



# REINVENTING DISCOVERY

---

The New Era of Networked Science



MICHAEL NIELSEN

発見の革新



再発明  
発見

---

ネットワーク科学の新時代

マイケル・ニールセン

PRINCETON UNIVERSITY PRESS  
PRINCETON AND OXFORD

著作権 © 2012 マイケル・ニールセン

この作品の複製許可の申請は、

許可、プリンストン大学出版局

発行元 :プリンストン大学出版局、41 William Street, Princeton, New Jersey 08540 英国 :プリンス  
トン大学出版局、6 Oxford Street,  
Woodstock, Oxfordshire OX20 1TW press.princeton.edu

無断転載を禁じます

米国議会図書館出版物目録データ

ニールセン、マイケル A.、1974-発見の

再発明 :ネットワーク化された科学の新時代 / マイケル・ニールセン。

p. cm.

参考文献と索引が含まれています。

ISBN 978-0-691-14890-8 (ハードカバー)

1. 研究 - 技術革新、科学。3. インターネット。

2. 発見

4. 情報ネットワーク。5. 情報技術。I. タイトル。

Q180.55.M4N54 2011 509-

dc23 2011020248

大英図書館の出版物目録データが利用可能

この本はミニオンで書かれています

酸フリー紙に印刷∞

SR Nova Pvt Ltd (インド、バンガロール)によるタイプセット  
アメリカ合衆国で印刷

10987654321

## コンテンツ

[1. 発見の改革](#)

### [パート1 集合知の増幅](#)

---

[2. オンラインツールは私たちが賢くする](#)

[3. 専門家の注目の再構築](#)

[4. オンラインコラボレーションのパターン](#)

[5. 集合知の限界と可能性](#)

### [パート2 ネットワーク化された科学](#)

---

[6. 世界のすべての知識](#)

[7. 科学の民主化](#)

[8. オープンな場で科学を行う難しさ](#)

[9. オープンサイエンスの必然性](#)

[付録: Polymathプロジェクトが解決した問題](#)

[謝辞](#)

参考文献と参考文献

---

注記

参考文献

索引

発見の革新

## 第1章

## 発見の改革

ティム・ガワーズは、典型的なブロガーではありません。ケンブリッジ大学の数学者であるガワーズは、数学界最高の栄誉であるフィールズ賞（数学のノーベル賞とも呼ばれる）の受賞者です。彼のブログは、数学的なアイデアと洞察に満ち溢れています。

2009年1月、ガワーズ氏は自身のブログを使って、非常に風変わりな社会実験を行うことを決意した。彼は重要かつ難解な未解決の数学問題を取り上げ、「ぜひとも解きたい」と語っていた。しかし、自分ひとりで、あるいは親しい同僚数人と取り組むのではなく、完全にオープンな形で問題に取り組むことを決意し、ブログにアイデアや進捗状況の一部を掲載した。さらに、彼は他の人々にも協力を呼びかけ、公開の招待状を出した。誰でもブログをフォローでき、アイデアがあればブログのコメント欄で説明できた。ガワーズ氏は、一人で考えるよりも多くの頭脳が力を発揮し、異なる専門知識や視点で刺激し合い、共同で難解な数学問題を容易に解決してくれることを期待した。彼はこの実験を「ポリマス・プロジェクト」と名付けた。

Polymath プロジェクトはゆっくりとしたスタートを切った。ガワーズが数学を議論するためのブログを開設してから7時間経っても、誰からもコメントがなかった。その後、ブリティッシュ コロンビア大学の数学者 Jozsef Solymosi が、ガワーズの問題のバリエーションを提案するコメントを投稿した。これはより簡単なバリエーションだが、Solymosi は元の問題を解明する手がかりになるかもしれないと考えた。15分後、アリゾナ州の高校教師 Jason Dyer が独自の考えを述べて賛同した。さらにそのわずか3分後、UCLA の数学者 Terence Tao (ガワーズと同じくフィールズ賞受賞者) がコメントを追加した。コメントは爆発的に増加し、その後37日間で27人が800件の数学的なコメントを投稿し、その総語数は17万語を超えた。コメントを読んでも、アイデアが提案され、洗練され、そして却下される過程が、驚くべき速さで繰り返されていることがわかる。一流の数学者たちが間違いを犯したり、間違っただ道を歩んだり、ごく些細なことに手を染めたり、執拗に追求したりするのを目にする。

解決策が提示される。そして、あらゆる失敗や誤った方向転換を乗り越えながら、徐々に洞察が芽生えていくのがわかる。ガワーズ氏はポリマスのプロセスを「通常の研究と比較すると、運転と車の押し合いのようなものだ」と表現した。プロジェクト開始からわずか37日後、ガワーズ氏は、ポリマスたちが当初の問題だけでなく、それを特殊なケースとして含むより難しい問題も解いたと確信していると発表した。彼はそれを「数学人生で最も刺激的な6週間の一つ」と表現した。さらに数ヶ月のクリーンアップ作業が残っていたが、数学の核心的な問題は解決された。(ガワーズ氏の問題の詳細を知りたい場合は、付録に記載されています。本書を読み進めたいだけなら、詳細は飛ばしても構いません。)

博学者たちは立ち止まっていません。ガワーズの最初のプロジェクト以来、12近くの Polymath プロジェクトや Polymath に類似したプロジェクトが立ち上げられ、中にはガワーズの最初の問題よりもさらに野心的な問題に取り組むものもありました。100人以上の数学者やその他の科学者が参加し、数学界における大規模な共同研究が広がり始めています。最初の Polymath プロジェクトのように、これらのプロジェクトのいくつかは大きな成功を収め、数学への理解を真に前進させました。一方で、限定的な成功にとどまり、(時には非常に野心的な)目標を達成できなかったものもあります。

いずれにせよ、大規模共同数学は難しい数学の問題に取り組む強力な新しい方法です。

なぜ大規模なオンラインコラボレーションは数学の問題解決に役立つのでしょうか？その答えの一つは、最高の数学者でさえ、互いに補完的な知識を持つ人々から多くのことを学び、自分だけでは考えつかなかったような方向へアイデアを検討するよう刺激されるからです。オンラインツールは、こうした共有空間、つまり短期的な集合的ワーキングメモリを作り出し、そこで多くの頭脳によってアイデアが急速に改良されるのです。これらのツールは創造的な会話のスケールアップを可能にし、通常は偶然のセレンディピティを必要とするようなつながりが、自然に生まれるようになります。これにより問題解決プロセスが加速され、人間の頭脳で解決できる問題の範囲が広がります。

ポリマス・プロジェクトは、オンラインツールが科学者の発見の方法をいかに変革しているかという、はるかに大きな物語のほんの一部に過ぎません。これらのツールは認知ツールであり、私たちの集合知を積極的に増幅させ、私たちをより賢くし、最も困難な科学的課題をより良く解決できるようにしてくれます。なぜこれが重要なのかを理解するには、17世紀、近代科学の黎明期、ガリレオによる衛星の観測といった偉大な発見の時代を思い起こしてみてください。

木星の発見、そしてニュートンによる万有引力の法則の定式化。ガリレオ、ニュートン、そして同時代の科学者たちの最大の遺産は、こうした一過性の画期的な発見ではありませんでした。それは科学的発見の方法そのものであり、自然の仕組みを理解する方法でした。17世紀初頭には、ごくわずかな科学的進歩を達成するだけでも並外れた天才が必要でした。初期の科学者たちは、科学的発見の方法を開発することで、17世紀末までにそのような科学的進歩が当たり前のものとなり、有能な科学的調査の成果として当然のものとなることを確実にしました。かつては天才を必要としていたことが日常的なものとなり、科学は爆発的に発展したのです。

発見の方法におけるこうした改善は、どんな発見よりも重要です。人間の知性を自然の新たな領域へと広げるのです。今日、オンラインツールは、発見の方法を改善する新たな機会を私たちに提供しています。これは、近代科学の黎明期以来見られなかった規模の機会です。科学のプロセス、つまり発見の方法は、過去300年間よりも今後20年間で大きく変化すると私は信じています。

ポリマス・プロジェクトは、この変化の一側面、つまり科学者が知識創造のために協力する方法の変化を示すものです。この変化の二つ目の側面は、科学者が知識に意味を見出す能力が劇的に向上したことです。例えば、ニュースでよく目にする「誰その遺伝子が、これこれの病気を引き起こす」という研究を考えてみましょう。こうした研究を可能にしているのが、過去20年間にわたって構築されてきた人間の遺伝子地図です。この地図の中で最もよく知られているのは、科学者たちが2003年に完成させたヒトゲノムです。あまり知られていませんが、おそらくより重要なのは、2007年に完成したハップマップ（ハプロタイプマップの略）です。これは、異なる人間が遺伝子コードにおいてどのように、どこで異なるのかを図表化したものです。これらの遺伝子変異は、私たちの病気に対する感受性の差を大きく左右します。そして、ハップマップは、これらの変異がどこで発生する可能性があるかを示します。つまり、これは一人の人間の遺伝子地図ではなく、人類全体の遺伝子地図なのです。

人種。

このヒト遺伝子地図は、世界中の多くの生物学者の共同作業によって誕生しました。彼らは研究室で新たな遺伝子データが得られるたびに、そのデータをGenBank（米国立生物工学情報センターが運営する遺伝子情報のオンラインリポジトリ）などの集中型オンラインサービスにアップロードしました。GenBankは、このすべての遺伝子情報を単一の、公開されたオンラインデータベースに統合し、数千人の生物学者の研究成果を集大成したものです。これは、ほぼ膨大な量の情報です。

手作業で解析するのは不可能です。幸いなことに、世界中の誰もが遺伝子地図を自由にダウンロードし、コンピュータアルゴリズムを使って解析することで、これまで考えられなかったヒトゲノムに関する事実を発見できるかもしれません。お望みであれば、今すぐGenBankのサイトにアクセスして、遺伝情報を閲覧し始めることができます。

(GenBankやその他のリソースへのリンクについては、347ページからの「情報源に関する注記」を参照してください。)実際、遺伝子と疾患を関連付ける研究を可能にしているのはこのためです。研究を行う科学者は、まず、疾患を持つ大規模な集団と、疾患を持たない対照群を見つけます。そして、ヒト遺伝子地図を用いて、疾患の発生率と2つの集団の遺伝的差異との相関関係を見つけます。

科学のあらゆる分野で、同様の発見のパターンが用いられています。様々な分野の科学者がオンラインで協力し、宇宙の構造、世界の気候、世界の海洋、人間の言語、さらにはすべての生命種までを網羅した巨大なデータベースを作成しています。数百、数千の科学者の研究成果を統合することで、私たちは共同で世界全体の地図を作成しています。これらの統合された地図があれば、誰もがコンピュータアルゴリズムを使用して、これまで想像もできなかったつながりを発見できます。本書の後半では、インフルエンザの発生を追跡する新しい方法から、軌道を回る超大質量ブラックホールのペアの発見に至るまで、さまざまな例を紹介します。私たちは、世界中の知識を少しずつ集め、単一の巨大な建造物へと組み立てています。その建造物はあまりにも巨大で、一人で作業している個人では理解できません。しかし、新しいコンピューターツールは、そのすべての知識に隠された意味を見つけるのに役立ちます。

Polymathプロジェクトが科学者の知識創造における協働方法の変化を示し、GenBankと遺伝子研究が科学者が知識に意味を見出す方法の変化を示しているとしたら、3つ目の大きな変化は科学と社会の関係性の変化です。この変化の一例が、天文学者による銀河画像の分類を支援するために20万人以上のオンラインボランティアを募集しているウェブサイト「Galaxy Zoo」です。

ボランティアたちは銀河の写真を見せられ、「これは渦巻き銀河ですか、それとも楕円銀河ですか?」「渦巻き銀河の場合、腕は時計回りですか、反時計回りですか?」といった質問に答えます。これらの写真はロボット望遠鏡によって自動的に撮影されたもので、これまで人間の目で見ただけのものではないのです。Galaxy Zooは、史上最大規模の宇宙の国勢調査、つまり1億5000万以上の銀河の分類を生み出した国勢調査と考えることができます。

ギャラクシー・ズーに参加するボランティア天文学者たちは、驚くべき発見を次々と発表しています。例えば、彼らは最近、全く新しい種類の銀河「グリーンピース銀河」を発見しました。これは、実際に小さなグリーンピースのように見えることから名付けられました。この銀河では、宇宙の他のほとんどの場所よりも速い速度で星が形成されています。また、クエーサーミラーの史上初と思われる例も発見されました。クエーサーミラーとは、直径数万光年にも及ぶ巨大なガス雲で、近くのクエーサーからの光によってガスが加熱され、明るく輝いています。わずか3年間で、ギャラクシー・ズーのボランティアたちの活動は22本の科学論文に結実し、さらに多くの論文が執筆中です。

Galaxy Zooは、科学研究の問題解決を支援するために、科学的な訓練を受けていないボランティアを募集している、数多くのオンライン市民科学プロジェクトの一つに過ぎません。コンピューターゲームを使ってタンパク質分子の形状を予測するボランティアから、恐竜の進化の解明に取り組むボランティアまで、科学のあらゆる分野における事例を紹介します。これらは真剣な科学プロジェクトであり、科学的な訓練をほとんど受けていない大規模なボランティアグループが、専門家の少人数グループでは解決できない科学的課題に取り組むことができるプロジェクトです。

Galaxy Zooのようなプロジェクトは、プロのチームだけでは到底不可能です。たとえフルタイムで働いていたとしても、数十万（あるいはそれ以上）もの銀河を分類する時間はありません。銀河の画像を分類するのにコンピューターを使うだろうと思われるかもしれませんが、実際には、人間のボランティアが最高のコンピュータープログラムよりも正確に銀河を分類しています。つまり、Galaxy Zooのようなプロジェクトに携わるボランティアたちは、科学的課題の解決可能性の限界を広げ、それによって、誰が科学者になれるのか、そして科学者であることの意味を変えているのです。プロ科学者とアマチュア科学者の境界線はどこまで曖昧になるのでしょうか？いつか、アマチュアが中心となった大規模な共同研究によってノーベル賞が授与される日が来るのでしょうか？

市民科学は、科学と社会の関係における大きな変化の一部です。Galaxy Zooや同様のプロジェクトは、科学コミュニティと社会全体を新たな方法で結びつけている機関の例です。オンラインツールは、科学の成果に一般市民が直接アクセスできるオープンアクセス出版や、よりオープンで透明性の高い科学コミュニティの形成に貢献する科学ブログなど、多くの新たな橋渡し機関の活動を可能にしています。

科学と社会全体の間には橋を架けるために、他にどのような新しい方法があるのでしょうか？そして、こうした新たな橋渡し機関は、長期的にどのような影響を与えるのでしょうか？

ここまでの話は、可能性と世界を変える新しいツールについての楽観的な物語でした。しかし、この物語には問題があります。科学者がオンラインツールを最大限に活用するのを妨げる大きな障害がいくつかあるのです。その障害を理解するために、先ほど議論した遺伝子と疾患を関連付ける研究を考えてみましょう。この物語には、私が簡単に触れましたが、実は非常に不可解な重要な部分があります。それは、そもそもなぜ生物学者は遺伝子データをGenBankで共有するのでしょうか？よく考えてみると、これは奇妙な選択です。プロの生物学者であれば、データをできるだけ秘密にしておくことが有利になるからです。

論文を発表したり、特許を取得したりする機会を得る前に、なぜデータをオンラインで共有する必要があるのでしょうか？科学の世界では、論文、そして分野によっては特許が、仕事や昇進といった形で報われるのです。データを公開することは、通常、キャリアに何のメリットもありません。むしろ、科学界の競合相手を助けてしまい、キャリアに悪影響を与える可能性さえあります。

これらの理由もあって、GenBankは1982年の立ち上げ後、ゆっくりと成長していきました。多くの生物学者はGenBank内の他者のデータにアクセスすることには満足していましたが、自分自身のデータを提供することにはほとんど関心がありませんでした。しかし、それは時とともに変化しました。変化の理由の1つは、1996年にバミューダで開催された歴史的な会議でした。この会議には、政府が後援したヒトゲノム計画のリーダー数名を含む、世界の一流生物学者が多数出席しました。また、後にヒトゲノムの配列を決定する民間の取り組みを主導することになるクレイグ・ベンターも出席していました。多くの参加者は、出版前にすべての遺伝子データを共有するという最初の一步を一方向的に踏み出すことを望んでいませんでしたが、データのオープンな共有が一般的な慣行になれば、科学全体が莫大な利益を得るだろうことは誰もが理解していました。そこで彼らは数日間座ってこの問題について話し合い、最終的に、すべてのヒト遺伝子データはオンラインで即座に共有されるべきであるという、現在バミューダ協定として知られる共同合意に達しました。この合意は単なる空虚なレトリックではありませんでした。

会議に出席した生物学者たちは十分な影響力を持っており、複数の主要な科学研究助成機関を説得して、ヒトゲノム研究の必須要件として即時データ共有を義務付けました。データ共有を拒否した科学者は、研究のための助成金を受け取れませんでした。これが状況を一変させ、ヒト遺伝子データの即時共有が標準となりました。バミューダ協定は最終的に政府の最高レベルにまで浸透し、2000年3月14日、ビル・クリントン米大統領とトニー・ブレア英首相は共同声明を発表し、バミューダ協定に記された原則を称賛し、すべての国の科学者に同様の原則を採用するよう促しました。これは、

バミューダ協定およびそれに続く同様の協定により、ヒトゲノムとマップは公開されるようになりました。

これは喜ばしい話ですが、残念な結末を迎えています。バミューダ協定は当初、ヒトの遺伝子データだけに適用されていました。その後、協定の精神を拡張し、より多くの遺伝子データを共有しようとする試みが数多く行われてきました。しかし、こうした試みにもかかわらず、遺伝子データが秘密のまま残されている生命体は依然として数多く存在します。例えば、2010年現在、インフルエンザウイルスに関するデータを共有するための世界的な合意は存在しません。そのような合意に向けた動きは、主要国間の論争によって停滞しています。多くの科学者がヒト以外の遺伝子データの共有についてどのように考えているかを示す例として、ある科学者が最近私に語ったところによると、彼は1年以上もの間、ある種 (!) のゲノムを「手元に置いていた」そうです。共有する動機がなく、共有しない理由もたくさんあるため、科学者はデータを独り占めしています。その結果、ほぼすべての遺伝子データがオンラインで公開されているヒトなどの生命体と、重要なデータが封印されたままのインフルエンザなどの生命体との間に、データの格差が生じています。

この話を聞くと、関係する科学者たちが貪欲で破壊的であるかのように思えます。結局のところ、こうした研究は通常、公的資金によって賄われているのです。科学者は研究結果をできるだけ早く公開すべきではないでしょうか？確かにその通りですが、状況は複雑です。何が起きているのかを理解するには、野心的な若手科学者たちが直面する途方もない競争のプレッシャーを理解する必要があります。稀に主要大学で長期の好条件の仕事が空いた場合、優秀な応募者が何百人もいることがしばしばあります。仕事の競争は非常に激しく、若手科学者の間では週80時間以上働くのが当たり前です。その時間を、そのような仕事を得るための唯一の手段、つまり素晴らしい科学論文の執筆に費やします。これらの論文は、長期雇用に必要な研究助成金や推薦状をもたらすでしょう。終身在職権が与えられるとペースは落ち着きますが、継続的な助成金の支援には依然として強い労働倫理が求められます。その結果、多くの科学者は原則的には論文発表前にデータを共有したいと考えているものの、そうすることで競合相手に不当な優位性を与えてしまうのではないかと懸念しています。競合相手は、その情報を利用して自分の研究結果を先に発表したり、さらに悪いことに、データを完全に盗用して自分の研究結果であるかのように発表したりする可能性があります。データ共有は、バミューダ協定のような団体交渉協定によって全員が保護されている場合にのみ現実的です。

同様の傾向として、科学者は他の多くのオンラインプロジェクトへの貢献を躊躇しています。オンライン百科事典のWikipediaを考えてみましょう。

には、科学者の心を温めるようなビジョンステートメントがあります。「すべての人間がすべての知識の総和を自由に共有できる世界を想像してください。それが私たちのコミットメントです。」ウィキペディアは世界中の知識を共有したいと熱望する科学者によって始められたと思うかもしれませんが、それは間違いです。実際には、当時主にアダルトコンテンツに特化したオンライン企業の共同設立者であったジミー「ジンボ」ウェールズと、オンライン百科事典でウェールズと協力するために学界を離れた哲学者のラリー・サンガーによって始められました。ウィキペディアの初期の頃は、科学者の関与はほとんどありませんでした。これは、世界中の誰でもウィキペディアを編集できるという事実、そして実際にはウィキペディアが完全にユーザーによって書かれているという事実にもかかわらずでした。そこで、誰でも参加でき、急速に軌道に乗り、中核的な科学的価値を表現する、信じられないほどエキサイティングなプロジェクトがあります。なぜ科学者は参加しようとしなかったのでしょうか。問題は遺伝子データの場合と同じです。科学者は、論文執筆など、同僚の間でもっと尊敬される活動ができるのに、なぜWikipediaへの投稿に時間を費やすのでしょうか？論文執筆は仕事、助成金、昇進につながる活動です。Wikipediaへの投稿の方が本質的に価値があるかもしれないとしても、それは問題ではありません。初期の頃、Wikipediaでの作業は科学者から軽薄で時間の無駄であり、真剣な科学ではないと見なされていました。幸いなことに、これは長年の間に変わり、今日ではWikipediaの成功によって、科学者によるWikipediaでの研究がある程度正当化されています。しかし、現代のアレクサンドリア図書館が学術界の外部から生まれたというのは奇妙ではありませんか？

ここに一つの謎があります。科学者たちはインターネットとワールド・ワイド・ウェブの創造に貢献しました。彼らは電子メールなどのオンラインツールを熱心に活用し、Polymath ProjectやGalaxy Zooといった画期的なプロジェクトを先駆的に立ち上げました。なぜ彼らはGenBankやWikipediaといったツールを渋々しか採用しなかったのでしょうか？その理由は、Polymath Project、Galaxy Zoo、そして類似のプロジェクトは、その急進的な外観にもかかわらず、根底に内在する保守性を持っているからです。つまり、これらは究極的には、科学論文を書くという従来目標に奉仕するプロジェクトなのです。この保守性こそが、ブログなどの型破りな手段を用いて従来目的（科学論文の執筆）をより効果的に達成しようとする寄稿者を引き付けるのに役立ちます。しかし、GenBank、Wikipedia、そして他の多くのツールのように、目標が単に科学論文を作成することではない場合は、科学者が貢献する直接的な動機がありません。そして、これは問題です。なぜなら、科学者の働き方を改善するための優れたアイデアの中には、科学研究の究極目標である科学論文からの脱却を伴うものもあるからです。GenBankやWikipediaをはるかに凌駕するチャンスが失われている。

潜在的な影響。本書では、科学の歴史と文化を深く掘り下げ、科学者が科学の進歩を加速させるような方法でアイデアやデータを共有することにしばしば消極的になるという状況がどのようにして生じたのかを検証します。朗報なのは、今日の小さな変化が、科学者がオンラインツールを最大限に活用し、科学的発見の能力を大幅に高める未来につながる、てこ入れポイントを見つけることです。

革命は時に、フランス革命におけるバスティーユ襲撃やアメリカ独立宣言の調印のように、一つの華々しい出来事によって特徴づけられる。しかし、最も重要な革命は多くの場合、トランペットの鳴り響く音とともに告げられるわけではない。静かに、ニュースになるにはあまりにもゆっくりと起こるが、注意深く見守っていないければ、革命が起こっていることに気づく前に終わってしまうほどの速さで起こる。本書で描かれる変化はまさにこれだ。それは一つの出来事でもなく、急速に起こる変化でもない。何年も静かに勢いを増してきたゆっくりとした革命なのだ。実際、多くの科学者がこの変化を見逃したり過小評価したりしている。彼らは自分の専門分野に集中するあまり、新しいオンラインツールが及ぼす影響がいかに広範囲に及ぶかを理解していないのだ。彼らはまるで、波が打ち寄せて引くのを見ることに夢中になりすぎて、満潮を見逃しているビーチのサーファーのようだ。しかし、科学の進め方における現在の変化がゆっくりと静かに進んでいるからといって、惑わされてはいけません。私たちは今、知識の構築方法における大きな変化の真っ只中にいるのです。17世紀、近代科学の黎明期に生きていたと想像してみてください。当時生きていたほとんどの人は、そこで起こっていた大きな変革、つまり知識の獲得方法における変革について、全く知りませんでした。たとえ科学者でなかったとしても、世界を理解する方法における驚くべき変革に、少なくとも気づいてほしかったのではないのでしょうか。今日も、これと同等の規模の変化が起こっています。私たちは発見を改革しているのです。

本書を執筆したのは、発見の再発見こそが、現代における大きな変化の一つだと信じているからです。100年後の歴史家は、科学には二つの時代があると認識するでしょう。ネットワーク以前の科学と、ネットワーク化された科学です。私たちは今、第二の科学時代への移行期に生きています。しかし、それは困難な移行であり、失敗したり、本来の潜在能力を十分に発揮できなかったりする可能性があります。だからこそ、本書を執筆したのは、今まさに目の前にある機会について、広く一般の人々に理解してもらうためでもあります。科学へのよりオープンなアプローチは、単なる良いアイデアではなく、科学者や科学機関に求められなければならないという理解です。

この変化は重要です。科学の実施方法を改善することは、あらゆる科学的発見のスピードを加速させることを意味します。がんの治療、気候変動問題の解決、人類の恒久的な宇宙飛行といった分野の加速を意味します。人間の特性、宇宙の仕組み、そしてその構成に関する根本的な洞察を意味します。私たちがまだ夢にも思わなかった発見を意味します。今後数年間、私たちは科学の実施方法を変え、改善する素晴らしい機会に恵まれています。本書は、この変化の物語であり、それが私たちにとって何を意味するのか、そしてそれを実現するために私たちが何をすべきかを描いています。

## パート1

---

### 集合知の増幅

## 第2章

## オンラインツールは私たちを賢くする

1999年、世界チェスチャンピオンのガルリ・カスパロフが「世界」とチェスの対局を行いました。マイクロソフトが主催したこのイベントでは、世界中の誰もがゲームのウェブサイトアクセスし、次に取るべき手を投票できるというアイデアが採用されました。ある特定の手には5,000人以上が投票し、ゲーム全体では75カ国から50,000人が投票しました。世界チームは24時間ごとに新たな手を決定し、どのターンでも最も多くの票を獲得した手が採用されました。この対局は「カスパロフ対世界」と銘打たれました。

この対局はあらゆる予想を上回りました。革新的なチェスが繰り広げられた62手の間、ゲームのバランスは幾度となく変化し、ワールドチームはついに投了しました。カスパロフはこの対局を「チェス史上最高の対局」と呼び、対局中は勝敗が分からなかったと明かしました。そして、51手目でようやく均衡が決定的に彼に有利に傾いたのです。対局後、カスパロフはこの対局に関する本を執筆し、その中で、世界選手権を含め、これまでのキャリアの中でこの対局に最も多くのエネルギーを費やしたと述べています。

世界チームには強豪プレイヤーからの意見もいくつかありましたが、カスパロフ自身ほど強いプレイヤーはおらず、プレイヤーの平均的な実力はカスパロフをはるかに下回っていました。しかし、世界チームは全体として、参加したどのプレイヤーが通常プレイするよりもずっと強いゲームを展開しました。まさに、チェス史上最強のゲームの一つと言えるでしょう。彼らはカスパロフの最高のプレイを見せただけでなく、戦略と戦術に関する討議の多くは公開の場で行われました。カスパロフはこの優位性を大いに活用しました。ガルリ・カスパロフと対戦するだけでなく、自分の指し手の背後にある考え方を彼に説明しなければならないことを想像してみてください！

一体どうやってこんなことが可能だったのか？何千人ものチェスプレイヤー（ほとんどがアマチュア）が、全盛期のカスパロフとチェスの対局で競い合うことができたのだろうか？世界チームには、初心者からグランドマスターまで、あらゆるレベルのチェスの実力者が参加していました。専門家が明らかに間違いと見なした手が、投票の10%を獲得することもありました。

多くの初心者が参加していたのです。ある手では、投票者の2.4%が、単に悪いだけでなく、チェスのルールに違反する手を選んでいました。

ワールドチームは、いくつかの方法でプレイを調整しました。マイクロソフトは、人々がゲームについて議論できるゲームフォーラムを設定し、ワールドチームに4人の公式アドバイザーを任命しました。彼らは、カスパロフと同年代ではないものの、世界でもトップクラスの優秀な10代のチェスプレイヤーでした。アドバイザーは、各手でマイクロソフトのWebサイトに推奨事項を公開し、必要に応じて推奨事項を説明する解説も追加しました。これは、ワールドチームの投票締め切りよりかなり前に行われたため、推奨事項が投票に影響を与える可能性がありました。ゲームが進むにつれて、他の数人の強力なチェスプレイヤーもアドバイスを提供しました。常に考慮されたわけではありませんが、特に影響力があったのは、数人のグランドマスターを擁するロシアのチェスクラブ、GMスクールでした。

アドバイザーや他の強豪選手のほとんどは、ゲームフォーラムでの議論を無視し、ワールドチームを構成する大多数の人々と関わろうとせず、ワールドチームの動きを決定づける投票者たちから距離を置いていました。しかし、アドバイザーの一人はワールドチームと積極的に交流していました。それは、イリーナ・クラッシュという名の、並外れた若きチェスプレイヤーでした。15歳のクラッシュは、最近アメリカ女子チェスチャンピオンになったばかりでした。ワールドチームの他の二人のアドバイザーほど高く評価されていませんでしたが、クラッシュは間違いなくジュニアチェスプレイヤーの国際的なエリート層に属していました。

熟練した同世代のプレイヤーとは異なり、クラッシュはワールドチームのゲームフォーラムに多大な時間と労力を費やしました。非難や侮辱をものともせず、彼女はフォーラムから優れたアイデアや分析を数多く引き出し、推奨する手筋の背景にある考え方を詳細に解説する記事を書き、徐々に、アドバイスを提供するグランドマスターを含む、有能なチェスプレイヤーのネットワークを築き上げていきました。

同時に、クラッシュと彼女のマネジメントチームであるSmart Chess社は、このゲームの分析ツリーを一般公開しました。このツリーには、可能な手と反撃、そして様々なプレイラインに対する賛否両論がまとめられていました。これらの議論は、クラッシュ自身の分析だけでなく、ゲームフォーラムやGMスクールを含む他のプレイヤーとのやり取りからも集められました。この分析ツリーは、ワールドチームの取り組みを調整し、作業の重複を防ぎ、議論や投票の際にワールドチームの参考資料として役立ちました。

試合が進むにつれて、ワールドチームにおけるKrushの役割が極めて重要になっていった。その理由の一つは、彼女のプレイの質の高さでした。10手目、クルシュはカスパロフが「素晴らしい手、チェスへの重要な貢献」と評した一手を示唆しました。この一手はチェスの展開を大きく変え、未知の領域へと導いたのです。この一手によって、彼女は世界チームにおける地位を高め、調整役を担うことができました。10手目から50手目までは、世界チームはクルシュの推奨する一手を常に指しました。たとえそれが世界チームの他の3人のアドバイザーや、GMスクールのような影響力のある解説者の推奨と異なっていたとしてもです。

その結果、カスパロフが通常であれば簡単にKrushに勝っていたにもかかわらず、この対局は実際にはカスパロフ対Krushだったという意見もある。カスパロフ自身は、実際にはKrushのマネジメントチームであるSmart Chessと対戦していたと思っていたと述べている。Krushはどちらの見解も否定している。対局後に執筆した一連のエッセイの中で、彼女は自分が推奨する手筋の背後にある考え方や、ゲームフォーラムの匿名投稿者からグランドマスターまで、様々な情報源からアイデアを得た経緯を説明している。彼女は、他者の優れた分析に納得し、自身のアイデアを変更したり、場合によっては放棄したりした経緯を繰り返し説明している。つまり、Krushは単独でプレイしていたわけでも、小規模なチームの一員としてプレイしていたわけでもなく、むしろワールドチーム全体の調整役として中心にいたのだ。そのため、ワールドチームのメンバーから出されたすべての提案を最もよく理解していたのは彼女だった。他のより強いプレイヤーたちは、異なる視点を十分に理解していなかったため、次にどの手を打つべきかについて適切な判断を下すことができず、また、ワールドチームにおいてKrushほど投票に影響を与える立場にもありませんでした。Krushの調整役は、このようにして、すべての参加者の優れたアイデアを一貫した全体へとまとめ上げました。その結果、ワールドチームはチーム内のどのプレイヤーよりもはるかに強力になり、全盛期のカスパロフを除けば、歴史上どのプレイヤーよりも強力になったと言えるでしょう。

カスパロフ対世界は、チェスのグランドマスターと世界が対戦した最初のゲームではありません。3年前の1996年には、元世界チェスチャンピオンのアナトリー・カルポフも同様のゲームを行っていました。

「Karpov Against the World」は、異なるオンラインシステムを用いて指し手を決め、ゲームフォーラムや公式のゲームアドバイザーは存在せず、ワールドチームのメンバーはわずか10分で自分の指し手を投票することができました。行動を調整する手段がなかったため、ワールドチームは低調なプレイを見せ、カルポフはわずか32手で彼らを圧倒しました。おそらくカルポフの成功に影響を受けたのか、カスパロフは対局前に「自分はそれほど強い意志を持っていなかった」と認めています。

「特に難しいことは予想していなかった」と言い、「40手以内で終わらせられる」と自信満々だった。どれほど驚いたことだろう。

## 集合知の増幅

カスパロフ対世界やポリマス・プロジェクトといった例は、グループがオンラインツールを活用して集団としてより賢くなることを示しています。つまり、これらのツールは、何千年もの間、手作業の道具が私たちの体力を高めるために使われてきたのと同じように、私たちの集団知性を高めるために活用できるのです。これらの新しいツールはどのようにしてこの驚くべき偉業を成し遂げるのでしょうか？単なる偶然でしょうか？それとも、オンラインツールはより一般的に活用され、最も賢い個人の創意工夫さえも打ち負かすような創造的な問題を解決できるのでしょうか？集団知性を高めるために活用できる一般的な設計原則、つまりコラボレーションのデザイン科学のようなものは存在するのでしょうか？

これらの疑問に対する一般的なアプローチは、オンラインツールがある種の集合的脳を可能にし、グループ内の人々がニューロンの役割を果たすというものです。そして、これらの人間のニューロン間のつながりから、より高度な知性が何らかの形で出現するのです。この比喩は刺激的ですが、多くの問題を抱えています。脳の起源とハードウェアはインターネットのものとは全く異なり、脳が集合的知性の仕組み、あるいはそれを最も効果的に増幅する方法の正確なモデルであると仮定する説得力のある根拠はありません。

私たちの集合的な脳が何をしているにせよ、それは頭の中の脳とは全く異なる原理に従って機能しているように思われます。さらに、人間の脳の仕組みはまだ十分に理解されていないため、この比喩はせいぜい限られた用途しか持ちません。集合知を高める方法を理解しようとするなら、集合的な脳という比喩の先を見据える必要があります。

集合知については、多くの書籍や雑誌記事が執筆されています。この研究で最もよく知られているのは、ジェームズ・スロウィツキの2004年の著書『群衆の知恵』でしょう。この本では、大規模な集団が問題解決において驚くほど優れた成果を上げることがある理由を解説しています。スロウィツキは本書の冒頭で、科学者フランシス・ゴルトンに関する印象的なエピソードを取り上げています。1906年、ゴルトンはイギリスの大学に通っていました。

田舎のフェアが開催され、フェアの目玉の一つに体重判定コンテストがあり、参加者は牛の体重を推測して競い合いました。ゴルトンは参加者のほとんどが推定値を大きく外すだろうと予想していましたが、参加者全員の推測値の平均（1,197ポンド）が、正解の1,198ポンドからわずか1ポンド足りないことを知って驚きました。つまり、推測値を平均すると、フェアの参加者はほぼ完璧に体重を推測できたということです。スロウィエツキの著書は、私たちが集合知を組み合わせることで驚くほど効果的な方法をさらに数多く論じています。

本書は、『群衆の叡智』や類似の著作を二つの点で凌駕しています。第一に、オンラインツールがどのように集合知を積極的に増幅させることができるかを理解することを目指しています。つまり、私たちは集合知そのものに関心があるのではなく、集合知を劇的に高めるツールをどのように設計するかに関心があります。第二に、牛の体重を推定するような日常的な問題だけを議論しているではありません。

むしろ、私たちは人間の問題解決能力の限界にある問題、例えばチェスの最高峰ガルリ・カスパロフと競い合うような問題、あるいは世界最高の数学者をも挑む数学の問題を克服するような問題に焦点を当てています。私たちの主な関心は科学的な問題解決にあり、もちろん、科学者が最も解決を望み、その解決が最大の利益をもたらすのは、人間の問題解決能力の限界にある問題なのです。

表面的には、オンラインツールが私たちが全体的に賢くするという考えは、現在一部の限界で流行している、インターネットが私たちの知能を低下させているという考えと矛盾している。たとえば、2010年に作家のNicholas Carr氏は「The Shallows: What the Internet Is Doing to Our Brains」と題する本を出版し、インターネットが私たちの集中力や熟考力を低下させていると主張している。Carr氏の本やその他の同様の著作は多くの優れた点を指摘しており、広く議論されている。しかし、新しいテクノロジーが単一の影響だけをもたらすことはめったになく、オンラインツールが知能を高めることも低下させることもできると信じることには何の矛盾もない。ハンマーを使って家を建てることもできるが、ハンマーを使って親指を折ることもできる。特に複雑なテクノロジーは、使いこなすのにかなりのスキルが必要になることが多い。自動車は素晴らしいツールだが、初心者ドライバーが道路を恐怖に陥れる可能性があることは周知の事実である。インターネットを見て、その主な影響は私たちが愚かにすることだと結論付けるのは、自動車を見て、それが運転教習生が怯えた歩行者を轢くための道具だと結論付けるようなものです。オンラインでは、私たちは皆、運転教習生であり、オンラインツールが不適切に使用され、個人的および集団的な愚かさを増幅させることは驚くべきことではありません。しかし、すでに述べたように

ご覧のとおり、オンラインツールが集合知を高めるために活用できることを示す例もあります。したがって、私たちの関心は、これらのツールがどのように私たちを集合的に賢くするために活用されるのか、そしてその変化が何を意味するのかを理解することにあります。

集合知をどのように増幅させるかという理解は、まだ初期段階にあります。ブログ、ウィキ、オンラインフォーラムといった、私たちが利用できる優れたツールの多くは、集団行動や知能の専門家、つまり集団心理学、社会学、経済学といった分野の専門家によって発明されたわけではないという事実は、示唆に富んでいます。むしろ、それらはアマチュアによって発明されたのです。例えば、19歳の学生だったマット・マレンウェッグは、最も人気のあるブログソフトウェアの一つである Wordpress を開発しました。また、21歳の学生だったリーナス・トーバルズも、オープンソースの Linux オペレーティングシステムを開発しました。これは、現在の理論には注意すべきことを示しています。既存の学術研究から多くのことを学ぶことができる一方で、そこから浮かび上がる集合知の姿もまた不完全です。そのため、Polymath Project や Kasparov versus the World といった具体的な例を用いて議論を進めていきます。この本の **パート 1** では、これらの具体的な例を使用して、オンライン ツールが集合知をどのように増幅できるかを説明する一連の原則を抽出します。

---

**パート1**では、意図的に比較的少数の例に焦点を絞って議論を展開しました。これは、集合知を理解するための概念的枠組みを構築する中で、これらの例を何度も繰り返し検討し、より深く理解していくことを目的としています。さらに、これらの例は科学分野だけでなく、チェスやコンピュータプログラミングといった分野からも引用されています。

その理由は、集合知の増幅に関する最も顕著な例のいくつか（カスパロフ対世界戦など）は科学の外部からもたらされており、それらを研究することで多くのことを学ぶことができるからです。

理解が深まるにつれ、科学的問題は集合知によるアプローチに特に適していることがわかります。**パート 2**では、集合知が科学をどう変えているのかに焦点を絞ります。

---

## 第3章

## 再構築専門家の注目

2003年、アリゾナ州ツーソン出身のニタ・ウマシャンカールという若い女性が1年間インドに滞在し、性労働者が性産業から脱却できるよう支援する非営利団体で活動しました。しかし、インドで目にした現実には彼女を苛立たせました。多くの性労働者はスキルが乏しく、売春以外の仕事を見つけるのはほとんど不可能だったのです。アメリカに戻ったウマシャンカールは、問題解決の糸口を見つけるため、問題を抱えるインドの少女たちにテクノロジー分野の研修を行い、テクノロジー企業への就職を支援する非営利団体を設立することを決意しました。

8年後、彼女が設立した非営利団体「ASSET India」は、インドの5都市にテクノロジー研修センターを開設しました。彼らは数百人の若者が性売買から逃れる手助けをしており、さらに拡大を計画しています。しかし残念なことに、彼らが進出を希望する小さな町の多くは、インターネット接続に必要な無線ルーターなどの重要なテクノロジーに必要な電力を安定的に供給できていません。

ASSETは太陽光発電の無線ルーターの使用を実験したが、すでに市場に出回っているデバイスはトレーニングセンターの営業時間が長い間は安定して動作しないことが判明した。

ASSETは無線ルーターの問題を解決するため、型破りな方法を試しました。それは、科学的な問題を扱うオンラインマーケットプレイス「InnoCentive」を利用して助けを求めるといったものです。InnoCentiveはeBayやCraigslistのようなサイトで、科学的な問題を対象としています。参加団体は、解決を希望する科学的な問題を「チャレンジ」としてオンラインに投稿し、解決すれば賞金（多くの場合、数万ドル）を獲得できるという仕組みです。

世界中の誰でも、チャレンジの詳細な説明をダウンロードして、問題の解決に挑戦し、賞品を獲得することができます。

ASSETは、ロックフェラー財団から提供された2万ドルの賞金を使い、低コストで入手しやすいハードウェアとソフトウェアを用いて、信頼性の高い太陽光発電式無線ルーターを設計するInnoCentiveチャレンジを募集しました。このチャレンジはInnoCentiveに掲載されてから2ヶ月で400回ダウンロードされ、27件の応募がありました。

2万ドルの賞金は、ザカリー・ブラウンという名の31歳のテキサス州出身のソフトウェアエンジニアに授与され、アリゾナ大学の工学部の学生らがプロトタイプを製作している。

ザカリー・ブラウンは、ただのソフトウェアエンジニアではありませんでした。熱心なアマチュア無線技師として、世界中の国々と無線通信を行うという目標に向かって努力を重ねていました。幼少期、ジミー・カーター元大統領がホワイトハウスに設置したソーラーパネルが太陽光で発電する仕組みを両親から聞き、強い関心を抱きました。そして大人になってからは、ソーラーパネルを使って無線機器の電源を調達する実験を始めました。そして将来的には、自宅のオフィス全体を太陽光発電で賄うことを夢見ていました。つまり、ザカリー・ブラウンはASSETにとってまさに最適な人物だったのです。InnoCentiveは、まさにその繋がりを築く手段を提供したのです。

InnoCentiveの根底にあるのは、世界には未開拓の科学的発見の巨大な潜在力があり、適切な人材を結びつけることでその潜在力を引き出すことができるという前提です。この前提は確固たるものとなり、175カ国から16万人以上がInnoCentiveに登録し、200以上のチャレンジで賞金が授与されています。チャレンジは科学技術分野の様々な分野にわたります。

例えば、結核治療薬のより費用対効果の高い製造方法の発見、マラリア対策のための太陽光発電式蚊よけ（これは作り話ではありません！）の設計、運動ニューロン疾患の発症リスクのある人をより適切に特定する方法の発見などが挙げられます。成功したソルバーの多くは、ザカリー・ブラウン氏のように、自分が解決したチャレンジが自分のスキルと関心に非常に合致していると報告しています。さらに、ASSETのストーリーのように、通常は偶然出会うはずのなかった人々の間につながりが生まれます。InnoCentiveは、このようなつながりを、一度きりの幸運な出会いではなく、体系的に、大規模に構築しています。

InnoCentiveが築いたつながりが非常に貴重な理由は、言うまでもなく、課題を提起する人々と課題を解決する人々のスキルに大きな差があるからです。太陽光発電式無線ルーターの設計は、ザカリー・ブラウンのような専門家なら数日で完了しますが、ASSET Indiaのスタッフにとっては数ヶ月、あるいは数年かかるでしょう。

彼らには適切な専門知識がないだけです。ザカリー・ブラウン氏には圧倒的な比較優位があるため、彼とASSET社は相互利益のために協力できるのです。より一般的に言えば、適切な専門家による適切なタイミングでの注意は、創造的な問題解決において最も貴重なリソースとなることがよくあります。専門家の注意は、砂漠の生命にとっての水のようなものであり、根本的な希少資源です。InnoCentiveは専門家の注意を再構築することで価値を生み出します。

Zacary Brown のような人々は、専門知識を非常に効果的な方法で活用できます。InnoCentive は、Zacary Brown が自宅で趣味に取り組むのではなく、専門知識を ASSET の問題に集中できるように支援しました。

本章では、オンラインツールが集合知を増幅させる鍵となるのが、専門家の注意を再構築するこの能力であることを見ていきます。InnoCentive、Polymath Project、Kasparov versus the World といった事例に共通するのは、適切な専門家の注意を適切な問題に適切なタイミングで向ける能力です。本章の前半では、これらの事例をより詳細に考察し、専門家の注意がどのように再構築されるかを説明する広範な概念的枠組みを構築します。後半では、この枠組みを適用し、オンラインコラボレーションがオフラインコラボレーションとは本質的に異なる方法でどのように連携できるかを理解していきます。

## 潜在的なマイクロ専門知識の活用

ASSET 対 InnoCentive のストーリーは印象的ですが、カスパロフ対世界は集合知のさらに印象的な例です。ASSET 対 InnoCentive のストーリーと同様に、カスパロフ対世界は専門家の注意力の再構築に依存していました。これがどのように機能したかを理解するために、イリーナ・クルシュが示唆したゲームメイキングの10手目に戻りましょう。カスパロフはこの手を「素晴らしい手であり、チェスへの重要な貢献」と称賛しました。クルシュの提案は何も考えずに思いついたわけではありません。彼女はカスパロフ対世界が始まる1ヶ月前、フィラデルフィアで開催されたワールドオープンチェストーナメントの研究会中に、10手目のアイデアを思いつきました。当時、彼女は簡単な分析を行い、トレーナーであるグランドマスターのギオルギ・カチェイシュヴィリとロン・ヘンリーに相談した後、アイデアを保留にしました。カスパロフ対世界が、クルシュがフィラデルフィアで検討していた手を使えるような形で始まったのは、幸運な偶然でした。カスパロフは白の駒を打っており、先手を取っていたため、彼女が完全にコントロールできるものではなかった。そのため、ゲームの展開を決定づけることができたのだ。それでも、10手目が打たれる1週間前には、クラッシュとトレーナーたちはゲームがこの方向に向かう可能性を察知し、クラッシュのアイデアの長所と短所をより綿密に分析し始めた。

チェスプレイヤーとして、カスパロフはほぼすべての点でクルシュをはるかに上回っていたことを認識することが重要です。チェスプレイヤーを評価するために使用される数値レーティングシステムがあるため、両者の差をかなり正確に表すことができます。そのレーティングシステムでは、優れたクラブプレイヤーのレーティングは1,800から2,000の範囲になります。イリーナ・クルシュのような国際的なマスターのレーティングは約2,400です。1999年、ワールドとの試合当時、カスパロフのレーティングは2,851に達しました。これはチェス史上最高のレーティングであるだけでなく、それ以前またはそれ以降のどのプレイヤーのレーティングよりも大幅に高いものでした。カスパロフとクルシュの450ポイントのレーティング差は、クルシュと優れたクラブプレイヤーとの差とほぼ同じでした。つまり、クルシュがカスパロフに勝てる可能性があるのは、大きなミスをした場合のみでした。これは、クルシュが弱い選手だったと言っているわけではない。彼女は米国の女子チャンピオンだったことを思い出してほしい。しかし、その試合の時点ではカスパロフは別格だった。

カスパロフとクルシュの実力差は大きかったものの、10手目につながるオープニングにおけるクルシュの極めて専門的な知識を活かすチャンスがゲーム展開に訪れたことは、非常に幸運だったと言えるでしょう。このチェスの狭い範囲においては、クルシュはカスパロフを上回り、ワールドチームに有利な状況をもたらす可能性がありました。言い換えれば、クルシュはチェスのほぼ全ての分野でカスパロフに劣っていたものの、この微細な専門知識という特殊な分野では、カスパロフさえも凌駕していたのです。

クルシュの特別なマイクロな専門知識がワールドチームの優位に立ったのは幸運だったとはいえ、ワールドチームの好プレーが単なる幸運によるものだったわけではない。チェス界ではこのゲームが広く宣伝され、何百人もの経験豊富なチェスプレイヤーがチェスを見守っていた。チェスには様々なバリエーションがあり、多くのプレイヤーが独自のマイクロな専門知識を持ち、カスパロフに匹敵、あるいは凌駕するほどだった。ワールドチームのプレーの鍵は、こうした普段は潜在的であるマイクロな専門知識をゲーム中の不測の事態に応じて明らかにし、活用することだった。したがって、10手目で決定的なマイクロな専門知識を持っていたのがクルシュだったのは幸運だったが、経験豊富なチェスプレイヤーの多さを考えると、これらのプレイヤーの潜在的なマイクロな専門知識がゲームの重要な局面で顕在化し、ワールドチームがカスパロフに匹敵する可能性は高かった。

実際、まさにその通りでした。例えば、試合終了後、Krushは26番の技をワールドチームのお気に入りの技3つのうちの1つとして挙げました。26番の技はKrushのアイデアでも、

対局後、定評のあるチェスの専門家の一人が提案した。代わりに、26手目は、ゲームフォーラムの投稿者の一人がYashaという名前で提案した。この人物は後に、かなり真剣ではあるもののエリートではないジュニアプレイヤーであるYaaqov Vaingortenであることが明らかになった。これはパターンの一部であり、対局中、Krushはゲームフォーラムの多くの無名または匿名の投稿者の考えを広範囲に参考にしていた。人々はAgent Scully、Solnushka、Ouj経由のAlekhineなどのペンネームを使用していた。同時に、彼女は国際的なマスターであるKen ReganとAntti Pihlajasalo、GMスクールのグランドマスターAlexander Khalifmanなどの定評のあるチェスプレイヤーにも相談した。世界チームは決して幸運ではなかった。むしろ、世界チームには非常に多様な才能の集まりがあったため、問題が発生するたびにチームのメンバーが台頭し、適切なミクロの専門知識を持つ誰かが飛び込んでその穴を埋めた。

## 設計されたセレンディピティ

Kasparov versus the World や InnoCentive といった共同プロジェクトが、潜在的なミクロ専門知識を活用し、共同作業のほとんどのメンバーが難航するような課題を克服する様子を見てきました。最も成功しているオンライン共同作業では、こうしたミクロ専門知識の活用が理想に近づいています。つまり、共同作業においてYashaやZacary Brownといった、まさにその場その場に最適なミクロ専門知識を持つ人々が日常的に見つかるといった状況です。特に、創造的な共同作業がスケールアップするにつれて、より幅広い専門知識を持つ人々が問題に直面できるようになり、ほとんどの参加者にとって難問に思える問題でも、誰かが「なるほど、簡単に解決できる」と気づく可能性が大幅に高まります。偶発的な偶然ではなく、セレンディピティは当たり前のものになります。共同作業は、作家のJon Udellの言葉を借りれば「計画されたセレンディピティ」と言えるでしょう。

創造的な仕事におけるこのような偶然の価値を理解するには、具体的な歴史的例が役立ちます。アインシュタインの科学への最大の貢献である重力理論、いわゆる「重力理論」の研究を取り上げてみましょう。

一般相対性理論。1907年から1915年にかけて、彼は断続的に一般相対性理論の発展に取り組み、しばしば大きな困難に直面した。

1912年までに、彼の研究は驚くべき結論へと導きました。三角形の角の合計が180度であるという、私たちが通常持つ空間幾何学の概念は近似的にしか正しくなく、空間と時間を記述するには新たな種類の幾何学が必要である、という結論です。さて、もしあなたが空間と時間の幾何学が重力とどう関係するのか疑問に思っているなら、それは当然のことです。アインシュタインにとっても、それは驚きだったのです。

重力を理解しようとしたとき、アインシュタインはそれを幾何学の問題として考えるようになるとは夢にも思っていませんでした。それでも、1912年に彼は、重力が何らかの形で非標準的な幾何学に関係しているという考えを持っていました。そして、そのような幾何学的なアイデアは彼の専門外であったため、彼は行き詰まってしまいました。彼は長年の数学者の友人、マルセル・グロスマンに自分の問題を相談し、「グロスマン、助けてくれないと気が狂ってしまうよ!」と言いました。幸いなことに、アインシュタインにとってグロスマンはまさに相談相手として適任でした。グロスマンはアインシュタインに、アインシュタインが必要とする幾何学的なアイデアは、数十年前に数学者ベルンハルト・リーマンによってすでに完全に解明されていると伝えました。アインシュタインはすぐにリーマン幾何学に没頭し、グロスマンが正しかったことを理解しました。リーマン幾何学は一般相対性理論の数学的言語になりました。

このような偶然の出会い、創造的な仕事において極めて重要です。特に科学の世界では、現役の科学者は皆、頭の中に未解決の問題を山ほど抱えています。その中には大きな問題（「宇宙の始まりを解明せよ」）もあれば、小さな問題（「計算である忌々しいマイナス記号は一体どこに消えたんだ？」）もありますが、どれも将来の進歩の糧となるものです。科学者であれば、これらの問題を一人で解決するのはほぼ自分自身にかかっています。運が良ければ、協力的な同僚が何人かいて、助けてくれるかもしれません。しかし、ごく稀に、全く異なる方法で問題を解決することもあります。知り合いと話している時に、ある問題が持ち上がったとします。何気なく話していると、突然、この人こそまさに相談すべき相手だと気づくのです。時には、相手があなたの問題をあっさり解決してくれることもあります。あるいは、問題解決に必要な推進力となる、決定的な洞察やアイデアを与えてくれることもあります。このような偶然のつながりは、科学において最も刺激的で重要な瞬間の一つです。問題は、このような偶然のつながりがあまりにも稀にしか起こらないことです。意図されたセレンディピティが重要な理由は、創造的な仕事において、私たちのほとんどが——アインシュタインでさえも——、もしそれが当たり前のことであれば、日常茶飯事となるような問題に多くの時間を費やしているからです。

適切な専門家を見つけるのは、私たち自身しかできませんでした。ほんの20年前までは、適切な専門家を見つけるのは困難でした。しかし、InnoCentiveやKasparov versus the Worldなどの例が示すように、今ではそれを日常的に行うシステムを設計することが可能です。設計されたセレンディピティによって、以前は解決不可能だった多くの問題を迅速かつ日常的に解決できるようになり、問題解決能力の範囲が広がります。

## 会話の臨界質量

意図されたセレンディピティの体験を伝えるのは難しいものです。事例を説明することと、実際に意図されたセレンディピティが起こっているコラボレーションに参加することは、全く別の話です。突然、心に翼が生えたような感覚になります。些細な問題、適切なスキルを持つ専門家に頼ることができれば日常茶飯事だったであろう問題といった重荷から解放されます。その代わりに、自分が特別な洞察力と強みを持つ問題に集中して時間を費やすことは、この上なく楽しいことです。意図されたセレンディピティは、実際に体験してみなければ完全に理解できません。

しかし、そうは言っても、なぜ意図されたセレンディピティが重要なのか、そしてそれがどのようにコラボレーションの性質を質的に変化させることができるのかを説明するのに役立つシンプルなモデルがあります。それは核連鎖反応です。連鎖反応中に何が起こるかを思い出すことで、なぜ意図されたセレンディピティが重要なのかについての洞察が得られるでしょう。

連鎖反応の仕組みはシンプルです。何らかの方法でウランの薄片、つまり核爆弾の原料となるウラン235を手に入れたと想像してみてください。(ウランにはいくつかの種類がありますが、すべてが核連鎖反応を起こすわけではありません。以降、「ウラン」と言う場合はウラン235のことを指します。)実は、ウラン原子はそれほど安定していません。ウラン原子の原子核は時折崩壊し、1つまたは複数の中性子を放出します。そして、その中性子はウランの薄片を通り抜けて飛び出します。ウランは、他の固体と同様に、人間の目には固体に見えます。実際には、原子レベルではほとんどが空間であり、中性子は別のウラン原子の原子核に衝突するまでに長い距離を移動します。ウランの小さな塊、例えば半キログラム(約1ポンド)では、中性子が他の原子核に遭遇することはなく、代わりにずっと飛び続ける可能性が非常に高い。

ウランの塊から抜け出して、そのまま進み続けるのです。しかし、ウランの塊がほんの少し大きい、例えば1キログラムだと、中性子が別のウラン原子の原子核に衝突する可能性がかなり高くなります。すると原子核は崩壊し、さらに3つの中性子が放出されます。これでウランの中を4つの中性子が飛び交うことになります。4つなのは、この過程を開始した最初の中性子も数に含める必要があるからです。最初の中性子は原子核に衝突した後も動き続けます。これらの中性子はそれぞれ、次に他の4つの原子核に衝突する可能性があり、結果として16個の中性子が飛び出すことになります。これらはさらに多くの原子核に衝突する可能性が高く、事態は急速に制御不能に陥ります。このような衝突が40回繰り返されると、1兆兆個の中性子が飛び交うことになります。この信じられないほど急速な増加率のため、このプロセスは連鎖反応と呼ばれています。臨界質量と呼ばれる特定の質量を下回ると、ウランの塊は単なる不活性な岩石の塊に過ぎません。内部の原子は時折崩壊して中性子を放出しますが、そのような中性子1つにつき、さらなる衝突によって生成されるいわゆる娘中性子の数は平均1個未満であり、起こり得る連鎖反応はすぐに消滅します。しかし、臨界質量よりもわずかに大きいウランの塊では、娘中性子の平均数は1個よりわずかに多くなります。そして、娘中性子の平均数が1個よりほんの少しでも多ければ、連鎖反応が開始され、制御不能に陥ります。娘中性子の平均数が1.1個だとすると、わずか200回の衝突でウラン内部には1億個以上の中性子が飛び交い、さらに多くの衝突を引き起こすことになります。そのため、一見同じように見える2つのウランが全く異なる挙動を示すのです。一方は不活性状態のままですが、わずかに大きいもう一方（ウラン）は数千トンのダイナマイトに匹敵する爆発を起こします。わずかな大きさの違いが、挙動に全く質的な変化をもたらすのです。

優れた創造的なコラボレーションにおいても、同じようなことが起こります。難しい創造的な課題を一人で解決しようとする、ほとんどのアイデアは行き詰まってしまいます。しかし、優れた創造的なコラボレーションにおいては、私たちのアイデアの一部、つまり私たちだけではこれ以上発展させることのできなかったアイデアが、他の人々を刺激し、彼ら自身も新たなアイデアを生み出すきっかけとなるのです。そして、そのアイデアがまた他の人々を刺激し、さらに多くのアイデアを生み出すのです。これが繰り返されるのです。

理想的には、ある種の会話の臨界点に達し、コラボレーションが自己刺激的なものとなり、偶然のつながりによる相互利益を何度も得られるようになることです。まさにこの移行を可能にするのが、意図されたセレンディピティであり、だからこそ意図されたセレンディピティの経験は、通常のコラボレーションとは大きく異なるのです。

コラボレーションの規模が大きくなり、参加者の数と多様性が増すと、一つのアイデアが別の新しいアイデアを刺激する機会が増えます。例えば、Polymathプロジェクトでは、ティム・ガワーズ氏は、プロセスを加速させた主な要因は、彼自身や他の参加者が「他の参加者の偶発的な発言がなければ思いつかなかったような考えを持つことがよくある」ことだと述べています。カスパロフ対世界でも同様のことが起こり、チームメンバーの一人のアイデアが他のメンバーのアイデアを刺激することが多く、世界チームがさまざまな方向性を模索することができました。

もちろん、連鎖反応モデルをコラボレーションのモデルとして文字通りに捉えるべきではありません。アイデアは中性子ではありませんし、コラボレーションの目標は単に「臨界状態」に達し、アイデアの数を急速に増やすことではありません。私たちは、少なくとも時折、正しいアイデア、つまり問題の解決に真に近づくアイデアを思いつく必要があります。取り組んでいる問題のどこかにボトルネックがあり、コラボレーションに参加している誰もがまだ持ち合わせていない重要な洞察が必要となる場合もあります。それでも、連鎖反応モデルは、コラボレーションが「臨界状態」に達したときに起こる質的な変化、つまり意図された偶発的な一致によってコラボレーションで生み出されるアイデアの数が飛躍的に増加し、プロセスが自立的になったときに起こる質的な変化をうまく伝えていきます。この飛躍によって問題解決の方法が質的に変化し、私たちが新たな、より高いレベルへと導いてくれるのです。

## 集合知の増幅

私たちが発展させている集合知の全体像を概観してみましょう。それは、大規模な集団の中には、集団内の一人一人が持つ能力をはるかに超える膨大な専門知識が存在する可能性があるという考えから始まります。理想的には、そのような集団は極めて認知的に多様性に富み、つまり重複しない幅広い専門知識を持ちながらも、メンバー間で効果的なコミュニケーションが取れる程度の共通点を持つべきです。

通常、こうした専門知識のほとんどは潜在的なものです。優れたチェスプレイヤーではないが、優れたチェスプレイヤーは、世界トップクラスのチェスプレイヤーに匹敵、あるいは凌駕する微細な専門性を個別に持っている場合があります。しかし、通常のチェスゲームにおいては、それらの専門性は、彼らが劣っている多くの分野を補うには十分ではありません。

しかし、グループが十分に大きく、認知的に多様性に富んでいる場合、適切なツールを用いることで、グループは必要に応じてそのようなミクロな専門知識を活用することが可能になり、個人の才能をはるかに超える能力を発揮できるようになります。意図されたセレンディピティが定着し、会話の臨界質量が生まれ、個人では到底不可能なほど広大なアイデア空間を迅速に探求できるようになります。

この大局的な考え方の根底にあるのは、私たちが集合的に持つ知識は、最も優れた個人でさえもはるかに上回っているという事実です。何世紀も前であれば、おそらく、アリストテレスやヒュパティア、レオナルドのような一人の優れた個人が、多くの知識分野において他のすべての人を凌駕することが可能でした。今日、人類の知識は拡大したため、もはやこれは不可能です。知識は分散化され、今では多くの人々の心に分散されています。数学者のティム・ガワーズやテレンス・タオ、チェスプレイヤーのガルリ・カスパロフといった最も優れた人々でさえ、私たちの知識のほんの一部しか卓越した習熟度を持っていません。彼らの専門分野内においてさえ、専門的な方法で他の人々、特に特定のミクロの専門知識を持つ人々に凌駕されることがしばしばあります。専門家の注意を再構築することにより、オンラインツールは、そのミクロの専門知識が最も必要とされる時と場所で適用することを可能にします。

この視点を念頭に置くと、集合知を増幅させるという課題は、ミクロの専門知識を最も有効に活用できる場所に導くことにあります。オンラインツールの目的は、人々がどこに注意を向けるべきかを見極めるのを支援することです。ツールが人々の注意をより効果的に導くことができれば、コラボレーションはより成功するでしょう。言い換えれば、オンラインツールは、参加者が比較優位が最も高いタスクを見つけられるよう支援することを目的とした「注意のアーキテクチャ」を構築します。理想的には、この「注意のアーキテクチャ」は、適切な専門家の注意を適切な問題に向けます。このように専門家の注意がより効果的に割り当てられるほど、問題はより効果的に解決されます。(テクノロジー専門家のティム・オライリー氏が提唱した「参加のアーキテクチャ」という関連するアイデアについては、巻末の注を参照してください。)集合知に関するこの見解は、「要約とプレビュー」のボックスにまとめられており、[パート1](#)の残りの部分で展開される集合知の増幅に関する多くのアイデアのプレビューも含まれています。

---

## 要約とプレビュー :集合知を高める方法

集団性を高めるには、コラボレーションを拡大し、認知の多様性と利用可能な専門知識の範囲を可能な限り拡大する必要があります。これにより、容易に解決できる問題の範囲が広がります。コラボレーションを拡大する上での課題は、参加者一人ひとりが

コラボレーションに割ける注意力は限られています。これにより、各参加者が注目できるコラボレーションへの貢献の量が制限されます。この制限を尊重しつつコラボレーションを拡大するには、オンラインツールは、各参加者の注意を最も適切な場所、つまり各参加者が最大の比較優位を持つ場所に向ける注意のアーキテクチャを確立する必要があります。理想的には、コラボレーションは意図されたセレンディピティを実現し、問題提起者にとって困難に思える問題が、適切なマイクロ専門知識を持つ人物の手に渡り、容易に解決できる（あるいはさらなる進歩を促す）ようなものになるでしょう。

会話の臨界質量が達成され、コラボレーションは自己刺激的なものとなり、常に新しいアイデアが探求されます。次の第4章では、これらの目的を達成するのに役立つ多くのコラボレーションパターンを見ていきます。

- コラボレーションをモジュール化すること。つまり、全体のタスクを、独立して、あるいはほぼ独立して取り組むことができる小さなサブタスクに分割する方法を見つけることです。これにより、新規参入者の参入障壁が低減され、利用可能な専門知識の幅が広がります。モジュール化は多くの場合困難であり、参加者による意識的で継続的なコミットメントが求められます。
- 小規模な貢献を奨励することで、参入障壁を低減し、利用可能な専門知識の範囲を広げます。
- 豊富で構造化された情報コモンズを構築し、人々が過去の成果を基に発展できるようにします。過去の成果を簡単に見つけて再利用できれば、情報コモンズはより速く成長します。

**第5章**では、集合知の限界について考察します。集合知が成功するには、参加者が共通の推論手法にコミットし、意見の相違を解決して永続的な亀裂を生じさせないようにする必要があります。

このような共通の手法は、チェス、プログラミング、科学といった分野では利用可能ですが、他の分野では必ずしもそうとは限りません。例えば、芸術家の間では、基本的な美的原理をめぐる根本的な意見の相違が生じることがあります。

このような分裂はコラボレーションの拡大を妨げ、意図された偶然的な出会いや会話の臨界質量を阻害します。

# オンラインコラボレーションの限界 従来の組織

集合知を活用して問題を解決することは新しいことではありません。歴史的に、グループは創造的な問題を解決するために主に3つの方法を用いてきました。(1) 大規模な公式組織（例えば、映画や新しい電子機器の制作に携わる数百人、数千人規模の組織）、(2) 市場システム、そして(3) 小規模な非公式グループにおける会話です。本章の残りの部分では、オンラインツールが、これら3つの既存のグループ問題解決方法をさらに進化させる方法について考察します。

オンラインコラボレーションが従来の組織を凌駕する仕組みを理解するために、映画制作を例に考えてみましょう。現代の大作映画は、数百人、あるいは数千人の従業員を雇用することがあります。2009年の映画『アバター』では、2,000人もの従業員が雇用されました。しかし、『カスパロフ対世界』や『ポリマス・プロジェクト』の参加者とは異なり、映画制作においては各従業員にそれぞれの役割が割り当てられています。映画の美術部門の従業員がオーケストラのバイオリニストにアドバイスをすることは、通常ありません。

しかし、まさにそれがカスパロフ対世界戦で行われた意思決定でした。ヤシャが提案した重要な動き26番を思い出してください。映画で言えば、見知らぬ人が撮影現場に迷い込み、監督に重要な提案をして映画の展開を一変させ、そして立ち去ったかのようでした。

もちろん、映画にはそういう逸話がつきものです。俳優メル・ギブソンが大ブレイクを果たしたのは、映画『マッドマックス』のオーディションを受ける友人が、オーディション会場まで車で送ってほしいと頼んできたことがきっかけでした。ギブソンはオーディションを受けていなかったのですが、前夜のパーティーで乱闘に巻き込まれ、顔中が痣だらけになっていました。キャスティングエージェントは、その姿こそが映画に必要な役柄だと判断し、ギブソンを再び招聘しました。こうして映画は一変し、ギブソンは世界的なスターダムへの道を歩み始めたのです。

映画の世界では、これは珍しい話です。しかし、「カスパロフ対世界」では、このような出来事は単なる幸運な出来事ではなく、世界チームのプレイの本質でした。従来の組織のように、事前に計画された静的な分業は存在しませんでした。その代わりに、世界チームのすべてのプレイヤーが、少なくとも原則として、あらゆる局面に関与する機会を持つ、動的な分業体制が敷かれていました。

動く。

動的な分業とはどういう意味か、もう少し詳しく説明しましょう。それは、コラボレーションに参加する全員が、目の前の問題が発生するたびにに対応できる分業のことです。Zacary BrownはASSETの問題を見て、自分が解決できると気づきました。Yashaはワールドチームの進捗を追いかけ、26手目で特別な洞察を得たことに気づきました。そして、Polymathプロジェクトの参加者全員が、急速に展開する会話をフォローし、特別な洞察が浮かんだ瞬間にいつでも参加することができました。

従来のオフライン組織では、このような柔軟な対応は、通常は小規模なグループでしか、あるいは全く不可能な場合に限られます。大規模なグループでは、各メンバーがそれぞれ事前に割り当てられた責任分野に集中します。オンラインツールはこれを変え、大規模なグループが各メンバーの専門分野を、必要に応じてジャストインタイムで活用することを可能にします。これが、私が「動的な分業」と呼んでいるものです。

理想的には、先ほど述べたように、これは意図されたセレンディピティにつながるでしょう。しかし、たとえそれが実現しなかったとしても、動的な分業は従来の静的な分業とは大きく異なります。

これらは、静的な分業の価値を否定するものではありません。私たちは、静的な分業を改善することで、製品製造能力を飛躍的に向上させてきました。ヘンリー・フォードの組立ラインや、アダム・スミスの仮想的なピン工場を思い浮かべてみてください。しかし、このような分業は予測可能で反復的なプロセスを用いた製品製造には適している一方で、難しい創造的問題の解決にはあまり役立っていません。なぜなら、創造的な仕事においては、計画外で予期せぬ洞察やつながりこそが最も重要になることが多いからです。

多くの場合、創造的な洞察が重要になるのは、それまで無関係だと考えられていたアイデアを組み合わせるという点です。

無関係であればあるほど、そのつながりは重要になる。シュタインとグロスマンが重力とリーマン幾何学間に示した驚くべき関連性を思い出してほしい。だからこそ、偉大な創造的作品は、従来の静的な分業の一部として計画することはできないのだ。カスパロフ対世界戦がこのように展開するとは誰も予想できなかった。したがって、10手目に発生した局面に対処するためにクルシュの特別なミクロな専門知識が必要になることを予測することは不可能だった。そして、26手目にヤシャが必要になることを予測することは絶対に不可能だった。状況に応じて、動的に分業を行うことしかできなかったのだ。

これが重要なのは、最近まで、難しい創造的な課題を解決するには、個人や少人数のグループの才能、そして時折の幸運な偶然の出会いに頼らざるを得なかったからです。そのため、活用できる専門知識の範囲が限られてしまいます。映画制作のような仕事でさえも。

自由奔放であることで知られるクリエイティブ業界ですが、主要なクリエイティブな決定は主に少人数で行われています。ただし、現代の組織は静的な流れ作業型のやり方に完全に縛られているわけではありません。多くの場合、小規模で動的な分業が行われ、少人数のグループがクリエイティブチームとして働いています。これは例えば映画制作で見られ、ロッキード・マーティン社のスカンクワークスや原子爆弾を開発したマンハッタン計画などの有名な組織を含む他の多くのクリエイティブ組織でも見られます。総合的品質管理やリーン生産方式などの管理手法には、より動的な分業を可能にするアイデアが組み込まれています。有名な例としては、トヨタが工場の労働者に製造上の欠陥を即座に発見して修正する大きな責任を委譲している方法があります。

オンライン ツールの新しい点は、大規模なダイナミックな分業がはるかに簡単になり、はるかに大規模なグループの専門知識を困難な創造的問題に活用できるようになったことです。

動的な分業と静的な分業の区別は、オンライン共同研究と従来の大規模科学共同研究の違いも浮き彫りにする。例えば、1983年に欧州原子核研究機構（CERN）の粒子加速器で自然界の新たな基本粒子であるZボソンを発見した138人の素粒子物理学者による共同研究を考えてみよう。カスパロフ対世界やポリマス・プロジェクトとは異なり、CERN共同研究に参加した人々はそれぞれ特定の役割を担うために雇用された。役割は、粒子ビームを冷却するエンジニアから、複雑な実験結果の解釈を担う統計学者まで、慎重に選ばれた多くの専門分野に及んだ。このような専門分野の異なる共同研究は驚くべき成果をあげることができるが、比較的固定された役割と静的な分業体制のため、多くのマイクロな専門知識が潜在化しており、目的の柔軟性がほとんどない。その柔軟性の欠如は、極めて重要な科学研究を行うことができる一方で、最も創造的な科学研究の多くに見られるような、より流動的な目的に容易に適応できるモデルではないことを意味する。

オンラインコラボレーションが  
市場

人類が集合知を増幅させる最も強力なツールの一つは市場システムであり、市場と比較することでオンラインコラボレーションについて多くのことを学ぶことができます。もちろん、市場はあまりにも馴染み深いため、当然のこととして捉え、2008年や1929年の金融危機のように、市場が集合的な愚かさを増幅させる例にのみ焦点を当ててしまいがちです。しかし、ほとんどの場合、市場は実際に私たちの集合知を増幅させます。イギリスの経済学者ポール・シーブライトは著書『異邦人の仲間たち』の中で、ソ連崩壊から2年後、自由市場について学ぶためにイギリスを訪れていたロシアの高官と会った時のことを語っています。「私たちは市場システムへの移行を熱望しています。しかし、そのようなシステムがどのように機能するかという根本的な詳細を理解する必要があります。例えば、教えてください。ロンドンの住民へのパンの供給は誰が担当しているのでしょうか？」

この問いに対する、おなじみの、しかし驚くべき答えは、市場経済においては誰もが主導権を握っているということです。パンの市場価格が変動すると、私たちの集団行動に影響を与えます。小麦畑に新しい作物を植えるか、休ませるか。街角に開店しようと考えていた新しいパン屋を開くか。あるいは、今週パンを2斤買うか3斤買うか、といったことです。価格は、供給者と消費者の行動を調整するためのシグナルです。商品の需要が高まると価格も上昇し、新たな供給者が市場に参入する動機となります。

その結果、食卓に食べ物が並び、ガレージに車が、ポケットにスマートフォンが入るといふ、素晴らしい一連の動作が生み出されました。私たちは慣れ親しんでいるため、これを当然のことのように思っていますが、この動作は実際には奇跡的な大衆の協力であり、市場によって非常にスムーズに仲介されているため、それが失われて初めて気づかれるのです。

価格が有用なのは、経済学者フリードリヒ・フォン・ハイエクが強調したように、価格が膨大な量の隠れた知識を集約するからです。それは、財の生産や消費に関心を持つすべての人にとって、本来は明らかではない知識です。価格を用いてこうした知識を集約し、さらなる行動を促すことで、市場は最も聡明で情報に精通した個人でさえも凌駕する成果を生み出します。価格によって動的な分業が可能になります。例えば、洪水によってアメリカ合衆国の大部分で小麦の収穫が壊滅した場合、価格は上昇し、他の小麦供給者は供給量を増やすために懸命に努力することで対応します。

市場と価格体系は、オンラインコラボレーションにおいて私たちが特定した多くの特性を備えている。従来のオフラインコラボレーションとは対照的に、

組織においては、動的な分業と意図的な偶然の出会いの両方が活用されています。しかし、Polymath Projectのようなオンラインコラボレーションは、検討対象となる問題の複雑さ、そして予期せぬ問題が提示され解決されるスピードにおいて、オフライン市場をはるかに凌駕しています。たとえ数学に興味がなくとも、Polymath参加者のライアン・オドネルが投げかけたこの「馬鹿げた質問」の豊かな味わいを理解するのは容易です。

この馬鹿げた質問について誰か助けてくれませんか？

$A = B$  が最後の要素  $n$  を含まない集合族であると仮定します。すると、 $A$  と  $B$  は  $K \times \mathbb{N} \times n/2 - k/2$  の範囲内で密度が約  $1/2$  になります。(ここでは  $k(n) \rightarrow \infty$ 、 $k(n)/n \rightarrow 0$  を想定していますよね?) [...] ]

これは質問のほんの始まりに過ぎません。「パンの値段はいくらですか？」とは程遠いものです。オドネル氏の質問はあまりにも専門的で、状況依存性であるため、従来のオフライン市場では対応できません。数学雑誌に広告を出して助けを求めることもできたかもしれませんが、その手間の方がメリットを上回っていたでしょう。

Polymath Projectのようなオンラインコラボレーションでは、誰かがそのような疑問を思いつき、他の参加者に伝え、数分あるいは数時間で答えを得ることができます。このように、オンラインツールは、市場に見られる動的な分業と意図された偶然の発見と、日常会話の柔軟性と自発性を兼ね備えています。この組み合わせにより、オンラインツールはオフライン市場から大きく前進し、特に難しい創造的な問題に取り組むのに適しています。

これまで私は従来のオフライン市場に焦点を当ててきました。もちろん、近年、市場はインターネットやその他の現代的な通信技術を取り入れ、それに伴い変化し、より複雑になっています。そして、ますます、非常に専門的で文脈依存的な問題への対応にも活用されるようになっていきます。この意味で、オンラインツールは徐々に市場を包含し、拡張しつつあります。前のセクションで議論した従来の組織においても、同様のことが起こっています。オンラインツールは、こうした組織における指揮統制インフラとしてますます利用されるようになっていきます。つまり、オンラインツールは従来の市場と組織の両方を包含し、拡張することができます。そして、後ほど説明するように、3つ目の歴史的なコラボレーション形態である小グループでの会話も包含し、拡張することができます。いずれの場合も、オンラインツールは、オフラインでのコラボレーション手法では不可能な、注意のアーキテクチャを実現しています。

## オンラインコラボレーションとオフラインコラボレーションの比較 少人数グループでの会話

Polymath ProjectやKasparov versus the Worldといったオンラインコラボレーションは、多くの点でオフラインの少人数グループでの会話に似ています。後ほど見ていくように、オフラインでの会話はオンラインコラボレーションよりも優れている点もあれば、明らかに劣っている点もあります。しかし、両者を比較する前に、まずオンラインコラボレーションとオフラインでの会話を関連付けようとする、よくある誤解に基づく2つの主張を整理し、誤解を解きましょう。

最初の誤解は、オンラインコラボレーションが退屈な委員会の仕事に似ていると考えることです。Polymath Projectのようなプロジェクトについて耳にする人は、「ラクダは委員会で設計された馬だ」といった、委員会にまつわる不愉快なステレオタイプを思い浮かべることがあります。確かに、多くの委員会は創造性とコミットメントを抑制しています。しかし、だからといってオンラインコラボレーションにも同じ問題があるわけではありません。Polymath ProjectやKasparov versus the Worldのようなプロジェクトをよく見ると、機能不全の委員会とはほど遠いことがわかります。むしろ、創造性とコミットメントに満ちた活気に満ちたコミュニティなのです。

このようなコラボレーションは、機能不全の委員会が抱える問題をいかに回避するのでしょうか？なぜ一部のグループはうまく機能し、他のグループはうまく機能しないのかを理解するのは難しいため、ここではこの問題を包括的に論じるつもりはありません。しかし、委員会ではうまく機能しないような状況でも、オンラインでのコラボレーションがしばしばうまく機能する理由を説明する強力な要因が2つあります。

まず、委員会は強制的にメンバーとして参加させられた人々で構成されることが多いのに対し、Polymath Projectのような共同作業は熱心なボランティアで構成されている。こうした情熱的な取り組みが大きな違いを生み出す。次に、委員会は少数の邪魔者によって作業が大きく遅れる可能性があるが、オンラインの共同作業ではそうしたメンバーを無視してしまうことが多い。例えばPolymath Projectでは、十分な情報を持つ参加者が、善意からではあるものの役に立たない貢献を時折無視してしまうことがあった。オンラインでの共同作業は、委員会での作業とは全く異なる。

オンラインコラボレーションに懐疑的な人々がしばしば主張する2つ目の誤解は、オンラインコラボレーションを同等のオフラインコラボレーションに置き換えることは常に可能であるというものです。例えば、十分な忍耐力と数学者でいっぱいの部屋があれば、次のようなことができると主張するかもしれません。

ポリマス・プロジェクトのオフライン「シミュレーション」。この議論には2つの問題点があります。1つ目は、現実的に考えると、オフラインよりもオンラインで集まる方がはるかに容易だということです。つまり、この反論は、自動車や旅客列車の発明は旅行に何の変化ももたらさなかった、なぜなら人々は原理的には馬車を使って長距離移動を常に行ってきたからだ、と主張するようなものです。この指摘は確かに正しいのですが、人々の実際の行動にはほとんど影響しません。2つ目の問題点は、数学者でいっぱいの子供部屋での人間の行動は、実際にはポリマス・プロジェクトとは劇的に異なるということです。多くの相違点の1つを挙げると、オフラインでは、疲れて機嫌が悪い時に誰かが話しかけても、何を言っているのか理解できないかもしれません。一方、オンラインでは、集中力と熱意がある時に、好きな時に何度も読み返すことができます。こうした点やその他多くの相違点があるため、オフライン・シミュレーションを行うには、人々が部屋の中でどのように行動するかについて非現実的な仮定を立てなければなりません。数学者でいっぱいの子供部屋で共同研究をして素晴らしい成果を上げることができないと言っているわけではありません。しかし、それはPolymathのようなプロセスではなく、異なる注意の構造を用いるでしょう。オンラインツールは、まさに新しい方法での共同研究を可能にしてくれます。

これら2つの誤解を取り除いたところで、オフラインでの会話がオンライン コラボレーションよりも本当に優れている点は何でしょうか。特に際立つのは、対面でのコミュニケーションが持つ豊かな性質です。ボディ ランゲージ、表情、声のトーン、定期的なインフォーマルな接触は、効果的なコラボレーションに非常に重要であり、代替できません。好きな人との対面での会話は楽しく刺激的ですが、それに比べるとオンライン コラボレーションには何かが欠けています。もちろん、この欠点は、より表現力豊かなコラボレーション テクノロジーによって徐々に補われつつあります。Skype ビデオ チャットなどのツールは、コラボレーションの手段として非常に効果的です。長期的には、仮想世界や拡張現実などのアイデアによって、オンラインでのコミュニケーションが対面でのコミュニケーションよりも優れたものになる可能性もあります。それでも、今日では、直接対面で行われるオンライン コラボレーションの経験は、オフライン コラボレーションの豊かさの多くを欠いています。オンライン コラボレーションはオフラインほど優れているはずがない、と結論付けたくなるかもしれません。

この結論の問題点は、そもそも一緒に仕事をするのに適した人材をどうやって見つけるかという問題を無視していることです。おそらく、適切な人材を見つけることは歴史的に非常に難しい問題であり、私たちはたいていそれを気にしないからでしょう。オフラインでは、自分の専門知識をちょうど良い形で補完してくれる新しい協力者を見つけるのに何ヶ月もかかることがあります。しかし、オンラインで質問できると状況は変わります。

オンラインフォーラムで質問すれば、10分後には、質問したトピックにおける世界有数の専門家から回答が返ってくるかもしれません。創造的な問題解決においては、自分の知識とあまり変わらない人と何週間も楽しく対面で議論するよりも、問題を簡単に解決できる専門家と20分間の簡潔なテキストのみのやり取りをする方が効果的です。そして、いずれにせよ、必ずしもそうする必要はありません。実際には、比較的非個人的なツールを使って目の前の問題に適した人を見つけ、ビデオチャット、仮想世界、拡張現実といったより表現力豊かなツールを使って、その人との作業を可能な限り効果的にすることができます。

言い換えれば、オフラインでの会話と比較したオンラインコラボレーションの大きな利点は、規模と認知的多様性にあります。ASSET Indiaの人々が無線ルーターのアイデアをブレインストーミングするためにグループを結成したと想像してみてください。よほど幸運でない限り、ザカリー・ブラウン氏のような専門知識を持つメンバーはグループにいなかったでしょう。オンラインツールはコラボレーションの規模を拡大することで、利用可能な専門知識の範囲を広げ、グループ内の誰も解決できない問題によってグループが行き詰まる可能性を減らします。理想的には、意図されたセレンディピティと会話の臨界質量が生まれ、限られた専門知識を持つ少人数のグループでは不可能な、はるかに幅広いアイデアを深く探求できるようになります。

オンラインツールはどのようにして会話のスケールアップを可能にするのでしょうか？答えは明白です。オンラインツールによって、世界中の専門家がグループの一員として集まりやすくなるからです。これは重要ですが、ここで起こっていることのほんの一部に過ぎません。実際、オンラインツールは、綿密に設計された注意のアーキテクチャを使用することで、オフラインの会話よりもはるかに多くの人々を巻き込んだコラボレーションを可能にしています。これがPolymathプロジェクトでどのように機能したかを説明しましょう。表面的には、ブログへのコメントに基づくPolymathプロジェクトの形式は、対面での会話における数学の議論に似ているように見えます。しかし、3つの重要な点でさらに進んでいます。まず、オンラインで作業する場合、人々は通常の数学の会話よりもコメントを事前にフィルタリングします。

オフラインでの会話では、どんなに優れた数学者でも長い沈黙を挟み、話を戻したり、時には混乱したりします。しかし、Polymath Projectでは、ほとんどのコメントが比較的簡潔な形で一つの論点を要約していました。

第二に、読者はブログのコメントをすぐに読み飛ばしてしまいがちです。対面で話している時に相手の言っていることが理解できないと、10分間も意味不明な話を聞かされる羽目になるかもしれません。

しかし、ブログではコメントを数秒間ちらっと見て、メモを取ることができます

全体的なアイデアを理解して、先へ進むことができます。3つ目に、コメントをスキップしても、後でいつでも戻って読むことができます。コメントはアーカイブされ、検索エンジンで見つけることができます。これら3つの違いの全体的な効果は、会話に参加できる人の数を増やすことです。ブログという媒体は会話の規模を拡大することで、より認知的に多様な参加者から最高のアイデアを得ることを可能にし、意図されたセレンディピティや会話の臨界質量が生まれる可能性が高くなります。

ただし、コラボレーションの規模を拡大すると、固有のトレードオフが存在します。一方で、コラボレーションには、可能な限り大規模かつ認知的に多様な参加者グループが関与するべきです。一方で、コラボレーションが十分に大きくなると、参加者は進行中のすべてに注意を払うことは不可能になります。その代わりに、参加者は必然的に貢献の一部にのみ注意を払うようになります。理想的には、注意のアーキテクチャは、参加者をそれぞれの才能が次のステップに進むのに最も適した場所、つまり比較優位が最大化される場所に導きます。そのため、各参加者は、より大きなコラボレーションの一部しか見ていません。簡単な例として、InnoCentiveはチャレンジを分野別に分類し、参加者が最も関心のあるチャレンジを見つけやすくしています。次章では、人々がどこに注意を向けるべきかを判断するのを支援する、より洗練された方法を見ていきます。このようにして、各参加者がコラボレーション全体に注意を払う必要のない段階を超えて、スケールすることが可能になります。言い換えれば、スケールアップの秘訣は、貢献をフィルタリングし、各参加者が個人的に最も価値があり刺激的だと感じる貢献だけを見るようにすることです。重要なのは、何を見るかではなく、何を無視できるかです。フィルターが優れているほど、私たちの注意は貢献の機会とより適切にマッチングされます。要するに、理想的な注意のアーキテクチャとは、最大規模かつ認知的に最も多様なグループが、利用可能な限られた注意を最大限に活用し、各参加者が常に比較優位を最大化できるようにするものです。Polymathプロジェクトのようなコラボレーションは、この目標達成のほんの一部に過ぎません。より優れた注意のアーキテクチャを用いることで、Polymathプロジェクトよりもさらにスケールアップしたコラボレーションが可能になります。次の章では、オンラインコラボレーションをスケールアップし、利用可能な専門知識をより有効に活用するために使用できるいくつかのパターンを検討します。

## 第4章

## オンラインコラボレーションのパターン

1991年8月26日午前2時12分、21歳のフィンランド人プログラミング学生、リーナス・トーバルズが、プログラマー向けのオンラインフォーラムに短いメモを投稿しました。その内容の一部は次のとおりです。

386(486) ATクローン向けの (フリーの)オペレーティングシステム (単なる趣味で、GNUのような大規模でプロフェッショナルなものではありません)を開発中です。多くの人がどんな機能を求めているのかを知りたいと思っています。どんな提案でも歓迎しますが、必ず実装するとは約束できません :-)

わずか14分後、別のユーザーが「もっと詳しく教えてください！」と返信し、いくつかの質問をしました。それから約6週間後の10月5日、トーバルズ氏は2つ目の投稿を行い、間もなくLinuxと名付けられることになるオペレーティングシステムのコードが公開されたことを発表しました。発表の中で彼はこう記しています。

これはハッカーによる、ハッカーのためのプログラムです。私は楽しく開発しましたし、誰かがこれを見て、自分のニーズに合わせて改造するのも楽しいかもしれません。まだ理解しやすく、使いやすく、改造しやすいサイズなので、皆さんのコメントをお待ちしています。

トーバルズ氏は無名で、ヘルシンキ大学で比較的孤立した環境で研究する学生であり、シリコンバレーの流行のスタートアップ企業に所属していたわけでもなかった。それでも、彼の発表は多くのハッカーにとって興味深いものだった。

オペレーティングシステムはコンピュータの神経中枢であり、コンピュータ全体の動作を司る重要な部品です。ハードコアなハッカーにオペレーティングシステムのコードを渡すのは、芸術家にシスティーナ礼拝堂の鍵を渡して、装飾を依頼するようなものです。トーバルズの投稿から間もなく、Linux活動家のためのメーリングリストが設立され、わずか3ヶ月後にはメンバー数が196人にまで増加しました。

トーバルズはオペレーティングシステムのコードを自由に公開しただけでなく、他のプログラマーにコードをメールで送るよう奨励した。

Linuxへの組み込みの可能性を探りました。これにより、Torvalds氏はLinux開発者コミュニティの形成と急速な成長を開始しました。つまり、共同でLinuxの改善を手伝ってくれたプログラマーたちです。1994年3月までに、Linux Credits ファイルには80名が貢献者として記載され、驚異的な速度でコードが貢献していました。1995年にはRed Hat社が設立され、Linuxの最初の商業的に成功したバージョンの1つを販売しました。1999年には、Red Hatはニューヨーク証券取引所に上場し、取引初日の終了時点で時価総額は30億ドルに達しました。2008年初頭までに、Linuxオペレーティングシステムの中核部分であるLinuxカーネルには、1,000人以上の共同作業によって書かれた900万行近くのコードが収められました。これは、これまでに作成された中で最も複雑なエンジニアリング成果物の一つです。

Linuxは非常に普及しているため、当たり前なものになりがちです。Microsoft Windowsは家庭やオフィスでの使用では依然として主流のオペレーティングシステムですが、他の多くの分野ではLinuxがそれを上回っています。Google、Yahoo!、Amazonなどの企業はいずれも、数万台から数十万台のコンピューターを含む巨大なLinuxクラスターを使用しています。ハリウッドのアニメーションや視覚効果の会社では、LinuxはWindowsやMacOSを凌駕する支配的なオペレーティングシステムであり、ピクサー、ドリームワークス、インダストリアル ライト & マジックで主要な役割を果たしています。消費者向けエレクトロニクス業界では、ソニー、ノキア、モトローラなどの企業が、携帯電話からテレビまであらゆるものにLinuxを使用しています。この遍在性により、Linuxのストーリーがいかに素晴らしいものであるかを忘れがちです。1991年に21歳のフィンランドのプログラミング学生があなたに近づき、オペレーティングシステムのコア部分を書き、そのコードを公開する予定であり、ついでに、それを改良するためにボランティアのプログラマー軍団を募集したいと考えていると話すと想像してみてください。あなたはそれをばかげていると思うでしょう。ばかげていました。あまりにばかげていたので、トールバルズ自身ですらそんなことが起こるとは想像もしていませんでした。

Linuxはオープンソースソフトウェアの一例です。オープンソースソフトウェアプロジェクトには、2つの重要な特徴があります。1つ目は、コードが公開されているため、オリジナルのプログラマーだけでなく、誰でもコードを実験したり変更したりできることです。2つ目は、他の人がコードの改善に貢献することが奨励されていることです。これは、何か問題が発生したときにバグレポートを送信したり、1行のコードの変更を提案したり、数千行のコードを含む主要なコードモジュールを作成したりすることを意味します。最も成功しているオープンソースプロジェクトは、多数の貢献者を募集し、彼らが協力することで、個々のプログラマーが開発できるよりもはるかに複雑なソフトウェアを開発できます。

独自のコードを開発するのです。その規模を少しお見せすると、2007年と2008年にはLinux開発者がLinuxカーネルに1日平均4,300行のコードを追加し、1,800行を削除し、1,500行を修正しました。これは驚異的な変化率です。大規模なソフトウェアプロジェクトでは、経験豊富な開発者でも年間数千行のコードを書くのが一般的です。

もちろん、ほとんどのオープンソースプロジェクトはLinuxよりも貢献者が少ないです。SourceForgeと呼ばれる人気のオープンソースプロジェクトリポジトリには、23万以上のオープンソースプロジェクトが登録されています。これらのプロジェクトのほとんどは、貢献者が1人か数人しかいません。しかし、プログラマーの想像力を掻き立て、数十人、数百人、あるいは数千人の貢献者を集めているプロジェクトも少数あります。

オープンソースはプログラミングの世界から始まりましたが、本質的にはプログラミングに関するものではありません。むしろ、オープンソースはデジタル情報を扱うあらゆるプロジェクトに適用できる一般的な設計手法です。例えば、建築家であれば、オープンソースアーキテクチャを実践できます。建物の設計図を自由に共有し、他の人に改良を依頼するだけです。2006年、キャメロン・シンクレアという建築家とケイト・ストールというジャーナリストが、Open Architecture Networkを立ち上げました。これは、オープンソースアーキテクチャのためのオンラインコミュニティ、いわば建築版Source-Forgeです。2010年初頭の時点で、このサイトには4,000以上のプロジェクトが掲載されており、その多くは間取り図、建築材料に関する議論、完成した建物の写真などであり、これらはすべて他の人が再利用したり改良したりするために利用できます。

このサイトは特に発展途上国での利用を目的としたデザインに焦点を当てており、シンクレア氏とストール氏は、優れた建築アイデアやイノベーションがより迅速に普及する一助となることを願っています。[図4.1](#)は、西アフリカの小さな国ブルキナファソ（旧称：上ボルタ）にある人口3,000人の町、ガンドに建設された小学校の設計図の一例です。この設計図には、平面図、立面図、その他多くの設計詳細に加え、完成した学校の写真も掲載されています。

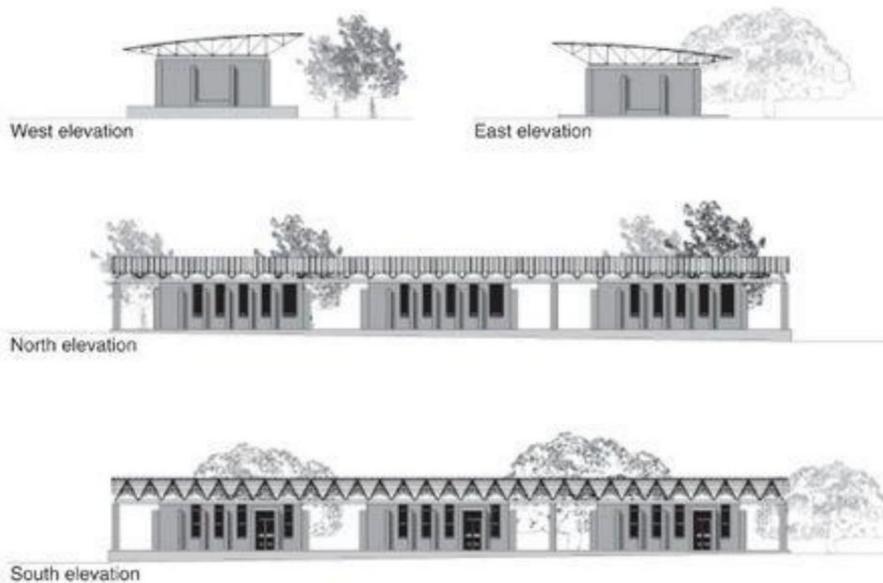


図4.1.上 :西アフリカのブルキナファソ、ガンド町にある小学校。下 :この学校的设计図書のうちの一つ。オープン・アーキテクチャー・ネットワークから無料でダウンロードできます。この设计図書は誰でも利用でき、必要に応じて改変することができます。クレジット :シメオン・デュショー / アガ・カーン建築賞

オープンソース化できるのは建築だけではなくありません。デジタルアーティストなら、オープンソースアートを実践できます。デジタルアートのファイルを自由に共有し、他の人に改善を促しましょう。生物学者なら、オープンソース生物学を実践できます。生物のDNA設計を共有し、他の人に改善を促しましょう。まさにそれを行っている生物学者のコミュニティがあります。

百科事典では、百科事典記事のテキストを自由に共有し、他の人に改善を促します。Wikipediaもオープンソースプロジェクトなので、そのように書かれています。これらのプロジェクトに共通する基本的なパターンは、デジタルデザインを共有し、他の人に変更を促し、貢献してもらうというものです。Polymathプロジェクトはこのパターンに完全には従っていませんが、似たような考え方を採用し、人々がアイデアを共有し、他の人のアイデアを改善するためのオンラインスペースを作り出しています。

本書ではこれまで、オンラインツールがグループをよりスマートにする例をいくつか見てきました。オープンソースのコラボレーションには通常、それぞれ異なる目的があります。それは、人々に他者の成果物を改善・修正する自由を与えることであり、LinuxやWikipediaのような大規模プロジェクトにおいては、個人では到底作成できないほど複雑なプロジェクトをグループで作成できるようにすることです。この目的の違いは、Wikipediaが素晴らしい一方で、多くの分野では世界トップクラスの専門家の方が優れた記事を書けるという事実に反映されています。

同様に、Linuxのコードは動作する程度に良ければ十分であり、全体的に最高品質である必要はありません。しかし、これまでの例とは意図が異なるにもかかわらず、オープンソースは集合知を増幅させる方法について多くのことを教えてくれます。特に、オープンソースのコラボレーションはスケールアップに非常に効果的であり、それによってコラボレーションで利用可能な認知的多様性とマイクロ専門知識の範囲を拡大してきました。本章では、オープンソースのコラボレーションがスケールアップに活用してきた4つの強力なパターンを特定します。(1) モジュール方式での作業への絶え間ないコミットメント、つまり、全体のタスクをより小さなサブタスクに分割する巧妙な方法を見つけること。(2) 参入障壁を下げるために、小さな貢献を奨励すること。(3) 他の人による以前の作業の容易な再利用を可能にすること。(4) スコアなどのシグナリングメカニズムを用いて、人々がどこに注意を向けるべきかを判断するのを支援すること。これらのパターンは、あらゆる注意のアーキテクチャに組み込むことができ、共同知を増幅させるために活用できます。

## モジュール化の重要性

オープンソースのコラボレーションがどのように拡大していくかを理解するために、Linuxのコラボレーションが拡大にほとんど失敗した時期、つまり

Linux開発者コミュニティは、2つの異なるバージョンのLinuxに取り組む、ほぼ2つの陣営に分裂するところだった。この事件は、1998年9月29日、開発者のマイケル・ハルノイス氏がLinuxカーネルのメーリングリストに投稿した、何気ない投稿から始まった。ハルノイス氏は、Linuxの表示システムの一部に問題があると投稿した。こうした苦情は珍しくなく、実際、Linux開発者はこうした苦情をコード改善の糧としていた。そこで、著名なLinux開発者であるゲルト・ウイッターホーヴェン氏がすぐにハルノイス氏に返信した。

Uytterhoeven氏は、時間を無駄にしないようにと、問題はすでに解決されており、Harnois氏が問題を抱えていた唯一の理由は、その問題を修正するコードがLinus Torvalds氏が保守している公式のLinuxコードベースにまだ含まれていなかったからだと伝えました。

ここまでは、いつも通りの展開だった。しかし、ウイッターホーヴェン氏が次に付け加えたことが、大騒動の引き金となった。彼はハルノイス氏に、問題の修正はまだ公式コードベースには含まれていないものの、VGERというウェブサイトから修正のコピーを入手できると伝えた。VGERは公式Linuxコードのミラー（つまりコピー）として開始されたサービスで、メインサイトがダウンしたりアクセスが困難な場合にLinuxをダウンロードできる代替の場所だった。しかし、一部のLinux開発者はトーバルズ氏への不満を募らせていた。彼らの貢献が公式Linuxコードベースに十分な速さで統合されていないと感じていたのだ。一方、VGERを運営するボランティアグループは、彼らの貢献の一部を受け入れており、「VGER Linux」が公式Linuxを決定的な点で凌駕し始めていることがひそかに知られていた。

Uytterhoeven氏の投稿から2時間も経たないうちに、Linus Torvalds氏はメーリングリストに簡潔な返信を投稿し、Harnois氏は「時間を無駄にしているわけではない」とし、VGERはLinux開発とは無関係だと述べた。Torvalds氏の投稿は猛烈な反響を呼び、最も尊敬されているLinux貢献者の一部は、彼が重要な貢献を公式Linuxコードに統合できなかったのは今回が初めてではないと声高に訴えた。中には、Torvalds氏に何度もコード貢献を送信したにもかかわらず、何の謝辞も受け取っていない、時には彼の依頼で行った作業に対してさえも謝辞を受け取っていないと訴える者もいた。Torvalds氏自身も、次のように不満を表明した。

正直に言うと、今回の議論（そしてそれ以前の議論も）は私をイライラさせ、プレッシャーを増大させています。それよりも、もし私が[貢献]をどのように扱っているかについて不満があるなら、私が最終的に何を処理しなければならないかを5分ほど考えてみてほしいと思います。

みんな、立ち去ってください。興味ないよ、休暇中だし、もうこれ以上聞きたくない。つまり、私のメールアドレスから消えてくれ。

コラボレーションが成功するには、取り組んでいる問題を、個人が実行できるタスクに分割する必要があります。この混乱が起こった時点で、Linuxコミュニティは非常に大きく成長していたため、提出されたコードのレビューと統合という作業は、トーバルズ氏（あるいはおそらく誰一人として）の手に負えないものでした。さらに、この騒動に関わったLinux開発者の一人、ラリー・マクボイ氏の言葉を付け加えると、「Linusはスケールしない」ということです。結果として、Linux開発コミュニティはもはや効果的に機能しなくなり、2つ以上の別々のコミュニティに分裂する危機に瀕していました。これは、トーバルズ氏や他の誰かが何か間違ったことをしたからではありません。むしろ、これは成功の結果でした。コミュニティがあまりにも大きく成長したため、従来のやり方はもはや通用しなくなっていたのです。

この問題を解決する明白な方法は、コード貢献の承認作業を複数の担当者に分担することだった。しかし、一部のLinux開発者は、コード貢献のレビューと承認にはトーバルズ氏のLinuxカーネルに関する幅広い知識が不可欠になるのではないかと懸念していた。

他の人が貢献を承認できるようにすると、実際にLinuxに損害を与える可能性がありますか？Linuxコラボレーションにおいて、これまで暗黙のうちに存在していた重要な機能が失われる可能性もあるかもしれない。幸いにも、そうした懸念は現実のものとはならなかった。白熱したオンライン討論と、Torvalds氏やVGERの作者Dave Miller氏を含むLinuxの主要開発者数名との直接会談の後、Torvalds氏はより多くの意思決定を部下に委任することに同意し、これは目立った悪影響もなく進められました。

共同研究の中には、取り組んでいる問題をより小さなタスクに分割することが容易なものもあります。冒頭で紹介した銀河分類プロジェクト「Galaxy Zoo」を思い出してください。Galaxy Zooでは、参加者に一度に1つの銀河に関する質問に答えてもらうことで、銀河の分類という問題を数百万もの小さなタスクに分割します。これは、Galaxy Zooの全体的な問題を分割するシンプルでありながら効果的な方法です。

しかし、このようなモジュール性を実現するのは時に非常に困難です。Polymathプロジェクトでは、ブログ投稿へのコメントを通じて作業が進められました。プロジェクト初期には、関心のある数学者が議論に参加するのは容易でした。しかし、コメント数は急速に増加し、最終的には800件に達しました。

17万語にも及ぶ。部外者にとって、これは非常に大きな参入障壁となった。コメントは、先行する投稿の大部分を理解しなければ議論に飛び込めないような形で整理されていなかったからだ。Polymathプロジェクトは27人の貢献者によるもので、数学の従来の基準からすれば大規模な共同研究であったが、議論が一枚岩ではなく、よりモジュール化されていたならば、おそらくさらに大規模なものになっていたであろう。そうなれば、認知の多様性が高まり、より幅広い専門知識を共同研究に活用できたはずだ。

このモノリシックな物語スタイルは、Polymath Projectのようなコラボレーションの必然的な特徴なのではないでしょうか？それとも、コラボレーションをサブプロジェクトに分割する、よりモジュール化されたアプローチを考案することは可能でしょうか？これらの疑問への洞察は、Linuxのような大規模なオープンソースプロジェクトを詳しく調べることで得られます。これらのプロジェクトは、容易く、あるいは偶然にモジュール化を実現したのではなく、非常に懸命な努力によって実現しました。彼らはモジュール化を意識的に約束し、多大な労力を要したとしても、その約束を執拗にやり遂げてきました。

LinuxコミュニティがVGER危機にどのように対応したかは、その好例です。しかし、より印象深いのは、たとえ地味な形ではあっても、Linux開発者コミュニティが日々モジュール化に注力してきたことです。例えば、Linuxカーネルのオリジナルのコードベースは、潜在的な開発者がコードの改善に容易に参加できるようなシンプルなモジュール構造ではありませんでした。Linuxリリース2.0では、モジュール化を実現するために、Linuxコード全体が大幅に書き直され、再構成されました。これは一見簡単そうに聞こえるかもしれませんが、Linux開発者による多大な協調的な努力が必要でした。トーバルズ氏は次のように説明しています。

Linuxカーネルの開発において、可能な限りモジュール化されたシステムが必要であることがすぐに明らかになりました。オープンソース開発モデルでは、これが必須です。そうでなければ、複数の人が同時に作業するのは難しいからです。

...

2.0カーネルでは、Linuxは大きく進化しました。ロードダブルカーネルモジュールを追加したのはこの時です。これにより、モジュール記述のための明確な構造が整えられ、モジュール性が大幅に向上しました。

プログラマーは干渉のリスクなしに異なるモジュールに取り組むことができました。カーネル本体に何が書き込まれるかは私が管理できました。つまり、人材管理とコード管理は、再び同じ設計上の決定につながったのです。人員数を維持するために

Linuxの連携作業には、カーネルモジュールのようなものが必要でした。しかし、設計の観点から言えば、それは正しい選択でもありました。

この意識的で徹底的なモジュール化のパターンは、大規模なオープンソースコラボレーションのほとんどに見られます。Wikipediaのように、モジュール化が容易に実現できそうなプロジェクトでさえ、しばしばモジュール化が求められます。表面的には、Wikipediaは単なる百科事典記事の集合体であり、単純で自然なモジュール構造を備えています。文章は自然に異なる記事に分割されています。しかし、この表面的なモジュール化は全体像の一部に過ぎません。百科事典の執筆には、記事の編集以外にも多くの作業が必要であり、その複雑さはWikipediaの構造に反映されています。おそらく最も単純な例は、すべてのWikipedia記事に「トーク」ページがあることでしょう。Wikipediaのトークページが何か分からない場合は、WebブラウザでWikipediaの「地質学」の記事 (<http://en.wikipedia.org/wiki/Geology>)を開いてみてください。ページ上部に「議論」というタブがあります。このタブをクリックすると、「地質学」の記事のトークページに移動します。ここでは、Wikipedia 編集者間で記事に関する議論が行われます。記事の欠点に関する議論、記事の改善方法に関する議論、さらには記事がそもそも存在すべきかどうかに関する議論まで行われます。このようなトークページは、Wikipedia が正常に機能するために不可欠でありながら、記事ページでは実行できない多くのタスクに関する会話の場となっています。トークページ以外にも、Wikipedia には特定のタスクに特化したさまざまな特別ページがあります。たとえば、「村のポンプ」ページは、Wikipedia のポリシー、技術的な問題などについて議論するためのものです。Wikipedia から削除が検討されている記事の一覧ページもあります。多くの Wikipedia ページは、Wikipedia コミュニティ自体にのみ関連するトピックを扱っています。これらのページの中には面白いものもある。1,181問の質問でウィキペディア中毒かどうかを判定するテスト（全テストを進んで受けた人なら、答えは明らかに「イエス」だと思う）、奇妙なタイトルの記事一覧（「22.86 Centimetre Nails」（残念ながら現在は削除されているバンド「ナイン・インチ・ネイルズ」のメートル法バージョン）など）など。他にもいろいろある。悲しいページもある。亡くなったウィキペディアンの一覧ページがあり、そのユーザーページへのリンクが掲載されている。そこには友人や家族の悲しみに暮れるコミュニティがよく見られる。ウィキペディアは百科事典ではない。それは仮想都市であり、世界への主な輸出品は百科事典記事だが、独自の内部生活を持っている都市である。トークページ、コミュニティページ、そして

記事自体は、Wikipedia内の重要なタスクを反映しており、百科事典運営という膨大な課題を多くの小さなタスクに分割するのに役立ちます。そして、うまく運営されている都市と同様に、この区分は中央委員会によって事前に決定されたものではなく、Wikipediaの「住民」、つまりWikipediaを執筆する編集者のニーズと要望に応じて、有機的に生まれたものです。

この意識的で徹底的なモジュール化のパターンが用いられなければ、オープンソースのコラボレーションはスケールしません。例えば、Wikiとオープンソースのアプローチを用いて良質な小説を書こうとする試みは数多く失敗してきました。中でも注目を集めたのが、2007年の2月から3月にペンギン出版社が実施した「ミリオン・ペンギンズ」プロジェクトです。このプロジェクトは、作家を募集し、Wikiソフトウェアを用いて共同で小説を執筆するというものでした。参加人数（1,500人）から判断すると、このプロジェクトは成功と言えるでしょう。しかし、参加者たちは効果的に共同作業を行うことができず、文学作品としては失敗作に終わりました。プロジェクト初期、コーディネーターの一人であるジョン・エリックは、「教皇のティアラが語る、宇宙を舞台にしたアフリカの忍者を狙うロボットゾンビの暗殺者のような作品にならない限り、私は満足だ」と記していました。しかし、実際の小説ははるかに奇妙なものでした。雰囲気を感じていただくために、短いサンプルをご紹介します。

その日は散歩なんて無理だった……泳ぐことはできるかもしれないが、散歩は無理だった。アーティーはクジラ、正確にはザトウクジラだった。少なくともこの瞬間は。晴れた日だったので、アーティーはサングラスをかけていただろうが、クジラである彼には耳がないので、サングラスがなかなか外れなかった。それでも構わない、少なくとも自分は若くて強い、と彼は思った。

ペンギン社がこの実験を行った理由は容易に理解できる。ウィキは百科事典だけでなく、素晴らしいマペット・ウィキ (muppet.wikia.com) から米国諜報機関のインテリペディア (残念ながら公開URLはありません!) まで、多くの参考資料の作成に効果的に利用されてきた。表面的には、小説は百科事典やその他の参考資料と非常によく似ている。しかし、百科事典を作成するのに十分なモジュール性は、一流の小説を書くには不十分だ。なぜなら、いくつかの重要なタスクが未完了のままになるからだ。小説のすべての文は、他のすべての文と潜在的な関係を持ち、小説内の各ストーリーアークと潜在的な関係を持ち、そして全体のストーリーアークと関係を持っている。優れた作家はこれらの関係をすべて認識し、それらを利用して共鳴と共感を生み出す。

物語の異なる部分間の関係を強化し、不協和音や矛盾を避けることが重要です。良い小説を書くために、常に取り組むべき課題の一つは、今書いている文章を小説の他の部分と比較し、それが小説全体を引き立てているのか、それとも損なっているのかを考えることです。共同執筆を成功させるには、誰かがこうした関係性をすべて把握しておかなければなりません。しかし、Wiki はこうした関係性を把握するという問題を自然に解決する手段を提供していません。そのため、Wiki は参考文献に掲載されるような短く独立した記事には適しているかもしれませんが、長い文章を共同執筆するための媒体としては機能しません。とはいえ、共同執筆技術はまだ初期段階です。近い将来、Wiki とあまり変わらない、小説の異なる部分間の関係性を簡単に把握できるオンライン共同執筆技術が開発されると私は確信しています。それは、オープンソースの共同執筆によって書かれた最初の良質な小説への大きな一歩となるでしょう。(もちろん、これらの関係を管理することは課題の一部にすぎません。次の章では、さらに多くの困難に遭遇します。)

Wikipedia や類似のリファレンス wiki が、モジュール化のために慎重に選択されたページ構造を使用する方法について説明しました。モジュール化へのもう 1 つのアプローチは、Firefox ウェブ ブラウザーの作業が編成される方法で示されています。Firefox に詳しくない方のために説明すると、Firefox は Internet Explorer ウェブ ブラウザーの人気のある代替です。Linux と同様に、Firefox はオープン ソース プロジェクトです。ただし、Firefox の開発者は、Linux や Wikipedia とは異なるアプローチを使用して作業を編成しています。特に、彼らは作業の多くを問題追跡ツールと呼ばれるツールを使用して編成しています。問題追跡ツールの仕組みを理解するには、自分がバグに遭遇した Firefox ユーザーだと想像してください。たとえば、私がときどき気付くバグは次のとおりです。Firefox のブックマークの一覧で、ブックマークの横にある小さな画像 (ファビコンと呼ばれます) が混在することがあります。つまり、ブックマークの横に間違った画像が表示されたり、他のサイトのランダムなファビコンが何の理由もなく表示されたりします。なぜこんなことが起こるのか全く分かりません。優れた製品の中では些細な問題に過ぎませんが、少し混乱させられます。とにかく、このバグに気づいたあなたは、Firefox プロジェクトに報告することで協力しようと決意しました。報告するには、Firefox のオンライン問題追跡システムにアクセスします。これは、発生している問題の説明や、バグ修正に取り組む人にとって役立つと思われるその他の詳細情報 (バグに気づいた時に閲覧していた Web ページ、使用しているオペレーティングシステム、Firefox のバージョンなど) を入力できるウェブサイトです。

これを想像してみたいとお願いしましたが、実際には想像する必要はありません。Firefoxの問題追跡システムを確認したところ、Bobという人物が2008年1月11日に、まさに私が今説明した通りのことをしていました。

ボブがファビコンのバグに関する報告を提出すると、その報告はすぐに問題追跡システムの「Hot Bugs (ホットバグ)」リストに送られました。Hot BugリストはFirefox Central Stationと呼ばれ、Firefoxの開発に携わる多くの開発者がこのリストを注意深く見守っています。彼らは、自分が修正に貢献できそうなバグを見つけると、すぐに参加します。ボブのファビコンのバグについても、すぐに議論スレッドが立ち上がりました。議論を読み進めていくと、このバグは驚くほど巧妙で、実際にはFirefoxのコードに複数の問題が絡んでいることがわかります。最終的に、このバグが完全に修正されるまでに、数十人の人々が関わることになりました。

問題追跡システムはバグ修正のためだけでなく、新機能の提案や実装にも活用されています。Firefoxに新機能を提案したい場合は、問題追跡システムにアクセスして機能を提案するだけで、会話が始まります。十分な数のユーザーがその機能を求めれば、誰かがコードを作成し始めます。このように、問題追跡システムは、それぞれに専用の会話スレッドが付随する、様々な問題やアイデアの寄せ集めのような役割を果たしています。

これは作業をモジュール化する優れた方法です。参加者の注意を単一の問題に集中させることで、問題追跡システムが会話の範囲を制限し、参加するために人々が費やす必要のある注意の量も制限します。Polymathプロジェクトのように以前の議論全体を理解する必要があるのでなく、参加者は目の前の問題を理解するだけで済みます。これにより、より多くの人に関与できるようになり、コラボレーションはより幅広い専門知識の恩恵を受けることができます。言い換えれば、徹底的かつ意識的なモジュール化のメリットは、誰もプロジェクト全体を詳細に理解する必要はなく、自分の最も得意な分野に貢献できることです。全体的な効果は仮想造船所のようなものです。さまざまな人々があちこちに散らばり、船のさまざまな部分に個別の努力で貢献しています。それぞれの規模と範囲は控えめですが、全体的な成果は注目に値します。

もちろん、モジュール化は物語の終わりではありません。それは単に、コラボレーションのスケールアップに役立つ単一のパターンに過ぎません。モジュールユニットは、注意の原子であり、そこから注意のアーキテクチャが構築されます。これまで見てきたように、理想的なのは、各参加者が自分の比較優位が最も高いタスクを認識し、最大の貢献を行えるように、これらのモジュールユニットが配置されるアーキテクチャを構築することです。ブログ、Wiki、問題追跡ツールなどの既存のツールは、これを不完全にしか実現していません。しかし、長期的には、徐々に

注意の設計科学の出現。これは、利用可能な専門家の注意を最大限に活用するツールの構築に役立ちます。

では、Linuxはどうなったのでしょうか？Linus Torvalds氏は、Linuxカーネル開発者コミュニティ全体をフォローしようとする試みをとうの昔に諦めました。2000年5月、Linuxカーネルメーリングリストに、Torvalds氏が自分の投稿に返信してくれないと不満を述べた投稿がありました。Torvalds氏は次のように返信しました。

Linuxカーネルのすべての投稿を読む人はいないということに注意してください。実際、カーネルの実際の作業に時間をかけられると期待している人は、半分も読まないでしょう。アラン・コックス（トーバルズ氏の部下の一人）は例外ですが、彼は人間ではなく、スウォンジーの地下洞窟で働く約1000人のノームです。ノームたちも、個々の投稿をすべて読むわけではありません。彼らはただ、とてもうまく連携して作業しているだけです。

とにかく、私たちの中には、あまりにも多くのメールが届きすぎて、個人的なメールを全部読むことさえできない人もいます。私は最善を尽くしています。

トーバルズ氏がその記事を書いた後、Linuxは大きく成長しました。今では、超人的な存在であるアラン・コックス氏でさえ、Linuxで行われているすべての作業を追跡できる人はいません。Linuxのコラボレーションの素晴らしい点は、組織化されているため、誰もその必要がないことです。

## 根本的な再利用と情報コモンズ

モジュール性は重要ですが、オープンソースの根底には、さらに基本的なコラボレーションのパターンがあります。それは、オープンソースプログラマーが互いの成果物を再利用し、修正できる能力です。これはあまりにも明白で、考えるまでもないかもしれませんが、驚くべき結果をもたらします。当然のことながら、明らかな影響は、プログラマーがゼロから始める必要がなくなり、他者の成果を基に段階的に改善していくことができることです。事実上、オープンソースプログラマーは、公開された情報共有の共有地を構築しているのです。この共有地は特定の場所にあるわけではなく、インターネット上の無数の場所に分散されているすべてのオープンソースコードで構成されています。これにより、動的な分業が可能になり、ある人が書いたコードが、後に面識のない他の人々によって改良されることもあります。

彼らが聞いたこともないような専門知識やニーズも存在します。情報共有がより豊かになればなるほど、コラボレーションの基盤はより強力になります。

オープンソースプログラマーのコミュニティは、驚くほど活発で豊富な情報共有地を作り上げています。ソフトウェア企業SAPの2人の科学者、アミット・デシュパンデ氏とディルク・リーレ氏による調査によると、この共有地には公開されているコードが現在10億行以上あり、年間3億行以上のペースで増加しています。ホームムービーに特殊効果として炎を加えたいですか？そのためのオープンソースソフトウェアパッケージがあります。家庭用ロボット望遠鏡を制御したいですか？お使いの望遠鏡の種類によっては、そのためのオープンソースソフトウェアがあるかもしれません。オープンソースソフトウェアは、想像を絶するほど幅広いタスクを実行できます。

この豊富な情報共有の出現は、プログラマーの仕事の仕方を根本的に変えました。以前は、プログラマーはプログラムをほとんどゼロから書いていました。彼らのヒーローは、腕の悪いプログラマーが何ヶ月もかけて書くようなプログラムを、数日でササッと仕上げられる人たちでした。当時どのようなスキルが評価されていたかを知るために、現代コンピューティングの偉大な先駆者の一人であり、コンピュータサイエンスの最高榮譽であるチューリング賞を受賞したアラン・ケイの逸話を考えてみましょう。これは、もう一人のコンピューティング界の伝説であり、チューリング賞を受賞したドナルド・クヌースのプログラミング能力を称賛する逸話です。

1960年代後半、スタンフォード大学で人工知能プロジェクトに携わっていた頃、毎年感謝祭になると、ベイエリアの研究プロジェクトに携わる人たちとプログラミングコンテストを開くのが恒例行事でした。賞品は七面鳥だったと思います。

[人工知能の先駆者、スタンフォード大学のジョン教授]

マッカーシーは問題をでっち上げていました。クヌースが参加したある年、彼はプログラムの実行開始時間とアルゴリズムの実行時間の両方で優勝しました。しかも、最悪のシステムでそれをやってのけたのです。そして、基本的に他の全員を圧倒したのです。

今日、プログラミングは変化しました。今日、優れたプログラマーとは、単に問題をゼロから素早く解決できる人だけではありません。優れたプログラマーとは、情報の達人でもある人です。

コモンズに精通している人とは、問題解決を依頼された際に、コモンズから抽出したコードを素早く組み立て、適応させる方法を知っている人、そしてゼロから追加コードを書く必要とのバランスを取れる人です。このような達人は、他者の成果物を基に、他の能力の低いプログラマーよりも迅速かつ確実に問題を解決できます。これは一種の受動的なコラボレーションであり、情報コモンズが拡大するにつれてその効果は高まります。今日のプログラマーは、コードを1行も書く前に、何千人ものプログラマーの成果物を基に構築していることがよくあります。「優れたプログラマーはコードを書くが、偉大なプログラマーは他人のコードを再利用する」とよく言うプログラマーもいます。

プログラミングの世界では、情報コモンズは1990年代初頭、インターネットの普及とともに急速に普及しました。しかし、再利用と情報コモンズという概念は、より原始的な形で、科学の分野で何世紀も前に開拓されていました。誰かが科学的発見、例えば、 $E = mc^2$ という式を含むアインシュタインの有名な論文を発表すると、他の科学者は、元の導出を引用するだけで、その結果を自身の論文で再利用できます。これにより、科学者は以前の研究を繰り返すことなく、その研究を基に研究を進めることができます。引用は、元の発見者を称えとともに、証拠の連鎖におけるリンクを提供します。誰かが $E = mc^2$ の理由を知りたい場合は、引用をたどってアインシュタインの元の論文を見つけるだけで済みます。その結果、現代のプログラミングの世界と同様に、偉大な科学者とは、自然に対する深い洞察力を持つだけでなく、情報コモンズ、つまり既に発表されている科学的知識を熟知し、その知識を基に研究を進める能力も備えた人物なのです。この意味で、科学は情報共有の上に築かれた一つの大きな協力関係なのです。

科学における引用に基づく情報共有は強力ですが、例えばWikipediaやLinuxのようなプロジェクトにおける矢継ぎ早な再利用パターンと比較すると、扱いにくく、処理速度も遅いです。WikipediaやLinuxのようなパターン、つまり他人の文章を逐語的に再利用しながらも、あちこちで多少の改良を加えたパターンを使った科学者は、おそらく元の著者から憤慨した（あるいはそれ以上の）反応を受けるでしょう。しかし、こうした改良は多くのオンライン共同作業の生命線であり、非常に迅速な反復的な改善を可能にし、人々は既に知られていることを蒸し返すのではなく、前進することだけに集中します。中程度に活発なWikipediaの記事は、1週間で12人の異なる人々によって20回から30回修正されることがあります。多くの科学分野では、同様のアイデアの蓄積には何年もかかるかもしれません。Polymathプロジェクトのようなプロジェクトは、従来の科学における累積的な構築プロセスを加速させ、科学者が迅速に構築できる共有スペースを作り出します。

互いのアイデアを共有する。引用は、17世紀の技術で構築できた情報共有の場を構築するための最も強力な手法と言えるかもしれない。しかし、ポリマス・プロジェクトが示すように、そして後ほど詳しく見ていくように、現代の技術はより優れた方法を可能にしている。

## MathWorksコンペティション

1998年、MathWorksというソフトウェア会社が、世界中の誰でも参加できるコンピュータプログラミングコンテストを年2回開催し始めました。コンテストごとに、MathWorksは制限のないプログラミング問題を出題します。コンテストの様子をつかむために、1998年の最初のコンテストで出題された問題を考えてみましょう。CDパッキング問題と呼ばれる問題です。これは、長い曲リストが与えられたときに、74分間のCDにできるだけ近いサブリストを選択するプログラムを作成するというものです。たとえば、プログラムにピンクフロイドのバックカタログから曲を選択するように要求するとします。プログラムを実行すると、CDに35秒の余裕が残る曲のリストがカタログから見つかります。しかし、プログラムに曲を選択するもっとよい方法があれば、CDに15秒しか残っていないことに気づくかもしれません。

CDパッキング問題は人為的に思えます。CDを可能な限り満杯に焼きたいというニーズを持つ人は、そう多くないでしょう。しかし、この問題はまさに多くのプログラマーが好んで取り組む類のもので、簡単に理解できるシンプルな問題でありながら、様々なアプローチが可能です。MathWorksの他のコンテストと同様に、最初のコンテストも非常に人気があり、世界中から100人以上の参加者が集まりました。

MathWorksコンテストにエントリーされたすべてのプログラムには、プログラムの実行速度（高速なプログラムほど高得点）と問題の解決精度の両方を反映したスコアが与えられます。CDパッキングの場合、CDの容量に近づいたプログラムほど高得点が与えられました。

出場者は、1週間にわたるコンテスト期間中いつでもプログラムを提出できます。複数の作品、あるいは同じ作品の複数のバージョンを提出することも可能です。作品は提出後すぐに自動的に採点され、スコアはすぐにリーダーボードに掲載されます。

(自動採点の方法について、後ほど詳しく説明します。)

リーダーボードの上位に近づいた人は、たとえ短期間であっても称賛的となります。そのため、応募者は週末まで待つのではなく、1週間を通して応募を受け付けます。コンテストの総合優勝者は、コンテスト終了時にリーダーボードのトップにいた人です。

MathWorksのコンテストが特別なのは、誰かがエントリーを提出するたびに、そのプログラムのコードが即座に他の人にダウンロードされ、再利用できるようになることです。つまり、誰でも他の人のコードを「盗み」、改良を加えて自分のコードとして再提出すれば、リーダーボードで他の人を追い抜くことができます。このように他の人のコードを再利用できるということは、驚くべき結果をもたらします。上位のプログラムは、ごくわずかな変更によって絶えず調整されており、以前のエントリーのコード1行を変更するだけの場合も少なくありません。変更は目まぐるしく、参加者の中には、瞬時のフィードバックと、リーダーボードのトップまであと一歩という実感に駆り立てられ、夢中になる人もいます。

ある参加者はこう書いています。

すっかり夢中になり始めました。3人の子供の父親であるにもかかわらず、家ではコンテストの仕事がフルタイムの仕事でした。毎日、仕事の後10時間くらい働いていました。木曜日には、(仕事に)真剣に取り組めないことがはっきりしたので、金曜日は休みました。

これは、コンピューターゲームを中毒性のあるものにする、素早いフィードバックサイクルに似ています。少しの改善を試みることはいつでも可能です。それが常に良いことかどうかは議論の余地がありますが(引用した出場者はコンピューターから少し離れる必要があるように思えます)、この絶え間ない集中力は驚くべき結果を生み出します。

コンテストの経過は、[図4.2のグラフに鮮明に示されています](#)。横軸は時間、縦軸はスコアです。CDパッキング問題では、スコアが低いほど良いです。グラフ上の各点は、コンテストへの参加作品を表しています。コンテスト中にスコアが劇的に低下したため、縦軸のスケールが変更されました。つまり、上のスコアは下のスコアの数百倍も高いのです。実線は、ある時点における最高スコアを示しています。ご覧のとおり、線には時折大きな変化が見られます。これは、最高スコアを大幅に向上させる画期的なアイデアを示しています。このような画期的なアイデアの後には、通常、主要なアイデアに多くの小さな調整を加える期間があります。

エントリーして、プログラムをさらに最適化する小さな改善点を見つけ、最高のスコアを獲得します。

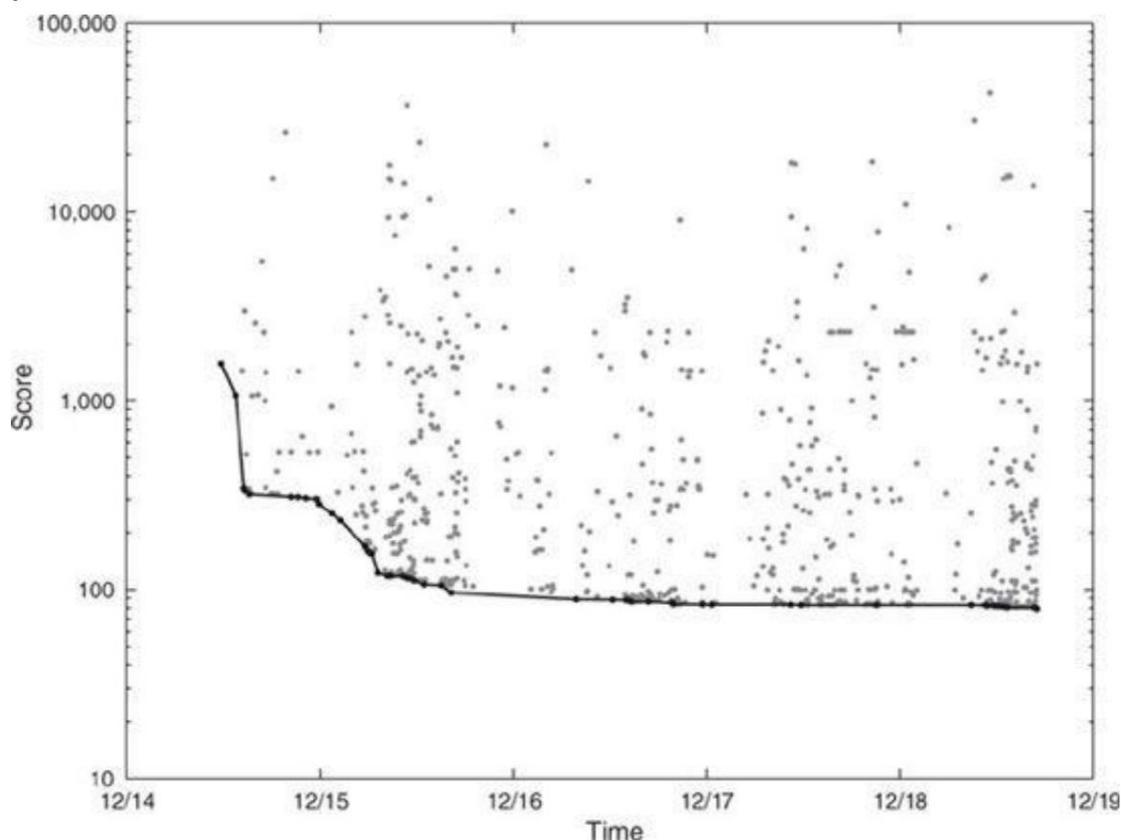


図4.2. MathWorksプログラミングコンテストにおけるスコアの推移。スコアが低いほど優秀です。出典 :Copyright 2011 The MathWorks, Inc. 許可を得て使用。図を提供してくれたNed Gulley氏に感謝します。

初期の最優秀作品と最終的な優勝作品の違いは劇的です。CDパッキングコンテストでは、初期の最優秀作品は実行速度が速かったものの、CDに6分間の未使用領域が残りました。優勝作品はほぼ同速度で実行されましたが、未使用領域はわずか20秒で、約20倍の改善が見られました。このコンテストは、数十件の個別の応募作品から少なくとも9人の貢献を得ています。MathWorksコンテストは、コンテストでありながら、多くの点で大規模な共同作業の場となっています。コンテスト主催者のネッド・ガリー氏は、優勝作品について次のように述べています。「地球上の誰一人として、このような最適化アルゴリズムを書くことはできませんでした。しかし、コンテストの最後に現れたのは、世界中から集まった、ほとんどが初対面の人々によって、まるで何もないところから生み出されたかのようなものでした。」これは偶然の産物ではありません。CDパッキングコンテストは、これまで開催されてきた20以上のMathWorksコンテストの最初のものでした。どのコンテストでも、同じように、徐々に進化を遂げています。

その構築は、おそらくどの競技者の能力も超えているプログラムです。

## マイクロコントリビューション

MathWorks のコンテストは、オンライン コラボレーションを拡大するために活用できるパターン、つまりマイクロコントリビューションを鮮やかに示しています。MathWorks のコンテストで最も一般的な応募作品は、以前の応募作品のコードを1行だけ変更する作品です。つまり、誰かが参加して以前の応募作品（おそらくは他人の応募作品）のコードを1行だけ変更し、それを自分の作品として再提出するのです。次に多いのは、2行だけ変更する作品です。このように、参加者同士が競い合っているにもかかわらず、上位作品の進化はまるで会話のようで、リーダーシップのバトンが参加者から次の参加者へと渡されるにつれて、多くのやり取りが繰り返されます。これは、さまざまな人が自分の能力を最大限に発揮して貢献することで、時間の経過とともに徐々に改善が進む創造的なアイデアの交換なのです。

マイクロコントリビューションの同様のパターンは、多くのオンラインコラボレーションで用いられています。Wikipediaでは、記事への編集は1行のみを変更するのが一般的です。Linuxでは、貢献は1行のコードのみを変更するのが一般的です。ソフトウェア企業SAPの2人の科学者、オリバー・アラファト氏とディルク・リーレ氏による研究では、このパターンは極めて一般的であることが示されました。ほとんどのオープンソースソフトウェアプロジェクトでは、最も一般的な変更は1行のコードのみであり、次に多いのは2行の変更、といった具合です。Polymathプロジェクトでは、プロジェクトリーダーのティム・ガワーズ氏が参加者に対し、各貢献において1つのアイデアのみを共有し、独自にアイデアを発展させようとする誘惑に抵抗するよう求めました。

マイクロコントリビューションは貢献へのハードルを下げ、より多くの人々の参加を促し、また、一人の人間が貢献できるアイデアの幅を広げます。結果として、コラボレーションに利用できる専門知識の幅が広がります。世界チームの一員で、決定的な26手目を貢献したヤシャを思い出してください。ヤシャは一人でカスパロフと対戦していたら、途方に暮れていたでしょう。しかし、世界チームにとってヤシャの小さな貢献にアクセスできたことは非常に役立ち、おそらく不可欠でした。小さな貢献は、人々がアイデアや洞察を刺激するからです。

自分だけでは考え出せないが、他の人に刺激を与えることができるアイデアを共有します。PolymathプロジェクトやMathWorksのコンペティションでアイデアに行き詰まった参加者は、数時間待つだけで、刺激となり挑戦を促してくれる新しいアイデアを待つことができました。あるいは、アーカイブを掘り下げて、古いアイデアから新たな刺激を得ることもできました。このように、マイクロコントリビューションは活気のあるコミュニティの構築に貢献し、何かが起きている、進歩が遂げられている、たとえ自分が行き詰まっても、他の人々が物事を前進させているという感覚を生み出します。つまり、マイクロコントリビューションは強力なコラボレーションパターンです。なぜなら、小さな貢献によって、コラボレーションは、そうでなければ不可能だったであろう、はるかに幅広いアイデアを迅速に探求できるようになるからです。

## スコアは専門家の調整のシグナルとなる 注意

先ほど、MathWorksコンペティションへの応募作品は提出後すぐに自動的に採点されると申し上げましたが、その方法については簡単に触れました。あなたがコンペティション主催者の一人だと想像してみてください。参加者の一人がプログラムを提出したとします。どのように採点すべきでしょうか？

当然のことですが（そして実際に行われている方法でもあります）、いくつかのテスト入力でプログラムを実行することです。たとえば、ビートルズのカタログ、ジャズの曲集、ダンスミュージックのコレクションという3つのテスト入力で試してみるとします。最初の実行では、プログラムはビートルズのカタログから選択した曲でCDを埋めようとし、2回目の実行ではジャズコレクションの曲を使用し、3回目の実行ではダンスコレクションの曲を使用します。次に、プログラムの実行速度と、3つのテスト入力のそれぞれでCD全体をどれだけうまく埋めたかに基づいて、プログラムにスコアを付けます。もちろん、主催者がこれを手動で行う必要はありません。エントリーが提出されるとすぐにすべて自動的に実行されるため、スコアはすぐに計算されます。唯一の注意点は、この方法が機能するためには、主催者がテスト入力を秘密にしておく必要があることです。例えば、参加者が自分のプログラムがビートルズのカタログで使用されることを知っていれば、ビートルズのカタログに合わせて特別にカスタマイズすることができ、コンテストの目的が損なわれる可能性があります。しかし、

主催者はテストの入力内容を秘密に保つよう注意しており、提出されるとすぐにエントリーを自動的に採点することができます。

自動採点が重要なのは、参加者が最も効果的な点に集中できるようになるからです。誰かがプログラムを変更してスコアが大きく（あるいはわずかに）向上した場合、他の参加者もそれに気づき、何が変更されたのかを確認します。もしかしたら、その人は素晴らしい新しいアイデアを持っているのかもしれませんが。自動採点によって、参加者数が非常に多い場合でも、プログラマーは互いの優れたアイデアを容易に把握し、自身の専門知識を活用してさらなる改善を行う機会を見つけ、互いにリードし合うことが容易になります。例えば、プログラマーの中には、競技で使用されるプログラミング言語（MATLAB）の細部まで熟知している人もいます。彼らは他の参加者のプログラムを注意深く観察し、MATLABの知識を活用して細かな最適化を行います。MATLABコードのわずか1,2行を変更するだけで効率化が図られ、実行時間がほんの数ミリ秒短縮されることもあります。他の参加者は、他の方法で専門性を高めています。インスピレーションを求めて科学文献を精査する人もいれば、全く新しいアプローチをブレインストーミングする人もいます。また、既存のアプローチを融合させる研究もあります。こうした多様なアプローチが混在する中で、自動スコアリングは市場における価格のような役割を果たし、コンテスト参加者の意思決定に役立つ情報を提供します。MathWorksのコンテストに応募した100人以上の参加者全員と会話をするのは現実的ではありません。100人以上の参加者の声に耳を傾ける時間など誰にもありません。しかし、スコアリングは人々がどこに注意を向けるべきかを適切に判断するのに役立ち、迅速な改善を促進します。

MathWorksスコアは、注意を集中させる方法として完璧ではありません。同じスコア情報が全員に提供されるため、参加者は同じような方法で注意を集中させてしまいます。例えば、誰かがリーダーボードのトップに躍り出れば、多くの参加者はすぐにそのエントリーに注目を向けます。もちろん、ある程度の注意の集中は良いことですが、全員が同じリードに従うと、グループ全体が探索の有望な方向性を見落としてしまう可能性があります。注意をより広範囲に分散させ、専門知識をより適切に配分する、より複雑なシグナル伝達メカニズムを想像してみてください。例えば、MATLABコードの最適化に精通した人々は、全体的な構造は急速に変化しているものの、細部はまだ最適化されていないプログラムに誘導されるかもしれません。あるいは、MATLABコードを使用するプログラムのクラスターを検出する何らかの方法があるかもしれません。

類似したアイデアの融合、異なるアプローチを組み合わせることに興味のある参加者は、この情報を利用して各クラスター内で最適なプログラムを選び出し、それらを融合させることに挑戦することができます。

これらの制限はさておき、MathWorks スコアは注目度の調整に非常に役立ち、ひいては MathWorks のコラボレーションの拡大にも貢献しています。注目を向ける方法として、これはたとえば、どの貢献がフォローアップする価値があるかを判断するために個人の洞察力に依存していた Polymath プロジェクトで利用可能などのメカニズムよりもはるかに効果的に機能します。博学者が最良の新しいアイデアを特定するには、数時間または数日かかる場合があります。これは、特に科学研究の通常のペースと比較すると速いですが、MathWorks スコアの即時性と比較すると遅いです。Kasparov versus the World の状況は Polymath プロジェクトに似ていましたが、Krush の分析ツリーなどのツールが注目度の調整に役立ちました。注目のアーキテクチャがこのように注目を向ける能力が優れているほど、集合知は増幅されます。

## 個人の洞察を集団の洞察に変換する 洞察力

MathWorksスコアは、注意を協調させるだけでなく、個々の参加者の洞察をグループ全体の集合的な洞察へと変換するという重要な役割も果たしました。誰かがプログラムを改善するアイデアを思いつくたびに、それがスコアに反映され、新しいアイデアの価値が参加者全員に即座に明らかになりました。コラボレーションを成功させるには、個々の洞察を集合的な洞察へと変換する何らかの方法が必要です。言い換えれば、コラボレーションは、コラボレーションが何を知っているかを知る必要があるのです。

カスパロフ対世界は、共同作業が個人の洞察を集団の洞察へと不完全にしか変換しない場合に何が起こるかを示しています。これまで見てきたように、世界チームはイリーナ・クルシュとその同僚に頼って、世界チームの優れたアイデアを特定し、公表しました。クルシュの分析を評価し、比較するスキルがなければ、世界チームは優れたアイデアを集約する上ではるかに悪い結果になっていたでしょう。もちろん、クルシュとその同僚が多大な努力を払ったにもかかわらず、彼らのマニュアルは

このアプローチは、MathWorks大会の自動採点ほど迅速でも客観的でもなかった。その結果、世界チームの持つ専門知識の多くが無駄になってしまった。世界チームには多くの経験豊富なチェスプレイヤーが参加したが、その経験を楽しんだプレイヤーもいた一方で、議論の雑音に埋もれてしまい、疎外感を感じたプレイヤーもいた。試合から数年後、ある参加者はオンラインフォーラムに次のように投稿した。

これまでの人生で私が参加した中で、コミュニティが問題を解決するべきではないことの完璧な例として挙げられるものがあるとすれば、それは KvW マッチです (私はこのマッチに熱心に取り組んでおり、マスター (fide [チェス レーティング] 2276) です)。

このような不満が生じたのは、Krush氏と数人の同僚が何千人もの人々の優れたアイデアを手作業で統合していたためです。彼らの努力は目覚ましいものでしたが、当然ながら、その仕事は不完全なものでした。

このことはワールドチームに時折フラストレーションを引き起こし、間違いなくいくつかの機会損失につながりました。これは一般的な原則ですが、コラボレーションによって個人の洞察を集団の洞察へと効果的に変換できればできるほど、そのコラボレーションはより効果的になります。

実際、ワールドチームの個人の洞察を集団の洞察へと変換するシステムは、ゲームの重要な局面で大きく崩壊しました。前述の通り、51手目までゲームはカスパロフとワールドチームの間で一進一退の攻防が続き、どちらにも決定的な優位性はありませんでした。51手目までにカスパロフがわずかに優勢となり、ワールドチームは引き分けを目指して奮闘していました。ところが残念なことに、51手目、ワールドチームのメンバーであるホセ・ウノドスが、マイクロソフトの投票システムを破り、個人的に気に入った一手を不正に投票したと主張しました。しかし、これはKrushをはじめとするワールドチームのトッププレイヤーのほとんどにとって、強い一手とはみなされていませんでした。

投票の結果、ホセ・ウノドスが推奨した手が勝利した。これは、9手目以来初めて、世界チームがクルシュの推奨を指さなかった瞬間だった。この出来事はゲームのバランスをカスパロフに有利に傾け、世界チームの士気を低下させた。11手後、カスパロフが勝利し、チェス史上に残る名勝負の一つは悲しい結末を迎えた。集団が個人の洞察を集団の洞察に変換する方法が崩壊すると、集団知性はもはや機能しなくなる。次章では、いくつかの分野において、このような崩壊が集団知性に根本的な限界を課すことを見ていく。

## 第5章

## 集団の限界と可能性

### 知能

集合知は問題解決の万能薬ではありません。本章では、集合知を適用できる問題と適用できない問題を区別する基本的な基準を特定します。そして、その基準を用いて、なぜ科学的問題が集合知によるアプローチに特に適しているのかを理解します。

この基準を理解するために、まず心理学者のギャロルド・スタッサーとウィリアム・タイタスが1985年に行った実験を見てみましょう。スタッサーとタイタスが示したのは、ある種の問題、つまり政治的決定について議論するグループが、保有する情報を十分に活用できないことがよくあるということです。これはそれほど意外なことではないかもしれませんが。結局のところ、日常的な政治的議論は必ずしも有益な情報をもたらすわけではないからです。しかし、スタッサーとタイタスが示したのは、さらに先を見据えたものでした。グループでの議論は、時に人々の政治的決定を、個人で行った場合よりも悪化させる可能性があるのです。

スタッサーとタイタスは、スタッサーが教員を務めるマイアミ大学の学生自治会長に立候補する架空の候補者3名のプロフィールを作成することから始めました。プロフィールには、学生寮への面会時間や地域の飲酒条例など、学生の関心の高い問題に関する候補者の政策に関する情報が含まれていました。スタッサーとタイタスは、3名の候補者のうち1名が他の2名よりも明らかに魅力的になるように、意図的にプロフィールを作成しました。まず学生にアンケート調査を行い、学生がどのような特性を魅力的だと感じているかを把握し、それに基づいてプロフィールを作成しました。この特に魅力的な候補者に名前を付け、「ベスト」と名付けましょう。

最初の実験では、各学生に3人の候補者全員のプロフィールを配布し、どの候補者を優先するかを尋ねました。予想通り、67%の学生が「ベスト」を選択しました。その後、スタッサーとタイタスは学生を4人ずつの小グループに分け、どの候補者が最有力候補か議論してもらいました。

誰が大統領になるべきか。議論の最後に、学生たちに再び候補者の希望を尋ねたところ、ベスト氏への支持は85パーセントに上昇した。

ここまでは、特に驚くような結果ではありません。しかし、スタッサーとタイタスは実験の2つ目のバージョンも行いました。今回は、各学生が3人の候補者について部分的な情報のみを受け取るようにプロフィールを変更しました。ベストに関する肯定的な情報（学生が好むと予想されるもの）の一部を削除し、望ましくない候補者の1人に関する否定的な情報も一部削除しました。実際、どの部分プロフィールでも、望ましくない候補者の1人がベストよりも優れていることを示唆するようになりました。当然のことながら、これらの部分プロフィールに基づいて候補者を選ぶように求められたとき、学生の61%が望ましくない候補者を好み、ベストを好んだのはわずか25%でした。この後、スタッサーとタイタスは再び学生を4人ずつの小グループに分け、どの候補者が大統領になるべきかを議論させました。しかし、ここで巧妙な点があります。スタッサーとタイタスは部分プロフィールを作成する際に、異なるプロフィールから異なる情報を削除するように注意しました。そのため、各グループの学生は3人の候補者全員に関するすべての情報を保持したままです。このように、各グループはベスト氏を真に最有力候補と特定するために必要な情報をすべて持っていました。ただし、グループ内の全員が3人の候補者について必ずしも同じ情報を持っているわけではないことを学生たちに事前に伝えていた点に留意してください。

さて、この2つ目の実験では、グループディスカッションの後、参加者が知識を共有し、ベストが真に優れた候補者であると認識することで、ベストの得票率が上昇するだろうと思われるでしょう。しかし、実際にはそうではありませんでした。実際には、ディスカッションの後、望ましくない候補者の得票率が61%から75%に上昇しました。ベストの得票率は25%から20%に低下しました。グループは情報を共有していたというより、学生たちの先入観を強化していたのです。言い換えれば、グループディスカッションはグループの意思決定を改善するどころか、悪化させてしまったのです。これは集団的知性ではなく、集団的愚かさによる結果でした。

一体何が起こっていたのでしょうか？集団が集団知性を活用して、グループ内のどの個人よりも優れたパフォーマンスを発揮できる例は数多くあります。しかし、スタッサー＝タイタスの実験は、議論によってグループのパフォーマンスが平均的なメンバーよりも悪くなる場合があることを示しています。さらに、スタッサー＝タイタスの実験は、集団心理学におけるより広範な発見の一部であり、グループでさえも、

小規模なグループや専門家のグループでは、集合的な知識を活用できないことがよくあります。

例えば、1989年に行われたオリジナルのスタッサー・タイタス実験の追跡調査では、グループディスカッションが記録され、実験者はグループがどのように決定に至ったかをより深く理解することができました。その結果、グループは利用可能な情報をすべて調べるのではなく、ほとんどの時間を共通して持っている情報の議論に費やしていることがわかりました。そのため、例えば、ベストが（例えば）寮の部屋への訪問に関して不人気な立場を取っていることを数人が全員知っていた場合、その事実について比較的長い議論が行われる可能性が高く、その情報は議論の中で再び言及される可能性が高くなります。しかし、グループの誰かが候補者について独自の情報、つまりその人だけが知っている情報を持っていた場合は、その情報についての議論は通常、形式的なものでした。これは重要でした。なぜなら、オリジナルのスタッサー・タイタス実験では、ベストに関する否定的な情報はグループの複数のメンバーによって共通して共有されていることが多く、肯定的な情報はメンバーの1人だけが持っていることが多かったからです。

1996年には、別の追跡実験が行われました。今回は教育病院で、患者へのインタビューのビデオクリップに基づいてグループに医学的診断を下してもらいました。ここでも情報は部分的でした。グループのメンバーはそれぞれ、ビデオインタビューの一部しか見ていなかったのです。判断を下すグループには、研修医、インターン、学生という、立場の異なる3人が参加していました。驚くべきことに、しかしおそらく驚くことではないのですが、グループは高い地位にある研修医が持つ独自の情報に、はるかに多くの注意を払いました。インターンと学生が持つ独自の情報は、無視される可能性ははるかに高かったのです。

これらの研究をはじめとする多くの研究は、集合知の現状を暗い影で照らし出しています。集団は往々にして、集合知をうまく活用できていないことが示されています。集団は共通して持つ知識、つまり集団内で地位の高いメンバーが持つ知識に焦点を合わせ、地位の低いメンバーの知識を無視しがちです。そのため、個人の洞察を集団全体で共有できる集合知へと変換することができません。

集合知を使おうとしているのなら、それは悪い知らせです。

## 集合知の限界

なぜPolymath Project、Kasparov versus the World、MathWorksコンペティションといったプロジェクトは成功しているのに、Stasser-Titusや関連実験のグループは成績が振るわないのでしょうか？より正確に言えば、成功したプロジェクトのグループは個々の優れた洞察を集団的な洞察へと変換できたのに、Stasser-Titusや関連実験のグループはなぜこの変換に失敗したのでしょうか？この違いは、単にそれぞれのケースで用いられたプロセスの違いによるものなのでしょうか？それとも、議論されている問題の性質上、改善されたプロセスでは解決できないような、より根本的な違いがあるのでしょうか？

これらの質問に答えるために、ちょっとした頭の体操を考えてみましょう。このパズルは言葉で説明しますが、視覚的に理解できるものなので、次のページの図解とキャプションを参考にするとう理解が深まるかもしれません。8×8のチェス盤が与えられ、1×2のドミノで2つのマス目（左下と右上）だけを覆うように配置してください。あなたはこれができますか？できるとしたら、どのように？

もしそうでないなら、なぜですか？ドミノを積み重ねたり、壊したり、ボードの端からドミノをはみ出させたりすることは禁止されています。パズルの記述はすべて通常の方法で解釈されます。

さらに簡単にするために、各ドミノがボード上の隣接する2つのマス目をカバーすることも要求します。斜めに配置されたドミノは許可されません。

ほとんどの人は、これを簡単なパズルだとは思わないでしょう。しかし、読み進める前に数分間格闘してみる価値はあります。もし格闘して、想像上の（または実際の）ドミノをチェス盤の上に並べようとしたら、どんなに頑張ってもできないことに気づくでしょう。まるで、成功を阻む目に見えない障害物があるかのようです。実際、要求された通りに盤を覆う方法はありません。その理由は次のとおりです。重要なのは、盤のどこにドミノを置いたとしても、合計で1つの黒いマス目と1つの白いマス目を覆うということに気づくことです。つまり、ドミノを2つ置くと、合計で2つの黒いマス目と2つの白いマス目が覆われることになります。

ドミノが3つ置かれるということは、黒マス3つと白マス3つが覆われることを意味します。以下同様です。ドミノを何個置いても、黒と白のマス目の合計は同じです。ただし、チェス盤の左下と右上のマスが両方とも黒であることに注目してください。そのため、これらのマスだけが覆われる状況に到達するには、

覆われていない場合、32個の白マスと30個の黒マスを何とか覆う必要があります。これは不等数なので、不可能です。

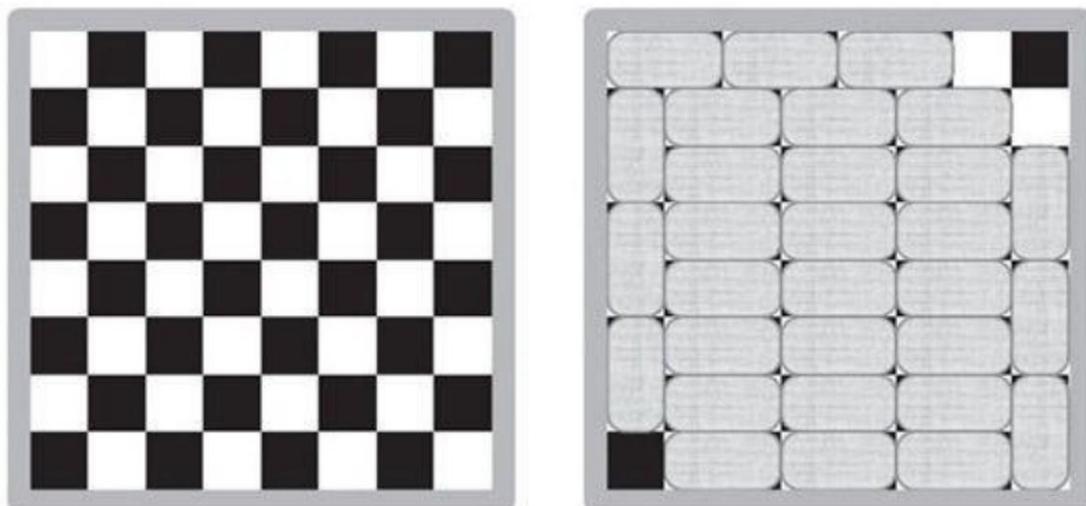


図5.1.このパズルは、左図のように8×8の空のチェス盤から始まります。チェス盤を1×2のドミノで覆い、左下と右上のマス目だけを覆わない状態にすることは可能でしょうか？右図は、この試みが失敗した例です。右上隅の2つのマス目が覆われていません。

ほとんどの人はこのパズルを解くのが難しいと感じますが、解決策を説明されるとすぐに「なるほど、わかった！」と言います。問題を解決する洞察を見分けるのは、その洞察を得るよりもはるかに簡単です。少し言い換えれば、洞察を見分けることの難しさと、そもそも洞察を得ることの難しさの間にはギャップがあります。同様のギャップは、Polymath Project、Kasparov versus the World、そしてMathWorksのコンペティションなどの例にも見られます。MathWorksのコンペティションを考えてみましょう。CDをほぼ満杯になるほどの曲を素早く詰め込むプログラムを書くには、途方もない創意工夫が必要です。しかし、これまで見てきたように、誰かが優れたプログラムを書いたかどうかは簡単に見分けられます。いくつかのテスト入力でプログラムを実行し、高速に実行され、CDにほとんど空きスペースがないことを確認するだけでよいのです。プログラムを書く難しさと評価の容易さの間にあるこのギャップこそが、MathWorksのコンペティションにおける集団的な進歩の原動力となっているのです。チェスでは、貴重な洞察を見抜くのはそれほど簡単ではありませんが、クルシュのような有能なチェスプレイヤーは、たとえ自分では思いつかなかったとしても、特定の局面における非常に洞察力に富んだ分析を認識し、理解することができます。最高の分析は、ドミノパズルのように「ああ、なんて賢いんだ！」という感覚を刺激することもあります。クルシュはチェスをプレイできません。

彼女は一貫してカスパロフのレベルに達しているわけではありませんが、他の人が（少なくとも一時的には）そのレベルでプレイしていることを認識でき、彼らの分析を理解できるほどの実力を持っています。そして、Polymathプロジェクトでは、参加者は他の人が自分を超越する数学的洞察力を持っていることを認識し、それを集合的な知識に組み込むことができました。これもまた、巧みな洞察によって刺激される「なるほど！」という感覚です。

したがって、各プロジェクトでは、有用な洞察を得る能力とそれを認識する能力の間のギャップを利用して、個人の洞察を集団の洞察に変換してきました。

シュタツァー＝タイタス実験における問題は、小グループでの議論が個人の洞察を集団的な洞察へと確実に変換しなかったことです。実験に参加した学生の多くは、知的には、すべての情報を体系的に集約し、そのように構築された統合プロファイルに基づいて意思決定を行うという道筋に間違いなく同意したでしょう。しかし、実際には彼らはそうしませんでした。

そして、状況を考えれば、これは驚くべきことではありません。日常の政治議論において、私たちのほとんどは政治家の立場を包括的に把握して評価しようとはしません。彼らの立場が私たちの価値観や利益とどう関係しているかを考えることに忙殺されているからです。

しかし、シュタツァー＝タイタス実験のグループが、実際にすべての情報を体系的に共有することから議論を始めていたと仮定してみましょう。私の知る限り、その実験はこれまで一度も行われたことはありませんが、結果が劇的に変化したことは間違いのないでしょう。つまり、シュタツァー＝タイタス実験のグループにおける問題は、部分的にはプロセスの失敗にありました。プロセスを改善すれば、劇的に優れた結果が得られるでしょう。しかし、問題はプロセスだけの問題ではありませんでした。たとえグループが体系的に情報を共有していたとしても、学生間では依然として解決不可能な意見の相違があったでしょう。ある学生が飲酒とパーティーが大好きで、別の学生が宗教上の理由で飲酒に強く反対している場合、どれほど優れたプロセスを用いていたとしても、彼らは政治的な選択で決して合意できないかもしれません。

これは、集合知を増幅させるために満たさなければならない根本的な要件への道を示しています。それは、参加者が知識と技術の集合体を共有しなければならないということです。彼らが協働するために用いるのは、まさにこの知識と技術の集合体です。この共有された集合体が存在するとき、私たちはそれを「共有プラクシス」と呼びます。これは知識の実践的応用を意味する「プラクシス」という言葉にちなんで名付けられました。共有プラクシスが利用可能かどうか、集合知をスケールアップできるかどうかを決定します。

共通のプラクシスの例として、大規模なグループがドミノ問題に取り組んでいる場面を想像してみてください。グループ内の誰かがドミノ問題が解決不可能だと判断すると、すぐに他のメンバーを説得することができます。なぜなら、彼らの推論の各ステップは自明に正しいからです。私たちは皆、同じ基本的な推論スキルを共有しているのです。

これは共有された実践の一例です。同様に、数学にも共通の実践が存在します。数学的推論の標準的な方法や数学的な議論に関する規範など、あらゆるものが共有されています。だからこそ、Polymathプロジェクトの参加者は、数学の進歩がいつ達成されたのかを認識し、合意することができたのです。また同様に、MathWorksコンペティションのスコアは、暗黙のうちに共有された実践を定義していました。スコアを向上させるプログラムの変更は、参加者にとって進歩であると理解されていました。チェスにおいては、共有された実践は数学やコンピュータプログラミングほど強力ではありません。トップクラスのチェスプレイヤーでさえ、異なる解析の価値について意見が一致しないことがあります。

それでも、強いプレイヤーの間で広く合意されているチェスの知識は大量に存在し、この共有された知識は、ワールドチームの強いプレイヤーが通常、どの分析が最善かについて合意できることを意味します。

これらはすべて、共通の実践が存在する問題の例です。しかし、多くの問題には共通の実践が存在しません。例えば、これまで見てきたように、政治の世界には強力な共通の実践は存在しません。人々は基本的な価値観をめぐって容易に意見の相違が生じます。そして、もし集団がそのような共通の実践を持っていなければ、解決できない意見の相違が生じます。解決不可能な意見の相違が生じると、コミュニティはその意見の相違をめぐって分裂し始め、協力を拡大する能力が制限されてしまいます。

一つの問題、例えばイギリスの田舎の市で牛の体重を推測する問題（[7ページ参照](#)）であれば、それはそれほど重要ではないかもしれません。しかし、[複数の](#)段階を経て協力して問題を解決する場合、このような断片化は協力の規模に根本的な制限を課します。

政治は、確固とした共通の実践が欠如している多くの分野の一つに過ぎません。多くの美術分野においても同様に、創作作品の評価はしばしば激しい論争を巻き起こします。例えば、2つの絵画のうちどちらが優れているかを判断する際に、私たちは自分自身の美的基準を用いますが、それは他の人々が持つ基準とは大きく異なる場合もあります。

同様に、2つの音楽作品のどちらが優れているかについても、意見が分かれるかもしれません。これは、芸術において客観的な基準が全く存在しないという意味ではありません。ビートルズがどこかのボーイズバンドよりも優れていることには、ほぼ全員が同意するでしょう。しかし、

ビートルズをバッハと比較すれば、分別のある人は異論を唱えるかもしれない。この発言で、世界中の音楽通を怒らせてしまったことは間違いない。しかし、肝心なのは、ビートルズがバッハに匹敵するとは信じられないクラシック音楽通と、バッハは既に超えられた伝統に属していると信じているポップミュージック通の両方を怒らせてしまったということだ。こうした伝統が共存すると、2つの伝統に属する人々が協力するのは極めて困難になる。なぜなら、いつ共通の進歩を遂げているのか、合意できる根拠がないからだ。これはそうした分野に対する否定的な判断ではない。偉大な音楽家、画家、政治家は皆、人間の能力の限界に近いところで活動している。しかし、集合知がいつ発揮されるかについては、重要な制約となる。

強力な共通の実践がないのは、政治や美術だけではない。多くの学問分野にもそれが欠けている。英文学批評を考えてみよう。批評家がある日突然、羽ペンを置いてシェイクスピアの共通理解に到達することはないだろう。実際、そのような共通理解に到達すること自体が重要なのではない。そのような分野では、多様な視点は欠点ではなく特徴であり、シェイクスピアを理解する新しい方法は称賛されるべきである。しかし、この多様な視点こそが、大勢の人々から得られる最良の洞察を認識し統合することを困難にしている。そのような共同作業の試みは、必然的に基本的な価値観に関する議論や、貢献を価値あるものにするものは何なのかという疑問に行き詰まってしまう。そのような分野では合意はスケールせず、それが個人の洞察を集団の洞察に変換する能力を著しく制限し、集団知の応用を妨げている。

いくつかの分野は、集合知のスケール化が可能な分野と不可能な分野を分ける境界線付近に位置します。例えば経済学には、貿易がどのようにしてすべての人の生活を豊かにするのか、紙幣増刷は一般的にインフレを引き起こすという考えなど、多くの強力な推論手法があり、多くの経済学者が同意しています。しかし、経済学者の間では、経済学の最も根本的な問題のいくつかについて意見が一致していません。古いジョークにもあるように、「5人の経済学者を同じ部屋に集めれば、6人とも全く異なる意見を言うだろう」のです。

ハリー・トルーマン米大統領は、片腕の経済学者、「一方で」と言えないような経済学者を求めたとされている。経済学には共通の実践が存在するものの、数学、コンピュータプログラミング、チェスといった分野ほど強力ではない。結果として、経済学には集合知の手法では解決できない問題が数多く存在する。それは、金融の数理モデルの研究など、経済学のごく一部の分野に限られる。

経済においては、強力な共有実践が存在します。経済のこうした分野においてこそ、集合知をスケールさせることができるのです。

集団知性を適用する上での課題は、共有された実践の有無だけではありません。他にも多くの実際的な問題があります。例えば、集団思考が挙げられます。集団思考では、グループのメンバーは、アイデアを批判的に評価するよりも、仲良くやっていくことに興味を持つかもしれません。あるいは、グループがエコーチェンバーとなり、メンバー同士が互いの既存の意見を強化するだけになることもあります。一部のグループでは、礼儀正しい行動の基本的な規範が崩壊しています。こうした崩壊は、多くのオープンソースソフトウェアのコラボレーションを破壊し、設計の悪いWebフォーラムを悩ませてきました。こうしたフォーラムは、インターネット荒らしやその他の反社会的行動の温床となる可能性があります。これまでに議論したプロジェクトは、これらの問題や同様の問題を克服してきました。中には見事に成功したもの（Polymathプロジェクト）もあれば、かろうじて成功したもの（World Teamの審議は、礼儀の欠如のために崩壊寸前になることもありました）もありました。同様の問題はオフラインのグループにも蔓延しており、その問題とその克服方法については、ジェームズ・スロウィツキの『群衆の知恵』、キャス・サンスティーン『インフォトピア』、その他ビジネスや組織行動に関する多くの書籍など、多くの著作が出版されています。これらの実践的な問題は重要ですが、多くの場合、適切なプロセスによって解決できます。しかし、プロセスがどれほど優れていても、根本的な分岐点が存在します。それは、共有された実践があるかどうかです。共有された実践がある分野では、集合知を拡大し、設計によるセレンディピティや会話の臨界質量など、問題解決行動の質的な向上を実現できます。共有された実践がない分野では、オンラインツールは同様の質的な変化をもたらしません。

## 科学の共有実践

科学は集合知に非常に適しています。ほとんどの科学分野には、その分野の科学者が共有する強力な技術の膨大な宝庫があります。議論や分析、実験手順が正しいとは何を意味するのかについては、広く合意された基準があります。これは、Polymathプロジェクトで非常に礼儀正しい議論が行われたことで鮮明に示されました。

意見の相違が生じた場合、それは通常、誰かが推論において明らかな誤りを犯したためでした。誰かが恨みを抱くことなくその誤りを指摘すると、指摘者は即座に自分の間違いを認めました。参加者が全く憶測に頼らなかったわけではありませんが、彼らは憶測を憶測であることを明確に示し、それを反駁の余地のない事実として提示することはありませんでした。ほぼすべての重要な問題において、参加者は議論の筋道が正しくて間違っている点、そしてアイデアが有望でそうでない場合について迅速に合意しました。この迅速な合意こそが、協力体制の拡大を可能にしたのです。

科学においてこれらの基準がいかに厳格に守られているかを示す例として、若きアルベルト・アインシュタインの研究を考えてみましょう。彼は今日私たちが知る科学の象徴的存在ではなく、プロの物理学者の職を見つけることができず、スイスの特許庁で働く無名の26歳の事務員でした。その無名の立場から、1905年にアインシュタインは特殊相対性理論に関する有名な論文を発表し、空間、時間、エネルギー、質量の概念を根本的に変えました。他の科学者もアインシュタインの結論を部分的に予測していましたが、特殊相対性理論の完全な帰結を彼ほど大胆かつ力強く示した科学者はいませんでした。アインシュタインの提案は驚くべきものでしたが、その議論は非常に説得力があったため、彼の研究は当時の主要な物理学雑誌の1つに掲載され、ほとんどの主要な物理学者に急速に受け入れられました。ほとんど無名の部外者が登場し、宇宙の仕組みに関する私たちの最も基本的な信念の多くに異議を唱えることができたのは、何と注目すべきことでしょう。そして、あっという間に物理学者のコミュニティは「そうだ、君の言う通りだ」と言ったのです。

別の例として、DNAの構造の発見を考えてみましょう。この発見は、ジェームズ・ワトソンとフランシス・クリックによって、ロザリンド・フランクリンから一部提供されたデータを使用してなされました。3人とも若く無名の科学者でした。ワトソンは24歳、クリックは36歳で、第二次世界大戦中に物理学の短いキャリアと英国海軍本部での勤務を経て再出発したばかりでした。フランクリンは32歳でした。彼らとこの発見を競っていたのは、世界の一流化学者、ライナス・ポーリングでした。10年以上も前、この聡明なポーリングは、後にノーベル化学賞をもたらすことになる一連の発見をしていました。DNAの構造を解読できれば、次の賞も確実に受賞できるでしょう。競争の最中、彼はDNAの構造を発見したと発表し、ワトソンとクリックを大いに驚かせました。しかし、ワトソンとクリックはポーリングの息子、ピーター・ポーリングと話し、父が提唱したDNAの構造を見せてもらいました。驚いたことに、彼らはすぐにポーリングが間違っていたことに気づいた。世界最高の化学者が基礎化学で単純な間違いを犯したのだ。

彼自身の教科書が彼に警告を与えるべきだった。ワトソンとクリックは新たな情熱で研究に戻り、すぐに正しい構造を発見した。それが実現すれば、ポーリングが世界的に有名であったのに対し、ワトソン、クリック、フランクリンが無名であったことは問題ではなくなった。科学界はポーリングの研究を拒絶し、二重らせん構造を世紀の科学的発見の一つとして称賛した。

アインシュタイン、そしてワトソン、クリック、フランクリンの例は、科学における共通の実践の強さを如実に示しています。人生の多くの場面では異例なことですが、科学においては、最も優れた証拠と最も優れた議論を持つ者が勝利を収めることが多く、最も高い名声と権力を持つ者が勝利を収めることはありません。ポーリングは世界を代表する化学者として広く認められていましたが、他の化学者たちもワトソンやクリックと同様に、ポーリングの理論体系が単純に間違っていることに気付くことができました。この強力な共通の実践こそが、科学を集合知に非常に適したものにしているのです。

この強力な共通実践は、科学が単純明快なプロセスであることを意味するものではありません。科学を行う実際の日々のプロセスは、雑然としていて憶測に満ち、誤りと議論に満ちています。科学者リチャード・ファインマンは抑えきれないひらめきと「素晴らしい」アイデアに満ちていましたが、そのほとんどは後に誤りであることが判明しました。彼の伝記作家ジェームズ・グレイクによると、抜け目のない同僚たちは「ファインマンが三度言えば、それは正しい」という経験則を生み出しました。多くの科学者にも同じことが言えます。科学者はしばしば、ある仮説が正しいというわずかなアイデアの匂い、疑念、そしてそれを検証する方法を概説します。最初は漠然としたものが多いですが、徐々に詳細を詰めていきます。実験は多くの場合何度も行う必要があり、科学者が説得力のある証拠に必要な証拠をより深く理解するにつれて、実験設計は徐々に変更・改善されていきます。これらはすべて、多くの憶測や議論、そして誤った出発点を伴う、ゆっくりとしたプロセスです。科学者は徐々に、より確固とした議論と証拠へと進んでいきます。しかし、最終目標は、その分野の共通の実践に沿った一連の議論と証拠です。

これは、バッハ対ビートルズ、あるいは政治的な議論、あるいはシェイクスピアについての議論とは全く異なります。これらの議論では、最終的には基本的な価値観をめぐる根本的な分裂が残る可能性があります。もちろん、科学者が間違っただけ、あるいは誤解を招く、あるいは説得力のない論文を公表することはあります。しかし、たとえある科学者がそのような結果を発表したとしても、他の科学者は実験をやり直して欠陥を見つけたり、議論の欠点を指摘したりすることができます。つまり、彼らは結果をその分野の共通の実践に照らし合わせて再検証し、不十分な点を発見することができるのです。

明確に間違える能力は、前進を可能にする。この意味で、先ほど申し上げたように、科学は既に一つの大きな共同作業であり、共通の証拠と推論の基準によって結びついている。

科学には、共通の実践が存在しない分野、例えば経済学のような分野があるでしょうか。そこでは、問題が非常に困難であるため、その分野は未だに原始科学の段階にあり、共有される知識や技術がようやく現れ始めたばかりです。例えば、物理学における大きな未解決問題の一つは、量子重力理論、つまり量子力学とアインシュタインの重力理論を統合する単一の理論を見つける問題です。これは物理学における最も難解な問題の一つであり、何十年にもわたって優れた頭脳をも翻弄してきました。1980年代には、この問題に対する弦理論として知られるアプローチが注目を集め、徐々に量子重力研究の主流となりました。同時に、はるかに少数の物理学者たちが、量子重力に対する他のアプローチを追求し続けました。近年、異なるアプローチの支持者の間で、一部から「弦理論戦争」と呼ばれる論争が繰り広げられています。多くの物理学者は、弦理論こそが量子重力への唯一の合理的なアプローチだと主張しています。一方、スティーブン・ホーキング、ロジャー・ペンローズ、リー・スモーリンなどは、異なるアプローチも追求する価値があると考えています。驚くべきことに、著名な弦理論家の中には、弦理論以外の理論家を単に間違っているだけでなく、見当違いだと、あるいは愚か者だとさえ一蹴する者がいる。このような根本的な分裂が生じると、大規模なグループがその分裂を越えて協力することはほぼ不可能になる。

集合知は、それぞれの部族内で、共通の実践が存在する場合にのみ適用されます。そして、そのような協力関係は、ライバル部族による妨害から慎重に守られる必要があります。

量子重力の状況は特異です。科学のほとんどの分野では、科学者はある現象について二つの相反する説明を実験と比較し、一方の説明が正しく（あるいは少なくとも実験によって否定されていない）、もう一方の説明が間違っていると気づくことができます。あるいは、ある科学者が他の科学者の実験手順の欠陥を指摘すれば、誰もが「確かにそれは欠陥であり、期待される水準に達していない」と同意するでしょう。しかし、量子重力の場合、研究対象となる現象は非常に遠く離れているため、私たちはまだ実験のやり方を知りません。つまり、すべては依然として理論の域を出ないのです。そして、基礎理論の構築は非常に困難であるため、出発点となる仮定を選ぶことは、美術のように、ある程度個人の好みの問題になっています。こうした極めて特異な状況こそが、共通の実践の発展を妨げてきたのです。対照的に、他のほとんどの科学分野では、確固たる共通の実践が存在します。だからこそ、科学は私たちに集合知を増幅させる素晴らしい機会を与えてくれるのです。

## 科学における集合知の活用

本書のパート2では、オンラインツールを活用して集合知を高める方法、つまりグループを強固にすると同時に、より賢いグループを作る方法について見てきました。パート1の終わりに近づいた今、これらのアイデアを基に、科学分野における集合知を高めるためにオンラインツールをどのように活用できるかを考えてみましょう。個人的な視点から、これらのツールが個々の科学者の日常生活にどのような影響を与えるかを想像してみましょう。以降の章では、これらの夢のいくつかが今日どのように実現され、さらにはそれを超越しているかを見ていきます。また、これらの夢の他の部分が、科学分野における現在の社会的慣習によってどのように阻害されているか、そしてそれをどのように変えることができるかについても見ていきます。

数年後の未来を想像してください。あなたはパサデナにあるカリフォルニア工科大学 (Caltech) で働く理論物理学者です。毎朝、コンピューターの前に座ることから仕事が始まります。コンピューターには、あなたのための支援を求める 10 個のリクエストのリストが表示されます。このリストは、世界中の科学者によって一晩で提出された何百万ものリクエストから、特にあなたのために抽出されたものです。これらのリクエストの中で、これらはあなたが最大の比較優位を持つ可能性が高い問題です。今日、リクエストの 1 つがすぐに目に留まりました。ハンガリーのブダペストに住む材料科学者が、新しいタイプの結晶を開発するプロジェクトに取り組んでいました。プロジェクト中に、非常に特殊な種類の問題、つまり三角格子上をランダムに飛び回る (「拡散」する) 粒子の挙動を解明するという予期せぬ困難が生じました。残念ながら、材料科学者にとって拡散はあまり知らないテーマです。

一方、あなたは結晶についてはあまり詳しくありませんが、拡散の数学に関しては専門家であり、実際、材料科学者を悩ませている問題に類似した研究課題をこれまでにいくつか解決しています。拡散問題について数分間じっくり考えた後、この問題は、あなたがよく知っているが材料科学者はおそらく全く知らない数学的手法に簡単に当てはまると確信しました。

あなたは材料科学者に、彼らの問題に対する解決策の概要を伝えるメッセージを送ります。その後数日間、二人はやり取りを重ね、解決策を具体化し、多くの詳細を詰め、数学的なアイデアを材料科学の言語に翻訳していきます。当初のプロジェクトには多くの作業が残されていますが、重要なボトルネックがあります。

問題は克服されました。あなたの報酬は、幸せな共同研究者になること、最終的には論文の共著者になること、そして結晶の物理学について少し学ぶことと、それが拡散に関するあなたの専門知識とどのように関係するかを知る喜びです。共同研究者の報酬は、拡散問題を解決できるほど専門家になるために費やしていたであろう何百時間もの時間を節約できることです。コミュニティ全体もまた報酬を得ます。あなたの助けにより、問題はそうでなければはるかに迅速かつ低コストで解決され、得られた科学的結果はより強力になり、出版された論文で結果の説明がより明確になります。あなたの比較優位により、誰もが利益を得ます。材料科学者が解決するのに何週間もかかる問題を、あなたはあっという間に解決するスキルを持っているのです。あなたはそれぞれが自分の最も得意なことをすることができ、社会は何千ドルもの節約になります。

このすべてが始まった同じ朝、あなたは上位のリクエストのリストにもう一つ注目すべきリクエストがあることに気づきます。それはインドのバンガロールの学生からのもので、複雑な量子システムをシミュレートするためにコンピューターアルゴリズムを使用する最近の研究について学ぶのに助けを求めています。彼らは地元の専門家を知らず、オンラインの論文で学んでいますが、ところどころ混乱しています。あなたはそのようなアルゴリズムの専門家であり、学生の質問に簡単に答えることができるため、このリクエストを受け取りました。さらに、あなたが特別な専門知識を持つ分野に合わせて、毎週数件の学生からの支援リクエストを通知するようにシステムに設定しました。その後数日間、学生との矢継ぎ早のやり取りが続き、彼らの混乱の多くを解消しました。学生との仕事は、公共のアウトリーチへの貢献を示す統計とともに、あなたの科学活動のアーカイブに自動的に記録されます。

他にもいくつかのリクエストが上位リストに表示されていますが、あなたは手伝う時間がないと判断しました。その中には、材料科学者からのリクエストとほぼ同じ内容だが細部が異なる共同研究のリクエストがいくつかありました。地元の学校からの支援依頼、そしてあなたの過去の論文と論文テーマが重複する学生からの参考資料の依頼もありました。これらのリクエストはすべて、数十人から数百人の他の人の目に触れることになり、そのほとんどはあなたと同じように、リクエストに密接に関連する専門知識を持っています。

回答は任意であり、リクエストはあなたただけに向けられるものではありません。

これらはすべて、毎日寄せられる何百万もの支援要請を優先順位付けするランキングアルゴリズムによって実現されています。これにより、お客様にとって最も関心が高く、比較優位性が高いと思われる要請だけが表示されます。ランキングアルゴリズムは、以下の点を考慮します。

あなたの専門分野、過去にどのようなリクエストに対応してきたか、リクエストを出した人の経歴、そして学生を支援したいという気持ちなどのあなたの希望を考慮してください。リクエストを慎重に選択することで、あなたの仕事の効果を最大限に高めることができます。

世界中で、似たようなパターンが何百万回も繰り返されています。オタワ在住の認知科学者は、特定の錯視が、錯視の一部の色を変えることでどのように抑制されるかを示す実験を再現しようとしています。彼女は研究を始めた当初、元の実験の大まかな理解のみに基づいて、どのように実験を再現するかを考え出そうとしました。順調に進みましたが、時折行き詰まり、そこで他の2つの研究室で行われている実験の様子を示すオンライン動画を参照しました。

それは役に立ったものの、結果の再現にはまだ苦労している。数日間行き詰まった後、昨夜、彼女は助けを求めるリクエストを送信した。錯視と、神経系が目の中の様々な錐体細胞から送られてくる色情報をどのように組み合わせるかの両方に精通した専門家を見つけたいと思ったのだ。今朝、アイオワ州の精神物理学者から連絡があり、修正した配色と、必要に応じて配色を再調整する方法が送られてきた。彼女はすぐに問題を解決し、実験は順調に進んだ。

一方、中国上海の研究所では、ある生物学者が夜遅くまでインフルエンザウイルスの遺伝子配列を解析していました。解析が終わると、彼はオンラインデータベースに問い合わせ、そのウイルスの遺伝子構造を既知のすべてのウイルス株と比較しました。そして、彼の予想通り、これがインフルエンザの新しい亜種であることを発見しました。彼は今後数週間かけて、この新しいウイルスのワクチンを設計する予定です。ワクチンを設計するために、彼は数十のオンラインデータベースから情報を取得するソフトウェアを使用し、ウイルス、その遺伝子、それらが産生するタンパク質、そしてそれらのタンパク質の効果に関する何千もの質問を事実上尋ね、答えを受け取ります。しかし、これまでの例とは異なり、これらの質問は一度限りのリクエストとして行われるのではなく、情報として提供されます。ソフトウェアは自動的に質問を行い、回答を受け取ります。科学者にはほとんど見えない形で、何万人もの生物学者が得た知識を織り交ぜ、さらにそれらの知識を再統合することで、新たな発見に役立っています。

世界中でこのようなつながりが何百万も生まれています。困難な科学的問題によって研究が行き詰まっている科学者たちは、それらの問題を迅速に解決できる専門知識を持つ他の科学者とつながることができます。これは専門家の注目を浴びるオンライン市場であり、誰もがより効率的に、そしてよりスムーズに研究を進めることができる一種のコラボレーション市場です。

有能な研究者は、比較優位のある問題に取り組む能力が高く、他の作業を他の人に任せることができる。このコラボレーション市場では、今日では偶然によってのみ起こるようなつながりが、意図的に起こる。科学者間のこうしたつながりが生まれると同時に、科学者が膨大な量のデータをダウンロードして処理することで、バックグラウンドではより静かに、しかしはるかに大規模な知識の交換が行われている。こうして、何千人もの科学者が以前に獲得した知識を活用しているのだ。これもコラボレーション市場だが、専門的で一度きりの質問ではなく、自動的に回答できるほど標準化された質問のための市場である。

個人的なレベル、パサデナとカリフォルニア工科大学に戻って考えてみましょう。ハンガリーの材料科学者との新しい共同研究の他に、あなたは進行中のプロジェクトの1つである量子コンピューター的设计という野心的な取り組みにほとんどの時間を費やしています。

量子コンピューターは、量子力学を用いて従来のコンピューターでは解決できない問題を解決する仮想的なコンピューターです。大規模な量子コンピューターは画期的なデバイスとなることが期待されていますが、量子状態が非常に繊細であるため、その構築は大きな課題です。この課題に対処するため、6か月前、あなたと2人の同僚は、実際にスケールアップ可能な量子コンピューターを設計するプロジェクトを開始しました。このプロジェクトは、トポロジカル量子コンピューティングと呼ばれる量子コンピューティングへの特別なアプローチを採用しています。このアプローチは、トポロジーという数学分野から超伝導体の物理学、半導体製造から量子コンピューティング理論のあらゆる詳細な情報に至るまで、さまざまな科学分野の知見に基づいています。このプロジェクトは急速に成長し、世界中から100人以上の科学者がオンラインで共同作業を行うようになりました。

これらの科学者の中には、様々な分野にわたる幅広い専門知識を持つ理論家もいます。しかし、ほとんどは実験家であり、超伝導体や半導体の世界トップクラスの専門家や、高品質の材料サンプルの作製を専門とする材料科学者もいます。これらの実験家たちは、最先端の研究室で何が可能なのか、秘訣やヒントを共有しています。それは、最先端の研究室と一歩遅れた研究室を隔てる、いわば「伝承」的な知識です。

コラボレーションは必ずしも目標に向かって順調に進んでいるわけではありません。しかし、一見乗り越えられないような障害が生じたとしても、ハンガリーでのコラボレーションを開始したのと同じコラボレーション市場を活用することで、多くの場合、それらの障害を乗り越えることができました。

今朝の会議で、新しい人材や専門知識をコラボレーションに引き込むことにも成功しました。コラボレーションが拡大するにつれ、これはあなたにとって最大の継続的な取り組みとなり、ほぼ毎日少なくとも1~2時間はプロジェクトに費やしています。コラボレーションは当初の想像をはるかに超える成果を上げ、乗り越えられないと思っていた障害を乗り越え、共同研究者のアイデアが投機的なものからより実現可能なものへと変化していくにつれ、関係するいくつかの研究室では、それらのアイデアのプロトタイプ作成が始まっています。

読者の中には、特に科学者として働いた経験のある方は、上記の文章を読んで、まるで夢物語のように思われるかもしれません。「なぜ実験者たちがこのように互いに助け合うのだろうか？現実世界では、彼らが競争上の優位性となる重要なアイデアを共有することは決してないだろう」と疑問に思うかもしれません。現時点では、これは事実であり、今後の章で、様々な形でこの問題に繰り返し立ち返ります。しかし、理解が深まるにつれて、これは困難な問題ではあるものの、克服できないものではないことが分かるでしょう。しかし、今は議論を保留することにします。

これらは、オンラインツールと集合知をどのように活用して科学を変革できるかについて、皆さんの思考を刺激するほんの一例です。もちろん、他にも多くの可能性が考えられます。研究を行うための完全にオープンソースなアプローチを想像してみてください。データ、コンピュータコード、科学的推論の連鎖、未解決の問題の記述などを統合・連携する、オンラインに繋がる科学知識のネットワークを想像してみてください。この科学知識のネットワークには、論文などの従来型のメディアだけでなく、動画、仮想世界、拡張現実も組み込むことができます。

そして、それは科学者の注意を最も価値のある場所に向ける科学的なソーシャル ウェブと緊密に統合され、膨大な共同作業の可能性を生み出します。

本書の[第2部](#)では、ネットワーク化された科学の時代が今日どのように到来しつつあるのかを具体的に探ります。例えば、世界中の知識の多くを収録した膨大なデータベースから、人間の力だけでは到底到達できないような発見がいかんにして発掘されているかを見ていきます。オンラインツールによって、科学と社会の架け橋として新たな形で機能し、科学と社会の関係を再定義するのに役立つ新たな機関の構築がどのように可能になるかを見ていきます。これらのアイデアが最も完全に実現されているのは基礎科学であり、[第2部](#)では基礎科学に焦点を当てます。対照的に、応用科学は多くの場合、民間企業内で秘密裏に活動する少人数のグループによって行われており、その秘密主義が協力体制の拡大を制限しています。しかし、基礎科学でさえ、克服すべき深刻な障害が存在します。[シンプルなアイデア](#)

共同研究市場、オープンソースのウィキのような研究論文、データやコンピュータコードの共有といった取り組みは、文化的な障壁によって大きな障壁に直面しています。ネットワーク化された科学がその可能性を最大限に発揮するには、科学者があらゆるデータと科学的知識をオープンかつ熱心に共有する文化に基づいたオープンサイエンスでなければならないという考えを発展させます。そして最後に、よりオープンな科学文化をどのように創造できるかを見ていきます。

## パート2

---

ネットワーク化された科学

## 第6章

## 世界の知識すべて

ドン・スワンソンが医学的発見をする人物とは考えにくい。シカゴ大学で情報科学者として活躍する、引退したが現在も活躍するスワンソン氏は、医学教育を受けておらず、医学実験も行っておらず、研究室を持ったこともありません。にもかかわらず、彼はいくつかの重要な医学的発見を成し遂げています。最も初期の発見の一つは1988年、片頭痛の研究で、マグネシウム欠乏が片頭痛の原因であることを示唆する証拠を発見したことです。当時、このアイデアは片頭痛を研究していた他の科学者にとって驚きでしたが、スワンソン氏のアイデアはその後、伝統的な医学団体による複数の治療試験で検証され、その有効性が立証されました。

医学教育を受けていない人間が、どうしてこのような発見をすることができたのでしょうか。スワンソン氏は、医学研究者としての一般的な資格は一切持っていませんでしたが、独創的なアイデアを持っていました。科学的知識が膨大になりすぎたため、主題間の重要な関連性が見過ごされてきました。それは、関連性が特に微妙であったり把握しにくいからではなく、そうした関連性に気づくほど科学を広く理解している人がいないからだと言います。スワンソン氏は考えました。干し草の山が大きければ、15メートルの針さえ見つけるのは難しいかもしれません。スワンソン氏は、Medlineと呼ばれる医療検索エンジンを使って、こうした隠れた関連性を発見したいと考えました。Medlineは、医学分野の何百万もの科学論文を検索できる検索エンジンで、人類の医学知識の高レベルな地図と考えることができます。彼はまず、Medlineを使って科学文献を検索し、片頭痛と他の症状との関連性を探しました。彼が発見した関連性の例を2つ挙げます。(1) 片頭痛はてんかんと関連している。(2) 片頭痛は通常よりも血栓ができやすい状態と関連している。もちろん、片頭痛は多くの研究の対象となっているため、これらは彼が発見したはるかに長い関連性のリストのうちの2つに過ぎません。しかし、スワンソン氏はリストに留まりませんでした。関連する病状を一つずつ取り上げ、さらにMedlineを使ってそれらの病状とのさらなる関連性を探りました。例えば、(1)マグネシウム欠乏は、

てんかん、(2)マグネシウム欠乏により血液が凝固しやすくなる。

研究を始めた当初、スワンソン氏は自分が偏頭痛とマグネシウム欠乏症を結びつけることになるとは夢にも思っていませんでした。しかし、マグネシウム欠乏症と偏頭痛の間にこのような二段階の関連性を示唆する論文をいくつか見つけた後、彼はマグネシウム欠乏症に焦点を当てて研究対象を絞り込み、最終的に偏頭痛との二段階の関連性を11件発見しました。これは医学者が好む伝統的なタイプの証拠ではありませんでしたが、それでも偏頭痛とマグネシウム欠乏症の関連性を説得力のある形で示しました。スワンソン氏の研究以前にも、マグネシウム欠乏症と偏頭痛の関連性を示唆する論文がいくつかありました（ほとんどは軽い言及でした）。

しかし、以前の研究は説得力に欠け、ほとんどの科学者に無視されました。対照的に、スワンソンの証拠は非常に示唆に富み、その後すぐに片頭痛とマグネシウムの関連性を確認する治療試験が続きました。

片頭痛に悩まされている方なら、片頭痛とマグネシウムの関連性の発見が、根本的な治療法や確実な治療法の発見につながっていないことをご存知でしょう。今日、マグネシウム欠乏症は片頭痛を引き起こすことが知られている多くの要因の一つに過ぎず、片頭痛の根本的な原因は依然として解明されておらず、議論の的となっています。しかしながら、片頭痛とマグネシウムの関連性の発見は、片頭痛の原因とその予防法を理解する上で重要な一歩となりました。さらに、スワンソン氏の研究の重要性は医学の領域をはるかに超えています。現代社会では、情報爆発を嘆き、知識の急増が何らかの悪事であるかのように捉えるのが通説となっていますが、スワンソン氏はこの見方を覆しました。彼は知識の増大を問題ではなく、むしろ機会と捉えました。メドラインのようなツールは、人類の集合知の中に意味を見出す能力を高め、人間には見えない全体のパターンを発見することを可能にすると考えたのです。Medlineに索引付けされた何百万もの実験を人間の頭で理解することは不可能です。

幸いなことに、誰かの心がそうする必要はありません。Medlineのようなツールと共生することで、私たちは思考を拡張し、超人的な量の知識に隠された関連性を発見することができます。事実上、このようなツールは科学的発見の新たな方法を可能にしているのです。

## インフルエンザの探索

スワンソン氏が片頭痛とマグネシウムの関連性を発見するために用いた方法は、既存の知識に隠された意味を見つける多くの新しい方法のうちの1つにすぎません。最近、Googleと米国疾病予防管理センター（CDC）の科学者らは、インフルエンザウイルス（インフルエンザ）の蔓延を追跡するより優れた方法を開発するために、異なるアプローチを使用しました。インフルエンザは毎年、世界中で25万人から50万人の命を奪っています。政府や保健機関はインフルエンザの蔓延を注意深く追跡することで、発生に迅速に対応し、5千万人以上が死亡した1918年のスペイン風邪などのパンデミックを防いでいます。米国では、インフルエンザはCDCによって追跡されており、CDCは全国の医師を追跡プログラムへの参加登録を行っています。患者がインフルエンザのような症状（発熱と喉の痛みまたは咳）を訴えた場合、医師はCDCにその受診を報告します。CDCのプログラムに参加している医師はごくわずかですが、CDCが地域および全国のインフルエンザの正確な状況を把握するには十分な人数が参加しています。アウトブレイクが発生した場合、CDCは動員され、地域のワクチン接種プログラムを強化し、メディアで情報を発信することができます。しかし、このシステムの問題は、インフルエンザの症例がCDCの報告書に掲載されるまでに1〜2週間かかることです。

インフルエンザの流行はわずか数日間で急速に拡大する可能性があるため、このタイムラグは深刻な懸念事項です。

CDCのシステムの高速化を目指し、GoogleとCDCの科学者たちは、ユーザーがGoogleの検索エンジンに入力する検索クエリを使って、インフルエンザの発生場所を瞬時に追跡できないかと考えた。アトランタ市内で「咳止め薬」などを検索する人が急増している場合、アトランタでインフルエンザが増加している可能性が高いという考え方だ。優れた結果を得るために、GoogleとCDCの科学者たちは、2003年から2007年初頭までのCDCのインフルエンザの過去のデータを使用し、一般的なGoogle検索クエリとの相関関係を調べた。その結果、過去のインフルエンザデータと特に高い相関関係にある45の検索クエリが見つかった。

これらのクエリを用いて、研究者たちはGoogle検索を監視するだけでインフルエンザの発生場所を瞬時に特定できるモデルを構築しました。そして、そのモデルを新たなデータセット、2007〜2008年のインフルエンザシーズンのCDCデータと比較してテストしました。すると、モデルはほぼ完璧な一致（97%）を示しました。つまり、Googleの検索クエリは、CDCが直面しているようなタイムラグなしに、インフルエンザの発生場所とその規模を特定できるということです。さらに、Googleの検索クエリは、米国だけでなく、多くの人がGoogleを使用しているあらゆる場所でインフルエンザを追跡するのに使用できます。

Googleは、CDCのような疾病追跡組織がない地域も含め、29カ国におけるインフルエンザの流行状況を追跡するために検索クエリを使用する「Google Flu Trends」というウェブサイトを構築しました。

Google Flu Trendsの結果には、いくつかの注意点があります。まず、現在、米国では多くの医師が電子カルテシステムを利用しており、CDCは最近、そうしたシステムのメーカーの一つであるゼネラル・エレクトリック社と提携し、1,400万人の患者からのインフルエンザの報告をほぼリアルタイムで追跡できる新しい追跡システムを開発しました。少なくとも米国では、CDCの新しいシステムによってGoogle Flu Trendsが時代遅れになる可能性、あるいはその可能性が高いと言えるでしょう。

第二に、Google-CDCシステムの構築に使用されたCDCデータは、厳密に言えばインフルエンザを追跡したものではありません。むしろ、咳や喉の痛みなど、インフルエンザによく見られる症状の報告から「インフルエンザ様」疾患を追跡したものでした。風邪などの他の病気でも同様の症状が現れることがあります。2010年に行われた追跡調査では、当然のことながら、Google Flu Trendsは、検査で確認されたインフルエンザの症例よりも、インフルエンザ様疾患の追跡においてはるかに優れていることが確認されました。これは有用な診断ツールであり、インフルエンザを追跡する完璧な方法ではありません。

Googleを使ってインフルエンザを予測するのは興味深いですが、さらに興味深いのは、それが示唆する他の可能性、つまり医学の枠を超え、生活のあらゆる側面に及ぶ可能性です。追跡調査ではすでに、検索クエリを使って失業率や住宅価格の動向を予測できることが明らかになっています。さらには、音楽チャートで曲がどれだけ売れるかを予測することさえ可能です。他に何ができるのでしょうか？Googleは、どの検索クエリがマイクロソフトのような企業の株価変動を予測するのかを突き止めることができるのでしょうか？ダウ工業株30種平均の動向はどうでしょうか？あるいは、どのテクノロジー系スタートアップが買収の最適なターゲットになるのか？あるいは、次期米国大統領選挙の結果は？あるいは、不安定な国でのクーデターは？Googleが米国最高裁判所の事務官の検索を追跡していたら、裁判所の判決を予測できるのでしょうか？あるいは、裁判が行われている間に個々の判事がどのような懸念を抱いているのかを突き止めることができるのでしょうか？Googleユーザーが銀行強盗を計画していることを示唆する検索をしているとしましょう。Googleは法執行機関に通報すべきでしょうか？2010年にアブダビで行われた記者会見で、GoogleのCEO、エリック・シュミット氏はこう述べた。「ある日、株式市場の予測を試みるという話がありました。しかし、それは違法だと判断したので、やめました。」安心すべきか、それとも恐怖すべきか、判断が難しい。もちろん、この種のデータを扱う立場にあるのはGoogleだけではない。

マイニング。銀行、クレジットカード会社、FacebookやTwitterといった人気ウェブサイトなど、多くの組織が、人間の行動を理解し、さらには予測するために利用できる可能性のあるデータソースにアクセスできます。データにアクセスでき、それを解釈する手段があれば、データは力となります。

## 世界中の知識に意味を見出す

有史以来ほぼ一貫して、私たち人類は情報の小さな繭の中に閉じこもって生きてきました。最も聡明で知識に富んだ祖先でさえ、人類の知識のほんの一部に直接アクセスできたに過ぎませんでした。そして1990年代から2000年代にかけて、わずか20年の間に、知識への直接アクセスはおそらく1000倍にまで拡大しました。同時に、さらに重要な第二の拡大が進行していました。それは、集合的な知識の中に意味を見出す能力の拡大です。スワンソン氏がメドラインを用いて集合的な医学知識に隠された関連性を発見したことや、GoogleとCDCがCDCの既存の（しかし不十分な）インフルエンザ報告に関する知識とGoogleの検索データを組み合わせて、インフルエンザの追跡方法を改善した方法に、この拡大が見て取れます。また、日常生活においても、Googleが私たちの質問に答え、適切なウェブページ、ニュース記事、科学論文、書籍を見つけてくれるといった例が見られます。GoogleやMedlineといったツールは、これまで隠されていた意味、つまり既存の人類の知識に内在しながらも、その膨大な知識量ゆえに未だ理解されていない「未知の既知」を発見する方法を提供することで、私たちと知識の関係を再定義します。本書の前半では、専門家の注意を再構築し、利用可能な専門知識をより有効に活用することで、集合知をどのように増幅できるかを見てきました。本章では、集合知を増幅するための補完的なアプローチ、すなわち、集合知の中にある意味と隠されたつながりを探索することで、知識そのものに直接作用し、認知タスクを実行するツールを構築するアプローチについて考察します。

この章の残りは2つのパートに分かれています。第1部では、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)と呼ばれる天文学のプロジェクトについて解説します。SDSSは、初期の地図製作者が地球を調査したのと同じように、ロボット望遠鏡を用いて空を広く探査し、宇宙を調査しています。

これまでに93万個の銀河の画像を撮影しました。これらの画像は単なる美しい写真ではありません。天文学者たちは、これらの画像から宇宙に関するあらゆる疑問に答えを見つけようとしています。SDSSがどのように利用され、宇宙で最大の構造である13億7000万光年の長さを持つ巨大な銀河列を発見したのか、また、天の川銀河付近の新しい矮小銀河を発見したのか、そして一対の周回ブラックホールを発見したのかを学びます。これらの発見はそれ自体が興味深いものですが、私たちがSDSSに興味を持つには、もっと深い理由があります。それは、過去20年間で人類の知識へのアクセスは飛躍的に拡大したにもかかわらず、多くの科学的知識がまだ一般に公開されておらず、それらをよりアクセスしやすくするための取り組みが続いているからです。そこで本章の前半では、科学における情報共有の拡大について、SDSSを具体的な例として用いて、その拡大がもたらすメリットと課題の両方を理解しながら解説します。この具体的な理解は、本章後半で焦点を広げ、全体像について考えるための準備となります。世界中の知識をすべて公開することは、どのような意味を持つのでしょうか？そして、それはどのような新しい発見の方法を可能にするのでしょうか？

## デジタル宇宙の探究

宇宙で知られている最大の構造は、スローン・グレートウォールと呼ばれる銀河の連なりです。長さは13億7000万光年で、数千の銀河を内包し、地球から約10億光年離れています。

あまりにも遠くにあるため、これらの銀河は肉眼では見えませんが、もし見えたら、スローン・グレートウォールはおとめ座から獅子座、そして蟹座まで、空のほぼ3分の1を占めることになります。夜空にきらめく銀河の数々を想像すると、なんとも美しい光景です！

スローン・グレート・ウォールは2003年に発見されました。プリンストン大学のJ・リチャード・ゴット3世率いる8人の科学者チームが、既知の宇宙全体の視覚的な地図を作成することを決意したのです。壮大な話に聞こえるかもしれませんが、彼らがそれを成し遂げたのは、私たちが都市や国の地図を作るのと同じ理由からです。つまり、知識を視覚的に提示することで、私たちが知っていることへの理解が容易になるからです。もし地図がなく、言葉による説明だけに頼らなければならないとしたら、地理学はどれほど難しいものになるか想像してみてください。問題点

大陸がいくつあるかといった視覚的に簡単に解けるような問題が、突如として難しい研究課題と化してしまうのです。初期の地理学者たちが「大陸の陸地の数を解明する」というテーマで研究会議を開き、アジアと北アメリカは本当に別々の大陸なのかといった問題について激しい議論を交わしていた様子が想像できます。

宇宙の地図を作る上で大きな難しさは、そこに何があるのかを知ることです。現代の望遠鏡で私たちは無数の物体を見ることができますが、ほとんどの場合、天文学者はそれらの物体のほんの一部を観察することに集中しています。これはおそらく驚くかもしれませんが、あなたが天文学者だと想像してください。どこかの銀河のどこかの星ではなく、天の川銀河の中心にある超大質量ブラックホールなど、非常に興味深いことがすでにわかっているものを観察することに時間を費やしたいと思いませんか？ そのため、ほとんどの天文学者は、すでに興味深いことがわかっている物体の観察にほとんどの時間を費やしています。これは、興味深い新しい場所を見つけるために街を広く探索することと、馴染みのある場所だけを再訪する誘惑との違いに似ています。空で興味深い新しい物体を見つけるには、誰かが出発して空を広く探索する必要があります。

ここで天体調査の出番となります。天体調査で使用される望遠鏡は、既知の天体を徹底的に詳細に観察する代わりに、全天を体系的にスキャンし、宇宙の全体像を構築します。天体調査は天文学の基礎であり、どの天体をもっと詳しく観察すべきかについての最初の手がかりを与えてくれることがよくあります。最も初期の天体調査の1つは、西暦2世紀にアレクサンドリアの天文学者プトレマイオスによって書かれた「アルマゲスト」です。プトレマイオスは望遠鏡を持っていませんでしたが、肉眼を使用して、惑星の動きの説明から1,022個の恒星の詳細なカタログまで、空で見たものに関するあらゆる種類の有用な情報を収集しました。「アルマゲスト」はその後800年間、ヨーロッパと中東で天文学の標準的な著作であり続けました。

ご想像のとおり、現代のアルマゲストはスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)です。これは、資金の大部分を提供しているアルフレッド・P・スローン財団にちなんで名付けられました。SDSSは、ニューメキシコ州サクラメント山脈の高地にある小さな町サンスポットのすぐ外にある優れた望遠鏡を用いて観測を行っています。この望遠鏡は、直径2.5メートルの大きな鏡で光を捉えます。この優れた立地と大きな鏡のおかげで、SDSSは非常に鮮明な画像を撮影し、既知の宇宙の果てまで見通すことができます。しかし、その画像は、巨大な

SDSS望遠鏡は、カナリア諸島にある口径10.4メートルのカナリア大望遠鏡に設置されています。しかし、SDSS望遠鏡には、ほとんどの大型望遠鏡にはない大きな利点があります。それは、空の広い部分を迅速に撮影できる特殊な広角レンズを備えていることです。1枚の画像で、満月の8倍の面積を捉えることができます。対照的に、カナリア大望遠鏡は月の16分の1の面積しか捉えることができず、空のサーベイに必要な広範囲の探査には適していません。2000年の運用開始以来、SDSSは空の4分の1以上を調査し、その過程で93万個の銀河の画像を撮影しました。そして、後で説明するように、それらの画像はそれ以来、ゴットと協力者たちによる宇宙の地図を作るプロジェクトを含む、何千もの他の科学プロジェクトで使用されています。

宇宙の地図はどうやって作るのでしょうか？これは驚くほど複雑な問題です。理想的には、わずか数光年離れた近くの恒星など、天文学的に比較的近い天体と、数十億光年離れた最遠の銀河の両方を示す地図が望ましいでしょう。しかし、この両方を同じ地図上に描くのは困難です。地図作成の問題は、宇宙が3次元であるのに対し、通常の世界地図は2次元であるという事実によってさらに複雑になっています。もちろん、こうした複雑な問題に対処する方法は数多くありますが、それはまた別の問題につながります。つまり、地図を作成するための多くの方法のうち、どれが最適な方法なのでしょうか？宇宙を視覚化するある方法では驚くほど明白な特徴が、別の方法ではほとんど見えない場合があります。もし間違った選択をしてしまったらどうなるのでしょうか？地球の表面を地図化する方がはるかに簡単な問題ですが、初期の世界地図製作者たちは地球を理解するために、依然として様々な投影法を試していました。

同様に、ゴットと彼の共同研究者たちは、地図を作成するために様々な方法を実験しました。彼らが作成した地図の一つは、SDSSの銀河データを用いて、宇宙における銀河の分布を視覚化したものでした。その地図を[図6.1に示します](#)。これは道路地図のような普通の世界地図ではないため、理解するには少し手間がかかりますが、[キャプションを詳しく読んで](#)、何が描かれているのかを理解する価値はあります。

鍵となるのは、地図の左上隅に銀河が集中していることです。これは地図の他の部分よりもはるかに高密度です。人類が初めてスローン・グレートウォールを垣間見た瞬間でした。

スローン・グレート・ウォールは、SDSSを用いて行われた数千もの科学的発見の一つに過ぎません。SDSSの影響をより深く理解していただくために、さらに2つの発見について簡単にご説明したいと思います。私たちの天の川銀河には、大マゼラン雲と小マゼラン雲という2つの隣接する銀河があることは、おそらくすでにご存知でしょう。これらは矮小な銀河です。

二つの銀河のうち大きい方の銀河には約300億個の恒星が含まれていますが、私たちの天の川銀河には数千億個の恒星があります。南半球に行ったことがない人は、マゼラン雲を見たことがないかもしれません。なぜなら、マゼラン雲は空の南の方にありすぎて、北半球のほとんどの地域からは見えないからです。しかし、南半球でも暗い夜には、空に染みのように現れます。

銀河形成に関する現在の最良の知見によれば、天の川銀河の近傍には数十から数百の矮小銀河が存在するはずですが、SDSS以前はマゼラン雲以外に発見された矮小銀河はごくわずかで、他の行方不明の矮小銀河がどこにあるのかは謎に包まれていました。SDSS画像が利用可能になると、複数の天文学者が画像から矮小銀河を探しました。彼らは手作業で作業しませんでした。すべての画像を調べるには時間がかかりすぎるからです。代わりに、彼らはコンピューターアルゴリズムを用いてSDSS画像から新たな矮小銀河を探し出しました。これまでに天の川銀河近傍に9つの新たな矮小銀河が発見されており、行方不明の矮小銀河の謎を解く大きな一歩となっています。

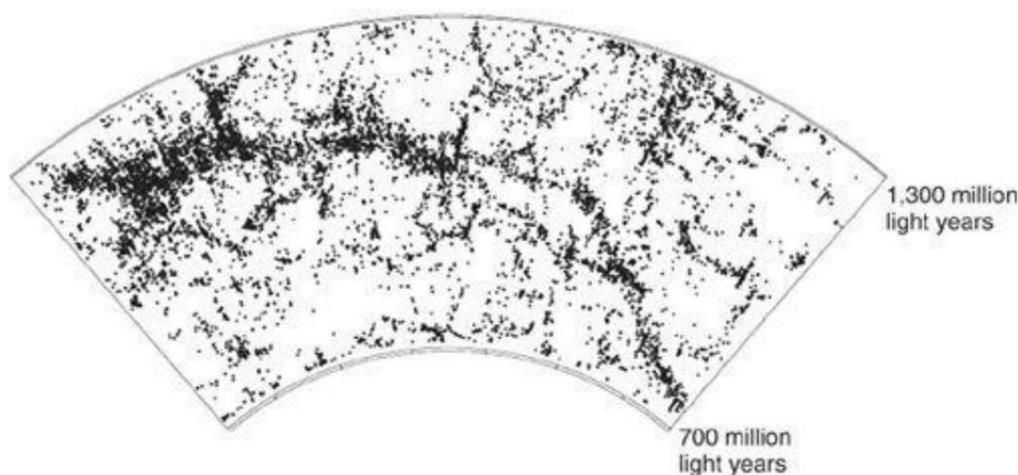


図6.1.ゴットと共同研究者が作成した宇宙地図の拡大図。地図がパイの切れ端に似ていることに気づくでしょう。地球の真ん中、パイの中心から宇宙を眺めている自分を想像してみてください。地図上の各点は、SDSSの銀河を一つずつ表しています。半径方向は銀河までの距離を示しており、図の中で最も近い銀河は約7億光年、最も遠い銀河は約13億光年離れています（右側に印が付けられています）。図に示されているすべての銀河は、地球の実際の赤道の真上を横切り、地球を周回する大きな弧である天の赤道に非常に近い位置にあります。つまり、ここで見ているのは、空の薄いスライスの中にある銀河であり、すべて天の赤道に非常に近いのです。図の角度方向は

この図は、銀河が天の赤道上のどこに位置しているかを示しています。地図の左側の銀河は乙女座の方向、中央の銀河は獅子座の方向、右側の銀河は蟹座の方向にあります。左上に集中している密集した銀河の列は、スローン・グレートウォールです。出典：アメリカ天文学会の許可を得て転載。

SDSS がもたらしたもう一つの発見例として、2009 年に天文学者のトッド・ポロソン氏とトッド・ラウアー氏が SDSS を利用して、互いの周りを公転する 2 つのブラックホールを発見しました。ポロソン氏とラウアー氏がこの対になるブラックホールを発見した方法は、ご想像のとおり、コンピューターを使って SDSS の銀河画像を検索したというものです。ブラックホールには色がなく、写真に直接写ることもありません。しかし、ブラックホールは大量の光る物質に囲まれており、それが落下してくるため、ある意味では銀河画像の中でブラックホールを「見る」ことや、ブラックホールに色があるなどと話すことなどが可能です。ポロソン氏とラウアー氏の研究の鍵となったのは、彼らが立てた巧みな推測でした。それは、もし 2 つのブラックホールが互いの周りを公転しているとしたら、それらの色はわずかに異なって見えるはずだというものでした。彼らがこの推測をした理由は興味深いものです。物体が十分に速い速度（光速のかなりの割合）で動いているとき、その物体の見た目の色は著しく変化します。

なぜこのようなことが起こるのかは長くなるのでここでは割愛しますが、例えば、地球に向かって非常に高速で移動している赤い物体は、実際には少し青く見えます。ポロソンとラウアーは、互いに周回する 2 つのブラックホールは地球に対する速度が異なるため、一方が他方よりもわずかに青く見えると推論しました。

この二重着色のアイデアを武器に、ポロソンとラウアーはコンピューターを使って SDSS データを探し始めた。彼らの希望は報われ、40 億光年離れた銀河に、まさに探し求めていた二重着色の特徴を持つ銀河を発見した。彼らはさらに詳細な銀河の調査を行い、周回するブラックホールの存在を確認し、どちらも驚くほど巨大で、それぞれ太陽の 2000 万倍と 8 億倍の質量を持ち、3 分の 1 光年の距離にあり、およそ 100 年に一度互いの周りを回っていることを明らかにした。この発見は大きな関心と呼び、同時に議論を巻き起こした。ポロソンとラウアーが見ている現象には、別の説明があるのではないかと他の天文学者たちが疑問を抱いているのだ。現時点では、周回するブラックホール説は、いくつかの考えられる説明の中で依然として最有力候補となっている。しかし、真実がどうであれ、

ボロソンとラウアーが何か驚くべきものを発見したのではないかと疑う人もいる。

これらの発見はどれも印象的ですが、SDSSが天文学に与えた計り知れない影響を十分に伝えるものではありません。その影響を理解する一つの方法は、SDSSの結果が他の科学論文で何回引用（つまり、参照）されたかを見ることです。天文学の論文のほとんどは、引用されたとしても数回しか引用されていません。何十回も引用されている論文はかなり成功していますが、何百回も引用されている論文は有名であるか、かなり人気が出つつあります。SDSSの最初の論文は、他の論文で3,000回以上引用されています。これは、多くの非常に成功した科学者がキャリア全体で受ける引用数よりも多い数です。これがいかに大きな功績であるかを少しでも感じてもらうために、おそらく世界で最も有名な科学者であるスティーブン・ホーキングの論文は、3,000回以上引用されているものがたった1つしかありません。ホーキングが1975年に発表した論文は、2011年時点でわずか4,000回強しか引用されていません。対照的に、SDSSの論文は2000年に発表され、すでに3,000回以上引用されています。まもなくホーキングの論文に追いつき、追い抜くでしょう。SDSSの他の側面を記述したいいくつかの後続論文も、1,000回以上引用されています。私がSDSSをプトレマイオスのアルマゲストと比較したのは冗談ではありません。SDSSは天文学の歴史全体を通して最も成功した事業の一つであり、プトレマイオス、ガリレオ、ニュートン、そして他の偉大な天文学者たちの業績と並ぶに値するものです。

## オープンデータ

SDSSがこれほど成功した理由は何でしょうか？すでにいくつかの理由を挙げました。SDSSは優れた望遠鏡と広い範囲の天空をカバーしています。しかし、それだけが理由ではありません。1940年代と1950年代、天文学者たちはカリフォルニア州サンディエゴ郊外にある巨大な5メートル望遠鏡を用いて、パロマー天文台スカイサーベイを実施しました。パロマー望遠鏡はいくつかの点でSDSS望遠鏡よりも優れているものの、パロマーサーベイが天文学に与えた影響ははるかに小さいものでした。なぜでしょうか？主な理由は、パロマーサーベイで製造された写真乾板は持ち運びや複製に費用がかかり、限られた人しかアクセスできなかったことです。

人々とは対照的に、SDSSはインターネットを利用して世界中の天文学者コミュニティ全体とデータを共有してきました。2001年以来、SDSSは7回の主要なデータリリースを行い、画像（およびその他のデータ）を誰でもダウンロードできるウェブ上に公開しました。お望みであれば、今すぐSDSSのオンラインSkyServerにアクセスして、遠方の銀河の素晴らしい画像をダウンロードできます。これは誰でも可能で、このサイトはプロの天文学者だけでなく一般の人々が使用できるように設計されています。このサイトのツールは、空の最も美しい光景を巡るツアーから、特定の特性を持つ画像を返す高度なデータベースクエリを送信する機能まで多岐にわたります。このサイトには、小惑星や他の銀河の星形成領域を見つける方法などを説明したチュートリアルもあります。

SDSSによるこのオープンなデータ共有は、Polymath プロジェクトや Kasparov versus the World などの例に見られる集合知への急進的なアプローチと比較すると、小さなイノベーションのように思えます。しかし、SDSSによるオープンなデータ共有の影響は計り知れません。これは、Todd Boroson 氏や Tod Lauer 氏など、SDSS コラボレーションのメンバーではない人々が参加して、それまで誰も考えもしなかった根本的な疑問を投げかけることができることを意味します。「SDSS データを使用して、周回するブラックホールのペアを探索できますか?」科学では、発見はしばしば私たちの知識の限界によって制約されます。しかし、SDSS のような実験は、70 テラバイトを超える膨大な知識を生み出し、これは一人の人間が理解できる能力をはるかに超える量であり、その期待を覆します。これほど豊富なデータを前にすると、多くの点で、私たちは知識が限られているというよりも、疑問が限られていると言えるでしょう。

私たちは、最も独創的で、突飛で、創造的な疑問を投げかける能力に限界があります。SDSSはデータを全世界に公開することで、ボロソン氏やラウアー氏のような人々が、もしデータへのアクセスが制限されていたら決して問われなかったかもしれない疑問を投げかけることを可能にしました。これは、スワンソン氏による片頭痛とマグネシウムの関連性の発見で見られたのと同じことです。スワンソン氏は既知の事実を一切利用せず、既存の知識に新たな疑問を投げかけることで、貴重な発見を成し遂げました。これは、[パート1](#)で見えた「計画されたセレンディピティ」のバリエーションです。SDSSのようなプロジェクトは、疑問を世界に発信して答えを期待するのではなく、人々が予期せぬ疑問を投げかけ、それが新たな発見につながると信じて、データを世界に発信しているのです。 [\\_\\_\\_\\_\\_](#)

SDSSのデータ共有は、それが可能にする発見のためだけに重要なものではありません。この分野でのデータ共有もまた重要です。

一見単純で明白な方法に思えるかもしれませんが、実際には、関係する科学者にとっては非常に大胆な一歩です。ほとんどの科学者は自分のデータを厳重に守っています。彼らのデータは実験観察の生の記録であり、重要な新発見につながる可能性があります。これは同僚や競争相手に対する彼らの特別な優位性です。彼らがデータを公に開示すること自体が珍しいことかもしれませんが、同僚に独自の分析、さらには独自の発見を奨励することはさらに珍しいことです。データが部分的に公開された有名な事例をいくつか見れば、何が問題なのかをある程度理解できます。たとえば、先ほど私は古代の偉大な科学作品の1つであるプトレマイオスの「アルmagest」について言及しました。しかし、「プトレマイオス」を引用符で囲むべきだったかもしれません。なぜなら、すべての科学史家ではないものの、多くの科学史家が、プトレマイオスがカタログの星の位置の多くを、約300年前に独自の天体測量を行っていた天文学者ヒッパルコスから盗用したと考えているからです。実際、科学の歴史には、科学者がお互いのデータを盗んだ例が数多くあります。

近代科学の黎明期、天文学者ヨハネス・ケプラーは、亡き師である天文学者ティコ・ブラーエから盗み出したデータを用いて、惑星が太陽の周りを楕円軌道で回っていることを発見しました。ジェームズ・ワトソンとフランシス・クリックは、世界有数の結晶学者ロザリンド・フランクリンから借りたデータを用いてDNAの構造を解明しました。「借りた」と表現したのは、フランクリンの同僚の協力を得て行われたものの、彼女には内緒だったからです。フランクリンの同僚の協力は、フランクリンの権利の範囲内であったと言えるでしょう。これらは確かに極端な例ですが、多くの科学者がデータを秘密に保つために苦労する理由をよく表しています。

すると、ここには謎があります。なぜSDSSはデータをこれほどオープンに共有するのでしょうか？SDSS共同研究メンバーの視点から状況を考えてみてください。彼らが成し遂げられたはずの重要な発見が、SDSSデータを使った共同研究メンバー以外の誰かに先を越されたことはほぼ確実です。利己的な言い方をすれば、オープンデータは科学にとっては良いかもしれませんが、SDSS共同研究メンバーのキャリアにとっては悪影響と言えるでしょう。なぜ彼らはオープンデータを支持するのでしょうか？なぜSDSSはデータをロックしないのでしょうか？

実際、SDSSはデータを部分的にロックしています。SDSS望遠鏡が撮影した画像はすぐには公開されません。その代わりに、通常は数か月から1年強という短期間、SDSS共同研究の公式メンバーのみが閲覧できます。

その期間が経過して初めて、データは世界中のすべての人に無料で公開されます。

SDSSコラボレーションのメンバーシップについても同様に、部分的にオープンになっています。ほとんどの科学実験はまだ少数の参加者しか関与していませんが、SDSSコラボレーションには25の学術機関が参加しており、参加機関以外の14人の科学者も含まれています。全体として、およそ200人の科学者がコラボレーションの正式なメンバーであり、これはSDSSを立ち上げるために科学的に必要な人数をはるかに上回っています。SDSSの現在のフェーズ（ステージIII）のウェブサイトのホームページでは、「コラボレーションへの参加に関心のある方からの問い合わせ」を奨励しています。天文学は小規模なコミュニティであり、プロの天文学者は世界中に数千人しかいません。その結果、多くの、おそらくほとんどのプロの天文学者は、SDSSコラボレーションに参加している友人や同僚がおり、データが公開されていない初期段階であっても、SDSSデータを使用して共同作業を行う可能性があります。

これらの説明は、SDSSがデータを共有するプロセスを明確にしていますが、そもそもなぜSDSSはデータを部分的に公開しているのかという最初の疑問には答えていません。なぜデータを永久にロックしないのでしょうか？また、SDSSの共同研究は、個々のメンバーが受ける利益を増やすために、意図的に可能な限り小規模に維持されないのはなぜでしょうか？これらの疑問に答える前に、データを公開している実験の例をいくつか簡単に説明したいと思います。これらの例は、科学者がなぜ、いつデータを公開するのか、そしてなぜオープンデータが重要なのかを理解するのに役立ちます。

## 科学情報コモンスの構築

2009年9月、オーシャン・オブザーバトリーズ・イニシアチブと呼ばれる組織が、太平洋の海底にデータと電力を供給する高速ネットワークの構築を開始しました。彼らはインターネットを海底まで延長しようとしており、最終的にはオレゴン州の海岸からブリティッシュコロンビア州まで、全長1,200キロメートル（750マイル）のケーブルを敷設する予定です。この海底インターネットは、沖合100キロメートル（60マイル）以上を網羅します。完成すれば、カメラからロボット車両、ゲノム編集装置まで、あらゆるデバイスがこのネットワークに接続されることになります。

シーケンシング装置。海底で火山が噴火し、近くのゲノムシーケンシング装置が作動して、噴火中に噴出した未知の微生物の遺伝子スナップショットを撮影する様子を想像してみてください。あるいは、SDSSが宇宙の地図を作成しているのと同じように、温度計やその他のセンサーのネットワークが海中の気候をマッピングすることを想像してみてください。しかし、海洋観測イニシアチブはSDSSをさらに先取りしています。開始当初からデータを公開することで、世界中の誰もがすぐにデータをダウンロードし、新たなパターンを探し、新たな疑問を抱くことができるのです。この前例のない海底の知識によって、どのような新たな発見がもたらされるのでしょうか？

地図化されているのは海洋や宇宙だけではなくありません。現在、人間の脳の地図を作成する取り組みが進められています。例えば、シアトルに拠点を置くアレン脳科学研究所の科学者たちは、アレン脳アトラスを構築し、脳を単一細胞レベルに近いレベルでマッピングし、脳のどの領域でどの遺伝子が活性化しているかを特定しています。これは、遺伝子がどのように心を形成するかを理解するための重要なステップであり、私たちの心の仕組みを理解する上で非常に役立つ可能性を秘めています。アレン研究所の科学者たちは、15個の脳を数十万枚のスライスに切り分けました。各スライスの厚さはわずか数ミクロンです。そして、各スライスを分析し、どの遺伝子がどこで活性化しているかを特定します。この作業は、24時間体制で稼働する5台のロボットチームによって行われ、各ロボットは毎日192枚の脳スライスを分析しています。アレン研究所の科学者たちは、2012年までに脳の地図を完成させ、その結果をオープンデータとして公開し、世界中の誰もがダウンロードして分析できるようにする予定です。

アレン研究所は2007年に、マウスの脳内で遺伝子がどのように発現しているかを示す公開マップを既に作成しました。さらに、アレン研究所によるこの研究は、神経科学におけるより大きな動きの一部であり、より野心的な目標、すなわちヒトの脳内の全てのニューロン、樹状突起、軸索、そしてシナプスの位置を網羅したコネクトーム全体のマッピングを目指しています。近い将来、ヒトの脳全体の詳細なモデルが公開される日が来るかもしれません。

SDSS、海洋観測イニシアチブ、アレン・ブレイン・アトラスといった例に見られるのは、新たな発見のパターンの出現です。SDSSは宇宙全体の地図を作成しています。海洋観測イニシアチブは海底の広範囲にわたる観測を行います。アレン・ブレイン・アトラスは人間の脳の地図を作成しています。さらに、地球の大気、地球表面、地球の気候、人間の言語、そして地球の詳細な地図を作成することを目指したプロジェクトもあります。

あらゆる種の遺伝子構成。自然界におけるほぼあらゆる複雑な現象について、その現象を詳細に解明するプロジェクトが進行中である可能性が高い。多くの場合、それは単一のプロジェクトではなく、より詳細な知識を提供する一連のプロジェクト全体である。ヒト遺伝学において、ヒトゲノム計画はヒトの基本的な遺伝子テンプレートを解明した。続いてハプロタイプマップが作成され、ヒト遺伝学における変異が解明された。今日では、後続プロジェクトによって特定のヒト集団における遺伝子変異に関するより詳細な情報が得られている。天文学においては、SDSSの後継として、大型シノプティック・サーベイ望遠鏡（LSST）がまもなく建設される予定で、ほぼあらゆる点でSDSSを凌駕するサーベイを実施する。チリのアンデス山脈に建設中のLSSTは、世界最大級の望遠鏡の一つとなる予定で、有効鏡径は6.68メートルとSDSSの鏡よりもはるかに大きく、はるかに優れた画像を生み出す。この望遠鏡は非常に広大な視野を持ち、4日に一度、可視光線で見える空全体を観測します。これまでは空の一部の地図を作るのに何年もかかっていましたが、この望遠鏡で観測されたすべてのデータは、すぐにオンラインで公開されます。

これらをはじめとする類似のプロジェクトを合わせると、私たちの世界は信じられないほど詳細に、前例のないほど詳細に描かれています。もちろん、アルマゲストから18世紀、19世紀の偉大な植物学者に至るまで、科学の歴史全体を通して同様の調査プロジェクトが実施されてきました。しかし、今日行われていることは特別で前例のないことです。インターネットは、私たちが構築しているモデルを共有し、そこから意味を引き出す能力を劇的に拡大しました。これは、SDSSが鮮明に示しているように、それらの科学的影響力を相応に高めることにつながっています。その結果、これらの取り組みの数と野心は爆発的に増加し、15世紀から18世紀の探検家たちの時代によく似た、大航海時代をもたらしました。しかし、当時の探検家たちが地球の地理の限界まで到達したのに対し、新たな発見者たちは私たちの科学世界の境界を探検し、地図に描き出しています。

オンラインで共有されるデータが増えるにつれ、観察とデータ分析の伝統的な関係性は変化しつつあります。歴史的に、観察と分析は密接に結びついており、実験を行った人がデータ分析も担当していました。しかし今日では、最も価値のある分析が元の研究室以外の人々によって行われることがますます一般的になっています。科学の一部の分野では、分業体制が変化しており、実験装置の構築とデータ収集に特化した人もいれば、そうでない人もいます。

実験データの分析に特化しています。例えば生物学では、バイオインフォマティクスという新しいタイプの生物学者が登場しました。彼らの主なスキルは細胞培養などの生物学研究室の伝統的なスキルではなく、コンピュータプログラマーと生物学者のスキルを組み合わせることで既存の生物学的データを分析することです。同様に、化学ではケモインフォマティクス、天文学ではアストロインフォマティクスが登場しました。これらの分野では、新しい実験を行うのではなく、既存のデータに新たな意味を見出すことに重点が置かれています。

## なぜデータを公開するのでしょうか？

科学者がなぜ、そしていつデータを公開するのかという謎に戻りましょう。その手がかりは実験の規模にあります。SDSS、海洋観測イニシアチブ、そしてアレン・ブレイン・アトラスはいずれも数千万ドルから数億ドルの費用がかかります（あるいはかかる見込みです）、数百人から数千人の人々が関わっています。先ほどのヒトゲノム計画やハプロタイプマップといったオープンデータの例は、いずれも大規模なプロジェクトでした。しかし、ほとんどの科学実験ははるかに小規模です。そして、小規模な実験においては、オープンデータは例外であり、原則ではありません。

オープンデータに興味を持つようになる前、私は13年間物理学者として働いていました。その間、何百もの実験を見てきましたが、そのほとんどは小規模な研究室で行われた小規模な実験でした。私の知る限り、それらの実験のうち、データをオープンにするための体系的な取り組みを行ったものは一つもありませんでした。冒頭の章でも似たようなことが見られました。科学者たちは当初、GenBankなどのオンラインデータベースで遺伝子データを共有することに消極的でした。この状況は、ヒト遺伝子データの共有に関するバミューダ協定など、大規模な協力によってようやく変化しました。今日、科学界全体で状況は変化しており、一部の科学雑誌や助成機関は、実験結果が発表された後もデータのオープンアクセスを奨励または義務付ける方針を制定しています。しかし、オープンデータは依然として例外であり、一般的ではありません。地元の大学に行き、小さな研究室に入ると、データが鍵のかかった状態で保管されていることに気づくでしょう。時には文字通り、鍵がかかっていることもあります。

大規模な科学プロジェクトは、小規模なプロジェクトよりもデータを公開する傾向があるようです。なぜでしょう？

説明は政治的です。SDSSについて考えてみてください。典型的な小規模な天文学プロジェクトの費用は「わずか」数万ドルから数十万ドルかもしれません。これは多額のお金ですが、社会が天文学に費やす数十億ドルからすればわずかな金額です。実験を行っている人々がデータを自分たちだけで保管すれば、他の天文学者にとって大きな損失にはなりません。さらに、それらの他の天文学者は文句を言う立場にありません。なぜなら、彼らも実験のデータを秘密にしているからです。これは安定した非協力的な状況です。しかし、SDSSの規模はそれを特別で異質なものにしています。それは非常に大きいため、世界の天文学予算の多くを消費しています。データが秘密にされれば、SDSSコラボレーション以外の天文学者にとっては、そのお金のすべてが天文学予算から消えてしまったのと同じなのです。

彼らがデータの公開を強く求めるのには十分な理由があります。したがって、大規模プロジェクトが少なくとも部分的な公開を約束しない場合、資金申請は共同研究の外部にいる同じ分野の研究者によって却下されるリスクがあります。これが、大規模な科学プロジェクトがデータを少なくとも部分的に公開しようとする動機となっているのです。

科学データのオープン化を阻害するもう一つの要因は、たとえデータを共有したいと思っても、他者にとって有用な方法で共有することが難しい場合があることです。気に入った銀河の写真をいくらでも撮って他の人と共有することはできますが、様々な追加情報がなければ、それらの写真は科学的にはあまり役に立ちません。どのようなカラーフィルターを使用しましたか？例えば、不良ピクセルや損傷したピクセルを除去するなど、画像に何らかの処理は施されていますか？撮影時に霞がかかっていて、画像が不明瞭になっていませんか？などなど。科学の多くの分野において、詳細な校正情報なしに実験データを理解することは困難です。そして、データと校正情報があっても、他の科学者がそのデータを活用するには、実験を非常に詳細に理解する必要があります。それに加えて、全員が専門用語を全く同じ方法で使用していることを確認することや、ファイル形式の変換などといった問題もあります。これらは個別には解決可能な問題ですが、それらが重なると、有用な方法でデータを共有する上で大きな障害となります。

データ共有に関するこれらの疑問は、より深い物語、つまり科学的知識がなぜ、いつ共有されるのかという物語の一部です。本書の冒頭で、科学者は論文執筆によって名声とキャリアを築くと何度も述べました。優れた論文執筆の名声は、良い研究職に就き、継続的な助成金の支援を受けることにつながります。データ共有における課題の多くは、科学者がデータ共有によって得る報酬が、論文執筆によって得られる報酬よりもはるかに不確実であることです。

論文。確かに、SDSSのようないくつかの大規模共同研究は、データ共有で広く称賛されています。しかし、科学の多くの分野では、他者のデータの使用をどのように、いつ認めるべきかについて確立された規範はほとんどありません。つまり、科学者にとってデータ共有はリスクを伴います。データは非常に価値があるにもかかわらず、科学者は一般的に十分な報酬を得られません。そのため、オープンデータは、特に小規模な研究室では依然として一般的ではありません。科学者にデータ共有への熱意を持ってもらう方法（およびその他の関連する質問）については、第8章と第9章で再び取り上げます。本章の残りの部分では、SDSSやヒトゲノムプロジェクトなどのプロジェクトを通じて、既に相当量の（そして増加しつつある）科学データが公開されていることで十分です。

## データウェブを夢見て

本章ではこれまで、SDSSなどの既存のプロジェクトを例に、具体的かつ短期的な視点から考察してきました。しかし、インターネットは人間の知識を操作するための、限りなく柔軟で拡張可能なプラットフォームであり、その可能性は無限大です。その可能性を理解するには、思考を広げ、インターネットを10年や20年の革命ではなく、100年や1000年の革命と捉える長期的な視点を持つ必要があります。科学情報コモンズの構築が実を結んだ世界を想像する必要があります。それは、あらゆる科学知識がオンラインで利用可能になり、コンピュータが理解できる形で表現される世界です。さらに、今日のように、アミノ酸、遺伝子、タンパク質、医薬品、人間の医療記録といった、自然界で根本的に繋がっている現象が、それぞれ個別にサイロ化された形で記述されているような、小さな知識の島々にデータが孤立している世界を想像してみてください。そうではなく、あらゆる知識を繋ぐ、リンクされたデータのウェブが生まれるのです。断片的に知識を掘り出すのではなく、人類の知識全体に対して自動推論を行い、スワンソンの研究やSDSSさえも凌駕する規模で隠れたつながりを発見できるようになるでしょう。この夢に名前を付けましょう。「データウェブの夢」と呼ぶことにしましょう。

データウェブは壮大なものに聞こえるかもしれませんが、しかし、これまで見てきたように、SDSSやヒトゲノム計画といったプロジェクトを通して、私たちはすでにデータウェブ実現に向けて小さな一歩を踏み出しています。徐々に現れつつあるのは、人間ではなく機械が解釈することを意図した、オンラインの知識ネットワークです。機械は知識ネットワークの中に意味を見出し、私たちに説明をしてくれるでしょう。本章の残りの部分では、データウェブがどのように構築され、それが何を意味するのかを考察します。

しかし、この議論には難しさがあります。それは、コンピュータが知識に意味を見出す可能性についてのあらゆる議論を悩ませる難しさです。この可能性について推測すればするほど、本格的な人工知能、つまりインターネットが目覚めて世界を征服するというSF的なシナリオへと議論が進んでしまうのです。この議論は非常に楽しいのですが、「では、機械は意識を持つことができるのだろうか？そもそも意識とは何なのだろうか？」とか、「ええ、もしかしたらいつかインターネットが目覚めて世界を征服するかもしれないが、それはどうだろう？」といった憶測的な疑問に陥りがちです。これらはいずれも、これまで何度も議論されてきた領域です。こうした議論を繰り返す代わりに、本章の前半で論じた短期的なプロジェクトと本格的な人工知能の中間地点を探ってみましょう。この中間的な未来は概念的に豊かで魅力的である一方、不思議なことに議論がほとんど進んでいません。おそらく、人工知能の夢がテクノロジーに興味のある人々の想像力を強く惹きつけるからでしょう。私たちは、コンピュータサイエンスの最新のアイデアを統合し、今日のアルゴリズムをあらゆる科学的知識に適用できる未来を想像するとどうなるかを理解しようと試みます。これからご覧いただくように、その成果は驚くべきものとなるでしょう。

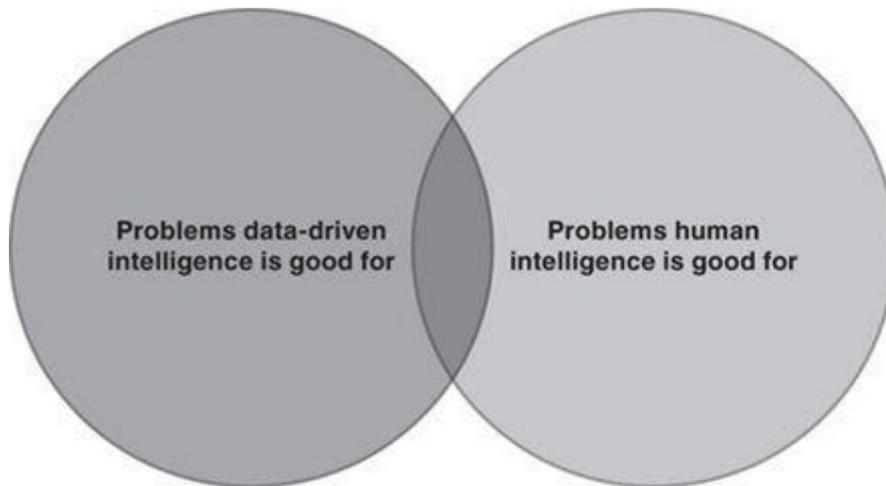
## データ駆動型インテリジェンス

データウェブの活用方法を理解するには、コンピュータがデータから意味を抽出する能力に名前を付けると役立ちます。私はこの能力を「データ駆動型インテリジェンス」と呼びたいと思います。データ駆動型インテリジェンスの例としては、ドン・スワンソンが片頭痛とマグネシウムの関連性を発見するために行ったMedline検索で使用されたアルゴリズム、Google検索とCDCのインフルエンザデータを相関させるアルゴリズム、そして

SDSS から矮小銀河や周回ブラックホールを探し、スローン グレート ウォールを発見します。

「データ駆動型知能」という用語は新しいものではない。しかし現状では、私が提案するよりも限定的な意味で、企業のビジネス上の意思決定におけるデータ駆動型のアプローチ、例えば航空会社がフライトのオーバーブッキング率を決定するために、ノーショー乗客のデータを活用する方法を指すのが一般的である。私は、この用語を「人間の知能」や「人工知能」といった用語と同様に、より一般的な意味で、広義の知能のカテゴリーとして用いることを提案する。この一般的な意味での「データ駆動型知能」は、データ駆動型知能の事例が膨大かつ急速に増加していることもあって、非常に必要とされている用語である。しかし、さらに重要なのは、この用語が意味を見出すための特定のアプローチ、すなわちコンピューターが極めて適したアプローチ、そして人間が意味を見出す方法とは異なり、かつそれを補完するアプローチを強調している点である。

もちろん、人間至上主義者は「データ駆動型知能」における「知能」という言葉の使い方に異議を唱えるかもしれません。コンピューターが1000万本の科学論文を検索したり、SDSSで矮小銀河を探したりすることに、それほど知的な要素はないと主張するでしょう。それは単なる定型的な機械的な作業であり、その規模は人間の能力をはるかに超えているとはいえ、です。しかし、重要なのは、これらは私たち人間には全く解決できない問題だということです。テラバイト、あるいはペタバイト（数千テラバイト）のデータから意味を引き出すことに関しては、人間は他の動物と比べてそれほど優れているわけではありません。この分野で人間が持っている能力は、せいぜい視覚画像を処理する能力など、ごく限られたごく限られた能力であり、汎用的な大規模データ処理能力は事実上ありません。では、この分野でコンピューターを判断する資格が私たちにはあるのでしょうか？ 補助なしの人間が大規模なデータセットを処理する能力は、犬の算術能力に匹敵し、それほど価値があるものではありません。これらの問題ではコンピューターがそれほど賢くなくてもよいかもしれませんが、この問題領域においては、コンピューターは人間よりもはるかに賢くなっています。この視点は、このページに示されている図に示されています。



図の右側にある問題、つまり人間のスキルと創意工夫が最も価値を発揮する問題に焦点を当てるのは人間の性です。そして、データ駆動型インテリジェンスが真価を発揮する左側の問題を過小評価するのは、人間として当然の偏見です。しかし、この偏見を脇に置いて、左側の問題について考えてみましょう。コンピューターが解決できて人間が解決できない問題は何でしょうか？そして、その能力と人間の知性を組み合わせれば、それぞれ単独では不可能なことをどのように実現できるのでしょうか？

後者の例として、2005年にチェスのウェブサイトPlaychess.comがフリースタイルチェストーナメントと呼ばれる大会を開催しました。これは、人間とコンピューターがハイブリッドチームとして一緒に参加できるトーナメントを意味します。言い換えれば、このトーナメントでは、人間の知能が、チェスをプレイするコンピューターというデータ駆動型の知能とチームを組むことができました。コンピューターは、膨大なオープニングとエンドゲームのデータベースを活用し、中盤における無数の組み合わせの可能性のある動きを分析できます。このトーナメントに参加したチームの一つは、Hydraシリーズのチェスコンピューターを開発するチームでした。当時世界最強のチェスコンピューターであったHydraは、通常のプレイでは人間のチェスプレイヤーに一度も負けたことがなく、トップクラスのグランドマスターを何度も簡単に破っていました。

Hydraチームは2台のコンピューターをエントリーし、1台は完全に単独でプレイし、もう1台は人間の支援を受けてプレイしました。トーナメントには、強力なグランドマスターと強力なチェスコンピューターを組み合わせたチームもいくつか参加しました。グランドマスターもコンピューターも単独ではHydraに太刀打ちできませんでした。しかし、人間とコンピューターの合同チームはHydraを圧倒しました。Hydraはトーナメントで優勝できなかっただけでなく、準々決勝にも進出できませんでした。グランドマスターがHydraに勝てたのは、いつコンピューターに頼るべきか、いつ自分の判断に頼るべきかを理解していたからです。さらに興味深いのは、トーナメントの優勝者はZackSというチームで、2人の低レベルのコンピューターで構成されていました。

市販のコンピュータ3台と標準的なチェスソフトを使った、ランク付けされたアマチュアプレイヤーによる対局。彼らはハイドラを圧倒しただけでなく、強力なチェス用コンピュータでグランドマスターたちをも圧倒しました。

ZackSの人間オペレーターたちは、コンピュータアルゴリズムのデータ駆動型知能を駆使してチェスのプレイ能力を高めるといって、卓越したスキルを発揮しました。このトーナメントのオブザーバーの一人、ガルリ・カスパロフは後に、「弱い人間+機械+優れたプロセスの組み合わせは、強いコンピュータ単体よりも優れており、さらに驚くべきことに、強い人間+機械+劣ったプロセスの組み合わせよりも優れていた」と述べています。

データ駆動型インテリジェンスは、人工知能よりも幅広い目標を持っています。人工知能は大抵、人間が得意とするタスクを取り上げ、人間のパフォーマンスを模倣するか、あるいはそれを上回ることを目指します。チェッカー、チェス、囲碁といった人間が行うゲームをコンピュータプログラムで遊ぶことや、コンピュータに人間の話し言葉を理解させるよう訓練する取り組みについて考えてみてください。データ駆動型知能は、こうした従来は人間が行っていたタスク（人間の話し言葉を理解したり、チェスをしたり）に適用できますが、本当に優れているのは、さまざまな種類の問題、つまり人間の知能を補完するスキルを必要とする問題、たとえばスワンソンによる医学研究文献の検索や、ボロソンとラウアーによるSDSSデータからの軌道を回るブラックホールのペアのマイニングなどを解決するときです。本格的なデータ駆動型知能は、チェッカー、チェス、囲碁を遊ぶことはできますが、楽しむために遊ぶわけではありません。遊ぶのは、人間の理解を完全に超える複雑さを持つゲームです。

「インテリジェンス」という言葉は、しばしばある種の一般的な知的能力を指すのに用いられます。データ駆動型インテリジェンスはよりの絞った性質を持ち、様々な種類のデータ駆動型インテリジェンスが、様々な種類の問題の解決に用いられます。次のセクションでは、生物学者がゲノム配列解析に用いるアルゴリズムを例に挙げ、具体的な例を見ていきます。Medlineなどのサービスでは、検索には全く異なるアルゴリズムが用いられています。それぞれの問題には、異なる種類のデータ駆動型インテリジェンスが必要です。結果として、ある問題領域におけるデータ駆動型インテリジェンスは、最初は非常に愚かなものであっても、改良された手法が開発されるにつれて徐々に賢くなる可能性があります。例えば、スワンソンが片頭痛とマグネシウムに関する研究を行った当時、Medlineなどの検索ツールは比較的単純なアイデアを用いていました。今日の検索エンジンははるかに洗練されたアイデアを用いており、明日の検索エンジンは間違いなくさらに優れたものになるでしょう。実際、データ駆動型インテリジェンスがGoogleなどの企業の利益向上に貢献するにつれ、これらの企業はより優れた技術の開発に資金を投入し、結果として改善の好循環が生まれます。

データ駆動型インテリジェンスは集合知とどのように関連しているのでしょうか？  
実は、それは今回の議論にはあまり適切な質問ではありません。私たちはデータ駆動型知能を、私たち自身の知能を拡張する方法として捉えているのですから、より適切な質問はこうです。「データ駆動型知能は、[パート1](#)で学んだツール、つまり集合知を増幅するツールとどのように関係するのか？」先ほど見たように、これらのツールは専門家の注意力を再構成し、より効果的に配分することで機能します。したがって、集合知を増幅するツールとデータ駆動型知能の間には直接的な関係はありません。しかし、この2つは補完的に活用することができます。

例えば、Medlineのようなデータ駆動型ツールは、生物医学コミュニティのような大規模な集団の集合知に隠された意味を見つけるための新しい方法を提供しています。また、Googleのようなデータ駆動型ツールは、私たちが注目すべき情報や人物を見つけるのを支援することで、私たちの集合知を増幅させることができます。逆に、Googleは私たちの集合知を利用してサービスを構築し、ウェブからコンテンツをマイニングし、ウェブのリンク構造を利用してどのページが最も重要かを判断しています。このように、データ駆動型と集合知は異なるものですが、互いに補完し合うことができます。

これはデータ駆動型インテリジェンスの教科書ではありませんし、使用中または開発中の何百もの巧妙なアルゴリズムについては説明しません。私たちにとって、データ駆動型インテリジェンスは、Google Flu Trends、Sloan Great Wall、Swanson の片頭痛とマグネシウムの発見などの例を統合する概念として主に重要です。これらすべての例の根底には、人間の理解を超えたデータから意味を抽出する巧妙なアルゴリズムがあります。データ駆動型インテリジェンスは、ある意味でデータウェブを補完するものです。データ駆動型インテリジェンスはあらゆるデータソースに適用できますが、可能な限り豊富なデータソースに適用したときにその可能性を最大限に発揮します。そして、データウェブは私たちが想像できる最も豊富なデータソースです。データ駆動型インテリジェンスは、世界中の知識をすべて取り入れて意味を引き出すことを可能にするものです。

## 生物学におけるデータ駆動型インテリジェンス

データ駆動型インテリジェンスをより具体的に理解するために、生物学を例に挙げてその仕組みを詳しく説明しましょう。この例は、巧妙なアルゴリズムと科学情報コモンズを活用して、驚くべき成果、つまり人間のゲノムを発見する方法を示しています。この例を理解するには、まず遺伝学の背景を少し思い出す必要があります。ご存知のように、私たちの体の細胞一つ一つには、DNA分子の鎖が多数含まれています。これらのDNA鎖は情報を担っており、その情報こそが私たちの設計なのです。

DNAがこの情報をどのように運ぶかを理解するには、DNAの二重らせん構造を思い出してください。らせんは美しく印象に残りますが、情報はらせん自体に格納されているわけではありません。そうではなく、情報はらせんとらせんの間に格納されています。二重らせんを上に向かって数ナノメートル進むと、らせんの両側を結合する分子のペアがあり、塩基対と呼ばれます。これは、互いに結合し、二重らせんのバックボーンにも結合する、特別な小さな分子のペアです。塩基分子には、アデニン、シトシン、グアニン、チミンと呼ばれる4種類があります。これらの名前は通常、A、C、G、Tと短縮されます。AはTに、CはGに結合するため、可能なペアはATとCGです。したがって、1本のDNA鎖の情報は、CGTCAAGGなどの長い文字列で記述できます。— らせんの片側に結合した塩基を表します（反対側には相補的な塩基、GCAGTTCCが存在します…）。この配列は、基本的な構造を記述するものです。この構造がどのように規定されているかは、まだ部分的にしか解明されていませんが、私たちが知っている限りでは、DNA塩基対の配列が私たちの設計図であることが示唆されています。

。

どのようにして人のDNA配列を解読するのでしょうか？実際、数百塩基対のDNA断片であれば、巧妙な昔ながらの化学技術を用いて直接配列を解読できます。つまり、一人の科学者が研究室で化学物質を慎重に混合するだけです。しかし、DNA鎖がそれよりもはるかに長い場合、配列解読の問題はより複雑になります。典型的なヒトDNA鎖は数億塩基対から成り、直接解読するには長すぎます。しかし、短いDNA鎖の直接解読とデータ駆動型インテリジェンスを組み合わせることで、DNAの全配列を解読する巧妙な方法があります。

仕組みを理解するために、ハリー・ポッターの最初の本『ハリー・ポッターと賢者の石』をあなたに渡したと想像してみてください。ただし、普通の本を渡す代わりに、ハサミで本を小さな断片に切り分けま。例えば、本の冒頭部分は、次のような断片に切り分けられるかもしれません。

「ダーズリー夫妻、4番地、プライベート」

「et Drive は、彼らが」と言うことを誇りに思っています。

「全く正常です、ありがとうございます。」

などなど。ここでは少し簡略化して、本の冒頭と同じ順序で断片を示しました。しかし、私がそれらを間違った順序で、ごちゃ混ぜにして渡したと想像してみてください。同時に、この本の2冊目も、同じように小さな断片に切り分けられていますが、切り分け方は異なります。

「ダーズリー夫妻、番号」

「プライベート ドライブの4人は誇りに思っています」

「完全に正常だったと言ってください」。

2つの事例の断片はそれぞれ異なりますが、かなり重複しており、それらの重複を利用して、どの断片が一緒になるかを判断することができます。例えば、「Mr. and Mrs. Dursley, of number 4, Priv」という断片は、「Mr. and Mrs.」と「Mr. and Mrs.」の両方と重複していることに注目してください。

「プライベート通り4番地のダーズリー夫妻は誇りに思っていた」これは、最後の2つの部分を貼り合わせて「ダーズリー夫妻」にすることを意味します。

プライベート通り4番地のダーズリーは、それを誇りに思っていたのです。」このように注意深く続ければ、本からかなり長い文章を再構成できるでしょう。偶然にも、二つの断片の重なりがあまりにも短く、それが本当に同じ文章の重なり合った断片だと判断するのが難しい場合にのみ、行き詰まります。しかし、もし私があなたに、このようにランダムに切り取った本の3冊目（そして4冊目……）を渡したら、どの時点でも重なりが全て短い可能性は劇的に減り、本全体を再構成できる可能性も十分にあります。

ヒト（および他の複雑な生命体）のゲノム配列解析も同様の仕組みで行われます。長いDNA鎖を直接配列することはできませんが、それらのDNA鎖を多数コピーし、ランダムな位置で切断して断片を直接配列解析することができます。これはすべて、昔ながらの化学技術、つまり一人の科学者が研究室で作業するといった方法で行うことができます。そして、コンピューターを用いて、異なる断片が重なり合う場所を特定します。

そして、すべてを再び組み立てます。(ちなみに、ヒトゲノム全体にわたる特定のDNA配列の繰り返しなど、いくつかの微妙な点については触れていません。これらの繰り返しは、DNA配列全体を再構成する上で困難を生じさせます。これらの微妙な点は他のトリックで対処できますが、これで大体のところは理解できたと思います。)

さて、今日、ある人の DNA の配列を解析したいとします。親子鑑定のためかもしれません。あるいは犯罪捜査の一環かもしれません。理由は何でも構いません。実は、(1) 参照ヒトゲノムが既に分かっていること、(2) ハプロタイプマップのおかげでゲノムのどこで人々が異なっているのか、そしてどこでは常に同じなのかが分かっていること、という2つの事実を利用することで、上記のDNA配列決定の手順を実際に簡略化できることがわかりました。この簡略化されたプロセスがどのように機能するかを理解するために、今、あなたが『ハリー・ポッターと賢者の石』の完全版を持っていると想像してみてください。次に、似た内容だが数箇所が変更された本の切り取られたコピーを渡されます。実際、この本はイギリスで最初に発売されてからアメリカで発売されるまでの間に本当に変更されたのです。

特に目立つ変更点は、タイトルの「Philosopher」という単語が「Sorcerer」に変更され、タイトルが「Harry Potter and the Sorcerer's Stone」になったことです。本全体を通して「philosopher」が「sorcerer」に置き換えられており、おそらく出版社はこの本が米国でより受け入れられると考えたのでしょう。元の本の全文を参照できれば、修正された本のテキストを解明するのがはるかに容易になることは明らかです。どの断片がどの断片と一致するかを苦労して解明する代わりに、現在調べている断片が本のどの部分からのものか常に把握できます。同様に、参照ゲノムとハプロタイプマップを常に参照することで、ヒトゲノムの配列決定をより迅速かつ容易に行うことができます。

ちなみに、ハリー・ポッターの例は空想的ですが、チャック・ハンセン氏が著書『米国の核兵器：秘められた歴史』の執筆に非常によく似た手法を用いていたことを付け加えずにはいられません。ハンセン氏は、機密情報を物理的に切り取ってサニタイズした数万点の機密解除文書を基に歴史を記述しました。彼は、同じ文書でも異なるコピーが異なる方法でサニタイズされていることを発見し、異なるバージョンを比較することで、削除された情報を復元できる場合もあったのです。

私が説明したゲノム配列解析のアルゴリズムは、データ駆動型インテリジェンスの好例です。これらのアルゴリズムが特に賢いというわけではありません。単純なパターン認識以上のことはほとんど行いません。

マッチングと再配置。しかし、これらの単純なアルゴリズムと膨大なデータ処理能力を組み合わせることで、人間の力だけでは到底解決できない問題を解決できます。さらに、データ駆動型インテリジェンスをヒトゲノムのオープンデータやHapMapと組み合わせることで、遺伝子配列解析の問題を簡素化できます。これは、データ駆動型インテリジェンスがデータウェブと融合することで、はるかに大規模なものとなるでしょう。

## データウェブの構築

今日、データウェブはまだ黎明期にあります。ほとんどのデータは依然としてロックされた状態です。データ共有においては、様々な技術が活用されています。利用可能なオープンデータセットは、ほとんどが互いに接続されておらず、それぞれがサイロ化された状態で存在しています。

要するに、データウェブの現状は、雑然としていて混沌としていて不完全です。それでも構いません。新しい技術の初期の頃は、往々にして雑然としているものです。ライト兄弟が初飛行をする前の1890年代から1900年代初頭にかけての航空史が、いかに雑然としていて混沌としていたかを考えてみてください。

何十人もの人々が、空気より重い飛行機を造る最良の方法について、それぞれ独自のアイデアを模索していました。こうしたアイデアの混乱の中から、最初の飛行機がゆっくりと誕生しました。同様に、今日では何千もの人々や組織が、データウェブを構築する最良の方法について、それぞれ独自のアイデアを持っています。皆、ほぼ同じ方向を目指していますが、細部には多くの違いがあります。おそらく最もよく知られているのは学界からの取り組みで、多くの研究者がセマンティックウェブと呼ばれるアプローチを開発しています。ビジネスの世界では、企業が様々なデータ共有方法を試みているため、状況はより流動的です。こうした多様なアプローチがあるため、データウェブを構築する最良の方法については、しばしば強い確信と確信を持って、熱のこもった議論が交わされています。しかし、データウェブはまだ初期段階にあり、どのアプローチが成功するかを断言するのは時期尚早です。これらの理由から、私は「データウェブ」という用語を、すべてのオープンデータを総体的に指すために、かなり緩い意味で使用しています。少し大げさな表現かもしれませんが、多くのデータはきちんとリンクされていないか、オンラインで見つけるのが難しいからです。しかし、リンクは今後確立されるので、多少の妥協はしました。

データウェブの構築に最終的にどのような技術が使われるかが分からなければ、データウェブが成長し、繁栄していくと確信できるでしょうか？確信できるのは、多くの人々がデータを共有し、他の情報源とリンクさせたいと望んでいるからです。科学の世界で、これがどのように起こっているかを少し見てきました。多くの企業や政府にも当てはまり、少なくとも一部のデータを公開しているところもあります。例えば、ウェブサイトTwitterは一部のデータを公開しており、これがTwitterで写真を簡単に共有できるTwitPicや、Twitterを効率的に利用できるTweetdeckといったサードパーティサービスの誕生につながっています。別の例として、バラク・オバマ米大統領は就任式の翌日、「透明性とオープンガバメント」に関する覚書を発表しました。この覚書は、data.govというウェブサイトの開設につながりました。米国政府はこのウェブサイトで、エネルギー使用から航空事故、テレビ免許まで、幅広いテーマに関する1,200以上のオープンデータセットを共有しています。

こうした事例は、最大数のユーザー間でデータを共有するための技術開発を牽引しています。どの技術が広く普及するかは、必然的にデータウェブとなるでしょう。だからこそ、データウェブのどの技術的ビジョンが勝利するかを知る必要はなく、データウェブが不可避であると結論づける必要があるのです。

おそらく、データウェブに向けたこれまでの最も印象的な進歩は、生物学の分野で遂げられてきたものです。生物学者は、生物界の一部を拾い上げてマッピングし、生物学全体の統一マップの構築に取り組んでいます。これまでに、こうしたマッピングの一部、つまりヒトゲノム、ハプロタイプマップ、そして始まったばかりのヒトコネクトームについて説明しました。しかし、他にも多くのものがあります。タンパク質の構造と機能、タンパク質間のさまざまな相互作用（「インタラクトーム」）をマッピングするなど、生物界を非常に小さなレベルで記述するオンラインデータベースがあります。動物の移動パターンなどをマッピングする大規模な生物界を記述するオンラインデータベースや、世界中のすべての種をマッピングしようとするカタログもあります。そして、その間のあらゆるレベルのオンラインデータベースがあり、生物界を記述するためのリソースが豊富に用意されています。Wikipediaの生物学データベースのリストには、2011年4月の時点で100件を超えるエントリがあります。これらのデータベースは、生物システムのつながりを反映するために、潜在的にリンクできます。つまり、遺伝情報はタンパク質情報にリンクされ、タンパク質情報はタンパク質相互作用に関する情報にリンクされ、タンパク質相互作用情報は代謝に関する情報にリンクされ、といった具合に、すべてが生物学の統一されたマップに向けて構築されます。

この初期の生物学的データ ウェブをマイニングするサービスが開発されつつあります。生物学版の Google のようなもので、生命に関する複雑な疑問にすばやく答えることができます。データ ウェブの生物学的部分が繁栄した未来の世界を想像してみてください。生まれたばかりの子供のゲノムの配列をすぐに決定し、それを巨大な公衆衛生記録のデータベースと関連させて、子供が特にかかりやすい病気 (SF の古い表現) だけでなく、病気に対する感受性に影響を与える環境要因も特定することを想像してみてください。「あなたの息子さんは、20 代と 30 代に運動不足だと、40 代で心臓病になる確率が 80 パーセントになります。しかし、毎週 3 時間の適度な運動をすると、その確率は 15 パーセントに下がります。」問題が明らかになると、個人の遺伝子構成と過去の病歴に合わせて特別に設計された特別な薬が作られるようになります。

今日、生物学的データウェブはプロトタイプに過ぎません。生命は様々なレベルで計り知れないほど複雑であり、私たちは生物界の姿を描き始めたばかりです。基本的な概念カテゴリーを確定することさえ困難です。遺伝子の概念を考えてみましょう。つい最近まで、生徒たちは遺伝子とはタンパク質をコードする DNA の一部であると教えられてきました。これは一見単純なように思えます。しかし実際には、DNA とタンパク質の関係がより深く理解されるにつれて、科学者が遺伝子と呼ぶものは変化しつつあります。遺伝子がタンパク質をコードするという初期の知見は不完全です。現在では、同じ DNA 配列が異なる方法で転写され、異なるタンパク質に変化することが分かっています。同時に、ゲノムの複数の断片から DNA が転写され、時には異なる染色体上の遺伝物質から転写されることで、単一のタンパク質が形成されることもあります。これらは、遺伝子の概念が現在変化している多くの方法のうちのほんの 2 つに過ぎません。より一般的には、生物学への理解が深まるにつれて、多くの基本概念が再定義されています。そして、このような再定義が起こると、知識の表現方法に大きな影響を与える可能性があります。将来のある時点で、古い概念スキーマが間違っており、更新する必要があることがわかり、知識のデータベースを根本的に再構築する必要があることは容易に想像できます。

データウェブが科学にもたらすもの

データ ウェブが発展するにつれて、科学は2つの方法で変革されるでしょう。

一つ目の方法は、答えられる科学的疑問の数と多様性を劇的に増やすことです。SDSSが天文学における何千もの新たな疑問に答えることを可能にしてきたことは既に見てきました。利用可能なデータソースが増え、それらがより豊かにリンクされるほど、その効果は劇的なものになるでしょう。Googleの検索データとCDCのインフルエンザデータがどのように組み合わせられたかを考えてみてください。どちらか一方のデータセットだけでは、「今、インフルエンザはどこで発生しているのか？」という質問に答えるのは困難です。しかし、両方のデータセットがあれば、その質問に答えることができます。その結果は魔法のような、まさにフリーランチのような性質を持っています。2つのデータセットを組み合わせることで、元々それらのデータセットで答えられていたすべての疑問に答えられるだけでなく、それらのデータセット間の関係性から生まれる驚くべき新しい疑問にも答えることができるのです。データウェブが拡大するにつれて、問える疑問の数と多様性も増大します。ある意味では、答えられる疑問は、複雑な知識体系の創発的な特性と言えるでしょう。つまり、答えられる疑問の数は、あなたの知識よりもはるかに速いペースで増えていくのです。そして、データ ウェブは世界のすべての知識を包含することを目指しています。

データウェブが科学を変革する二つ目の方法は、説明そのものの性質を変えることです。歴史的に、科学においてはシンプルな説明が重視されてきました。偉大な理論の多くは、一見異なる多くの現象を一つの核となるアイデアで説明する、いわば「帽子からウサギが出てくる」ような性質を持っています。例えば、ダーウィンの自然選択による進化論は、その核となるアイデアは一つだけですが、生命の進化を理解するための驚くほど強力な枠組みとなっています。別の例として、アインシュタインの一般相対性理論は、物理学者ジョン・ホイーラーによって一文で美しく要約されています。「時空は物質に動き方を指示し、物質は時空に曲がり方を指示する。」このシンプルなアイデアを数学的に表現すると、投げられたボールの飛行から惑星の運動、そして宇宙の起源に至るまで、あらゆる重力現象を説明できます。これは説明の奇跡であり、多くの科学者（私を含め）は、初めてそれを理解したときに啓示を受けます。

しかし、いくつかの現象は単純に説明できません。スペイン語を英語に翻訳する問題について考えてみましょう。これらの言語は、歴史的起源におけるあらゆる偶然性の結果として、多くの偶発的な複雑さを内包しています。質の高い翻訳を行うには、こうした複雑さすべてに対処せざるを得ません。日常生活において、翻訳者は、翻訳対象の詳細に関する豊富な知識を通して、この複雑さに対処しています。

言語、そして長年にわたる両言語への接触を通して培われた、言葉では言い表せない直感によって、ある程度は理解できる。スペイン語から英語への翻訳方法を真に正確に説明するには、必然的に非常に複雑なものになり、進化論や一般相対性理論のような単純さは到底得られないだろう。

最近まで、私たちが用いる科学的説明の複雑さは、私たち自身の知性の限界によって制約されていました。今日では、コンピュータを用いて極めて複雑なモデルを構築し、それを扱う方法を習得するにつれ、この状況は変わりつつあります。この変化を説明するために、機械言語翻訳の分野から例を挙げましょう。1950年頃から、研究者たちは、ある言語から別の言語に自動的に翻訳することを目的としたコンピュータシステムの構築を始めました。残念ながら、初期のシステムはあまり優れたものではありませんでした。彼らは、文法規則やその他の言語規則に基づいた、比較的単純な巧妙なモデルを用いて翻訳を行おうとしたのです。これは良いアイデアのように聞こえますが、多大な努力にもかかわらず、うまく機能することはありませんでした。人間の言語には、そのような単純な規則では捉えきれないほどの複雑さが含まれていることが判明したのです。

1990年代、機械翻訳の研究者たちは、これまでとは全く異なる新しいアプローチを試み始めました。彼らは従来の文法や言語のルールを捨て去り、膨大なテキストと翻訳のコーパス（例えば、国連の文書など）を収集することから研究を始めました。彼らのアイデアは、データ駆動型知能を用いてこれらの文書を大量に分析し、翻訳モデルを推論しようとするものでした。例えば、コーパスを分析する中で、プログラムは「hola」という単語を含むスペイン語の文の英語訳には「hello」という単語が頻繁に含まれていることに気付くかもしれません。このことから、プログラムは「hola」という単語が翻訳文で「hello」という単語になる確率が高いと推定しますが、「hola」に関連のない英語の単語（例えば「tiger」「couch」「January」）の場合はその確率をはるかに低くなります。プログラムはコーパスを調べて、単語が文中でどのように動いているかを把握し、例えば「hola」と「hello」は文中の同じ部分に出現する傾向があるのに対し、他の単語はより多く動いていることを観察します。これをスペイン語と英語のすべての単語ペアに対して繰り返すことで、プログラムは徐々に翻訳の統計モデルを構築しました。これは非常に複雑なモデルですが、現代のコンピュータに保存できるものです。ここでは彼らが使用したモデルの詳細をすべて説明することはできませんが、hola-helloの例を見れば、その雰囲気は伝わるでしょう。コーパスを分析して統計モデルを構築した後、彼らはそのモデルを使って新しいテキストを翻訳しました。スペイン語の文を翻訳するには、

モデルによれば、最も高い確率を持つと判断された英語の文。その高確率の文が翻訳として出力されます。

正直なところ、統計的機械翻訳について初めて聞いたときは、あまり期待できないと思いました。その考えにあまりにも驚き、自分が何かを誤解しているに違いないと思いました。これらのモデルは「Hola」や「Hello」の意味を理解できないだけでなく、名詞と動詞の区別といった言語の最も基本的なことさえ理解していないのです。そして、私の懐疑心は正しかったことが分かりました。モデルの推論に用いる最初のコーパスが数百万語程度しか含まれていない場合、このアプローチはあまりうまく機能しません。しかし、コーパスが数十億語になると、このアプローチは非常にうまく機能し始めます。今日、最高の機械翻訳システムはこの方法で動作しています。

Google検索で外国語の検索結果が表示されたことがある方は、Googleが「このページを翻訳」と提案していることに気付くでしょう。これらの翻訳は、人間が行うものでも、関連する言語に関する詳細な知識に基づいて特別に作成されたアルゴリズムによって行われるものでもありません。

その代わりに、Googleは翻訳の方法に関する非常に詳細な統計モデルを採用しています。完璧とは程遠いものですが、現在では最高の自動翻訳システムとなっています。翻訳サービスを開始して間もなく、Googleは英語からアラビア語、英語から中国語への機械翻訳の国際コンペティションで楽勝しました。本当に注目すべきは、Google翻訳チームのメンバーに中国語やアラビア語を話せる人がいなかったことです。話す必要がなかったのです。システムが自ら翻訳を学習できるのです。

これらの翻訳モデルは、ある意味では翻訳方法に関する理論、あるいは説明と言えるでしょう。しかし、ダーウィンの進化論は数文で要約でき、アインシュタインの一般相対性理論は一方程式で表現できるのに対し、これらの翻訳理論は数十億ものパラメータを持つモデルで表現されます。このような統計モデルは従来の科学的説明とはかけ離れている、と反論されるかもしれませんが、確かにその通りです。従来の意味での説明ではありません。しかし、むしろ新しい種類の説明として捉えるべきかもしれません。通常、私たちは説明を、新しい現象を予測する能力によって判断します。翻訳の場合、それはこれまで見たことのない文を正確に翻訳することを意味します。そして、少なくともこれまでのところ、統計翻訳モデルは、従来の言語理論よりも優れた成果を上げています。名詞と動詞の区別さえ理解していないモデルが、最高の言語モデルよりも優れた性能を発揮できるというのは、示唆に富んでいます。少なくとも、これらの統計モデルが、より従来の説明には見られない真実を表現しているという考えを真剣に受け止めるべきです。

言語翻訳の説明。統計モデルは、動詞、名詞、形容詞、主語、目的語といった従来の言語理論よりも多くの真実を含んでいるのでしょうか？それとも、統計モデルは従来の言語理論と部分的に補完し、部分的に重複する、異なる種類の真実を含んでいるのでしょうか？従来のアプローチと統計モデルに基づくアプローチから得られる最良の知見を統合し、単一の統一された説明にすることで、より優れた言語理論を構築できるのでしょうか？

残念ながら、そのような統一理論をどのように構築するかはまだわかっていません。

しかし、名詞や動詞、主語や目的語、そしてその他言語を構成するあらゆる要素が、実は言語の統計モデルからその存在を推論できる創発的な性質であると考えるのは刺激的です。今日、私たちはそのような演繹的飛躍をどのように行うかはまだ分かっていませんが、だからといって不可能というわけではありません。

このような複雑な説明には、どのような地位を与えるべきでしょうか？データウェブが構築されるにつれて、人々がそのような説明を構築することはますます容易になり、最終的にはあらゆる種類の複雑な現象の統計モデルが構築されるでしょう。言語モデルのような複雑なモデルを解析し、動詞や名詞といった新たな概念を抽出する方法を学ぶ必要があります。そして、それらの新たな概念が時として近似値に過ぎないという事実に対処する方法も学ぶ必要があります。つまり、これらの複雑なモデルから意味を抽出するための、より多くの、より優れたツールを開発する必要があります。

とはいえ、単純な説明の方が複雑な説明よりも真実を多く含むというのは、やはり直感的に納得できるように思えます。科学において複雑な説明に対するこの偏見は根強く残っており、名前さえあります。私たちはそれを「オッカムの剃刀」と呼んでいます。これは、同じ現象に対して2つの説明の選択肢がある場合、より単純な説明を優先すべきだという考えです。この信念は他の面にも反映されています。一見無関係に見える様々な現象を、単一の単純な説明で説明できると、私たちはそれを真実だと思いがちです。複雑に見えた現象に単純な説明が見つくと、「ユーレカ！」と叫びます。ニュートンが、物体が地球に落下する仕組みと、惑星が太陽の周りを回る仕組みの両方を、重力の法則で説明できるという驚くべき発見をしたことを考えてみてください。ニュートンの発見以前は、これらの現象は完全に別のものと考えられていました。同じ法則が両方を説明できるとは、なんと驚くべきことでしょう。

単純な説明の真実性に対する私たちの信頼は非常に強いため、そのような説明に明らかに反する点を発見すると、私たちはそれを守るためにあらゆる手段を講じることがあります。1970年代、天文学者のヴェラ・ルビンは

私たちの天の川銀河の外縁部の星々が、重力に関する最も優れた理論である一般相対性理論に基づいて予測されるよりもはるかに速く銀河の中心の周りを回転していることを発見しました。

しかし、一般相対性理論を諦めるのではなく、多くの天文学者は銀河全体に浸透する目に見えない暗黒物質の存在を仮説として唱えています。暗黒物質の分布が適切であれば、一般相対性理論は銀河の外縁にある星の速度を正しく説明できます。暗黒物質の普及と比較すると、重力に関する新しい理論を追求している天文学者は比較的少数です。

これまで私は、従来の説明と複雑なモデルをほとんど区別してきませんでした。この両者の軽率な混同は、読者の中にはおそらく不快感を抱かれる方もいらっしゃるでしょう。多くの人々は、説明とモデルの間には明確な区別があると信じています。説明には真実の要素がいくらか含まれているのに対し、モデルは単なる便利な道具に過ぎず、ある現象を明らかにするには役立ちますが、結局のところ真実を表現するものではありません。この見方は直感的に魅力的ですが、科学の歴史において、モデルと説明の区別は曖昧で、もはや存在しないほどです。「単なる」モデルとして始まったアイデアには、しばしばその考案者さえも驚かせるような真実の芽が含まれているのです。1900年、物理学者マックス・プランクは、物体から放出される光の色と強度が温度によってどのように変化するかを理解しようとしていました。例えば、燃えている石炭は最初は赤く輝きますが、石炭が熱せられるにつれて色が変化し、最終的には青く輝きます。温度と色の関係を解明するのは難問でした。当時の最高の物理理論は2つの異なる答えを提示し、どちらも実験によって矛盾していたからです。プランクはこの問題を解決するために様々なアイデアを試し、最終的に、光に関連するエネルギーは量子化されたパケット、つまり何らかの基本単位の倍数でなければならないというアドホックな仮定に基づくモデルに落ち着きました。これは恣意的な仮定であり、プランク自身も後に「実際にはあまり深く考えなかった」と述べています。これは、彼が望んだ結果に導くための単なるトリックだったのです。

実際、プランクのモデルのアイデアは、科学における偉大な発見の一つである量子力学理論の種となったのです。では、プランクのアイデアは単なるモデルと見るべきでしょうか、それとも説明と見るべきでしょうか？当時はモデルのように見えたが、そのモデルには当時のどの理論よりも深い真実が含まれていました。どんな合理的な解釈をしても、プランクのアイデアはモデルであると同時に説明でもあります。モデルと説明はどちらも同じ連続体の一部です。オンラインツールが私たちの構築能力と説明能力を高めるにつれて、

複雑なモデルから意味を抽出できるようになると、科学的説明の性質も変化するでしょう。

## 第7章

## 科学の民主化

2007年8月7日、25歳のオランダ人教師、ハニー・ファン・アルケルさんはウェブサーフィン中に Galaxy Zoo の Web サイトを見つけました。冒頭の章で触れたように、Galaxy Zoo では銀河の画像の分類を手伝ってくれるボランティアを募集しています。ボランティアには銀河の写真（多くの場合、人類がまだ見たことのない銀河）を見せて、「これは渦巻き銀河ですか、それとも楕円銀河ですか?」や「渦巻き銀河の場合、腕は時計回りですか、反時計回りですか?」といった質問に答えてもらいます。これは一種の宇宙の国勢調査で、これまでで最大規模であり、20万人を超えるボランティアが1億5000万枚を超える銀河の画像を分類しています。Galaxy Zoo を見つけたファン・アルケルさんはすぐに夢中になり、余暇を利用して銀河の分類を始めました。参加して数日後、彼女は銀河の一つの真下に浮かぶ奇妙な青い塊に気づきました。彼女が見たものは、次のページに白黒で再現されており、矢印がその塊を指しています。

困惑した彼女は、8月13日にギャラクシー動物園のオンライン掲示板にメモを投稿した。フォーラムで、青い塊が何なのか知っている人はいるかと尋ねました。誰も知らなかった。

検査が行われた。その塊は写真に写っている傷などではなく、実際に存在していた。より詳細な情報を得るため、カナリア諸島にある強力なウィリアム・ハーシェル望遠鏡を含む他の望遠鏡による観測が行われた。これらの観測結果から、青い塊は地球からその上空に浮かぶ銀河とほぼ同じ距離にあることが示された。つまり、その塊は直径数万光年にも及ぶ巨大なものであることが示された。さらに多くの専門家が招集されたが、誰もそのようなものを見たことがなかった。

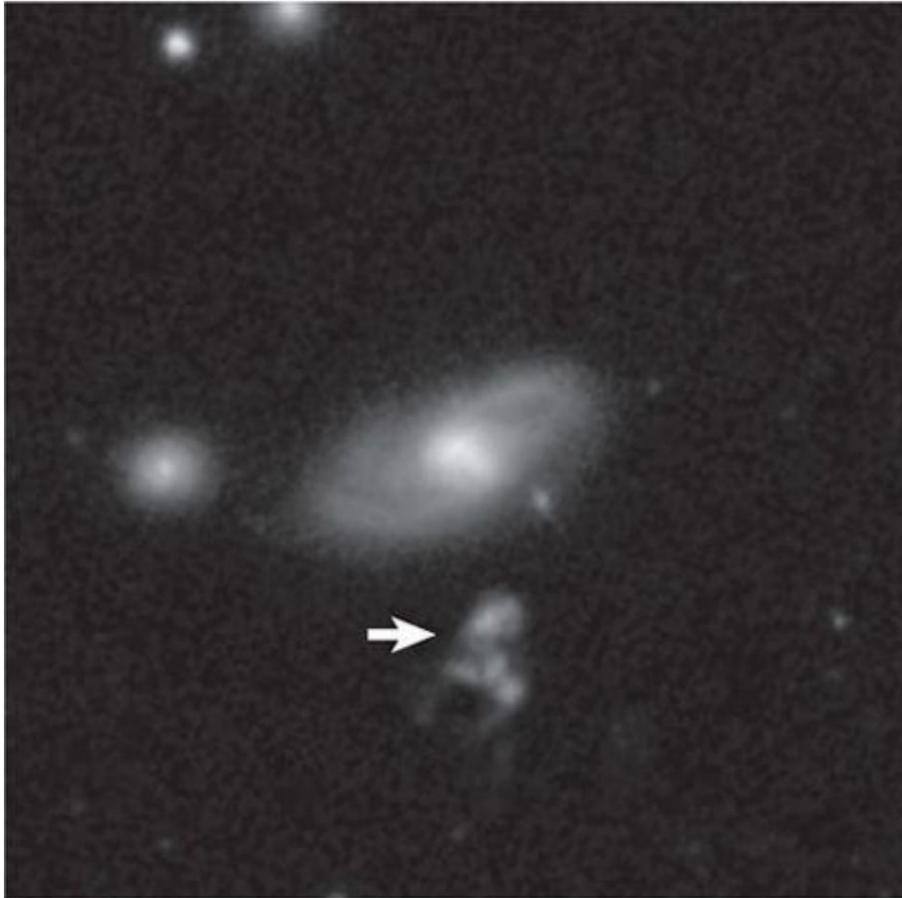


図7.1.ハニー・ファン・アルケルが初めて発見した奇妙な塊の白黒複製画像。オリジナルのカラー画像では、この塊は鮮やかな青色で、上空の銀河と鮮やかなコントラストをなしていた。提供：スローン・デジタル・スカイ・サーベイ

謎は深まり、多くの人々がその青い塊の正体について推測し始めました。この物体は、発見者の名前とオランダ語で「物体」を意味する言葉にちなんで、「ハニーのフォーウルウェルプ」と名付けられました。

ゆっくりと、フォーウルウェルプの説明が形になりつつありました。それは、フォーウルウェルプとクエーサーと呼ばれる驚くほど明るい天体を結びつけるものでした。その説明を理解するには、まず少し遡ってクエーサーについて話をする必要があります。ご存知のとおり、クエーサーは宇宙で最も奇妙で神秘的な天体の一つです。クエーサーは非常に明るく、太陽系ほどの大きさのクエーサーは太陽の1兆倍もの明るさを放ち、天の川銀河のような巨大な銀河の何倍も明るく輝きます。幸いなことに、最も近いクエーサーは数億光年も離れています。もし数光年離れた場所でクエーサーが活動を始めたら、地球は焼け焦げてしまうでしょう。

1963年にクエーサーが初めて発見されたとき、これほど比較的小さな天体がどのようにしてこれほど明るく輝くのかは謎でした。

天文学者や天体物理学者は、何が起きているのかを理解して合意するのに何年もかかりましたが、1980年代までには、クエーサーは銀河の中心にある太陽系サイズのブラックホールによってエネルギーを得ていることが広く認められました。

これらのブラックホールは、星や塵など、周囲の物質を飲み込み、一方で他の物質はブラックホールの周りを渦巻きながら、完全には落ち込まないものの、光速近くまで加速します。この巨大な加速によって膨大なエネルギーが発生し、その一部は光として放出されます。地球上でクエーサーとして観測されるのはこの光です。しかし、クエーサーに関するこの基本的な概念は現在広く受け入れられていますが、多くの根本的な疑問は未解明のままです。

クエーサーについての理解を念頭に、フォアウェルプに戻りましょう。ギャラクシースーの人々はフォアウェルプが一体何なのか頭を悩ませ、様々な説明の可能性を検討し、徐々にすべての事実に当てはまると思われる単純な説明にたどり着きました。それは、フォアウェルプはクエーサーの鏡であるというものです。約10万年前、フォアウェルプの近くの銀河にはクエーサーが存在していたと考えられています。そのクエーサーはその後、理由は不明ですが活動を停止し、私たちはもう見ることはできません。しかし、クエーサーがまだ輝いていた頃、クエーサーからの光は近くの矮小銀河内のガスを加熱し、輝かせていました。私たちが現在青い塊として見ているのは、まさにこの輝くガスであり、だからこそフォアウェルプはクエーサーの鏡だと考えられるのです。実際には、それは広大な宇宙空間に分布する巨大な鏡の集合体であり、クエーサーの歴史における様々な時期の光を反射しています。もちろん、ここでの「鏡」という言葉は厳密には当てはまりません。なぜなら、フォアウェルプからの光は反射光ではなく、加熱されたガスの輝きだからです。これはクエーサーからの一種の光の反響です。

クエーサーの鏡による説明を、すべての天文学者や天体物理学者が納得しているわけではない。クエーサーが活動を停止したというのは、少々都合が良すぎるように思える人もいる。別のグループは、フォアウェルプの別の説明を提唱している。それは、近傍銀河に存在する別の種類の源、つまりブラックホールからエネルギーを得ているもののクエーサーではない源によるものだというものだ。この推定源は活動銀河核（AGN）と呼ばれる。

これは超大質量ブラックホールで、ジェットと呼ばれる、数万光年にも及ぶプラズマの細い円錐状の放射を放出しています。偶然にも、このジェットはフォールウェルプの方向を向いています。ジェットはフォールウェルプ内のガスを熱し、輝かせます。つまり、この説明では、フォールウェルプはクエーサーの鏡ではなく、AGNの鏡なのです（これもまた、大まかに言っていますが）。

私がこれを書いている時点でも、天文学者と天体物理学者たちは、どの説明が正しいのかを解明しようとしています。しかし、どの説明が正しいかに関わらず、

正しい、あるいは説明が必要だったとしても、フォアウェルプは実に興味深いものです。例えば、それが本当にクエーサーの鏡だと仮定してみましょう。既に見てきたように、これはフォアウェルプが巨大な鏡の集合体であり、クエーサーの生涯を通して様々な時期にその光を反射していることを意味します。つまり、フォアウェルプからの光は、クエーサーの伝記のようなもので、フォアウェルプを詳しく調べることで、クエーサーがどのように生き、どのように死に、そしてもしかしたらどのように誕生したのかなど、多くのことがわかるかもしれません。

そのため、フォアウェルプはクエーサーのライフサイクルを研究する手段として極めて重要です。同様に、フォアウェルプが実際にAGNからのジェットによって輝いているのであれば、フォアウェルプの研究はAGNについてより深く知るための素晴らしい方法となるでしょう。いずれにせよ、天文学者たちはその可能性に興奮しており、フォアウェルプのより詳細な画像を得るための追跡調査を計画しています。ハッブル宇宙望遠鏡をはじめとする宇宙望遠鏡など、世界で最も需要の高い望遠鏡のいくつかで観測時間が確保されています。これらの観測やその他の観測から、私たちはフォアウェルプについて、そしておそらくクエーサーや活動銀河核についても、より深く理解できるようになるでしょう。フォアウェルプの物語は始まったばかりです。

## 科学と社会の関係を再定義する

私たちは、科学の大部分は科学者によって行われることを当然のことと考えています。しかし、ハンニーのフォールウェルプが刺激的なのは、この前提を覆す点にあります。25歳の教師が、この壮大で美しいガス雲を発見したとは、なんと驚くべきことでしょう。アマチュアが、クエーサーや活動銀河核に対する私たちの理解を変えるかもしれない発見をするとは、なんと意外なことでしょう。フォールウェルプの発見が発表されると、世界中のメディアで大きく取り上げられ、CNN、BBC、エコノミスト誌、その他多くの主要メディアで取り上げられました。ハンニー・ファン・アルケルとGalaxy Zooチームにとって喜ばしい出来事でしたが、作家として、この報道に対する私の最初の感情は、ある種の利己的な失望でした。私は、フォールウェルプを自分の本から削除し、より新しい例に置き換える必要があったと考えました。しかし、さらに考えた後、私は前置きを残すことにしました。メディアの報道自体が、科学は科学者によって行われると私たちがいかに強く当然のこととして受け止めているか、そして私たちがいかに科学に魅了されているかを示しています。

このルールには例外もあります。CNNの見出しがすべてを物語っています。「アームチェア天文学者、特異な『宇宙の幽霊』を発見」。科学者ではない人間が天体物理学における重要な発見を成し遂げたとは、なんと衝撃的で驚くべきことでしょう！

Galaxy Zooとフォアウェルプは、オンラインツールが科学と社会の関係を徐々に変えつつある、より大きな物語の一部です。こうした変化が最も顕著に見られる分野の一つが市民科学です。Galaxy Zooのようなプロジェクトでは、科学的発見を支援するオンラインボランティアを募集しています。本章の前半では、市民科学を深く掘り下げ、それが科学者のあり方をどのように変え、新しいタイプの科学的課題への取り組みをどのように可能にするのかを見ていきます。しかし、市民科学は、オンラインツールが科学と社会の関係を変えている唯一の方法ではありません。本章の後半では、オンラインツールによって可能になる他の新しい橋渡し機関を取り上げ、そのような機関が公的な議論や意思決定における科学の役割をどのように変えていく可能性があるのかを考察します。この議論は、科学者がどのように発見を成し遂げるかに直接関係しないため、本書の主題とは関係がないように思われるかもしれませんが、長期的には、こうした社会の変化は科学が行われる文脈を大きく変える可能性があり、深く探求する価値があります。まず、Galaxy Zoo をもう一度詳しく調べてみましょう。

## ギャラクシー動物園再訪

正直に言って、Galaxy Zoo は私がこれまでに作った中で最高の作品です。

。 。 何がそうさせるのかはよく分かりませんが、Galaxy Zooは人々に何かを与えています。フォーラムに人々が投稿した作品は、創造的なものから学術的なものまで、どんな螺旋の光景にも劣らず素晴らしく、いつも私を感動させてくれます。

—アリス・シェパード、ギャラクシー動物園ボランティアモデレーター

Galaxy Zooは2007年、オックスフォード大学のケビン・シャウインスキー氏とクリス・リントン氏という二人の科学者によって始まりました。シャウインスキー氏は博士課程の研究の一環として、銀河の写真を調べていました。銀河には様々な形や大きさがありますが、ほとんどの銀河は私たちの天の川銀河のような渦巻銀河か、星とガスが球状に集まった楕円銀河です。2007年当時の通説では、楕円銀河の星のほとんどは非常に古い星で、年齢は100億年近くになると考えられていました。星は年を取ると、色や大きさが変わり、赤色巨星に変化します。その結果、多くの楕円銀河は赤みがかった色になります。

渦巻銀河と比較すると、渦巻銀河はより若く、新しく形成された青い星を多く含んでいる色合いです。

シャウインスキーは、従来の通説が間違っていて、一部の楕円銀河はそれほど古くなく、内部で星生成が盛んに行われているのではないかと疑っていました。この疑念を検証するため、シャウインスキーは1週間かけてスローン デジタル スカイ サーベイ (SDSS) から取得した50,000個の銀河の写真を詳しく調べ、どの銀河が楕円銀河でどの銀河が渦巻銀河かを調べました。冒頭で述べたように、楕円銀河と渦巻銀河の区別は、今でも人間の方がコンピュータよりも得意としています。分類を終えると、シャウインスキーはコンピュータ プログラムを使用して各楕円銀河を分析し、その赤色や青色を調べました。彼の疑念どおり、結果は従来の通説が間違っていて、一部の楕円銀河では星生成が行われていることを示唆しました。残念ながら、この効果は弱く、本当に断定するにははるかに大規模な銀河のサンプルを分析する必要があります。

幸いなことに、前章で述べたように、SDSSは93万個の銀河の画像を公開していました。これは有望ではありましたが、同時に困難なリソースでもありました。最初の5万個の銀河を分類するには、シャウインスキー氏による1週間に及ぶ英雄的な努力が必要でした。7日間、12時間労働で5万個の銀河を分類するには、6秒ごとに画像を分類する必要があります。この驚異的なペースでも、93万個の銀河を分類するには数ヶ月かかるでしょう。そして、シャウインスキー氏がそのペースを維持できるはずがありません。たとえ彼が勤務時間のほとんどを分類に費やしたとしても、何年もかかるでしょう。

2007年3月のある日、シャウインスキーはオックスフォードにあるパブ、ロイヤル・オークに、オックスフォードに着任したばかりのポスドク研究者、クリス・リントンと共に集まりました。ビールを一杯飲みながら、SDSSの写真の分類に関する突飛なアイデアを二人は考えました。自分たちだけで分類作業を行う代わりに、一般の人々に協力を呼びかけるようなウェブサイトを作るのはどうだろうか、と。彼らはウェブ開発者として働く友人たちにサイト構築を手伝わせ、2007年7月11日、BBCラジオ4のToday番組でアナウンスされ、Galaxy Zooサイトがオープンしました。

Galaxy Zooの発表に対する反響は予想をはるかに上回り、新しいウェブサイトは瞬く間にクラッシュしました。その後6時間、サイトを運営する飼育員たちは必死にサイトを復旧させようと作業しました。ようやくサイトが復旧すると、ボランティアが次々と登録を始め、初日の終わりには毎時7万個以上の銀河の分類が行われていました。これは、シャウインスキー氏が1週間で成し遂げた偉業を上回る数です。それぞれの銀河は調査されました。

多くのボランティアが独立して作業を行い、動物園の飼育係は誤った分類を自動的に識別して破棄することができました。これにより、結果はプロの天文学者による入念な分類に匹敵するようになりました。銀河の分類速度はピーク時の時速7万個から徐々に低下しましたが、Galaxy Zooの最初の銀河の分類はわずか数か月で完了しました。これにより、シャウインスキー氏はプロジェクトを完了するために必要なデータを得ることができました。結論：はい、渦巻き銀河と楕円銀河に関する従来の見解は誤りであり、一部の楕円銀河には実際に多くの新しく形成された星が含まれています。

ギャラクシー・ズーはシャウインスキー氏の疑問から始まりましたが、時とともにサイトは拡大し、より幅広い疑問に対応できるようになりました。多くの発見は、ズーアイト（参加者は自らをそう呼んでいます）が写真の中の異変に気づいたことから、偶然の産物としてもたらされました。例えば、ハニー・ファン・アルケル氏によるフォアウエルプの発見がその例です。もう一つの、より複雑な偶然の産物として、「グリーンピース」銀河の物語があります。この物語は、フォアウエルプよりも市民科学の可能性をよりよく示しているため、ここで詳しくお話ししたいと思います。ちなみに、私の物語はズーアイトの一人、アリス・シェパード氏が執筆した素晴らしい記事に基づいています。この記事は、本書の巻末の「注釈」に参考文献として掲載されています。

2007年7月28日、動物園が開園してから2週間後、Nightblizzardという名の投稿者がGalaxy Zooフォーラムにぼんやりとした緑色の銀河の写真を投稿し、緑色の銀河は珍しいと指摘しました。それから2週間後の2007年8月11日、別の人物が奇妙な緑色の銀河の写真を投稿しました。その銀河は異常に明るく、Patという名の投稿者は、その銀河がクエーサーではないかと尋ねました。しかし、誰も確信を持てませんでした。

翌日の8月12日、3人目の投稿者、どこにでもいるハニー・ファン・アーケルが、また別の奇妙な緑色の銀河を発見しました。ファン・アーケルはその銀河を「グリーンピース」と名付け、「グリーンピースにチャンス！」というタイトルのメッセージを添えてフォーラムに投稿しました。他のズーイ人たちはこれを面白く思い、自分たちもグリーンピースを掘り起こし、フォーラムで形になりつつある「グリーンピーススープ」に加え始めました。数ヶ月かけて、このディスカッションスレッドは成長していきました。最初は、主にオブジェクトを追加したり、グリーンピースジョーク（「グリーンピースはもういいや」）を言う人たちでした。しかし、思慮深い質問も寄せられました。そのグリーンピースとは一体何なのか？なぜ誰も今まで聞いたことがなかったのか？ある投稿者はこうコメントしました。「天文学の授業では星、銀河、星雲、惑星などについては話しますが、グリーンピースのことには一度も触れませんでした。プロの天文学者の間では大きな秘密に違いありません。きっと、グリーンピースを独り占めしたいのでしょう。」

当初、ズーイト一家にとってエンドウ豆の収集は単なる楽しい趣味でした。しかし、エンドウ豆のコレクションが増えるにつれて、それらを取り巻く謎も深まりました。中には普通の星や星雲であることが判明したものもありました。しかし、緑色の銀河の中には、依然として珍しいものとして際立っているものもありました。ズーイト一家は、エンドウ豆のような銀河のいくつかが、信じられないほど高温の電離酸素ガスに囲まれていることを突き止めました。これは銀河としては珍しいことでした。高温の電離酸素に囲まれた、これらの小さく緑色で非常に明るい銀河とは一体何なののでしょうか？そして、なぜこれまで誰もその存在を知らなかったのでしょうか？

ここで少し立ち止まって、ズーイトたちがどのようにしてエンドウ豆が高温のイオン化酸素に囲まれていることを突き止めたのかを説明しましょう。これは興味深い科学的発見であり、ズーイトたちの一部がいかにも真剣な研究をしていたかを示しています。もちろん、銀河の一つを訪れて酸素の存在を確かめることはできませんでした。彼らはスペクトル分析と呼ばれる手法を独学で習得することでそれを解明しました。スペクトル分析の仕組みを詳しく説明する必要はありませんが、基本的な考え方は非常にシンプルです。これは銀河のスペクトルと呼ばれるものに基づいています。スペクトルは、銀河からの光がどのように様々な色に分解されるかを示しています。例えば、少し赤、多く緑、そしてほんの少し青といった具合です。

実際、スペクトルは（例えば）光が複数のわずかに異なる緑の色合いの混合であること、それらの色合いが正確にどのようなものか、そしてそれぞれの割合を示すことさえできます。つまり、スペクトルは銀河の画像を様々な色に分解するための非常に詳細かつ正確な方法なのです。

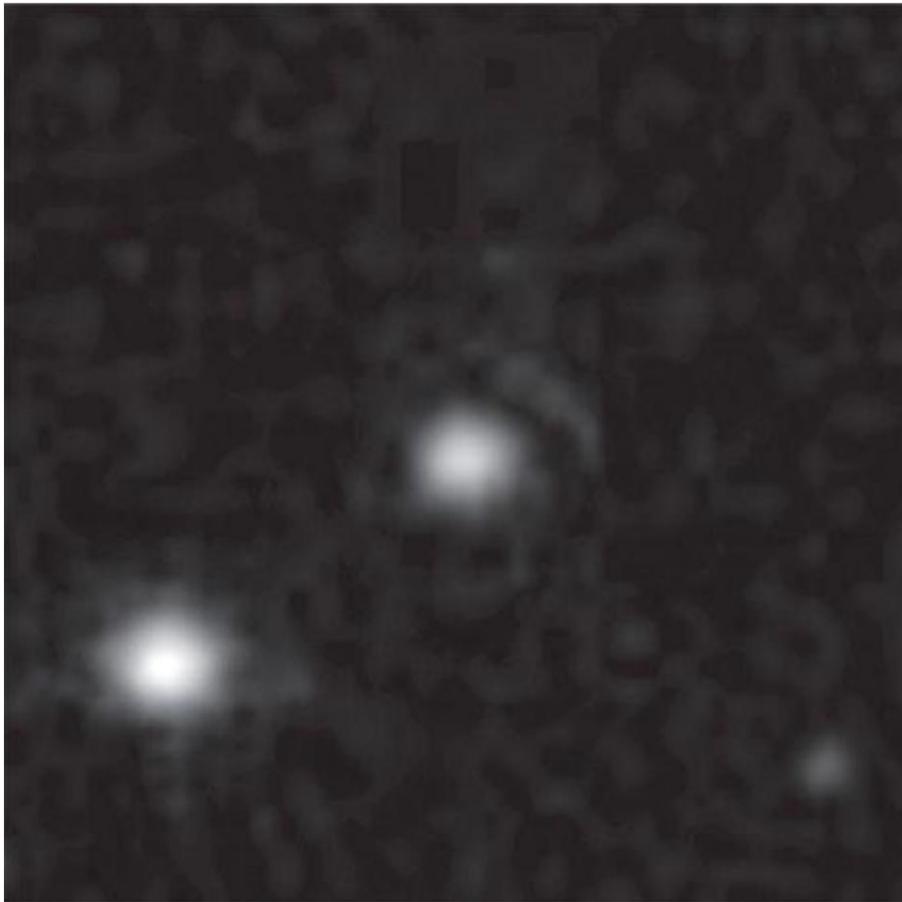


図7.2. Galaxy ZooフォーラムのメンバーNightblizzardが2007年7月に発見した、最初のグリーンピース銀河。グリーンピースは中央にあります。他のグリーンピース銀河と同様に、この銀河も特徴のない外観をしており、銀河に詳しくない人は、ただの楕円銀河か、あるいは恒星だと思いがちです。しかし、Zooのメンバーの多くは銀河画像の分析に長けており、このグリーンピース銀河が珍しいものであることにすぐに気づきました。  
クレジット :Sloan Digital Sky Survey

銀河のスペクトルが重要な理由は、天文学者がその銀河が何でできているかを解明するのに役立つからです。意外に聞こえるかもしれませんが、考え方は非常にシンプルです。例えばナトリウムのような物質を加熱すると、特定の色の混合で輝く傾向があります。

そのため、ナトリウム街灯は非常に独特な黄橙色に光ります。実は、ナトリウムだけでなく、酸素、水素、炭素など、あらゆる物質は独自のスペクトル、つまり特徴的な色の混合で輝いているのです。物質のスペクトルはいわばシグネチャーのようなもので、銀河のスペクトルにそのようなシグネチャーを探すことで、その銀河が何でできているかを解明できるのです。これは科学における注目すべき発見の一つです。遠くにある天体の色を注意深く観察することで、その天体が何でできているかを解明できるのです。

物質を加熱すると、その特性スペクトルがわずかに変化するため、それらが何でできているか、そしてどれほど熱いかさえも知ることはできません。SDSSはGalaxy Zooのすべての銀河の高品質スペクトルを公開し、Zooitesはグリーンピースのスペクトルを詳しく観察することで、グリーンピースの一部が高温のイオン化酸素ガスに囲まれていることを突き止めました。

(ここで余談ですが、ヘリウムという物質が実はスペクトル分析によって発見されたという驚くべき事実に触れずにはいられません！1868年、天文学者のピエール・ジュール・セザール・ヤンセンとジョセフ・ノーマン・ロッカーはそれぞれ独立して、太陽のスペクトルが地球上でこれまで観測されたどの物質とも異なる特徴を持つことを観測しました。彼らは、新しい化学物質の最初の兆候を観測しているのだ、と正しく推測しました。しかし、ウィリアム・ラムゼーという化学者が地球上でヘリウムを発見したのは、それからほぼ30年後のことでした。)

スペクトル分析についてはこれで十分です。銀河動物園とその謎に戻りましょう。2007年12月12日、飼育員のケビン・シャウインスキーはこれらの奇妙な銀河に興味をそそられていました。彼はエンドウ豆を詳しく観察することにしました。いくつかの検査を行った結果、それらが確かに新しいタイプの銀河であることがすぐに確認されました。

プロの天文学者が今こそこのプロジェクトに参入し、引き継ぐだろうと思うかもしれませんが。何しろ、Galaxy Zooのアマチュアたちが、全く新しい種類の銀河を発見したばかりなのですから！しかし、シャウインスキーをはじめとするプロたちは、ハニーのフォルウェルプなど他の活動に忙しく、すぐには引き継ぎませんでした。ところが、次に起こったのは、アマチュア主導による驚くべき科学的成果でした。その方向性を決定づけたのは、リック・ノーウェルというZooiteでした。ノーウェルはGalaxy Zooフォーラムに投稿されたエンドウ豆のような画像をすべて調べ直し、新しいタイプの銀河の可能性のある39個の天体を体系的に特定しました。ノーウェルのリストに触発された他の人々も、独自のリストを作成し始め、この新しいタイプの銀河を、緑色の星など、似たような天体と区別するためにどのような基準を用いるべきかについて議論を始めました。プロジェクトの方向性は変わり始め、エンドウ豆のような謎の真相を解明することに焦点が当てられるようになりました。人々は、グリーンピースに似た特徴を持つ赤い銀河を、より遠くに発見しました。議論は銀河のスペクトルの詳細な特性に焦点が当てられるようになり、ズーイトの中には、通常はプロの天文学者の専門分野であるスペクトル分析に非常に熟達した者もいました。

この段階でのアイデアの議論は驚くべきものでした。一つ一つ説明したいのですが、ここで要約するだけでも長くなりすぎます。これは新しいタイプの銀河を発見し理解する方法についての本ではありません！しかし、特に注目すべき点は

この議論の一番の特徴は、そのスタイルでした。どんな科学者でも見覚えのある類の議論です。科学的発見は往々にして、ちょっとした謎、漠然とした疑念、そして中途半端なアイデアから始まります。グリーンピースが新しいタイプの銀河かもしれないという、最初の漠然とした疑念のように。最初の疑念は徐々に洗練されていきます。新しいアイデアが提案され、検証され、改良され、そして時には捨てられていきます。参加者は夢中になり、疑念は徐々に確固とした詳細な事実へと変わっていきます。これはどんな科学者にも馴染みのある研究のプロセスであり、まさに「Galaxy Zoo」でのグリーンピースに関する議論で見られるものと同じです。これはPolymath Projectでの議論を不気味に彷彿とさせます。ズーイたちはアマチュアかもしれない。彼らの天文学に関する知識は、多くの博学者が数学について知っている知識よりもはるかに少なく、銀河動物園の議論はより軽妙だ。しかし、こうした違いの根底には、アイデアが生まれ、洗練されていくという、同じ豊かな感覚、ここには知るべき何かがあるという確信、そしてそれを究明しようとする強い意志がある。ズーイたちは一部の博学者のような資格は持っていない。しかし、彼らは科学者なのだ。

ズーイたちは、グリーンピース銀河の特徴を示すより正確な基準を徐々に確立していくにつれ、候補画像の発見方法も洗練されていきました。もはやGalaxy Zooの画像を手作業でふるいにかけるだけでなく、オリジナルのSDSSデータにアクセスし、SDSSデータセット全体から基準に合う銀河を自動的に検索する高度なデータベースを開発しました。そして、これらの候補はボランティアによって綿密に精査され、新しいタイプのグリーンピース銀河である可能性が高い約200個のリストが作成されました。

専門家たちはこの議論に興味深く見守っていたが、2008年7月初旬、現在イェール大学のポスドク科学者であるシャウインスキー氏とイェール大学の学生、カロリン・カルダモーネ氏は、関与を強化することを決めた。ズーイテス氏と共同で、カルダモーネ氏とシャウインスキー氏は、高性能コンピュータソフトウェアを使用してエンドウ豆銀河の詳細なスペクトル分析を開始した。その後9か月かけて、彼らはズーイテス氏が始めた研究を完成させた。浮かび上がったエンドウ豆銀河の画像は、それが確かに新しいタイプの銀河であることを示した。それらは超コンパクトで、質量は私たちの天の川銀河の10%にも満たず、非常に急速に星を生成していた。天の川銀河が毎年1つか2つの新しい星を生成するのに対し、エンドウ豆銀河ははるかに小さいにもかかわらず、年間40個近くの新しい星を生成している。そして、銀河はその大きさの割に非常に明るかった。

グリーンピースとフォールウェルブは、Galaxy Zoo によってなされた数多くの発見のうちの 2 つにすぎません。Galaxy Zoo のもう 1 つのプロジェクトは、合体中の銀河の画像を探すことでした (次のページの画像を参照)。合体は銀河の一生を一変させる出来事であるため、合体を理解することは天文学者や天体物理学者にとって大きな関心事です。私たちの天の川銀河は現在、いくつかの小さな矮小銀河と合体しており、将来的には、現在 200 万光年離れた巨大なアンドロメダ銀河と合体すると予測されています。残念ながら、その重要性にもかかわらず、合体中の銀河を見つけるのはそれほど簡単ではなく、その結果、ほとんどの合体研究では、わずか数十個の合体中の銀河を含むサンプルが使用されています。Galaxy Zoo 合体プロジェクトでは、すぐに 3,000 個の合体中の銀河が見つかりました。これは、将来の研究にとっての合体の宝庫です。ズーイタたちが探している他の天体には、重力レンズ (重力によって遠くの天体からの光を歪ませ、集光する天体) や対銀河 (一見重なり合っているように見えるが、実際には一方の銀河がもう一方の銀河よりもずっと近い位置にある銀河) などがあります。さらに、フォアワープ・プロジェクトも存在し、ズーイタたちはさらにいくつかのフォアワープの発見に成功しています。

Galaxy Zoo は、多岐にわたるテーマで計 22 本の科学論文の執筆に利用されており、さらに多くの論文が執筆中です。発見は、フォアワープの場合のように偶然の産物である場合もあれば、合併プロジェクトのように体系的な分析に基づく場合もあります。

グリーンピースの研究のように、偶然の発見は時に広範囲にわたる体系的な分析へと繋がる場合があります。後継プロジェクトである Galaxy Zoo 2 と Galaxy Zoo: Hubble が開始され、SDSS とハッブル宇宙望遠鏡によって観測されたいくつかの銀河について、さらに詳細な情報を提供しています。Galaxy Zoo を開始したチームによる他の新しいプロジェクトには、月のクレーターを理解を深めることを目指す Moon Zoo や、太陽の爆発を発見することを目指す Project Solar Storm Watch などがあります。Galaxy Zoo 2 に参加した天文学者の一人、ポーツマス大学のボブ・ニコル氏は、Galaxy Zoo と日常的な天文学を次のように比較しています。



図7.3.合体しつつある2つの渦巻銀河（UGC 8335として総称される）。提供：NASA、ESA、ハッブル・ヘリテージ（STScI/AURA） - ESA/ハッブル・コラボレーション、A. エバンス（バージニア大学シャーロットビル校/NRAO/ストーニーブルック大学）。

[日々の仕事で]「真ん中に棒状の線がある銀河はいくつあるか」という疑問を持つと、通常はこの根本的な疑問に答えるために生涯をかけて探求することになります。時には、かわいそうな大学院生を雇って5万個の銀河を目視で観察させ、その疑問に答えてもらうこともあります（ケビンの場合のように！）。

しかし今、[Galaxy Zoo 2]の打ち上げから2日後に、この疑問に答えるデータがすでに得られており、私のような古参にとってはちょっと早すぎる。

。インターネットは明らかにこの世代の天文学者にとって革命的な技術です。Galaxy Zoo は、この新しいツールが新しい疑問を解決するためにどれほど強力になり得るかを示す素晴らしい例です。

コンピューターのように、Galaxy Zoo は大規模なデータセットからパターンを見つけることができます。データセットは、個人では到底理解できないほどです。しかし、Galaxy Zoo はコンピューターの域を超えています。分析に人間の知能も適用できるからです。人間の知能とは、例えば、ふしぎな丸い銀河やグリーンピースのような形をした銀河が普通ではないことを見抜き、さらに調査する価値があると認識できるような知能です。つまり、Galaxy Zoo はハイブリッドであり、他の方法では不可能な大規模データセットの詳細な分析が可能です。これは、データを知識に変える新しい方法です。動物園の飼育係は、Galaxy Zoo が自分の研究に役立つと言う新しい天文学者と何度も出会い、現在 20 人以上の天文学者が、幅広い天文学的問題を研究する方法として Galaxy Zoo を使用しています。Galaxy Zoo は、プロの天文学者と興味を持つ一般の人々を結びつけ、一緒に科学に取り組める汎用プラットフォームへと急速に成長しています。

## アマチュアがプロに対抗するとき

市民科学が役立つのは天文学だけではなく、生物学における大きな未解決問題の一つは、遺伝暗号がどのようにして生物の形態を生み出すのかを理解することです。もちろん、DNAは「生命の設計図」であるという話は、誰もが何度も耳にしたことがあるでしょう。しかし、このスローガンはよく知られているとはいえ（結局のところ、偉大なスローガンは決まり文句になってしまうのが常套句です）、DNAがどのようにして生命を生み出すのかを詳細に理解している人はまだいないのです。

生物学者がゾウの鼻を見たことがなかったとしたらどうでしょう。ゾウのDNAを調べて、そこに鼻を見つけることができるでしょうか。つまり、ゾウの遺伝暗号の塩基配列だけに基づいて、鼻の存在を予測できるでしょうか。今日、この問いへの答えは「ノー」です。DNAがどのようにして生物の形態を決定するのかは、生物学における謎の一つです。

この謎を解くために、「Foldit」と呼ばれる市民科学プロジェクトでは、DNAがタンパク質と呼ばれる分子をどのようにして生み出すのかを解明するコンピューターゲームをプレイするオンラインボランティアを募集している。

この挑戦は、象の鼻の存在を推測することとはかけ離れているように聞こえるかもしれない。実際、かけ離れているのだ。しかし、タンパク質は私たちの体の中で最も重要なプロセスの多くを担っているため、この挑戦は重要な一歩となる。Folditは、それ自体の科学的関心に加え、膨大な作業の複雑さを示す点でも興味深い。

ボランティアによって行われるべきです。Galaxy Zooでは、参加者は主に銀河を渦巻き銀河か楕円銀河に分類するといった単純な課題に取り組みます。一方、Folditでは、生化学の博士号取得者でも挑戦できるような難題に挑戦するよう求められます。そして、これから見ていくように、Folditのトッププレイヤーたちはこれらの課題を驚くほど見事にこなしています。

Folditについて詳しく説明する前に、タンパク質全般について少しお話ししましょう。生物学者はタンパク質に夢中ですが、それには十分な理由があります。タンパク質は、食物の消化から筋肉の収縮まで、あらゆる働きをする分子だからです。タンパク質の良い例は、ヘモグロビン分子です。ヘモグロビンは血液の主要成分の一つで、肺から体の他の部位へ酸素を運ぶために使われる分子です。もう一つの重要なタンパク質の種類は、免疫システムを構成する抗体です。それぞれの抗体は独自の形状をしており、体内のウイルスやその他の侵入者に反応して標識を付け、免疫システムによる攻撃を可能にします。

DNAがヘモグロビンなどのタンパク質をどのようにして生み出すのか、現在のところ完全には解明されていません。分かっているのは、DNAの特定の領域がタンパク質をコードしている、つまり特定のタンパク質を記述しているということです。例えば、DNAのどこかにヘモグロビンのタンパク質コード領域があります。この領域はCACTCTTCTGGTで始まる長いDNA塩基の列です。

この塩基の並びを、CAC TCT TCT GGT というコドンと呼ばれる 3 つの塩基の組に分けると分かりやすいことが分かりました。タンパク質は、DNA のタンパク質コード領域にある各コドンが、タンパク質内の対応する分子であるアミノ酸に転写されることによって形成されます。たとえば、ヘモグロビンの最初のコドンである CAC は、ヒスチジンというアミノ酸に転写されます。ヒスチジンが何であるか、何をするのかについては詳しく説明しません。私たちにとっては、それほど重要ではありません。重要なのは、ヘモグロビン (または他のタンパク質) の DNA 配列で CAC コドンが現れる場所ならどこでも、ヒスチジンに転写されるということです。同様に、2 番目のコドンである TCT は、アミノ酸のセリンに転写されます。以下同様に続きます。結果として得られるタンパク質は、これらすべてのアミノ酸を含む鎖です。つまり、ヘモグロビンはヒスチジン、セリンなどを含む鎖なのです。

ここまでは順調です。DNAはタンパク質を生成するためのレシピとして使えます。しかし、タンパク質はDNAとは異なり、DNAのように完全に規則的な構造ではなく、それぞれが独自の特殊な形状をしています。この形状は非常に重要です。例えば、先ほどお話ししたように、私たちの免疫システムにおける抗体はタンパク質であり、抗体の形状によってどのウイルスに結合できるかが決まります。DNAの情報が転写されてアミノ酸が形成されると、

タンパク質の中で、タンパク質はその形に「折り畳まれて」いきます。この折り畳みがどのように起こるのかはまだ部分的にしか解明されていませんが、何が起きているのか、おおよその目安はつかめるはずで、アミノ酸の中には、水の近くにいることを好むものがあり、ギリシャ語の「hydro」と「philia」（それぞれ水と愛）に由来する親水性アミノ酸と呼ばれます。細胞内のタンパク質は水に囲まれているため、親水性アミノ酸が外側、水の近くに位置するようにタンパク質が折り畳まれる傾向があります。ヒスチジンとセリンはどちらも親水性アミノ酸の例です。対照的に、疎水性アミノ酸（水を嫌うアミノ酸）は、タンパク質内でしっかりと束ねられます。これらの傾向が相反する場合があります。タンパク質内の隣接するアミノ酸が交互に疎水性と親水性になることがあり、その結果、タンパク質が非常に複雑な形に折り畳まれることがあります。

自然はここに、驚くほど巧妙なトリックを駆使しています。DNAは完全に規則的な情報配列で構成されているため、コピーしやすく、アミノ酸への転写も比較的容易です。しかし、親水性、疎水性、その他の力の競合により、タンパク質は複雑な形状に折り畳まれます。DNAを変化させることで、タンパク質中のアミノ酸を変化させることができ、結果としてタンパク質の形状も変化します。この仕組みの巧妙な点は、簡単にコピーできるDNA内の規則的な情報配列から、タンパク質の多様な形状へと変化させられることです。

先験的に、形を模倣するのはそれほど簡単ではないように思えます。まるで家の設計図をトレースすると、そのトレース版が小さな模型として突然現れるようなものです。DNAとタンパク質の結合は、複雑な形を模倣するという一見不可能な作業を容易にする自然の手段です。

しかし、この見事な話には問題があります。タンパク質のDNA配列が分かっているからといって、そのタンパク質がどのような形状をしているのか、あるいはどのような働きをするのかを簡単に予測できるわけではありません。実際、今日、タンパク質がどのように折り畳まれるかについての理解は、非常に不完全なものにすぎません。何百万ものタンパク質のDNA配列が分かっているにもかかわらず、完全な構造、つまり正確な形状が分かっているタンパク質はわずか6万種類しかありません。これらの完全な構造のほとんどは、X線回折と呼ばれる手法によって発見されています。これは、タンパク質にX線を照射し、それが投げかけるX線の影を注意深く観察することで、その形状を解明するというものです。これは時間がかかり、費用がかかり、骨の折れる作業であり、技術は徐々にしか進歩していません。私たちが本当に求めているのは、遺伝子の記述から形状を予測する、迅速かつ確実な方法です。もしそれが実現できれば、時間と費用のかかるX線回折のステップを省くことができ、

60,000 個のタンパク質の形状を知ることから、数百万個のタンパク質の形状を知ることまで。さらに重要なのは、このような手法は、望ましい形状のタンパク質を設計するための非常に強力なツールとなるということです。例えば、病気と闘うための新たな抗体の開発に役立つでしょう。

タンパク質の折り畳み問題を解決するため、生化学者たちはコンピューターを用いて、遺伝子の記述からタンパク質の形状を予測しようと試みてきました。予測を行うために、彼らはタンパク質が最終的に最もエネルギーの低い形状に折り畳まれるという考えを用いています。これは、ボールが二つの丘の間の谷底に転がっていくのと同じです。必要なのは、タンパク質の最もエネルギーの低い形状を見つけるための優れた方法だけです。これは有望に思えますが、実際には、すべての可能な形状を調べて最もエネルギーの低い形状を探すのは困難です。問題は、タンパク質が折り畳まれる可能性のある異なる形状の数です。タンパク質は通常、数百、あるいは数千ものアミノ酸から構成されています。構造を決定するには、それらのアミノ酸一つ一つの正確な位置と向きを知る必要があります。これほど多くのアミノ酸が関与しているため、考えられる形状の数は天文学的な数に達し、非常に高性能なコンピューターをもってしても、検索するには多すぎます。検討すべき形状の数を制限するための巧妙なアルゴリズムを見つけるために多大な努力が払われており、そのアルゴリズムはかなり改良されつつあります。しかし、コンピューターを使ってタンパク質の形状を確実に予測できるようになるまでには、まだ長い道のりがあります。

2007年、シアトルのワシントン大学の生化学者デビッド・ベイカー氏とコンピュータグラフィックス研究者ゾラン・ポポビッチ氏は、この問題を解決するより良い方法を思いつきました。ベイカー氏とポポビッチ氏のアイデアは、プレイヤーにタンパク質を表示し、その形状を変えたり、回転したり、アミノ酸を移動させたりするためのコントロールを提供するコンピュータゲームを作ることでした。ゲームに組み込まれているコントロールの一部は、プロの生化学者が使用するツールに似ています。プレイヤーが考え出した形状のエネルギーが低いほど、スコアが高くなるため、最高スコアの形状はタンパク質の実際の形状の良い候補になります。ベイカー氏とポポビッチ氏は、最先端の計算手法とコンピュータゲーマーの粘り強さ、パターンマッチングおよび3D問題解決能力を組み合わせることで、これが従来のアプローチよりもタンパク質フォールディングに対する優れたアプローチになるのではないかと期待しました。

Folditについて初めて聞いた時は懐疑的でした。1980年代に学校で見た退屈な教育用コンピュータゲームに似ていると思ったからです。しかし、ダウンロードして数日かけて何時間もプレイしました。その時点で、「本のためのリサーチをしている」という言い訳は通用しなくなりました。

Foldit は急速に「これは本を書くのを先延ばしにする素晴らしい方法だ」という婉曲表現になりつつあり、私は自分に無理やり止めさせました。これまでに 75,000 人以上がサインアップしています。人々がこのゲームをプレイするのは、それが良いからです。このゲームには、優れたコンピューター ゲームにすべて備わっている、魅力的で中毒性のある性質があります。つまり、難しいが不可能ではないタスク、どれだけうまくやっているかの即時フィードバック、そして、常に上達まであと一歩という感覚です。これは、先ほど MathWorks のコンテストで見られたのと同じ中毒性であり、Galaxy Zoo の多くの参加者にも感じられています。さらに、Galaxy Zoo と同様に、Foldit は多くのプレイヤーにとって深い意味を持っています。アインシュタインはかつて、なぜ政治よりも科学に興味があるのかについて、「私にとって方程式のほうが重要です。なぜなら、政治は現在のためのものですが、方程式は永遠のものだからです」と述べています。銀河を分類するたび、またはタンパク質を折りたたむより良い方法を見つけるたびに、人類の知識に小さいながらも確実に貢献していることになります。多くの参加者にとって、Foldit と Galaxy Zoo は、World of Warcraft や他のオンラインゲームをプレイするような、後ろめたい楽しみではありません。むしろ、社会に重要な貢献をするための手段なのです。Foldit のトッププレイヤーの一人である Aotearoa は、このゲームを「今までプレイした中で最も挑戦的で、エキサイティングで、刺激的で、緊張感があり、中毒性のあるゲーム」と評し、「タンパク質を折りたたむようなゲームのような『報酬』を得られず、時間を無駄にするよりも、世界や社会の最も複雑なパズルを解くための積極的な行動を起こすための手段を提供している」とコメントしています。

Foldit は、個人でプレイするモチベーションに加えて、プレイヤーによる集団的な問題解決も促します。オンライン ディスカッション フォーラムと Wiki があり、プレイヤーはそこでニュースを共有したり、タンパク質の折り畳みに関する戦略について話し合ったりできます。このゲームには、プレイヤーがゲーム タスクを自動化するスクリプト (短いプログラム) を作成するために使用できるシンプルなプログラミング言語が組み込まれています。典型的なスクリプトは、折り畳みを改善するための戦略を実装したり、タンパク質の現在の形状のどの部分が最も改善が必要かを特定したりします。数百のそのようなスクリプトが公開されており、これはタンパク質折り畳みに対するオープンソース アプローチです。プレイヤーの多くはグループで作業し、折り畳みの最良の方法についての見識を共有します。この作業はすべて、ゲームのスコアによって大きく左右されます。MathWorks のコンペティションと同様に、スコアは参加者の注意を最も役立つところに集中させます。つまり、高得点のプレイヤーの 1 人が戦略のヒントやスクリプトを共有すると、他のプレイヤーが注目します。出演者自身も実に多様で、テキサス州ダラス出身の自称「教養ある田舎者」から、サウスダコタ州出身の演劇史家、高校卒で 3 人の子供を持つ祖母まで多岐にわたる。

Folditのプレイヤーは、タンパク質の折り畳みがどのくらい得意なのでしょうか? 1994年以来2年に一度、コンピューターを使ってタンパク質の構造を予測する生化学者の世界規模のコンテストが開催されています。CASP (タンパク質構造予測技術の批判的評価) と呼ばれるこのコンテストは、タンパク質の構造予測に取り組む科学者にとって非常に重要です。コンテストが始まる前に、CASPの主催者は、X線回折という従来の方法を使ってタンパク質の構造を決定しているいくつかの施設に連絡を取り、今後2、3か月でどのようなタンパク質構造を完成すると見込まれるかを尋ねます。そして、それらのタンパク質をCASPのパズルとして使用します。タンパク質を構成するアミノ酸の配列から始めて、CASP参加者は構造を予測するよう求められます。コンテストの最後に、実際の構造にどれだけ近づいたかでチームが順位付けされます。

Folditのプレイヤーは、CASP 2008と2010の両方の大会に出場しました。彼らは非常に良い成績を収め、CASPの多くの課題でトップかそれに近い成績を収めました。Foldit開発者のZoran Popovi氏は、2008年の大会の結果を次のように総括しました。「Folditプレイヤーは、利用可能なすべてのツールを使って同じ問題を解こうとすると、タンパク質折り畳みの専門家と同等ですが、それ以上ではありません。また、Folditは完全に自動化されたサーバーからの提出をすべて上回ったようです。」つまり、アマチュアのチームが、最先端のコンピュータを備えた世界トップクラスの生化学者と競争できるということです。Popovi氏は私にこう語りました。「最終的な目標は、この問題に関して専門家が一般の人々より明らかに劣っていることを示すことです。…生化学の博士号取得者は空間推論を自ら選択するわけではありません。構造予測は3Dの問題解決がすべてであり、生化学はあまり関係ありません。」実際、タンパク質構造予測の専門家であっても、タンパク質構造の予測に直接取り組む時間はほんのわずかです。

アマチュアにはない専門知識を持つ一方で、その知識の多くはゲームの仕組みに体现されています。そのため、Folditプレイヤーのより多くの時間投入によって、残りの専門知識の差を克服できるほど、競技の公平性が保たれています。これはまさに共生関係と言えるでしょう。プロはゲームの仕組みの根底にある体系的な理解を深め、アマチュアはその体系的な理解を最大限に活用するために必要な、献身的な芸術性を発揮します。

## 今日の市民科学

市民科学はインターネット時代の発明ではありません。初期の科学者の多くはアマチュアであり、占星術など、より高収入の職業と並行して趣味として科学を追求していたことが多かったのです。しかし、科学が専門化された後も、アマチュアは科学の一部を支配し続けました。例えば、歴史上最も成功した彗星ハンターの多くはアマチュア天文学者でした。南アフリカのプレトリア市で公務員を務めていたジョン・カイスター・ベネットは、20世紀で最も壮観な彗星の一つ、1968年の大彗星ベネットを発見しました。

市民科学は目新しいものではないが、オンラインツールによってはるかに多くの人々が参加できるようになりつつある。Galaxy Zoo の 20 万人以上の参加者や Foldit の 7 万 5 千人を超える参加者を考えてみよう。そして、人々が行える科学研究の範囲も広がっている。1960 年代に彗星ハンターになるには、望遠鏡を購入または自作し、使い方を学び、そして何時間も空を観測する必要がありました。参入障壁も継続的な貢献の障壁も高かった。それとは対照的に、Galaxy Zoo や Foldit では、ほんの数分で始めることができる。スマートフォンで銀河を分類することさえ可能だ。参入障壁を下げることに加えて、オンラインツールは高度な対話型トレーニングを可能にし、参加者をコミュニティに集めて互いに学び合い、互いの研究をサポートできるようにする。その結果、私たちは市民科学が大きく開花しているのを目撃しているのだ。

この発展の一例として、彗星探査はインターネットによって一変しました。1995年、欧州宇宙機関（ESA）とNASAは、太陽とその周辺地域の非常に鮮明な写真を撮るために設計されたSOHOと呼ばれる宇宙船を打ち上げました（SOHOは太陽・太陽圏観測所の略です）。太陽の近くは彗星を探するのに最適な場所であることが判明しました。その理由の一つは、彗星が非常によく照らされていることと、太陽風によって尾が長く伸びていることです。通常、このような彗星は太陽のまぶしさで写真に写りませんが、SOHOに搭載されている機器の一つは、太陽本体からの光を遮断するように特別に設計されており、太陽コロナ（太陽表面のすぐ上にあるプラズマ大気）の写真を撮ることができます。SOHOチームはコロナの画像をインターネットで公開することを決定し、多くのアマチュア彗星探査者が写真に目を通し、彗星を探し始めました。最も成功したのはドイツの

アマチュア天文家のライナー・クラフト氏は、毎週何時間もかけてSOHOから送られてきた写真を非常に注意深く観察しています。こうして彼は史上最も成功した彗星ハンターとなり、これまでに250個以上の彗星を発見しました。これは、これまで発見された彗星のほぼ15分の1に相当します。

市民科学のもう一つの例は、コーネル大学鳥類学研究所が運営するプロジェクト eBird です。eBird では、アマチュア バードウォッチャーに、観察した鳥に関する情報（観察した鳥の種類、観察日時、観察場所）をオンライン ウェブサイトにアップロードするよう求めます。提出された観察結果をすべて統合することで、eBird は世界中の鳥類の個体数に関する理解を深めることができます。これは、市民科学が従来からの伝統、つまりアマチュア バードウォッチャーとプロの鳥類学者のコラボレーションの伝統の上に成り立っているもう一つの例です。しかし、プロジェクト eBird はこのコラボレーションを前例のない規模で実現しており、参加者はこれまでに3,000 万件を超える鳥類観察結果を報告しています。約 2,500 人のバードウォッチャーが頻繁にこのサイトに投稿しており、50 件以上の投稿を行っています。また、数万人が定期的にこのサイトを使用しています。収集されたデータは、たとえば、さまざまな場所における特定の鳥類の密度を示す分布マップを作成するために使用できます。eBird がより多くのデータを収集するにつれて（2002 年に開始）、このような分布域マップは、気候変動、近隣の人口の変化、その他の環境要因などが鳥に与える影響を追跡するのにますます役立つようになります。

市民科学のもう一つの例は、恐竜の研究です。恐竜研究のほとんどは、たった1つ、あるいは数個の化石に集中しています。2009年9月、古生物学者のアンディ・ファーケ、マシュー・ウェデル、マイク・テイラーは、数百、あるいは数千もの科学論文の結果を統合し、多くの恐竜に関する情報を収録した大規模なデータベースを作成するというアイデアを思いつきました。彼らは、このデータベースから多くの新たな疑問に答えを見つけ出せることを期待していました。しかし、彼らはデータベースを自分たちだけで構築するのではなく、より広範なコミュニティの人々の知識と努力を活用することにしました。

彼らは「オープン・ダイナソー・プロジェクト」を立ち上げ、世界中から人々を募って恐竜に関する論文を発掘するプロジェクトを立ち上げました。この記事を書いている時点では、恐竜の四肢の計測に焦点を当てています。例えば、右大腿骨の長さが1,242ミリメートルのステゴサウルスの標本を研究した論文をボランティアが見つけたら、そのデータをデータベースに記録します。こうしてこのプロジェクトは、46人（多くはアマチュア）から提供された1,659個の恐竜標本の計測データリストを作成しました。

これにより、例えば次のような質問に答えられるようになることを期待しています。

恐竜の移動の進化。オープン・ダイナソー・プロジェクトはまだ初期段階にあり、データは急速に収集されていますが、そのデータがどれほど有用であるかを判断するのは時期尚早です。しかし、これは、アマチュア科学者とプロの科学者の両方を含むコミュニティが、どちらか一方だけでは成し遂げられないほどの成果を上げられることを示す、もう一つの例です。

これらの例やこれまでの例から、市民科学者が科学に貢献しているいくつかの明確な方法がわかります。市民科学は、膨大なデータセットを収集し、分析する上で強力な手段となり得ます。これらのデータセットから、市民科学者は、フォルヴェルプやグリーンピースといった、コンピューターで見つけ出すのが難しいような、珍しい、予想外の発見を見つけることができます。このように、市民科学は前章で述べたデータ駆動型インテリジェンスのツールを補完するものです。

市民科学者もまた、これらのツールの機能を共生的に拡張する取り組みを行うことができます。これは、Folditプレイヤーがタンパク質構造予測ツールを巧みに使いこなしている様子からも明らかです。このアイデアのもう一つの展開として、Zookeepersは最近、Zooitesの銀河分類を用いて、渦巻銀河と楕円銀河を区別するコンピュータアルゴリズムを訓練しました。予備的な結果は有望で、アルゴリズムは人間の分類と90%の一致を達成しました。この結果が興味深いのは、大型シノプティック・サーベイ望遠鏡（LSST、[107ページで説明](#)）などの機器による将来の天体サーベイによって、Galaxy Zooの膨大なボランティアでさえ分析できる量をはるかに超えるデータが生成されるためです。おそらく、LSSTの結果は、まずアマチュアにデータのごく一部を分析させ、次にコンピュータアルゴリズムを用いてアマチュアの分析から学習し、コンピューターがデータセット全体の分類を完了することで理解されるでしょう。このような可能性によって、市民科学プロジェクトが大量に生み出され、一世代前には想像もできなかった方法で一般の人々が科学研究に参加するようになりました。

## 市民科学は科学をどれだけ変えるのでしょうか？

Galaxy Zoo、Foldit、オープン恐竜プロジェクトといった例は興味深く楽しいものです。しかし、科学は広大であり、市民科学は

今後数年、数十年で急速に成長する可能性が高いとはいえ、それが科学の実施方法の支配的な部分となることを意味するわけではありません。Galaxy Zooのようなプロジェクトは重要ですが、それが単なる奇想天外なものなのか、それとも科学におけるより広範な変化の前兆なのかは明らかではありません。市民科学は、科学の実施方法に広範かつ決定的な影響を与えることはあるのでしょうか？それとも、科学の特定の分野でのみ役立つ運命にあるのでしょうか？これらの疑問の答えは私にはわかりません。オンラインツールが市民科学の影響を拡大する方法を探り始めたばかりです。状況は前章で述べた変化とは全く異なります。そこでは、知識の意味を見出すための強力な新しいツールが、すでに科学の多くの分野に革命をもたらしています。今のところ、市民科学の見通しはより不透明です。しかし、市民科学が最終的にどれほど重要になるかを確実に知ることはできませんが、少なくともその可能性、適用可能な分野、そして限界についてもう少し考えることができます。

その可能性の一つは、市民科学のための支援的で刺激的なコミュニティを創り出すことです。インターネットが登場する前は、ほとんどの市民科学者は同僚からの励ましや批判を受けることなく、主に一人で活動していました。しかし今日、状況は変わりつつあります。Galaxy Zooフォーラムでは、人々が互いに助け合うコミュニティ、天文学者として学び成長できる支援的な環境、そして人々が質問し、他の人々が親切に答えてくれる場所が見られます。例えば、グリーンピース銀河の解明を目指すZooitesの人々が互いに助け合った様子を考えてみてください。

彼らは、グリーンピースの独自性について互いのアイデアを繰り返し批評し、改善し、銀河のスペクトルを分析する最良の方法や、SDSS データ内でグリーンピースを自動的に見つけるためのデータベース クエリの実行方法などの問題についての豆知識を共有し合いながら、互いに刺激し合いました。

そのようなコミュニティに参加すると、実質的に「これは重要です。これが本当に重要なのです」というフィードバックを絶えず受け取ることになります。

子どもたちが路上や公園でサッカーや野球をする様子を想像してみてください。彼らは毎日、何時間も休むことなくプレーし、ベストを尽くすことを要求しながらも、それを達成する喜びを与えてくれるコミュニティの一員として、徐々に上達していきます。最もクリエイティブなコミュニティは皆、同じことをしています。

この新しいタイプのコミュニティ構築は重要ですが、今日の市民科学プロジェクトには大きな改善の余地があります。Galaxy Zoo、Foldit、そして他のほとんどの市民科学プロジェクトには、プロの科学者が利用できるような、体系的な育成とメンターシップの足がかりがまだありません。こうした足がかりは、科学者が様々な科学研究に必要な幅広い知識を習得する上で役立ちます。

市民科学プロジェクトがどのように進化していくのか、興味深いところです。より効果的な学習環境、つまりアマチュアが学びながら徐々に専門知識を習得できるような環境が生まれるのでしょうか？メンター制度が生まれ、体系的な学習方法が提供されていくのでしょうか？バーチャルセミナーやカンファレンス、オンライン質疑応答セッション、ディスカッショングループを中心としたオンラインコミュニティを想像してみてください。こうしたアイデアやその他のアイデアを活用することで、市民科学を支援する、やりがいのある、そして充実したオンラインコミュニティを構築できるでしょう。

最大規模の市民科学プロジェクトは、多くの参加者を動員してきました。Galaxy Zooには20万人以上の参加者がいます。市民科学には、まだ成長の余地があるのかと疑問に思う方もいるかもしれませんが、それとも、市民科学への関心は既に枯渇してしまったのでしょうか？

これらの疑問について考える良い方法があります。それは、ニューヨーク大学の著者クレイ・シャーキーがウィキペディアの類似の疑問を分析したことにヒントを得たものです。まず、Galaxy Zooのようなプロジェクトにかかる総労力を大まかに見積もってみましょう。これまでに、Zooitesは約1億5000万個の銀河の分類を行ってきました。1回の分類にたとえば12秒かかるとすると、50万時間の作業に相当します。これは、250人の従業員が1年間フルタイムで働いているのに等しいのです。これは驚くべき作業量ですが、社会全体という規模で見ればほんのわずかな量です。平均して、アメリカ人は1日に5時間テレビを見ており、これを1年間に換算すると、アメリカ人は5000億時間以上テレビを見ていることになります。これはGalaxy Zooプロジェクト100万個に相当します。

ギャラクシー動物園の規模に近い活動を見てみましょう。イングランドのサッカーチーム、マンチェスターユナイテッドは、本拠地であるオールドトラフフォードに7万6000人の観客を収容しています。試合は中断を挟みながら2時間続きます。そのため、試合の観客は合計でおよそ15万時間を費やしています。これは、ズーアイトが銀河の分類に費やした時間のほぼ3分の1に相当します。言い換えれば、マンチェスターユナイテッドのスタジアムを満員にして、サッカーを見る代わりに、人々に数時間かけて銀河を分類するよう依頼したと想像してみてください。これを3回行えば、ギャラクシー動物園に費やされた労力にはほぼ匹敵することになります。もちろん、私がこれを書いている時点でギャラクシー動物園は3年が経過していますが、マンチェスターユナイテッドは毎年何十回もホームゲームを行っています。そのため、ズーアイトは、マンチェスターユナイテッドのホームゲームのファンが示す献身より1,2段階劣っています。もっと近い例えは、ブリストル・ローヴァーズのような、ホームゲームで数千人のファンを集める、はるかに小規模なサッカークラブです。市民科学には、まだまだ成長の余地が大いにあります！

シャーキーは「認知的余剰」という言葉を創り出し、私たちの社会が持つ可処分時間とエネルギー、つまり生計を立てたり家族を養ったりといった生活の基本的な義務を果たさない、私たち全員が共有している時間すべてを表現しました。テレビを見たり、友人と出かけたり、趣味でリラックスしたりするなど、余暇活動に費やす時間です。これらの活動は、ほとんどの場合、個人または少人数のグループで行うものです。

オンラインツールは、大規模なグループ内で複雑なクリエイティブプロジェクトを容易に調整することを可能にします。大人数が集まってサッカーの試合を応援することは、これまでも常に可能でした。しかし、複雑なクリエイティブな目標に向かって大人数を集めるのは、はるかに困難です。一つの方法は、全員に報酬を支払って集まり、マネージャーと部下で構成される階層構造を形成することです。私たちはそれを会社、非営利団体、政府などと呼びます。しかし、お金がなければ、これほど複雑なクリエイティブプロジェクトをまとめることは歴史的に困難でした。オンラインツールは、お金を動機とすることなく、こうした複雑な調整をはるかに容易にします。シャーキーは詩的にこう表現しています。

私たちは、愛のために小さな出来事が起こり、お金のために大きな出来事が起こる世界に慣れていますが、愛はケーキを焼く動機となり、お金は百科事典を作る動機となります。しかし今、私たちは愛のために大きなことを成し遂げることができるのです。

Galaxy Zoo や Foldit などのプロジェクトはまさにそれを実行し、社会の認知的余剰を活用して科学的問題を解決しています。

私たちの社会の認知的余剰のうち、どれだけが市民科学に活用されるのでしょうか？ 現時点ではこの問いに答えることはできません。市民科学は、オンラインツールによって大きく発展しつつある初期段階にあります。

最終的にどこまで拡大するかは、科学者たちが一般の人々とつながるための新しい巧妙な方法、彼らにインスピレーションを与え、彼らが意義深い貢献をできるよう支援する方法を考案する想像力にかかっています。ギャラクシー・ズーで最も多作な参加者の一人、アイダ・ベルゲスという女性の話から、その一端を垣間見ることができます。

ベルジェスさんは53歳で、ドミニカ共和国出身、現在はプエルトリコ在住の専業主婦です。2児の母で、毎週数百もの銀河を分類しており、これまでに合計4万個以上の銀河を分類しています。グリーンピース、フォアワープ、合体銀河の探査など、数多くのプロジェクトに携わってきました。彼女は2つの超高速星を発見しました。超高速星とは、非常に高速で移動しているため、銀河系から遠ざかろうとしている星のことです。このような星は、これまでに合計で20個にも満たない数しか発見されていません。ベルジェスさん

ネットでギャラクシー動物園について読んで参加した彼は、「私の人生は永遠に変わりました。まるで家に帰ってきたようでした」と語っています。

自分。

皮肉屋は、ほとんどの人は科学に貢献できるほど賢くも興味も持っていないと言うでしょう。しかし、Galaxy ZooやFolditのようなプロジェクトは、そうした皮肉屋が間違っていることを示していると思います。ほとんどの人は科学に貢献できるほど賢く、そして多くの人が科学に興味を持っています。足りないのは、彼らが科学コミュニティとつながり、科学に貢献できるようなツールだけです。

今日、私たちはそれらのツールを構築することができます。

## 社会における科学の役割の変化

1955年にジョナス・ソークがポリオワクチンを発表すると、裕福な先進国ではすぐに広く使用されるようになり、ポリオの発生率は急減しました。しかし、発展途上国では状況が異なりました。1988年には、発展途上国で約35万人がポリオに感染しました。その年、世界保健機構（WHO）は、この病気を撲滅するための世界的な取り組みを開始することを決定しました。彼らは急速に進展し、2003年には世界の新規症例はわずか784件で、ほとんどがわずか数カ国に集中していました。最も打撃を受けたのはナイジェリアで、新規症例のほぼ半数（355件）が発生しました。WHOはナイジェリアで大規模なワクチン接種プログラムを開始することを決定しましたが、この取り組みは、総人口1,800万人を抱えるナイジェリア北部の3州、カノ州、ザムファラ州、カドゥナ州の政治指導者と宗教指導者によって阻止されました。

これらの州の指導者たちは、ワクチンがHIV/エイズや不妊症を引き起こす物質に汚染されている可能性がある」と警告し、親たちに子供にワクチン接種を受けさせないように伝えた。カノ州政府は、ワクチン接種反対を「数十万、あるいは数百万人の少女が不妊になるのを許すより、2人、3人、4人、5人、あるいは10人の子供をポリオで犠牲にする方がましだ」と表現した。強力な権力を持つカノ州シャリーア最高評議会の指導者は、ポリオワクチンは「アメリカとその西側同盟国の悪人によって腐敗し、汚染されている」と述べた。カノ州ではワクチン接種が中止され、新たなポリオの発生が起こり、

8つの近隣諸国に広がり、最終的には1,500人の子どもたちが麻痺する事態を引き起こしました。

ポリオワクチン接種は、優れた科学が必ずしも良好な公衆衛生成果につながらない唯一の問題からは程遠い。英国では、1998年に権威ある医学雑誌「ランセット」にワクチンが子どもに自閉症を引き起こす可能性を示唆する論文が掲載された後、2000年代初頭に麻疹・おたふく風邪・風疹混合ワクチンの使用が急激に減少した。

(この論文の方法論には欠陥があり、後に同誌とほとんどの著者によって撤回された。)ワクチンと自閉症の疑惑の関連性は英国で大きな論争の的となり、トニー・ブレア首相はワクチンを公に支持したが、息子のレオがワクチン接種を受けたかどうかについては確認を拒否した。ワクチン接種率は92%から80%に低下した。小さな減少のように聞こえるかもしれないが、麻疹の症例数は劇的に増加し、わずか数年で17倍に増加した。麻疹の急増がなぜこれほど劇的だったのか、そしてワクチン接種率の低下がなぜこれほど重大な問題なのかを理解するには、ワクチン接種を受けていない人の割合が8%から20%に上昇したことに注目してください。大まかに言えば、これは麻疹に感染した人が、以前の2.5倍の感受性のある人に曝露することを意味します。そして、これらの人が麻疹に感染した場合、今度は以前の2.5倍の感受性のある人に曝露することになります。このように、同様のことが繰り返されます。だからこそ、ワクチン接種率がわずかに低下しただけでも、発症率が大幅に上昇する可能性があるのです。

ワクチン開発の失敗はさておき、私たちの社会は科学を社会貢献へと転換する点でしばしば優れた成果を上げています。例えば、市場や起業家精神は、科学を私たちの生活を豊かにする商品へと変える強力な制度です。レーザーのような開発を考えてみましょう。レーザーが最初に発明されたとき、多くの人々はそれを用途の薄いおもちゃだと考えていました。しかし、起業家たちは、映画 (DVD) の再生からレーザー眼科手術による視力矯正まで、あらゆることにレーザーを活用する独創的な方法を生み出しました。私たちの社会は、科学を取り込み、それをを用いて新製品を開発し、市場に投入することに非常に長けています。

しかし、科学を市場に届けることは得意ですが、公共政策を通じて科学を届けることに関しては、実績がまちまちです。

市場では、誰もが製品を使うかどうかを自分で決めることができます。レーザー眼科手術に抵抗があるとしても、誰もあなたにそれを強制しているわけではありません。しかし、政策決定は、子供の予防接種を義務化すべきかどうかのように、しばしば集団的な決定です。このような決定は市場のように個別に行うことはできませんが、効果を上げるには幅広い合意が必要です。そして、科学者が劇的な政策で何かを発見した時、

例えば、人間の二酸化炭素排出が地球温暖化につながっているといった、科学的な含意を否定する意見を述べると、多くの点で彼らは政府にロビー活動を行う単なる利益団体として扱われます。しかし、科学は単なる利益団体ではありません。世界を理解するための手段なのです。理想的には、私たちの統治機関は、科学によって得られた知識を、たとえそれが不完全で不確実で暫定的なものであったとしても、可能な限り公共政策に取り入れるべきです。しかし、今日の民主主義国家では、そうはなっていません。これが民主主義における科学の問題なのです。

ワクチン問題、あるいはもっと広く言えば、民主主義における科学の問題に対する解決策は私にはありません。私がこれらの問題について説明するのは、それらが私たちの社会において現在科学が果たしている役割における重大な欠陥の具体的な例だからです。これらの問題や同様の問題を解決するには、社会における科学の役割を大きく変える必要があります。多くの場合、こうした変化は非常にゆっくりとしか起こらないため、その役割を当然のことと考え、自然な状態と見なしてしまいがちです。しかし実際には、現状は全く自然なものではありません。科学の役割は、社会や時代によって根本的に異なってきました。例えば、科学的思考が完全に抑圧されてきた社会を考えてみてください。歴史的に見て、科学の役割における大きな変化は、しばしば新しい技術と、それによって可能になる新しい制度によって引き起こされてきました。

印刷機がルネサンス、宗教改革、啓蒙主義の推進役として果たした役割を考えてみてください。「誰が科学に資金を提供するのか？」「科学はどのように政府の政策に組み込まれているのか？」、あるいは「誰が科学者になれるのか？」といった根本的な問いに対する制度的な答えを変えることで、社会における科学の役割を変えることができます。

制度が科学の役割に及ぼす影響の具体的な例として、市場システムに戻りましょう。科学の役割における市場の重要性は、ソビエト連邦で市場が抑圧された際に起こった出来事によって鮮明に示されています。ソビエト連邦は世界でも有数の科学研究システムを有していましたが、市場システムがなければ、科学的イノベーションを国民に提供することはほとんど不可能でした。制度の力のもう一つの例は、義務教育の導入が一般の科学リテラシーを向上させたことです。科学リテラシーの水準について多くの分野で不満を言うのは常識ですが、歴史的に見ると、私たちは啓蒙時代に生きています。市場と学校はどちらも橋渡し機関として機能し、科学と社会を結びつけ、多くの社会的利益をもたらします。最後の例として、今度は負の例ですが、初期キリスト教会による科学の抑圧を考えてみましょう。これは、キリスト教皇帝ユスティニアヌス帝の治世から1000年以上続きました。

西暦529年のアテネのアカデミーの閉鎖から、西暦1633年のガリレオの裁判と自宅軟禁まで。

社会制度を変えることで、科学の役割を劇的に変え、社会の最も深刻な問題のいくつかに対処できる可能性があります。そのためには、ワクチン問題や民主主義における科学の問題といった問題に対処できる新たな制度的メカニズムを発明する想像力と意志が必要です。このように制度を変えるのは非現実的に思えるかもしれませんが。多くの場合、制度はゆっくりとしか変化しません。しかし、今日ではほとんどの場合そうではありません。オンラインツールは、制度を生み出す機械です。Galaxy Zoo、Wikipedia、Linuxといった例は、新しい制度、さらには根本的に新しいタイプの制度を作ることがいかに容易になったかを示しています。同時に、オンラインツールは社会の既存の制度を変革しています。過去10年間の伝統的な音楽会社や新聞社の崩壊と、それに取って代わる新しいモデルの台頭を考えてみてください。つまり、私たちは歴史上非常に興味深い局面に立ち、新しい制度の創設や既存の制度の再構築がはるかに容易になったのです。だからといって、ワクチン問題のような問題を簡単に解決できるわけではありません。これは、社会における科学の役割を再考し、ある程度再構築する機会が私たちに与えられていることを意味します。Galaxy ZooやFolditといった市民科学プロジェクトは、オンラインツールがいかにして非常に根本的な変化をもたらすか、つまり「誰が科学者になれるのか」という点を変革できるかを示しており、既にこの動きは始まっています。本章の残りの部分では、オンラインツールが社会における科学の役割をどのように変えているのか、そして科学の成果と科学者自身への市民のアクセスを向上させる方法についても探っていきます。

## オープンアクセス

定期的なマンモグラフィ検査のために医者を訪れた女性を想像してみてください。すると、医師から驚くべき悲報が告げられました。「早期の乳がん」です。ショックを受けながら家に帰り、この病気と闘う計画を立て始めます。まずは知識を深めることだと決意し、インターネットで情報を調べ、次のようなサイトから多くの役立つ情報を見つけます。

米国立がん研究所が運営する cancer.gov というサイトです。しかし、しばらくすると、ウェブ上で見つかる入門情報はすべて繰り返しばかりになってしまいます。あなたは、最も有望な最新研究に関する知識をもっと知りたいと思うでしょう。友人が、Google には Google Scholar という特別な検索エンジンがあり、科学文献から乳がんに関する最も優れた最新の論文を検索できると教えてくれました。そのサイトにアクセスして「乳がん」と検索すると、数え切れないほどの論文が見つかります。すばらしい！さらに、Google Scholar は、Google が推測した重要度に基づいて結果を並べ替えます。Google がトップの結果としてランク付けした論文をダウンロードしようとする、ダウンロードに 50 ドルも支払う必要があることがわかります。「まあいいや、その論文については後でまた見よう」とあなたは思う。しかし、2 番目の論文を見ると、ダウンロードに 15 ドルもかかることが分かる。3 番目の論文を見ると、その出版社も課金したがつているものの、価格については遠慮しており、まずはサイトに登録するよう求めてくる。検索結果のページをめくっていくと、料金のパターンは続き、最初の高揚感は怒りと不信感に変わる。「毎年何百億ドルもの税金が科学研究に使われているのだから、せめてその研究結果を読む権利はあるはずだ」とあなたは考える。乳がんは深刻な病気であり、怒りをこらえて料金を支払いたいと思う。しかし、論文は何千本もある。そのほんの一部でさえ支払う余裕はない。

従来の科学出版は、アクセス料金モデルに基づいています。多くの点で雑誌ビジネスとよく似ており、『Physical Review Letters』のような一流科学ジャーナルと、『Time』や『People』のような雑誌との間には、想像するほど大きな違いはありません。雑誌と同様に、科学ジャーナルも論文集ですが、ニュース、政治、有名人について議論するのではなく、ジャーナルの記事は科学的発見について述べています。ジャーナルは派手な表紙や広告を掲載しているわけではなく、地元のニューススタンドで見かけることもほとんどありませんが、ジャーナルも雑誌も読者から料金を徴収することで収益の大部分を得ています。ジャーナルの年間購読料は、数百ドル、数千ドル、あるいは数万ドルに及ぶこともあります。そして、先ほど見たように、ジャーナルはこれらの料金に加えて、ウェブ上の記事への一回限りのアクセスに対して、通常10ドルから50ドルを請求しています。

この購読制のビジネスモデルは、科学出版社によって何百年も前から利用されてきました。科学と社会の両方に貢献してきたモデルです。しかし、インターネットの登場により、科学論文へのオープンアクセスという新しいモデルへの移行が可能になり、論文は無料でダウンロードできるようになりました。これは前章で見てきた変化の一部です。

世界中の科学的知識が徐々にオンラインでアクセス可能になりつつあります。しかし、この話には注意すべき点があります。現状では、多くの知識にアクセスできるのは科学者だけです。特に、科学者は数千もの科学雑誌を一括購読している大学に勤務していることが多いのです。科学者は乳がんやその他のテーマに関する論文を好きなだけ自由にダウンロードできますが、他の人は購読料によってアクセスが制限されています。まるで人類を隔てる壁があるかのようです。

壁の片側には、これまで生きてきた人類の99%以上がいます。そして壁の反対側には、世界の科学的知識があります。オープンアクセス運動は、その壁を打ち破ろうとしています。

市民科学が科学者になれる人を変えているのと同様に、オープン アクセス運動は科学の成果にアクセスできる人を変えています。

オープンアクセス運動の際立った成功例の1つに、物理学プレプリント arXiv (「アーカイブ」と発音) として知られる人気の Web サイトがあります。「プレプリント」とは科学論文で、多くの場合は草稿最終段階で、科学雑誌での掲載が検討される準備ができていますが、まだ雑誌に掲載されていません。今すぐ arXiv にアクセスすれば、世界中の物理学者による最新のプレプリントが何十万も見つかります。すべて無料でダウンロードできます。スティーブン・ホーキングが最近何を考えているのか知りたいですか? arXiv にアクセスして「ホーキング」で検索すると、彼の最新の論文を読むことができます。数年や数十年前に書いたものではなく、昨日、先週、または先月完成した論文です。大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) での自然界の基本粒子の探索の最新情報を知りたいですか? arXiv にアクセスして「LHC」で検索すると、驚くような論文が山ほど見つかります。人を驚かせるのが好きなら、カクテルパーティーでちょっと変わった会話が弾むかもしれません。「LHCのヒッグス粒子探索の最新情報はご覧になりましたか? 結果は…」といった具合です。もちろん、すべてが読みやすいわけではありません。多くの論文は物理学者が物理学者のために書いたもので、非常に専門的になることもあります。しかし、最も専門的な論文でさえ、一般の人にも理解しやすい興味深い核心が含まれていることがよくあります。

arXivサイトの仕組みは次の通りです。物理学者が最新の論文を完成させると、arXivのウェブサイトにアクセスしてアップロードします。arXivのモデレーターによる簡単なチェックが行われ、不適切な投稿は削除されます。バイアグラの広告や、明らかに狂気じみた論文は表示されません。数時間後、論文はサイトに掲載され、世界中の誰もがダウンロードして読むことができます。多くの物理学者は、論文が完成次第、従来の科学雑誌に掲載されるずっと前にarXivに投稿します。物理学の論文の半分以上がarXivに掲載されており、物理学のいくつかの分野ではその割合は…

ほぼ100%です。多くの物理学者は、arXivをチェックして一夜にして何が生まれたかを確認することから一日を始めます。arXivは科学的発見の共有速度を加速させ、物理学に革命をもたらしました。同時に、arXivは人類の物理学に関する知識の多くを、インターネットに接続できる人なら誰でも自由に利用できるようにしました。物理学に個人的な関心があるかどうかに関わらず、起業家やエンジニア、ジャーナリストや学生、そしてこれまではアクセスできなかった多くの人々が、この知識を自由に利用できることは社会にとって大きな利益です。

arXiv はオープン アクセス運動の大きな成功例の 1 つです。しかし、医学、気候科学、環境など、科学のほとんどの分野では、人類の科学的知識にアクセスできるのは、いまだに科学者と、アクセス料金を支払える人だけというのが現状です。

このため、そしてarXivの成功に一部触発されて、物理学以外の分野でもオープンアクセス・ソリューションを構築している組織がいくつかある。その一例が、Public Library of Science (PLoS)だ。2000年に設立されたPLoSは、多くの点でarXivよりも従来のジャーナル出版社に近い。しかし、PLoSは読者に論文へのアクセス料を請求するのではなく、著者に論文の出版料を請求している。

この料金によってPLoSの運営資金が賄われ、PLoSの論文をウェブ上で無料で公開することが可能になっています。このモデルを用いることで、PLoSはPLoS BiologyやPLoS Medicineといった、各分野で最高峰と評されるジャーナルを急速に築き上げてきました。

arXivとPLoSは、科学文献へのオープンアクセスを標準とすることを目指す多くの取り組みのうち、ほんの2つに過ぎません。他にも多くのオープンアクセス・プロジェクトが立ち上げられています。これらのプロジェクトは勢いを増し、2008年には米国議会が国立衛生研究所 (NIH)のパブリック・アクセス・ポリシーを法制化しました。NIHのポリシーでは、NIHから資金提供を受けているすべての研究者は、従来の学術誌への掲載後12ヶ月以内に、完成した論文をオープンアクセス可能なアーカイブにアップロードすることが義務付けられています。年間300億ドル以上の予算を持つNIHは世界最大の科学研究助成機関であり、このポリシーによってオープンアクセス可能な研究の量が急速に増加しています。世界中の他の多くの研究助成機関や大学も同様のオープンアクセス・ポリシーを実施しています。例えば、英国のすべての研究会議は現在、NIHと同様の方針を採用し、研究者に論文のオープンアクセスを義務付けています。多くの科学研究は依然として出版社の有料購読という壁の背後に閉じ込められていますが、オープンアクセスが例外ではなく標準へと大きく転換する瀬戸際にいるのかもしれませんが、もしそうなれば、数十年後の人々は、

科学への普遍的なアクセスがなかった時代はかつてありませんでした。これは市場の導入と似たような制度的変化となるでしょう。

オープンアクセスの普及による最も明白なメリットは、個々の市民にとってです。病気に苦しむ人々が最新の研究論文をダウンロードする能力に制限がなくなるのです！しかし、長期的には、オープンアクセスのさらに大きなメリットは、科学と社会全体をつなぐ新たな機関の創設を可能にすることです。これはすでに起こり始めています。例えば、DiggやSlashdotといったユーザー生成のオンラインニュースサイトは、arXivやPLoSといったオープンアクセスの情報源にある最新の研究論文に定期的にリンクしています。これらのニュースサイトは、一般の人々が共同でニュースの内容を決め、そのニュースについて議論する場を提供しています。人々が議論の対象とするのは、宇宙論や量子テレポーテーションといったテーマに関するarXivの最新論文、あるいは遺伝学や進化生物学といったテーマに関するPLoSの最新論文などです。ニュースサイトでNatureやScienceといった有料アクセスジャーナルへのリンクを投稿すると、しばしば苦情が寄せられ、ユーザーからは海賊版のオンラインコピーを代わりに指摘されることもあります。(これは私が推奨しているわけではありませんが、実際に起こっていることです!) 同様に、ScienceNewsなどの専門的に制作されたオンラインニュースサイトでは、最新の研究に対する独自の見解を提供しています。

これらのサイトはオープンアクセスとクローズドアクセスの両方の記事を扱っていますが、オープンアクセスの記事は、クリックして元の研究を閲覧できるという理由だけで、より注目を集めることが多いです。これらのサイトは科学コミュニティへの窓口となり、arXivやPLoSといったリソースを補完・拡張しています。もちろん、こうした変化の影響は時に複雑です。arXivなどのオープンアクセスリソースに掲載された、科学的価値に疑問のある論文に関するニュース記事は数多く書かれてきました。しかし、科学者が誠実な証拠に基づいている限り、オープンアクセスは社会をより良くするための新たな制度を構築するための強力なプラットフォームとなります。

従来の有料アクセスの科学出版社のオープンアクセスに対する反応は様々です。中には独自のオープンアクセス実験を始めた出版社もあります。しかし、大手出版社を含む多くの出版社は、オープンアクセス運動に脅威を感じています。彼らにとって、オープンアクセスのアーカイブやジャーナルは、ありふれたビジネス上の競合相手ではありません。むしろ、科学出版のビジネスモデルを根本的に変える可能性を秘めています。従来の出版社は難しい選択に直面しています。PLoSやそれに類似するジャーナルのオープンアクセスモデルを採用すべきでしょうか？それとも現状維持すべきでしょうか？さらに一歩進んで、例えばNIHのオープンアクセス政策に反対するロビー活動を行うなど、オープンアクセスに反対すべきでしょうか？

方針を変える必要があるでしょうか？難しい選択です。オープンアクセスの道を選べば、ジャーナルの収益が大幅に減少する可能性があります。企業が新たな収入源を開拓しなければ、従業員は職を失い、株主は損失を被ることになります。何十年、時には何世紀にもわたって社会に貢献する事業を築き上げてきた後では、これは厳しい現実です。しかし、社会の最善の利益は、古いビジネスモデルから離れつつあります。多くの従来型出版社が脅威を感じているのも無理はありません。利用可能なテクノロジーは変化したかもしれませんが、だからといってビジネスモデルが変わったわけではありません。

金銭的に言えば、ここには多くのものが賭けられています。科学出版は巨大なビジネスなのです。これはあなたにとって意外な話かもしれません。確かに、一流の職業といえば、科学雑誌の出版を思い浮かべる人は多くないでしょう。科学出版社のCEOが、ソフトウェア王やヘッジファンドの運用者と並んで、フォーブス誌やビジネスウィーク誌の表紙に登場することは滅多にありません。しかし、科学出版は驚くほど利益率が高いため、登場してもおかしくないかもしれません。世界最大の科学雑誌出版社はエルゼビアです。2009年、エルゼビアは11億ドルの利益を上げました。これは、総売上高32億ドルの3分の1以上を占めます。売上高に占める割合で言えば、これはGoogleやMicrosoftといったごく少数の企業が享受している利益に相当します。エルゼビアは非常に利益を上げているため、親会社のリード・エルゼビア・グループは最近、事業のもう一つの大きな部分である教育出版社ハーコートを約50億ドルで売却し、エルゼビアのジャーナル出版事業の拡大資金に充てました。エルゼビアは科学出版社の中で最大手ですが、他の多くの科学出版社も驚くほどの利益を上げています。非営利の科学協会の中にも、会員向けにジャーナルを出版することで多額の利益を上げているところがあり、その利益で他の協会の活動を補助しています。例えば、2004年にはアメリカ化学会は収益3億4000万ドルのうち、ジャーナルとオンラインデータベースで約4000万ドルの利益を上げました。これはエルゼビアよりはるかに少ないですが、忘れないでください。これは非営利の協会なのです。

これほど多くの利害が絡んでいるため、一部の従来型科学雑誌出版社がオープンアクセスに反対する積極的なロビー活動を開始したのも当然と言えるでしょう。2007年にネイチャー誌が発表したレポートによると、大手出版社の業界団体が、オープンアクセス運動への対応を支援するため、高額の広報コンサルタントであるエリック・デゼンホールを雇いました。

デゼンホールは広報界の「ピットブル」として評判を得ており、顧客にはエンロン社の元CEOで不名誉なジェフリー・スキリングや、デゼンホールの会社を雇って広報を支援したエクソンモービルなどが含まれていた。

出版社協会は、デゼンホール氏の助言を受けて間もなく、科学と医学における研究公正性のためのパートナーシップ (PRISM) という組織を設立した。PRISMは、NIHの政策などのオープンアクセス政策に反対する広報活動を開始し、オープンアクセスは「雑誌の経済的存続可能性と独立した査読システム」を脅かし、「科学的記録に選択的バイアス」をもたらす可能性がある」と主張した。

デゼンホールとPRISMの件は、一部の伝統的な科学出版社とオープンアクセス運動の間の争いにおける、数ある小競り合いの一つに過ぎません。一方では、オープンアクセスが伝統的な科学出版社と非営利の科学学会双方の利益、ひいては雇用を脅かす状況にあります。

しかし、これと釣り合う素晴らしい機会があります。arXivやPLoS、そしてNIHのオープンアクセス政策といった例が示すように、あらゆる科学的知識を全人類が自由に利用できるようにすることが今や実現可能となっています。そして、それは驚くべき利益をもたらすでしょう。それは、少数の成功した企業を守るためだけに拒否するにはあまりにも大きな利益です。新しい技術の導入でよくあるように、私たちは社会にとっての大きな利益と、少数の人々にとっての損害を天秤にかけなければなりません。オープンアクセスに反対する従来の出版社には、同情はすべきですが、支援すべきではありません。

## 科学ブログ

2008年4月、作家のサイモン・シンはガーディアン紙に記事を書き、英国カイロプラクティック協会を批判した。

(BCA)は、「会員は痙攣、睡眠や摂食障害、頻繁な耳の感染症、喘息、

証拠が全くないにもかかわらず、長時間泣き続けるよう訴えている。この団体はカイロプラクティック業界の立派な顔でありながら、偽りの治療法を平気で推奨しているのだ。」これに対し、BCAはシン氏を英国の名誉毀損法に基づき提訴し、同団体の治療法の有効性は「膨大な証拠」によって裏付けられていると主張した。この訴訟は英国で大きな注目を集め、シン氏の記事から14か月後、BCAはカイロプラクティック治療の有効性に関する証拠をまとめた7ページの文書を公開した。

その後の展開は予想外だった。BCAが公開した証拠は、ほぼ即座に、科学ブロガーによる特別グループによって独自に調査・分析され、徹底的に分析された。シン氏の代理人を務めた弁護士ロバート・ダガンズ氏と、この事件取材していたブロガーのデイビッド・アレン・グリーン氏がThe Lawyer誌に寄稿した記事では、この出来事が以下のように描写されている。

わずか1日で、この証拠の信頼性、そしてそれを推奨したBCAの信頼性は完全に破壊されました。王立協会フェローを含む12名ほどの科学者ブロガーが、BCAが引用した科学論文を一つ一つ追跡・評価し、これらの論文がBCAの立場を全く支持していないことを疑いの余地なく証明しました。これはブログ上で行われた衝撃的で壊滅的な行為であり、数週間後に英国医学雑誌（British Medical Journal）が正式に繰り返した際には、ほとんど後付けの指摘に過ぎませんでした。物議を醸した事件における原告側の技術的証拠は、あっさりと覆され、そして覆されたと思われたのです。しかも、それは従来の専門家による反対意見の証言や高額な法医学的反対尋問といった手段ではなく、専門ブロガーによって行われたのです。

そして、そのような専門ブロガーが同様のケースで同じことをしない理由はない。

ダガンズ氏とグリーン氏は、このプロセスを「ウィキ訴訟」と呼び、この訴訟におけるその重要性はBCAの証拠を覆す以上のものだと指摘した。ブログは主流メディアによる事件報道に大きな影響を与えただけでなく、「シン氏には、弁護団や運動家たちよりも多様で理にかなった見解を各段階で提供した。シン氏は間違いなく、これらの見解を意思決定において考慮に入れた」と彼らは述べた。これは、ブロガー集団がいかに社会に変化をもたらすことができるかを示す、驚くべき事例である。

オープンアクセスや市民科学と同様に、科学ブログは社会における科学の役割を変えている機関です。そのことについてはここでは触れません。

科学ブログについてここで詳しく説明するのは適切ではありません。なぜなら、1990年代にブログ（科学ブログに限らず、あらゆる形態）が始まって以来、ブログをめぐる騒ぎが絶えないからです。「ブログは政治に革命を起こしている！」「そしてジャーナリズムにも！」「いや、違う！」といった雑誌や新聞記事を数え切れないほど目にしてきました。この既成概念を改めて取り上げるつもりはありません。しかし、科学ブログが科学コミュニティとより広範なコミュニティの間に、オープンアクセスといった考え方を補完し、拡張しながら、どのように新しいタイプの関係性を築き上げることができるのか、その一端を示す例をいくつか挙げたいと思います。

最も広く読まれている科学ブログの注目すべき点の一つは、その人気です。ミネソタ大学の生物学者ポール・マイヤーズ氏が運営するブログ「Pharyngula」は、1日10万回以上のアクセス数を記録しており、これはデモイン・レジスター紙やソルトレイク・トリビューン紙といった大都市圏の主要日刊紙の発行部数に匹敵します。これは、一人の人間が余暇に執筆活動を行うものとしては悪くない数字であり、最も著名な主流紙のジャーナリストを除く他のジャーナリストが日常的に受ける注目度ははるかに上回っています。

Pharyngulaは最も人気のある科学ブログですが、他にも数千人、数万人の定期読者を抱える科学ブログは数多くあります。私が世界最高のブログに選ぶのは、UCLAを拠点とするフィールズ賞受賞数学者、テレンス・タオ氏のブログです。（タオ氏とは以前、Polymath Projectの参加者として少しだけお会いしました。）タオ氏のブログには数百の記事が掲載されています。中には「量子力学とトゥームレイダー」といった気楽な内容のものもありますが、ほとんどの記事は高度な数学的な内容を含んでいます。例えば、「不変部分空間問題の有限的帰結」や「転移原理と素数における線形方程式」といった記事が挙げられます。数学者以外の人にとっては難しそうなタイトルかもしれませんが、数学者にとっては、これらの記事は難しいテーマを驚くほど明快かつ洞察力豊かに解説しており、思慮深く独創的な洞察が数多く含まれていることがよくあります。技術的な内容にもかかわらず、タオ氏のブログは1万人以上の読者を集めています。コメント欄を見ると、これらの人々の多くはプロの数学者である一方で、学生でもあり、時には遠隔地にいる学生も少なくないことがわかります。コメント投稿者の中には数学の知識がほとんどない人もいますが、彼らはただ数学に興味を持ち、もっと学びたいと願う人々であり、世界を代表する科学者の考えに直接触れることを楽しんでいるのです。

科学ブログをどう捉えるべきでしょうか？世界を変える力を持つでしょうか？現状では、そうは思えません。むしろ、科学ブログは可能性の先駆けとして捉えるべきでしょう。科学

ブログは、科学者とその他のコミュニティを隔てる障壁を取り除き、真の双方向の情報の流れを可能にすると何が起こり得るかを、初期の段階で示しています。プリンストン大学に通う幸運に恵まれた友人がかつて私に言ったことがあります。プリンストン大学で一番良かったのは授業でも、出会ったクラスメイトでもなかったそうです。むしろ、並外れて優れた教授陣に出会って、彼らもただの人間だと気づいたことでした。些細なことで腹を立てたり、くだらない冗談を言ったり、間抜けなミスを犯したり、人生で大きな困難に直面したり、そして、欠点や困難にもかかわらず、ごく稀に何か素晴らしいことを成し遂げたりする人たちです。

「あの人たちができるなら、私にもできる」というのが私の友人が学んだ最も重要な教訓でした。

そこで重要なのは、ブログによって、インターネットに接続できる人なら誰でも、世界中の多くの科学者の考えを、気軽に、そして矢継ぎ早に垣間見ることができるようになることです。テレンス・タオのブログを訪れて、彼が数学の最も深い概念のいくつかに対する理解を深めようと奮闘する様子を追うことができます。重要なのは科学的コンテンツだけではありません。そこから明らかになる文化、つまり世界を見る特定の方法です。この世界の見方はさまざまな形を取ります。実験物理学者のチャド・オーゼルのブログでは、彼が愛犬に物理学について気まぐれに説明したり、研究室での爆発について議論したりする内容を読むことができます。内容は多岐にわたりますが、読んでいくうちに、あるパターンが形成され始めます。実験物理学者が世界をどのように見ているのか、彼が何を面白いと思うのか、何を重要だと思うのか、何に苛立たしいと思うのか、少なくとも少しは理解し始めるのです。この世界観に必ずしも賛同したり、完全に理解したりする必要はないかもしれませんが、それでも興味深く、変革をもたらすものです。ボストン、ケンブリッジ、パリといった世界の知的中心地に住んでいる限り、この世界観に触れることは常に可能でした。ブログの読者の多くは、間違いなくそのような知的中心地に住んでいるでしょう。しかし、知的中心地の外に住んでいる人々からのコメントも、このブログには日常的に目にするでしょう。私はオーストラリアの大都市（ブリスベン）で育ちました。世界のほとんどの人々と比べると、私は知的に恵まれた青春時代を過ごしました。それでも、人生で初めて科学者の非公式な話を耳にしたのは16歳の時でした。それが私の人生を変えたのです。

今やインターネットに接続できる人なら誰でも、科学者の考え方や世界観を垣間見ることができ、ひょっとすると対話に参加することもできる。これはどれだけの人の人生を変えることになるだろうか？

## 新しい制度を想像する

市民科学、オープンアクセス、科学ブログといった制度は、いずれも私たちの社会における科学の役割を変えつつあります。現在、これらの制度は規模こそ小さいものの、急速に成長しています。シン事件やハニーによるフォアウェルプの発見といった出来事は重要ですが、義務教育といった社会最大の制度と比べると、その影響は微々たるものです。しかし、大規模で重要な制度のほとんどは、最初は小さく、取るに足りないものから始まりました。学校制度や民主的な政治体制のつましい起源を考えてみてください。重要なのは、制度の絶対的な規模ではなく、むしろ成長の可能性です。制度とは、人々が共通の理念に触発され、その理念を追求するために行動を調整するほどに刺激を受けたときに生まれるものです。オンラインツールは、かつてないほど速くアイデアを広め、行動を調整するのを助けることで、制度の設立をはるかに容易にしています。

例えば、Galaxy Zooは2007年、二人の男がパブで、大胆さと想像力にあふれた予算で立ち上げたプロジェクトです。3年後には、25人のプロの天文学者と20万人のアマチュア天文学者が参加するようになりました。Moon ZooやProject Solar Storm Watchといったプロジェクトも含まれるようになりました。10年後にはどれほど規模が拡大しているでしょうか？ Galaxy Zooがデータセットの分析のために天文学コミュニティから提案を体系的に募集するとしみましょう。Galaxy Zooが天文学全体、そしておそらく他の分野にとっても重要な機関となることは、決して想像に難くありません。私たちは、他にどんな大胆さと想像力を持って、どんな新しい機関を思いつくのでしょうか？

社会における科学の役割に関する根本的な疑問に対して、他にどのような新しい答えが見つかるのでしょうか？

## 創意工夫のギャップを埋める

世界で最も孤立した場所はイースター島です。太平洋南東部に浮かぶ、直径わずか25キロメートル（15マイル）、チリの西3,500キロメートル（2,200マイル）、ピトケアン諸島の東2,100キロメートル（1,300マイル）に位置する小さな島です。この島はもともと、

ポリネシア諸島の住民とその文化は数百年にわたって繁栄し、人口は1万人から3万人にまで増加しました。しかし、人口増加に伴い、島民は島の資源をますます消費するようになり、1500年代から1600年代にかけて社会は崩壊しました。1722年、イースター島を発見したヨーロッパ人、オランダ人探検家ヤコブ・ロッゲフェーンが到着した際、彼は自然資源が枯渇した島を発見しました。島のどこにも3メートルを超える木は一本もありませんでした。今日、島の花粉を分析することで、イースター島はかつて亜熱帯林であり、少なくとも21種の樹木が生息し、中には高さ30メートルに達するものもあったことが分かっています。

ロッゲフェーンでは陸鳥も一種も発見されませんでした。今日では、少なくとも6種の陸鳥がかつてこの島に生息していたことが分かっています。イースター島民が食料と木材の備蓄を破壊したため、彼らは飢餓に苦しみ始め、人口は激減し、おそらく90%も減少しました。イースター島の文化は戦争へと転落し、最終的には人食いへと発展しました。

作家トーマス・ホーマー＝ディクソンは、「創意工夫のギャップ」という造語を用い、社会が直面する問題とその社会が問題解決能力を持つ間の難しさのギャップを表現しました。イースター島の人々に起こったことは、彼らが社会が直面する創意工夫のギャップに圧倒され、自らが作り出した問題の解決策を見出せなかったことです。この創意工夫のギャップが、彼らの文明の崩壊を引き起こしたのです。

現代のグローバル社会は、独自の創意工夫の不足に直面しています。HIV/エイズといった問題もあり、最も深刻な影響を受けているアフリカ諸国では、平均寿命が54.8歳から48.3歳へと6.5歳も短縮しています。核兵器の問題もあり、核兵器を保有するインドとパキスタンがカシミールをめぐる争い、世界の二大新興超大国である中国とインドがアジアにおける覇権を争っています。核拡散が続く中、核紛争の起こりうる事例は急増しています。石油と水の潜在的な不足、そして将来のバイオテロの可能性にも直面しています。そしてもちろん、現代における最もよく知られた存在的脅威である、人為的な気候変動もあります。これらの問題の多くは、科学的に理解されています。しかし、問題とその解決策を事実レベルで理解しているからといって、集団的に行動を起こす能力を結集できるわけではありません。知識を実際の解決策に変えるために必要な、組織的な創意工夫が欠けているのです。今日、オンラインツールは、科学と社会の関係を変革し、再定義するための新たな制度を創設する機会を与えてくれます。この機会が、よりレジリエンスの高い社会の創造に貢献し、ハッサン・マサムとマーク・トヴィーの印象的な言葉を借りれば、創意工夫のギャップを埋める一助となることを願っています。

## 第8章

## オープンな場で科学を行うという挑戦

1609年後半、ガリレオ・ガリレイは新しく製作した望遠鏡の一つを夜空に向け、科学史上最も驚くべき発見の一つを次々と成し遂げ始めました。ガリレオの最初の大きな発見は、1610年1月に木星の4つの最大の衛星を発見したことでした。今日では、この発見は取るに足りないもののように思えるかもしれませんが、古代以来、宇宙観に大きな変化をもたらしました。この発見はセンセーションを巻き起こし、ガリレオはヨーロッパ中で称賛されました。また、ヨーロッパ有数の富豪、トスカーナ大公コジモ・デ・メディチの庇護も得ました。

名声と後援を得たことで成功を繰り返すプレッシャーがかかり、ガリレオは木星の衛星に匹敵するさらなる発見を望んだ。待つ時間は長くはかからなかった。1610年7月25日の夜明け直前、ガリレオは望遠鏡を土星に向け、それまで考えられていたような単一の円盤ではないことを観察した。土星の主円盤の横に、彼は2つの小さな突起を、主円盤の両側に1つずつ見つけた。そのため、土星は1つの天体ではなく、3つの天体で構成されているように見えた。主円盤の両側にあるこの2つの突起が、土星の環の存在を初めて示唆するものだ。ガリレオにとって残念なことに、彼の望遠鏡は環をはっきりと見分けるほどの性能ではなかった。それは1655年、オランダの科学者クリスティアーン・ホイヘンスを待たなければならなかった。それでも、これはまたしても画期的な発見であり、ガリレオはホイヘンスと共に環の発見者としてしばしば認められている。

ガリレオは新たな発見の功績を自分のものにしたくて、すぐに同僚数名に手紙を送りました。その中には、偉大な同僚でありライバルでもあった天文学者ヨハネス・ケプラーも含まれていました。ケプラー（そして他の同僚たち）へのガリレオの手紙は奇妙なものでした。ガリレオは、自分が見たものを率直に説明する代わりに、アナグラムの形で最新の発見を説明すると記しました。

## smaismrmilmepoetalemibunenugttairas

このアナグラムを送ることで、ガリレオは発見の詳細を明かさずに済みましたが、同時に、ケプラーなど他の誰かが後に同じ発見をした場合、ガリレオがアナグラムを明らかにして功績を主張できることを確実にしました。これにより、自分だけが発見をさらに発展させる時間を稼ぐことができました。同時にガリレオはパトロンであるメディチ家にも手紙を書きました。しかし、その手紙の中で、パトロンを喜ばせようと必死だったガリレオは、メディチ家に当面は秘密にしておくよう頼み、発見の詳細をすべて明らかにしました。この状況は3か月余り続きましたが、ケプラーのパトロンである神聖ローマ皇帝ルドルフ2世の要請により、ガリレオは態度を軟化させ、アナグラムがラテン語の「*Altissimum planetam tergeminum observavi*」であり、おおよそ、最も高い惑星（土星）が3つに分かれていることを観測したという意味であることを明かしました。

この話には面白い結末がある。ガリレオが木星の4つの衛星を発見した後、ケプラーは、地球には1つの衛星があり、木星には4つの衛星があり、火星は地球と木星の間にある惑星であるという根拠に基づいて、火星には2つの衛星があるという理論を展開した。ケプラーはガリレオから土星についてのアナグラムを受け取ったとき、解読に熱心に取り組み、最終的に「*Salve umbistineum geminatum Martia proles*」と解読した。これは、おおよそ「火星の子供たちよ、二重の突起に挨拶せよ」という意味だ。ああ、とケプラーは思った。ガリレオは火星の2つの衛星を見たに違いない！しかし、ガリレオのアナグラムの1つの文字が使われていなかったため、ケプラーは確信が持てなかった。残念ながら、ケプラーにとって残念なことに、火星の2つの衛星の発見は、はるかに強力な望遠鏡が利用可能になった1877年まで待たなければならなかった。

## 最初のオープンサイエンス革命

アナグラムを用いて発見を発表した当時の偉大な科学者は、ガリレオだけではありませんでした。ニュートン、ホイヘンス、フックも同様の目的でアナグラムや暗号を用いていました。実際、当時の多くの科学者は、いかなる形であれ自らの発見を公表することに消極的でした。誰が微積分を発明したかをめぐり、悪名高いニュートンとライプニッツの論争は、ニュートンが1660年代と1670年代に微積分を発明したと主張していたものの、1693年までその発見の完全な説明を公表しなかったことに起因しています。

その間に、ライプニッツは独自の微積分法を開発し、発表しました。もしヒトゲノムの塩基対の発表が30年遅れていたら、あるいは塩基対がアナグラム（例えば「CGTCAAGG...」ではなく「AACCGGGT...」）として発表されていたら、現代生物学はどうなっていたでしょうか？

ガリレオ、ニュートン、そして他の初期の科学者たちはなぜそれほど秘密主義だったのでしょうか？実際、発見を秘密主義的に扱う文化は、当時の状況に対する自然な反応でした。科学者にとって、発見を共有しても個人的な利益はほとんどなく、失うものの方が大きかったのです。ガリレオはキャリアの初期、自らが発明した軍用コンパスをバルダッサレ・カプラという若者に見せるという過ちを犯しました。バルダッサレは後にこの発見は自分のものだとして主張し、ガリレオを盗作だと非難しました。ガリレオが自分の発見の功績を取り戻し、名声を取り戻すまでには、何年もの努力と多大な費用がかかりました。土星が「三体型」であるという問題について、彼がそれほど秘密主義だったのも不思議ではありません。

このような秘密主義的な行動は、現代の私たちの目には奇妙に映ります。今日では、科学者は何か発見をすると、その成果を科学雑誌に掲載することで、できるだけ迅速かつ広く共有します。

本当に重要なブレークスルーの場合、科学者は論文を書き上げて数日で学術誌に投稿することもあります。一部の科学誌は、主要な論文に対して迅速な出版サービスを提供し、投稿後数週間以内に出版することを約束しています。もちろん、今日の科学者が研究成果の共有に熱心なのは、彼らの生活がそれにかかっているからです。科学者が職に応募する際、最も重要なのは論文の出版実績です。「出版するか、滅びるか（publish or perish）」というフレーズは、科学生活の核心的な事実を簡潔に表現しているため、現代科学において決まり文句となっています。

現代の科学者は、出版とキャリアの成功の間にこの関連性があることを当然のことと考えていますが、ガリレオが数々の偉大な発見をした1610年には、そのような関連性は存在しませんでした。最初の科学雑誌が創刊されたのはそれから55年後の1665年だったため、そのような関連性は存在し得なかったのです。

閉鎖的で秘密主義的な発見文化から、科学者が最良の結果をできるだけ早く発表しようと躍起になる近代科学文化への変化を引き起こしたのは何だったのでしょうか。17世紀における科学の大きな進歩が、裕福なパトロンを刺激し、科学を職業として助成するようになったのです。この動機は、科学的発見がもたらす公共の利益と、そのような発見によって指導者（メデチ家など）に与えられる名声に一部起因していました。これらの動機は、科学的発見が科学雑誌のような媒体を通じて広く共有されることで、最も効果的に実現されました。

科学雑誌の出版は、科学の発展にとって大きな課題でした。その結果、後援者たちは、発見を共有することが発見者に仕事と名声という形で報われるという科学文化への転換を求めました。この変革はガリレオの時代に始まったばかりでしたが、ガリレオの死後2世紀を経て、科学文化は大きく変化しました。19世紀の偉大な物理学者マイケル・ファラデーは、成功の秘訣を尋ねられたとき、「研究。完成。出版」という3つの言葉に要約できると答えました。当時、科学雑誌に掲載されない発見は、真に完成していたとは言えませんでした。

閉鎖的で秘密主義的な発見文化から、より開かれた近代科学文化への変容は、歴史上最も重大な出来事の一つでした。この変容は、科学雑誌システムの広範な採用と発展をもたらしました。当初はささやかなものであったこのシステムは、私たちの文明にとって豊かな共有知識の集積へと発展し、人類の進歩の基盤となる集合的な長期記憶となっています。この知識共有システムは非常にうまく機能し、過去300年間、ゆっくりとしか変化してきませんでした。

今日、私たちが見てきたように、オンラインツールは新たな機会をもたらしています。それは、集合的な短期作業記憶、つまりアイデアを迅速に共同で発展させるための会話型の共有地を創出する機会です。同時に、これらのツールは、集合的な長期記憶を大幅に拡張し、豊かにする機会も与えてくれます。これらは非常に刺激的で、将来性に富んだ機会です。スローン・デジタル・スカイ・サーベイなどのプロジェクトから得られるオープンデータが、世界を説明する方法を変えるデータウェブの基盤を築いていることは、すでに見てきました。また、Galaxy Zoo、Foldit、arXivなどのプロジェクトが、科学と社会の関係をどのように変えているのも見えてきました。しかし、これらの例は確かに励みになるものの、ネットワーク化された科学の可能性には程遠いものです。その可能性を実現するためには、克服しなければならない根本的なボトルネックがあります。そのボトルネックは、以前、一部の科学者がデータを共有することに消極的だったこと、そして科学者がWikipediaに当初関心を示さなかったことに垣間見ました。残念ながら、これらは単なる例ではなく、多くの科学者がオンラインでの作業に対して抱く、より根深い抵抗の兆候です。この抵抗は、17世紀に秘密主義的な発見文化が科学を阻害したのとほぼ同じように、科学の発展を阻害しています。この抵抗の本質を理解するために、科学者向けのオンラインツールの有望ながらも失敗した事例をいくつか詳しく見ていきましょう。

## 科学ウィキ

初期の頃、科学者たちはWikipediaへの投稿に消極的でしたが、Wikipediaが成長するにつれ、多くの科学者が科学的発見に焦点を当てたWikiを導入するようになりました。そのようなプロジェクトの一例として、2005年に当時カリフォルニア工科大学（Caltech）の博士課程学生だったジョン・ストックトンによって設立されたqwiki（「quantum wiki」の略）が挙げられます。一般読者を対象としたWikipediaとは異なり、qwikiは量子コンピューティング分野で研究を行うプロの科学者を対象としていました。ストックトンがqwikiに目指したのは、量子コンピューティングと関連分野における最新の研究をすべて網羅した、単一の集中型リファレンスを提供することでした。これは、急速に進化し、常に更新される一種のスーパー教科書です。しかし、qwikiは教科書をはるかに超える可能性を秘めていました。qwikiは無限に拡張・変更可能であり、主要な概念の簡単な紹介から、最新の研究成果の詳細な説明、研究の最前線における未解決問題への指摘まで、幅広い情報を伝えることができます。量子コンピューティングの主要概念を説明するアニメーションやインタラクティブなシミュレーション、そして他の人々がそれらのアニメーションやシミュレーションをさらに改良するためのソース資料などが含まれる可能性があります。理論家が集まり、量子コンピューティングの最も深い理論的問題に取り組む、新しいタイプのウィキサイエンスのような、博学者的なコラボレーションの拠点となる可能性があります。あるいは、実験家が集まり、ベストプラクティス、つまり暗黙知のまま残され、実験結果を別の研究室で再現することが困難な、微妙で説明が難しい実験の詳細を共有することも可能になります。たとえこのビジョンが部分的にしか実現されなかったとしても、量子コンピューティング分野への影響は計り知れないものとなるでしょう。

qwikiの立ち上げは、2005年にカリフォルニア工科大学で開催されたワークショップにたまたま参加した際に行われました。chは大きな話題を呼びました。ワークショップの休憩時間の会話の中で、何人かの人々が、WikipediaやGoogleが一般知識にもたらしたような成果を、qwikiが量子コンピューティングの専門知識にもたらすかもしれないと楽観的に語っているのを耳にしました。残念ながら、その楽観的な見方は、彼らが貢献する意欲に繋がることはありませんでした。むしろ、彼らは誰かが主導権を握ってくれることを期待していました。結局のところ、論文を書いたり助成金を獲得したりといった、自分のキャリアにとってもっと有益なことができるのに、なぜqwikiに貢献する必要があるのでしょうか？競合他社の利益になるだけなのに、なぜ最新かつ最高のアイデアをqwikiで共有する必要があるのでしょうか？そして、まだ開発段階だったqwikiに、なぜ貢献する必要があるのでしょうか？

まだ初期段階であり、それが繁栄するかどうかは明らかではありませんでしたか？  
qwikiで唯一本当に盛り上がったのは「研究者ページ」、つまり個々の科学者が自分自身や研究内容について説明を加えることができる「研究者ページ」でした。多くの科学者は、これらの「研究者ページ」を充実させるために1,2時間（場合によってはそれ以上）を費やして喜んでいました。

しかし、qwikiの他の部分に資料を追加するために10分も費やそうとする人はほとんどいませんでした。優先事項ではなかったのです。その結果、開始から6年経った現在、qwikiは機能していません。qwikiで定期的に更新されているのはほんの数ページだけです。スパマーがサイトを徘徊し、怪しい製品へのリンクを追加しています。サイト上の科学的なコンテンツはほぼすべて、ストックトン自身、同じ研究室のスタッフ、またはストックトンの後任としてqwikiの管理者となったスタンフォード大学の大学院生、アンソニー ミラーによって投稿されました。この失敗は、ストックトンやミラーの熱意や能力不足によるものではありませんでした。彼らは懸命に作業し、大量の優れた資料をqwikiに追加し、他の人にも協力を呼びかけました。残念ながら、多くの科学者がこのようなサイトが大きなリソースになる可能性を秘めていると考えていたにもかかわらず、コンテンツを提供しようとする人はほとんどいませんでした。

qwikiの失敗の背景にある考え方は、本書の冒頭で述べた考え方と似ています。科学者がデータの共有やWikipediaへの貢献をためらう原因となっている考え方です。問題の根底にあるのは、野心的な科学者が科学論文の出版や助成金獲得に注がなければならない、偏執的なまでの熱意です。

特に若い科学者にとって、これは科学職をめぐる熾烈な競争から生じる激しさです。たとえば、米国の大学では毎年1,300人が物理学の博士号を取得しますが、物理学の教員のポストはわずか300人しか空きません。同時に、多くの博士課程では、若い科学者に対し、「成功」とは研究志向の大学で教員のポストを得ることであり、それ以外は失敗であるという考えを叩き込んでいきます。その結果、教員のポストを得ようと必死になる科学者で非常に混雑した状態になります。若い科学者は、他の1,299人の新しく取得した博士号取得者と競争しているだけでなく、まだ教員の職を得ようと努力している過去の人たちとも競争することになります。その結果、多くの若い科学者が教員の職を得られないことで大きく長引く苦悩を経験します。中堅の大学でさえ、求人には簡単に100人を超える応募者が集まります。このような競争の激しい環境では、週80時間以上働くことは珍しくなく、トップクラスの大学に就職するためには、可能な限り多くの時間を、優れた科学論文の発表という目標に費やさなければなりません。論文は、大学に進学するために必要な研究助成金や推薦状ももたらします。

雇用されることはありません。既に終身在職権を持つ科学者は、依然として助成金の支援を必要としており、そのためには論文執筆に注力する強い労働倫理が求められます。こうした状況下で、科学者がqwikiのような取り組みに貢献する時間を確保することは可能でしょうか？彼らは原則的にはqwikiの成功を望んでいるかもしれませんが、実際には論文執筆や助成金申請書の作成に忙しく、自分自身が貢献する時間などありません。

qwiki は、立ち上げられた数多くの科学 wiki の 1 つにすぎません。

遺伝学、弦理論、化学など、多くの分野で同様のウィキ開発の取り組みが行われてきました。qwikiと同様に、これらの科学ウィキの多くは大きな可能性を秘めており、中にはそれぞれの分野で大きな話題と期待を集めたものもありました。しかし、そのほとんどは、科学者の時間と貢献意欲の不足によって頓挫し、成功には至りませんでした。

成功している科学ウィキは、通常、より従来のなプロジェクトをサポートする役割を担っています。例えば、多くの研究室では、実験の参考資料を保管するために内部ウィキを運用しています。もう一つの成功例としては、Polymath Projectによるウィキがあります。このプロジェクトは、Polymathの共同研究から得られた貴重な知見を集約する場としてウィキを活用しています。Polymathウィキは100人以上のユーザーによる数千件の編集を集めており、ピーク時には1日に数十件の編集と数千ページビューを記録しています。（Polymathウィキを立ち上げたのは私であり、その成功を独自に判断しているわけではないことをご承知おきください。）

しかし、ここでもPolymath wikiは、数学の問題を解いて論文を書くという、従来の目標をサポートするものです。いずれの場合も、wiki自体が目的ではありません。ウィキサイエンスは、どれほど有望な可能性を秘めているとしても、依然として夢の域を出ません。

## 科学に関するユーザー投稿コメントサイト

失敗しているのは科学ウィキだけではありません。いくつかの組織が、ユーザー投稿型のコメントサイトを立ち上げ、科学者が科学論文に関する意見を共有できるようにしています。これは、他の科学者がどの論文を読む価値があるか、どの論文を読む価値がないかを判断するのに役立ちます。この考え方は、書籍、電子機器、その他の製品の顧客レビューを収集するAmazon.comなどのサイトと似ています。Amazon.comを利用したことがある人なら誰でも知っているように、レビューは次のような場合に非常に役立ちます。

製品を購入するかどうかを決める。科学者にとっても同じようなことが役立つのではないのでしょうか？

最も注目を集めたユーザー投稿型のコメントサイトは、科学界で最も権威のある出版社の一つであるNatureによって開設されました。2006年、Natureは投稿された論文に対して科学者が自由にコメントを書き込めるサイトを立ち上げました。多大な努力と宣伝にもかかわらず、この試みは成功しませんでした。この試みを終了させた最終報告書では、次のように説明されています。

オープンピアレビューに対してかなりのレベルの関心が表明されました。

[試行に]参加した著者の大多数はコメントを受け取りましたが、かなりのウェブトラフィックがあったにもかかわらず、コメント数は概してごくわずかでした。コメントのほとんどは技術的に実質的なものではありません。フィードバックから、研究者はオープンなコメントを提供することに著しく抵抗感を持っていることが示唆されています。

言い換えれば、他の人の論文についてのコメントを読みたい人はたくさんいる一方で、実際にコメントを書きたい人はほとんどいなかったのです。

Natureの試みは、科学分野におけるユーザー投稿型のコメントサイト構築の試みの一つに過ぎません。特に物理学は、科学論文の配信手段としてウェブを広く採用した最初の分野であったためか、こうしたサイトが数多く存在してきました。最初の試みは1997年に開設されたQuick Reviewsというサイトでしたが、利用者が少なかったため1998年に廃止されました。数年後にはPhysics Commentsという類似サイトが開設されましたが、同じ運命を辿り、2006年に廃止されました。さらに新しいサイトであるScience Advisorは現在も活動していますが、この記事が執筆している時点では、会員数（1,240人）がレビュー数（1,119件）を上回っています。多くの科学者が科学論文へのコメントを読みたいと考えている一方で、自らコメントを書きみたいと思う科学者はほとんどいないようです。

なぜユーザー投稿型のコメントサイトは失敗しているのでしょうか？原則として、ほとんどの科学者は、科学論文に関する思慮深いコメントが広く利用可能であれば非常に有益だろうという点で同意しています。しかし、もしそれが真実だとしたら、Amazon.comのようなサイトのコメント欄が盛んである一方で、これらのサイト（多くは適切に設計され、サポートも充実している）が失敗しているのは不可解です。科学コメントサイトの問題は、科学論文に関する思慮深いコメントは他の科学者にとって非常に有益である一方で、コメントを書くこと自体が誰にとっても最善の利益になるとは限らないということです。このようなサイトにコメントすることを検討している個々の科学者の視点から、状況がどのように見えるか想像してみてください。

もっと役に立つことができるのに、なぜコメントを書くのか

論文執筆や助成金申請など、あなた個人に何か影響があるでしょうか？たとえコメントを書いたとしても、他人の論文を公に批判するのはためられるでしょう。批判する相手は、あなたの次の論文や助成金申請を台無しにする立場にある匿名の査読者かもしれないのですから。

科学に関するユーザー投稿型コメントサイトの失敗とAmazon.comレビューの成功の対比は際立っています。一例を挙げると、Amazon.comにはポケモン製品のレビューが1,500件以上投稿されており、これは私が上で述べたすべての科学コメントサイトのレビューの総数よりも多くなっています。ポケモン製品を購入する人の数は科学者の数よりも多いと反論されるかもしれません。

確かにそうです。しかし、世界には依然として100万人以上のプロの科学者がおり、彼らは仕事人生の大半を他人が書いた論文に対する意見形成に費やしています。これは、どんなに熱心な親でさえポケモンに費やす時間よりもはるかに長いのです。これは滑稽な状況です。大衆文化はポケモンのレビューを書きたくなるほどオープンであるのに、科学文化はあまりにも閉鎖的であるため、科学者は科学論文に対する意見を同じように公に共有しようとしません。この対比を奇妙に、あるいは面白いと感じる人もいるでしょう。しかし、私はこれは科学に何か深刻な問題があることを示唆していると考えています。

## オープンサイエンスの現代的課題

科学ウィキやユーザー投稿型コメントサイトの失敗は、はるかに大きなパターンの一部です。Polymath Project、Galaxy Zoo、Folditといったプロジェクトはいずれも大きな成功を収めていますが、その成功は根本的な保守主義に一部起因しています。つまり、これらのプロジェクトはすべて、最終的には科学論文の執筆を目指しているのです。科学ウィキやユーザー投稿型コメントサイトといったツールは、こうした保守主義から脱却しています。なぜなら、こうしたサイトへの投稿はそれ自体が目的であり、科学論文に直接結びつくものではないからです。残念ながら、その結果、キャリア志向の科学者はこうしたサイトに貢献するインセンティブがほとんどなく、代わりに報われること、つまり論文執筆に力を注いでしまうのです。第1部で議論した集合知を増幅させるための大きなアイデアは、科学ウィキやユーザー投稿型コメントサイトといった漸進的なアイデアが既に限界を超えている現状では、成功する可能性はほとんどありません。



科学のやり方を劇的に変え、改善するという試みは、全く実現不可能です。[パート1](#)で挙げた集合知の増幅に関する優れた事例の多くが、科学の外部から出てきたのは偶然ではありません。科学者は知識を生み出すための新しいツールの開発において、あまりにも遅れをとっており、主導権を握っていないことが多すぎます。科学志向の素晴らしいプロジェクトもいくつかありましたが、それらは可能性のほんの一部しか探求していません。私たちは巨大な機会を逃しているのです。

実際、探求されている可能性さえも、本来あるべきほどには発展していない。スローン・デジタル・スカイ・サーベイやヒトゲノム・プロジェクトといったプロジェクトはデータを他の科学者に公開しているものの、科学実験の大半のデータは依然として非公開のままである。科学者は一般的にデータを公開する動機が乏しく、そのためデータを溜め込んでしまう。医学研究者のエリザベス・ピサーニとカーラ・アブザールの言葉を借りれば、科学の世界では「[論文]を公表するか、滅びるか」であり、「[データ]を公表するか、滅びるか」ではない。そして、この考えが正しい限り、世界の科学的知識の多くは閉じ込められたままとなり、科学データ・ウェブがその潜在能力を最大限に発揮するのを阻むことになるだろう。

同様に懸念されるのは、科学者が新しいオンラインツールを開発する上での阻害要因です。本書を執筆中、ある著名な物理学者が、arXivを創設した物理学者ポール・ギンスパーグはarXivを創設することで物理学における「才能を無駄にってしまった」と語り、ギンスパーグの行為は「ゴミ収集」のようなものだと言いました。誰かがやっているのは良いことだが、ギンスパーグの能力には及ばない、と。この驚くべき狭量さは、arXivを毎日使っている人物から出たものだというのを忘れてはなりません。ギンスパーグは、同世代の物理学者の中で、物理学（そして人類全体）のために、おそらく誰よりも多くの貢献をしてきたと言えるでしょう。

しかし、このような感情は科学者によって個人的に表明されることが多い。arXivのようなツールを構築する人々は、「単なる」ツール開発者として片付けられ、まるで科学研究のプロセス全体を加速させるツールを開発する価値がないかのように扱われます。この軽視は組織レベルにも及び、新しいツールの開発に対する支援はほとんどないことが多いのです。Galaxy ZooやarXivのようなプロジェクトは、最初の段階が論文執筆ではなくツールの開発であるため、資金がほとんど、あるいは全くない状態で始まることがよくあります。新しいツールの開発がこれほど軽視される環境において、市民科学やデータウェブといったアイデアは、どのようにしてその可能性を最大限に発揮できるのでしょうか。

つまり、全体的なパターンは、ネットワーク化された科学が、主に科学論文という形での貢献を重視する閉鎖的な科学文化によって強く阻害されているということです。非標準的なメディアで共有される知識は、その本質的な科学的価値に関わらず、科学者によって評価されません。

そのため、科学者はそのようなメディアで研究することに消極的です。ネットワーク化された科学の可能性、つまりデータウェブ、市民科学、共同研究市場といったアイデアは、未だ十分に実現されていません。その可能性を最大限に発揮するには、ネットワーク化された科学はオープンサイエンスでなければなりません。

皮肉なことに、科学情報をオープンに共有することの価値は、何世紀も前の近代科学の創始者たちによって深く理解されていました。この理解が、現代のジャーナルシステム、つまり17世紀のメディアで構築できた知識伝達システムの中でおそらく最もオープンなものへとつながりました。このシステムの導入は、ジャーナルに発見を発表する科学者に助成金を与えることで達成されました。しかし、その同じ助成金が現在、より効果的な技術の導入を阻害しています。なぜなら、従来のジャーナルで研究成果を共有するインセンティブを科学者に与え続ける一方で、現代のツールを使用または開発するインセンティブはほとんど、あるいは全くないからです。実際、今日の科学者がデータやアイデアの共有に抵抗するとき、彼らは無意識のうちに、ガリレオやニュートン、そして仲間たちの秘密主義やアナグラムの行動を模倣しているのです。

それは当面の個人的な懸念に対する実際的な対応かもしれないが、長い目で見れば科学を行う間違った方法だ。

知識を生み出すための現代ツールを最大限に活用するには、可能な限り多くの情報が人々の頭の中や研究室からネットワークへと移行される、オープンな科学文化を創造する必要があります。これは、従来科学論文で共有されてきた情報だけでなく、生の実験データやコンピュータコードから、個々の科学者の頭の中に閉じ込められているあらゆる疑問、アイデア、民間伝承、推測に至るまで、科学的価値のあるあらゆる情報を意味します。ネットワーク上に存在しない情報は、何の役にも立ちません。

理想的な世界では、私たちはある種の極端なオープン性を実現するでしょう。それは、すべての科学的知識を、人間が読めるだけでなく、機械も読める形式で、データウェブの一部として表現することを意味します。そうすることで、コンピューターが私たちの集合的な知識の意味を見出すのを手助けしてくれるようになります。それは、科学コミュニティを社会全体に開放し、双方向の情報とアイデアの交換を可能にすることを意味します。それは、科学的価値のあるすべての情報がネットワーク上に置かれる、共有の倫理を意味します。そして、既存の研究をより創造的に再利用し、改変することを可能にもします。このような極端なオープン性は、他の人々が個々の科学者の研究を基に、おそらく彼ら自身も思いつかなかったような方法で、発展させることができるべきであるという考えの究極の表現です。実際には、いくつかの制限が必要になるでしょう。

医学研究における患者の守秘義務といった懸念事項については、次の章で論じます。しかし、たとえそうした制約があったとしても、私が提唱するオープン性は、科学の進め方における巨大な文化的変革、つまり17世紀と18世紀に起きた最初のオープンサイエンス革命を延長し、完成させる第二のオープンサイエンス革命となるでしょう。

次の章では、よりオープンな文化をどのように実現できるかについて説明します。

## 商業化と秘密主義について 科学

本章では、科学者が科学的発見の究極の表現として論文に強くこだわることで、科学研究の新しい、より良い方法が阻害されていることを見てきました。しかし、一部の科学者にとっては、さらなる阻害要因があります。それは、研究成果を特許や商業的スピンオフにつなげようとするため、秘密保持の必要性です。例えば、2001年から2003年にかけて、私は量子コンピューティングに取り組む大規模な研究センターに所属していました。センターが商業製品を生み出すには程遠い状況でしたが、センターのリーダーたちはいつかそのようなスピンオフが生まれることを期待していました。センターの研究セミナーに出席する科学者は（しばらくの間）秘密保持契約に署名するよう求められ、セミナーの内容を他の人に話さないことを約束していました。センターの多くの科学者は、後に特許を申請する際に優先権を確立するため、各ページに日付とセンター職員の署名を記したノートに、研究内容を綿密に記録していました。こうした秘密主義は、商業的成功につながる可能性があります。しかし、そのような文化は、たとえば Polymath プロジェクトに見られる、あるいは wiki の成功に必要なとされるオープンな協力的な雰囲気と共存することは不可能です。

こうした商業主義的な秘密主義は、基礎研究のほとんどが行われている大学においては比較的新しいものです。実際、ごく最近まで、大学は科学研究の大半を、直接の商業的応用を伴わない基礎研究に集中させていました。しかし、この状況はここ数十年で変化しました。その大きな要因は、1980年に米国議会で可決されたバイ・ドール法と呼ばれる法律です。

バイ・ドール法は、米国の大学に（以前は政府に与えられていた）政府補助金の支援を受けて生み出された特許やその他の知的財産の所有権を与えるものでした。バイ・ドール法の成立後、多くの大学は基礎研究に重点を置くようになり、商業的なスピノフによる利益を期待して、より多くの応用研究を支援するようになりました。同時に、そして同じ理由で、大学で実施される基礎研究に関連する特許も増加しました。他の多くの国々も米国に倣い、バイ・ドール法に類似した法律を可決し、研究文化に同様の影響を及ぼしました。これらの取り組みの成功は疑問視されており、多くの大学は実際に研究を商業化しようとして損失を出しています。しかし、商業化と知的財産への関心は、それでも多くの科学者をより秘密主義にさせました。

この商業主義的な秘密主義は、私たちの大学における大きな文化的変化です。歴史的に見て、バイ・ドール法や類似の法律が制定される以前は、基礎科学の成果は、世界の仕組みについての理解を深めることが長期的にはすべての人々の利益になるという信念のもと、論文という形で（最終的には）公開されることが一般的でした。例えば、電気と磁気に関する基礎研究は、モーターや電灯、ラジオやテレビといった発明の基盤となりました。

量子力学に関する基礎研究は半導体産業にとって極めて重要でした。「上げ潮はすべての船を浮かべる」というおなじみの考え方です。そのため、私たちのイノベーションシステムは、かなり明確に二分されていました。一方は基礎研究システムで、その最終成果は長期的には誰もが利益を得るという理由で、研究論文として公開されていました。もう一方は、短期的な製品開発を目的とした民間資金による応用研究で、多くの場合秘密裏に進められていました。バイ・ドール法はこの分断を打破し始めており、今日では政府や助成機関は、特許などの知的財産の取得を基礎研究を支援する主要な理由と見なすようになっています。

この変化は、ネットワーク化された科学の発展に不可欠なオープンな情報共有にとって、真の障害です。しかし、この障害の大きさと範囲を適切な視点で捉えるべきです。本書の執筆中、商業主義的な秘密主義こそがオープンサイエンスの最大の障害であると考えた人たちと何度か出会いました。しかし、それは誤りです。

基礎科学の大部分において、科学者にとって商業化への懸念は、従来の論文発表への執拗な集中に比べれば、明らかに二次的なものに過ぎない。商業化や特許権は、もし実現すれば歓迎されるが、キャリアの成功は、

論文発表を通じた同僚からの評価。これは就職活動で最も顕著です。科学者はしばしば自身の研究から生まれた特許やスピンオフをいくつか挙げますが、強調されるのは論文、論文、論文、そして助成金、助成金、助成金です。これは物理学や天文学の大部分、数学、化学や生物学のかなりの部分、そしてその他多くの科学分野に当てはまります。これらの分野において、オープンサイエンスの直接的な障害は商業化ではなく、論文という形での科学的知識の共有のみを評価し、報奨する文化です。

基礎科学のいくつかの分野では、商業的な秘密主義が極めて重要です。例えば、後の医薬品開発につながる可能性のある初期段階の研究の一部は、まさにその例です。このような分野では、科学は閉鎖的で秘密主義的なままでしょう。そして、基礎科学には、商業的な秘密主義への懸念が一因ではあるものの、必ずしも支配的な要因ではない、はるかに大きなグレーゾーンが存在します。真の問題は、原則的にはオープンにできる科学研究であっても、後に特許が取得できるという根拠のない期待がオープンサイエンスを阻害している点にあります。長期的には、基礎科学における知的財産の役割について議論する必要があります。しかし、オープンサイエンスの基盤、つまり私たちが出発点とすべき点は、論文の執筆だけでなく、新しい共有方法も評価し報いるような科学文化の変革です。これが最も重要な問題であり、私たちは今、その問題に取り組んでいます。

## 第9章

## オープンサイエンスの必然性

オープンサイエンスが科学と社会に多大な利益をもたらすと心から信じている現役の科学者だと想像してください。

深く根付いた科学文化を変えるのは難しいと理解しながらも、自分のアイデアやデータをオンラインで共有し、科学ウィキやユーザー投稿型コメントサイトといった新しいツールに貢献し、コンピュータプログラムのコードを自由に公開することに全力を尽くすことを決意します。これらには多大な時間と労力がかかりますが、同僚の協力がなければ、得られるメリットはわずかです。オープンサイエンスのメリットの多くは、多数の科学者が共同で採用した場合にのみ得られるからです。そして、たった一人の科学者として、他の全員にオープンサイエンスを強制することはできません。

典型的な例として、私の同僚であり、かつての教え子でもあるトビアス・オズボーン氏が挙げられます。彼は現在ドイツのハノーバー大学に在籍しています。オープンサイエンスに挑戦することに熱心だったオズボーン氏は、6ヶ月間、量子コンピューティングに関する研究の多くをブログ上で公開して進めました。彼は洞察力に富んだアイデアに満ちた、思慮深い記事を数多く投稿し、彼のブログは量子コンピューティングコミュニティで多くのフォロワーを獲得し、50人以上の常連読者を獲得しました。しかし残念なことに、オズボーン氏の記事に積極的にフィードバックしたり、自身のアイデアを共有したりする読者はほとんどいませんでした。

熱心な同僚のコミュニティがなければ、オープンサイエンスに取り組むには多大な労力がかかるにもかかわらず、得られる成果はわずかでした。オズボーン氏は最終的に、オープンサイエンスは「ほとんどの科学者が同時に、そして完全に行動を変えることを必要とする」ため成功しないと結論付けました。

このような経験から、オープンサイエンスは絶望的な目標であるように思われます。

個々の科学者による直接的な行動を通じてオープンサイエンスへと移行することは確かに困難ですが、だからといって他のアプローチが成功しないということではありません。私たちの社会は、オープンサイエンスの問題に類似した多くの問題を解決してきました。それらは、個人の直接的な行動が機能せず、大規模なグループで多くの人々が同時に新しい方法を採用することによってのみ利益が得られる問題です。例えば、

道路のどちら側を運転するかという問題。左側通行の国に住んでいる場合、単に自分が運転する側を変えるだけで、ある日突然右側通行の運動を始めることはできません。

しかし、だからといって、全員が同時に切り替えられないというわけではありません。まさにそれが、1967年9月3日午前5時にスウェーデンで起こったことです。スウェーデン人が右側通行に切り替えたのには十分な理由がありました。隣国では既に右側通行が一般的であり、さらにスウェーデンではほとんどの車が左ハンドルだったため、右側通行の方が実際には安全でした。しかし、オープンサイエンスの場合と同様に、右側通行の方が良いという単なる事実だけでは、個人の直接的な行動によって変化を起こすには不十分でした。政府による長期的なキャンペーンと法律の改正が必要でした。

道を変えることと科学文化を変えることは、かけ離れているように思えます。しかし実際には、最初のオープンサイエンス革命には、同様の集団的行動が必要でした。17世紀の科学者が、しばしば自分の研究結果を秘密にしていたことは周知の事実です。アナグラムを送ることさえ共有とみなせば話は別ですが。科学雑誌制度が初めて導入されたとき、多くの科学者は疑念を抱き、新しい媒体で自分の研究結果を他者と共有することに消極的でした。個々の科学者は、すべての科学者が発見のニュースを自由に共有すれば科学全体がより速く進歩することを理解していましたが、だからといって、雑誌に論文を発表することが個々の科学者にとって最善の利益になるとは限りませんでした。これは、1665年に世界初の科学雑誌『王立協会哲学論文集』を創刊したヘンリー・オルデンバーグのような初期の雑誌編集者にとって問題となった。オルデンバーグの伝記作家メアリー・ボアズ・ホールは、オルデンバーグが当時の科学者に手紙を書き、「情報を懇願」し、時には「AにBがやっていることを伝え、BもAに何をしているかを伝えるのが最善」という理由で、対立する2人の科学者に同時に手紙を書いたことを述べている。こうしてオルデンバーグは、ニュートン、ホイヘンス、フックなど、当時の最も著名な科学者の何人かを刺激して『王立協会哲学論文集』に論文を発表させた。このような戦略が必要なくなったのは、オルデンバーグらが科学文化を変えるために数十年にわたって尽力した後のことである。

道の転換の問題とオープンサイエンスの問題の根底にある共通のパターンは、今日でも17世紀でも、個人の利益が集団全体の利益と自然に一致するわけではないということです。「誰もがこれをすべきだ」と信じている人、例えばオープンサイエンスや道の転換は、必ずしも「誰も賛成しなくても、自分はこれをすべきだ」とも信じているわけではありません。

社会学者はこのような問題を集団行動の問題と呼ぶ。集団行動の問題を解決する秘訣は、個人の利益と集団の利益を一致させる方法を見つけることである。スウェーデンの右派への転換の場合、解決策は、部分的には法律の力として表された政府の正当性を利用して、人々に変えることを強制することだった。ある日は左側通行が個人の最善の利益であったのに、次の日には右側通行が利益となった。同様に、最初のオープンサイエンス革命の天才的な点は、科学者が科学雑誌で発見を共有することに報酬を与えることによって、個人の利益と集団の利益を一致させたことだった。今日の問題は、科学者が新しい技術を採用することが集団の利益になった一方で、彼らの個人的利益は依然として雑誌の出版と一致しているということである。私たちは、個人の利益を集団の利益と再び一致させる必要がある。

幸いなことに、集団行動の問題を解決する方法については多くのことが分かっています。1960年代に執筆した政治経済学者マンカー・オルソンは、「集団行動の論理」が何を意味するのかを分析し、集団内の個人が集団の利益のために協力する条件と、そうでない条件を理解しようとしてきました。

1990年代、政治経済学者エリノア・オストロムは、オルソンの分析を特定の集団行動、すなわち水や森林といった共有資源を管理するために集団がどのように協力できるかという点において大幅に深化させました。オルソンとオストロムが執筆した彼らの研究成果をまとめた書籍は、社会科学分野において最も頻繁に引用されている書籍の一つであり、その影響力は大きく、オストロムは2009年のノーベル経済学賞を受賞しました。

私は、オープンサイエンスに対する悲観論に対する解毒剤としてこの研究について言及します。非常に賢明な人々が、集団行動の問題が解決された実例を長年かけて調査し、それらの例で用いられた戦略を他の集団行動の問題の解決にどのように一般化できるかについて真剣に考え抜いてきました。オルソン、オストロム、そして彼らの同僚たちが示したのは、集団行動の問題を解決することは困難ではあるものの、不可能ではないということです。オープンサイエンスを諦める前に、これらの考えを参考にすべきです。では、科学文化を変革するために活用できる2つの戦略を見ていきましょう。どちらの戦略も即効性はありませんが、十分な想像力と決意があれば、これらの戦略は科学をはるかにオープンなものにすることができます。私の説明はオルソンとオストロム、そしてその後継者たちの研究に基づいていますが、これは政治経済学の教科書ではないため、明確な関連性は示しません。関連性をさらに探求することにご興味があれば、ぜひご一読ください。

[217ページ](#)から始まる「参考文献と参考資料」を参照してください。

## 魅力的なオープンサイエンス

本書の前半で、一部の科学研究助成機関が科学研究成果を広く公開するために導入しているオープンアクセス政策について論じました。例えば、米国国立衛生研究所（NIH）は現在、科学者に対し、論文を出版後12ヶ月以内にオープンアクセスにすることを義務付けています。この条件に同意しない科学者は、資金提供先を他国に探さなければなりません。これは一種の強制政策であり、スウェーデン政府が政策転換に用いた戦略に似ています。このように、政府や助成機関といった強力な組織は、コミュニティ内の全員に同時に行動変容を促すことができるのです。

いくつかの助成機関は、オープンアクセスポリシーに続き、科学者に対しデータのオープンな共有を義務付けています。これらのオープンデータポリシーは、ヒト遺伝子データの共有に関するバミューダ協定（[7ページ](#)参照）の精神を受け継いでいますが、その範囲はより広範です。その実現方法は様々ですので、ここではいくつかの例を挙げて説明します。ゲノミクスのような対象範囲が狭い分野では、これらのポリシーは非常に厳しいものとなる場合があります。

本書の[3ページ](#)では、ゲノミクスを用いて遺伝子と疾患の関連性を解明する方法について説明しました。この研究はゲノムワイド関連研究（GWAS）と呼ばれています。2007年、NIHは参加者のプライバシー保護のため、一定の制限を設けた上で、GWASのデータを一般公開することを義務付ける方針を制定しました。

ゲノミクス研究のもう一つの主要な資金提供機関であるウェルカム・トラストは、現在、すべての遺伝子データを公開することを義務付けていますが、これもプライバシーなどの懸念事項を伴います。さらに、これらの機関は、データをどのオンラインデータベースにどのような形式でアップロードすべきかなどを指定しています。

の上。

データ共有に関するより広範なポリシーは、通常、具体的ではありません。例えば、英国医学研究会議（MRC）は2006年以降、資金提供を受けるすべての科学者に対し、倫理的または法的規制に違反しない限り、データを公開することを義務付けています。しかし、このポリシーでは、データがどのように、どこで公開されるべきかは具体的には規定されていません。多くのオープンデータポリシーは、

まだ開発の初期段階にあります。例えば、米国国立科学財団は2011年1月以降、助成金申請に2ページのデータ管理計画の提出を義務付けています。これは本格的なオープンデータポリシーではありませんが、広報担当者は今回の発表は、すべてのデータにオープンにアクセスできるようにするための取り組みの「第1段階」に過ぎないと述べました。

これらすべてを包括するものとして、政治の最高レベルではオープンデータの価値に対する理解が深まりつつあります。例えば、2007年には経済協力開発機構（OECD）が加盟国に対し、公的資金による研究データをオープンアクセスにするよう勧告しました。こうした勧告が浸透するには時間がかかりますが、時間の経過とともに効果を発揮する可能性があります。

オープンアクセスとオープンデータポリシーは、オープンサイエンスへの強力な一歩であり、個々の科学者が単独では踏み出すのが難しい種類の一歩です。助成機関は科学共和国における事実上の統治機構であり、変化を強制する大きな力を持っています。その力は、ノーベル賞受賞者のようなスーパースター科学者よりもさらに大きいのです。多くの科学者の行動は、黄金律、つまり金を持つ者がルールを作る、というルールによって決定されています。そして、大手助成機関は金を持っています。もし助成機関の運営者が、助成金交付プロセスの一環として、助成金申請者は街中でジグダンスを踊らなければならないと決定したら、世界中の通りはすぐに踊る教授で溢れかえるでしょう。現在、多くの人々、特に多くの助成金担当者は、このシステムがあまりにも中央集権的で管理的であると欠点を指摘しています。

しかし、現実的には、現在、科学研究の大部分は助成金制度によって支配されており、助成金提供機関がオープンサイエンスを真剣に受け止めるのであれば、科学者もそうするでしょう。例えば、大手助成金提供機関の一つが、ブログやオンライン動画をを用いた広報活動の証拠の提出を申請者に求め始めたと想像してみてください。あるいは、研究活動の証拠として、科学ウィキへの貢献内容を説明するよう申請者に求めるようになったとしましょう。こうした方針は、新しいツールの正当性を高める上で大きな役割を果たすでしょう。

助成機関は新しいツールの普及を支援できますが、科学者にオープンサイエンスを強制する無制限の権限を持っているわけではありません。ヒト遺伝子データの共有に関するバミューダ協定の話をもう一度思い出してください。これらの原則は、中央の助成機関が分子生物学者に単に命令で押し付けたものではありません。分子生物学コミュニティのリーダーたちがバミューダに集まり、データを共有することがコミュニティ全体の利益になるという点で合意したのです。本質的には、個々の科学者が「私たちはオープンにしたいが、他の皆もそうするなら」と言っていたのです。助成機関は、オープン化の方針を強制することで、その目的の達成を支援しました。しかし、

この政策がこれほど効果的だったのは、既に著名な分子生物学者の支持を得ていたからだ。スウェーデンでも同様の状況が見られ、道路の右側通行への変更は、このアイデアに関する数十年にわたる国民的議論の末によようやく実現した。

成功するには、助成機関は単に公開性を強制するだけではなく、科学界内で同意と合意を形成する必要があります。彼らがそうしなければ、科学者は助成機関の要件の文言には従っても、その精神には従わないという対応をしがちです。将来、科学者が「オープン」データセットを公開したとしても、それが文書化が不十分で誰にとっても役に立たない状況を想像してみてください。科学者が生のデータをオンライン上のどこか人目につかない場所に放置するのは一つのことです。しかし、そのデータを注意深く文書化し、調整し、他の科学者のデータと統合し、他の科学者が新しい用途を見つけるよう積極的に促すのは、全く別の話です。

科学データウェブが成功するために必要なのは、まさにこれです。より一般的に言えば、ネットワーク化された科学がその潜在能力を最大限に発揮するには、科学者が知識を共有する新しい方法に熱心に、そして心からコミットしなければなりません。そのためには、助成機関は科学コミュニティと個別に協力し、各コミュニティの科学者と、コミュニティがよりオープンになる方法についてじっくり話し合う必要があります。体系的に共有できるデータはあるでしょうか？コンピュータコードはどうでしょうか？人々の疑問やアイデア、そして民衆の知恵はどうでしょうか？他に何を共有できるでしょうか？どれほど迅速に共有できるでしょうか？これを効果的にするために、どのような新しいツールを開発する必要があるでしょうか？助成機関がこれを実行すれば、科学知識を共有するためのバミューダ式の合意を促進する触媒として機能することができます。そして、そのような合意を締結した後、それを政策に反映させることができます。これは長くゆっくりとした作業になるでしょうが、その見返りとして、よりオープンな方向への大きな文化的変化が生まれるでしょう。

## オープンサイエンスの奨励

助成機関が「もっとオープンに研究せよ」と言う可能性は、科学者として複雑な気持ちです。新しいツールの使用は促進されるでしょうが、ツールを使うための新たなインセンティブを創出しない限り、科学者が真に熱心にツールを採用するようになることはないでしょう。今日の科学者は、科学コミュニティが評価するものだからこそ、論文執筆に飽くなき情熱を注いでいます。私たちに新しいものが重要です。

データ、コード、その他の知識を共有する意欲を喚起するインセンティブ。論文発表が今日科学者にとって不可欠であるのと同様に、知識の共有を新しい方法で実現するにはどうすればよいのでしょうか？

この問題を経済的な観点から見てみると分かりやすいでしょう。従来の経済では、私がソファを現金と交換した場合、あなたはソファを手に入れ、私はソファを失います。しかし、科学的な発見は違います。私が発見のニュースをあなたと共有しても、その発見に関する私の知識は失われません。

こうした共有は社会全体にとっては素晴らしいことですが、最初の発見者の観点からは問題があります。報酬が支払われなければ、そもそも発見に至るために時間と労力を費やす理由がほとんどなくなってしまうのです。

この問題に対する、科学界が17世紀に採用した（そして今日でも使われている）解決策は実に素晴らしいものです。従来の経済のように人々にアイデアの独占権を与えるのではなく、私たちは評判に基づく経済を生み出しました。科学者は発見を科学論文として発表することでオープンに共有します。つまり、事実上、無料で提供しているのです。しかし、その見返りとして、発見者としてクレジットされる権利を得ます。クレジットされることで評判を築き上げ、それが収入を得られる仕事に繋がるのです。これはアイデアに対する一種の財産権であり、評判に基づく経済へとつながり、科学者が研究成果を共有する強い動機となる、科学の見えざる手を確立します。この評判経済の基盤は、非常に強力な社会規範です。科学者は他者の研究成果をクレジットとして認めなければならず、盗用は許されず、他の科学者の研究成果は論文発表の実績によって判断されます。しかし、これらの規範は、科学的知識を共有する唯一の方法、つまり科学論文にのみ焦点を当てています。同様の規範と、科学的知識のより広範な共有を促す評判経済を確立できれば、科学の見えざる手はより強力になり、科学のプロセスは大幅に加速されるでしょう。

科学の評判経済をこのように拡大するにはどうすればよいのでしょうか。今日、そのような拡大が起こり始めている例を見てみましょう。これは、先ほど紹介した物理学の最新成果を無料でダウンロードできるサービスであるarXivと、物理学者向けの別のサービスであるSPIRESの両方に関係する話です。arXivとSPIRESは協力して、物理学者が新しい方法で知識を共有するインセンティブを生み出しています。何が起きているのかを説明するには、まずSPIRESの活動について説明する必要があります。例えば、何らかの理由で、スティーブン・ホーキングの最新のarXivプレプリントが他の科学者の研究にどのような影響を与えているかを知りたいとします。SPIRESは、次のような情報を提供することで役立ちます。

ホーキングのプレプリントを引用しているarXivのプレプリントや出版済みジャーナル論文を調べてみましょう。例えば、SPIRESを使えば、ホーキングの最新のプレプリントを引用しているプレプリントや論文はまだ一つもない、といった情報が得られるかもしれません。あるいは、ホーキングの最新のプレプリントが、他の多くの物理学者を刺激し、関連するアイデアの探求を促していることに気づくかもしれません。

SPIRESは、ホーキング博士（あるいは他の物理学者）のプレプリントや論文が全体としてどの程度引用されているか、そして誰が引用しているかという全体像を把握するのに役立ちます。そのため、SPIRESは科学職の候補者を評価する上で非常に有用なツールとなります。物理学系の採用委員会がSPIRESの対象分野（素粒子物理学および関連分野）の候補者を評価するために会合を開く際、出席者全員がノートパソコンを取り出し、SPIRESの引用記録を比較するのは珍しいことではありません。

これらすべてが、オープン性や知識共有の新たなインセンティブとどう関係するのでしょうか。数十年前、プレプリントはほとんどの物理学者から、従来のジャーナル出版への道における単なる踏み石とみなされていました。それ自体が目的であるとは評価されていませんでした。キャリアを築くには、高品質のジャーナル論文の実績が必要でした。今日では、arXivとSPIRESのおかげで、プレプリントはそれ自体が目的としての地位を獲得しています。例えば、物理学者が履歴書にまだジャーナルに掲載されていないプレプリントを記載することは珍しくありません。また、物理学者が自分のプロジェクトと競合するプロジェクトに取り組んでいる他の人を発見した場合、自分のプレプリントを先に発表しようと急ぐかもしれません。プレプリントはまだジャーナル論文ほど高い地位を獲得していませんが、SPIRESで何百回も引用されているプレプリントは、キャリアにおいて依然として大きな影響力を持つ可能性があります。プレプリントの科学的価値と影響力を実証する方法を提供することで、SPIRESとarXivは物理学者にプレプリントを作成する本当のインセンティブを生み出しました。それは論文を書くための通常のインセンティブとは別のものです。

文化的な変化としては、これはかなり小さなものであると認めざるを得ません。物理学におけるプレプリント文化への移行は、科学的知識の共有を加速させ、より広範なアクセスを可能にします。しかし、アナグラムを科学雑誌に置き換えるほど大きな変化ではありません。それでも、arXivとSPIRESの事例には注目すべきです。なぜなら、科学者が知識を共有するための新たなインセンティブを生み出すことが実際に可能であることを示しているからです。しかも、これは中央機関による強制なしに実現しました。SPIRESによってプレプリントの影響度を測定できるようになると、個々の物理学者がSPIRESの引用レポートを使い始めるにつれて、新たなインセンティブが自然に生まれました。

科学では、人生の他の多くの部分と同様に、測定されたものが報酬の対象となり、報酬が得られたものが達成されたものとなる。

同様の戦略を用いて、科学者に他の種類の科学的知識を共有するインセンティブを与えることは可能でしょうか？例えば、データ共有のインセンティブについて考えてみましょう。物理学のプレプリントで起こったように、科学者が自身の科学論文で他者のデータを定期的に引用し始めたとしましょう。これはすでに起こり始めており、オープンデータポリシーがより一般的になるにつれて、さらに起こり始めるでしょう。また、誰かが論文やプレプリントの引用だけでなく、データへの引用も追跡する引用追跡サービスを立ち上げたとしましょう。そのサービスが良質であれば、人々は他の科学者を評価するためにそれを利用するでしょう。そして、データ共有がもたらす影響をより鮮明に認識し始めるでしょう。この時点で、データ共有は科学者のキャリアを損なうのではなく、むしろ助けになり始めるでしょう。実際、科学者はデータを共有するインセンティブを持つだけでなく、そのデータを他の科学者にとって可能な限り有用なものにすることが科学者にとって有利になるでしょう。科学者たちは、データウェブの構築を、論文執筆という真剣な仕事の妨げではなく、仕事の重要な一部とみなすようになるでしょう。

同様のインセンティブ構築は、あらゆる種類の科学的知識に適用できます。プレプリント、データ、コンピュータコード、科学ウィキ、共同研究市場など、何でも構いません。いずれの場合も、全体的なパターンは同じです。引用が測定につながり、それが報酬につながり、そして貢献意欲のある人々へとつながります。これは、科学における評判経済を拡大する方法です。実際には、多くの複雑な要素があり、このテーマには様々なバリエーションが考えられます。実際、私が述べたarXivとSPIRESの話でさえ、あまりにも単純化されすぎていました。SPIRESは、物理学においてプレプリントに真の地位を与えた複数の要因のうちの1つに過ぎませんでした。しかし、基本的な状況は明らかです。

特に重要な例はコンピュータコードです。今日、コードを書いて公開する科学者は、その研究に対してほとんど評価されないことがよくあります。

何千人もの科学者が利用する素晴らしいオープンソースソフトウェアプログラムを開発した人は、同僚からほとんど評価されない可能性が高い。「ただのソフトウェアだ」というのが、多くの科学者がそのような仕事に対して抱く反応だ。キャリアの観点から言えば、コードの作者は誰にも読まれないようなマイナーな論文をいくつか書く方が時間を有効に活用できたはずだ。これはおかしい話だ。多くの科学的知識は、科学論文という形よりもコードとして表現する方がはるかに優れている。しかし今日では、そうした知識は隠されたままか、論文に無理やり押し込められることが多い。なぜなら、そうするインセンティブがないからだ。しかし、もしコードに引用・評価・報酬のサイクルが機能すれば、コードの作成と共有は科学者のキャリアを損なうのではなく、むしろプラスになるだろう。

多くの肯定的な結果をもたらすでしょうが、特に重要な結果が一つあります。それは、科学者に科学研究のための新しいツールを開発する強い動機を与えることです。科学者は、Galaxy Zoo、Foldit、arXivといったツールの開発に対して報酬を得るでしょう。そして、それが実現すれば、科学者は知識構築のための新しいツールの開発において、後進ではなくリーダーとなるでしょう。

引用・測定・報酬という考え方には限界があります。論文（あるいはプレプリント、データ、コード）の引用数のみに基づいて発見を判断することは、明らかに不可能であり、また望ましいことでもありません。発見の重要性を評価するには、その発見を深く理解すること以外に代わるものはありません。しかし、そうは言っても、科学における評判経済の基盤は引用システムです。これは、科学者が科学的知識の来歴を追跡する方法です。科学者が従来の紙媒体以外の貢献を真剣に受け止めるのであれば、引用システムを拡張し、引用のための新しいツールと規範を作成する必要があります。その際には、科学研究を評価する方法としての引用の限界（そして常に限界があった）を念頭に置く必要があります。

今日、多くの科学者にとって、よりオープンに研究するという考えは、ほとんど想像もできないものです。オープンサイエンスについて講演した後、懐疑的な人が時々近づいてきます。彼らはこう言います。「なぜ新しいウェブサイトでアイデアやデータを共有することで、競争手を助ける必要があるのでしょうか？それは、他の人に私のデータを盗んだり、先を越したりすることを誘っているだけではないのでしょうか？これが広く普及すると考えるのは、世間知らずの人だけです。」現状では、この見解には多くの真実が含まれています。しかし、その限界を理解することも重要です。これらの懐疑論者が忘れてるのは、彼らは既に自分の科学研究について論文を発表する際に、アイデアや発見を自由に共有しているということです。彼らは論文の引用・評価・報酬というシステムにすっかりとらわれているため、それを自然法則と見なし、それが社会的に構築されたものであることを忘れています。それは合意です。そして、それが社会的合意であるがゆえに、その合意は変更される可能性があるのです。オープンサイエンスが成功するために必要なのは、新しいメディアにおける科学知識の共有が、今日の論文と同じような権威を持つことだけです。そうなれば、新しい方法で知識を共有することによる評判上のメリットは、その知識を隠しておくことのメリットを上回るでしょう。この時点で、懐疑論者は時々「ブログ（やウィキなど）で共有されたアイデアを真剣に受け止める人はいないだろう！」と言うでしょう。これは今のところ真実かもしれませんが（もちろん、それも変わりつつありますが）、長期的に見れば、この見方は近視眼的であり、最初のオープンサイエンス革命の教訓を無視しています。私たちは、ヘンリー・オルデンバーグとその同僚が17世紀と18世紀に引き起こしたのと同じような転換を推し進める真のチャンスを手にかけています。

科学者が現在利用可能な最も強力なツールを用いて科学的知識を共有するよう奨励する。個々の科学者の利益を、科学コミュニティと社会全体の共通の利益と再び一致させ、科学を可能な限り迅速に前進させることができる。

## オープン性の限界

科学におけるオープン性にはどのような制限を課すべきでしょうか？先ほど述べたように、ネットワーク上に存在しない情報は役に立たないというのは概ね事実ですが、ある程度の制限は必要です。これらの制限の中には明らかなものがいくつかあります。例えば、医師が患者の記録を好き勝手に共有したり、セキュリティ専門家がセキュリティを脅かす情報を共有したりすることはできません。もちろん、プライバシー、倫理、安全性、合法性への期待に反する情報開示を防ぐための対策は既に数多く講じられています。

しかし、オープン性に関して、さらに微妙な懸念事項も考慮する必要があります。

オープンさは科学者を圧倒してしまうのだろうか？歴史上最も偉大な数学者の一人、アレクサンダー・グロタンディークは、孤独でいられる能力こそが彼の創造性の源泉だと信じていた。自伝の中で、彼は真の創造性を見出したのは、「自分が属する多かれ少なかれ広範な一族からもたらされる、公然であれ暗黙であれ、コンセンサスの概念に頼るのではなく、自分が学びたいものへと、自分なりの方法で手を伸ばす」ことへの意欲の結果である、と述べている。この考えを持つのはグロタンディークだけではない。慎重な育成を必要とするアイデアは、他者の意見に応じて時期尚早に修正されると、枯れてしまい、消滅してしまう可能性がある。よりオープンで協調的な文化へと移行すれば、最高の創造性に必要な精神的独立性を放棄してしまう危険性があるのかもしれない。既存の科学コミュニティの共通の実践に当てはまらない、むしろ新たな実践を定義することを目指す大胆な研究に挑戦する人は、今後減っていくのだろうか？

ここには、グロタンディークの孤独への願望や、分野を再定義する孤独な天才というロマンチックな概念を超えた、一般的な問題があります。

第3章の最後で議論したように、科学者の時間は限られており、それが他者との連携に制約を課すという問題があります。科学者は協力を少しだけ行うべきか、たくさん行うべきか、それとも全く行わないべきか？

共同研究を選ぶ場合、誰と研究すべきでしょうか。共同研究をどれだけ楽しんでいても、注意力が無限に広がることはないので、注意深く管理する必要があります。グロタンディークの場合のように、問題解決は孤独を求めることである場合もあります。しかし、共同研究を選んだ科学者の場合、問題は別の形で現れます。たとえば、Polymath プロジェクトでは、問題の解決を大きく前進させるのに必要な数学的背景を持たない人々からの貢献が少数ありました。これらの人々は、ほとんどの Polymath 参加者が共有する実践の範囲外にいました。彼らの貢献は善意に基づくものでしたが、ほとんど役に立ちませんでした。幸いなことに、質の低い貢献はほとんどなく、簡単に無視されました。しかし、もっと多かったら、他の Polymath 参加者の注意を著しく奪っていたでしょう。同様の問題は、偏執狂、荒らし、スパマー、あるいは単に不快な人々によっても引き起こされる可能性があります。

これらの問題は深刻ですが、克服できないものではありません。すべての参加者が平等に注目することを求めなくても、システムをオープンにすることは可能です。また、他の全員（または誰も）に注意を払う必要がなく、知識をオープンに共有できます。一般に、オープンな共同システムが最も効果的に機能するには、参加者が情報をフィルタリングする強力な手段を備え、最も関心のある情報に集中し、残りを無視できるようにする必要があります。たとえば、MathWorks のコンペティションでは、スコアによって参加者が役に立たないアイデアをフィルタリングし、他のユーザーの優れたアイデアに集中できるようにしていることを思い出してください。また、Polymath プロジェクトで低品質の投稿がより大きな問題になる場合は、これもフィルタリングされる可能性があります。理想的には、科学はオープンでありながら強力にフィルタリングされています。これは、私たちの注意力はスケールしませんが、知識の共有はスケールするという事実の自然な帰結です。オープンでありながらフィルタリングされた世界では、グロタンディークのような人が独自の孤独なプログラムを追求することに何の問題もありません。

オープンサイエンスは、時に多くの科学者が不快に感じる目的に利用されるのではないのでしょうか。2009年11月、世界有数の気候研究拠点の一つである英国イースト・アングリア大学の気候研究ユニットのコンピュータシステムにハッカーが侵入しました。ハッカーたちは気候科学者の間でやり取りされた1,000通以上のメールをダウンロードし、それらのメール（とその他多くの文書）をブロガーやジャーナリストに漏洩しました。この事件は世界中のメディアの注目を集め、多くの気候変動懐疑論者がこれらのメールに飛びつき、人為的な気候変動という概念は気候科学者による陰謀であることを証明する証拠が含まれていると主張しました。この主張を裏付ける例として挙げられたのが、ケビン・

コロラド州ボルダーにある国立大気研究センターの著名な気候科学者、トレンバース氏は電子メールで、「温暖化の兆候がないことについて説明できないのが事実であり、説明できないのは悲劇だ」と述べている。実際、この文章は文脈から大きく外れて引用されていた。電子メールでトレンバース氏は、最近発表した論文について論じていた。その論文では、地球の表面温度の年ごとの変動の原因（なぜ暑い年と寒い年があるか）と、その変動が長期的な気温上昇全体とどう関係しているかを検討していた。年ごとの変動は、表面の熱が海洋や融解した氷などに再分配される方法の変化によるものと推測される。トレンバース氏の電子メールと論文は、こうした変動を引き起こすプロセスをすべて理解しているわけではないため、特定の年がより暑くなったり寒くなったりする理由を必ずしも説明できるわけではないことを指摘していた。メールには現状に対する不満が表明されていたものの、短期的な変動を圧倒する長期的な気温上昇という彼の信念とは全く矛盾していなかった。ここで問題となるのは、気候変動についてトレンバース氏の意見に賛同するかどうかではない。問題は、気候変動について慎重かつ誠実に懐疑的な立場をとる者であれば、トレンバース氏のメールを、人間が気候変動を引き起こしているという疑念を表明したものと解釈することは到底できないということだ。にもかかわらず、多くの懐疑論者は、悪意を持って自らの目的を達成するために、あるいは不注意に、元の意図を真に理解しないまま、文脈を無視してこの文章を引用した。

このような事件は、よりオープンな研究活動を検討している気候科学者が直面する大きなリスクを浮き彫りにしています。アイデアやデータのオープンな共有は、一方では発見を加速させる可能性を秘めています。他方では、気候科学者が共有するあらゆる情報は、たとえどれほど無害なものであっても、些細な問題を誇張したり、トレンバース氏のような発言を文脈から外して報道したりすることで、気候科学の評判を落としたいと考えるグループから攻撃を受ける可能性があります。こうした状況を踏まえると、気候科学の研究活動はどの程度オープンに行うべきでしょうか。これは容易な問いではありません。もし問題が純粋に科学的なものであるならば、気候科学者はよりオープンな研究活動へと迅速に移行すべきです。しかし、問題は科学的なものであるだけでなく、政治的な問題でもあります。私は、劇的な転換ではなく、むしろ徐々にオープンなシステムへと移行し、問題が発生した際に診断と修正を行っていくことが正しいアプローチだと考えています。

オープンサイエンスは誤情報の拡散につながる可能性があるのでしょうか？過去20年間で、科学者たちは太陽以外の恒星を周回する500個以上の惑星を発見しました。これらの発見は刺激的です。

しかし最近まで、確認された太陽系外惑星はすべてガス惑星で、地球に似ているというよりは木星や海王星に似ている。この状況を変えようと、NASAは2009年初頭にケプラー・ミッションを開始した。これは、天文学者たちが他の恒星の周りを回る最初の地球サイズの惑星を発見できると信じていた宇宙ベースの観測所である。NASAの方針では通常、このようなミッションのデータは1年以内に公開することが義務付けられており、科学者の間ではケプラーのデータは2010年6月に公開されると広く予想されていた。しかし2010年4月、NASAの諮問委員会は異例の延期を認め、ケプラーチームは最も有望な400個の惑星候補に関するデータを2011年2月まで保留することができた。これにより、データを分析する時間が増え、地球サイズの惑星を最初に発見する可能性が高まった。ニューヨーク・タイムズの記事によると、ケプラー計画のチームリーダー、ウィリアム・ボルツキ氏は、他の天文学者による発見に関する虚偽の主張を防ぐため、計画期間の延長を正当化し、「『はい、それらは小さな惑星です』と言えば、それは間違いありません」と述べたと伝えられている。2011年2月、ケプラー計画チームは実際に地球サイズの惑星を5つ発見したと発表した。

科学をオープンに実践することは、概して望ましいとはいえ、ボルツキ氏が虚偽の主張を懸念するのは全く間違っていない。2010年7月8日、素粒子物理学者でブロガーのトマス・ドリゴ氏は自身のブログで、長年探し求められていたヒッグス粒子がついに発見されたという噂を報じた。ドリゴ氏の投稿では、未確認の噂を繰り返しているだけだと強調されていたが、この注意書きにもかかわらず、彼のブログに掲載された噂は主流メディアに取り上げられ、デイリー・テレグラフ（英国）やニューサイエンティスト誌などの記事に掲載された。わずか9日後の7月17日、ドリゴ氏は自身のブログでこの噂を撤回し、誤報だったと反論した。一部の科学者は、ドリゴ氏の行動は無責任だ、あるいは単に悪評を買おうとしているだけだと批判した。しかし、科学的な噂は科学者生活に欠かせないものであり、科学者たちが昼食会や会議場で話題にする類のものだ。実際、このような憶測に基づく議論を通して、新しいアイデアが生まれることはよくあるのだ。ドリゴ氏が素粒子物理学者の友人や同僚と話し合うことができるブログという非公式な場で、この話題を取り上げるのは自然な流れでした。こう考えると、主流メディアの無責任な報道を批判したくなる気持ちも分かります。しかし、それも公平ではありません。ドリゴ氏はプロの物理学者であり、素粒子物理学界ではよく知られ、人脈も広く、事情をよく知っている人物だと考えられます。当然のことながら、主流メディアはこれらの噂を取り上げました。

ここに真の緊張関係があります。ブログは、非公式な科学的会話を活発化させ、思索的なアイデアを探求する強力な手段です。しかし

この探査が公の場で行われると、スクープを狙う主流メディアがその推測を広め、あたかもそれが事実であるかのような印象を与えてしまう危険がある。幸いにも、これは限られた範囲の問題である。主流メディアはほとんどの科学的発見には興味がなく、広く関心を集める少数の発見については、ドリゴ=ヒッグス事件のような出来事が、メディアが未確認の噂を報道することに対しより慎重になる一因となるだろう。ジャーナリズムに対して懐疑的な見方をする人もいるが、ほとんどの大手メディア組織は、信頼性（あるいはそうでない）に関する自らの評判を痛感しており、頻繁に公に撤回しなければならないとすれば当惑する。ドリゴ=ヒッグス撤回のニュースは、6社以上の大手メディア組織によって報道され、その多くが、噂はもともとテレグラフ紙とニューサイエンティスト紙によって広められたものだと指摘した。

それはテレグラフやニューサイエンティストが望んでいる種類の宣伝ではない。そうは言っても、この問題は今後ますます多く見られるようになるでしょう。

オープンサイエンスのメリットを考えると、これは比較的小さな代償であるように思われます。

科学の規模が拡大すると、科学的発見の検証が難しくなるのではないのでしょうか。オープンサイエンスによって発見のプロセスが大規模化されるにつれて、科学的証拠の性質は変化し、より複雑になるでしょう。発見によっては、証拠を詳細に理解することが一人の人間の能力を超えることもあります。その初期の例は1983年に起こりました。数学者が有限単純群の分類として知られる重要な数学問題の解を発表したのです。証明は1955年から1983年までの30年近くを要し、100人の数学者が約500本の論文を執筆しました。その後、証明には多くの小さな欠陥と少なくとも1つの重大な欠陥が見つかりました。これは現在、2巻1,200ページに及ぶ証明の補遺によって解決されています（そう願っています）。1980年代には、科学的発見がこれほど複雑な証拠を伴うことは珍しかったのですが、今日では当たり前になりつつあります。複雑さの具体的な例を挙げると、多くの科学分野における現代の実験では、数十万行、あるいは数百万行に及ぶコンピュータコードが使用されるケースが増えているという点が挙げられます。このようなコードからすべてのバグを排除することはほぼ不可能です。そのコードによって出力される結果が妥当であると、どのように確認できるのでしょうか？他の科学者はどのようにしてそのような実験の結果を検証し、再現できるのでしょうか？さらに、計算システムが複雑化するにつれて、状況はますます困難になっています。単一のソフトウェアプログラムは、相互作用するプログラムの複雑なネットワークであるソフトウェアエコロジーに置き換えられつつあり、時には多くの人々が複数の場所にまたがって維持しています。どのようにして

このようなソフトウェアエコロジーが信頼性と再現性のある結果を生み出すことを保証できるでしょうか？こうした懸念やその他の同様の懸念は、素粒子物理学から気候科学、生物学から天文学に至るまで、さまざまな発見に影響を与えています。

これは個人の理解を超えた一種の科学です。この新たな証拠のスケールが標準となるにつれ、証拠の基準も進化していく必要があります。しかし、私は楽観的に考えています。私たちはこの課題に立ち向かい、増幅された集合知を駆使して新たな発見をするだけでなく、それらの発見を検証し検証するためのより優れた方法を開発していくでしょう。

## オープンサイエンスへの実践的なステップ

オープンサイエンスに向けて、私たちはどのような実践的なステップを踏むことができるでしょうか？世界中で、各国政府は基礎研究に毎年1,000億ドル以上を費やしています。これは私たちのお金であり、よりオープンな科学文化への変革を求めるべきです。公的資金で運営される科学は、オープンサイエンスであるべきだと私は信じています。では、現役の科学者から一般市民まで、誰もがこの目標に向けて実践できるステップをいくつか見ていきましょう。

科学者なら何ができるでしょうか？オープンサイエンスに挑戦してみましょう！古いデータや古いコードをオンラインにアップロードしましょう。文書化し、他の人にも活用を促し、引用方法も必ず伝えましょう。ブログも試してみてください。自分のコンフォートゾーンを破り、長年頭の片隅にあってなかなか実現できなかったアイデアをブログで発展させてみましょう。失うものはほとんどなく、オープンな環境で作業することでアイデアに新たな息吹が吹き込まれるかもしれません。もし時間があまりにかかりすぎるようであれば、他の人のオープンサイエンスプロジェクトに少し貢献してみてください。例えば、科学ブログにコメントしたり、Wikiに投稿したりするなどです。これらの貢献は小さいかもしれませんが、科学者の同僚はそれに気づき、科学コミュニティにおける新しいツールの正当性を高めるのに役立ちます。そして、想像以上にやりがいを感じるかもしれません。冒険心のある方は、限界に挑戦してみてください。Polymath Project、Foldit、Galaxy Zooのように、科学の新しい方法を切り拓けるか自問してみてください。想像力と強い意志で、あなたは何を思いつくでしょうか？たとえオープンサイエンスへの取り組みが成功しなかったとしても、あなたの努力は地域社会への貢献だと考えてください。

もちろん、すべての科学研究を公開で行う必要はありませんし、ほんの一部でも公開する必要はありません。

何よりもまず、他の科学者が科学的知識を新しい方法で共有する際には、惜しみなく功績を認めてあげましょう。オンラインで共有するアイデアやデータ、コードを引用する方法を見つけましょう。オープンな研究を宣伝し、履歴書や助成金申請書で強調し、その影響力を示す方法を見つけるよう促しましょう。これが、引用・評価・報酬という新しいサイクルを始動させる方法です。もちろん、時には、古い科学的価値観を持つ同僚に出会うこともあるでしょう。彼らは新しい知識共有方法を軽視し、科学者の成功の唯一の尺度はNatureのような著名なジャーナルにどれだけ多くの論文を出版したかだと考えているのです。そのような人々と、知識共有の新しい方法の価値、そして科学者、特に若い科学者がオープンな環境で研究を行うために必要な勇気について話し合ってください。アイデア、コード、データをオンラインでオープンに共有することは、論文を発表することと同じくらい重要です。そして、古い価値観がそうではないと主張するのです。

科学者でありプログラマーでもあるなら、特別な役割を担うことができます。科学のあり方を再定義する新しいツールを開発するチャンスです。新しいアイデアを大胆に実験してください。今は科学ソフトウェアの黄金時代です。そして、自分の研究の価値を大胆に主張してください。

今日、あなたの研究は、悪意ではなく理解不足のために、旧態依然とした同僚から過小評価される可能性が高いです。他の科学者に、あなたの研究をどのように引用すべきかを説明しましょう。科学者でありプログラマーでもある友人と協力し、引用やコードの共有に関する共通の規範を確立しましょう。そして、他の科学者がそれらの規範に従うよう、徐々に圧力を強めていきましょう。自分の研究を宣伝するだけでなく、コード自体が科学的貢献であり、従来の形式に劣らず価値があることを広く訴えましょう。

もしあなたが助成機関で働いているとしたらどうでしょうか？あなたが支援する科学コミュニティの人々と話し、現在科学者の頭の中や研究室の中に閉じ込められている知識は何なのかを尋ねてみましょう。その知識を共有するために最も効果的なツールは何でしょうか？オープンアクセス、オープンデータ、オープンコードに関するポリシーを策定する機会はあるでしょうか？現在のオープンアクセスとオープンデータに関するポリシーをどのように超えることができるでしょうか？arXivやSPIRESなどの事例をモデルとして、引用に関する新しい規範や評価のための新しいツールを作成し、科学の評判経済を拡大することは可能でしょうか？より一般的には、政府機関や政策立案プロセスに関わっているなら、次のような方法で貢献できます。

オープン アクセスとオープン データを推進し、より一般的にはオープン サイエンスの問題に対する意識を高めることによって、関与します。

科学者でもなければ、助成機関で働いておらず、政策に携わっているわけでもないけれど、科学と人類の福祉に関心を持つ市民である場合、どうすればいいのでしょうか？科学者である友人や知り合いと話してみましょう。彼らがデータをオープンにするために何をしているのか聞いてみましょう。

アイデアを公に、そして迅速に共有するために何をしているのか、彼らに聞いてみてください。コードをどのように共有しているのか、彼らに聞いてみてください。オープンサイエンスを成功させるには、科学コミュニティの価値観を変える必要があります。すべての科学者が、オープンでオンラインで研究することの価値を心から信じれば、変化は訪れるでしょう。これは根本的に、心と意識を変えることの問題です。このような変化を実現するには、社会の意識を高めること以上に強力な力はありません。社会のすべての人々がオープンサイエンスの計り知れない価値を理解し、オープンサイエンスの実現が現代の大きな課題の一つであることを理解するようにすることです。世界中のすべての科学者が、友人や家族から、科学をよりオープンにするために何をしているのか尋ねられれば、変化は訪れるでしょう。すべての助成金担当者と大学のリーダーが、友人や家族から、科学をよりオープンにするために何をしているのか尋ねられれば、変化は訪れるでしょう。そして、よりオープンな科学文化を求める国民が政治家に圧力をかければ、変化は訪れるでしょう。

これは社会全体の関心事、政治問題、そして誰もが極めて重要であると理解する社会問題にならなければなりません。あなたは、個人之力、人脈、そして想像力を駆使して、政治家や助成機関に働きかけ、オープン化を促進する政策の策定を促すことで、この目標の達成に貢献することができます。

(本書巻末の「参考文献と参考文献」セクションに、既にこの活動を行っている組織をいくつか挙げています。) 私たち社会は、科学者が世界と共有することをどのような種類の知識に期待し、奨励するのでしょうか？現在のアプローチを続けるのでしょうか？それとも、知識のオープンな共有、問題解決能力を高め、科学的発見を加速させる新しいツールの開発を重視する科学文化の創造を選択するのでしょうか？

ここまで述べてきたステップはどれも小さな一歩です。しかし、これらが積み重なれば、よりオープンな科学のあり方へと向かう、後戻りできないような動きが生まれるでしょう。発明家で科学者のダニエル・ヒリスは、「誰もがそうするように、2年単位で考えれば解決不可能な問題もあるが、50年単位で考えれば簡単に解決できる」と述べています。オープンサイエンスの問題はまさにこの類の問題です。今日、

開かれた科学文化を創造するには、科学者の働き方を変えることは不可能に思えます。しかし、小さな一歩を踏み出すことで、徐々に大きな文化的変化をもたらすことができます。

## ネットワーク化された科学の時代

本書は、科学界に万能の火を灯すことを目指して執筆しました。私たちは今、歴史上特異な瞬間を迎えています。初めて、思考のための強力な新ツールを自由に構築できる能力を手にしたのです。知識の構築方法を変えるチャンスが到来したのです。しかし、本来先頭に立つべき科学界は、後手に回っています。ほとんどの科学者は既存の研究手法に固執し、より良い方法を模索する人々を支援していません。最初のオープンサイエンス革命と同様に、社会として私たちは、科学者に新たな方法で貢献するよう奨励し、場合によっては強制することで、この機会損失という悲劇を積極的に回避する必要があります。努力と献身があれば、科学に完全な革命を起こす可能性は十分にあると私は信じています。

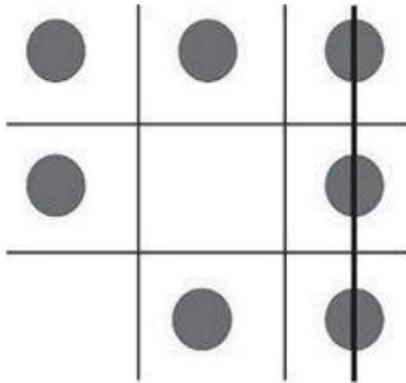
17世紀後半を振り返ると、その時代における大きな変化の一つが近代科学の発明であったことがわかります。20世紀後半から21世紀初頭の歴史が記されるとき、私たちはこれを、世界の情報が不活性で受動的な状態から、情報を活性化させる統一システムへと変貌を遂げた時代として捉えるでしょう。世界の情報は目覚めつつあります。そして、この変化は、科学者の思考と研究の方法を再構築し、ひいては人類の問題解決能力を拡張する機会を与えてくれます。私たちは発見のあり方を改革しており、その結果、科学の一角ではなく、科学全体にわたって発見を加速させる、ネットワーク化された科学の新たな時代が到来するでしょう。

この再発明により、宇宙の仕組みについての理解が深まり、人類が抱える最も重要な問題への対処にも役立つでしょう。

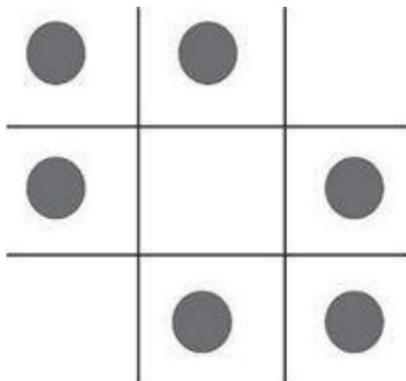
## 付録 : 博学者が解決した問題

プロジェクト

Polymathプロジェクトは、密度ヘイルズ・ジュレット定理 (DHJ定理)として知られる数学的帰結を証明することを目指しました。DHJの証明は複雑ですが、基本的な命題は誰にでも理解できます。次の $3 \times 3$ のグリッドをご覧ください。



グリッド上の7つのマス目に点を付けました。ご覧の通り、3つの点には線を引くことができます。一方、次の図は線のない配置です。つまり、どの3つの点にも線を引くことはできません。



少し試してみると、この配置が線のない配置として可能な限り最大であることが分かります。特に、グリッド上に7つの点をマークすると、点をどのように配置しても、グリッド上のどこかに必ず3つの点を通る線を引くことができます。

グリッドを3次元、つまり $3 \times 3 \times 3$ のグリッドに拡張したと想像してみてください。3次元では、線のない構成は最大で16箇所が塗りつぶされていることがわかります。グリッド上の17箇所を塗りつぶすと、どの箇所を塗りつぶしても、グリッド上のどこかにある3つの点を通る線を引くことができます。これは私の言葉を信じていただいても構いませんし、少しの努力と3次元的な想像力があれば、これが事実だと納得していただくこともできます。

ここで少し飛躍して、グリッドを3次元から任意の数の空間次元に拡張することを想像してみましょう。次元の数にラベルを付け、これを $n$ と呼びます。この拡張は視覚化が難しく、ほとんどの数学者が実行できないほど難しいため、代わりに問題を代数形式に変換します。ここでは代数変換は行わず、関心のある質問について説明します。 $n$ 次元のグリッドで、線のない最大の配置のサイズはどれくらいでしょうか。そのサイズに名前を付け、 $s_n$ と呼びます。上記の説明から、 $s_2 = 6$  および  $s_3 = 16$  であることがわかります。これらは、2次元と3次元の線のない最大の配置のサイズです。次元が高くなると、 $s_n$ の値を計算することが急速に困難になります。数学者たちは、これまで見てきたように $s_2$ と $s_3$ の値を、そしてさらに努力を重ねて $s_4$ 、 $s_5$ 、 $s_6$ の値も求めてきました。しかし、 $s_7$ の正確な値は誰も知りません。さらに高次元になると状況はさらに複雑になります。 $s_n$ の正確な値を求めるのは困難ですが、DHJ定理は $s_n$ の大きさについてある程度の情報を与えてくれます。

特に、DHJ定理の帰結の一つは、次元数 $n$ が非常に大きくなると、最大の線なし構成のサイズ $s_n$ は、グリッド上の位置の総数のごく一部にしかならないということです。言い換えれば、 $n$ が大きくなると、グリッドのほんの一部を埋めるだけでも、どこかに線が引かれます。どんなに巧みに場所を埋めても、どこかに線が引かれます。この主張をもう少し正式に表現すると、DHJ定理は、最大の線なし構成が占めるグリッドの割合 $s_n / 3^n$ が、

$n$ が大きくなるにつれて、構成は無視できるほど小さくなります。数学用語で言うと、 $n$ が大きい場合の限界では構成はゼロになります。

これは驚くべき主張です。これまで見てきたように、2次元や3次元では、3つのピースを一行に並べざるを得なくなる前に、グリッドの大部分を埋めることができます。しかし、高次元では、DHJ定理によれば、たとえグリッドのごく一部しか埋められていない場合でも、グリッド上のどこかに一行に並べられることとなります。これが当然であるはずなのに、DHJ定理はそれが正しいことを示しています。

DHJ定理の帰結について説明してきたのは、DHJ定理の趣旨を理解していただくためです。実際、DHJ定理の完全な記述は、これまで説明してきた帰結よりも強力です。この定理は $3 \times 3 \times \dots$ のグリッドにのみ当てはまるのではなく、 $m \times m \times \dots$ のグリッドにも同様の記述が成り立ちます（ここで $m$ は任意の数です）。

さらに、DHJは、その直線が「組み合わせ直線」と呼ばれる特別な種類の直線になることを示唆しています。ここでは組み合わせ直線の定義はしません。組み合わせ直線とは何かを知りたい場合は、脚注の参考文献を参照してください。今は、それが特別な種類の直線であるということだけで十分です。DHJ定理の完全な記述は、次元数 $n$ が大きくなるにつれて、 $m \times m \dots$ グリッドのうち組み合わせ直線のない最大の部分集合が占める割合がゼロに近づく、ということです。言い換えれば、 $n$ が大きくなるにつれて、グリッドのほんのわずかな部分を埋めるだけでも、どこかに $\times$  組み合わせ直線が強制的に出現するということです。

なぜDHJに注目すべきなのでしょう？ 数学的な背景知識があまりない状態でDHJに取り組むと、難解な問題のように思えるかもしれません。しかし、パズルを解くのが好きな人にとっては、DHJは（難しいとはいえ）楽しい気晴らしになるようなパズルのように思えます。

しかし、DHJ定理はなぜ数独パズルを解くことよりも重要なのでしょうか？

見た目は欺瞞に満ちている。DHJは奥深い定理である。その結果、数学における他の多くの重要かつ証明困難な結果がもたらされる。その中には、一見全く無関係に見える分野におけるものも含まれる。ドミノ倒しを想像してみてください。それが倒れると、他の多くの重要かつ動かしにくい数学的なドミノ倒しも引き起こされるのだ。DHJが、一見無関係に見える数学の別の分野、つまり素数の構造を理解する問題とどのように関連しているか、例を挙げてみよう。DHJは、セメレディの定理と呼ばれる数論の奥深い結果を示唆している。この定理は1975年に数学者エンドレ・セメレディによって初めて証明され、その後も数学者たちはいくつかの追加証明を発見してきた。それらの証明から得られたアイデアを用いて、2004年に数学者ベン・グリーンとテレンス・タオは、ある

素数の構造に関する重要な新結果。グリーン・タオ定理の意味を理解するために、199、409、619、829、1039、1249、1459、1669、1879、2089 という数列を考えてみましょう。これらはすべて素数であり、等間隔に配置されています。数列の各要素は、その前の要素よりも 210 だけ大きくなっています。グリーン・タオ定理が述べているのは、どんな長さの素数でも等間隔に並んだ数列を見つけることができるということです。100 万個の素数が等間隔に並んだ数列が欲しいですか？ グリーン・タオ定理は、そのような数列が存在することを保証します。この定理は、実際にそのような数列を見つけるための簡単なレシピを与えているわけではありませんが、十分な長さで数列を探せば、最終的には見つかるということを保証します。さて、素数に関する結果は、高次元における線のない構成を心配することとはほとんど関係がないように思われるかもしれませんが、しかし、DHJ-Szemerédi と Szemerédi-Green-Tao の関係は、DHJ と素数の構造の間に実際に関係があることを示唆しています。

DHJ定理は1991年に数学者ヒレル・ファーステンバーグとイツハク・カツネルソンによって初めて証明されました。ティム・ガワーズがポリマス・プロジェクトを提唱した時、彼は博学者たちにDHJの最初の証明を見つけてほしいと提案していたわけではありません。むしろ、新たな証明を見つけてほしいと提案していたのです。ガワーズのような一流数学者が、既に知られている結果の新たな証明を見つけることに興味を持っていることに、驚かれるかもしれません。

しかし、DHJの既存の証明は、エルゴード理論と呼ばれる数学の一分野における間接的でかなり高度な手法を用いていました。これは確かに優れた証明でしたが、ガワーズは、異なる手法を用いた新しい証明を見つけることで、DHJへの更なる洞察が得られると考えました。特にガワーズは、エルゴード理論のような高度な数学を必要としない、初歩的な手法のみを用いた証明を見つけることに興味を持っていました。

時には、新たな証明を見つけることで、結果がそもそもなぜ正しいのかを理解するのに役立つ重要な新たな洞察が得られることがあります。まさにこれが、セメレディの定理の多重証明で起こったことです。

グリーンとタオが素数に関する定理を証明したとき、彼らはセメレディの定理のいくつかの異なる証明からアイデアを利用しました。

これにより、基本的な手法のみを使用して DHJ 定理の新しい証明を見つけることが、Polymath プロジェクトにとって挑戦的で価値のある目標となりました。

## 謝辞

本書の執筆にあたり、多くの方々の熱意、洞察力、そしてサポートに多大な恩恵を受けました。特に、エージェントのピーター・タラック氏には感謝申し上げます。彼のプロジェクトへの熱意、鋭いフィードバック、そして的確な質問を投げかける才能のおかげで、本書は劇的に向上しました。

プリンストン大学出版局のチームの皆様にも、熱意と辛抱強い支援を惜しみなくいただき、深く感謝いたします。特に編集者のイングリッド・グナーリッヒ氏、ジョディ・ベダー氏、ボブ・ベッテンドルフ氏、クリストファー・チャン氏、キャスリーン・シオフィ氏、ピーター・ドハティ氏、ジェシカ・ペリエン氏、ジュリー・ショーヴァン氏には深く感謝いたします。また、初期の出版企画書に有益なコメントを寄せてくださったサイモン・カペリン氏、ケリー・マクニーズ氏、リー・スモーリン氏にも感謝いたします。出版をほぼ諦めかけていた時期に、リー・スモーリン氏の励ましの言葉は特にありがたかったです。エヴァ・アムセン氏、ロブ・ドッド氏、エリック・ドレクスラー氏、ジョン・デュプイ氏、ハッサン・マサム氏、クリスティーナ・ピカス氏、ドロテア・サロ氏、リー・スモーリン氏、ロブ・スペッケンズ氏には、本書全体の草稿に思慮深いコメントを寄せていただき、深く感謝いたします。Rob Spekkens氏は、本書全体について詳細なコメントを寄せてくれただけでなく、全体を劇的に改善する幅広い提案をいくつかしてくれました。Harvey Brown氏、Amy Dodd氏、Danielle Fong氏、Chris Ing氏、Chris Lintott氏、Garrett Lisi氏、Cameron Neylon氏、Tobias Osborne氏、Peter Rohde氏、Mickey Schafer氏、Carlos Scheidegger氏、Arfon Smith氏、John Stockton氏、そしてMark Tovey氏には、初期の各章の草稿に詳細なコメントを寄せていただきました。本書の第8章と第9章は、私がブログ[152]に寄稿し、その後Physics World [150]に再掲載されたエッセイを一部改変したものです。本稿の執筆に協力し、実現に尽力してくれたPhysics WorldのJoao Medeiros氏とMatin Durrani氏に感謝します。私の研究は、オンラインのオープンサイエンスコミュニティの多くの人々によって大きく豊かになりました。

コミュニティの皆様、特にキャメロン・ネイロン氏、ピーター・スーバー氏、そしてオープンサイエンスのための活気あるオンラインコミュニティの構築に多大な貢献をしてくださった多くの方々に感謝申し上げます。私の考えに影響を与えてくれた多くの方々にも感謝します。スコット・アーロンソン、ハル・アベルソン、リチャード・アッカーマン、デイブ・ベーコン、ギャビン・ベイカー、トラビス・ビールズ、ペドロ・ベルトラオ、ミック・バーマン、マイケル・バーンスタイン、ピーター・ビンフィールド、ロビン・ブルーム・コハウト、ジャン＝クロード・ブラッドリー、ビョルン・ブレンブス、タイタス・ブラウン、ザカリー・ブラウン、ハワード・バートン、カール・ケイブス、アイク・チュアン、ケン・コーツ、アレクサンドロ・コセンティーノ、ジョン・カンバーズ、ウィム・ファン・ダム、エイミー・ドッド、ロブ・ドッド、マイケル・ドゥシェネス、ドリュウ・エンディ、ステイブン・ファン・エンク、ステイブ・フラミア、コニー・フレンチ、クリス・フックス、ジョシュア・ガンズ、アレクセイ・ギルクリスト、ベンジャミン・グッド、ダニエル・ゴッテスマン、ティム・ガワーズ、クリストファー・グラネード、イリヤ・グリゴリック、ニコラス・グルーエン、メリッサ・ハーゲマン、ティモ・ハネイアラム・ハロウ、アンドリュウ・ヘッセル、ダニエル・ホルツ、タッド・ホーマー＝ディクソン、ビル・フッカー、ザビーネ・ホッセンフェルダー、ジョナサン・ハント、ヘザー・ジョセフ、ジェイソン・ケリー、マリウス・ケンペ、マニー・キル、ステイブ・コッホ、マット・ライファー、ホープ・レマン、ダニエル・レミア、デビー・レオン、マイク・ルキデス、ショーン・マギー、ボブ・マクニーズ、ハッサン・マスム、ジェラルド・ミルバーン、レン・ムロディナウ、ピーター・マレー＝ラスト、ブライアン・マイヤーズ、ベラ・ナジ、アンダース・ノルガード、ジル・オニール、トビアス・オズボーン、セブ・パケット、ヘザー・ピワワール、ホルヘ・プーリン、スリニバサン・ラマスブラマニアン、ニール・サンダース、ケビン・シャインスキー、コスマ・シャリジ、アリス・シェパード、ジョン・サイドルズ、ディーパック・シン、ロランド・ソンマ、ヒラリー・スペンサー、グラハム・スティール、ヴィクトリア・ストッデン、ダンストウェル、ブライアン・サリバン、パヴェウ・シュチシュニー、テリー・タオ、ケイトリン・サニー、マシュー・トッド、ベン・トナー、ウメシュ・ヴァジラニ、リカルド・ヴィダル、クリスチャン・ウィードブルック、アンドリュウ・ホワイト、ジョン・ウィルバンクス、グレッグ・ウィルソン、シャーリー・ウー、カール・ジマー、そしてボラ・ジヴコヴィッチ。このリストに名前が載るべきなのに載っていないの方々には、お詫びと感謝を申し上げます。家族には、愛とサポートをくれて、言葉では言い表せないほど感謝しています。ハワードとウエンディ・ニールセン夫妻、スチュアートとシェリー・ニールセン夫妻、ケイト・ニールセンとスコット・アンドリュース、姪と甥のジー、クーパー、ブレイク、ボーエン、祖母のリカルド、ロブとダイアン・ドッド、エイミー・ドッド、キャンディスとジョニー・マルツァーノ。そして何よりも、妻のジェン・ドッドに心から感謝します。ジェンのコメントと批評は、本書のあらゆる側面、細部から全体の構成、そして全体的な議論に至るまで、大きく改善してくれました。彼女の励ましとサポートがなければ、本書を書き始めることも、もちろん完成させることもできなかったでしょう。

## 参考文献とさらなる情報源 読む

本書は大部分が総合的な研究であり、他の研究者の研究に多大な恩恵を受けています。参考文献に関する詳細な注釈は221ページ以降に掲載されています。ここでは、私の思考に最も決定的な影響を与えた参考文献をいくつか挙げ、さらに参考文献となる文献を提案します。

集合知: コンピューターを使用して個人および集合的な人間の知能を増幅するという考えには長い歴史があります。影響力のある初期の著作としては、ヴァネヴァー・ブッシュの有名な論文「As We May Think」(我々の思考の範疇)[31]が挙げられる。これは彼が想像するメメックスシステムを解説したもので、ダグラス・エンゲルバート[63]とテッド・ネルソン[145]の両者の独創的な研究に影響を与えた。これらの著作は数十年前のものであるが、今日のインターネットで見られるものの多くを提示し、その先にある展望を明らかにしている。これらの基礎的な著作とは別に、集合知に関する私の考えは経済学の考えに強く影響を受けている。ハーバート・サイモン[197]は、情報過多の世界において希少資源としての注意の重要性を指摘した最初の人物と思われる。また、マイケル・ゴールドハーバーの刺激的な論文「注意経済とネット」[75]も大いに楽しんだ。これを補完するのが、複雑性理論家スコット・ページによる、集団問題解決における認知的多様性の価値を実証した研究[168]、そしてハイエクの「隠れた知識」の概念と、その知識を集約するためのシグナルとしての価格の利用[93]である。関連テーマに関する影響力のある他の著作としては、ハッチンズによる船の航海における集合知の詳細な人類学的分析[95]、レヴィの集合知に関する著書[124]、そしてマーク・トーヴィーが最近まとめた集合知に関する刺激的なエッセイ集[224]などがある。

デイビッド・イズリーとジョン・クラインバーグは、ネットワークに関する数学的・定量的研究の多くを要約した優れた教科書『ネットワーク、群衆、そして市場』 [59]を著しています。最後に、ニコラス・カーの著書『The Shallows』 [35]をお勧めします。本書は、オンラインツールは私たち（個人）の思考様式をどのように変えているのかという根本的な問いを提起しています。カーの答えは不完全だと思いますが、この重要な問いを刺激的に探求しています。

オープンソース :オープンソースについて知る最良の方法は、オープンソースプロジェクトに参加することです。LinuxやWikipediaといったオープンソースプロジェクトのコードやディスカッションアーカイブを読むことでも、多くのことを学ぶことができます。本書の執筆中、私はまさにその作業に多くの時間を費やしました。そして、それは有益な情報であるだけでなく、驚くほど楽しいことも多く、オタクにとって一種の安価な娯楽となっていることをお伝えできます。GitHub (<http://github.com>) もぜひご覧ください。Linuxは現在、オープンソース活動の最も重要な拠点です。オープンソースの概要をまとめた本としては、[Steven Weber](#) のThe Success of Open Source [235] が優れています。唯一の欠点は、やや時代遅れ (2004年) になっていることですが、この本には比較的時代を超越した内容が多数含まれています。さらに遡ると、Eric Raymond の有名なエッセイ「The Cathedral and the Bazaar」[178] があります。Raymond のエッセイは、私 (および他の多くの人々) がオープンソースに興味を持つようになったきっかけであり、今でも読む価値があります。Yochai Benkler の洞察に満ちた「Coase's Penguin, or, Linux and The Nature of the Firm」 [12] とThe Wealth of Networks [13] は、特に学術コミュニティにおいて、オープンソースに関する多くの考え方に強い影響を与えました。最後に、Ned Gulley と Karim Lakhani による Mathworks プログラミング コンテントの魅力的な説明 [87] をお勧めします。

集合知の限界 :キャス・サンスティーンの『インフォトピア』 [212]やジェームズ・スロウィツキの『群衆の知恵』 [214]は参考になる要約である。古典的なテキストとしては、1841年に初版が発行され、その後何度も再版されているチャールズ・マッケイの『群衆の異常な妄想と狂気』 [130]やアーヴィング・レスター・ジャニスの『集団思考』 [99]などがある。もちろん、私たちの書かれた文化のかなりの部分は、直接的または間接的に、集団での問題解決の課題を扱っている。私にとってより形式的な記述の中には、ベン・リッチの『スカンク・ワークス』 [184]、リチャード・ローズの『原子爆弾の製造』 [183]、ロバート・コルウェルの『ペンティアム・クロニクルズ』 [45]がある。もう少し範囲を広げると、ピーター・ブロックの著書『コミュニティ :帰属の構造』 [18]には、コミュニティ構築の問題について多くの洞察が含まれている。そして最後に、ジェーン・ジェイコブスの傑作『偉大なアメリカ人の死と生』

『都市』 [98]は、非常に大きな集団が、人間の根源的な問題である「住む場所をどうやって作るか」という問題にどのように取り組んでいるかを説明した優れた本です。

ネットワーク化された科学全般 : コンピュータとネットワークが科学のあり方を変える可能性については、長年にわたり多くの人々によって議論されてきました。こうした議論は、前述の多くの著作、特にヴァネヴァー・ブッシュ [31] とダグラス・エンゲルバート [63] の著作に見出すことができます。その他の著名な著作としては、エリック・ドレクスラー [57]、ジョン・ウデル [227]、クリスティン・ボーグマン [23]、ジム・グレイ [83] の著作が挙げられます。また、[14] に再録されているティム・バーナース＝リーによるワールド・ワイド・ウェブの原案も参照してください。ネットワーク化された科学を描いた刺激的で楽しいフィクション作品としては、ヴァーナー・ヴィンジの『虹の果て』 [231] があります。

データ駆動型科学 : データ駆動型科学の価値を最初に理解し、明確に表現した一人が、マイクロソフトリサーチのジム・グレイでした。彼の考えの多くは、上でも触れたエッセイ [83] にまとめられています。このエッセイは、『第四のパラダイム』 [94] という刺激的なエッセイ集に収録されています。この本はウェブから無料でダウンロードでき、データ駆動型科学の多くの側面を概観することができます。もう一つの示唆に富む論文は、アロン・ハレヴィ、ピーター・ノーヴィグ、フェルナンド・ペレイラによる「データの不当な有効性」 [88] です。著者3人はGoogleに勤務しており、Googleはおそらく世界で最もデータ駆動型の文化を持つ組織であり、この論文はデータ駆動型の考え方から生まれる視点の根本的な変化をよく伝えています。プログラミングの経験がある方には、Norvigの素晴らしい短いエッセイ [157] もおすすめです。これは、わずか21行のコードで（当然ながらデータ駆動型の）スペルチェックツールを作成する方法について解説しています。データ駆動型知能に関するトピックについては、数多くのテキストや論文が存在します（ただし、ほとんどの論文では「データ駆動型知能」という言葉は使われていません）。実践的な入門書としては、Toby Segaranの『Programming Collective Intelligence』 [191] がお勧めです。

科学の民主化と市民科学 : 科学の民主化は、ビジネスの世界にも類似点があり、ユーザー生成イノベーションやビジネスにおけるオープンイノベーションモデルといった現象に見られる。例えば、第7章のタイトルの着想を得たエリック・フォン・ヒッペルの著書『イノベーションの民主化』 [233] や、ヘンリー・チェスブロウの『オープンイノベーション』 [36] を参照のこと。第7章で展開された視点は、私たちの社会には認知的余剰 [195, 194; 196も参照] があり、それを新しい形態の集団行動に活用できるというクレイ・シャーキーの考えにも大きく影響を受けている。

---

オープンサイエンス : 私のオープンサイエンスの分析は、マンカー・オルソン [161] の集団行動に関する研究と、

エリノア・オストロム [165] は漁業や森林といった共有資源の管理について著作を残している。これらの著作はいずれも、私が述べた以上にオープンサイエンスに多くの示唆を与えてくれる。特に、オストロムが共有資源の管理に関して特定した詳細な原則の多くについては、ここでは簡単に触れたにとどめた。これらの原則の多くは、オープンサイエンスにも効果的に適用・適応できる。また、ロバート・アクセルロッド [9] による、関係者が協力する条件に関する研究からも刺激を受けた。大規模協力の問題は、集団行動の問題の一例である。オープンサイエンスの初期の歴史については、多くの文献から刺激を受けたが、特にポール・デイビッド [49]、エリザベス・アイゼンシュタイン [61]、メアリー・ボアズ・ホール [89] の影響を受けている。

本書の執筆中に私が苦勞したことの一つは、物語の制約により、現在進行中の数千ものオープンサイエンス・プロジェクトのほぼすべてを省略せざるを得なかったことです。幸いなことに、今日のオープンサイエンスの動向を追跡するための優れた情報源は数多くあります。いくつか例を挙げてみましょう。最も貴重な情報源の一つは、ピーター・スーバーのウェブサイト (<http://www.earlham.edu/~peters/hometoc.htm>) です。これはオープンサイエンスのあらゆる側面、特にオープンアクセス出版に関する素晴らしいリソースです。素晴らしいブログです (<http://www.earlham.edu/~peters/fos/fosblog.html>)。現在は更新されていませんが、貴重な歴史的資料として残っています。また、Suber氏の継続的なオープンアクセスニュースレター (<http://www.earlham.edu/~peters/fos/newsletter/archive.htm>) もご覧ください。は不可欠です。 スーバーの

---

オープンサイエンスに関するもう一つの優れた情報源は、Cameron Neylon 氏のブログ (<http://cameronneylon.net/>) です。ネイロン氏はオープンノートブックサイエンスの先駆者の一人であり、オープンサイエンス全般について多くの刺激的な発言をしています。TwitterやFriendFeedなどのサービスを利用しているオープンサイエンティストやオープンサイエンスプロジェクトも数多くあります。この世界への入り口として、Googleで「Twitter オープンサイエンス」と検索してみるのが良いでしょう。

これらの個人に加えて、オープンサイエンスのために活動する組織も数多くあります。納税者アクセス同盟 (<http://www.taxpayeraccess.org/>) 科学論文や科学データへのオープンアクセスに関する政策の実現に向けて、米国政府にロビー活動を行ってきた。例えば、第7章で述べたNIHのオープンアクセス政策は、彼らのロビー活動によって実現した部分もある。オープンアクセス政策の実現に向けて活動している他の組織としては、サイエンス・コモンズ (<http://sciencecommon.org>) などが挙げられる。これは Creative Commons 組織および Open Knowledge Foundation (<http://okfn.org>) の一部です。

科学

---

よりオープンな文化を創造するという課題は、科学に限ったことではありません。一般的な文化においても、同様の課題に直面しています。リチャード・ストールマン[202]、ローレンス・レッシング[122]をはじめとする多くの人々が、ネットワーク化された世界においてオープン性がもたらす利益について述べてきました。彼らはクリエイティブ・コモンズ・ライセンス (<http://creativecommons.org>)などのツールを開発してきました。そして「コピーレフト」ライセンスは、よりオープンな文化の実現に役立ちます。私の考え方は、特にレッシング[122]の影響を強く受けています。オープンサイエンスはオープンカルチャー運動と多くの類似点を持つものの、科学はオープンな共有を阻害する独特の力に直面しています。つまり、クリエイティブ・コモンズ・ライセンスのようなツールは、よりオープンな文化への移行に非常に効果的でしたが、科学における根本的な課題、つまり科学者が論文を発表することで報酬を得て、他の方法で知識を共有することに対しては報酬を得ていないという事実に対処できていません。したがって、オープンサイエンスはオープンカルチャー運動から多くを学ぶことができますが、同時に新しい考え方も必要とします。

## 注記

以下の参考文献の中には、本書の出版後にURLが失効する可能性のあるウェブページが含まれています。これらのウェブページは、インターネットアーカイブのWayback Machine (<http://www.archive.org/web/web.php>) で復元できるはずですが、オンラインソースは非公式に書かれていることが多く、そのようなソースを引用する際にはスペルやその他のエラーをそのまま再現しました。

## 第1章 発見の改革

[p 1](#): Gowers は彼のブログ [79] で Polymath プロジェクトを提案しました。Polymath プロジェクトの詳細については [82] を参照してください

[p 2](#): Gowers による最初の Polymath プロジェクトの成功の可能性に関する発表: [81]。

### [p 2](#) Polymath

プロセスは「通常の研究と比較すると、運転と車を押すことの関係と同じ」でした: [78]。 [p 3](#): 集合知という用語

[p 3](#): 哲学者 Pierre Lévy [124] によって導入されました。集合知を測定し、それをグループの参加者の資質に関連させる刺激的な最近の試みは [243] です。 [p 3](#) 科学のプロセスは、過去 300 年間よりも今後 20 年間でより大きく変化するでしょう。作家の Kevin Kelly は [108] で同様の主

張をしています ([109] も参照)。「科学の次の 50 年間では、過去 400 年間よりも多くの変化が起こるでしょう。」私とケリー氏の考え方には、ある程度の共通点があります。例えば、私たちは共に協力と大規模データ収集の重要性を強調しています。一方で、私たちの考え方には大きな違いもあります。例えば、ケリー氏は三重盲検法の導入や科学賞の増額といった変化を重視していますが、私はこれらの変化は比較的小さな役割しか果たさないと考えています。そして、以下の3つの分野が最も重要だと考えています。

(1) 集合知とデータ駆動型科学、そしてそれらが科学の実施方法をどのように変えるか、(2) 科学と社会の関係の変化、(3) よりオープンな科学文化を実現するという課題。p 4: GenBankは<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>にあります。ゲノムにおけるヒト<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/projects/genome/assembly/grc/human/index.shtml>ハプロタイプ マップは<http://hapmap.ncbi.nlm.nih.gov/>で入手できます。

は 利用可能

p 7: バミューダ会議の直接の記録、特にバミューダ協定に関する声明は[211]に掲載されています。遺伝子データの共有に関するクリントン・ブレア声明ではバミューダ協定が明示的に言及されていませんが、そこで支持された原則は基本的にバミューダで合意された原則です。

この声明は[102]に記載されています。

p 7: データ共有を促進する団体協約の例として、バミューダ協定を挙げました。実際、GenBankに寄託される遺伝子データの量は、GenBank設立以来、約18ヶ月ごとに倍増しており、この傾向はバミューダ協定によって顕著に加速されたわけではありません。バミューダ協定がデータ共有の増加に本当にそれほど重要だったのか疑問に思う方もいるかもしれませんが、もちろん、データ共有の増加は、シーケンシング技術の向上によるところが大きいですが、生物学コミュニティがより自由にデータを共有しようという幅広い動きも、この増加の一因となっています。

バミューダ協定は、おそらく最も目立った表明ではあるが、その広範な取り組みの一部に過ぎない。

p 7: バミューダ協定の延長については、特にフォートローダーデール協定[237]を参照。p 7: インフルエンザデータの共有については、例えば[20]と[60]を参照。

2006年の鳥インフルエンザの発生、および[32] 2009~2010年の豚インフルエンザの大流行についてです。

p 10 私たちは、科学の第二の時代への移行期に生きています。データベース研究者のジム・グレイ[83]は、これに関連した主張をしています（グレイのエッセイが掲載されている書籍[94]も参照）。グレイは、私たちは今日、科学的発見のいわゆる「第四のパラダイム」に突入していると主張しました。これは、コンピューターがデータの意味の発見を手助けしてくれる、高度にデータ集約的な科学に基づくものです。グレイの説明では、この第四のパラダイムは、彼が科学の第一のパラダイム（経験的観察）、第二のパラダイム（観察を説明するためのモデルの形成）、そして第三のパラダイム（複雑な現象を理解するためのシミュレーションの使用）と呼ぶものの延長線上にあるものです。確かにデータ集約型科学は重要であり、第6章でこれについて論じます。しかし、グレイが捉える現在の科学の変化は狭すぎます。科学とは、データに意味を見出すことだけにとどまりません。科学者たちが協力して知識を構築する方法、そして科学コミュニティが社会全体とどのように関わっていくかということも、科学なのです。科学のこれらの側面も、オンラインツールによって変革されています。さらに、これらの変化はそれぞれが互いに影響を及ぼし、強化し合っています。例えば、データ集約型科学の影響を真に理解するには、科学者の働き方の変化を理解する必要があります。

一緒に。グレイの第4のパラダイムは、ネットワーク化された科学によってもたらされる変化のほんの一部にすぎません。

## 第2章 オンラインツールは私たちが賢くする

[p.15](#):カスパロフ対世界についての私の説明は、主にカスパロフの本（ダニエル・キングと共著）[107]とイリーナ・クラッシュのゲームの説明（ケネス・リーガンと共著）[115]に基づいています。

[p.15](#) 「チェス史上最も偉大なゲーム」：対局中 [186]、37手目の時点で行われたロイター通信によるカスパロフへのインタビューより。これはカスパロフによる興味深い長文コメントの一部である：「『これはチェス史上最も偉大なゲームだ。膨大な数のアイデア、複雑さ、そしてそれがチェスにもたらした貢献により、チェスは史上最も重要なゲームとなった』」 [p.19](#) :ジェームズ・スロウイェツキ『群衆の知恵』 [214]。 [p.20](#) :ニコラス・カーの著書『浅瀬』 [35]は以前の記事「グ

[グーグル](#)は私たちが愚かにしているのか？」[34]の拡張版である。関連する議論はジャロン・ラニアー[117]によっても行われている。

## 第3章 専門家の注目の再構築

[p.22](#): ASSET India、InnoCentive、Zacary Brownについて: [29, 222]。InnoCentiveに関する文章は、私の論文[153]の文章を大幅に拡張・改変したものです。 [p.23](#) 成功した解答者の多くは、Zacary Brown

と同様に、自分が解いた課題が自分のスキルと興味に非常に合致していると報告しています。成功した解答者の特徴については[116]を参照してください。この研究では、人々が自分の専門分野から外れた課題を解くことが多いことも明らかになっています。例えば、化学者は生物学の問題を解くかもしれません。

これは専門知識との密接な一致という主張と矛盾しているように思われますが、そうではありません。生物学上の問題を解決する上での重要な難しさは、化学における非常に特殊な専門知識である可能性があります。そのため、チャレンジの解答を詳細に見ると、専門知識との一致は非常に近い場合が多いのです。

[p.24](#) ザカリー・ブラウンは非常に大きな比較優位を持っているため、彼と ASSET は相互利益のために協力することができます。

「比較優位」は経済学の専門用語であり、私はその意味でこの用語を使用しています。他の場所で、人々が専門知識を可能な限り「最善の」方法（または同様の言葉）で適用すると言う場合、私の言う「最善」とは、絶対的優位を最大化するという意味ではなく、比較優位を最大化するという意味です。p 24 : 情報に溢れた世界における希少資源としての人間の注意力の重要性は、ハーバート・サイ

モン [197] の先見の明のある論文で指摘されていました。注意の経済学に関する印象的な思索的な研究は、マイケル・ゴールドハーバー [75] の論文です。[151] も参照してください。p

27 : 「設計されたセレンディピティ」という用語に関して、ジョン・ユードルは [228] で同様の概念を説明するのに「製造されたセレンディピテ

ィ」という用語を使用しています。私は「設計されたセレンディピティ」を使用しています。これは、意図的な設計選択の結果としてセレンディピティが達成される方法を強調しているからです。設計されたセレンディピティというアイデアは、オープンソースソフトウェア運動に端を発し、エリック・レイモンド [178] の、オープンソースソフトウェアのデバッグにおいて「十分な数の目があれば、すべてのバグは浅くなる」という観察に簡潔にまとめられている。レイモンドはこの観察を、Linuxの開発者リーナス・トーバルズにちなんでリーナスの法則と名付けた。リーナスの法則は他の問題解決にも一般化できる。「十分な数の目があれば、すべての問題は簡単になる」。これは文字通りの真実ではないが、設計されたセレンディピティの本質をある程度捉えていると言える。p 27 「グロスマン、助けてよ。さもないと気が狂ってしまう！」 : アインシュタインとグロスマンの物語は [169] に詳しく書かれている。p 30 : 会話の臨界質量に関する議論は、

---

[189]の第3章。

p30 ポリマス参加者はしばしば「他の参加者の偶然の発言がなければ考えなかったであろう考えを持っていることに気づいた」 : [80]。

p31 認知的多様性の価値については、例えばスコット・ページ [168] とフリードリヒ・フォン・ハイエク [93] の研究を参照のこと。p 32 : 「注意

のアーキテクチャ」という語句は、ティム・オライリーの「参加のアーキテクチャ」 [162] という洗練された語句に触発されている。オライリーはこの語句を「ユーザーの貢献のために設計されたシステムの性質を説明するために」使用している。私たちは創造的な問題解決のために設計されたシステムに興味があり、そのようなシステムでは専門家の注意の配分が最も重要である。p 34: アバターの従業員数は [65] による。p 36: 1983 年の Z ボソンの発見

は [4] で説明されている。p 37 「人口へのパンの供給を担当しているのは誰か」

---

「ロンドン？」 : ポール・シーブライトの『見知らぬ人々の集まり』 [190] を参照。

p37 価格が役に立つのは、価格が膨大な情報を集約しているからだ。  
隠された知識の量 : [93]

p38: この「愚かな質問」は、ポリマス参加者のライアンによって提起された。  
オドネル : [159]

[p.39](#):オンラインツールが従来型の市場と組織の両方を包含し、拡張しているという点について、理論家ヨハイ・ベンクラーは論文「コースのペンギン、あるいは、Linuxと企業の性質[12]」で関連する点を指摘している。ベンクラーは異なる焦点を当てており、創造的な問題の解決よりも商品の生産に関心を持っている。彼は、オンラインでのコラボレーションによって、市場や従来型の組織を超えた第3の生産形態が可能になったと提案し、それを「ピアプロダクション」と呼んでいる。これは、創造的な問題解決と商品の生産の両方にとって、あまりにも狭い視点だと私は考えている。オンラインツールは、特別なケースとして市場と従来型の組織の両方を包含するために使用でき、また多くの新しい生産形態と創造的な問題解決を可能にする。

つまり、私たちが今、第三の生産形態を持っているということではなく、これまでの生産形態をすべて特別なケースとして包含し、新たな生産形態を可能にする生産手段を持っているということです。

#### 第4章 オンラインコラボレーションのパターン

[p.44](#):オープンソースソフトウェア開発に関する洞察に満ちた記述としては、[12, 13, 178, 235]が挙げられる。さらに有用なのは、GitHub (<http://github.com>)などのサイトでオンライン上で維持されている無数のオープンソースプロジェクトである。および SourceForge (<http://sourceforge.net>)。 \_\_\_\_\_

[p.44](#)私のLinuxの歴史は、主に1991年と1992年にcomp.os.minix.alt.os.linux、comp.os.linuxニュースグループに投稿した内容に基づいています。これらのフォーラムを読むのは驚くほど楽しく、そして説得力さえありました。読み進めるうちに、現代の驚異的なソフトウェアを生み出すために何が関わっていたのかを、生々しく理解できるようになるからです。私のLinuxに関する記述は、[235]をはじめ、多くの情報源（詳細は下記参照）からも大きな影響を受けています。[p.45](#) Torvalds氏の投稿の直後… :comp.os.minixニュースグループへの投稿

1992年1月13日。

[p.45](#) Linuxのクレジットファイルには、貢献者として80名が挙げられている。クレジットファイルの履歴については[226]を参照。1994年3月が、Linuxにこのようなファイルが初めて含まれた年である。[p.45](#) 2008年初頭までに、Linuxカーネルは… [p.45](#):ハリウッドのアニ

メーションおよび視覚効果会社におけるLinuxの役割につ。 [114]。

いては、[90]を参照。2002年、つまりLinuxが業界に参入し、主流になり始めた時期のことである。[187]は、2008年の時点で、Linuxは「大規模なアニメーションおよび視覚効果会社のサーバーとデスクトップの95%以上」で使用されていると主張している。[p.45](#) オープンソースソフトウェアプロジェクトには、2つの重要な特性がある。オープンソースの支持者の中には、オープンソースについて、

私が説明した通りです。どのプロジェクトを真のオープンソースと見なすべきかについては、複雑で時に白熱した議論が数多く行われてきました。

実際、オープンソース・イニシアティブという非営利団体が存在するが、その目的の一つは、プロジェクトをオープンソースと呼ぶべきかどうか、またそうである場合には認証を与えることである。外部から見ると、これは杓子定規な批判のように見えるかもしれないが、それにはちゃんとした理由がある。オープンソースは、一部の大手ソフトウェア企業にとって脅威とみなされることがある。例えば、リーナス・トーバルズはかつてニューヨーク・タイムズ紙で「私はマイクロソフトを潰そうとしているわけではない。それは単に全く意図しない副作用に過ぎない」と述べたことがある [52]。オープンソースの脅威にさらされている企業の中には、オープンソース・ブランドを破壊しようとして反撃し、「オープンソース」と呼ぶ製品をリリースしているものもあるが、真のオープンソース・プロジェクトに備わっている重要な機能は備えていない。2001年5月、マイクロソフトの上級副社長クレイグ・マンディー [142] は、マイクロソフトが一部製品を「シェアード・ソース」としてリリースすると発表し、「シェアード・ソースはオープンソースである」と述べた。Microsoftの共有ソースライセンスをよく見てみると、Microsoft製品のユーザーに大きく偏っており、場合によってはプログラマーによるコードの変更を禁じていることがわかります。これは明らかにオープンソースではありません！このような事例は、オープンソース支持者が「オープンソース」という言葉をいい加減な形で使うことに憤慨する理由を如実に示しています。私たちは、オープンソースの本質を捉える、よりリラックスしたアプローチを取りますが、ここで説明するプロジェクトが、一部のオープンソース支持者が求める厳格なテストをすべてクリアできるかどうかといった複雑な問題には立ち入りません。

[p 46](#): Linuxカーネルに1日あたり4,300行のコードが追加されるという数字は、Greg Kroah-Hartman [113]によるLinuxカーネル開発プロセスについての有益な講演から引用したものです。  
[p 46](#) 経験豊富な開発者は通

常、15行のコードに対してaf:を記述します。

年間コード数:この推定はCOCOMO II ソフトウェア モデル [19] に基づいています。[p 46](#)

[SourceForge](#) には 230,000 以上のオープンソースプロジェクトが存在します: [239]。[p 46](#) オープンソースとは、デジタル情報を伴うあらゆるプロジェクトに適用できる一般的な設計方法論です。オープンソース方法論は、非デジタル情報にも適用できます。たとえば、建築家の印刷された設計図を基にしてオープンソースで建物を設計するといったことが考えられます。アナログ情報の問題は、繰り返しコピーされるうちに品質が劣化してしまうことであり、オープンソース方法論での有用性は限定的になります。

[p 46](#) オープンアーキテクチャネットワーク: <http://www.openarchitecturenetwork.org>。オープンアーキテクチャネットワークは、キャメロン・シンクレアの講演で紹介されました。[198]。  
[p 48](#): オー

ンソース生物学については、例えば[33]の第13章を参照してください。[p 49](#): Linux

のニアフォークに関する私の説明は、主にオンライン

Linuxカーネルメーリングリスト、[235]からの追加情報。

[p 51](#): オープンソース開発をモジュール化することの難しさについて、オープンソースに興味を持つ非プログラマーから時々聞くコメントは、プログラミングは「自然にモジュール化されている」というものです。これは



最終製品の大部分を占めるわけではありません。少数の大きな貢献が、多数の小さな貢献を圧倒してしまうこともあるでしょう。実際、多くのオープンソースプロジェクトではそれが起こっています。小さな変更は最も頻繁に行われますが、最終製品は依然として比較的大きなコードチャンクで占められています。すると、方向を逆転させて、小さな貢献はそれほど重要ではなく、むしろ邪魔だと結論付けたくなるかもしれません。しかし、これも間違いです。ハムレットから偉大な独白以外のすべてを取り除いた方がより良い劇になると主張するようなものです。大きな貢献も小さな貢献もどちらも重要です。大きな貢献は明白な理由で重要であり、小さな貢献は会話を前進させ、コラボレーションがより幅広いアイデアを探求するのに役立つため重要です。大きな貢献は、それらのアイデアの中から最良のものから生まれるのです。

[p.66](#) コラボレーションでは、[p.67](#) 「もし私が人生で参加した何かが

。 . . . .」 : この引用は、ウェブサイトredditのコメント投稿者AdmiralBumblebee [30]によるコメントからの抜粋です。なお、このコメントは本書第2章冒頭の資料の初期バージョンに触発されたもので、AdmiralBumblebee氏はそれが「商業的な誇大宣伝」とスポンサーのゲーム観を反映していると感じていました。しかし、私の説明はスポンサーであるMicrosoftの情報に基づくものではなく、主にカスパロフ氏とクルシュ氏による直接の証言に基づいており、他の複数の情報源によって裏付けられています。

## 第5章 集合知の限界と可能性

[p.69](#) シュタツサー=タイタスの実験については[204]で詳しく説明されており、私の簡略な説明よりもはるかに詳細な情報が含まれています。これらの実験のフォローアップ研究のレビューは[203]です。集合知がどのように失敗するかについて、より広範な概要をまとめたサンスティーンの本『インフォトピア』 [212]は、参考になります。

[p.75](#) ワールドチームの強力なプレイヤーは、通常、どの分析が最適かについて合意できました。これには大きな例外があり、ゲームの初期段階でマイクロソフトがワールドチームのアドバイザーに互いに相談しないように依頼したため、合意に達する機会がありませんでした。

しかし、より強力なワールドチームの選手たちの多くは密接に連絡を取り合っており、頻繁に合意に達することができました。[p.78](#) 集団知性の限界、および集団思考、情報カスケードな

[この問題](#)については、[99,212,213,214]とそこに含まれる参考文献を参照してください。

[p 79](#):アインシュタインの考えが急速に受け入れられた点については、ローレンツやポアンカレといった著名な科学者がほぼ同時期に同様の結論に達したことが一因となった。アインシュタインの相対性理論の定式化はローレンツやポアンカレの定式化よりもさらに過激であったにもかかわらず、相対性理論を考える正しい方法としてすぐに受け入れられた。

[p 79](#): DNAの発見とポーリングの誤りについては、ワトソンの回想録を参照。  
二重らせん[234]

[p 80](#) 「ファインマンが三度言ったら、それは正しい」 : [72]

[p 84](#):この例を構築するのに協力してくれたマーク・トーヴィーに感謝します。  
錯視と認知科学。

[p 85](#): コラボレーション市場については、[246]と[146]も参照。[p 85](#): トポロジカル量子コンピューティングの議論は[22]に触発されています。  
トポロジカル量子コンピュータはもともとキタエフ[111]の注目すべき論文で提案されました。

## 第6章 世界のすべての知識

[p 91](#): スワンソンによるマグネシウムと片頭痛の関連の発見は [215] で説明され、[216] でレビューされています。[p 92](#): 片頭痛とマグネシウムの関連に関する興味深い疑問は、な

ぜこの関連が、たとえばてんかんを研究している科学者によって発見されなかったのかということです。彼らの中には、てんかんと片頭痛およびマグネシウム欠乏の関連を認識していたと思われる人もいます。推測すると、この関連が気づかれなかった理由は、(1) これらの科学者がてんかんの理解に主に焦点を当てており、他の病状の理解には焦点を当てていなかったこと、および (2) 片頭痛とマグネシウム欠乏を結び付ける単一の関連だけでは、何かを推測するには十分なパターンではないためである可能性があります。てんかんは多くの異なる病状に関連していますが、そのほとんどは互いに直接的な関連がありません。

[p 92](#): スワンソンの手法について言えば、既存の科学的知識から未発見の知識を推論すること自体は、もちろん目新しいことではありません。私の専門分野である理論物理学のような分野では、これは標準的な手法です。しかし、スワンソンがコンピューターを用いてこのアイデアを医学に体系的に応用したことは斬新であり、多くの科学分野で同様のデータマイニング技術が爆発的に普及する前兆となりました。[p 93](#): 拡張された心の概念については[43]で議論されています。[p 93](#):

Google検索クエリを用いてインフルエンザ

を追跡する論文は[71]です。[p 93](#): インフルエンザの年間死亡率は世界保健機関 (WHO)のデータに基づいています。

---

組織[244]。 [p 93](#) : スペイ

ン風邪の死亡率は[219]からのものである。

[p 94: Google Flu Trends のウェブサイトはhttp://www.google.org/flutrends です。](http://www.google.org/flutrends) [p 94: CDC/ゼネラル・エレクトリックのインフルエンザ追跡システムについては \[136\] で説明されている。](#)

Google Flu Trends はインフルエンザ様疾患の追跡に、検査で確認されたインフルエンザ症例の追跡よりも優れていることを示した追跡研究は [163] である。[p 94: 検索クエリを使用して失業率を予測する方法については \[6\] を参照。](#)

[クエリを使用して住宅価格を予測する方法については \[245\] を参照。](#) [検索クエリを使用して、曲がチャートでどれだけうまくいくかを予測する方法については \[73\] を参照。](#) [幅広い応用例については \[42\] を参照。](#) [Twitter を使用して映画の興行収入を予測する研究は \[7\] である。](#) 最後に、Google を「[人間の] 意図のデータベース」として考える興味深い議論については [11] を参照。

[p 95: プライバシーに関するエリック・シュミットについて](#)

は、[\[64\]](#)を参照してください。[p 96: この文脈で「未知の既知」というフレーズは、ジェン・ドッドとハッサン・マサムによって提案されました。これは、元米国防長官ドナルド・ラムズフェルドの有名な「未知の未知」という言葉 \[188\] に触発されたものです。](#) [p 97: スローン銀河のグレート](#)

[ウォールの発見については、\[77\]で説明されています。](#)

スローン グレートウォール銀河は重力的に結合しているようには見えないため、一部の天体物理学者はこれを単一の構造とは見なしていません。

しかし、このセクションで語られる物語の多くは、宇宙の他のいくつかの大規模な特徴にも当てはまりません。スローンの万里の長城を私が選んだのは、いくぶん恣意的なものでした。

[p 100: 天の川銀河の近くにある多数の矮小銀河の発見は、複数の論文で説明されています。](http://www.sdss.org/signature.html) <http://www.sdss.org/signature.html> で のために 一つの 概要、 見る

---

[p 100: 軌道を回るブラックホールの発見については、\[25\]で説明しました。本文では、ボロソンとラウアーがSDSSの銀河画像を検索したと述べています。より正確に言うと、彼らは17,500個のクエーサー（超大質量ブラックホールを含むことが知られている特別なタイプの銀河）を選択して検索しました。クエーサーとは何か、そしてなぜそれが興味深いのかについての詳細は、130ページの説明を参照してください。天文学と天体物理学のコミュニティでは、\[25\]の発見が実際に軌道を回るブラックホールのペアであるかどうか、または何か他のものかどうかについてかなりのフォローアップの議論が行われていることに注意する必要があります。この議論は継続中です。](#) [p 101: スローンデジタルスカイサーベイについては\[247\]で説明しました。この論文の引用数はGoogle Scholarサービスから取得しました。これらの数字は、SDSS の後続のデータリリースやその他多くの重要な論文](#)

[の引用が含まれていないため、控えめな数字です。](#) [p 102: SDSS は、コラボレーションとデータ共有に関するポリシーの多くを <http://www.sdss.org/collaboration/> で成文化しています。驚くほど刺激的な読み物です。](#)

---

[p 102: SDSS SkyServer はhttp://skyserver.sdss.org にあります。](http://skyserver.sdss.org)

p.104:ワトソン、クリック、フランクリンについてはワトソンの回想録『二重らせん』 [234]を参照。p.105: SDSSステージIIIのウェブページ

ジは<http://www.sdss3.org>にある。 p.105:海洋観測イニシアチブに関する私の説明は、ウェブサイト<http://www.oceanleadership.org/programs-and-project-partnerships/ocean-observing/ooi/>と[50]に基づいていません。 p.106:脳のマッピングはあまりにも広大なテーマであるため、包括的な参考文献リストを示すことは、アレン脳アトラスに関する研究の概要は、ジョナ・レーラーの優れた

論文 [120] に記載されています。私が述べる事実のほとんどは、その論文からのものです。マウス脳の遺伝子発現アトラスを発表した論文は [121] です。ヒトコネクトームのマッピングにおける進歩と課題の概要は、[119] と [125] に記載されています。

p.108: バイオインフォマティクスとケモインフォマティクスは現在では確立された分野であり、多くの文献も存在するため、特に言及すべき文献を挙げるつもりはありません。アストロインフォマティクスは比較的最近登場したばかりです。特に [24]には、アストロインフォマティクスの必要性を訴える宣言が掲載されています。

p.113: 2005年のPlaychess.comフリースタイルチェストーナメントのレポートは[37]に掲載されており、優勝者に関する解説は[39]に掲載されています。ガルリ・カスパロフによる結果に関するコメントは、コンピュータとチェスに関する興味深い記事[106]に掲載されています。Hydraの関与に関する追加解説は[38]に掲載されています。興味深いことに、Hydraは通信チェスのグランドマスターであるアルノ・ニッケルと通信チェスで2度対戦し、敗れています。ただし、ニッケルはこれらの対戦でコンピュータチェスプログラムを使用することが許可されていました。Hydraの対戦の全記録は[40]に掲載されています。p.119: チャック・ハンセンの本は[92]です。私がハンセンの

---

この方法論はリチャード・ローズの著書「How to Write」 [182]の61ページに記載されています。p.120: セマンティック

ウェブについては、[16,15]と<http://www.w3.org/standards/semanticweb/>を参照してください。刺激的な別の観点が [88] である。p.120: オバマ大統領の透明性と開かれた政府に関する覚書については [158] を参照。p.123: アインシュタインの一般相対性

理論の美しい要約「時空は物質にどのように移動するかを伝え、物質は時空にどのように曲がるかを伝える」は、ジョン・ホイーラーに

よるものである [240]。p.125 これらのモデルは「hola」や「hello」の意味を理解しない。ここでは「理解」という言葉を日常的な意味で使っている。しかし、いつか私たちが「理解」という言葉で意味することは、これらのモデルにおける統計的関連性の種類によって部分的に（しかし

部分的にしか）捉えられていることに気づく日が来るのではないと思う。p.125 Google 翻訳チームで中国語やアラビア語を話せる人は一人もいなかった。 [69]。p.128: ブランクのコメント「私はそれ（量子論）についてはあまり考えなかった」はヘルゲ・クラークの記事 [112] からの引用である。

---

---

## 第7章 科学の民主化

[p 129](#):私のGalaxy Zooに関する記述は、Galaxy Zooブログ (<http://blogs.zooniverse.org/galaxyzoo/>)に基づいています。Galaxy Zoo フォーラム、<http://www.galaxyzooforum.org>、[クリス・リントンとケイト・ランドによる記事](#)[127]も参照。Hanny's Voorwerpに関する資料は、Hanny van Arkelのブログ<http://www.hannysvoorwerp.com>からも引用している。そして、[Hanny van Arkel氏によって開始された最初の議論スレッド](#)[67]。Voorwerpに関する最初のGalaxy Zoo論文は[128]です。[p 131](#): Voorwerpに関する別の説明は[105, 177]に記載されています。

ギャラクシー動物園の共同設立者であり飼育員でもあるクリス・リントンによるこの代替説明についてのコメントは[126]に掲載されています。

[p 135](#):アリス・シェパードによるグリーンピース銀河の発見に関する記述は[193]にあります。ズーイテスが見た銀河の画像は擬似カラーであり、「グリーンピース」は実際には赤に近いことに注意してください。[p 138](#):ヘリウム発見に関する興味

深い短い記事が[118]にあります。[p 141](#):ボブ・ニコルの「『真ん中に棒状のものが入っている銀河はいくつあるか』という質問をすると、私は通常、この根本的な疑問に答えるために生涯をかけて探求することになります…」という発言は[149]からの引用です。

[p 143](#): Foldit は<http://fold.it>にあります。Folditの優れた概要は[46, 21]にあります。[p 147](#): Folditに関するAotearoaについては、[1]と[2]

を参照してください。[p 148](#): 2008 CASPのFolditの結果は[174]にあります。[p 149](#): ジョン・カイスター・ベネットによる1968年の大彗星の発見については、[104]を参照してください。

[p 149](#): 彗星ハンターRainer Krachtのホームページ<http://www.rkracht.de> / [彼が発見した彗星のリスト](#)があります。SOHOの彗星探査の成功の背景については、<http://sungrazer.nrl.navy.mil/> をご覧ください。

[p 150](#): eBirdのウェブサイトは<http://ebird.org>です。このプロジェクトについては[210]で説明されている。貢献件数と貢献者に関する情報は<http://www.avianknowledge.net/content/datasets>から引用した。そして[209]。[p 150](#): オープン恐竜プロジェクトは

<http://opendino.wordpress.com/>にあります。プロジェクトの概要は[220]に記載されています。[p 151](#): Galaxy Zooデータを使用してコンピューターアルゴリズムをトレーニングすることは、[10]に記載されている。

[p 153](#): クレイ・シャーキーによるWikipediaの分析は[195]に掲載されています。この記事は「認知的余剰」というフレーズの由来でもあります。シャーキーはこれらの考えを[194]で詳しく展開しています。[p 153](#) アメリカ人は平均して

1日に5時間テレビを見ています: [156]。[p 154](#): クレイ・シャーキーの「愛のために大きなことをする」という考えは、彼の洞察に満ちた著書『Here Comes Everybody』 [196]で詳しく展開されています。「私たちは

「愛のためには小さなことが起き、お金のためには大きなことが起きる世界に慣れている…」は、その本の104ページからの引用です。

~~p.155~~ 「私の人生は永遠に変わりました…」 :[132]。

~~p.155~~: 1988年のポリオ発生率のデータは[141]からのものです。p 155:

2003年のポリオ発生率のデータは世界ポリオ撲滅計画からのものです。

ポリオ撲滅イニシアチブの 2003 年度年次報告書は、 <http://polioeradication.org> から入手できます。

~~p.155~~: ナイジェリアによるポリオ予防接種プログラムのボイコットについては[101]で説明されている。p 156: ワクチンと自閉

症の関連性に関する文献レビューは[68]である。このレビューの証拠は、因果関係がないことを強く示唆している。p 156: 麻疹・おたふく風邪・風疹の予防接種率と麻疹感染率の数値は[135]から引用しており、保健保護庁のデータに基づいている。

---

~~p.160~~: オープン アクセスに関する最も優れたリソースは、Peter Suber の注目すべきブログです(<http://www.earlham.edu/~c5e/fos/fosblog.html>)。このブログは2010年4月をもって終了しましたが、アーカイブを閲覧してみる価値は十分にあります。Suber氏はオープンアクセスの概要[207]とタイムライン[208]を作成しており、どちらもオープンアクセスの全体像を把握するのに非常に役立ちます。Suber氏らはオープンアクセス追跡プロジェクトを継続しており、アーカイブは<http://oatp.tumblr.com/>でご覧いただけます。オープンアクセスに関する本全体の概要については、[241]を参照してください。p 161: arXivは<http://www.arxiv.org>でオンラインで利用できます。arXivは物理学の分野で始まりましたが、その後、数学やコンピュータサイエンスなど他の分野にも広がっています。本書では物理学の側面に焦点を当てており、arXivが最も優勢な分野である物理学に焦点を合わせているため、物理学arXivと呼ぶこともありま

す。

---

~~p.162~~: Public Library of Science (PLoS) の Web サイトは<http://plos.org> です。PLoSは最初のオープンアクセスジャーナルではありませんが、最も初期のジャーナルの一つであり、多くの点で先駆的な役割を果たしてきたため、私はPLoSに焦点を当ててきま

した。p.162: NIHパブリックアクセスポリシーの概要については、[206]を参照してください。簡潔ですが、多くの有益なリンクが含まれています。p 162:

NIHの予算 <http://www.nih.gov/about/budget.htm> 情報は から

---

~~p.164~~: エルゼビアの収益と利益の数値は、2009年リード・エルゼビア年次報告書[181]に基づいています。p 164: アメリカ化学会の収益と

利益の数値は[131]に基づいています。p 164: エリック・デゼンホールと出版社業界団体（アメリカ出版社

協会）に関する私の記述は[70]に基づいており、背景情報は[100]から追加しています。PRISMからの引用は[176]に基づいています。

[p 165](#):サイモン・シンが英国カイロプラクティック協会 (BCA)を批判した原論文は[199]である。ダガンズとグリーンによるシン事件に関する論文は[56]である。私の議論は、ベン・ゴールドエーカー[74]とマーティン・ロビンズ[185]の論文からも恩恵を受けている。BCAによるカイロプラクティック治療の有効性に関する証拠の説明は[221]である。オープンソースソフトウェアの世界における同様のウィキ訴訟の例としては、SCOという企業が自社のコードがLinuxに組み込まれていると主張し、その結果、SCOはNovellやIBMなどの企業を訴えたケースがある。これらの訴訟は、Groklaw (<http://groklaw.net>)というコミュニティウェブサイト非常に詳細に取り上げられている。パメラ・ジョーンズというパラリーガルによって設立されました。

---

[p 167](#): Pharyngula は<http://scienceblogs.com/pharyngula/> にあります。デモン・レジスター紙とソルトレイク・トリビューン紙の発行部数に関する数字は、監査局発行部数[8]から得たものである。

[p 170](#):イースター島に関する私の記述は、ジャレド・ダイヤモンドの著書『文明崩壊』 [53]に基づいています。イースター島の歴史の再構築は困難かつ複雑であり、学者の間でも多くの論争的的となっています。当然のことながら、ダイヤモンドの記述に異議を唱える人もいます。[p 171](#): HIV/AIDSの影響が最も大きいアフリカ諸国における平均寿命の短縮については、[103]を参照してください。

[p 171](#):創意工夫のギャップを埋める方法については、[133]を参照。

## 第8章 オープンな場で科学を行う課題

[p 173](#):ガリレオの業績に関する私の説明は [238] に基づいています。[p](#)

[174](#):ガリレオとバルダッサーレ・カプラの事件については [17] を参照してください。[p 175](#):

科学における発見のオープンな共有の起源に関する私の説明は、ポール・デイヴィッドの記事 [49] に一部基づいています。デイヴィッドは、科学におけるオープン性の出現は論理的に必然的なものではなく、科学内部の力だけでなく、科学コミュニティに作用した外部の力の結果であることが多いと指摘しています。デイヴィッドの分析は近代科学の最も初期の部分に焦点を当てており、君主やその他のパトロンによる威信の追求が研究成果のオープンな開示の動機であったことを強調しています。私の説明では、オープンサイエンスから得られる公共の利益から来る動機も強調しています。この動機は、君主の力が弱まるにつれて、後世にさらに強力になったようです。

[p 176](#): qwiki は[http://qwiki.stanford.edu/wiki/Main\\_Page](http://qwiki.stanford.edu/wiki/Main_Page) でオンラインになっています。qwiki の説明では、定期的に更新されるのは少数のページだけであると述べています。実際、このサイトには定期的に注目を集めている部分があります。それは「Complexity Zoo」です。これは、さまざまな種類の計算問題を解説するコンピュータ科学者向けのリソースです。Complexity Zooには、別途

しかし、これはqwikiとは全く関係のないプロジェクトに基づいており、後にqwikiに統合されたため、考慮すべき事項ではありません。そのため、この議論では「Complexity Zoo」を別個の存在として扱っています。qwikiの他の部分が失敗したのに、なぜComplexity Zooが成功したのかという疑問は当然興味深いものです。この質問に完全に答えるのは複雑ですが、簡単に言うと、Complexity Zooの対象範囲はqwikiよりもはるかに狭く、その狭い範囲ゆえに、たった一人の熱心な人物（現在はMITに所属するスコット・アーロンソン）がそれを構築し、コンピュータサイエンスのコミュニティで非常に有用でよく知られたリソースにすることができたのです。

すでに高い知名度と狭い範囲という組み合わせにより、少数の人々が時折その維持に貢献するようになりました。

[p.176](#): 「ウィキサイエンス」という用語は、ケビン・ケリー[108]のエッセイで導入されたようです。同様のアイデアは、多くの人々によって独立して（場合によってはそれ以前に）提案されていました。ウィキの初期の貢献者によるインターネット上の議論は、Meatball wikiで見つけることができます。[137]と[138]。[p.178](#): 物理学者の雇用と卒業データは、アメリカ物理学会の「物理学者および関連科学者の最新雇用データ」（<http://www.aip.org/statistics/>）に基づいています。信頼できるデータが揃っているのも物理学を選びました。他の分野からの体験談からも、状況は同様であることが分かります。

---

[p.178](#) 科学系ウィキで成功しているものは、通常、より従来のなプロジェクトを補助する役割を担っています。このルールの注目すべき例外は、遺伝子を注釈付けるウィキベースのプロジェクトとして成功しているGene Wikiです。Gene Wikiが成功した理由の一つは、独立したウィキではなく、Wikipediaのサブプロジェクトであるという点です。Wikipediaで遺伝子を調べたことがある人なら、Gene Wikiプロジェクトの一環として行われた作業を目にしたことがあるでしょう。Gene Wikiは、Wikipediaの編集と改善に既に多くの時間を費やしている人々、そして検索エンジンでWikipediaページがしばしば高い可視性を持つことから恩恵を受けています。[p.179](#): ユーザー投稿型コメントサイトに関する別の視点については、

---

科学については、[148]

を参照。[p.179](#): Nature によるオープンピアレビューの試行に関する最終報告書:

[\[167\]](#)、[p.180](#): 科学向けのユーザー投稿コメントサイトは失敗しているが、科学者が他の科学者の研究についてオンラインでコメントすることを常に嫌がるわけではない。259ページから始まるこの種の例を見ることができ、科学ブロガーが、英国カイロプラクティック協会がサイモン・シンの論争で提示したカイロプラクティックの証拠を調査している。他の例としては、(1) 2010年のポリマススタイルのコラボレーション[173]があり、数学者、コンピュータ科学者、物理学者のグループがオンラインで協力して、コンピュータサイエンスにおける最大の未解決問題の1つに対する主張された解決策を分析しました。(2) ヒ素を含む生命体を発見したというNASAの2010年の発表[242]を分析したブログベースのオンラインディスカッション[180] (3) Faculty of 1000 (<http://f1000.com/>) 限定された人材を積極的に募集するサイト

---

生物医学論文のレビューを書く著名な研究者の数、および (4) MathSciNet (<http://www.ams.org/mathscinet/>) 数学に関する同様のサイト。いずれの場合も、潜在的な貢献者に対するインセンティブは、私が説明したユーザー投稿型コメントサイトとは全く異なる。ここではインセンティブを分析しない (このセクションの目的は、科学者のオンラインコメント習慣を包括的に分析することではない)。しかし、いずれの場合も詳細な分析により、科学者がコメントするインセンティブは、ユーザー投稿型コメントサイトよりもはるかに強いことが示されていることに注意されたい。p 182の「[論文]を出版するか、減じるか」は「[データを]出版するか、減じるか」ではなく[171]からの引用である。

---

## 第9章 オープンサイエンスの必然性

= "0em" width="1em" align="justify"> p 187: Tobias Osborne の量子コンピューティングに関する研究ブログは<http://tjoresearchnotes.wordpress.com/>にあります。オープンノートブックサイエンスのアイデアは、ジャン＝クロード・ブラッドリー [26] とキャメロン・ネイロン [147] によって詳細に展開されています。ブラッドリーのブログ(<http://usefulchem.blogspot.com/>)も参照してください。そして ネイロンのブログ(<http://cameronneylon.net/>)。 p 187 オープンサイエ

ンスは「ほとんどの科学者に同時にそして完全に行動を変えることを要求するだろう： [164] p 188 : スウェーデンの左側通行から右側通行への変更の詳細については、[217]と[97]を参照してください。私の説

明の言葉遣いは、スティーブン・ピンカー[170]の素晴らしい文章に触発されています。彼は次のように書いています。「左側通行から右側通行への変更は、大胆な非順応主義者や草の根運動から始まることはできず、トップダウンで課されなければならない (そしてそれは1967年9月3日日曜日午前5時にスウェーデンで起こったことである)」。 p 188: 実際、『ジャーナル・デ・シャヴァンス』は『王立協会哲学論文集』より数か月早く創刊されたため、世界初の科学雑誌であると主張している。しかし、『ジャーナル・デ・シャヴァンス』は科学的な内容と非科学的な内容が混在していたため、この点は議論の余地がある。 p 188: メアリー・ボアス・ホールによる、オルデンバーグが懇願したことに関するコメント

---

当時の科学者からの情報は[89] (159ページ)に記載されています。

p 191: 遺伝子データの共有に関する政策状況は急速に進化しています。ゲノムワイド関連研究に関する方針を含む、国立衛生研究所 (NIH) の方針の概要については、[143]を参照。パミュダ協定を支持する国立ヒトゲノム研究所の具体的な方針については、[96]を参照。ウエルカム・トラストの方針については、[236]を参照。

p 191: 英国医学研究会議のオープンデータに関する方針は[229]に記載されている。

[p 191](#) 広報担当者は、この発表はすべてのデータがオープンにアクセス可能となるための取り組みの「第1段階」に過ぎないと述べた。[140] [p 191](#): OECDの公的資金による研究へのオープンアクセスに関する勧告  
研究データは[160]にあります。

[p 191](#): 「科学共和国」という表現は、マイケル・ポラニーの同名の優れたエッセイ [172] から引用されています。このエッセイは、とりわけ、科学における過度の中央集権化の危険性、まさに今日の助成機関が抱えているような中央集権化について論じています。(ポラニーが執筆していた当時、助成機関の予算ははるかに少なく、したがって権限もはるかに小さかったのです。)私はポラニーの懸念に賛成です。実際、「科学の寡頭制」に関する続編のエッセイを書きたくなる衝動に駆られますが、現在の議論の要点は、言うまでもなく、私たちが暮らす現実の世界において最善の行動を見つけることであり、理想化された世界において最善の行動を見つけることではありません。

[p 193](#): アイデアの所有権と科学における見えざる手については、[172,48]を参照。見えざる手の説明に関する興味深い一般的な記事は[230]です。

「評判経済」という言葉の起源はわかりません。1990年代から(あるいはそれ以前から)広く使われていますが、その考え方はもっと古いものです。

[p 194](#): SPIRES は<http://www.slac.stanford.edu/spires/>にあります。物理学のプレプリント arXiv は、前述のとおり、<http://arxiv.org> にあります。 [p 195](#): 科学を測定する新しい方法については、例えば[175]および

そこに記載されている参照事項。

[p 196](#): 知識構築のための新しいツールの開発に関して、私はこれらのツールを構築する責任の大部分を科学者に負わせてきました。そのようなツールの開発は大学図書館や科学出版社の仕事だと反論されるかもしれませんが、しかし、そのようなツールを生み出すべき場所は科学者自身であると考えられる理由は数多くあります。例えば、本書で私が挙げた例のほぼすべて — Polymath Project から GenBank、arXiv まで — は科学者によって作成されたものであることを考えてみてください。

図書館や科学出版社は、ほとんどの場合、リスクの高い革新的なイノベーションに取り組む体制が整っていません。むしろ、既存のやり方を着実に改善していくことに重点を置いています。図書館や出版社は多くの優秀な人材を雇用していますが、彼らが根本的に新しいツールを開発しようとする、しばしば組織内の大きな慣性と闘わなければなりません。結果として、新しいツールを生み出す最適な場所は、科学者自身です。図書館や出版社が果たすべき役割は、より後、最も成功したツールを維持し、さらに発展させるパートナーとしての役割であると私は考えています。

まさにこれが、科学者によって始められたarXivやGenBankといったプロジェクトで起こったことです。しかし、その成長とさらなる発展は、それぞれコーネル大学図書館や米国国立医学図書館との提携を通してもたらされました。[p 196](#): 前回のノートのテーマに続き、新しいソフトウェアツールの開発は中央集権的な機関の仕事ではないかと考える方もいるかもしれません。例えば生物

[学](#)では、多くのソフトウェアツールが

米国国立医学図書館の一部である国立生物工学情報センター (NCBI)で開発された。NCBIは GenBankの運営を担っており、他の多くの重要なオンライン生物学データベースの開発やサポートにも貢献してきた。NCBIは貴重なサービスを提供する一方で、イノベーションを集中化し、NCBIの潤沢な資金力に太刀打ちできない潜在的な競合相手を排除してしまう側面もある。長期的には、科学はイノベーションに対してより分散的なアプローチをとる必要があると私は考える。196ページ :科学の融合の限界については、[154]を参照。198ページ :プライバシー、倫理、安全性、合法性に関する期待については、当然ながら進化していきだろう。Patients Like Me (<http://patientslikeme.com>)のようなサイトは、医療患者に医療情報を自発的に共有するよう求めており、多くの患者が、その情報を研究目的で利用できるようにするために、これに協力している。

---

p 198:グロタンディークの引用は[85]からのものである。また、[200]の第18章でこの引用を知りました。

p 198:共同作業における注意の管理の問題は、[76]で実験的に研究されている。彼らの研究結果はここでの分析と一致しており、グループでの問題解決は、全員が全員とコミュニケーションをとると実際には効率が悪くなる可能性があることを示している。p 200:トレンバースの電子メールの説明と (明らかに本物の)元の電子メールへのリンク

は、[44]で見つけることができる。トレンバースの元の論文[225]は非常に読みやすい。p 201:ケプラーのデータの管理については、[91, 166]を参照。2011年2月の地球サイズの惑星の発表については、[129]を参照。2010年9月に

別のチームが独立して、グリーゼ581の周りを回る地球のような惑星を発見したと発表したことに留意されたい[232]。この発見はその後異議を唱えられている[110]。

p 201:ドリゴがヒッグス粒子発見の噂を耳にしていたという発表は[54]に掲載されており、その撤回は[55]に掲載されている。主流メディアの報道には[47, 41]が含まれる。p 202:有限単純群の分類の歴史については[201]で議論されている。分

類の現状については[5]で議論されている。p 203他の科学者はどのようにしてこのような実験結果を検証し、再現することができるか? :例えば[205]およびそこに含まれる参考文献を参照。

---

p 203: 「個人の理解を超えた科学」については、[155]を参照。p 203世界中で、各国政府は毎年1000億ドル以上を基礎研究に費やしている。この主張は、米国国立科学財団 (NSF)の報告書第4章[144]に基づいている。同報告書に記載されている数字によると、米国政府は毎年390億ドルを基礎研究に費やしている。同報告書は世界全体の政府による基礎研究支出の総額を直接算出していないため、1000億ドルという数字は同報告書の他のいくつかの数字に基づく推定値である。

[p206](#):ダニエル・ヒリスの「解決不可能な問題がある」という引用は、スチュワート・ブランドの著書『The Clock of the Long Now』 [27]の157ページからの抜粋です。

## 付録

[p 211](#):密度ヘイルズ・ジュエット定理 (DHJ定理)の簡単な入門書は、[66]に掲載されています。組合せ線概念の説明も含まれています。p [212](#):セメレディの定理については[218]を参照してください

[い。グリーン・タオ](#)定理は[84]で証明されています。p [212](#): DHJの最初の証明は[66]に掲載されています。

---

## 参考文献

- [1] アオテアロア。Boing Boing (ブログ)のブログ投稿へのコメント。2009年5月3日。<http://www.boingboing.net/2009/05/03/wasting-time-for-ag.html#comment-481275>。
- [2] アオテアロア。Natureニュースブログのブログ投稿へのコメント、2009年3月23日。[http://blogs.nature.com/news/2008/05/addictive\\_protein\\_folding\\_game.html#comment-97818](http://blogs.nature.com/news/2008/05/addictive_protein_folding_game.html#comment-97818)。
- [3] オリバー・アラファトとディルク・リール。オープンソースソフトウェアのコミットサイズの分布。2008年第42回ハワイ国際システム科学会議の議事録。
- [4] G. Arnisonら。CERN SPS衝突型加速器における不変質量レプトン対の実験的観測。Physics Letters B, 126(5):398–95 GeV/c<sup>2</sup> 410, 1983。
- [5] マイケル・アッシュバッハー。有限単純群の分類の現状。アメリカ数学会誌51(7):736–740, 2004年8月。 <http://www.ams.org/notices/200407/fea-aschbacher.pdf>。
- [6] ニコラオス・アスキタスとクラウド・F・ツインメルマン「グーグル計量経済学と失業予測」応用経済学季刊誌、55:107–120, 2009年。
- [7] シタラム・アスールとベルナルド・A・フーバーマン「ソーシャルメディアで未来を予測する」電子プリントarXiv:1003.5699、2010年。
- [8] 監査局発行部数調査、ACCESS ABC :米国新聞向けeCirc、2010年。  
<http://abcas3.accessabc.com/ecirc/newstitlesearchus.asp>。
- [9] ロバート・M・アクセルロッド『協同組合の進化』ニューヨーク :ベーシックブックス、1984年
- [10] Manda Banerji, Ofer Lahav, Chris J. Lintott, Filipe B. Abdalla, Kevin Schawinski, Steven P. Bamford, Dan Andreescu, Phil Murray, M. Jordan Raddick, Anze Slosar, Alex Szalay, Daniel Thomas, Jan Vandenberg. Galaxy Zoo: 機械学習による銀河形態の再現。Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 406(1):342–353, 2010年7月。 eprint arXiv:0908.2033。
- [11] J.パテル『検索 :グーグルとそのライバルはいかにしてビジネスのルールを書き換え、私たちの文化を変えたのか』ボストン :ニコラス・ブリーリー、2005年
- [12] ヨハイ・ベンクラ「コースのペンギン、あるいは、Linuxと企業の性質」イェール・ロー・ジャーナル、112:369-446、2002年。
- [13] ヨハイ・ベンクラ『ネットワークの富』イェール大学出版局、2006年。
- [14] ティム・バーナーズ＝リー『Weaving the Web』ニューヨーク :ハーパー・ビジネス、2000年。
- [15] ティム・バーナーズ＝リーとジェームズ・ヘンドラー「セマンティックウェブ上の出版」 Nature、410:1023-1024、2001年4月26日。
- [16] ティム・バーナーズ＝リー、ジェームズ・ヘンドラー、オーラ・ラッシーラ「セマンティック・ウェブ」サイエンティフィック・アメリカン、2001年5月17日
- [17] マリオ・ピアジョーリ『ガリレオの功績の道具 :望遠鏡、像、秘密』シカゴ :シカゴ大学出版局、2006年。
- [18] ピーター・ブロック『コミュニティ :帰属の構造』サンフランシスコ :ペレット社ケラー、2008年。

- [19] バリー・ボーム、ブラッドフォード・クラーク、エリス・ホロウィッツ、レイ・マダチー、リチャード・シェルビー、クリス・ウェストランド。将来のソフトウェアライフサイクルプロセスのためのコストモデル :COCOMO 2.0. *Annals of Software Engineering*, 1(1):57-94, 1995.
- [20] ピーター・ボグナー、イラリア・カプア、デビッド・J・リップマン、ナンシー・J・コックス他「鳥インフルエンザデータ共有に関する世界的取り組み」 *Nature*, 442:981, 2006年8月31日
- [21] ジョン・ボハノン「ゲーマーがタンパク質の秘密を解き明かす」 *Wired*, 17(5), 4月20日、[http://www.wired.com/medtech/genetics/magazine/17-05/ff\\_protein?2009](http://www.wired.com/medtech/genetics/magazine/17-05/ff_protein?2009)。現在のページをすべて。
- [22] パルサ・ボンダーソン、サンカール・ダス・サルマ、マイケル・フリードマン、チェタン・ナヤック。トポロジカルフォールトトレラント量子コンピュータの青写真。eprint arXiv:1003.2856, 2010。
- [23] クリスティン・L・ボグマン『デジタル時代の学問』ケンブリッジ、マサチューセッツ州 :MITプレス、2007年。
- [24] カーク・D・ボーン他「アストロインフォマティクス :21世紀の天文学へのアプローチ」 eprint arXiv: 0909.3892, 2009。Astro2010十年調査国家の立場表明書、<http://arxiv.org/abs/0909.3892>で入手可能。
- [25] トッド・A・ボロソンとトッド・R・ラウアー「サブパーセク超大質量連星ブラックホール候補系」*ネイチャー*, 458:53-55, 2009年3月5日。
- [26] Jean-Claude Bradley. Open Notebook Science. Drexel CoAS E-Learning (ブログ), 2006年9月26日。<http://drexel-coas-elearning.blogspot.com/2006/09/open-notebook-science.html>。
- [27] スチュワート・ブランド『ロング・ナウの時計』ニューヨーク :ベーシックブックス、2000年。
- [28] ジョン・シーラー・ブラウン、ポール・デュギッド『情報の社会生活』ボストン :ハーバード・ビジネス・スクール出版、2000年。
- [29] ザカリー・ブラウン「私は問題解決者です。イノベーションの展望」 (ブログ), 2009年2月4日。<http://blog.innocentive.com/2009/02/04/im-a-solver-zacary-brown/>。
- [30] アドミラル・バンブルビー、「カスパロフ対世界」へのコメント、2007年。[http://www.reddit.com/r/reddit.com/comments/2hvex/kasparov\\_versus\\_the\\_world/](http://www.reddit.com/r/reddit.com/comments/2hvex/kasparov_versus_the_world/)。
- [31] ヴァネヴァー・ブッシュ「私たちが考えるとおりのアトランティック・マンスリー、1945年7月。
- [32] デ克蘭・バトラー「インフルエンザデータベースをめぐる論争が激化」*The Great Beyond* (ブログ), 2009年9月14日。[http://blogs.nature.com/news/thegreatbeyond/2009/09/flu\\_database\\_row\\_escalates.html](http://blogs.nature.com/news/thegreatbeyond/2009/09/flu_database_row_escalates.html)。
- [33] ロバート・H・カーソン『生物学はテクノロジーである』ケンブリッジ、マサチューセッツ州 :ハーバード大学プレス、2010年。
- [34] ニコラス・カー「グーグルは私たちが愚かにしているのか？」*アトランティック・マンスリー*, 2008年7/8月号。
- [35] ニコラス・カー『ザ・シャロウズ :インターネットは私たちの脳に何をもたらしているか』ニューヨーク :WWノートン・アンド・カンパニー、2010年。
- [36] ヘンリー・ウィリアム・チェスブロウ著『オープンノベーション :テクノロジーを創造し、そこから利益を得るための新たな必須事項』ボストン :ハーバード・ビジネス・プレス、2006年。
- [37] チェスベース。ダークホースのZackSがフリースタイルチェストーナメントで優勝。2005年6月19日。<http://www.chessbase.com/newsdetail.asp?newsid=2461>。
- [38] チェスベース。ハイドラはフリースタイルトーナメント準々決勝に出場できなかった。2005年6月11日。<http://www.chessbase.com/newsdetail.asp?newsid=2446>。
- [39] チェスベース。ダークホースからのPAL / CSSレポート、2005年6月22日。<http://www.chessbase.com/newsdetail.asp?newsid=2467>。[40]  
その チェス ゲーム の Hydra (コンピューター)。  
<http://www.chessgames.com/perl/chessplayer?pid=87303>。
- [41] トム・チヴァース「大型ハドロン衝突型加速器のライバル、テバトロンがヒッグス粒子を発見したとの噂」*デイリー・テレグラフ*, 2010年7月12日。

- [42] ヒョンヨン・チェ、ハル・ヴァリアン「Googleトレンドで現在を予測する」 Google 2009年12月  
調査[http://  
googleresearch.blogspot.com/2009/04/predicting-present-with-google-trends.html](http://googleresearch.blogspot.com/2009/04/predicting-present-with-google-trends.html)、  
ブログ、 4月
- [43] アンディ・クラークとデイヴィッド・J・チャーマーズ『拡張された心』分析、 58:10-23,1998。
- [44] 「クライメートゲート」暴露 :保守メディア、盗まれた電子メールを歪曲、地球温暖化コンセンサスへの最新の攻撃Media  
Matters、 2009年12月1日<http://mediamatters.org/research/200912010002>
- [45] ロバート・P・コルウェル『ペンティアム・クロニクルズ』ホボカー、ニュージャージー州 :IEEEコンピュータ協会、  
2006年。
- [46] セス・クーパー、フィラス・ハティブ、アドリアン・トレイユ、ヤノシュ・バルベロ、ジジョン・リ、マイケル・ビーネン、アンドリュー・リ  
ーバー=フェイ、デビッド・ベイカー、ゾラン・ポポヴィッチ、フォルディットの選手たち。  
マルチプレイヤーオンラインゲームによるタンパク質構造予測. Nature, 466:756-760, 2010年8月5日。
- [47] レイチェル・コートランド「ヒッグス粒子 :結果は間近か？」ニューサイエンティスト、 2010年7月9日。
- [48] パルタ・ダスグプタとポール・A・デイヴィッド「科学の新しい経済学に向けて」研究  
ポリシー、 23:487-521,1994年。
- [49] ポール・A・デイヴィッド「オープンサイエンス」の歴史的起源 :科学革命におけるパトロネージ、評判、共通代理契約に関する  
試論『資本主義と社会』 3(2),2008年。
- [50] ジョン・R・デラニー、ロジャー・S・バルガ「2020年の海洋科学ビジョン」トニー・ヘイ、スチュワート・タンズリー、クリスティン・トール編『第  
4のパラダイム :データ集約型科学』シアトル :マイクロソフトリサーチ、ディスカバリー、 2009年。[http://research.microsoft.com/  
en-us/collaboration/fourthparadigm/](http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/fourthparadigm/)
- [51] アミット・デシュパンデとディルク・リレ「オープンソースの総成長」 Proceedings  
2008 年第 4 回オープンソース システム カンファレンスの。
- [52] デイヴィッド・ダイヤモンド『私たちの生き方 :リーナス・トーバルズへの質問』ニューヨーク  
タイムズ、 2003年9月28日。
- [53] ジャレド・ダイヤモンド『崩壊』ニューヨーク :ペンギンブックス、2005年。
- [54] トマソ・ドリゴ「軽いヒッグスについての噂」 A Quantum Diaries Survivor (ブログ)、 2010年7月8日。[http ://  
www.science20.com/quantum\\_diaries\\_survivor/rumors\\_about\\_light\\_higgs](http://www.science20.com/quantum_diaries_survivor/rumors_about_light_higgs)
- [55] トマソ・ドリゴ「噂は単なる噂以上のものだったのか、それとも正直な噂だったのか？」 A Quantum Diaries Survivor (ブ  
ログ)、2010年7月17日。[http ://www.science20.com/quantum\\_diaries\\_survivor/  
so\\_was\\_rumor\\_more\\_just\\_rumor\\_or\\_was\\_it\\_honest\\_rumor](http://www.science20.com/quantum_diaries_survivor/so_was_rumor_more_just_rumor_or_was_it_honest_rumor)
- [56] ロバート・ダガンズとデビッド・アレン・グリーン「バーチャル・ベラシティ」ザ・ロイヤー、 2010年7月5日。
- [57] K. エリック・ドレクスラー「ハイパーテキスト出版と知識の進化」ソーシャル  
インテリジェンス、 1:87-120,1991年。
- [58] ジェイソン・ダイアー「ポリマス・プロジェクトへの優しい入門」 The Number Warrior (ブログ)、2009年3月25日。[http ://  
numberwarrior.wordpress.com/2009/03/25/a-gentle-introduction-to-the-polymath-project/](http://numberwarrior.wordpress.com/2009/03/25/a-gentle-introduction-to-the-polymath-project/)
- [59] デイヴィッド・イーズリーとジョン・クラインバーグ『ネットワーク、群衆、そして市場』ケンブリッジ :ケンブリッジ大学出版局、  
2010年。
- [60] Nature社説「インフルエンザデータの夢」 Nature、 440:255-256,2006年3月16日。
- [61] エリザベス・L・アイゼンシュタイン『初期近代ヨーロッパにおける印刷革命』(第2版)。  
ケンブリッジ :ケンブリッジ大学出版局、2005年。
- [62] T.S.エリオット『聖なる森 :詩と批評のエッセイ』ロンドン :メチューン、  
1920年。
- [63] ダグラス・C・エンゲルバート「人間の知能を拡張する :概念的枠組み」  
スタンフォード研究所レポート、 1962 年 10 月。

- [64] ジョン・フォート。エリック・シュミット氏のアブダビ講演の5つのハイライト。フォーチュン・テック  
(ブログ) ,2010年。 行進 11,  
<http://brainstormtech.blogspot.com/2010/03/11/top-five-moments-from-eric-schmidt%27s-talk-in-abu-dhabi/>.
- [65] アバターのキャストとスタッフ一覧。インターネット・ムービー・データベース(IMDb)。  
<http://www.imdb.com/title/tt0499549/fullcredits>
- [66] ヒレル・ファーステンバーグとイツハク・カツネルソン。ヘイルズ・ジュエットの密度版  
定理。Journal d'Analyse Mathématique、57:64-119,1991。  
銀河 動物園 フォーラム。 [67] Hanny's Voorwerp、<http://www.galaxyzooforum.org/index.php?topic=3802.0> 2007年-∞。
- [68] ジェフリー・S・ガーバー、ポール・A・オフィット「ワクチンと自閉症 :変化の物語」  
仮説臨床感染症48:456-461, 2009。
- [69] ジム・ジャイルズ「Googleが翻訳ランキングでトップに」ネイチャーニュース、2006年11月7日  
<http://www.nature.com/news/2006/061106/full/news061106-6.html>
- [70] ジム・ジャイルズ「PRの“ビットブル”がオープンアクセスに挑戦」ネイチャー445:347,2007年2月1日
- [71] ジェレミー・ギンズバーグ、マシュー・H・モヘッピ、ラジャン・S・パテル、リネット・ブラマー、マーク・S。  
スモリンスキー、ラリー・ブリリアント。検索エンジンを用いたインフルエンザ流行の検出  
クエリデータ。Nature、457:1012-1015,2009年2月19日。
- [72] ジェームズ・グレイク『天才 :リチャード・ファインマンの生涯と科学』トロント :ランダム社  
カナダ下院,1993年。
- [73] シャラド・ゴエル、ジェイク・M・ホフマン、セバスチャン・ラエ、デビッド・M・ペノック、ダンカン・J。  
ワッツ。 何 できる 検索予測?  
<http://www.cam.cornell.edu/~sharad/papers/searchpreds.pdf>, 2009年。
- [74] ベン・ゴールドエーカー「勇敢で雑多なブロガー集団」ガーディアン、2009年7月29日。  
<http://www.badscience.net/2009/07/we-are-more-possible-than-you-can-powerfully-imagine/>
- [75] マイケル・H・ゴールドハーバー「注目経済とネット」ファースト・マンデー2(4-7)  
1997年4月。
- [76] ロバート・L・ゴールドストーン、マイケル・E・ロバーツ、トッド・M・グレッキス。エマージェント  
集団行動におけるプロセス。心理科学の最新動向、17(1):10-  
2008年15日。
- [77] J.リチャード・ゴット三世、マリオ・ユリッチ、デヴィッド・シュレーゲル、フィオナ・ホイル、マイケル・ヴォージュリー、  
マックス・テグマーク、ネタ・バコール、ジョン・プリנקマン。宇宙の地図。  
天体物理学ジャーナル、624(2):463-484,2005年。
- [78] W.ティモシー・ガワーズ。ガワーズのウェブログへのコメント、2009年2月2日。  
<http://gowers.wordpress.com/2009/02/01/questions-of-procedure/#comment-1701>
- [79] W. ティモシー・ガワーズ。大規模共同数学は可能か?ガワーズの  
ウェブログ、2009年1月27日。<http://gowers.wordpress.com/2009/01/27/is-massively-collaborative-mathematics-possible/>
- [80] W. ティモシー・ガワーズ。ポリマスとオープンコラボレーティブ数学。ガワーズの  
ウェブログ、2009年3月10日。<http://gowers.wordpress.com/2009/03/10/polymath1-and-open-collaborative-mathematics/>
- [81] W.ティモシー・ガワーズ「問題は解決した(おそらく)」ガワーズのウェブログ、2009年3月10日。  
<http://gowers.wordpress.com/2009/03/10/problem-solved-probably/>
- [82] W.ティモシー・ガワーズとマイケル・ニールセン「大規模共同数学」  
Nature 461,2009年10月15日。
- [83] ジム・グレイ「eサイエンス :変革された科学的方法」トニー・ヘイ、スチュワート・タンズリー、  
クリスティン・トール編『第四のパラダイム :データ集約型科学』  
Discovery。シアトル: Microsoft Research, 2009。 <http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/fourthparadigm/>

- [84] ベン・グリーンとテレンス・タオ。素数は任意の長さの算術演算を含む。  
数列。Annals of Mathematics, 167:481–547, 2008.
- [85] アレクサンダー・レコルテ。 [www.fermentmagazine.org/rands/recoltes1.html](http://www.fermentmagazine.org/rands/recoltes1.html) から セマイユ。 1986年。
- [86] ネット・ガリー 「微調整の賛美 :ウィキのようなプログラミングコンテスト」インタラクションズ  
11(3):18–23, 2004年5月-6月。
- [87] ネット・ガリーとカリム・R・ラカニ 「個人のパフォーマンスと  
民間共同体によるソフトウェアイノベーションにおける集合的価値。ハーバード・ビジネス・スクール  
ワーキングペーパー10–65.2010年。
- [88] アロン・ハレヴィ、ピーター・ノーヴィグ、フェルナンド・ペレイラ。  
データ。IEEEインテリジェントシステム、24:8–12,2009年。
- [89] マリー・ボアズ・ホール 『ヘンリー・オルデンバーグ :王立協会の形成』オックスフォード:オックスフォード  
大学出版局,2002年。
- [90] マイケル・J・ハメル 「変化の産業 :Linuxがハリウッドを席卷」 Linux Journal、  
2002年2月。 <http://www.linuxjournal.com/article/5472>。
- [91] エリック・ハンド 「望遠鏡チームは太陽系外惑星のデータを保有することが許可されるかもしれない」ネイチャーニュース  
2010年4月14日。 <http://www.nature.com/news/2010/100414/full/news.2010.182.html>。
- [92] チャック・ハンセン 「米国の核兵器 :秘められた歴史」アーリントン、エアロファックス、  
1988年。
- [93] フリードリヒ・フォン・ハイエク 「社会における知識の活用」アメリカ経済評論、  
35(4):519–530, 1945年。
- [94] トニー・ヘイ、スチュワート・タンズリー、クリスティン・トール編 『第4のパラダイム :データ集約型科学的発見』シ  
アトル :マイクロソフトリサーチ,2009年。  
<http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/fourthparadigm/>。
- [95] エドウィン・ハッチンス 『野生における認知』ケンブリッジ、マサチューセッツ州 :MITプレス,1995年。
- [96] 国立ヒトゲノム研究所。  
NHGRIの迅速なデータ公開ポリシー :大規模シーケンシングとその他のコミュニティ  
リソースプロジェクト,2003年2月。<http://www.genome.gov/10506537>。
- [97] 一瞬にして左車線国家が右に逸れる。ライフ誌、1967年9月15日。
- [98] ジェーン・ジェイコブズ 『アメリカ大都市の死と生』トロント :ランダムハウス  
カナダ,1961年。
- [99] アーヴィング・レスター・ジャニス 『集団思考 :政策決定と集団行動の心理学的研究』  
『大失敗』ボストン :ホートン・ミフリン,1983年。
- [100] イーモン・ジェイヴァース 「広報界のピットブル」ビジネスウィーク誌、2006年4月17日
- [101] アヨデレ・サミュエル・ジェゲデ。ナイジェリアのポリオワクチンボイコットのきっかけは何だったのか  
キャンペーン PLoS 医学、4(3):e73,2007年。  
<http://www.plosmedicine.org/article/info:doi/10.1371/journal.pmed.0040073>。
- [102] クリントン大統領とブレア首相の共同声明。2000年3月14日。  
<http://clinton4.nara.gov/WH/EOP/OSTP/html/00314.html>。
- [103] 国連HIV/エイズ合同計画。HIV/エイズの社会経済的影響  
HIV/エイズの流行とHIV/エイズと闘うための国家能力の強化,6月  
2001年15日[http://data.unaids.org/Publications/External-Documents/GAS26-  
rt3\\_en.pdf](http://data.unaids.org/Publications/External-Documents/GAS26-rt3_en.pdf)。
- [104] ジョナサン・スペンサー・ジョーンズ、JCベネット (1914-1990) 『王立協会季刊誌』  
天文学会誌、35:353,1994年。
- [105] GIG Jozsa,MA Garrett,TA Oosterloo,H. Rampadarath,Z. Paragi,H. van  
アーケル,C. リントット,W.C キール,K. シャウィンスキー,および E. エドモンドソン。明らかにする  
ハニーのフォールウェルプ :IC 2497の電波観測。天文学と天体物理学、  
500(2):L33–L36,2009。eprint arXiv:0905.1851。

- [106] ガルリ・カスパロフ 『チェスの名手とコンピュータ』ニューヨーク・レビュー・オブ・ブックス  
57(2)、2010年2月11日。
- [107] ガルリ・カスパロフとダニエル・キング共著 「カスパロフ対世界」 KasparovChessOnline、2000年。
- [108] ケビン・ケリー 「科学の未来についての考察」エッジ :第三の文化、 2006年。[http://www.edge.org/3rd\\_culture/kelly06/kelly06\\_index.html](http://www.edge.org/3rd_culture/kelly06/kelly06_index.html)
- [109] ケビン・ケリー 『テクノロジーが望むもの』ニューヨーク :ヴァイキング、2010年。
- [110] リチャード・A・カー 「最近発見された居住可能な惑星は存在しないかもしれない」サイエンス・ナウ、 2010年10月12日。<http://news.sciencemag.org/sciencenow/2010/10/recently-discovered-habitable-world.html>
- [111] A. Yu Kitaev. エニオンによるフォールトトレラント量子計算. Annals of Physics, 303(1):2-30, 2003.
- [112] ヘルゲ・クラッグ 「マックス・プランク :消極的な革命家」 Physics World、 12月  
2000年. <http://physicsworld.com/cws/article/print/373>
- [113] Greg Kroah-Hartman. Linuxカーネル. Google Tech Talksのオンラインビデオ. <http://www.youtube.com/watch?v=L2SEd6sewRw>
- [114] グレグ・クロア・ハートマン、ジョナサン・コーベット、アマンダ・マクファーソン. Linuxカーネル開発. Linux Foundation, 2008年4月.
- [115] イリーナ・クラッシュとケネス・W・リーガン共著 『チェス史上最高のゲーム パートII,III』。 <http://www.cse.buffalo.edu/~regan/chess/KW/KHR99i.html>, 1999年。
- [116] カリム・R・ラカニ、ラース・ボー・イエップセン、ピーター・A・ローゼ、ジル・A・パネッタ 「科学的問題解決におけるオープン性の価値」ハーバード・ビジネス・スクール・ワーキングペーパー07-050、2007年。
- [117] ジャロン・ラニアー 『あなたはガジェットではない :マニフェスト』トロント :ランダムハウス・オブ・カナダ、2010年。
- [118] ハドリー・レグット。1868年8月18日:皆既日食中にヘリウムが発見される。2009年。  
Wired、 8月 [http://www.wired.com/thisdayintech/2009/08/dayintech\\_0818/](http://www.wired.com/thisdayintech/2009/08/dayintech_0818/) 18歳
- [119] ジョナ・レーラー 「つながりを作る」ネイチャー457:524-527、2009年1月28日。
- [120] ジョナ・レーラー 「科学者が遺伝子ごとに脳の地図を作成」 Wired、 17、2009年3月28日。  
[http://www.wired.com/medtech/health/magazine/17-04/ff\\_brainatlas](http://www.wired.com/medtech/health/magazine/17-04/ff_brainatlas)
- [121] Ed S. Leinら.成体マウス脳における遺伝子発現のゲノムワイドアトラス。  
Nature、 445:168-176、2007年1月11日。
- [122] ローレンス・レッシング 『フリーカルチャー :大手メディアはテクノロジーと法律をいかに利用して文化を封じ込め、創造性をコントロールしているか』ニューヨーク :ペンギン社、2004年。<http://www.free-culture.cc/freecontent/>
- [123] ピエール・レヴィ。インテリジェンス集団。パリ :ラ・ドゥクヴト、1994年。
- [124] ピエール・レヴィ 『集合知』ケンブリッジ、マサチューセッツ州:ペルセウス・ブックス、1997年。  
フランス語の原文[123]からロバート・ボノが翻訳した。
- [125] ジェフ・W・リヒトマン、R・クレイ・リード、ハンス・ペーター・フィスター、マイケル・F・コーエン。  
脳の配線図の発見。トニー・ヘイ、スチュワート・タンズリー、クリスティン・トール編 『第四のパラダイム :データ集約型科学的発見』より。  
シアトル: Microsoft Research、2009年。<http://research.microsoft.com/en-us/collaboration/fourthparadigm/>
- [126] クリス・リントン。彼は彼らがそう言ったと言った。 . Galaxy Zoo (ブログ) 、2009年。  
<http://blogs.zooniverse.org/galaxyzoo/2009/07/09/he-said-that-they-said-that-he-said/>
- [127] クリス・リントンとケイト・ランド 「宇宙を見つめる」 Physics World、 21:27-30、  
2008年。

- [128] クリス・J・リントット、ケビン・シャインスキー、ウィリアム・キール、ハニー・ファン・アーケル、ニコラベナート、エドワード エドモンドソン、ダニエル トーマス、ダニエル JB スミス、ピーター D. ハーバート、マット・J・ジャービス、シャニル・ヴィラニ、ダン・アンドレースク、ステイーブン・P・バンフォード、ケイトランド、フィル・マーレー、ロバート・C・ニコル、M・ジョーダン・ラディック、アンゼ・スロサル、アレックスザライとヤン・ヴァンデンバーグ。銀河動物園: クエーサー光「ハニーのフォールワープ」  
エコー ? 王立天文学会月報、399(1):129-140、  
2009年10月。eprint arXiv:0906.5304。
- [129] ジャック・J・リサウアー、ダニエル・C・ファブリッキー、エリック・B・フォード、ウィリアム・J・ボルッキ、フランソワ・フレッシン、ジェフリー・W・マーシー、ジェローム・A・オロス、ジェイソン・F・ロウ、ギレルモ・トーレス、ウィリアム・F・ウェルシュ、ナタリー・M・バターリヤ、ステイーブン・T・ブライソン、ラス・A・ブツハバ、ダグラス A. コールドウェル、ジョシュア A. カーター、デビッド シャルボノー、ジェシー L. クリスチャンセン、ウィリアム・D・コ克蘭、ジャン＝ミシェル・デザート、エドワード・W・ダナム、マイケル・N・ファネリ、ジョナサン・J・フォートニー、トーマス・N・ゴートイエ3世、ジョン・C・ギアリー、ロナルド・L・ギリランド、マイケル・R・ハース、ジェニファー・R・ホール、マシュー・J・ホルマン、デビッド・G・コッホ、デビッド・W・レイサム、エリック・ロペス、シオン・マコーリフ、ニール・ミラー、ロバート・C・モアヘッド、エリサ・V・キンタナ、ダリン・ラゴジン、ディミタール・サセロフ、ドナルド・R・ショート、ジェイソン・H・ステッフェン。低質量の密集したシステム、  
ケプラー11を通過する低密度惑星。Nature, 470:53-58, 2011年2月3日。
- [130] チャールズ・マッケイ「異常な大衆の妄想と群衆の狂気」  
(1841年)。トロント : ランダムハウス・オブ・カナダ、1995年。
- [131] エマ・マリス。アメリカ化学会: 化学反応。Nature, 437:807-809, 2005年10月6日。
- [132] カレン・マスターズ。彼女は天文学者です : アイダ・ベルゲス。ギャラクシー動物園 (ブログ)、10月1日  
2009年。 <http://blogs.zooniverse.org/galaxyzoo/2009/10/01/shes-an-astronomer-aida-berges/>
- [133] ハッサン・マスムとマーク・トーヴィー「十分な心があれば…ギャップが生まれ。.: 創意工夫を繋ぐ  
る」 First Monday 11(7), 2006年7月。
- [134] ハッサン・マスム、マーク・トーヴィー編『レピュテーション・ソサエティ』ケンブリッジ、マサチューセッツ州  
MIT Press, 近日刊行予定。
- [135] ピーター・マッキンタイアとジュリー・リースク。MMRワクチンの接種率向上。英国  
メディカルジャーナル、336:729-730, 2008年。
- [136] ルーカス・メリアン。CDCが新しいほぼリアルタイムのインフルエンザ追跡システムを導入。コンピューター  
ワールド、2009年11月5日。
- [137] ミートボールウィキ。WikiAsScience. <http://meatballwiki.org/wiki/WikiAsScience>
- [138] ミートボールウィキ。 ウィキサイエンス出版物。  
<http://meatballwiki.org/wiki/WikiSciencePublication>
- [139] デビッド・メーガン、「Author(s)! author(s)! Off the Shelf」 (ブログ)、2007年4月10日。  
[http://www.boston.com/ae/books/blog/2007/04/authors\\_authors\\_2.html](http://www.boston.com/ae/books/blog/2007/04/authors_authors_2.html)
- [140] ジェフリー・マービス。NSFはすべての助成金申請者にデータ管理計画の提出を求める。  
ScienceInsider、2010年5月5日。  
<http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2010/05/nsf-to-ask-every-grant-applicant.html>
- [141] 罹患率と死亡率の週報。米国疾病予防管理センター、  
2006年10月13日。
- [142] クレイグ・マンディ「商用ソフトウェアモデル」ニューヨークでの講演  
スターンビジネス大学、2001年。 学校 の 5月  
<http://www.microsoft.com/presspass/exec/craig/05-03sharedSource.msp#> を参照してください。
- [143] 国立衛生研究所NIHデータ共有方針 (2007年4月17日現在)。  
[http://grants.nih.gov/grants/policy/data\\_sharing/](http://grants.nih.gov/grants/policy/data_sharing/)
- [144] 全米科学財団「科学技術指標」2010年。  
<http://www.nsf.gov/statistics/seind10/pdfstart.htm>

- [145] セオドア・ホルム・ネルソン 『文学の機械』カリフォルニア州ソーサリート :マインドフル・プレス、1987年。
- [146] キャメロン・ネイロン 「科学交流」サイエンス・イン・ザ・オープン (ブログ) 、4月16日  
2008年。 <http://cameronneylon.net/blog/the-science-exchange/>
- [147] キャメロン・ネイロン 「科学者がオープンデータ共有の推進を主導」研究  
情報: [http://www.researchinformation.info/features/feature.php?feature\\_id=214](http://www.researchinformation.info/features/feature.php?feature_id=214) 4月/5月 2009年。
- [148] キャメロン・ネイロンとシャーリー・ウー 「論文レベルの指標と  
科学的インパクト」PLoS Biology 7(11): e1000242, 2009.
- [149] ボブ・ニコル。「初めてです。ギャラクシー動物園」 (ブログ) 、2009年2月19日。  
<http://blogs.zooniverse.org/galaxyzoo/2009/02/19/this-is-my-first-time/>
- [150] マイケル・ニールセン 「オープンな場で科学を行う」 Physics World、2009年5月。  
<http://physicsworld.com/cws/article/print/38904>
- [151] マイケル・ニールセン 「科学協力の経済学」マイケル・ニールセンの  
ブログ、2008年12月29日。<http://michaelnielsen.org/blog/the-economics-of-scientific-collaboration/>
- [152] マイケル・ニールセン 「科学の未来」マイケル・ニールセンのブログ、2008年7月17日。  
<http://michaelnielsen.org/blog/the-future-of-science-2/>
- [153] マイケル・ニールセン、「情報の覚醒」、ネイチャーフィジックス5、2009年4月。
- [154] マイケル・ニールセン 「科学の誤った測定」マイケル・ニールセンのブログ  
2010年11月29日。<http://michaelnielsen.org/blog/the-mismeasurement-of-science/> [134]に掲載され  
る。
- [155] マイケル・ニールセン 「個人の理解を超えた科学」マイケル・ニールセンのブログ  
2008年9月24日。 <http://michaelnielsen.org/blog/science-beyond-individual-understanding/>
- [156] ニールセンメディアリサーチ。3スクリーンレポート。ニールセンワイヤー (ブログ) 、2009年第1四半期。  
[http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online\\_mobile/americans-watching-more-tv-than-ever/](http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online_mobile/americans-watching-more-tv-than-ever/)
- [17] ピーター・ノーヴィグ 「スペルチェックツールの書き方」 [http://norvig.com/spell-  
正しい.html](http://norvig.com/spell-正しい.html)。
- [158] バラク・オバマ 「透明性と開かれた政府」連邦官報74(15)  
1月[http://www.whitehouse.gov/the\\_press\\_office/TransparencyandOpen  
政府/](http://www.whitehouse.gov/the_press_office/TransparencyandOpen政府/) 26歳 2009年。
- [159] ライアン・オドネル、ガワーズのブログへのコメント、2009年2月6日。  
[http://gowers.wordpress.com/2009/02/06/dhj-the-triangle-removal-approach/  
#comment-1913](http://gowers.wordpress.com/2009/02/06/dhj-the-triangle-removal-approach/#comment-1913)
- [160] OECD。OECDの研究データへの公開アクセスに関する原則とガイドライン  
資金調達。 OECD 報告、 2007年4月。  
[http://www.oecd.org/document/55/0,3343,en\\_2649\\_201185\\_38500791\\_1\\_1\\_1\\_00.html](http://www.oecd.org/document/55/0,3343,en_2649_201185_38500791_1_1_1_00.html)
- [161] マンカー・オルソン 『集団行為の論理 :公共財と  
グループ。ケンブリッジ、マサチューセッツ州: ハーバード大学出版局、1965年。
- [162] ティム・オライリー 『参加の建築』2004年6月。  
[http://www.oreillynet.com/pub/a/oreilly/tim/articles/architecture\\_of  
参加.html](http://www.oreillynet.com/pub/a/oreilly/tim/articles/architecture_of参加.html)
- [163] ジャスティン・R・オルティス、ホン・ソウ、デビッド・K・シェイ、キャスリーン・M・ニュージェル、クリストファー・  
H. ゴス。Googleのインフルエンザ追跡は臨床検査の陽性反応と相関するか？  
インフルエンザの予防には？会議要旨。アメリカ呼吸器・重症心血管疾患学会誌  
ケア医学、181:A2626、2010年。
- [164] トバイアス・J・オズボーン。6ヶ月以上経って。トバイアス・J・オズボーンの研究ノート (ブログ)  
2010年10月4日<http://tjoresearchnotes.wordpress.com/2009/10/04/over-6->

数ヶ月後。

- [165] エリノア・オストロム 『コモンズの統治 : 集団行動制度の進化』ケンブリッジ : ケンブリッジ大学出版局、1990年。
- [166] デニス・オーバーバイ 「惑星探査におけるデータの所有権は誰にあるか？」ニューヨーク・タイムズ、2010年6月14日 <http://www.nytimes.com/2010/06/15/science/space/15kepler.html>
- [167] 概要 : Natureの査読トリアル Nature、2006年12月。  
<http://www.nature.com/nature/peerreview/debate/nature05535.html>.
- [168] スコット・E・ペイジ、 「違い : 多様性の力でより良いグループを創る」  
プリンストン、ニュージャージー州 : プリンストン大学出版局、2008年。
- [169] A. ベイス 『主は微妙なり: アルバート・アインシュタインの科学と生涯』オックスフォード: オックスフォード大学出版局、1982年。
- [170] スティーブン・ピンカー 『白紙の石版 : 人間性の現代における否定』ニューヨーク : ペンギン社、2003年。
- [171] エリザベス・ピサーニとカーラ・アブザール 「健康データの共有 : 善意だけでは不十分」世界保健機関紀要、88(6)、2010年。
- [172] マイケル・ポラニー 『科学の共和国 : その政治経済理論』  
ミネルヴァ、1:54-74、1962年。 <http://www.missouriwestern.edu/orgs/polanyi/mp-repsc.htm>
- [173] Polymath参加者。DeolalikarのP vs NP論文。Polymath wiki、2010年。 [http://michaelnielsen.org/polymath1/index.php?title=Deolalikar's\\_P!%3DNP\\_paper](http://michaelnielsen.org/polymath1/index.php?title=Deolalikar's_P!%3DNP_paper).
- [174] ゴラン・ポポヴィッチ。CASP8の結果。Foldit ブログ、2008年12月17日。 <http://fold.it/portal/node/729520>.
- [175] Jason Priem, Dario Taraborelli, Paul Groth, Cameron Neylon. Altmetrics: マニフェスト。2010年10月26日。 <http://altmetrics.org/manifesto/>.
- [176] PRISM: 現在の問題。 <http://web.archive.org/web/20080330235026/http://www.prismcoalition.org/topics.htm>.
- [177] H. ランパダラス、MA ギャレット、GIG ジョザ、T. マックスロウ、TA オースターラー、Z. Paragi, R. Beswick, H. van Arkel, WC Keel, K. Schawinski. 「Hanny's Voorwerp : IC 2497の中心領域におけるAGN活動と核スターバーストの証拠」 eprint arXiv: 1006.4096, 2010.
- [178] エリック・S・レイモンド 『大聖堂とバザール』オンライン出版、および[179]に転載。 <http://www.catb.org/~esr/writings/cathedral-bazaar/cathedral-bazaar/>.
- [179] エリック・S・レイモンド 『The Cathedral and the Bazaar: 偶然の革命家によるLinuxとオープンソースについての思索』カリフォルニア州セバスターポール: オライリーメディア、2001年。
- [180] ロージャー・レッドフィールド 「ヒ素関連細菌 (NASAの主張)」 Rresearch (ブログ)、2010年12月4日。 <http://rresearch.blogspot.com/2010/12/arsenic-associated-bacteria-nasas.html>
- [181] リード・エルゼビア。年次報告書および財務諸表、2009年。 <http://reports.reedelsevier.com/ar09/> [182] リチャード・ローズ 『ハウ・トゥ・ライティング』ニュー  
ヨーク : ハーパーコリンズ、1995年。
- [183] リチャード・ローズ 『原爆の誕生』ニューヨーク : サイモン&シュスター  
1986年。
- [184] ベン・リッチ 『スカンクワークス : ロッキード社での私の回想録』ボストン  
リトル、ブラウンアンドカンパニー、1996年。
- [185] マーティン・ロビンズ 「BCAによるカイロプラクティックに関するエビデンスのレビュー」 The Lay  
科学者 : マーティンのブログ、2009年。 <http://www.layscience.net/node/598>.
- [186] ビル・ロサト 「チェスチャンピオン、カスパロフがインターネットで対戦」ロイター (ロンドン)、1999年9月3日。
- [187] ロビン・ロウ。Linux #1 <http://www.linuxmovies.org>、2008年。 ハリウッドのオペレーティング システム。

- [188] ドナルド・ラムズフェルド、アメリカ国防総省記者会見、2002年2月12日。<http://www.defense.gov/transcripts/transcript.aspx?transcriptid=2636>
- [189] トーマス・C・シェリング 『マイクロ動機とマクロ行動』ニューヨーク :WWノートン・アンド・カンパニー、1978年。
- [190] ポール・シーブライト 『見知らぬ人々の集まり :経済生活の自然史』  
プリンストン、ニュージャージー州 :プリンストン大学出版局、2004年。
- [191] トビー・セガラン 『集合知プログラミング』カリフォルニア州セバストポリ :オライリーメディア、2007年。
- [192] D.シャシャ、C.ラゼール 『Out of Their Minds: The Lives and Discoveries of 15 Great Computer Scientists』ニューヨーク:Springer-Verlag、1998年。
- [193] アリス・シェパード 「宇宙のエンドウ豆、善意、そしてエンドウ豆プロジェクトにおけるズーイトとの協力の歴史」ギャラクシー動物園 (ブログ) 、2009年7月7日。<http://blogs.zooniverse.org/galaxyzoo/2009/07/07/peas-in-the-universe-goodwill-and-a-history-of-zooite-collaboration-on-the-peas-project/>
- [194] クレイ・シャーキー 『認知的余剰 :つながりの時代の創造性と寛容さ』  
ペンギン、2010年。
- [195] クレイ・シャーキー 「ジン、テレビ、そして社会的余剰」 Here Comes Everybody (ブログ) 、2008年4月26日。<http://www.shirky.com/hercomeseverybody/2008/04/looking-for-the-mouse.html>
- [196] クレイ・シャーキー 「さあみんなの出番だ :組織化の力は組織」ニューヨーク :ペンギン社、2008年。
- [197] ハーバート・A・サイモン 『情報化世界のための組織設計』マーティン・グリーンバーガー編 『コンピュータ、コミュニケーション、そして公共の利益』  
ボルチモア:ジョンズ・ホプキンス・プレス、1971年。
- [198] キャメロン・シンクレア、「オープンソース・アーキテクチャについて語る」 TED: 広める価値のあるアイデア、 2006年。[http://www.ted.com/talks/cameron\\_sinclair\\_on\\_open\\_source\\_architecture.html](http://www.ted.com/talks/cameron_sinclair_on_open_source_architecture.html)
- [199] サイモン・シン 「脊髄損傷に注意」ガーディアン、 2008年4月19日。
- [200] リー・スモーリン 『物理学の悩み』ロンドン :アレンレーン、2006年。
- [201] ロン・ソロモン 「有限単純群とその分類について」アメリカ数学会報、 42(2):231-239、1995年2月。<http://www.ams.org/notices/199502/solomon.pdf>
- [202] リチャード・M・ストールマン著 『フリーソフトウェア、自由な社会 :リチャード・Mのエッセイ選』  
ストールマン。                      ボストン:                      無料                      ソフトウェア                      財団、2002年。  
<http://www.gnu.org/philosophy/fsfs/rms-essays.pdf>
- [203] ガロル・スタッサーとウィリアム・タイタス 『隠されたプロフィール :簡潔な歴史』心理学研究、 14(3&4):304-313、2003年。
- [204] ギャロルド・スタッサーとウィリアム・タイタス 「集団意思決定における非共有情報のプーリング :議論中の偏った情報サンプリング」人格と社会心理学ジャーナル、 48(6):1467-1478、1985年。[199] w Roman">[205] ビクトリア・ストッデン、デビッド・ドノホ、セルゲイ・フォメル、マイケル・P.  
  
フリードランダー、マーク・ガースタイン、ランディールヴェック、イアン・ミッチェル、リサ・ラリモア・ウエレット、クリス・ウイギンズ、ニコラス・W・ブランブル、パトリック・O・ブラウン、ヴィンセント・J.  
ケアリー、ローラ・デナルデイス、ロバート・ジェントルマン、J・ダニエル・ゲゼルター、アリッサ・グッドマン、マシュー・G・ネブリー、ジョイ・E・ムーア、フランク・A・パスクアーレ、ジョシュア・ロルニック、マイケル・セリンハウス、ラメッシュ・ブラマニアン。再現可能な研究 :計算科学におけるデータとコードの共有の必要性への対応。『科学と工学におけるコンピュータリング』 p12(5):8-12、2010年9月/10月。
- [206] ピーター・サバー 「祝う価値のある日」オープンアクセスニュース (ブログ) 、2008年4月17日。<http://www.earlham.edu/~peters/fos/2008/04/day-worth-celebrating.html>

- [207] Peter Suber. <http://www.earlham.edu/~peters/fos/overview.htm> 開ける アクセス 概要。
- [208] ピーター スーパー。 オープン アクセス運動のタイムライン。  
<http://www.earlham.edu/~peters/fos/timeline.htm>
- [209] ブライアン・サリバン「eBirdを使っていますか？」オープンスレッド。チップノート :eBird Buzz (ブログ) ,5月 2009年5月23日。<http://ebirdforum.blogspot.com/2009/05/do-you-ebird-tell-us-about-yourself.html>
- [210] ブライアン・L・サリバン、クリストファー・L・ウッド、マーシャル・J・イリフ、リック・E・ボニー、ダニエル・フィンカ、スティーブ・ケリンガ。eBird :市民ベースの鳥類観察ネットワーク  
生物科学:生物学的保全, 142(10):2282-2292, 2009.
- [211] ジョン・サルストン。人類の遺産。ル・モンド・ディプロマティック (英語版) 、  
2002年11月。
- [212] キャス・R・サンスティーン『インフォトピア :いかに多くの心が知識を生み出すか』ニューヨーク :  
オックスフォード大学出版局、2006年。
- [213] キャス・R・サンスティーン『Republic.com 2.0』プリンストン大学出版局、2007年。
- [214] ジェームズ・スロウィツキ『群衆の知恵』ニューヨーク :ダブルデイ、2004年。
- [215] ドン・R・スワンソン「片頭痛とマグネシウム :見落とされがちな11の関連性」  
生物学と医学の展望、 31(4):526-557、1988年。
- [216] ドン・R・スワンソン「新たな知識の潜在的な源泉としての医学文献」  
医学図書館協会紀要、 78(1):29-37、1990。
- [217] スウェーデン :右カラーセルに切り替えConse>Time、1967年9月15日。
- [218] エンドレ・セメレディ。算術におけるk元を含まない整数の集合について  
進行。Acta Arithmetica、 27:199-245、1975。
- [219] ジェフリー・K・タウベンバガーとデイヴィッド・M・モレンズ「1918年インフルエンザ :すべての  
パンデミック。新興感染症、 12:15-22、2006年。
- [220] マイケル・P・テイラー、アンドリュー・A・ファーケ、マシュー・J・ウエード「開いた恐竜  
プロジェクト。 古生物学協会ニュースレター、 (73)、2010。  
<http://opendino.wordpress.com/2010/04/22/new-odp-article-in-the-palaeontological-association-newsletter/>
- [221] BCA対サイモン・シン事件第3回更新、2009年6月。<http://www.chiropractic-uk.co.uk/gfx/uploads/textbox/Singh/BCA%20Statement%20170609.pdf>
- [222] 31歳のテキサス出身者がASSET India向けに太陽光発電の無線ルーターを開発、  
インドの恵まれない子供たちの教育に重点を置いた非営利団体  
テクノロジー。InnoCentiveプレスリリース、 2008年9月25日。  
<http://www.marketwire.com/press-release/31-Year-Old-Texas-Native-Develops-Solar-Powered-Wireless-Router-ASSET-India-Non-Profit-903974.htm>
- [223] Linus Torvalds. Linuxの優位性. Open Sources: Voices from the Open Source  
Revolution. 編集者、クリス・ディボナ、サム・オックマン、マーク・ストーン、セバストーポル、  
CA: O'Reilly Media、1999年。
- [224] マーク・トーヴィー編著『集合知 :平和で繁栄する世界の創造』  
オークトン、バージニア州 :Earth Intelligence Network、2008年。
- [225] ケビン・トレンバース「気候変動計画の必須事項 :地球の  
世界のエネルギー。Current Opinion in Environmental Sustainability, 1:19-27, 2009.  
[http://www.cgd.ucar.edu/cas/Trenberth/trenberth\\_papers/EnergyDiagnostics09final2.pdf](http://www.cgd.ucar.edu/cas/Trenberth/trenberth_papers/EnergyDiagnostics09final2.pdf)
- [226] イルッカ・トウオミ「Linuxクレジットファイルの進化 :方法論的課題と  
オープンソース研究のための参考データ。First Monday、 9(6)、2004年。
- [227] ジョン・ウデル「科学コラボレーションのためのインターネットグループウェア」2000年。  
<http://jonudell.net/GroupwareReport.html>
- [228] ジョン・ウデル。サムの偶然の出会い。ジョン・ウデルのラジオブログ  
2002年3月4日。 <http://radio-weblogs.com/0100887/2002/03/04.html>

- [229] 英国医学研究会議のデータ共有と保存に関する方針。  
<http://www.mrc.ac.uk/Ourresearch/Ethicsresearchguidance/Datasharinginitiative/ポリシー/index.htm>
- [230] エドナ・ウルマン＝マルガリット「見えざる手による説明」シンセシス、39(2): 263-291、1978年。
- [231] ヴァーナー・ヴィンジ『レインボーズ・エンド』ニューヨーク、Tor、2007年。
- [232] スティーブン・S・ヴォクト、R・ポール・バトラー、エウジェニオ・J・リベラ、ネイター・ハギギブール、グレゴリー W・ヘンリー、マイケル・H・ウィリアムソン著「リック・カーネギー太陽系外惑星サーベイ：近くの M3V 恒星グリーゼ 581 のハビタブルゾーンにある 3.1 M<sub>Earth</sub> 惑星。  
電子プリントarXiv:1009.5733、2010年。
- [233] エリック・フォン・ヒッペル『イノベーションの民主化』MIT出版、2005年。
- [234] ジェームズ・D・ワトソン『二重らせん：発見の個人的な記録』  
DNAの構造、ニューヨーク：サイモン&シュスター、1980。
- [235] スティーブン・ウェーバー『オープンソースの成功』ケンブリッジ、マサチューセッツ州：ハーバード大学  
プレス、2004年。
- [236] ウェルカムトラスト。データ管理と共有に関する方針。2010年。  
<http://www.wellcome.ac.uk/About-us/Policy/Policy-and-position-statements/WTX035043.htm>
- [237] ウェルカムトラスト。大規模生物学研究プロジェクトのデータの共有：  
システムの 三者責任。2003年。  
[http://www.wellcome.ac.uk/stellent/groups/corporatesite/@policy\\_通信/ドキュメント/web\\_document/wtd003207.pdf](http://www.wellcome.ac.uk/stellent/groups/corporatesite/@policy_通信/ドキュメント/web_document/wtd003207.pdf)
- [238] リチャード・S・ウェストフォール「科学とパトロン：ガリレオと望遠鏡」イシス、76:11-1985年30日。
- [239] SourceForge.net って何ですか？ は  
<http://sourceforge.net/apps/trac/sourceforge/wiki/What%20is%20SourceForge.net?>
- [240] ジョン・A・ウィーラー『重力と時空への旅』ニューヨーク：サイエンティフィック  
アメリカ図書館、1990年。
- [241] ジョン・ウィリンスキー著『アクセス原則』MIT出版、ケンブリッジ  
マサチューセッツ州、2006年。
- [242] フェリサ・ウルフ＝サイモン、ジョディ・スイス・ブルム、トーマス・R・クルプ、グウィネス・W・ゴードン、  
シェリー E. ホーフ、ジェニファー ペットリッジ、ジョン F. ストルツ、サミュエル M. ウェッブ、ピーター K.  
ウェーバー、ポール・CW・デイヴィス、アリエル・D・アンバー、ロナルド・S・オレムランド。細菌  
リンの代わりにヒ素を使って成長できる植物。サイエンス誌、2010年12月2日。
- [243] アニタ・ウィリアムズ・ウーリー、クリストファー・F・チャプリス、アレックス・ペントランド、ナダ・ハシュミ、  
トーマス・W・マローン。集団知能要因の証拠  
人間集団のパフォーマンスサイエンス、330(6004):686-688、2010年10月29日。
- [244] 世界保健機関、インフルエンザファクトシートNo.211、2003年3月。  
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs211/en/>
- [245] リン・ウー、エリック・プリニョルフソン「予測の未来：Google検索の仕組み」  
住宅価格と販売を予測する。2009年のワークショップで発表された。  
情報システム経済学 (WISE 2009)、2009年。  
[http://pages.stern.nyu.edu/~bakos/wise/papers/wise2009-3b3\\_paper.pdf](http://pages.stern.nyu.edu/~bakos/wise/papers/wise2009-3b3_paper.pdf)
- [246] シャーリー・ウー「科学コミュニティを一つの大きな研究室として構想する」一つの大きな研究室  
(ブログ)、2008年4月14日。<http://onebiglab.blogspot.com/2008/04/envisioning-scientific-community-as-one.html>
- [247] ドナルド・G・ヨーク他「スローンデジタルスカイサーベイ：技術概要」  
天文学ジャーナル、120(3):1579-1587、2000年9月。

## 索引

アーロンソン, スコット, [1](#)  
[233](#) アブザール, カーラ, [1](#)  
[182](#) 活動銀河核 (AGN), [131](#), [132](#) アレン・ブレイン  
• アトラス, [106](#), [108](#) 納税者 [アクセ](#)  
ス同盟, [219](#) アルマゲスト(プトレマイオ  
ス), [98](#), [102](#), [104](#), [107](#) アマチュア, オンライン  
ツール作成者, [20](#). 参照: 市民科学 font face="Times New  
Roman">Amazon.com: カスタマーレビュー, [179](#), 180–81 Linuxシステム, [45](#) アメ  
リカ化学会誌,

[164](#) 集合知の増幅, 31–[1](#)

33 注意のアーキテクチャ, 32–33, [49](#), [66](#), [115](#) デー

タ駆動型知能, [115](#) 知識に意味を見出すことによっ

て, [96](#) 市場と共に, 37–39 オンラインツールと共に, [3](#), [18](#)–

[21](#), [24](#), [32](#), 82–87 科学者の開発の遅

れ, [181](#) 必要な共有の実践, [75](#) 要約, 32–33 発

見の検証のため, [203](#). 集

合知も参照

— — — — —

—

—

—

—

コラボレーションの拡大

アンドロメダ銀河, [140](#) アニ

メーションと視覚効果、Linux用、[45](#) 抗体、[143](#)、

[144](#)、[145](#) — — — — —

アオテアロア、[147](#)

アラファト、オリバー、[63](#)

アーキテクチャ、オープンソース、[46](#)–[48](#) —



ブロック、ピーター、[218](#)

ブログ :注目のアーキテクチャと、[42,56](#)ポリマスプロジェクト  
の基盤として、1~[2,42](#)発明、[20](#)量子コンピューティングにおける、[187](#)

噂、[201~2](#)科学的、6,165~69,[203](#)

~4ボルグマン、[クリスティ](#)

ン、[218](#)ボロソン、[トッド](#)、[100~101](#)、

[103,114](#)ボルッキ、ウィリアム、[201](#)

植物学、[107](#)ブラーエ、[ティコ](#)、[104](#)脳アトラス、

[106,108](#)英国カイロプラクティク

ク協会、[165~](#)

[66](#)ブラウン、ザカリー、[23](#)

~[24,27,35,41,223](#)ブルキナフ

アソ、オープンアーキテクチャプロジェクト、[46~48](#)ブッシ

ュ、ヴァネヴァー、[217,218](#)ビジネス;データ駆動型イン

テリジェンス112のデータ共有方法、[120](#)。市場も参照

がん、[11](#)

Capra, Baldassare、[174](#)

Cardamone, Carolin、[139-40](#) Carr,

Nicholas、[20,217](#) Carter, \_\_\_\_\_

Jimmy、[23](#) CASP \_\_\_\_\_

(Critical Assessment of Techniques for Protein Structure Prediction)、[147-48](#) CD パッキング問  
題、[60-63](#), [64, 74](#) 米国疾病

予防管理センター (CDC)、[93-94, 95, 112](#) CERN 粒

子加速器、[36](#) ケモインフォマティクス、[108](#) chemistry wiki、[178](#) Chesbrough, Henry、[219](#)

チェス。フリースタイルチェスを参照。Karpov,

Anatoly。カスパロフ対世界チェ

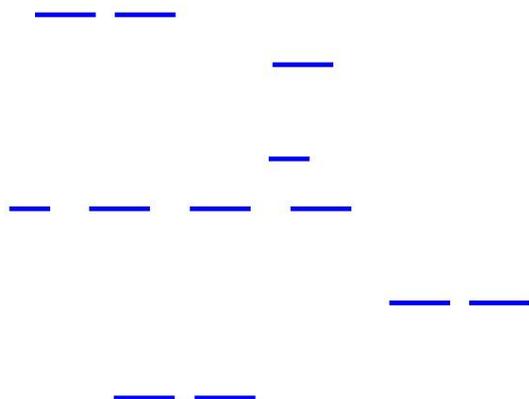
ス盤ドミノパズル、[72-73](#)、

[75](#)チェスをプレイするコンピュー

タ、[113-14](#) カイロプラクティック、[165-67](#) 初期科学に対するキリスト教の抑圧、[158](#)

引用-評価-報酬サイクル、196-97、204引用:コンピュー  
タコード、196、204-5データ、195情報 コモン  
ズ、59-60 オ  
リジナルの SDSS 論文、101-2プレプリン  
ト、194-96。参照論文、科学的市民科  
学、5-6、133 彗星探索における、148-49 コミュニティの  
構築、152-53 貢献役割、  
151現在の開花、149、151長い  
歴史、148-49、150長期的な可能性、  
151-55参加の動機、154-55  
Open Dinosaur Project、150-51  
ボランティアの情熱的な取り組み、  
40 Project eBird、150改善の余地、  
152-53 実現されていない可能性、182。参照  
Foldit、Galaxy Zoo、社会 気候、地図作  
成、106気候変動:鳥類の個体群と、150組織の創意  
工夫と、171公共政策  
と、<7204>157 オープンであることのリ  
スクについて、199-200 懐疑論者について、199-200 解決の迅速化、11ビル・ク  
リント  
ン、7認知的多様性、31, 32、  
41-43, 48, 51認知的余剰、154, 155認知ツール、3、  
関連項目オンラインツール コラボレーシ  
ョン:従来型組織とオンライン、34-  
37, 39  
  
市場と、数学における37  
~39、2、オフラインの  
小グループとオンラインにおける、39~43、要約、  
32~33、時間的制約、  
198~99。関連項目:オープンサイエンス、オープンソースアプローチ、コラボレーシ  
ョンのスケールアップ

コラボレーション 市場、 [85](#), [86](#), [87](#) イン  
センティブ、 [196](#) 実現  
されていない潜在能力、 [182](#) 集合  
的行動の問題、 188-90 集合的洞察、 66-  
68, [74](#) 集合知 : データ駆動型知能  
と、 [115](#) 限界、 [33](#), [72-78](#) 潜在的な科学的用途、 82-87 科学の適合  
性、 78-82。集合知の増  
幅も参照ロバート・コルウェル [218](#) 組み合  
わせ線 [211](#) コメットハンター [148-49](#) コメントサイト : 成功例 [234](#) ユーザー投稿  
[179-81](#) 科学  
の商業化 [87](#), [184-86](#) 見知  
らぬ人たちの会社 (シーブ  
ライト) [37](#) 比較優位 : 注目  
の構造と [32](#), [33](#), [43](#), [56](#) 科学からの例 [82](#), [83](#), [84](#), [85](#)  
InnoCentive Challenges の  
場合 [24](#), [43](#) モジュール性と [56](#) 技術的な意味 [223](#) 競  
争 : データ共有と [103-4](#) 共同作業の障害として [86](#) タン  
パク質構造予測の場合 [147-48](#) 科学的な仕事の場合 [8](#), [9](#), [178](#), [186](#) 複雑性動物園 [233](#)  
コンピュータコード : バイオインフォマティクスにおい  
て [108](#) 集中化された新しいツールの開発、  
[236](#) 引用、 [196](#), [204-5](#) 複  
雑な実験の場合、 [203](#) height=" "  
情報共有における、 [57-59](#) 共有、 [87](#), [183](#)、  
[193](#), [204-5](#)。 Firefox、Linux、  
MathWorks コンペティション、オープンソースソ  
フトウェア コンピュータゲーム : 中毒  
性、 [146](#), [147](#) タンパク質  
の折りたたみの場合 (Foldit を参照) [コネクトニ  
ム](#)、ヒト、 [106](#), [121](#)



会話、オフライン、小グループ、 39-43 会話的臨  
界質量、 [30](#)、[31](#)、[33](#)、[42](#) [コーネル大学鳥類学研究](#)  
所、 [150](#) [アラン・コックス](#)、 [57](#) [クリエイティブ・コモンズ](#)、  
[219](#)、[220](#) [創造的](#)  
問題解決、 [24](#)、[30](#)、[34](#)、[35](#)、[36](#)、[38](#)。  
[問題解決も参照](#) [フランス・クリック](#)、 [79-80](#)、[104](#) [連鎖反応](#)のための臨界質量、  
[29-31](#) [会](#)  
話的、 [30](#)、[31](#)、[33](#)、[42](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

暗黒物質、 [127](#) [デ](#)  
ータ :引用、 [195](#) [盗難](#)、  
[104](#) [データベ](#)  
ース、オンライン :世界の知識のすべて、 4-5 [アメリカ化学](#)  
会、 [164](#) [生物学](#)、 [121](#) \_\_\_\_\_

GenBank、 [4](#)、[6](#) ~ [7](#)、[9](#)、[108](#)、  
Open Dinosaur Project、 [150](#) ~ [51](#) [助成](#)  
機関によって指定されたもの、 [191](#) \_\_\_\_\_  
[データ駆動型インテリジェンス](#)、[生物](#)  
学では [112-16](#)、[市民](#)  
科学では [116-19](#)、[機械翻訳](#)では[151](#)で補完さ  
れています。関連項目[データ集約型科学](#)における知識の意味 [データマイニン](#)  
[グ](#)におけるデ  
ータ共有の概念[222](#) [助成金機関](#)による強制[190-93](#) [現在](#)  
の技術[119-21](#) [分業](#)と[107-8](#) [遺伝学](#)にお  
ける極端なオープン  
ン性[183-84](#) [4](#)、[6-8](#)、[9](#)、[108](#)、[190-91](#)、[192](#)、  
[222](#) [インセンティブ](#) [195-96](#) [動機](#) [108-](#)  
[9](#) [抵抗](#) [7-8](#)、[9](#)、[108](#)、[109-10](#)、  
[176](#)、[181-82](#)、[183](#) [スローン](#) [デジタ](#)  
[ルス](#) [カイサー](#) [ベイ](#)における[データ共有の概念](#) [102-5](#)、  
[108-10](#)、[181](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

試してみる、[203](#)。バミューダ協定、オープンサイエンス、機密データウェブ、生物学、121-22、構築、  
119-22、196、必要なコミットメント、192、  
[データ駆動型インテリジェンス](#)、  
[112](#)、[116](#)、[119](#)、夢、[111](#)、科学についての  
重要性、122-28、実現されていない可能性、[182-83](#)も参  
照。インターネット、  
ネットワーク化も参照。

科学; オンラインツール; オープンサイエンス  
デイヴィッド、ポール、[219](#)、  
[233](#)民主主義、科学、[157](#)、[158](#)[密度ハイルズ](#)  
•ジューエット (DHJ)定理、209-13  
デシュパンデ、アミット、[57](#)  
[設計](#)されたセレンディピティ、[27-31](#)、[33](#)、[223](#)[デー](#)  
[タ共有](#)と、[103](#)[動的](#)分業と、  
[35](#)[市場](#)の力と、[38](#)[コラボレーション](#)の規模  
と、[42](#)

デゼンホール、エリック、[165](#)  
ダイヤモンド、ジャレッド、[232](#)  
Digg, [163](#)[恐](#)  
竜、150-51 [科学的](#)発見：  
功績、193-94 17世紀に開発された方法、[3](#)[デー](#)タベ  
[ス](#)のマイニング、[87](#)[新しい](#)パターン、[106](#)[現在の](#)偉大な時代、[107](#)[再](#)  
[発明](#)、10-11 (オープンサイエン  
[ス](#)も参照) 高速化、[11](#)、  
[197](#)、[206](#)、[207](#)[未開発](#)の可能性、[23](#)  
大規模科学共同研究における検証、[202-3](#)分業 :データ共有によ  
る変化、[107-8](#)[動的](#)、[34-36](#)、[38](#)、[57](#)

DNA: 塩基配列、116-19 [二重らせん](#)構造、  
79-80、[104](#)、[116](#)[生物](#)の形状と、142-43 [コード](#)されるタン  
パク質、[122](#)、143-45

ドリゴ、トマソ、 [201-2](#) \_\_\_\_\_  
ダガンズ、ロバート、 [166](#) \_\_\_\_\_  
ドレクスラー、エリッ \_\_\_\_\_  
ク、 [218](#)医薬品開発、 [186](#)矮 \_\_\_\_\_  
小銀河、 [96-99-100-112-131-140](#) \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
ダイアー、ジェイソ \_\_\_\_\_  
ン、 [1](#)動的分業、 [34-36](#) \_\_\_\_\_  
情報コモンズと、 [57](#)市場、 [38](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

地球の科学的地図作成、 [106-7](#)イーズリー、デ  
イビッド、 [217](#)イースタ  
一島、 [170](#) eBird、 \_\_\_\_\_  
[150](#)経済学、 \_\_\_\_\_  
共有された実践、 [77](#)。市場も参照アインシュタイン、アルバー  
ト：  $E = mc^2$ 初期の曖昧さ、 \_\_\_\_\_、 [59](#)  
[78-79](#) 科学の意義について、 [146](#)  
[急速に受け入れられたアイデア、228](#) [重力理](#)  
[論、27、35、81、123](#) [アイゼンシュタイン](#)、  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ [エリザベス](#)、 [219](#) [電子医療記録システム](#)、  
[94](#) [エレック](#)、[ジョン](#)、 [54](#) [エルゼビ](#)  
\_\_\_\_\_ [ア誌](#)、 [164](#) [複雑知識システムの創発的特性](#)、 [123](#)  
[言語](#)、 [126](#) [エン](#) \_\_\_\_\_  
[ゲルバート](#)、[ダグラス](#)、 [217](#)、  
[218](#) [起業家と科学の社会的利益](#)、 [156-57](#) [エルゴード理論](#)、 [212](#) [科学的証](#)  
[拠](#)、 [202-3](#) [自然淘汰](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ [による進化](#)、 [123](#) [大規模な専門知識グ](#)  
[ループ](#)、 [31、41-42](#)。 [集合知](#)、[マイクロ専門知識](#)、[再構築専門家](#)の注意の  
[説明も参照](#)、 [123-24](#)、 \_\_\_\_\_  
[125-28](#) \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_

Facebook、 [95](#) \_\_\_\_\_  
対面でのコラボレーション、 [40~41](#) [虚偽](#)  
の主張、 [201~2](#) \_\_\_\_\_

ファラデー、マイケル、 [175](#)

ファーケ、アンディ、 [150](#)

ファインマン、リチャード、 [80歳](#)

フィールズ賞、 [1,167有限単](#)

純群の分類、 [202-3](#)

ファイアフォックス、 [55~56](#)

Foldit, [143](#), [146-48](#), [151](#) 認知的余

剰と, [154](#), [155](#) 論文の目標, [181](#) ネットワーク科

学の可能性と, [175](#) 改善の余地,

[152-53](#) 社会の変化と, [159](#)

フォード、ヘンリー、 [35](#)

フォーラム、オンライン、 [20](#), [77](#), [152](#)

フランクリン、ロザリンド、 [79-80](#), [104](#) フリー

スタイルチェス、 [113-14](#)

フルステンベルグ、ヒレル、 [212](#)

銀河 :活動銀河核、 [131](#), [132](#)

矮星, [96](#), [99-100](#), [112](#), [131](#), [140](#) グリーンピー

ス, [5](#), [135-40](#), [142](#), [155](#) 超高速星, [155](#) 合体,

[140](#), [155](#) 天の川, [96](#), [97](#), [99-100](#), [127](#),

[140](#) 対をなす, [140](#) スローン

万里の長城, [97](#), [99](#), [100](#), [112](#), [116](#). スカイサーベイも参

照

銀河動物園, [5-6](#), [129-31](#), [133-42](#) 認知的余剰と,

[154](#) 訓練されたコンピュータアルゴリズム

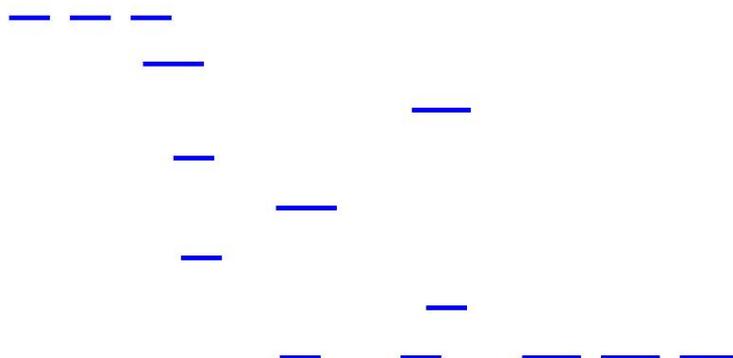
ム, [151](#) 日常の天文学との比較, [141-42](#) 重力レンズ

と, [140](#) グリーンピース銀河と, [5](#), [135-40](#), [142](#), [155](#) 合体銀河と,

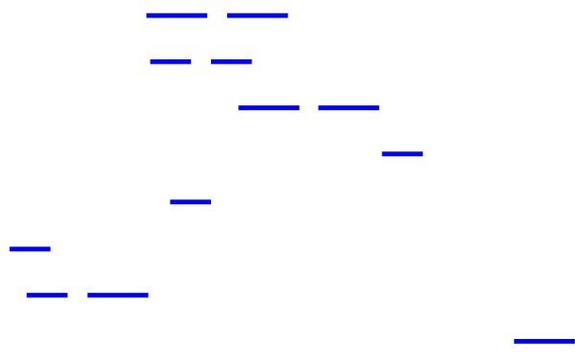
[140](#), [155](#) モジュール性, [51](#) 貢献者の動機,

[146-47](#), [155](#) 独自の開発, [133-35](#) 対になった銀河と, [140](#)

ネットワーク科学の可能性と, [175](#)改善の余地, [152-53](#) 科学論文の目標, [9](#), [181](#)科学論文の支援, [140](#)社会の変化と, [158](#), [159](#), [169-70](#) 先行研究と, [129-33](#), [140](#), [142](#), [155](#) ギャラクシー動物園2, [140-42](#) ギャラクシー動物園:ハッブル, [140-41](#) ガリレオ, [3](#), [102](#), [158](#), [172-73](#), [174-75](#), [183](#)フラ  
ンシス・ガルトン, [19](#)ガンド, [ブルキ](#)  
ナファソ, [46-48](#) GenBank, [4](#), [6-7](#), [9](#), [108](#), [222](#)一般  
相対性理論, [27](#), [123](#), [127](#)遺伝暗号, [142-44](#) 遺伝学: アレ  
ン脳アトラスと, [106](#)すべての種の,  
[107](#)疾患と, [3](#), [191](#)ゲノム配列決定, [116-19](#) ハブ  
ロタイプマップ, [4](#), [107](#),  
[108](#), [118](#), [119](#), [121](#)ヒトゲノムプロジェクト,  
[7](#), [107](#), [108](#), [110](#),  
[111](#), [181](#)マウス脳アトラ  
スト, [106](#)データの共有, [4](#), [6-8](#), [9](#),  
[108](#), [190-91](#), [192](#), [222](#)水中インターネットと, [105](#)ウ  
ィキプロジェクト, [178](#), [233-34](#).参照DNA Gene Wiki, [233-34](#)  
ゲノムワイド関連研究 (GWAS),  
[191](#) Gibson, Mel, [34](#) Ginsparg, Paul, [182](#) Gleick, James,  
[80](#)地球温暖化。気候変動参照GM  
School, [16](#), [17](#), [26](#) Goldhaber, Michael, [217](#) Google:  
データ駆動型インテリジ  
ェンスと, [115](#)日常的な使用, [96](#)言語翻訳, [125](#) Linuxシス  
テム, [45](#)検索クエリ  
の予測的使用, [93-95](#) イ  
ンフルエンザの追跡,  
[93-94](#), [95-96](#), [112](#), [116](#), [122-23](#)



Google Scholar, [159](#)  
Gott, J. Richard, III, [97](#), [98](#), [99](#), [100](#)政府:データ共有、民主的、科学的知識、 [157](#), [158](#)。公的資金による科学、公共政策も参照。 Gowers, Tim, 1-2, [30](#), [32](#), [63](#), [212](#)。 Polymath Projectも参照。 助成機関:データ共有と、 [7](#), [108](#)論文へのオープンアクセスと、 [162](#)オープンサイエンスと、 [190-93](#), [205](#), [206/a](#)>権力、 [191-92](#), [235](#)知的財産の追求と、 [184](#)。国立衛生研究所 (NIH)も参照。公的資金による科学研究費補助金の競争, [8](#), [9](#), [178](#), [186](#)重力レンズ, [140](#)重力: アインシュタインの重力理論, [27](#), [35](#), [81](#), [123](#)ニュートンの重力理論, [3](#), [102](#), [126-27](#) ジム・グレイ, [218](#), [222](#)ベン・グリーン, [212](#), [213](#)デビッド・アレン・グリーン, [166](#)グリーンピース銀河, [5](#), [135-40](#), [142](#), [155](#)グリーン・タオ定理, [212](#), [213](#)マルセル・グロスマン, [27](#), [35](#)アレクサンダー・グロタンディーク, [198](#), [199](#)集団心理学: 実験, [69-71](#) オンラインツールと, [20](#)集団思考, [77](#)ネッド・ガリー, [62](#), [218](#) GWAS (ゲノムワイド関連研究)、 [191](#)



ヘイレヴィ, アロン, [218](#)ホール, メアリー・ボアス, [188](#), [219](#)ハニーのフォールウェルプ, [130](#), [132-33](#)。フォールウェルプも参照ハンセン, チャック, [119](#)ハプロタイプマップ, [4](#), [107](#), [108](#)データウェブと, [121](#)ゲノムシーケンシングと, [118](#), [119](#)ハーノイス, マイケル, [49](#)ホーキング, [スティーブン](#), [81](#), [102](#), [161](#), [194](#)



ジャンス、アーヴィング・レスター、 [218](#)

ヤンセン、ピエール・ジュール・セザール、 [138](#) [誌、科](#)

学 : 歴史的起源、 174-75、188-89

歴史的価値、 182-83 [オープンアクセス](#)、

[6](#)、160-65。引用文献も参照。[論文](#)、[科学論文](#) ユスティニアヌス帝（皇帝）、 [158](#)

カチエイシュビリ、ギオルギ、 [25歳](#)

カルポフ、アナトリー、 [18歳](#)

カスパロフ、ガリー、ハイブリッドチェ

ストーナメント15~18、[専門知識の制限](#)[114](#)、[32](#)

カスパロフ対世界、 15-18 集団的知性の増幅、[21](#)、[66](#)、

[75](#) 集団的洞察と、66-68 会話の臨界質量、[30](#) 動的的分業、34-36 [専門家の注](#)

意と、24-26、[28](#)、[66](#) マイクロ貢献、[64](#) 共有さ

れた実践、[75](#) 委員会に対する優位性、[39](#)

カツネルソン、イツハク、 [212](#)

ケイ、アラン、 [58歳](#)

ケリー、ケビン、 [221](#)、[233](#)

ケプラー、ヨハネス、 [104](#)、[172-73](#)

ケプラーミッション、 [201](#)

カリブマン、アレクサンダー、 [26歳](#)

クラインバーグ、ジョン、 [217](#)

知識 : 市場によって集約される、 37-39

情報 [コモンズ](#) の現在の構造の変化、 [10](#)、[206](#) [情報コモンズの全](#)

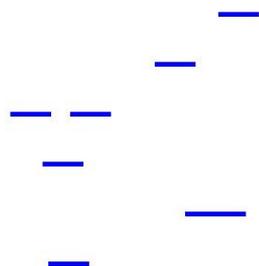
体、 [123](#) [情報コモンズの現代](#)

的な拡張、 [31-32](#) 公共のアクセス可能性、

[96](#)。知識の中に見出される意味も参照 [Knuth](#)、

Donald、 [58](#) [Krush](#) , Irina、 16-18、24-[26](#)、[35](#)、66、67-68、74

Lakhani, Karim, [218](#)機械  
による言語翻訳, 124-26 Lanier, Jaron, [223](#)大型ハド  
ロン衝突型加速器 [\\_\\_\\_](#)  
(LHC), [161](#)大型シノプティックサーベイ望遠  
鏡 (LSST), [107](#), [151](#)レーザー, [157](#) Lauer, Tod, [100-101](#), [103](#),  
[114](#)リーニ製  
造業, [36](#) Leibniz, Gottfried [Wilhelm](#),  
[174](#) Lessig, Lawrence, [220](#)  
Lévy, Pierre, [217](#), [221](#)ライブラリと新し  
い知識ツール, [235-36](#) [ライン](#)  
フリー構成, [209-10](#), [212](#) [\\_\\_\\_](#)  
Lintott, Chris, [133](#), [134-35](#) Linus の法則, [223](#) Linux:  
開発における意識的なモジュール性, [51-52](#), [56-](#)  
[57](#) マイクロコントリビューション,  
[63](#)ニアフラクチャリン  
グ, [49-50](#) 起源, [20](#), [44-45](#) リリース2.0, [52](#) 社会の変化と, [158](#) 遍在性, [45](#)



ロッキード・マーティン・スカンクワークス, [36](#) [\\_\\_\\_](#)  
ロッカー, ジョセフ・ノーマン, [138](#) [\\_\\_\\_](#)

機械翻訳, [124-126](#) [\\_\\_\\_](#)  
マッケイ, チャールズ, [218](#) [\\_\\_\\_](#)  
マッドマックス (映画), [34](#) [\\_\\_\\_](#)  
マゼラン雲, [99](#) [\\_\\_\\_](#)  
マンハッタン計画, [36](#) [市](#) [\\_\\_\\_](#)  
場 : コラボレーション市場, [85](#), [86](#), [87](#), [182](#), [196](#) [\\_\\_\\_](#) [\\_\\_\\_](#) [\\_\\_\\_](#)  
科学の社会的利益の提供, [156-57](#), [158](#) オンラインコラボレー  
ションとの比較, [37-38](#) オンラインツールに包含さ  
れるもの, [38-39](#), [224](#) Masum, Hassan, [171](#) 数  
学的証明。Polymath [\\_\\_\\_](#)  
Projectを参照MathWorksの競争, [60-63](#), [64-66](#),  
[74](#) 中毒性, [146](#) [\\_\\_\\_](#) [\\_\\_\\_](#) [\\_\\_\\_](#)  
[\\_\\_\\_](#)

情報のフィルタリング、 [199](#)共有実

践、 [75](#)

MATLAB、 [65](#), [66](#)

マッカーシー、ジョン、 [58](#)歳

マクボイ、ラリー、 [50](#)

知識の中に見出される意味 :コンピュータ化されたツールと、 [5](#), [112-13](#), [115-16](#)

データウェブと、 [111](#)劇的

な拡大、 [3](#), [95-96](#) 説明の性質と、 [128](#)新たな発

見の方法として、 [93](#) 関連項目データ駆動型イ

ンテリジェンス 麻疹・おたふく風邪・風疹ワクチン、 [156](#)電子医療記録システム、 [94](#)英国医学研究  
会議、 [191](#)メディ

チ家、科学のパトロンとして、 [172](#), [173](#), [175](#) Medline、

[91-93](#), [95](#), [96](#), [112](#), [115](#)マイクロ貢献。マイクロ専門知識、

[25-27](#), [31](#), [32](#), [33](#), [35](#), [36](#), [48](#) Microsoft: Kasparov

versus the World と、 [15](#), [16](#), [68](#), [227](#) Linuxと、 [45](#), [225](#)

片頭痛とマグネシウムの関係、 [91-92](#), [103](#), [112](#), [115](#), [116](#), [228](#)動物の移動パターン、

[121](#)天の川銀河、 [96](#), [97](#), [99-100](#), [127](#), [140](#)ミ

ラー、アンソニー、 [177](#)ミラー、デイブ、 [51](#)ミリオンペンギンブ

プロジェクト、 [53-54](#) 誤情報、

[201-2](#)モデル vs. 説

明、 [127-28](#) モジュール性、 [33](#), [48](#), [49-57](#),

[226](#)ムーン動物園、 [141](#), [169](#)マ

レンウェッグ、マット、 [20](#)マペット Wiki、 [54](#)

ポール マイヤーズ、 [167](#)

NASAのデータ公開に関する方針、 [201](#)

国立生物工学情報センター、米国、 [4](#), [236](#)

国立衛生研究所 (NIH) :GWASデータの共有は[191](#)年に義務付けられている。

パブリックアクセスポリシー、[162](#)、[164](#)、[165](#)、[190](#) —  
国立医学図書館、[236](#) —  
米国国立科学財団、[191](#) —  
Natureオープンピアレビューサイト、[179-80](#)  
ネルソン、テッド、  
[217](#)ネットワーク科学 : 必要なコミットメント、[192-93](#) —  
オープンサイエンスとして、  
[87](#)、[182](#)抵抗、[175-76](#)、[182](#)革命的な影響、[10](#)、[206-7](#). 関連項目 データウェブ; インターネット; オンラインツール; オープンサイエンスニュースサイト、ユーザー生成、[163](#) ニュートン、アイザック: 重力理論、[3](#)、[102](#)、[126-27](#) 出版への抵抗、[174](#)、[183](#)、[189](#) ネイロン、キャメロン、[219](#) ニコル、ボブ、[141](#) ニッケル、アルノ、  
[230](#) ノーヴィグ、ピーター、[218](#) 小説、共同、[53-55](#) ノーウェル、リック、[138](#) 核拡散、[171](#) —

オバマ、バラク、[120](#) —  
オッカムの剃刀、[126](#) —  
海洋観測イニシアチブ、[105-6](#)、[108](#) — —  
オドネル、ライアン、[38](#)歳 —  
OECD (経済協力開発機構)、[191](#)

---

オルデンバーグ、ヘンリー、[188-89](#)、[197](#) —  
オルソン、マンカー、[189-90](#)、[219](#)  
オンラインツール : 集合知の増幅、[3](#)、[18-21](#)、[24](#)、[32](#)、[82-](#) — — — —

87

注意の構造と、[32-33](#)、[39](#) 橋渡し機能によって可能になる、[6](#)、[87](#) 市民科学において、[149](#)、[152](#)、[154-55](#) 発見プロセスと、[3](#) 動的分業と、[36](#) /blockquote> —

集合的長期記憶の拡張、[175](#) 貢献のフィルタリング、[199](#) —

オープンアクセス運動, [160](#), [162](#),  
[163](#), [165](#). 関連項目 [オープンアクセス出版](#), [6](#), [160-65](#) [オープンアーキテクチャ](#) [ネットワーク](#),  
[46-](#)  
[48](#) [オープンデータ](#). [データ共有](#) [を参照](#) [Open](#) [Dinosaur Project](#), [150-51](#) [Open Knowledge Foundation](#),  
[219](#) [オープンサイエンス](#): [集団的行動](#), [188-90](#) [魅力](#)  
[的な](#), [190-93](#) [科学の文化と](#), [87](#), [181-84](#),  
[186](#) [個人行動の失敗](#), [187-88](#)  
[奨励する](#), [193-97](#) [限界](#), [198-203](#) [向かう](#) [実際の](#)  
[なステップ](#), [203-6](#) [革命](#), [175](#),  
[184](#), [188-89](#), [197](#), [206-7](#) [懐疑論](#), [197](#) [データ共有](#) [も参照](#). [ネ](#)  
[ットワーク化](#) [された](#) [科学](#). [オンラインツール](#) [オープンソ](#)  
[スアプローチ](#), [46-48](#), [87](#) [モジュール性](#),  
[48](#), [49-57](#) [スケーリングパターン](#), [48](#) [再利](#)  
[用](#), [48](#), [57-60](#), [61](#), [183](#) [シグナリ](#)  
[ングメカニズム](#), [48-49](#), [64-66](#) [小さな](#) [貢献](#), [48](#), [64](#)

[オープンソースアーキテクチャ](#), [46~48](#)

オープンソースソフトウェア, [45](#)–  
46 反社会的行動に関連する, [77](#)競合する定義, [225](#)科学者の間での功績, [196](#)設計されたセレンディピティと, [223](#) Folditスクリプトとしての, [147](#) マイクロコントリビューション, [63](#), [227](#)モジュール性, [226](#). コンピュータコードも[参照](#)してください。Linux O'Reilly, Tim, [224](#)経済協力開発機構 (OECD), [191](#)鳥類学, [150](#) Orzel, Chad, [168](#) Osborne, Tobias, [187](#) Ostrom, Elinor, [189](#)–  
90, [219](#)

ページ, スコット, [217](#)  
パロマー天文台スカイサーベイ, [102](#)論文, 科学: [キャリア](#)の成功と, 6, 8, 9, [110](#), [174](#), [178](#), 181–82, [186](#), [194](#)他者のデータの引用, [195](#)共同プロジェクト, 9, [181](#)[ユーザー向](#)  
[け](#)コメントサイト, 179–81 [関連するクレジット](#)  
ト, 193–94 [ギャラクシーズの貢献](#), 9, [140](#), [181](#)  
vs. 新しい共有の価値, [204](#)[オープンアクセス](#), 6,  
160–65 [オープンソースサイエンス](#), [87](#)[海賊版オンラインコピー](#), [163](#)[プレプリント](#)と, 194–95, [196](#) (arXivも[参照](#)) [迅速な出版](#), [174](#), [175](#)[従来の科学出版](#), [160](#), 163–65 [ウェブアクセス料](#)  
金については、159–60ページを[参照](#)。  
[引用文献](#)、[ジャーナル](#)、[科学雑誌](#)も[参照](#)。

[特許](#)、6, [184](#)–[86](#)[科学](#)  
の[パトロン](#)、[172](#), [173](#), [175](#)  
[ポーリング](#)、[ライナス](#)、[79](#), [80](#)



Popovi , Zoran, [146](#)[148](#)[プレ](#)  
プリント, [194-95](#), [196](#). arXivも参照素数, Green-  
Tao 定理, [212](#), [213](#) PRISM (科学と医学における研究公正性のため  
のパートナーシップ), [165](#) プライバシー, [198](#). 秘密問題解決: 集団, Foldit プレイヤーによ  
る, [147-48](#) 創造的,

[24](#), [30](#), [34](#), [35](#), [36](#), [38](#) 孤独と, [198](#), [199](#)

eBird プロジェクト, [150](#) Solar Storm Watch プロジェクト, [141](#), [169](#) タン

パク質: DNA [コーディング](#), [122](#), [143-45](#)

例, [143-44](#) [折り畳み](#), [143-48](#),

[151](#) (Foldit も参照) [構](#)

造と機能, [121](#) X 線回折研究, [145](#), [147](#) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

プトレマイオスの [アルマゲスト](#), [98](#), [102](#), [104](#), [107](#)

Public Library of Science (PLOS), [162](#), [163](#), [165](#) [公的資金による](#)

科学 : 商業主導の秘密主義、

[184-86](#) 強制的なオープン性、 [190-91](#) 経済的規模、

[203](#) . 助成金機関も参照。 [公共政策](#) : [オープン](#)

サイエンスについて、 [205-6](#) [科学的知識に影響を与える](#)、 [157](#)。

政府、社会、出版社、新しい知識ツールも参照。 [235-](#)

[36](#) 出版。引用文献、科学雑誌、科学論文を参照。 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

量子計算, [86](#), [176-77](#), [184](#), [187](#) [量子力学](#), [プランク模型](#),

[127-28](#) [量子重力理論](#), [81](#) [クエーサーミラー](#), [5](#), [131-32](#) [クエーサー](#),

[130-32](#) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

クイックレビュー、 [180](#) \_\_\_\_\_

qwiki、 [176-78](#)

ラムゼイ、ウィリアム、 [138](#) \_\_\_\_\_

レイモンド、エリック、 [218](#), [223](#) \_\_\_\_\_

Red Hat, [45](#) \_\_\_\_\_  
Reed Elsevier Group, [164](#) Regan, \_\_\_\_\_  
Ken, [26](#) 評判経済, [193](#)–  
[94](#), [196](#), [197](#), [205](#) 専門家の注意の再編成, [24](#) 集合知の増幅, [115](#) コ  
ラボレーション市場, [85](#) 設計されたセレンディピ  
ティと, [27](#)–[28](#) InnoCentive, [24](#) カスパロフ対世界, [24](#)–  
[26](#) マイクロ専門知識と, [25](#)–[26](#), [32](#). 参照: 注  
目の構造 \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

再利用, [33](#), [57](#)–[60](#) 究極の  
オープン性の理想と, [183](#) MathWorksの競争におい  
て, [61](#) オープンソースのコラボレーションにおい  
て, [48](#) \_\_\_\_\_

ローズ、リチャード、 [218](#) \_\_\_\_\_  
リッチ、ベン、 [218](#) \_\_\_\_\_  
リール、ディルク、 [57](#), [63](#) \_\_\_\_\_  
リーマン、ベルンハルト、 [27](#), [35](#) \_\_\_\_\_  
ロックフェラー財団、 [23](#) \_\_\_\_\_  
ロッゲフェーン、ヤコブ、 [170](#) \_\_\_\_\_  
ルービン、ヴェラ、 [127](#) \_\_\_\_\_  
ルドルフ2世（ケプラーのパトロン）、 [173](#) の噂、オ  
ンライン、 [201](#)–[2](#) \_\_\_\_\_

ソーク、ジョナス、 [155](#) \_\_\_\_\_  
サンガー、ラリー、 [8](#) 歳 \_\_\_\_\_  
SAP, [57](#), [63](#) コラ  
ボレーションの拡大, [32](#)–[33](#), [41](#)–[42](#) 注目の方向づけと, [42](#)–  
[43](#) 貢献のフィルタリングと, [43](#) マイクロ貢献に  
よる, [63](#)–[64](#) マイクロ専門知識と, [27](#) モジュー  
ル性と, [53](#), [56](#) オープンソース運動における, [48](#),  
[53](#) スコアリング, [66](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

共同研究に必要な共有手法、[33](#)。集合知の増幅、共同研究も参照。Schawinski, Kevin、[133-35](#), [138](#), [139-40](#)。Schmidt, Eric、[95](#)。Science Advisor、[180](#)。Science Commons、[219](#)。ScienceNews、[163](#)。科学的発見。科学的発見を参照。科学的手法、起源、[3](#)。スコアリング、[48](#)、[64-66](#)、[75](#)。Folditプレイヤーのスクリプト、[147](#)。SDSS。Sloan Digital Sky Survey (SDSS)を参照。

Seabright, Paul、[37](#)。検索エンジン、[115](#)。また、Googleの秘密主義: 科学と遺伝子データの商業化、[87](#)、[184-86](#)、[6](#)、[7-8](#)、ケプラー ミッションのデータ、[201](#)。科学者の動機、[104](#)、[17](#)世紀の科学者、[173-75](#)、[183](#)、[188-89](#)も参照。

関連項目データ共有、オープンアクセス運動 セガラ、トビー、[219](#)。セマンティックウェブ、[120](#)。セレンディピティ。設計されたセレンディピティを参照。セックスワーカー、テクノロジー関連の仕事の訓練、[22](#)。Shallows, Carr、[20](#)。共有データ。データ共有を参照。共有プラクティス、[75-77](#)、[78-82](#)、[198](#)。Sheppard、アリス、[133](#)、[135](#)。Shirky、クレイ、[153](#)、[154](#)、[219](#)。シグナリング。スコアリングを参照。Simon、ハーバート、[217](#)、[223](#)。Sinclair、Cameron、[46](#)。Singh、Simon、[165-67](#)。Skilling、ジェフリー、[165](#)。カンクワークス、[36](#)。Skypeビデオチャット、[41](#)。カイザーベイ、[98](#)。ヒッパルコス、[104](#)。大型シノプティックサーベイ望遠鏡、[107](#)、[151](#)。

パロマー天文台の[102](#)、[プトレマイオスの](#)  
[98,102,104](#)。また、[スローンデジタルスカイサーベイ \(SDSS\)](#)も参照してください。

[スラッシュドット](#)、

[163](#) [スローンデジタルスカイサーベイ \(SDSS\)](#) , [96-105](#) デ

ータ駆動型インテリジェンスと, [112, 114](#) [データ共有](#)、

[102-5, 108-10, 181](#) [データウェブ](#)と, [111](#) [ギャラク](#)

[シーザー](#)の利用, [138](#)、

[139, 140](#) [新しい発見のパターン](#)と, [106-7](#) [ネットワ](#)

[ーク](#)科学の可能性と, [175](#) [シャウインスキー](#)の利用,

[134](#) [銀河のスペクトル](#), [138](#) [スローンプレートウォール](#)、

[97, 99, 100, 112, 116](#) [小さな貢献](#)、

[33, 48, 63-64, 227](#) [マイクロ専門知](#)

識も参照 [スマートチェス](#), [17](#) [スマートフォン](#)、[銀河の分](#)

[類](#), [149](#) [アダムスミス](#), [35](#) [リースモーリン](#), [81](#) [社会 :利益](#) [オープンアクセス出版](#)のメリット, [6,](#)

[165](#) [科学のメリット](#)、

[156-57](#) [科学機関と科学コミュニティの橋渡し](#), [6, 87](#) [科学](#)

[コミュニティ](#)の開放, [183](#)

[科学](#)の役割, [157-59](#)、

[169-70](#) [オンラインツール](#)によって変革された, [133, 158-59, 171](#) [市民科学](#)

も参照

[ソフトウェア生態系](#)、 [203](#) [太陽光](#)

[発電無線ルーター](#)、 [22-24,41](#) [太陽嵐](#)、[141,169](#) [孤独と創](#)

[造性](#)、 [198,199](#)

[ソリモン](#)、[ヨージェフ](#)、 [1](#)

[SourceForge](#), [46](#) [宇宙](#)、

[植民地化](#)、 [11](#) [世界の種](#)、 [121](#) [スペ](#)

[クトル](#)分析、 [136-38,139,140](#)

[スパイアーズ](#)、 [194-95,196](#)

[ストールマン](#)、[リチャード](#)、 [220](#)

[スタッサー](#)、[ギャロルド](#)、 [69-71,74-75](#) [統](#)

[計的機械翻訳](#)、 [124-26](#)

ストックトン、ジョン、 [176](#), [177](#) \_\_\_\_\_  
ストア、ケイト、 [46](#) 弦  
理論、 [81](#), [178](#) \_\_\_\_\_  
スーパー、ピーター、 [219](#) \_\_\_\_\_  
サンスティーン、キャス、 [78](#), [218](#) \_\_\_\_\_  
ジェームズ・スロヴィツキ、 [19](#), [78](#), [218](#) \_\_\_\_\_  
スワンソン、ドン、 [91-93](#), [95](#), [103](#), [111](#), [228](#) データ駆動型インテリ  
                  ジェンスト、 [112](#), [114](#), [115](#), [116](#) \_\_\_\_\_  
セメレディ、エンドレ、 [212](#) \_\_\_\_\_  
セメレディの定理、 [212](#), [213](#) \_\_\_\_\_

タオ、テレンス、 [1](#), [32](#), [167-68](#), [212](#), [213](#) マイク・テイ  
ラー、 [150](#) ウィリアム・タイ  
タス、 [69-71](#), [74-75](#) ツール。オンラインツ  
ールを参照リーナス・トール  
ズ、 [20](#), [44-45](#), [49-51](#), [52](#), [57](#), [223](#), [225](#) 総合的品質管理, [36](#) マーク・トーブ  
ィー、 [171](#), [217](#) トヨタの動的分業, [36](#) 翻訳,  
[124-26](#) ケビン・トレンバース,  
[199-200](#) トロール, インターネット, [77](#), [199](#) ハリー・ト  
ルーマン, [77](#) チューリング  
賞, [58](#) Twitter, [95](#), [120](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

ユデル、ジョン、 [27](#), [218](#), [223](#) ウマシャ  
ンカール、ニタ、 [22](#) ウノドス、ホセ,  
[68](#) 米国の核兵器 (ハンセ  
ン)、 [119](#) ユーザー投稿コメントサイト, [179-81](#) ウイッタ  
ーホーヴェン、ゲルト、 [49](#) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

ワクチン接種、 [155-56](#), [157](#), [158](#), [159](#) ヴァインゴルテン,  
ヤアコフ。 Yasha van Arkel, Hanny、 [129](#), [130](#),  
[132-33](#), [136](#) Venter, Craig, [7](#) VGER Linux, [49](#), [51](#) を参照 \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

ヴィンジ、ヴァーナー、[218](#)  
の仮想世界、[41名](#)、[87名の](#)  
ボランティア。Citizen Science von  
Hippel、Eric、[219](#) \_\_\_\_\_  
[voorwerps](#)、[129-33](#)、[138](#)、[142](#)、[155](#)を参照 \_\_\_\_\_

ウェールズ、ジミー、  
[8](#)ワトソン、ジェームズ、[79-80](#)、  
[104](#)ウェーバー、ステュー  
ブン、[218](#)ウェブサイト。データウェブ参照。  
オンラインツール [Wedel](#)、  
Mathew、[150](#) Wellcome  
Trust、[191](#) Wheeler、  
John、[123](#) Wikipedia: Gene Wiki の関連、[233-34](#) マイク  
ロコントリビューション、[63](#)モジ  
ユール構造、[52-53](#) オープンソース  
プロジェクトとして、[48](#)捧げられ  
た作業量、[153](#)修正率、[59](#)科学者の初期の  
抵抗、[8-9](#)、[176](#)社会の変化と、[158](#)  
ビジョン、[8-9](#) ウィキ: 注目の構造と、[56](#)共同小  
説の場合、[53-54](#) 失敗した科  
学的例、[176-78](#)、  
[181](#) Folditの場合、[147](#) Gene Wiki、[233-34](#) 奨  
励する、[196](#)アマチュアによる発明、[20](#)  
成功例、[178-79](#) 試してみる、[204](#)群衆の知恵 \_\_\_\_\_  
(Surowiecki)、\_\_\_\_\_  
[19](#)、[78](#)ワードプレス、  
[20](#) \_\_\_\_\_

X線回折、[145](#)、[147](#) \_\_\_\_\_

Yahoo!、[Linux](#)システム、[45 Yasha](#)  
([Yaaqov Vaingorten](#))、[26](#)、[27](#)、[34](#)、[35](#)、[36](#)、[64](#) \_ \_ \_ \_

ザックS、[114](#)

Zボソン、[36](#)