

# 2020 visions

## 2020年 科学の旅 (前編)

Nature Vol. 463(26-32)/7 January 2010

これから10年間、科学はどう展開していくのだろうか。今月号と来月号の2回に分けて、最先端の研究者と政策立案者からの展望を紹介する。go.nature.com/htW8uM にアクセスし、読者諸氏の反応や見方をお寄せいただきたい。

### 検索

Peter Norvig\*

グーグル社

(米国カリフォルニア州マウンテンビュー)

研究担当役員

インターネット検索は10年ほど前から使われ始めたが、2020年までには、さまざまな垣根を越えて進化を遂げているだろう。コンテンツとしては、テキスト、音声、静止画、動画のほか、同僚や友人、情報源、それに自動プロキシ（代理役のソフトウェア）との通信の記録、さらには、身の回りにあるGPS装置や医療機器、その他の埋め込み型センサーが感知した記録のデータなどが、渾然一体となっているだろう。

検索キーワードの入力法は、大部分がテキストではなく音声になっていて、脳の信号の直接モニタリングによる検索も、実験が始まっていると思われる。生活の中でどれだけの時間をどうやって検索エンジンと付き合うかは、ユーザーが決めるだろう。

検索結果は、単なるリストではなく、合成されたものになるだろう。例えば、現在私が「核融合方式の比較」と検索すると、主要な検索エンジンは皆、核融合発電に関する一般的な百科事典の記事を先頭に表示し、その下に似たような記事を並べる。しかし、10年後の検索結果では、主だった方式について要約してそれぞれの違いを浮き彫りにし、あらゆる外国語文書が自国語に自動翻訳され、さらに、結果が有



ILLUSTRATIONS BY JESSE LEFKOWITZ

効性の順に並べられるか、表やチャートで適宜順位付けられているだろう。

さらに「核融合理論の背景となる数学」を検索すると、必要となる複雑な分析に焦点を合わせた概要が即座に表示され、核融合の中の特定の用途や私自身の数学的な理解力に応じて、カスタマイズされる。もしまごついていたら、もう一度私のニーズに合うように再調整表示されるか、さもなければ、検索エンジンは、それについてよく知っている人、あるいは同じ検索で困っている学生とかに、私をつないでくれるだろう。検索エンジンとの対話は流れゆく会話であり、その会話は、生活の中で進行するその他の作業と統合されているだろう。

検索エンジンには、数のみによるのではなく、「質を測る物差し」を組み込むという大きな課題がある。検索エンジンは、2つの課題を同時に判断しなければなら

ない。1つは関連性、つまり、そのアイテムがユーザーの要求項目（クエリー）に当てはまるかどうか、の判断である。そしてもう1つが、質、つまり要求項目とは別に、そもそもそのアイテムが正確なのか、有用なのか、理解可能なものかどうかを判断しなければならない。

現在のところ、関連性の物差しについては、かなりよいレベルに達している。しかし、質の物差しに関しては、文書で表現された概念と関連性について、またそれが世界の現実とどう関連しているかについて、優れたモデルが必要となっている。もちろん、著者の信頼性に関するモデルも必要だ。それにより、月着陸が捏造だったと首尾一貫した論理で主張しているサイトは、捏造の主張の前提が現実と食い違っているため、まともな天文関連サイトよりも質が劣る、と判断されることになる。こ

うしたモデルを理解して改善することが、この先 10 年の重要な課題だ。

## 微生物群集

David A. Relman

退役軍人局パロアルト健康管理システム

(米国カリフォルニア州パロアルト)

感染症主任

これからの 10 年、人体そのものが、最も重要な生態学研究の場となるだろう。人類は、体内に生息する微生物群集に依存して生きている。彼らは我々にさまざまな利益をもたらしており、食物からエネルギーを取り出すこと、免疫系を教育すること、病原体から保護することなど、枚挙にいとまがない。こうした人体固有の微生物相に、近年注目が集まっている。しかし、「広い意味での自分の体」が、何によって構成され、それらがどのように機能しているかについては、まだあまり知られていない。

人体は、さまざまな微生物の生息場所によって構成されている。これまでは、皮膚や口、腸、膈など、大まかな解剖学的仕分けに基づいて研究・規定されてきた。しかし、明らかになっている生息場所、あるいは生息場所の境界部分は、ごく一部にすぎない。特に重要な生体現象は、多くの場合、そうした境界部分で生じている。これからの 10 年、分子微生物学的研究を通じて、希少な微生物種を捕らえ、また、さまざまな空間的スケールで多様性を分析する必要がある。

人体の微生物相は、ランダムに構成されているわけではないが、それを支配している規則はほとんどわかっていない。微生物群集との早期の接触、それらの分散、種間相互作用などは、いったいどんな役割を果たしているのだろうか。微生物群集の中で、選択過程は起こっているのだろうか。もしそうなら、どのようになされているのか。最も重要な問いは、人体はどうやって微生物群集の構成を制御している

のか、だ。こうした疑問に答えることができれば、歯の表面とか腸の粘膜などの微生物群集の構成を、健康な状態にもっていくことができるはずである。

これと同じように重要なのは、微生物群集の安定性や強さ・しびとさについての疑問だ。人体の微生物群集は、抗生物質などによる攪乱<sup>かくらん</sup>に対して、どれだけ抵抗することができるのだろうか。また、どの程度、原状に戻ることができるのだろうか。いったい、健康な状態とはいくつあるのだろうか。微生物群集の回復力が、人間の健康を決定したり予測したりするのだろうか。回復力の基礎にはどんなメカニズムがあり、それを測定したり増強したりするにはどうすればよいのだろうか。

こうした疑問に答えを出すには、微生物相の「機能的特性」を理解しなければならない。そのために必要なのは、微生物の DNA 配列を、RNA、タンパク質産物、機能アッセイ、環境変数などと直接結び付けることだ。人間が持つ微生物群集を、国内あるいは世界的規模で明らかにしようというプロジェクトが始まっており、これはまさによい端緒である。そのほか、この分野に必要なものを挙げると、適切に管理された長期的な臨床試験、非破壊的で侵襲性が最小限ですむサンプリング法、複雑で多次元的なデータの管理・分析法、そして、微生物学者、環境学者、臨床医、生理学者、技術者間の新たな協力関係だ。

## 個別化医療

David B. Goldstein\*

デューク大学

(米国ノースカロライナ州ダーラム)

この 10 年間、強力な遺伝子型判定ツールにより、ヒトゲノム全体にわたって一般的な変異を調べ、多くの病気の背後にあるリスク因子を特定できるようになった。今後の 10 年においては、2 つの際立つ

た発見が、病気の研究の行方を決定付けると思われる。第一は、広く存在する遺伝的変異が、多くの一般的な病気に対する個々人のかかりやすさを決定付けるうえで、限定的な役割しかもっていないらしい、ということだ。第二は、全体の中でごくわずかしか存在しない遺伝子変異が、病気のかかりやすさを極めて強力に左右する場面がある、ということだ。

例えば、ゲノムから大きな塊が削除される原因となる希少な変異は、統合失調症やてんかん、自閉症などの病気のリスクを、20 倍にも高める場合がある。こうした大きなリスク因子を例外的なものとする研究者もいる。しかし私は、今後さらに多くのゲノムの配列が明らかにされるにつれて、影響力の大きなほかのリスク因子が数多く発見されるだろうと考えている。

それが正しいとすると、2020 年の個別化ゲノミクスがどのようなものになるかについて、確信的で忌まわしい予想が成り立つ。病気の主要なリスク因子の発見は、胚などの選別プログラムに対する関心を相当高めるはずだ。社会は既に、間違いなく重度の健康問題につながる変異については、この排除原理を大筋で受け入れている。しかし、例えば、重度だが不特定の神経精神病のリスクが 20 倍高い胚を排除したいと考える人に、社会は配慮できるのだろうか。

遺伝的な差に基づく特製の無害な治療薬の開発など、進歩の中には比較的異論の少ないテーマもある。一方で、統合失調症やてんかん、がんなど、治療が困難な場合が多い病気に対して、新たな薬物標的となりうる決定的な遺伝的リスク因子のように、見方が分かれるものもある。これからの 10 年で、何百万人ものゲノム配列が解読されるかもしれない。そして多くの人は、自分もつリスクについて知らされるだろう。そのような予測力が及ぼす実際の・倫理的問題に対して、どう対処すべきなのか、今、真剣に考え始めるべきだ。

## エネルギー

Daniel M. Kammen

カリフォルニア大学バークレー校

再生可能・適正エネルギー研究所 (米国)  
所長

2020年までに、人類は、しっかりと低炭素社会のレールに乗っている必要がある。それは、効率的でクリーンなエネルギー技術が普及した社会だ。正しく管理されたキャップ・アンド・トレード方式または炭素税によって、炭素の放出を有料とすることが不可欠となる。家庭や企業が、事前に支払いをすることなく、エネルギー効率や再生可能エネルギーのサービスに投資できるよう、創造的な金融も必要になるだろう。私の研究所がデザインとプロモーションに参画している「資産評価クリーンエネルギー」金融メカニズムは、その一例だ (<http://rael.berkeley.edu/financing>)。

政府が研究に資金を出すことは不可欠だ。再生可能技術の中には、爆発的に成長しようとしているものがいくつかある。エネルギー効率の目標値は、消費量を上回るエネルギーを生み出す建築物や電気自動車などの技術革新を促進することによって、需要を減少させるのに役立つと考えられる。太陽エネルギーの研究、特にその保存と配送を効率的に行う方法は、社会の貧富を問わず、ニーズに対応する

ことができる。これらが広く展開されれば、スマートグリッドの開発なども含めて、世界は、2020年までに、太陽光、風力、原子力、地熱、水力による電力供給が80パーセント以上を占めるエネルギーシステムへと、向かっていることになるだろう。

## 精神衛生

Daniel R. Weinberger

米国立精神衛生研究所

(米国メリーランド州ベセスダ)

上級研究員

精神病の背後にある遺伝子がこの10年間に探索され、精神障害は、特定の原因による不連続的な状態ではない、と認識されるようになった。それどころか、精神障害は、発達に影響するリスク因子どうしの相互作用の結果であって、精神症状は、多くの原因によって生ずることがあり、現在の疾患モデルが許容する以上に相互関係をもっている。定着に時間がかかったこの洞察は、2020年までに、精神状態に対する医師の理解と治療法を変化させているだろう。

現在、精神病に特有の遺伝子を発見しようとするのは、非現実的な考え方だと思われる。これからの10年に進めべき現実的な努力とは、細胞や脳の基本的機能をコードする遺伝子を探索することであり、その中でも特に、環境に対す

る反応を調節しているもので、かつ個人のリスクが増大した時に、ある特別な方法で一緒に働くようなものを探し出すことだ。脆弱性の増大には何百万もの遺伝子が寄与していると考えられ、そうした弱点は、特定の精神医学的診断とは無関係に、脳の発達と機能を左右しているかもしれない。精神病にあるのは、一本道ではなく、発達という経路が高度に分岐したネットワークだ。

この取り組み方では、症状を解釈することではなく、根底にある生体の仕組みを適切に把握することにより、診断と治療法が決定される。精神医学的研究は、生物学的心理学というフロイトの夢を実現すべく漂っているが、古い考え方の新しい応用が必要となるだろう (*Nature* 2010年1月7日号9ページを参照)。

## 古人類学

Leslie C. Aiello

ウェンナー・グレン財団

(米国ニューヨーク州)

会長

最近の古人類学研究の多くは、アフリカとヨーロッパに集中している。しかし、インドネシアの小さな人類 *Homo floresiensis* に関する2004年の発表は、我々が人類の進化の歴史の基本的概略を十二分に知っていると考えたことの愚かさを警告するものとなった。*H. floresiensis* が本当に200万年前にアフリカを離れた初期の人類の末裔なのだとすれば、我々は、*Homo erectus* がアフリカを最初に離れた人類だとする昔からの考え方を改めなければならない。また、比較的大きな脳や大きな体、人間らしい手足のプロポーションなど、このアフリカ脱出の前提に関する仮説の多くも捨て去らなければならない。重要なのは、ヨーロッパとアフリカ以外の場所で起こった人類の進化について、我々があまりよく知らずにいることを直視することだ。





これからの10年の大きな課題として、アジアでの人類の進化に関する我々の知識の大きなギャップを埋め始めることが挙げられる。研究機関や政府による財政的支援を受けて、強力で創造的な国際共同研究を行い、必要な研究と分析を実行する必要がある。東アフリカでの研究に対しては、大規模で集中的な支援がなされた。それを担ったのは、トゥルカナ盆地研究所（米国ニューヨーク州ストーンブルック）、マックス・プランク進化人類学研究所（ドイツ・ライプツィヒ）、それに、ハイデルベルク自然科学人文科学アカデミー（ドイツ）のプログラム「人類の初期の拡大で文化が果たした役割」であった。

これと同じような支援が、アジアでの研究にも必要だ。化石の探索はリスクの高い冒険であり、掘りに行けば必ず思うような成果が得られるとは限らない。しかし、近年アフリカとヨーロッパで発見されている新種の人類の数を見ると、アジアで同様の努力をすれば、多くの成果が得られる可能性は高い。

600万年ほどの間に、人類はなぜ、どうやって進化して世界中に分散していったのか。願わくは、この人類進化に関する大きなパズルのピースを、2020年までにもっとたくさん手にしたい。遺伝学、同位体分析、古気候研究などの分野には、化石の発見と同じく進展が期待される。しかし、化石記録の地理的な完成をめざした取り組みなくして、人類の進化に関する重要な問題の答えは得られない。

## 合成生物学

George Church

ハーバード大学医学系大学院

(米国マサチューセッツ州)

遺伝学教授

DNAを読み書きするためのコストは、この10年間で100万分の1に下がった。そのスピードは、集積回路上のトランジスタ数が、時間経過とともに指数関数的に向上するという「ムーアの法則」を超えている。これから10年の課題は、分子工学と計算機とを統合して複雑なシステムを作ることだろう。DNA部品がどう組み合わせかなど、生物学的部品の作製が標準化できれば、原子レベルから集団のレベルまで、CAD（コンピュータ支援設計）技術が使えるようになる。生物学者は、例えば、触媒を最適化するように原子を配置するツールや、協力して物質を作り出すように生物集団を配置するツールを利用できるようになるだろう。

わかりやすいのは、薬物の製造・送達効率を向上させる用途だ。しかし、そのような治療法も、経口ワクチンや「プログラム可能な」個人の幹細胞のような、もっとスマートな治療法に取って代わられるかもしれない。さらに、例えば、近くにある腫瘍を感知して攻撃の準備を整え、がん細胞に穴をあけて毒素を注入するような細菌治療法も登場するかもしれない（この細菌は、天然および実験室の進化で得られたセンサー、論理機能、作動装置を備えている）。

別の用途としては、物質、バイオ燃料、食糧の生産がある。寄生生物への抵抗性をもつ作物や、たった3時間でバイオマスが2倍になる光合成生物の開発がその例だ。コストが下がるにつれ、そうした技術は、開発途上国が、肥料を浪費しながら化石燃料を大量に使う病害の多い農法を飛び越えて、クリーンで効率の高いシステムを作り上げるのに役立つだろう。それは、彼らが、高コストの地上電話網を作らずに、一気に携帯電話ネットワークを構築したのとよく似ている。

合成生物学は、既に生物学の領域を超えた影響力を示しており、2020年までにはそれがますます大きくなっているだろう。ある種の細菌が磁性ナノ粒子を利用して地球の弱い磁場を感知し、それに基づいて動き回る能力を利用したナノ記憶装置など、無数の技術が可能になるだろう。電子チップは旧来のモノづくりの限界を打ち破ったが、その電子チップも、原子レベルで正確な故障のない生物学的回路に、やがては取って代わられるだろう。三次元の「バイオプリンター」は、ほぼすべての製品の価格を劇的に下げる可能性がある。大きな課題は、合成生物学革命によるさまざまな意図せぬ結果、すなわち、環境、経済、社会への影響を予想し、その対策を打つことだ。

## 大学

John L. Hennessy

スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）

学長

90億～100億の人口を支えながら地球生態系を維持すること、貧困の緩和、平和と安全の強化、開発途上国と先進国の双方における人類の健康の増進など、世界はますます複雑な課題に直面している。大学は、こうした諸問題を解決する方法を探求し、それに取り組む次代のリーダーを教育する、という2つの役割を果たさなければならない。

研究を中心に進める我々のような大学にとって、今後10年間における最大の脅威は、政府が直面する財政的な問題だろう。例えば米国では、予算不足で多くの州が公立大学への資金供給を圧縮しており、連邦レベルでは、研究プログラムへの資金拠出が、ゼロ成長または予算削減となる見通しだ。

こうした財政的、知的な難題を解決するために、大学は、研究と教育という使命のとらえ方について、自ら変えていこうとしなければならない。今日の地球的問題の規模と複雑さは、より協同的で学際的なアプローチを要求している。

従来、大学は、分野や学科を中心として成り立ってきた。研究資金を提供する機関も、プロジェクトを経済的に支援するとき、そうした大学の構造を反映させることが多かった。しかし、その硬直性は技術革新を妨げることがあり、時として、広い共同研究の環境を作ろうとする学生教育に対しても、障壁となる。

したがって、大学も資金拠出機関も、分野の枠を越えた研究を奨励する必要がある。狭い領域ではなく、幅広いテーマに基づく学術研究機関群が参加した研究、といったものだ。めざす挑戦課題は、それぞれがもつ伝統的な基本原則や、優秀性を保証している役割を葬らずに、新しい試みを実行することだ。

経済的な圧力が強まるにつれ、研究機関は難しい判断を迫られると考えられる。十分な強みを発揮して学生の関心を集めている領域には高い優先順位を付け、他の領域では、大きな力をもつ研究機関と提携することもありうるだろう。難しい経済状況下で学際的研究を育むための継続的な支援には、監視が必要だろう。

大学には車の両輪のような責任がある。それは、知識の境界を押し広げること、学生を教育することだ。この二重の役割により、我々は未来を形作るために貢献できるのだ。この先10年の課題は、その可能性に恥じない成果を上げることだ。

## グローバルガバナンス

Jeffrey Sachs

コロンビア大学地球研究所

(米国ニューヨーク州)

所長

2020年までに、世界では、持続可能な発展を管理するための効果的なグローバルガバナンス・システムが必要とされる。それには、4つの領域で体系的な改善が求められるだろう。

第一に、政治は専門技術を考慮しなければならない。コペンハーゲンの気候変動会議のような多国間交渉では、多大な時間を使って合意の正当性が議論されるが、科学技術に関するオプションについて議論される時間はほとんどない。技術戦略抜きに目標が発表される傾向があり、その目標は的外れになりがちだ。国連は、専門家グループを立ち上げて気候変動の緩和と適応に関わる実務を支援させ、コペンハーゲン会議をフォローアップすべきだ。数年以内に、地球環境に関する新たな体制を構築し、主要な取り決めに関する科学技術支援について、調査・実行させなければならない。

第二に、官民による新技術への投資を、統合的システムの一環として管理すべきだ。温室効果ガスの排出から地下水資源の枯渇まで、環境関連課題のほぼすべてが技術の変化を必要としている。その実現には、官民の事業の組み合わせが必要だろう。公的部門は、監視、規制、社会

的安全性や社会認識などの問題を担当し、民間部門は、特に研究開発で利益指向の投資を先導する。両者は活動を調和させ、効果的なパートナーシップを追求しなければならない。

第三に、企業のロビー活動の制限が必要だ。これは、持続可能な発展にとって極めて危険なものの1つだ。米国では、ロビー活動、選挙運動資金、誤解をよぶ意見広告による企業の影響力が、経済と環境の効果的規制に対する大きな障害となってきた。例えば、ウォール街による強力なロビー活動は、金融の規制緩和をもたらし最近の危機を発生させ、エネルギー業界からの圧力は気候変動への対応を遅らせた。一部の国では、選挙への公的資金供給などの手段により、そうした影響力の抑制に成功した。米国も見習うべきだ。

最後に、気候、土地利用、生物多様性に関する国際合意を成立させようとするならば、貧困国向けの国際金融を改善しなければならない。貧困国に対する支援の実績はお寒いものだ。富裕国はいつも支援を約束するが、それが実施されることはない。事態を改善させようとする提案が2つ出されている。それは、外国との金融取引への減税と、炭素放出に対する地球規模の課税だ。この2つを既存の援助方式とともに実施し、開発金融の確実な源を作り出すべきだ。(小林盛方 訳)

\* 筆者は経済的利害関係を明らかにしている。詳細は、[go.nature.com/rSQXyc](http://go.nature.com/rSQXyc)のオンライン記事を参照。

