

# 2020年 科学の旅 (後編)

## 2020 visions

2010年1月7日号 Vol. 463 (26-32)

今後10年、科学や技術の世界ではどんな進展がみられるのだろうか。

先月号に引き続いて、最前線にいる研究者や専門家による展望予測を紹介する。

## 人口統計

Joshua R. Goldstein

マックス・プランク人口統計学研究所  
(ドイツ・ベルリン)

所長

20世紀は人口増加の世紀だったが、21世紀は高齢化の世紀となるだろう。2020年には、平均的なヨーロッパ人は、人生の中間点を過ぎていることになる。東アジアの人々がまもなくそれに追従する。増加し続ける高齢者のケアをどう進め、そのコストをどう負担するか、高齢者が消費するものを誰が作り出すのか。これらの問題解決に向けて、人類はこれからの10年間、多くの時間を費やすことになる。

長期的には、出生率の極めて低い国々の出生率を適度に戻すこと、そして移民を増加させることが、高齢化の緩和に大きく寄与しうる。スウェーデンと日本の人口動態見通しが大きく異なっているのは、スウェーデンの出生率が回復に近づいており、小規模ながら着実な移民の受け入れがその不足分を補っているためだ。世界最長寿国の日本では、出生率が低空飛行を続け、移民も大きな社会的課題であり続けている。

高齢化への対処では、4つの切り口からの人口統計学的研究が必要だ。出生率を向上させることは、仕事と家庭に折り合いをつけ、子どもが欲しい人が子どもをもてるようにする方策を取れば可能であろう。移民の社会的・経済的融合の促

進も重要だ。人間を若々しく長生きさせるための健康科学研究は、高齢化した社会では既に重要課題となっている。実際、これまでのところ、健康に生きられる期間の伸びは、平均余命の伸びと同等ないしはそれ以上に高速だ。しかし、ベビーブーム世代が65歳に差しかかってきた現在、もっと大きな問題に取り組まなければならない。それは、人生の転換点の時期を決め直して、人間が活動的・生産的に生き続ける期間を延ばすことだ。高齢化に的確に対応した社会とは、長寿を利用する社会であろう。

## 天文学

Adam Burrows

米国研究会議 (NRC)

ワシントン D.C.

物理・天文学委員会副委員長

今後10年の重要課題の1つは、宇宙を満たしているダークマター (暗黒物質) の解明だ。ダークマター・パラダイムができて約40年になるが、微弱な相互作用しか及ぼさない粒子を直接検出してこの理論を立証しないと、大きな問題が生じることになる。一方で、天文学が直面する最も根本的な謎として、ダークエネルギーの実体解明を挙げる人もいる。その他、希薄なガスと塵からどうやって密度の高い恒星や惑星ができたのか、また、銀河系の中に地球のように生命体が存在可能な惑星がいくつあるのか、知りたがっている人もいる。2020年までには、

こうした問いのすべてに答えが見つかるかもしれないが、まずは、天文学界はこれらのテーマに優先順位を付けなければならない。

優先順位付けは容易ではない。未来の技術は、間違いなくもっと複雑で、また高コストになる。地上天文学が巨大科学に成長した一方で、宇宙天文学は創造性と採算性のバランスに苦しんでいる。結果として、現在ある望遠鏡の運用予算が、新規の望遠鏡建造計画を縛っている。2014年に打ち上げ予定のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡のライフサイクル・コストは、小型で低コストで小回りのきく天体物理関係の観測衛星予算を、今後とも切り崩し続けるだろう。

次の10年間の、刺激的で統合的な戦略を構築するため、2010年末までの完成をめざして、米国は天文学の広範な調査を進めてきた。天文学者は、事業や施設に関する科学技術案件を雪崩のように提出しており、その総額は700億米ドル (約6兆3000億円) を超えるとみられる。これは、今後10年間の新規事業に見込まれる資金の4~5倍に上る。そのため、調査委員会は、大小のプロジェクトの適切なバランスを取ること、また地上観測と宇宙観測の適度な配分に留意しなければならない。さらに、米国天文学固有の特徴である官民の望遠鏡間の調整を行い、しかもそれらの望遠鏡に組み込む観測計器類も、調整して決めなければならない。

まさしく今は天文学の黄金期であり、飛躍的に進歩する可能性は高い。しか



し、それを一部でも実現させるためには、膨大な資金とともに、それをうまく配分する工夫も必要だ。人類は、宇宙の包括的理解の正念場で立ち止まってしまうのか。今後1～2年の政治的決断が、成否のカギを握っている。

## 医薬品探索

Gary P. Pisano

ハーバード大学大学院

(米国マサチューセッツ州)

経営学研究科経営管理学教授

これからの10年間、製薬業界は加速度的な激しい変化に見舞われるだろう。医薬品の研究開発、競争、政府の政策、それに市場の大きな変化という荒波が、既存のビジネスモデルと戦略を洗い続けるはずだ。主要なプレーヤーで転換を図るところは多くはないだろう。立派な企業の中には、既に関係によって消滅したものもある。

業界は、新薬開発を長く追求し続ける会社とマーケティングに集中する会社に二分されるだろう。後者は、短期的には成功するかもしれないが、最終的には破滅する運命にある。製薬産業にとっては、有効な治療薬の開発こそが、価値を生み出し続ける唯一の源だ。多くの重病の治療法の不足と多くの既存薬の凡庸な有効性を考えれば、限りないチャンスがみえる。新薬を探索しようとするリスクが生まれるが、それを避けようとするリスクはもっと大きい。

私は、企業規模や組織構造の観点から1つの優れたモデルを思い描いているの

ではない。多大な科学的資源をもつ一握りの巨大な国際的プレーヤーと、多数の特殊化した企業からなる“生態系”を見通しているのだ。医薬品の技術革新は国際化を続けるだろう。強力な技術革新能力をもつ強大な中国系多国籍製薬企業が出現しても、決して驚くには当たらない。

## 化学

Paul Anastas

エール大学グリーン化学

(米国コネチカット州)

グリーン工学センター

化学の未来は、これまでとは大きく変わっていくはずだ。還元主義的で高度に専門化した従来の化学は、食糧、エネルギー、衛生、輸送、コミュニケーション、そして現代生活を大きく変容させてきた。一方で、意図したわけではないにせよ、限りある希少な資源を枯渇させ、労働者を危険にさらし、環境を汚染した。グリーンケミストリー（環境共生化学）はその打開策であり、合成・物理・生物化学の専門知識を、毒物学・環境衛生学・生命科学の専門知識と組み合わせ、持続可能な化学的デザインを作り出すものだ。

有害物質の使用と生成を抑制・排除した化学製品や化学プロセスを作ること、全体を体系的にとらえて問題解決を図る「システムズアプローチ」そのものだ。「グリーンケミストリーの12の原理」には、原材料や出発物質の入手に始まり、合成・製造プロセスを経て、製品の実用寿命の終わり最終処分に至るまで、分子のライフサイクルの全局面がまとめら

れている。これらの原理は、人工的な物質と自然界との相互作用に関する最新の重要な発見に基づいている。

化学分野では、持続可能な技術革新のための研究資金は貧弱であり、それもあって努力も不十分である。まず第一歩として、「分子科学研究者は、人間と地球に害を及ぼさずに創造性を維持しなければならない」という明確な研究規範を取り入れる必要がある。すべての化学をグリーンケミストリーにしなければならないのだ。

## 生態学

Robert D. Holt

フロリダ大学生物学科 (米国)

これからの10年間、生態学者が直面する最大の現実的問題は、「研究したい対象の多くが、理解される前に消滅してしまう」という可能性だ。人工生態系は着実に地球を支配しつつある。景観は人間が改造し、そこに外来種と耐性自生種の集団が無計画に持ち込まれている。それ自体もまた真つ当な研究対象ではあるが、それでも、我々が十分に記録・理解することさえできずに自然生態系を失うことは、実用的、美的、道徳的に多大な代償を伴う。

このような生物多様性の喪失や生態系機能の破壊を予測して緩和すること、それが最重要課題だ。1つのステップは、食物網などの生態学的ネットワークの回復力、特に、それが攪乱<sup>かくらん</sup>や生物種の喪失に対抗しうる能力を評価することだ。それには、さまざまな学問領域の知識が必要になる。安定同位体分析と遺伝子バーコードは、「群集内で、どの生物がどんな生物を食べているか」を明確化する助けとなるはずだ。

個体から集団、さらには空間的につながった生態系まで、変化はさまざまなレベルで起きている。2020年までに、生態学の理論は、明確にはとらえにくかった「各生物の詳細な機能や役割」とか、

進化のダイナミクスとのかかわりをますます強めていく、と私は考える。主流は、微生物生態学になるだろう。それと同時に、生物種と群集がどうやって地球の歴史に適合してきたかを調べるのが、重要テーマになるだろう。

10年間で、生態学に対する認識は一変するだろう。それは生物学の中核となるだけでなく、地球科学における役割もますます大きなものとなっていくだろう。

## 土壌

David R. Montgomery

ワシントン大学 (米国シアトル)

『Dirt: The Erosion of Civilizations』

の著者

過去の過ちを繰り返さないために、世界は2020年に向かって、地球規模の土壌劣化という問題に取り組みなければならない。これは、21世紀において特に注意すべき挑戦課題の1つである。人類は、全耕作可能地の3分の1以上の表土を既に劣化させている。農地は毎年約0.5%失われている。なのに、推計によれば、今世紀後半には90億人以上の食糧を賄う必要があるのだ。

20世紀には、ハーバー・ボッシュ法によって窒素肥料の大量生産が実現し、緑の革命とも相まって、土壌管理というテーマは農業から事実上切り離された。肥料の大量投入と機械化は収量の増大を支えたが、土壌中の生命を単純化・荒廃させ、土壌本来の生産力を低下させてしまった。例えば、伝統的な農業環境と比較した研究によると、多くの植物に土壌栄養素を供給する菌根菌が、細菌などの生物種により、事実上駆逐されてしまっている。

脱石油社会では、化石エネルギーで生産される安価な肥料の時代が終わりを告げる。大量投入型農業は、持続可能ではなく、また土壌を回復させることもできない。将来の食糧安全保障と環境保護を確かなものにするには、土壌を劣化させ



るような手段や肥料の大量投入に頼るのではなく、それぞれの環境や農地の土壌に合わせた農法を、慎重に組み立てることが必要だ。

そのためには、有益な土壌生物を育て、土壌生態系を維持するための農法や技術の研究が必須だ。政府は積極的に研究資金を拠出するとともに、その採用を推進すべきである。これからの数十年、低耕作農法や有機農法などを採用し、土壌本来の生産力が回復して十分な土壌有機物が蓄えられれば、全世界で化石燃料からのCO<sub>2</sub>排出量の5~15%が減殺される可能性がある。バイオ炭、つまり有機廃棄物を加熱して作る炭<sup>すす</sup>を投入すれば、この減殺量と土壌生産力を、さらに増やすことができるだろう。

ミネラル、微生物、動植物の残骸が形成する地表の薄層は、あらゆる陸上生物の母であり、すべての国にとって最も戦略的な資源だ。しかし、我々はそれを汚れたもののように扱ってきた。土壌、食糧、人間に対しては、通常の一環をすることはいけない。緑、いや深緑の革命を始めるときが来ている。

## レーザー

Thomas M. Baer

スタンフォードフォトリクス研究センター  
(米国カリフォルニア州)

Nicholas P. Bigelow

ロチェスター大学物理天文学科  
(米国ニューヨーク州)

50年前にレーザー開発にかかわった人々は、これほどまでに社会を支える技

術に成長しようとは、想像できなかったに違いない。いまやレーザーは、通信から環境モニタリング、工業生産から医療、娯楽から科学研究まで、多岐にわたって大活躍している。

2020年には、レーザーのビーム径は、ナノメートルサイズまで小さくなっているだろう。それは、小さな分子の大きさだ。一般に、波長よりも小さな物体を解像するには、レーザーや顕微鏡の光源は、その物体よりも小さな穴から放出しなければならない。逆にいえば、1分子の大きさの穴をもったレーザー光源による顕微鏡ができれば、DNAやRNAのような生体分子の配列を、迅速で直接的に解読できることになる。また、現在より100倍も高い記録再生密度をもったハードディスク記憶装置も作れるだろう。パソコンにペタバイト(1000テラバイト)の記憶装置が載る時代がやってくる。

レーザーを利用した超精密時計を使えば、宇宙膨張に伴う基礎定数の変化が測定され、宇宙の起源と進化を説明する現在の理論が挑戦を受けることになるだろう。

次世代レーザーによって、物質の新たな状態を作り出すことも可能になるだろう。大質量星の中心でしかみられない温度まで物質を熱すること、鉛の50倍を超える高密度まで水素原子を圧縮することも可能になる。このような極限状態で得られる核融合反応によって、ほぼ無限の無炭素エネルギーを得ることも、いずれは実現するはずだ。核融合燃料は海水中に十分に存在し、現在、全世界で使われているエネルギー量を宇宙の寿命よりも長く供給できるのだ。

2020年には、極めて短いパルスレーザー、つまり、ごく短時間に光子の放出が行われるレーザーも登場するだろう。そのパルス時間幅は、光が原子を通過するのに要する時間よりも短い。そのような「アト秒パルス」を使えば、化学反応のストロボ写真や、動いている電子の静止画も撮れるようになる。

また、このパルスレーザーを超高強度に増幅すれば、電子や陽子を光速に近いスピードまで加速するエンジンとして利用できる。つまり、サイズ的にもコスト的にもコンパクトな卓上加速器が作れるのだ。もちろんそれは、現在ある最大の粒子加速器に匹敵する運動エネルギーを粒子に与えることができる。

こうしたすばらしい目標を達成するための課題は何か。新しいレーザー素材、光源、超高強度に耐える光学機器、そして新たなナノ製造技術の開発だ。すべてがこれからの10年間に実現されるだろうか。我々はそれを信じている。1960年の発明者のように、我々もまだ、レーザーがもつ豊かな可能性とインパクトを十分にはとらえきれていないからだ。

## NIH

Richard Klausner

コラムグループ

David Baltimore

カリフォルニア工科大学 (米国)

米国立衛生研究所 (NIH) は、米国の生物医学研究のために実験用資金を提供している。しかし、企業は短期的で非独創的な思考に向かうようになってきている。2020年のNIHに寄せる我々の提言は、その文化と意思決定プロセスに、大変化を要求するものだ。

まず、資金提供の基準は、提案されたプロジェクトの詳細ではなく、応募者個人の評価に重きを置くように変えるべきだ。支援したいのは創造的な頭脳であり、NIHが革新的で生産的と認めた人物には十分な支援を行って、その創造性

を独自のやり方で発揮できるようにすべきである。

特に、研究提案を吟味するうえで、現在の高度に専門化した学問領域という体系は、誤りを恐れない創造的試みを阻んでいる。研究機関をベースとした学際的な幅広い評価チームによって、これに置き換えるか、あるいは増強を図るべきだ。そして、研究の目標、問題の重要性、研究者の質にしばって、極めて単純化した応募評価をするべきである。評価の技術的側面では、これまでなされてきた計画の実行可能性の評価から、研究者の能力評価へと軸足を移したい。

同時に、新しい世代の独立した研究者には、通常の学術的ルートとは別の、生産的なキャリアを用意・支援すべきである。つまり、すべての候補生を年長者の監督下で大学院生やポスドクとするのではなく、独立した、あるいは自律的な研究者という道筋もあってしかるべきだ。

2020年までに、NIHは、臨床研究を再活性化させるプログラムをいくつか立ち上げているべきだ。NIHが支援する臨床試験(NIHの全予算の約15%を占める)は、「医学の科学的基盤を強化するには、どうすればよいか」という問いを発すべきである。例えば、NIHが資金を提供する臨床試験は、試験の実施を合理化することに集中し、患者の分類、バイオマーカーの試験、臨床応答のための生物学的に意味のある代用物の特定など、新しい技術を開拓しなければならない。今よりも臨床試験は減るかもしれないが、それぞれが、臨床科学全体を拡張・充実するようデザインされるべきである。

NIH内部のプログラムは、その資金の約10%を占めており、強さを維持すべきである。しかし、明確なミッションが欠け、質が低下している。十分に活用されていない新しい臨床施設には、ほかにない強力な装置があり、これらをNIHの臨床への橋渡し研究の最前線に押し出すべきだ。

臨床研究では、個人もまた進歩のためのカギとなる。組織の外では、臨床研究

者の枠組みを広げることが必要だ。人間の疾患生理に関する学際的研究を奨励し、「実験室からベッドサイドへ」という現在の一方通行を問い直すべきである。

こうした改革が2020年までに、できれば2015年までに実行されれば、生物医学研究での米国の優位は確かなものとなるだろう。

## メタボロミクス

Jeremy K. Nicholson

インペリアル・カレッジ・ロンドン(英国)  
外科がん科部長

代謝プロセスで残る“化学的な指紋”の分析は、個別化医療、特にがん治療で、重要な役割を担い始めている。これは、人間が「多くの共生生物のゲノムを内包する代謝的超生命体」であり、すべての共生生物が個人の生理に影響しうる、という理解に基づいている。人間の代謝は、食事や環境ストレスはもとより、自分の遺伝子と腸内微生物活動との相互作用による影響を強く受けている。この代謝的相互作用の産物は、病気のかかりやすさに直接影響している。

人体の代謝プロセスはどうやって腸内微生物と相互作用しているのか、それを突き止めるのが今後の重要課題だ。というのは、潰瘍性大腸炎、クローン病、肥満、糖尿病、自己免疫疾患など、病気の多くが、腸の健康状態や微生物のアンバランスと関係しているからだ。

2020年には、患者の腸内微生物の代謝活性を監視し、場合によってはそれを治療・調節する医師が、個別化ヘルスケアのチームに加わっているかもしれない。核磁気共鳴分光法や質量分析法による代謝データからその意味を解釈する数学モデルも、使われているかもしれない。それは、変化する人間の病気のパターンを大きなスケールで理解し、薬剤や栄養による新たな治療標的を見つけ出すために貢献するだろう。 ■

(翻訳：小林盛方)