



Science & Technology Trends

科学技術動向

9-10
2014
No.146

レポート・トピックス タイトルをクリックすると各項目にジャンプします

レポート

- p 5

フォーサイトに関する最新動向—第5回予測国際会議
世界の科学技術予測の現状
～社会課題解決に向けて～（開催報告 その3）
国際機関による予測調査
- p12

オープンサイエンスをめぐる新しい潮流（その1）
科学技術・学術情報共有の枠組みの国際動向と
研究のオープンデータ
- p18

世界のスーパーコンピュータの動向（2014年）
- p24

オバマ政権下の最近の米国の科学技術政策の展開
第1部 緊縮財政下における研究開発優先順位設定
- p30

オバマ政権下の最近の米国の科学技術政策の展開
第2部 米国の研究開発エコシステムの特徴と我が国の政策形成への示唆
- p37

医療イノベーションに向けた腸管微生物叢研究の展開
—微生物叢移植とその発展型を巡る研究開発と実用化の動向—



本文は p.5 へ

フォーサイトに関する最新動向—第5回予測国際会議 世界の科学技術予測の現状～社会課題解決に向けて～ (開催報告 その3) 国際機関による予測調査

多様化するフォーサイトのうち、国際機関が主導するフォーサイトは、複数の国にまたがる地域の産業・経済発展、貧困対策、防災や公害問題など、一国では解決が困難な多様な複雑な問題を対象としている。今回の国際会議では、特に日本に関係の深い ASEAN (東南アジア諸国連合) での環境・貧困対策の中で、共通の課題と考えられる「エネルギー・食料・水」に関する調査方法および分析結果について APEC (環太平洋経済協力) の技術予測センター事務局長から報告があった。また、今後の発展が注目されるアフリカにおいて、WRR (オランダ政府科学政策委員会) が調査した通信インフラの普及とその影響についての事例と、結果に見られる特徴、つまりヨーロッパのインフラ普及との違いを中心に、WRR 委員から説明があった。さらに OECD (経済協力開発機構) における政策策定のための調査手法について、これまでの取り組みと近年の調査手法の開発についての説明があった。政策策定に向けた各々の目的に応じた手法の選択と、国民の意見が反映される調査を実施するためのノウハウを含めた手法を知ることは重要で、我が国が継続実施している技術予測調査にとって有用な参考情報にもなる。

本文は p.12 へ

オープンサイエンスをめぐる新しい潮流 (その1) 科学技術・学術情報共有の枠組みの国際動向と 研究のオープンデータ

データは現代の科学技術・学術にとって重要な存立基盤と言っても過言ではない。研究成果の再検証や、成果の社会との共有、データの再利用による研究活動の発展を図る上で、データの保全・管理と共有・利用は今後、ますます重要なものとなると考えられる。こうした状況下で、科学技術・学術にとっての「データ・マネジメント」が国際的な重要課題となっており、政治の場でも、2013年6月のG8会合で研究活動に係るデータのオープン化が合意事項になった。地球科学を中心にした分野では、世界的な科学データ保存の取り組みが、すでに戦後50年以上にわたり続けられている。近年はさらに、データを原著論文と同等の成果として「出版」して保存し、「引用」するデータ・パブリケーションやデータ・サイテーションの検討、また電子データの保全・管理・利活用に関する図書館の新たな役割の再検討などが課題として議論されている。我が国においても、科学技術・学術研究システムの再構築に、科学技術・学術研究情報の電子化・オープン化を進める制度の整備まで含めて取り組むことが求められる。

世界のスーパーコンピュータの動向（2014年）

最近のスーパーコンピュータの動向を概観すると、「演算性能のなだらかな伸び」「電力効率改善は道半ば」「データインテンシブ処理の増大」「ペタ Flops 超の高性能スーパーコンピュータの普及」「エクサスケールへ向けた具体化の動き」「プロセッサ開発における選択肢の増加」などが見える。将来を見据え、高速演算・高速データ転送・低電力化・ポストシリコンなどに向け、商用化量子コンピュータの出現、カーボンナノチューブを用いた論理回路の試作、光インターコネクトの研究、データ移動を抑えるソフトウェア研究等の動きが出ており、その進展が注目される。

今後の高性能スーパーコンピュータの実現には、ハードウェア・ソフトウェア・システム全体の総合的な改善が必要となる。そのための課題は複雑化・多様化しており、グローバル環境での競争と協調を戦略的に考えたコラボレーションがますます重要となる。その事例としての日米間の協調体制による研究開発において、世界を先導する成果の創出が期待される。

オバマ政権下の最近の米国の科学技術政策の展開 第1部 緊縮財政下における研究開発優先順位設定

近年の米国連邦政府の科学技術政策は、基礎研究の強化やいわゆるハイリスクリサーチ支援の拡大などの積極的な取り組みが見られる反面、緊縮財政下において予算増を伴う新規の研究開発プログラムの設置には困難な状況も見られる。

2014年3月に発表された2015年度大統領予算案および同年7月に発表された2016年度予算案作成にかかる覚書は、オバマ政権の政策を理解する重要な手掛かりとなる。2015年度予算案には、「機会、成長、および安全イニシアチブ（OGSI）」という概念が示され、予算法の枠外で重点政策が示されている。また、2016年度予算案作成にかかる覚書においては、知的好奇心に導かれた疑問が研究の発展の鍵となることや、社会的ニーズに対応した民間部門に対する資金配分の考え方などが記されている。

注目すべき取り組みとしては、公的部門における研究基盤の強化に向けた、行政、産業界、アカデミックコミュニティにおける基礎研究・学術研究の重要性に関する認識の共有や、政府による研究者の革新的な発想を支援する施策などを挙げることができる。また、民間部門における実用化、商業化のための政策としては、小企業向け支援事業や国防高等研究計画局（DARPA）をモデルとした新たなプログラムなどの事例がある。

本文は p.30 へ

オバマ政権下の最近の米国の科学技術政策の展開

第2部 米国の研究開発エコシステムの特徴と我が国の政策形成への示唆

米国の科学技術政策を他の先進諸国と比較した場合、いくつか留意すべき特徴がある。この特徴の理解のためには、研究開発エコシステムという考え方を採用し、各国の大学、公的研究機関、企業における研究開発活動への政府の関与の状況を明らかにすることが有効と考えられる。この考え方を通してみると、米国は大規模な連邦政府資金による国防研究開発支出が行われ、他の国々とは異なる特殊なエコシステムを形成していることがわかる。

また、基礎研究・学術研究については、米国、ドイツ、英国は大学において強固な研究基盤が形成されているのに対し、我が国の大学においては深刻な「イノベーション欠損」とも言える状況が存在している。そのような状況の中、各国の研究資金の配分機関は共通の理念に立って革新的な発想の研究を見出し、支援する取り組みを行っている。

民間部門の研究開発については、国防研究開発実施機関である国防高等研究計画局（DARPA）をモデルとして実用化・商業化に向けた成果を上げようとする場合、多くの課題が生じることも予想される。しかし、公共調達と関連付けるなど、我が国の研究開発エコシステムに適合した取り組みを目指すことも考えられる。

本文は p.37 へ

医療イノベーションに向けた腸管微生物叢研究の展開

—微生物叢移植とその発展型を巡る研究開発と実用化の動向—

欧米を中心に実施された2000年代後半のヒト常在菌叢のゲノム解析プロジェクトも相俟って、「実質的な臓器」とも呼ばれる腸管微生物叢（腸内フローラ）に関する研究が急速に進展し、免疫系・代謝系・神経系等の各種疾患における重要な役割が示されてきている。我が国からも、特筆すべき研究成果が生まれており、これら内外の研究から、細菌移植を始めとした方法による腸管微生物叢の調節が、健康長寿に有用であることが示唆されている。

一方、従来効果的な治療法がなかった再発性クロストリジウム感染症に対し、ランダム化比較試験で著しい効果を示すことが2013年に報告されたことから、糞便微生物叢移植が脚光を浴びている。従来の枠組みに収まりがたいこの治療法に関して、患者や研究者のアクセスを左右する、米国での規制上の取扱いを巡る議論もまた注目されている。

この治療法を突破口として、微生物を利用した、より有効性、安全性、簡便性、経済性の高い次世代型医療（予防・診断・治療）の幅広い展開に向け、我が国に特徴的な微生物叢も考慮した研究とその成果の実用化・産業化の推進が望まれる。

フォーサイトに関する最新動向—第5回予測国際会議 世界の科学技術予測の現状 ～社会課題解決に向けて～ (開催報告 その3) 国際機関による予測調査

村田 純一 浦島 邦子

概要

多様化するフォーサイトのうち、国際機関が主導するフォーサイトは、複数の国にまたがる地域の産業・経済発展、貧困対策、防災や公害問題など、一国では解決が困難な多様で複雑な問題を対象としている。今回の国際会議では、特に日本に関係の深いASEAN（東南アジア諸国連合）での環境・貧困対策の中で、共通の課題と考えられる「エネルギー・食料・水」に関する調査方法および分析結果についてAPEC（環太平洋経済協力）の技術予測センター事務局長から報告があった。また、今後の発展が注目されるアフリカにおいて、WRR（オランダ政府科学政策委員会）が調査した通信インフラの普及とその影響についての事例と、結果に見られる特徴、つまりヨーロッパのインフラ普及との違いを中心に、WRR委員から説明があった。さらにOECD（経済協力開発機構）における政策策定のための調査手法について、これまでの取り組みと近年の調査手法の開発についての説明があった。政策策定に向けた各々の目的に応じた手法の選択と、国民の意見が反映される調査を実施するためのノウハウを含めた手法を知ることは重要で、我が国が継続実施している技術予測調査にとって有用な参考情報にもなる。

キーワード：デルファイ調査, シナリオライティング, APEC, OECD, WRR, アフリカ

1 はじめに

1960年代にアメリカで始まり1990年代以降、欧州を中心に各国で盛んに行われるようになったフォーサイトは、自国のためだけでなく、隣国やより大きな枠組みでも実施されるようになり、政府機関のみならず、国際機関においても行われるようになった。このように多様化するフォーサイトのうち、国際機関が主導するフォーサイトは、複数の国に渡った地域の産業・経済発展、貧困対策、防災や公害問題など、一国では解決が困難な多様で複雑な問題を対象としている。特に発展途上国では技術、

規模、予算などの面で単独で行うことは困難であることから、国際機関が様々な形で援助するケースが多い。国家間の利害関係のある中で、各国の要望を満たすためには、各国の技術レベルやこれからの開発計画などの現状把握が必要となる。持続可能な社会の構築を目標として、様々なステークホルダーを対象にしたワークショップを実施することが重要であり、成功の鍵となる。専門家へのヒアリングおよびアンケート調査、ワークショップが中心となるであろうが、政策策定となればより多くの人の意見を取り込むために、一般市民に参加してもらう手法もあり、目的に応じた調査を選んで実施し、それを国民のために役立てることが一番大切である。

今回の国際会議では、特に日本に関係の深い

ASEAN (東南アジア諸国連合) での環境・貧困対策についての実施報告をタイの APEC-CTF の事務局長から、また、これからの発展が注目されるアフリカでの通信インフラについての調査事例について、WRR (オランダ政府政策の科学委員会) 委員のひとりから、さらに OECD (経済協力開発機構) における政府の政策策定のための調査手法についての報告があったので、前回に引き続き報告する^{1,2)}。

2 ASEAN 諸国のための 予測活動

「ASEAN 諸国の持続的経済成長と経済回復のための統合されたフォーサイト」と言うタイトルで、タイの APEC 技術フォーサイトセンター³⁾ (APEC-CTF) の所長から以下のような説明があった。

リアルタイムデルファイの結果を用いた、ASEAN 諸国のエネルギー、水、食料に関するシナリオ作成プロジェクト⁴⁾ を実施した。デルファイ調査で取り扱う内容とシナリオ作成のために、タイ、インドネシア、ベトナム、タイで4回の国際ワークショップを実施して議論した。図表1は議論したテーマ、図表2は議論した内容のサマリーである。

ワークショップで取り上げた「CO₂ 排出」のテーマでは、不確実性として規制の制定が影響することや、「水」のテーマでは資金が重要な要素であることなどが議論された。これらは自国のみならず隣国に関係し、かつ解決困難な課題である。今回作成し

たシナリオでは、APEC 加盟国の貿易についても考慮している。ガバナンスは経済状態に影響するので、チェンジファクターとして不確実性要因に織り込んで検討した。ワークショップでの議論を基に作成したシナリオの結果の一部を図表3に示す。この図表からは、エネルギー政策に関する各国の現状が垣間見られ、こうした現状を踏まえた形で今後取り組むべき課題などが政策決定者の間で議論されることになる。

国によって気象・環境や経済状況は様々であり、それぞれの重要度は異なる。エネルギー、食料、水について国家間の関連性を考慮し、国別に重要度の調査結果をスコア (Constraint Preparedness Index: CPI 制約準備指数) として計算し、それらの比較に基づきネクサス・シナリオ⁵⁾ を作成している。

2009年以降は、タイ国立科学技術イノベーション政策局⁶⁾ (STI: National Science Technology and Innovation Policy Office) が、センターの新しいホストとなった。現在、ロックフェラー財団の協力を得て、「ASEAN のエネルギー、食料、水のネクサス・シナリオ⁷⁾」プロジェクトを進めている。

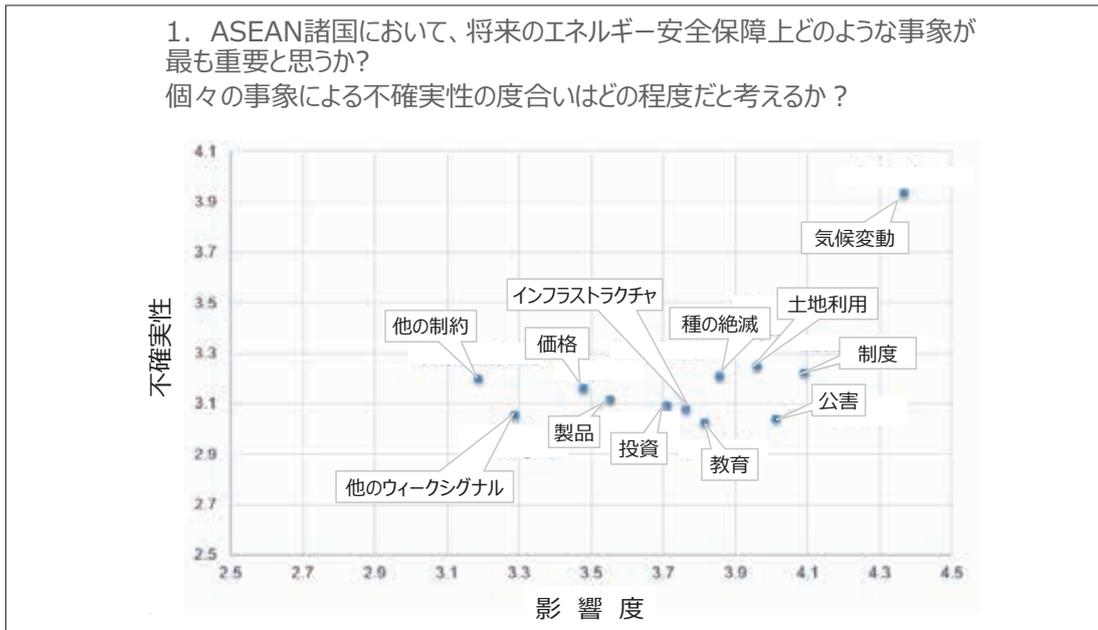
こうした調査結果は、調査のファンディング元である財団と ASEAN 諸国に送り、政策につなげる努力をしている。また、昨年開催された科学技術イノベーション ASEAN 閣僚会議やアジア保健研修所 (AHI: Asian Hospital Inc.) などにも情報提供した。さらに今注目されている TPP に関係する情報収集と分析も関係国と連携して行っている。

図表1 ワークショップで議論したテーマ

1. ASEAN諸国において、将来のエネルギー安全保障上どのような事象が最も重要(最も大きな影響を及ぼす)と思うか？
個々の事象による不確実性(障害となる)の度合いはどの程度だと考えるか？
2. ASEANに必要な活動を実行するための具体的な施策は何か。
それは、どのレベル(局所 - 国内の地方 - ASEAN地域 - 多国間)で実施されることが想定され、最も特徴的な効果、重要度と不確実性は、どの程度か？
3. 2020年以降のASEANの役割の面で、包括的技術革新を奨励するための施策と、貧困層に関係する、エネルギー、水、食糧システムの安全で効率的かつ環境に優しい施策のうち、最も費用対効果が良いと思うのはどれか？
4. 2020年以降のASEANの役割の面で、エネルギー、水、食糧システムの長期的な持続可能性を促進するための施策のうち、最も費用対効果が良いと思うのはどれか？ その関係性や理由は何か？

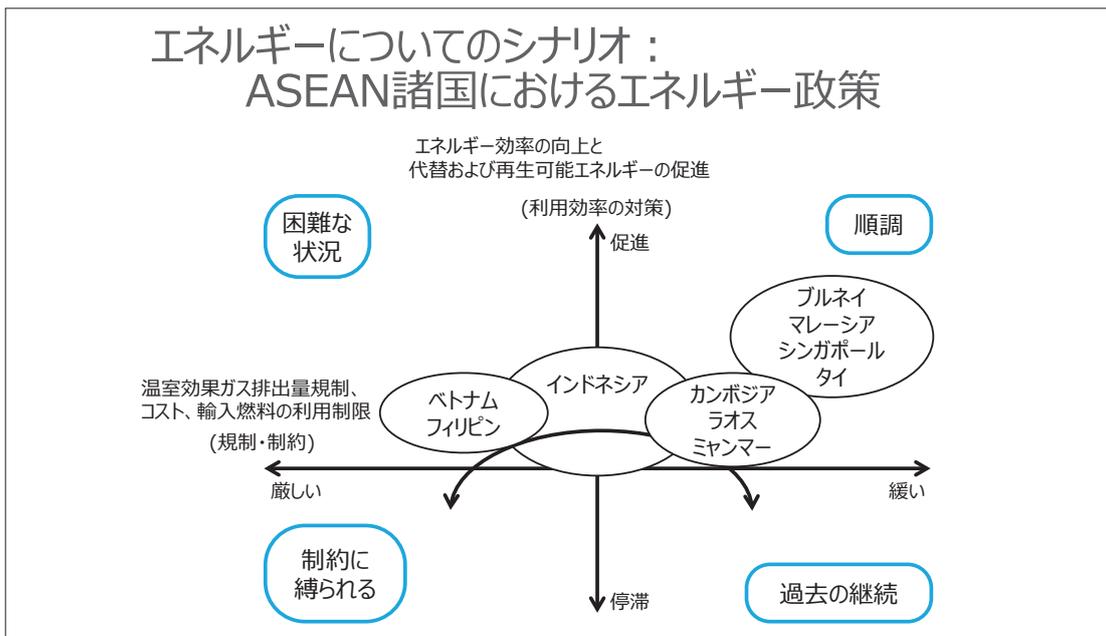
発表資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 影響度と不確実性



発表資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 ASEAN 諸国におけるエネルギー政策のシナリオ



発表資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

3 国家のポリシー作成への関与

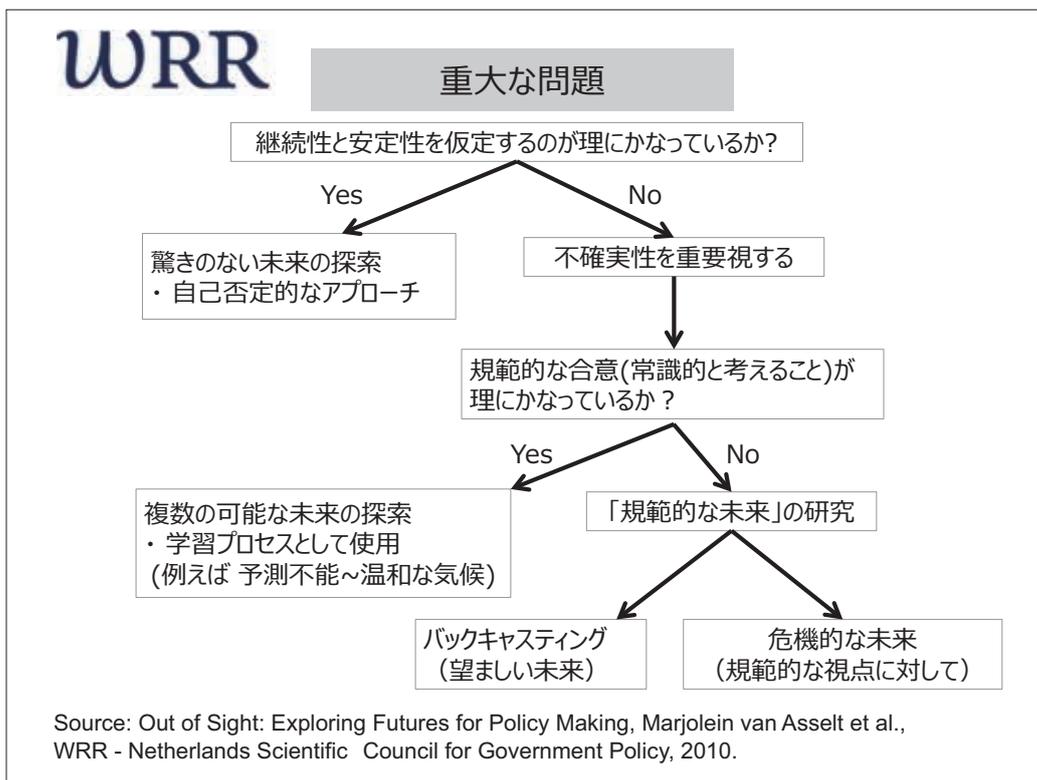
オランダ政府・政策の科学委員会⁸⁾が実施した「アフリカの通信インフラ整備に関する調査」について、調査を担当した大学教授から以下のような説明があった。

既存のインフラは過去からの延長で、かつ未来に継続している。インフラについての分析は客観的、規範的と考えられがちだが、経済状況とイノベーションによる不確実性が影響する。そこで、

重大な問題を考える場合のフローを図表4に示す。ステークホルダーは、合理的なリニアモデルを期待し、政策を考える場合はできる限り不確実性を排除することを検討するのが基本である。しかし、一方で不確実性の中には将来望ましい可能性も含まれることがあるから、バックキャストिंगには批判的アプローチが必要となる。

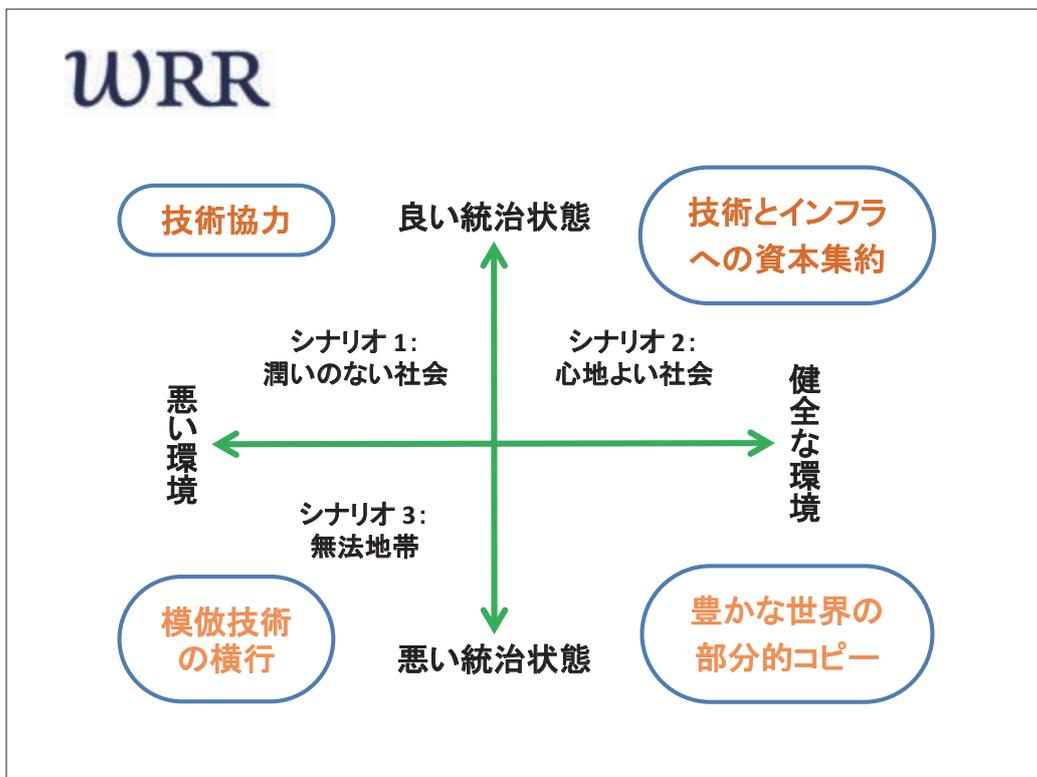
シナリオライティングでは複数の未来が描かれるが、そこに描かれる未来には、少数の人しか気付かない事象が含まれることがある。したがって、人々の交流による相互作用が大切であり、対話により問題設定を再検討することが必要となる。難

図表4 予測の取り組み⁹⁾



発表資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表5 ガバナンスと技術の関係



発表資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

題に対処するには、市民が参加するプロセスが有効であり、さらに過去の歴史を見直すことで、極端なイメージや類似性、変革のダイナミズムを取り込むことで問題解決を探る必要がある。

図表5に示すように、ガバナンスの影響により

技術普及のための環境の質や、使用できるリソースが不確実になる場合がある。また、プロジェクト資金を分散することで、競争と協調によるシナジー効果が生み出され実現が早くなることが期待できる。そのための教育政策も必要である。

イノベーションを起こすには色々な不確実性があることから、複数の未来予測を見て比較することが必要になる。科学者でも様々な影響を受けて偏見を持つことがあるので、調査方法によっては偏った意見が集約されることが懸念される。しかし一方、一般人が交わるワークショップでは有用な示唆や見識が得られるというメリットがある。「一般国民として、どういう未来を望むか」に関する意見を聞くことで、政策に色々なインプットを取り込むことが可能となる。これは新しい方法であり、方法論や成果に関して専門家が関心をもって議論することが望まれる。

こうした考えに基づき実施したフォーサイトとして、2010年、フューチャーラボによる技術の未来に関するワークショップをナイロビで開催した。アフリカでは、技術開発は立ち遅れているが、いったん技術が取り入れられると普及が速い。例えば携帯電話の普及は、7年間で9,000万から4億7,500万回線となった。海底通信回線¹⁰⁾をみると、2009年から2012年で5万倍になり、今も増設が続けられ、ブラジルから、マレーシア、シンガポール経由の既存ケーブルの改良や人工衛星の利用が進んでいる。地上の回線は最寄りの接続点から家まではWi-Fiを利用している。また、ディーゼル発電機と共に、太陽電池、風力発電充電器が無料で使えるようになり、エネルギー使用量が低減した。反面、Wi-Fiの普及によってケニアのサバンナでは、有線による情報通信インフラの普及はそれほど伸びなくなる、つまり固定電話の普及よりも、携帯電話、PCでの通信が普及する「一足飛び」の変化が起こることが想像される。そして、モバイルマネー、位置情報、データコストの低減、通信の信頼性、電力、エネルギー、運輸、通信品質の改質などが進展すると思われる。このように、有線通信と輸送インフラが普及していなかったアフリカでは、無線の通信インフラとICTが急速に普及した。アフリカの発展は、ヨーロッパの企業家に比べはるかに革新的な方法をとったと言える。

今回の調査で、アフリカの通信インフラの普及は、ヨーロッパなどのそれとはまったく異なっていることがわかった。今後、インフラに関する未来研究を進める上では、地域ごとの技術レベルと普及の度合いも考慮に入れるようになるだろう。アフリカから学ぶことはたくさんある。

4 OECDによる国際的な予測の取り組み

「国際的な未来：未来を形成するための未来研究」と言うタイトルでOECDにおけるこれまでとこれからのフォーサイト活動について報告があった。

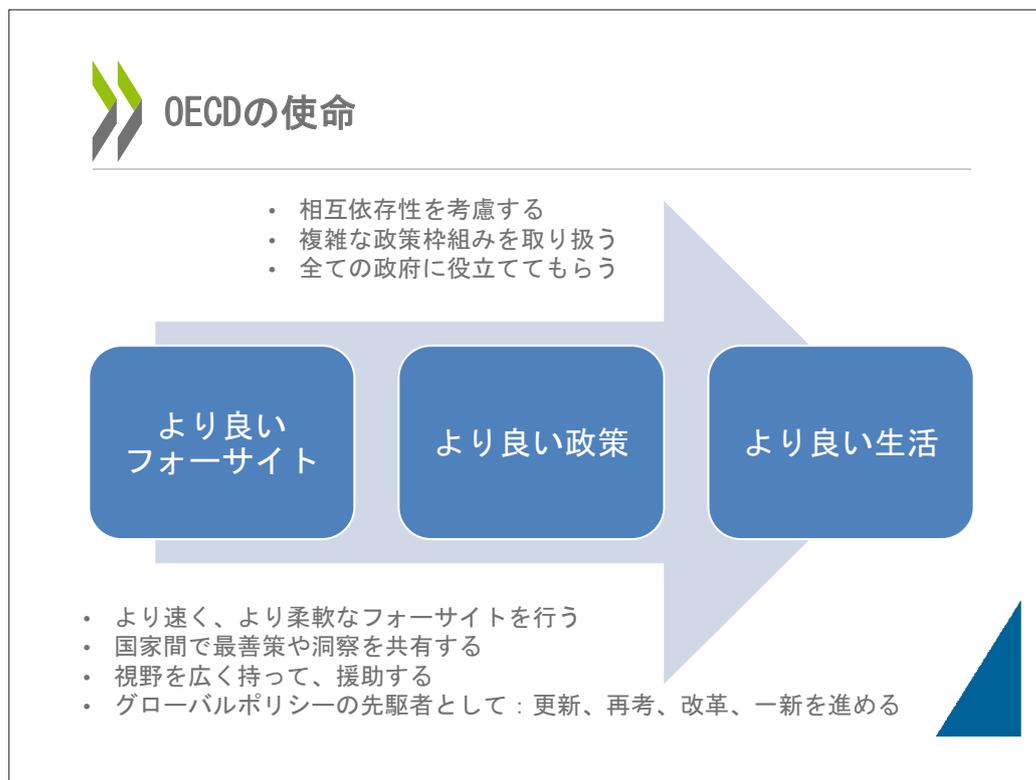
OECDは1961年に設立、1970年代から未来レポートを発表し、その方法論やツールは各国で参考にされている。1979年に発表したレポートには、2年で300万ドル程度支出したが、同じ規模のプログラムを現在実施すると1,200万ドルくらい掛かるであろう。

図表6に示したように、OECDでは各国の国内状態に合わせて政策決定者と連携して、ボトムアップとトップダウンを組み合わせた政策を策定している。その例としてFAOと共同でプログラムを実施し、報告書¹¹⁾を発表している。これまで、政策実施に向けて、現状¹²⁾とのギャップを埋めるために様々な角度で政策を見直し、あらゆる未来を想定してシナリオを作成している。予測の方法には、ホライズンスキミング、トレンド分析、エキスパートパネルなどがあるが、ベースラインを示しながら、経済要因なども考慮して、多様な手段をとることが欠かせない。通常、OECDは、ボトムアップ・イノベーターを念頭に置いて報告書を出している。会議は、34か国2,000人以上の委員が参加し、例えば103回目のCSTPコミュニティー会議のように、270テーマから自由に設定して開催している。現実的なシナリオを作成するために活発な議論をし、その結果制度の整備や再考を促し、政策決定と実施をサポートしている。これまでの成果として、韓国を対象にした「家族の未来」¹³⁾やデンマークを対象にした「R&D政策」などの報告が例として挙げられる。

フォーサイトにも、新しいやり方が取り入れられ、分野別の個別の対策ではなく、分野を越えての協力が必要であり、オープンな会合で建設的意見を出すことが重要である。急変する社会に対応するために、より早く、自由度のある予測技術のアップグレードが必要である。

国際組織間で最良の経験と見識を共有するために、視野の拡大と助け合いが必要である。新しいフォーサイトでは、「自分たちの強みを生かす」ことも重要な検討課題である。その環境に慣れていると、善悪が判断しきれないことから、周りからの指摘も積極的に取り入れることが望まれる。このように、見方を変える、自己変革、関係性の変革、道具の一新などの予測活動により、政策全般の誘

図表6 OECDの使命について



発表資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

導ができる人材の育成も同時に期待できる。大切なのは重要な課題を認識すること、戦略的なことについての話し合いであり、それには効率や投資と言った共通の問題が含まれる。各フォーラムが集まって話し合うことや、フォーラム間で交流する必要がある。そして政策の実施が重要である。

シナリオから未来のプロジェクトを成功させるには、プロジェクトに予算を付ける時、例えばフォーサイト調査に1/3、政策決定ゲーム・シミュレーションに1/3、その他の部分に1/3という具合に配分することも必要である。

(次号に続く)

参考文献

- 1) 村田純一、浦島邦子、フォーサイトに関する最新動向―第5回予測国際会議 世界の科学技術予測の現状～社会課題解決に向けて～（開催報告 その1）、科学技術動向 No. 144. p.10-14、2014年5月：<http://hdl.handle.net/11035/2922>
- 2) 村田純一、浦島邦子、フォーサイトに関する最新動向―第5回予測国際会議 世界の科学技術予測の現状～社会課題解決に向けて～（開催報告 その2）イノベーションとビジネスのための予測調査、科学技術動向 No. 145. p.4-11、2014年7月：<http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-STT145J-4.pdf>
- 3) APEC 技術フォーサイトセンター（APEC-CTF）：<http://www.apecforesight.org/>
- 4) International Focus Group Meeting, “Integrated Foresight for Sustainable Economic Development and Eco-Resilience in ASEAN Countries”：http://www.apecforesight.org/index.php?option=com_content&view=article&id=103:international-focus-group-meeting-integrated-foresight-for-sustainable-economic-development-and-eco-resilience-in-asean-countries&catid=39:new-release
- 5) Asia Nexus Dialogue Workshop Bangkok, Thailand, 17-19 March 2014. 報告書：<http://www.waternexussolutions.org/contentsuite/upload/wns/all/Asia%20Nexus%20Dialogue%20Workshop%20Report%20-%20final.pdf>
- 6) タイ国立科学技術イノベーション政策室：<http://www.sti.or.th/en/>
- 7) Surachai Sathitkunarath, “Integrated Foresight for Sustainable Economic Development and Eco-Resilience in ASEAN Countries”, Asia Nexus Dialogue Workshop, World Water Day 2014 United Nations Economic and Social

Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), 17 Mar 2014 Bangkok, Thailand. :

http://www.waternexusolutions.org/contentsuite/upload/wns/all/Session%201_5%20Surachai%20Sathitkunararat.pdf

- 8) Scientific Council for Government Policy : <http://www.wrr.nl/en/home/>
- 9) Exploring Futures for Policymaking, WRR / Scientific Council for Government Policy, p.13, September 2010 : http://www.wrr.nl/fileadmin/en/publicaties/PDF-samenvattingen/Exploring_Futures_for_Policymaking.pdf
- 10) African Undersea Cables, Many Possibilities : <https://manypossibilities.net/african-undersea-cables/>
- 11) 例えば、農業についての概要報告 : OECD-FAO Agricultural Outlook 2014, DOI:10.1787/agr_outlook-2014-en : http://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook_19991142
- 12) 例えば、科学技術についての概要報告 : OECD Science, Technology and Industry Outlook, September 2012 : <http://www.oecd.org/sti/oecdsciencetechnologyandindustryoutlook.htm>
- 13) Facing the Future, Korea's Family, Pension and Health Policy Challenges, OECD, Feb 2007, DOI : 10.1787/9789264065406-en : http://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/facing-the-future_9789264065406-en

..... **執筆者プロフィール**



村田 純一

科学技術動向研究センター 特別研究員

専門は半導体結晶成長。企業にて、化合物半導体結晶性基板作製の研究などに従事。2013年5月より、科学技術動向研究センターにて、科学技術予測調査の業務に従事。計測、通信用デバイスに関心がある。博士（工学）



浦島 邦子

科学技術動向研究センター 上席研究官

工学博士。日本の電機メーカー、カナダ、アメリカ、フランスの大学、国立研究所、企業にてプラズマ技術を用いた環境汚染物質の処理ならびに除去技術の開発に従事後、2003年より現職。世界の環境とエネルギー全般に関する科学技術動向について主に調査中。

オープンサイエンスをめぐる新しい潮流(その1)

科学技術・学術情報共有の枠組みの国際動向と研究のオープンデータ

村山 泰啓 林 和弘

概要

データは現代の科学技術・学術にとって重要な存立基盤と言っても過言ではない。研究成果の再検証や、成果の社会との共有、データの再利用による研究活動の発展を図る上で、データの保全・管理と共有・利用は今後、ますます重要なものとなると考えられる。こうした状況下で、科学技術・学術にとっての「データ・マネジメント」が国際的な重要課題となってきており、政治の場でも、2013年6月のG8会合で研究活動に係るデータのオープン化が合意事項になった。地球科学を中心にした分野では、世界的な科学データ保存の取り組みが、すでに戦後50年以上にわたり続けられている。近年はさらに、データを原著論文と同等の成果として「出版」して保存し、「引用」するデータ・パブリケーションやデータ・サイテーションの検討、また電子データの保全・管理・利活用に関する図書館の新たな役割の再検討などが課題として議論されている。我が国においても、科学技術・学術研究システムの再構築に、科学技術・学術研究情報の電子化・オープン化を進める制度の整備まで含めて取り組むことが求められる。

キーワード：オープンデータ, オープンアクセス, データ共有, ICSU-WDS, CODATA, RDA

1 はじめに

2013年のG8首脳会合ではオープンデータ憲章についての合意、あわせて行われたG8科学大臣およびアカデミー会長会合では科学研究データのオープン化に言及した声明が発表された¹⁾。

科学技術・学術の研究現場において、近年、論文や発明と同様に重要な成果物、資源として「データ」をとらえるようになってきた。「研究データのオープン化」は、科学技術立国を目指す我が国においても重要な課題である。これは、学術ジャーナルのオープンアクセス化と同じく学術情報共有化の大きな国際世論の流れの中で理解されるべきである。特に日本では、研究論文を中心としたオープンアクセスの議論は比較的盛んであり^{2,3)}、2014年3月に日本学術会議のフォーラムも開かれたが⁴⁾、研究データ

の共有に関する政策的な議論は、科学技術振興機構(JST)において一部見られるものの⁵⁾、全体的にはほとんど見られない。

オープン化することの情報資源の得失と、オープン化しないことで生ずる科学技術発展上の障害とについては依然慎重な判断が求められるであろう。しかしながら、G8合意にあるように研究データをオープン化することは国際合意である。研究データのオープン化は、研究当事者に閉じず、科学者集団および社会が情報を共有することで、オープンなサイエンスの議論・再検証を可能にしながら、新たな研究機会を増やし、科学と社会の相互信頼を確保しながら研究成果やイノベーションを望めるビジョンと考えられている⁶⁾。

本レポートでは、近年の国際的な議論の動向を簡単に紹介し、なんらかのオープン化を進めることが妥当な分野・科学技術データないしは学術研究

データセットが特定されたと仮定したときの、社会の科学技術基盤としてのデータのあり方について論ずる。またオープン化することでその分野の科学技術や学術研究がより健全に発展し、より充実した成果をもたらすためにも、背景となる理念を踏まえた上での我が国の対応について基本的な提案を行いたい。

2 科学研究の方法論とデータ

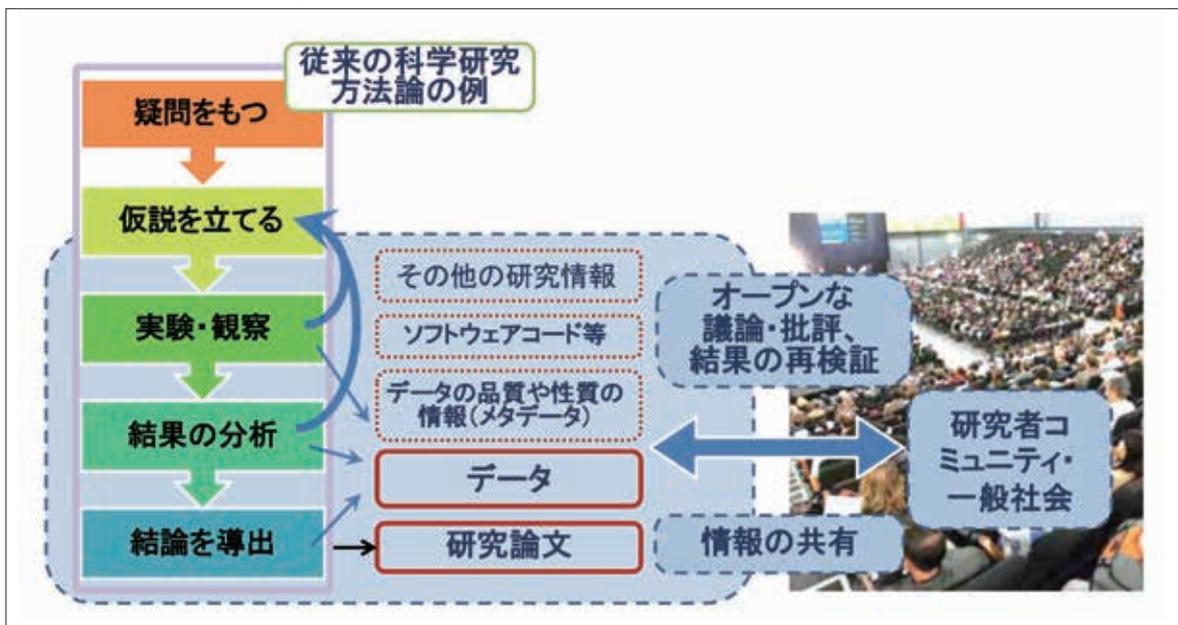
上述の国際的な研究データをめぐる議論では、近代科学の研究方法論が念頭におかれている。科学研究の手続きでは例えば、仮説をたて、証拠に基づく合理的な論理構築により仮説の検証を行い、仮説が支持されれば一定の結論を得る。そこでは結果は例えば専門家コミュニティによる再現性、または統計的有意性の確認により正当と認められる。したがって、第三者による結果の再現性を担保するため、検証可能な記録を共有する必要がある⁷⁾。論考が基盤となる研究なら、その論理がフォロー可能なように論文に書かれるべきであるし、実験的研究ならば再試験に必要な実験条件が論文に書かれる必要がある。近年は大量のデータの解析結果に基づいて論考した論文も少なくないため、検証にはその論文で使われたデータを入手する必要がある。これにより、同条件での追試験・再検証により研究結果の再現・検証が可能になる。

こうした科学研究成果の再現性に関しては、生命科学分野ではすでに、結論の検証ができない論文が問題視されている^{8,9)}。科学が社会と密接にかかわればかかわるほど、社会から科学知、科学的判断の信頼を得ることは重要となり、そこでは科学者集団と社会との情報共有とオープンな検証の担保が重要となるであろうことを示している。そのために、論文流通のオープン化（オープンアクセス）に呼応して、同様に論文のもとになったデータのオープン化が不可欠と考えられている。すべての研究・論文について他者が検証し続けることはできないし、また科学研究の訓練をせずに専門でない人間が十分な成果検証をできるわけではないが、批判や再試験、検証ができる資料の提供機会をつねに維持していることが重要となる（図表1）。さらにオープン化されたデータは検証のためだけではなく、再利用により次の研究を生み出す知的資産として活用される。

3 科学技術・学術データの共有をめぐる国際動向

ICSU-WDS（World Data System）は、国際科学会議（ICSU：International Council for Science）の直轄事業・組織として、2008年ICSU総会で設立された。また、ICSU-WDS科学委員会（WDS-SC：Scientific Committee）のもとに、実行組織として国際プログラムオフィスが2012年5月、東京に設置された¹⁰⁾。ICSU-WDSの目標は、品質管理された信頼できる科学データを長期間保全することととも

図表1 科学研究の方法論と研究論文・データのオープン化



に、自然科学から人文社会科学まで、多様な分野について相互運用性をもったデータ共有を進めること、等である¹¹⁾。ICSU-WDSの前身となった2つの国際組織、WDC (World Data Centre) および FAGS (Federation of Astronomical and Geophysical Services) は ICSU のイニシアチブで 50 年以上、継続して行われた科学データ保全事業である¹²⁾。これらの組織は国際地球観測年 (IGY: International Geophysical Year, 1957-1958 年) を機に設立されたこともあり、地球科学・宇宙科学が中心であった。

国際組織としての WDS は現在、データを扱う計算機や大型ストレージシステムを開発・整備することよりも、むしろ世界的な組織間の関係形成 (コミュニティ形成) およびそのコミュニティにおける社会的システムを構築するためのコンセンサス形成が重要なフェーズにある。もちろん国際的なカタログ・メタデータ整備や検索システム開発なども並行しているが、グランドデザインとしては、自然科学から社会科学までの多様なデータを対象とした長期保全と相互利活用を可能とする分散型の世界体制を目標としている。

WDS の作業部会 (WG) の課題の 1 つにデータ・パブリケーション (出版) がある¹³⁾。データの出版

は、論文以外にも、科学技術研究開発が社会に還元すべきプロダクトとしてデータを公開するものである。ただし、原著論文出版と比較して考えると、一般読者・ユーザーが信頼できるデータであることを担保すべき査読 (レビュー)、審査基準、印刷するように内容を固定するのか、データ値の修正とその版の管理や引用、など多数の課題がある。WG においては科学者・技術者とともに図書館関係者 (ライブラリアン: librarian) や、トムソン・ロイター、エルセビア、ワイリーといったジャーナル出版社がメンバーとなりともに議論を行っている。

他に、ICSU 下のより一般的な科学技術データに関係する組織として CODATA (Committee on Data and Science and Technology: コデータと読まれる) がある。WDS と CODATA は、歴史的経緯もあり、成り立ちや加盟メンバー、投票権、その事業の方向性が異なっている。両者の違いを図表 2 にまとめている。また、総合的な地球と人類の将来を見据えた学術事業として Future Earth 事業が ICSU や国連などの協同のもとで立ち上がりつつある。WDS および CODATA はこれと連携しながら進めるよう ICSU から要請されている^{14,15)}。

また、G8 の下に設けられた GSO (Group of Senior

図表 2 ICSU 下のデータ関連国際組織 ICSU-WDS と CODATA の違い

	ICSU-WDS (World Data System)	CODATA (Committee on Data and Science and Technology)
設立	2008 年 (前身となる WDC、FAGS 組織は 1957-58 年)	1966 年
メンバー	データ保有機関、データサービス機関が主体。	各国アカデミー・学術会議、および国際学術連合。
意思決定方法	WDS 科学委員会が最終決定組織。委員は原則的には立候補または各国アカデミー等からの推薦に基づき ICSU が決定。	2 年毎に開催される総会が最終決定組織。メンバーが投票権をもち、ポリシー策定、決議などを行う。
主な活動内容	品質管理された科学データの長期保全・利用システムの構築、データ公開・出版体制の改善、情報格差の解消など。前身の WDC 時代は地球科学分野が大きく貢献してきた。	基礎物理・化学の基礎的な定数・係数の国際推奨値の決定。データ利用・共有に関する国際的なポリシー策定や政策への提言、データ科学の推進。我が国では、物質科学分野などで貢献が大きい。
国際的な貢献	WDC、FAGS 時代から 50 年以上にわたり、科学データ保全事業・情報提供サービスを提供してきた。現在は、自然科学から人文社会科学までのデータの長期保全、利活用体制を検討。	地球観測に関する政府間会合 (GEO: Group on Earth Observations) のデータ共有ポリシーの策定に大きな貢献。これは WDS のデータポリシーへ引き継がれた。

Officials) がグローバル・リサーチ・インフラストラクチャを課題ととらえ、その一部として研究データ・インフラストラクチャ部会が2011年頃から活動してきている。この部会での議論が基礎となつて、研究データに関する新しい国際コンソーシアム RDA (Research Data Alliance) が2013年3月に米・欧・豪の協力によって設立された。RDAへの参加はポリシーに同意すれば原則自由であり、ボトムアップでの会合提案が行われるため、データ共有やデータの相互交換、法的枠組み、海洋データ・遺伝データの相互利用、など多岐にわたる課題についてコミュニティ・コンセンサス形成を目指した議論を行っている¹⁶⁾。

なお、欧州委員会内のG8部会担当者によると、オープン・ガバメントと研究データのオープン化とは、別扱いとのことである (Carlos Morais-Pires, 私信 2013)。前者は政府機構の意思決定で情報公開を行うこともできるが、後者の研究データの扱いについては原則、個別の科学者・研究者に委ねられるものであり、科学者や機関のモチベーションを下げず、研究の減速やイノベーションの減退を招かないようにしながら最適なデータ共有へ移行することが、結局は社会のために有用であり重要である。

4 研究データのオープン化に対する今後の対応の可能性

4-1 研究活動のデータ共有を 発展させるために

• データ・マネジメントのための技術と情報科学・ICT
科学技術・学術研究データを、原著論文と同等の価値の高い科学技術研究成果として位置づけるとき、そのデータの保存とアクセス性が肝要となる。今日の論文においても約80年前のアインシュタインらによる論文が理論根拠として多数引用されている。これは、論文文献の保存とアクセス機能が長期にわたってよく設計・整備されたシステムであるからこそ可能といえる。一方、論文と同等の高価値な成果物としてとらえられている今日のデータは、80年後といわなくとも、10年後、20年後の我が国の新たなイノベーションを確保するためにも、論文文献の保存・保全と同等のデータ保存の品質、信頼性、期間、アクセス性が担保されなければならない。過去の多数のデータ資源を保存して、80年後の研究開発において必要なときに利用可能にする、そ

うした技術と制度、これをひっくるめて「システム」として機能し続けるようにする必要がある。

現在の電子技術・計算機技術の変革の速さは目を見張るものがある。IP通信や固定ディスクの発明以来、約半世紀ほどの間にさまざまな製品・デバイス・規格が年々改善されて新機種が過去のものを市場から追い出していき、技術と性能が向上してきた。一方、グーテンベルク以来の活版印刷文化に基礎を置く文献の保存、整理、検索、利用のサービスの技術と制度（システム）は、数百年にわたり安定かつ高信頼度で稼働してきた。現在の情報技術、ICT技術がこれまでになかった即時性、高速性、新たなサービス・情報創出などを可能にしながら、活版印刷ベースのシステムと同等の長期的安定性・信頼性を担保した社会の基盤システムとなることで、電子技術文化による10年後20年後、さらには80年後のイノベーションが可能になると期待される。

ところで現状では、情報学・ICT研究と他の科学研究分野とが、非常に密接につながり随所で融合して研究が進展している、とは言い難い。現在では災害対策・防災に不可欠な気象レーダーを例にとると、レーダー工学者と気象学者がそれぞれ協力し合ったというより、両者が歩み寄り、新たな専門性をもつ研究者群が育ち、それぞれの領域から踏み出して、「レーダー気象学」などの新たな研究分野を開拓して初めて成功したとも考えられる。科学技術・学術データの各専門領域と情報学やICT技術はおそらくそれぞれの領域から踏み出した新たな協力関係、新領域をつくることでブレークスルーが実現すると期待される。しかしながら、この新たな連携関係、新領域を日常的に支援できるしくみや予算制度などが乏しいことから、今後は一般の研究者が情報学・ICT分野研究者と連携し、また情報以外の科学分野からの情報学的なアプローチを支援する仕組みが必要となるだろう。

• データ保存・管理・利用運用体制

科学技術データ、学術データの保存・管理の議論においては、欧米では特に、図書館関係者（ライブラリアン）が重要な役割を果たしている。国会図書館における資料のデジタル化、電子図書館構想¹⁷⁾などのように、電子化時代の図書館の新たな役割が提言され、また、欧米図書館でのデータ収容事業をはじめとして、図書館による文献とならぶ知的情報資産としてのデータの保存・管理事業が新たな図書館の社会的役割として重要視され始めている¹⁸⁾。我が国においても、大学図書館や研究機関の図書館は、ジャーナル購読や専門図書閲覧の管理にとどま

らず、文献の電子化やデータ資産の保存という新たな役割と新たな業務の開発を行う、科学技術・学術研究情報の基盤管理・運営組織として新たにデザインされ、我が国の将来のイノベーション創生の機能の一端を担うべき存在にならなければならない。同様に、公的・非営利的な科学技術情報・学術研究情報の保管・管理運用組織においては、図書館と同様に、その情報基盤事業の刷新と新たな基盤を社会に提供するための業務開発が望まれる。

4-2 研究成果公開としての研究データの共有を進めるために

• データ・パブリケーション

論文文献と同様に、データも後年に活用されるべき資料であるならば、原著論文と同様に「出版」されるべき、また査読・編集過程のようにデータの品質評価・出版の過程が必要、との論がある。これには論文査読とは異なったスタイルが必要である。データのフォーマットやメタデータ項目をはじめとする外形的なチェックや、専門家が必要とするデータ品質など、さまざまな議論がされている。求められるデータ品質も、高ければよいというものではなく、利用目的によってさまざまであるし、こうした「データ出版」のスタイルはまだまだ研究コミュニティで検討の途上である。

上記は、データ・パブリケーションという新しいシステム全体の確立へ向けた課題のほんの一部である。コミュニティによるトライ・アンド・エラーを通じたデータ出版活動を、研究費・事業費などの形でサポートしながら支えていく必要がある。

• データ・サイテーション

データを「出版」して、他の研究でこのデータを使い、また参照して新たな論文を執筆するときに、文献引用・参照と同様にデータもサイテーシ

ョン（参照）することで、同様に、その論文の根拠や関係業績を示して論考を構成する要素となる。また、被引用度数の統計からデータ生成者・提供者の業績をカウントする。論文でいえばサイテーション・インデックスなどに対応する「データ・サイテーション・インデックス」（トムソン・ロイター、2012）などの研究評価での利用が想定される。また論文のPDFと同様にデータにDOI（Digital Object Identifier）を付与して、引用・発見を容易にする取り組みも必要であろう。データを整理して、引用に適した粒度でDOIを付与して、これを論文中で引用する、これに基づき研究成果・データの生産性やデータ生成者の成果を測る、といった一連の活動は、これまでの文献事業でもなければ、データベース構築事業でもない、新たな枠組みであるため、このための活動を資金的・人的・組織的に支援していくことが必要である。

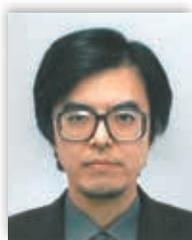
データのパブリケーション・サイテーションを通じた研究評価に関しては、有識者の中には、いずれは例えば研究者の人事審査において原著論文業績リストと、データ業績リスト、およびその被引用度などの評価基準が用いられるような世界になるべきだとの意見もある。巨大科学や大規模実験などで競争力の高いデータを生成することで重要な科学研究成果を出すにあたり、データ生成や整備に寄与した科学者がこれまでかならずしも公平に評価されていないとの声もある。また、このシステムが成立すれば、貴重な科学技術情報を一般公開しても、その生成者・公開者は論文のオープンアクセスと同様に、他の論文からの引用・参照を通じて著者・貢献者として評価されることになる。研究者や機関の利益を損なうことなくデータのオープン化ができるとすれば、そこからデータの相互利用が世界に広がり、新たに公開される膨大な情報資産から、さらなるイノベーションへつながることも期待される。

参考文献

- 1) G8 science ministers endorse open access :
<http://www.timeshighereducation.co.uk/news/g8-science-ministers-endorse-open-access/2004820.article>
- 2) 林和弘. 新しい局面を迎えたオープンアクセスと日本のオープンアクセス義務化に向けて.
科学技術動向. 2014, 142, p. 25-31 : <http://hdl.handle.net/11035/2475>
- 3) 古西真. 研究基盤としての電子ジャーナル —電子ジャーナルへのアクセスの維持を目指して—.
科学技術動向. 2011, 119, p.20-27 : <http://hdl.handle.net/11035/2217>
- 4) 学術フォーラム「世界のオープンアクセス政策と日本：研究と学術コミュニケーションへの影響」日本学術会議.

- 2014年3月13日：<http://www.scj.go.jp/ja/event/pdf2/184-s-0313.pdf>
- 5) 日本の科学情報基盤のあり方およびJST情報事業の今後の方向性、科学技術・学術審議会学術分科学術情報委員会（第4回）資料3. 2013年7月24日：
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/031/shiryu/_icsFiles/afiedfile/2013/07/29/1338254_03.pdf
 - 6) Riding the wave – How Europe can gain from the rising tide of scientific data (retrieved August 2014) :
http://ec.europa.eu/information_society/newsroom/cf/newsletter-item-detail.cfm?item_id=6204
 - 7) American Association for the Advancement of Science. (1990) . Science for All Americans. Retrieved from :
<http://www.project2061.org/publications/sfaa/online/sfaatoc.htm>
 - 8) Boulton, G. (2012) . Why does open data matter and how can we make it a reality? 23rd International CODATA Conference “Open Data and Information for a Changing Planet” . Taipei.
 - 9) Glenn Begley, C., & Ellis, L. M. (2012) . Drug development :
Raise standards for preclinical cancer research. Nature, Vol.483, p.531, 29 March 2012, doi:10.1038/483531a
 - 10) 情報通信研究機構統合データシステム研究開発室. (2012) . 世界科学データシステム国際プログラムオフィス開所式 :
<http://isds.nict.go.jp/ceremony01.html>
 - 11) ICSU-World Data System Scientific Committee. (2013) . Constitution of the International Council for Science World Data System (ICSU-WDS) . Retrieved 10 December, 2013, from :
http://www.icsu-wds.org/organization/constitution/at_download/file1/WDS_Constitution_06_11_13.pdf
 - 12) 渡邊堯. (2012) . ICSU 世界データシステム (WDS) について . 学術の動向 , Vol.17, No.6, p.6_11-6_15 :
http://dx.doi.org/10.5363/tits.17.6_11
 - 13) <http://www.icsu-wds.org/community/working-groups/data-publication>
 - 14) Future Earth Transition Team. (2013) . Future Earth Initial Design. Retrieved from :
<http://www.icsu.org/news-centre/news/top-news/final-report-of-the-future-earth-transition-team-published>
 - 15) 増田耕一, 浦島邦子. 地球環境研究に関する国際プログラムの動向 —Future Earth について—. 科学技術動向 . 2013, 138, p. 18-25 : <http://hdl.handle.net/11035/2427>
 - 16) 恒松直幸, 加藤齊史, 大濱隆司, 村山泰啓. 集会報告：研究データ同盟 (Research Data Alliance) 第2回総会. 情報管理 . P. 724-727, 56 (10) , 2013 : <http://dx.doi.org/10.1241/johokanri.56.724>
 - 17) 国立国会図書館電子図書館中期計画 2004 : http://www.ndl.go.jp/jp/aboutus/elib_plan2004.html
 - 18) Karen Antell, Jody Bales Foote, Jaymie Turner and Brian Shults. (2014) Dealing with Data: Science Librarians' Participation in Data Management at Association of Research Libraries Institutions. College & Research Libraries, Vol.75, p. 557-574, doi:10.5860/crl.75.4.557

..... **執筆者プロフィール**



村山 泰啓

科学技術動向研究センター 客員研究官

専門は超高層大気物理学・リモートセンシング。アラスカでの成層圏・中間圏観測に長く携わり、実験観測データベースの開発も行ってきた。ICSU-WDS 科学委員会 ex officio 委員、国立極地研究所南極観測審議委員、京大大学生存圏研究所客員教授、日本地球惑星科学連合・理事などを歴任。



林 和弘

科学技術動向研究センター 上席研究官

専門は学術情報流通。1990年代後半より日本化学会英文誌の電子化と事業化に取り組み、オープンアクセスにも対応した。電子ジャーナルから発展する研究者コミュニケーションの将来と、学会、図書館、大学の変革に興味を持つ。

世界のスーパーコンピュータの動向 (2014年)

野村 稔

概 要

最近のスーパーコンピュータの動向を概観すると、「演算性能のなだらかな伸び」「電力効率改善は道半ば」「データインテンシブ処理の増大」「ペタ Flops 超の高性能スーパーコンピュータの普及」「エクサスケールへ向けた具体化の動き」「プロセッサ開発における選択肢の増加」などが見える。将来を見据え、高速演算・高速データ転送・低電力化・ポストシリコンなどに向け、商用化量子コンピュータの出現、カーボンナノチューブを用いた論理回路の試作、光インターコネクットの研究、データ移動を抑えるソフトウェア研究等の動きが出ており、その進展が目される。

今後の高性能スーパーコンピュータの実現には、ハードウェア・ソフトウェア・システム全体の総合的な改善が必要となる。そのための課題は複雑化・多様化しており、グローバル環境での競争と協調を戦略的に考えたコラボレーションがますます重要となる。その事例としての日米間の協調体制による研究開発において、世界を先導する成果の創出が期待される。

キーワード：スーパーコンピュータ、科学技術、性能ランキング、エクサスケール

1 はじめに

現在、世界的にみて、大規模な科学技術計算に用いられるスーパーコンピュータが、科学技術面、経済面で国の将来に大きな影響を及ぼすという認識が広まりつつある。そのため、世界中の国々で開発および導入競争が激化している。

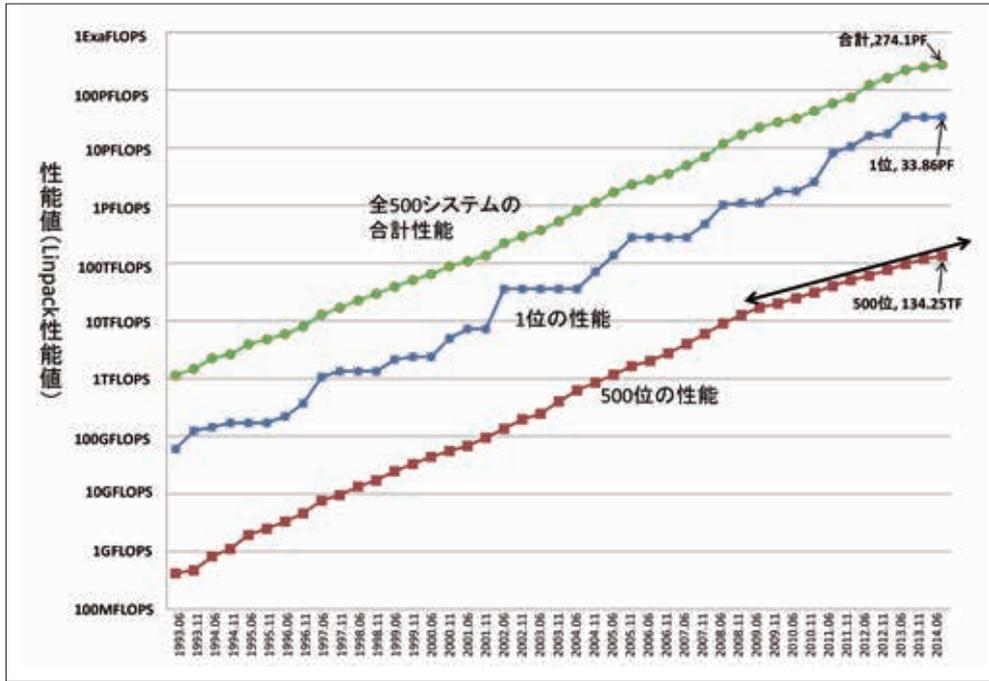
本稿では、科学技術動向 (2013年8月号)¹⁾ から現在までの変化に注目し、ランキングリストにみる世界のスーパーコンピュータの状況、グローバル化の進展状況、新しい動きなどを紹介する。

2 世界のスーパーコンピュータの状況

1) 演算性能の伸び

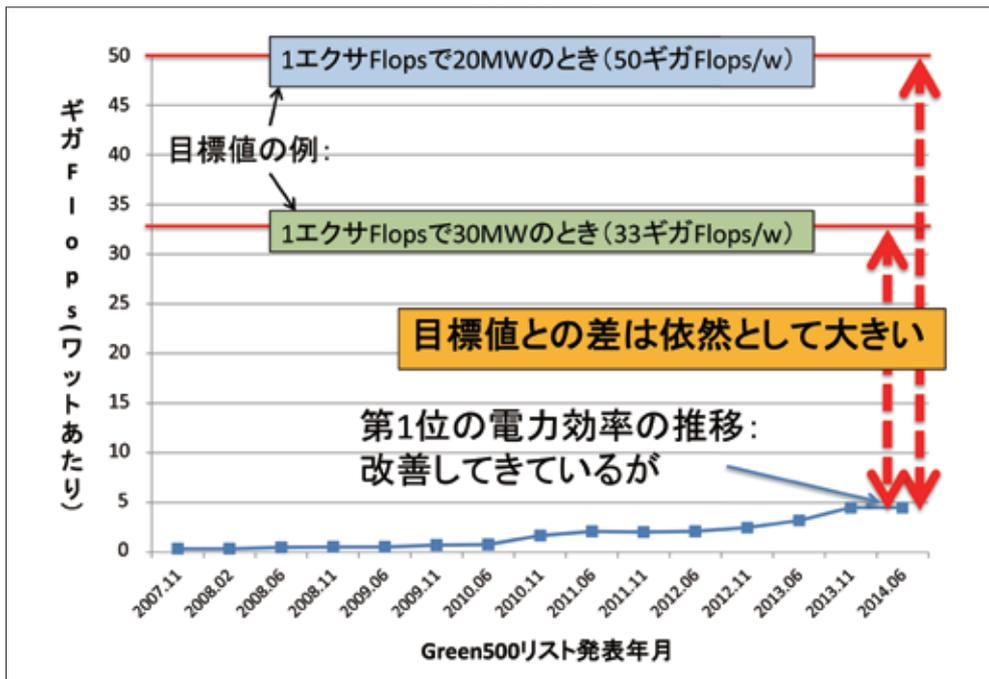
図表1に2014年6月に公表されたスーパーコンピュータの演算性能のランキングリストであるTOP500リスト²⁾に記載されている、全500システムの合計、第1位、500位に対するLinpack性能(実効性能)の推移を示す。1位は過去何度か性能で飛躍を遂げているがここ1年間の変化はない。最近、500位の性能、および全システムの合計性能の伸びがなだらかになっており今回もその傾向は継続している。具体的には、500位の性能の伸びの年率は、1993年から2008年までは90数%だったが、それ以降は50数%へと低下している。また、第10位までのシステムでは過去1年間に2システムが置換されたのみであり、大幅な置換が見られたそれ以前の傾向とは大きく異なっている。500位までで前回リストから置換されたシステム数も116と、1年前の178を大

図表1 Linpack 性能の推移



出典：参考文献2を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 電力効率の推移



出典：参考文献3を基に科学技術動向研究センターにて作成

幅に下回っている。半導体微細化から得られる恩恵（高速化、低電力化、低コスト化）の陰りを反映してか性能の伸びに若干の停滞傾向が見えている。

2) 電力効率の改善

Linpack ベンチマーク実行時の性能と電力に基づいた電力効率 (Flops/w) のランキングリストである Green500³⁾ の最新リストではトップ17位までをCPUとアクセラレータ (GPU [画像処理プロセッ

サ] やコプロセッサなど) を組合わせて構成したヘテロジニアスシステムが占めている。

図表2にGreen500での第1位の過去の電力効率の推移を示す。最新リストでは、日本のヘテロジニアスシステム (東京工業大学のTSUBAME-KFC) が4.5 GigaFlops/wと突出した値で前回同様第1位を獲得した。しかし、以前の第1位から40%改善しているこの電力効率ですら1エクサFlopsの目標値 (仮定) との間の差は大きく、電力効率改善はま

だ道半ばの状況が継続している。ハードウェアのみの改善では限界があり、ソフトウェアも合わせたシステム全体の総合的な改善が重要となる。

3) データインテンシブ処理の増大

Graph500 リスト⁴⁾のベンチマークはビッグデータに向けたグラフ関連処理の性能を対象としている。その背景には、今までは、高度な計算に重点が置かれた問題を解くことを目指してきたが、現在は、プロセッサ・メモリー間、プロセッサ間などでデータを転送するインターコネクト性能の高度化も求められるデータインテンシブなアプリケーションの増加がある。最新リストの掲載システム数は174で、日本の京コンピュータが第1位となった。

4) ハードウェアアーキテクチャの多様化

TOP500 リスト中で演算部がCPUで構成されるシステムの割合は87%で、ヘテロジニアシステムは13%である。現状で実装されているCPUのコア数は6から8コアが支配的であるが、今後、60コア以上のメニーコアプロセッサの製品化も間近とみられ、アーキテクチャはさらに多様化しそうだ。高い演算性能・電力効率・データインテンシブ処理能力などのスーパーコンピュータをめざし様々なアーキテクチャの出現が続いている。

3 グローバル化の進展状況

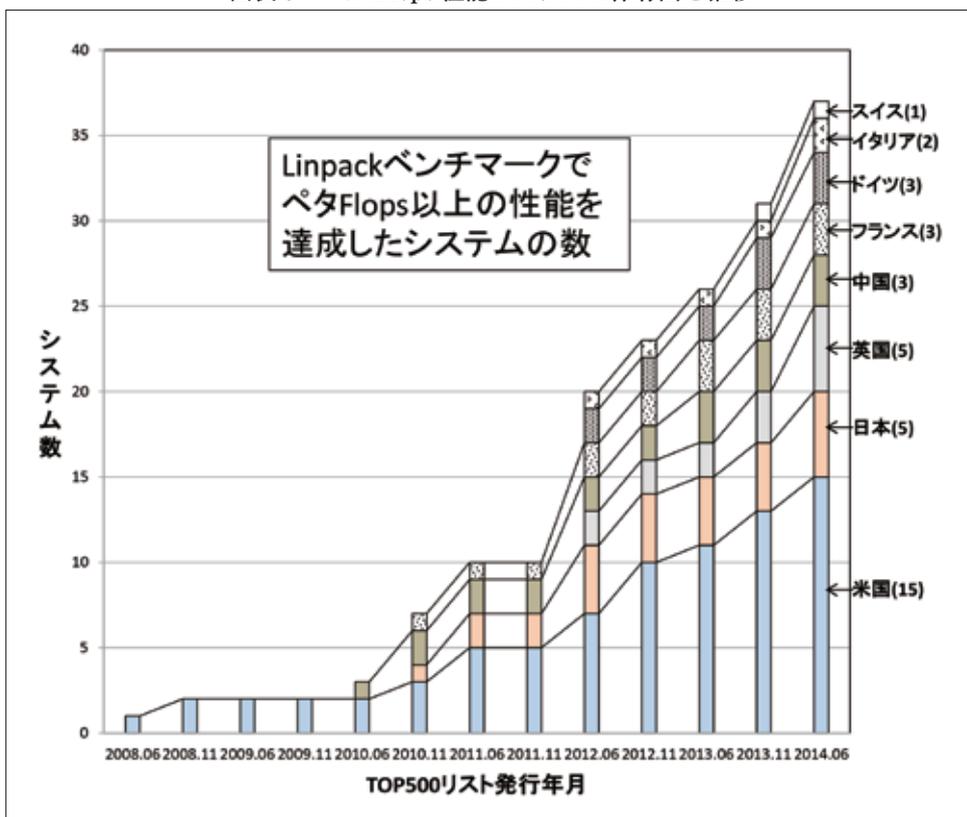
1) 導入国の広がり (導入のグローバル化)

最新のTOP500 リストに記載されている国々は29か国で1年前からは2か国の増加となっている。特筆できるのは、1ペタFlops (以下、PFと略す) 以上の実効性能を持つシステムを所有する国々の増加である。図表3は、それらの国々とそのシステム数の推移を示す。すでに8か国が所有しており、そのシステム数もここ3年で急激に増加している。最新リストでは合計で37システム (内、ヘテロジニアシステムは10) となっている。

2) 研究開発のグローバル化

ソフトウェアやアプリケーションに関して各国間でのコラボレーションが積極的に進められている。文部科学省は2014年6月に米国DOEとの間でシステムソフトウェアの開発に関する協力取極を締結した。これにより、ハードウェア開発は各国での競争となるが、ハードウェア上で動作するアプリケーションの共通基盤となるシステムソフトウェアの研究開発で日米間が協調体制をとる。

図表3 ペタFlops性能システムの保有国と推移



出典：参考文献2を基に科学技術動向研究センターにて作成

4 新しい動き

4-1 次世代スーパーコンピュータに向けた動き

1) 米国

米国 DOE の Advanced Scientific Computing Research (ASCR) による Exascale Computing Initiative (ECI) で提案されているエクサスケール・コンピューティング構想のタイムラインでは、ノード・プロトタイプを 2018 年度初頭、ペタスケール・プロトタイプを 2019 年度初頭、エクサスケールのプロトタイプを 2022 年度初頭に予定している⁵⁾。

そのタイムラインにはハードウェア関連の研究開発プロジェクトとして、Fast Forward と Design Forward の記載がある。Fast Forward は、2012 年 7 月から 2 年契約でプロセッサ・メモリ・ストレージ & I/O などの要素技術の研究開発へ 6,244 万ドルを投資したプロジェクトであり、2014 年 4 月には後続の Fast Forward2 の提案依頼書 (RFP) が発行されている⁶⁾。図表 4 に Design Forward と Fast Forward2 の概要を示す。なお、Design Forward の後続として、2014 年 7 月には Design Forward2 の RFP が発行されている。

その他、2015 年以降のソフトウェアテクノロジー

(プログラミング環境、OS/ランタイム、ライブラリ) の研究開発や、すでに実施中のエクサスケールのコデザインとエクストリームスケール研究プログラム (基礎技術) の記載もある⁵⁾。

また、図表 4 に 2014 年 7 月に RFP を発行した「Resilience for Extreme Scale Supercomputing Systems」の概要も合わせて示す。このプログラムは、レジリエンス (回復力、復元力、耐久力などの意) を対象としており、エクストリーム規模の並列コンピューティング環境でのシステムの安定した動作を重視している⁷⁾。

エクサスケールに至る途中に、高性能スーパーコンピュータを導入する計画も遂行中である。DOE のローレンスリバモア、アルゴンヌ、オークリッジの各国立研究所は、それぞれ世界トップレベルのスーパーコンピュータである Sequoia, Mira, Titan を所有している。現在、これら 3 研究所は、「CORAL」と命名されたスーパーコンピュータの共同調達活動を推進しており、導入時期は 2017 年から 2018 年頃と計画している⁸⁾。

2) 欧州

EU のファンディングによるエクサスケール研究開発プロジェクトは、CRESTA、DEEP/DEEP-ER、Mont-Blanc/Mont-Blanc2 が進行中であり、さらに図表 5 に示す 3 プロジェクトが加わり、合計 6 プロジェクトが現在進行中である^{1,9)}。

図表 4 DOE のエクサスケール研究開発プロジェクト (抜粋)

プロジェクト	期間とファンド	投資の対象と参加ベンダー
Design Forward	2013年秋から 2年の契約 2,540万ドル	インターコネクトアーキテクチャおよび技術、データ移動および信頼性などシステム寄りの研究開発投資。 参加は5ベンダー (AMD、Cray、IBM、Intel、NVIDIA)
Fast Forward2	2014年7月から 27か月の契約 約1億ドル	Fast Forwardの後続プロジェクト。 2020年-2023年の製品化時期を想定したノードアーキテクチャとメモリ技術への研究開発投資
Resilience に関する研究 (新規プログラム)	2015年4月から 3年の契約 年400万ドル (最大)	Resilience for Extreme Scale Supercomputing Systems エクサスケールのアプリケーションが正しくタイムリーに正確な結果を生成できることを目的とし、故障検出とカテゴリー化・故障軽減・異常検出と故障回避、の3領域にフォーカスした研究開発に投資

出典：参考文献 5、6、7 を基に科学技術動向研究センターにて編集

図表 5 新たに加わった EU のエクサスケールプロジェクト

名称	内容	構成メンバー
EPiGRAM(Exascale ProGramming Models)	エクサスケール時代のプログラミングモデルの開拓	スウェーデン、オーストリア、ドイツ、英国、米国からの6メンバー
EXA2CT(Exascale Algorithms and Advanced Computational Techniques)	数値シミュレーションアルゴリズムと計算技術開拓によるアプリケーションのスケール化	ドイツ、ベルギー、フランス、イタリア他からの10メンバー
NUMEXAS(Numerical Methods and Tools for Key Exascale Computing Challenges in Engineering and Applied Sciences)	数100万コアまでにスケラブルな次世代の数値手法の開発、実装、評価	スウェーデン、オーストリア、ドイツ、英国、米国、スペイン、ドイツ、ギリシャからの6メンバー

出典：参考文献 9 を基に科学技術動向研究センターにて編集

3) 中国

最新のTOP500リストでは3回連続で第1位を獲得し、システム数も米国に次ぐ第2位(76システム)を誇っている中国であるが、中国製システムは10、そのうち中国製のプロセッサを主演算部に使用したシステムは1とまだ少ない。しかし、中国は2015年に100PFシステムを開発するとし、現在、その計画を推進中である。2014年1月にIBM社がx86サーバー事業を中国のLenovo Groupに売却すると発表した。契約はまだ完結してはいないが大きな変化である。

4) 日本

文部科学省は、2020年までに、世界トップレベルで幅広い課題に対応できる汎用のシステムを実現し、エクサスケールを目指すとしている¹⁰⁾。そして理化学研究所は、前述のシステムおよびその性能を最大限に引き出すアプリケーションソフトウェアの開発に着手するため、2014年4月1日から計算科学研究機構に「エクサスケールコンピューティング開発プロジェクト」を設置している¹¹⁾。

4-2 プロセッサ開発における 選択肢の増加

プロセッサアーキテクチャの知的財産(IP)のライセンス販売は大きなビジネスとなっており、形態にもよるがライセンス提供を受けると独自のプロセッサが開発可能となる。

英国のARM社は、組み込みデバイス領域でその存在感が高いが、最近、高性能サーバー領域向けのプロセッサアーキテクチャのIPライセンス提供を開始しており、そのIPを採用したチップを実装したスーパーコンピュータの出現も予見される。

IBM社は、2013年にOpenPOWER Foundationを設立、参加企業にはIBM社が開発したPOWERプロセッサアーキテクチャを公開する計画であり、

2014年8月現在、参画企業30、大学・研究機関12が名を連ねている¹²⁾。

プロセッサを開発する場合、独力で全てを開発する方法以外の選択肢が増加してきている。

5 おわりに

最近のスーパーコンピュータの動向を概観すると、「演算性能のなだらかな伸び」「電力効率改善は道半ば」「データインテンシブ処理の増大」「ペタFlops超の高性能スーパーコンピュータの普及」「エクサスケールへ向けた具体化の動き」「プロセッサ開発における選択肢の増加」などが見える。プロセッサとメモリ間の超広帯域化に向けた高速な3次元積層メモリの採用¹³⁾は、今、研究・試行レベルから具体的実装レベルへと進化しつつある。また、パッケージ内に3次元積層メモリ、プロセッサ、インタコネク、光-電気変換など、同一チップ上では実現が困難な多様なシステム構成要素を実装することでシステムの最適化を目指す技術開発も進められつつある。さらに将来を見据え、高速演算・高速データ転送・低電力化・ポストシリコンなどに向け、商用化量子コンピュータの出現、カーボンナノチューブを用いた論理回路の試作、光インターコネクの研究、データ移動を抑えるソフトウェア研究等の動きが出ており、その進展が注目される。

今後の高性能スーパーコンピュータの実現にはハードウェア・ソフトウェア・システム全体の総合的な改善が必要となる。そのための課題は複雑化・多様化しており、グローバル環境での競争と協調を戦略的に考えたコラボレーションがますます重要となる。その事例としての日米間の協調体制による研究開発において、世界を先導する成果の創出が期待される。

参考文献

- 1) 野村稔、「世界のスーパーコンピュータの動向」科学技術動向、No. 137、2013年8月、p11-18：
<http://hdl.handle.net/11035/2415>
- 2) TOP500：<http://www.top500.org/>
- 3) Green500：<http://www.green500.org/>
- 4) Graph500：<http://www.graph500.org/>
- 5) William Harrod、「Office of Science Big Data and Scientific Discovery」BDEC、2014年2月26日

- 6) https://asc.llnl.gov/fastforward/rfp/04_DraftSOW_04-03-2014.pdf
- 7) <http://www.grants.gov/web/grants/view-opportunity.html?oppId=260430>
- 8) CORAL Request for Proposal B604142 : <https://asc.llnl.gov/CORAL/>
- 9) 「Joint European Exascale Projects Workshop」:
<http://www.cresta-project.eu/news-events/joint-european-exascale-projects-workshop-edinburgh-18th-19th-march-slides-and-presentations.html>
- 10) 「ポスト『京』の開発 (フラグシップ 2020 プロジェクト)」、文部科学省:
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afieldfile/2014/09/02/1351653_04.pdf p62
- 11) http://www.aics.riken.jp/jp/exa_project/14498.html
- 12) OpenPOWER : <http://openpowerfoundation.org/>
- 13) 野村稔、「コンピュータシステムの高性能化への動き—プロセッサと主記憶間のデータ移動に関する課題の改善—」
科学技術動向、No. 139、2013年10月、p11-16 : <http://hdl.handle.net/11035/2436>

..... **執筆者プロフィール**



野村 稔

科学技術動向研究センター 客員研究官

企業にてコンピュータ設計用 CAD の研究開発、ハイパフォーマンス・コンピューティング領域、ユビキタス領域のビジネス開発に従事後、現職。スーパーコンピュータ、ビッグデータ、半導体技術、LSI 設計技術等の科学技術動向に興味を持つ。

オバマ政権下の最近の米国の 科学技術政策の展開

第1部 緊縮財政下における研究開発優先順位設定

遠藤 悟

概 要

近年の米国連邦政府の科学技術政策は、基礎研究の強化やいわゆるハイリスクリサーチ支援の拡大などの積極的な取り組みが見られる反面、緊縮財政下において予算増を伴う新規の研究開発プログラムの設置には困難な状況も見られる。

2014年3月に発表された2015年度大統領予算案および同年7月に発表された2016年度予算案作成にかかる覚書は、オバマ政権の政策を理解する重要な手掛かりとなる。2015年度予算案には、「機会、成長、および安全イニシアチブ (OGSI)」という概念が示され、予算法の枠外で重点政策が示されている。また、2016年度予算案作成にかかる覚書においては、知的好奇心に導かれた疑問が研究の発展の鍵となることや、社会的ニーズに対応した民間部門に対する資金配分の考え方などが記されている。

注目すべき取り組みとしては、公的部門における研究基盤の強化に向けた、行政、産業界、アカデミックコミュニティにおける基礎研究・学術研究の重要性に関する認識の共有や、政府による研究者の革新的な発想を支援する施策などを挙げるができる。また、民間部門における実用化、商業化のための政策としては、小企業向け支援事業や国防高等研究計画局 (DARPA) をモデルとした新たなプログラムなどの事例がある。

キーワード：米国， 緊縮財政， 研究開発優先順位， OGSI， イノベーション欠損， DARPA

1 はじめに

近年の米国連邦政府の科学技術政策は、競争力強化法であるアメリカ COMPETES 法およびその再授權法等に規定された内容に基づく、基礎研究の強化やいわゆるハイリスクリサーチ支援の拡大などの積極的な取り組みが見られる反面、緊縮財政下において予算増を伴う新規の研究開発プログラムを設置することが困難な状況も見られる。本稿においては、このような状況の中、オバマ政権がどのように優先順位を設定し政策を実行しようとしているか、2014年3月に発表した2015年度予算案および7月に発表した2016年度予算案作成にかかる覚書の内容を紹介したうえで、公的部門における基礎研究・学術研究基盤の強化に関する政策、および民間

部門における実用化、商業化に向けた取り組みに関する政策という二つの側面から検討を加える。

2 科学技術政策の優先事項

2-1 緊縮財政の中で示された 2015年度大統領予算案

米国の2015会計年度予算案は与野党間で行われた合意に基づく予算法の水準に抑えられている¹⁾。図表1は、研究開発予算総額および主な機関の研究開発予算案の額であるが、研究開発予算も前年度に比べ僅かな伸びに留まっている。ただし、議会の審議の中で今後増額または減額となる可能性がある。

図表1 研究開発予算案総額および主な機関の研究開発予算案の額

	2013年度実績	2014年度見込み	2015年度予算案	2015年度予算案の 対前年度増減率
研究開発予算案総額	130,332	133,682	135,352	1.2%
国防省 (DOD)	63,838	63,856	64,430	0.9%
国立衛生研究所 (NIH)	28,508	29,341	29,540	0.7%
米国航空宇宙局 (NASA)	11,282	11,667	11,555	-1.0%
エネルギー省 (DOE) 非国防研究開発	6,513	6,943	7,274	4.8%
国立科学財団 (NSF)	5,319	5,729	5,727	0.0%
国立標準技術研究所 (NIST)	596	667	690	3.4%

(単位：100万ドル)

出典：参考文献1を基に科学技術動向研究センターにて作成

2-2 機会、成長、および安全イニシアチブ

2014年3月、オバマ大統領は予算案の発表と合わせて「機会、成長、および安全イニシアチブ (Opportunity, Growth, and Security Initiative: OGSИ)」を発表した。このイニシアチブは、雇用の創造、経済成長、そして全ての国民への機会の創造に必要な追加的な裁量的予算措置を行おうとするもので、全額措置された場合には560億ドル規模となる²⁾。

その対象は、非国防予算においては、教育、研究およびイノベーション、基盤と雇用、機会と移動、

人々の健康と安心と安全、より効果的・効率的な政府、また、国防予算においては、主要な兵器システムの近代化、即応能力の回復、核研究開発と基盤、国防省施設改善と幅広いが、財源の確保の困難性も指摘されている。従ってこのイニシアチブの意味は、仮に予算措置が困難であっても重要な歳出予算項目が何であるかを示そうとしたものと見ることができる。OGSIのうち、研究・イノベーションにかかる項目は図表2のとおりである³⁾。

また、各連邦政府機関の予算書にはより詳細なOGSIによる予算案の額が示されている。図表3は全米科学振興協会 (AAAS) が取りまとめたOGSIを上乗せした場合の各機関の予算案の額である⁴⁾。

図表2 OGSИにおける研究およびイノベーションに関する項目の抜粋

○ 基礎研究におけるグローバルなリーダーシップの再構築
・ 650件の新たな国立衛生研究所 (NIH) のグラントへの配分
・ NIHに国防高等計画局 (DARPA) をモデルとした、医学研究のブレークスルーに対する資金配分の拡大
・ BRAIN (革新的な神経技術の前進を通じた脳研究) イニシアチブへの NIH の関与の拡大
・ 新たな製造技術の開発・拡大
・ 国立科学財団 (NSF) の1,000件の追加的なグラントへの資金配分
・ バイオセーフティー研究所の新設
注：研究およびイノベーション関連では、上記の他、エネルギー関連の政策についての言及もある。

出典：参考文献2を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 OGSИを上乗せした場合のNIH、NSF、NISTの予算案の額

	2014年度見込み	2015年度予算案	OGSI予算額	OGSIを上乗せした2015年度 予算額	OGSIを上乗せ した場合の 対前年度増減
国立衛生研究所 (NIH)	30,003	30,203	970	31,173	3.9%
国立科学財団 (NSF)	7,172	7,255	552	7,807	8.9%
国立標準技術研究所 (NIST)	850	900	2,515	3,415	301.8%

(単位：100万ドル)

出典：参考文献4を基に科学技術動向研究センターにて作成

2-3 2016年度予算案作成に関する覚書に示された優先事項

2016年度予算案については、2014年7月18日付で大統領府の行政管理予算局（OMB）および科学技術政策局（OSTP）の長が連名で連邦政府各省・機関の長宛に、図表4に示すような研究開発活動が記された「2016年度予算案に向けた科学技術の優先事項」の覚書の送付が行われた⁵⁾。これらは、連邦政府各省・機関を横断的に実施される事業等が示されたものであり、各省・機関固有のミッションに基づく具体的な予算項目については記されていない。

図表4 2016年度予算案作成に関する覚書に示された複数の省・機関にまたがる研究開発活動の優先事項

- ・ 未来の先進製造および産業
- ・ クリーンエネルギー
- ・ 地球観測
- ・ 地球規模の気候変動
- ・ 情報技術および高性能コンピューティング
- ・ 生命科学、生物学および神経科学におけるイノベーション
- ・ 国家および国土の安全保障
- ・ 情報が備わった政策形成とマネジメントのための研究開発

出典：参考文献5に基づき科学技術動向研究センターにて作成

同覚書には、「連邦政府の研究開発への資金配分は、民間部門において必要とされる十分な経済的誘因がない分野における社会的ニーズへの対応のために必須であり、そこにおいて鍵となるものは、米国の研究活動の大きな特徴であるとともに予期せぬ新たな技術を産み出す強い力となる基盤的な、知的好奇心に導かれた疑問にある」と記されている。

さらに、同覚書には「その他の研究開発プログラム指導事項」として、「連邦政府機関は、科学、技術、イノベーションを前進させる野心的な目標や高いリスクで高い見返りがある研究といった明確に定義されたグランドチャレンジを明らかにし追求することが推奨されること」、また、「連邦政府機関は、適切かつ授権された場合、グラントやコントラクトといった伝統的な「プッシュ」研究開発メカニズムを補う形で、誘因プライズや先進的な市場への関与といった、市場の失敗を克服し、幅広い解決に取り組む者が参画し、イノベーションが触発されるよう設計された、成果に基づく市場の誘因（result-based market incentives）とい

う「プル」メカニズムを検討すべきこと」などに関し、各省・機関は予算案作成において留意すべきとしている。

3 公的部門における基礎研究・学術研究基盤の強化の重要性の認識と連邦政府の役割

3-1 基礎研究・学術研究の重要性の認識の共有と新たな課題

米国の競争力強化論議のさきがけとなった「パルミサーノレポート」と呼ばれる競争力委員会報告書が提出されてから間もなく10年が経過するが、その間にはNSF、NIST、エネルギー省科学室の予算増など基礎研究の強化に向けた様々な政策が実行され、また、国の経済発展や国民の福祉のために基礎研究・学術研究がいかに重要であるかという認識も広く共有されるようになった。

しかし、同時に連邦政府、州政府による大学支援は必ずしも期待された伸びは見られず、また、大学に対する事務負担増などによる研究活動への影響などの問題も顕在化した。

3-2 アカデミックコミュニティーや産業界から示された米国の基礎研究・学術研究の課題

米国大学協会（AAU）および米国公立・ランドグラント大学協会（APLU）の会長および165名の大学の学長は、2013年7月31日にオバマ大統領および連邦議会議員に宛てて「イノベーション欠損の縮小（Close the Innovation Deficit）」という表題の書簡を送付した⁶⁾。この「イノベーション欠損」とは、「実際に連邦政府の研究と高等教育に対して資金配分を行っている額と、米国が世界のイノベーションのリーダーになり続けようとする際に必要な資金配分額との間の、拡大しつつあるギャップ」と定義されている。

この書簡においては、財政赤字を理由に連邦政府による大学への支援を怠るならば、研究開発活動や人材育成における欠損が生じ、イノベーションを通して達成される米国の世界のリーダーとしての地位が危うくなるという論議が展開されている。

2014年4月29日には、上院歳出委員会において「連邦政府資金配分によるイノベーション創出」と題された公聴会が開催されたが、この公聴会では「イノベーション欠損」を埋める取り組み

を求める50の産業界およびアカデミックコミュニティから提出された文書が、書面による証言として審議記録に加えられた⁷⁾。このようなアカデミックコミュニティや産業界から連邦政府に向けられた基礎研究・学術研究基盤の強化の要望は、前述のとおり必ずしも2015年度予算案に反映されたとは言えない。しかし、OGSIにおいてはその重要性が明示されており、このイノベーション欠損という考えがアカデミックコミュニティ、産業界、そして行政府によって共有されたと言うことができる。

3-3 基礎研究・学術研究において革新的な発想を支援する取り組み

NIHにおいては個々の研究所・センターから独立した所長室に設けられた共通基金により、ハイリスクリサーチとして若手独立、新たなイノベーターやパイオニア創出、トランスフォーマティブR01 (Transformative R01's) といったプログラムが実施されている。これらのプログラムは、既に10年の期間を経たものもあり、ハイリスクリサーチ支援制度として定着している⁸⁾。

NSFにおいては、長い期間、革新的な発想の提案に対し、プログラムオフィサーの裁量により比較的少額の研究資金を配分するプログラムなどが実施されてきたが、2013年度には、より規模が拡大した新たな試みである「NSF学際的研究教育促進支援統合プログラム (INSPIRE)」が開始されている⁹⁾。

NIHとNSFのプログラムは、理念、支援対象、採択手順等において異なるが、いずれも従来のグラントの申請・採択手順よりも、独創的、革新的な発想を重視するシステムとなっているという点

で共通性がある。そして、研究提案の評価は学術的価値を重視して行われるという点では他のグラントと同様の理念を持つものであるとも言える。図表5を見てわかるように、NIHやNSFにおけるいわゆるハイリスクリサーチは、大規模な伝統的な基礎研究支援メカニズムを補完する比較的小規模なプログラムとして位置づけられている。

4 民間部門における実用化・商業化に向けた取り組みに対する連邦政府の関与

4-1 連邦政府による民間部門への研究開発支出の考え方

連邦政府は民間部門に対しても多額の研究開発支出を行っている。全研究開発予算の約半分を占める国防研究開発支出は、大学や公的研究機関よりも、むしろ企業に対してのほうが多い。一方、民生研究開発予算は、一般に大学等公的研究部門に向けて支出される額が大きいが、各省・機関のミッションに沿う形で企業に対し配分される場合もある。国防研究においてはその研究開発活動の成果により産み出される製品の多くは政府調達という形で公的資金、すなわち税金により支出されるのに対し、民生研究開発を通して産みだされた製品等は市場をとおして販売され、企業に利益をもたらす。米国民の間には、政府が企業の利益に結びつく研究開発活動に対し支援を行うことに強い抵抗感が見られる。このため、「2016年度予算案に向けた科学技術の優先事項」においても前述のとおり連邦政府の研究開発への資金配分は、「社会的ニーズはあるが、企業にとって十分な誘因がない分野」を対象に行うことが明らかにされている。

図表5 NIHとNSFの支援メカニズム

	NIH (2013年度)	NSF (2014年度)
伝統的な基礎研究支援メカニズム	研究プロジェクトグラントの約66%の102億ドルをR01型と呼ばれる中核的グラントにより支援	NSF全予算のうち、研究および関連事業は約58億ドル
革新的な発想に対する支援メカニズム	所長室共通基金の以下のグラントにより支援 若手独立：約1,200万ドル パイオニア創出：約3,300万ドル 新たなイノベーター：約8,700万ドル トランスフォーマティブR01：約7,800万ドル	INSPIRE：約2,700万ドル (他に比較的小規模の初期概念探索的研究グラント (EAGERs) のプログラムにより毎年400件前後採択)

出典：参考資料8、9およびNIH、NSFウェブサイト掲載情報に基づき科学技術動向研究センターにて作成

4-2 小企業を主な対象とした政策

小企業に向けた研究開発プログラムには、小企業が独自に行う活動を対象として12の連邦政府機関により実施される小企業イノベーション研究(SBIR)、および小企業および大学等の非営利研究機関が共同で行う事業を対象とした、国防省、エネルギー省、保健福祉省、航空宇宙局、NSFにより実施される小企業技術移転(STTR)がある。

これらのプログラムは既に定着していると言えるが、NISTによる新たな事業としては、製造イノベーションのための全米ネットワーク(NNMI)や先進製造技術コンソーシアム(AMTech)がある。後者は先進製造の促進を妨げる優先度の高い研究上の課題に対応して産業へと導く新たなコンソーシアムを設置、あるいは既存のコンソーシアムを強化することを目的としたプログラムで、申請資格のある機関は、企業および連邦政府以外の組織、すなわち、非営利機関、高等教育機関、州・部族・地方の政府等となっている¹⁰⁾。計画段階に対する第1回の公募が行われ、2年間にわたる約38～54万ドルの配分が決定している。なお、マッチングファンドの要件はない。

NISTは、これまでオバマ政権の製造業への挺入れの一環として「製造拡張連携(Manufacturing Extension Partnership(MEP))」の拡充を図ってきたが、AMTechの創設は、大学等非営利研究機関が主導して行う実用化・商業化の取り組みに着目したものと言える。

なお、NSFは支援を行った基礎研究プロジェクトの研究代表者や参加者が起業に向けた知識を向上させることへの支援を目的としたイノベーション部隊(Innovation Corps(I-Corps))という6か月間、1件あたり5万ドルを支援する事業を実施している¹¹⁾。

これら最近の連邦政府の小企業向けプログラムにおいては、STTRにおける産学協力の考えをさらに発展させ、大学側へ新たな誘因を付与した企業と大学の連携を促す取り組みが見られる。

4-3 DARPAをモデルとしたいわゆるハイリスクリサーチ支援プログラム

国防高等研究計画局(DARPA)は、米軍の技術的優越性を維持することを第一の目的としてハイリスク、ハイペイオフリサーチを支援し、軍事

技術だけでなく、いくつもの民生技術の展開にも貢献している。DARPAをモデルとした支援メカニズムは米国において強い関心が持たれており、2015年度予算案においても、エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)の増額や、NIHにDARPAをモデルとしたプログラムの設置の構想などが記されている。

ARPA-Eは、2009年にエネルギー技術イノベーションの支援を目的に創設されたが、DARPAと大きく異なる点は、その成否の評価基準が市場にもたらされた経済的価値ということである¹²⁾。成果としては2015年度予算案の文書に見られる計9,500万ドル配分された22件のARPA-Eプロジェクトが民間企業における計6億2,500万ドルの資金配分として継続、24の研究チームに関連した起業の実現、16件以上のプロジェクトが他の連邦政府機関の開発に連携、そして、4件の技術が製品販売の前段階にあることが報告されている¹³⁾。同文書によるとARPA-Eは362件のプロジェクトに計9億ドル以上の支援が行われているが、現時点においては報告された成果の件数は限られ、また、商業的に自立した成果も見られない。このような状況は、民生研究におけるDARPA型プログラムが短期間で所期の目的を達成することの困難性を示しているものとも言える。

NIHにおいては、NIH所長室の共通基金予算関連文書に、「その他資金執行権限(Other Transaction Authority(OTA))」の支出として3,000万ドルを要求し、ハイリスクで目標に導かれたDARPA型のモデルによりBioelectronic Medicinesの研究開発を行うという記述が見られる¹⁴⁾。また、OGSIにおいてもDARPA型モデルによる資金配分を拡大することが言及されている。ただし、この3,000万ドルという予算規模は約300億ドルというNIH全体の予算規模に比べれば僅かであり、NIHにおいてDARPA型プログラムが今後どのような位置づけとなるかは現時点では不明である。

5 米国に見る公的部門と民間部門のそれぞれに対する科学技術政策の在り方

緊縮財政の中、連邦政府の科学技術政策論議は、単に予算額の多寡を論じるものから、連邦政府資金をいかに効率よく成果に結びつけるか、あるいは、連邦政府資金を呼び水とするなどしていかに民間部門の研究開発活動を活性化させるかなど、幅広い政策的枠組みの中で行われる傾向がより強まっている。

米国の研究開発システムを他の先進諸国と比較した場合、多くの相違点が見られる。そのひとつは大規模な連邦政府による国防研究開発支出であるが、同時に研究開発活動全体における大学や企業の役割といった点においてもいくつもの違いが見られる。我が国において米国の科学技術政策を参考として政策を立案しようとする場合、これら

の相違を念頭に置くことは極めて重要と言える。DARPAのPrabhakar長官は、「同機関がそのユニークなミッションを達成することができた背景には、米国の強力な研究開発エコシステムがある」と述べており、このエコシステムを理解することが米国の科学技術政策を理解する鍵となると考えられる¹⁵⁾。

参考文献

- 1) OSTP, 2014 R&D Budgets : <http://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/rdbudgets/2014>
- 2) Office of Management and Budget, Fiscal Year 2015 Budget Overview : <http://www.whitehouse.gov/omb/overview>
- 3) OSTP, The 2015 Budget: Science, Technology, and Innovation for Opportunity and Growth : <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2015/assets/opportunity.pdf>
- 4) AAAS, AAAS Report XXXIX: Research and Development FY 2015: Tables, Table II-20 : <http://www.aaas.org/sites/default/files/OGSI%2015p.jpg>
- 5) OMB and OST, Science and Technology Priorities for the FY 2016 Budget : <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/m-14-11.pdf>
- 6) AAU and APLU, 165 University Presidents Call on Congress and President Obama to Close Innovation Deficit : <http://static.squarespace.com/static/52f96df9e4b02281aef7b19c/t/530ce6cae4b05530aaa00822/1393354442256/Innovation%20Deficit%20Release%20-%20AAU-APLU%20-%202014-11-13.pdf>
- 7) Senate, Committee on Appropriations, Full Committee Hearing: Driving Innovation through Federal Investments : <http://www.appropriations.senate.gov/hearings-and-testimony/outside-witness-testimony-federal-innovation-hearing>
- 8) NIH, Office of Strategic Coordination – The Common Fund, High-Risk Research : <http://commonfund.nih.gov/highrisk/index>
- 9) NSF, Integrated NSF Support Promoting Interdisciplinary Research and Education (INSPIRE) : http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504852
- 10) NIST, Advanced Manufacturing Technology Consortia (AMTech) program : <http://www.nist.gov/amo/>
- 11) NSF, Innovation Corps : http://www.nsf.gov/news/special_reports/i-corps/
- 12) DOE, ARPA-E : <http://arpa-e.energy.gov/>
- 13) Advanced Research Projects Agency-Energy, FY 2015 Congressional Budget : <http://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/ARPA-E%20FY15%20Budget%20Request.pdf>
- 14) OSTP, The 2015 Budget: Science, Technology, and Innovation for Opportunity and Growth : <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/Fy%202015%20R&D.pdf>
- 15) Senate, Committee on Appropriations, Full Committee Hearing: Driving Innovation through Federal Investments, Statement by Dr. Arati Prabhakar, Director, DARPA : <http://www.appropriations.senate.gov/sites/default/files/hearings/Prabhakar%20Written%20Testimony%204-29-14.pdf>

執筆者プロフィール



遠藤 悟

科学技術動向研究センター 客員研究官
<http://homepage1.nifty.com/bicycletour/sci-index.htm>

研究対象は米国を中心とした科学政策。2000年に「米国の科学政策」HPを開設し、政策動向を発信している。本務は独立行政法人日本学術振興会グローバル学術情報センター 専門調査役・分析研究員。

オバマ政権下の最近の米国の 科学技術政策の展開

第2部 米国の研究開発エコシステムの特徴と 我が国の政策形成への示唆

遠藤 悟

概 要

米国の科学技術政策を他の先進諸国と比較した場合、いくつか留意すべき特徴がある。この特徴の理解のためには、研究開発エコシステムという考え方を採用し、各国の大学、公的研究機関、企業における研究開発活動への政府の関与の状況を明らかにすることが有効と考えられる。この考え方を通してみると、米国は大規模な連邦政府資金による国防研究開発支出が行われ、他の国々とは異なる特殊なエコシステムを形成していることがわかる。

また、基礎研究・学術研究については、米国、ドイツ、英国は大学において強固な研究基盤が形成されているのに対し、我が国の大学においては深刻な「イノベーション欠損」とも言える状況が存在している。そのような状況の中、各国の研究資金の配分機関は共通の理念に立って革新的な発想の研究を見出し、支援する取り組みを行っている。

民間部門の研究開発については、国防研究開発実施機関である国防高等研究計画局（DARPA）をモデルとして実用化・商業化に向けた成果を上げようとする場合、多くの課題が生じることも予想される。しかし、公共調達と関連付けるなど、我が国の研究開発エコシステムに適合した取り組みを目指すことも考えられる。

キーワード：研究開発エコシステム, 米国, ドイツ, 英国, 民生研究と国防研究, DARPA モデル

1 はじめに

米国の科学技術システムは、他の先進諸国と比較した場合、いくつかの大きく異なる特徴が見られる。従って、我が国において米国を参考として政策立案を行おうとする際にはこのことを十分に留意すべきであり、ドイツや英国の状況も参照しつつ検討を加えることの意味は大きいと考えられる。

2 主要国との比較をととした米国の研究開発エコシステムの理解

2-1 研究開発エコシステムの理解の重要性

国防高等研究計画局（DARPA）の Prabhakar 長官は、2014年4月29日に開催された連邦議会衆議院歳出委員会の2015年度予算案にかかる公聴会で、「ご存知のとおり、我が国は科学技術の面において比類なき能力を有している。それは連邦政府、大学、産業のパートナーを含む強力な研究開発エコシステムの結果である。DARPAの成功は、健全な米国の研究開発エコシステムに依存している。」と発

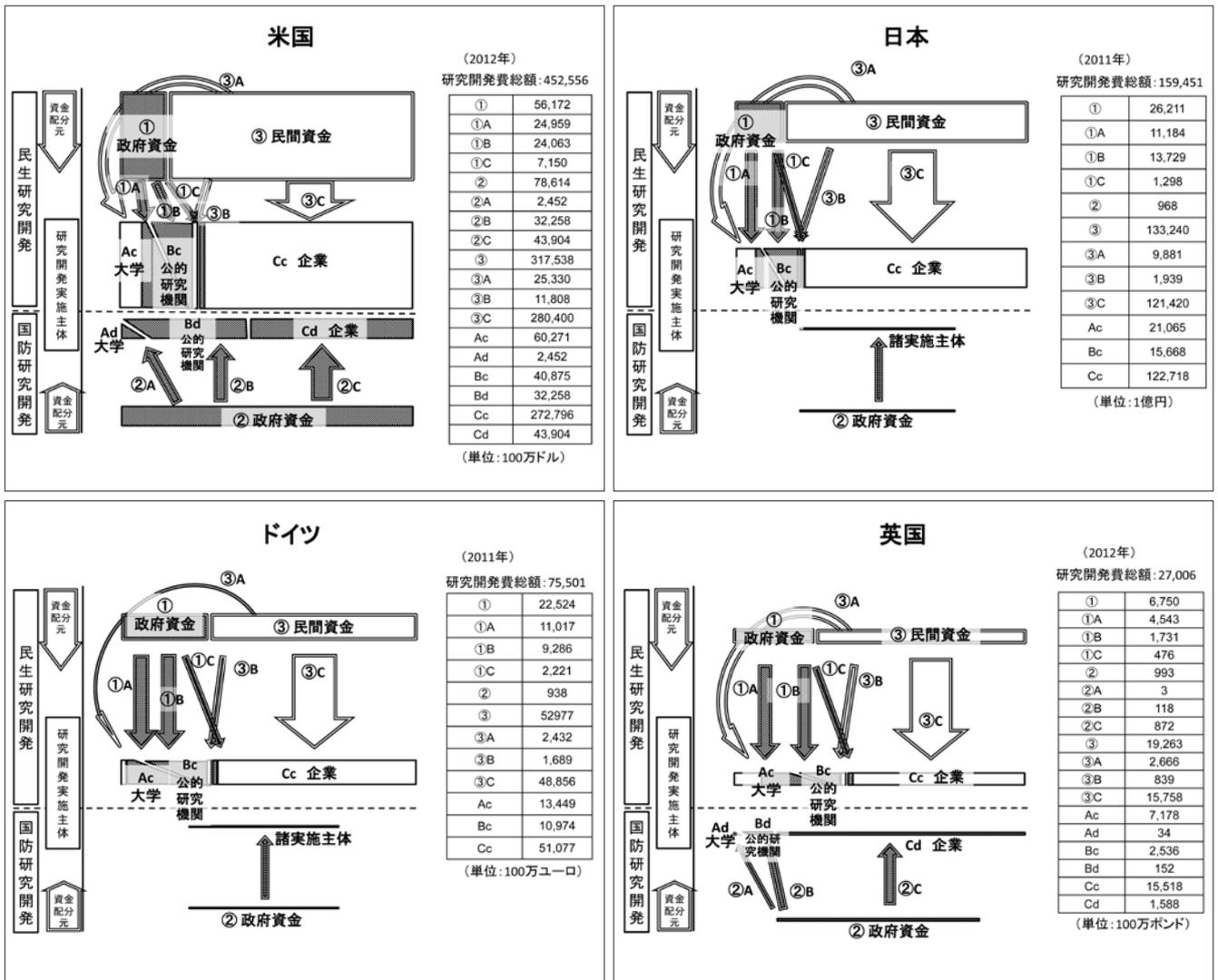
言した¹⁾。研究開発エコシステムの語は、必ずしも科学技術政策論議において定義され、広く用いられている訳ではないが、いわゆるハイリスクリサーチ支援のモデルとされる DARPA の長官が、この語を用いて DARPA の役割を説明していることから、米国の科学技術政策の鍵となる言葉であるといえる。

2-2 資金面から見た主要国の研究開発エコシステム

本稿においては研究開発エコシステムについて、資金面から理解する試みを行う。このため、図表1に主要各国の資金の概要を示す。研究開発資金は

民生研究と国防研究に分けられ、配分元の資金は、政府資金と民間資金（政府資金以外の資金）の2区分としている。また、資金を使用する研究開発実施主体は、大学、公的研究機関、企業の3区分である。各研究開発実施主体において使用する資金の元が政府資金であるものは網掛けし、大きさは概ね資金の大きさに比例している。研究開発は一般に左側の大学から右側の企業へと進むが、その先には企業における実用化、そして市場をとおした製品・サービスの提供、あるいは民生目的・軍事目的の政府調達へと展開することとなる。なお、この図表の作成にあたって使用した各国のデータは、国により統計の基準や手法が異なり、また、複数の資料の値が異なる場合もあったため、示された値の一部に整合性に欠ける点がある。各国の図表に示し

図表1 資金面からみた研究開発エコシステム



出典：以下の資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

米国：National Patterns of R&D Resources: 2011-12 Update、Federal Funds for Research and Development: Fiscal Years 2011-13

日本、ドイツ：科学技術・学術政策研究所科学技術指標 2014

英国：Office for National Statistics, Statistical Bulletin 12 March 2014, 1. Expenditure of R&D in the UK by Performance and Funding Sectors 2012、Department for Business, Innovation & Skills (BIS), SET Statistics 2013

た数値に関する留意点は以下のとおりである。

- ・米国の資金配分元のうち、政府は連邦政府のみの値である。州・地方等の政府から大学に配分された額は、民間資金からの配分として計上されているが、その額は大学に支出された民間資金の額のうち約14.4% (2012年) である。州・地方等の政府から公的研究機関および企業に支出された額の統計は入手できていない。米国の国防研究開発費は、連邦政府予算における国防研究開発費 (国防省予算およびエネルギー省国家核安全保障局の予算の大半) のみである。政府以外の国防研究開発資金については不明である。

- ・日本は、大学部門について人件費分をフルタイム換算にした OECD 換算値を掲載している。

- ・日本、ドイツの国防研究開発費の使用額の内訳の情報は入手できなかったため、総額を記している。また、政府以外の国防研究開発資金については不明である。

- ・ドイツの資金配分元のうち、政府の値は国 (連邦) および州を合算した値である。

- ・英国の政府から支出された国防研究開発費の支出先は、BIS SET Statistics を用いたが、他の統計との相違が大きいため按分比例した額を記した。また、国防研究開発費の使用額が計17億7,400万ポンドであることから、それに必要な資金配分があると推定されるが、その内容は把握できていない。地方政府分の研究開発費の額は不明である。

これらの図表から以下のような各国の特徴を読み取ることができる。

米国は、連邦政府支出における国防研究開発の割合が大きく、その配分先も企業、公的研究機関、大学と多様である。民生研究開発において連邦政府は、大学、公的研究機関、企業のそれぞれに相当の額の資金を配分しているが、大学における研究開発支出に占める比率は独英に比べ高くない。なお、この点に関しては、州・地方政府からの支出が含まれていない点に留意する必要がある。

日本は、研究開発費総額に占める政府による資金配分の割合が小さく、そこに占める国防研究開発費の割合も小さい。民生研究開発においては、大学、企業いずれに対しても配分される額は小さい。企業への配分額が少ない背景には、政府の研究開発支援の方法が研究開発費の負担といった直接的支援よりも、研究開発税制優遇措置といった間接的

支援に重きが置かれているといった事情がある²⁾。

ドイツは、国防研究開発支出が少なく、研究開発投資は民生研究に重点が置かれており、大学や企業が政府 (連邦政府、州政府) から受ける配分の割合も他国より高い。また、研究開発活動全体の規模に占める公的研究機関 (マックス・プランク学術振興協会 (MPG)、フラウンホーファー応用研究促進協会 (FhG) など) への支出の比率も高い。

英国は、研究開発費の対 GDP 比率が1.73% と他国に比べて低い中で、政府の研究開発支出の割合が高い³⁾。また、国防研究開発については日本やドイツよりも規模が大きく、政府から企業への支出額は民生研究よりも国防研究の方が大きい。大学は、Wellcome Trust などの民間資金の配分もあり、国の研究開発活動全体における存在感は大きい。企業については自身の研究開発支出も大きくない。

3 基礎研究・学術研究基盤の強化における政府の役割

3-1 基礎研究・学術研究の担い手としての大学とその置かれた地位

前章で述べたとおり、各国の大学に対する資金配分の流れは大きく異なる。このため基礎研究・学術研究に関する政策についても、それぞれの差異についての十分な理解のうえに企画・立案されることが重要である。研究開発費総額に対する大学における支出の割合を比較すると図表2のとおりとなる。

また、大学の研究開発費への資金配分については、図表1の①Aと③Aの額の大きさの差により政府と政府以外の機関による配分額の違いが明確となる。

米国は連邦政府の支援は大学の研究開発費の半分にも足りないが、公立大学に対する州・地方政府からの資金、私立大学の基金による資金、民間財団等から提供される資金などにより、十分な規模の研究基盤が形成されている。

ドイツはその大半が政府 (連邦政府・州政府) の資金により賄われている。

英国は政府からの研究開発費が半分を超えることに加え、約5億ポンドの Wellcome Trust による

図表2 各国の研究開発費に占める大学部門の割合 (2011年)

米国	日本 (OECD 換算)	ドイツ	英国
14.6%	13.2%	17.8%	26.0%

出典：科学技術指標 2014 統計集表 1-3-14 を基に科学技術動向研究センターにて作成

科学研究支援が民間資金の中に含まれている⁴⁾。

このような各国の状況に対し日本では、研究開発費総額に占める大学の研究開発支出の水準が英国、ドイツよりも低いことに加え、政府から大学に配分される額も少ない。また、政府以外の資金の多くが企業などからの研究費ではなく、私立大学の授業料等となっており、研究活動の向上の誘因となりにくいことも留意すべきである。

これらの事実から、英国では大学に対しては十分な資金が配分されており、また、ドイツにおいても大学、公的研究機関、企業それぞれに政府資金が行き渡っており、いずれの国も資金面におけるイノベーションの欠損と言った状況にはないということが読み取れる。これに対し我が国には、大学の研究開発資金に大きな欠損があることは明らかである。米国において研究開発資金の不足が論じられる場合、しばしば引き合いに出されるデータは、政府の裁量予算全体に占める研究開発予算の割合の低下や、主要国との比較における米国の研究開発費の変化などである。我が国に関するこれに類するデータは科学技術指標 2014 などでも発表されているが、大学部門の研究開発費については、同指標の図表 1-5-3 の 2000 年と 2011 年（英国については、2010 年）の間の大学部門の研究開発費の推移がある⁵⁾。ここに示された指数は米国が 204、ドイツが 175、英国が 193 であるところ、日本は 111 である。この数字は、我が国の大学においてイノベーションの欠損がますます拡大していることを示すものであり、大学に対する基盤的経費と競争的資金の双方の拡充が望まれる。

3-2 基礎研究・学術研究支援において革新的発想を見出し、支援する方策

第1部では、NSF と NIH の革新的な発想を支援するプログラムの位置づけを、伝統的な基礎研究支援メカニズムとの関係において示したが、ここでは、その審査・評価の考え方における関係を見る。

NSF は、研究および関連事業として約 58 億ドルの予算措置をしており、申請受付のウェブサイトにはつねに 300~400 件に及ぶ様々な公募情報が掲示されているが、これらの公募の基本となるものは、研究者が自身の研究計画に基づき、主として分野別に設置された部署 (division) などを指定して自由に行う申請である⁶⁾。NSF は、受理した申請書を、パネルやメールを用いた手順により研究者が行う評価を基本としたメリットレビューシステムを通して採否の検討を行う。共通の評価基準は、

知的メリット (Intellectual Merit)、およびより幅広いインパクト (Broader Impact) の2つであるが、この中には研究計画が潜在的にトランスフォーマティブであるかといった観点が含まれている⁷⁾。

NIH は、研究プロジェクト支援、トレーニング、キャリア開発、フェローシップなど多様なプログラムを実施しているが、R01 型プログラムは、予算額約 102 億ドルで、NIH の学術研究活動支援の中核を成すものである⁸⁾。R01 型プログラムへの申請は、NIH 側が設定する特定のテーマ等に対応する申請や、研究者自身が自由に研究計画を立案して行う申請など異なる手順があるが、それらはいずれも研究者によるピアレビューを基本とするスタディセクション方式において審査が行われる。その評価基準は、研究課題の重要性 (Significance)、参加研究者の適格性 (Investigator (s))、申請内容の革新性 (Innovation)、戦略・手法・分析等のアプローチ (Approach)、研究等の環境 (Environment) である⁹⁾。

NSF の INSPIRE や NIH のハイリスクリサーチ支援は、これらの伝統的な基礎研究支援メカニズムに対し、業績よりも発想を重視する評価手順、募集対象の若手研究者への限定、採択件数を少数とすることによる名誉的意味の付与などの違いが見られるが、評価基準は同一であるなど、基本的には伝統的な基礎研究支援と同じ理念に基づき行われている。換言すれば、NSF や NIH は、伝統的な基礎研究支援の理念の中において、革新的な発想を見出し、支援しようとしていると言える。

このような研究者が自由に研究計画を立案・申請し、その中から革新的な発想を見出し、支援するメカニズムが基礎研究・学術研究支援の中核に位置付けられていることは、ドイツ研究振興協会 (DFG) や英国の各研究協議会 (Research Councils) においても同様である。

我が国においてこれに相当する科学研究費助成事業も、このような海外の研究支援機関と共通の考え方に立つものであると言える。

4 政府による民間部門の研究開発活動向上への誘因の付与

4-1 各国の研究開発エコシステムの相違

図表 1 に示したとおり、政府と企業との関係から見た研究開発エコシステムも国により相違が大

きい。

米国においては国防研究を含め多額の政府研究開発資金が企業に向けて配分されているが、特に民生研究開発部門には公的資金の企業（特に大企業）への配分に対する人々の抵抗感もあるため、連邦政府の政策は小企業向けやハイリスクリサーチ支援に重点が置かれている。

ドイツでは国防研究開発支出は少なく、民生研究開発部門を中心に企業に向けた資金配分がなされている。

英国では民生研究開発および国防研究開発の双方において政府から企業に一定規模の配分が行われてはいるが、企業の研究開発支出全体の規模が比較的小さいこともあり、政府は技術戦略審議会（TSB）などによる積極的な産業競争力の強化に向けた政策を採っている¹⁰⁾。

4-2 中小企業と大学等との連携の拡大に向けた政策

オバマ政権における小企業支援プログラムは、SBIR、STTRに加え、国立標準技術局（NIST）による製造イノベーションのための全米ネットワーク（NNMI）や先進製造技術コンソーシアム（AMTech）などの新たな取り組みが見られる。これらの事業の特徴は、企業が積極的に研究開発投資をするように設計されていることや、大学や公的研究機関の側からも積極的に企業と協力する環境を構築することなどである。

大学と企業との協力に関する米国の課題のひとつに利益相反（COI）がある。各大学は連邦政府資金の受領に関する利益相反のポリシーを制定することが求められているが、この背景には研究者が様々な形で企業と協力する機会が多いことが挙げられる。我が国において米国の取り組みを参考にしようとする場合、これまでの産学間の協力関係で培われた利益相反の考え方の上に、新たなポリシー等の制定が必要となることも考えられる。

4-3 我が国における DARPA をモデルとした いわゆるハイリスクリサーチ支援の可能性

図表3は、DARPA と DARPA 以外の国防省国防研究開発予算の支出先、ARPA-E とエネルギー省で科学関係を扱う科学室予算の支出先、そして DARPA 型プログラムが計画されている NIH 予算の支出先を示したものである。

DARPA と国防省全体の研究開発資金は、いずれも企業等が最大の支出先で、6割前後を占める。企業における国防研究開発は政府の資金の獲得が期待でき、また、それをとおして実用化された製品等の多くは公共調達を期待することができる。DARPA の成果には、GPS など商業的にも成功した事例があるとされているが、軍事利用において実用化が進められたことが報告されている¹¹⁾。

一方で、民生研究開発部門である ARPA-E において5割以上の資金が企業等に配分されているが、エネルギー省科学室などの他の機関の研究開発資金の支出先の大半は大学等や公的研究機関であり、ARPA-E の成果を引き継ぐ形で企業により行われる研究開発を支援する政府のプログラムは限定的である。ARPA-E は当初より商業的に自立した成果が期待されており、DARPA が置かれた状況とは異なる。2015年度予算案で構想されている NIH の DARPA 型プログラムについても、同様の課題が生じることも懸念される。

我が国における国防研究開発におけるいわゆるハイリスクリサーチの実施は、国防研究開発の規模が米国に比べ小さいことに加え、米国における機密指定（DARPA のプロジェクトも該当する場合がある）のような規制が我が国の大学に対しても求められるとすれば、それに伴い必要となる新たな機密扱いに対応した施設の設置や規則の制定、外国人を含む研究者や学生間の自由な交流の抑止などの対応も念頭に置く必要がある。

民生研究開発においては、我が国の政府の研究開発資金の企業への配分が大きいことを考え

図表3 米国における各機関の研究開発予算の支出先

	総計	大学等	公的研究機関	企業等	海外
DARPA	2,884.3	625.9 (21.7%)	364.4 (12.6%)	1,869 (64.8%)	25 (0.9%)
国防省研究開発 (DARPA を除く)	71,619.9	1,759.9 (2.5%)	28,670.0 (40.0%)	40,877.8 (57.1%)	312.2 (0.6%)
ARPA-E	110.9	17.2 (15.5%)	34 (30.7%)	59.8 (53.9%)	0 (0.0%)
エネルギー省科学室	3,735.4	610 (16.3%)	3,020.9 (80.9%)	102.9 (2.8%)	1.7 (0.0%)
NIH	29,895.4	17,588.5 (58.8%)	10,471.1 (35.0%)	1,593.7 (5.3%)	242.1 (0.8%)

(単位：100 万ドル)

出典：Federal Funds for Research and Development: Fiscal Years 2011-13 を基に科学技術動向研究センターにて作成

ると、ARPA-Eと同様な課題が生じることが予想される。我が国においては企業自身の研究開発支出が大きいとは言え、リスクが大きいDARPA型研究開発課題が、速やかに企業の手による研究開発および実用化に結びつくことには困難が伴うことも考えられる。

このような状況において参考となると考えられる事例に、公共調達がある。上述のとおり、国防研究開発は軍需として公共調達が期待される。しかし、米国においては、公共調達が科学技術政策論議に取り上げられることは稀である。これはおそらく公共調達が国防を中心とした研究開発においては自明のことであるという事情によるものと考えられる。民生研究開発における公共調達に関する政策は、むしろ欧州において見られる。欧州連合の科学技術の中心的イニシアチブであるイノベーションユニオンにおいて、革新的な製品やサービスの商業化前の段階を含む公共調達について各国に予算措置を求める記述が見られるなど、イノベーションの公共調達という考え方に基づく政策が実施されている¹²⁾。また、英国においても調達の先行関与（FCP）のプログラムが実施されている¹³⁾。

イノベーションを促進させるための公共調達は、起業の支援を目的として行われる事例も見られるが、我が国においては、これに加え、環境や防災・災害救助などを目的として行うことも考えられる。

既に我が国において行われているこれらの分野の研究開発支援に公共調達を関連づけることは、イノベーションの促進だけではなく、公共調達の質を高める効果もあると考えられる。

5 我が国の大学や企業における研究開発活動の向上に向けて

基礎研究・学術研究活動については、第一に大学における財政面を含む研究教育機能の強化が必要であり、大学改革プランを通して行われる国立大学の改革を含む現在行われている取り組みが高い成果を上げることが強く期待されている。また、学術研究活動を支える科学研究費助成事業等の競争的な研究資金配分を拡充させることも重要な取り組みである。

企業における研究開発活動については、厳しい財政状況の中にあっても優先的に取り組むべき課題がある。起業を活性化させる小企業向けプログラムや、環境や防災・災害救助など社会的ニーズに対応した事業などである。これらにかかる政策は、米国だけでなく、欧州諸国においても多く参考となる事例が存在する。

参考文献

- 1) Senate, Committee on Appropriations, Full Committee Hearing: Driving Innovation through Federal Investments, Statement by Dr. Arati Prabhakar, Director, DARPA : <http://www.appropriations.senate.gov/sites/default/files/hearings/Prabhakar%20Written%20Testimony%204-29-14.pdf>
- 2) 科学技術指標 2014 p42、科学技術・学術政策研究所、2014年8月 : <http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/2935/4/NISTEP-RM229-FullJ.pdf>
- 3) Main Science and Technology Indicators, OECD, 10 June 2014 : <http://www.oecd.org/sti/msti.htm>
- 4) Annual Report and Financial Statements 2013, Wellcome Trust : http://www.wellcome.ac.uk/stellent/groups/corporatesite/@msh_publishing_group/documents/web_document/wtp055010.pdf
- 5) 科学技術指標 2014 p63、科学技術・学術政策研究所、2014年8月
- 6) Funding, National Science Foundation : <http://www.nsf.gov/funding/>
- 7) 遠藤悟、米国国立科学財団（NSF）の評価基準の改訂 ―基礎科学研究活動が潜在的に持つ社会的インパクトに関する新たな理念の提示―、科学技術動向 No.134、p13-19、2013年3-4月 : <http://data.nistep.go.jp/dspace/handle/11035/2361>
- 8) NIH Data Book, Research Grants, R1-Equivalent Grants: Funding as a percentage of all research grant funding : <http://report.nih.gov/nihdatabook/charts/Default.aspx?sid=0&index=1&catId=2&chartId=33>
- 9) NIH Grants & Funding, Grants Process Overview : http://grants.nih.gov/grants/grants_process.htm
- 10) Innovate UK, Technology Strategy Board : <https://www.innovateuk.org/>

- 11) Breakthrough Technologies: What DARPA Has Done for U.S. National Security、DARPA、2014 :
<http://www.darpa.mil/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2147487842>
- 12) Public procurement - Public purchasers as first customers、Enterprise and Industry、European Commission :
http://ec.europa.eu/enterprise/policies/innovation/policy/public-procurement/index_en.htm
- 13) Investing in research, development and innovation、Department for Business, Innovation & Skills、2014 :
<https://www.gov.uk/government/policies/investing-in-research-development-and-innovation/supporting-pages/using-government-purchasing-power-to-stimulate-innovation>

..... **執筆者プロフィール**



遠藤 悟

科学技術動向研究センター 客員研究官
<http://homepage1.nifty.com/bicycletour/sci-index.htm>

研究対象は米国を中心とした科学政策。2000年に「米国の科学政策」HPを開設し、政策動向を発信している。本務は独立行政法人日本学術振興会グローバル学術情報センター 専門調査役・分析研究員。

医療イノベーションに向けた 腸管微生物叢研究の展開

—微生物叢移植とその発展型を巡る研究開発と実用化の動向—

本間 央之

概 要

欧米を中心に実施された2000年代後半のヒト常在菌叢のゲノム解析プロジェクトも相俟って、「実質的な臓器」とも呼ばれる腸管微生物叢（腸内フローラ）に関する研究が急速に進展し、免疫系・代謝系・神経系等の各種疾患における重要な役割が示されてきている。我が国からも、特筆すべき研究成果が生まれており、これら内外の研究から、細菌移植を始めとした方法による腸管微生物叢の調節が、健康長寿に有用であることが示唆されている。

一方、従来効果的な治療法がなかった再発性クロストリジウム感染症に対し、ランダム化比較試験で著しい効果を示すことが2013年に報告されたことから、糞便微生物叢移植が脚光を浴びている。従来の枠組みに収まりがたいこの治療法に関して、患者や研究者のアクセスを左右する、米国での規制上の取扱いを巡る議論もまた注目されている。

この治療法を突破口として、微生物を利用した、より有効性、安全性、簡便性、経済性の高い次世代型医療（予防・診断・治療）の幅広い展開に向け、我が国に特徴的な微生物叢も考慮した研究とその成果の実用化・産業化の推進が望まれる。

キーワード：医療，微生物叢，マイクロバイオーム，メタゲノム，感染症，規制

付属解説：薬剤耐性菌の世界的脅威

1 はじめに

人体には、ヒト細胞（約60兆個）の10倍もの数の常在菌が生息しており、その大部分を成す腸内細菌（～1,000種類）に、他の腸管微生物（ファージを含むウイルス、古細菌、真菌、寄生虫）も加えた生態系である腸管微生物叢（gut microbiota^{注1}）は、全身の恒常性維持に大きな影響を与えるため、「実質的な臓器（virtual organ）」とも呼ばれてきた。腸

管微生物叢は、炎症性腸疾患（inflammatory bowel disease: IBD）、喘息、肥満、がん、自閉症等、様々な疾患との関連が指摘されてきており、近年その解明が顕著に進んでいる。世界経済フォーラムが2014年の『新興技術トップ10』のひとつに「ヒトマイクロバイオーム治療薬」を挙げたように、微生物叢研究は我が国の『健康・医療戦略』の観点からも注目される。本稿では、難治性感染症治療のブレークスルーとなった「糞便微生物叢移植（fecal microbiota transplant: FMT^{注2}）」をめぐる話題とともに、微

注1 マイクロバイオーム解析の興隆とともに、「flora」に代わって、「microbiota」という用語が支配的となった。

注2 別名、fecal microbiota transplantation、fecal transplant、fecal bacteriotherapy、stool transplant等。移植方法は、上部消化管内視鏡、経鼻空腸チューブ、大腸内視鏡、浣腸等。

生物、特に細菌を利用した医療の今後の方向性について述べる。

2 腸管微生物叢解析の進展

2-1 メタゲノム解析と研究の興隆

次世代シーケンサと生命情報解析技術（バイオインフォマティクス）が急速に進歩する流れの中、2000年代後半、混在する多様な常在菌群のゲノム全体を丸ごと配列解析するメタゲノム解析が大規模に行われた¹⁾。単離培養からの解析では、培養不能な細菌種が解析できないが、メタゲノム解析により、微生物叢全体（マイクロバイーム）を解析できるようになった。現在ではさらに、単一細胞解析と組み合わせられることもある。

先駆的な研究として、ヒトとマウスで肥満とマイクロバイームの関連を示し、腸管微生物叢の移植により肥満が伝達可能であることをマウスで示した、2000年代半ばの研究²⁾等があった。

我が国からは2007年、世界に先駆けてメタゲノミクスの研究成果が発表された^{3,4)}。国家プロジェクトとして予算措置等は行われなかったが、東京大学・服部らから成る日本ヒト常在細菌叢メタゲノムコンソーシアムによる、従来型シーケンサを用いた、日本人13名の腸内細菌叢メタゲノム解析は、発表時点で世界最大の配列データ量を公的DNAデータバンクにリリースした。

その後2008年には、米国国立衛生研究所（National Institutes of Health:NIH）により Human Microbiome Project（HMP）、欧州では中国 BGI も参加した Metagenomics of the Human Intestinal Tract（MetaHIT）といったプロジェクトが立ち上がり、マイクロバイーム解析に大規模投資が行わ

れた（図表1）。MetaHITの2010年の報告では、124名の健常者、肥満者、IBD患者の糞便の解析結果が示された⁵⁾。HMPの2012年の報告では、健康な242名からの4,788検体の解析結果が示された（口腔・咽頭9箇所、皮膚4箇所、鼻孔、下部消化管（糞便）、膣3箇所⁶⁾）。

これらの研究投資の結果、さまざまな領域の研究者が、腸管微生物叢研究領域に流れ込んだ。2002年から2012年にかけて、微生物叢関連の学術文献数は年間265から2,683へ、公表特許および特許出願数は年間169から909へ増加した¹⁾。

2-2 腸管微生物叢と疾患・恒常性

2-2-1 研究の概観

腸管微生物叢の失調（dysbiosis）は、多くの疾患と関連することが明らかとなった⁷⁾（図表2）。そのため、糞便メタゲノム解析を、肝生検のような侵襲的な方法に代わる診断法として開発する企業も出現している¹⁾。相関だけでなく、微生物を原因とした代謝物質を介した因果関係も、動物実験により明らかにされつつある。ヒトの遺伝子変異・多型により、腸管微生物叢が変わり、代謝物質を介して疾患に寄与する可能性も示唆されている（例：IBDのひとつであるクローン病⁸⁾）。微生物叢と疾患・恒常性の関係について、ヒトと動物モデルを比較しながら、さまざまな階層間のつながりが解明されつつある（図表3）。

マウスでの研究結果を受けた疫学研究として、2013年4月のNew England Journal of Medicine（NEJM）誌では、待機的冠動脈造影を受けた4,007名を3年間追跡調査した結果、腸内細菌の脂質代謝産物 TMAO の血漿中の値が、伝統的リスク因子（喫煙、血圧、LDL コレステロール、糖尿病等）とは独立して心血管イベントのリスクを予測する因子であることが示された⁹⁾。

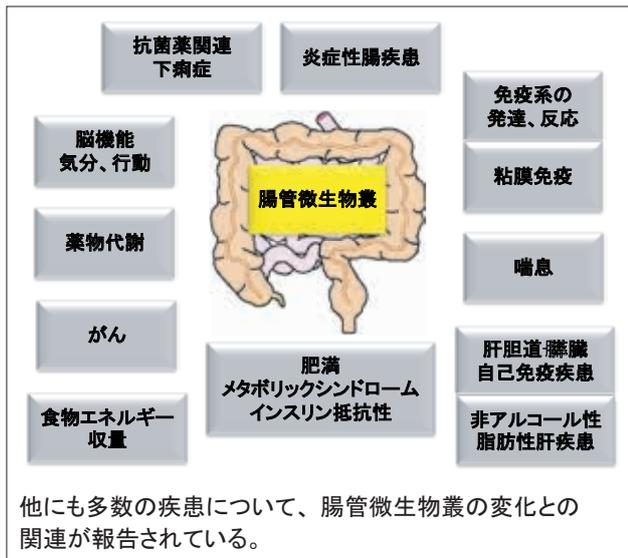
図表1 マイクロバイーム研究への資金拠出

資金源	資金量(百万ドル)
NIH	170
MetaHIT(EU)	28.6
カナダマイクロバイームイニシアチブ	13.3
他の国際ヒトマイクロバイームコンソーシアムメンバー(オーストラリア、日本、他)	38.1
民間(ベンチャーキャピタル、エンジェル等)	19
民間基金	20.5
合計	289

2008年以降の約5年間

出典：参考文献1を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 腸管微生物叢とヒトの疾患・恒常性

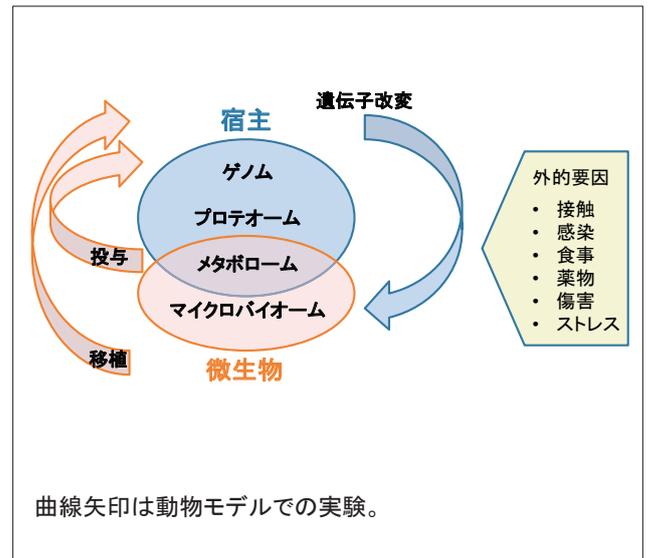


腸管微生物叢は、精神・脳機能にまで影響を及ぼすことが示唆されていきている¹⁰⁾。2013年12月のCell誌では、自閉症スペクトラム障害のモデル動物において、マイクロバイオームの変化がもたらすメタボロームの変化が、行動に影響を与えていることが報告されている¹¹⁾。

2-2-2 日本での研究

我が国からも、動物モデルでの免疫系との関連を中心に、関連領域の特筆すべき研究成果が生まれてきている。理化学研究所(理研)／慶應義塾大学・本田らは、免疫反応の抑制に重要な役割を果たしている制御性T細胞(Treg細胞)を大腸で誘導するヒト腸内細菌の同定に成功した¹²⁾。健康者の糞便から、無菌マウスでのTreg細胞誘導能を指標に分離・選択した17種類のクロストリジウム属細菌の混合物が、マウスの腸炎を抑制することを2013年8月のNature誌で報告した。さらに、理研・大野らは2013年12月のNature誌に、腸内細菌由来の酪酸が、大腸のTreg細胞を誘導することを示した。本田らは、Treg細胞とは逆に感染防御やIBDの炎症惹起に重要な役割を果たしているTh17細胞が、腸内細菌由来ATPや特定の腸内細菌で誘導されることも示唆している^{13,14)}。また、理研・Fagarasanらは、腸管における獲得免疫系、抗体産生機構の変調が、腸管微生物叢の変化をもたらし、全身免疫系に大きく影響することを示した¹⁵⁾。また、筑波大学・渋谷らは2014年1月、抗菌薬の服用によって増殖した腸内の真菌が、喘息を悪化させるメカニズムを示した¹⁶⁾。免疫関連以外にも、肥満により増加する腸内細菌の代謝産物であるデオキシコール酸が、細胞老化関連分泌現象を介し肝臓がん発症を促進するという、がん研究会・原らの研究¹⁷⁾

図表3 微生物叢研究の諸相



等がある。

これらの研究成果は、細菌移植を始めとした方法による腸管微生物叢の調節が、健康長寿に有用であることを示唆している。

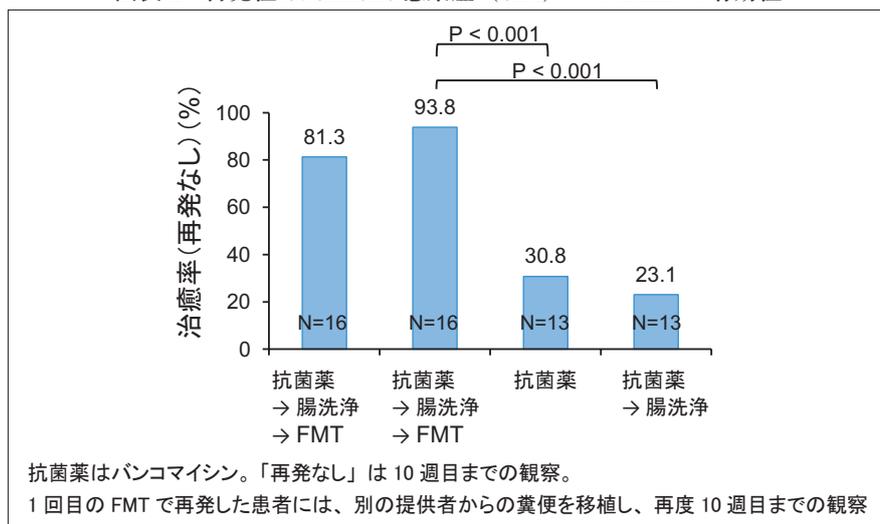
3 糞便微生物叢移植とその発展型

3-1 難治性感染症に対する顕著な効果

健康者の糞便を患者の腸に注入するFMTは、科学的文献としては、1958年に初めて登場した¹⁸⁾。重症感染性腸炎の治療に成功した、米国での症例研究である。その後FMTは、特に治療抵抗性の症例に、最後の手段として使われたようだが、2011年11月の系統的レビューでは、27の症例シリーズ(計317名)での再発性クロストリジウム・デフィシル感染症(C. difficile infection: CDI)の治療成功率は、92%と驚異的であった。2011年12月には、臨床医の国際グループ、FMT作業部会から、FMTのガイドラインが出された。しかし、従来の治療例と対照なしの試験ではエビデンスとして限界があり、また審美的に「気持ち悪い」ことから、広く実施されてはなかった。

そのような中、オランダのアムステルダム大学アカデミックメディカルセンターを中心としたグループは2013年1月のNEJM誌に、FMTの有効性を決定づける、ランダム化比較試験の報告をした(図表4)¹⁸⁾。当初、120名の患者の登録を予定していたが、FMTの有効性が明らかで、対照群のほとんど全てで再発したため、倫理的判断により43名で終

図表4 再発性 C. difficile 感染症 (CDI) への FMT の有効性



出典：参考文献18を基に科学技術動向研究センターにて作成

了したほどであった。FMTの投与後3時間以内に消失する軽度の下痢と腹部けいれんを除いて、有害事象に有意な差はなかった。この研究のそもそものきっかけは、「若くてナイーブ」だった著者の一人 Nieuwdorp が、2006年に研修医を始めてすぐに直面した患者の運命を受け入れることができず、PubMedを検索して1958年の文献を見つけたことであった¹⁹⁾。

米国マサチューセッツ総合病院のグループによる2014年6月報告の決定解析は、再発性CDIのマネジメントにおいて、FMTが抗菌薬治療より費用効果的であることを示しており²⁰⁾、FMTが標準療法になってもおかしくない状況である。FMTは、米国疾病予防管理センター (Centers for Disease Control and Prevention : CDC) の2013年の報告書『抗菌薬耐性の脅威』²¹⁾※でも筆頭に挙げられているCDIに対して、非常に大きな進歩となりうる。

※ 解説：薬剤耐性菌の世界的脅威

CDCは2013年、医療や経済に対するインパクト等に基づいて、現在脅威となっている18種類の薬剤耐性菌を「緊急」「深刻」「懸念」の3段階に分類し、最も高い「緊急」には、2000年から2007年にかけて感染死亡者数が4倍になったC. difficileの他に、カルバペネム耐性腸内細菌、薬剤耐性淋菌を挙げている²¹⁾。

C. difficileは、獲得耐性以前に、多くの抗菌薬に対し自然耐性であり、他の感染症を治療するための抗菌薬使用が、CDIを誘発する最も主要な要因である。2000年代に、フルオロキノロン耐性変異を獲得した強毒株が、急速に北米から世界に広まった。CDIの初回の抗菌薬治療の

失敗率は25%程度であるが、回を重ねると失敗率は40%、50%以上へと上昇する。米国では、CDIが年25万件発生して1万4,000人が死亡し、10億ドルの超過医療費を生じさせている。

2013年6月のG8サミットに向けて各国学会会議の共同声明が出されたり、2014年4月には世界保健機関 (World Health Organization : WHO) から最初の報告書が出されたりと、薬剤耐性菌の世界的な脅威への対応は緊急課題とみなされている。政策立案者や公衆の認識を高める次に、主に次のような方策が望まれている²²⁾。

- (1) 抗菌薬使用の管理：医療 (市販薬を含む) や畜産 (成長促進目的) での適正使用
 - ◇使用を抑制する政策のない発展途上国での使用が爆発的に増えており、国際的な対応が必要。
- (2) 迅速診断検査と組み合わせて使用される狭域スペクトルの薬剤の開発
 - ◇抗菌薬適正使用のための簡易検査は2014年6月、現代最大の課題の解決に1,000万ポンドの賞金を与える英国「経度賞 (Longitude Prize) 2014」(300年前の海上経度測定技術への懸賞金の法律に因む) の課題に、「食料」「水」等6つの候補の中から選ばれた。
 - ◇ロシア等で100年近い歴史を持ち、極端に抗菌スペクトルが狭いファージ療法も再注目されている²³⁾。
- (3) 長期的に低下している抗菌薬上市数を向上させるための施策
 - ◇排他的権利を5年延長する、米国で2012年施行の 'Generating Antibiotic Incentives Now Act' や、WHOが世界的

行動計画として提案を考えている「新しいビジネスモデル」（市場原理ではなく公共ニーズによって駆動される医薬開発モデル）がある。

3-2 FMTの盛り上がり

2009年から2013年にかけて、FMT関連の学術文献数は、年間2から90へ、登録臨床試験数は年間0から20へ急増した²⁴⁾。大部分はエビデンスが弱い、FMTが臨床で効果を示した疾患が多数あり、今後の発展が期待される（図表5）¹⁹⁾。

2012年には、米国マサチューセッツ工科大学の研究者らによって、非営利組織の糞便バンクOpenBiomeが設立された²⁵⁾。安全性確保のために、感染リスクや消化管・全身性疾患がない健常者を問診によりスクリーニングし、さらに血液と糞便の感染性病原体17項目を検査して、全て陰性の者を糞便提供者としている。また、製造工程管理規準も定めている。個別に検査すれば1,500ドルの費用がかかる、治療1回分を250ドルで臨床医に提供している。4カ月で、10州22医療機関に182回分を送付した。他にマサチューセッツ総合病院等でも、自身の病院の患者のために、糞便バンクを作っている。

我が国では、慶應義塾大学・金井らのグループが、潰瘍性大腸炎、過敏性腸症候群、再発性C. difficile感染症、腸管ペーチェット病の患者計45人を対象としたFMTの臨床試験を開始した。

3-3 米国での規制をめぐる議論

FMTは、特殊な治療形態であり、従来の枠組みにはすんなりと収まりがたいため、どのようにリスクと便益のバランスをとるべきか、規制のありかたに関して議論が起こった（補足ファイル参照）^{7,26,27)}。

FMTに関する規制は不明確であったため、米

国消化器病学会（American Gastroenterological Association：AGA）等4つの学会は、米国食品医薬品局（Food and Drug Administration：FDA）にFMTのガイダンスを求めた。それに対し、FDAは2013年4月、予防や治療用の糞便は、定義上、生物学的製剤であって医薬品に該当し、新薬治験許可申請（Investigational New Drug Application：IND）が必要であるとの回答を示した。

FMTの治療と研究を広く普及させたい臨床医や研究者らは、膨大な作業を要するINDの必要性を疑問視した。臨床医や研究者らとの時間をかけた議論や、AGA等によるINDの簡素化要求を受け、FDAは2013年6月、さらに検討する間の期間限定的なものつもりであるとしながらも、標準治療に反応しないCDIにはINDを必要としない旨の同年7月付けのガイダンスを発出した。

FMT用の糞便を、医薬品としてではなく、手続きがより簡素な、移植用の臓器や組織のように扱うことが望ましいとの意見も高まる中、FDAは2014年3月、糞便供給組織に制約をかけるようなガイダンス案を発出し、パブリックコメントを求めた。INDを要しない標準治療抵抗性CDI治療において、糞便提供者は患者または治療医師に知られていること、および提供者スクリーニングと糞便検査は治療医師の指示のもと実施されること、が必要とした（2014年8月現在、ガイダンス案は最終化されていない）。

FMTには、疾患のリスクを高める等の、未知の長期的リスクがあるかもしれない。一方で、FMTの利用に困難が伴うと、インターネット上の動画で方法が公開されている「自家製」のFMTを実施する患者が増加し、かえって感染症等のリスクが増加するのではないかとの懸念もある。

英国国立医療技術評価機構（National Institute for Health and Clinical Excellence：NICE）は2014年3月、再発性CDI患者へのFMTに関するガイダンスを発表したが、移植用糞便は医薬品としてはとらえられていない。欧州医薬品庁（European Medicines Agency）や、再発性CDI以外に過敏性腸症候群等多数の疾患で1988年以来3,000名以上の患者にFMTを実施したBorodyのいるオーストラリアにも、重荷となるような規制はない¹⁹⁾。

図表5 FMTがプラスの効果を示した疾患

ランダム化比較試験	症例シリーズ	孤立した症例	未公表臨床観察
<ul style="list-style-type: none"> 再発C. difficile感染症 メタボリックシンドローム 	<ul style="list-style-type: none"> 過敏性腸症候群 慢性便秘 潰瘍性大腸炎 クローン病 	<ul style="list-style-type: none"> 慢性疲労症候群 多発性硬化症 特発性血小板減少性紫斑病 自閉症 	<ul style="list-style-type: none"> パーキンソン病 関節リウマチ・仙腸骨炎 口臭・にきび 不眠症・うつ病

出典：参考文献19を基に科学技術動向研究センターにて作成

3-4 FMTの発展型と産業化の動向

FMTを洗練させる方向での研究開発の動きがある²⁸⁾。

3-4-1 菌株カクテル、経口製剤

2013年1月の報告では、カナダのグループが、糞便から分離された33の菌株を培養して再混合した合成糞便‘RePOOPulate’を移植し、再発性CDI患者2名の治療に成功した。しかし、カナダの規制当局Health Canadaは2011年、同品は合成品であり医薬品としての承認が必要として、その後の試験の中止を命じた。一方で、2011年設立の米国Rebiotix社は2014年7月現在、同様の菌株カクテル懸濁液（浣腸用）の第3相臨床試験をFDAと準備中である。同社は、糞便という言葉は患者の心理に良くないとし、微生物叢回復療法という用語を提案している。

より投与が簡単な経口製剤化の動きもある。カナダの別のグループは2013年10月の学会で、糞便由来細菌の濃縮カプセル錠剤で、27名の再発性CDI患者全員の治療に成功したことを発表した。これをプロトタイプとして、2013年設立の米国Symbiotic Health社が開発を試みている。同社も培養細菌を用いる可能性もあるとしているが、培養が難しく糞便に比べて費用がかかることから、‘RePOOPulate’の研究者をはじめ、培養細菌の商業化には疑問を持つ者もいる。

2011年設立の米国Seres Health社は、マイクロバイオームのデータから独自アルゴリズムで状態のネットワークを決定し、補うことで腸管生態系を疾患状態から健康状態に移行させることができる微生物群を選抜するプラットフォーム技術を持つ。2013年後半に臨床試験に入った開発品は2014年1月の中間報告によると、再発性CDI患者10名中9名の治療に成功した。代謝疾患と炎症性疾患に向けた開発品も、デザインを終え、それぞれ非臨床、バリデーションに入った。同社は、C. difficile毒素に対する抗体医薬を開発品に持つ米国製薬大手メルク社の元上級経営幹部を2014年6月にCEOとし、科学顧問には、米国科学アカデミー会員3名の他、上述のNieuwdorpや微生物叢と肥満との関連を示したハーバード大学・Turnbaughら、有力な人材を揃えている。

また、前述の本田も共同設立者として名を連ねる、2010年設立の米国Vedanta Biosciences社は、Treg細胞を誘導するクロストリジウム属菌種

のカクテルを、IBD等を対象に開発している。米国製薬大手Johnson & Johnson社は、Vedanta社の他、組換え乳酸菌を開発している米国ViThera Pharmaceuticals社や、細菌に限らないマイクロバイオーム調節薬を開発するSecond Genome社とも、IBD向けの提携をしている（Second Genome社は肥満・代謝疾患研究で米国製薬大手Pfizer社とも提携）。

3-4-2 組換え細菌

細菌の機能を高めるために、組換え技術を利用する動きも続いており、欧米ではいくつかの会社が、組換え細菌の臨床試験を実施してきた。組換え細菌の作用部位は、口腔、腸管、膣、腫瘍と多岐にわたり、組換え技術は、有用タンパク質の分泌、RNA干渉(RNAi)用RNAのヒト細胞内での放出、細菌無毒化、あるいは組換え体の生物学的封じ込めのための栄養要求性化等に用いられている。日本からは2013年3月、産業革新機構も出資しているアネロファーマ・サイエンス社が、プロドラッグ変換酵素を発現する組換えビフィズス菌の臨床試験を、米国で開始したと発表した。同社の技術は、嫌気性菌であるビフィズス菌が、血中に投与されると低酸素部位である腫瘍に選択的に集積するという信州大学・谷口の発見（低酸素以外に免疫系からの回避等が選択的に寄与しているという説もある）と、元京都薬科大学・加納のビフィズス菌組換え技術に由来し、東京医科大学・藤森らの意志により、実用化に向けて前進した。

4 おわりに

以上のように、近年、共生微生物叢と疾患との関係の解明が飛躍的に進み、微生物叢調節を治療に応用する動きも活発化している。微生物叢は最も移植しやすい「臓器」とも言えるが、特にFMTの規制には、従来の臓器・組織や医薬品に対するものとは異なる視点も必要である。

我が国としては、次のような点も考慮し、研究とその実用化を推進していくことが望まれる。

1) 我が国固有のマイクロバイオームの研究

マイクロバイオームは、解析がまだ始まったばかりであり、経時的变化だけでなく個人差や地域差も大きいことから、我が国での解析を進める意義も大きい。フランスでのバイオマス分解酵素の研究か

ら、西洋人になく日本人の一部のみが持つ腸内細菌が発見されている²⁹⁾。海藻を多く食べる我が国の食文化を反映した、海洋細菌から海藻多糖類分解酵素の遺伝子水平伝播を受けた細菌である。マイクロバイーム解析をゲノムコホート研究に取り入れていくことも望まれる。

2) より高付加価値な予防・治療用微生物の探索

予防や治療に有用な微生物叢の機能は、単純な微生物叢調節薬や代謝物等の化合物で代替できる場合があるかもしれない一方、デリバリー機能を備えた「生きた医薬品工場」たる微生物や、そのネットワークシステムとしての微生物複合体が、より有用な場合があるかもしれない。肥満やIBDでは腸内細菌の多様性が低下しており（一方、膵炎では膵内細菌叢の多様性が増加⁶⁾）、予防や治療に必要な細菌も、多様性が鍵となる可能性がある。開発候補微生物または微生物群を選択するための、ヒトでの効果の予測性が高い評価系や、個別化医療のために個人差を反映できる評価系の開発が望まれる。

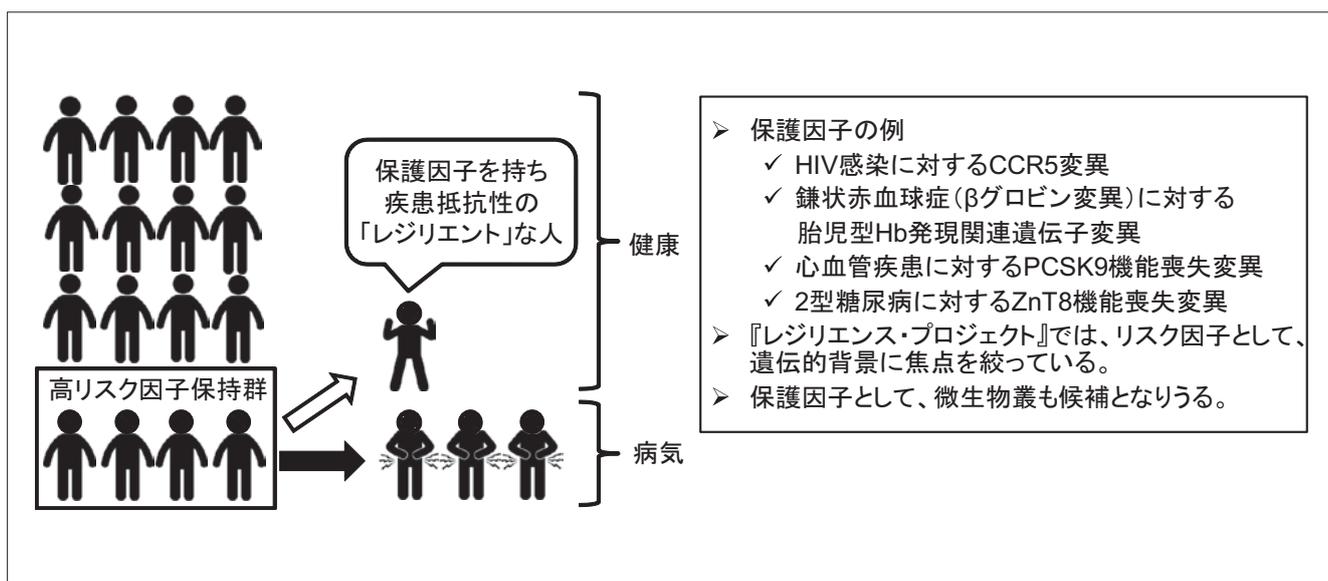
また、これからの予防・治療用微生物の研究には、先行者の追随以上の高付加価値が求められる。IBDの潰瘍性大腸炎でのFMTの最初のランダム化比較試験の結果が2014年5月の学会で報告され、治療期間延長等により有効性を示せる期待は残されたが、寛解に有意差はなかった(7/31 vs 2/30、 $P=0.15$)³⁰⁾。CDIと違い、他の疾患では簡単に頑健な有効性を示すのは難しいのかもしれない。制御効

果がより強力な微生物の探索には、高リスク因子を持つにもかかわらず疾患抵抗性（「良い外れ値」）の人をヒントに新治療法を考える、米国『レジリエンス・プロジェクト』³¹⁾の考え方が活かせるかもしれない（図表6）。微生物叢が、リスク因子の影響を緩衝する、保護因子となる可能性がある。また、必要な機能を人工的に付与する組換え微生物には、新たな生物学的封じ込め技術や分泌発現技術等、研究の開拓の余地が大きい。

3) 柔軟な規制

我が国では、医療イノベーション推進（効率化、迅速化）のために、GCP省令改正（2012年12月）から、再生医療推進法（2013年5月）、医薬品医療機器等法（改正薬事法）・再生医療等安全性確保法（2013年11月）、健康・医療戦略推進法（2014年5月）等まで、レギュラトリーサイエンスの推進を含め、次々と環境整備が進んでいる。規制に痺れを切らして海外流出する研究者の動きも一部あるが、たとえ世界の先頭に立つような新規の医療形態であっても、我が国での先進的な取り組みが、我が国の利益になるように、原理原則に基づきながら柔軟な規制が望まれる。事業によっては、OpenBiomeのような非営利組織による運営も視野に入れる必要がある。便益とリスク・費用のバランスを適時に迅速にとれるよう、関係者との対話も重要である。

図表6 「レジリエント」な人をヒントとした研究



補足ファイル <http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-STT146-Supplement.pdf>

参考文献

- 1) Olle B. "Medicines from microbiota." *Nature Biotechnology* 2013;31 (4) :309-15.
- 2) Ley RE, et al. "Human gut microbes associated with obesity." *Nature* 2006;444 (7122) :1022-3. & Turnbaugh PJ, et al. "An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest." 同誌同号 :1027-31.
- 3) 服部 正平、他『微生物ゲノムシーケンシング体制の活用による微生物システム解明への基盤構築』ゲノム特定領域 (2005年-2009年) 年次報告書 : http://lifesciencedb.jp/houkoku/pdf/D-05_final.pdf
- 4) 森宙史、他『メタゲノム解析の現状と将来』*情報管理* 2012;55 (3) :167-75.
- 5) Qin J, et al. "A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing." *Nature* 2010; 464 (7285) : 59-65.
- 6) Human Microbiome Project Consortium. "Structure, function and diversity of the healthy human microbiome." *Nature* 2012;486 (7402) :207-14.
- 7) Gut Microbiota for Health : <http://www.gutmicrobiotaforhealth.com/>
- 8) Tong M, et al. "Reprogramming of gut microbiome energy metabolism by the FUT2 Crohn's disease risk polymorphism." *The ISME Journal* 2014;doi: 10.1038/ismej.2014.64.
- 9) Tang WH, et al. "Intestinal microbial metabolism of phosphatidylcholine and cardiovascular risk." *New England Journal of Medicine* 2013;368 (17) :1575-84.
- 10) Cryan JF, et al. "Mind-altering microorganisms: the impact of the gut microbiota on brain and behaviour." *Nature Review Neuroscience*. 2012;13 (10) :701-12.
- 11) Hsiao EY, et al. "Microbiota modulate behavioral and physiological abnormalities associated with neurodevelopmental disorders." *Cell*. 2013;155 (7) :1451-63.
- 12) Atarashi K, et al. "Treg induction by a rationally selected mixture of Clostridia strains from the human microbiota." *Nature* 2013;500 (7461) :232-6.
- 13) Atarashi K, et al. "ATP drives lamina propria T (H) 17 cell differentiation." *Nature* 2008;455 (7214) :808-12.
- 14) Ivanov II, et al. "Induction of intestinal Th17 cells by segmented filamentous bacteria." *Cell* 2009;139 (3) :485-98.
- 15) Kawamoto S, et al. "The inhibitory receptor PD-1 regulates IgA selection and bacterial composition in the gut." *Science* 2012;336 (6080) :485-9.
- 16) Kim YG, et al. "Gut dysbiosis promotes M2 macrophage polarization and allergic airway inflammation via fungi-induced PGE2." *Cell Host & Microbe* 2014;15 (1) :95-102.
- 17) Yoshimoto S, et al. "Obesity-induced gut microbial metabolite promotes liver cancer through senescence secretome." *Nature* 2013 Jul 4;499 (7456) :97-101.
- 18) van Nood E, et al. "Duodenal infusion of donor feces for recurrent Clostridium difficile." *New England Journal of Medicine* 2013;368 (5) :407-15. & Kelly CP. "Fecal microbiota transplantation—an old therapy comes of age." *ibid*:474-5.
- 19) de Vrieze J. "The promise of poop." *Science*. 2013;341 (6149) :954-7.
- 20) Konijeti GG, et al. "Cost-effectiveness of competing strategies for management of recurrent Clostridium difficile infection: a decision." *Clinical Infectious Diseases*. 2014;58 (11) :1507-14.
- 21) "Antibiotic resistance threats in the United States, 2013." CDC : <http://www.cdc.gov/drugresistance/threat-report-2013/>
- 22) "A three-step plan for antibiotics." *Nature* 2014;509 (7502) : 533. & Woolhouse M, et al. "An intergovernmental panel on antimicrobial resistance." *ibid*: 555-7. & Peacock S. "Bring microbial sequencing to hospitals." *ibid*:557-9.
- 23) Reardon S. "Phage therapy gets revitalized." *Nature*. 2014;510 (7503) :15-6.
- 24) Smith MB, et al. "How to regulate faecal transplants." *Nature*. 2014;506 (7488) :290-1.
- 25) OpenBiome : <http://www.openbiome.org/regulatory-support>
- 26) "Vaccine and Related Biological Product Guidances." & "Public Workshop: Fecal Microbiota for Transplantation." FDA : <http://www.fda.gov/> & The American Gastroenterological Association : <http://www.gastro.org/>
- 27) Ratner M. "Fecal transplantation poses dilemma for FDA." *Nature Biotechnology* 2014;32 (5) :401-2.
- 28) 各社ウェブサイト
- 29) Hehemann JH, et al. "Transfer of carbohydrate-active enzymes from marine bacteria to Japanese gut microbiota." *Nature* 2010;464 (7290) :908-12.

- 30) Moayyedi P, et al. "929c A randomized, placebo controlled trial of fecal microbiota therapy in active ulcerative colitis." Gastroenterology 2014;146 (5) Supplement 1, S-159.
- 31) Friend SH, et al. "Clues from the resilient." Science 2014;344 (6187) :970-2.

..... **執筆者プロフィール**



本間 央之

科学技術動向研究センター 特別研究員

博士(医学)。免疫やがんの創薬研究に従事し、2012年11月より現職。長年にわたり、生命・社会の自己組織化および‘disruptive innovation’（胚盤胞補完法による臓器作製、標的構造の制約や送達の限界を突破する創薬等）に関心を持つ。