

Science & Technology Trends

科学技術動向

8
2013
No.137

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

- p4

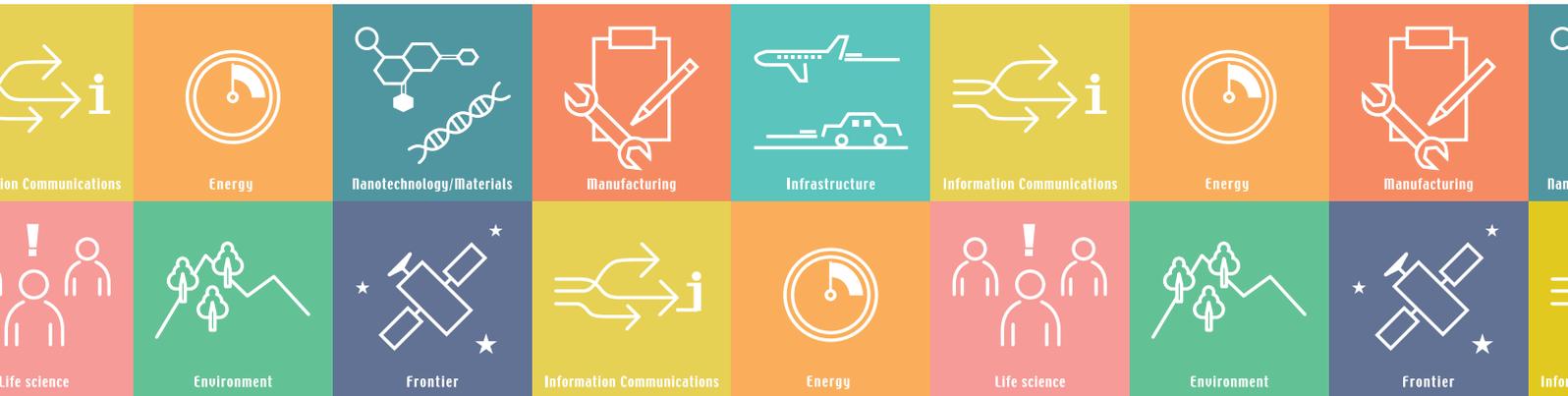
米国における革新的発想に対する
新たな研究支援の枠組み
—2014年度予算案における注目すべきプログラム等—
- p11

世界のスーパーコンピュータの動向
- p19

デジタルファブリケーションの最近の動向
—3Dプリンタを利用した新しいものづくりの可能性—
- p27

スポーツ脳震とう関連研究の動向
- p34

各国の地球観測動向シリーズ (第2回)
欧州の地球観測活動の方向性
—地球観測データの仲介枠組—

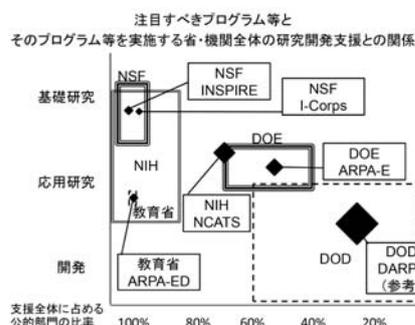


本文は p.4 へ

米国における革新的発想に対する 新たな研究支援の枠組み —2014年度予算案における注目すべきプログラム等—

米国では革新的な発想を、既存の枠組みを超えて支援する様々な取り組みが見られるが、それらの取り組みは多様である。ここで紹介するプログラムやセンターは、いずれも革新的な発想を支援し発展させるという目的を持っているが、それぞれの目的、プロジェクト選定手順、経費負担（特に民間部門における経費分担）等において大きく異なっている。このことは、いわゆるハイリスクリサーチが画一的な制度において行なわれているのではなく、それぞれの目的に適合したプログラム等が構築されていることを意味し、既存の研究支援との補完的な関係を含め、国全体の研究開発エコシステムが形成されていると言える。

本稿においては、2014年度大統領予算案の中から注目すべきと考えられるいくつかのプログラムやセンターを紹介し、米国連邦政府がどのような施策を取り入れているかを示す。



上の図表は、米国連邦政府のいくつかの省・機関の研究開発予算が、基礎研究、応用研究、あるいは開発のいずれに重点が置かれているか、また、公的部門で支出されているか、民間部門で支出されているかを長方形により示したうえで、それらの省・機関が実施する注目すべきプログラム等を同様の視点で整理したものである。
DARPA、ARPA-Eといったプログラムは、民間部門で支出する応用研究や開発への支出が比較的大きく、NSFや教育省において注目すべきプログラムは、その大半が公的部門で支出される研究への支援となっている。また、NIHにおいては、その予算の大半が公的部門において実施される研究のために支出されるが、最近設置されたトランスレーショナル研究のためのセンターは、他に比べ民間部門への支援の比率が大きい。

本文は p.11 へ

世界のスーパーコンピュータの動向

2013年6月、スーパーコンピュータの性能ランキングを示すTOP500リストの最新版が発表された。最新リストでは、中国の再躍進ぶりが特筆できる。今回のリストでは中国の新スーパーコンピュータが他を大きく引き離して第1位を獲得した。過去、ハードウェアのアーキテクチャは多様化しており、CPUとアクセラレータ（GPU（画像処理プロセッサ）やメニーコアプロセッサほか）を組合わせて構成したシステムが増加している。スーパーコンピュータの「導入国の国際的な広がり」・「自主開発国の拡大」・「研究開発のグローバル化」などの動きも継続している。新しい動きとしてビッグデータへの対応、新ベンチマーク指標の検討などが見える。

今後、各国の科学技術の発展や産業競争力の強化に向けたスーパーコンピュータの整備・拡充は一層進むと想定される。そして、開発競争は次のエクサスケールシステムを目指してますます熾烈な戦いが繰り広げられていくだろう。文部科学省は、今後10年程度を見据えた日本の「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）」計画の推進の在り方についての新たな戦略を調査検討し、2013年6月に中間報告を公表した。今後の高性能なスーパーコンピュータの開発にはグローバルな連携は必須である。日本は、スーパーコンピュータ「京」の開発と活用で培った技術・経験・人材を維持・発展させるとともに、それらを活かして国際連携を優位に進めていくべきである。

本文は p.19 へ

デジタルファブリケーションの最近の動向 —3D プリンタを利用した新しいものづくりの可能性—

三次元に層を重ねて物体を製造する積層造形を利用する三次元（3D）プリンタが、デジタル&パーソナルファブリケーションツールとして注目されている。従来のものづくり手法と異なり、デジタルデータを基に一体的に 3D 形状が作製できることから、製造の大幅な低コスト化、あるいはオープンソースを利用した製造のイノベーションが期待されている。近年、欧米を中心に、このデジタルファブリケーションを製造業や教育に展開する政策が推進されている。

デジタルファブリケーションでは、デザインとプロセスを一体化・融合することで、新たな発想によるものづくりが実現できる可能性がある。今後、基幹となる付加製造技術の高精度化、高スループット化、材料の多様化のための研究開発と併せて、アイデア創出のためのデザインとプロセスの研究者・技術者の融合の場の提供や、人材育成の観点からの市民や子供たちへの教育・啓発のための施策も、将来に向けたデジタルファブリケーションの進展のために有効である。

本文は p.27 へ

スポーツ脳震とう関連研究の動向

近年、脳科学研究は、分子・細胞から個体・社会、あるいは疾患から認知・行動まで、様々な分野に広がっている。そうした中、オバマ大統領が 2013 年 4 月に発表した『BRAIN イニシアチブ』をはじめとした脳科学研究プログラムは、世界的に盛り上がりを見せている。特に米国では、アメリカンフットボール等によるスポーツ関連の脳震とうが、世間の注目を集めている。社会的関心に応えるかたちで多額の資金が脳損傷研究に投じられ、その研究成果により新たな知見も得られつつある。米国神経学会は 2013 年 3 月、これまでのエビデンスに基づいてスポーツ脳震とうガイドラインを改訂するとともに、リスクを最小化するための法規制を強く促す声明を発表した。一方、我が国では、中学校、高校の主要部活動において、柔道による死亡率が最も高い。その主因は頭部外傷であり、脳震とう発生率も高いものと推定される。我が国でも、医学・医療とスポーツ・教育現場の間の積極的な橋渡しが必要であり、エビデンスの収集と分析とともに、実用的な脳震とう対策の導入が望まれる。対策の進歩のために、未だ不十分な障害の予知・予防や治療につながる研究は重要である。

本文は p.34 へ

各国の地球観測動向シリーズ（第 2 回） 欧州の地球観測活動の方向性 —地球観測データの仲介枠組—

欧州連合（EU）はコペルニクス計画（旧称 GMES）で活発に地球観測活動を促進しており、環境監視と安全保障を含む幅広いテーマで統合的なデータベース・システムを構築している。最近になって地球観測データの相互運用性を大幅に向上させる「仲介枠組」というソフトウェアを開発し、生物多様性や森林など学際的な分野に適用し始めている。このシステムの導入によりデータ提供者や利用者の負担が少なくなり、データへのアクセスおよび提供するサービスの増大によって雇用創出にも寄与している。我が国でも地球環境情報統合システムを構築する上で欧州と同様な仕組みを導入しつつある。

米国における革新的発想に対する 新たな研究支援の枠組み

—2014年度予算案における注目すべきプログラム等—

遠藤 悟

概 要

米国では革新的な発想を、既存の枠組みを超えて支援する様々な取り組みが見られるが、それらの取り組みは多様である。ここで紹介するプログラムやセンターは、いずれも革新的な発想を支援し発展させるという目的を持っているが、それぞれの目的、プロジェクト選定手順、経費負担（特に民間部門における経費分担）等において大きく異なっている。このことは、いわゆるハイリスクリサーチが画一的な制度において行われているのではなく、それぞれの目的に適合したプログラム等が構築されていることを意味し、既存の研究支援との補完的な関係を含め、国全体の研究開発エコシステムが形成されているとすることができる。

本稿においては、2014年度大統領予算案の中から注目すべきと考えられるいくつかのプログラムやセンターを紹介し、米国連邦政府がどのような施策を取り入れているかを示す。

キーワード：米国, ハイリスクリサーチ, NSF, NIH, DARPA

1 はじめに

米国においては、いわゆるハイリスク研究支援と呼ばれるものの他にも、トランスフォーマティブ研究支援、トランスレーショナル研究支援などの言葉を用い、革新的な発想を、既存の枠組みを超えて支援する様々な取り組みが見られるが、それらの取り組みは多様であり、必ずしも単一のスキームが存在する訳ではない。そのため、個々のプログラムの実施や関連するセンターの設置についてその目的や実施手順等を比較することは重要と考えられる。本稿においては、2014年度大統領予算案の中から、このような観点において注目すべきと考えられるいくつかのプログラムやセンターを紹介し、米国連邦政府がどのように革新的な発想の研究を展開させるための施策を取り入れているかを示す。

2 各省・機関の研究開発支援の位置づけ

ここで紹介するそれぞれのプログラム等は、旧来型でない、革新的な発想の研究を展開させることを目的としたものであるという点では共通性があるが、その目的は、研究者の好奇心に基づく研究を発展させることを目的としたものから、民間部門において商業的に成立する技術開発を目的としたものまで様々である。このため、各プログラム等を紹介するのに先立ち、米国における連邦政府の研究開発支援の状況について、研究開発の段階（基礎研究、応用研究、開発）とその担い手（公的部門と民間部門）という観点から整理する。

国立科学財団（National Science Foundation：NSF）は、定期的に研究開発に関する様々な統計資料を発表しているが、連邦政府による研究開発に関する資料としては、「研究開発のための連

邦政府資金 (Federal Funds for Research and Development)¹⁾」を刊行している。同報告書には連邦政府各省・機関別に支出された予算について基礎研究、応用研究、開発の別に区分され、また、支出先について、連邦政府機関内、大学、産業、非営利機関等に区分された情報が掲載されている。

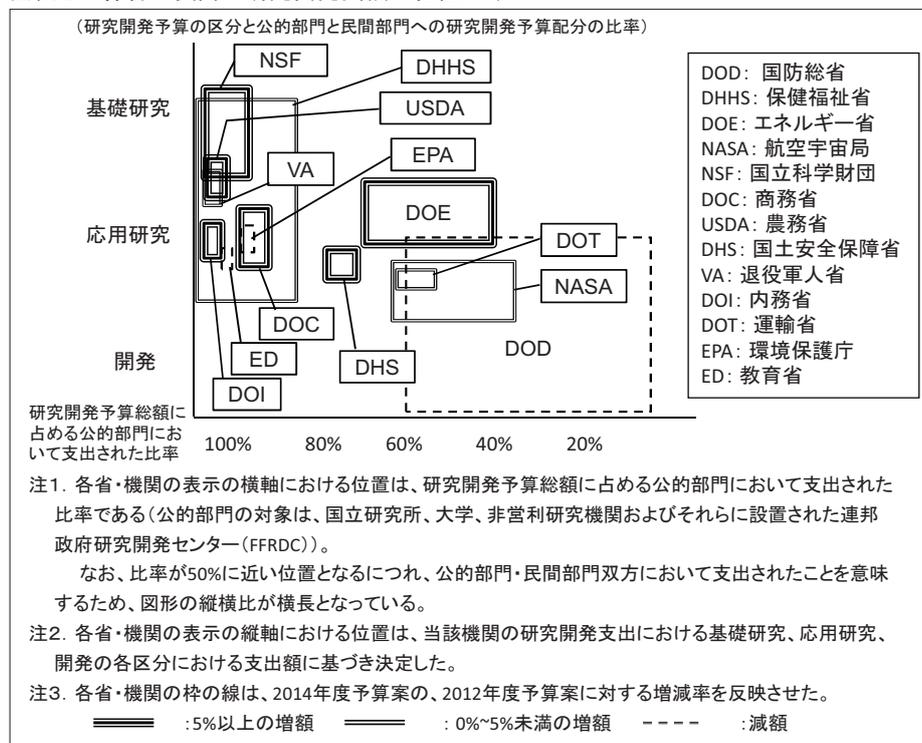
米国における科学技術政策論議において最も関心が持たれる点は、当該研究開発活動が、連邦政府の資金により支援されなければならないか (すなわち、民間部門において資金負担できないものか) という点である。連邦政府各省・機関は、国立研究所や大学などの公的部門に加え、民間部門で支出される研究開発活動に対しても多額の資金を負担しているが、その資金負担の公的部門、民間部門の比率は、各省・機関により異なる。図表1は、上記NSF報告書をもとに筆者が各省・機関の資金による研究開発活動の実施様態について、公的部門 (連邦政府研究機関、州・地方政府研究機関、大学、非営利研究機関等) と民間部門 (民間企業) の比率を横軸に、また、基礎研究、応用研究、開発の別を縦軸に設定し、それぞれの省・機関における研究開発支援の性格を示したものである。

この図表においては、中央下に配置された国防

総省 (Department of Defense : DOD)、エネルギー省 (Department of Energy : DOE)、航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration : NASA)、そして運輸省といったグループと、左上に配置された保健福祉省 (Department of Health and Human Services : DHHS)、NSF、農務省 (Department of Agriculture) 等のグループに大きく分けることができる (なお、DHHSの研究開発予算の約95%は、国立衛生研究所 (National Institutes of Health : NIH) において支出されている)。一般に、中央下のグループは、民間企業や国立研究所、大学等様々な機関において行われる、実用目的が示された開発や応用研究活動に対して資金を配分するのに対し、左上のグループは、大学や国立研究機関、そして非営利研究機関が行う研究者の自由な発想による基礎研究や応用研究の活動に対し資金を配分するという役割の違いを見ることが出来る。本稿の後の章においては、この図表のどのような位置において新たなプログラム等の展開が見られるかを明らかにする。

なお、図表1では2014年度予算案の対2012年度増減についても囲み線により示した。DOD研究開発予算は削減されているのに対し、公的部門における基礎研究活動に対し資金配分を行う機関は概ね増額の傾向が見られることがわかる。

図表1 各省・機関の研究開発支援の位置づけ



参考：各省機関の研究開発予算額

	2012年度実績	2014年度予算案
DOD	72,916	68,291 (6.3%減)
DHHS	31,377	32,046 (2.1%増)
DOE	10,811	12,739 (17.8%増)
NASA	11,315	11,605 (2.6%増)
NSF	5,636	6,148 (9.1%増)
DOC	1,254	2,682 (113.9%増)
USDA	2,331	2,523 (8.2%増)
DHS	481	1,374 (185.7%増)
VA	1,160	1,172 (1.0%増)
DOI	820	963 (17.4%増)
DOT	921	943 (2.3%増)
EPA	568	560 (1.4%減)
ED	397	352 (11.3%減)
その他	925	1,376 (48.8%増)
計	140,912	142,773 (1.3%増)

(単位：100万ドル)

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

3 2014年度予算案において注目される研究開発プログラム

米国の財政は引き続き厳しい状況にあり、2014年度裁量予算案も全体としては減額傾向が見られるが、研究開発予算は2012年度予算実績に比べ1.3%の増額、さらにこのうち研究（基礎研究および応用研究）予算は7.5%の増額となっており、オバマ政権が研究開発活動を重視していることは明らかである²⁾。さらに、予算案においては、NSF、DOE 科学局、そして商務省国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology: NIST）研究室の予算を8.0%増の135億ドルとするといった従来から継続している競争力強化に向けた取り組みに加え、いくつかの新たなプログラムを創設したり、最近開始したプログラムを拡大するなどメリハリのある予算案となっている。これらの予算案については、今後の予算管理法に基づく歳出上限の設定等により、必ずしもそのまま歳出法として成立する見込みがある訳ではないが、大統領予算案において強調されている事業等は、今後の米国の科学技術政策を見通すうえで注目すべきであると考えられる。

以下においては、行政管理予算局（Office of Management and Budget: OMB）が発行する2014年度の大統領予算案に加え、科学技術政策局（Office of Science and Technology Policy: OSTP）や、各省・機関が発行した解説書やパンフレット、さらに大統領科学顧問の連邦議会公聴会発言資料など様々な文書から、注目すべきと考えられるプログラム等を取り上げた。

(1) 国立科学財団（NSF）

① NSF 学際的研究教育促進支援統合プログラム（INSPIRE）³⁾

NSFは、2011年に、「トランスフォーマティブで学際的な計画に対する創造的研究資金授与（Creative Research Awards for Transformative Interdisciplinary Venture - CREATIV）」と名付けたプログラムを創設した。これは、既存の伝統的なプログラムの枠組みに納まらない、並外れて創造的な提案や、高いリスクで高い見返りの学際的な提案などに対し支援を行うもので、その評価は、原則として外部のレビュアーの評価によることなく、NSF内部のメリットレビューにより行われる。

同プログラムは2013年度にこのCREATIVプログラムの継続部分を取り込み、「NSF学際的研

究教育促進支援統合プログラム（Integrated NSF Support Promoting Interdisciplinary Research and Education - INSPIRE）」に改編された。2014年度予算案においては2012年度のCREATIVの当初予算額の2035万ドルからおよそ3倍増となる6300万ドルのプログラムに拡充する計画となっている。INSPIREにおいては、CREATIVのプロジェクトの継続をトラック1とした上で、新たにINSPIREトラック2とINSPIRE長官賞が設置されている。

プログラムの実施手順で特徴的な点として、研究計画の提案が研究趣旨書を提出することに始まり、この研究趣旨書についてNSF内部で認められた者のみが、フルプロポーザルを提出することができるという点を挙げるができる。フルプロポーザルに対する審査は、トラック1については原則としてNSF内部のメリットレビューにより行われるが、トラック2およびINSPIRE長官賞についてはブルーリボンパネルにより行われる。支援規模は、トラック1が最高100万ドルで30～40件を採択、トラック2が最高300万ドルで10～15件を採択の予定である（いずれも期間は5年）。さらに、INSPIRE長官賞はそれ以上の規模の計画を対象として3～7件採択予定である。

② イノベーション部隊（Innovation-Corps）⁴⁾

NSFは、2011年度にその支援を行う科学工学研究の科学的成果（アウトプット）を、技術イノベーションに導くことを目的としてイノベーション部隊（Innovation-Corps: I-Corps）のプログラムを創設した。同プログラムの2014年度予算は、2012年度当初予算額である750万ドルから、3倍以上の2485万ドルとなっている。NSFは以前から様々な技術展開やイノベーション促進のためのプログラムを実施してきたが、それらがいずれも研究本体を支援する性格のものであったのに対し、I-Corpsは、1) プロトタイプ開発やコンセプトの実証といった目的を持つチームを支援するプログラムであること、2) チームは研究代表者に加え、起業面での主導者、イノベーションや起業のメンターといった者により構成されること、3) 仮説に導かれたアプローチから、その提案されたコンセプトの技術的メリットと市場性の両面における評価のための手法の開発まで関与する教育部門の存在、といった点を特徴としている。支援対象者はNSFの資金を獲得している研究者で、6か月の間、上記のチームを通し5万ドルの資金とメンタリングを受けることができる。また、既存の大学のイノベーションや起業のためのユニットを支

援する Innovation Corps Site 等のプログラムも併せて実施されている。

(2) 国立衛生研究所 (NIH)

○ 国立トランスレーショナル科学先進センター (NCATS)⁵⁾

国立トランスレーショナル科学先進センター (National Center for Advancing Translational Sciences。以後、NCATS) は、2014年度予算案の額が6億6570万ドルで、2012年度の5億7430万ドルから16%という大幅な伸びとなっている。

NCATSは、2011年に設置されたNIHの一機関で、幅広い病態に対する診断、治療法の開発、試験、そして実施の向上を目的としており、このトランスレーションと呼ばれる手順の改善により、公的部門と民間部門双方の研究者が協力し、患者のニーズに応えた薬品、機器、診断の開発を行っている。具体的な活動としては、研究・トレーニング環境を臨床・トランスレーショナル研究に向け変容させるための「臨床・トランスレーショナル科学活動 (Clinical and Translational Science Activities)」(予算案の額:4億6250万ドル)の他、所内研究(5575万ドル)、トランスレーショナル研究を妨げる科学的・技術的課題を解決するイニシアチブへの資金提供を目的とした治癒加速ネットワーク(5000万ドル)、そして研究プロジェクトグラント(5000万ドル)などである。

(3) エネルギー省 (DOE)

○ エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E)⁸⁾

DOEは、素粒子物理学等の基礎研究から兵器等の実用目的を持った開発まで幅広い研究開発活動を実施しているが、科学局 (Office of Science) による大学等への研究支援プログラムとは別の、注目すべきプログラムとしてエネルギー高等研究計画局 (Advanced Research Projects Agency-Energy。以後、ARPA-E) を挙げることができる。同局は、米国の経済やエネルギーの安全保障を向上させるため、既存の技術を転換させるようなエネルギー技術イノベーションを支援することを目的に設置された機関である。技術的あるいは資金的な不確定性により他のDOEの組織や民間部門が資金配分を行わない技術の開発を支援することとしており、リスクが高いが期待される見返りも高い研究を対象としている。そしてその成果は、民間部門あるいは連邦政府により開発が進められることが期待されている。

2009年の米国再生・再投資法に基づき、4億ド

ルの予算措置が行われ、2011年度以降は毎年予算が措置されてきたが、2014年度予算案においては、2012年度に比べ37.8%、1億400万ドル増の3億7900万ドルとなっている。

申請・採択手順は、まず申請を行おうとする者がコンセプトペーパーを提出し、ARPA-E側がこれに対し事前評価を行い、フルプロポーザルの提出を推奨する者とそうでない者を区分し通知を行う。その後、ARPA-Eは提出されたフルプロポーザルに対し、最終的な採否決定を行う。

研究支援期間は、1年から3年とエネルギー省の支援プログラムとしては比較的短期間であるが、その理由は研究活動が市場化に向けた活動に注力すべきプログラムであると説明されている。

(4) 教育省 (ED)

○ 教育高等研究計画局 (ARPA-ED)^{7,8)}

教育省 (Department of Education: ED) の研究開発予算の規模は大きくないが、科学・技術・工学および数学 (STEM) 教育は、オバマ政権の重要な政策課題となっていることから特徴的なプログラムも見られる。「幼稚園・初等中等教育 (K-12) の教育と学習の改善」の「イノベーションへの投資 (i3)」という予算項目においては、「教育高等研究計画局 (Advanced Research Projects Agency for Education: ARPA-ED)」というプログラムがあり、2014年度予算案においては、6450万ドルを上限として資金を配分するとしている。このプログラムは、2011年頃から大統領の教育イニシアチブの一部として提案されていたものであるが、2014年度予算案において上記金額が書き込まれ、また、下院科学宇宙技術委員会公聴会でのHoldren大統領科学顧問の説明でもその実施が明言されるなど、ここにきて実現の可能性が高まってきたものである。

参考:

国防高等研究計画局 (DARPA)⁹⁾

国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA) は、ソ連のスパイ打撃の翌年の1958年に、米軍の技術的優越性を維持し、敵対する者からの予期せぬ驚き (surprise) を回避することを目的として設立されたDODの機関である (設立時の名称は「高等研究計画局」(Advanced Research Project Agency: ARPA))。

現在、DARPAは国防科学、情報イノベーション、マイクロシステム技術、戦略技術、戦

術技術の5つの技術室を通し250のプログラムが実施され、企業、大学やDOD他の研究機関との間で約2,000のプロジェクトが実施されている。その戦略目的としては、1) 国家安全保障のためのブレークスルー能力を展開すること、2) 優越性のある、高い能力を保持した米国の技術基盤の形成のための触媒となること、3) 現在および未来におけるDARPAの堅固で力強いミッションの遂行を確かなものとする、の3点である。なお、2)の技術基盤に関する目的の中には、国防目的に加え、商業的に利用可能な技術開発にも注力することが示されている。

2014年度予算案の額は、対2012年度比約1.8%増の28億6500万ドルで、この額はDODの研究開発予算の約4パーセントにあたるが、大幅に削減されたDOD予算の中では例外的に増加傾向となっている。職員(政府職員)の数は210人で、うち95人がプログラスマネージャーである。プログラスマネージャーは、企業、大学、政府機関等から3～5年の任期で任用され、個々のプロジェクトについて、当該プロジェクトの運営に関与し、また、外部の技術コミュニティと交流しその成果を高める努力をするなどの役割が求められている。

4 各プログラムの特徴のまとめ

以上が注目すべきと考えられるプログラム等の中から取り上げた5つの例であるが、以下においてはその目的や実施手順等の点から3つに括り直した。

(1) 研究者の自由な発想に基づく基礎研究に対する旧来の枠組みを超えた支援

NSFのINSPIREは、基礎研究支援の中でも伝統的なプログラムの枠組みに納まらない大胆な発想に対し、フルプロポーザルに先立ち、研究趣旨書の提出とそれに対するNSF内部における承認手続きを必要とするなど、既存のメリットレビューとは異なる手順で採択を決定するという特徴がある。

このようなプログラムはNIHにおいてもNIH共通基金によるハイリスクリサーチとして実施されている。特に創造性の高い研究者による先進的な研究を支援するNIH長官パイオニア賞等の名称のプログラムがそれであり、伝統的なプログラムと補完的

な関係に位置づけられている。

これらのプログラムはハイリスクリサーチと呼ばれることがあるが、基礎研究の中でも挑戦的な研究計画であるという意味で用いられており、以下(3)における民間資金の支出におけるリスクの意味とは異なる。

(2) 基礎研究の成果を、将来の実用化へ結び付けるための支援

NSFのI-CorpsとNIHのNCATSはともに将来の実用化を念頭に置いた枠組みである。ただし、I-CorpsはNSFの研究資金の受領者(主に大学の研究者)を中心として、研究成果が技術イノベーションへと展開するためのチームを対象として資金配分を行うメカニズムであるのに対し、NCATSは、NIHの一センターとして、公的部門と民間部門双方の研究者が協力し、患者ニーズに応えた薬品、機器、診断の開発を行う場を設け、資金配分を行うという点でその位置づけは大きく異なる。

(3) 民間資金ではリスクが大きい革新的な発想による研究開発に対する支援

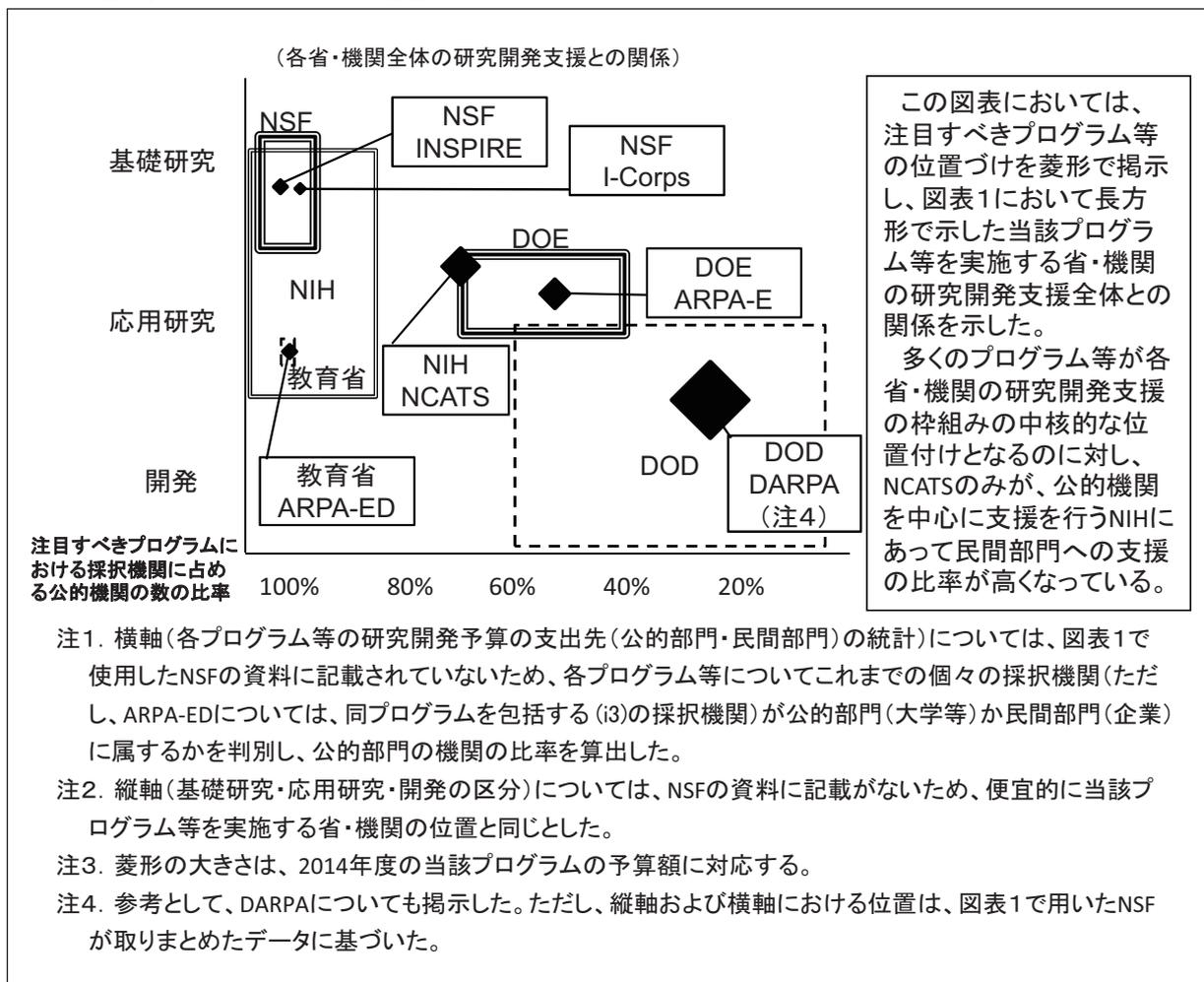
ARPA-EおよびARPA-EDは、いわゆるDARPAモデルと呼ばれるハイリスク研究支援である。その最大の特徴は多額の研究開発資金を要するにも関わらず失敗するリスクは高いが、成功すれば多大な見返りが期待できるプロジェクトを支援するという点である。ただし、ARPA-EやARPA-EDの最終的な目的は、DARPAのような必ずしも商業的な自立性が問われない国防目的の技術開発とは異なり、民間企業が出資する商業的に自立した技術の開発である。特にARPA-Eについては、支援対象機関の半数近くが民間機関となっており、民間企業等に公的資金を投入することの妥当性についても検証が行われている。

5 各省・機関の研究開発支援の枠組みにおける各プログラム等の位置づけ

以上の内容を改めて連邦政府全体の研究開発システムの中において理解するため、図表2においては図表1の関係する省・機関の上に上記の各プログラムを書き込んだ。

NSFにおける注目すべきプログラムは、いずれも大学を中心とした公的部門に資金配分することにより、革新的な発想を支援したり、技術イノベーションを促進させようとしたりするものであるこ

図表2 注目すべきプログラム等の位置づけ



とがわかる。また、ARPA-Eは、応用研究を中心に、公的部門、民間部門双方の機関を支援することにより、商業的に自立した研究成果を追い求めるものであることが読み取れる。さらに、NIHのNCATSを見ると、トランスレーショナルリサーチの促進に向けた取り組みが、NIH全体の公的部門を中心とした支援とは異なる位置づけにおいて行われていることが理解できる。

6 まとめ—米国の取り組みを通して得られる知見

以上、2014年度予算案の中から、注目すべきと考えられるいくつかのプログラム等を紹介した。各プ

ログラム等は、いずれも革新的な発想を支援し発展させるという目的を持っているが、それぞれの目的、プロジェクト選定手順、経費負担(特に民間部門における経費分担)等において大きく異なっている。このことはすなわち、いわゆるハイリスクリサーチが画一的な制度において行なわれているのではなく、それぞれの目的に適合したプログラム等が構築されていることを意味する。

また、各プログラム等は、いずれも各省・機関、あるいは連邦政府全体の研究開発の枠組みにおいて、既存のプログラム等との関係が明確に整理されている。すなわち、米国においては、いわゆるハイリスクリサーチと既存の研究に補完的な関係を見ることができ、このような関係が成立していることにより米国全体の研究開発エコシステムが形成されているとすることができる。

参考文献

- 1) Federal Funds for Research and Development: Fiscal Years 2009–11. 2013年7月9日 :
<http://www.nsf.gov/statistics/nsf12318/>
- 2) OSTP: R&D Budgets. 2013年7月10日 : <http://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/rdbudgets>
- 3) NSF: Integrated NSF Support Promoting Interdisciplinary Research and Education (INSPIRE) 2013年7月10日 :
http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504852
- 4) NSF: I-Corps 2013年7月10日 : http://www.nsf.gov/news/special_reports/i-corps/index.jsp
- 5) NIH: National Center for Advancing Translational Sciences 2013年7月10日 : <http://www.ncats.nih.gov/>
- 6) DOE: Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) 2013年7月10日 : <http://arpa-e.energy.gov/>
- 7) OSTP: Director's written testimony on the 2014 R&D Budget 2013年7月10日 : <http://science.house.gov/sites/republicans.science.house.gov/files/documents/HHRG-113-SY-WState-JHoldren-20130417.pdf>
- 8) Department of Education: ARPA-ED 2013年7月10日 : <http://www.ed.gov/technology/arpa-ed>
- 9) Defense Advanced Research Projects Agency 2013年7月10日 : <http://www.darpa.mil/>

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。近年は、科学と社会の関係や高等教育等にも対象を拡大している。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 企画官・分析研究員。

世界のスーパーコンピュータの動向

野村 稔

概要

2013年6月、スーパーコンピュータの性能ランキングを示すTOP500リストの最新版が発表された。最新リストでは、中国の再躍進ぶりが特筆できる。今回のリストでは中国の新スーパーコンピュータが他を大きく引き離して第1位を獲得した。過去、ハードウェアのアーキテクチャは多様化しており、CPUとアクセラレータ（GPU（画像処理プロセッサ）やメニーコアプロセッサほか）を組合わせて構成したシステムが増加している。スーパーコンピュータの「導入国の国際的な広がり」・「自主開発国の拡大」・「研究開発のグローバル化」などの動きも継続している。新しい動きとしてビッグデータへの対応、新ベンチマーク指標の検討などが見える。

今後、各国の科学技術の発展や産業競争力の強化に向けたスーパーコンピュータの整備・拡充は一層進むと想定される。そして、開発競争は次のエクサスケールシステムを目指してますます熾烈な戦いが繰り広げられていくだろう。文部科学省は、今後10年程度を見据えた日本の「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）」計画の推進の在り方についての新たな戦略を調査検討し、2013年6月に中間報告を公表した。今後の高性能なスーパーコンピュータの開発にはグローバルな連携は必須である。日本は、スーパーコンピュータ「京」の開発と活用で培った技術・経験・人材を維持・発展させるとともに、それらを活かして国際連携を優位に進めていくべきである。

キーワード：スーパーコンピュータ，HPC，国際競争力，科学技術，性能ランキング，TOP500，グローバル化，エクサスケール

1 はじめに

現在、世界中でスーパーコンピュータの活用が、科学技術面、あるいは経済面で各国の将来に影響を及ぼすという認識が定着してきている。そして数値シミュレーションが、「理論」、「実験」に次ぐ「第3の科学」として位置づけられ、そのための基盤たるスーパーコンピュータの導入が積極的に進められている。

科学技術動向（2011年9・10月号）¹⁾（以下、前回とする）に、世界のスーパーコンピュータの動向を述べた。そこでは、導入国が国際的に広がっていること、自主開発国が拡大していること、そして、研

究開発がグローバル連携化していること、という3つのグローバル化が進んでいることを示した。

本稿では、その後の動向を紹介する。まず、2章でTOP500リストにみる世界のスーパーコンピュータの状況、3章でグローバル化の進展状況、4章で新しい動きを述べ、世界のスーパーコンピュータの動きを追う。

2 TOP500 リストにみる世界のスーパーコンピュータの状況

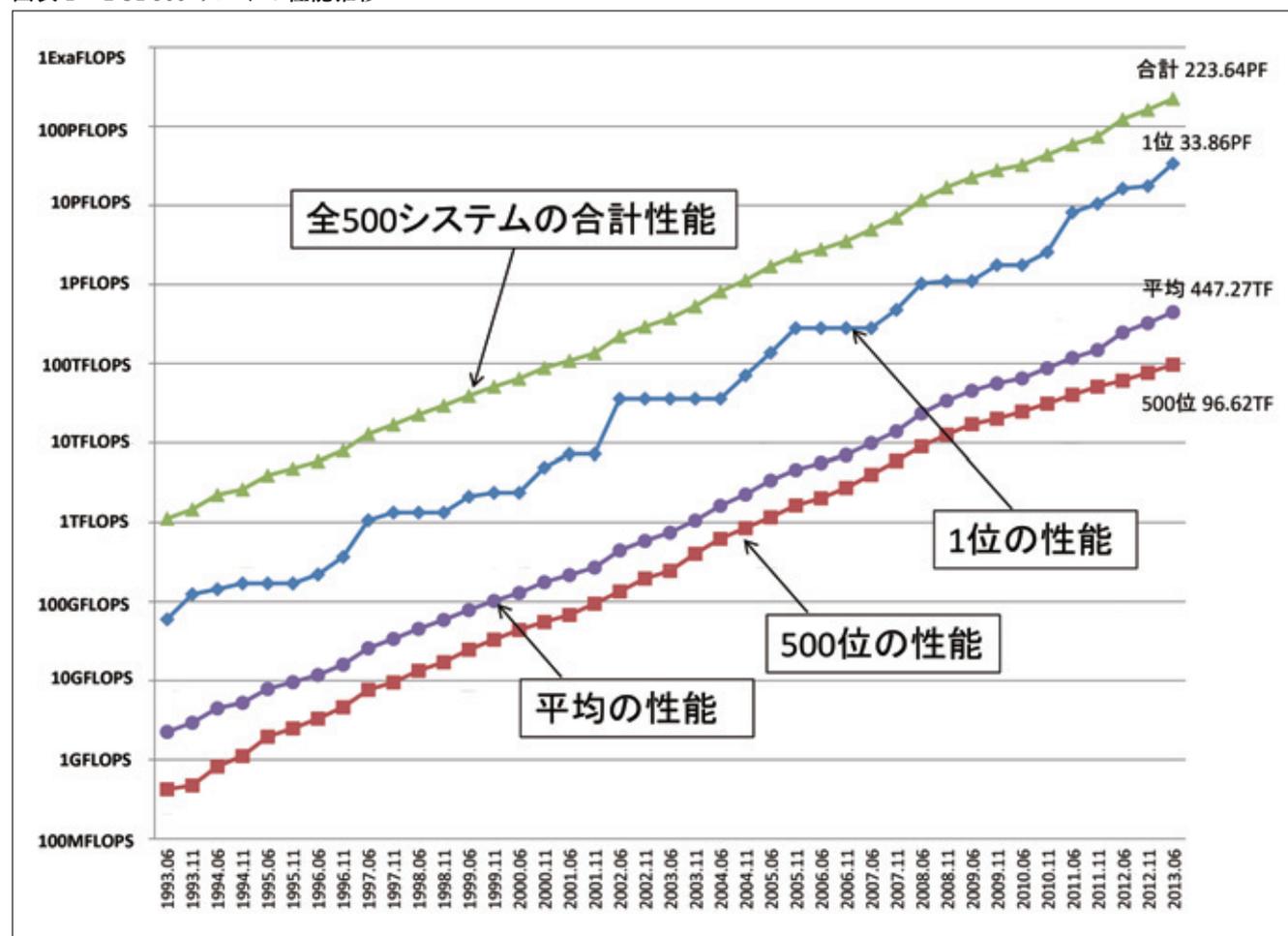
2013年6月、国際スーパーコンピューティング

会議 (ISC' 13) が、ドイツで開催され、スーパーコンピュータの性能ランキングを示す TOP500 リストの最新版 (第 41 回)²⁾ が発表された。以下に今回の TOP500 リストから特徴的な内容を記す。

2-1 LINPACK 性能の推移

図表 1 に、TOP500 リスト中の全 500 システムの

図表 1 TOP500 リストの性能推移



縦軸は LINPACK 性能で、FLOPS の前の文字は Mega (100 万), Giga (10 億), Tera (1 兆), Peta (1000 兆), Exa (100 京) を示す
 出典：TOP500 リストを基に科学技術動向研究センターにて作成

2-2 システムの性能分布

図表 2 に第 41 回 TOP500 リスト中における各システムの LINPACK 性能の分布を示す。縦軸に LINPACK 性能、横軸に 1 ~ 500 位までの順位を示している。

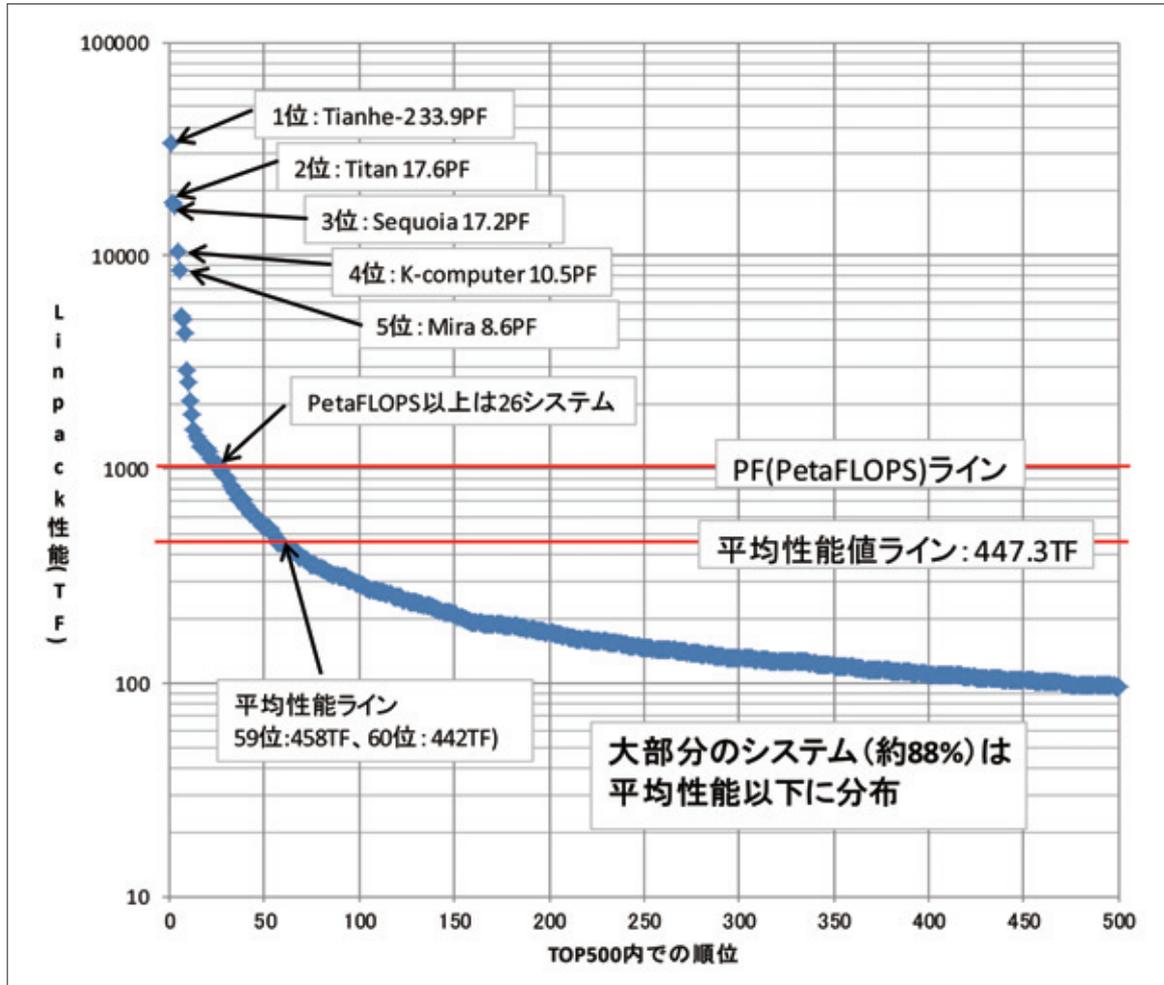
今回の TOP500 リストでは 26 位までが 1PetaFLOPS 以上の LINPACK 性能値を出してい

LINPACK 合計性能、第 1 位、500 位、平均の性能の過去の推移を示す。第 1 位の性能は階段状に伸びており、今回の伸びも大きい。500 位の性能の伸びにはなだらかな下降傾向が見える。また、合計性能値と 1 位との差が近接していること、平均の性能が 500 位に近いことから、上位と下位システム間での性能乖離が大きくなっていることがうかがえる。

以下、今回のリストからシステムの性能分布を分析する。

る。500 位までの平均性能は 447.3TeraFLOPS で、平均以上が約 12% で、残りの約 88% は平均以下の性能となっている。すなわち、TOP500 リストのシステムの性能には偏りがあり、高性能を目指したシステムは 10% 以下であることがうかがえる。

図表2 システムの性能分布



出典：第41回TOP500を基に科学技術動向研究センターにて作成

2-3 ハードウェアアーキテクチャ（構成）の多様化

スーパーコンピュータのハードウェアアーキテクチャ（構成）は多様化している³⁾。演算部がCPU（Central Processing Unit：中央処理装置）で構成されるシステム（CPUベースのシステムとする）、CPUとアクセラレータ（Graphics Processing Unit 画像処理装置、メニーコアプロセッサほか）を組合わせて構成されるシステム（アクセラレータを採用したシステムとする。ハイブリッドアーキテクチャともいう）などがある。今回のTOP500リストでは、アクセラレータを採用したシステム数は54で、2年前の第37回のリストの19から約3倍も増加しており、システムの性能合計を大きく押し上げている。

今回のリストで第1位の中国のTianhe-2や第6位の米国Texas Advanced Computing Center (TACC)のStampedeにはIntel Corporation（以下、Intel社）製のメニーコアプロセッサ（名称：Xeon

Phi）が多用されている。第2位の米国のオークリッジ国立研究所のTitanにはNVIDIA Corporation（以下、NVIDIA社）製のGPU（名称：K20x）が多用されている。このようにアクセラレータを採用して性能向上を図ろうとする動きが見える。

2-4 電力効率の改善

TOP500内のシステムに対して電力効率（LINPACK性能値／消費電力）の大きい順を競うリストとしてGREEN500⁴⁾があり、年2回公表されている。今回のリストでは、1、2位が3GigaFLOPS/Wを超えている。この2システムは、共にハイブリッドアーキテクチャのシステムであり、第1位は6か月前のリストの第1位との比で約30%、1年前の第1位との比で50%以上の改善となっている。

エクサスケールスーパーコンピュータの電力消

費目標を最大で 20MW までとした動きがあるが¹⁾、今回の第 1 位の値を外挿しても 312MW と依然として目標までには大きなハードルがある。今後は、半導体プロセス改善のみでは目標到達が難しく、回路、アーキテクチャを含めた研究が共に必要となる。また、データをいかに省電力で移動するかという問題への研究も重要になっている。

国と、それぞれ 2 倍強の増加となっており、性能強化が盛んに行われている実態がわかる。図表 3 内で、米国、中国、日本の 2 年前の性能合計を☆印で示すが、今回との差は大きい。

中国のシステム数は 66 で、2 年前の 62 システム以降、その数は安定しており、合計システム数で米国に続いて第 2 位の位置を継続して確保している。

3 今までの動き

3-2 自主開発国の拡大について

前回で報告した以降の主だった動きについて述べる。

3-1 導入国の広がり (導入のグローバル化) について

図表 3 に、今回の TOP500 リストに掲載された、導入国 27 か国別のシステム数と LINPACK 性能合計を示す。ここで LINPACK 性能合計とは、500 位までにランクされている各国のシステムの LINPACK 性能の合計値である。

2011 年 6 月時点の導入国と大きな差はないが、今回のリストでは、香港がエントリーしている。この 2 年間にアイルランド、メキシコ、オランダ、スロバキア共和国、南アフリカ共和国、アラブ首長国連邦などのリストへのエントリーもあり、延べ導入国数は 30 以上にもなっている。

また、2011 年 6 月時点ではシステム単体で LINPACK 性能が 1PetaFLOPS 以上は 10 システムで、LINPACK 性能合計が 1PetaFLOPS 以上の国は 7 か国であったが、今回のリストではシステム単体では 26 システム、LINPACK 性能合計が 1PetaFLOPS 以上の国は 16 か

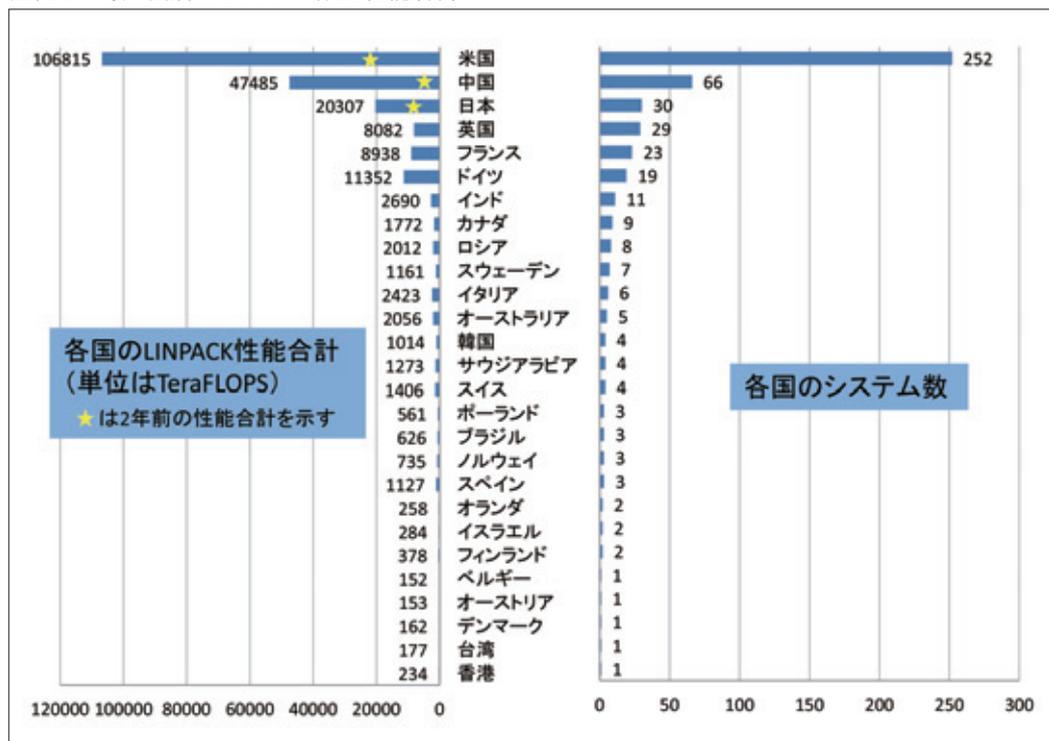
前回では、米国、日本以外での開発が進められている状況を、中国、フランス、ロシア、インドについて示した。現状もそれらの国々での開発は継続されている。今回のリストで第 60 位以内 (平均性能以上) の開発国と掲載システム数を示すと、米国 (43 システム)、中国 (6)、日本 (5)、フランス (4)、英国・ロシア (1) の順となっており、米国の圧倒的強さには変更がないが、中国が第 2 位につけてきている。

以下では自主開発国に関する特記事項を述べる。

(1) 中国

中国は、2010 年 11 月の TOP500 で Tianhe-1A システムが第 1 位に躍り出て世界を驚かせたが、半年後のリストで日本の京コンピュータに

図表 3 導入国別のシステム数と性能合計



出典：第 41 回 TOP500 を基に科学技術動向研究センターにて作成

第1位を譲り渡した経緯がある。今回、第1位に返り咲いた Tianhe-2 は中国の国防科学技術大学 (NUDT) が設計し、米国 Intel 社と中国企業の Inspur Group Co.,Ltd の協働で開発されたシステムである。プロセッサおよびメニーコアのコプロセッサである Xeon Phi は共に Intel 社製である。中国は、かねてより 100PetaFLOPS のシステムを 2015 年までに 2 システム開発すると公表していた。今回、性能は約半分 (ピーク性能で 54.9PetaFLOPS) ではあるが予定より 2 年も早い時期の開発となり、2015 年の 100PetaFLOPS への足がかりのシステムとの位置づけである。このシステムではフロントエンド処理用として独自開発のプロセッサも採用している。また、ノード (プロセッサ、コプロセッサ、メモリからなる計算単位) 間を接続するインターコネクには、専用 LSI を開発するなど独自の工夫が施されている。

(2) イタリア

イタリアに本社を置き、欧州市場を対象にしている EUROTECH 社が開発した 2 システムが、前記した GREEN500 で第1位と2位を獲得している。LINPACK 性能は、110.5TeraFLOPS (第395位) と 100.9TeraFLOPS (第467位) であり、TOP500 リスト中では低位であるが、電力効率で大幅な改善を図ったシステムがイタリアで開発されたことになる。

(3) ロシア

ロシアの企業である RSC Group は、エネルギーとコスト効率に優れたシステムアーキテクチャの RSC Tornado を提供している。驚異的なのは、その電力効率の良さで、PUE 1.06 (PUE とは Power Usage Effectiveness の略で、データセンター全体の消費電力をサーバーなどの IT 機器の消費電力で割った値) を達成とある。Intel 社の Xeon Phi を使用した 10PetaFLOPS のシステムに向けたプロトタイプを既に開発している。ロシアでは他に T-Platforms 社があり、2011 年に 1.37PetaFLOPS のシステムをモスクワ大学に納入した実績を持っている。

(4) インド

インドでは、政府系の研究機関である C-DAC (Centre for Development of Advanced Computing) が 1990 年以降スーパーコンピュータを開発している。最新 TOP500 リストでは、386.7TeraFLOPS のシステムが第69位に入っている。インド政府は高性能コンピューティングの研

究開発の加速のためにスーパーコンピューティングイニシアティブを発足しており、今後 4-5 年で 500 億ルピー (1 ルピー = 1.7 円とすると、約 850 億円) の投入をコミットメントとしているとの発表もある⁵⁾。

(5) その他

自主開発ではないが韓国の動きも特筆できる。韓国では National Supercomputing Promotion Act が 2011 年 6 月 7 日に制定され、同年 12 月 8 日に施行に至っている。背景には、2009 年時点で韓国のスーパーコンピュータ関連は世界に立ち遅れているとした認識があり、その挽回策としての法令制定に至っている。9 つの関係省庁が関係している委員会、国立スーパーコンピューティングセンターの設置などが行われ、国を挙げてスーパーコンピュータの設置および利用環境の充実に力を入れている。

3-2 自主開発国の拡大について

3-3-1 欧州におけるエクサスケールに向けた取り組み

欧州では EU ファンドの European Exascale Software Initiative² (EESI²)⁶⁾ と 3 つの実行プロジェクト (MontBlanc、DEEP、CRESTA) が並行して進行している。

EESI² は、2010 年 6 月 1 日から 18 か月間に渡って実施された EESI の後継としての位置づけである。EESI では、ペタスケール、エクサスケールスーパーコンピュータ上での科学計算処理における諸課題を明確にし、欧州としての研究開発の方向性をロードマップとして策定することを目指した。150 人の専門家の参加により実施され、2011 年 10 月に Final Conference を開催し、ビジョンとリコメンデーションを示している。EESI² は、2012 年 9 月 1 日から 30 か月間に渡った後継の活動であり、EESI のロードマップ、ビジョン、リコメンデーションに対し、モニタリング、更新そして新しい課題に対応するため、数種類のワーキンググループを編成し活動している。

3 つの実行プロジェクト (MontBlanc、DEEP、CRESTA) は共に 3 年間のプロジェクトであり、その概要を図表 4 に示す。2013 年 6 月時点では、ハードウェア開発のプロジェクトである MontBlanc と DEEP は共にプロトタイプの作成段階にあり、着々と進展している様子がうかがえる。

図表4 EU ファンドのプロジェクトの概要

プロジェクト	概要
MontBlanc : European scalable and power efficient HPC platform based on lowpower embedded technology	組込みの電力効率テクノロジーに基づいたエクサスケールアプローチで2011年10月開始、予算14.5M€、プロトタイプの開発目標は7MWで50PetaFLOPS、ARM Ltdのプロセッサ・NVIDIA社のGPUを使用。バルセロナ・スーパーコンピューティング・センター(BSC)が主導。
DEEP : Dynamical Exascale Entry Platform, Hierarchical Concurrency Approach	エクサスケールに向けたアーキテクチャ設計、ハードウェア・ソフトウェア開発を目標にし2011年12月開始、予算18.5M€、Intel社のXeon Phi使用、8か国16パートナーからなり、ドイツのユーリッヒ・スーパーコンピューティング・センターが主導。
CRESTA : Collaborative Research into Exascale Systemware, Tools and Applications	ソフトウェアコードデザインにフォーカスしたプロジェクトで2011年11月開始、12M€コスト、8.57M€ファンディング、13パートナー。イギリスのエジンバラ・並列コンピューティング・センター (EPCC) が主導。

3-3-2 国際的な動き

国際的なプロジェクトである International Exascale Software Project⁷⁾ (IESP) は、米国のスーパーコンピュータ関係者が2007年以降に開催してきたワークショップに端を発し、その後、米国を中心に、欧州・日本・中国の研究者が共同でシステムソフトウェア・ソフトウェア開発環境・アプリケーションソフトウェア・全体に横断する課題などの項目に渡って検討を行った。このプロジェクトは、2013年3月をもって終了しており、その後、2013年4月からは、BIGDATA AND EXTREME - SCALE COMPUTING (BDEC) ワークショップに活動の場を移している。

米国 DOE と文部科学省はエクサスケールスーパーコンピュータに向けたシステムソフトウェアの研究開発で協力を検討していくこととしており、ISC'13 の場でも研究情報の相互交換が行われている⁸⁾。これも IESP での検討内容を基盤とした、拡大・発展に向けた動きである。

を含めたハイパフォーマンス・コンピューティングを検討している。スーパーコンピュータの世界でも膨大な計算結果をはじめとしたビッグデータの問題に直面している。

こうしたシステムの性能指標として、データインテンシブアプリケーションに対するシステムの適合度合いの性能順を示す Graph500 リストが、2010年11月から毎年6月と11月に発表されている。2013年6月発表のリストは6回目にあたり、142システムがエントリーされ、内訳は米国が74、日本が28となっている。

その他、カリフォルニア大学サンディエゴ校のサンディエゴスーパーコンピュータセンター (SDSC と略す) が中心となり、ビッグデータの性能ランキングリスト「BigData Top100List」の作成に向けて活動している動きもある⁹⁾。

今までは、スーパーコンピュータとビッグデータとは異なる IT 領域での問題との認識もあったが、今、その対応に変化がみられる。ビッグデータ処理は多様であり扱うデータ種類も多様である。様々な領域からの多面的な研究成果の融合で進められることになろう。

4 新しい動き

4-1 ビッグデータへの取り組み

3-3-2で記したBDECワークショップでは、日本、米国、欧州の研究者によってビッグデータ

4-2 新ベンチマーク指標の検討

異なる目的をもつスーパーコンピュータを、LINPACK ベンチマーク (High Performance Linpack : HPL) という尺度だけで比較するのが適

当かという議論が今までにもたびたび持ち上がっている。

最近、TOP500 編集委員もこの議論を重要視しており、新しい指標を検討している。背景として、1990年代前半には、実際のアプリケーション性能と HPL の性能間の相関が強かったため注目を集めたが、もはや現実のアプリケーション性能（特に、広範なアプリケーションセットの性能）とあまり強い相関がないことを挙げている。そして、良い HPL 性能のシステムを設計することは、実際のアプリケーションミックスにとって間違った設計上の選択につながりうるとも言及している。また、将来、この指標による性能と実際のアプリケーション性能との間のギャップは広がるのではないかと懸念している。計測時間も長大化しており、最長では 60 時間以上も要しているシステムもあるとのことで、今後「計測時間に 1 週間も要するのでは？」との試算もある。これは、巨大化するスーパーコンピュータの安定稼働を証明することではあるが、所要の電力消費やスタッフ費用などが膨大になることも示している。

新指標としては、High Performance Conjugate Gradient (HPCG) が提案されており、今後、実現に向けて検証を進めていくとしている。この新指標は、HPL を除外するものではなく、GREEN500 と同じように TOP500 とは別のリストとしての位置づけを目指している¹⁰⁾。

5 おわりに

以上、世界のスーパーコンピュータについて前回で示した 2011 年以降の主な動きを述べた。「導入国の国際的な広がり」、「自主開発国の拡大」、「研

究開発のグローバル化」という動きは継続している。また、新しい動きとしてビッグデータへの対応や新ベンチマーク指標の検討が見える。今後、各国の科学技術の発展や産業競争力の強化に向けたスーパーコンピュータの整備・拡充は一層進むと想定される。そして、開発競争は次のエクサスケールシステムを目指してますます熾烈な戦いが繰り広げられていくだろう。

こうした動きに対応して、文部科学省は、今後 10 年程度を見据えた日本の「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI)」計画の推進の在り方についての新たな戦略の調査検討を 2012 年 2 月から開始した。そして 2013 年 6 月に中間報告¹¹⁾ が公表された。ここには「世界トップレベルのスーパーコンピュータやその次のレベルのスーパーコンピュータを複層的に配置し、全体として多様なユーザーズに対応できる世界最高水準の計算科学技術インフラを維持・強化するという考え方が重要」とし、その実現を検討していくとある。その実現にはハードウェア、ソフトウェア面で多くの解決すべき課題があり、その解決にはグローバルな英知の結集が必須となろう。前記したが、既に文部科学省は米国 DOE と研究開発の連携を推進している。こうした連携では、自国が世界に認められる強さを持つことが重要である。日本で開発した京コンピュータは、2011 年 6 月と 11 月に TOP500 の第 1 位を獲得しハードウェア面での優位性を実証したと共に、京コンピュータを使用したアプリケーション（シミュレーション）面でも 2011 年 11 月と 2012 年 11 月にゴードン・ベル賞^{注)} を連続受賞してその優位性を広く世界に示した。日本は、このような京コンピュータの開発と活用で培った技術・経験・人材を維持・発展させるとともに、それらを活かして国際連携を優位に進めていくべきである。

注 ゴードン・ベル賞 (Goldon Bell Prizes) は、ハイパフォーマンス・コンピューティング分野における、アプリケーションの実性能と計算科学の成果に対し Association for Computing Machinery (ACM) が授与する賞である。

参考文献

- 1) 野村稔、「スーパーコンピュータをめぐるグローバル化の動き」科学技術動向、No.125、2011 年 9・10 月号
- 2) TOP500 : <http://www.top500.org/>
- 3) 古川貴雄、野村稔、「数値シミュレーションにおけるソフトウェア研究開発の動向—並列分散型のハードウェアとソフ

トウェア自動チューニング」科学技術動向、No.104、2009年11月号

- 4) GREEN500 : <http://www.green500.org/>
- 5) SanJay Wandhe, HPC in India, ISC' 13,2013年6月
- 6) EESI : <http://www.eesi-project.eu/pages/menu/homepage.php>
- 7) IESP : http://www.exascale.org/iesp/Main_Page
- 8) Workshop on International Cooperation on System Software for Trans-Petascale, ISC' 13, 2013年6月
- 9) 野村稔、「コンピュータシステムの性能指標の変化—ビッグデータ処理システムの性能ランキングリスト作成の動き—」科学技術動向、No.135、2013年5・6月号
- 10) Jack Dongarra, TOWARD A NEW (ANOTHER) METRIC FOR RANKING HIGH PERFORMANCE COMPUTING SYSTEMS, ISC' 13, 2013年6月
- 11) 「今後のHPCI計画推進の在り方について(中間報告)」、2013年6月25日、http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/gaiyou/_icsFiles/afiedfile/2013/07/10/1337595_1.pdf

..... **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
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

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。

デジタルファブリケーションの最近の動向

—3Dプリンタを利用した新しいものづくりの可能性—

蒲生 秀典

概要

三次元に層を重ねて物体を製造する積層造形を利用する三次元（3D）プリンタが、デジタル&パーソナルファブリケーションツールとして注目されている。従来のものづくり手法と異なり、デジタルデータを基に一体的に3D形状が作製できることから、製造の大幅な低コスト化、あるいはオープンソースを利用した製造のイノベーションが期待されている。近年、欧米を中心に、このデジタルファブリケーションを製造業や教育に展開する政策が推進されている。

デジタルファブリケーションでは、デザインとプロセスを一体化・融合することで、新たな発想によるものづくりが実現できる可能性がある。今後、基幹となる付加製造技術の高精度化、高スループット化、材料の多様化のための研究開発と併せて、アイデア創出のためのデザインとプロセスの研究者・技術者の融合の場の提供や、人材育成の観点からの市民や子供たちへの教育・啓発のための施策も、将来に向けたデジタルファブリケーションの進展のために有効である。

キーワード：デジタルファブリケーション，3Dプリンタ，付加製造，ファブラボ，オープンソース

1 はじめに

三次元に層を重ねて物体を製造する積層造形を利用する三次元（3D）プリンタが、デジタル&パーソナルファブリケーションツールとして注目されている。従来のものづくりにおける一般的な加工・成形法と異なり、デジタルデータを基に一体的に形成できることから、製造の大幅な低コスト化、あるいはオープンソースを利用した製造のイノベーションが期待されている。

近年、欧米を中心に、このデジタルファブリケーションを製造業や教育に展開する政策が推進されている。一方、デジタル&パーソナルファブリケーションを、グローバルネットワークを利用して先駆的に展開してきた市民工房ファブラボ(FabLab)は、先進国・発展途上国を問わず、世界的にその拠点数

が急増している。

日本では、「科学技術イノベーション総合戦略」(2013年6月7日閣議決定)¹⁾において、少量多品種のフレキシブルなものづくりによる地域の産業の確立を目標とした、生産技術等を活用した産業競争力の涵養の取組があげられている。その一例としてデジタルファブリケーションの基幹技術である三次元造形等の高度な生産技術の地域のものづくり産業への展開等が示されている。

本稿では、世界的に急速に拡大し、先進国で政策展開への局面を迎えたデジタルファブリケーションの最近の動向と今後の方向性について記す。

2 デジタルファブ리케이션と基幹技術としての付加製造の特徴と現状

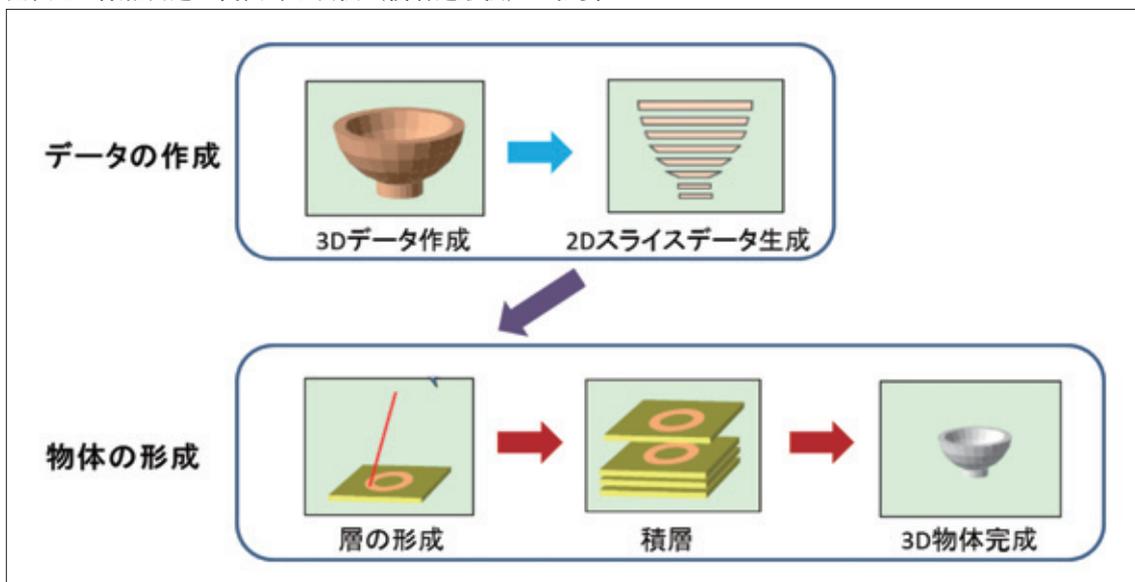
2-1 特徴

工業製品には必要とされる用途に適した形態を作製するために、何らかの形状付与（加工・成形）が施される。一般的には、大きな塊から不要な部分を取り除く「除去加工」、あるいは、材料を計量して必要な形に変形する「成形加工」が用いられる。一方、3Dプリンタに代表される加工法はこれとは異なり、材料を積み上げて必要な形を作る「付着加工」である。²⁾ これまで日本では積層造形法、欧米ではラ

ピッドプロトタイピングと呼ばれていたが、2009年のASTM（米国材料試験協会）国際標準化会議において、主に「材料を付着することによって物体を三次元形状の数値表現から作製するプロセス」を、アディティブマニファクチャリング（Additive manufacturing [ASTM F2792]³⁾；日本語では付加製造）と呼ぶことが決められた。

付加製造では、三次元CADやCGで作成した物体構造のデジタルデータを用いて物体を造形するため、設計（デザイン）と製造（プロセス）が3Dデータを基に連続的かつ一体的に利用できることから、従来の製造とは異なるデジタルファブ리케이션が実現できる（図表1）。デジタルファブ리케이션では、デザインとプロセスの融合による新規構造・形態の創出が期待できるほか、形状デー

図表1 付加製造の代表的な製法（積層造形法）の概要



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 付加製造の主な方法

名称	光造形	レーザー焼結	FDM
製造方法	液槽光重合	粉末床熔融結合	材料押出堆積
概略図			
原理	液状の光硬化性樹脂を、光重合によって選択的に硬化	粉末材料を熱エネルギーによって選択的に熔融結合	液状の材料をノズルから押し出し堆積と同時に固化
基本特許	1984.8, Hull	1986.10, Deckard	1989.10, Crump
主なメーカー	3D System, CMET	EOS, 3D System, Arcam 他	Stratasys, 3D System 他

出典：参考文献2、4を基に科学技術動向研究センターにて作成

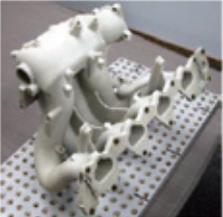
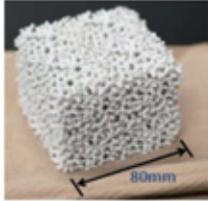
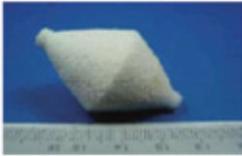
タのオープンソースとしての利用、さらにはネット上での共有が可能となる。また、製造コストは使用する材料の量や工程の数に大きく依存するが、付加製造では原理的に最小限の材料量と工程数で作製できるため、低コストかつ低環境負荷での製造が期待できる。

現在実用化している主な付加製造の方法を図表2に示す。これらの基本特許は1980年代後半に出願されており、特許期限を迎えていることも、近年普及が拡大していることの一因である。なお、現在数十万円で市販されている低価格の3Dプリンタは、熱硬化性樹脂を用いた材料押出堆積法(Fused Deposition Modeling:FDM)であり、Fab@Home⁵⁾やRepRap⁶⁾にオープンソースとして装置構成やソフトウェアが公開され利用されている。

2-2 適用例

付加製造の主な適用例を図表3に示す。航空機や自動車などの移動体の部品や医療機器、生体模型などの作製が報告されている。また、特に組織工学・再生医療分野では、組織再構築のための三次元担体造形や、マルチマテリアルの塗り分けが可能な3Dプリント技術に注目した、細胞から実際の組織や臓器を作製する「バイオフィブリケーション」の研究が進められている。⁷⁾ さらに、インターネットマーケットへの展開の事例として、Shapeways社⁸⁾のオンライン3Dプリントショップでは、個人が作成した3Dモデルデータを元に3Dプリンタで造形したり、デザイナーやアーティストあるいは一般の個人がアップロードした作品を3Dプリンタの造形物として販売するオンラインショップやSNS機能も兼ね備えたサービスを行なっている。

図表3 付加製造の適用例

機能模型(エンジン) ⁹⁾	ラピッドツーリング	戦闘機用エアダクト ¹⁰⁾	航空機部品 ¹¹⁾
			
フォトニックデバイス	補聴器 ¹²⁾	入れ歯 ¹³⁾	歯科補綴物
			
義足 ⁴⁾	生体組織培養足場	人工皮膚 ¹⁴⁾	心臓弁用鋳型 ⁴⁾
			

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

2-3 付加製造に関する国際会議

付加製造技術に関する国際会議は、研究開発が本格化した1990年代から開催されている。主要な会

議としては、米国・テキサス大学¹⁵⁾においてSolid Freeform Fabrication Symposiumおよび英国・ノッティンガム大学¹⁶⁾ではAdditive Manufacturing Conferenceが毎年行われている。前者は教育・研究機関が中心、後者は企業の参加が多いことが特徴である。

2-4 現状の課題

付加製造は、現状では、図表3に示したような、単一材料で内部構造が複雑な構造体の作製、および、変種少量生産に適している。ただし、現在利用できる材料は高分子（樹脂）、金属、セラミックスの一部であり、スループットも一般的な従来の製造方法に比べると低い場合が多く、適用例に示したごく限られた部品や模型等に実用化されるに留まっている。

3 ものづくり産業振興策としての各国の動向

欧米を中心に、ものづくり産業の振興策として、付加製造あるいはデジタルファブリケーションを重点施策化する動きが活発化している。

3-1 米国

米国では、デジタルファブリケーションによって実現される設計と製造の一体化、そして各拠点間のネットワーク構築を、工学教育や製造業の振興に適用する政策を推進している。オバマ大統領は、2012年のはじめに、今後4年間で1000か所の学校に、3Dプリンタやレーザーカッターなどのデジタル工作機械を完備した「工作室」を開くプログラムを立ち上げた。¹⁷⁾ 同年8月には、付加製造技術を研究・発展させるための研究所（National Additive Manufacturing Innovation Institute : NAMII）を設立した。¹⁸⁾ この研究所は、オハイオ州ヤングスタウンに本部をおき、製造業、大学、コミュニティカレッジおよび非営利団体から構成されるコンソーシアムで構成されている。このプロジェクトには、国防総省とエネルギー省傘下の国立研究所が参画している。国防総省では、防衛、航空宇宙、自動車、金属製造など幅広い業種に影響を持つと考えており、一方エネルギー省では、従来の「除去・成形加工」製造プロセスに比べエネルギー使用量の50%以上を節約できるとの予測を示している。2013年1月には報告書を公開¹⁹⁾、同年5月より新たな研究所の設立案を公募中²⁰⁾である。

3-2 英国

英国では、産学連携に基づくイノベーションの推進を目的とし構築されたカタパルト・センター・ネットワーク（現在は7研究拠点）の最初のセンターとして、2011年10月に「高付加価値製造カタパルト」が発足した。この中の、製造技術センターにおいて、頭蓋骨、医療機器、宝飾品を作製することを目的とした付加製造プロジェクトが進められている。²¹⁾

3-3 ドイツ

ドイツでは、フラウンホーファー研究機構が付加製造に関する産学官のアライアンスを締結している。²²⁾ また、ボーイング社の出資によって設立されたパダーボーン大学のダイレクト・マニユファクチャリング研究センターにおいて、付加製造技術の適用による低コスト製造技術研究が進められている。²³⁾

3-4 オランダ

オランダ応用研究機構（Netherlands Organization for Applied Scientific Research : TNO²⁴⁾には、ペンローズアディティブマニユファクチャリング技術を共有する研究プログラムがあり、産学共同／委託研究を実施している。これには、材料メーカー、エンドユーザー、セットメーカー、ソフトウェアやデザイン技術者が参画している。

3-5 ベルギー

ベルギーでは、アディティブマニユファクチャリングネットワークを組織しており、ルーベン材料研究センターをはじめ、企業等がパートナーとして参画している。医療用外装具への付加製造の応用プロジェクトとして、ルーベンを拠点とする「Materialize」が進められている。²⁵⁾

また、欧州諸国では、The European Collaboration on Rapid Manufacturingを組織しており、2013年

6月にStrategic Research Agenda (SRA) 2013 for Additive Manufacturingを公開している。²⁶⁾

3-6 日本

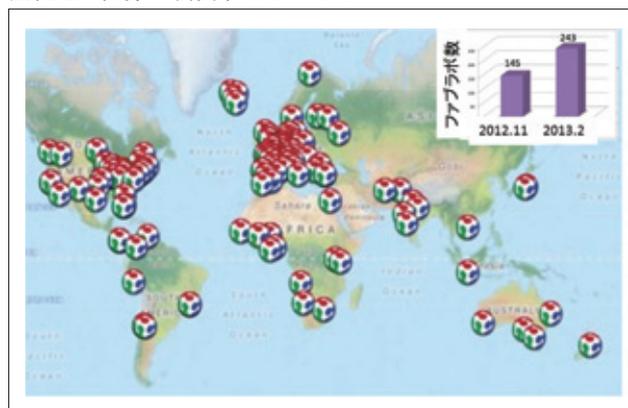
経済産業省では2013年度より5年間の計画で、高付加価値の複雑形状な铸造製品を一体成型で製造するための高速三次元(3D)積層造型システムの技術開発を目的に、複数のメーカーと(独)産業技術総合研究所のグループを委託先とした「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」²⁷⁾を開始している。

4 「もの」のデザインと機能の創造の場：市民工房「ファブラボ」の世界展開

欧米を中心に付加製造技術の高度化のための研究開発施策が進む一方、デジタルファブリケーションを先駆的に展開してきた「ファブラボ」には、市販あるいは手作りの設備を利用しながら、むしろ個人の発想によるデザイン創造の場としての特徴がある。米国の政策の基になったと考えられるこのファブラボ²⁸⁾は、3Dプリンタやカッティングマシンなどの工作機械を備えた、一般市民のためのオープンな工房であり、2000年にMITメディアラボのアウトリーチ活動として誕生した。ファブラボの特徴は、先進国、発展途上国を問わず世界各地に設けられた工房に市民が集い、各人のアイデアでそれぞれの目的のものづくりを実現する場の提供にある。また、それらのラボはグローバルネットワークで結ばれ、インターネット上で情報が共有(オープンソース)化されている。

ファブラボは現在、MITのThe Center for Bits and Atomsが中心となって活動しており、2013年2月現在で世界に243か所あり、3か月間で1.6倍と急速に増加している(図表4)。ファブラボの理念では、インターネットというインフラが普及することによって、誰もが自由に情報発信することができるようになったように、ファブラボが各地に普及することで、誰もが自由にものづくりを行えるようになる、としている。

図表4 世界に展開するファブラボ



出典：参考文献28を基に科学技術動向研究センターにて作成

ファブラボネットワークでは、以下のようなロードマップを示している。現状は、fablab1.0である

○マシン／ツール革命

- ・fablab1.0 computers make machines :
—3Dプリンタやカッティングマシンで材料を切り出して組み立てて機械をつくる。
- ・fablab2.0 machines make machines :
—機械自体が機械を生み出す。(自己複製する3Dプリンタ。)

○マテリアル革命

- ・fablab3.0 code makes materials :
—物質に「コード(情報、形状)」が埋め込まれるようになる。
- ・fablab4.0 program makes materials :
—物質に「プログラム」が埋め込まれるようになる。

日本では、2010年春に「Fablab Japan²⁹⁾」が設立され、2011年5月には鎌倉に日本初のファブラボがオープン、その後つくばと渋谷などの6か所にできている。年に一度、世界のファブラボのメンバーが集まる「世界ファブラボ会議」が開かれ、9回目は2013年8月に、初めて日本(横浜)において、「パーソナル・ファブリケーション～新たなルネサンスを迎えて」のテーマで開催される。³⁰⁾日本からは、第5回(2009年インド)に初めて参加して以来、毎回数名が参加している。

世界のファブラボでは、それぞれの地域性を反映した多種多様な事例が報告されている。^{31)、32)}個人のデザインによる日用品や電子部品あるいは芸術作品などパーソナルファブリケーションの例が多いが、ここでは社会へ波及した例をいくつかあげる。

スペインでは、分解・組立が可能なプラモデルのような木造建築で、ソーラーパネルで自家発電ができる「ソーラー・ファブハウス」が製作され、南

米のファブラボのハブとして機能しており、またバルセロナ都市計画の拠点にもなっている。オランダでは、ソフトウェアやデジタルコンテンツで見られるオープンソースを、ものづくりに拡張した「オープンソース・ハードウェア」や「オープン・デザイン」による創作の流れを生み始めている。また、メニューのレシピをダウンロードし、自分で料理し、アレンジを加えたレシピをアップロードする「オープンソース・レストラン」を行うファブラボもある。

一方、インドでは、ウェブを見たいと思う少年が無線アンテナ「FabFi (ファブファイ)」を製作している。FabFiは、ファブラボオリジナルの低コストのバケツリレー式無線ネットワークシステムで、途上国のファブラボを中心に各地で製作され、一部の村では量産もされている。このように、未だソフト・ハード両面のインフラが構築されていない新興国 (Bottom of the pyramid : BOP) 市場におけるサプライチェーンとして機能している例もある。

また、2011年の東日本大震災の際には、スイスのファブラボから、「もの」ではなく小型の水質検査用顕微鏡のデジタルデータと製作レシピが送られ、ビデオチャットで遠隔会議を行いながら、日本のファブラボの工房で製作され役立てられた。このように、データを送り、必要とされる場所 (あるいは市場) で、必要な「もの」がオンデマンドかつ短時間で製作できることも、デジタルファブリケーションの特長である。

5 まとめと提言

デジタルファブリケーションでは、デザインとプロセスを一体化・融合することで、新たな発想によるものづくりが実現できる可能性がある。基幹となる付加製造技術は、従来の一般的な加工とは原理的に異なるため、材料、エネルギー、環境いずれの側面においても、必要最小限の資源と環境負荷での製造を実現するポテンシャルを有する。構造体の低コスト生産、変種少量生産、オンデマンド生産への早期展開も期待される一方で、高機能な実用品を作るためには材料やプロセスに関する高度な研究開発、すなわち付加製造技術の高精度化、高スループット化、材料の多様化のための基礎的な研究開発が必須であり、長い目で見た研究とインフラ構築の支援が必要である。

一方、ファブラボでは、地域への場の提供とグ

ローバルネットワークの構築によって、世界各国で様々なものづくりが試みられている。このような、地域や学校における市民や子供たちが、ものの使用者が同時に製作者となり、かつデザインとプロセスに一連で取り組む経験は、新しいものづくりの体験的教育として人材の育成に役に立つと考えられる。

日本でも「科学技術イノベーション総合戦略」¹⁾において、地域をベースとしたものづくり産業の発展への寄与のために、三次元造形等の利用が例示されている。また、健康長寿の重点的取組として、再生医療デバイスや人工臓器の研究開発があげられており、個別医療に適したバイオファブリケーションの適用も期待される。

産業振興や健康長寿社会への貢献のためには、装置性能の高度化と併せて、例えば複雑かつ機能を効率的に発現する内部構造を設計する3Dデータ作成技術や、実体化に関しては、構造体さらには機能デバイス作製に不可欠な多様な材料開発のための中長期的な基礎研究支援が、科学技術政策として求められる。

さらに、ベースとなる付加製造に係わる技術の研究開発と併せて、米国の政策のように、アイデア創出のためのデザインとプロセスの研究者・技術者、さらには多様な個人レベルのメーカー&ユーザーの融合の場としての研究拠点の構築、あるいは、次世代の人材育成の観点からの市民や子供たちへの教育・啓発の場としてのファブラボ等の支援などの施策が、将来に向けた新しいものづくりとしてのデジタルファブリケーションの進展には必要である。

謝辞

本稿の執筆に当たり、東京大学生産技術研究所付加製造科学研究室 新野俊樹教授、慶応大学環境情報学部 田中浩也准教授、財団法人国際メディア研究財団研究企画担当 大野一生氏に貴重なご意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～、平成 25 年 6 月 7 日閣議決定；
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/honbun.pdf>
- 2) 新野俊樹、「Additive Manufacturing (付加製造) 技術によるものづくりの現状と可能性」、(製造業革命 “メーカームーブメント”、2013.4.12 東京)
- 3) 米国材料試験協会；<http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>
- 4) 小林広美、「3D プリンターの種類と応用分野」、(3D プリンターシンポジウム、2013.7.31 東京)
- 5) Fab@Home；<http://www.fabathome.org/>
- 6) RepRap；http://reprap.org/wiki/Main_Page
- 7) 中村真人、「バイオファブリケーション研究の動向と今後の展望」、科学技術政策研究所 講演録 -271、2010 年 11 月
- 8) Shapeways 社；<http://www.shapeways.com/>
- 9) (株)スリーディー・システムズ・ジャパン提供
- 10) (株)アスペクト；<http://www.aspect-rp.co.jp/#>
- 11) SPAR Point Group；<http://www.sparpointgroup.com/News/Vol11No23ge/>
- 12) Stratasys；http://jp.objet.com/Industries/Hearing_Aid/
- 13) 三井化学；http://jp.mitsuichem.com/release/2013/2013_0621.htm
- 14) 3D WAVE；<http://3dwave.net/?p=405>
- 15) Solid freeform fabrication symposium；<http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/>
- 16) Additive Manufacturing Conference；<http://www.am-conference.com/>
- 17) 新田浩之、「新産業革命の渦中に商機を」、ジェトロセンサー、2013 年 5 月号；
http://www.jetro.go.jp/jfile/report/07001351/jp_word_industrial_revolution.pdf
- 18) National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII)；National Additive Manufacturing Innovation Institute HP；<http://namii.org/>
- 19) National Network for Manufacturing Innovation: A Preliminary Design；
http://www.manufacturing.gov/docs/nmii_prelim_design.pdf
- 20) White House；<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/05/09/obama-administration-launches-competition-three-new-manufacturing-innova> (2013.5.9)
- 21) The Manufacturing Technology Centre (MTC), High Value Manufacturing Catapult；
<http://hvmcatapult.com/our-centres/manufacturing-technology-centre>
- 22) Fraunhofer Additive Manufacturing Alliance；
<http://www.fraunhofer.de/en/institutes-research-establishments/groups-alliances/additive-manufacturing-alliance.html>
- 23) The Direct Manufacturing Research Center (DMRC), University Paderborn；
<http://dmrc.uni-paderborn.de/en/>
- 24) オランダ TNO 応用科学研究機構；<http://home.att.ne.jp/yellow/tnojapan/>
- 25) Materialise；<http://www.materialise.com/>
- 26) Strategic Research Agenda (SRA) 2013 for Additive Manufacturing；
<http://www.rm-platform.com/linkdoc/AM%20SRA%20Consultation%20Document.pdf>
- 27) 経済産業省；<http://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/k130410001.html>
- 28) Fab Central, The Center for Bits and Atoms, MIT；<http://fab.cba.mit.edu/>
- 29) Fab Lab Japan；<http://fablabjapan.org/>
- 30) The 9th International Fab Lab Conference；<http://www.fab9jp.com/>
- 31) Neil Gershenfeld 「Fab —パーソナルコンピュータからパーソナルファブリケーションへ」、オラリージャパン、2012 年 12 月
- 32) 田中浩也 「FabLife デジタルファブリケーションから生まれる「つくりかたの未来」、オラリージャパン、2012 年 6 月

..... 執筆者プロフィール



蒲生 秀典

科学技術動向研究センター 特別研究員

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

企業の研究所にてカーボンナノチューブや半導体薄膜を微細加工した微小電子源と表示・照明デバイス応用の研究に従事。その間、産総研・物材機構・大学にて外来・客員研究員として共同研究に携わる。2010年4月より現職。日本学術振興会真空ナノエレクトロニクス第158委員会委員、表面技術協会学術委員。京都大学博士(工学)。

スポーツ脳震とう関連研究の動向

本間 央之

概要

近年、脳科学研究は、分子・細胞から個体・社会、あるいは疾患から認知・行動まで、様々な分野に広がっている。そうした中、オバマ大統領が2013年4月に発表した『BRAIN イニシアチブ』をはじめとした脳科学研究プログラムは、世界的に盛り上がりを見せている。特に米国では、アメリカンフットボール等によるスポーツ関連の脳震とうが、世間の注目を集めている。社会的関心に応えるかたちで多額の資金が脳損傷研究に投じられ、その研究成果により新たな知見も得られつつある。米国神経学会は2013年3月、これまでのエビデンスに基づいてスポーツ脳震とうガイドラインを改訂するとともに、リスクを最小化するための法規制を強く促す声明を発表した。一方、我が国では、中学校、高校の主要部活動において、柔道による死亡率が最も高い。その主因は頭部外傷であり、脳震とう発生率も高いものと推定される。我が国でも、医学・医療とスポーツ・教育現場の間の積極的な橋渡しが必要であり、エビデンスの収集と分析とともに、実用的な脳震とう対策の導入が望まれる。対策の進歩のために、未だ不十分な障害の予知・予防や治療につながる研究は重要である。

キーワード：脳神経系疾患，スポーツ医学，脳科学，保健政策，教育

1 はじめに

近年、脳科学研究は、分子・細胞から個体・社会、あるいは疾患から認知・行動まで、様々な分野に広がりを見せている。そうした中、オバマ大統領が2013年4月に発表した『BRAIN イニシアチブ』をはじめとした脳科学研究プログラムは、世界的に盛り上がりを見せている。同イニシアチブは、脳機能の解明と、新たな治療法・予防法の発見のため、米国国立衛生研究所(National Institutes of Health: NIH)、国防高等研究計画局、国立科学財団が支持する研究に、2014年度は約1億ドルを投じる予定であり、さらに民間団体も関連投資をする¹⁾。最近、特に米国では、脳関連の傷病の中で、スポーツ関連の脳震とう(concussion)が世間の注目を集め、研究成果の活用もなされている。本稿ではその概要を、我が国固有の課題とともに紹介する。

米国でのスポーツ関連の外傷性脳損傷(traumatic

brain injury: TBI)による2001～2009年の19歳以下の救急治療部来院推定年間件数は平均173,285件で、1位自転車、2位アメリカンフットボール(アメフト)、3位遊び場、4位バスケットボール、5位サッカー、6位野球であった²⁾。頭部を強打するボクシングは、特に問題視されてきており、各国の医師会・小児科学会から、ボクシングについての反対等の声明が出されてきている³⁾。中でも米国医師会と米国神経学会(American Academy of Neurology: AAN)は1984年、ボクシング禁止の立場を表明したが、複雑な背景の社会的困難さからその後あきらめ、安全のために関与する方針に転じている^{4) 5)}。米国では、スポーツ関連の脳震とうが、年間160～380万件発生していると推定されるが、多くは速やかな診察を受けておらず、問題として認識され、取り組みがなされている⁶⁾。

特に最近、アメフトの話題から、脳震とうへの社会的関心が高まっている。米国で圧倒的に一番人気が高いプロスポーツリーグであるナショナル・フッ

トボール・リーグ (National Football League : NFL) が、脳震とうの危険性を長年に渡って隠し、安全措置を怠っていたとして、元選手の約3分の1に当たる約4,200名から、集団訴訟を起こされている⁷⁾。また2012年は、NFLの元スター選手や現役選手の自殺や事件・事故が相次ぎ、脳震とうとの関連も指摘されている⁸⁾。

脳震とうは、TBIの一種であり、脳構造というより脳機能を変化させる^{6, 9)}。打撲に限らず、頭が激しく動かされることによって生じる。影響は通常一時的であるが、頭痛が生じたり、脳機能に問題を生じたりする。ほとんどの脳震とうは、意識消失をとまわず、CTや通常のMRIでは異常所見を認めない。完全に回復するまでの間、脳は損傷を受けやすくなる。若年者は成人と比べて、回復に時間がかかる。長期的あるいは重度の障害となる可能性があるため、すみやかに認識し適切に対処することが重要である。「頭を打っていないから、あるいはCTで異常がないから、脳震とうではない」等の誤解のないことが、理解の第一歩である。

2 米国での脳損傷研究の推進

2-1 元NFL選手に高リスクな脳神経系疾患・障害

米国疾病対策予防センター (Centers for Disease Control and Prevention : CDC) の国立労働安全衛生研究所は2013年1月、NFL選手の脳神経系疾患についての要約報告を発表した¹⁰⁾。1959-1988年間に5シーズン以上プレーした全選手3,439名のうち、2007年時点で90%は生存しており (大部分は55歳以上)、2013年時点で平均的米国人男性より長生きであることがわかった。一方、脳神経系疾患で死亡するリスクは、一般米国人男性に対して、筋萎縮性側索硬化症とアルツハイマー病 (Alzheimer's disease : AD) で4倍であった。

また、ボストン大学の研究者らは2012年12月、繰り返しの脳震とう既往歴のある85名の死亡者 (男性84名、14-98歳、平均54.1歳) の脳を調べた結果、68名 (17-98歳、平均59.5歳) に、進行性タウオパシーの一種である慢性外傷性脳症 (chronic traumatic encephalopathy : CTE) を発見した (対照の脳震とう既往歴の無い認知機能正常者18名には無し)^{11, 12)}。これまでで最大のCTE症例シリーズである。CTEが発見された68名のうち、64名は競技者であり、そのうち49名は元プロまたは大学・

高校までのアメフト選手であった。CTEは、脳震とうおよび無症候性の準脳震とう (subconcussion) を含む反復性頭部外傷既往歴のある競技者に生じ、興奮性、衝動性、攻撃性、うつ、記憶障害、自殺傾向の高まりと関連する。進行すると、認知症、歩行・発話異常、パーキンソン病 (PD) を含む重度の神経学的変化につながり、元々パンチドランカーでの発症が知られていた。タウオパシーとは、神経軸索内の微小管結合蛋白質タウが異常リン酸化され、不溶性凝集体を形成し異常蓄積することによって、神経原線維変化を引き起こすことにより生ずる神経変性疾患の総称であり、代表的疾患はADである。したがって、ADとCTEの研究は、相互に役立つ可能性がある。

米国クリーブランド・クリニックの研究者らは2013年3月、脳震とうと診断されない程度の軽度頭部打撃の反復が、認知変化につながるメカニズムについて報告した¹³⁾。すなわち、血液脳関門破壊により漏出した脳内蛋白質に対する免疫応答が生じることで認知変化が起こる可能性を示した。脳震とう未経験の大学アメフト選手の、試合中の頭部打撃を映像と質問票で調べ、頭部打撃が、血液中のアストロサイト蛋白質、さらにはその蛋白質に対する自己抗体の上昇につながることを示された。そして、自己抗体と、神経損傷および認知変化との関係も調べ、相関を見出した。ここで、白質 (神経線維) の破壊は、MRIの拡散テンソル画像で測定している。

準脳震とうのエビデンスの蓄積は浅いが、サッカーでのヘディングによる認知機能障害の可能性も示唆されており¹⁴⁾、今後の研究が注目される。脳震とうの結果生ずる、知らない間に進行し発症する一連 (スペクトラム) の慢性障害は重要な問題であるが、研究はまだ緒に就いたばかりである¹⁵⁾。

2-2 脳損傷研究への投資

NFLは2013年3月、MRIを開発する会社とスポーツ用具会社とともに、脳震とうの画像診断の改善に焦点をあてた研究プログラム『Head Health イニシアチブ』を立ち上げ、4年で6,000万ドル投資することを発表した¹⁶⁾。繰り返しの脳震とうにより生ずるタウ蛋白質の蓄積を画像診断する承認された方法はまだないが、Siemens社が開発したタウ結合化合物を用いたPETスキャンは期待できる。一方、NIHは何十年にもわたり、年間約8,000万ドルをTBI研究に提供しているが、診断と比べて治療には十分に研究費が投入されておらず、治療薬および予防薬は、臨床使用に進んでいない¹⁶⁾。

またNFLは2012年、スポーツ関連頭部損傷研究のために、NIHに3,000万ドルを寄付することにした。NIHは、このうち1,000万ドルをCTEの研究に使用する予定である¹⁶⁾。

一方、米国国防総省は、イラク等での爆発により兵士がCTEに苦しむ兆候が見られることから、既に7-8億ドルをTBI研究に投入した¹⁶⁾。NFLは、より良いヘルメットの開発に向けて、米軍等と協力している¹⁷⁾。さらに、NFLとは別に、NFL選手会は2013年1月、選手の健康についての10年間の研究のために、ハーバード・メディカルスクールに1億ドルの助成金を出している¹⁷⁾。

るために、AANは2013年3月、スポーツ脳震とうの評価と管理についての1997年のガイドラインを改訂した⁶⁾。1955年から2012年6月までの文献上のエビデンスを、修正GRADE法^{注1)}を用いて系統的にレビューし、修正デルファイ法によって推奨レベルを決定した。エビデンスの分析結果の主要なポイントは、図表1の通りである（診断ツールについては補足ファイル参照）。

3-1-2 推奨実施事項

上記のエビデンス分析を受け、推奨レベルの高い推奨実施事項が示された。特に重要なポイントは、図表2の通りである（他の主要なポイントは補足ファイル参照）。ここで、経験豊かな有資格ヘルスケア提供者（licensed health care provider：LHCP）とは、脳震とうの評価と管理についての知識と技能を習得し、実践している者を指す。

3 スポーツ脳震とうガイドライン改訂への取り組み

3-1 米国神経学会（AAN）のスポーツ脳震とうガイドライン改訂

3-1-1 エビデンス分析

米国では、脳震とう関連の研究成果を実践適用す

図表1 エビデンスの分析結果

ポイント	内容
リスクを増減させる因子	アメフト、ラグビーが高リスクである。サッカーやバスケットボールでは、女性の方が高リスクである。ラグビーのヘッドギアは保護効果がある。マウスピースやサッカーでのヘッドギアの有無、およびアメフトのヘルメットの種類については、違いを見出せない。また、年齢や競技レベルについてのエビデンスは不十分である。
診断ツール	脳震とうの疑いのある競技者の脳震とうの同定、および脳震とうの疑いのある競技者のうち重度あるいは長期障害のリスクの高い者の同定に有用な、医療従事者でない人も使用可能な、SAC（Standardized Assessment of Concussion）やBESS（Balance Error Scoring System）といった各種診断ツールがレビューされ、正確さ（感度と特異度）等が示された。
臨床学的予測因子	最初の脳震とうから10日間は、脳震とうを繰り返すリスクが高い。脳震とう既往歴は、症状と認知障害の重度／長期継続と関連し、多くのプロスポーツで慢性神経行動障害のリスク因子となる。但し、サッカーでのヘディングとの関連は、エビデンス不十分である。ADの代表的なリスク因子でもあるAPOEε4遺伝子型は、脳震とう後の慢性認知障害と関連していそうである。
治療介入	脳震とうからの回復を促進する、あるいは脳震とうの再発リスクを減ずる、あるいは長期の後遺症を軽減する介入については、結論が引き出せない。

出典：参考文献6を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 推奨実施事項

参加前カウンセリング	経験豊かなLHCPが学校職員を教育し、親や競技者に正確な情報を伝えられるように脳震とうの危険性を理解させるべきである。	
競技者の管理	脳震とうの疑いのある者	・ チームの職員（コーチ、トレーニングスタッフ、LHCP等）は、即時に競技から外す。 ・ 経験豊かなLHCPによって評価されるまで、競技に復帰させてはならない。
	脳震とうと診断された者	・ 監督する者は、LHCPが脳震とうが無くなったと判断を下すまで、あるいは症状が無くなり医療から離れるまで、競技および接触リスクのある練習への復帰を禁止する。 ・ 高校生がそれより若い場合、競技復帰により慎重になるべきである。

出典：参考文献6を基に科学技術動向研究センターにて作成

注1 GRADE：エビデンスの質と推奨の強さを格付けするアプローチ。世界保健機関（WHO）、CDC、英国国立医療技術評価機構（NICE）等が採用している。

3-2 AANのスポーツ脳震とう対策についての声明

AANは、スポーツ脳震とうガイドライン改訂に伴い、特に発達期の脳への震とうの影響を憂慮し、州と地方の政策立案者に、スポーツ脳震とう発生を最小化するための法律施行と規制を強く促す声明を発表した¹⁸⁾。ワシントン州で2009年に通過した法律を模範として支持し、次の要素を含めることを推奨する（追加推奨事項は補足ファイル参照）。ちなみに、2013年4月までに、47州とワシントンD.C.で、若者のスポーツ脳震とうに関する法律が通過した¹⁹⁾。

- 脳震とうとその悪影響への、競技者、親、コーチの認知を改善するため、教育努力を最大化する。AANは、CDCの『注意喚起：若者のスポーツ脳震とう』のコーチと親のためのオンライン・トレーニングコース⁹⁾等の強力な教材を支持する。
- 脳震とうの疑いのあるいかなる競技者も、重症度に関係なく、試合や練習から即時に外す。
- 脳震とうの評価と管理について適切に訓練された、神経科医等のLHCPが、若年競技者の競技復帰判断をしなくてはならない。高校に認知された競技団体だけでなく、他の団体によって運営されている娯楽リーグでもそうである。

3-3 スポーツ脳震とう国際会議における合意声明の改訂

2012年11月に開催された第4回スポーツ脳震とう国際会議での審議に基づく合意声明が、2013年3月前後に5誌に発表された²⁰⁾。4年ぶりの改訂であり、内容はAANのスポーツ脳震とうガイドラインに類似している。特に以下に示すようなポイントが前面に出されている。

- 推奨診断ツール：SCAT3 (Sports Concussion Assessment Tool 第3版)^{注2)}を推奨する。5-12歳の診断には子ども用SCAT3、非専門家向けにはポケットCRT (Concussion Recognition Tool)を推奨する。
- 段階的競技復帰：競技復帰までには、段階的なリハビリテーションの手順を踏むことを推奨する。すなわち、①活動なし、②軽度有酸素運動、③スポーツ特異的運動、④接触プレーのないト

レーニング、⑤接触プレーを含む練習、⑥競技復帰、の順となる。

4 我が国の学校スポーツにおける脳震とう対策の必要性

4-1 柔道での対策の必要性が高い

我が国の学校におけるスポーツ事故の発生件数や発生確率を分析し、効率的なリスク低減の方向性を検討している事例がある²¹⁾。(独)日本スポーツ振興センター (Japan Sport Council: JSC) のデータによると、2001-2010年度の中学校の主要部活動の中で、柔道の死亡率は突出して1位であり、高校においても1位であった (図表3)。死亡率や死亡率を軸に考えると、柔道の事故防止は最優先であるとしている。

さらに、学校の管理下で、柔道 (部活動や保健体育科) による死亡事故は、1983-2011年度の29年間に118件発生 [中学校40件、高校78件] し、その内訳は下の通りである。

- 中学校、高校のいずれも、1年生すなわち初心者で事故が多発 [中学校52.5%、高校65.4%]。
- 部活動が大多数 [中学校92.5%、高校83.3%]。
- 柔道固有の動作に起因する頭部外傷による死亡が過半数 [中学校75.0%、高校59.0%]。

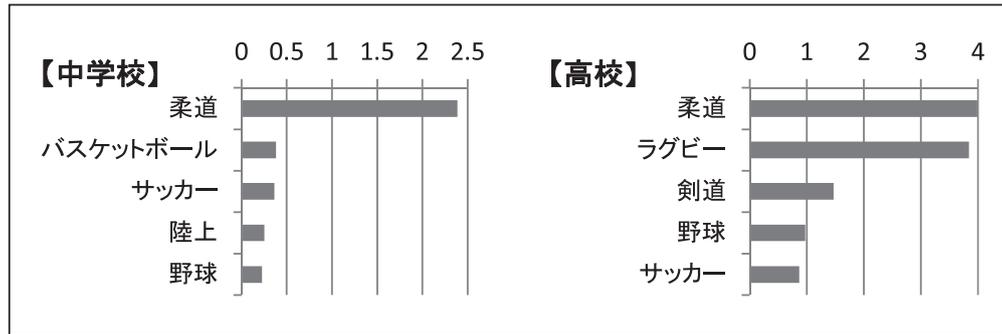
しかし、頭部外傷だけではなく、熱中症においても、柔道は他の競技を凌ぐ高い死亡率を有していることから、広い視野から検討されることが急務としている。

また、中学校での柔道負傷事故のJSC名古屋支所の個票データ3,004件の分析によると、保健体育は部活動に対し、延べ時間数の少なさのわりに負傷事故が多く (時間当たり約1.7倍)、頭部を負傷する割合が高い (図表4左)。また、保健体育では男子よりも女子の方が頭部外傷に至る可能性が高い (図表4右)。2012年度から完全実施された中学校武道必修化において、女子の指導には、よりいっそうの配慮が求められるとしている。

保健体育での柔道は、競技レベルの低さによる安全性より、指導者と生徒の指導と技能のレベルの低さによる危険性が上回っている面があるのかもしれない。

注2 SCAT3: SACや修正BESS等を含む診断ツールのセットであり、国際サッカー連盟 (FIFA)、国際アイスホッケー連盟 (IIHF)、オリンピック、国際ラグビー評議会 (IRB)、国際馬術連盟 (FEI) 等が採用している。

図表3 中学校、高校の主要部活動における死亡率（10万人当たり）：上位5競技
2001-2010年度の10年分



出典：参考文献 21 を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 中学校柔道での頭部負傷の割合

	負傷事故中の頭部負傷割合	授業での負傷事故中の頭部負傷割合
授業	10.7% (1,118件中120件)	男子 10.3% (946件中97件)
部活動	4.2% (1,886件中80件)	女子 13.4% (172件中23件)

出典：参考文献 21 を基に科学技術動向研究センターにて作成

4-2 柔道での安全対策への取り組み

以上、学校スポーツにおいて、柔道に対しては、頭部を中心に優先的な安全対策が必要であろうことがわかってきた。

初心者が初心者を教えることになる武道必修化を懸念し、長年死亡者の発生がない欧米諸国の柔道の安全対策を検討して、事故原因と死因を究明する制度や指導者の資格認定制度の確立を唱える有識者もいる（柔道人口が日本の約3倍のフランスでは国家資格^{22,23)}。

我が国のみならず柔道事故が多発する現状を、スポーツ医学の諸外国からの遅れとスポーツ精神の問題ととらえ、次の安全対策を挙げている事例もある：①脳震とうを甘くみない＝最大限のケア、②指導者への医学的知識の啓蒙と認定（ライセンス）制度、③脳神経外科の介入、④脳震とう時における復帰のガイドラインの作成、⑤マウスガードの導入²⁴⁾。

全日本柔道連盟の『柔道の安全指導 2011年第三版』や、文部科学省の2012年3月の通知『武道必修化に伴う柔道の安全管理の徹底について』²⁵⁾の資料『柔道の授業の安全な実施に向けて』には、脳震とうについての記述がある。文部科学省は、事故調査を含めた体育活動中の事故防止に関する報告書も2012年7月に公表しており、知識の普及・浸透が期待される^{26,27)}。文部科学省の2013年度の『スポーツ指導者の資質能力向上のための有識者会議』でも、新しい時代にふさわしいコーチングが話し合われた。

5 おわりに

ニューヨーク・タイムズ紙は2013年4月、我が国の学校柔道事故問題を取り上げた²⁸⁾。そこで言及された、植物昏迷状態となった高校生に関する裁判の2013年2月の判決においては、2008年の事故発生時、脳震とう後の競技復帰の危険性に関する医療従事者の知見は、教育現場では前提とされず、学校への賠償請求は棄却された²⁹⁾。しかし、スポーツ脳震とうに関して、世界での認識が変わりつつある現在、我が国においても、スポーツ現場での脳震とうの危険性に関する知識の欠如は、許容されなくなりつつある（2013年7月の控訴審判決では、2月の判決を取り消し、約1億8千7百万円の賠償命令が下された）。

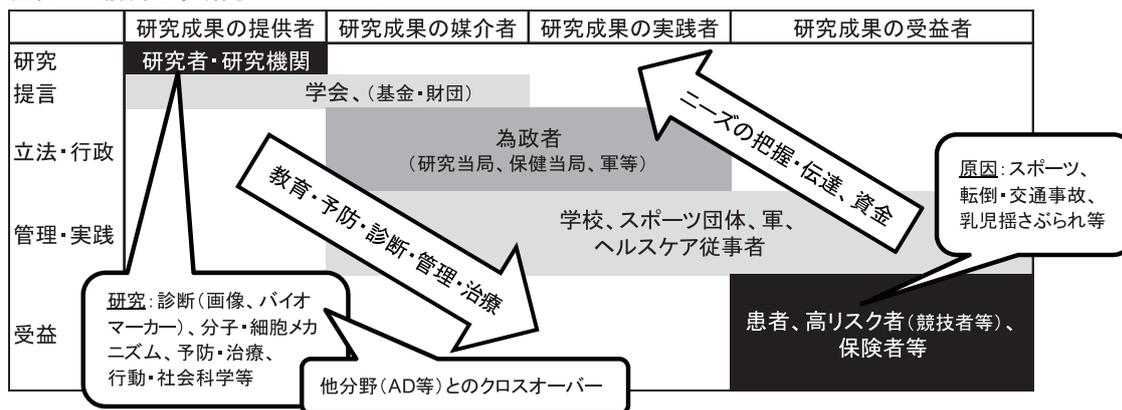
文部科学省等の取り組みを出発点として、前述のAANや国際スポーツ脳震とう会議のガイドラインや声明を採り入れ、我が国の事情に合わせた、これまで以上の脳震とう対策を目指すことが望まれる。

AANが前述の声明でも推奨している、CDCによるコーチのためのトレーニングコース⁹⁾は、インターネットを通じて誰もが利用でき、実践的で分かりやすい。子どものスポーツ現場のドラマ、解説、クイズからなる動画であり、最後に修了書がもらえる。親や競技者のためのファクト・シート、ポスター、クイズも用意されており、模範的な教材であろう。

スポーツ脳震とうに関しては、多くの海外のエビデンスはあるものの、我が国固有のスポーツ・教育事情があり、独自のエビデンスの収集と分析が必要な部分もある。我が国の医学・医療とスポーツ・教育現場の間の橋渡しは、まだ十分とは言えないが、今後の適切な政策の立案と実行は、武道を含むスポーツのより良い発展につながるものと期待される。

図表5に脳震とう研究のステークホルダーとそれぞれの役割の関係を示す。重度あるいは長期の障害の予知・予防法あるいは治療法の開発につながるよう、AD等の他疾患研究ともクロスオーバーしながら、脳画像解析や分子メカニズム解明等の研究開発を進めることは重要であり、そのためには、関係者の連携が必要である。

図表5 脳震とう研究のステークホルダー



補足ファイル : <http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-STT137-Supplement.pdf>

参考文献

- 1) "BRAIN Initiative challenges researchers to unlock mysteries of human mind." The White House 2013年4月 : <http://www.whitehouse.gov/blog/2013/04/02/brain-initiative-challenges-researchers-unlock-mysteries-human-mind>
- 2) "Nonfatal traumatic brain injuries related to sports and recreation activities among persons aged ≤19 years—United States, 2001–2009." MMWR 2011;60(39):1337-1342.
- 3) "Policy statement—boxing participation by children and adolescents." Pediatrics 2011;128(3):617-623.
- 4) Alessi AG, et al. "Protecting the brain in sports: What do we really know?" Neurology 2013 Published online before print doi: 10.1212/WNL.0b013e31828d9c13.
- 5) Rowland LP. "Why haven't we banned boxing?" Neurology Today 2006; 6(23):5-6.
- 6) Giza CC, et al. "Summary of evidence-based guideline update: evaluation and management of concussion in sports: report of the guideline development subcommittee of the American Academy of Neurology." Neurology. 2013 Mar 18. [Epub ahead of print]
- 7) "Important court date for players' legal action against NFL." U.S. Department of Health and Human Services 2013年4月 <http://healthfinder.gov/News/Article.aspx?id=675261>
- 8) 『米最大の人気スポーツ、NFLを揺るがす脳振盪問題』日本経済新聞 2012年12月 : <http://www.nikkei.com/article/DGXZZO49472920S2A211C1000000/>
- 9) "Heads up: concussion in youth sports." CDC 2013年5月 : <http://www.cdc.gov/concussion/HeadsUp/youth.html>
- 10) "Brain and nervous system disorders among NFL players." NIOSH 2013年1月 : http://www.cdc.gov/niosh/pgms/worknotify/pdfs/NFL_Notification_02.pdf
- 11) McKee AC, et al. "The spectrum of disease in chronic traumatic encephalopathy." Brain. 2013;136(Pt 1):43-64.
- 12) Center for the study of traumatic encephalopathy (CSTE), Boston University 2013年5月 : <http://www.bu.edu/cste/>
- 13) Marchi N, et al. "Consequences of repeated blood-brain barrier disruption in football players." PLoS ONE 2013;8(3): e56805. doi:10.1371/journal.pone.0056805.

- 14) Zhang MR. "Evidence of cognitive dysfunction after soccer playing with ball heading using a novel tablet-based approach." PLoS One 2013;8(2):e57364.
- 15) Jordan BD. "The clinical spectrum of sport-related traumatic brain injury." Nature Reviews Neurology 2013;9:222-230.
- 16) Underwood E. "NFL kicks off brain injury research effort." Science 2013;339:1367.
- 17) "NFL looks to helmet technology to combat concussions." National Geographic 2013年2月 : <http://news.nationalgeographic.com/news/2013/13/130202-football-concussions-nfl-super-bowl-safety-head-injuries-health/>
- 18) "Position statement: sports concussion." AAN 2013年3月 : <http://www.aan.com/globals/axon/assets/7913.pdf>
- 19) "Get a heads up on concussion in sports policies." 2013年6月 CDC : <http://www.cdc.gov/concussion/policies.html>
- 20) McCrory P, et. al. "Consensus statement on concussion in sport: the 4th international conference on concussion in sport held in Zurich, November 2012." British Journal of Sports Medicine 2013;47(5) : 250-267. 他4誌に同一内容を掲載
- 21) 『柔道事故データブック 2012』 学校リスク研究所 2012年8月 : <http://www.dadala.net/statistics/judo.html>
- 22) 二村雄次 『柔道による子どもの教育と死亡事故—西欧との比較—』 季刊教育法 2011;168:19-25.
- 23) 二村雄次 『中学の武道必修 柔道に「待て」』 朝日新聞 2011年7月5日
- 24) 野地雅人 『柔道による脳損傷の現状：最近27年間で110名以上の柔道死亡事故』 神経外傷 2011;34:70-79.
- 25) 『武道必修化に伴う柔道の安全管理の徹底について』 文部科学省 2012年3月 : http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/judo/index.htm
- 26) 『学校における体育活動中の事故防止について（報告書）』 文部科学省 2012年7月 : http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/jyujitsu/1323968.htm
- 27) 『体育活動中の事故防止に関する調査研究における海外調査（報告書）』 三菱総合研究所 2012年3月 : http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/jyujitsu/1323969.htm
- 28) "Japan confronts hazards of judo." New York Times 2013年4月 : <http://www.nytimes.com/2013/04/18/sports/japan-confronts-hazards-of-judo.html?ref=global&r=0>
- 29) 『平成25年2月15日判決言渡 平成22年（ワ）第3461号 損害賠償請求事件』 裁判所 : <http://www.courts.go.jp/hanrei/pdf/20130306171531.pdf>

..... **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

<http://www.nistep.go.jp/>

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。

各国の地球観測動向シリーズ(第2回)

欧州の地球観測活動の方向性 —地球観測データの仲介枠組—

辻野 照久

概要

欧州連合 (EU) はコペルニクス計画 (旧称 GMES) で活発に地球観測活動を促進しており、環境監視と安全保障を含む幅広いテーマで統合的なデータベース・システムを構築している。最近になって地球観測データの相互運用性を大幅に向上させる「仲介枠組」というソフトウェアを開発し、生物多様性や森林など学際的な分野に適用し始めている。このシステムの導入によりデータ提供者や利用者の負担が少なくなり、データへのアクセスおよび提供するサービスの増大によって雇用創出にも寄与している。我が国でも地球環境情報統融合システムを構築する上で欧州と同様な仕組みを導入しつつある。

キーワード : EuroGEOSS, 仲介枠組, 生物多様性, オントロジー, 地球環境情報統融合システム

1 はじめに

地球観測とは地球そのものの変化や人間の活動、動植物の生態などを現場 (in situ) で、あるいは宇宙から観察し分析する活動である。米国と並んで世界で最も活発に地球観測活動を行っている欧州では、これまでコペルニクス計画 (旧称 GMES) により環境監視と安全保障を含む幅広いテーマで「複数システムからなる全球地球観測システム (GEOSS)」への貢献を行ってきた。数年前から地球観測データの相互運用性に関する新しいコンセプトを開発し、生物多様性や森林など一部の分野に適用し始めた。それは、欧州連合 (EU) が実施している「欧州全球観測システム」(EuroGEOSS) プロジェクトである。このプロジェクトの主眼点は、多数の分野の多種類の地球観測データを統合化する上で、「仲介枠組」という手法を導入することにより、各分野のデータ提供者が相互運用性のためにデータを加工する負担をなくすことができるという点である。この結果、新規にデータを提供する参加者が一挙に増加する効果があったという。欧州の地球観測は今後5系列の「センチネル (Sentinel 1 ~ Sentinel 5)」衛星や

新たに Earth Explorer 計画の7番目のミッションに選定された森林バイオマスや炭素蓄積量を観測する「バイオマス (Biomass)」衛星など注目すべき計画があるが、本稿では GEOSS の重要な目標である「データの統合化」に焦点を当てて欧州の今後の方向性を考察する。

2 EuroGEOSS の活動状況

EU のサイトにある「EuroGEOSS」の Web site¹⁾ の冒頭には、「Welcome to EuroGEOSS, the European approach to GEOSS!」とある。EuroGEOSS とは世界の主要国で推進している GEOSS に対する欧州としての主要な取組みの1つであるといえる。

環境と人間社会の複雑な相互作用の理解を深めるためには、社会科学と環境科学を統合した学際的な取組みが必要である。EU は EuroGEOSS に 600 万ユーロを拠出し、森林、渇水、生物多様性の3つの分野をつなぐ相互運用性を備えたシステムを構築しながら、最適なシステムの枠組みを作るとい

課題に取り組んだ。従来の方法は、まず試行をする中で共通の基準やルールを定め、互いの理解を深めるという手順を取る。しかし、この方法ではデータの利用者と提供者の双方に負担が大きく、多くの分野が関与すると機能しなくなる。EuroGEOSSでは、それぞれの分野のグループに、共通の基準に合うように歩み寄ることを求めず、代わりにそれぞれのグループの間の『仲介枠組』(Brokering Framework)を作るという画期的な方法を取った。EuroGEOSSにおける「仲介枠組」の成功を受け、現在はジュネーブの世界気象機関(WMO)内に本部を置く政府間地球観測グループ(GEO)も公式にこの方法を取り入れている。その結果、データ・ソースが大幅に増大し、EuroGEOSSの関係者は複雑な環境変化を科学的に理解する力強いツールとなったと自負している。データへのアクセスが増え、提供するサービスが増えたことで、主に欧州の中小企業における雇用創出に貢献しており、EuroGEOSSは欧州イニシアティブに沿ったプロジェクトであると言える。

3 EuroGEOSS に導入された「仲介枠組」の仕組み

今回 EuroGEOSS に導入されたソフトウェア群の中心は、3種類のブローカーである。ブローカーの機能自体は同じ原理に基づいているが、ユーザーからの問い合わせを最初に受け付けるブローカーであるディスカバリーブローカーが中心的な要素となっている。

(1) ディスカバリーブローカー

EuroGEOSS のディスカバリーブローカーは仲介枠組の基礎となる要素である。このコンポーネントは、さまざまな科学コミュニティで使われる多くの標準や仕様を読んで、相互に仲介できる。これらのコミュニティが実際に行う作業の間にブリッジを構築していくことで、異なる種類のデータ・ソースから利用可能なリソースを発見することがブローカーの役割である。検索ツールとして OpenSearch^{注1)}などが利用されている。

(2) アクセスブローカー

アクセスブローカーは、ディスカバリーブローカーと同じ原理を応用し、学際的なデータへのアクセスを容易にするために導入されたブローカーである。座標参照系、空間分解能、空間的な広がり、データ符号化形式といった共通的な特徴に対して、以前であればユーザーが逐一選択していたのに対して、ユーザーが問い合わせを行って返ってきた検索結果を、共通のグリッド環境に基づいてデータセットにアクセスできるようにすることがアクセスブローカーの役割である。

(3) セマンティックブローカー

セマンティックとは事物と言語の対応規則を明らかにすることで「意味論」ともいう。学際的な研究においては、それぞれの分野の専門用語を橋渡しすることが重要で、何らかの統合化のためのツールが必要である。セマンティックブローカーもアクセスブローカーと同様にディスカバリーブローカーの機能を活用して開発されており、既存のセマンティック検索エンジンを介して外部のセマンティック・サービス、すなわちシソーラス(統制語彙の体系)、オントロジー^{注2)}、ガゼットィア(地名辞典)などの情報資源を活用できるようにしている。

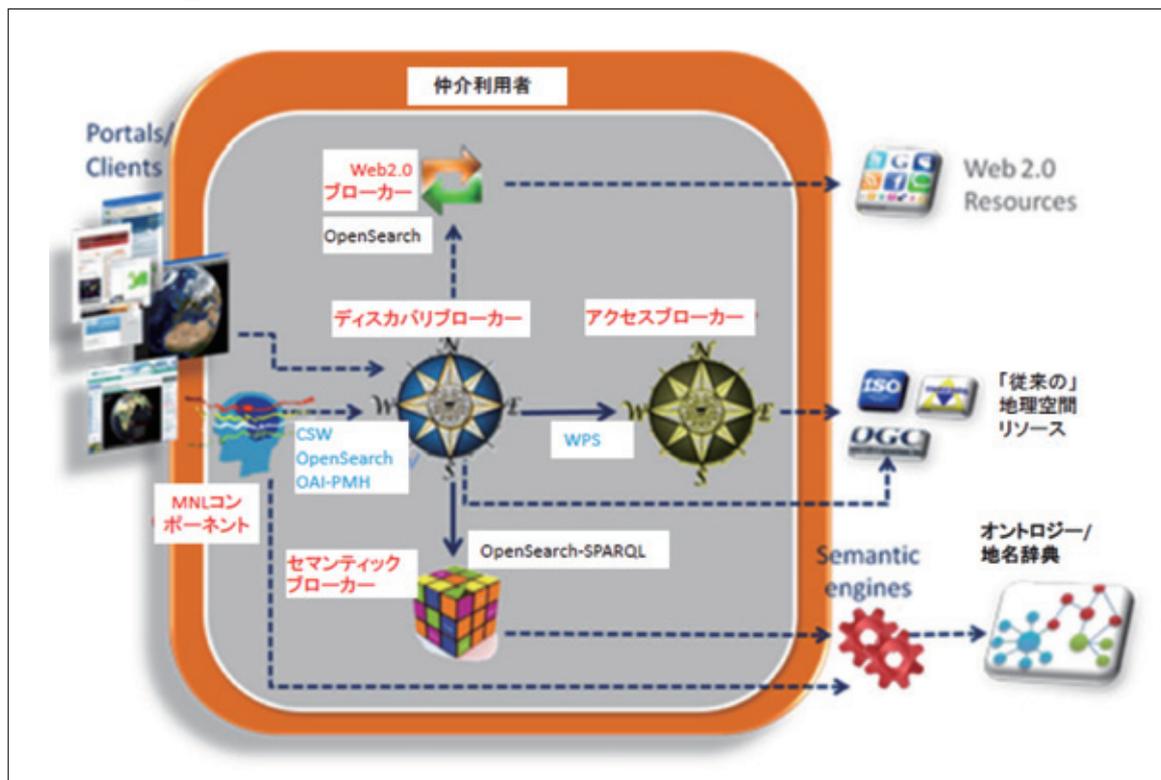
以上の主要なブローカーの他に、ウェブ 2.0 ブローカーがある。システムの外部に広がる Web 2.0 のコンテンツ資源を利用するためのブローカーである。

EuroGEOSS が開発した仲介枠組の機能構成を図表 1 に示す。

注1 米国アマゾン子会社の A9 が開発した検索ツール。ユーザーの問い合わせに対して複数のサイトを検索し、結果を合成。加工してユーザーに返す機能を持つ。

注2 哲学の分野では「存在論」と訳されるが、情報技術分野では適当な訳語がなく「存在するものを体系的に分類し、それらの関係を明示的に記述すること」を意味する用語となっている。

図表1 仲介枠組の機能構成図



出典：参考文献1より科学技術動向研究センターにて作成

4 EuroGEOSS の観測実施機関

EuroGEOSS に参加し、観測や相互利用に寄与している国際機関・国立研究機関・公的機関・企業・

大学等は、2013年6月現在欧州10か国と米国で23の組織がある。今後の参加組織数の推移に注目したい。現在参加している23機関を所在地の国別に図表2に示す。

図表2 EuroGEOSS 参加機関

国名	参加機関名
オーストリア	国際応用システム分析研究所 (IIASA)、ウイーン農科大学 (BOKU)
ベルギー	欧州連合 (EU) 欧州委員会共同研究センター (EC-JRC)
デンマーク	全球生物多様性情報施設事務局 (GBIPS)
フランス	鉱山地質学研究所 (BRGM)、電気電子学会 (IEEE) フランス支部
ドイツ	ハンブルク大学 (UNIHH)、フライブルク大学 (ALU-FR)
イタリア	国連食糧農業機関 (FAO)、イタリア学術研究会議 (CNR)
ポルトガル	EDI ソフト社
スロベニア	リュビアナ大学 (ULBF)
スペイン	ハウメ I 世大学 (UJI)、地理情報センター (CNIG)、アルカラ大学 (FGUA-OSE)、サラゴサ大学 (UZ)、エプロ川水路連盟 (CHE)、科学基金機構 (CSIC)
イギリス	国連環境プログラム-世界自然保全モニタリングセンター (UNEP-WCMC)、ノッティンガム大学 (UNOTT)、王立鳥類保護学会 (RSBP)、バードライフ・インターナショナル (Birdlife)
米国	ネブラスカ大学 (NDMC)

出典：参考文献1に基づき科学技術動向研究センターにて作成

5 利用事例

参考文献¹⁾には EuroGEOSS の仲介枠組を利用してサービスを行っている事例がいくつか示されている。その中から例としてアフリカの生物多様性保護に関するデータサービスの概要を紹介する。

中心となるシステムの名称はアフリカ保護地域評価ツール (APAAT) と呼ばれ、ユーザが生物多様性の評価・監視・予測などの研究を行うために、50 か国 741 か所の保護地域 (PA) の約 1600 の生物種の情報を集積している。このシステムは仲介枠組が開発される以前から整備されており、多数の情報源からさまざまなタイプのデータが集められるため、相互運用性が低く、大量のデータ交換は困難であった。EuroGEOSS では 具体的な仲介システムとして保護地域デジタル観測所 (DOPA) が開発され、保護地域の情報だけでなく各種のウェブサービスから生息地・生物種・地理などに関する情報にも自動的にリンクさせ、相互運用性が高まって生態系の予測にも役立つ機能を提供している。

6 我が国との対比

我が国では、文部科学省が「気候変動適応戦略イニシアチブ」の一環として「地球環境情報統融合プログラム」を推進している。その具体的な統合データベース・システムとして、東京大学地球観測データ統融合連携研究機構において地球観測の「データ統合解析システム (DIAS)」を整備している³⁾。2012 年度にデータ活用的高度化を行い、2013 年以降、長期運用体制の構築に向けた検討を行っているところである。オントロジーの活用も考慮するなど EuroGEOSS の仲介枠組と類似点もある。

データやプログラムは実体として眼前に見えるものではないため、システムの高度化や適用範囲の拡張の状況を実感しにくいだが、目に見えるサービスを通じて地球観測データの利用促進の機運を各分野に浸透させていく必要がある。

7 おわりに

EuroGEOSS プロジェクトのアシスタントで、仏鉱山地質学研究所 (BRGM) に籍を置く Lumier は、「GEOSS は環境を取り扱う多数のシステムからなり、個々のシステムがシームレスに相互運用できなくてはならない」と述べている⁴⁾。欧州の地球観測活動は、今回開発された「仲介枠組」をシステム的なソリューションとして活用することで、質・量ともに発展性が高くなったと考えられる。

地球観測分野においては、観測データの相互運用性を高めることによって、データ提供者や利用者の負担が少なくなり、本来の目的とは異なる領域から新たな利用目的が生まれ、それがまた参加者を増やすきっかけになるという好循環につながる。地球観測先進国である欧州各国が参加する EuroGEOSS でオープン・アーキテクチャに基づく仲介枠組が構築され、参加者の増加や雇用の増大につながる実証されている。我が国においても関係省庁、研究機関等の連携により DIAS の利用促進を図り、欧米に伍して地球観測活動を推進しうる体制を整備すべきであると考えられる。

略語

- ① APAAT : African Protected Areas Assessment Tool
- ② BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- ③ DIAS : Data Integration and Analysis System
- ④ DOPA : Digital Observatory for Protected Areas
- ⑤ GEO : Group on Earth Observations
- ⑥ GEOSS : Global Earth Observation System of Systems
- ⑦ GMES : Global Monitoring for Environment and Security
- ⑧ PA : Protected Areas

参考文献

- 1) EuroGEOSS ; <http://www.eurogeoss.eu/>
- 2) Biodiversity Operatin Capacity ; <http://www.eurogeoss.eu/about/Pages/WP4.aspx>
- 3) 東京大学、データ統合解析システム (DIAS) ; <http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias/>
- 4) New approach to improve the integration of earth observation data、欧州リモートセンシング企業協会 (EARSC)、2013年5月21日付NEWS ;
<http://earsc.org/news/new-approach-to-improve-the-integration-of-earth-observation-data>

..... **執筆者プロフィール**



辻野 照久

科学技術動向研究センター 客員研究官

<http://members.jcom.home.ne.jp/ttsujino/space/sub03.htm>

専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理、旧宇宙開発事業団で世界の宇宙開発動向調査などに従事。現在は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 調査国際部調査分析課特任担当役、科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター特任フェローも兼ねる。中国語の科学技術文献読解を得意とする。