

No. 1265 (2024. 2.27)

国家プロジェクトとしてのスパコン開発

はじめに

I スーパーコンピュータとは

- 1 構造
- 2 性能指標
- 3 世界ランキング
- 4 活用分野

II 日本のスパコン開発の経緯

- 1 「京」の開発及び運用
- 2 「富岳」の開発及び運用

III 次世代機の開発に向けて

- 1 ポスト「富岳」の開発に向けた検討
- 2 主要国におけるエクサ FLOPS 級スパコンの開発動向
- 3 スパコンの性能向上の限界と新たな計算原理の可能性

おわりに

キーワード：スーパーコンピュータ、計算科学、計算機科学、富岳、京、HPCI、共用促進法

- スーパーコンピュータ（スパコン）によるシミュレーションは、理論、実験と並ぶ科学技術研究の主要な手段となっており、様々な分野で活用されている。また、近年は、AIの開発手段としてもスパコンの重要性が高まっている。
- 日本は現在まで、国家プロジェクトとしてのスパコン開発に取り組んできた。2021（令和3）年3月に国の共用施設として運用が開始された我が国のスパコン「富岳」は、高い汎用性と世界最高水準の演算性能を両立した。
- 今後のスパコン開発においては、半導体加工技術の限界や、プロセッサの増加に伴って増える消費電力への対応が課題となる。また、開発されたスパコンが、広く社会に活用される仕組みを整えることも求められる。

国立国会図書館 調査及び立法考査局

文教科学技術課 なかむら しんや 中村 真也

はじめに

スーパーコンピュータを用いて行うシミュレーションは、科学技術において、理論、実験と並ぶ主要な研究手法となっており、学術研究や産業応用において、その重要性は高まっている。また、経済安全保障の観点から、高性能なスーパーコンピュータの技術を自国で保有することが重要視されており、主要国は、その開発と利用に積極的に取り組んでいる。

本稿では、スーパーコンピュータの基本事項を整理した上で、日本のスーパーコンピュータ「富岳」及び「京」を中心に、国家プロジェクトとしてのスーパーコンピュータ開発の経緯と運用の状況を紹介する。さらに、次世代機の開発に向けた検討の動きにも触れる。

I スーパーコンピュータとは

スーパーコンピュータ（以下「スパコン」）とは、同時代の計算機（コンピュータ）と比較して、著しく性能が高い計算機のことをいう¹。本章では、スパコンに関する基本事項を整理する。

1 構造

スパコンは、演算処理を担う CPU、計算に必要なデータを一時的に記録するメモリ、長期的に記録するストレージなどのハードウェアと、OS やアプリケーションなどのソフトウェアで構成される。この構成は一般的なコンピュータと同様であるが、スパコンは、「計算ノード」という単独の計算機として機能する要素が多数結合されたネットワーク構造を持つ点に特徴がある。この構造により、スパコンは、多数のプログラムを同時に実行したり、大規模なプログラムを各計算ノードで分担して実行したりすることができる²。

計算ノードには、CPU とは別に、画像処理装置（GPU）等のアクセラレータと呼ばれる演算加速装置が取り付けられることがある。アクセラレータを使用することで、同種の計算を多数のデータに適用する処理が高速化され、消費電力が抑えられるというメリットがある。ただし、アクセラレータは、異なる種類の計算を同時に行う処理や、複雑な条件分岐を含む計算処理には適さない場合があるとされる³。

大規模なシミュレーションなど、複数の計算ノードを使用して行う計算では、計算ノード間でデータ交換を行う必要が生じる。データ交換は「ノード間結合ネットワーク」と呼ばれるシステムによって行われる。ノード間結合ネットワークの性能が不足すると、各計算ノードの処理が完了した後に、データ交換のための長い待ち時間が発生し、プログラム全体の実行が遅くなる。スパコンが十分な性能を発揮するには、計算ノードの能力に見合った性能（低遅延、高

* 本稿のインターネット情報の最終アクセス日は、2024（令和6）年2月16日である。なお、本稿では、桁数が大きい演算速度等を表す際に次の単位を使用する。メガ： 10^6 （100万）、ギガ： 10^9 （10億）、テラ： 10^{12} （1兆）、ペタ： 10^{15} （1000兆）、エクサ： 10^{18} （100京）

¹ 岩下武史ほか『スパコンを知る—その基礎から最新の動向まで—』東京大学出版会、2015、pp.3-4。計算機の計算性能は年々向上しているため、一定の基準を設定し、その基準を上回る性能を持つ計算機をスパコンと定義するのは適切ではなく、飽くまで同時代の計算機との比較により定義されるということに留意が必要である。なお、スパコンを含む高性能計算機による計算技術は、「High Performance Computing（HPC）」と呼ばれることもある。

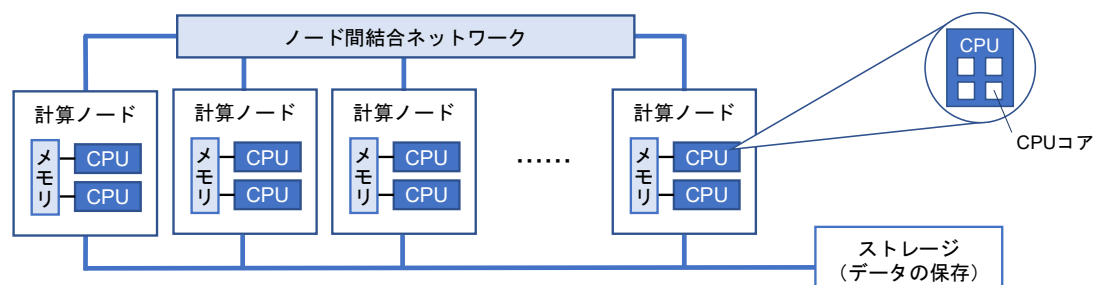
² 同上、pp.14-15、35-42。

³ 同上、pp.16-17。

速転送)⁴のノード間結合ネットワークが必要となる⁵。

多数の計算ノードが接続されたスパコンの構造の模式図を図1に示した。計算ノードが並列処理を行うことにより、多数のプログラムの同時処理や大規模な計算の高速処理が可能になる。

図1 スパコンの構造



(出典) 岩下武史ほか『スパコンを知る—その基礎から最新の動向まで—』東京大学出版会、2015、pp.14-17を基に筆者作成。

また、以上のハードウェアのほか、ソフトウェアにもスパコン特有の性質が求められる場合がある。例えば、スパコンは多くの利用者が共同で使用される。その際、利用者から提出される必要な計算ノード数が記された「ジョブ」と呼ばれる処理依頼を、ジョブ管理ソフトウェアが計算ノードの空き状況に応じて割り振る。ジョブ管理ソフトウェアには、利用者間の公平性、待ち時間の長さ、計算システム全体の稼働率等を考慮して適切な管理を行うことが求められる。加えて、実行中のジョブの管理や、計算ノードの故障時の対応といった機能も必要となる⁶。

2 性能指標

スパコンの性能指標には、理論上の演算性能の最高値として算出される「理論ピーク演算性能」と、実際の計算時間を基に算出される「実効演算性能」の2種類がある。

前者の理論ピーク演算性能は、スパコンを構成する各CPUが1秒あたりに実行可能な演算⁷の回数（FLOPS）にCPUの総数を乗じた値により算出される⁸。例えば、日本の「富岳」の各計算ノードには、3.38 テラ FLOPS の演算性能を持つCPUが1個搭載され、計算ノードの総数は全体で158,976であるため、理論ピーク演算性能は537 ペタ FLOPSとなる⁹。なお、「富岳」の演算性能をスマートフォンに換算すると、およそ2000万台分に相当するとされる¹⁰。

後者の実効演算性能は、性能測定用のプログラム（ベンチマーク）の実行に要する時間から算出される。使用するベンチマークによって算出される性能値は異なるため、評価の目的に応

⁴ 低遅延とは、ある計算ノードが別の計算ノードにデータを要求してから、最初のデータが届くまでの時間が短いことをいう。高速転送とは、単位時間あたりに転送できるデータ量が大きいことをいう。同上、p.20。

⁵ 同上、pp.17-20。

⁶ 同上、pp.41-42。

⁷ 64ビット（64桁の2進数）を用いて数を表す倍精度浮動小数点数を用いた計算。同上、p.8。

⁸ 同上、pp.23-25。なお、アクセラレータを利用するシステムの場合は、CPUとアクセラレータのそれぞれの理論ピーク演算性能の和として算出される。

⁹ 「システム紹介」計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/system/>>

¹⁰ 松岡聡「スーパーコンピュータ「富岳」の夜明け」2020.7.1、p.6。文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/content/20200701-mxt_jyohoka01-000008742_1.pdf>

じて様々なベンチマークが開発されている¹¹。次節で述べるように、それらに基づいて世界的なスパコンのランキングが発表されている。

3 世界ランキング

世界のスパコンの性能をランク付けしたものとしては、毎年2回、高性能計算技術の国際会議で発表¹²される「TOP500」¹³が代表的である。TOP500では、「LINPACK」と呼ばれる連立一次方程式を解くベンチマークプログラムで算出された実効演算性能 (LINPACK 性能) により、上位500位がランキングされる¹⁴。2023年11月時点の世界1位は、米国エネルギー省などが開発した「Frontier」で、そのLINPACK性能は1エクサ FLOPS を超えている (巻末図参照)¹⁵。

また、TOP500 にランキングされているスパコンを対象に、消費電力当たりの性能 (電力効率) を評価する「Green500」¹⁶と呼ばれるランキングも発表されている。電力効率に関しては、一般に、CPUのみで構成されたスパコンよりも、GPUを搭載したスパコンなど、特定の用途向けに開発されたスパコンの方が有利とされるが、2019年11月に発表されたGreen500では、CPUのみで構成された日本の「富岳」のプロトタイプが世界1位を獲得した¹⁷。

このほか、産業用のアプリケーションの計算手法を取り入れて実用的な計算性能を評価する「HPCG」や、ビッグデータ解析の処理性能を評価する「Graph500」、AI (人工知能) に関する処理性能を評価する「HPL-MxP」 (旧名称「HPL-AI」) などのベンチマークに基づくランキングがあり、評価の目的に応じて参照されている¹⁸。

4 活用分野

スパコンは学術研究や産業部門の研究開発において活用されている。例えば、創薬、新材料開発、災害シミュレーション、気象予報、宇宙研究などの分野が挙げられる¹⁹。また、近年は、高性能なAIの開発においても、計算インフラとしてのスパコンの重要性が高まっている²⁰。

例えば、創薬は、長期の開発期間や多額の開発費が必要となる上、それらを投じて開発に成功するとは限らないとされる。しかし、スパコンを活用することにより、薬の候補となる膨大な数の化合物の中から、人体に有効に作用する物質を絞り込むことができる。また、高い計算性能を持つスパコンを使用すれば、人体内の状況をシミュレートして、実際の薬の働きを解析することができる。こうした技術による創薬プロセスの大幅な効率化が期待されている²¹。

宇宙に関する研究も、スパコンによる発展が特に期待される分野である。学術的な研究としては、スパコンによるシミュレーションで初期の宇宙の様子を検証する試みや、銀河系内での

¹¹ 岩下ほか 前掲注(1), pp.7, 25-35.

¹² 毎年、6月頃に開催されるISC (International Supercomputing Conference) と11月頃に開催されるSC (Supercomputing Conference) において発表される。

¹³ “TOP500.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/lists/top500/>>

¹⁴ 佐藤三久「スーパーコンピュータのベンチマークについて」2020.6.17, p.21. 計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/wp/wp-content/uploads/2020/10/20200617sato.pdf>>

¹⁵ “NOVEMBER 2023.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/lists/top500/2023/11/>>

¹⁶ “Green500.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/lists/green500/>>

¹⁷ 佐藤 前掲注(14), p.25.

¹⁸ 同上, pp.26-29.

¹⁹ 岩下ほか 前掲注(1), pp.9-10.

²⁰ 小川宏高「人工知能向けスーパーコンピュータの技術開発動向」『電子情報通信学会誌』1153号, 2020.5, p.488.

²¹ 岩下ほか 前掲注(1), pp.10-12.

星の形成過程を明らかにする試みなどが行われている²²。また、宇宙開発の分野では、人工衛星が宇宙環境から受ける影響や宇宙環境に与える影響の評価などがスパコンのシミュレーションによって行われている。こうした研究は、実際に宇宙空間に行って実施することが困難であるため、スパコンによる解析が重要な役割を担う²³。

II 日本のスパコン開発の経緯

1980年代以降、日本のスパコンに関する技術は著しく発展し、日本企業が開発したスパコンが世界に普及した。一方、商用のスパコンでは能力が不足する大規模な計算課題を扱うため、極めて高い性能を持つスパコンを、国産技術を用いて開発する必要性が認識され、国家プロジェクトとしてのスパコン開発が進められた²⁴。

2002（平成14）年に、地球規模の気候変動の解析・予測などを行うために開発された「地球シミュレータ」は、それまで世界1位の演算性能を持っていた米国のスパコン「ASCI White」のおよそ5倍の演算性能（LINEPACK性能35.6テラFLOPS）を実現し、米国のスパコン関係者を驚かせた²⁵。

その後も、日本では国家プロジェクトとしてのスパコン開発が行われている。本章では、日本の「京」及び「富岳」の開発・運用の経緯と成果をまとめる²⁶。

1 「京」の開発及び運用

(1) 「次世代スーパーコンピュータ」の開発

後に「京」と呼ばれるスパコンを開発するプロジェクトの構想は、2005（平成17）年に始まった。同年8月に文部科学省の有識者会議が10ペタFLOPS超級のスパコン開発を提言したこと²⁷などを受け、「次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト」が立ち上がり、同年10月には、「次世代スーパーコンピュータ」（以下「次世代スパコン」）の開発主体として独立行政法人理化学研究所が選定された²⁸。翌年3月に閣議決定された第3期科学技術基本計画（2006（平成18）～2010（平成22）年度）では、「次世代スパコン」が、「国家的な大規模プロジェ

²² 「スーパーコンピュータで時間を戻して探る宇宙の始まり」国立天文台天文シミュレーションプロジェクトウェブサイト <<https://www.cfca.nao.ac.jp/pr/20210216>>; 「サブ課題B「星形成と惑星形成をつなぐ統一的描像の構築」」計算基礎科学連携拠点（JICFuS）ウェブサイト <https://jicfus.jp/fugaku_ap/jp/research/subtask/subtaskb/>

²³ 岩下ほか 前掲注(1), pp.12-14.

²⁴ 海洋研究開発機構地球シミュレータ開発史編集チーム編『地球シミュレータ開発史』2010, pp.17-18, 28-29. <https://www.jamstec.go.jp/es/jp/publication/pdf/Development_ES.pdf>

²⁵ 冷戦下のソ連が世界初の打ち上げに成功して米国に衝撃を与えた人工衛星「スプートニク（Sputnik）1号」（1957（昭和32）年）になぞらえて、「コンピュータニク（Computenik）」と呼ばれた。John Markoff, “Japanese Computer Is World’s Fastest, As U.S. Falls Back,” *New York Times*, Apr 20, 2002, pp.A1, C14.

²⁶ 筆者は2023（令和5）年3月に、理化学研究所計算科学研究センターを訪問して現地調査を行う機会を得た。現地調査に協力してくださった方々に感謝する。本章以降の記述の一部には、その際の聞き取り内容を反映している。ただし、本稿の文責は筆者に属し、訪問先の公式見解を示すものではない。

²⁷ 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会情報科学技術委員会計算科学技術推進ワーキンググループ「計算科学技術推進ワーキンググループ第2次中間報告」2005.8.24, p.46. 文部科学省ウェブサイト（国立国会図書館インターネット資料収集保存事業（WARP）で保存されたページ）<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9217658/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/05091401/008_2.pdf>

²⁸ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集『理化学研究所百年史 第II編 研究と成果』2018, pp.431-432. <<https://www.riken.jp/medialibrary/riken/pr/publications/anniv/riken100/part2/riken100-2-4-7.pdf>> 理化学研究所は、2015（平成27）年4月から、国立研究開発法人となっている。

クトとして基本計画期間中に集中的に投資すべき基幹技術」に位置付けられた²⁹。

2006（平成 18）年度に「次世代スパコン」の開発が開始され、システム構成の検討やソフトウェア開発などが行われた³⁰。また、同年 7 月には、「次世代スパコン」が「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」（平成 6 年法律第 78 号。以下「共用促進法」）に基づく「特定先端大型研究施設」に指定された。これにより「次世代スパコン」は、国の経費の措置を受け、幅広く産学官の研究者等の共用に供されることとなった（共用の仕組みは 2(6)参照）³¹。

理化学研究所によるシステム構成の検討の結果、「次世代スパコン」のシステム構成として、汎用性が高く世界的な主流となっているスカラ型と呼ばれる方式と、気象シミュレーションのような処理に適し日本が強みを持つベクトル型と呼ばれる方式の両方の性質を併せ持つスカラ・ベクトル複合型が採用された。この構成により LINPACK 性能 10 ペタ FLOPS を実現することが目標とされ、2012（平成 24）年の完成を目指すこととなった³²。

しかし、その後の文部科学省の有識者会議において、十分な性能が見込めないなどの理由でシステム構成の再検討が求められたことや、ベクトル型部分の開発担当企業がプロジェクトから撤退したことにより、スカラ型単一のシステムとして開発が進められることとなった³³。

(2) 「事業仕分け」を受けた計画の変更

2009（平成 21）年 11 月、「次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト」を対象に、政府の事業仕分けが行われた。事業仕分けでは、スカラ・ベクトル複合型のシステム構成をスカラ型のみ構成に変更したことの妥当性や、世界一を達成するために国費を投入する意義、10 ペタ FLOPS の計算性能に対する産業界のニーズなどについて議論が行われた。議論の結果、同プロジェクトは「来年度の予算計上の見送りに限りなく近い縮減」と評価された³⁴。

翌月 9 日、内閣府の総合科学技術会議（現・総合科学技術・イノベーション会議）は、同プロジェクトについて、「スカラ型単一システムへの構成変更等があったが、10 ペタ級の目標は達成できるものと評価されており、確実に推進すべきである。ただし、この計画変更の経緯・内容等について、国民の十分な理解を得ることが重要である」との見解を示した³⁵。

そして、同月 16 日、財務大臣、行政刷新担当大臣、国家戦略担当大臣、文部科学大臣は、プロジェクトについて、計画を変更した上で予算案への計上を認めることで合意した。これにより、当初は 2011（平成 23）年 11 月とされていた 10 ペタ FLOPS の達成時期が、2012（平成 24）年 6 月に延期された。また、プロジェクトの推進は、開発者側の視点ではなく、利用者側の視点で行うこととされ、世界一の性能は目指しつつも、多様な利用者のニーズに応えるべく、「革

²⁹ 「科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月 28 日閣議決定）pp.14-15. 内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/honbun.pdf>>

³⁰ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), pp.432-433.

³¹ 文部科学省「特定放射光施設の共用の促進に関する法律の改正について」『Spring-8 利用者情報』vol.11 no.5, 2006.9. <<https://user.spring8.or.jp/sp8info?download=27823&tmstv=1705285642>>

³² 「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）について」文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.htm>; 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), p.433.

³³ 「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）について」同上

³⁴ 内閣府行政刷新会議事務局「行政刷新会議ワーキングチーム「事業仕分け」第 3WG」（3-17）2009.11.13, pp.9, 14-16, 18, 21.（国立国会図書館インターネット資料収集保存事業（WARP）で保存されたページ）<<https://warp.d.a.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9283589/www.cao.go.jp/sasshin/oshirase/h-kekka/pdf/nov13gijigaiyo/3-17.pdf>>

³⁵ 「「次世代スーパーコンピュータの開発・利用」の平成 22 年度概算要求にかかる見解」2009.12.9. 内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu87/siryo2-2-3-1-1.pdf>>

「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) (後述)の構築を目指すこととした。こうして、「次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト」は、「HPCI 計画」へと改められ、開発は継続されることとなった³⁶。2010(平成22)年8月には、HPCI 計画の推進や進捗評価を行う有識者会議として、文部科学省に「HPCI 計画推進委員会」が設置された³⁷。

「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)とは、「次世代スパコン」を中核として、全国の大学や研究機関が保有するスパコンや大規模ストレージを高速ネットワークで結んだものであり、利用者(大学や企業等に所属する研究者等)が、単一のアカウントによりネットワーク上にある各地のスパコンを利用したり、他のスパコンとの間で大規模データを共有したりすることが可能なシステムである³⁸。

2010(平成22)年7月、「次世代スパコン」の名称が「京」(けい)に決定した。「次世代スパコン」が目標として掲げていた FLOPS 数「10 ペタ (=10¹⁶)」を表す単位が「京」であることなどが決定の理由とされた³⁹。

(3) 「京」の運用・成果

「京」は、2010(平成22)年8月以降、富士通により製造され、同年秋から翌年8月末にかけて、神戸市の理化学研究所計算科学研究機構(現・計算科学研究センター)に搬入された。2011(平成23)年3月には、一部のシステムが稼働し、試験利用環境が暫定的に整備された⁴⁰。

2011(平成23)年6月の TOP500 において、「京」は未完成のシステムながら、LINPACK 性能 8.2 ペタ FLOPS (理論ピーク演算性能 8.8 ペタ FLOPS) を達成し世界 1 位を獲得した⁴¹。さらに、同年11月には、目標としていた 10 ペタ FLOPS を超える 10.5 ペタ FLOPS の LINPACK 性能(理論ピーク演算性能 11.3 ペタ FLOPS)を達成して2期連続の世界 1 位を獲得した⁴²。

2012(平成24)年6月29日には「京」のシステムが完成し、同年9月28日、共用促進法に基づく共用施設として運用が開始された。同日、「京」を中核とする HPCI の運用も開始された⁴³。

「京」の開発に要した資金の総額は約 1111 億円(システム開発費 793 億円、ソフトウェア開発費 126 億円、施設建設費 193 億円)であった⁴⁴。

「京」は、後継機の「富岳」の設置のため、2019(令和元)年8月16日の共用終了まで、約7年間にわたって安定的に運用された。その間、延べ約 11,100 人に利用され、そのうち約 3 割が産業部門の利用者であった。「京」を利

図2 スーパーコンピュータ「京」



(出典) 理化学研究所提供。

³⁶ 「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) について」前掲注(32)

³⁷ 文部科学省研究振興局「HPCI 計画推進委員会の設置について」2010.8.10. <https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/housa/shinkou/020/gaiyou/1296773.htm>

³⁸ 「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) について」前掲注(32)

³⁹ 「次世代スーパーコンピュータの愛称は「京(けい)」と決定」2010.7.5. 理化学研究所ウェブサイト <<https://www.riken.jp/pr/news/2010/20100705/>>

⁴⁰ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), p.437.

⁴¹ “JUNE 2011.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/lists/top500/2011/06/>>

⁴² “NOVEMBER 2011.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/lists/top500/2011/11/>>

⁴³ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), pp.437, 442.

⁴⁴ 「「京」の開発資金について」理化学研究所計算科学研究機構ウェブサイト <https://aics.riken.go.jp/jp/overview/budget/development_cost.html>

用して得られた顕著な研究成果として、分子・細胞レベルで心臓の動きを再現する心臓シミュレータ、超高解像度の台風・豪雨予測、過去の経験からは予測困難な複合災害の予測システムなどの実現のほか、燃料電池の素材開発など、産業応用に関連するものも挙げられる。これらの研究は、従来のスパコンでは現実的な時間内に計算ができなかったという意味で、「京」によって初めて実現した成果とされる⁴⁵。

2 「富岳」の開発及び運用

(1) ポスト「京」の検討

「京」の後継機（以下「ポスト「京」」）の開発に向けた検討は、2010（平成22）年に始まった。同年、スパコン関係の研究コミュニティが、「戦略的高性能計算システム開発に関するワークショップ」（Strategic Direction/Development of HPC: SDHPC）を組織し、将来のスパコン開発に向けた検討を行った。また、翌年7月には、文部科学省の主催により、「アプリケーション作業部会」と「コンピュータアーキテクチャ・コンパイラ・システムソフトウェア作業部会」が設置され、検討が行われた⁴⁶。2011（平成23）年10月以降はこれらの活動が統合され、翌年2月、将来のスパコン開発において実現を目指すべき技術課題や必要な開発体制などを取りまとめた「今後のHPCI技術開発に関する報告書」⁴⁷がHPCI計画推進委員会に提出された⁴⁸。

その後、文部科学省は、ポスト「京」で必要となるシステムやアプリケーションに関する知見の獲得のため、「将来のHPCIシステムのあり方の調査研究」を委託により実施した⁴⁹。

(2) ポスト「京」の開発

2014（平成26）年度から、2020（令和2）年の運用開始を目指してポスト「京」を開発するプロジェクト「フラッグシップ2020プロジェクト」が開始された⁵⁰。

当初、ポスト「京」は、消費電力を30～40メガW（「京」の消費電力は約13メガW）⁵¹とし、かつ、理論ピーク演算性能で1エクサFLOPSを達成するため、汎用的なCPUにアクセラレータを加えたシステム構成とすることが検討されていた。しかし、多額の費用が見込まれるなどの理由から、アクセラレータは使用せず、CPUのみでシステムを構成することとなった⁵²。

新たなシステム構成の下で掲げられた開発目標では、具体的な演算性能の数値目標は設定されず、代わりに、消費電力を30～40メガWに抑え、かつ、実際のアプリケーション実行時に、

⁴⁵ 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会「情報科学技術に関する研究開発課題の事後評価結果①」2021.4, pp. 8-9, 11. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/content/20210709-mxt_chousei01-000016732_5.pdf>

⁴⁶ 「今後のHPC技術の研究開発の検討について」（第5回HPCI計画推進委員会 資料2）2011.7.14, p.1. 文部科学省ウェブサイト（国立国会図書館インターネット資料収集保存事業（WARP）で保存されたページ）<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11293659/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/020/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2011/09/28/1308909_05.pdf>

⁴⁷ アプリケーション&コンピュータアーキテクチャ・コンパイラ・システムソフトウェア合同作業部会「今後のHPCI技術開発に関する報告書」2012.2.10. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/020/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2012/04/04/1318848_06.pdf>

⁴⁸ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), p.456.

⁴⁹ 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会「情報科学技術に関する研究開発課題の中間・事後評価結果」2014. 8, pp.13-20. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afiedfile/2014/09/26/1351725_3.pdf>

⁵⁰ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), p.457.

⁵¹ “NOVEMBER 2011,” *op.cit.*(42)

⁵² 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), p.457.

最大で「京」の100倍の性能を達成することが掲げられた。また、開発方針として、社会や科学分野の課題解決を最優先するためにシステムとアプリケーションの協調的な設計（コデザイン）を行うこと、国際競争力のある汎用的なシステムを実現すること、国際協力を戦略的に活用すること、「京」の資産（技術・人材、アプリケーション）を最大限活用すること、システムが完成する2020年以降も性能の拡張が可能なシステムを実現することが掲げられた⁵³。

2014（平成26）年10月から翌年8月末にかけて、理化学研究所と富士通による基本設計が行われた。ハードウェア・システム系の開発に13のワーキンググループが、アプリケーション系の開発に9のワーキンググループが設置され、コデザインによる設計・開発が進められた⁵⁴。

2016（平成28）年1月、詳細設計と試作が開始された⁵⁵。この段階までの計画では、ポスト「京」には10nm微細加工技術⁵⁶を利用したCPUを使用する予定であったが、半導体製造技術の開発遅延により、計画どおりの性能達成が困難となることが見込まれた。そこで、ポスト「京」の開発期限を1年から2年延期し、次世代の7nm微細加工技術を利用したCPUを採用するとともに、AI分野への応用も可能な演算方式（半精度浮動小数点演算）を追加することとした⁵⁷。

2018（平成30）年夏、試作機が完成し、性能評価が行われた。その結果を基に、総合科学技術・イノベーション会議によって製造が認められ、翌年1月に製造が開始された⁵⁸。

2019（令和元）年5月、公募により、ポスト「京」の名称が「富岳」（ふがく）に決定した。富岳（富士山）の高さがポスト「京」の性能の高さを表し、裾野の広がりを利用者の広がりを表していることなどが決定の理由とされた⁵⁹。

(3) 「富岳」の運用開始・性能評価

2019（令和元）年12月から翌年5月にかけて、「富岳」の機体が理化学研究所計算科学研究センター（R-CCS）の「京」の跡地に搬入・設置された。2021（令和3）年3月9日、「富岳」の全システムが完成し、共用促進法に基づく共用施設（特定先端大型研究施設）⁶⁰として運用が開始された⁶¹。「富岳」の開発費用（アプリケーション開発を含む。）における国費負担は、約1100億円とされる⁶²。また、「富岳」の共用開始以降、「富岳」の運営に係る経費として、年間150億円程度の予算が措置されている⁶³。

⁵³ 同上, pp.457-458.

⁵⁴ フラッグシップ2020プロジェクト・理化学研究所計算科学研究センター『富岳コデザイン・レポート—フラッグシップ2020プロジェクト・テクニカルレポート—』2022.3, p.23. <<https://www.r-ccs.riken.jp/wp/wp-content/uploads/2022/03/fs2020-report-j.pdf>>

⁵⁵ 理化学研究所百年史編集委員会企画・編集 前掲注(28), p.460.

⁵⁶ n（ナノ）は 10^{-9} 。微細加工の精度が高いほど、高性能な半導体素子の製造が可能になる。

⁵⁷ フラッグシップ2020プロジェクト・理化学研究所計算科学研究センター 前掲注(54), p.23.

⁵⁸ 同上, pp.23-24; 「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）について」前掲注(32)

⁵⁹ 「ポスト「京」の名称「富岳（ふがく）」に決定」2019.5.23. 理化学研究所ウェブサイト <https://www.riken.jp/pr/news/2019/20190523_1/>

⁶⁰ 「京」の運用終了と「富岳」の運用開始に伴って共用促進法施行規則が改正され、新たに「富岳」が共用促進法に基づく「特定先端大型研究施設」とされた（特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律施行規則の一部を改正する省令（令和元年文部科学省令第16号））。

⁶¹ 「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）について」前掲注(32); 「スーパーコンピュータ「富岳」完成、共用開始」2021.3.9. 理化学研究所ウェブサイト <https://www.riken.jp/pr/news/2021/20210309_2/index.html>

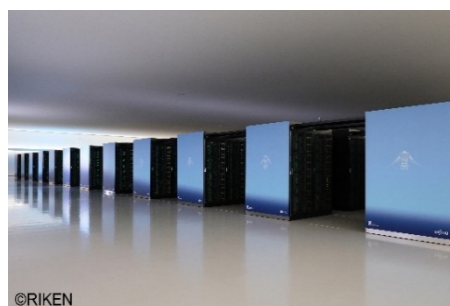
⁶² 「開発資金について」計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/history/funds/>>

⁶³ 「世界最高水準の大型研究施設の整備・利活用」2023.1. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/content/20230119-mxt_kouhou02-000027104_16.pdf>; 「世界最高水準の大型研究施設の整備・利活用」2022.1. 同 <https://www.mext.go.jp/content/20220118-mxt_kouhou02-000019986_15.pdf>

運用開始前の2020（令和2）年6月には、「富岳」のシステム完成前に行われた各種ベンチマークテストによる世界ランキングが発表され、TOP500では、LINPACK性能416ペタFLOPS（理論ピーク演算性能514ペタFLOPS）のスコアにより、日本製スパコンとしては「京」以来8年半（17期）ぶりとなる世界1位を獲得した。また、TOP500のほか、HPCG、Graph500、HPL-AI（I3参照）でも世界1位となり、「富岳」は、幅広い計算用途において世界最高の性能を持つことが示された。その後、TOP500及びHPL-MxPについては、2022年6月に米国の「Frontier」が1位となるまで2年（4期）連続で1位を獲得した。HPCG及びGraph500については、2023年11月現在、4年（8期）連続で1位を獲得している⁶⁴。

「富岳」の開発方針の1つとされたシステムとアプリケーションのコーデザインを実施するため、9つのターゲットアプリケーション⁶⁵が選定されていた。完成した「富岳」によるターゲットアプリケーションの性能評価が行われた結果、「京」との比較で少なくとも23倍、最大で131倍の性能向上が達成された。また、最大消費電力は30メガWに抑えられた。これにより、「富岳」の開発目標は達成された⁶⁶。

図3 スーパーコンピュータ「富岳」



（出典）理化学研究所提供。

（4）「富岳」の成果

「富岳」の搬入が進められていた2020年初頭、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的な拡大が発生した。これを受けて理化学研究所は、2021（令和3）年度の共用開始に向け整備中であった「富岳」の計算資源の一部を、新型コロナウイルス対策に資する研究開発のために提供することとした。この取組の下で実施された研究の一例として、新型コロナウイルスの飛沫・エアロゾル拡散モデルシミュレーションがある。これにより、様々な条件下での感染リスクのシミュレーションが行われ、その結果は、感染対策に係る政策立案やガイドラインの策定に役立てられた⁶⁷。

共用開始以降、「富岳」は気象、物質科学、宇宙、医学など、各分野のシミュレーションに活用され、成果が報告されている。AIモデルの開発に「富岳」を活用する研究や、「富岳」のシミュレーションとAIを融合させる研究など、AIに関係する研究も行われている⁶⁸。

⁶⁴ “SUPERCOMPUTER FUGAKU.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/system/179807/>>; “RESULTS.” HPL-MxP Website <<https://hpl-mxp.org/results.md>>; 「スーパーコンピュータ「富岳」の世界ランキング結果について」2023.11.14. 富士通株式会社ウェブサイト <<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2023/11/14.html>> なお、2020（令和2）年11月以降、「富岳」は設計された全計算資源を使用してベンチマークを実施しており、TOP500ではLINPACK性能442ペタFLOPS（理論ピーク演算性能537ペタFLOPS）を達成している。

⁶⁵ GENESIS（タンパク質の動きの計算）、Genomon（ゲノム解析）、GAMERA（地殻・都市の地震の計算）、NICAM+LETKF（観測データを融合した地球大気シミュレーション）、NTChem（分子の構造解明）、ADVENTURE（大規模システムのシミュレーション）、RSDFT（物質の特性解明）、FrontFlow/blue（乱れのある流れや音響の計算）、LQCD（素粒子の振る舞いの計算）の9つ。「スーパーコンピュータ「富岳」の開発」2019.11. 計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/newsletter/201911/fugaku.html>>

⁶⁶ フラッグシップ2020プロジェクト・理化学研究所計算科学研究センター 前掲注(54), p.36.

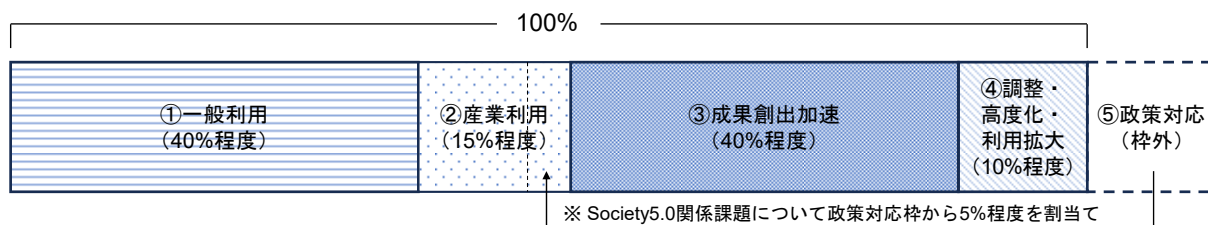
⁶⁷ 「新型コロナウイルス対策を目的としたスーパーコンピュータ「富岳」の優先的な試行的利用について」2020.4.7. 理化学研究所ウェブサイト <https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200407_1/index.html> この研究は、スパコンを用いた科学技術研究の最も顕著な成果を表彰する2021年ゴードン・ベル賞のCOVID-19研究特別賞を受賞した（理化学研究所・神戸大学「富岳」を用いたCOVID-19の飛沫・エアロゾル拡散モデルシミュレーションが、2021年ゴードン・ベル賞COVID-19研究特別賞受賞」2021.11.19. 同 <https://www.riken.jp/pr/news/2021/20211119_1/>）。

⁶⁸ 「「富岳」ユーザーの主な研究成果」計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/research/press/>>

(5) 「富岳」の計算資源の配分

「富岳」の計算資源は、文部科学省が策定した基本方針に従い、利用目的別に5種類の枠に配分され、それぞれの枠組みに従って共用される（図4）。

図4 「富岳」の計算資源配分



(出典) 文部科学省「スーパーコンピュータ「富岳」利活用促進の基本方針」2020.7.17, p.3. <https://www.mext.go.jp/content/200200812_mxt_jyohoka01_000009348_1.pdf> を基に筆者作成。

「①一般利用」は、主に学术界による利用を想定した枠（40%程度）で、幅広い研究課題を対象に、科学的見地から審査・採択される。「②産業利用」は、主に産業界による利用を想定した枠（15%程度）で、幅広い研究課題を対象に、科学的・社会経済的見地から審査・採択される。なお、産業利用枠には、Society5.0⁶⁹の推進に係る研究課題について、政策対応枠（100%の枠外）から5%程度に相当する計算資源が割り当てられている。「③成果創出加速」は、科学的・社会的課題の解決に直結する成果が早期に見込める研究課題を実施するための枠である（40%程度）。「④調整・高度化・利用拡大」は、「富岳」の安定運用のためのシステム調整や、利用者の利用支援や利用拡大に係る研究開発等を理化学研究所が中心となって実施するための枠である（10%程度）。「⑤政策対応」は、政策的に重要又は緊急と認められる課題を実施するためのもので、利用可能な計算資源の枠外に設定される⁷⁰。

なお、「富岳」の利用料は、研究成果を公開することで基本的に無償となるが、ジョブを優先的に実行させたり、成果を非公開としたりすることが可能な有償利用のオプションもある⁷¹。

(6) 「富岳」の共用の仕組み

共用促進法により、「富岳」の開発、維持管理、研究者等への共用は「富岳」の設置者である理化学研究所が行うこととされている（第5条）。また、文部科学大臣は、「富岳」の利用者選定や利用支援などの利用促進業務を、登録施設利用促進機関に行わせることができるとされており（第8条）、一般財団法人高度情報科学技術研究機構（RIST）が登録施設利用促進機関に選定されている⁷²。「富岳」の共用の枠組みを図5に示した。

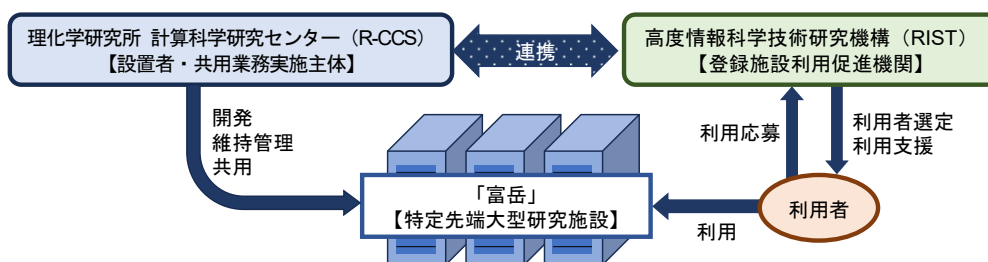
⁶⁹ サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）。内閣府ウェブサイト <https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/>

⁷⁰ 文部科学省「スーパーコンピュータ「富岳」利活用促進の基本方針」2020.7.17. <https://www.mext.go.jp/content/200200812_mxt_jyohoka01_000009348_1.pdf>

⁷¹ 同上, pp.3-4; 「有償利用の特徴」HPCIウェブサイト <https://www.hpci-office.jp/application/files/7816/6494/5729/fugaku_fee_bsd_merits.pdf>

⁷² 「登録施設利用促進機関について」文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/shisetsu/1325458.htm>

図5 「富岳」の共用の枠組み



(出典) 「1「富岳」の共用と組織 1-1 共用の枠組み」『富岳年報 2022』計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/fugaku-annual-reports/2022/1/1/>> を基に筆者作成。

RISTは、利用支援の取組の1つとしてヘルプデスクを運営している。利用者は、ヘルプデスクを一元的な窓口として、「富岳」の利用に関する情報提供や技術支援を受けることができる。「富岳」設置者のR-CCSは、「富岳」の運用に関する情報や技術的な知見をRISTとの間で定期的に共有する機会を設けるなど、RISTと連携してヘルプデスクの運営に取り組んでいる⁷³。

(7) 「富岳」の利用拡大に向けた取組

R-CCSは、「富岳」の利用者層の拡大を図るため、「富岳」のクラウド化」と「クラウドの「富岳」化」の2種類のアプローチによる取組を行っている。

「富岳」のクラウド化は、クラウドサービス事業者が利用者と「富岳」とを仲介し、「富岳」をクラウドサービスのように利用できるようにするアプローチである。スパコンを利用するための専門的知識を持たない利用者であっても、事業者が提供するアプリケーションやサポートを通じて、「富岳」の計算資源を容易に利用できる環境の構築を目指している⁷⁴。2020（令和2）年度から2021（令和3）年度にかけて試行的な取組が実施され、このような仕組みに対するニーズの存在が確認された一方、課題申請書や利用報告書の提出に係る手続の煩雑さや利用目的の制限など、現行制度に起因する手続上の課題の存在も明らかとなった⁷⁵。

「クラウドの「富岳」化」は、「富岳」の開発成果であるソフトウェアをクラウド上で直接利用できる環境を整え、「富岳」の潜在的な利用者を含む幅広い利用者が「富岳」の成果を享受できるようにするアプローチである。R-CCSは、こうした構想を「バーチャル富岳」と呼び、クラウドサービス事業者大手のアマゾンウェブサービス（AWS）社と覚書を締結して「富岳」のアプリケーションをAWS社のクラウド環境に構築する取組を進めている⁷⁶。

III 次世代機の開発に向けて

1 ポスト「富岳」の開発に向けた検討

「富岳」の後継機（以下「ポスト「富岳」」）の開発に向けた検討のため、文部科学省の科

⁷³ 「4「富岳」の利用支援 4-1 利用支援」『富岳年報 2022』計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/fugaku-annual-reports/2022/4/1/>> R-CCSとRISTの連携については、前掲注(26)の聞き取りによる。

⁷⁴ 「富岳クラウドプラットフォーム」計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/fcp/>>

⁷⁵ 松岡聡「富岳クラウド的利用—試行的実施の成果と課題—」2022.3.16, pp.[7, 9]. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/content/20220415-mxt_jyohoka01-000021825_05.pdf>

⁷⁶ 「バーチャル富岳」計算科学研究センターウェブサイト <<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/virtual-fugaku/>>

学技術・学術審議会情報委員会の下に「次世代計算基盤検討部会」が設置され、2020（令和2）年11月に議論が開始されている⁷⁷。翌年8月、中間取りまとめとして議論の結果がまとめられ、「ポスト「富岳」時代の次世代計算基盤を、国として戦略的に整備することは必要不可欠」とされ、その実現のための方向性が示された⁷⁸。

2022（令和4）年度から、文部科学省は、ポスト「富岳」のシステム構成の検討や必要な要素技術の特定等を行うため、「次世代計算基盤に係る調査研究」を委託により実施している⁷⁹。

2 主要国におけるエクサ FLOPS 級スパコンの開発動向

米国、中国、欧州では、エクサ FLOPS 級のスパコンの開発が進んでいる。

米国では、エネルギー省が3機のエクサ FLOPS 級のスパコン「Frontier」、「Aurora」、「El Capitan」を開発している。このうち「Frontier」は、2022年5月に完成し、同年6月のTOP500において、世界で初めて1エクサ FLOPS 超のLINPACK性能（1.1エクサ FLOPS）を達成し1位となった。また、2023年6月には「Aurora」が完成し、同年11月のTOP500で「Frontier」に続く2位となった。「El Capitan」は2024年に完成予定とされる⁸⁰。

中国では、2機のエクサ FLOPS 級のスパコンが開発されている。そのうちの1機は、2013年6月以降、6期連続でTOP500の1位を獲得した「Tianhe-2」（天河二号）の後継の「Tianhe-3」（天河三号）である。もう1機は、2016年6月のTOP500において、中国製のCPUを使用した国産機として初めて世界1位となった「Sunway TaihuLight」（神威太湖之光）の後継の「Sunway OceanLight」（神威海洋之光）である。しかし、2023年11月時点において、これら2機はTOP500のリストに掲載されておらず、正確な性能は明らかにされていない⁸¹。

欧州では、EU や加盟国等が参加して欧州のスパコン技術を世界トップレベルとすることを目指すプロジェクト「EuroHPC JU」が2018年に発足した。このプロジェクトの下で、これまでに数百ペタ FLOPS 級のスパコン3機を含む8機のスパコンが開発されている⁸²。そして現在、エクサ FLOPS 級のスパコン2機を開発する計画が進められている。1機は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（JSC）に、もう1機はフランスの国立高機能計算推進機構（GENCI）に設置される予定である⁸³。

⁷⁷ 「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）について」前掲注(32)

⁷⁸ 科学技術・学術審議会情報委員会次世代計算基盤検討部会「次世代計算基盤検討部会中間取りまとめ」2021.8.27, pp.15-22. <https://www.mext.go.jp/content/20210913-mxt_jyohoka01-000017979_01.pdf>

⁷⁹ 文部科学省「令和4年度「次世代計算基盤に係る調査研究」公募要領」2022.5. <https://www.mext.go.jp/content/20220518-mext_jyohoka01-000022658_1.pdf>

⁸⁰ “Frontier supercomputer debuts as world’s fastest, breaking exascale barrier,” May 30, 2022. Oak Ridge National Laboratory Website <<https://www.ornl.gov/news/frontier-supercomputer-debuts-worlds-fastest-breaking-exascale-barrier>>; “Aurora Supercomputer Blade Installation Complete,” June 22, 2023. Intel Website <<https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/aurora-supercomputer-blade-installation-complete.html#gs.0x0yhm>>; “Road to El Capitan 1: It takes a village,” August 14, 2023. Lawrence Livermore National Laboratory Website <<https://computing.llnl.gov/about/newsroom/road-el-capitan-1>>; “NOVEMBER 2023,” *op.cit.*(15)

⁸¹ Depei Qian and Zhongzhi Luan, “High Performance Computing Development in China: A Brief Review and Perspectives,” *Computing in Science & Engineering*, vol.21 no.1, 2019.1・2, p.8. <<https://doi.org/10.1109/MCSE.2018.2875367>>; 「エクサスケール・コンピューティングへの中国の静かな旅」2023.10.2. HPCwire Japan ウェブサイト <<https://www.hpwire.jp/archives/78577>>

⁸² “Our supercomputers.” EuroHPC JU Website <https://eurohpc-ju.europa.eu/supercomputers/our-supercomputers_en>

⁸³ “JUPITER Technical Overview: A DEEP DIVE INTO JUPITERS BUILDING BLOCKS.” Jülich Supercomputing Centre Website <<https://www.fz-juelich.de/en/ias/jsc/jupiter/tech?expand=translations,fzjsettings,nearest-institut>>; “The Jules Verne Consortium Will Host the New EuroHPC Exascale Supercomputer in France,” 20 June 2023. EuroHPC JU Website <https://eurohpc-ju.europa.eu/jules-verne-consortium-will-host-new-eurohpc-exascale-supercomputer-france-2023-06-20_en>

3 スパコンの性能向上の限界と新たな計算原理の可能性

「トランジスタの集積密度は、コスト一定の下で18か月ごとに倍増する」という半導体産業の経験則（ムーアの法則）がある。スパコンを含むコンピュータは、この法則に沿うように多数のトランジスタを含むプロセッサを搭載することで性能を向上させてきた。しかし、近年は、微細加工技術の限界から、従来のような性能向上が困難になりつつあるとの指摘がある⁸⁴。

また、消費電力に起因する限界もある。現在のスパコンは、プロセッサを多数結合することで高い演算性能を実現しているが、使用するプロセッサの数が増えるほど消費電力は増加する。スパコンの電力効率はやears向上しているものの⁸⁵、全体の消費電力の制約がある中で、搭載するプロセッサの数を大きく増やすことは難しくなっている⁸⁶。

このように、従来技術の延長による演算性能の継続的な向上は望めなくなっている。他方、近年、量子コンピュータを始めとする、従来のコンピュータとは異なる原理で作動する計算機の研究も発展している。ポスト「富岳」の開発に向けた調査研究では、こうした新たな計算原理とスパコンを連携させることの可能性も検討されることとなっている⁸⁷。

おわりに

国家プロジェクトとしてのスパコン開発においては、最先端の技術を取り入れて高い性能を実現することだけでなく、開発されたスパコンが幅広い分野で有効に活用される仕組みを整えることも求められる。

その点で、R-CCSは「富岳」の利用拡大に向けた取組を進めているが、制度に起因する課題もある。例えば、共用施設である「富岳」を利用するには、共用促進法により、利用目的に科学技術に関する試験、研究、開発の要素が含まれることが必要とされる（第1条）。そのため、企業は、それらの要素を含まない商用目的では「富岳」を利用することができない。また、企業としては、自社が想定する利用内容が、共用促進法が規定する試験、研究、開発に該当するか否かの判断が難しく、「富岳」の利用を躊躇（ちゅうちょ）することもあるとされる。こうした制約が、産業界における「富岳」の利用の障壁になっているという⁸⁸。

現在、スパコン開発は新たな局面に差し掛かっていると言える。見え始めた従来技術の限界にいかに対処するか、また、新たな技術をいかに取り入れていくかは、今後の日本の科学技術や産業における競争力にも影響し得る課題である。そして、スパコンの利用については、分野の広がりやニーズの高まりに対応した、より効果的な仕組みの実現が期待される。

⁸⁴ 井上敬介「「ムーアの法則」の進化についての一考察」『研究技術計画』35(2), 2020.8, pp.263-276. <https://doi.org/10.20801/jsrpim.35.2_263>

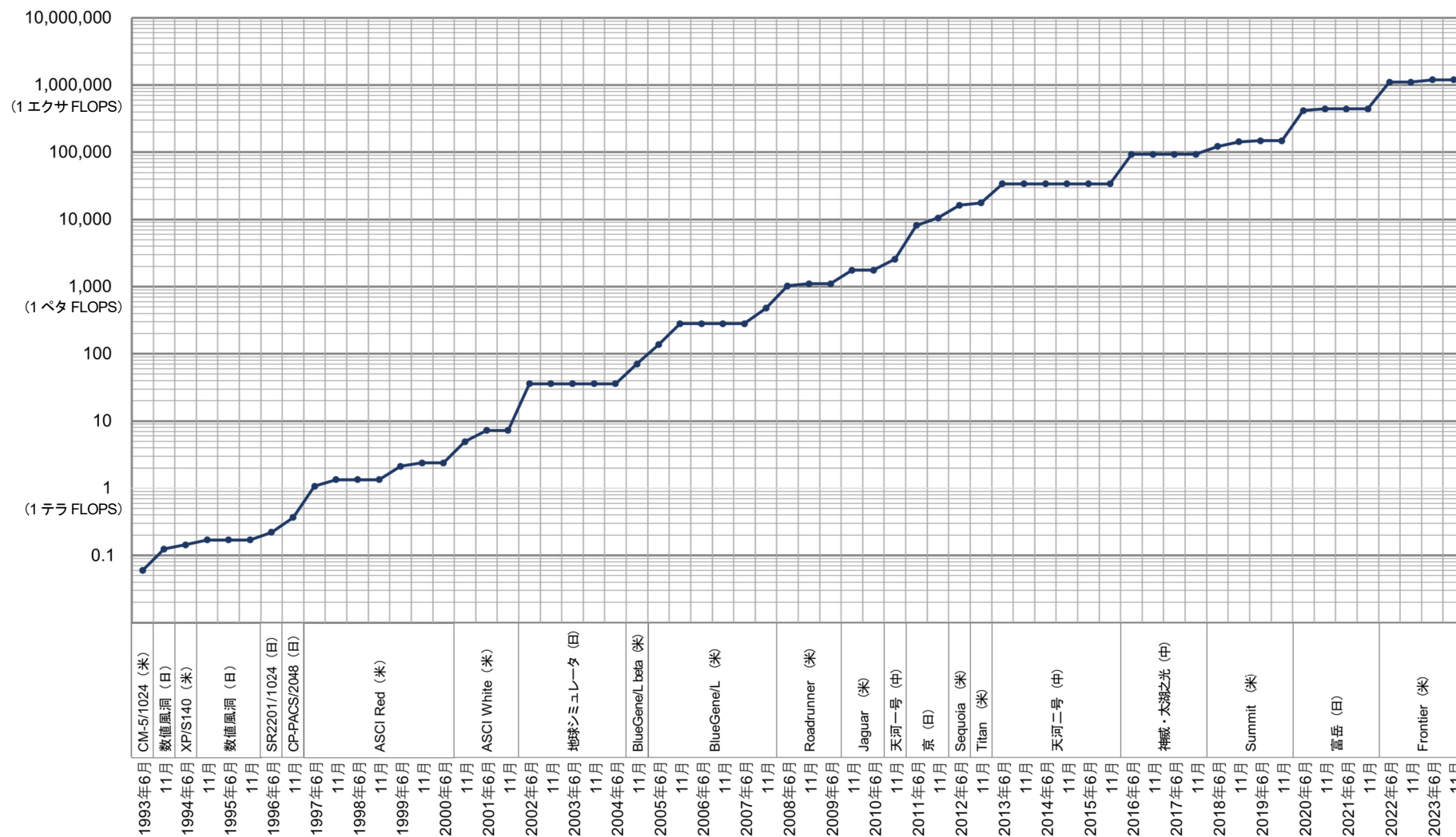
⁸⁵ 例えば、「京」（LINPACK 性能 10.5 ペタ FLOPS、消費電力 12.7 メガ W）から「富岳」（LINPACK 性能 442 ペタ FLOPS、消費電力 29.9 メガ W）で、演算性能は約 42 倍になった一方、消費電力は約 2.4 倍程度に抑えられた。

⁸⁶ 佐藤 前掲注(14), p.24.

⁸⁷ 文部科学省 前掲注(79), p.14.

⁸⁸ 前掲注(26)の聞き取りによる。

巻末図 TOP500 で 1 位となったスパコンの LINPACK 性能の推移（単位：テラ FLOPS）



(出典) “TOP500.” TOP500 Website <<https://www.top500.org/lists/top500/>> を基に筆者作成。