

「京」の後の時代を支えるスパコン

# ① 日本のスーパーコンピュータの現在の状況と今後



朴 泰祐 | 筑波大学計算科学研究センター      田浦健次郎 | 東京大学情報基盤センター

## 「スーパーコンピュータ」とは何か？

今や「スーパーコンピュータ」という言葉は一般に知れ渡り、特に国家フラッグシップマシンとしての「京」コンピュータの誕生以来、マスコミ等でも取り上げられることが増えた。しかし、そもそもスーパーコンピュータとは何なのか、どのように定義されるか、という点から解説を始めたい。なお、以下、本稿では誌面節約のため、一般的に使われている略称「スパコン」を使うことにする（不本意ではあるが）。

スパコンは一般的なコンピュータ、たとえばノートPCやデスクトップPCと何が異なるのか？一言で言えば、「演算能力・メモリ性能・メモリ容量・ネットワーク性能・ディスク容量といった、コンピュータの基本的な構成要素がすべて桁違いに大きかったり高速だったりする『スーパーな』コンピュータ」である。時代でいえば、1970年代初頭（当時はまだパーソナルコンピュータもなかった）に、当時の大型計算機の性能をはるかに上回る、特に科学技術計算の性能（浮動小数点の数値計算）がきわめて高い特殊な計算機として製造された。当然、一般的な計算機とは作りが異なり、複雑な浮動小数点演算を高速に処理するためのパイプライン処理や並列処理技術が導入されており、また一般的なユーザを対象としていないことから販売台数も限られ、非常に高価なシステムであった。現在のスパコンの構成（アーキテクチャ）はさまざまな方式があり多岐に

渡るが、それらについては本稿の各章で詳しく述べられている。

## スパコンの性能と高性能計算

スパコンは一般的なコンピュータに比べ何が「スーパー」なのか、先述したようにさまざまな尺度があり得るが、最も重要なのは「浮動小数点演算性能」である。Floating-point Operations Per Second を略し、FLOPS（フロップス）と呼ばれる単位で示される。1秒間に浮動小数点演算1回を処理できれば1FLOPSということになる。

通常のPCには汎用CPUが備わっているが、こういったCPUのFLOPS値は1CPUあたり数～十数GFLOPS程度である。ここでGは「ギガ」のことで $10^9$ である。コンピュータの演算性能やメモリ容量は非常に大きいため、補助単位としてM, G, T, P等が使われる。それぞれ「メガ ( $10^6$ )」「ギガ ( $10^9$ )」「テラ ( $10^{12}$ )」「ペタ ( $10^{15}$ )」と呼ぶ。

では、現在の世界トップレベルのスパコンの性能はどれくらいだろうか。TOP500リスト<sup>1)</sup>と呼ばれる、世界のスパコンの性能ランキングの一覧があり、毎年6月と11月に更新される。歴史は古く、25年以上の間、リストの更新が続けられている。TOP500リストにおけるスパコンのランキングは、「理論的に達成可能な最高性能（理論ピーク性能）」ではなく、大規模連立一次方程式をガウス

の消去法に基づいて解いた場合の FLOPS 値を求めるベンチマーク、「LINPACK」によって決定される。図-1に、2019年6月のTOP500リストから得られるスパコンの性能向上グラフを示す。横軸は年代、縦軸はFLOPS値であるが、対数スケールのFLOPS値がほぼ直線的に伸びていることで、いかに性能向上が凄まじいかがうかがえる。3つの線は「第1位」「第500位」「1位から500位までの性能の総和」を表している。本稿のいくつかの章で述べられているように、現在のスパコンは超並列方式と呼ばれ、CPUを千台～百万台規模で集約した構成を取る。さらに、各CPUの性能が一般的なそれに比べきわめて高く、それらの技術の集大成がこの性能をもたらしている。

このようにきわめて高いスパコンのFLOPS性能はなぜ求められるのか？ 現在、さまざまな分野での高精細シミュレーションが日常的に行われている。一例として数値気象予報を挙げる。3次元空間上の空気の流れはNavier-Stokes方程式と呼ばれる偏微分方程式で表されるが、これを解析的に解くことは難しい。そこで、空間を細かい「網の目」(メッシュ)に区切り、その各点における気圧や温度等の物理的変数を数値化し、これを数値積分によって解くことで気圧の変化や、雲の元となる水分子の密度等を詳細にシミュレーションすることができる。もう1つの例として、宇宙における銀河のシミュレーションでは、引力や化学反応等の現象を方程式で表現し、これを数値的に計算することで銀河の成り立ちやビッグバン後の星の形成等を数値的に再現する。いずれの場合も、詳細なシミュレーションのためには膨大な量の数値計算が必要で、浮動小数点を用いる必要がある。さらに、演算精度に関しても倍精度浮動小数点(64bit)が求められる場合も多い。

このような数値シミュレーションに求められるFLOPS値はきわめて高く、これを実用的な時間(明日の天気予報に3日間かかっては困る!)で処理するためにはスパコンが必要なのである。このような数値計算に基づく科学・工学を「計算科学」「計算工学」と呼ぶ。そして、このような高い演算能力を求めるアプリケーション分野を支える、ハードウェア技術からアプリケーション性能チューニング技術までをまとめて、広く「高性能計算(HPC: High Performance Computing)」と呼ぶ。なお、Computer Scienceという言葉は計算機科学(計算機のための科学)と訳されるが、計算科学の英語はComputational Scienceであり、「計算機によって推進される科学」という意味になる。

また、近年では、従来からあるこのような浮動小数点演算に基づくアプリケーションだけでなく、AI(人工知能)研究の現実的手法としての深層学習(Deep Learning)等にもスパコンが多用されており、その役割はますます広がっている。

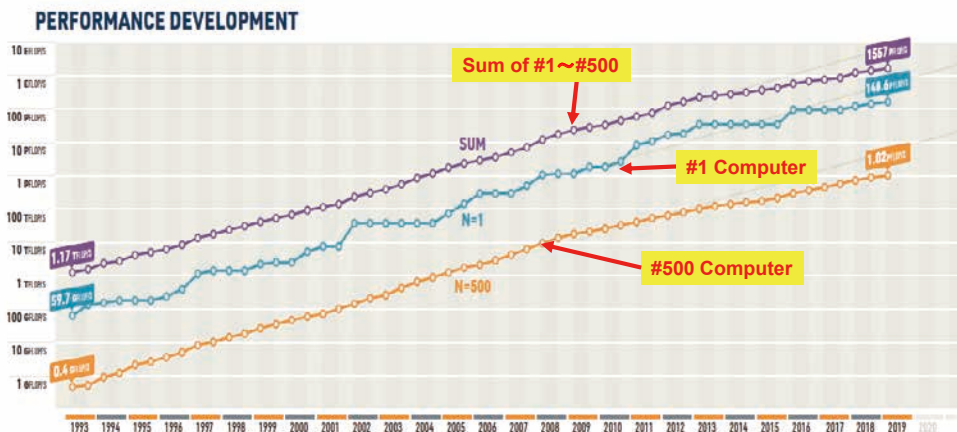


図-1 TOP500 リストにおけるスパコン性能の変遷

## 日本におけるスパコンの配置

TOP500 リストにおける日本のスパコンの位置付けは当然気になるところだが、その前に日本におけるスパコンの配置について概説する。従来、スパコ

ンはきわめて高性能かつ高価な特殊な計算機である。したがってこれを配備してユーザに提供するのは一般の計算機センターには難しく、国内でも有数の計算センターに設置されている。国家プロジェクトによるフラッグシップスパコンとして構築された「京」コンピュータは、世界初のLINPACK性能10PFLOPSを達成したマシンである（「京」の意味の1つが $10^{16}=10$ ペタであった）。「京」の運用母体は神戸にある理化学研究所・計算科学研究センター（「京」完成時点の名称は計算科学研究機構）であり、文字通り日本最高性能のスパコンを有するセンターである（以下、R-CCSと略す）。

このように理研のR-CCSは特別であるが、これ以外に9つの国立大学（北大、東北大、筑波大、東大、東工大、名大、京大、阪大、九大）のそれぞれに大規模計算センターまたは情報基盤センターと呼ばれる計算センターがあり、それぞれが1台以上のスパコンを管理運用している。それ以外に、いくつかの国立研究所がスパコンを管理運用している。そのほとんどは文部科学省の組織であるが、経済産業省組織として産業技術総合研究所がABCi（AI Bridging Cloud Infrastructure）システムを管理運用しており、2019年6月時点でこのマシンがTOP500リストにおける国内最高性能スパコンである。また、かつて世界最高性能スパコンであった「地球シミュレータ」を保有していた海洋研究開発機構（JAMSTEC）等もある。さらに、これら以外に比較的小規模のスパコンを有する大学および研究所が存在する。

各センターはそれぞれ独自のスパコン共用プログラム（どのように利用者を募集・選定・資源配分するか）を持っており、多くは有償利用であるが、一部のセンターおよびプログラムでは一定の条件下で無償での利用も提供している。また、一般的な科学技術研究のほかに企業向けの利用も促進している場合が多い。

## HPCI～スパコンの共用に関する枠組み

R-CCSの「京」コンピュータは2019年8月中旬に運用が終了したが、それまではナショナルフラッグシップマシンとして国内における中心的存在であった。また、前述した9つの国立大学法人のスパコンセンターでは全国のスパコンを必要とするさまざまな分野の科学・工学研究者や企業の研究者を対象とし、スパコンを共用するためのプログラムが用意されている。

現在、国内の主要スパコンは超高速ネットワークで結ばれ、さらに大容量の共有ファイルシステムに接続され、ユーザが複数のスパコンを効率的に利用する仕組みが用意されている。その基本となるのが文科省が運用する「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：High Performance Computing Infrastructure）」である。

日本におけるHPCIの生い立ちにはある特殊な経緯があった。「京」コンピュータの開発が進む中、2009年11月13日（金）に行われた事業仕分けにおいて、ナショナルフラッグシップマシンである同システムの開発が凍結されそうになった。しかし、その後の議論で「一部の特定の研究者だけのスパコンではなく、国内の多数の研究者が使えるものにする」という方向が示され、結果として広い研究分野に跨る多数の研究者にとって使いやすいスパコンの開発とその利用ネットワークを構築するという計画が持ち上がった。この基本となる枠組みがHPCIである。この経緯およびHPCI誕生に至る文科省での議論については文献2)を参照されたい。

結果として、HPCIは日本のスパコン資源の共用、その位置付け、さらに今後のスパコンの開発にまで関係する重要な枠組みとなっている。HPCIは単にスパコン同士をつなぐネットワークではなく、東西の2拠点にそれぞれ巨大な共用ファイルシステムを整備し、HPCIに属するすべてのスパコンのユーザがこれを利用できる仕組みになっている。また、ス

パソコン間のログインやジョブ実行、さらにファイル共有を容易にするシングルサインオンの仕組みも提供されている。

HPCIは文科省が運営しているが、その基本的な考え方や運用はスパコンを提供する組織とスパコンを利用するユーザコミュニティの双方の議論によって進められる。これを束ねる組織として「HPCIコンソーシアム」が設立され、その下に各種部会、またHPCIに属するスパコン提供機関を中心とする「HPCI連携サービス委員会」が組織され、HPCI関連組織間の調整やスパコンの利用状況等の情報整理を行っている。

「京」コンピュータはもちろん、9つの国立大学のセンターのスパコン、さらにいくつかの国研のスパコンがHPCIにリソースを提供している。しかし、これらのスパコンのすべてのリソース（CPU時間）がHPCIに供出されているわけではなく、それぞれのセンターは独自の利用プログラムとHPCIの下での利用を併用している。HPCIでは年1回（「京」に関しては年2回）の利用申請を受け付け、計算科学・計算工学上の重要な研究のためにスパコン資源が提供される。このスパコン利用は一部を除いて無償である。その代わりに、全申請は書類および合議による審査にかけられ、その科学的重要性やスパコン利用計画の妥当性等が審議され、最終的なリソース量が決定される。HPCIの利用プログラムでは、申請プロジェクトはHPCI下の複数のスパコンを利用することも可能であり、HPCIの共用ストレージはこういったスパコンの連携利用で大きな威力を発揮する。また、大規模シミュレーションではその計算結果のデータ量も膨大になるため、プロジェクト遂行期間にデータを保存することも共用ストレージの重要な役割である。

## 「富士山」と「八ヶ岳」

「京」コンピュータはナショナルフラッグシップ

スパコンであり、その利用はHPCIを中心として行われてきた。一方、国立大学を中心とするスパコンの設置は、基本的に各大学のポリシーに委ねられており、どの程度の予算および規模のマシンを、どのようなアーキテクチャに基づいて構築するかは各大学によって決められている。本稿の以降の章では、代表的なスパコンアーキテクチャについて詳しく述べられているが、そのようなバラエティに富む多種に渡るスパコンを利用できるのもHPCIの強みといえる。

「京」コンピュータ、そして現在開発中の次世代のナショナルフラッグシップスパコンである「富岳」（名称が確定するまでは『ポスト「京」コンピュータ』と呼ばれていた）は国内で唯一のフラッグシップであり、いわば孤立峰である「富士山」のような存在であるといえる。これに対し、それ以外の国立大学等のHPCI下のスパコン群は、さまざまな個性やサイズのマシンが混在していることから「八ヶ岳連峰」のような存在と考えることができる。八ヶ岳という山は存在しないが、さまざまなスパコン群が1つの集合としてHPCIの下に束ねられている状況をなぞらえてこのように呼ばれている（その意味で、ポスト「京」コンピュータに「富岳」という名称が付けられたことはきわめてストレートであるといえる）。

日本の計算科学・計算工学の発展にとって、富士山と八ヶ岳連峰はどちらも重要である。「京」コンピュータや「富岳」は1台しかなく、いかにその絶対的性能が高いとはいえ、多数のユーザが共用することでユーザあたりの資源量には限りがある。また、アプリケーションによっては演算加速装置（GPU等）が効率的に利用でき、「京」コンピュータ並みの計算をよりコンパクトなシステムで実行できる可能性もある。したがって、両者はともに重要なのである。

HPCIではフラッグシップマシン以外のスパコン群を「第二階層（Tier-2）」と呼んでいる。これはそれらのマシンが「京」コンピュータより下位にあ

るという意味ではなく、便宜上「京」と区別するためにそう呼ばれているだけである。先述したように、第二階層スパコン群は各運営組織のポリシーで導入されるが、それぞれはHPCIを支える重要な計算資源である。そこで、文科省では第二階層の各スパコンを運用する組織に情報を求め、今後の国内におけるスパコンの配備計画をまとめている。各組織は、今後数年間のスパコンの入れ替え計画を性能(FLOPS)や予想消費電力、さらにどのようなアーキテクチャで進めるかといった情報を共有しており、この情報は一般にも公開されている。表-1に2019年9月現在でHPCIに資源を提供している第二階層スパコンの一覧を示す。なお、1大学が複数のシステムを提供している場合もあり、この表では代表的なシステム(最大性能のもの)を示している。

第二階層のシステム群は「京」コンピュータに比べ一見、下位に位置づいているように見える。しかし、実際には「京」の利用を希望するユーザは非常に多く、また「京」の全資源がHPCI向けに提供されているわけでもない。また、2019年8月に運用を停止した「京」の性能を上回るシステムも複数存在している。このため、HPCIプログラムは「京」と第二階層が支え合いながら進められており、ど

らの階層も重要な資源である。実際、2019年8月に「京」コンピュータが運用終了し、その後「富岳」が実用になるまでの間、八ヶ岳連峰、すなわち第二階層スパコン群の役割は非常に重要になるのである。

## 日本のスパコンの今後

次期ナショナルフラッグシップスパコンであるポスト「京」コンピュータ＝「富岳」は2021年度から本格運用される計画で、そのときにはもちろんHPCIプログラム等を通じて最先端・超大規模シミュレーションに供されるだろう。「富岳」はすでにその設計を終え、ハードウェアの構築やシステムソフトウェア、さらにアプリケーションソフトウェアの開発が急ピッチで進められている。

一方、第二階層スパコン群も前述のような形で各組織での配備が計画されている。これらのスパコンはフラッグシップマシンとは異なり「一から作成」しているわけではない。しかし、プロセッサや演算加速装置に何をを用いるか、並列処理ネットワークはどうするか、ストレージはどうするか等、幅広い設計点があり、各組織のポリシーが大きく反映されたものとなる。図-2に、2019年7月時点での第二階層スパコン群の導入計画の一覧を示す。もちろん、

これは各組織における現時点での計画であり、必ずしもその通りになる保証はない。しかし、日本のスパコンの今後の発展に対する一定の指標を与えるものであることは確かである。

HPCIでは、今後の日本のスパコン開発がどのような形で進められるべきであるという「提言」も行っている<sup>3)</sup>。あくまで提言であるため、これが国のスパコン開発に直接反映されるわけではないが、有識者による重要なメッセージであることは間違いない。

「富岳」を始めとするスパコンは超並

表-1 現在運用中のHPCI一般利用課題で利用できる第二階層システム(複数のシステムを提供している機関については最大性能のものを掲示)

大学/機関	マシン名称	プロセッサ アーキテクチャ	プロセッサ型番
北海道大学	Grand Chariot	マルチコア	Intel Xeon
東北大学	SX-ACE	ベクトル演算加速	NEC SX-ACE
筑波大学	Cygnus	GPU+FPGA	NVIDIA Tesla V100 + Intel Stratix10
JCAHPC (筑波大学 + 東京大学)	Oakforest PACS	メニーコア	Intel Xeon Phi
東京大学	Oakbridge-CX	マルチコア	Intel Xeon
東京工業大学	TSUBAME 3.0	GPU	NVIDIA Tesla P100
名古屋大学	PRIMEHPC FX100	マルチコア	富士通 SPARC64 XIfx
京都大学	Camphor 2	メニーコア	Intel Xeon Phi
大阪大学	OCTOPUS	GPU	NVIDIA Tesla P100
九州大学	ITO サブシステム A	マルチコア	Intel Xeon
海洋研究開発機構	地球シミュレータ	ベクトル演算加速	NEC SX-ACE

列方式を取っており、きわめて高性能な演算装置を数千～百万という単位で集約して構成される。今後のさらなる性能向上を目指すとき、単体の演算装置の性能の限界や消費電力の限界、そしてその結果としての電力あたり性能の限界、さらにネットワーク結合における台数の限界等、あらゆる面でこれまで以上に厳しい条件が見えてきている。特に、いわゆる「ムーアの法則」と呼ばれる半導体微細加工技術の限界や、大規模システムの部品点数から来る耐故障性の問題等、さまざまなチャレンジが待ち受けている。

それでも、スパコンと高性能計算の研究者たちはその性能はさらに向上すると信じている。すでに世界最高性能スパコンの性能は100PFLOPSを超えており、当然次の目標は1EFLOPS (Exa-FLOPS)ということになるが、これが時間の問題であることは疑いようがない。しかし、その先、すなわち「post-Exa」時代のスパコンがどのような技術に

よって構築されるのか、あるいはそもそも本当に可能であるのかについては現時点ではほぼ未知数といえる。それでも研究は進められ、新しい技術による革新が起きることに大いに期待したい。

参考文献

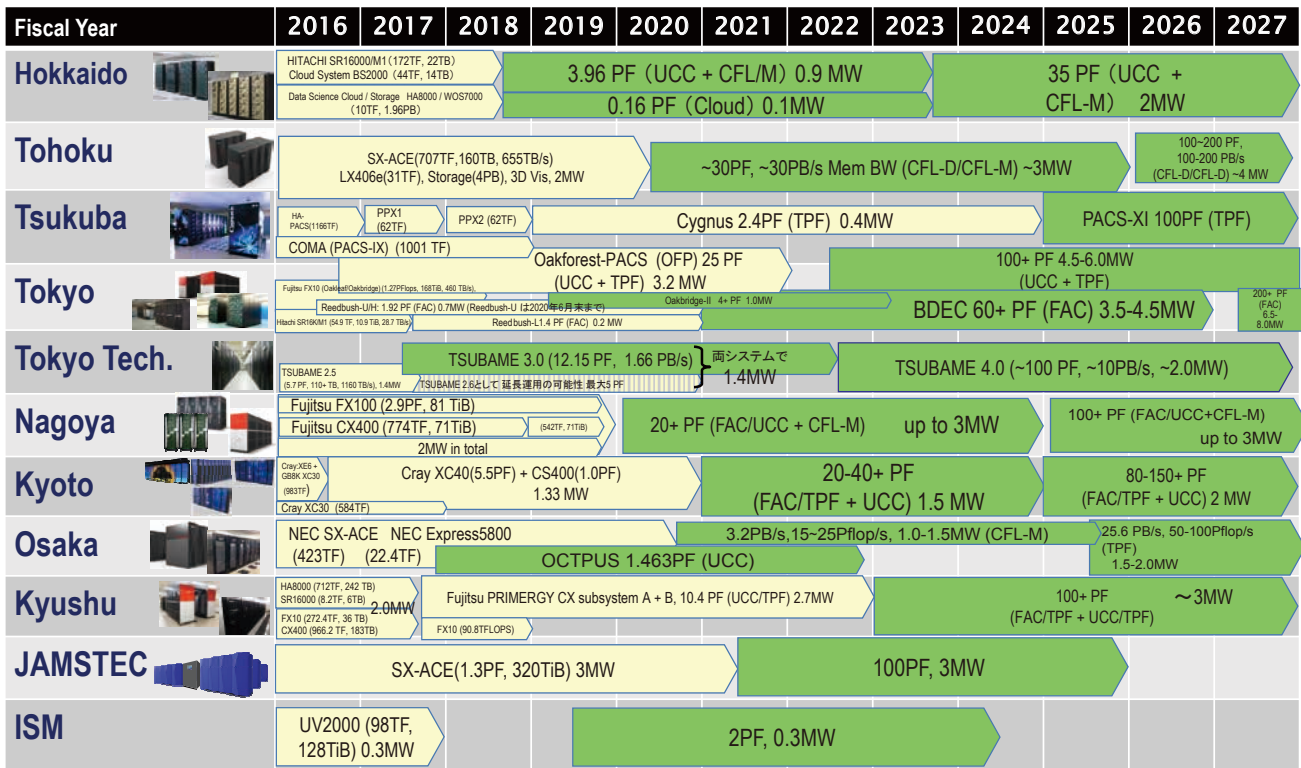
- 1) <http://www.top500.org>
- 2) 衆議院決算行政監視委員会における行政監視に基づく事業の見直しに関する対応状況について、[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/kaihatu/jouhou/1325199.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/1325199.htm)
- 3) ポスト「京」による成果創出に向けた提言、[https://www.hpci-c.jp/news/file/190624\\_HPCIC\\_teigen\\_01.pdf](https://www.hpci-c.jp/news/file/190624_HPCIC_teigen_01.pdf) (2019年8月28日受付)

朴 泰祐 (正会員) taisuke@ccs.tsukuba.ac.jp

慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了、工学博士 (慶應義塾大学)。現筑波大学計算科学研究センター長、同大学院システム情報工学研究科 教授。現HPCI連携サービス委員会委員長。超並列アーキテクチャ、相互結合網、クラスタ計算に興味を持つ。2011年ACM GordonBell賞共同受賞。IEEE、ACM各会員。

田浦健次朗 (正会員) taura@itc.u-tokyo.ac.jp

東京大学情報基盤センター長、同大学院情報理工学系研究科 教授。並列計算、分散計算、高性能プログラミング言語やその実装などに興味を持ち、効率的なスレッド処理系、負荷分散、自動ゴミ集め、分散計算基盤の構築などに取り組む。ACM、IEEE各会員。



電力は最大供給量 (空調システム含む)

図-2 HPCI 第二階層システムにおけるシステム配備計画