

高性能コンピュータ技術の発展と今後の動向

Progress and Future Trends in High-Performance Computer Technology

青 木 優

- I. はじめに
- II. 高性能コンピュータ技術の変遷
- III. 各国の高性能コンピュータ事情
- IV. 次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト
- V. 高性能コンピュータ技術の今後の動向
- VI. まとめ

I. はじめに

近年、高性能コンピュータ技術の進歩に伴い、科学技術計算やコンピュータ・シミュレーションが、自動車、船舶、航空機、高層ビル、原子力、材料開発、生命科学研究、医療などの様々な産業分野の発展に寄与している。これらの科学技術計算やコンピュータ・シミュレーションは、理論や実験と並ぶ第3の研究開発手法として、今や企業の国際競争力を強化する為に必要不可欠となっている。

大規模な科学技術計算やコンピュータ・シミュレーション等に用いられる超高性能コンピュータを「スーパーコンピュータ」(略して「スパコン」)と呼ぶが、コンピュータの性能が年々向上する為、それを定義することは難しい。そこで、一般的に使用される家庭用コンピュータよりも演算速度が少なくとも1000倍以上速いコンピュータを「スーパーコンピュータ」と呼んでいる¹⁾。国家プロジェクトとして開発されたスパコン「京(けい)」が、2011年に世界最速のコンピュータとして認定されたことは未だ記憶に新しいが、その後、スパコン「京」を用いて、創薬、地震・津波、気象、宇宙、ものづくり、材料開発など幅広い分野で成果が出ている。

近年、製造業に於いては、CAD (Computer Aided Design)、CAE (Computer Aided

Engineering)、CAM (Computer Aided Manufacture)、NC (Numerical Control)旋盤、マシニングセンタ、3Dプリンタ等を用いた製造業に於ける製造プロセスのデジタル化が進んでおり、これを「デジタルファブリケーション」、または「デジタル製造革命」と呼ぶ。様々な製造工程をデジタル化し、コンピュータで設計・管理することにより、更にコスト削減が可能となり、国際競争力強化に繋がる。製品の設計段階で高性能コンピュータによる科学技術計算やコンピュータ・シミュレーションを用いることにより、更なるスピードアップやコストダウンが期待できる。また、日本企業が築き上げてきた垂直統合型の製造形態は、現在では国際競争力を失ってしまっているが、デジタル製造革命では垂直統合型の製造が向いているとも言われており、デジタル製造革命の発展次第では、日本の製造業が復活する可能性もある。

高性能コンピュータ技術の進歩が様々な産業分野の発展に寄与している具体的な事例として、自動車産業を取り上げてみる。従来、自動車の開発は、自動車のボディや部品の形状を変え、試作品を作り、風洞実験を行うことにより製品開発を進めてきた。しかし、この作業を何パターンも繰り返すのは、非常に時間とコストが掛かる。これらの作業を全てコンピュータ・シミュレーションで行い、最終的に選ばれたものをだけを試作し、風洞実験をおこなえば、製品開発の時間短縮とコス

¹⁾ 辛木哲夫『次世代スパコン「エクサ」が日本を変える！「京」は凄い、“その次”は100倍凄い』、小学館、(2014年)、pp.17.

トダウンに繋がり、延いては国際競争力強化に繋がる。

具体的な事例の二つ目として、医薬品産業を取り上げる。一般的に、薬を開発するとは、まず病気の原因となっているタンパク質を見つけ出し、その構造をX線回折によって原子レベルで明らかにする。そして、そのタンパク質の機能を阻害する為、それに結合する化合物を探索する。しかし、化合物は 10^{60} 種類以上もあり、すべての化合物について薬としての効果を実験的に調べることは不可能である。しかも、化合物の形状が合うだけでなく、タンパク質との結合の強さを正確に求めることは容易ではない。そこで、コンピュータを用いた量子化学計算²⁾によって電子レベルの計算を行うことにより、病気の原因となるタンパク質と薬の候補となる化合物の結合の強さを高精度で求め、薬の候補として最も有力な化合物を探し出すのである。これは、コンピュータ内での創薬方法であることから、「インシリコ創薬」と呼ばれている。実際、インフルエンザの薬として知られるタミフルも、こうして設計されている。それでもまだ、新しい薬を創るには何年もの時間を要している。

人間の体の60%は水であり、タンパク質は水の中で働いている。したがって、タンパク質の周りに多くの水分子を配置してコンピュータ・シミュレーションを行うことにより、より現実に近い創薬が可能となる。この方法は、スパコン「京」が登場する以前に国内最速だったスパコン「地球シミュレータ」でも数ヶ月を要する計算であり、これまでは現実的ではなかった。しかし、スパコン「京」の登場により、数日で計算結果を得られるようになった。実際、スパコン「京」によって、薬の開発期間2年～3年が1年～1.5年と半分になり、成功確率も2500分の1が10分の1～100分の1と数十倍から数百倍になり、開発費については約200億円が数億円～数十億円となっている³⁾。現代では、生涯でがんに罹患

する確率は、男性53%、女性41%である。今後、更にスパコンの処理速度が向上すれば、副作用の少ないがんの特効薬が開発される可能性が高まる。

量子化学計算は、スパコンを利用することにより、医薬品開発だけではなく、様々な材料開発にも適用可能であり、非常に大きな成果をもたらすことができる。コンピュータやナノテクノロジーの進歩と共に、量子化学計算で物質設計をおこない、ナノテクノロジーで思い通りの物質を開発可能となってきた。今後は、更なるコンピュータの発展と共に、様々な産業分野での活用が広がると予想される。例えば、今後のエネルギー問題や地球環境問題を考える時、太陽光発電などの再生可能エネルギー技術、蓄電技術、送電技術などの進歩は非常に重要である。これら技術の進歩は、材料の進歩に依存するところが非常に大きい。しかし、これら材料の開発は、非常に時間とコストが掛かる。そこで、量子化学計算によって、時間短縮とコストダウンをし、さらに技術の進歩を加速するのである。

量子化学計算分野では、今までに次の二つのノーベル化学賞が授与されており、量子化学計算が人類の発展に寄与していることを示している。最初の受賞は、1998年、ジョン・ポーブルとウォルター・コーンの「化学物質の性質や反応過程の量子化学理論（第一原理計算理論）の構築への貢献」である。二つ目の受賞は、2013年、マーティン・カープラス、マイケル・レビット、アリー・ワーシエルの「複雑化学系を計算する為のマルチスケール・モデル（QM/MM（Quantum Mechanics/Molecular Mechanics）法）の開発への貢献」である。このQM/MM法は、コンピュータによってタンパク質などの複雑な分子の化学現象を解明する為の量子化学計算的手法の一つとして広く用いられており、今後、生体反応メカニズムの解明や創薬の分野で更なる応用が期待されている。

コンピュータ産業の発展は、どの国に於い

2) 量子化学計算とは、物理学や化学の第一原理から物質の構造や性質を計算によって求める手法である。

3) 奥野恭史,「スパコン「京」が拓く医薬品開発の未来～速い安い旨い薬づくり～」, K computer Symposium 2013, (2013年) .

でも重要である。コンピュータ産業の発展のレベルが、その国の様々な分野の発展のレベルと言っても過言ではない。このようにコンピュータ産業は社会、経済、学術など様々な分野に大きな影響を与えている。コンピュータは研究者や技術者の独創的なアイデアを現実のものにする可能性を秘めており、企業の国際競争力の強化に繋がるのである。

本論文では、今までの高性能コンピュータ技術の進歩、及び各国の高性能コンピュータ事情について述べると共に、現在の高性能コンピュータ開発の現状と課題、そして今後の動向について様々な情報を基に考察を行う。

II. 高性能コンピュータ技術の変遷

高性能コンピュータ技術の変遷について考える時、「TOP500」⁴⁾に蓄積されたデータは、最も重要なデータの一つである。「TOP500」は、スパコンの処理性能の高い順に500位までを、毎年6月と11月に2回公表している。この処理性能を調べるベンチマーク・ソフトウェアには、米国アルゴンヌ国立研究所に於いて、当初はFORTRANライブラリとして開発されたLINPACK⁵⁾が用いられ、線型方程式を解く速度を測定することにより、浮動小数点演算性能を評価している。また、「TOP500」には、処理性能だけでなく、様々なデータが掲載されている。

最初にスパコンのアーキテクチャの変遷について述べる。図1は、1993年から2014年までの「TOP500」に於けるスパコンのアーキテクチャ別シェアの変遷を示す。スパコンが登場してから1980年代まではシングルプロセッサの時代であったが、徐々にマルチプロセッサのスパコンが現れ、1996年頃までには、「TOP500」に入るスパコンは全てマルチプロセッサとなっている。Constellationsは、Sun Microsystems社製であったが、同社は、2010

年にオラクルに吸収合併された為、その後「TOP500」からは消えている。SMP (symmetric multi-processing : 対称型マルチプロセッシング) 型は、1台のコンピュータ内に於いて、CPU を並列に並べ、一つのメモリ、一つのOS、一つのアプリケーションを共有する方式である。しかし、このSMP型スパコンも2002年頃には消えている。現在ではMPP (massively parallel processor : 超並列コンピュータ) 型とクラスタ型のスパコンが主流となっている。MPP型は、1台のコンピュータ内に於いて、CPU を並列に並べ、各CPUに、メモリ、OS、アプリケーションソフトを搭載する方式である。また、クラスタ型は、複数台のコンピュータを、多数、並列に結合させる方式である。

次に、図2に1993年から2014年までの「TOP500」に於けるスパコンの半導体メーカー別シェアの変遷を示す。以前は各スパコンメーカーが半導体も製造していたが、現在では必ずしもそうではなく、Intel、AMD、IBMの米国3社でシェアのほぼ全てを占めている。また、図1と比較すると、Intel社のシェアが広がった時期とクラスタ型スパコンのシェアが広がった時期がほぼ一致している。これは、クラスタ型スパコンに使用されている半導体の多くがIntel社製であることを示している。

図3は、1993年から2014年までの「TOP500」に於けるスパコンの施設別シェアの変遷である。研究機関や教育機関に於ける利用はやや減少傾向にあるが、産業に於ける利用は1994年と比較して2014年には2倍近くに拡大している。これは、スパコンによるコンピュータ・シミュレーションや高精度科学技術計算が、産業の発展に寄与している証である。今後も更に広い産業分野での利用が予測される。

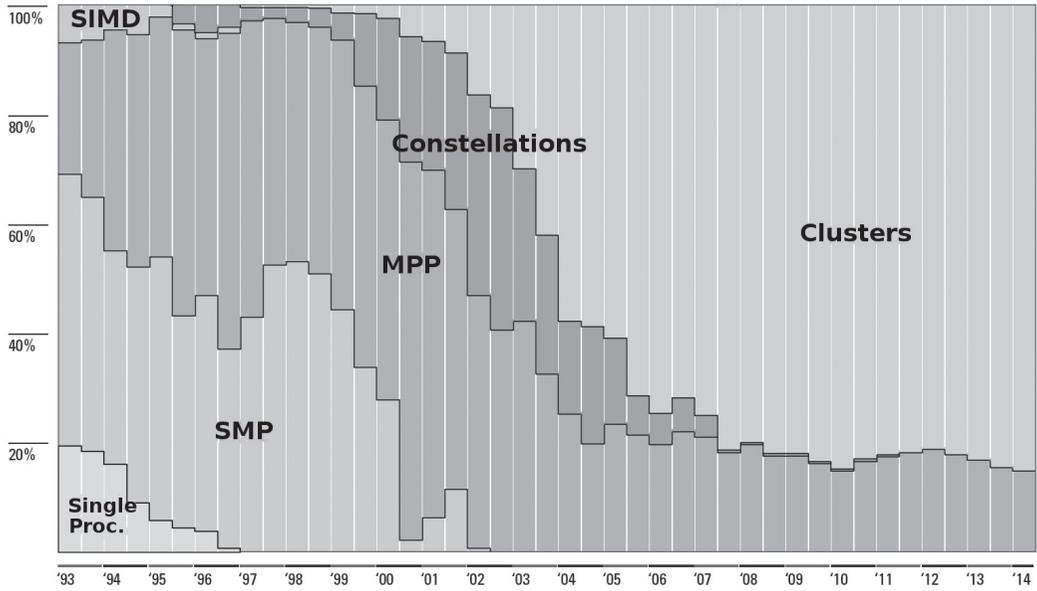
図4は、1994年から2012年までの「TOP500」に於けるスパコンのOS (Operating System : 基本ソフト) 別シェアの変遷を示す。1998年頃までは、大型コンピュータ向けOSのUnixが主流であったが、それ以降は家庭用コンピュータにも使用可能なLinuxが主流となっている。また、図1と比較すると、Linuxのシェアが広がった時期とクラスタ型スパコン

4) TOP500, <http://www.top500.org>

5) Linpack, <http://www.netlib.org/linpack/>

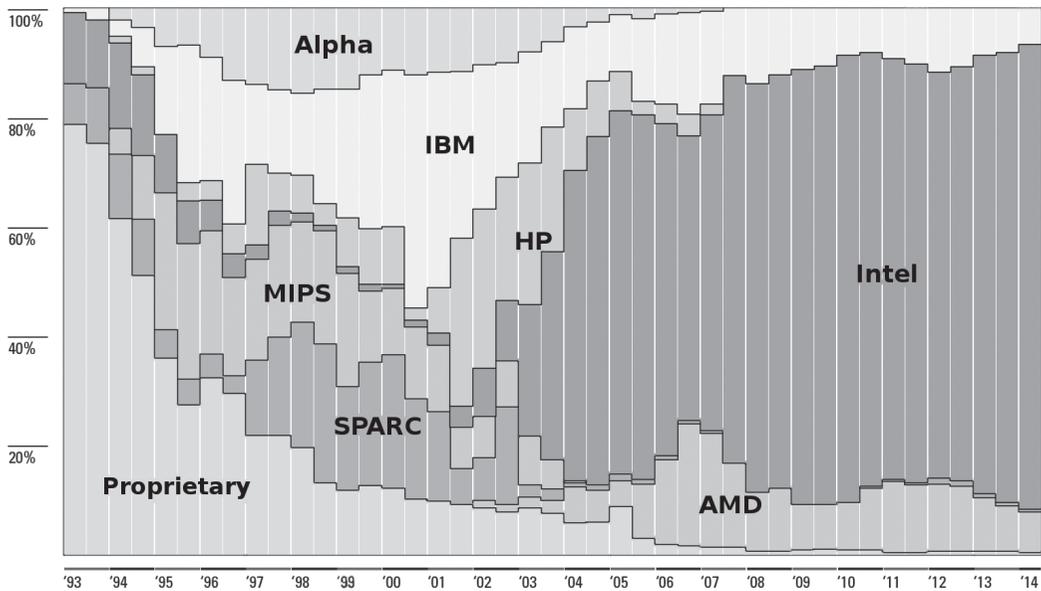
6) HPL - A Portable Implementation of the High-Performance Linpack Benchmark for Distributed-Memory Computers, <http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>

図1 「TOP500」に於けるスパコンのアーキテクチャ別シェアの変遷



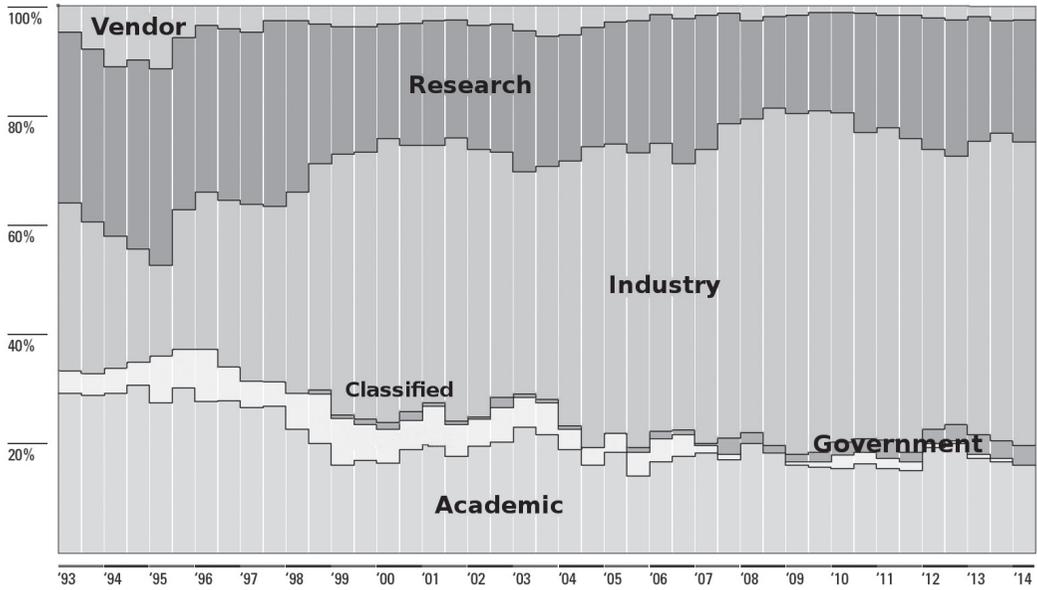
(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

図2 「TOP500」に於けるスパコンの半導体メーカー別シェアの変遷



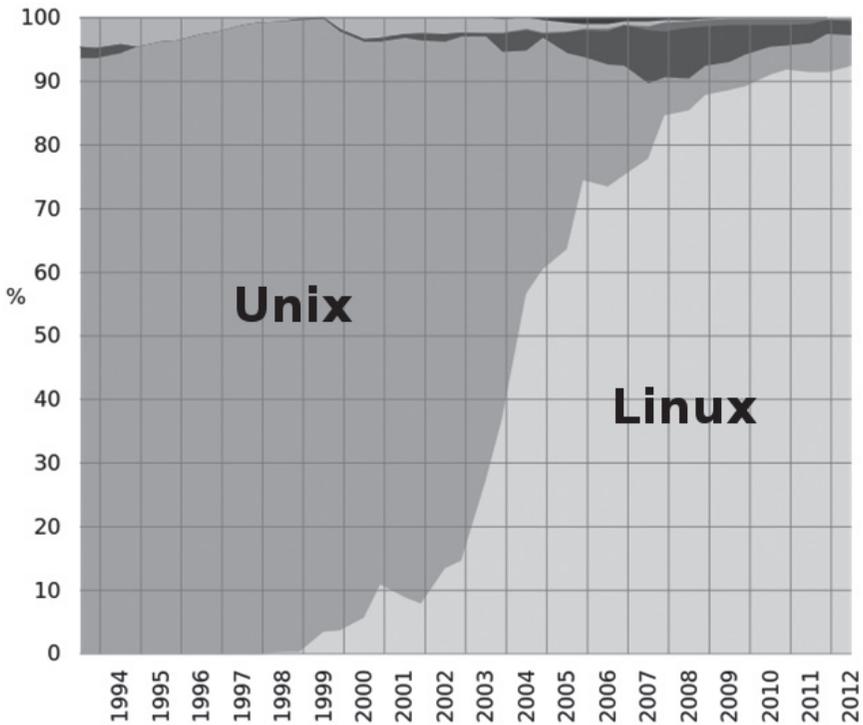
(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

図3 「TOP500」に於けるスパコンの施設別シェアの変遷



(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

図4 「TOP500」に於けるスパコンOS別シェアの変遷



(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

のシェアが広がった時期がほぼ等しくなっている。これは、クラスタ型スパコンに使用されているOSがLinuxであることを示している。この理由としては、PCクラスタを構築する為に必要なソフトウェアが、Linuxではオープンソースで提供されていることが挙げられる。

図5は、1993年から2014年までの「TOP500」に於けるスパコンの処理速度の推移を示す。縦軸の単位FLOPS(Floating-point Operations Per Second)⁷⁾はコンピュータの処理速度をあらゆる単位であり、1FLOPSのコンピュータは、1秒間に1回の浮動小数点演算(実数計算)ができることを意味する。また、図中で「#1」は1位のスパコンの処理速度の推移を表し、同様に「#500」は500位のスパコンの処理速度の推移を、そして、「Sum」は1位から500位までのスパコンの処理速度の総和の推移を表す。図5より、スパコンの処理速度は、10年間で約1000倍になっていることがわかる。このまま処理速度が向上していくと、2020年頃にはペタ (10^{15}) の1000倍であるエクサスケールのスパコンが登場することになる。一方、本論文の第I章に於いて、「一般的に使用される家庭用コンピュータよりも演算が少なくとも1000倍以上速いコンピュータを『スーパーコンピュータ』と呼んでいる」と書いたが、スパコンの処理速度を家庭用コンピュータの1000倍とすれば、10年前のスパコンの処理速度は、現在の家庭用コンピュータのそれにほぼ等しいことになる。実際に、2013年に発売されたパソコン向けのIntel社製CPU「Core i7-4770K」のLINPACK性能は177 GFLOPSであるが、これは、図5を見ると2003年の500位のスパコンの処理速度とほぼ等しい。つまり、数億円も費やしたスパコンも10年経てば数十万円の卓上パソコンに取って代わられてしまうということである。

「TOP500」に於ける1位と500位の処理速度の差は100倍程度である。100倍の差があると、500位のスパコンはとて1位のスパコンに太

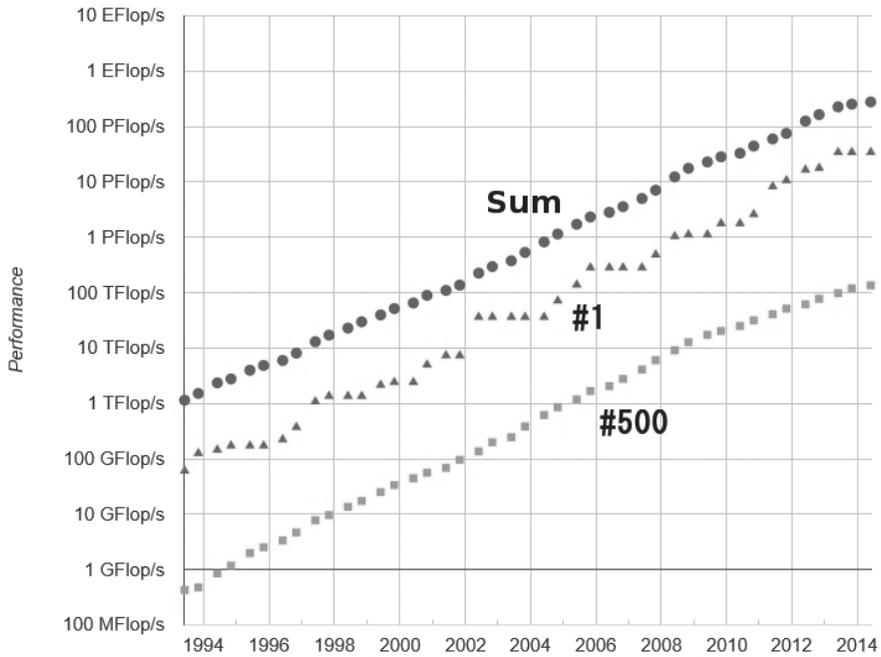
刀打ちできない。なぜならば、1位のスパコンが1日で終わる計算を、500位のスパコンでは100日かかるからである。100日は不可能な計算時間ではないが、あまり現実的ではない。実は、100倍どころか、10倍違ってもその差はかなり大きい。なぜならば、1位のスパコンが10日で終わる計算を、500位のスパコンでは100日かかるからである。10日ならば可能な時間だが、100日は厳しい。そのような意味では、10倍違ってもその差は大きい。しかし、そのように考えてみると、処理速度だけで考えれば、トップと数倍程度の差であれば、まだ同じ計算が可能であると考えられる。何れにせよ、多額の資金を投入して購入したスパコンであるから、そのスパコンでなければ不可能な計算にチャレンジした方がよい。

図6は、「TOP500」に於けるスパコンの順位と処理速度の関係を散布図にして、2005年6月と2014年6月のデータを比較している。上位のスパコンに注目する為、敢えてヒストグラムでの描画を避けている。2014年と2005年のスパコンの順位と処理速度の関係は非常に似ている。1位と500位の速度比は100倍以上あるが、注目すべきは、1位と10位の速度比だけで10倍近くあることである。つまり、先程の議論からすると、1位と10位以降のスパコンは全くの別物と考えたほうが良い。要するに、世界最速レベルのスパコンとは、「TOP500」に於いて精々5位以内のスパコンというところであろう。したがって、国際競争力強化に寄与するというのであれば、単に「TOP500」にランクインすることを目指すのではなく、5位以内を目指すことが重要である。

これらのスパコンの処理速度向上には、半導体の微細加工技術の発展が不可欠である。単純にトランジスタの集積数を増やすと、ダイ(集積回路が作り込まれたシリコンの土台)のサイズが大きくなり、1枚のシリコンウエハから製造できるCPUの数が少なくなり、製造コストが上がってしまう。したがって、ダイの大きさをあまり変えずに、集積密度を上げることによりトランジスタの集積数を増やすしかない。例えば、回路の線幅を0.7倍に

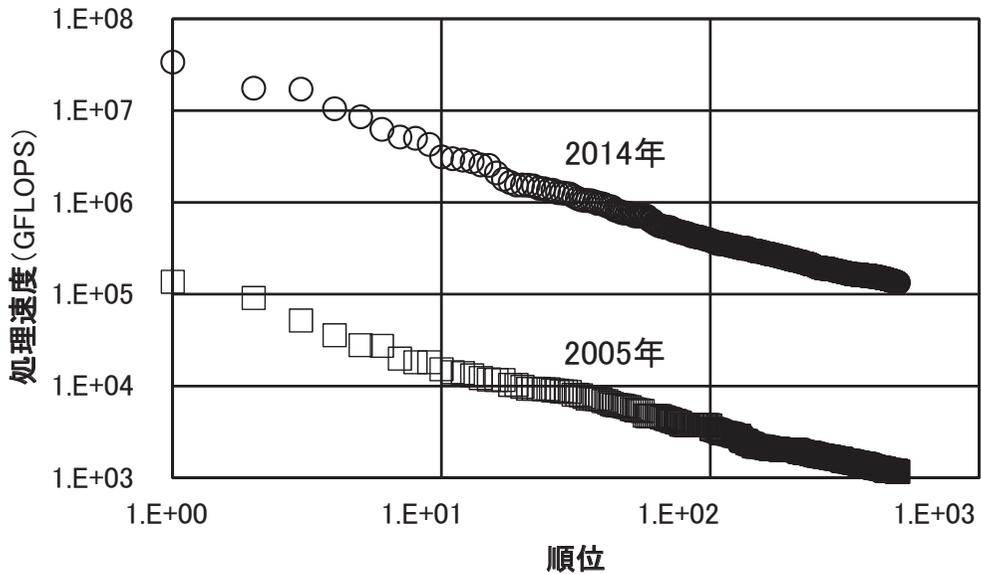
⁷⁾ 一般的には「FLOP/S」ではなく、「FLOPS」と表記する。

図5 「TOP500」に於けるスパコンの処理速度の推移



(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

図6 「TOP500」に於けるスパコンの順位と処理速度の関係



(出所)「TOP500」(<http://www.top500.org>) のデータを元に著者が作成

して同じ回路を作成すれば、 $0.7^2 \approx 0.5$ なので、面積は約半分です。その為、回路を2倍にしても、以前のダイと同じサイズで製造が可能である。

また、CPUの動作周波数を上げることも処理速度向上に繋がる。動作周波数を上げるには電圧を上げる必要があるが、電圧を上げると消費電力が上がり、発熱量が増加し、誤動作などを起こす。しかし、回路の細線化によって抵抗が下がり、消費電力を下げるできるので、その下がった分で動作周波数を上げることが可能である。

Intel社の創設者の一人であるゴードン・ムーアが、1965年に「半導体の集積密度は18～24ヶ月で倍増する」という経験則（ムーアの法則）を提唱したが、実際には集積密度の向上ペースはこれより鈍化しており、「集積密度」を「性能向上」に置き換えれば、この法則は現在でもある程度成立していると考えられている。スパコンの場合、 $2^{10}=1024$ であるから、処理速度は12か月で倍増することになり、スパコンの性能向上は、ムーアの法則よりも速い速度で進歩していることになる。

しかし、ムーアの法則は半導体の微細加工技術の発展を根拠としているため、いずれは微細化が原子レベルにまで到達してしまい、ムーアの法則は通用しなくなると予想される。現在、Intel社のHaswell世代のCPUでは微細化が22nmまで進み、今後、14nm、10nmとさらに細くなっていくと予想されている（図7）。しかし微細化が進み、7nmから5nm程度（シリコン原子数十個分の幅）になると、熱によってチップが溶ける、または量子論的な効果で集積回路の動作が困難になるなどの理由により、限界に近付いていると言える。

その為、2000年代後半より、微細加工による動作周波数の向上が困難になり、マルチコア化による性能向上を図った製品が登場するようになった。2005年に1CPU当たり2コアの「デュアルコアCPU」が登場、2006年、4コアの「クアッドコアCPU」が登場、2010年、6コアの「ヘキサコアCPU」が登場、2014年には18コアのCPUが登場している。そして、現在のスパコンは、これらマルチコアCPUの

コンピュータを更にクラスタ化して高速化を図っている。

またその一方で、2010年頃からスパコンを高速化するためにアクセラレータやコプロセッサを搭載するなどの新しい動きがあるが、これについては第V章で詳しく述べる。

Ⅲ. 各国の高性能コンピュータ事情

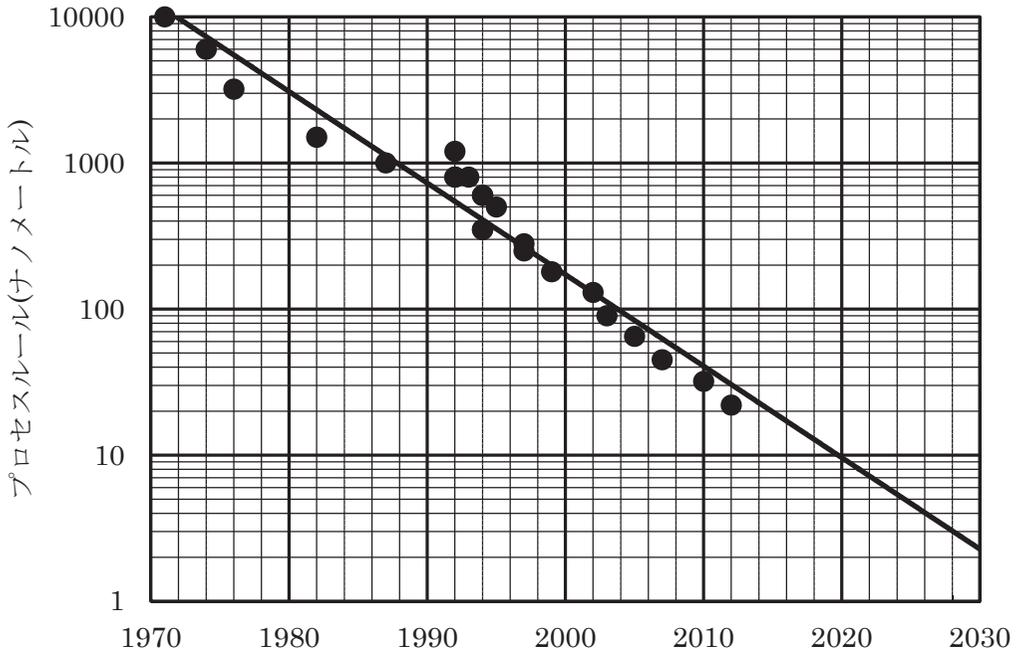
世界の国々の中で、長年に渡り世界最速スパコンの座を競いながらスパコン界をリードしてきたのは、米国と日本である。実際、表1にあるように、過去20年間に「TOP500」の1位になったスパコンは16台あるが、そのうち米国の施設が所有していたスパコンは9台でトップであり、次いで日本は5台である。近年は、中国のスパコン2台が1位になっており、現在では、この3か国がスパコンの処理速度世界一を競っている。中国に於いては、ここ10年程の間に急速にスパコン開発が進歩している。これにはやはり、中国経済と深い関係がある。その他、欧州に於いても以前から研究利用でのスパコン需要がある。以下、各国のスパコン事情について、詳しく述べる。

1. 米国の高性能コンピュータ事情

スパコン以前に、最初のコンピュータを開発し、その後のコンピュータ技術の発展を牽引してきたのは米国である。どのコンピュータを最初のコンピュータと見なすかについては、様々な意見があるが、1946年にペンシルバニア大学で真空管を約18000本使って開発された「ENIAC」⁸⁾を最初の電子計算機、つまり最初のコンピュータと見なすのが一般的である。この頃のコンピュータは、主に軍事目的や研究目的に利用されていたが、1951年に米国レミントンランド社（現Unisys社）が世界初の商用コンピュータ「UNIVAC I」を開発した。この時代の真空管を用いたコンピュータは、「第1世代コンピュータ」（～1959年）と呼ばれる。その後、米国で発明されたトランジスタを用いた「第2世代コン

⁸⁾ Penn Engineering - ENIAC: Celebrating Penn Engineering History, <http://www.seas.upenn.edu/about-seas/eniac/>

図7 Intel社製CPUのプロセスルール推移



(出所) CPUIDB (<http://cpuidb.stanford.edu/>) のデータを元に著者が作成

表1 過去20年間に「TOP500」の1位になったスパコンとその所有機関、国

スパコンの名称	所有機関	国
CM-5	Los Alamos National Lab	米国
Numerical Wind Tunnel	National Aerospace Laboratory of Japan	日本
Intel XP/S 140 Paragon	Sandia National Labs	米国
Hitachi SR2201	University of Tokyo	日本
CP-PACS	University of Tsukuba	日本
ASCI Red	Sandia National Laboratory	米国
ASCI White	Lawrence Livermore National Laboratory	米国
The Earth Simulator	Earth Simulator Center	日本
BlueGene/L	Lawrence Livermore National Laboratory	米国
Roadrunner	Los Alamos National Laboratory	米国
Jaguar	Oak Ridge National Laboratory	米国
Tianhe-1A	National Supercomputing Center in Tianjin	中国
K Computer	RIKEN Advanced Institute for Computational Science	日本
Sequoia	Lawrence Livermore National Laboratory	米国
Titan	Oak Ridge National Laboratory	米国
Tianhe-2	National Super Computer Center in Guangzhou	中国

(出所)「TOP500」(<http://www.top500.org>) のデータを元に著者が作成

ピュータ」(1959年～1964年)やIC(Integrated Circuit:集積回路)を用いた「第3世代コンピュータ」(1965年～1979年)が次々と開発された。その中でもICを用いたIBM社のIBM/360が代表的である。このコンピュータは世界初の汎用コンピュータであり、これによってIBM社は世界制覇を成し遂げた。1980年以降には、LSI(Large Scale Integration:集積度が1000～10万個程度の大規模集積回路)やVLSI(Very Large Scale Integration:素子集積度が10万～1000万個程度の大規模集積回路)を用いた「第4世代コンピュータ」(1980年～)が開発され、コンピュータの高性能化が進む一方で、コンピュータのコンパクト化が進み、Apple社やIBM社に代表されるようにオフィスや家庭向けのパーソナル・コンピュータが普及した。

一般的なコンピュータ同様、最初のスパコンを特定するにも様々な意見があるが、1964年に発表されたCDC社の「CDC6600」を最初のスパコンとするのが一般的である⁹⁾。「CDC6600」は、「スパコンの父」と呼ばれるシーモア・クレイによる設計であり、世界初の商用スパコンである。その後、クレイはCDC 7600を開発、1972年にクレイ・リサーチ社を設立し、1976年にCray-1を発表した。Cray-1は大規模科学技術計算用に広く普及し、成功を収めている。その後クレイ・リサーチ社は、Cray X-MP、Cray-2、Cray Y-MPなどを次々と開発し、スパコン業界をリードした。

しかし、1980年代後半～1990年代には日本企業の優勢時代が続き、軍事面や産業面での競争優位のためにスパコンを重視してきた米国との間で「日米スパコン貿易摩擦」が生じた。そこで米国は、1991年に「HPC法(High-Performance Computing Act)」を制定、1995年からは「ASCI(Accelerated Strategic Computing Initiative)プロジェクト」を推進して国内コンピュータ関連産業の発展に注力

した。その結果、1997年にIntel社のスパコン「ASCI Red」、2000年にIBM社のスパコン「ASCI White」が「TOP500」に於いて世界最速となった。その後も米国はスパコン開発に注力し、2010年のスパコン関連予算は18億8300万ドル、2020年にはエクサスケール・スパコンの稼働を目指している。

図8は、1993年から2014年までの「TOP500」に於ける国別システムシェアを100%積み上げ折れ線グラフで示している。海外製のスパコンであっても、所有している国にカウントしている。これを見ると、米国は常に50%近いシェアを維持しており、スパコンの利用率が非常に高いことがわかる。また、2014年6月現在の「TOP500」のトップテンには、2位「Titan」、3位「Sequoia」、5位「Mira」、7位「Stampede」、9位「Vulcan」、10位(米国政府のスパコン)と、米国製のスパコンが5台もランクインしている。

2. 日本の高性能コンピュータ事情

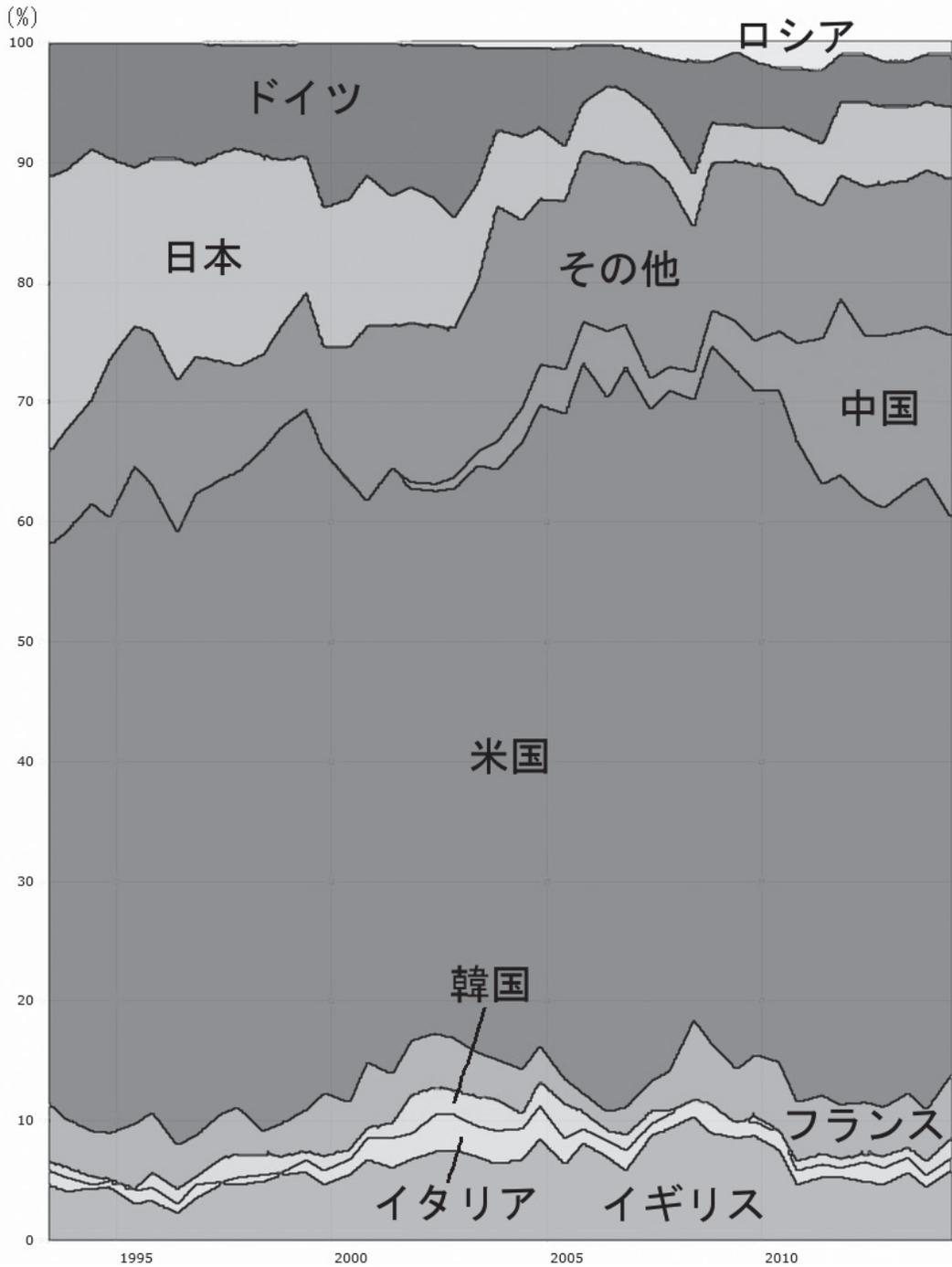
米国同様、日本に於いてもスパコンが登場する以前からコンピュータに関する研究開発が盛んであった。コンピュータの研究開発は、米国より少し遅れて第二次世界大戦後開始されている。1950年頃から大学や企業に於いて真空管を用いた第1世代コンピュータの開発が始まったが、トランジスタコンピュータの登場により、1950年後半に第2世代コンピュータへと移行し、1960年代半ばからはICを用いた第3世代コンピュータに移行した。その後、国内メーカーが次々とオフィス用コンピュータを発売している。ちょうどコンピュータが大きく発展していく時期に日本もコンピュータ開発を始めている。

日本に於ける本格的なスパコンの歴史は、1980年代に遡る。1981年、通商産業省(現経済産業省)は、1989年までに10GFLOPSのスパコンを製作、運転、評価を行い、その技

⁹⁾ 山田昭彦、「コンピュータ開発史概要と資料保存状況—第3世代・第3.5世代コンピュータおよびスーパーコンピュータについて—」、『国立科学博物館技術の系統化調査報告』第2集(2002年)。

¹⁰⁾ 中村吉明、渡辺千匂、「通産省の研究開発プロジェクトのマネジメントと効果—スーパーコンピュータプロジェクトのケーススタディ」、『研究・技術計画学会、年次学術大会講演要旨集、14:(1999年)pp.75-80、

図8 「TOP500」に於ける国別システムシェアの推移



(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

術を確立することを目標とし、「科学技術用高速計算システムプロジェクト（スーパーコンピュータ・プロジェクト）」をスタートした¹⁰⁾。

当時の日本のコンピュータメーカーは既に国際的競争力をもっていただけでなく、スパコンの研究開発からスピノフして得られる技術は通常の商用コンピュータの開発にも重要だと認識しており、既にスパコン開発を進めていた。そして1982年以降、日本のコンピュータメーカーはスパコン市場に本格的に参入し、1982年には富士通「FACOM VP-100/200」、日立「HITAC S-810」、1983年にはNEC「SX-1、SX-2」が開発された。これらが日本での本格的なスパコンの最初といえる。

1980年代後半～1990年代には日本のコンピュータメーカーの優勢時代が続き、1980年代後半になると、国産スパコンは、世界最高水準に達した。このころ開発されたスパコンが、1987年 日立「HITAC S-820」、1988年 富士通「FUJITSU VP2000」、1989年 NEC「SX-3」である。そして、1990年代中頃までの世界最速スパコンは日本のほぼ独壇場となった。

しかしその後、「日米スパコン貿易摩擦」が生じ、さらに追い打ちを掛けるように、バブル崩壊による国内スパコン市場縮小により、日本のスパコン産業は衰退してしまう。

過去に世界最速となった日本製スパコンは、航空宇宙技術研究所（現 独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA））の「数値風洞(NWT)」（1993年～1995年、富士通との共同開発）、東京大学の「SR2201」（1996年、日立製作所製）、筑波大学の「CP-PACS」（1996年、日立製作所との共同開発）、独立行政法人海洋研究開発機構の「地球シミュレータ」（2002～2004年、NEC製）、独立行政法人理化学研究所計算科学研究機構の「京」（2011年、富士通製）の5台である。このことから、1990年代以降、日本では世界最高水準のスパコン開発には力を入れていることがわかる。

しかし、「TOP500」にランクインする我が国のスパコン台数は減少傾向にある。図8を見ると、1993年には「TOP500」の内115台が日本国内で稼働中であったが、2014年

には30台となり、1993年と比較して約1/4程度にまで減少している。また、1993年には、「TOP500」に入るスパコン保有台数の1位は米国、2位は日本、3位はドイツ、4位はフランス、5位は英国となっていたが、2009年には、1位米国、2位イギリス、3位ドイツ、4位フランス、5位フランスとなり、日本は6位となった。

その後、第IV章で詳しく述べる国家プロジェクト「次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト」によって、スパコン「京」を開発し、2011年6月、中国のスパコン「Tianhe-1A（天河1A号）」を抜き、世界一を達成した。2014年には、1位米国、2位中国、3位日本とイギリス、5位フランスとなっている。

3. 中国の高性能コンピュータ事情

1990年代以降、中国経済の飛躍的な成長に伴い、1999年、中国のスパコンが初めて「TOP500」にランクインし、2010年には国立国防技術大学（NUDT）の「Tianhe-1A（天河1A号）」が「TOP500」に於いて1位となった。その後も「Tianhe-2（天河2号）」が1位となるなど、近年の中国に於けるスパコン開発の進歩は目覚ましいものがある。

日本ではあまり知られていないが、中国に於けるコンピュータ産業は1950年代の第1世代コンピュータからスタートしており、その歴史は米国や日本と同様に長い¹¹⁾。1978年からは国の開放政策が始められ、コンピュータ産業も徐々に発展し、1980年代以降大きく発展した。

2014年6月現在、「TOP500」に於いて「Tianhe-2（天河2号）」が1位となっているが、中国は今後の計画で、2020年までにエクサスケール・スパコンを開発するとみられている。各国が、スパコンを国家プロジェクトとして莫大な予算をつぎ込んで開発するのは、高精度シミュレーションによって、防衛や防災に有益となるのに加え、製造業などに於いて国

11) 玄 光均, 「現代中国 コンピュータ産業の現状と展望」, 京都コンピュータ学院校友会機関誌『アキュム』, vol.2 (1990年).

際競争力を強化する為の基盤となるからである。宇宙開発と同様、スピンオフした技術が、様々な産業に波及する効果も期待している。

図8に於いては、1999年、中国のスパコンが初めて「TOP500」にランクインし、2009年にはトップ500台の中に21台、2014年にはトップ500台の中に76台がランクインしている。これは、日本の30台と比較して2倍以上となっている。

4. 欧州の高性能コンピュータ事情

欧州各国は、これまで米国や日本などの外国製スパコンを調達してきた。その戦略は、導入したスパコンを利用して、ソフトウェア面で優位性を確保することである。しかし、最近、フランスのBull社は、スパコンの自主開発を積極的に進めている。Bull社のスパコンは、2014年6月現在、「TOP500」リスト中に合計17台がランクインしており、欧州の国々が導入している。

欧州の研究共同体であるPRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe)¹²⁾は、「全てのためのスパコン」というビジョンの下に、2020年頃にエクサスケール・スパコンを開発することを目標に、欧州の競争力を強化する為の包括的なアプローチを開始した¹³⁾。科学分野だけでなく産業分野にもスパコン利用のメリットを浸透させ、経済的機会をもたらす狙いがある。

また、スパコン「Tianhe-1A (天河1A号)」をベースとする中国・欧州のスパコン戦略協力プロジェクトが発足し、中国、イギリス、ノルウェー、スペイン、ブルガリア、スイスの研究機関が共同で申請したEU第7次研究枠組み計画 (FP7) の国際協力プロジェクト「SCC-Computing (Strategic collaboration with China on super-computing based on Tianhe-1A)」¹⁴⁾がスタートした。このプロジェクトは、様々な分野で中国と欧州の強者連合をつくり、コ

ンピュータシステム等の研究を進めるというものである。

図8を見ると、欧州でスパコンを保有している主な国はイギリス、フランス、ドイツの3か国であるが、ドイツが減少傾向であり、一方、イギリスは増加傾向である。3か国の合計は、1993年に105台であったが、2014年には79台と減少している。日本と同様、中国の台頭が影響していると考えられる。

また、2014年6月現在、「TOP500」に於いて、スイスのスパコン「Piz Daint」が6位、ドイツのスパコン「JUQUEEN」が8位にランクインしている。

IV. 次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト

1. スパコン「京」

2000年以降、「TOP500」にランクインする日本国内のスパコンが減少していく中で、2005年、文部科学省は以下の3つの目的を達成する為、世界最先端・最高性能の次世代スパコンを開発・整備する「次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト」を立ち上げた¹⁵⁾。

- ・ 計算科学技術を更に発展させ、広範な分野の研究及び産業における幅広い利用のための基盤を提供することにより、我が国の競争力の強化に資すること。
- ・ ライフサイエンス、物質材料、防災・減災など多様な分野で社会に貢献する研究成果を挙げること。
- ・ 我が国において、継続的にスパコンを開発していくための技術力を維持及び強化すること。

この国家プロジェクトは、2006年～2012年の間に、総額約1150億円をかけて10PFlops (1秒間に1京回の演算が可能) のスパコンを開発しようとするものであった。「京」という名前は、これに由来している。開発は、理化学研究所を中心として富士通、NEC、日立製作所の民間3社との共同プロジェクトだっ

¹²⁾ PRACE, <http://www.prace-ri.eu/>

¹³⁾ 野村稔, 「欧州のハイパフォーマンス・コンピューティング戦略とその実現に向けた動き」, 科学技術動向, 140号, (2013年).

¹⁴⁾ SCC-Computing, <http://www.scc-computing.eu/en/>

¹⁵⁾ 文部科学省, 「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) の構築について」, http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.htm

たが、2009年5月にNECと日立製作所の2社が撤退し、ベクトル型を担当していた2社が抜けたことからシステム構成の見直しを迫られ、ベクトル・スカラー複合型からスカラー型へと変更した。その後、このプロジェクトは、2009年11月の政府の事業仕分けにより、同年12月、引き続き世界最高水準を目指しつつ、利用者側の視点に立った多様なユーザーニーズに応える「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」を構築するHPCI (High Performance Computing Infrastructure)計画へと変化し、処理速度だけでなく利用者の使い勝手にも更に配慮することとなった。「京」の完成は2012年6月であったが、2011年6月の性能評価で、中国のスパコン「Tianhe-1A (天河1A号)」を抜いて世界最速を達成し、同年11月にも2度続けて世界最速となった。

スパコン「京」には富士通製のCPU「SPARC64VIIIfx」が搭載されている。図2の半導体メーカー別シェアに於ける3大メーカー (Intel社、AMD社、IBM社) 以外であり、珍しい存在となっている。人によっては、携帯電話同様、「ガラパゴス」という言葉を使う人も居るが、コンピュータ産業に於ける技術の継承という目的を考えると、これで目的は達成されていると考えられる。ただし、今後も引き続き、技術が継承されることが重要である。

「SPARC64VIIIfx」は、45nm半導体プロセスルールで製造され、約7億6000万個のトランジスタを集積している。1CPU当たり8コアが搭載され、128GFLOPSの性能がある。また、メモリは1CPU当たり16GB (1コア当たり2GB) である。1枚のシステムボード (マザーボード) には4つのCPUが搭載され、1台のラックに24枚のシステムボードが収納されている。つまり、このラック1台だけでも96個のCPU (768個のコア) が搭載されている。「京」は、このラックを更に864台繋げて並列計算をおこなうシステムとなっている。したがって、82944個のCPU (7962624個のコア) の並列計算が可能であり、10PFLOPSという処理速度を実現できる。最大消費電力は、1CPU当たり58Wであり、「京」のシステム全

体で3000万Wである。これは、72000世帯分の電力に相当する。

CPUの冷却方式は、近年には珍しい水冷式を採用している。一般的にコンピュータの演算性能は、CPUの温度を1℃下げれば性能が0.2%向上し、10℃下げれば故障率は半減すると言われている¹⁶⁾。水冷方式によって十分に冷却することによって、システムを安定的に稼働させることが可能になっている。

また、「TOFU (Torus Fusion) インターコネクト」と呼ばれる8万個以上のCPUを約20万本のケーブルを用いて接続し、高速に協調動作させるネットワーク技術も独自に開発している。「TOFUインターコネクト」では、12個のCPUをメッシュ接続した各ブロック同士を3次元トーラス接続している。これを、6次元トーラス接続と呼ぶ。トーラスを構成する一つのブロックにおいて通信機能が失われても、ブロック中の別のノードが通信機能をバックアップすることで、トーラス接続を維持可能である。

ここまで、スパコン「京」のハードウェアについて説明したが、このプロジェクトの目的は、単に世界最速のスパコンを開発することではない。総額約1150億円を費やしているわけだから、それに見合う成果が得られないといけな。そこで、文部科学省は、スパコン「京」の利用枠を非公募制の「戦略プログラム利用枠」と公募制の「一般利用枠」の二つに大きく分け、計算資源の効率的な利用を図っている¹⁷⁾。その利用内訳は、「戦略プログラム利用枠」が「京」の計算資源の約50%、「一般利用枠」が約30%としている。残りの計算資源は、「京」のシステム調整等に利用されている。

「戦略プログラム」とは「京」を用いて戦略的・重点的に研究を推進していくプログラムであり、「京」の性能を最大限に活用し、科

¹⁶⁾ 日本経済新聞電子版、「スパコン「京」で復活した「忘れかけられた技術」 スパコンは再び「水冷」へ」、2012年7月27日。

¹⁷⁾ 高度情報科学技術研究機構、「スーパーコンピュータ「京」及びHPCI共用計算資源 平成26年度利用研究課題募集の選定結果について - 「京」の産業利用枠を1.6倍に -」、(2014年2月)

表2 戦略プログラム分野配分枠における平成26年度選定課題一覧

分野1	細胞内分子ダイナミクスのシミュレーション 創薬応用シミュレーション 予測医療に向けた階層統合シミュレーション 大規模生命データ解析
分野2	相関の強い量子系の新量子相探求とダイナミクスの解明 電子状態・動力学・熱揺らぎの融和と分子理論の新展開 密度汎関数法によるナノ構造時空場での電子機能予測とその実現 全原子シミュレーションによるウイルスの分子科学の展開 エネルギー変換の界面科学 水素・メタンハイドレートの生成、融解機構と熱力学的安定性 金属系構造材料の高性能化のためのマルチスケール組織設計・評価手法の開発
分野3	地球規模の気候・環境変動予測に関する研究 超高精度メソスケール気象予測の実証 地震の予測精度の高度化に関する研究 津波の予測精度の高度化に関する研究 都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究
分野4	輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率・低騒音化に関する研究開発 次世代半導体集積素子におけるカーボン系ナノ構造プロセスシミュレーションに関する研究開発 乱流の直接計算に基づく次世代流体設計システムの研究開発 多目的設計探査による設計手法の革新に関する研究開発 原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発
分野5	格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定 大規模量子多体計算による核物性解明とその応用 超新星爆発およびブラックホール誕生過程の解明 ダークマター密度ゆらぎから生まれる第1世代天体形成

(出所) 高度情報科学技術研究機構、「スーパーコンピュータ「京」の戦略プログラム利用枠で実施される平成26年度重点課題・一般課題の選定について」,(2014年)。

学技術のブレイクスルーに挑む以下の5つの分野から成る¹⁸⁾。

HPCI戦略プログラム：

【戦略分野1】 予測する生命科学・医療および創薬基盤 (実施機関：理化学研究所)

【戦略分野2】 新物質・エネルギーの創成 (実施機関：東京大学物性研究所、分子科学研究所、東北大学金属材料研究所)

【戦略分野3】 防災・減災に資する地球変動予測 (実施機関：海洋研究開発機構)

【戦略分野4】 次世代ものづくり (実施機関：東京大学生産技術研究所、宇宙航空研究開発機構、日本原子力研究開発機構)

【戦略分野5】 物質と宇宙の起源と構造 (実施機関：筑波大学、高エネルギー加速器研究機構、国立天文台)

これら戦略分野に於いては、平成26年度は、表2に示すような合計29件の研究課題(表2以外に計算科学推進体制構築4件を含む)が、HPCI戦略プログラム推進委員会に於いて選定されている。

また、スパコン「京」の2014年度一般利用枠には144件の応募があり、69件の課題が選

¹⁸⁾ 姫野龍太郎『絵でわかるスーパーコンピュータ』, 講談社, (2012年), p.102.

ばれている¹⁹⁾。このうち、産業利用については、35件の課題が選ばれている。分野別には、数理科学2件、物理・素粒子・宇宙4件、物質・材料・化学21件、工学・ものづくり21件、バイオ・ライフ11件、環境・防災・減災8件、原子力・核融合2件である。この中で、産業利用には、物質・材料・化学8件、工学・ものづくり18件、バイオ・ライフ6件、環境・防災・減災3件となっており、工学・ものづくり、バイオ・ライフの分野は、産業利用が多いことがわかる。

2014年4月現在、スパコン「京」が実現したシミュレーションには、例として、以下のようものが挙げられる²⁰⁾。

- ・創薬・・・10種類以上の抗がん剤候補、リード化合物を発見
- ・10兆個の結合の世界最大の脳神経シミュレーション (小型霊長類の全脳規模) パーキンソン病のモデル確立へ
- ・人の心臓を精緻に再現、肥大型心筋症の病態を蛋白質レベルの変異から解析、仮想手術、心臓に埋め込むペースメーカーの電極の位置を最適化
- ・血流シミュレータ+心臓シミュレータで心筋梗塞のシミュレーション
- ・ウイルスの営みを分子レベルで解明—抗ウイルス剤やワクチン開発への道を拓く—
- ・シリコンナノワイヤー等の次世代半導体設計手法を開発、世界初でナノ領域に流れる電子分布
- ・高温超電導、量子スピン液体の機構解明に向けてのシミュレーション
- ・リチウムイオン電池の電解液反応を分子レベルで解明、充電時間を1/3に減らす電解液の開発 磁性材料の材料設計に活用できる新たなシミュレーション技術を開発
- ・メタンハイドレートの融解機構を解明、よ

り効率的なメタンの回収 全球雲解像モデル(NICAM)による気候研究、一月先までMJOの予測可能性 台風発生の10日程度前から60%の確率で台風の発生を予測

- ・世界初の1km以下解像度で地球全体での積乱雲の描像を明らかに
- ・発生の半日～1日前からの計算で高い確率で2012年7月の九州北部豪雨を予測
- ・2012年5月6日のつくば竜巻のアンサンブル予報実験
- ・南海トラフ巨大地震 広域詳細な高精度地震動・津波シミュレーション
- ・ものづくり 自動車の空力、船体の推進抵抗、ファンの性能と騒音、超高精度シミュレーション
- ・超新星爆発のシミュレーションに成功

このようにスパコン「京」は、様々な分野で成果を挙げつつある。LINPACKによるスパコンの処理速度を競う「TOP500」ばかりがクローズアップされがちであるが、本来の目的からすれば、そのスパコンで挙げた成果も考慮して総合的に評価すべきである。2014年6月現在、「TOP500」に於いて、スパコン「京」は第4位であるが、成果も含めて総合的に評価すれば、更に上の順位に位置すると考えられる。

2. FOCUSスパコン

「FOCUSスパコン」とは、2011年4月、企業の国際競争力強化に向けたスパコン「京」の産業利用に於けるエントリーマシンとして、兵庫県、神戸市、神戸商工会議所が設立した計算科学振興財団²¹⁾の高度計算科学研究支援センター内に設置されたスパコンである。公的機関所有のスパコンでは国内唯一の企業向け貸し出し専用である。2014年1月現在、処理速度は272TFLOPSである。また、2014年6月の「TOP500」に於いて450位である。

「FOCUSスパコン」では、2014年8月15日現在、合計80本 (内商用アプリケーション57本) のアプリケーション・ソフトウェアが動作検

¹⁹⁾ 高度情報科学技術研究機構, 「スーパーコンピュータ「京」及びHPCI共用計算資源 平成26年度利用研究課題募集の選定結果について—「京」の産業利用枠を1.6倍に—, (2014年)。

²⁰⁾ 平尾公彦「ポスト「京」プロジェクトについて」, 文部科学省「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会 (第1回) 配付資料3」(2014年)。

²¹⁾ FOCUS, <http://www.j-focus.or.jp/>

証済みであり、流体解析、構造解析、計算化学など、一企業の計算機では手におえないくらい計算規模が大きくなりがちな分野のソフトウェアが使用可能である。

「FOCUSスパコン」を製品開発などに利用する企業は、年々増加している。また、「FOCUSスパコン」を利用した企業の43%は、その後、より高速なスパコン「京」を使っている²²⁾。表3に、平成26年度のFOCUSスパコン利用企業等一覧を示す。利用企業は製造業が多く、医薬品メーカーや材料メーカー等が目立つ。

「FOCUSスパコン」に関する取り組みは、地元にとっても大きな利点がある。現在、神戸市が推進している「神戸医療産業都市」プロジェクトに於いては、スパコン「京」と兵庫県播磨にあるSPring-8やSACLA等の研究施設と連携して、創薬等ライフサイエンスの分野で更なる研究の加速が期待されている。またこれ以外にも、イノベーションと新産業の創出による神戸経済の成長、国内外の企業の誘致、優秀な研究者・技術者の確保、神戸空港など交通インフラの利用拡大、神戸市のイメージアップ等が挙げられる。

V. 高性能コンピュータ技術の今後の動向

現在、米国をはじめ、中国や欧州の国々が、国際競争力を高める為、エクサスケールのスパコン開発を、2020年頃の完成を目標に進めている。我が国でも、文部科学省が推進する「エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト」²³⁾に基づき、2013年、「国家基幹技術としての世界最高性能のスパコンの開発をする」と発表した。それによると、2020年の完成を目指し、「京」の100倍の処理速度をもつエクサスケールのスパコン（ポスト「京」）、及びその性能を最大限に引き出すアプリケーション・ソフトウェアの開発に着手するとしている。また、エクサスケール・

スパコンは、神戸市の計算科学研究機構内に設置するとしている。目標とする処理速度は1エクサフロップス級（1秒間に 10^{18} 回の演算性能）、開発主体は独立行政法人理化学研究所、総事業費は約1,400億円（国費分：約1,100億円、関係企業分：約300億円）であり、2020年度からの運用を予定している。

もはや抜けられない競争に日本も参加しているわけだが、エクサスケールのスパコン開発にはいくつかのハードルが待ち構えている。前述の通り、半導体の微細加工技術は限界に達して、ムーアの法則も通用しなくなるとしている。その為、マルチコア化によって並列性を上げて、処理速度向上を図っている。しかし、これ以上の並列化には、消費電力の問題が生じてくる。2011年11月の「TOP500」に於けるベンチマークテスト時の「京」の消費電力は、12.65989MWである²⁴⁾。一般家庭での平均電力使用量を400Wとすると、「京」の消費電力は約30000世帯分に相当する。日本では1MWが年間約1億円なので、電気料金だけでも年間約12億円になっている。現在の技術でエクサスケールのスパコンの消費電力を考えると、さらに一桁消費電力が増えてしまい、あまり現実的ではない。

このことから、スパコンの処理速度向上には、省エネルギー化が重要である。そこで、電力1W当たりの演算回数（MFLOPS / W）を評価尺度として、2007年から「Green500」²⁵⁾がスタートした。表4に2014年6月現在に於ける「Green500」の10位以内のスパコンを示す。これら全てのスパコンがNVIDIA社製のアクセラレータGPGPU（General Purpose Graphics Processing Unit）を使用していることがわかる。つまり、スパコンの処理速度向上に重要な省エネルギー化には、今のところNVIDIA社製のアクセラレータGPGPUが有力であることがわかる。また国別にみると、日本の東京工業大学のスパコンが1位と8位に、筑波大学のスパコンが3位に入っている。また欧州各国も健闘している。米国のスパコンは10位のみで

22) 産経新聞、「「京」より役立つ!? スパコン「FOCUS」が人気」、2014年8月20日。

23) 文部科学省、「エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト」、http://www.mext.go.jp/component/_b_menu/other/_jcsFiles/afieldfile/2013/12/05/1342054_1.pdf

24) FUJITSU, <http://jp.fujitsu.com/about/tech/k/qa/k04.html>

25) GREEN500, <http://www.green500.org/>

表3 平成26年度FOCUSスパコン利用企業等一覧 (2014年8月15日現在)

(株)アイ・アール・ディー	神戸大学・水ing(株)	(株)トヨタプロダクションエンジニアリング
アイクラフト(株)	光洋サーモシステム(株)	(株)西島製作所
(株)IDAJ	(株)コベルコ科研	ナブテスコ(株)
味の素(株)	(株)小松製作所	(株)ニコン
(株)アスミス	サイエンス ソリューションズ(株)	日機装技研(株)
アルプス電気(株)	サイバネットシステム(株)	(株)日産アーク
いであ(株)	佐藤製菓(株)	日本精工(株)
伊藤忠テクノソリューションズ(株)	(株)CAEソリューションズ	(株)日本製鋼所
今治造船(株)	JFEスチール(株)	NUMECAジャパン(株)
(株)ヴァイナス	JFEテクノリサーチ(株)	パイオニア(株)
AGCセラミックス(株)	(株)ジェイテクト	(株)バイオモデリングリサーチ
AGCプライブリコ(株)	シスメックス(株)	(株)爆発研究所
Exelis VIS (株)	(株)島津製作所	パシフィックコンサルタンツ(株)
NECソリューションイノベータ(株)	新日鐵住金(株)	パナソニック(株)
NSプラント設計(株)	(株)数値フローデザイン	(株)ヒューリンクス
FsTech(株)	住友化学(株)	兵庫県立大学 産学連携・研究推進機構
(株)MCHC R&Dシナジーセンター	住友ゴム工業(株)	(株)フォーラムエイト
MPM数値解析センター(株)	住友電気工業(株)	(株)フォトン
(株)エンプラス研究所	住友バークライト(株)	富士ゼロックス(株)
大阪ガス(株)	(株)精研	富士電機(株)
(株)大林組	セイコーインスツル(株)	(株)ブリヂストン
オムロン(株)	西菱エンジニアリング(株)	みずほ情報総研(株)
海洋エネルギーエンジニアリング(株)	(株)先端力学シミュレーション研究所	三井造船(株)
花王(株)	ソニー(株)	(株)三井造船昭島研究所
鹿島建設(株)	ソニーイーエムシーエス(株)	三菱電機(株)
(株)風工学研究所	(株)ソフトウェアクレイドル	三菱日立パワーシステムズエンジニアリング(株)
(株)カネカ	ダイキン工業(株)	三ツ星ベルト(株)
川崎重工業(株)	(株)大真空	ミネベア(株)
川重テクノロジー(株)	大日本スクリーン製造(株)	(株)明電舎
(株)気象工学研究所	千代田化工建設(株)	(株)森村設計
キッセイ薬品工業(株)	筑波大学・住友化学(株)・法政大学	森六テクノロジー(株)
京セラ(株)	帝人(株)	(株)ヤマナカコーキン
クボタシステム開発(株)	(株)デンソー	ヤンマー(株)
(株)クロスアビリティ	東京大学生産技術研究所	(株)ユタカ技研
(株)計算力学研究センター	東京ニュークリア・サービス(株)	(株)リコー
(株)構造計画研究所	東洋紡(株)	(株)菱友システム技術
(株)神戸製鋼所	東レ(株)	リョービ(株)

(出所)「FOCUS」 <http://www.j-focus.or.jp/>

表4 「Green500」の10位以内のスパコン（2014年6月）

Green500 Rank	MFLOPS/W	Site	Computer	Total Power (kW)
1	4,389.82	GSIC Center, Tokyo Institute of Technology (日本)	TSUBAME-KFC - LX 1U-4GPU/104Re-1G Cluster, Intel Xeon E5-2620v2 6C 2.100GHz, Infiniband FDR, NVIDIA K20x	34.58
2	3,631.70	Cambridge University (イギリス)	Wilkes - Dell T620 Cluster, Intel Xeon E5-2630v2 6C 2.600GHz, Infiniband FDR, NVIDIA K20	52.62
3	3,517.84	Center for Computational Sciences, University of Tsukuba (日本)	HA-PACS TCA - Cray 3623G4-SM Cluster, Intel Xeon E5-2680v2 10C 2.800GHz, Infiniband QDR, NVIDIA K20x	78.77
4	3,459.46	SURFsara (オランダ)	Cartesius Accelerator Island - Bullx B515 cluster, Intel Xeon E5-2450v2 8C 2.5GHz, InfiniBand 4× FDR, Nvidia K40m	44.4
5	3,185.91	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) (スイス)	Piz Daint - Cray XC30, Xeon E5-2670 8C 2.600GHz, Aries interconnect, NVIDIA K20x Level 3 measurement data available	1,753.66
6	3,131.06	ROMEO HPC Center - Champagne-Ardenne (フランス)	romeo - Bull R421-E3 Cluster, Intel Xeon E5-2650v2 8C 2.600GHz, Infiniband FDR, NVIDIA K20x	81.41
7	3,019.72	CSIRO (オーストラリア)	CSIRO GPU Cluster - Nitro G16 3GPU, Xeon E5-2650 8C 2GHz, Infiniband FDR, Nvidia K20m	86.2
8	2,951.95	GSIC Center, Tokyo Institute of Technology (日本)	TSUBAME 2.5 - Cluster Platform SL390s G7, Xeon X5670 6C 2.93GHz, Infiniband QDR, NVIDIA K20x	927.86
9	2,813.14	Exploration & Production - Eni S.p.A. (イタリア)	HPC2 - iDataPlex DX360M4, Intel Xeon E5-2680v2 10C 2.8GHz, Infiniband FDR, NVIDIA K20x	1,067.49
10	2,678.41	Financial Institution (米国)	iDataPlex DX360M4, Intel Xeon E5-2680v2 10C 2.800GHz, Infiniband, NVIDIA K20x	54.6

(出所)「Green 500」<http://www.green500.org/>

あり、中国のスパコンは上位10位に入っていない。このように、「TOP500」とは全く異なる競争の構図が現れている。

図9に、2006年から2014年までの「TOP500」に於けるスパコン高速化の為に搭載されているアクセラレータ/コプロセッサの変遷を示す。現在、スパコンに最も多く搭載されているアクセラレータ/コプロセッサは、NVIDIA社製のGPGPUというアクセラレータである。GPU (Graphics Processing Unit) とは、主にゲームの画像処理用に発展してきたコンピュータ・グラフィックス向け画像処理装置のことであり、3次元画像などを高速で処理する為に、多数の演算コアが搭載されている。これを数値計算用に汎用化したものがGPGPUである。GPGPU上での計算は、CUDA(Compute Unified Device Architecture)²⁶⁾ というNVIDIA社が無償で提供するGPGPUコンピューティング向け統合開発環境によって実現される。プログラム言語はC言語をベースにしており、コンパイラ、ライブラリ、デバッグなどから構成されている。また、科学技術計算に用いられているFortran言語にも対応している²⁷⁾。

2009年に長崎大の濱田等が、GPUを760個並列に動作させることにより、わずか3800万円ですべて158TFLOPSという処理速度を実現し、「スパコンのノーベル賞」とも言われる ゴードン・ベル賞を受賞した。それまでの国内最速記録は、海洋研究機構の「地球シミュレータシステム」(数百億円) が持つ122.4 TFLOPSであった為、非常にコストパフォーマンスが良いスパコンであると話題になった。実は、著者等もこの頃に量子化学計算をGPGPUによって高速化する研究をおこなっている^{28),29)}。

2010年、中国天津スパコンセンターのスパコン「Tianhe-1A (天河1A号)」がLINPACK性能で2.566PFLOPS となり、中国のスパコンとして初めて「TOP500」に於いて世界最速となったが、この時のシステムは、CPU (Xeon X5670 2.93GHz) : 14336個、GPGPU (NVIDIA Tesla 2050) : 7168個という構成であった。

2014年6月現在、「TOP500」にランクインしているスパコンの内、NVIDIA社製GPGPUを搭載しているスパコンが46台あり、15位以内には5台もある。2位の米国オークリッジ国立研究所が所有するスパコン「Titan」には、「NVIDIA Tesla K20x」というGPGPUが搭載されており、1台当たりのコア数は2688個である。このGPGPUが、「Titan」には約100台搭載されており、コア数の合計は、GPGPUだけで261632個、CPUのコア数も含めると560640個となっている。また、東京工業大学のスパコン「TSUBAME2.5」もGPGPUを「NVIDIA Tesla M2050」から「NVIDIA Tesla K20x」にアップグレードした結果、2014年6月現在、「TOP500」に於いて13位となり、国内ではスパコン「京」に続く性能となった。

また近年、Intel社が「Xeon Phi」というコプロセッサを発売し、これを搭載するスパコンが現れてきた。このコプロセッサは、通常のIntel社製のプロセッサと親和性が良く、GPGPUよりもソフトウェアの移植が容易であるという利点がある。

2014年6月現在、「TOP500」に於いて中国の「Tianhe-2 (天河2号)」が1位となっているが、これには「Intel Xeon Phi 31S1P」(1コア当たり最大4スレッド、倍精度ピーク性能: 約1TFLOPS) というコプロセッサが搭載されている。コプロセッサ1台当たりのコア数は57個である。「Tianhe-2 (天河2号)」には、このコプロセッサが約48000台搭載されており、コア数の合計は、コプロセッサだけで2736000個、CPUのコア数も含めると3120000個となっている。

表5に、最新のGPGPUアクセラレータ「NVIDIA Tesla K40」とコプロセッサ「Intel Xeon Phi 7120P」の性能比較表を示す。倍精度浮動小数点性能では、両者に大きな違いは

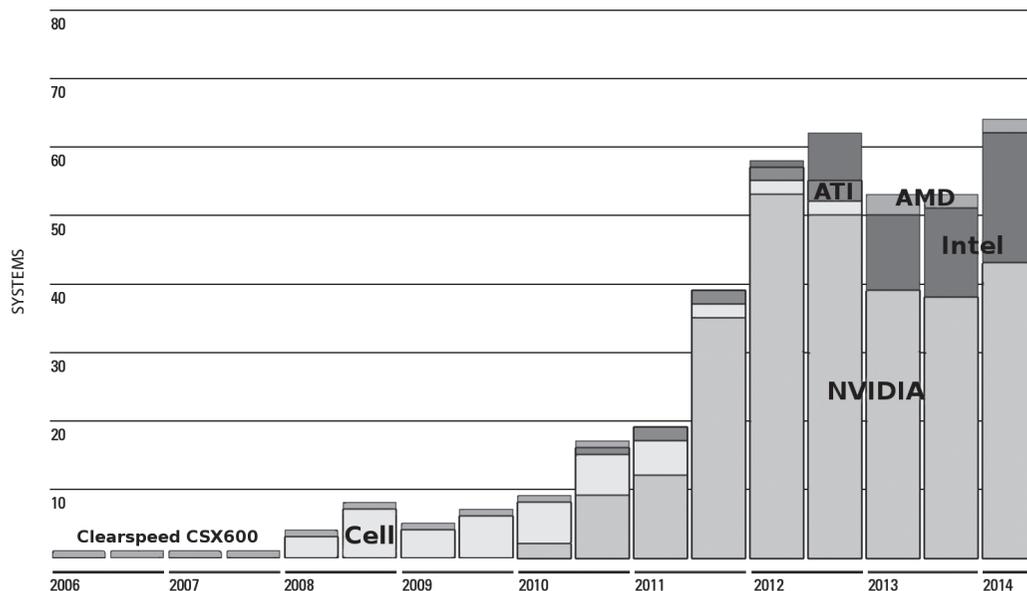
26) NVIDIA Corp., CUDA ZONE, <http://www.nvidia.co.jp/object/cuda-jp.html>

27) PGI CUDA Fortran Compiler, <http://www.pgroup.com/resources/cudafortran.htm>

28) 青木優、伴野秀和、飯高敏晃、円谷和雄、「GPUによるOrbital-Free第一原理分子動力学シミュレーションの高速化」、日本シミュレーション学会「研究賞」(2010年)

29) Aoki,M., Tomono,H., Iitaka,T., and Tsumuraya,K., 'Acceleration of orbital-free first principles calculation with graphics processing unit GPU', J. Phys. Conf. Ser. 215 (2010) 012121.

図9 「TOP500」のスパコンに搭載されているアクセラレータ/コプロセッサの変遷



(出所)「TOP500」 <http://www.top500.org>

表5 GPGPUアクセラレータ「NVIDIA Tesla K40」とコプロセッサ「Intel Xeon Phi 7120P」の性能比較

機種名	NVIDIA Tesla K40	Intel Xeon Phi 7120P
倍精度浮動小数点性能 (TFLOPS)	1.43	1.208
単精度浮動小数点性能 (TFLOPS)	4.29	2.416
メモリバンド幅(GB/秒)	288	352
メモリサイズ(GB)	12	16
コア数	2880	61
最大消費電力(W)	235	300

(出所) 以下のサイトのデータを元に著者が作成

NVIDIA, <http://www.nvidia.co.jp/object/tesla-servers-jp.html>

Intel, <http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/processors/xeon/xeon-phi-coprocessor.html>

HPC, http://www.hpc.co.jp/HPC5000-XIGPU4TS-KPL_features.html

HPC, http://www.hpc.co.jp/xeon_phi_product.html

見られないが、単精度浮動小数点性能に於いては、K40の方が2倍近い性能が出ている。メモリバンド幅とメモリサイズは7120Pの方が大きい、最大消費電力はK40の方が小さくなっている。

エクサスケールのスパコン開発には、消費電力の問題以外に開発費の問題もある。政府の事業仕分けでも問題になったように、次世代スパコンの開発には多額の費用が必要となる。一度はスパコン貿易摩擦によって劣勢になり、グローバル市場での競争力を失った国産スパコンであるが、最近、NECがコストパフォーマンスの優れたスパコン開発し、富士通が約10年ぶりにスパコン輸出を再開するなど、グローバル展開を始めた。しかし、コンピュータのダウンサイジング化の流れは止まらず、スパコン市場は小さくなる一方である。例えば、2010年のスパコン市場は、100億ドル（約1兆円）程の規模しかない³⁰⁾。

そこでNVIDIA社では、スパコン市場よりも大きな市場を持つコンピュータ・ゲーム等の3D処理やHD (High Definition) 映像の再生支援に用いられてきたコンシューマ向けGPUを複数搭載してスパコン並の処理速度を持つコンピュータを開発することを可能にし、開発費を大幅に下げること成功した。ちなみに、2013年の世界ゲームコンテンツ市場は、推定6兆3,269億円である³¹⁾。我が国に於いても、コンピュータ・ゲーム機、自動車、家電、携帯端末、ロボットなどの組み込み用コンピュータも視野に入れつつ、スパコンの開発を進めた方が良いのかもしれない。そして近い将来、数万台の自動車や家庭用ロボットを高速ネットワークで接続したスパコンが登場する日が来るかも知れない。また、巨額の費用がかかる大型科学プロジェクトは、国際協力が一般的である。大型望遠鏡や大型加速器の開発同

様、スパコンの世界でも国際協力が広がってきている。

問題はこれだけではない。シリコン半導体を用いたコンピュータの性能向上に限界が来ている。IBM社は、2014年7月、今後5年間で半導体の微細化 (7nm)、そして、ポストシリコン半導体の開発やニューロコンピュータ、量子コンピュータなどの研究に30億ドルを投資すると発表した³²⁾。そろそろ、過去50年間の経験や知識に囚われずに、今までとは全く異なる考え方でコンピュータを開発する時期に来ている。今後のコンピュータ技術開発に於いては、現在のような米国企業の独り勝ち状態となったコンピュータ業界の勢力図を大きく変えるような発明が出てくるかもしれない。そのような意味では、日本企業もこの競争から抜けるわけにはいかないであろう。

ハードウェアだけでなく、ソフトウェアの開発も非常に重要である。アプリケーション・ソフトウェアを高速化するには、そのハードウェアに合ったチューニングが必要である。また、ハードウェアによっては新たなアルゴリズムの開発も必要である。エクサスケールのスパコンOSについても、今後、日米で共同開発することが決まっている³³⁾。

その他、「TOP500」や「Green500」のようなハードウェア性能の評価ランキング以外に、そのスパコンを用いた研究開発の成果を評価したランキングや、それらを含む様々な評価を総合評価したランキングも必要である。それが、今後の国際的なスパコン開発競争を、より正しい方向に導いてくれるものと考えられる。

VI. まとめ

1946年、米国で最初のコンピュータ「ENIAC」が産声を上げてから、トランジスタや集積回路を用いたコンピュータが次々と登場し、1960年代には早くもスパコンが登場

30) 大河原克行「スパコンからx86サーバへ - コモディティ化が進むHPC市場におけるデルの戦略」マイナビニュース (2009年12月7日) . <http://news.mynavi.jp/articles/2009/12/07/dellhpc/index.html>

31) KADOKAWAエンターブレイン『ファミ通ゲーム白書2014』KADOKAWAエンターブレイン (2014).

31) KADOKAWAエンターブレイン『ファミ通ゲーム白書2014』KADOKAWAエンターブレイン(2014).

32) IBM News releases, <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/44357.wss>

33) 日本経済新聞電子版、「スパコンOS開発、日米が連携 東大や富士通参加」、2013年6月25日。

した。我が国も米国に若干遅れてコンピュータ開発をスタートし、1980年以降、スパコン市場は米国と日本のほぼ独占状態となった。その後、1980年代後半～1990年代は日本企業の優勢時代となったが、日米スパコン貿易摩擦やバブル崩壊による国内スパコン市場縮小により、日本のスパコンメーカーは衰退してしまった。

しかしその一方で、コンピュータ技術の向上により、その処理速度は格段に速くなり、現実に近いコンピュータ・シミュレーションが可能となった。そこで製造業各社は、国際競争力強化の為、設計段階でスパコンを積極的に利用するようになった。文部科学省も、我が国のコンピュータ開発技術の更なる発展と様々な分野の研究、及び産業の国際競争力の強化を目的として、世界最先端の次世代スパコンを開発する「次世代スーパーコンピュータ・プロジェクト」を立ち上げた。その後、参加企業の撤退によるシステム構成の変更や、政府の事業仕分けによる計画の変更もあったが、2011年6月と11月の「TOP500」に於ける性能評価で2度続けてスパコン「京」が世界最速となり、その後、様々な分野で成果を挙げ始めている。

現在、米国、中国、欧州の各国が、国際競争力強化の為、エクサスケール・スパコンの開発に向けて準備を進めている。我が国でも、文部科学省が2020年度からの運用を目指し、約1,400億円を掛けて「エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト」をスタートさせた。

しかし、エクサスケールのスパコン開発にはいくつかのハードルが待ち構えている。一つ目は、消費電力問題である。「京」の消費電力は約12.7MWであり、その電気料金は、年間12億円に上る。現状のシステムでエクサスケールのスパコンを開発しようとする、その電気料金は、更に一桁高くなることが予測される。したがって、今後のスパコン開発には省エネルギー化が重要となる。この解決策には、今のところNVIDIA社のGPGPUアクセラレータやIntel社のコプロセッサの搭載が有力であるが、「京」も国産メーカーで開発し

ているので、おそらくアクセラレータも独自開発をされると思われる。

二つ目は、開発費の問題である。2010年のスパコン市場は、約1兆円規模しかない。そこでNVIDIA社がGPGPUで成功したように、コンピュータ・ゲーム機、自動車、家電、携帯端末、ロボットなどの組み込み用コンピュータも視野に入れつつ、スパコンの開発を進めた方が良いのかもしれない。また、巨額の費用を必要とする大型科学プロジェクトは、国際協力が一般的である。海外では、大型望遠鏡や大型加速器の開発同様、スパコン開発に於いても既に国際協力が始まっている。

それから、今後のコンピュータ技術の発展を考えると問題となるのは、シリコン半導体を用いたコンピュータ性能向上の限界である。ポストシリコン半導体の開発やニューロコンピュータ、量子コンピュータなどの研究分野で現実的な成果を早期に挙げなければならない。そろそろ我々は、過去50年間の経験や知識に囚われずに、今までとは全く異なる考え方でコンピュータを開発する時期に来ている。今後のスパコン開発では、米国のほぼ独り勝ち状態となっているコンピュータ産業分野の勢力図を大きく変えるような発明が出てくるかもしれない。そのような意味では、日本もこの競争から抜けるわけにはいかない。

それから、「TOP500」や「Green500」のようなハードウェア性能の評価ランキング以外に、そのスパコンを用いた研究開発の成果を評価したランキングや、それらを含む様々な評価を総合評価したランキングも必要である。それが、今後の国際的なスパコン開発競争を、より正しい方向に導いてくれるものと考えられる。

スパコン「京」によって、原子数10万個の量子化学計算が可能となった。しかし、夢は原子数がアボガドロ数 (6×10^{23}) 以上の量子化学計算である。これが可能となれば、臓器や脳、延いては一個の生命体をまるごと、第一原理的にシミュレートできる。それらを実現するためには、もっともって高性能なコンピュータが必要である。

ガリレオは、1608年にオランダで10倍の望遠鏡が発明されると、すぐにその望遠鏡を入手して20倍に改良した。そして、それを使って、木星の衛星、金星の満ち欠けや太陽の黒点を発見し、地動説を裏付けた。スパコンは、しばしば望遠鏡に例えられる。高精度の科学技術計算やコンピュータ・シミュレーションによって、今まで見ることができなかった世界が詳細に見えるようになるのである。スパコンは、人類の未来を切り拓いてくれる望遠鏡と言える。

参考文献

青木優、伴野秀和、飯高敏晃、円谷和雄、「GPUによるOrbital-Free第一原理分子動力学シミュレーションの高速化」、日本シミュレーション学会「研究賞」、(2010年)。

大河原克行、「スパコンからx86サーバへ コモディティ化が進むHPC市場におけるデルの戦略」マイナビニュース (2009年12月7日)。 <http://news.mynavi.jp/articles/2009/12/07/dellhpc/index.html>

奥野恭史、「スパコン「京」が拓く医薬品開発の未来 ～速い安い旨い薬づくり～」、K computer Symposium 2013、(2013年)。

KADOKAWAエンターブレイン『ファミ通ゲーム白書2014』KADOKAWAエンターブレイン、(2014年)。

金田康正、『スパコンとは何か』、ウェッジ、(2012年)。

辛木哲夫『次世代スパコン「エクサ」が日本を変える！「京」は凄い、“その次”は100倍凄い』、小学館、(2014年)。

玄 光均、「現代中国 コンピュータ産業の現状と展望」、京都コンピュータ学院校友会機関誌『アキューム』、vol.2、(1990年)。

高度情報科学技術研究機構、「スーパーコンピュータ「京」及びHPCI共用計算資源 平成26年度利用研究課題募集の選定結果について -「京」の産業利用枠を1.6倍に-」、(2014年)。

高度情報科学技術研究機構、「スーパーコンピュータ「京」の戦略プログラム利用枠で実施される平成26年度重点 課題・一般課

題の選定について」、(2014年)。

産経新聞、「「京」より役立つ!? スパコン「FOCUS」が人気」、2014年8月20日。

創薬バリューチェーン『コンピューターで薬を創ろう』、ケイディーネオブック、(2009年)。

中村吉明、渡辺千旬、「通産省の研究開発プロジェクトのマネジメントと効果 スーパーコンピュータプロジェクトのケーススタディ」、研究・技術計画学会、年次学術大会講演要旨集、14、(1999年) pp.75-80

日本経済新聞電子版、「スパコン「京」で復活した「忘れかけられた技術」スパコンは再び「水冷」へ」、2012年7月27日。

日本経済新聞電子版、「スパコンOS開発、日米が連携 東大や富士通参加」、2013年6月25日。

野村稔、「欧州のハイパフォーマンス・コンピューティング戦略とその実現に向けた動き」、科学技術動向、140号、(2013年)。

姫野龍太郎『絵でわかるスーパーコンピュータ』、講談社、(2012年)。

平尾公彦「ポスト「京」プロジェクトについて」、文部科学省「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会(第1回) 配付資料3」(2014年)。

平山令明『実践量子化学入門—分子軌道法で化学反応が見える』、講談社、(2002年)。

文部科学省、「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) の構築について」、http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.htm

文部科学省、「エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト」、http://www.mext.go.jp/component/_b_menu/other/_icsFiles/afieldfile/2013/12/05/1342054_1.pdf

山田昭彦 「コンピュータ開発史概要と資料保存状況について— 第一世代と第二世代コンピュータを中心に —」、『技術の系統化調査報告』、第1集、(2001年) pp.39-104。

山田昭彦 「コンピュータ開発史概要と資料保存状況について— 第3世代・第3.5世代コンピュータおよびスーパーコンピュー

タについて一」、『技術の系統化調査報告』、
第2集、(2002年) pp.7-74。

Aoki,M., Tomono,H., Itaka,T., and Tsumuraya,
K., ‘Acceleration of orbital-free first
principles calculation with graphics processing
unit GPU’ , J. Phys. Conf. Ser. 215 (2010)
012121.

CPUDB, <http://cpudb.stanford.edu/>

FOCUS, <http://www.j-focus.or.jp/>

FUJITSU, [http://jp.fujitsu.com/about/tech /k/
qa/k04.html](http://jp.fujitsu.com/about/tech/k/qa/k04.html)

Green500, <http://www.green500.org/>

Harris,M., harrism@cs.unc.edu GPGPU.org,
2002, <http://www.gpgpu.org/>

HPC, [http://www.hpc.co.jp/HPC5000-
XIGPU4TS-KPL_features.html](http://www.hpc.co.jp/HPC5000-XIGPU4TS-KPL_features.html)

HPC, [http://www.hpc.co.jp/ xeon_phi_product.
html](http://www.hpc.co.jp/xeon_phi_product.html)

HPL - A Portable Implementation of the
High-Performance Linpack Benchmark for
Distributed-Memory Computers, [http://www.
netlib.org/ benchmark/hpl/](http://www.netlib.org/benchmark/hpl/)

IBM News releases, [http://www-03.ibm.com/
press/us/en/pressrelease/44357.wss](http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/44357.wss)

Intel, [http://www.intel.co.jp/content/www/jp/
ja/processors/xeon/xeon-phi-coprocessor.
html](http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/processors/xeon/xeon-phi-coprocessor.html)

Linpack, <http://www.netlib.org/linpack/>

NVIDIA, [http://www.nvidia.co.jp/object /tesla-
servers-jp.html](http://www.nvidia.co.jp/object/tesla-servers-jp.html)

NVIDIA Corp., CUDA ZONE, [http://www.
nvidia.co.jp/object/cuda-jp.html](http://www.nvidia.co.jp/object/cuda-jp.html)

Penn Engineering - ENIAC: Celebrating Penn
Engineering History, [http://www.seas.upenn.
edu/about-seas /eniac/](http://www.seas.upenn.edu/about-seas/eniac/)

PGI CUDA Fortran Compiler, [http:// www.
pgroup.com/resources/ cudafortran.htm](http://www.pgroup.com/resources/cudafortran.htm)

PRACE, <http://www.prace-ri.eu/>

SCC-Computing, [http://www.scc-computing.eu/
en/](http://www.scc-computing.eu/en/)

TOP500, <http://www.top500.org>

