

BEYOND SILICON: NEW COMPUTING PARADIGMS

シリコンアーキテクチャの領域を超えて：新しい計算パラダイム

Toshinori Munakata (宗像 俊則)

ACM 設立以来これまでの 60 年間で、「計算 (computing)」という用語の持つ意味やその実装は大きく変化してきた。本特集で集めた解説記事は、「非シリコンベースの新しい計算パラダイム (non-silicon-based new computing paradigms)」とまとめて呼ぶことができる。これらの個々のパラダイムは互いに大きく異なるものも多くあるものの、3 つの共通する特徴がある。1 点目はこれらの技術が伝統的なシリコンベースの集積回路技術には基づいていないこと、2 点目は基礎となる計算素子が物理的に実装されており単に理論だけではないこと、そして 3 点目はこれらの技術の多くは 1-100nm 程度のオーダーへの微細化を目指していることである。本特集では、「計算」という用語は非常に広い意味で使われている。

現在の計算機ハードウェア技術はシリコンチップを基礎としている。シリコンチップは 1958 年に発明され、1961 年に初めて商業化された。それ以降のハードウェア技術の進歩は、計算速度とメモリ容量がおよそ 18 ヶ月ごとに 2 倍になっていく (いわゆるムーアの法則, Moore's Law) という他に類を見ないのであった。これまで、このような速度やメモリサイズの改善は、回路の大きさを小さくすることによって達成されてきた。しかし、回路間の距離が分子サイズのオーダーまで近づいてくると、さまざまな問題が起こり、安定した計算ができなくなってしまう。そのため、最も悲観的な見方で 5 年、楽観的な見方でも 20 年でこれ以上の進歩は止まってしまうと見られている。だが、このことは現在の技術の終焉を意味しているのではない。シリコンベースのアプローチは、過去、多くの研究と多大な投資によって目覚ましい発展を遂げてきた。シリコンベースの計算技術が限界に達

したとしても、その能力レベルがどの程度であれ、そこからさらに長い年月の間使われることになるだろう。しかし、シリコン時代の終わりを予期した時、全く新しい技術を追い求めようという動機が生まれるのは自然である。

本特集で集めた解説記事で議論している計算パラダイムが、必ずしも現在の技術を置き換えることを目的としているわけではないことには注意する必要がある。いくつかは、ある種の問題、例えば計算量的に困難な問題を解決しようとしているものもあるし、ある特殊なタイプの応用に焦点を当てているものもある。これらの技術のほとんどについては、計算デバイスとして実用的、大規模、日常的に利用されているのはまだ見られないが、これらのアイデアの基本的な本質、内在する新規性、新しい形の情報処理や応用のための基盤としての可能性は科学界に刺激を与えてきている。

その時代の終わりを予期した時、全く新しい技術を追い求めようという動機が生まれるのは自然である。

これらの新しいパラダイムの研究開発はほとんど物理学や化学など計算機科学以外の分野の文献で報告されている。その大きな理由の一つは、これら各々の技術は開発の初期段階にあるため、そもそも基本的な実装の問題に焦点が当てられているからである。しかし、これらのパラダイムがさらに発展していくにつれて、より多くの機会が計算機科学者を巻き込んでいくことになる。その1つの領域は、これらの技術のハードウェア的側面であり、アーキテクチャ設計が挙げられる。別の領域は、ソフトウェア的側面であり、これらの技術に特有な計算手法やアルゴリズムの開発である。ちょうど、並列計算用の新しいアルゴリズムを、逐次アルゴリズムを拡張したり置き換えたりして開発するのにたとえられる。ある領域で生み出されたアイデアは、シリコンベースの技術への応用であっても、新しいパラダイムへの応用であっても、他の領域へ応用されていく。また、そうした領域間の技術移転はハードウェアにおいてもソフトウェアにおいても起こり得る。

本特集の扱う領域は多岐にわたるため、解説論文を分類するのは単純な作業ではない。しかし、便宜上、2つの部分に分けて紹介することにする。前半の解説論文が網羅するのは、主にナノスケールの技術を基礎とする領域である。ナノワイヤ (nanowire)、カーボンナノチューブ (carbon nanotube)、有機分子、生体 DNA および量子物理学に基づく計算手法が含まれる。後半には、光学、マイクロ・ナノ流体 (micro/nanofluidic)、及び、アメーバに基づくカオスを含む、特殊な形の計算についての解説論文が含まれている。

原子計算、分子計算、及び量子計算

現在のシリコンベースの技術は、「トップダウン」のアプローチをとってきている。つまり、大きなサイズから始めて、だんだんサイズを小さくしていくことで、より高速な計算やより密度の高いメモリを実現してきている。前述のとおり、このようにスケールを小

さくしていくアプローチには限界がある。この前半の論文では、それとは全く逆の方向である「ボトムアップ」のアプローチについて述べる。そこで基礎となる計算素子はナノサイズの原子や分子である。計算機は、これらの素子を組み立てて構築されるため、トップダウンのアプローチにおける問題を回避することができる。

Robinett, Snider, Kuekes, Williams は、各素子 (スイッチ) の1辺が 10nm のオーダーのサイズになるという、原子計算・分子計算 (atomic and molecular computing) の有望な側面について論じている。この素子を用いて、1cm² 当り 10¹² 個 (1兆個) の局部密度のスイッチによるプログラマブルアレイを作ることができる。これらの素子はワイヤーでつながれ、メモリや論理回路—すなわち計算機のビルディングブロック—として使われる。小さなこれらの部品をどのように組み立てればよいかという課題に加えて、信頼性が 100% ではない「質の悪い」素子でどのようにすれば耐性のある計算が行えるかという主要な大課題がある。これは昔、真空管について起こっていた状況に似ているが、今回の問題はずっと小さなスケールで起こっている。この技術の大きな強みの1つは、大量の計算素子を組み立てる際のスケールアップ問題が解決済みだということである。これは他の多くの分野では未解決のままである。この解説論文の著者は、この技術と従来のシリコンベースの技術のハイブリッドなシステムによってムーアの法則をさらに先に延ばすことも提案している。

カーボンナノチューブ計算は、直径が数ナノメートルという小さなサイズで、ピコ秒程度のスピードを出せる可能性を持ち、電子散乱 (electron scattering) も少ないという利点を持つため、次世代の計算構成要素として非常に魅力的である。Kong の解説論文では本技術の現状が概説されている。それによると、NOR や NAND といった基本論理ゲートやメモリセルは構築済である。一方、それらのゲ

これらのパラダイムが高度に成長していくにつれて、より多くの 機会が計算機科学者が関与することになる。

ートを統合して複数ビット加算器を実装するのはまだできていない。複数ビット加算器の実装というブレイクスルーは、この技術が本格的な計算技術となるために必要な大きな進展の1つにつながるだろう。カーボンナノチューブの論理素子のための商用利用は、別の動作機構の下で、たとえば、RAM やフラッシュメモリでの高速・高密度メモリ用ナノ電子機構スイッチ (nano-electromechanical switch) として、より早く登場して来るかも知れない。

最近、カーボンナノチューブにやや似ている基本的な計算素子として、有機あるいはそれ以外の種類の分子を基礎としたものが報告されている。Stadler の論文にこの分野の現状について解説している。それによると、高分子化合物のようなバルク材を基礎とする技術はすでに商用化されている。しかしサイズがより小さいもの、特に単一の分子レベルまで小さいものについてはまだ研究段階である。それでもいくつかの場合では、カスケード接続 (cascading) も含む論理ゲートなど基本的な計算素子は実現済みである。この分野の大きな利点として、まず単一分子技術 (single-molecule technology) によって微細化が可能になっているという点がある。また、化学合成 (chemical synthesis) による構成要素の大量生産に伴うコストの削減が期待される。さらに、有機分子はシリコンと比較して生体適合性 (bio-compatibility) にも優れている。その結果、近年この分野の研究活動は一層活発になっており、将来の計算技術の有望な候補になっている。

DNA 計算、より一般的には生体 DNA 計算 (bio-DNA computing) は、Leonard M. Adleman によって USC で 1994 年に初めて開発された。この手法では情報は DNA 上でエンコードされ、それを使って生体分子プロセスを実行し、所望の計算を実現する。この分野は登場して以来、大きな進歩を遂げている。本特集で紹介する Reif と LaBean の解説

論文ではそうした最近の開発のいくつかを調査報告している。この手法における単一素子の計算速度は、 10^2 秒から 10^3 秒程度のオーダーの時間がかかる遅いものだが、これらの要素を超並列で動かすことで高速化ができ、全体として有効な速度を実現できる。この計算手法の特徴として、スケラビリティとナノスケールの DNA 分子による自律的な自己集積化プロセス (self-assembly process) が挙げられる。このプロセスによって簡単に効率的な演算を実現でき、これを実装する研究所の数は世界中で増え続けている。

量子計算 (quantum computing) は、量子力学を基礎としており、シリコンベースの技術とは全く異なる原理を活用している。量子計算機では、それぞれの量子ビット (キュービット, qubit) は 0 か 1, あるいは 0 と 1 を同時に重ね合わせた状態をとることができる。これはつまり、量子ビットは干渉 (interference) や量子非局所性 (quantum nonlocality) などの量子効果 (quantum effect) により、古典的なビットとは異なる挙動をし得るということである。このような量子計算は、探索問題、暗号、整数論などのさまざまな計算量的に困難な問題に応用されている。Bacon と Leung はこの話題についての短いチュートリアルを示し、重要な歴史上の出来事を列挙することで、この分野のサブドメインもカバーしながらうまくまとめている。量子計算アルゴリズムの開発は多くの計算機科学者の興味の対象になっている。商用の製品も市場に現れており、この分野は将来シリコンベース計算を補完するまでに成長していくことになりそうである。

特別な形の計算

本特集後半に含まれる解説論文が取り上げるのは、「計算」という言葉が広範な意味で解釈されている領域である。光計算 (optical computing) は、Abdeldayem と Frazier が議論しており、計算速度を大きく向上させる

可能性を秘めている。現在のシリコンベースの技術と比べて 10^5 倍も速いフェムト秒 (10^{-15} 秒) のオーダのスピードまで一気に到達する可能性があるかもしれない。そのような大きな可能性があるため、特に 1980 年代から 1990 年代初頭にかけて、この技術はかなり沸き立った。しかし技術的に困難なことがわかってくると、その興奮は冷めていった。その困難なことの 1 つは、他の新しいパラダイムでも共通して問題になっていることであるが、カスケード接続の難しさである。具体的な計算機アーキテクチャはまだ作られていないが、AND や XOR といった論理ゲートは構築されており、光学技術のみで作られた半加算器も最近になって報告されている。私は、この技術は段階的に現実のものとなっていく、計算の分野に革命をもたらしていくだろうという見通しを持っている。そのためには大きなブレイクスルーが必要であるが、それが具体的にどのようなものでいつ起こるのかはわからない。おそらく光計算は、最初のうちはこれまでのシリコンベースの計算と組み合わせる形で、全体的な速度を上げるために用いられることになるだろう。

マイクロ・ナノ流体はとても小さなサイズであるため多くの利点がある。一般に、大きなサイズでの処理に比べて処理時間を短くできることや、数千のチャンネルを小さな平面上に配置して (ラボオンチップ, lab-on-a-chip) それらを並列に動作させることができること、そしてそのサイズも個別細胞 (individual cell) や個別分子 (individual molecule) に近い大きさであることである。この技術は、生体臨床医学や工学の領域などに応用できる可能性がある。マイクロ・ナノ流体計算については Marr と Munakata によって議論されている。これはマイクロ・ナノ流体工学の基盤の範囲の上に組み込まれた、特殊用途を目的とした計算パラダイムである。速度は遅いため、従来のシリコンベースの技術を置き換えることを目指しているわけではない。その主な目的は、流体に計算能力を直接組み込みながらそれ特有の長所も維持することで、マイクロ・ナノ流体工学の機能性を高めることにある。今までに、論理ゲート、加算器、メモリなどの計算素子が作られており、カスケ-

ード接続を可能にする技術もいくつか存在する。そのため、スケーラブルな集積回路が作れる可能性もある。

Aono, Hara, Aihara の解説論文では、アメーバのカオス的な挙動に基づくニューラル計算の手法という面白いものを紹介している。スピードはとても遅いので、それ自身を実際の計算デバイスとして使うことはほとんど無理だが、科学的な見地からは以下の点で興味深い。まず、これがカオスのニューロンモデルの、シリコンベースではない初めての実装であるということである。この手法は面白い問題解決能力を持っていて、そこでは速度が問題にならないかもしれないほどである。もう 1 点は、自然界には、レーザや原子・分子で観測されるある種の性質など、カオス的な現象が数多く存在することである。これらの現象の動的速度はとても速く、中には現在のシリコンベースで対応するものより速度が軽く上回るものもある。この解説論文で紹介された問題解決の技術がこれらの分野で実現されれば、高速な計算の新しいパラダイムになり得るだろう。

最もよく尋ねられる問いの 1 つは、現在開発中の技術がいつになれば広く用いられるようになるのか、である。この問いを受ける時、以前、私がゲスト編集者を務めた AI をテーマとした 2 つの本学会誌 (1994 年 3 月号と 1995 年 11 月号) が出版された時に、この分野が実用的な日常の応用に使えるのかということに対して懐疑的な者もいたことを思い出す。それ以降、知的エージェントやスマート計算と言った用語は、多くの応用において非常によく利用されるようになってきている。正確に予言することは難しいが、本特集での解説論文で述べられた、今は発生期にある技術の多くは、今後 5 年から 15 年の間には重要な計算の分野になっている可能性もある。

Toshinori Munakata (宗像俊則 t.munakata@csuohio.edu) は、クリーブランド州立大学計算機・情報科学学科の教授である。

訳：平石拓 (京都大学・情報学研究科)