

コンピューター・シミュレーションが切り拓く天文学——星から宇宙の果てへ—— (1)

スーパーコンピューターが作る“新世界”

梅村 雅之*

今日、コンピューターは人間生活にとって欠くべからざるものになっている。コンピューターはまた宇宙科学の発展にも計り知れない貢献をしてきた。コンピューターがなければアポロ11号の月面着陸はあり得なかつただろうし、スペース・シャトルも飛ばなかつたであろう。そして、ボイジャーのあの美しい映像を見ることもなかつたのである。そして今、コンピューターは宇宙の未知なる現象を解明するための強力なシミュレーション装置となりつつある。特に最近の超高速スーパーコンピューターが作り出す世界は、いままで我々が決して知る事の出来なかつた天文学の“新世界”である。

1. コンピューターの誕生

1910年5月20日、ドイツのリチャードソンは、人間の手による天気予報の数値実験を試みた。彼は、円形大劇場に6万4千人の人を集め、一人一人がおよそ200kmずつ離れた地点にいると想定して、その点の風向きや気圧を使って、時々刻々変わりゆく大気の動きをリチャードソンの指揮に従って1ステップずつ一斉に計算した。これは、現在メッシュ法と呼ばれる流体の典型的な数値計算法の人間版である。彼らはこの大実験によって6時間後の天気を予想したが、結果は敢なく失敗に終わった。リチャードソンはこの試みの後、こう語った。「たぶん遠い将来には、いつかは天候の変化よりも速く……この計算をすることができるようになる日が来るであろう。しかし、これは夢でしかない。」

人類初の電子式自動計算機——コンピューター——が誕生したのは、これから30年以上たった1946年のことである。それは、アメリカが開発した真空管式高速計算機ENIACである。ENIACは計算の専門家が7時間かかる弾道の計算をわずか3秒でやってのけた。これは実に人間の計算速度の8400倍に当たる。このときまさに、リチャードソンの夢の実現に向けての第一歩が印されたのである。ENIACは真空管を2万個近くつないで作られたが、1960年にはトランジスタを用いた計算機がIBMによって制作された。これがIBM7090であり、計算速度は一気にENIACの100倍となった。そしてわずか4年後、1964年にクレイ氏の率いるアメリカのコントロールデータ社はIBM7090のさらに30倍の計算速度を持つ1MFLOPS計算機CDC6600を完成させたのである。MFLOPS(メガフロップス)とは浮動小数点演算(かけ算等)を1秒間に100万回計算する速さの単位である。それは人間の250万倍の計算速度を意味する。これらはすべて計算を逐次処理する計算機でスカラプロセッサと呼ばれる。スカラプロセッサはその後1968年CDC7600、1969年IBM360/195等の4MFLOPS計算機に発展した。日本では1956年

ごろ、ようやく初のコンピューターが完成し、日立のHITAC5020E、HITAC8800など20年の変遷を経て1978年には富士通がFACOMM-200、1979年には日立がHITACM-200HとそれぞれCDC7600に並ぶ4MFLOPS機を完成。今日ではスカラプロセッサとしては最高速の20MFLOPS機FACOMM-780、HITACM-680H、NECACOS1500が誕生し稼働している(図1参照)。

2. スーパーコンピューターの誕生

逐次処理方式のスカラプロセッサは構成素子の光速限界からくる制限を受けており、計算速度はあるところで限界に達する。現在の20MFLOPSはこの限界に近い速さであり、さらに何10倍にも速くすることはきわめて困難である。そこで考えられたのが、複数の計算を同時処理することによってこの壁を破ろうという画期的なアイデアである。このような計算機をアレイプロセッサと呼ぶ。

アレイプロセッサにはベクトル処理とパラレル処理がある。この処理方法を理解するために、例として試験問題の採点を考えてみよう。問題が100問あったとして、一人の採点者が答案用紙を一枚ずつ順番に採点していくのが逐次処理方式のスカラプロセッサである。1000枚をこの方式で採点すると、1問に1秒かかるとして10万秒(約28時間)かかることになる。これに対し、10人の人がそれぞれ問1から問10、問11から問20……問91から問100を担当し最初の人1が1枚目の問1~問10をやったら2人目の人に渡し、2人目の人が問11~問20をやっている間に2枚目の問1~問10を採点するという様に次々に答案用紙を送りながら採点して行くと、1枚目が終了するには100秒かかるが、その後10秒たつ毎に1枚ずつ終了するので、 $100+10\times99=10090$ 秒(約2.8時間)で採点が終了する。このような計算処理方式をベクトル処理方式(別名パイプライン方式)と言う。コンピューターの場合、この例で言えば採点者が演算器に対応し、答案用紙枚数がベクトル長と呼ばれるものに対応する。一方パラレル処理とは、何人かの人が手分けしてそれぞれ100問全てを採点するやり方で、処

* 国立天文台 Masayuki Umemura: New Aspects of Astrophysics by Supercomputers

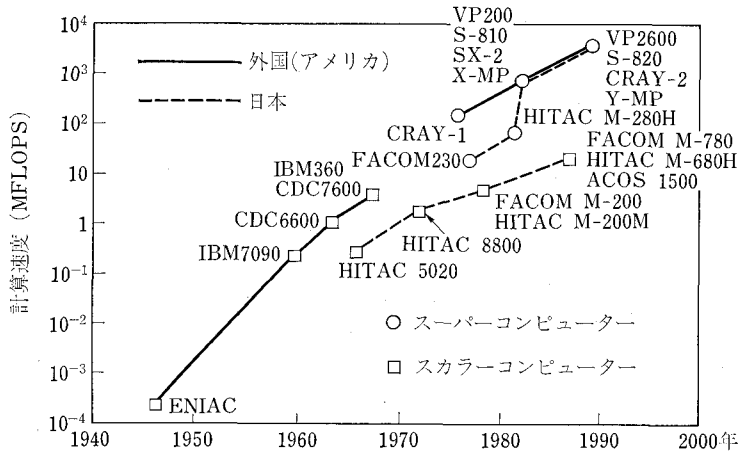


図 1 コンピューターの発展史

理時間は単純に人数分の一で済む。

スカラプロセッサの速度限界に早々と気が付いてアレイプロセッサを最初に考えたのは、ウェスティングハウス社（アメリカ）のスロトニックであった。そしてこれを SOLOMON と名付け開発に当たったが、この構想は残念ながら失敗に終わった。その後幾多の変遷を経て、ついに 1976 年スーパーコンピュータ時代の幕開けとも言うべき超高速計算機が誕生した。それが CRAY-1 である。CRAY-1 はコントロールデータ社から独立したクレイ氏によって設立されたクレイリサーチ社によって作られたものであり、ベクトル処理方式を採用して、実に 160 MFLOPS のピーク性能を達成し、世界を驚嘆させた。（今では、CRAY-1 に匹敵する 100 MFLOPS 以上の計算機をスーパーコンピュータと呼んでいる。）日本では、1977 年によく最初のベクトル計算機 FACOM 230-75 APU が制作されたが、ピーク性能は 20 MFLOPS 程度であった。その後、1982 年に FORTRAN 言語を自動ベクトル化するコンピュータ HITAC M-280 H IAP が誕生しピーク性能で 70 MFLOPS 近くまで達した。そして、1982 年から 1983 年にかけて、日本でもスーパーコンピュータと呼ぶにふさわしい超高速計算機 FACOM VP-200, HITAC S-810/20, NEC SX-2 が誕生し、それぞれ 500, 630, 1300 MFLOPS と、いずれも CRAY-1 を数段上回るピーク性能を実現した。これに刺激されたクレイリサーチ社は 1984 年に CRAY X-MP/4 (800 MFLOPS) を発表した。そして 1987 年までには、夢の 1 GFLOPS (ギガフロップス=1000 MFLOPS) を超えるスーパーコンピュータ VP-400 E (1.14 GFLOPS), S-820/80 (3 GFLOPS), SX-2 (1.3 GFLOPS), CRAY-2 (2 GFLOPS) が次々に誕生したのである。これらは現在、大学、研究所、企業等で活躍しているものである。さらに現在は、この上の SX-3 (22 GFLOPS), VP-2600 (4 GFLOPS), Y-MP/4

(4 GFLOPS) 等が発表されている。日本では、アメリカより 20 年近くも遅れてスーパーコンピュータの開発が始まったが、今や世界最高速度を実現すると共に、スーパーコンピュータ環境は他のどの国よりも優っている。これらの超高速計算機を用いれば、リチャードソンが行った 6 万 4 千人の天気予報の計算はわずか 1000 分の 1 秒で終わってしまう。そして今や、大気の動きを空間点 100 万点について時間刻み 2 分で計算することが可能になったのである。リチャードソンの夢はまさに実現したのである。

3. スーパーコンピュータが切り拓くシミュレーション天文学

1 GFLOPS のスーパーコンピュータは世界最初のコンピュータ ENIAC の 300 万倍、人間の計算速度の実に 10^{11} 倍の計算機である。スーパーコンピュータを用いれば ENIAC が行った弾道計算は 10^{-6} 秒で終わる。そして、スーパーコンピュータで 1 ヶ月の数値計算を仮に人間が手で行ったとするとそれは 10^{10} 年かかることになる。これはちょうど宇宙の年齢である。我々はとてつもない数値実験装置を手に入れたのである。

日本では、既に数多くの理論天文学者がこれまで扱うことの出来なかった複雑な宇宙現象を数値シミュレーションによって解析し、現代天文学の多くの謎を解明できる可能性が開けてきた。それは“星から宇宙の果て”まで宇宙のあらゆる階層に亘るものである。ここで、次号よりシリーズで紹介するコンピュータ・シミュレーションが切り拓く天文学を概観しよう。

(i) 超新星

星の終末を飾る超新星爆発は、まだ未解明の部分が多い。特に、爆発機構そのものに重要な影響をもつニュートリノによるエネルギー輸送の問題や、爆発後の衝撃波形成とその分裂過程は、これまで十分な解析がなされてこなかった。今やスーパーコンピュータを用いればこ

のような問題を数時間から数十時間の数値シミュレーションによって解析することが可能である。

(ii) 星と太陽系

恒星や連星系は自転や回転のために変形を受けているが、これらの詳細な構造決定はスーパーコンピュータで数十時間かかる大計算である。また、太陽系の形成は地球及び生命の誕生と深い関係があり極めて重要な問題であるが、微惑星が合体して地球や木星などの惑星を作る過程はスーパーコンピュータなしでは解析出来ない問題になっている。

(iii) 星間雲

星間雲はガスや塵から成っており、銀河内における星の誕生の地である。その質量は太陽の千倍以上ある。星間雲では磁場が大変重要な役割を果たす。磁場を持った星間雲の構造は最近になってようやくスーパーコンピュータで詳しい解析がなされるようになった。

(iv) 降着円盤

降着円盤とはブラックホールや中性子星の周りにガスが回転しながら降り積もってできる円盤のことである。これは、近接連星系の進化や銀河中心核を理解する上で極めて重要なものである。最近、大規模な数値シミュレーションによって、降着円盤上に出来る渦状の衝撃波が発見された。また、降着円盤を構成する相対論的プラズマについても放射過程を含めた数値解析が進んでいる。

(v) 宇宙ジェット

活動的な銀河の中心核ではビーム状の高速ガス流——ジェット——が観測される。このようなジェットの形成理論として、降着円盤を形成しながら銀河中心に落ち込んでくるガスが磁場の働きで高速ガス流に変わるモデルがあり、数値シミュレーションによって詳細に調べられている。

(vi) 数値一般相対論

一般相対論による重力場の方程式は解析的に扱うことは極めて難しく、これまで4つの球対称厳密解とその他解がいくつかわかっているにすぎない。このため、これまで一般相対論的な現象の解明は非常に制約されてきた。しかし、最近ではスーパーコンピュータによって重力場の方程式を数値的にかなり詳しく解くことが出来るようになり、この分野の研究が飛躍的に向上しつつある。たとえば、中性子星の合体など、100時間近い大計算が行われている。

(vii) 重力多体系専用計算機 (GRAPE)

宇宙には、球状星団、銀河、銀河団、超銀河団等、多くの質点が互いに万有引力(自己重力)を及ぼし合っている系が数々ある。このような系をシミュレートしようとすると、計算時間が膨大にかかり、これまでは1万点程度しか計算できなかった。いま、天文の世界ではこの

ような重力多体系専用の計算機を作る計画が進行しており、既にワークステーション用の GRAPE-1 が動きだしている。今後専用チップを制作すれば1 TFLOPS(テラフロップス=1000 GFLOPS)の極超高速計算機が実現し一気に百万点の計算が可能になる。

(viii) 球状星団

球状星団は $10^5 \sim 10^6$ 個の星からなり、銀河の中に数百個存在する。球状星団の進化はこれまで様々なアプローチで調べられてきたが、質点系をコンピュータでシミュレートすることにより、自己重力衝突系としての多くの物理的性質がわかってきた。現在は、100億年にわたる進化や、星団の衝突などが長時間シミュレーションによって詳細に調べられている。

(ix) 銀河形成と進化

銀河がどのようにして生まれたかは現代宇宙論の大問題となっており、いまだ定説がない。銀河形成の計算の難しさは、ガスの流体力学的効果が重要に働く自己重力系であることである。このような系の数値計算が最近のスーパーコンピュータによってようやく可能になってきた。現在、宇宙の大規模構造から銀河が誕生する過程や、銀河同士の相互作用や合体による進化の大規模なシミュレーションが行われている。

(x) 宇宙の大規模構造

宇宙の大規模構造は数億光年にわたる超銀河集団や銀河がほとんどない巨大な空洞(ボイド)からなり、数十万個の銀河が織りなすものである。大規模構造形成のシナリオはいくつか提案されているが、これらの正否をきめるためには、銀河の大集団や宇宙論的衝撃波のコンピュータシミュレーションが重要であり、現在数十時間にわたる数値計算が行われている。

(xi) 初期宇宙

初期宇宙の謎を解く大きな手がかりの一つは、宇宙のあらゆる方向からやって来る3K宇宙黒体輻射である。これは、ビッグバン以降の宇宙の歴史、特に膨張宇宙の中で銀河や大構造の種がどのように成長してきたかということと深く関係している。この問題を調べるために、宇宙初期のゆらぎの成長に関する詳細な解析がスーパーコンピュータによって行われている。

以上のように、スーパーコンピュータはまさに新しい天文学——シミュレーション天文学——を作り出そうとしているのである。

参考文献

- 1) スーパーコンピュータ——科学技術計算への適用——: 村田健郎, 小国 力, 唐木幸比古著(丸善)
- 2) スーパーコンピュータの現状と展望: 唐木幸比古著 (*bit*, Vol. 19, No. 13, p. 6)