

スーパーコンピュータの現状と展望

専修大学 唐木幸比古 (Yukihiro KARAKI)

数値シミュレーションの問題をコンピュータの演算速度と記憶容量に基づいて数値解析と物理学の両面から分類整理し、現状のスーパーコンピュータの到達水準と応用範囲を概観する。特に今回は、問題の分析を基礎に、3つの調和数による3軸等角表現によって演算パイプライン型や多重プロセッサ型のスーパーコンピュータの性能を総合的に評価する新しい方法を提案したい。この方法による評価によれば、CRAY-1、X-MP、Cyber 205などは2等辺三角形、S-810、S-820、VP-400、SX-2、3090 VFなどは正三角形に近い型になり、並列演算性能の調和の度合いなどの特徴を良く把握できる。例えばS-820はS-810より正三角形に近く、調和性を高めていることがわかる。また、表現された性能三角形の大きさの比較によって演算器能力がどれだけ実効的に発揮されているかを直観的に知ることができる。例えば、S-820の性能三角形は3090 VFのものよりかなり大きい。最後に、スーパーコンピュータの将来展望にも触れる。

1. 数値シミュレーションの問題の分類

主要な数値シミュレーションの問題の核心部分を調べると、何らかの演算を繰返し行うものが多い。例えばそれをFORTRANプログラムで表現すれば、DOループで記述される。データの長さを N とすれば、総和や表計算は N^1 の計算量になる。 $N=100$ 程度の問題であれば人間の暗算または算盤でもよいが、それを超えると人手では時間が掛り、誤りも増える。この問題に対しては、KFLOPS程度の演算速度があれば、 $N=1000$ であっても1秒で済む。つまり、総和や表計算の問題はKFLOPS機械に対応している。次にフーリエ変換を考える。これは元来 N^2 の計算であり、高速フーリエ変換プログラム(FFT)では算法の工夫によってそれを $N \cdot \log N$ の計算量に縮めている。この計算は、 $N=1000$ 程度の問題でもKFLOPS機械で1K秒程度は掛ることになり、信号処理などの実用に供するには、本来、MFLOPS機械が必要な問題であった。FFT算法ではそれをKFLOPS機械上で数秒の計算(計算可能)にした点が、ソフトウェアとしての画期的な評価を得た所以である。つまり、ハードウェアでは一世代前の機械で次世代の問題を解いたところにFFTのソフトウェア価値がある。

ENIAC(1945年)がKFLOPS機械(現在のパソコン・クラス)、CDC6600(1965年)がMFLOPS機械である。

連立一次方程式や固有値問題では、未知数または固有ベクトルの要素数を N とすると、 N^3 の規模の計算量になる。通常は係数行列を $N \times N$ の密行列でなく、帯行列や疎行列とするように工夫するので完全な立法体計算になることは少ないが、例えば $N = 1000$ としてそれをKFLOPS機械で処理しようとするれば、1M秒（～300時間）程度掛ることになり、MFLOPS機械でも1K秒クラスの計算になる。三次元構造物を $10 \times 10 \times 10$ の網目に分割するだけでも、各点に対応する未知数は1000になる。流体解析のように非線形非定常でもっと多くの網目と物理量を必要とすとか非線形構造解析問題など、この規模の計算を繰返し行う必要がある場合には、これに対応できるのはGFLOPS機械ということになる。後述するように、乱流解析に必要な未知数は 10^9 の規模になるから、その問題を数値シミュレーションするにはTFLOPS機械も必要になる。

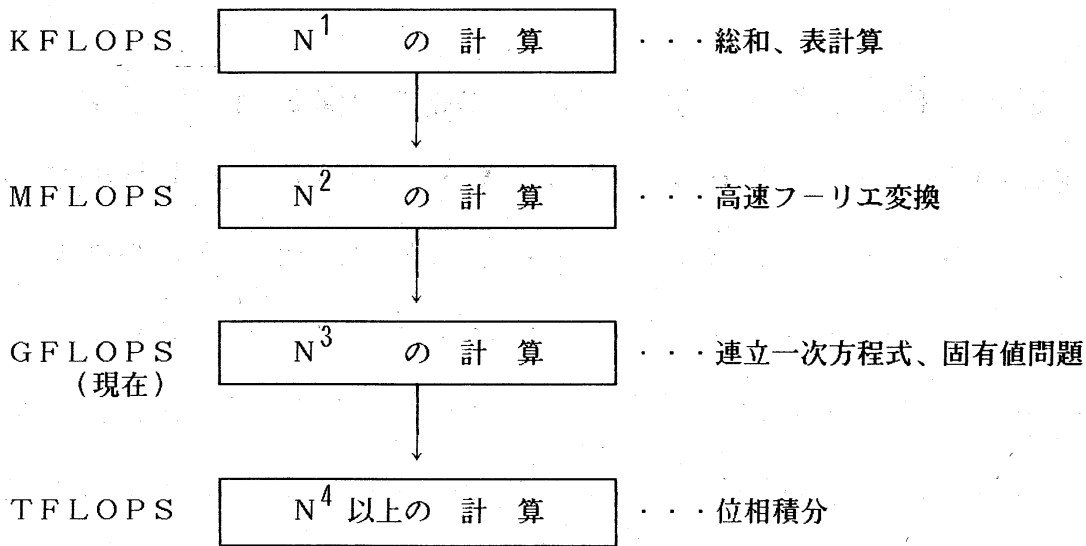
3次元空間と時間に附随する物理量を扱う古典力学の問題には、このほかに多粒子系の動力学や協力問題がある。これはアボガドロ数（ 6×10^{23} 個）程度の粒子の振舞いを追跡することになるので、粒子間相互作用の計算規模はたとえ N^2 であっても、そのままではTFLOPS機械をもってしても全く対応できない。通常は統計力学やモンテカルロ計算などの手法によって計算量の縮少を計ることになるが、例えばボルツマン方程式の積分は N^6 の計算になる。

それに対して、量子力学や相対論的量子電磁力学の問題では、固有値問題や反応解析の計算規模は N^3 であるが、三次元空間（複素数）のほかに量子数空間（パウリ原理など）が加わるので四次元以上の空間点での物理量の解析（位相積分など）が必要になる。空間点と量子空間点の長さを共通に N とすれば、位相積分（波動関数）の計算規模は N^4 以上になるので、やはりTFLOPS以上の機械が必要になる。これらの概略を次頁の図に示す。

データの長さ N は、計算機の記憶容量、特に、主記憶の容量に規定される。1語=8バイト(B)としてKB, MB, GB, TBの各容量に収容できる問題を分類すると、KBでは 10^2 程度、MBでは 10^5 程度、GBでは 10^8 程度、TBでは 10^{11} 程度が限度であるから、KB機械では一次元問題、MB機械では二次元問題、GB機械では三次元問題、TB機械では四次元問題というように大よその対応がつけられる。問題の非線形性や非定常性によってはクラスが一段階ずれることもある。その概略を次頁の図に示す。

後述するように、現在の最高水準にあるスーパーコンピュータは[G FLOPS, GB]のクラスにあるので、それに見合う範囲の問題が数値シミュレーション可能となる。例えば、三次元非線形問題や低いレイノルズ数の移流拡散問題などをPCG法/PBCG法系統の算法などによって安定に数値解析することができる。

数値シミュレーションの問題の分類



N : データの長さ (1語=8B)

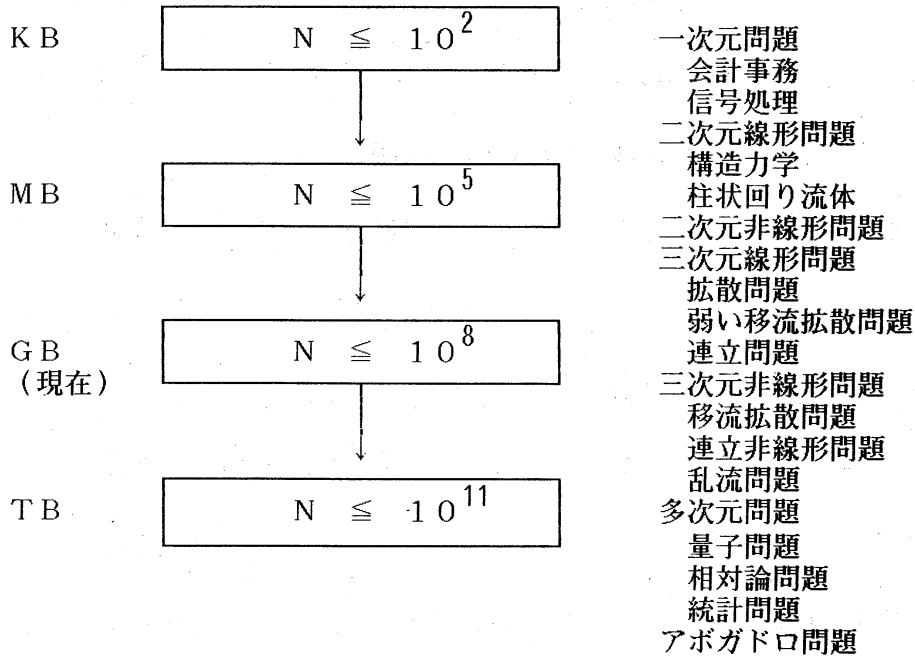


図1. 演算速度と記憶容量による計算規模の分析

2. スーパーコンピュータの概観

性能と価格によるコンピュータの概略の分類を図2に示す。

現在のスーパーコンピュータの基準を、64ビット演算の最高性能が200MFLOPS以上にあるものとするれば、その基準をみताすものは、クレイ社のX-MP、CRAY-2、Y-MPシリーズ、CDC/ETA社のCyber 205、ETA10シリーズ、IBM社の3090 VF 多重プロセッサ・シリーズ（以上米国製品）、日立製作所のS-810、S-820シリーズ、富士通のVPシリーズ、日本電気のSXシリーズ（以上日本製品）などのような演算パイプライン方式を基調とするものと、シンキングマシン社のConnection Machineやインテル社のiPSC、Ncube社のNcubeなどのパラレル方式のものがある。

演算パイプライン方式スーパーコンピュータの市場動向について、図3a～fに示す。3090 VFをスーパーコンピュータに含めるか否かで、市場占有比率が大きく変化する。

スーパーコンピュータの主な流れを表1に示す。単体プロセッサでは、現在、S-820/80の3GFLOPSが最高水準にあり、1990年予定のVP-2600が4GFLOPSを目指している。1992年頃に登場予定のCRAY-4は、2GFLOPSを単体とする64多重プロセッサを目指している。

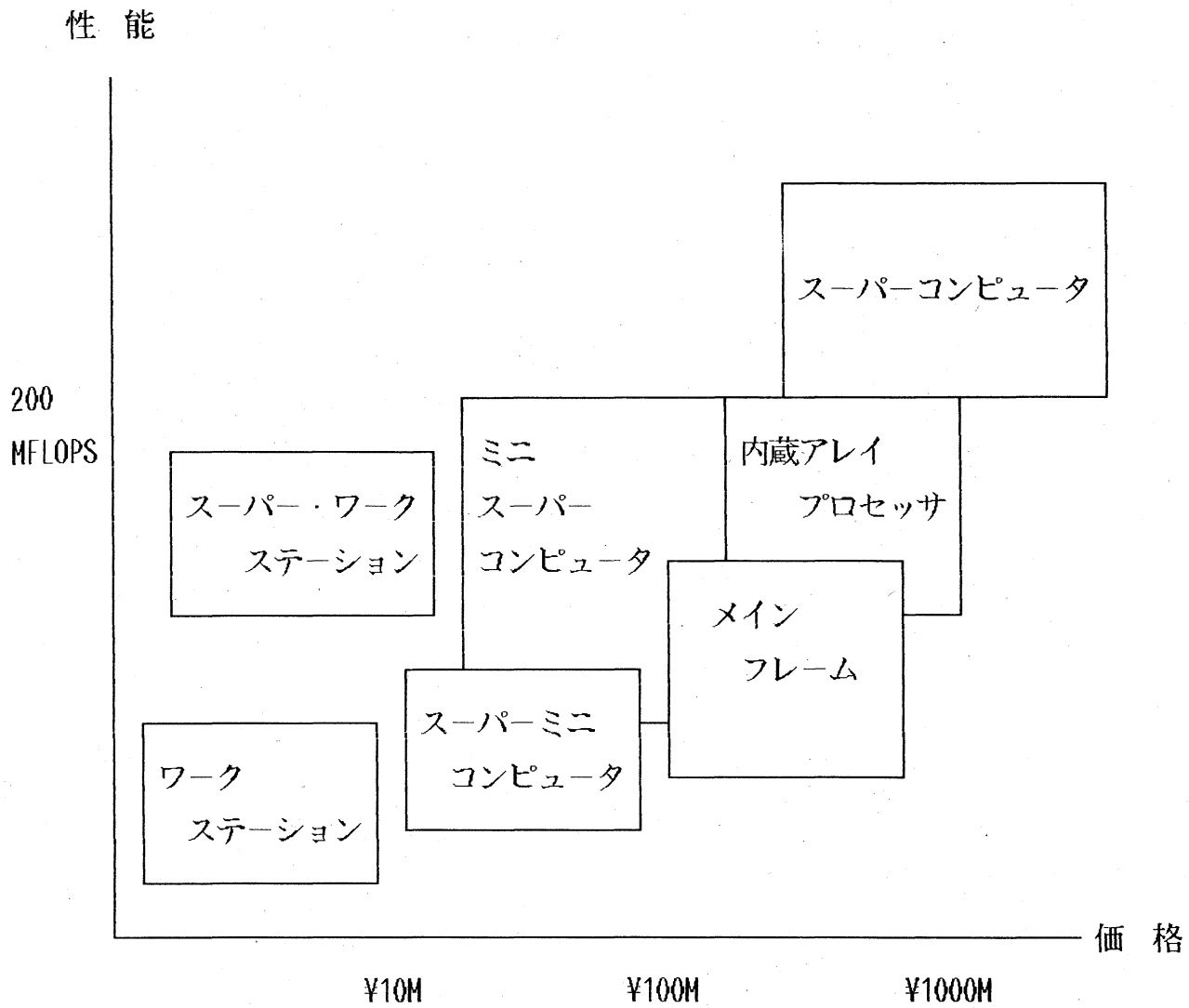


図2. 性能と価格によるコンピュータの分類

図3a. 7-11°-コンピュータの占有状況

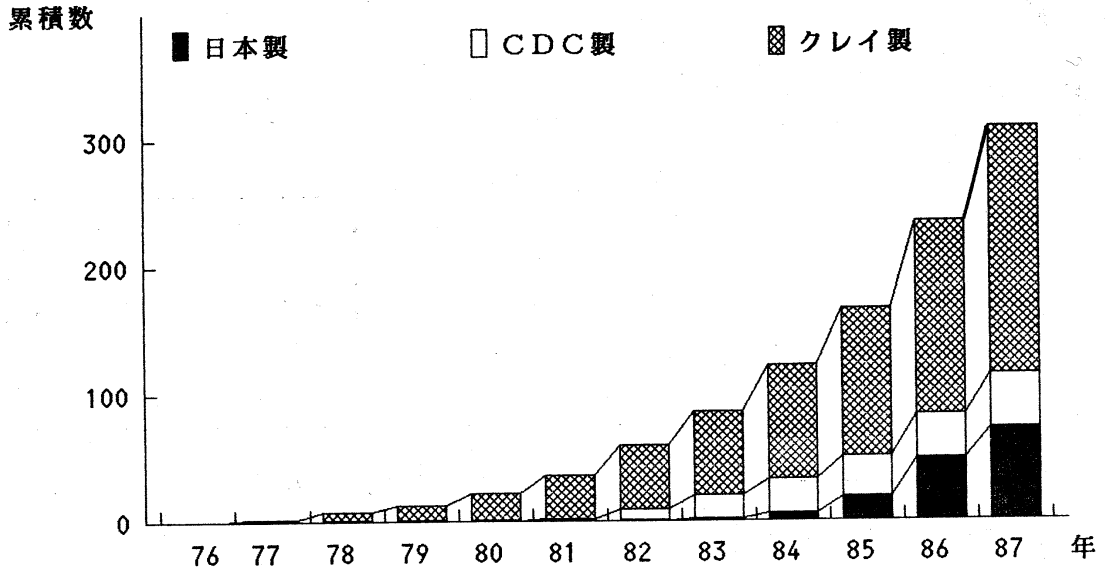


図3b. 7-11°-コンピュータの世界市場



図3c. 7-11°-コンピュータの日本市場



図3d. スーパーコンピュータの占有状況2

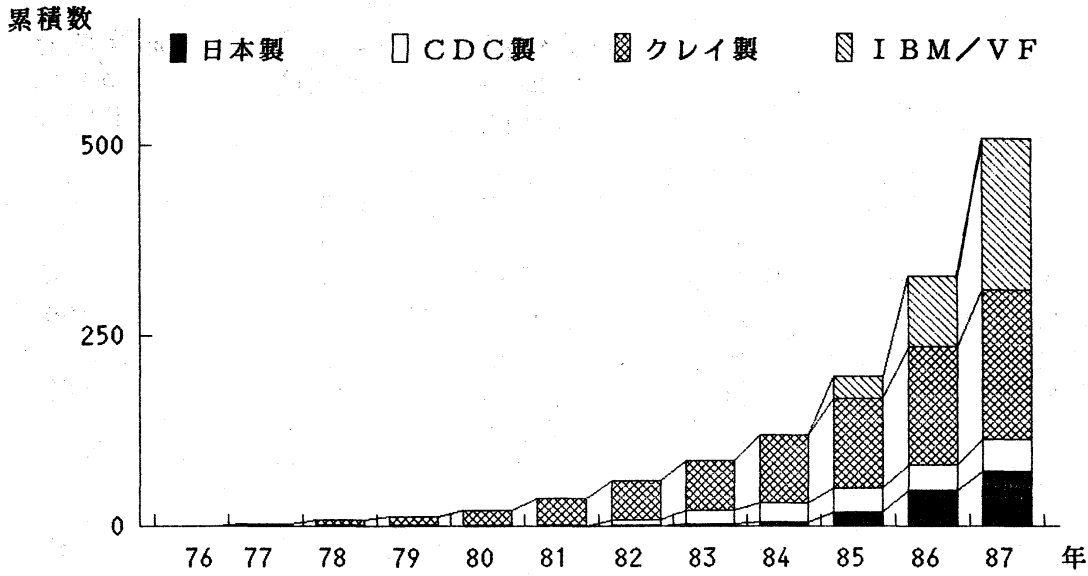


図3e. スーパーコンピュータの世界市場2

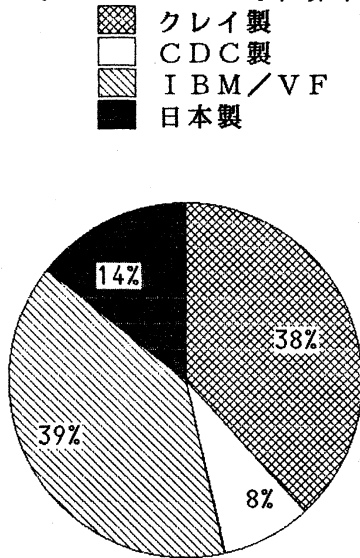


図3f. スーパーコンピュータの日本市場2

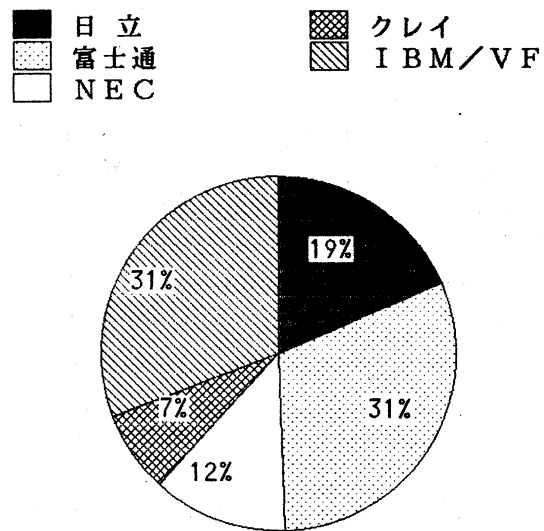


表1. スーパーコンピュータの発展動向

	年	単体性能 (64bit) MFLOPS	多重度 (並列度)	最高性能 (64bit) MFLOPS
ILLIAC IV	1972	1.25	64	80
STAR-100	1973	50	1	50
CYBER203	1980	100	1	100
CYBER205	1981	200	1	200
CYBER205	1982	400	1	400
ETA10-E	1987	381	8	3047
ETA10-G	1988	571	8	4571
CRAY-1	1976	160	1	160
CRAY-2	1985	488	4	1951
CRAY-3	1989	1000	16	16000
CRAY-4	1992	2000	64	128000
X-MP/2	1983	210	2	420
X-MP/4	1985	235	4	941
Y-MP/8	1988	333	8	2667
IBM/VF	1985	116	6	698
S-810	1983	857	1	857
S-820	1987	3000	1	3000
S-830				
VP-100	1983	267	1	267
VP-200	1984	571	1	571
VP-400	1985	1143	1	1143
VP-400E	1987	1714	1	1714
VP-2600	1990	4000	1	4000
SX-1	1985	571	1	571
SX-2	1985	1333	1	1333
SX-3				

3. 調和数による性能評価法

スーパーコンピュータの性能評価には、様々なプログラムが用いられる。標準的なものでは、ロスアラモス研究所の基本演算速度測定プログラム、ローレンスリバモア研究所の14カーネルおよびその発展版である24カーネル、アルゴンヌ国立研究所のリンパックなどが知られる。そのほかにも、CRAY-1ベンチマークス、S-810ベンチマークス、NASAエームズ研究所のNASライブラリ・ベンチマークス、Mendezベンチマークス、Whetstoneベンチマークスなどが知られる。また、分子科学、高エネルギー物理学、プラズマ物理学、流体力学、構造力学などに特有のプログラムによる個別ベンチマークテストなども行われている。スカラーコンピュータの性能評価では、Gibson-Mixプログラムなども古くから知られている。

現代のスーパーコンピュータは、スカラー演算器とベクトル演算器をプログラムの内容に応じて使い分けるので、その性能にも1~100倍程度のバラツキが出る。従って、スーパーコンピュータの性能を把握する場合には、スカラー性能と最高性能を知って性能の下限と上限を押えることはまず必要である。しかしながら、その上下幅は、大抵、非常に大きいので多くの応用問題における実効的な性能を知るのには極めて不十分である。

そこで、幾多のプログラムによるベンチマークテストが行われることになるわけであり、更に利用者プログラムをも加えて全数検査的な評価をすれば、スーパーコンピュータの性能の特徴は把握できよう。しかしながら、スカラコンピュータと異なり、スーパーコンピュータでは各々のプログラムに対するMFLOPS値は様々に異なるので、通常、それらの中から標準的と思われる数値を選択して、あるいはその平均値をとって実効性能値の目安とすることが多い。例えば、リバモア14カーネルまたは24カーネルの平均速度（単純平均または調和平均）、リンパック（100次元または300次元）の性能などである。しかしながら、それらの数値自体にも大きな幅があり、例えばS-820/80では次のようになる。

S-820/80の標準的な性能値

	MFLOPS
理論最高性能	3000
スカラ性能（リバモア平均）	23
リバモア14カーネル単純平均	418
調和平均	82
リバモア24カーネル単純平均	353
調和平均	43
リンパック（300×300）	440
（100×100）	38

最高性能とスカラー性能の間には100倍以上の開きがあることが知られるが、実効性能値にも1~10倍の開きがある。そこで問題になるのは、どの数値を実効性能の基準とすればよいかということである。これらの数値はいずれもハードウェアとFORTRANコンパイラを合体しての性能値であるが、あたかも、素粒子の質量スペクトルにおける重粒子と軽粒子の如くに、幾つかのモードがある。その数値も安定的なものと不安定なものがあり、リバモア単純平均速度やリンパック300次元速度が、コンパイラ版の変更に対してかなり安定的であるのに対して、リバモア調和平均速度やリンパック100次元速度はコンパイラ版の変更に対してかなり不安定である。S-820の例では、プリプロセッサによってリンパック・プログラムの中のサブルーチンCALLをインライン展開すると、100次元の性能が38から65MFLOPSに大幅に向上する。またリバモア調和平均速度は、内部の幾つかの低いMFLOPS値のループの性能をコンパイラの改良で向上させると、大幅に変化することも知られている。逆に、リバモア単純平均速度やリンパック300次元の速度がコンパイラの変更によって余り大きく変動しないのは、ベクトル演算器の高い性能を既にかなり引出しているために、性能が眠っている部分の揺り起こしの寄与が小さいからである。こうしてみると、実効性能の基準にはコンパイラ鈍感のものを選ぶほうが適切なように思われる。

そこで素粒子物理学における基本素粒子の考え方を取入れて、実効性能の基準となる基本性能値を選抜することにした。坂田模型における3粒子（陽子、中性子、ラムダ粒子）のように、あるいはゲルマンとツバイクのクォーク模型における3粒子（ $\times 2$ ）のように、安定的な実効性能値を3つ選び、それを用いて3種類の基準値を定義し、それを調和数と名付けることにした。次にそれを3軸等角表現（ 120° 交差）によって図形化し、性能三角形を描いてスーパーコンピュータの実効性能の調和性を見ることにした。

実効速度の3つの基準値として、浮動小数点乗算、リバモア14カーネル平均およびリストベクトル演算の各速度を選ぶことにした。リンパック300次元の速度を浮動小数点乗算速度の代りに選ぶこともできるが、いずれも、連続アクセス型のベクトル演算性能を計る最も単純なものであり、乗算だけで十分に性能を知ることができる。そこでこれをA軸の基準性能値とした。次に、リバモア14カーネルの単純平均速度を選んだが、これは24カーネルであってもよい。調和平均速度を選ばぬ理由は既に述べた。この数値は、スーパーコンピュータの応用分野として適切な問題の核心部分を集めたプログラムの平均的な速度を表現しているものであり、応用面での実効性能の目安になる。そこでこれをB軸の基準性能値とした。第三には、主記憶制限の極限で最大性能を得るのに重要で応用範囲の広いリストベクトル演算を選び、C軸の基準性能値とした。

調和数による性能評価法の原理

3軸等角表現

A軸・・・[乗算] 浮動小数点乗算の実測速度

B軸・・・[LLL] リバモア14カーネルの平均速度

C軸・・・[LIST] リストベクトル演算の実測速度

調和数の計算法

$$\text{調和数} = \frac{\text{各々の速度 (MFLOPS)}}{\text{正規化の母数 (MFLOPS)}} \times 100$$

正規化の母数 = 浮動小数点加算の理論最高速度

[例] CRAY-1の場合

$$\text{A値} = \frac{37.5 \text{ MFLOPS}}{80.0 \text{ MFLOPS}} \times 100 = 47$$

$$\text{B値} = \frac{37.9 \text{ MFLOPS}}{80.0 \text{ MFLOPS}} \times 100 = 47$$

$$\text{C値} = \frac{3.3 \text{ MFLOPS}}{80.0 \text{ MFLOPS}} \times 100 = 4$$

スーパーコンピュータの調和性

付録の表 (A. 1) に基き、幾つかのスーパーコンピュータについて3つの基準性能値を選び、表2に示す。次に、既に述べた評価法の原理により計算された3つの調和数 (A値、B値、C値) について、表3に示す。

表3の数値を3軸等角表現したものを図4 a～hに示す。

図4 aとbによれば、CRAY-1とX-MPの性能図は2等辺三角形でほぼ相似形をなしており、X-MPにおいて三角形が大きくなっている。これは、両者の基本アーキテクチャが共通で、演算器の活用効率が向上したことを示している。主な改良点であるデータ転送能力強化 (1本→3本) の効果が現れたといえる。C値が弱点であることがわかる。なおクレイ社では、X-MPの改良版 (マシンサイクル 9.5ns→8.5ns) においてリストベクトル性能を向上させている。

図4 eとfによれば、S-810/20とS-820/80の性能図はほぼ正三角形であるが、S-820の方がより調和がとれている。主記憶まわりのハードウェアの強化によってリストベクトル性能を改善したことが性能図に良く表現されている。この機械の課題は三角形をもっと大きくすることである。それにはデータ転送能力をもっと強化する必要がある。S-820とSX-2では、ほぼ同等の演算器活用度を示しているが、SX-2のC値が少し弱い。

ほぼ正三角形にあるS-820、VP-400、3090 VFなどは、いずれも調和性にすぐれているといえるが、性能三角形の大きさでみると、

$$S-820 > VP-400 > 3090 VF$$

となっており、演算器能力の活用度においてVFなどはまだ不十分であることを示している。VP-400のデータ転送能力は演算器能力に比べてやや弱いことが知られているが、この性能三角形によってそのことが一目瞭然となる。

その反対にCyber 205の性能三角形は一定の大きさを有しているが、それに寄与しているのはA値だけである。A値は、連続アクセスで短項型の演算性能を見るものであり、205では、それに限れば演算器性能に近い性能値になっている。しかしながらB値やC値のように、非連続アクセスや多項型の複雑な演算の実効性能を見るものに対しては、演算器能力を十分に発揮しているとはいえない。ここでは示していないが、この特徴はETA10にも受けつがれている。[例えば、リバモア24カーネルの単純平均速度は、Cyber 205(マシンサイクル20ns)の28.8MFLOPSに対して、ETA10-E(マシンサイクル12.5ns)の46.7MFLOPSである。] ETA10はリンパック100次元の速度が勝れていることで知られているが、これは、Cyber 205の弱点の一つであった短いベクトルに対する演算性能をETA10で例外的に強化したことによる。

表2. スーパーコンピュータの3速度

機 種	3 速 度		
	乗 算	LLL	LIST
CRAY-1	37.5	37.9	3.3
X-MP	68.7	68.6	7.0
CYBER 205	91.6	26.4	27.7
IBM3090 VF	10.6	15.6	10.7
S-810/20	120.0	130.6	85.0
S-820/80	399.9	417.9	400.0
VP-400	152.6	163.9	149.4
SX-2	279.1	285.4	106.1

単位=MFLOPS

表3. スーパーコンピュータの調和数

機 種	調 和 数		
	A 値	B 値	C 値
CRAY-1	47	47	4
X-MP	65	65	7
CYBER 205	92	26	28
IBM3090 VF	18	27	18
S-810/20	42	46	30
S-820/80	40	42	40
VP-400	27	29	26
SX-2	42	43	16

図 4 a. CRAY-1

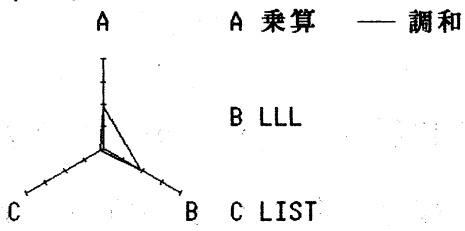


図 4 b. X-MP

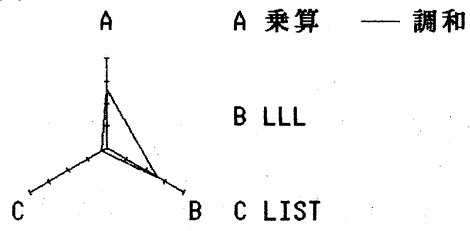


図 4 c. CYBER 205

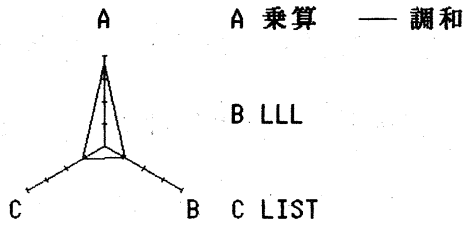


図 4 d. IBM3090 VF

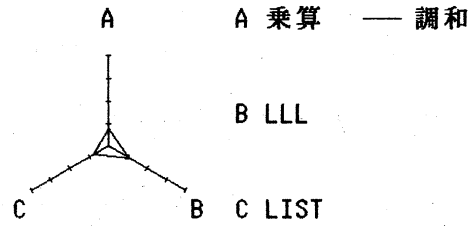


図 4 e. S-810/20

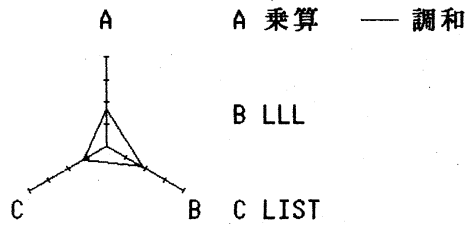


図 4 f. S-820/80

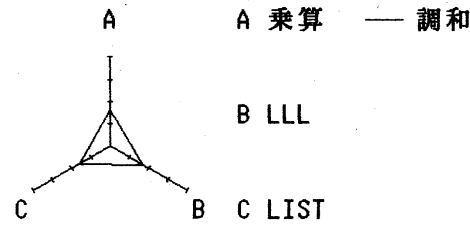


図 4 g. VP-400

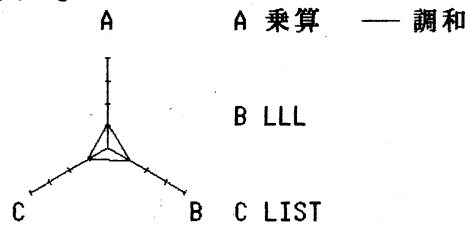
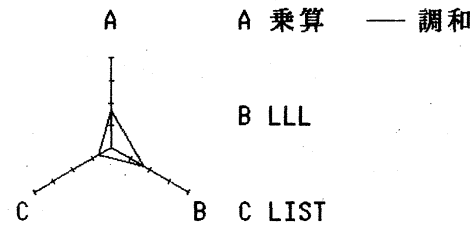


図 4 h. SX-2



4. 現状の到達点と課題

現状のスーパーコンピュータの下で数値シミュレーションが抱えている問題は、流れの速い場における様々な物理現象の解析である。移流拡散方程式によって表現される問題においては、移流速度 (\underline{b}) を含む移流項と、拡散係数 (k) を含む拡散項の寄与比率が数値解析の難易度を定める。その比率は、物理学の側ではレイノルズ数として現れ、数値解析の側ではセル・ペクレ数として現れる。

レイノルズ数 (物理側)

$$Re = | \underline{b} \cdot \underline{a} / k | \quad (a \sim n \Delta x)$$

セルペクレ数 (数学側)

$$Pec = | \underline{b} \cdot \Delta x / k | \quad (\Delta x \text{ は網目幅})$$

$Re \geq 10^4$ のような高いレイノルズ数の流体では、乱流解析が重要になる。それを直接に数値シミュレーションするには、

$Re^{9/4}$ の網目

が必要であることが知られている。例えば $Re = 10^4$ の場合には 10^9 の網目が要求される。各網目に5つの未知物理量、7点差分で1語 = 8Bとすると、必要な記憶容量は280GBになる。現在のスーパーコンピュータの記憶容量の水準から逆算すると、

現在の実効主記憶 256 MB \rightarrow $Re \leq 400$

最大拡張記憶 12 GB \rightarrow $Re \leq 2400$

となる。セルペクレ数で見れば、 $0 \leq Pec < 1$ では数値解析が安定するが、 $Pec \geq 1$ に対してはどこまで安定的に拡大できるかが算法研究の重要な課題となる。現在のところ、PBCG法/PCGS法などの安定性が注目されている。また、この系統のプログラムを含めた連立一次方程式の反復解法では、スーパーコンピュータのリストベクトル性能による高速化が極めて有効であることが知られている。

5. スーパーコンピュータの将来展望

現在の到達点にあるスーパーコンピュータは、

- [a] 演算および記憶素子をできるだけ高速化してマシンサイクルを短縮し、演算パイプラインのピッチを上げる方向にあるもの (S-820、CRAY-3、VP-2600など)
 - [b] 演算および記憶素子の高速化の限界を見越して演算の多重処理をめざすもの (X-MP、ETA10、Y-MPなど)
 - [c] 演算記憶装置の安価なものを大量に集めて並列処理化を拡大しようとするもの (Connection Machine、Ncubeなど)
- などに分類される。

第一の方向は半導体その他のデバイス技術に全面的に依存する。

第二の方向は現状の主流にあるが、多重処理で広範なプログラムを高速化するにはソフトウェアのサポートを必要とする。

第三の方向は既に画像処理等の単能レベルでの超高速化には成功しているが、演算パイプライン方式クラスの汎用性を実現できるか否かの課題を残している。

次世代への主な応用課題は乱流解析であり乱流モデルやLESモデルなどの工夫がなされているが、直接シミュレーションのためには [TFLOPS、TB] の機械が必要である。現在の水準の約1000倍の主記憶と演算速度をもつスーパーコンピュータの出現が期待される。

参考文献

- [1] 唐木幸比古編：特集『スーパーコンピュータの現在』、コンピュータロール、No.20, 1987年、コロナ社。
- [2] 村田健郎・小国力・唐木幸比古：『スーパーコンピュータ—科学技術計算への適用—』、1985年、丸善。
- [3] 日本物理学会編：『スーパーコンピュータ』、1985年、培風館。
- [4] シドニー・ファンバック編（長島重夫訳）：『スーパーコンピュータ』、1988年、パーソナルメディア社。
- [5] 名取亮・野寺隆編：『スーパーコンピュータと大型数値計算』、bit臨時増刊、1987年、共立出版。
- [6] 唐木幸比古：『スーパーコンピュータと行列計算』、情報処理、第28巻11号、1987年、情報処理学会。
- [7] 唐木幸比古：『計算力学と超大型電算機』（基調講演）、第4回CAEDSユーザー研究会報告書、1987年11月27日、日本アイ・ビー・エム。
- [8] 唐木幸比古：『日米「超高速コンピュータ」のベンチマーク・テスト』、日経ウォッチャーIBM版、1988年1月25日号、日経マグロウヒル社。
- [9] 唐木幸比古：『スーパーコンピュータと大型行列計算』（基調講演）、日立スーパーコンピュータ HITAC S-820 が拓げる大規模科学技術計算、1988年3月11日セミナー、日立製作所。
- [10] J. J. Dongarra: "Performance of Various Computers Using Standard Linear Equations Software in a Fortran Environment, Technical Memorandum No23 Oct. 9 1987, Argonne National Lab., U. S. A.; ibid. Aug. 21 1988.
- [11] Yukihiko Karaki: "Analysis of Applicability of Supercomputers on the Basis of Benchmarks", Proceeding of International Conference of Computational Physics, June 1-5, 1988, Beijing, China.
- [12] D. W. Duke, J. D. McCalpin, M. Ramamurthy and D. Sandee: "Initial Benchmark Results from the ETA10 Supercomputer", May 21, 1987, Supercomputer Computations Research Institute, The Florida State University. U. S. A.

付録A. 1 高速コンピュータの性能比較

64ビット演算による性能

	高速コンピュータ機種	CPU数	マシンサイクル	最高性能(理論値)	乗算速度	リバモア14平均		リンパック300元	リストベクトル速度
						Scalar	Vector		
C R A Y	CRAY-1	1	nsec 12.5	MFLOPS 160	MFLOPS 37.5	MFLOPS NA	MFLOPS 37.9	MFLOPS 66	MFLOPS 3.3
	X-MP/1	1	9.5	210	68.7	NA	68.6	106	7.0
	X-MP/2	2	8.5	470	* 72.8	NA	* 85.0	161	NA
	X-MP/4	4	8.5	940	NA	NA	351.7	*140	NA
	CRAY-2	2-4	4.1	1950	NA	NA	* 58.8	*129	NA
	Y-MP	1-8	6.3	2540	NA	NA	NA	*173	NA
E T A	Cyber 205(2p)	1	20.0	200	91.6	NA	26.4	31	27.7
	Cyber 205(4p)	1	20.0	400	181.8	NA	40.3	NA	NA
	ETA10-P	1-2	24.0	333	NA	NA	NA	* 80	NA
	ETA10-Q	1-2	19.0	421	NA	NA	NA	*101	NA
	ETA10-F (77 K)	1-8	10.5	3047	NA	NA	NA	*182	NA
	ETA10-G (77 K)	2-8	7.0	4571	*250 e	NA	NA	*273 e	NA
F P S	FPS M64/MAX	1	176.0	341	NA	NA	NA	48 e	NA
	I/100	64	125.0	768	NA	NA	NA	NA	NA
	I/200	128	125.0	1536	NA	NA	NA	NA	NA
I	IBM3090 VF	1-6	17.2	698	* 10.6	* 7.6	* 15.6	* 18	* 10.7
日 立	S-810/20	1	14.0	857	120.0	7.9	130.6	158	85.0
	M-680H IAP	1	9.0	111	52.2	20.1	35.6	NA	23.1
	S-820/80	1	4.0	3000	399.9	22.9	417.9	440	400.0
富 士 通	VP-100(E)	1	7.0	285	61.7	8.9	78.6	139	23.7
	VP-200(E)	1	7.0	571	111.8	8.9	121.2	183	24.6
	VP-400(E)	1	7.0	1142	152.6	8.9	163.9	197	149.4
	VP-2600(1990年)	1	3.0	4000					
N E C	SX-1E(A)	1	7(6)	285	NA	NA	NA	147	NA
	SX-1(A)	1	7(6)	571	NA	17.1	159.7	224	NA
	SX-2(A)	1	6.0	1333	279.1	19.5	285.4	347	106.1
空 間 並 列 型	Intel iPSC/2VX	64	62.3e	1028	NA	NA	NA	17 e	NA
	NCube 10	1024	2048.e	500	NA	NA	NA	NA	NA
	Meiko Com. Sur.	1000	1000.e	1000	NA	NA	NA	NA	NA
	Think Mach. CM	65536		2500	NA	NA	NA	NA	NA
ミ ニ ス ー パ ー 機	FPS-264(M64/60)	1	53.0	38	NA	7.4	10.3	33.0	NA
	Convex C-1	1	100.0	20	NA	1.7	4.2	15.0	NA
		1	40.0	50	NA	NA	NA	41.0	NA
	Alliant FX/8	8	169.4	94	NA	2.9	10.7	27.0	NA
		8	84.7	189	NA	NA	NA	33.0	NA
	Supertek S-1	1	50.0	40	8.4	NA	10.8	23.6	1.2
M-280D IAP	1	38.0	53	6.8	5.6	8.8	NA	1.2	
逐 次 型	SUN 4/260	1		10MIPS	NA	NA	/	1.1	NA
	MPS 020-2	2		3MIPS	NA	NA	/	e 0.3	NA
	DEC VAX11/780	1		1MIPS	NA	NA	/	0.1	NA

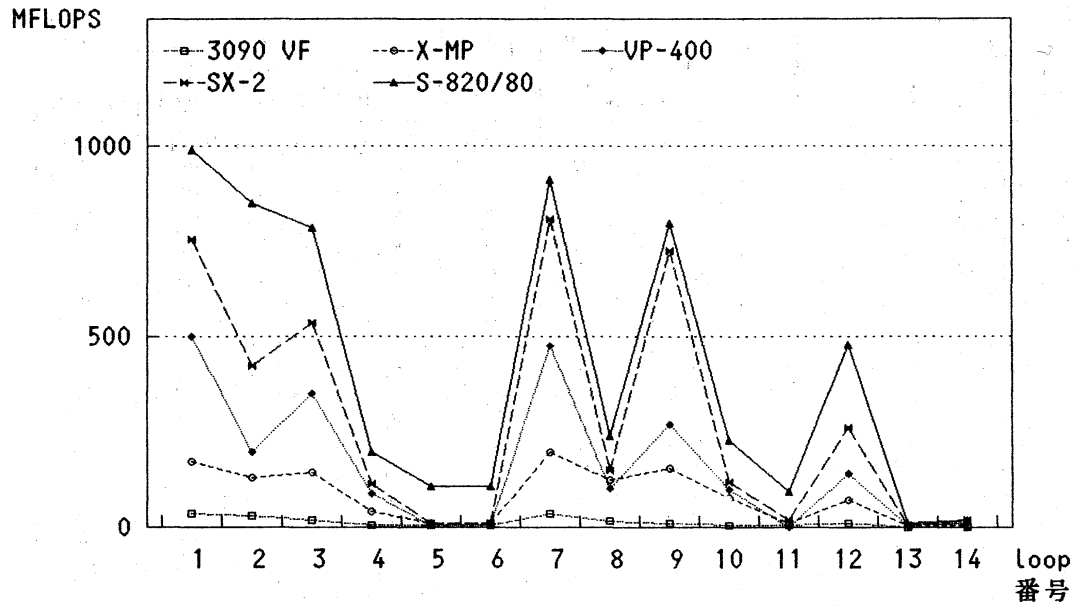
MFLOPS = Million Floating-point Operations Per Second
MIPS = Million Instructions Per Second

*印: 単体性能 / e印: 推算値

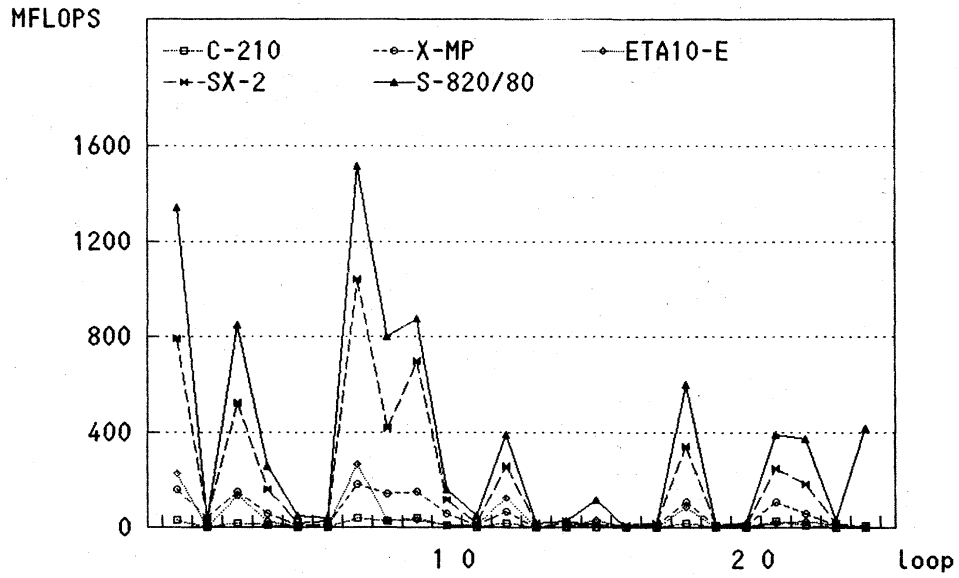
[備考] FACOM VPの最高性能(理論値)は旧モデルのものであり、VP-Fシリーズでは表中の値の3/2倍になる。同様に、NEC SX-1EA及びSX-1Aでは、表中の値の7/6倍になる。

乗算速度及びリストベクトル速度は、ベクトル長1000における値である。

リハモア・ルーフ(14カ-礼) 速度分布



リハモア・ルーフ(24カ-礼) 速度分布



リンパック (300X300)

