

解説

地球シミュレータ計画

谷 啓二
横川 三津夫

日本原子力研究所
地球シミュレータ開発特別チーム

地球（ガイア）との共生の指針を求めて

△前編▽

科学技術庁は、プロセス（基礎科学）研究、観測、計算機シミュレーションの三位一体で地球環境変動予測研究を推進するプロジェクトを平成9年度より推進している。その一環として、大気大循環シミュレーションで実効性能5TFLOPS（ピーク性能40TFLOPS）の超高速並列計算機「地球シミュレータ」を開発中である。この地球シミュレータ開発の必要性、応用のターゲット、そのために求められる計算機としての要件、開発スケジュール、さらには、世界の高性能計算機開発計画における位置付けなどについて解説する。

●地球シミュレータ計画とは

～計画のバックグラウンド

過去数年おきのエルニーニョの年には、南北アメリカ大陸は記録破りの大洪水に見舞われる一方、インドネシア、オーストラリアなどの西太平洋地域は記録的な干ばつに襲われてきた。これらの異常気象はそのつど数多くの尊い人命を奪い、米国では穀物生産に大打撃を与え、食料の大部分を輸入に頼っている我が国は深刻な影響を受けてきた。1997～1998年にかけても同じパターン of 異常気象が東西太平洋地域で発生し、雨季にまったく雨のなかったインドネシアで、焼畑の火が消えず大森林火災が発生した。また、日本においても、1997年の南九州での集中豪雨による土石流や図-1に示すように1998年8月の栃木県那須黒磯周辺での1時間に90mm以上の驚異的な集中豪雨で多数の人命と田畑や家屋が奪われたことは記憶に新しい。

また、国連環境計画（UNEP）と世界気象機関（WMO）によって1988年に設立された「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」による1995年の第二次レポートで

- ・人類の活動による地球温暖化がすでに始まっている。
- ・このままでは、2100年には平均気温が2℃上昇し、海面は50cm上昇する。

と衝撃的な予測がなされた。

このように、環境の変動は、豆腐一丁の値段などの我々の日常生活に直接的にかかわるきわめて身近な問題から、人類の将来を左右するグローバルな問題まで、きわめて重大な問題としてクローズアップされている。この地球環境変動の「予測」が可能になれば、自然災害に対して適切な対策を事前に講じることでその被害を最小限

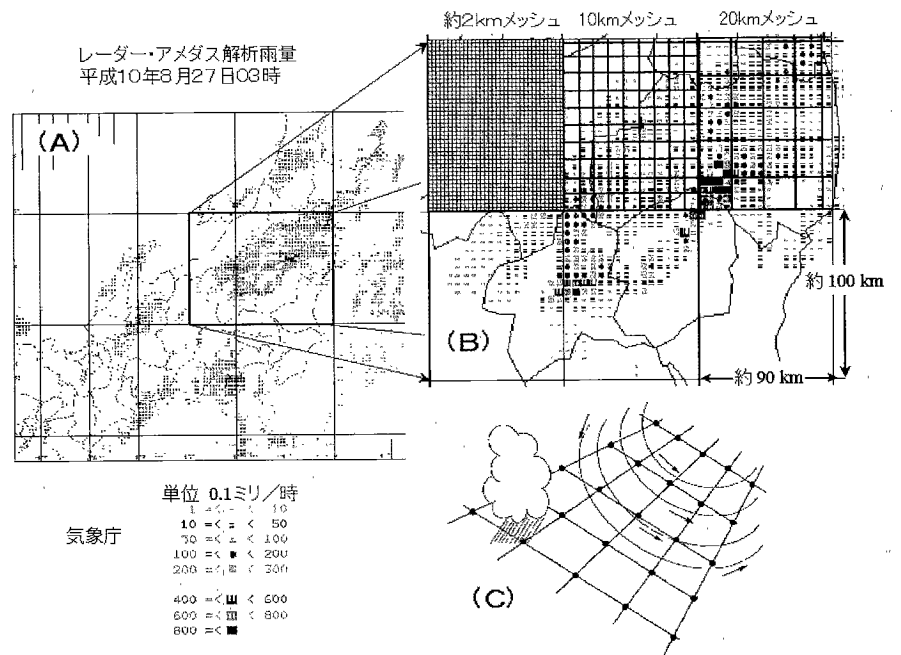


図-1 平成10年8月27日 栃木県那須黒磯周辺での集中豪雨時のレーダー・アメダス解析雨量（気象庁提供）。（B）は（A）の拡大図，（C）は雨雲の概念図。

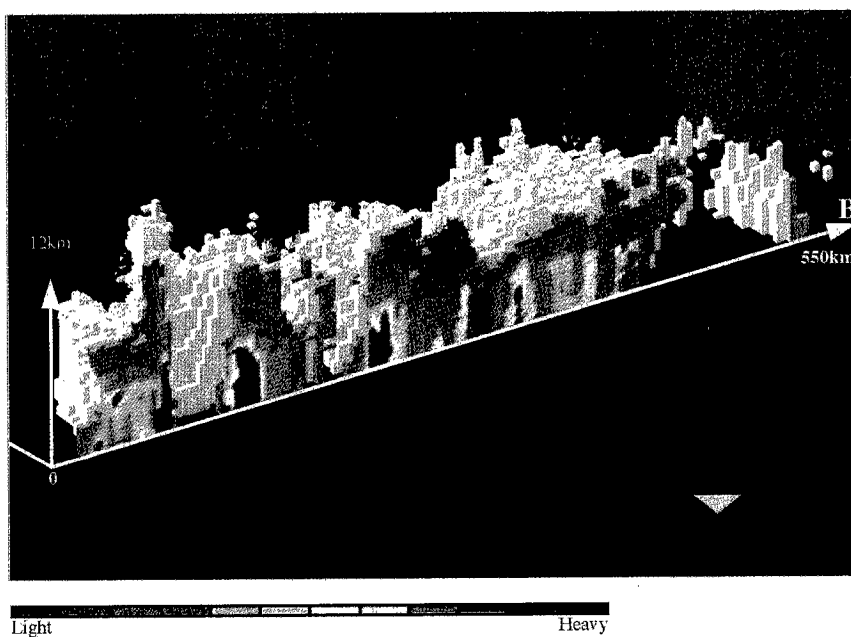


図-2 熱帯降雨観測衛星 TRMM が捉えた台風 PAKA 降雨の強度の3次元構造
(<http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/>参照)

表-1 米国立大気研究センターのCCM2の
種々の計算機での実効効率

研究機関	計算機モデル	プロセッサ数	T42L18	T170L18
NCAR	CRAY C90	1	362MFLOPS (効率 38%)	400MFLOPS (効率 42%)
		16	2708MFLOPS (効率 28%)	2708MFLOPS (効率 28%)
	CRAY T3D	64	608MFLOPS (効率 6.3%)	
	TM CM-5	256	628MFLOPS (効率 1.9%)	
		512	742MFLOPS (効率 1.1%)	
Oak-Ridge & Argonne	Intel Paragon	512		1710MFLOPS (効率 4.4%)
		1024		3181MFLOPS (効率 4.1%)
	IBM-SP2	128		2270MFLOPS (効率 6.6%)

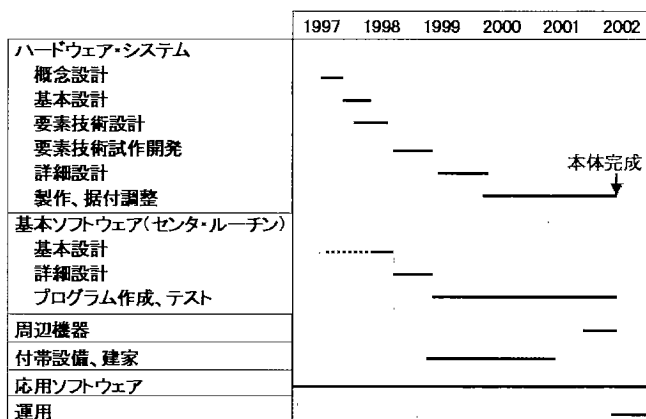


表-2 地球シミュレータ開発スケジュール

国名	研究機関	機種名	ピーク性能 (GFLOPS)	計算機種別	導入時期
日本	国立環境研究所	NEC SX-4/32	64.0	ベクトル並列	1997年2月
		NEC SX-4/C	8.0	ベクトル並列	1997年2月
	海洋科学技術センタ	NEC SX-4/20	40.0	ベクトル並列	1996年2月
		NEC SX-5/16A	128.0	ベクトル並列	1999年16月
	気象庁	Hitachi S3800/480	32.0	ベクトル並列	1996年3月
米国	NASAゴダード宇宙センター 大気研究センター	SGI/Cray T932	58.0	ベクトル並列	1997年3月
		SGI/Cray T3E LC1024	614.0	スカラー並列	1998年
		SGI/Cray T916	16.0	ベクトル並列	
		SGI/Cray T3D/128	19.0	スカラー並列	
	NAVOCEANO (Naval Oceanographic Office)	SGI/Cray Origin 2000/250	62.4	スカラー並列	1998年9月
		HP Exemplar SPP2000	46.1	スカラー並列	1998年9月
		SGI/Cray T3E900 LC512	460.8	スカラー並列	1997年
カナダ	カナダ気象庁	SGI/Cray Y-IMP C916	15.2	ベクトル並列	1994年
フランス	フランス気象庁	NEC SX-4/16	32.0	ベクトル並列	1995年12月
		NEC SX-4/32	64.0	ベクトル並列	1997年3月
		NEC SX-4/16	32.0	ベクトル並列	1997年11月
英国	欧州中期予報センター	Fujitsu VPP700E/46	110.4	ベクトル並列	
		Fujitsu VPP700/160	352.0	ベクトル並列	1998年10月
ブラジル	ブラジル気象庁	SGI/Cray T3E	801.0	スカラー並列	
オーストラリア	オーストラリア気象庁	NEC SX-4/8A	16.0	ベクトル並列	1996年12月
		NEC SX-4/32	64.0	ベクトル並列	1998年1月
デンマーク	デンマーク気象庁	NEC SX-4/20	40.0	ベクトル並列	1999年7月 予定
チェコ	チェコ気象庁	NEC SX-4/16	32.0	ベクトル並列	1996年5月
ドイツ	大気物理研	NEC SX-4/3A	6.0	ベクトル並列	1997年12月
		NEC SX-4B/2	3.6	ベクトル並列	1996年8月
	ドイツ気象庁	SGI/Cray C916/16	16.0	ベクトル並列	

表-3 世界の主な気象・気候関連研究機関の並列計算機導入実績

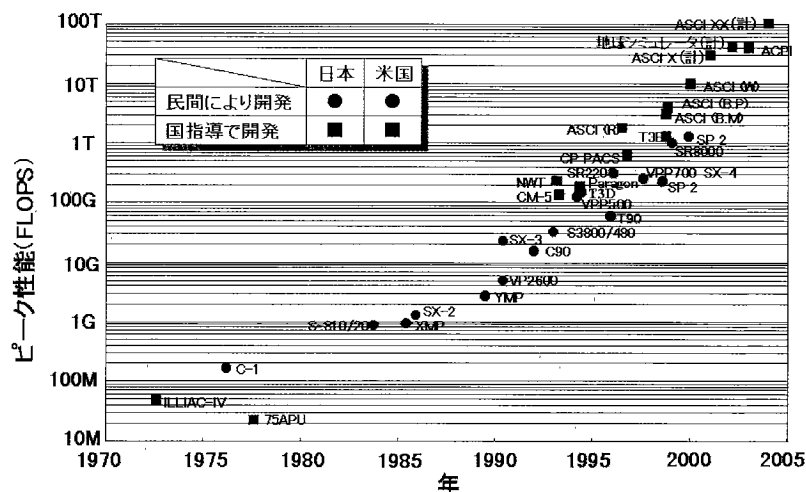


図-3 高速計算機性能の発展

に食い止めることができるばかりでなく、地球（ガイア）といかに共生し人類の持続的発展を実現するかの指針が得られ、それに沿った水資源、エネルギー資源の適切な管理や農林、水産、流通など、我々の安定的な社会経済活動に対しても計り知れない恩恵となる。その実現に向けて、1996年7月の科学技術庁の航空・電子等技術審議会において、地球温暖化予測等の戦略目標とそれらの目標を達成するため、「プロセス（基礎科学）研究」、「観測」および「計算機シミュレーション」の三位一体の研究展開の重要性が報告された。地球シミュレータ計画は、このシミュレーション研究に不可欠なインフラとなる超高速計算機と応用ソフトウェアを整備するプロジェクトとして平成9年度に開始されたものである。

～大規模シミュレーションの必要性

前述の地球温暖化の問題を例に、これらの地球環境変動の予測研究に果たすシミュレーションの役割を考えてみる。

地球温暖化は、関連する現象をざっと列記しても（朝日新聞 平成11年1月8日～3月26日、科学欄 参照）、

- ①氷期一週氷期、エルニーニョなどの変動との関係は？
- ②太陽活動の影響は？
- ③雲の温室効果と太陽光の遮蔽効果（日傘効果）はどちらが大きい？
- ④温暖化による植生、生態系の変化とそれらによるフィードバック効果は？
- ⑤永久凍土の融解と凍土中の温室効果ガスの放出、緑地の増加の効果は？
- ⑥大気中の浮遊微粒子エアロゾルの効果は？
- ⑦熱塩循環（海水がグリーンランド沖で沈み込み、大西洋の深層を巡り、インド洋、太平洋で浮上し、再び大西洋にゆっくりと戻る）との関係は？

などが挙げられる。このように、地球温暖化は数多くの事象が複雑に絡まり合っており、理論的な解析はほとんど不可能な問題である。

もう1つ、地球上での空気の流れを考えてみる。大気中には、人の呼吸や鳥の羽ばたきなどのきわめて局所的な流れから、つむじ風、陸風・海風や台風のような地域的な風、さらには、季節風、貿易風やジェット気流などの地球規模の風まで、スケールの異なる種々の流れが存在している。このような時間的にも空間的にもスケールが極端に異なる現象が共鳴、フィードバックを通して複雑に絡まり合った系は、カオスの性質を持つ場合が多い。

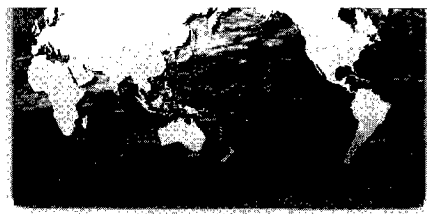
このような系は、よく“バタフライ効果（中国の山中で蝶々が羽ばたいた空気の乱が巡り巡ってニューヨークの天気に影響を与えること）”に例えられるように、ほんのわずかな出発点の違いが時間とともに大きく異なった結果に発展していく性質を内包しており、理論的に取り扱うことはきわめて困難である。

上記2つのような地球環境の問題では、個々の素過程間の部分的因果関係を理論あるいは実験的に解明する「プロセス研究」の重要性は言うに及ばないが、それだけでは地球の全体像は見えてこない。各素過程間の相互作用を統一的に表現する大規模・高精度シミュレーション・システムを開発し、その上にすべての素過程モデルを組み込み、統合化することによって初めて地球の全体像を理解することができるようになる。

～地球環境シミュレーションの宿命

計算機を用いて地球規模のシミュレーションを行う場合、一般に、地球の経度、緯度、鉛直方向にメッシュ化し、大気、海水の温度、圧力、流速などの支配方程式を離散化式で表現し、その時間発展を数値的に解いていく。このメッシュ間隔が小さいほどより詳細なシミュレーションができることになる。ここで問題は、メッシュ間隔より細かいスケールの現象は直接的には表現できないことである。たとえば、図-1 (B) の黒磯周辺のレーダ・アメダス解析図と (C) の雨雲概念図からも判断できるように、20～30kmメッシュでは、数kmスケールの集中豪雨をもたらした雨雲は表現できない。一般に、メッシュ間隔より細かいスケールの現象がメッシュ間隔より大きなスケールの現象に及ぼす影響はモデル化（パラメタリゼーション）することによって方程式中に取り入れられる。しかし、スケールの異なる現象間には相互作用があるため、パラメタリゼーションにより小スケールの現象が大スケールの現象に及ぼす効果を十分表現できない場合が多い。このため、計算精度を上げるにはメッシュの細分化が最も有効であるが、計算資源が有限である限りパラメタリゼーションの呪縛から解放されることはない（モデル研究は永遠に続く）。

もう1つの問題は、シミュレーションの初期値の誤差にある。一般に、初期値としては、観測データが用いられる。近年、地上観測、ラジオゾンデ、気象ロケットや図-2に示す気象観測衛星によるリモートセンシングなど、地球観測データは格段に充実されつつある。しかし、地上観測は地表面の観測に限られること、高層まで精度のよい観測データが得られるラジオゾンデの観測は、北



半球の洋上や南半球では観測点が少ないこと、また、全球をカバーできる衛星観測は、データの鉛直方向の分解能や精度が低いことなどの問題から、現時点では、ある任意の時刻の全球（全3次元メッシュ点上）の観測データは存在しない。このため、ある一連の時刻の既知の観測データと大気や海洋の支配方程式を用いて、大気や海洋のある時刻の全球の状態を推定することが行われている。この方法は、一般にデータ同化と称され、その推定方法としていくつかの手法が提案、研究されている¹⁾。しかしデータ同化で得られる結果はあくまで観測データをベースとした推定値であり、観測データそのものの誤差と推定の両方の誤差が含まれる。このように、地球環境シミュレーションは、その初期値に誤差が含まれており、その誤差がカオスの性質から計算の時間発展に伴い拡大していくもう1つの宿命を背負っている。

●地球環境シミュレーションのターゲット

前述の航空・電子等技術審議会の報告を受け、1997年に同じく科学技術庁において計算科学技術推進会議の地球シミュレータ部会が開催された。その中で、省庁を超えた計算地球科学分野の多数の研究者により、地球シミュレータの開発とその利用について議論された。その応用のターゲットとしては、以下のものが挙げられている。

(1) 大気・海洋科学への応用

- 1) 高分解能グローバルモデル：地球温暖化等の予測
温室効果ガスの循環過程の解明と人間活動による温室効果ガス濃度上昇の定量的評価
- 2) 高分解能地域（リージョナル）モデル：異常気象の発生予測
エルニーニョ機構解明、発生予測およびそれに伴う気候変動の高精度予測
- 3) 高分解能局所（ローカル）モデル：気象災害の発生予測
台風、集中豪雨、マイクロバースト、および重油流出事故時の重油拡散などの予測

(2) 固体地球への応用

- 1) グローバル・ダイナミックモデル：マントル対流から地殻変動まで、地球を1つのシステムとして表現
- 2) リージョナルモデル：日本列島域の地殻・マントルの活動の解明
- 3) 地震発生シミュレーション
- 4) 高分解能地震波トモグラフィ

●地球シミュレータの具備すべき要件

～計算機性能

ここで、大気大循環モデルを例に、地球シミュレータに求められる種々の要件について考えてみる。

上記のように、従来、グローバルモデルでは、数100kmのメッシュで全球を分割していたのに対して、これらの予測の高精度化のためには、10km程度のメッシュに高分解能化する必要があることが数多くの気候シミュレーション研究者から指摘されている。また、図-1に示すように、地域モデルで集中豪雨などの気象災害を予測する場合、従来の20～30kmメッシュから1kmメッシュ程度まで高分解能化しなければ、気象災害に重要な役割を果たす数kmのスケールの積雲を十分シミュレーションできない。

これらの場合、経度、緯度両方向に1桁以上、鉛直方向に数倍、それぞれ分解能を向上させるとして、全体では、数百倍のメッシュ数になる。さらに、物理モデルの高度化に伴いメッシュ点上で取り扱う変数も増大することから、必要主記憶量は現行の1000倍以上となる。また、一般的に、空間メッシュが細くなるに伴い、時間積分間隔も1桁程度短くする必要があることから、計算時間も全体で現行の数千倍必要となる。

以上から総合的に判断して、気候・気象分野の典型的な現用計算機（CRAY C90）と比べ、主記憶容量、計算速度のいずれも1000倍以上の能力が求められているものと考えられる。CRAY C90の大気大循環モデルでの実効速度は4～6GFLOPSであることから、地球シミュレータの実効性能としては、5TFLOPS以上である必要がある。

～計算機タイプ

地球シミュレータの完成時期である2002年の半導体技術をもってしても上述のような現用計算機の1000倍以上の能力を持つ計算機を単一のプロセッサで構成することは不可能であり並列計算機とならざるを得ない。世界の並列計算機は、並列計算機を構成する要素計算機のタイプにより、2つに大別される。1つは、汎用のマイクロプロセッサを非常に数多く用いるスカラ超並列計算機と、ベクトル計算機を比較的の中小規模に並列化するベクトル並列計算機である。計算科学のベースとなる大規模シミュレーションは、粒子モデルと流体モデルの2つに大別されるが、一般に、粒子モデルにはスカラ超並列計算機が、流体モデルにはベクトル並列計算機が適しているといわれている。表-1は、米国立大気研究センター

(NCAR)が開発した大気大循環モデル(CCM2)を、現在の代表的な高速計算機上で実効効率(ピーク性能に対する実行性能の比)を比較したものである²⁾。表中のCRAY C90はベクトル並列計算機であるが、それ以外はすべてスカラ超並列計算機である。ベクトル並列計算機の実効効率は30~40%であるのに対して、スカラ超並列計算機では数%程度しかない。これは、大気大循環シミュレーションのような流体モデルにおいては、ベクトル計算機がスカラ計算機に比べ優位であることを如実に示しているものである。以上のことから、地球シミュレータはベクトル計算機を要素計算機とする並列計算機であることが求められる。

●地球シミュレータ開発スケジュール

地球シミュレータは、その応用を考えれば、1日も早い完成が望まれる。しかし、山積する技術開発課題(後編参照)を1つ1つクリアしていく必要があり、ある程度の開発期間はやむを得ないところである。その開発スケジュールの概要は表-2の通りである。

●世界の中の地球シミュレータ計画

表-3に、現在の世界の主な気象・気候関連研究機関における並列計算機の導入実績を示す。米国を除けば、欧州を中心に世界の主要国で日本のベクトル型スーパーコンピュータが導入されており、この分野におけるベクトル計算機の優位性が示されている。

気象・気候の予測データは、ナショナルセキュリティ上非常に重要なデータである。米国以外の、欧州を中心とした世界の主要国は、日本のベクトル型スーパーコンピュータに自国のナショナルセキュリティを委ねていることになる。この意味では、スーパーコンピュータは単なる商品を超えた重要性を内包しているといえる。

一方、米国は、以下の国家プロジェクトで、汎用マイクロプロセッサを要素計算機とする超並列計算機の利用技術とハードウェアの開発を進めている。

1) HPCC (High Performance Computing and Communications) 計画

1991年計画発表、1992~1996年の5カ年計画で約5,000億円を投入³⁾

2) ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) 計画

1996年から10カ年計画で、包括的核実験禁止条約に

伴い、貯蔵核兵器の安全性、信頼性、性能を確保するため、核実験を代替する高度シミュレーション技術とそのツールとしての高性能並列計算機を開発⁴⁾

3) ACPI (Accelerated Climate Prediction Initiative) 計画

気候変動予測のための高速計算機とシミュレーション・ソフトウェアを開発

地球シミュレータ計画に触発され、2000年度に着手、2003年にピーク性能40TFLOPSの計算機開発を計画
現在は、IT²計画の一部に発展解消

4) IT² (Information Technology for the Twenty-First Century) 計画

長期的視野に立った基礎的情報技術の研究開発と高度情報科学、超高速計算機の研究開発

これら、日米の高速計算機の発展の経緯を図-3に示す。この図から、

- 日米間で、スーパーコンピュータの開発は、抜きつ抜かれつの状態が続いている。
 - 1992~1993年以降(HPCC計画以降)高速計算機の開発は国主導になっている。
- が読み取れる。

前述のように、地球シミュレータは、米国のASCI、IT²計画のマイクロプロセッサベースの超並列計算機とはタイプの異なるもう一方のベクトル型並列計算機の頂点として、世界中の気象・気候研究者からエールが送られてくるようになった。スーパーコンピュータの持つ商品を超えた意味と合わせて、地球シミュレータ計画の重要性の認識を新たにするものである。

謝辞 本テキストをまとめるにあたり、「テクノカレント No.235編集/主筆 岸田純之助」を主として参考にさせていただいた。ご協力をいただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 露木 義: 気象の予測とアジョイント・モデル, 数理学, No.401, pp.50-59 (1996).
- 2) Drake, J. et al.: Design and Performance of a Scalable Parallel Community Climate Model, Parallel Computing, Vol.21, pp.1571-1591 (1995).
- 3) HPCC計画 調査報告「High Performance Computing and Communications Programの現状」米国の科学技術戦略'95, 富士総合研究所.
- 4) ASCI計画 <http://www.llnl.gov.asci/>

(平成11年9月24日受付)