

PN-33-02/03



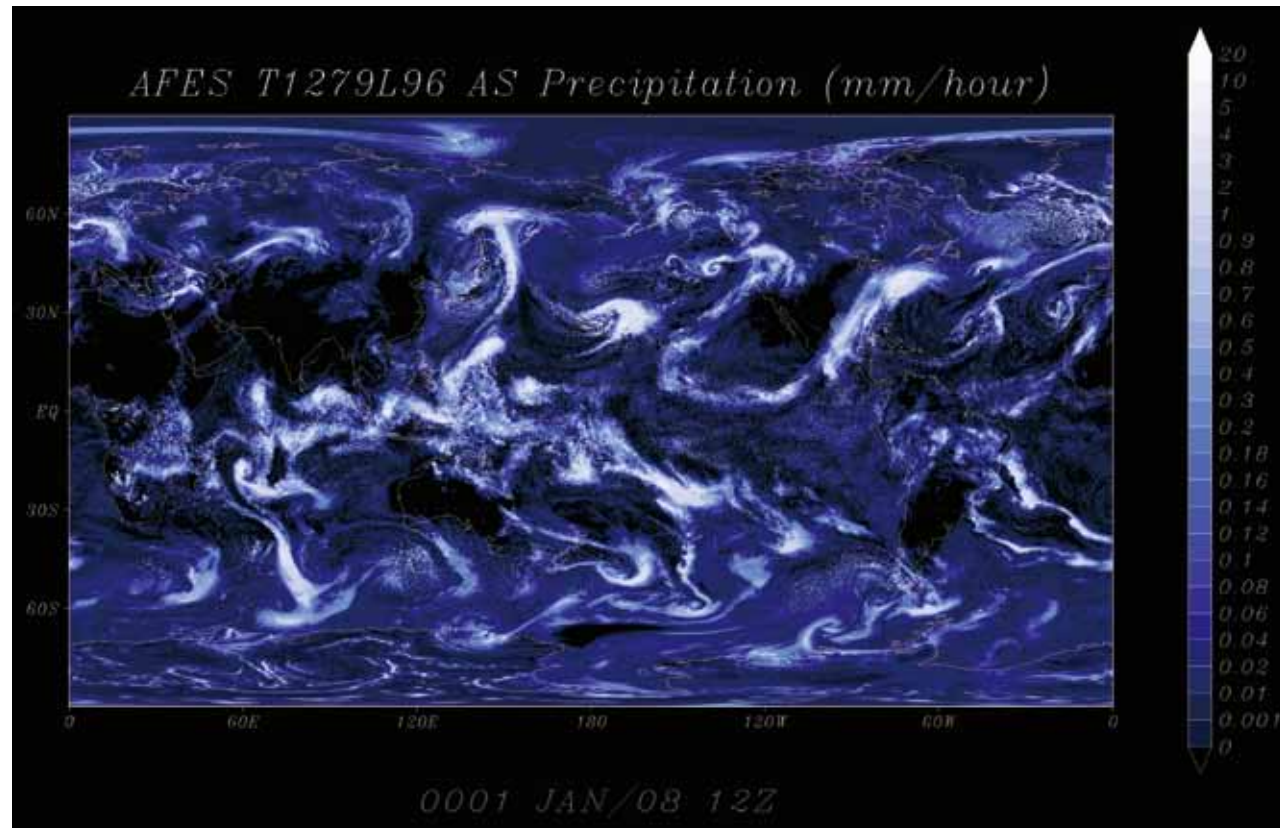
地球シミュレータ開発史

Development of Earth Simulator

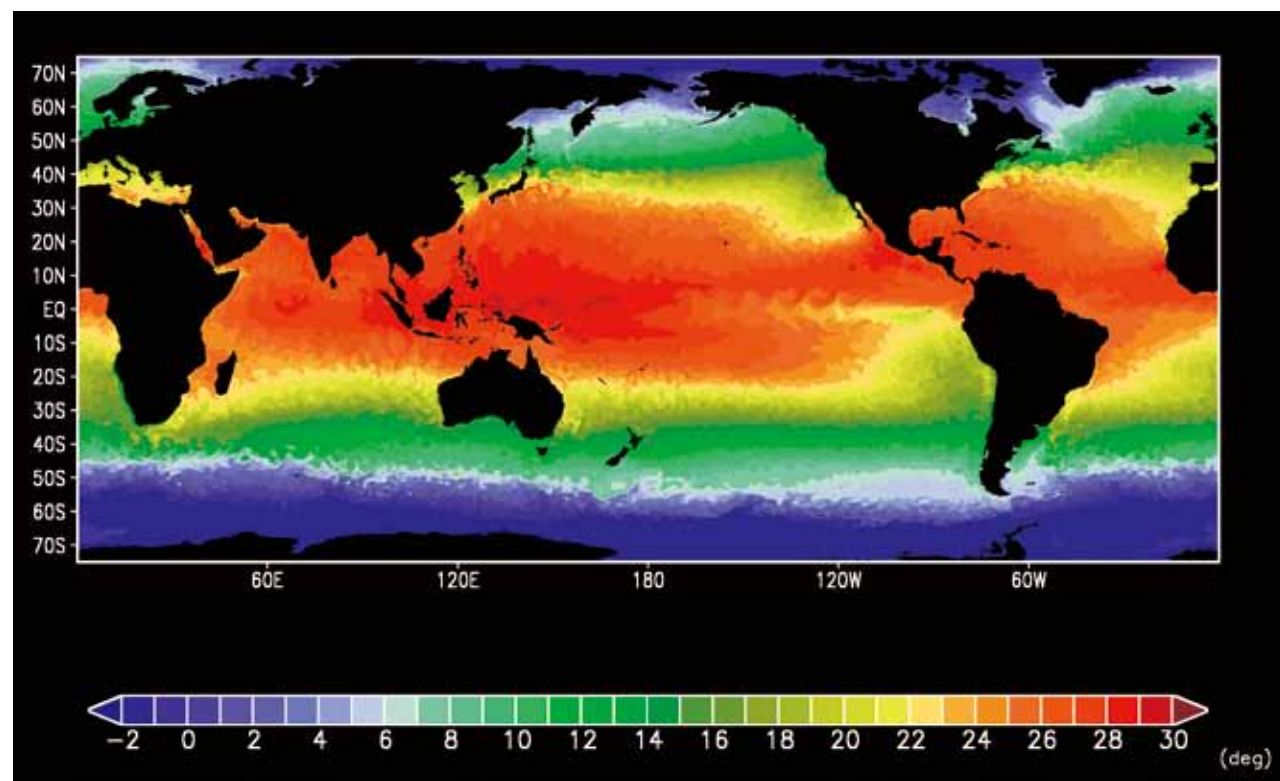


独立行政法人

海洋研究開発機構



水平分解能約10kmの大気大循環全球シミュレーション結果における降水量分布のスナップショット。衛星画像のように、細部まではっきりと表現されている。



同じく海洋大循環全球シミュレーション結果における海面温度のスナップショット。日本付近では、黒潮の蛇行や渦の存在なども見事に表されている。



運用開始から2年半にわたって世界ランキング「TOP500」で第1位に輝いた。



地球シミュレータ開発に多大な貢献を果たした三好甫氏。



2002年11月、ゴードン・ベル賞を受賞。研究成果3件が、実効性能部門最高性能賞、実効性能部門言語賞、特別賞に輝いた。右下は授賞式の様子。

●【地球シミュレータ棟ができるまで】

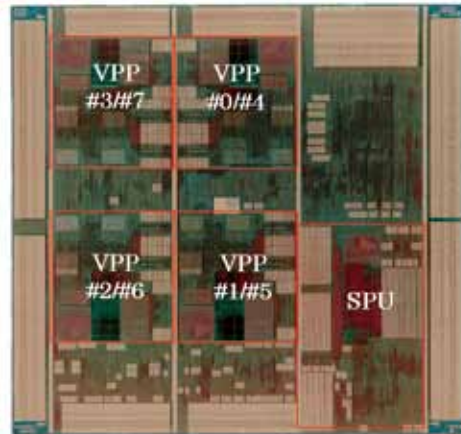


1999年秋に建設が始まった地球シミュレータ建屋(地球シミュレータ棟)は、およそ1年後に完成。

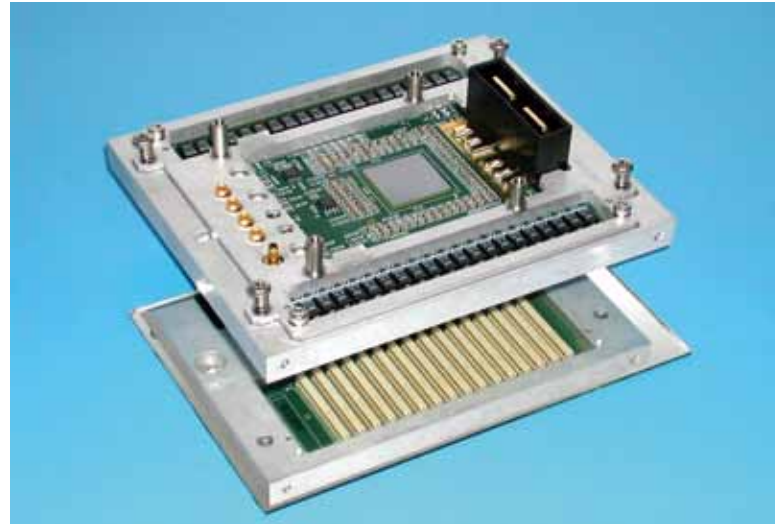


鉄骨2階建て3層構造の地球シミュレータ棟は、電磁ノイズを除去する照明システムをはじめ、外部からの電磁波を完全シールドするなど、さまざまな工夫が凝らされている。

●【地球シミュレータの構造】



計算プロセッサ(AP)のLSIチップを拡大した様子。



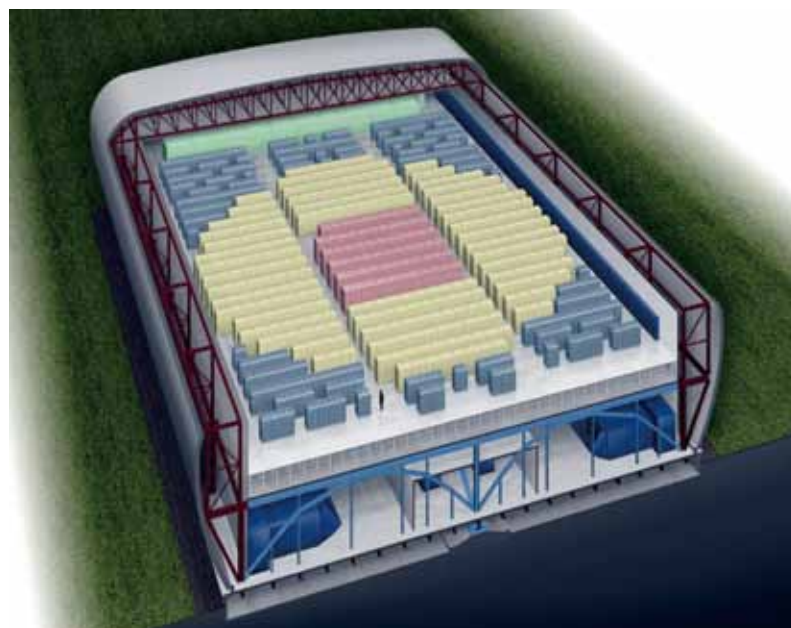
計算プロセッサ(AP)パッケージ。中央のビルドアップ基板上にあるのがLSI(2×2cm)。



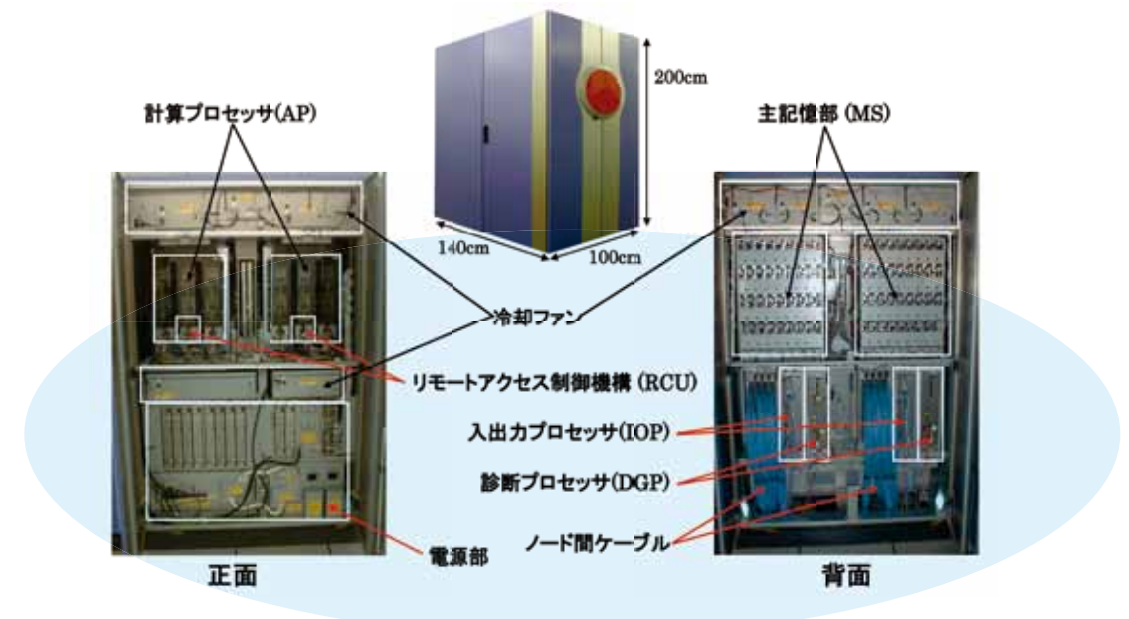
沸騰型ヒートシンク(冷却器)を搭載した計算プロセッサ。



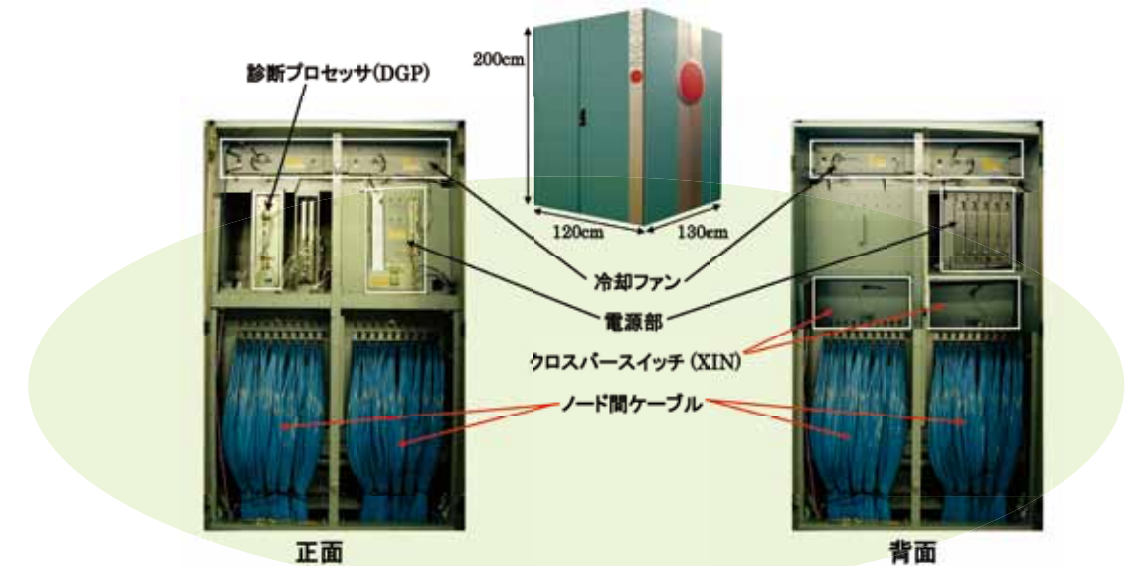
主記憶ユニット(MMU)パッケージ。中央のメモリ制御用LSIを囲むようにメモリ素子が並ぶ。



←地球シミュレータ本体の配置図。中央の結合ネットワークの周りに計算ノード(320筐体)が並び、さらに外側に磁気ディスク、カートリッジテープライブラリシステムが配置されている。



計算ノード筐体(2ノード)の内部。



結合ネットワーク筐体(2ユニット)の内部。

●【地球シミュレータ設置から運用開始まで】



地球シミュレータ棟のフロアに設置される計算機筐体。



計算機フロアの床下(フリーアクセススペース)に敷設される膨大なネットワークケーブル。総本数8万3,200本、総延長約2,400kmに及ぶ。



2002年3月15日に行われた完成披露式の様子。

地球シミュレータ開発史発刊に寄せて

独立行政法人海洋研究開発機構
理事長

加藤 康宏



平成 14 年 3 月、構想段階から数えれば、ほぼ 10 年の歳月をかけて完成したスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が、稼働を開始して 9 年になろうとしております。この間、平成 21 年 3 月には、更新により更なる性能向上が図られましたが、地球シミュレータは、地球温暖化予測、地球内部ダイナミクスなど地球科学分野はもちろんのこと、ナノやバイオ、産業分野など、計算科学を駆使した研究の牽引役となり、多大な成果をあげて参りました。

地球シミュレータの登場は、世界に大変な驚きをもたらしました。その一つの理由は、高い実効性能を有していたことで、事実 2 年半にわたってリンパック世界第一位の座を堅持するとともに、登場した年のゴードン・ベル賞の全部門を総なめにしたことです。今一つの理由は、史上初めてのベクトル型高並列計算機であるにもかかわらず、信頼性の高いシステム構築ができ、稼働開始直後から、その持てる全能力を発揮したことであります。これらは日本が長年培ってきた半導体技術やシステム技術が世界最先端のレベルであったことを示しております。

忘れてはならないのは、数百億円という巨額な地球シミュレータ開発プロジェクトをまとめ上げるために、強力なリーダーシップを発揮した故三好甫氏の存在です。三好氏の存在なしでは、地球シミュレータの成功はありえなかったと言っても過言ではないでしょう。残念ながら、三好氏は稼働開始のわずか 4 ヶ月前に亡くなれましたが、その直前まで地球シミュレータの演算チップの成否を気にかけておられ、文字通り、命をかけて地球シミュレータを誕生させたと言えるでしょう。

本書は、三好氏が残された大量の資料を整理するとともに、当時の多数の関係者にインタビューして、どのようにして地球シミュレータが誕生したのか、その経緯をとりまとめたものです。おりしも、理化学研究所では、神戸の地に次世代スーパーコンピュータ「京」の開発を進めております。国家基幹技術として、スーパーコンピュータは、今後も、ますます重要なポジションを占めていくであろうことは疑いのないところであります。本書がそのための一助となれば幸いです。

目 次

カラーグラフ	2
地球シミュレータ開発史発刊に寄せて	9
もくじ	10
はじめに	12

第1章 地球シミュレータ開発への道のり

1. スーパーコンピュータ開発の歴史	15
(1) スーパーコンピュータ黎明期	15
(2) 日本のスーパーコンピュータ開発と三好甫氏の貢献	16
(3) 日米スパコン貿易摩擦	17
(4) ベクトル方式と並列処理	19
(5) 世界最速を達成した NWT	20

第2章 動き出した地球シミュレータ計画

1. 世界最速のスーパーコンピュータをめざして	23
(1) 計算科学の推進に向けて	23
(2) まず足元を固めよ	25
(3) 計算科学技術推進に動き出した科学技術庁	29
(4) ソフトウェア開発と地球科学	30
(5) 気候変動研究とコンピュータシミュレーション	32
(6) 地球変動予測の実現に向けて	35
2. 地球シミュレータ開発と地球シミュレータ研究開発センター	38
(1) 「地球シミュレータ計画」始動	38
(2) 地球シミュレータの応用ターゲット	41
(3) 地球シミュレータの研究開発体制の構築	44
(4) 地球シミュレータの設計・製作	47
(5) 地球フロンティア研究システムとソフトウェア開発	49

第3章 世界最高性能をめざして

1. 地球シミュレータシステムの概要	53
(1) 地球シミュレータの開発目標	53
(2) 地球シミュレータの構成	55
(3) 地球シミュレータ施設の整備	59
(4) 地球シミュレータの基本ソフトウェア	66
2. 地球シミュレータ本体システムの技術開発	68
(1) 技術的課題克服へのチャレンジ	68
●最先端高集積 LSI 技術	69
●高集積 LSI 設計	70
●高密度パッケージ技術	71
●LSI 実装技術 (ベアチップ実装)	72
●冷却技術	73
●接続技術 (AP-MMU 間)	73
●接続技術 (ノード間)	74

第4章 地球シミュレータ完成

1. 世界を驚かせた地球シミュレータ	77
(1) 地球シミュレータセンター誕生	77
(2) 世界一の座についた地球シミュレータ	79

おわりに	84
------------	----

資料編

●地球シミュレータ開発年表	87
●地球シミュレータの開発経費	93
●用語解説	95
●三好甫氏の主な執筆記事・インタビュー記事	107

はじめに

日本のスーパーコンピュータが世界でトップに立ったのは、性能の認定を行う組織である「TOP500」が1993年に発足して以来、今日までに11回ある。この認定は、6月と11月、年2回行われているが、航空宇宙技術研究所に設置された数値風洞は、1993年11月から4回トップの座に就いている。海洋科学技術センターに設置された地球シミュレータは、2002年6月から連続5回トップの座に就いた。この2機種の他は、単発である。ドッグイヤーと呼ばれるほど半導体の技術革新が進展するなかで、トップのポジションを維持できたのは、その傑出した性能の高さを示すことに他ならない。

この2機種のスーパーコンピュータ開発を終始リードしたのは、航空宇宙技術研究所、地球シミュレータ研究開発センターにいた故三好甫氏である。なお、数値風洞開発は富士通と、地球シミュレータ開発は日本電気とともにおこなわれた。三好氏のメーカー技術者をも納得させる高い見識と洞察力、ずば抜けたプロジェクト管理・遂行能力がこれらスーパーコンピュータを世界一に導いたといっても過言ではない。その力の源泉は、遺品のなかには書き込みのある論文等の大量の資料が物語っているように、コツコツと積み上げた不断の努力の結果に間違いない。

本書は、地球シミュレータの完成直前に急逝された氏が残された膨大な資料を整理し、当時の関係者にインタビューすることにより、地球シミュレータが登場するまでの経緯をまとめたものである。当時は、ハイテクに関わる日米問題、省庁再編、経済不況そして特殊法人改革などが錯綜しており、その一方では科学技術基本法が制定された時期でもある。このような変化の激しい時期に、どのように政策決定がなされて、開発プロジェクトが進められたのか、技術開発の問題点は何だったのか、どのように克服されたのか、などが本書の内容である。

地球シミュレータの開発費は、大半を本体システム製作費が占めるため、関連法人の年次予算での捻出が難しく、半分をリースにする案も検討されたが、補正予算による製作費充当が認められ、無事に完成を迎えることができた。三好氏は、地球シミュレータの開発後は、組織の運営は、自分以外に任せ、次のスーパーコンピュータの開発に没頭すべく、準備を進めていたが2001年11月半ばに急逝された。その後の米国の急ピッチの巻き返しを考えると、氏の逝去により、日本の次のフラグシップスーパーコンピュータ開発が遅れたのは、誠に残念なことであったと言わざるを得ない。

2004年11月以来、世界のトップスーパーコンピュータサイトは米国が独占してきたが、2010年11月、近年成長著しい中国にその座を奪われた。スーパーコンピュータの能力を国力の重要指標と見る各国による開発競争は、さらに加速すると思われる。

独立行政法人海洋研究開発機構
地球シミュレータ開発史編集チーム

地球シミュレータ開発史



第1章

地球シミュレータ開発への道のり

1. スーパーコンピュータ開発の歴史

(1) スーパーコンピュータ黎明期

スーパーコンピュータ（スパコン）という言葉は、一般にコンピュータの特別な構成や具体的な性能によって定義されるものではなく、「その時代のコンピュータと比較して、特に高い性能を有するもの」を意味する。計算速度の数値で公式に定義しようという試みもあったが、性能の急速な発展に追いついていけないのが実情だ。高性能という点で、ハイパフォーマンスコンピュータという言葉も使われるが、どちらも技術的に明確な意味付けがあるわけではない。

ただ、スーパーコンピュータと呼ぶ場合、主に科学技術計算に使われる高性能のコンピュータをさすことが多い。こうした流れは1960年代に米国で始まったとされる。この時代、米国ではいち早くコンピュータビジネスで成功をおさめたIBM社のIBM360-90、コンピュータ開発の歴史にその名を残すセイモア・クレイ氏が関わったコントロールデータ社（CDC）のCDC6600／7600といった優れたスーパーコンピュータが登場し、これらを用いて数多くの科学技術計算に関するソフトウェアも開発された。セイモア・クレイ氏は、後にCDC社を退社してクレイ社を設立し、1976年にベクトル計算機として有名なCRAY-1を開発する。

1960～70年代、国のサポートなどもあり、国産コンピュータの開発が軌道に乗り始めてはいたものの、日本のコンピュータ産業は技術的に米国に大きく水をあけられていた。一方で、日本国内でもコンピュータをデータ処理や科学技術計算に用いる動きは進み、大型コンピュータの需要は急速に高まりつつあったが、国内各社は米国メーカーと技術提携を結ぶなど、米国主導のもとでその開発に取り組んでいた。

日本のスーパーコンピュータ開発が本格化するのは1980年代に入ってからだが、その先駆けとなる優れたスーパーコンピュータが1977年に登場している。富士通によって開発され、当時の航空宇宙技術研究所（2003年に宇宙航空研究開発機構に統合）に設置されたFACOM230-75APUだ。

航空宇宙技術研究所では航空機開発に欠かせない流体力学解析に利用するため、早くからコンピュータの導入に力を入れ、数値シミュレーション開発を進めており、1960年には米国のDatatron205を導入し、研究に活用していた。さらに1966年にはHITAC5020／5020F（日立）を導入し、航空機の機体強度の計算を行うなど、コンピュータ利用分野を大きく拡大させた。1975年には2台のFACOM230-75システム（富士通）を導入し、国内屈指の計算センターを保有することとなった。そして、1977年、そのうちの1台をアレイプロセッサ（APU）に交換し

(FACOM230-75APU)、構造解析や流体力学など科学技術計算分野の大規模なベクトルデータ（一連のまとまりを持ったデータや配列など）を高速に処理することが可能な、国内初のベクトル計算機を誕生させた。CRAY-1の登場から約1年後のことだ。APU 開発は、メーカーにとっても初めての試みであり、設計ミスなど多くの困難を乗り越えなければならなかったが、これによって得られた技術とノウハウは、次に続く富士通の VP シリーズ（1982年に発表）の貴重な土台となった。さらに、1980年代に入ると、日立が S-810を発表（1982年）し、日本電気が SX-1 / 2 を発表（1983年）するなど、ベクトルプロセッサ搭載機による日本メーカー躍進の時代の到来を告げるきっかけにもなった。

(2) 日本のスーパーコンピュータ開発と三好甫氏の貢献

この FACOM230-75APU の開発に大きく貢献した一人の人物が航空宇宙技術研究所にいた。当時、同研究所の計算センター計算研究室長だった三好甫（はじめ）氏だ。APU 開発は、三好氏の指導・助言があつてはじめて実現したといわれている。

三好氏は、1956年に早稲田大学第一理工学部数学科を卒業し、1958年に当時の科学技術庁に入庁。翌年に当時の航空技術研究所（後の航空宇宙技術研究所）に移った。後に計算センター長、科学研究官などを歴任し、世界一を達成したスーパーコンピュータ NWT (Numerical Wind Tunnel: 数値風洞) の開発に尽力。さらに退職後も、プロジェクトリーダーとして地球シミュレータの実現に大きな役割を果たすことになる。

三好氏は、FACOM230-75APU が導入されると、すぐに GFLOPS スケールの計算性能を持つベクトル計算機をつくる計画に向けて動き出した（「G〈ギガ〉」は10の9乗、「1GFLOPS」は、1秒間に10億回の浮動小数点演算を行う能力を表わす）。ちなみに、FACOM230-75APU の計算性能は、最大 22MFLOPS（「M〈メガ〉」は10の6乗）であった。三好氏は、各メーカーに呼びかけ、GFLOPS スケールのスーパーコンピュータ実現に向けて積極的に活動した。1980年



日本のスーパーコンピュータ開発に貢献した三好甫氏

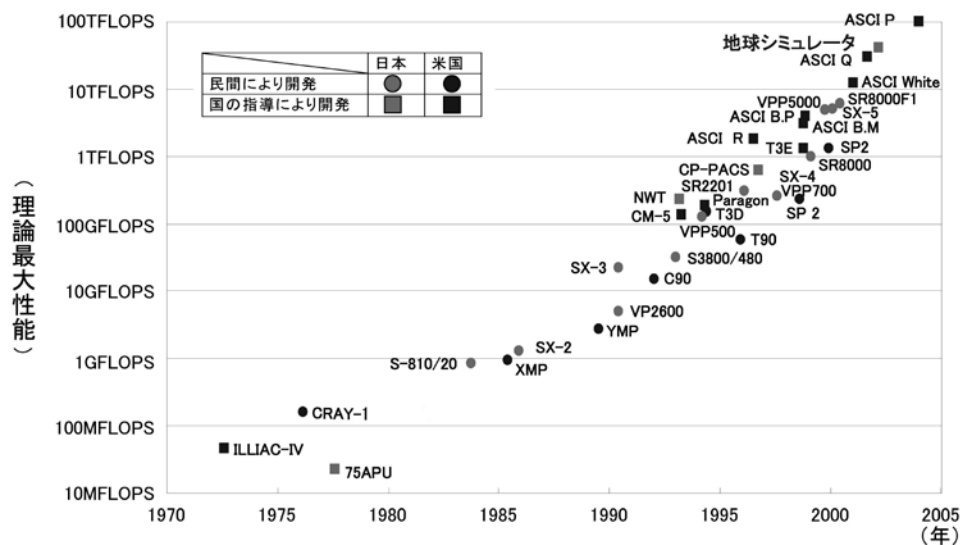
代に入ると、日本の経済的な好調が技術開発を後押しし、富士通、日本電気、日立といったメーカーは設備投資や研究開発に力を入れ、日本のスーパーコンピュータ技術は瞬く間に世界のトップに躍り出た。1985年に出荷された日本電気の SX-2は理論性能 1.3GFLOPS と初めて 1GFLOPS を超えたベクトル型スーパーコンピュータであった。さらに同じ年に航空宇宙技術研究所と富士通

によって FACOM VP400(理論性能 1.14GFLOPS) を中核機とする第1世代数値シミュレータ (NS I) が開発された。そして、1987年には日立が理論性能 3GFLOPS の HITAC S-820を発表した。

当時から三好氏は国内各社と並列計算機の開発にも取り組んでいたが、残念ながらこれは実現しなかった。この時代に開発された日本のスーパーコンピュータは、いずれも米国クレイ社の CRAY-1と同じベクトル型の高性能スーパーコンピュータだった。このことが、後のスパコン貿易摩擦の種をまくこととなった。

(3) 日米スパコン貿易摩擦

1980年代、日本製のスーパーコンピュータが著しくその性能を高めていく一方で、米国では停滞期を迎えていた。この時期は、世界のスーパーコンピュータ市場の規模が大きく拡大した時期でもあったため、日本製のスーパーコンピュータは国内はもとより欧米諸国にも数多く設置されるようになった。逆に80年代初頭まで絶大な勢力を保ってきたクレイ社は、徐々に世界的な競争力を失い、CDC社も1989年にスーパーコンピュータ分野から撤退するまでに追い込まれていた。そうしたなか、1985年に米国国立大気研究センター (NCAR) で、1987年にはマサチューセッツ工科大学 (MIT) で、日本製スーパーコンピュータが落札後に導入をキャンセルされるという出来事が起きた。日米政府間交渉において、米国側は、日本のメーカーが大幅なダンピング (不当販売) を行っていることを主張した。また、日本国内において国産スーパーコンピュータへの優遇政策がとられ、米国製スーパーコンピュータが不当に排除されていることを指摘した。このころ日本の経済的な成長は著しく、ハイテク分野を中心に日本製品が米国市場を席巻しつつあった。



日米スーパーコンピュータの性能の推移

スーパーコンピュータも例外ではなかった。こうしたことへの反発もあったのではないかとされるが、日米のスパコン貿易摩擦は大きな問題となった。日米間で繰り返し協議が行われた結果、日本の調達慣行の見直しが進められ、スーパーコンピュータ市場の透明性は高まったが、その一方で国家安全保障上の配慮から米国市場の閉鎖性はほとんど改善されなかった。1987年から日米スパコン協議に参加していた三好甫氏もこの問題に大きな関心を抱き、当時のビジネス誌の取材に「スパコン摩擦をめぐる米国の動きは、スパコン技術でリーダーシップを保持したいという技術覇権主義の押しつけ」と語るなど、米国スーパーコンピュータ市場の閉鎖性を憂慮していた。

こうした状況にありながらも、日本のメーカーは米国市場の堅く閉ざされた扉を開こうと努力を続けていった。だが、そんななか、再び大きな問題が起きた。1996年に全米科学財団 (NSF) のスーパーコンピュータ導入における入札で、日本のメーカーが提示した価格がダンピングに当たると認定され、米国は 1997 年に最大 454% に及ぶアンチダンピング関税をかけることを決めた。これにより、日本製スーパーコンピュータは、事実上米国市場から締め出されることとなった。しかしその後、2001 年に提訴していた米国メーカーに日本メーカーのスーパーコンピュータを OEM (Original Equipment Manufacturing) 供給することで、2001 年に和解が成立し、提訴が取り下げられ、問題は終結した。

日米スパコン貿易摩擦が問題化し、日米間で激しい政府間交渉が行われた 1990 年代初頭、米国では新たな動きがあった。ブッシュ政権のもと、1992 年に HPCC (High Performance Computing & Communications) 計画がスタートしたのだ。米国の産業競争力の強化を目的に開始されたこの計画は、国家主導型の大規模な科学技術研究開発プロジェクトであり、並列コンピュータをターゲットとした高性能コンピューティングシステムの開発、そのための先端ソフトウェアやアルゴリズムの開発、研究・教育のための高速通信ネットワークの開発、基礎研究支援・人材育成を推進するものだった。さらにクリントン政権下では NII (National Information Infrastructure: 全米情報基盤) 構想へと発展し、1996 年には米国エネルギー省による ASCI (Accelerated Strategic Computing Initiative) 計画なども始まり、国をあげて高性能スーパーコンピュータ開発に力を注ぐこととなった。

スーパーコンピュータ開発に関する国家プロジェクトについては、日本でもすでに IT 産業振興を目的に 1980 年代から通商産業省の主導で行われてきた。1981 年に始まった「科学技術用高速計算システム」プロジェクトをはじめ、90 年代には「リアルワールドコンピューティング」プロジェクトが実施されている。これらは華々しい成果を達成することは叶わなかったが、新しいデバイス技術の開発、並列処理システムの研究開発などの成果を挙げている。さらにこうしたプロジェクトは、各メーカーの技術向上にも貢献しており、ある意味では、後の地球シミュレータプロジェクトのベースになったともいえる。

(4) ベクトル方式と並列処理

1977年に登場した FACOM230-75APU 以降、1980年代、日本のスーパーコンピュータ開発は急速な進展を見せ、世界市場への進出を果たした。そして、この時期の日本は、まさにベクトルプロセッサ全盛の時代であった。

スーパーコンピュータの高性能化の歴史は、言い換えれば演算性能の高速化の歴史でもある。特に科学技術計算においては、同じプログラムで数多くのデータを処理していく「DO LOOP」と呼ばれる繰り返し演算実行を、いかに高速化するかが大きな課題であった。そのための手法のひとつとして開発されたのがベクトルプロセッサ方式だった。データを順次処理していくスカラー方式に対して、ベクトル方式は、ひとつの命令で連続的に複数データの処理を行い、高速化を実現した。もうひとつ、高速化するための方法として考えられたのが、数多くの演算器を同時に稼働させて、ひとつの命令で多くのデータを同時に処理し、高速化を実現する並列処理だ。

スカラー方式をタクシー、ベクトル方式を一度にたくさんの乗客が乗れる電車に例えると、両者の違いを理解しやすい。タクシーは小回りが利いて速いが、乗り場にたくさんの客が集まるとすぐに行列ができてしまう。その点、電車は同じ方面へまとめてたくさんの乗客を運ぶことができる（だが電車は乗客が少ないときには、かえって効率が悪い）。また、並列化はタクシーが走る道路の車線を増やすこと、電車の複数線化で何本の電車を同じ方面に走らせることによって、同時にたくさんの乗客を運ぶことに例えられる。

ベクトルプロセッサ方式、並列処理（スカラー方式の並列処理）は、どちらも1960～70年代に米国で開発された技術だ。ベクトルプロセッサ方式は、クレイ社のCRAY-1で本格的に製品化され、成功を収めた。一方、並列プロセッサ方式によるスーパーコンピュータも開発されたが、当時は並列化技術が未熟だったため、その性能をなかなか活かすことができなかった。しかし1980～90年代に、米国でいち早く並列計算機の開発が進み、やがて製品化されるようになる。日本では、CRAY-1登場の1年後にFACOM230-75APUが生まれて以降、ベクトルプロセッサ方式によるスーパーコンピュータ開発が進み、米国を凌ぐ勢いで優れた製品が次々に開発されていった。しかし、並列処理に関してはわずかに出遅れた感がある。当時、日本のスーパーコンピュータは、コンパイラの自動ベクトル化技術によりプログラミングが比較的容易であったことをはじめ、各ベンダーとも有力な汎用コンピュータや半導体ベンダーでもあったので、米国のスーパーコンピュータ専門ベンダーに比べて高性能なプロセッサ開発、大容量メモリ開発に関して優位にあった。だが、プロセッサもメモリも際限なく高速化できるわけではない。ベクトル方式だけでは計算性能の向上に限界があることが認知されると、さらに性能を高めるためにはどうしても並列処理を取り入れて行かざるを得なくなる。こうしたことから、高速化に向けてベクトルプロセッサを複数搭載し、ネットワークで接続するベクトル並列システムが登場し、並列処理が

注目されるようになった。

複数のプロセッサを搭載する並列システムにも、さまざまな方法がある。共有メモリ方式は、複数のプロセッサでメモリを共有する方法で、使いやすいが、大容量の高性能共有メモリの実現自体が困難であることに加えて、メモリの参照をどのようにして矛盾なく処理するかをハードウェア、ソフトウェア（OS、コンパイラなど）で行うことが必要で、高並列化には限界がある。これに対して、プロセッサごとにメモリを分ける分散メモリ方式は、メインメモリ上のデータの共有をあきらめて、通信機能でデータを交換する方法だ。この方法では、並列度の限界は緩和されるが、通信の負担が問題になる。

1990年代以降、ハードウェアの低価格化、半導体技術やネットワーク技術の向上、ソフトウェアの発展などによって、さまざまな方式が開発され、並列処理はスーパーコンピュータの高速化に欠かせない技術になっていく。

(5) 世界最速を達成した NWT

1980年代後半、日本では87年に日立がS-820、88年に富士通がVP-2000シリーズ、89年に日本電気がSX-3をそれぞれ発表した。世界に誇る高性能を達成しながら、日本のスーパーコンピュータはGFLOPS時代を開拓し続けていた。しかし、これに満足していなかったのが、先に紹介した三好甫氏だった。1987年に航空宇宙技術研究所にNS I（数値シミュレータ）を設置した三好氏は、自らリーダーシップをとって富士通とともに新たなスーパーコンピュータの開発を進めた。それが1993年1月に完成した革命的な並列スーパーコンピュータシステムNWT（数値風洞）だった。



航空宇宙技術研究所で開発された数値風洞（NWT） 画像提供／JAXA



この新システムは、計算流体解析の100万格子点の計算を10分で行うという高速処理を目標に開発が行われた。1台あたり1.7GFLOPSのプロセッサを166台結合させて、理論性能で280GFLOPSを達成しようという、その当時としては驚異的なスーパーコンピュータだった。つまり166台のベクトル計算機を、ひとつのシステムとして並列化させたのだ。この膨大な並列処理を可能にするため、それまでの共有メモリ構成から、各プロセッサにローカルメモリをおき、クロスバネットワークで結合する分散メモリアーキテクチャが採用された。

こうして完成した「分散メモリ型並列ベクトルスーパーコンピュータ」であるNWTは、航空宇宙技術研究所における幅広いシミュレーション研究を大きく進展させることに貢献しただけでなく、1993年から95年まで、世界のスーパーコンピュータ性能ランキング「TOP500」で1位を達成している。1994年の米国電気電子学会コンピュータ部門と米国計算機学会が主催する「SC'94 (スーパーコンピューティング'94)」では、各種流体シミュレーションで高性能達成を示した論文で、実利用に貢献した研究に与えられる「ゴードン・ベル賞」の等外特別賞を受賞、さらに1995、96年には同賞の性能部門賞を受賞するなど、輝かしい成果を達成した。

航空宇宙技術研究所でNWTの開発を主導した三好氏は、当時のスーパーコンピュータ開発プロジェクト推進のポイントについて、後に雑誌インタビューで、次のように語っている。

「いい計算機をつくって、はいどうぞと言ったって、これはいい計算機にはなりません。いいユーザーが使って初めていい計算機になる。ユーザーもやっぱり一つの集団であるわけで、計算機の開発計画と並行してそれをエキサイトさせるわけね。だから、エキサイトした集団にいい計算機を放り込むと、それはすばらしい成果を生む。」「要するにこういうことになるね。計算機をつくるというのは、まず自分でいろいろ半導体だとか実装技術だとか基本的な要素技術の趨勢をよく読むことね。まあ、この辺は個人プレーだ。それから、どこの会社にどういう技術者がいるか。それをよく知っていないといけない。」「自分で検討してみて、大体フィージビリティ(実現可能性)があるなど見当をつけたら、三つ、組織しないといかん。組織に成功しないと、計画は成功しない。」「まず、役所を組織せんといかん。予算を取るということです。」「一方で狙いをつけたメーカーの技術者を組織せんといかん。これはほんと頼めばできるというものではない。メーカーのいい技術者をどうやって組織するか。」「なかなか難しい。」「それから3番目。いいユーザーのコミュニティを組織せんといかん。この三つの組織に成功しなかったら、幾ら発想がよくてフィージビリティがあっても、まずいい計算機の開発はできない。」(『情報管理』Vol.40 No.5 Aug. 1997)

こうした三好氏の考え方は、NWT に続く地球シミュレータ開発プロジェクト推進においても、重要なポイントとなっている。

航空宇宙技術研究所の第2世代数値シミュレータ（NSII）として導入された NWT は、輝かしい実績を残しつつも 2002 年夏にその役割を終え、スカラー方式を採用した新システム・第3世代数値シミュレータ（理論性能 9.3TFLOPS）にその座を譲った（「T〈テラ〉」は 10 の 12 乗）。

第2章

動き出した地球シミュレータ計画

1. 世界最速のスーパーコンピュータをめざして

(1) 計算科学の推進に向けて

NWT が運用を開始した 1993 年の春、三好甫氏は航空宇宙技術研究所を定年退職した。三好氏自身は、民間のコンピュータ関連企業に再就職し、「計算機を使う立場ではなく、売る立場から開発したいと考えていた」と後に語っているが、これを引き留めたのが、当時の科学技術庁（後の文部科学省）事務次官の平野拓也氏だった。

「民間に行くよりもっと大きなことを、国のためにやってもらいたかった。そのために勉強を続けてほしいと彼に話した」と平野氏は当時を振り返る。結果的に、三好氏は同庁所管の財団法人材料科学技術振興財団参与に招かれた。

平野氏は 1969 年に設立された宇宙開発事業団（現・独立行政法人宇宙航空研究開発機構）の仕事に携わる間に、三好氏と出会っていた。さらに 1980 年代半ば、航空宇宙技術研究所に総務部長として勤務していたときに親しく話すようになり、スーパーコンピュータ開発に関する話も聞いていた。三好氏が NWT 開発のための予算獲得に向けて奔走していたころにも相談に乗り、担当者の説得にも力を貸したという。

「三好さんについては、とても尖がった人だなという印象を持っていました。私は、尖がっているというか、少し組織の枠からはみ出ても、情熱を持って仕事に取り組む、そういうタイプの人間が好きでしたから、応援したい気持ちがありました。また、たくさんの人を見てきた経験から、彼はきっといい仕事をする男だと思っていました」と平野氏は話す。

1997 年に平野氏は海洋科学技術センター（現・独立行政法人海洋研究開発機構）の理事長となり、そこで再び三好氏、さらには地球シミュレータと深く関わることとなるが、これについては後に記す。

「三好さんをバックアップして、計算科学の分野を立ち上げてほしい」と、上司であった平野氏から指示を受けたのは、当時、科学技術庁材料開発推進室にいた岩橋理彦氏だった。岩橋氏は後に研究開発局計算科学技術推進室次長を務め、三好氏と連携を図りながら計算科学技術の推進に尽力することになる。

「三好先生の要望を実現しようとする、制度的なことと対立することも多く、いろいろな意味で泣かされました（笑）。かたや局長からはハッパをかけられ、どうやって収めたらよいか、苦労の連続でした。しかしながら、NWT 開発を通して、国家として計算科学に取り組むためには、説明責任を明確に果たせるものでなければならないという考え方をしっかり持っておられました

し、日米スパコン貿易摩擦のときに通商産業省（現・経済産業省）のアドバイザーとして米国に行かれた経験から、調達の問題点や国の支援に関する機微についても十分に理解しておられました。また、何よりも三好先生の技術トレンドを的確に押さえた明確な目標設定や、ソフトウェア、ハードウェア両面に細かく目配りしながらプロジェクトをリードしていった手腕は並大抵のものではありませんでした。科学技術庁の歴代の次官が揃って計算科学をプッシュしていったのも、三好先生がいたからこそだったろうと思います」と岩橋氏は当時を振り返る。

航空宇宙技術研究所を退職した年に材料科学技術振興財団に移った三好氏は、早速行動をおこした。自ら先頭に立って、同財団内に計算科学研究会を設立しようと働きかけた。その設立趣意書から、計算科学の発展と、優れたスーパーコンピュータ開発への三好氏の強い思いが伝わってくる。

科学技術の研究は、永年、現実の研究対象に具体的に問いかけ試しそこから本質的な現象を見出し普遍的原理を導く研究（実験研究）と、研究開発の対象となる現象を記述すると考えられる数学的モデルの性質を調べ新しい概念を探索する研究（理論研究）の二本柱によって形成され進展してきました。近年、研究開発は次第に複雑かつ極限的な現象を対象とするようになり、単純な理論モデルの解析によってのみでは現象の理解が困難となりつつあり、より実証的な理論研究が必要となってきています。（中略）

実験、理論研究の相補的役割を演じることが可能な研究が、大容量、超高速の計算機による大規模数値計算・数値シミュレーションを主たる研究手段・解析方法とする計算科学であります。計算科学は、スーパーコンピュータに代表される計算機技術の急速な進歩及び新しい計算手法・解析技術の開発により各研究分野においてここ数十年、劇的な展開を見せ、すでに実験、理論研究と並び科学技術研究の第三番目の柱に成長しつつあると言っても過言ではありません。今後、我が国が創造的な基礎研究の推進を図り、その成果を積極的に国際社会に発信していくためには、材料の設計、新型航空機・宇宙の開発、原子力研究、地球環境変動の解明、タンパク質工学、大型建造物の設計等に不可欠な計算科学の振興を図る重要性が益々高まっています。このように計算科学は21世紀の発展や技術革新の鍵を握るものであり、あらゆる科学技術分野でその比重を拡大しつつあると言えます。

計算科学のさらなる発展のためには、適切な計算機設計概念を新たに構築するとともに、現状における大容量、超高速の計算機関連技術やその利用環境等の解析を行い、これからの可能性及び展開の方向を探り、新たな具体的な積極的な提案を行い、広範な分野の研究者の交流の促進を図ることが重要であり、このため、(財)材料科学技

術振興財団に、「計算科学研究会」(仮称)を設立することをここに提案します。(後略)

(1993年 計算科学研究会 設立趣意書より引用)

さらに趣意書には、「航空・宇宙、原子力、物質、材料、バイオ、地球環境、建築等の研究分野における計算科学の研究者」だけでなく、計算機の基盤技術に関わる大学・研究機関の計算機科学研究者、民間の計算機関連会社の技術者・研究者の積極的な貢献が欠かせないとして、幅広い分野の専門家たちに参加を呼びかけ、「計算科学全体を包含した国家規模のプロジェクト」として取り組んでいくことが必要であると記されている。

科学技術庁はこうした三好氏の動きを支援し、三好氏を会長とする計算科学研究会が、1993年12月から開始された。その活動は、計算科学に関連する若手研究者を中心とした研究会と、計算機の管理にあたるマネージャークラスの担当者による懇談会に分かれて実施された。研究会においては、並列処理などハードウェアの技術動向やその性能を活かすためのソフトウェアのあり方など、スーパーコンピュータの利用に関する情報交換、招聘講師による講演、討論などが行われ、懇談会では、各機関に共通するスーパーコンピュータの導入・利用に関するさまざまな問題、インフラ整備などについての検討が行われた。

(2) まず足元を固めよ

1994年2月、三好甫氏は、計算科学研究会懇談会に向けた「科学技術庁(全日本が対象でも良いが足元より固めよである)による計算科学の推進策」と題する文章に、当時の日本の計算科学の課題、計算科学推進のための問題点と解決策などについてまとめている。後に地球シミュレータ開発を推進することになる三好氏の当時の考えを知る意味から、そのポイントを紹介しておく。

文頭で、三好氏はそのころの日本の計算科学の状況について、次のようにまとめている。

計算科学の重要性は航空宇宙工学、原子力工学、気象科学および土木建設工学の分野においては計算機開発の初期の頃から認識されていたが、近年の半導体技術および方式技術の急激な発展により計算機が高速化と大容量化を達成するに及んで宇宙科学、環境科学、分子科学、材料科学等、科学技術の殆どあらゆる分野においてその重要性が認識されるに至った。米国においては計算科学の振興とその研究開発環境の整備のための High Performance Computing and Communications (HPCC) 計画を推進するため、1991年以来、年間6億～10億ドルの予算を投入している。その内容は高速計算機システムの開発、研究および教育用の全国ネットワークの整備、並列処理技術の開発、

情報処理支援基盤技術の開発、人材の養成等多岐にわたっている。この計画達成のために主要な国立研究機関の力が結集されている。欧州においても ESPRIT 計画等の政府計画において高度情報処理技術の推進を計っている。

我国においても 21 世紀における計算科学の重要性は関係各省庁において認識されつつあるが、先端的計算科学の推進を必須要件とする分野の研究機関を多数その傘下に擁している科学技術庁は計算科学の系統的かつ恒常的な推進策を講ずべき時期にきていると考える。

計算科学発展のための基本的な課題として、三好氏は「高精度化」、「複雑化への対処」をあげている。

- 高精度化：現在用いられている数学（物理）モデルの適用限界はほぼ明らかになっていると思われる。その適用限界を超える現象を把握するために信頼性のある高精度モデルを構築し、その検証を行い、同時に新しいモデルに対応する高精度計算法を開発すること。これは計算科学の基礎的分野に属する課題である。従来我国の計算科学はこの分野に関する寄与が高速計算機の設置台数に比較して過小であったといえる。計算科学の先進国として世界に寄与するためにはこの分野において先導性を発揮することが求められる。
- 複雑化への対処：産業技術の分野においてはもちろんのこと環境科学の分野等においても現実の対象は例えば流体力学、例えば構造力学といった単一の要素分野から成り立っているものは殆どないといっても過言ではない。複数の要素分野を同時に計算することにより、より高度な結果——複数分野間の干渉に関する定量的な知識——を得ることが可能になる。この様な複数分野にまたがる Concurrent Engineering は計算機の高性能化によって初めて可能になるもので、世界的にみてもこの分野は緒についたばかりである。この分野は産業技術に対してもインパクトが大きく、産業技術における計算科学の位置づけに変革をもたらす可能性がある。我国はこの分野で先導的な役割を果たすことが可能であり、積極的に手を付けるべきである。この分野における問題点は異なる分野間のインターフェースの数学モデルを確立することと異なる分野間の組織マネジメントを確立することである。

続いて、計算科学推進のための問題点とその解決策について論じているが、ここでは、当時大きな問題となっていた日米間のスパコン貿易摩擦に関連した内容に多くの文字数を割いている。

商用スーパーコンピュータの導入

- ① 導入手続きと仕様書の作成：日米協議により我国の公的機関に課せられている導入手続きはそれなりに正の側面もあるが実行上重要な部分に解釈が曖昧なところ、不備なところがある。又、これの実施に当たっての各省庁の指導はまちまちで文部省の様に過剰な義務を導入機関に課するところもある。こういうものは伝染性のものであり歯止めをかける必要がある。この様な問題に対してはユーザー有志と通産省との間でたびたび話し合いを持ってきた。科技庁としても内規的な統一見解を持つことが望ましい。又、導入手続きの実行、仕様書の作成等については各機関が相互に知識を交換することが望まれる。
- ② 導入決定後のシステム作成：導入決定後のシステム作成に関しても知識と経験の交流から現場での実地の協力が必要と思われる。これは各機関の間の共同研究といった形で解決できると思われるが、この様な業務についてそれに参加した技術者・研究者の評価法を確立する必要がある。この課題を抜本的に解決するためには、こうした技術者の確保・維持のための組織が必要と思われる。
- ③ 高速計算機の性能評価：これは必ずしも導入のみに関係した事項ではないが便宜上ここで論ずることとする。現在の導入手続きでは導入対象となることが予測される計算機の性能に関してできる限り正確な予測をする事が望ましい計算機を導入する上で必要不可欠である。しかしながらこれは非常に難しい。特に超並列計算機ではそうである。更に重大なことは我国では計算機の性能評価という研究分野は軽視されており、その上、計算科学へのマンパワーの投入が少ないため、この分野で日本は国際的に見るべき成果を殆ど挙げ得ないでいるのが現状である。欧米、特に米国においてはこの分野を専門とする研究者・技術者が多数存在している。そのため、国際的に通用する計算機の性能評価は殆ど欧米の研究者・技術者によるものばかりである。彼らは我国の高速計算機にアクセスする機会が少ないため、我国の計算機が彼らの研究対象になることは少ない。又、研究対象になった場合でも、我国の計算機にとって余り適していないスタイルのプログラムを用いての評価が多い。後で述べるようにこれは我国の開発したアプリケーションソフトウェアで国際市場に流通するものが殆ど無いことにも責任がある。そのため米国政府及び議会等では米国メーカー或いは米国メーカー寄りの人々の我田引水的な発言がまかり通り、これが DOC、USTR 等の『米国の計算機の方が日本の計算機よりも優れているのにシェアが少ないのはおかしい』という発言の根拠になっている。以上のことから高速計算機の性能評価の研究の推進は技術的にも外交

政策的にも必要不可欠である。この問題は当面は懇談会で性能評価の内容と評価用プログラムの検討を行い、各機関で実行することで対処できるが、性能評価を系統的、恒常的に行う必要があることから並列処理技術に関する技術者・研究者の組織が必要である。

さらに、計算科学推進のための問題点とその解決策については、「ネットワーク整備」と「超高速計算機の開発」、そして「並列処理技術の高度化と普及」を取り上げている。そのなかの「超高速計算機の開発」については次のように記している。

計算科学の課題に挑戦し、計算科学の分野で国際的に突出した成果を挙げるためには商用機では能力が全く不足することがある。その場合、技術的に可能であれば、商用機に対して突出した性能を持つ計算機の開発を行うことになる。

また、この文章では、最後に1章を設けて、日本が欧米に比べて大きく遅れていると指摘した「アプリケーションソフトウェア（APS）の開発」について、その開発推進の必要性を説いている。

周知の様に日本は APS に関しては全く輸入超過の状態にある。この状況も放置するわけにはいかない。その理由は、

- ① いつまでも外国品に頼っているのは科学技術の研究開発において重要な計算科学の分野で外国の技術レベルを追い越せない。航空機に関する CFD 技術で日本が米国と対等になったのはこの分野に関して我国の航空機の研究開発のコミュニティが CFD の APS を自家開発したからである。
- ② 先端的 APS は今後国外持ち出し禁止となる可能性がある。米国には貿易摩擦とからんでその動きがある。
- ③ 現在の APS はロードモジュールで提供されるのが普通であるがこれだと改良が不可能である。
- ④ 計算機メーカーは国産高速計算機に外国産の APS を乗せるために APS の移植を外国業者に依頼しているが、外国業者の移植のレベルは例えばクレイ社の計算機への移植に比較して種々の理由から低く、これを利用した性能競争で国産機は外国機に勝てない。国産愛護という時代ではないという考えもあるが、一方 National Flag は現実に厳然としてある。筆者の経験では外国ユーザーの自国優先主義もはっきりしており、その意味で米国ユーザーがクレイ社の向背に重大な関心を寄せているのは理

解できている。高速計算機の開発といった事態になれば地理学的な距離の持つ意味は絶大である。

さらに、三好氏は「日本がAPSに関して輸入大国になった理由」について言及し、「APS開発の問題点の解決は並列処理技術の問題点と並んで計算科学の推進における緊急の課題である」としている。

(3) 計算科学技術推進に動き出した科学技術庁

このころ、すでに科学技術庁傘下の多くの研究機関にスーパーコンピュータが導入されていた。それぞれの研究機関の研究のためのインフラとして導入されていたが、その数は30台近い数であった。当時、それらはそれぞれの機関ごとに運用されていたが、米国で国をあげて大規模な計算科学技術推進のプロジェクトが進められていたこともあり、日本でも、各機関の協力体制を築くことが必要であるという機運が高まりつつあった。

さらに、このころ計算科学技術の重要性については、当時の科学技術会議、原子力委員会の答申などにおいても、その推進の必要性が指摘されており、1993年9月の航空・電子等技術審議会でも「原子・分子レベルの現象、機能解明のための計算科学技術に関する総合的な研究開発の推進方策について」を諮問し、調査審議が開始されていた。

「当時はまだ、いわゆる計算科学技術という形でひとつの戦略分野としてクローズアップされるまでには至っていませんでした。しかし足元を見れば、すでに科学技術庁傘下に数多くのスーパーコンピュータがありました。これはもしかしたらすごい能力ではないか、ということにあらためて気づいたのです。そこで、それぞればらばらにやっていくのではなく、全体を束ねる方向性や協力体制を構築していけば、きっと大きな力になるのではないか、そういうことを実感したわけです」と後に科学技術庁計算科学研究企画官（1996年6月～97年9月）を務めた森本浩一氏は、当時の状況を語る。

1995年度より、科学技術庁は、計算科学技術を21世紀の科学技術の基盤とするための国家的取り組みが急務であるとして、「高度計算科学技術の推進」のための施策を強力に実施していく。計算科学技術を戦略分野として積極的に推進し、同庁関係機関全体に計算科学に関する研究を拡充し、各機関に共通基盤的な科学技術として育成していこうとした。

科学技術庁では、高度計算科学技術に関する施策を計画的かつ総合的に推進するため、研究開発局総合研究課計算科学技術推進室が、研究機関・大学・他省庁・民間等との連携を図りながら計画策定、予算取りまとめ、体制整備、計画管理などの業務を行い、その推進にあたって重要な事項の検討を行うため、学識経験者や研究機関の代表者らから構成される計算科学

技術推進会議も新たに設置された。三好甫氏も科学技術庁参与として、この取り組みの中心的な人物として、大きく関わっていくことになる。

こうした体制のもとで、航空・宇宙、地球科学、物質・材料、原子力などの分野で、スーパーコンピュータを駆使した数値シミュレーションのためのモデル開発に関するプロジェクトを進め、日本原子力研究所を中心として並列処理技術に関する基盤技術の研究開発を行った。日本原子力研究所は、1957年にいち早く計算室を立ち上げて以来、日本の計算科学研究の草分けであり、高い実績を挙げてきたことで知られる。1995年、同研究所は各メーカーのスーパーコンピュータを揃え、計算科学技術推進センター（後のシステム計算科学センター）を立ち上げ、研究所の計算センターとしてだけでなく、積極的に各研究機関との間で共同研究を実施し、データの共有化、プラットフォーム化などにも取り組んだ。

1995年には、科学技術推進に関連する大きな出来事がもうひとつあった。科学技術基本法の施行（1995年11月15日）だ。1994年から議員立法による制定に向けて検討が始まった科学技術基本法は、国際的な経済競争が激化するなかで、日本が明るい未来を切り拓いていくためには、独創的・先進的な科学技術を開発し、それによって新産業を創出することが不可欠であること、さらに、環境問題、食料・エネルギー問題など、人類の将来に立ちはだかる諸問題の解決に対して、科学技術への期待は大きく、この面での日本の貢献が強く求められているといった理由から、法案提出がなされ、翌年に国会で可決されて成立した。そして1996年7月には、新たな研究開発システム構築のための制度改革推進、政府研究開発投資の拡充などが盛り込まれた、科学技術基本計画が閣議決定された。このような科学技術政策の新しい動きを背景に、地球シミュレータの開発が進められることになる。

（4）ソフトウェア開発と地球科学

科学技術庁は、1995年度から21世紀の科学技術の基盤とするための国家的取り組みとして、高度計算科学技術の推進に大きな力を注いだ。その意義として掲げたのは、計算科学技術が、科学技術のみならず社会経済に多大なインパクトを与える基盤技術であるという点だった。

かつてコンピュータによる数値計算（シミュレーション）は、「理論（仮説）」、「実験（検証）」の補完的な役割を果たすものと捉えられていたが、スーパーコンピュータの急速な発達とともに、より複雑で現実に近い系が取り扱えるまでになり、数値計算は、「理論」、「実験」に並ぶ「第三の科学の方法」として、その重要性が認知されようとしていた。一方では、宇宙の進化、クォークのような物質の究極、高温超電導のメカニズムなど、未知の科学フロンティアの拡大、さらには新材料の設計、核融合炉心のプラズマの挙動と制御、新薬開発、気候変動予測、先端技術の開発などのように、社会経済活動にも大きな変革をもたらす必要不可欠な研究の手法や手段と

しても大いに期待されつつあった。

そのための重要なカギを握っていたのが、ハードウェアとソフトウェアの調和のとれた発展だった。ハードウェアについては、当時、日本は世界でもトップレベルの技術力を誇っていた。しかし、研究開発分野のソフトウェアにおいては、その多くを欧米に依存するなど、欧米に大きく遅れをとっていた。こうした状況を打開し、ハードウェアとソフトウェアを共に世界のトップレベルに押し上げていくため、科学技術庁は、所管機関における計算科学技術の振興を図り、さまざまな分野で優れたソフトウェアの開発に力を入れるとともに、スーパーコンピュータの計算能力をより高めていくための並列処理技術の推進にも力を入れていくこととした。

こうした取り組みのなかで、科学技術庁は全体をけん引していくような中核となる研究プロジェクトの実施を模索していた。原子力分野、物質・材料分野、航空・宇宙分野、地球科学分野など、さまざまな分野が選定の対象となっていたが、社会的にも大きなインパクトが得られ、なおかつ、限られた期間のなかで目に見える成果が達成できるものでなければならなかった。さまざまな観点から検討が行われ、ターゲットとして絞り込まれたのが地球科学だった。

「ある分野は、もっと計算機の性能があればブレイクスルーが開けるかもしれないが当時の性能では難しかったり、ある分野では、まだ伝統的な研究手法が中心的でシミュレーションを導入しても高い成果が得られるかどうか先が見えない、またある分野では、まだ研究が始まったばかりで研究者・技術者が非常に少ないなど、それぞれ一長一短があって難しい面がありました。そのなかで目にとまったのが地球科学でした。地球科学には大気・海洋分野と固体地球分野がありますが、特に大気・海洋分野では気候変動や地球温暖化といった地球規模の大きな課題があり、社会的にも注目されていることから、これがひとつのテーマになり得るのではないかということになりました。こうした情報科学と地球科学の融合を推し進めるなかから、やがて地球シミュレータの概念ができてきたのです」と森本浩一氏（前出）は語る。

科学技術庁における計算科学技術推進に大きな役割を果たした三好甫氏は、1995年春から財団法人高度情報科学技術研究機構の副理事長に就いていた。当時の状況について、後に三好氏は雑誌のインタビューで次のように語っている。

科技庁の計算科学プロジェクトというのは、もともと基盤技術の振興だから、言ってみれば高山植物みたいなもので、遠くから見ると綺麗なんだけど、そばに行ってみると一つ一つの花は小さい。やっぱり、牡丹とかシャクヤクとか、ああいうのがないと官のプロジェクトとしては寂しい。じゃあ、牡丹とかシャクヤクを植えるとするかという話が、地球シミュレータになったわけです。

でも、その伏線がもう一つ別にあって、計算科学のプロジェクトを起こしたときに、初

めは、計算材料力学をやろうと思っていたけれど、実際にやろうと思って見ると、なかなか上手くまとまらない。その一方で、地球環境の学者グループから話があって、調べてみると、これはやって結構意味がありそうということになり、材料をやめて地球環境の並列ソフトウェア開発をやり始めた。それで、地球科学関係の先生方といろいろ議論をしているうちに、これはやっぱり開発したソフトウェアをのつける計算機が要るなということになった。問題点を聞いてみると、やっぱり1,000倍ぐらいの性能を頑張らんといかんかというわけね。(中略)それで、自分で半導体や実装技術等を調べてみて、1,000倍の性能の計算機がいつごろやれるかなあと考える。それから、当然ながら効率というものがありますよね。今、大気循環とか、そういう、実用のプログラムが大体どの方式の計算機で、どの程度の性能、効率で走っているかというのを調べる。それで大体2001年ごろには開発出来そうということが分かったので、科技庁に『牡丹かシャクヤクを開発しようよ』と言ったわけです。

科学技術庁研究開発局にいた岩橋理彦氏(前出)は、次のように当時を振り返る。「三好先生は、当初、ソフトウェアで大輪の花を咲かせたいと思っていたのですが、次第にNWTに続く次のスーパーコンピュータをつくりたいという思いが強くなっていったようです。1995年度に新たに着任した加藤康宏研究開発局長も『何か新しいことをやっていきたい。そして、やるからには世界でナンバーワンをめざしたい』ということで、地球シミュレータの実現に向けて舵が切られたのです」

科学技術庁が計算科学技術の推進に向けて動き出した1994～1995年ごろには、すでにさまざまな研究分野のなかから地球科学、とりわけ気候変動研究をターゲットとした新たなソフトウェア開発に注目する動きが芽生え始めていた。さらに、ほぼ同じ時期に、このソフトウェアを活用するための世界最速のスーパーコンピュータの開発も視野に入っていたことが分かる。このスーパーコンピュータが「地球シミュレータ」と名付けられ、実際に開発がスタートするのは、もう少し先の1997年のことだった。

(5) 気候変動研究とコンピュータシミュレーション

科学技術庁が計算科学技術の推進に取り組んでいくなかで注目した気候変動研究は、まさにスーパーコンピュータ技術の発達とともに発展してきた学問分野だった。

経験的な知識や統計的な分析からではなく、大気の運動や温度の変化といった現象を支配する物理法則に従って方程式を解けば、天気が予測できるという考え方は、すでに20世紀初頭に確立されていた。これを初めて試みたのは、『数値計算による天気予報』(1922年)という本

を記した英国の気象学者L・F・リチャードソンだ。彼は実際に人間の手でこれを解こうとしたが失敗し、それ以後、数値予報は「リチャードソンの夢」と呼ばれた。

1946年に完成した計算機 ENIAC (エニアク) を用いて、この夢の実現に取り組んだのは、米国・プリンストン大学高等研究所のフォン・ノイマンだった。さらにプリンストングループ (気象学グループ) によって、「数値モデルによる大気大循環のシミュレーション」という新しい分野が確立された。この分野の研究には大量の計算を処理するスーパーコンピュータが欠かせないことから、長い間、計算機資源が豊富な米国が世界をリードした。日本でも 1950年代後半から数値予報モデルの研究が始まったが、1960～70年代、日本ではまだこの分野でスーパーコンピュータを大量に使用するという研究環境が整っていなかったため、優秀な日本人研究者が米国に流出し、米国の研究機関で優れた成果を挙げるということもあった。

1980年代に入ると、日本でも優れたスーパーコンピュータがつくられるようになり、気象庁気象研究所 (筑波) に気候モデル研究専用のスーパーコンピュータが導入される (1980年) など、この分野の研究がようやく本格的に始まった。そして、1990年代には、東京大学に気候システム研究センターが設置される (1991年) など、コンピュータシミュレーションによる気候変動研究が盛んに行われるようになり、研究者らの連携の動きも現れ始めた。

その背景には、地球温暖化をはじめ地球規模の気候変動への世界的な関心の高まりを受けて 1988年に設置された「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の存在も大きく関係している。IPCC は、気候変動の問題について、自然科学的な最新の研究成果を基盤とする科学的な評価に加えて、気候変動による社会的、経済的な影響等の評価を世界的な規模で行い、政策決定者に判断材料を提供しようという国際的な取り組みだ。その第一次評価報告書が 1990年に発表された。この報告書を受けて、1990年 11月に第 2回世界気候会議が開かれ、12月には国連総会で、地球温暖化防止に向けた条約策定の政府間交渉会議を開始することが決議され、1992年に気候変動に関する国連枠組み条約 (UNFCCC) が採択された。こうしてコンピュータシミュレーションによる気候変動研究は、社会的にも大きく注目される研究分野となった。

こうした状況のもとで、1993～1994年にかけて、気象庁気象研究所、東京大学気候システム研究センター、電力中央研究所などの研究者らが中心となって、気候モデル研究者のコミュニティ形成をめざす自主的な研究会として「次世代気候モデル開発研究会」がスタートした。

同研究会発足にあたって、発起人の一人であった、当時東京大学気候システム研究センター長の松野太郎氏は、呼びかけ文に次のように記している。

自然の気候変動の原因をさぐるために、また、信頼のおける地球温暖化のアセスメントを行うために、気候モデルの進歩・改良は単に我々の望みにとどまらず、社会からの

熱い期待に応える必要に迫られています。

一方、このような社会的必要から“しにせ”の気象研に加え、最近いくつかの研究機関に気候モデリングのグループが次々と作られた事は御存知の通りです。(中略)マンパワー、コンピュータともに不十分ですし、特に研究者が分散し過ぎています。(中略)民間研究所(例えば電力中央研、東京電力研、三菱総研など)でも少人数による部分的研究が始められています。

このような状況下で研究を有効に進めるためには、協力して難問に当たることが必要かと思います。第三世代モデル(格子間隔 100 ~ 50km、スペクトル変換した後の波数で T106 ~ 213)になるとクラウドクラスターなどメソスケール現象を陽に扱う為の積雲パラメタリゼーションが必要になると思いますし、内部重力波も一部は直接表現されるなど、今までと違った局面が出てくると予想されます。差分法とスペクトル法、積雲対流の異なるパラメタリゼーションなど、それぞれの独自性は保ちながら、結果を比較して長所、短所を明らかにして知識を共有し、場合によっては手分けして多数の実験を行うことも有効でしょう。

さらに、第三世代のさきには超並列計算機(Massively Parallel Processor)を使うことになると予想されますが、この新しい技術課題に、全体足しても少人数のコミュニティで対応するには協力は必須だと思います。コンピュータ技術者と協力して気候モデルに適したアーキテクチャのコンピュータを開発してもらうためには、共同して我々としてベストの注文を出す事が有効でしょう。

このような動機から、次世代気候モデルの開発を目指して産・官・学にわたる共同研究のグループを作ることを提案いたします。

一方、このころ地球科学に関連するソフトウェア開発に大きな関心を持っていた三好氏は、さまざまな研究者グループと議論を重ねていた。そして、日本の気候モデル研究者のコミュニティである次世代気候モデル開発研究会のメンバーらとも議論を交わしている。そして、1995年1月、三好氏は同研究会の幹事らとの議論の内容を、次のように科学技術庁の関係者らに報告している。

北海道大学の松野太郎教授、東大気候システム研究センターの住明正教授は共に科学技術庁で地球環境モデルのソフトウェア開発を行うのであれば、是非とも協力して世界に誇れるものを作りたいし、作る自信があるとのことでした。

さらに、いろいろな可能性を議論するなかで、当時は計算機性能の制約から全球モデルの分解能は、「水平方向 250km から粗いもので 400km、鉛直方向 9 ～ 15 層だが、これを水平分解能 10km、鉛直分解能 30 層にしたい」という研究者の発言を受けて、三好氏は「計算機の性能としては、現在貴君方が使用しているものの 1,000 ～ 2,000 倍のものが要ということか?」と質している。また、この報告には、実際に地球環境モデルを開発すると、どのくらいの資金が必要か、どのような組織が必要か（「次世代気候モデル開発研究会、観測データ取得・解析組織、ソフトウェア開発組織、高速計算機設置組織の 4 つの組織が主体的に対等な立場に関わることが望ましい」といった話も出ている）、2000 年ころまでに意味のある数 TFLOPS の計算機をつくるとすると 200 億円くらいはかかるだろうなど、かなり具体的で突っ込んだ内容について議論されたことが記されている。つまり、この時点で三好氏の頭のなかには、すでに地球シミュレータ計画の骨格となるものができ上がっていたことがうかがえる。

そして、1995 年 7 月には、当時三好氏が副理事長を務めていた高度情報科学技術研究機構に「地球環境シミュレーションシステム開発推進委員会」が設置された。同機構は、1981 年に財団法人原子力データセンターとして設立され、原子力関係の計算コードの開発・整備・運用支援など、大規模計算機の運用業務を手掛けてきた機関であり、計算科学分野で豊富な経験と実績を持っていた。そして、この年の改組により、地球シミュレータの初期準備、さらには地球環境シミュレーションの核となる、高性能な並列計算機に対応する、高分解能型地球環境シミュレーション用の並列処理ソフトウェアシステムの開発に向けて、具体的な取り組みがスタートした。

しかし、このときはまだ地球シミュレータ計画が具体化されていなかったこともあり、高度情報科学技術研究機構と研究者グループとの間には、考え方や方向性に食い違いがあった。そのころ北海道大学大学院地球環境科学研究科の教授だった松野太郎氏、防災科学技術研究所気候変動研究室長だった杉正人氏は、当時を次のように振り返る。「研究者コミュニティの人間は、基本的にモデル（プログラム）というものは自分たちでつくると考えており、どこかに委託して開発してもらうということは頭になかったものですから、勉強会という意識でこの委員会に参加していた部分がありました。そのために自分たちのプログラムやノウハウも並列計算機に向けて改良するサンプルとして委員会に出していました。実際、最初は並列化研究会でした。しかし、機構側としてはすでにそのころから地球シミュレータ用のモデルを新たに開発するという意識があったと思います」。この意識のずれが、後に足並みの乱れを生むことになる。

(6) 地球変動予測の実現に向けて

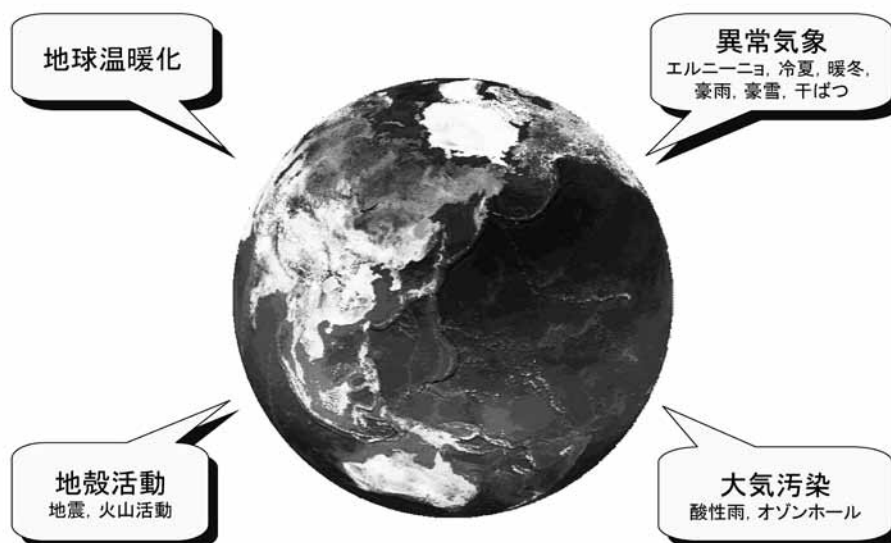
1996 年 7 月、科学技術庁の「航空・電子等技術審議会地球科学技術部会」は、『地球変動予

測の実現に向けて』と題する報告書をまとめた。地球規模でおきるさまざまな現象・問題を、科学技術を活用して解明し、その成果を活用して精度の高い将来予測を行い、人類の明るい未来に役立てることをめざす戦略プログラムだ。

報告書では、その重要性について「地球規模の諸現象の解明とその予測、すなわち『地球変動予測』の実現に向けた研究開発は、地球科学技術全体の基礎となる重要な分野であり、科学技術基本計画（1995年11月に制定された科学技術基本法に基づき、日本の科学技術政策を具体化するものとして1996年7月に閣議決定）においても、社会的ニーズに対応した分布型サイエンスとしてその重要性が指摘されているものであることから、地球変動予測の実現に向けた研究開発をより一層強力に推進していくことは、今、我々に与えられた責務であると考えることができよう」と記している。

その一方で、当時の状況については、「地球規模の諸現象の予測に焦点を置いた研究開発は、我が国では主に気象庁及び気象研究所において進められており、IPCCの報告書の基礎資料となる地球温暖化の予測に関する研究開発を行っている外、エルニーニョ、気候変動等の予測に必要な気候モデルの高度化に関する研究開発を行っている。また、科学技術庁防災科学技術研究所においては、降水変動が災害に及ぼす影響の予測技術に関する研究開発を行っており、また、環境庁国立環境研究所においては、酸性雨の影響やオゾン層の将来予測に関する研究開発を行うなど、地球環境問題への対応に関連した予測モデルの高度化等の研究開発を行って

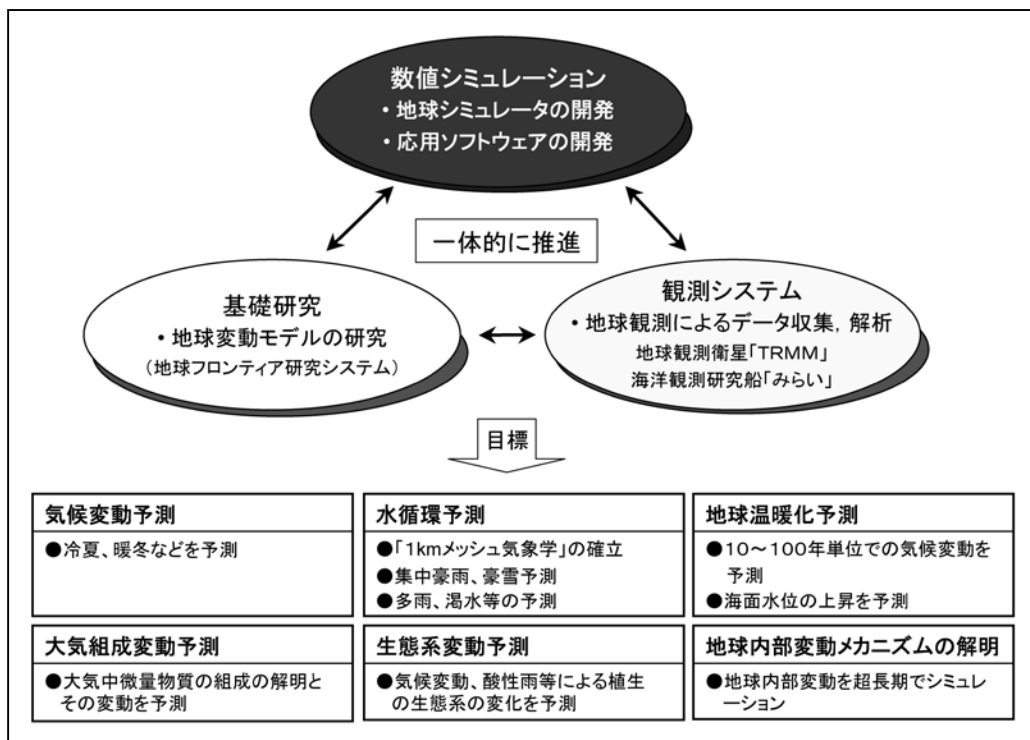
○ 地球規模の複雑な諸現象の理解、予測の必要性



る。しかしながら、これら研究開発のほとんどは、モデル開発と少数のプロセス研究に絞られているのが現状である」、「一方、観測システムの開発・運用については、例えば、宇宙開発事業団が地球観測衛星を開発・運用し、海洋科学技術センターが海洋観測研究船を開発・運用しており、それらは個々の観測計画としては世界のトップに並ぶものであるが、目標をめざした地球観測に関する全体計画が必ずしも明確に作られてないため、これらの観測は体系的かつ継続的に行われているとはいえない」、「プロセス研究と観測システムとの連携が弱いことがその原因の一つである」とまとめている。その結果、「地球規模の諸現象の解明やその予測に関する基礎的な研究開発については、個々の研究開発機関（大学を含む）が個別に実施しているという現状にあり、総合的かつ計画的な取り組みが十分であるとは言い難い」としている。そして、今後の課題として、「①地球を一つのシステムとして捉えた取り組み」、「②目標の設定と総合的かつ計画的な取り組み」、「③資金及び人材の抜本的拡充」という3つを抽出した。

こうした現状分析に基づき、報告書では、究極目標である「地球変動予測の実現」を果たすために、「関係機関の有機的な連携・協力のもと、プロセス研究、観測システム及びシミュレーションの3つの機能が常に一体となった研究開発計画を定め、着実に実施していく必要がある」ことが提言された。

加えて、「①アジア・太平洋地域における気候変動の予測」、「②アジア地域における水循環の



地球変動予測を実現するために、プロセス研究（基礎研究）、観測システム、数値シミュレーションの3つの機能が一体となった研究開発計画の必要性が提言された

予測」、「③地球温暖化の予測」、「④アジア・太平洋地域における大気組成の変動の予測」、「⑤アジア地域における生態系の変動の予測」、「⑥地球内部変動メカニズムの解明」という6つの目標が設定され、それぞれの目標達成のための戦略プログラムが提言された。

さらに、この地球変動予測計画の推進方策として研究開発推進体制の強化が打ち出され、次の7項目が掲げられた。「①関係機関の間の有機的連携の強化」、「②新たな研究体制の構築」、「③体系的かつ継続的な地球観測システムの開発・運用」、「④予測モデル及びシミュレーションシステムの開発」、「⑤地球観測データや研究開発成果の流通・利用の促進」、「⑥予測システムの構築と予測の実現に向けて」、「⑦研究開発に対する評価の実施」という7項目だ。

これらのなかの「④予測モデル及びシミュレーションシステムの開発」については、次のように説明されている。

地球変動予測の実現に向けた戦略プログラムに従い実施されるプロセス研究のほとんどは、観測データの取得と計算機によるシミュレーションを併用して研究が進められている。一方、地球の諸現象の正確な予測とその前提となる地球規模の諸現象の解明、そして素過程の役割を評価してシステム的に研究を進めるには、観測システムから供給されるデータの同化と予測モデルによるシミュレーションが不可欠である。

そこで、本報告書が提示した戦略プログラムに従ったプロセス研究や観測システムの開発・運用との連携に十分配慮しつつ、モデル及び同化技術の開発に積極的に取り組むこととする。加えて、20年後の目標を達成するためには、積雲対流や海洋の深層対流等の小規模の物理的素過程をも考慮に入れた計算、すなわち、大気においては全球を約10km メッシュ、局所的には1km メッシュ、海洋においては1km の精度でシミュレーションすることが必要であり、そのためには、現在の1千倍である数十テラフロップス級の計算速度（ピーク速度）が要求されることから、この速度での計算を可能とし膨大なデータの出入力を伴う時間発展系にふさわしい目的志向型の計算機システム（超並列計算機）の開発及びこれに関連したモデルの開発を実施することが必要である。

ここにおいて、地球変動予測の実現に向けて、高性能なスーパーコンピュータを開発することの必要性が提言された。

2. 地球シミュレータ開発と地球シミュレータ研究開発センター

(1) 「地球シミュレータ計画」始動

航空・電子等技術審議会地球科学技術部会がまとめた報告書『地球変動予測の実現に向け

て』(1996年7月)を受けて、1997年3月から7月にかけて科学技術庁において「計算科学技術推進会議地球シミュレータ部会」が開催された。松野太郎氏が部会長を務め、その構成員には大学や研究機関の計算地球科学分野の研究者はもちろん、当時の建設省、通産省、環境庁、気象庁の関係機関も参加し、省庁の枠を超えて地球シミュレータの開発と利用について議論が交わされた。

地球シミュレータ部会における6回の審議を経て、報告書『「地球シミュレータ」計画の推進について』がまとめられた。この報告書には、地球シミュレータ計画において達成すべき目標の設定と推進方策のあり方などについて、詳しく記されている。すでに、1995年より情報科学技術および地球科学技術の推進という観点から、科学技術庁において地球規模の複雑な諸現象を忠実に再現することを可能とする超高速並列計算機システムおよび地球変動予測実現をめざす高度なソフトウェアの開発について検討が進められてきたが、この報告書によって、いよいよ地球シミュレータ開発がスタートした。

地球は、多数の物理・化学プロセスが相互に複雑な影響を及ぼし合って、一つの巨大かつ複雑なシステムを構成している。このようないわば大規模複合系ともいべき地球の変動現象を解明・予測するためには、これらを短時間に精度良く再現することを可能とする超高速並列計算機システムを開発するとともに、複合的な物理・化学過程を計算可能な数式にモデル化し、これを高精度、高速で計算可能とする革新的なソフトウェアの開発が不可欠である。これらの実現を目指す『地球シミュレータ』計画を通じ、ハードウェア、ソフトウェア両面にわたる飛躍的な技術の発展が図られ、情報科学技術分野において先導的な役割を果たし、来るべき21世紀の経済社会の発展を支える高度情報通信社会の構築に大きく貢献することとなる。

このように、『「地球シミュレータ」計画の推進について』では、地球シミュレータ計画の意義として、地球変動予測の実現に向けた目的と合わせ、情報科学技術の高度化を実現するねらいがあることが記されている。

これを踏まえた上で、地球シミュレータの開発目標について、次のように設定している。

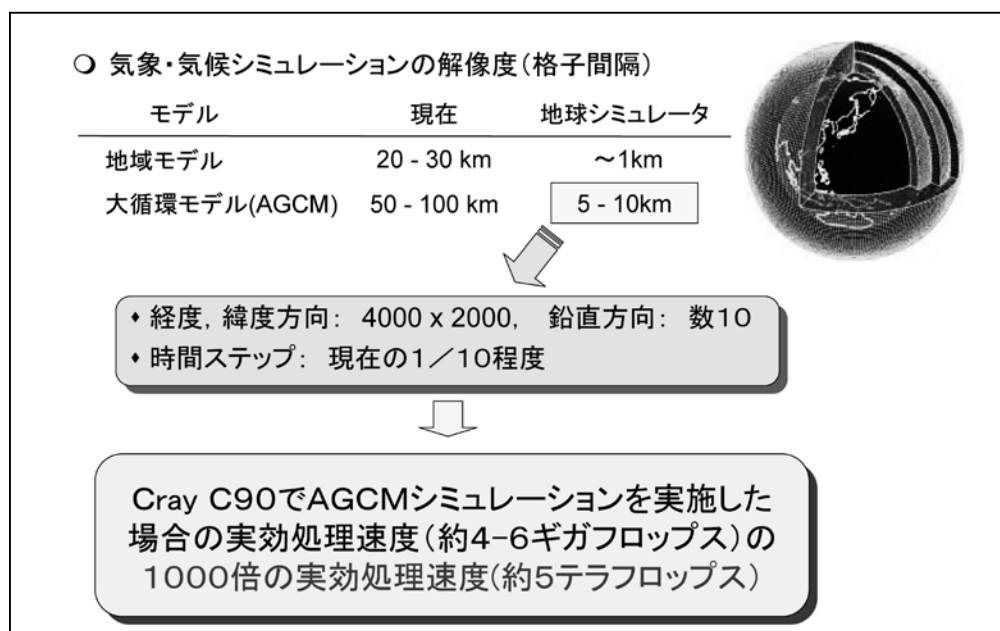
現在、気候や気象分野の代表的な大規模問題に関するシミュレーションでは、4～6GFLOPS (1GFLOPSは1秒間に10億回の浮動小数点演算を行う処理能力) の実効処理速度が得られているが、(中略) 目標を達成するためには、格子の分解能を、経度及び緯度方向に10倍程度、鉛直方向に数倍程度引き上げることで、これまでは分解能不

足のためにパラメータ化によりモデルに組み込んでいた重要な現象を直接シミュレーションにかけることが必要となる。このようなシミュレーションを意味のある時間内で実行するためには、現状の約1,000倍の実効処理速度、すなわち5TFLOPS程度が必要である。
(中略)

5TFLOPS 程度の実効処理速度を、マイクロプロセッサを要素計算機とする分散主記憶型並列計算機で実現するためには、台数増加にも拘らず実効効率を維持できると仮定しても、50～100TFLOPS 程度のピーク処理速度を持っていなければならない。このピーク処理速度は、単体のマイクロプロセッサのピーク処理速度が2GFLOPS 以上としても数万台の要素計算機が必要となり、適切な結合ネットワークにより安定した高い効率で動作させることは、21世紀初頭に達成させることは非常に困難であると考えられる。

一方、ベクトル計算機を要素計算機とする分散主記憶型並列計算機では、現在ピーク処理速度の30%程度の実効効率が得られている。要素計算機の台数が約10倍に増加した時、通信オーバーヘッド等により効率が20%程度に低下するとしても、5TFLOPSの実効処理速度は30TFLOPS 程度のピーク処理速度で達成可能と考えられる。

21世紀初頭にマイクロプロセッサでの実現が予想される数百 MHz のクロック周波数がベクトル計算機でも達成できるとすれば、1組当たりのベクトル計算機で GFLOPS 級のピーク処理速度が得られる。また、論理素子の実装密度は1cm²当たり1千万個を越え、一辺が1.5cm から2cm 程度のチップに多重パイプライン構成のベクトル計算機の主要要



地球シミュレータの開発目標は、当時のスーパーコンピュータの性能の約1,000倍、約5TFLOPSとされた

素を実装できると予想でき、これによりピーク処理速度が10GFLOPS前後の要素計算機を実現することが出来る。従って、この要素計算機数千台を強力なネットワークで結合し、一体化すれば、約30TFLOPSのピーク処理速度を持つ「地球シミュレータ」が開発できるものと見込まれる。

主記憶容量については、全球の大気・海洋大循環シミュレーションにおいて、大気の格子間隔を10km程度、海洋の格子間隔をその半分程度以下の格子点とし、1格子点当たりの変数の数を数十個から数百個とすれば、全体で数テラバイトが必要となる。仮に4テラバイト必要とすれば、21世紀初頭では、SDRAMでは20万個程度、又はSSRAMでは80万個程度を用いれば実現可能である。

報告書では、こうした開発目標に加えて、さらに開発しなければならないハードウェアの要素技術として、高密度LSI技術、高速SRAM技術、光インタコネクト技術、パッケージ実装技術、高効率冷却技術など、従来技術のさらなる高度化が課題として挙げられている。さらに、基本ソフトウェアに関しても、大規模な計算機システムを効率よく運用するためのオペレーティングシステムの開発や、数テラバイトのメモリを使用する大規模なジョブから、数ギガバイトの小規模なジョブまでの広い範囲のマルチジョブに対応できるような運用形態を検討しなければならないとしている。

ところで、この報告書においては、新たに開発されることになったスーパーコンピュータの名称として、はっきりと「地球シミュレータ」が使われているが、実はこの名称がいつどのような経緯でつけられたのか、はっきりしたことは分かっていない。当初は、「ガイアシミュレータ」、「地球環境シミュレータ」などとも呼ばれていたとされる。三好氏の残した膨大な文書を調べてみると、1996年12月に書かれた「地球科学の推進と地球シミュレータ開発計画」(下書き)において、明確に「地球シミュレータ」という名称が記されていることから、このころに三好氏によってこの名称がつけられたのではないかと考えられている。

(2) 地球シミュレータの応用ターゲット

『「地球シミュレータ」計画の推進について』では、その達成すべき目標として、超高速並列計算機システムの開発とともに、その計算機システムを活用して行う地球変動予測のための高度なソフトウェア開発を挙げている。そのターゲットは「地球規模の気候変動の解明・予測」と「固体地球変動の解明・予測」の2分野だ。

「地球規模の気候変動の解明・予測」に関する達成目標では、大気・海洋のマクロな現象とミクロな現象などに分けて、以下のような7つの目標を挙げている。

＜マクロな現象＞

- ① 全地球規模の高分解能プラットフォームの構築：長期間にわたる全地球規模の気候変動・海洋循環の解明・予測を高い精度で行うため、約 10km メッシュの全球大気、海洋及び全球大気・海洋結合モデルを開発し、様々なシミュレーションに共通的に利用可能なプラットフォームを構築する。
- ② 全球大気・海洋結合モデルによる地球温暖化の予測技術の高度化：百年以上の長期間にわたる地球温暖化の影響を精密に評価・予測するため、全球大気・海洋結合モデルを構築するとともに、海水、中・深層水の形成過程、雲・エアロゾルの放射過程への影響、温暖化原因物質の挙動、生態系の変動等、これまでに十分考慮されていなかったパラメータを取り込んでシミュレーションを行う並列ソフトウェアを開発する。
- ③ 全球大気・海洋結合モデルによる海洋現象の解明・予測技術の高度化：エルニーニョ現象をはじめとする全地球規模の海洋現象の発生を精度良く予測するため、大気・海洋結合モデルにより、数年以上の長期間にわたるシミュレーションを行う並列ソフトウェアを開発する。

＜ミクロな現象＞

- ① 雲の活動と降水過程を扱う高分解能大気モデルの構築：短時間の変化を伴い、高層大気にまで及ぶ雲の活動と降水過程を高分解能で3次元的に再現するため、対流運動と蒸発、凝縮等の物理過程を統合し、水平分解能 1km メッシュで、数千 km 四方の領域を対象とする非静水圧モデルとしてシミュレーションを行う並列ソフトウェアを開発する。
- ② 局所的な気象災害の迅速な予測技術の開発：局所的な気象災害を精度良く予測するため、より広域の気象条件の変動を予測するモデルとの結合を図るとともに、対象となる地域の複雑な地形・起伏、局所的な気象条件等を考慮してシミュレーションを行う並列ソフトウェアを開発する。
- ③ 大気・海洋中の物質輸送・拡散過程の解明・評価：大気中及び海洋中における環境汚染物質、放射性核種等の輸送・拡散等を精度良く予測するため、物質固有の物理的・化学的特性に応じ、鉛直混合、沈着過程等を詳細に考慮して、シミュレーションを行うための並列ソフトウェアの高度化を図る。

＜データ同化＞

- ① 4次元変分法・カルマンフィルタによるデータ同化手法の高度化：地球観測衛星・気象衛星等から得られた大容量の観測データ、地上観測網その他の観測データ等をシミュレーションの初期値又は境界値として統合的に活用するため、4次元変分法やカルマン

フィルタ等に基づく新たな解析手法を開発し、大容量データの効率的な前処理技術の高度化に貢献する。

「固体地球変動の解明・予測」に関する達成目標では、同様にマクロな現象とミクロな現象に分けて、以下の5つの目標を挙げている。

<マクロな現象>

- ① 固体地球内部のダイナミクスと熱・物質輸送の解明：固体地球内部の変動現象を解明するため、地震波の伝播解析による3次元トモグラフィの手法を高度化し、地殻からマントル、核に及ぶ固体地球の内部構造を詳細に解析するとともに、異なる領域間の熱力学的な結合、局所的な粘性の違い等を考慮して、固体地球内部の熱・物質輸送の3次元的なシミュレーションを行う。これにより、将来の全地球ダイナミクスモデルの構築に貢献する。
- ② 日本列島域の地殻・マントル活動の解明、予測技術の開発：プレートの相対運動に強く支配されている地殻・マントル活動や大地震の発生の総合的な解明・予測を行うため、弾性的な特性を有する地殻と粘弾性的な特性を有するマントルの2つの部分から成る構造モデルを想定し、プレート境界面及び主要な活断層面の位置と形状を考慮して3次元的なシミュレーションを行うモデルを開発する。

<ミクロな現象>

- ① 地震の発生メカニズムの解明：地震の発生メカニズムを定量的に解明するため、不均質構造場における地震発生の過程や応力蓄積・解放のメカニズムの研究等の進展を踏まえ、地震の発生に関する物理モデルの高度化を図る。
 - ② 3次元地震波動伝播の解析：断層面における破壊伝播により発生する地震波が、不整形基盤構造などの地球表層部の複雑な3次元構造を伝播する影響を評価し、地表面での強震動シミュレーションを行う。
 - ③ 地層中の物質移行過程の解明・評価：高レベル放射性廃棄物の深地層処分の安全性を評価するに当たっては、1万年程度の超長期にわたって、地層中の地下水の移行、放射性物質の移行等による人間環境への影響を評価する必要がある。ボーリングにより得られた観測データ、岩石の物理的・化学的特性に関する試験データ等を活用しつつ、安全性に影響を及ぼす可能性のある様々な因子を考慮したシミュレーションを行う。
-

報告書では、この2分野に加えて、情報科学技術分野に関しても、「メッシュ生成の自動化・

最適化」、「大規模プログラムの統合化」、「有限要素法の高度化」、「実時間可視化・高速データ転送」の開発を目標として挙げている。

(3) 地球シミュレータの研究開発体制の構築

1995～96年、科学技術庁内では、地球シミュレータ開発計画を推進していくための準備が、着々と進められていた。このころの大きな課題のひとつが、地球シミュレータ開発の中核となる実行機関を決めることだった。1996年1月、三好甫氏は科学技術庁に送った書類のなかで、「実行組織の検討において留意すべき」ポイントを次のように挙げている。

- 1) 組織は意欲のある有能な人材を採用し、これを教育し、一流の技術者、研究者を養育することができなければならない。これらの人材を核として、国内外の流動研究員制度等の活用を図る。
- 2) 自力で予算を獲得する必要がある。
- 3) 計算機を開発し、これを中心にシステムを練り上げ、システムを有効に活用する運用形態を維持する能力を持たなければならない。
- 4) 1)～3)が確保されれば、この組織が国内外の協力体制の中心となることは容易である。

さらに、書類には「私案」として、宇宙開発事業団（現・宇宙航空研究開発機構）のなかに地球シミュレータの研究開発、数値地球科学などの研究、加えて地球シミュレータの管理・運用も行う研究開発組織をつくることを提案している。

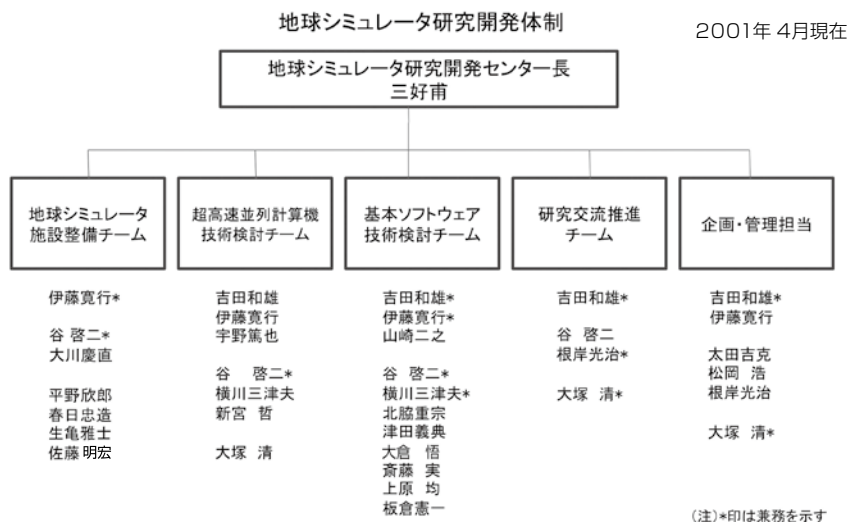
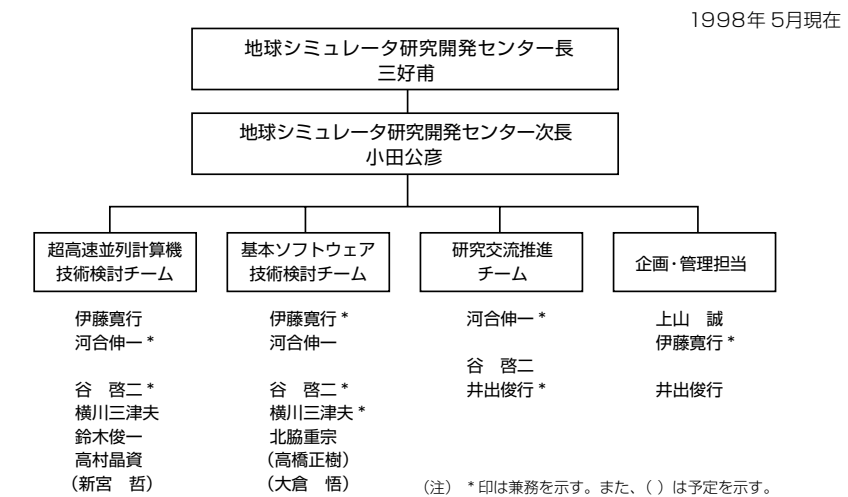
結果的には、宇宙開発事業団と動力炉・核燃料開発事業団（2005年に日本原子力研究所と統合され、現在は日本原子力研究開発機構）の2つの機関が中核機関となって共同プロジェクトチームを設置し、地球シミュレータのハードウェアとソフトウェアを一体となって開発するための体制を整備することに決まった。

この2つの機関に決まった経緯について、1996年6月から科学技術庁で計算科学研究企画官を務めた森本浩一氏は、次のように語る。「優れた人材を、機関を超えて集結させて、選りすぐりの少数精鋭で進めたいという思いが、三好氏の頭のなかにありました。さらに、短期的に集中的に開発しなければいけない、つまり時間との勝負という面がありました。そのため、予算の枠の問題、組織の体力を考えると、やはりひとつの機関でやれる範囲には限界がありますから、複数の機関がそのポテンシャルを集結して進めていった方がよいだろうという結論に至りました。さらに、研究開発分野として大気・海洋と固体地球からなる地球科学を設定したことから、大気・海洋部分を当時の宇宙開発事業団が担い、固体地球部分を当時の動力炉・核燃料開発事業団が担うという役割分担を描いたわけです。宇宙開発事業団は衛星データをたくさん持っていますから、それを活かして大気・海洋を結合した統合的なシミュレーション研究を推進してもらいたいということでした。また、動燃に参画を求めた理由は、高レベルな放射性廃棄

物の深地層処分の安全性を評価するために、固体地球分野のシミュレーション研究に着手してもらいたいということからです。当時、地質学の分野では、その複雑さもあって、シミュレーションを活用したサイエンスはまだ十分に行われていませんでした。しかし、深地層処分の安全性評価には、深地層の挙動について1万年オーダーで追跡していかなければ十分とはいえません。そのためには膨大な計算が必要ということで、参画を求めたわけです」

さらに、中核機関が共同して地球シミュレータの研究開発を実施していくため、また優れた人員の集結を図るための共同プロジェクトチームとして、2つの中核機関が協力協定を締結し、新たな組織が設置されることになった。それが地球シミュレータ研究開発センターだった。「地球

地球シミュレータ研究開発センター組織図



シミュレータ研究開発センターは、いってみれば2つの中核機関の間を結び付けるバーチャルな組織でした。両方から委任を受けて両機関に対して指導・監督できるようにしたわけです。そこに予算や契約の発注等の権限を集中させて、同センターの意思が両機関に反映されるような仕組みを組んだのです」と森本氏は話す。

そして、1997年4月1日、宇宙開発事業団と動力炉・核燃料開発事業団の両機関は、地球シミュレータ研究開発に関する協力協定を締結し、この協定に基づいて、プロジェクト・マネジメントを担う地球シミュレータ研究開発センターが設置された。そして、同センターのセンター長には、地球シミュレータ計画の推進役としてこの計画をけん引してきた三好氏が就任した。

科学技術庁は、地球シミュレータ開発を計画的に推進するため、研究開発局に設置された計算科学技術推進室において、関係課室の協力を得ながら地球シミュレータ開発計画全体の企画・調整を総括することとした。さらに、研究開発局長の諮問機関である計算科学技術推進会議のもとに地球シミュレータ部会が設置され、全体計画に関する基本方針などについて検討を行うこととした（1997年2月）。この地球シミュレータ部会での審議を経て1997年7月にまとめられたのが、先に紹介した報告書『地球シミュレータ計画の推進について』だった。

また、科学技術庁は、地球シミュレータ計画推進の中核機関である宇宙開発事業団と動力炉・核燃料開発事業団に、ハードウェア開発及びソフトウェアの研究開発を担わせる一方で、高度情報科学技術研究機構を支援機関として効率的な並列ソフトウェア開発のための体制整備を行い、さらに、地球科学技術分野において海洋科学技術センター、防災科学技術研究所、計算科学技術分野において日本原子力研究所、航空宇宙技術研究所、国際共同研究分野において理化学研究所、その他、金属材料技術研究所、地球科学技術研究機構などを協力機関とし、幅広い研究機関との緊密な連携・協力のもとで地球シミュレータ開発を推進していくための支援機能の強化を図った。こうして地球シミュレータ計画は、1997年春にその推進体制を確立し、いよいよ具体的に動き始めた。

ところが、その1年後、この推進体制に改変が求められる事態が生じる。中核機関のひとつであった動力炉・核燃料開発事業団で、事業の見直しが行われることになったのだ。高速増殖炉「もんじゅ」の開発などを行っていた動力炉・核燃料開発事業団では、1995年に「もんじゅ」でナトリウム漏洩事故、1997年には東海事業所再処理施設アスファルト固化処理施設で火災爆発事故が発生するなどのトラブルがおきていた。このため、1997年8月に取りまとめられた動燃改革検討委員会の報告書に基づき、1998年から動力炉・核燃料開発事業団は、高速増殖炉開発および関連核燃料リサイクル技術、高レベル放射性廃棄物処理処分技術の研究開発を中心とする新法人に改組されることとなった。これを受けて、科学技術庁は1998年4月から、動力炉・核燃料開発事業団に替えて日本原子力研究所を地球シミュレータ開発計画の中核機関とすること

を決めた。日本原子力研究所は、従来より計算科学技術分野の実績があり、1995年には計算科学技術推進センターがスタートして並列処理基盤技術の研究開発に取り組むなど、科学技術庁が推進する高度計算科学技術の中心的な機関であったためだ。この決定により、宇宙開発事業団と日本原子力研究所は1998年4月1日に協力協定を締結し、共同して地球シミュレータの研究開発を進めていくこととなった。

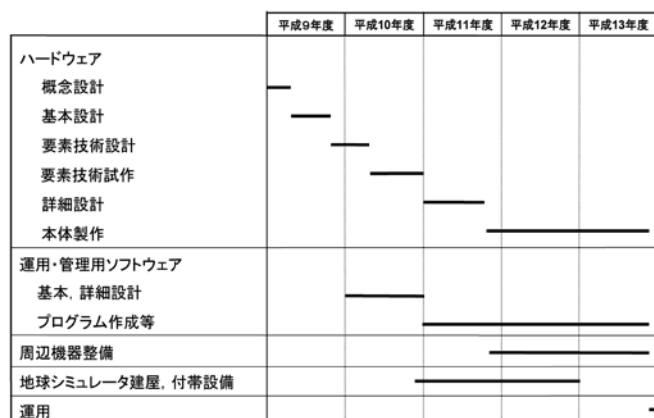
地球シミュレータの研究開発体制に関しては、翌1999年、さらに修正が加えられることになる。それは、中核機関への海洋科学技術センターの参画だ。科学技術庁は、地球シミュレータを設置するための建屋の建設、および完成後の運用体制の整備などを円滑に進めていくため、計算機システムの開発段階から、宇宙開発事業団、日本原子力研究所の2法人に海洋科学技術センターを加えた3法人で推進していくことを決めた。その一方で、1997年に地球環境変動の解明に焦点をあてた基礎的かつ学際的な研究を推進する目的で、宇宙開発事業団と海洋科学技術センターの共同事業として、地球フロンティア研究システムが創設されていた（(5)項で詳しく紹介）。科学技術庁は、地球シミュレータの運用に際して地球フロンティア研究システムとの連携を考えていたため、海洋科学技術センターに地球シミュレータの建屋の整備のための経費を計上すること、さらに地球シミュレータの開発にも中核機関として参加することを求めたのだ。そして、1998年夏から3法人の協定へ向けた準備が始まり、1999年3月に3法人による協力協定が締結された。

(4) 地球シミュレータの設計・製作

1997年度から、地球シミュレータ研究開発計画が具体的に動き出した。研究開発の全体スケジュールに関しては、概ね次のように計画されていた。97年度初頭より、地球シミュレータ用の超高速並列計算機のプロトタイプに関する委託研究を行い、秋からは基本設計、さらに年度中に、ハードウェアを構成する半導体技術および実装関連技術に関する要素技術設計を開始し、98年度には要素技術の試作を行い、

99年度には詳細設計、そして2000年度から01年度にかけて本体製作を実施し、01年度末の総合調整を経て02年度から運用を開始する。この間98年度には、本格的な開発が行われる前の段階で、それまでの成果について

の中間評価を行うこととした。



地球シミュレータの開発スケジュール

については、次のような考え方によって進められた。

一般に、既製品のスーパーコンピュータの調達においては、その透明性、公開性を保持しつつ、差別のない競争的な手続きによって実施することが重要であるため、政府調達協定 (GATT) および「日本の公共部門のコンピュータ製品及びサービスの調達に関する措置」の「1990年スーパーコンピュータ導入手続き」などの国内諸規則に基づいて行うこととなっているが、地球シミュレータ開発は、既製品のスーパーコンピュータ調達とは異なり、世界最高水準の性能の達成をめざした研究開発業務と位置付けられることから、その調達は、GATT の定めるところ (第 15 条第 1 項 e 号) によって、随意契約を行うことができる。しかし、地球シミュレータ開発においては、研究開発およびその調達の透明性、公開性、正当性を国内外に広く示すために、事前官報公示などの調達手続きを行うなど、自主的に GATT 政府調達の手続きの一部を準用しながら開発を進めることとなった。

これにより、概念設計の段階では、官報公示により広く概念設計を行う企業を募り、受託業者となるための資格を満たし、開発意思を表明した複数企業に、概念設計の研究委託を行うこととした。そして、開発業者の選定においては、開発計画金額の範囲内で、最大限の計算機性能を実現できる業者が選ばれるように、調達側の示した概念設計仕様書と性能評価手法に基づいて、提出された概念設計書をあらかじめ定めた評価基準を用いて評価し、地球シミュレータの推定性能および開発予定価格に対する総合評価によって、1社を選定することとした。こうして開発業者が決定した後は、最初の契約となる基本設計の契約については、官報公示を行い、要素技術設計の契約については、官報公示を行わずに随意契約によって行うことになった。

こうした考え方に基づいて、1997年 5月、「地球シミュレータ用超高速並列計算機的设计等提案書に関する官報公示」が行われた。そして、その概要説明会には、日本電気、富士通、日立製作所、日本 IBM、日本シリコングラフィックスレイの 5社が参加した。そして、これらの業者に概念設計のための技術提案書として、提案業者の業務経歴、地球シミュレータ開発方針および体制、技術職員の経歴および能力、地球シミュレータ概念設計の原案、開発すべき要素技術などについての記述を要求した。その結果、翌月の提出期限までに技術提案書の提出があったのは、日本電気、富士通の 2社のみだった。この 2社の技術提案書を検討した結果、両社ともに評価基準を満たしており、また地球シミュレータ開発計画概要書に記述されていた要件をすべて満たしていたことから、97年 7月、両社に地球シミュレータ用超高速並列計算機の概念設計が研究委託 (97年 8月～11月) された。そして、提出された概念設計書の審査・評価の結果、総合得点でより高い評価を得た日本電気が開発業者に決まった。

これを受けて、97年 12月、宇宙開発事業団、動力炉・核燃料開発事業団と日本電気との間

で、「地球シミュレータ用超高速並列計算機の基本設計」業務委託の契約締結がなされた（納期は98年3月）。さらに、翌98年1月から要素技術設計（納期は98年5月）、3月から実装技術に関する設計（納期は98年6月）も開始された。この後に要素技術の試作および中間評価を経て、地球シミュレータの具体的な製作が開始された。

(5) 地球フロンティア研究システムとソフトウェア開発

地球シミュレータの開発計画が本格的に動き出した1997年、宇宙開発事業団と海洋科学技術センターの共同事業として、新たな研究組織が誕生した。97年10月に創設された地球フロンティア研究システム（システム長は松野太郎氏）だ。

発端となったのは、96年7月、科学技術庁長官の諮問機関である航空・電子等技術審議会の地球科学技術部会がまとめた報告書「地球変動予測の実現に向けて」だった。この報告書では、関係機関の有機的な連携・協力のもとで、地球をひとつのシステムとしてとらえた取り組みにより、観測システム、プロセス研究、シミュレーションの3つの機能が常に一体となった研究開発計画を定めて、これを着実に実施していく必要があることが強調されていた。その背景には、すでに日本でも最先端の観測機器を備えた地球観測衛星（人工衛星）や海洋地球研究船「みらい」（97年竣工）のような優れた海洋観測船が登場し、日本における地球観測の急速な進展により、観測によって得られたデータを有効に活用することの必要性が認識されるようになってきたこと、さらには、コンピュータ技術の発展により、日本でも地球規模の観測を基にした全地球モデリングによるシミュレーションの将来性が見えてきたことが挙げられる。そこで、地球変動予測の実現をめざして、さまざまな現象の個別過程の基礎的かつ学際的な研究の充実・強化を図り、大規模な地球モデリングを行っていくための新たな体制を整備し、統一のとれた戦略のもとで、これを推進していく研究組織が求められた。地球フロンティア研究システムは、まさにそれを実現するために創設された。

報告書「地球変動予測の実現に向けて」において具体的に掲げられた目標を実現するため、地球フロンティア研究システムには、初年度に、気候変動予測研究プログラム、水循環予測研究プログラム、地球温暖化予測研究プログラム、続いて大気組成変動予測研究プログラム、生態系変動予測研究プログラムが設置された。また、地球フロンティ



1997年10月に地球フロンティア研究システムが創設された。右から平野拓也 JAMSTEC 理事長、松野太郎システム長、内田勇夫 NASDA 理事長

ア研究システムでは、国際共同研究の推進がもうひとつの重要な機能とされていた。そのため、日・米を中核とした2つの国際研究センター（国際太平洋研究センター、国際北極圏研究センター）が設置され、これに積極的に参加していくこととなった。さらに、目標には含まれていないが、並行して進められていた地球シミュレータ計画で必要となる次世代気候モデルの開発のため、モデル統合化プログラムも置かれた。基本的には、地球シミュレータ開発計画と地球フロンティア研究システムは別の計画であったが、密接な連携を図りながら計画を進めていくこととされていた。モデル統合化プログラムには、統合モデル開発グループ、次世代モデル研究グループ、データ同化研究グループの3つが置かれ、地球シミュレータ完成時に可能となる水平格子間隔 10km オーダーの気候モデル開発の推進をめざし、その能力を活かすソフトウェアの開発にあたった。

三好甫氏は、地球フロンティア研究システムの創設に関連して『科学技術ジャーナル』誌（1997年12月号）上で行われた座談会で、地球シミュレータと地球フロンティア研究システムの関係について、次のように語っている。

「良い計算モデルを開発するのは地球物理の方たちの分担です。分解能を上げさえすればそれで良いのであれば事は簡単ですが、それだけでは駄目でしょう。良いユーザーに出会って、良い成果を出してもらって、計算機は初めて良い計算機になるのです。」「要するに、良いユーザー集団に出会えた計算機が幸せなのです。正直なところ、私は地球フロンティア研究システムだけが地球シミュレータのユーザーとは考えていません。これは国民の税金を使った仕事ですから。気象庁だろうが、環境庁だろうが、良い計算をする人たち全員に使って頂きたいと思っています」

地球シミュレータに向けた応用ソフトウェア（計算地球科学ソフトウェア）の開発は、地球シミュレータのハードウェア開発と並行して進められたが、関係する複数の機関の間の調整不足や思惑の違いなどによって、スムーズに進展せず、多少の混乱が生じる事態となった。

地球シミュレータに向けた地球環境予測に関するソフトウェア開発については、1994～95年にかけて動き出した2つの活動があった。ひとつは、94年に始まった地球環境予測に関する懇談会（事務局は地球科学技術推進室）。2010年までに、数カ月から数十年という時間スケールで地球環境変動を予測できるモデルを開発することを目標にしていたが、後の97年に地球フロンティア研究システムが創設され、モデル統合化プログラムにおいて同様の研究が行われることになったため、97年度で中止となっている。もうひとつは、95年に始まった地球環境シミュレーションシステム開発委員会（事務局は高度情報科学技術研究機構）で、地球シミュレータに向けて、大気モデル、海洋モデルを並列化した地球環境シミュレーションシステムの調査・開発を目

標としていた。後者の開発委員会では、開始から間もなくして、モデルの並列化を試みるために、東京大学気候システム研究センターなどから大気モデル、海洋モデルの提供を受けた。委員となっていた研究者らにとって、これらは新規に並列モデルを開発するためのテスト材料という認識だったが、実際には並列化された大気モデル・海洋モデルをつくるために活用され、そのまま新たな著作物となることが明らかになり、オリジナルモデルの扱いや権利などを巡って大きな問題となった。さらに、97年にできあがったプログラムは、大気モデルや海洋モデルとしてはエラーが多く、その計算結果は、オリジナルモデルに関係する研究者らにとって満足いくものではなかった。こうしたことから、98年より新たに並列化モデルの改良作業が、高度情報科学技術研究機構と地球フロンティア研究システムによるタスクチームの手で進められることとなった。さらに、オリジナルモデルを開発した機関とも新たに共同開発を進めていくための協力関係を結び、関係修復の努力が行われた。

さまざまな組織や機関が総力を結集して研究開発を行おうとするとき、当然ながら、そこにはそれぞれの立場の違いや考え方の差異が存在する。特に地球シミュレータ開発計画のように大規模かつ革新的な事業においては、ボタンの掛け違いが、後に大きな問題へと広がっていくことがある。この問題は、まさにその顕著な例であったといえるだろう。

なお、この項で引用した『科学技術ジャーナル』誌(1997年12月号)上で行われた、地球フロンティア研究システムの創設に関連した座談会での三好氏の発言は、科学技術庁で開発した地球シミュレータは、「直接傘下にある地球フロンティア、開発に参画した法人や科学技術庁関係者が中心になって使い、成果を出すべき」との考えと、「世界で誰も経験したことのない能力を持つはずの地球シミュレータは、国家プロジェクトとして、全ての日本の関係者が全員協力して世界をリードする研究をするために利用すべき」との2つの考え方が、この当時あったことを示している。実際、利用方法に関する協議は、地球シミュレータが完成し、運用が開始されるまで続けられた。最重要とされた IPCC 対応の温暖化予測等の研究は、文科省の「人・自然・地球共生プロジェクト(RR2002)」として、その他の分野は、JAMSTEC による公募プロジェクトとして運用されることとなったが、この時点では必ずしも明確ではなかった。

第3章

世界最高性能をめざして

1. 地球シミュレータシステムの概要

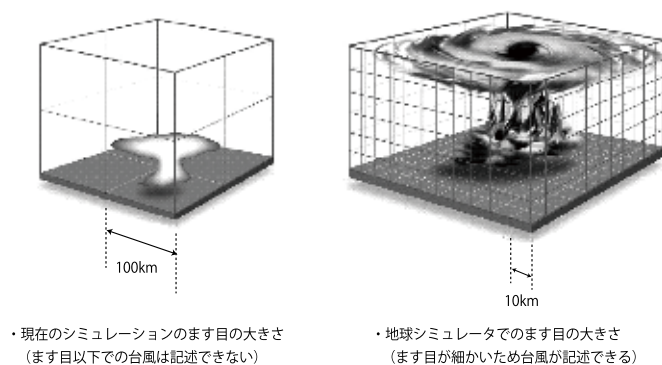
(1) 地球シミュレータの開発目標

「地球シミュレータ」計画の具体化が始まった1997年当時の大気大循環モデルでは、全球を約100kmの格子間隔（分解能）で分割してシミュレーションを行っていた。だが、予測を高精度化するためには10km程度まで分解能を高める必要があるとされていた。緯度・経度両方向に10倍程度、鉛直方向に数倍程度、さらに時間ステップも一桁程度短くするためには、そのころ気候・気象分野の代表的な大規模問題に関するシミュレーションで利用されていたスーパーコンピュータ（CRAY C90）の約1,000倍の実効処理速度が求められた。CRAY C90の大気大循環モデルでの実効処理速度が4～6GFLOPSであったことから、新たに開発される地球シミュレータには、5TFLOPS程度の実効性能が必要であることが示された。また、主記憶容量についても、全体で数TB（テラバイト）が必要とされた。こうした開発目標を実現するため、アーキテクチャ（計算機タイプ）については、地球シミュレータの完成時期となる21世紀初頭の技術的な達成予測を考慮しながらさまざまな可能性が検討され、そのなかから示唆されたのは、ベクトルプロセッサを要素計算機とする分散主記憶型並列計算機だった。

気候・気象分野の数値シミュレーションにおいて、当時のベクトル並列計算機は約30%という高い実効効率（理論性能に対する実効性能の割合）が得られていたが、地球シミュレータでは非常に大きな並列数となることを考慮し、実効効率を半分程度（16%）と低く見積もった場合、地球シミュレータが実効速度5TFLOPS実現するためには、理論性能は32TFLOPS以上が必要とされた。また、数値モデルの高分解能を実現するために必要な主記憶容量はおおよそ4TB以上と見積もられた。さらに、地球シ

ミュレータを実現させるために、「高密度LSI技術において、ベクトル計算機の論理素子のクロック周波数を500MHz程度に上げ、トランジスタ数を1cm²あたり1,200万～1,500万個とすることをめざす。高速メモリ技術（SRAM）において、アクセス時間が8ナノ秒以下の64～256MbitのSSRAMの開発をめざす。パッケー

シミュレータの規模による違い



シリアル技術において、ベクトルプロセッサの1チップあたりの端子数 5,000ピン以上の開発をめざす。高効率冷却技術において、数千 kW 程度の消費電力を冷却する機構の開発をめざす。結合ネットワーク技術において、2,000 ～ 4,000台の要素計算機をクロスバ接続し、転送速度は1秒あたり 4 ～ 16GB、アクセスレイテンシは 1,000 ～ 2,000クロック程度をめざす」といった要素技術に関する、当時の将来予測に基づいた「達成目標」も掲げられた。

こうした目標を達成するために示された、具体化に向けたハードウェア設計の調達指針の主なポイントは、次のようにまとめられる

第1に、地球シミュレータは分散メモリ型並列計算機とする。プロセッサとメモリ間のデータ転送性能は、現在の最先端の商用共有メモリ型計算機であっても高々 1TB/ 秒であり、技術の進展を考慮しても 21世紀初頭に得られるデータ転送性能は 10TB/ 秒程度であると考えられる。浮動小数点演算あたり、科学技術計算に必要な倍精度変数 (8バイト / 変数) が高々 1個必要だとしても、理論性能 32TFLOPS にデータを供給するためには 256TB/ 秒が必要となり、とても共有メモリ型並列計算機では達成できない。したがって、分散メモリ型並列計算機とならざるを得ない (分散メモリ方式は、小容量のメモリとプロセッサで独立した計算機を構成し、複数の計算機を高速ネットワークで結合して一体化する並列化方式。これに対して、共有メモリ方式は、大容量のメモリを複数のプロセッサで共有する並列化方式)。一方、現在の並列計算機利用技術、並列計算機利用効率を考慮すれば、ノード (分散コンポーネント) 数はせいぜい 1000未満が現実的である。

第2に、地球シミュレータの各プロセッサは、ベクトルレジスタ付ベクトルプロセッサとする。すなわち、連続体モデルに対するベクトルプロセッサの実効処理速度の優位性は、『「地球シミュレータ」計画の推進について』で示された大気大循環シミュレーションの性能評価からも明らかである。このとき、地球シミュレータ全体の容積の縮小化、及び使用電力の抑制を行うため、ベクトルプロセッサを1チップ LSI 上に高密度実装することを目標とする。

第3に、分散コンポーネントのアーキテクチャは共有メモリ型並列計算機とする。1000台で 32TFLOPS 以上の理論性能を達成しようとする、ひとつの分散コンポーネントは 32GFLOPS 以上必要となる。現在、マイクロプロセッサの動作周波数はすでに GHz のオーダーに達しているが、1チップのベクトルプロセッサで 32GFLOPS を達成することは 2002年の技術予測ではほとんど困難である。したがって、分散コンポーネントは複数台のベクトルプロセッサがひとつの主記憶システムを共有するシステムとする。

第4に、地球シミュレータの分散コンポーネント間の結合ネットワークは、すべての分散コンポーネント同士が均質に結合され、1ホップでデータ転送が可能なように単段クロスバスイッチとする。これは地球シミュレータ上で様々なプログラム、すなわち種々のアルゴリズムが実行されるため、どのようなアルゴリズムに対しても1ホップでデータ転送を可能にするためである。例えば、現在大気大循環シミュレーションのプログラムでは、偏微分方程式を直交関数で離散化するスペクトル法がよく用いられるが、このプログラムではすべてのプロセッサ間でデータ転送が生じ、単段クロスバスイッチであれば多対多の通信に非常に有効である。また、地球シミュレータでは、様々なジョブが実行されることを考慮すれば、自由にジョブの配置ができることが望ましい。このような要求に対しても、クロスバネットワークは柔軟に対応できる。

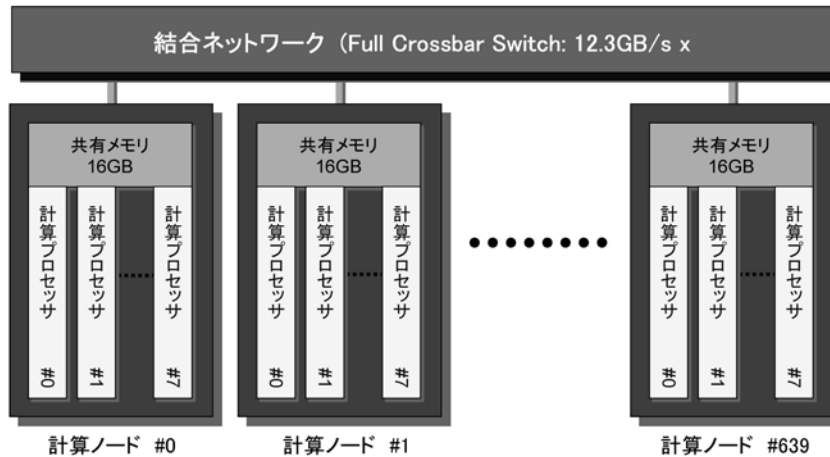
こうした指針に基づいて、1997年度より地球シミュレータの設計（概念設計、基本設計、要素技術設計）が進められた。さらに、基本設計において、概念設計当時想定していた大気大循環モデルのさらなる高解像度化、固体地球分野、大気・海洋分野の有限要素法を用いた数値シミュレーションにも対応するために主記憶容量を大きく増やす必要が出たため、概念設計時の主記憶装置に関する仕様変更されるなど、一部の見直しも行われた。

(2) 地球シミュレータの構成

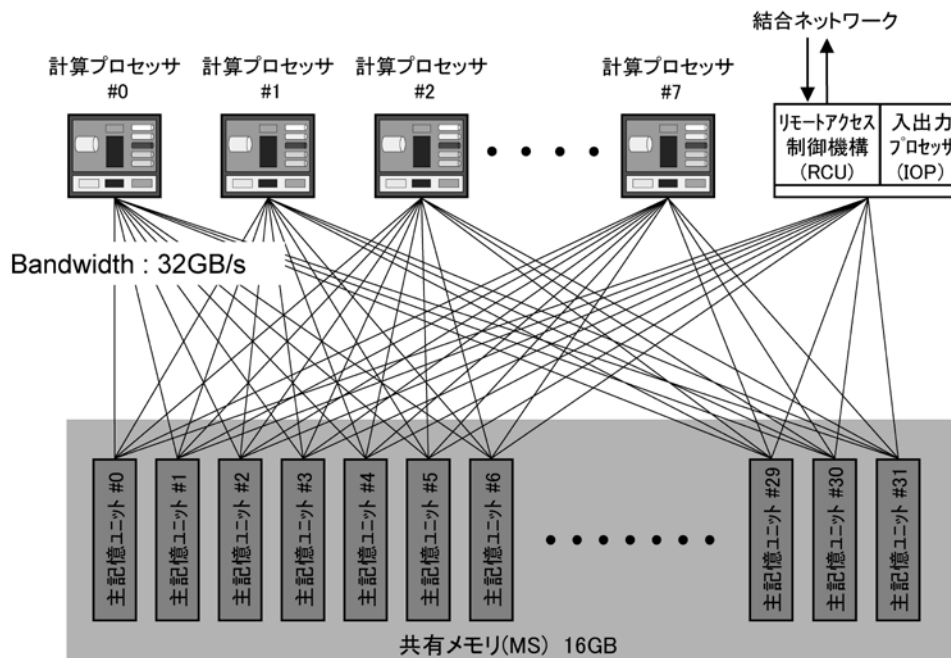
1998年、本格的な開発が開始される前に、それまでの成果を評価し、その後の開発の進め方に反映させていく目的で、科学技術庁は計算科学技術推進会議のもとに地球シミュレータ中間評価委員会（座長：小柳義夫東京大学教授）を設置し、地球シミュレータ開発の中間評価を実施して、同年8月に報告書としてまとめられた。この場において、詳細設計を前にした地球シミュレータの概要（ハードウェアおよび要素技術の設計についての概要）に関して、開発主体である地球シミュレータ研究開発センターから次のように説明された。

-
- 地球シミュレータは、640台の計算ノードをクロスバネットワークで結合させた分散メモリ型並列計算機である。各計算ノードは、理論性能 8GFLOPS のベクトル型計算プロセッサ 8台が主記憶装置 16GB を共有する共有メモリ型並列計算機となっている。従って、全体で計算プロセッサは 5,120台、理論性能は 40TFLOPS、主記憶容量 10TB となる。
 - 各計算ノードは、8台の計算プロセッサ、32台の主記憶ユニット (MMU)、リモート制御装置 (RCU) 及び入出力プロセッサ (IOP) から構成される。

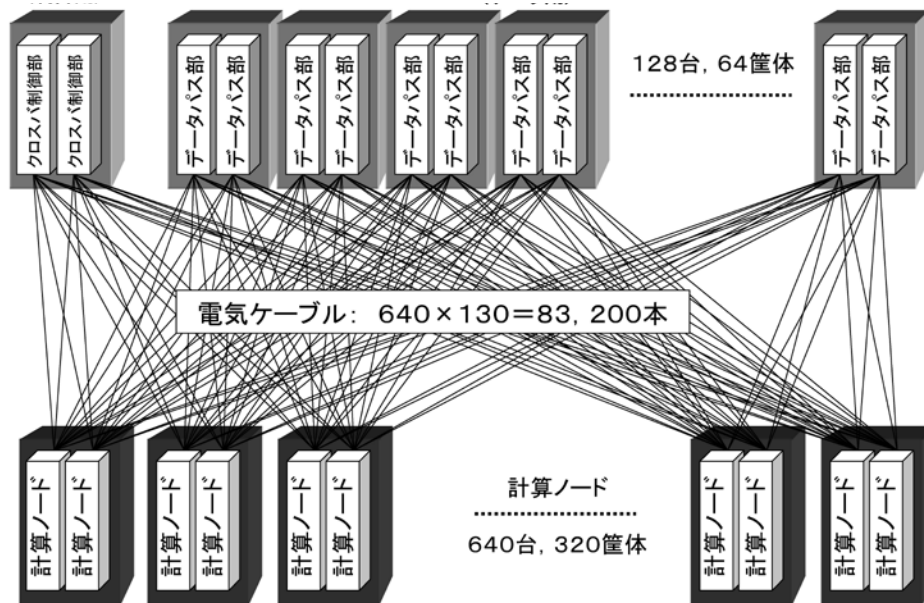
- ・ 総計算ノード数: 640
- ・ ピーク性能: 40TFLOPS
- ・ 主記憶容量: 10TB
- ・ 総プロセッサ数: 5120
- ・ 計算プロセッサのピーク性能: 8GFLOPS
- ・ 計算ノードのピーク性能: 64GFLOPS
- ・ 計算ノードの主記憶容量: 16GB



地球シミュレータの全体構成



計算ノードの構成



結合ネットワーク接続のイメージ

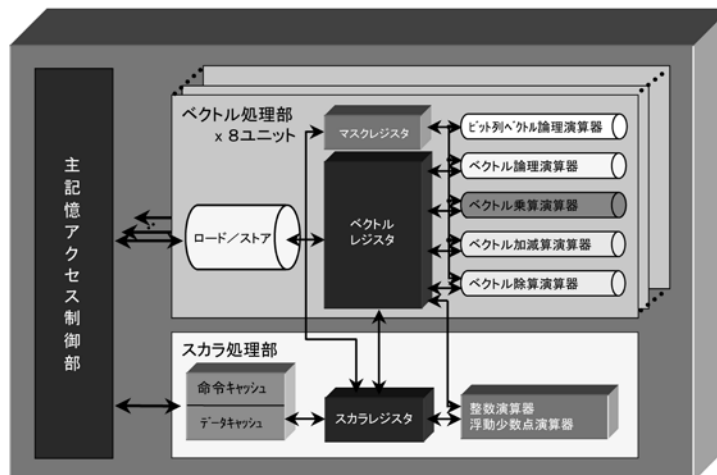
○ ベクトルユニット: 8セット

- ◆ 6種のベクトルパイプライン
- ◆ 256要素のベクトルレジスタ: 72個
- ◆ 256ビットのマスクレジスタ: 17個

○ 主記憶アクセス制御部

○ スカラユニット

- ◆ 4-ウェイ スーパースカラ
- ◆ 64KB 命令キャッシュ
- ◆ 64KB データキャッシュ
- ◆ 128個の汎用レジスタ



1チップLSI: 8Gflops

- ◆ 0.15μm CMOSテクノロジー + 銅配線
- ◆ 20.79mm x 20.79mm
- ◆ 5,700万トランジスタ
- ◆ 5185 ピン
- ◆ クロック周波数 500MHz(1GHz)
- ◆ 消費電力 135W(Typ.)

計算プロセッサの構成

- 計算プロセッサ (AP) は、ベクトル処理部、スカラー処理部、プロセッサネットワークユニット及びアドレス制御部が1チップ上に実装され、主要クロック周波数 500MHz で動作する。
- スカラー処理部は、最大 4 命令同時発行のスーパーカラー方式の処理を行う。また、ベクトル処理部は、6 種類 (加算、乗算、除算、論理、ビット列論理、ロード/ストア) のベクトル演算部と 2 種類のベクトルレジスタからなるベクトル演算部セット 8 個で構成され、最大 8GFLOPS の性能を有している。
- 32 台の主記憶ユニットには、主記憶素子として 128Mbit の高速 RAM を採用し、主記憶システムとして 256ウェイ、2048バンク構成とした。各主記憶ユニットの最大転送性能は 8GB/ 秒、計算ノード当たり、256GB/ 秒を確保している。
- クロスバネットワークは、複数のクロスバを並列に実装したデータパス部 (XSW) と制御部 (XCT) から構成され、各計算ノードのリモート制御装置と接続される。制御部は、計算ノード間の転送経路の予約、競合調停等を行う。計算ノード間では、ブロック転送、3ストライドまでのストライド付きベクトル転送、リストベクトル転送のデータ転送が可能である。データ転送性能は、16GB/ 秒である。
- 一方、地球シミュレータ本体の運用・管理を行うために、16 台の計算ノードをクラスタと呼ぶ論理的単位でまとめ、クラスタに属する計算ノードの電源投入及び切断等各クラスタ内の制御を行うために、クラスタ制御装置 (CCS) として UNIX サーバーを置く。全体で 40 台の CCS のうち、一つの CCS を特にシステム制御装置 (SCCS) として、全クラスタの運用・管理を統括させる。
- RAID ディスク装置はクラスタ単位に配置され、クラスタ内の計算プロセッサとファイバチャネル (FC-AL) で接続される。このため、他のクラスタに接続されているディスク装置は、クロスバネットワークを介してアクセスする。また、大容量テープライブラリ装置を置き、各 CCS との接続を検討している。
- 地球シミュレータを実現するための要素技術設計では、計算プロセッサを 1チップ化し、500MHz のクロック周波数で動作させるための技術として、地球シミュレータ本体完成の時期である 2001 年までの技術動向を考慮しつつ、CMOS LSI 技術、高速 RAM 技術、高速高密度実装技術、高性能冷却技術等を検討した。その結果、0.15 μ m の CMOS LSI 技術、ベアチップ実装、効率の良い空冷構造等地球シミュレータに必要な技術が 2001 年までに得られる見通しである。

(『地球シミュレータ中間評価報告書』より引用)

こうした説明に対して、中間評価委員会は、全体のシステム構成、ハードウェアの構成要素・要素技術の開発目標を達成する上での設計などに不適切な点や、技術動向の反映が十分でない点、技術的に実現不可能と考えられる点は認められないとし、「現在の設計に基づいて開発を進めていくことが妥当であるとする」と評価した。

(3) 地球シミュレータ施設の整備

2001年度中の運用開始をめざし、1998年の中間評価を経て、地球シミュレータ本体の開発が順調に進むなか、課題として残ったのは、1999年度から設計や建設を開始しなければならない地球シミュレータ用の建屋についてだった。

1998年4月に宇宙開発事業団と日本原子力研究所による地球シミュレータ開発の新たな推進体制が誕生した。だが、この年の夏、科学技術庁は2法人に加えて、地球フロンティア研究システムを設置している海洋科学技術センターの参画を決める。そして、地球シミュレータの建屋の整備のための経費を海洋科学技術センターに計上することとした。海洋科学技術センターは、1999年3月に他の2法人との間で協力協定を結び、地球シミュレータ開発の中核機関に加わることとなった。当初、海洋科学技術センターは地球シミュレータの施設の設置と運営のみに関わることになっていたが、後には本体の開発にも参画することとなり、2000年3月に協力協定の変更協定が結ばれている。

このとき海洋科学技術センターの理事長を務めていたのは平野拓也氏だった。かつて航空宇宙技術研究所を定年退職した三好甫氏に「もっと大きなことを、国のためにやってもらいたい」と話した平野氏が、三好氏の大きな夢の実現に深く関わることになった。平野氏は、当時の状況を次のように話す。「他の2法人に比べれば、確かに予算規模も小さかったが、当時、海洋科学技術センターには地球フロンティア研究システムが設置されて、センターが本当の意味で研究センターに生まれ変わろうとする時期だったので、地球シミュレータ開発のプロジェクトに参画することに躊躇する気持ちはなかった。まさに三位一体で、観測、プロセス研究に加えてコンピュータを使ってシミュレーション研究を行っていくことは時代の流れでもあり、当然、やるべきことと考えていた」

海洋科学技術センターのプロジェクトへの参画が決まった1998年秋、早速、地球シミュレータを建設するための場所探しが始まった。選定の基本的な考え方は、①地球シミュレータの本体および関連施設を収納し、運用するために必要な施設が整備できること、②地球シミュレータの運用に加え、計算科学技術および地球変動予測の研究並びに内外の幅広い研究者等との研究交流および地球シミュレータの共同利用のために必要であると現時点で考えられる施設が整備できること、③将来、地球変動予測研究の総合的推進のために施設を拡充整備すること

が可能であること、④内外の幅広い研究者等が円滑に利用できるよう、交通の便がよいことであった。東京都心部から郊外までさまざまな候補地があげられた。そのなかには筑波や東京湾岸の青海地区なども含まれていた。こうした候補地のなかから選ばれたのは、神奈川県横浜市金沢区の神奈川県工業試験場の跡地だった。東京駅からJRを利用して1時間程度、面積も約1万坪（約33,000m²）と十分な広さを備えていた。

当初は、2000年度から2001年度にかけて建屋建設を行い、これと並行して計算ノード間のケーブル敷設などの工事を進めていく計画だったが、建屋構造の制約などから、ケーブル敷設に予定していた以上の期間を要することが分かった。そのため、2000年度中に建屋の整備を終了していなければならないことが明らかとなり、1998年度中に全体の設計を完了し、1999年度から建設工事を開始することとなった。こうして、地球シミュレータの建屋建設が、慌しく開始された。

1999年10月に起工式を行い、2000年秋に完成した地球シミュレータ施設は、地球シミュレータが設置されるシミュレータ棟（幅50m、奥行き65m、高さ17m）およびシミュレータ研究棟、冷却施設棟で構成される。鉄骨2階建て（免震構造）のシミュレータ棟は、3層で構成される。第1層は計算機システムを冷却するための空調機器や電気室などが設置され、第2層と第3層は高さ約1.7mのフリーアクセスフロアで区切られ、第2層には計算ノードと結合ネットワークをつなぐ8万本以上のケーブルが収納される



地球シミュレータ建設地に決まった神奈川県工業試験場の跡地（横浜市金沢区）

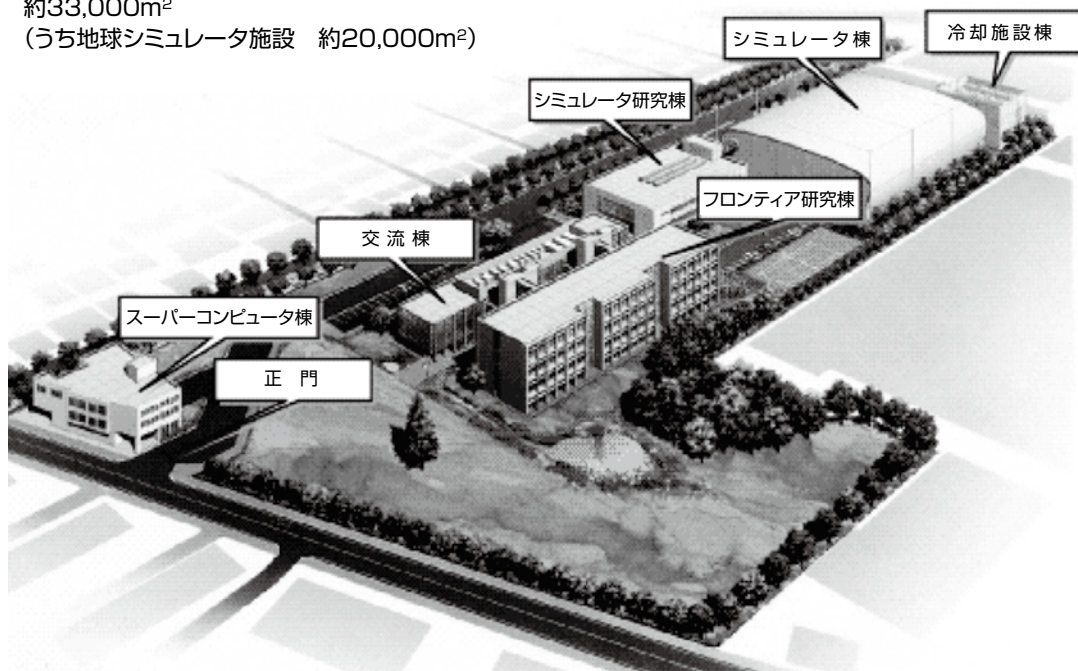


1999年10月に行われた地球シミュレータ建屋の起工式

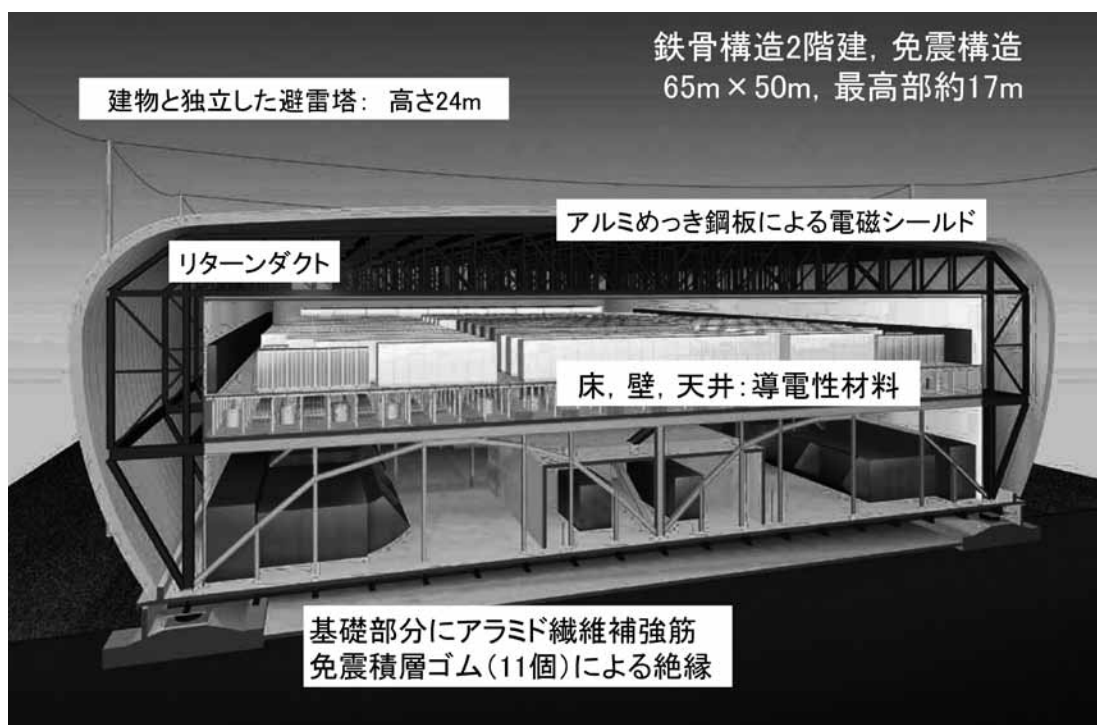


地球シミュレータ関連施設（JAMSTEC 横浜研究所）の竣工式の様子

神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
約33,000m²
(うち地球シミュレータ施設 約20,000m²)



JAMSTEC 横浜研究所の全景 (2000年当時)



地球シミュレータ棟の構造



空調機 (1)



空調機 (2)



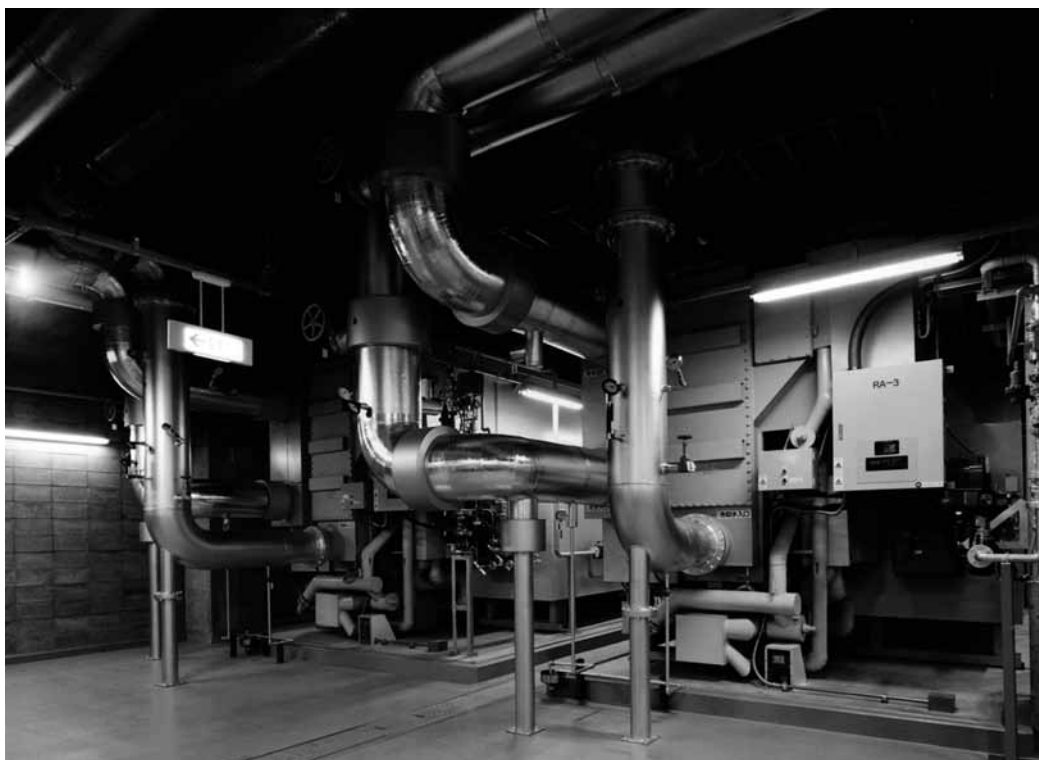
無停電電源設備 (UPS)



ライトガイド式照明システム



冷却施設棟



ガス炊吸収式冷温水発生機



水冷式ウォータチリングユニット



特高受変電設備 (66kV)

ほか、冷気を計算機システム全体に分配する空調ダクトスペースも兼ねている。そして、第3層が地球シミュレータの本体および周辺機器を設置するスペースとなっている。このシミュレータ棟は、免震構造とするために、ゴムと鋼板を積層した直径 1.1m のアイソレータ 11個で支える構造になっている。また建物全体は、アルミめっき鋼板によって誤作動の原因となる外部からの電磁波を完全にシールドしている。さらに、2階フロア全体、フリーアクセス床内と合わせて三重のシールド構造が施され、全体のシールド性能は 50dB となっている。計算機室の照明には、外部に設置された光源部（マルチハロゲン灯）から光だけを特殊なフィルムに反射させて計算機室内の照明とするライトガイド式照明システムが用いられている。これにより、蛍光灯などの照明システムで発生する電磁ノイズを除去している。さらに、建屋の基礎部分にアラミド繊維補強筋を使用して強度を保ちながら地下に流れた迷走電流の影響を避ける絶縁を施したり、建物から距離をおいて高さ 24m のポールを 8本立て、ポール間にワイヤーを張った避雷システムを設置するなど、さまざまな工夫が凝らされている。

(4) 地球シミュレータの基本ソフトウェア

地球シミュレータの基本ソフトウェアは、オペレーティングシステム (OS)、プログラム言語処理系（コンパイラなど）、運用・管理ソフトウェア（センタルーチン）から構成されている。基本ソフトウェアの開発は、既存のベクトル型並列スーパーコンピュータ用の標準機能をベースに、地球シミュレータ特有の機能を付加するかたちで開発が進められた。

地球シミュレータの OS は、640ノードという多数の計算リソースを管理するため、クラスタ構造を導入して制御している。クラスタとは 16ノードをまとめたもので、OS によるシステム管理の単位となっている。また、大規模分散並列処理に対応するため、高速ファイルアクセスが可能なファイルシステムを導入するとともに、並列ファイル入出力機能を提供している。運用におけるジョブ配置では、ひとつのクラスタ (S クラスタ) を会話型処理、小規模バッチ処理用として、その他の 39個のクラスタ (L クラスタ) を大規模バッチ処理用に割り当てることを想定した機能を充実させた。

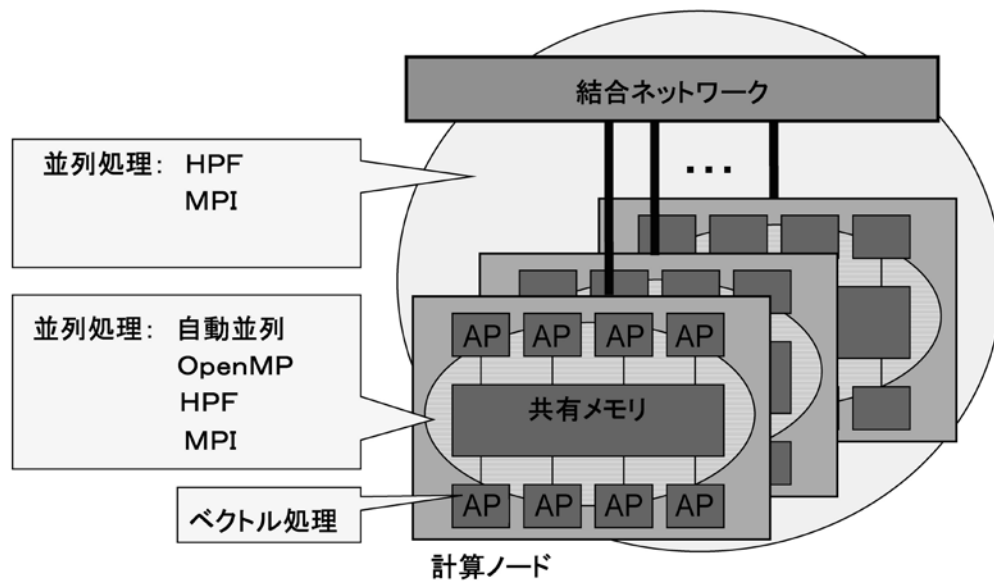
運用・管理ソフトウェアは、地球シミュレータ研究開発センターが独自に開発したもので、ジョブスケジューラ、大容量テープライブラリシステム上のファイル管理システムなどから構成されている。L クラスタ群では単一ジョブ環境を提供しているが、そのためのジョブ配置は、使用するファイルなどの配置を含めて非常に複雑だ。ジョブスケジューラは、ジョブが実行されるべき計算ノード予約や、そのノードにローカル接続されている磁気ディスクへのファイル配置、ジョブのアロケーションなどの複雑な制御を行い、地球シミュレータの利用効率の向上をめざした。

ジョブスケジューラの開発とともに苦労したのは、OS 開発において 5,120という膨大な数のブ

ロセッサを統合した巨大システム上で、スケーラビリティを確保することであった。これについては、地球シミュレータの開発が始まった時点から、性能的な課題、容量的な課題、タイムアウト（一定間隔以上の無応答を異常状態として検出する処理）関連、故障対策などに関して詳細な検討がなされ、その解決を図った。

640ノードをすべて使うような巨大なジョブが1ノードに接続されたディスクを共有して大量のI/Oを行うと、スケーラビリティが大きく損なわれてしまう。それぞれのノードがローカルI/Oを明示的に記述することで高性能I/Oを実現できるが、プログラミングがたいへんであり、生成された数多くのファイルの管理も負担となる。こうした問題を解決するために、並列ファイルシステムPFSが開発された。これにより、ファイルシステムとしてユーザーからはグローバルに唯一のものとして扱うことができ、しかも各ノードからの並列I/O処理を実現した。

地球シミュレータは、「共有メモリ-分散メモリ」とメモリの2段の階層構造を持っている。システムの性能を最大限に引き出すためには、このメモリ構造を十分に考慮した並列処理が必要になる。このため、地球シミュレータでは並列プログラミング環境として、①共有メモリ並列化：自動並列化（マイクロタスク）、OpenMP、②分散メモリ並列化：MPI（Message Passing Interface）、HPF（High Performance Fortran）が用意されている。HPFについては、国内で計算機ベンダーとユーザーの合同検討会（JAHPF：Japan Association for HPF）において拡張仕様が検討され、HPFフォーラムにその標準化を提言する活動が行われており、地球シミュレータでは、このJAHPF拡張仕様にさらに計算地球科学に必要な機能が追加されている。



3階層のプログラミングモデル

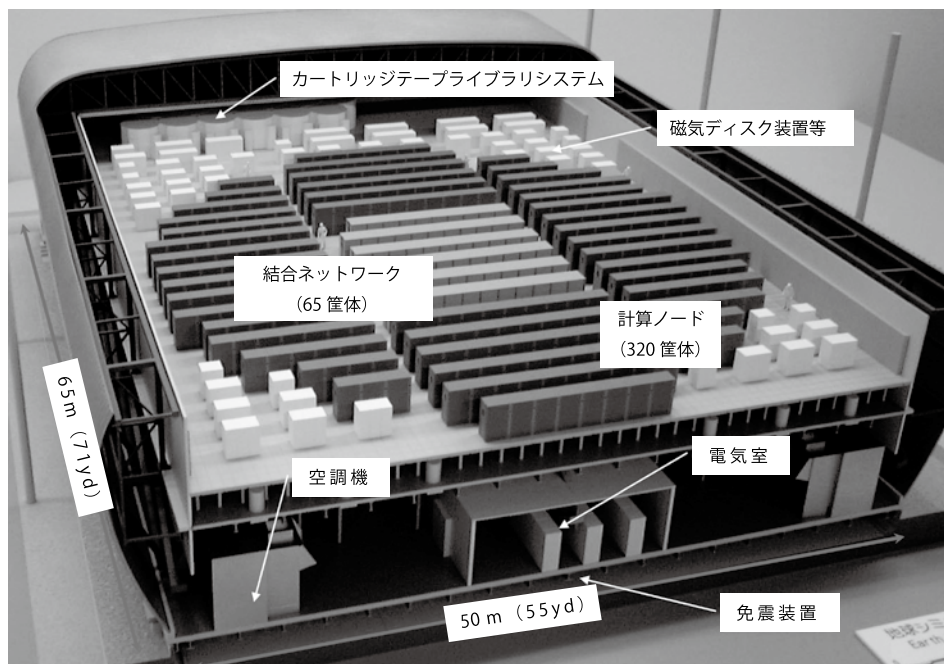
2. 地球シミュレータ本体システムの技術開発

(1) 技術的課題克服へのチャレンジ

地球シミュレータの開発では、省スペース化、省エネルギー化、省コスト化などが大きな課題として掲げられた。そのためには、要素計算機の高性能化と計算ノードのコンパクト化が不可欠であった。これを実現するため、ハードウェア開発において、半導体 (LSI) 技術、LSI パッケージング技術、実装技術、冷却技術、電源技術などに、21世紀初頭の最先端技術を取り入れることが要求された。これを実現するため、1998年から開始された要素技術の設計・試作、続いて1999年から行われた詳細設計・本体製作において、完遂のために技術的課題克服へ向けた厳しいチャレンジが続けられた。

その結果、LSI 加工技術では $0.15\mu\text{m}$ の CMOS テクノロジーと銅配線技術を用いることにより、CMOS によるベクトルプロセッサで 1GHz (一部は 500MHz) の高速動作が可能になった。さらに、1チップベクトルプロセッサを達成するために LSI の大型化を追求し、 $20.79\text{mm} \times 20.79\text{mm}$ のダイに 5,700万トランジスタ、5,185ピンを実装することに成功した。LSI パッケージング技術では、微細配線加工技術を駆使した大型ビルドアップ基板上に LSI をベア実装する技術が用いられた。また、冷却技術ではヒートパイプによる冷却方法が採用され、約 140W にも達する AP 用 LSI の発熱に対処することができた。

これまで、本体製作における技術開発の成果は報告されていたが、実際の開発にあたって、



地球シミュレータ棟の内部構造と本体の配置

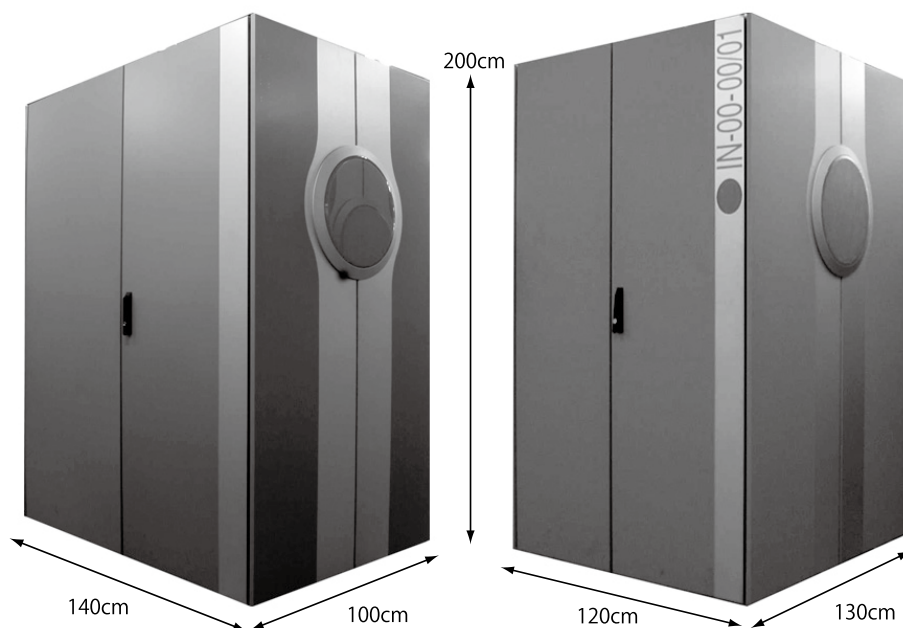
どのような苦労があったかについては語られることはなかった。今回、地球シミュレータ開発の経緯をまとめるにあたり、当時、技術開発を担当した日本電気の技術者らにあらためて取材し、さまざまな技術的課題を克服するための開発時の状況について話を聞いた。

● 最先端高集積 LSI 技術

LSI 技術については、 $0.15\mu\text{m}$ 、銅配線、CMOS プロセス採用を決定し、その量産製造技術の確立をめざした。当時、日本電気では、 $0.25\mu\text{m}$ のアルミ配線で SX-5 を開発していたが、地球シミュレータはかなり先の話であったことから、当初、 $0.18\mu\text{m}$ という次のプロセスにターゲットを設定した。だが後に、さらに一歩進めた $0.15\mu\text{m}$ プロセスの前倒し開発を決断し、適用プロセスを変更した。

銅配線プロセスも非常に大きな高いハードルだった。当時、まだ適用例は無く、この銅配線プロセスの量産製造技術に挑戦しようとしていたのは日本電気と他にもう1社のみだった。その1社が1998年に量産を開始した。日本電気も、同じころにプロセス量産製造技術確立し、それほど大差ない時期に OPC（光近接効果補正）処理、多層銅配線（8層）などの製造技術が確立された。

銅配線プロセスについては、従来のプロセスライン（アルミを使用）を汚染する問題があり、地球シミュレータ対応だけのために、完全に隔離した専用のラインを構築しなければならず、費



地球シミュレータの計算ノードキャビネット（左）と結合ネットワークキャビネット

用などの面でもたいへんだった。

しかし、銅配線はアルミ配線よりも抵抗が小さいことにより、遅延時間が短縮できる。つまり高性能につながるとともに、信頼性という意味からも非常に優れているため、現在では銅配線が一般的となっている。

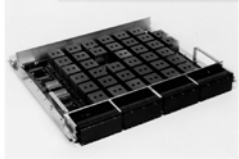
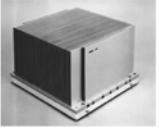
ダイサイズと製造歩留まりについては、まさに限界への挑戦であった。開発当初、それまで32チップで構成していたAP (SX-5) を1チップ化するためには、22mm × 22mm のダイサイズが必要という結果が出ていた。これは、マスクパターンをウェハに焼き付ける露光機（ステッパ）の能力限界（光学的限界）ぎりぎりだった。このような大きなチップは、世界的にも前例がなく、量産に対して著しいリスクを生じることが予測された。しかし、その後、物理設計の工夫を重ねたことにより、ダイサイズを20.8mm 角にまで縮小することに成功し、製造限界をクリアした。

さらに苦労したのは、LSI 内蔵 RAM 部分だった。LSI 内蔵 RAM 部分を専用に設計・開発することにより、従来に比べて2倍の集積度を実現した。また、内蔵 RAM の高速動作（500MHz）を実現するため、タイミング設計とプロセス条件へのフィードバックを繰り返した。

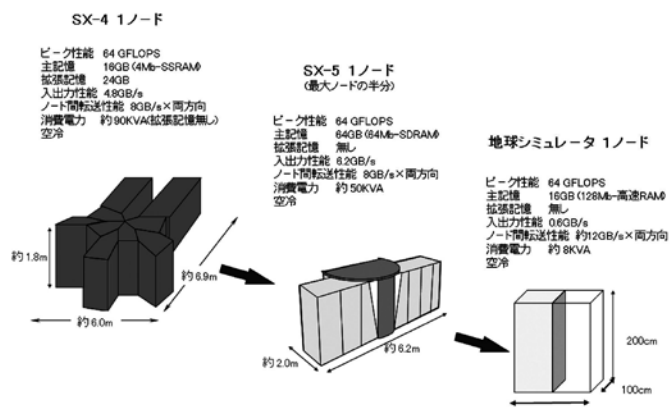
● 高集積 LSI 設計

SX-5において32チップで構成していたAPを1チップに収めるためには、論理構成の徹底的な見直しを行わなければならなかった。例えば、ブロック間の構成を一から見直して最適化する、アドレス変換機能（ATB）などのように追い出せるものはとにかく追い出し、必要最小限の構成にスリム化する、最先端の高速回路や設計技術を駆使してクロック倍速（1GHz）を実現させるといった見直しが行われた。

なかでも苦労したのは、配線収容性についてだった。最後の2カ月は24時間体制で、引ききれない配

	SX-4	SX-5	Earth Simulator
			
Size	457 x 386mm	225 x 225mm	110 x 115mm
Peak performance	2 GFLOPS	8 GFLOPS	8 GFLOPS
Clock	125MHz	250MHz	500MHz/1 GHz
LSI	0.35μm CMOS 37 LSIs	0.25μm CMOS 32 LSIs	0.15μm CMOS 1 chip processor

プロセッササイズの比較。地球シミュレータのサイズがいかに小さいかが分かる



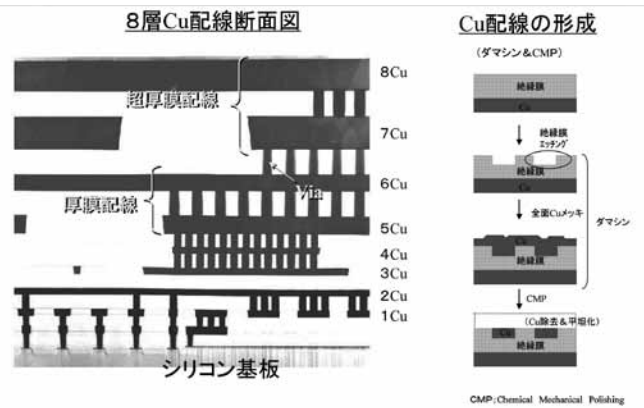
1ノードの筐体サイズの比較 (64GFLOPS 相当分)

線のエラー修正対策に追われた。1mm 角のなかに約 700本の配線という、まさに限界を超えるような作業が続いた。これは例えていえば、東京ドームのグラウンドに1mm ピッチの線を巡らせていくことに匹敵するほどの精度となる。

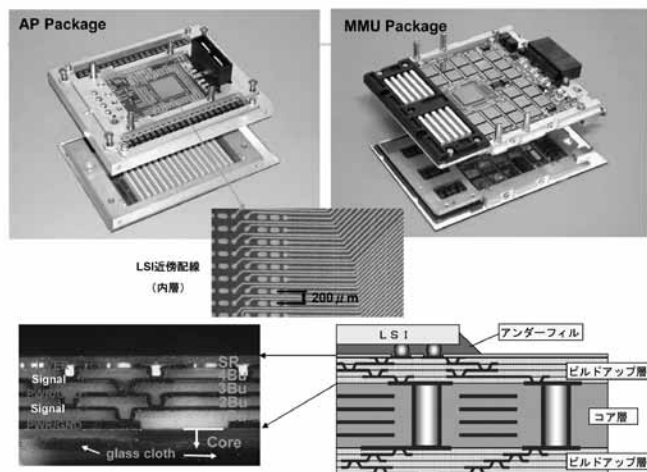
● 高密度パッケージ技術

ビルドアップ配線基板については、設計のための専用 CAD ツール開発・整備を行うとともに、通常 1～2カ月で行うところを半年かけて配線試行を重ね、多ピン LSI からのファンアウト (LSI に接続する約 2,000信号のパターン配線)、スルーホールによる信号伝送特性の劣化や配線収容性悪化の回避を目的としたリバールーティングによって高密度化をめざした。さらに、本番設計では、AP-MMU 間等長配線をはじめ、製造性、信頼性、伝送特性、耐ノイズ性などに配慮した設計が行われた。当時、まだ出始めたばかりのビルドアップ配線基板だったが、こうした努力の積み重ねにより、最短配線幅 $25\mu\text{m}$ (当時は約 $80\mu\text{m}$ が最も細かった) をなし遂げ、そのころの技術レベルの約 30倍 (地球シミュレータ稼働時も 10～15倍) の配線収容性を実現することができた。

ところが、試作を開始した当初は、歩留まりが非常に低いことに悩まされた。多層化することによりビルドアップ層形成回数が増え、その層形成時に多くの欠陥が発生していた。そこで各工程ごとにチェックを行い、不良箇所をリペアし、何とか歩留まりを改善。さらに塵埃も歩留まり低下の原因であったため、クリーンルーム内で製造を行った。また、基板を強化するために編み込まれていた、ガラスクロス気泡にも悩まされた。直径約 $10\mu\text{m}$ のガ

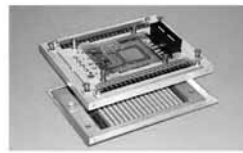


LSI 技術では、これまでメーカーが経験したことのない $0.15\mu\text{m}$ の銅配線 (8層) プロセスが採用された



高密度パッケージ技術の開発により、開発当時 (1998年) のビルド基盤の 30倍の配線収容性が実現した

ラスクロスのなかに、約 $1\mu\text{m}$ の気泡がストロー状にできてしまうことがあり、そこでショートした。この問題はスルーホールドリル加工の際にストロー状の穴を周辺にあるプリント基板樹脂で埋めるようにすることで解決した。



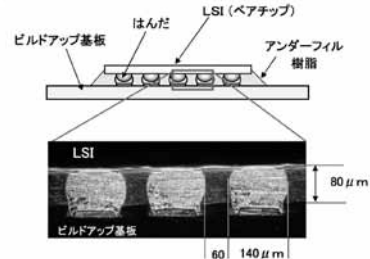
APモジュールの外観

ボイド



ボイド写真

基板寸法	100 × 115mm
LSI端子数	5,185
LSI端子ピッチ	200 μm
LSI寸法	20.79mm□



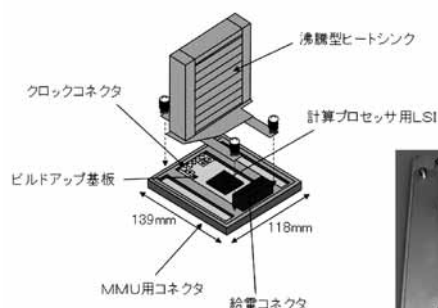
● LSI 実装技術 (ベアチップ実装)

LSI (ベアチップ) とビルドアップ基板をハンダ付けすると、両者の熱膨張係数の差 (LSI: 3.5ppm、基板:

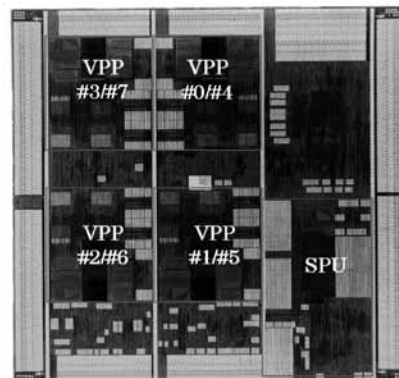
わずか $200\mu\text{m}$ というLSI端子ピッチで、気泡ができないよう樹脂を充填する作業は困難を極めた

10ppm) により、ハンダ部分にストレスが生じる恐れがある。それを防ぐ対策として、LSIと基板との間 (約 $80\mu\text{m}$) にアンダーフィル樹脂を充填する構造が採用された。しかし、当時の一般的なLSIに比べて面積で4倍大きく、その上LSIバンプピッチが $200\mu\text{m}$ (はんだが約 $140\mu\text{m}$ 、間隔が約 $60\mu\text{m}$) と狭ピッチであったため、わずかな間隙を通して広い面に気泡ができないよう樹脂を充填する作業は困難を極めた。LSIと基板との間に気泡が残ってしまうと、動作に悪影響を及ぼしたり、気泡が膨張によって破裂するなどの問題が生じる可能性がある。

ボイド (気泡) レス化を達成するためにさまざまな方法が試行錯誤された。その結果、充填前処理としてベーキングおよびプラズマ処理を採用し、充填時の樹脂の温度や供給スピードといった充填条件を最適化することによってこの問題を解決した。さらに、樹脂の充填後には、新たに導入した超音波映像装置によって気泡がないことを確認する工程を加え、アンダーフィル樹脂のボイドレス充填を実現した。



計算プロセッサ (AP) パッケージの実装イメージ



計算プロセッサ (AP) のLSIチップ

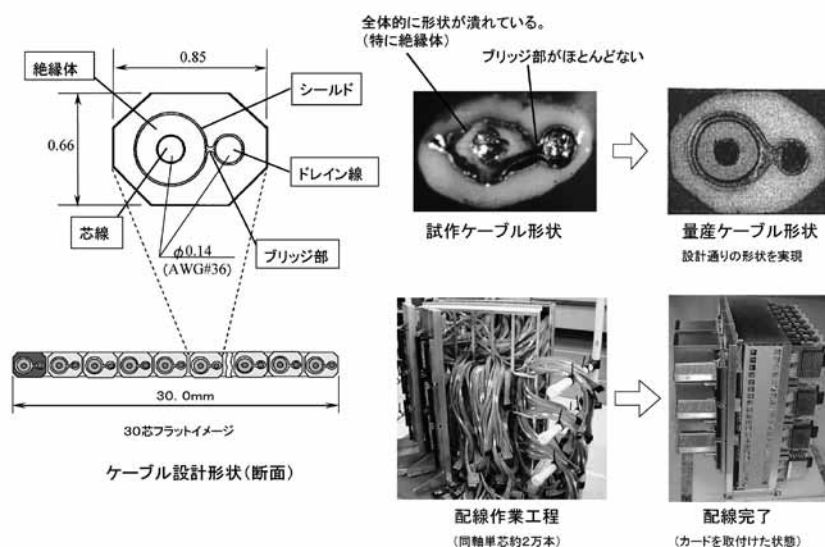
● 冷却技術

設計段階で、1チップベクトルプロセッサの消費電力の見積もり値が140Wであることが示され、消費電力140WのLSI冷却への挑戦が始まった（当時の一般的な冷却限界は30W程度）。水冷方式にすると大きなメリットがあることは明らかだったが、保守作業性や設置の容易さなどを考慮し、開発方針を空冷方式に定めた。ところが、当時は空冷方式でこれだけの発熱量のLSIを冷却する方式は皆無であり、ヒートパイプ方式を含め、さまざまな高発熱対応のヒートシンク（冷却器）を評価したが、必要な冷却効果は得られず、新しい方式を模索する状態が続いた。

そうした状況のなかで、新たに出会ったのが沸騰冷却器だった。内部に封入された冷媒の沸騰と凝縮によって熱を輸送する方式で、原理的にはヒートパイプ方式に似ているが、ヒートパイプ方式が毛細管現象を利用して液化した冷媒を発熱部に戻すのに対して、沸騰冷却器では、重力の作用を効果的に利用して冷媒を放熱フィン部から発熱部に戻す仕組みが取り入れられていた。重力を利用することから、自由に実装することができないという問題はあるが、この沸騰冷却器を評価したところ、ヒートパイプより優れた性能を有し、必要な冷却効果を生む可能性が確認された。それから約1年半をかけて沸騰冷却器に改良を加え、最終的に要求される仕様を満足するものが完成した。

● 接続技術（AP-MMU間）

当初はプリント板での配線を検討したが、1ノード当たり約20,000本の高速（500MHz）信号接続が必要であり、さらに信号伝送品質などの点から、より信号の減衰が小さく伝播速度が速い同軸ケーブルを採用することで検討を開始した。



計算プロセッサ（AP）とMMU間の接続に用いられた同軸ケーブル

同軸ケーブルの太さについては、装置全体の収容性から配線エリア（布線ボックス）の大きさが決まり、そこに収められる必要接続本数、配線作業性、さらに装置要求特性を考慮して決められる。地球シミュレータの許容布線ボックスの外形は、幅 50×高さ 65×奥行き 16cm で、ボックス内に収められるケーブルの接続本数は約 20,000 本、ケーブル長は 70cm（1 ノード当たり 14km、システム全体で 9,000km）であったことから、太さはシャープペンシルの 0.9mm 芯よりやや細い 0.66×0.85mm という極細線同軸ケーブルの開発が求められた（芯線の太さは 0.14mm、電気特性は信号伝播遅延時間：3.8ns/m、特性インピーダンス：50±5Ω）。

これまでに経験のない細径であり、またケーブルコネクタ結線性を考慮してシールド部をケーブル端部で加工し、芯線と交互に 0.5mm ピッチで整列させるという複雑な形状の極細線同軸ケーブルであったことから、安定した形状・特性が得られるまでに何度も試作と評価を繰り返し、実現までに 1 年半かかった。さらに、ボックス内のケーブル配線を確認するために実物モデルを製作して配線を試したところ、接続先に規則性がないことなどからさまざまな問題が発生した。何度も評価を行い、ようやくケーブルリングルールを確立することができた。

● 接続技術（ノード間）

ノード間、つまり計算ノード（640 ノード）と結合ネットワーク（129 ノード）との接続については、開発当初、光信号インターフェイスと電気信号インターフェイスの 2 案が検討された。しかし、当時使用可能だった光信号インターフェイスは、電気-光変換部で部品点数が 16 万点以上も増え、消費電力も増加するといった問題があったことから、電気信号インターフェイスを採用することで検討が開始された。



計算ノードと結合ネットワーク間のケーブル敷設作業の様子

大きな課題となったのは、伝送距離の制約だった。減衰を防ぎ、最大伝送距離 40m を実現するために、直径 6.5mm のケーブル（伝送距離 29m 以下）と直径 7.7mm のケーブル（同 30 ～ 40m）を使い分けることになった。また、この制約のため、全てのノードは 40m のケーブルで接続できるようにレイアウトすることが求められた。当初、地球シミュレータ研究開発センターとの協議では、2つのノードを縦に重ねる、建屋を3階建てにしてノードを球状にレイアウトするなどさまざまな案が出たが、最終的には結合ネットワークを中心に、円状に計算ノードを配置することに決まった。

使用するケーブルとレイアウトが決まったところで、次の課題となったのは、全てのノード間接続に必要な 83,200本のケーブル（総延長約 2,400km）をどのように敷設するかだった。コンピュータ開発部門にとっては、これまでに経験したことがない難題だった。そこで、プリント基板のパターン配線設計プログラムを応用して、ケーブルルート最適化プログラムを作成し、これを用いてケーブルルートと敷設の順番を決めた。そして要素技術試作のひとつとして、事業所内に地球シミュレータの10分の1スケールモデルを作成するなどして、実際にケーブル敷設のルート、ケーブルの積み上げ高の評価を実施した。さらに、事業所内の体育館に建屋のフロアの一部を再現し、作業者の動きを検証するといったことも行われた。こうした事前準備を経て、決められた順番で正しいルートにケーブルが敷設されるように、全体の作業工程が決められた。

ノード間ケーブルの敷設作業は、2001年2月から5月まで、3カ月半かけて実施された。ピーク時には1日に70名の作業員を動員し、1日当たり1,200本のペースで敷設が行われ、作業は予定通りに完了した。



ケーブル敷設作業が完了したときの様子

第4章

地球シミュレータ完成

1. 世界を驚かせた地球シミュレータ

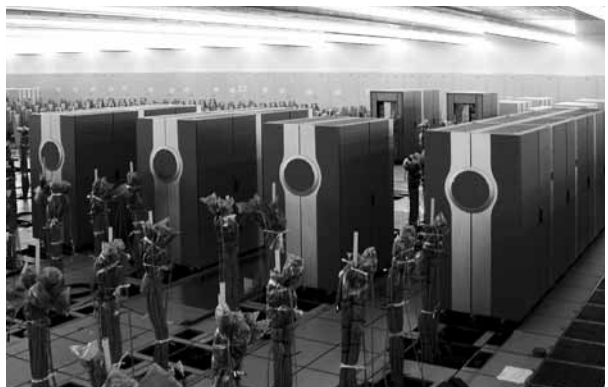
(1) 地球シミュレータセンター誕生

要素技術の試作(1998年8月～99年3月)、詳細設計(1999年5月～2000年1月)を経て、2000年3月から地球シミュレータの本体製作が開始された。地球シミュレータを設置するための施設(神奈川・横浜市)も、1999年10月から建設工事が始まった。

本体製作に関しては、前章で紹介した通り、数々の難関を乗り越えなければならず、時間的にも技術的にも追い詰められたなかでのチャレンジが続いた。例えば、計算プロセッサ(AP)については歩留まりが思うように改善されず、完全動作するAPがなかなか得られないという状況が続くなど、開発現場は最後まで不安と緊張の連続だった。それでも、2002年3月の運用開始をめざして製作が進められた。そして、2001年1月から地球シミュレータ施設へのノード間ケーブルの搬入・敷設が開始され(～5月)、6月からは機器の搬入が始まり、7月には最初の計算ノード(2筐体、4ノード)が搬入された。続いて8月末から次々に計算ノード、結合ネットワークが据え付けられ、完成予定日を間近に控えた2001年12月末にようやく全筐体の搬入が完了。APに関しては、全数の搬入を終えたのは、年が明けた2002年1月24日と、まさにギリギリのスケジュールだっ



上空から見た地球シミュレータ棟



2001年9月、筐体の搬入、設置作業が本格的に進められた



2001年12月末に全ての筐体の設置が完了した

た。利用実績のある通常の市販されているスーパーコンピュータシステムであれば、全システム設置から1カ月程度で総合評価し、運用に移行することも考えられるが、このシステムの場合、個別に入念に事前評価した上とはいえ、ハードウェア、基本ソフトウェア、運用管理ソフトウェア、アプリケーションソフトウェアまでほとんど同時にこのシステムでしか動かせない未経験の大規模の負荷を掛ける総合評価を、昼夜兼行で完成予定日に間に合わせるべく実施した。

一方、地球シミュレータの研究開発を推進する3機関（宇宙開発事業団、日本原子力研究所、海洋科学技術センター）の共同プロジェクトチームである地球シミュレータ研究開発センターでは、地球シミュレータ本体の開発、基本・応用ソフトウェアの開発を進めるとともに、完成後の地球シミュレータの管理・運用を担当する新たな組織づくりに向けた準備が、2001年初頭より進められた。

1999年3月に締結された3機関の協力協定では、新たに計画に参画した海洋科学技術センターは施設の整備のみを担当することになっていたが、翌2000年3月、3機関の間で協力協定の変更協定が締結され、地球シミュレータ開発は3機関が均等に分担することとなった。さらに2001年4月には、地球シミュレータの運用を海洋科学技術センターが一元的に行うことが決まった。このため、海洋科学技術センターには地球シミュレータ運用準備室（後に運用準備課）が設置され、地球シミュレータ研究開発センターの後を引き継いで運用開始後の新たな担当組織となる地球シミュレータセンターの体制づくりが開始された。またこの年、海洋科学技術センターに地球シミュレータ運営委員会が置かれ、地球シミュレータ運営基本計画が策定された。

1997年4月に開設された地球シミュレータ研究開発センターは、同センター長の三好甫氏のもと、3機関の職員二十数名によって構成されていた。地球シミュレータ施設整備チーム、超高速並列計算機技術検討チーム、基本ソフトウェア技術検討チーム、研究交流推進チーム、企画管理担当チームに編成され、地球シミュレータの研究開発を進めてきた。当初、東京・浜松町に置かれた事務所は、2001年5月より、完成した地球シミュレータ施設（神奈川・横浜市）に移転して業務を行った。そして、地球シミュレータ完成（検収完了）とともに業務を終え、その運用が開始されてからは、海洋科学技術センターの地球シミュレータセンターがその業務を担った。

地球シミュレータセンター（設置は2001年4月）は、地球シミュレータのシステムを管理し、適切な運用を推進するための組織で、運用の状況を把握し、それに基づいた適切なシステム操作を行うと同時に、システムの問題点を解決し、効率的なシステム運用を行うために、システムの機能・性能の向上に向けた対応策を提案し、その実施と確認を行うことをその主要な業務としている。そのため、同センターには、システム管理・運用、ユーザー管理・窓口業務、ハードウェア保守、システムソフトウェア開発、研究交流・教育、利用支援、計算機技術研究開発領域といった業務を担当する部署が設置された。さらに、計算地球科学領域の大規模科学技術計算を用

いた研究開発、ソフトウェア開発を推進する部署も置かれた。

2001年7月に三好氏が初代センター長に就任した。だが、2001年11月、三好氏逝去に伴い、2001年12月、核融合科学研究所が設置する理論・シミュレーション研究センターのセンター長を務めていた佐藤哲也氏が地球シミュレータセンター長に就任し、地球シミュレータ研究開発センター長には日本原子力研究所理事の浅井清氏が就任し、ともに目標通りの開発完了と運用開始をめざした（三好氏逝去までの状況については後述）。

なお、地球シミュレータ研究開発に関する予算については、巻末の資料にその内訳を紹介するととどめ、報告書本文中では詳しく紹介しない。だが、地球シミュレータ開発費の大半を占める本体システムの製作費を年次予算で捻出するのが難しく、半分をリースにする案も検討されたが、補正予算による製作費充当が認められ、無事に完成を迎えることができたことだけ、ここで述べておく。

(2) 世界一の座についた地球シミュレータ

地球シミュレータ開発計画では、超高速並列計算機システム（地球シミュレータ）の開発とともに、地球変動予測のための高度な応用ソフトウェアの開発が求められていた。三好甫氏は、地球シミュレータ開発計画について記した文章のなかで、「ハードウェアの開発力だけでなく、これを機会に並列計算機の高度応用ソフトウェアの開発力においても欧米の技術者に比較して負けないだけの技術者を量質ともに拡充する努力を、我が国はするべきである。ハードとソフトの開発力の両輪がそろって初めて一人前であることを忘れないようにしよう」と述べている。

地球シミュレータに向けての応用ソフトウェア開発は、大気大循環モデルや海洋大循環モデルの並列化に関する技術開発として、1995年ころよりスタートした。地球シミュレータ開発計画が動き出した1997年からは、実際に地球シミュレータの性能を十分に発揮できる大気・海洋分野



驚異的な性能で世界一の座を獲得した地球シミュレータ

の高度応用ソフトウェアの開発をめざして、高度情報科学技術研究機構を中心に開発が進められた。そして1999年からは、高度情報科学技術研究機構、地球フロンティア研究システム、地球シミュレータ研究開発センターが協力して、その開発を行うこととなった。

一方、固体地球分野では、1998年から5カ年計画として「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」がスタートした。地球シミュレータを基盤として、多様な固体地球変動現象の連成シミュレーションを可能とする大規模並列シミュレーションソフトウェアシステム「固体地球シミュレータ」の開発をめざす取り組みだ。①全地球規模の地殻・マントル・コアのダイナミクス、②日本列島域のプレート間相互作用による地殻活動、③特定地域規模での複雑断層系の地震発生過程と波動伝播という3つのサブシステムをさらにいくつかの要素モデル（プログラム）に分割して、シミュレーションコードが開発された。

地球シミュレータの優れた性能を評価するためにも、開発が進められた応用ソフトウェアのうちのいくつかは、地球シミュレータ運用開始に伴い、直ちにその成果を出すことが必要だった。そのための、いわば「第一走者」として、大気・海洋分野の4つの応用ソフトウェアの準備が進められた。ひとつは「AFES（地球シミュレータ用大気大循環モデル：AGCM for Earth Simulator）」で、東京大学気候研究センターと国立環境研究所によって開発された大気大循環モデル「CCSR/NIES AGCM」を地球シミュレータ向けに最適化したもの。もうひとつは「OFES（地球シミュレータ用海洋大循環モデル：OGCM for Earth Simulator）」で、米国海洋大気局の地球流体力学研究所（GFDL）で開発され、世界標準のモデルになっている「MOM3」を地球シミュレータ用に最適化したもの。このほかに、「PFES（POM for Earth Simulator）」（プリンストン大学によって開発された海洋モデルをベースにして地球シミュレータ用に開発されたモデル）、「CFES（CGCM for Earth Simulator）」（地球シミュレータ用に開発された大気・海洋結合モデル）の開発が、2000年から2001年にかけてそれぞれ開始された。なかでも「AFES」は、地球シミュレータがその開発目標として掲げてきた5TFLOPS達成の性能実証のためのプログラムでもあった。

地球シミュレータ本体の搬入・設置・調整が整った2001年12月から、地球シミュレータ運用に向けて開発・チューニングが進められてきた応用ソフトウェア「AFES」、「OFES」を使用した性能確認が開始された。12月中旬、7ノードを使用した「OFES」によって、始めて全球10kmメッシュの海洋大循環の処理結果が出された。これまでの全球モデルでは表現できなかった中規模渦と呼ばれる渦や海流までも鮮明に描き出され、立ち会った海洋研究者らからも驚きの声があった。また、「AFES」全球10kmメッシュの結果でも、高精細な雲（降水量）の分布画像が得られ、まるで衛星写真のようだと研究者らを驚嘆させた。

さらに、結合ネットワークを活用しての並列処理環境も整った2002年2月には、160ノー

ドを使って「AFES」で 7.6 TFLOPS という性能を確認した。全体の約 4 分の 1 の構成で、5TFLOPS という目標の実効性能を達成（目標の約 1.5 倍）することができたのだ。とはいえ、この時点ではまだ初期トラブルも数多く発生し、システムは安定せず、ジョブの実行もスムーズではなかった。それでも、2 月末の検収までには全 640 ノードの同時稼働を確認することができ、地球シミュレータをスケジュール通りに完成することができた。

この時点で、「AFES」は 320 ノードですでに 16TFLOPS を実測していた。そして 2002 年 3 月から、地球シミュレータは海洋科学技術センター内の地球シミュレータセンターによる運用が開始され、本格的に稼働し始めた。3 月 15 日には文部科学省（旧科学技術庁、2001 年 1 月の中央省庁再編により文部省と統合された）をはじめ、開発 3 機関などから約 70 名が参加して完成披露式が行われた。披露式では「AFES」による全球の降水量分布、「OFES」による全球の海面水温など、地球シミュレータによって得られたシミュレーション結果も紹介された。

運用が始まった地球シミュレータによって最初に行われたのは、世界最高速を証明するための LINPACK ベンチマークテストへの挑戦だった。これはスーパーコンピュータの性能をはかる世界標準指標のひとつともいえるものだ。4 月 14 日に 3 回のテストが行われ、2 回は失敗、1 回は 638 ノードで 35.61TFLOPS を達成した。この性能値は、それまで世界最高値を誇っていた米国の ASCI White Pacific の性能 7.226TFLOPS の約 5 倍に相当し、当時としてはまさに驚異的な性能だった。地球シミュレータは他のスーパーコンピュータを圧倒する高い計算性能で世界一をなし遂げた。



2002 年 3 月 15 日に行われた完成披露式

この結果は、いち早く4月20日の米国・ニューヨークタイムズ紙でトップ記事として紹介された。同紙は、かつての宇宙開発において米国に先行して旧ソ連（現・ロシア）が人工衛星スプートニクの打ち上げに成功したときの「スプートニックショック」に匹敵するとして、「コンピュータショック」という言葉で、その驚きを表現した。

日本が地球シミュレータの開発に取り組んでいたことは、開発時からさまざまな機会を通じて欧米に伝えられていたが、海外の反応は決して大きくなかった。むしろ「本当に目標値を達成できるのか」といった懐疑的な見方が多かったといわれる。それだけに、欧米、特に米国にとって、完成直後にいきなり目標値を大きく上回る性能をたたき出した地球シミュレータへの驚きは大きかったようだ。一方、海外で大きな反響があったにもかかわらず、国内での反応は比較的小さかった。海外で騒がれたことで、ようやく地球シミュレータへの関心が高まったというのが実情だった。

5月3日、地球シミュレータは全640ノードでの計測に成功し、LINPACKベンチマークテストで前回は上回る35.86TFLOPSを達成した。この結果が認められ、6月のISC2002（ドイツ・ハイデルベルグ）において、地球シミュレータは世界のスーパーコンピュータ「トップ500」の世界最高速機に認定された。さらに2002年11月には、地球シミュレータを用いた研究成果3件が、SC2002（米国・ボルチモア）において「ゴードン・ベル賞」を受賞した。同賞は、毎年、並列計算機を実用的な科学技術計算に利用し、その性能を含めて最も優れた成果を出した研究に与えられ、この分野では最も権威のある賞として知られる。この年は、実効性能部門最高性能賞に「地球シミュレータを用いたスペクトル変換法による全球大気大循環シミュレーション（26.58TFLOPS）」、実効性能部門言語賞に「地球シミュレータを用いたHPFによる核融合3次元流体シミュレーション（14.9TFLOPS）」、特別賞に「地球シミュレータを用いたフーリエスペクトル法による乱流直接数値シミュレーション（16.4TFLOPS）」が、それぞれ受賞を果たした。

ピーク性能に対する実効性能比が89%を超え、「トップ500」で第2位のASCI Whiteシステムの約5倍、米国の上位20機分の処理能力に匹敵する計算性能を達成した地球シミュレータの完成は、まさに世界的な偉業であるとともに、20世紀後半以降長く続いてきた日米のスーパーコンピュータ開発競争の歴史のなかで燦然と輝く画期的な出来事だった。ただ、残念だったのは、この世界的偉業達成を目前に控えた2001年11月17日、三好氏が他界されたことだった。

長きにわたって地球シミュレータの開発をリードし、完成に向けて情熱を傾け続けてきた三好氏は、2001年5月に風邪をこじらせて肺炎を患い、長期の入院を余儀なくされた。しかし、病床にありながらも電話やFAXで報告を受け、さらには地球シミュレータ研究開発センターの職員を入院先に呼んで指示を出すなど、地球シミュレータの開発の状況を熱心に見守り、その運用に向けた準備に取り組んだ。さらに三好氏は、このときすでに技術者らにも声をかけて、地球シミュレータの次に開発すべき次世代計算機の構想を練り始めていた。

10月22日、検査の結果、症状がやや好転したこともあり、退院して自宅療養となった。三好氏は「週に1回程度は出勤したい」と述べるなど、仕事への意欲を持ち続け、実際に10月29日には地球シミュレータの設置工事が進む横浜へ出勤し、執務室で予算や人事案件などのヒアリング、採用委員会の面接などの業務をこなした。しかし、体調は万全とはいえず、職員からの再三の勧めにも関わらず、この日は隣接する地球シミュレータ棟を見学することはなかった。そして、その3日後、三好氏は再び肺炎をおこして入院。11月17日、入院先の病院において逝去された。

そのころ地球シミュレータ棟に次々と搬入された計算機キャビネットがフロアに並ぶ姿を一度も目にすることなく、三好氏はこの世を去られた。そして、地球シミュレータに続くペタクラスのスーパーコンピュータを2009年ごろに完成させたいと願う三好氏の構想も、氏の逝去とともに消えることとなった。

一方、地球シミュレータの完成後、その性能に驚愕した米国の反応は素早かった。2002年5月には米国エネルギー省が全米のスーパーコンピュータ研究者をはじめ政策担当者らを集め、今後、地球シミュレータが米国にどのような影響を与えるかを分析し、その対抗策を政府に勧告。さらに2003年11月にはエネルギー省長官がワシントンのプレスクラブで講演し、米国は国家プロジェクトとして技術開発の遅れを取り戻し、再び世界一の座を奪還すると発言し、打倒・地球シミュレータを宣言した。

地球シミュレータは、2002年の運用開始以降2年半にわたって「トップ500」で世界一の座に輝き続けた。そして、地球科学ならびに計算科学技術の発展に大きく貢献し、今日もなおシミュレーション科学の新たな可能性を開拓し続けている。



日本の計算科学技術の発展を担う主要研究者らと並ぶ生前の三好甫氏（右から4人目）。2000年6月、JSPP2000「スーパーパネル ペタフロップスへの道」パネラーの方々。

写真提供／笠原博徳氏（早稲田大学教授）

おわりに

地球シミュレータの開発は、1997年から2002年にかけて実施されたが、本書で示す如く、三好氏は1993年に数値風洞を完成させたところから、次のスーパーコンピュータの構想を持っており、この実現に向けた努力を重ねている。つまり、実質10年がかりで地球シミュレータの開発が行われたことになる。

数値風洞で培われた技術は、さらに磨かれて地球シミュレータへと引き継がれた。開発・製造のメーカーは、富士通から日本電気変わったが、現状に満足することなく、困難な課題に対して飽くなき挑戦を繰り返す技術者魂が継承されたことに、まずは敬意を表したい。連綿と続く、日本のフラグシップスーパーコンピュータ開発の精神が今日まで受け継がれ、次世代スーパーコンピュータの開発に繋がっていることは、まことに喜ばしい限りである。

地球シミュレータは、IPCCをはじめとする地球温暖化に関する政策決定に役立てるための科学的根拠の提供で国際的にも高い評価を獲得している。また、地球内部の構造的理解も、シミュレーション能力の向上により飛躍的に進展した。さらに産業界のものづくり分野においても、そのシミュレーションの有効性が高く評価されている。

地球シミュレータプロジェクトは、1995年に制定された科学技術基本法に基づく、第一期科学技術基本計画の華々しい成果となったが、このプロジェクトの歴史的変遷を踏まえ、日本の計算機科学及び計算科学のさらなる発展に向けて関係者の闊達な意見交換と奮起を期待したい。また、本書がそのための一助となれば、これにまさる喜びはない。

本書をまとめるにあたって、多くの方々にご協力をいただいたことを、この場をかりて深く感謝申し上げます。また、本書はできるだけ忠実に開発の経緯を再現することを主眼としたため、技術的な掘り下げや、たくさんのエピソードなどを割愛せざるを得なかった。この点については、稿を改めることを検討している。

2010年12月

資料編

地球シミュレータ開発年表

地球シミュレータ開発 およびスパコン関連の動き

● 1993 年 (平成 5 年)

- 1月 航空宇宙技術研究所に NWT (数値風洞) 完成、「TOP500」で世界第1位に
- 3月 三好甫氏、航空宇宙技術研究所を退職
- 4月 三好甫氏、財団法人材料科学技術振興財団参与に就任
- 4月 計算科学研究会 (材料科学技術振興財団) 設置 (活動は12月から)

● 1994 年 (平成 6 年)

- 2月 計算科学研究会懇談会設置
- 6月 日立、スカラ型スーパーコンピュータ SR2001を発表

11月 日本電気、SX-4シリーズを発表

● 1995 年 (平成 7 年)

- 4月 三好甫氏、財団法人高度情報科学技術研究機構副理事長に就任
- 7月 地球環境シミュレーション・システム開発推進委員会を高度情報科学技術研究機構に設置
- 9月 第1回地球環境シミュレーション・システム開発推進委員会 (大気部会) 開催
- 11月 科学技術基本法の施行

● 1996 年 (平成 8 年)

- 3月 富士通、スカラ型スーパーコンピュータ AP3000を発表
- 6月 地球シミュレータ計画推進懇談会準備会合 (第1回) 開催
- 6月 東京大学設置の日立 SR2201/1024、「TOP500」で世界第1位に

社会の出来事

● 1993 年 (平成 5 年)

- 7月 北海道南西沖地震で奥尻島に大被害
- 8月 細川内閣 (1993/8/9 - 1994/4/28)
- 9月 米不足、緊急輸入
- 11月 ヨーロッパで欧州連合 (EU) 発足

● 1994 年 (平成 6 年)

- 2月 リレハンメル冬季五輪開催
- 4月 羽田内閣 (1994/4/28 - 1994/6/30)
- 6月 村山内閣 (1994/6/30 - 1996/1/11)
- 7月 宇宙飛行士・向井千秋氏、日本人女性として初めてスペースシャトルで宇宙へ
- 9月 関西国際空港開港
- 10月 大江健三郎氏、ノーベル文学賞を受賞

● 1995 年 (平成 7 年)

- 1月 阪神大震災
- 3月 地下鉄サリン事件
- 4月 円が80円割れ (79円75銭) の史上最高値を記録

11月 Windows95日本で発売開始

● 1996 年 (平成 8 年)

- 1月 橋本内閣 (1996/1/11 - 1998/7/30)

地球シミュレータ開発およびスパコン関連の動き

- 7月 科学技術基本計画が決定
- 7月 航空・電子等技術審議会地球科学技術部会『地球変動予測の実現に向けて』を発表
- 11月 筑波大 CP-PACS、「TOP500」で世界第1位に
- 12月 宇宙開発事業団、地球シミュレータ研究開発準備チーム発足

● 1997 年 (平成 9 年)

- 1月 HPF合同検討会発足
- 2月 平野拓也氏、JAMSTEC 理事長に就任
- 2月 計算科学技術推進会議、地球シミュレータ部会を設置
- 3月 地球シミュレータ開発に関する推進体制について (科学技術庁庁議了解)
- 4月 三好甫氏、動力炉・核燃料開発事業団 (PNC) 客員研究員、宇宙開発事業団 (NASDA) 地球シミュレータ研究開発特別チームリーダーに就任
- 4月 宇宙開発事業団と動力炉・核燃料開発事業団、地球シミュレータ研究開発に関する協力協定の締結
- 4月 地球シミュレータ研究開発センター (ESRDC) 発足
- 5月 第1回地球シミュレータ連絡協議会開催 (PNC,NASDA,ESRDC)
- 5月 地球シミュレータ用超高速並列計算機の設計等提案書に関する官報公示
- 5月 地球シミュレータ開発計画概要説明会 (提案書に関する説明会)
- 7月 計算科学技術推進会議地球シミュレータ部会、報告書『地球シミュレータ計画の推進について』を発表
- 7月 地球シミュレータ用超高速並列計算機の概念設計委託研究の随意契約に関する事前官報公示
- 8月 地球シミュレータ概念設計委託研究契

社会の出来事

- 7月 アトランタ五輪開催
- 9月 民主党結成
- 11月 キーチェーンゲームたまごっち大ブーム
- 12月 ペルーで日本大使公邸人質事件

● 1997 年 (平成 9 年)

- 1月 ナホトカ号重油流出事故
- 3月 動燃 東海村のアスファルト固化処理施設で爆発事故
- 4月 消費税5%に引き上げ
- 7月 香港、英国から中国に返還

地球シミュレータ開発およびスパコン関連の動き

- 約を日本電気、富士通の2社と締結
- 10月 地球フロンティア研究システム創設
- 10月 地球シミュレータ用超高速並列計算機の概念設計委託研究の随意契約に関する事後官報公示
- 11月 地球シミュレータ開発業者を日本電気に決定
- 12月 地球シミュレータ用超高速並列計算機の基本設計業務委託の随意契約に関する事前官報公示
- 12月 地球シミュレータ用超高速並列計算機の基本設計業務委託契約を日本電気と締結

● 1998 年 (平成 10 年)

- 1月 地球シミュレータの要素技術設計業務委託契約を日本電気と締結 (NASDA)
- 3月 地球シミュレータの実装技術に関する設計業務委託契約を日本電気と締結 (PNC)
- 3月 地球シミュレータ開発に関する推進体制について (科学技術庁庁議了解)
- 4月 宇宙開発事業団と日本原子力研究所 (JAERI)、地球シミュレータ研究開発に関する協力協定の締結
- 4月 三好甫氏、日本原子力研究所地球シミュレータ研究開発特別チームリーダーに就任
- 4月 宇宙開発事業団及び日本原子力研究所による地球シミュレータ研究体制の発足に関するキックオフ会合
- 4月 計算科学技術推進会議、地球シミュレータ中間評価委員会を設置
- 5月 日立、SR8000を発表
- 6月 日本電気、SX-5シリーズを発表
- 8月 計算科学技術推進会議『地球シミュレータの中間評価報告書』を発表
- 8月 地球シミュレータ要素技術試作開始 (～99年3月)

社会の出来事

- 11月 北海道拓殖銀行破たん、山一証券自主廃業
- 12月 地球温暖化防止京都会議開幕、京都議定書を採択
- 12月 第3回気候変動枠組条約締約国会議
- 12月 世界初の量産型ハイブリッドカー・プリウス (トヨタ) 発売

● 1998 年 (平成 10 年)

- 2月 長野冬季五輪開催
- 3月 大手銀行 21行に約1兆8000億円の公的資金を注入
- 7月 小渕内閣 (1998/7/30 - 2000/4/5)
- 9月 映画監督・黒沢明氏死去

地球シミュレータ開発およびスパコン関連の動き

● 1999 年 (平成 11 年)

- 2月 第1回地球シミュレータ計画関係機関協議会開催 (NASDA, JAERI, ESRDC)
- 3月 宇宙開発事業団及び日本原子力研究所、海洋科学技術センター (JAMSTEC)、地球シミュレータ研究開発に関する協力協定の締結 (海洋科学技術センター、地球シミュレータ計画に参画)
- 5月 地球シミュレータ詳細設計開始 (～2000年1月)
- 10月 第2回地球シミュレータ計画関係機関協議会開催 (NASDA, JAERI, JAMSTEC, ESRDC)
- 10月 地球シミュレータ施設起工式 (2000年秋に完成)

● 2000 年 (平成 12 年)

- 3月 地球シミュレータの研究開発に関する協力協定の変更協定の締結 (NASDA, JAERI, JAMSTEC)
- 3月 地球シミュレータ本体製作開始
- 11月 地球シミュレータ計画関係機関協議会開催 (地球シミュレータの運用体制構築に関する基本方針について) (NASDA, JAERI, JAMSTEC, ESRDC)

● 2001 年 (平成 13 年)

- 1月 地球シミュレータ、計算ノード間ケーブル搬入、敷設 (～5月)
- 4月 地球シミュレータセンターが海洋科学技術センターに設置され、運用を海洋科学技術センターが一元的に行うことが決まる
- 4月 地球シミュレータセンター発足
- 5月 地球シミュレータ研究開発センター、横浜移転
- 7月 三好甫氏、地球シミュレータセンター長に就任

社会の出来事

● 1999 年 (平成 11 年)

- 1月 欧州通貨ユーロ誕生
- 2月 日本銀行、ゼロ金利政策を導入
- 3月 大手15行に約7兆5000億円の公的資金を注入
- 3月 コソボ紛争

9月 東海村でJCO臨界事故

- 12月 コンピュータ2000年問題騒動
- 12月 パナマ運河、米国からパナマに返還

● 2000 年 (平成 12 年)

- 4月 森内閣 (2000/4/5 - 2001/4/26)
- 7月 2000円札発行
- 7月 九州・沖縄サミット開催
- 8月 三宅島噴火
- 9月 シドニー五輪開催
- 10月 白川英樹氏、ノーベル化学賞を受賞

● 2001 年 (平成 13 年)

- 4月 小泉内閣 (2001/4/26 - 2006/9/26)

地球シミュレータ開発およびスパコン関連の動き

- 7月 地球シミュレータ、先行出荷機(2筐体)搬入
- 8月 計算ノード及び結合ネットワーク筐体の搬入開始
- 11月 三好甫地球シミュレータ研究開発センター長兼地球シミュレータセンター長逝去
- 12月 浅井清氏、地球シミュレータ研究開発センター長に就任、佐藤哲也氏、地球シミュレータセンター長に就任
- 12月 第1回地球シミュレータ運営委員会開催
- 12月 全筐体の搬入完了

● 2002 年 (平成 14 年)

- 1月 第2回地球シミュレータ運営委員会開催
- 2月 地球シミュレータ 160ノード(システム全体の4分の1)を使い大気大循環モデルで7.6 TFLOPSを達成3月 地球シミュレータ運用開始
- 3月 地球シミュレータ開発3法人、及びその共同研究者による利用開始(～7月)
- 3月 地球シミュレータ完成披露式(3月15日)
- 4月 地球シミュレータ、LINPACKベンチマークテストで35.61TFLOPSを達成
- 5月 地球シミュレータ、LINPACKベンチマークテストで35.86TFLOPSを達成
- 6月 第1回地球シミュレータ利用計画委員会開催
- 6月 地球シミュレータが「TOP500」で世界第1位に認定される
- 7月 公募によるユーザー利用開始
- 11月 地球シミュレータを用いた高速シミュレーションに関する研究論文3件がゴードン・ベル賞受賞

社会の出来事

- 8月 東京ディズニーシー開園
- 9月 アメリカ同時多発テロが勃発
- 10月 野依良治氏、ノーベル化学賞を受賞
- 11月 iPod 発売

● 2002 年 (平成 14 年)

- 1月 ユーロ通貨流通開始
- 2月 ソルトレイクシティ冬季五輪開催
- 5月 サッカーワールドカップ日本・韓国大会開催
- 10月 小柴昌俊氏がノーベル物理学賞、田中耕一氏がノーベル化学賞を受賞
- 12月 東北新幹線、盛岡―八戸間開業

地球シミュレータの開発経費

地球シミュレータの開発経費

(平成9年度～平成13年度の合計)

	動力炉・核燃料 開発事業団	宇宙開発 事業団	日本原子力 研究所	海洋科学技術 センター	合 計
本体システム	4.3	151.3	152.8	119.3	427.6 億円
・ハードウェアの設計・製作 (要素技術の設計・試作を含む)	(3.9)	(137.1)	(138.2)	(112.9)	(392.1)
・現地据付調整	—	(6.0)	(6.0)	(6.0)	(18.0)
・基本ソフトウェアの開発	(0.4)	(3.7)	(3.1)	—	(7.2)
・研究交流・事務所等	—	(4.6)	(5.4)	—	(9.9)
周辺機器の整備	—	10.7	10.3	20.3	41.2 億円
施設等の整備	—	—	—	94.6	94.6 億円
・施設・設備の設計・建設	—	—	—	(72.1)	(72.1)
・什器等整備・電力系工事	—	—	—	(2.5)	(2.5)
・土地購入	—	—	—	(20.0)	(20.0)
合 計	4.3	162.0	163.0	234.1	563.4 億円

用語解説

(注)

*用語は、本文に出てくる順番に並んでいます。

*ページ数は初出のページのみ掲載しています。

• ベクトル計算機 (P.15)

ベクトル演算を行うことができる計算機のこと。ベクトル演算とは、ベクトルプロセッサと呼ばれる高速プロセッサ (CPU) で、配列データなどの多数の演算を一つのベクトル命令で一括して行う処理。これに対して、汎用プロセッサで一つのデータの演算を一つの命令で処理するタイプをスカラー計算機と呼ぶ。

• アレイプロセッサ (P.15)

行列、ベクトルなどのアレイデータ (配列データ) の演算を高速処理する専用装置。行列演算など科学技術計算の高速化のために、CPU に付加されて使われることが多い。

• ベクトルプロセッサ (P.16)

ベクトル演算処理をするプロセッサ (CPU)。ベクトル型スーパーコンピュータに使われている。

• GFLOPS (P.16)

FLOPS は Floating Point Operations per Second の略で、1秒間に浮動小数点 (コンピュータ内での数値表現の一つで科学技術計算に向く) の乗算、加算などの演算を何回実行できるかを表し、コンピュータの演算処理速度の指標の一つとして使われている。特に科学技術計算などを行うスーパーコンピュータの性能を表すのに用いられる。これに大きさを表す K (キロ、 $10^3 = 1000$)、M (メガ、 $10^6 = 100$ 万)、G (ギガ、 $10^9 = 10$ 億)、T (テラ、 $10^{12} = 1$ 兆)、P (ペタ、 $10^{15} = 1000$ 兆) などの接頭辞を付けて、KFLOPS、MFLOPS、GFLOPS、TFLOPS、PFLOPS のように表現する。

• 並列プロセッサ方式 (P.19)

複数のプロセッサ (CPU) を用いて処理する方式。同時に複数のプロセッサが動作することにより処理効率が向上する。

• 並列スーパーコンピュータ (P.20)

複数台のコンピュータを並列につなげて高速な処理が可能なスーパーコンピュータ。

• 格子点 (P.21)

コンピュータシミュレーションを行う際に、対象となる領域を、例えば碁盤の目のように区切ってできた領域のこと。シミュレーションを行う現象に対して物理モデルを構築して、この物理モデルに従って各格子点での物理量を計算する。

• クロスバ (P.21)

コンピュータの複数の CPU やメモリなどの間でデータをやり取りするとき、その経路を動的に選択制御する装置。縦・横の経路が交差するイメージからクロスバと呼ばれる。双方の間を 1 対 1 で直結するので高速なデータ転送が実現できる。

• アーキテクチャ (P.21)

もともとは建築学、建築様式を意味するが、コンピュータの世界では「コンピュータアーキテクチャ」などと使われ、コンピュータに関する基本設計、基本構造、設計思想などを表す。

• 分散メモリ型並列ベクトルスーパーコンピュータ (P.21)

各プロセッサ (CPU) に独自にメモリがあり、異なるプロセッサのメモリにアクセスする場合はプロセッサ間のネットワークを介した通信で行う方式を分散メモリ型という。これに対して、複数のプロセッサでメモリを共有する方式を共有メモリ型と呼ぶ。分散メモリ型のこの通信は、一般に MPI(Message Passing Interface) と呼ばれる標準規格を用いてプログラミングを行う。

• Concurrent Engineering (P.26)

製品の設計から製造までにかかわる業務を、コンピュータシステムなどを利用して同時並行的に進め、開発期間の短縮など効率化をおこなう概念、手法のこと。

• 超並列計算機 (P.27)

並列計算機の中でもプロセッサ (CPU) が多数ある大規模な並列度のある物を指す。具体的な並列度や性能値での定義は特にない。

• 計算機の性能評価 (P.27)

計算機の性能は、その計算機のアーキテクチャ、ハードウェアやソフトウェア (基本ソフトウェアやアプリケーションプログラム) の性能など様々な要因が相互に絡んでいて単純に評価することは容易ではなく、明確に定義されていない。一般的には、標準的なあるいはよく使われるプログラムを選んでベンチマークテストを行う評価方法が取られている。有名な性能評価のベンチマークプログラムとしては、LINPACK (リンパック) がある。これは大規模な線形方程式を解くプログラムで、スーパーコンピュータ性能測定の一つの基準として用いられている。

• ロードモジュール (P.28)

メモリに読み込まれ (ロードされ) 実行可能な形式のプログラム。

• モデル開発 (P.30)

実際の実験や観測が不可能、困難な事象を予測するのにコンピュータシミュレーションが使われるが、その際、対象となる事象の本質を損なわず論理的に簡素化したモデルを構築することによってシミュレーションを行う。これをモデル化と呼び、その開発のこと。

• プラットフォーム化 (P.30)

コンピュータのハードウェアやソフトウェアなどの組み合わせを工夫し、利用環境の共通基盤を実現すること。

• 大気大循環 (P.33)

全地球的な規模の大気の変動（全地球的に見れば循環的变化なので循環と呼ぶ）。気温、風、湿度、降水量などの変化を全地球的に数値シミュレーションすることはスーパーコンピュータにより可能になった。大気大循環のシミュレーションは気象予測や気候変動予測で用いられる。

• クラウドクラスター (P.34)

いくつかの積乱雲が集合体となって大きな塊を形成したもの。巨大な物は台風となったり、梅雨時の大雨をもたらすことがある。

• メソスケール現象 (P.34)

気象現象を水平規模によって分類することがあり、メソスケールは中規模（数～千 km 程度）を表す。

• 積雲パラメタリゼーション (P.34)

気候の数値シミュレーションにおいて、区切った格子より細かな部分でその格子スケールでは表現できないが、全体には大きく影響を与える現象がある。たとえば積雲も格子スケールでは表現できないが、太陽放射を散乱・吸収したり、地表熱を吸収したり大気に大きな影響を与える。このような場合、積雲の熱力学的効果を物理的考察に基づいて経験式で表現することを積雲パラメータ化（パラメタリゼーション）という。

• 内部重力波 (P.34)

流体が安定した成層（層状に分かれていること）をなしているとき、成層構造に起因する重力を復元力として、水平および鉛直方向共に伝搬する波のこと。

• 差分法 (P.34)

数値解析の手法であり、微分方程式の数値解法の一つ。微分を関数値の差分として近似表現して差分方程式を立て、これを解いて微分方程式の数値解（近似値）を求める。

• スペクトル法 (P.34)

数値解析の手法であり、微分方程式の数値解法の一つ。フーリエ級数などを使い、微分を使わない代数方程式に近似して解く方法のこと。

• 積雲対流 (P.34)

大気の対流において、大気が湿っていて積雲が発生するような対流を指す。

• 全球モデル (P.35)

特定の領域ではなく、地球全体を対象とした地球規模の気候予測モデル。

• 分解能 (P.35)

観測などの対象物をどこまで処理できるかという性能の程度・度合を表す。

• 分布型サイエンス (P.36)

参画する研究者や利用される施設・設備、情報などが広範な科学技術分野、広範な地域に分布していて、これらが有機的に連携し推進できるサイエンスのこと。

• プロセス研究 (P.37)

気候を力学システムとしてとらえた場合、非常に多くの構成要素からなる複雑系と見ることができ、この複雑系の全体的挙動を決定している各要素間の力学的つながりを研究すること。

• 水循環 (P.37)

地表、水面などから水が蒸発し水蒸気となり、凝結して雲となり降水し地表、地下、海に流れるという繰り返し行われるサイクルのこと。

• 深層対流 (P.38)

海底近くに存在する深層水および深層循環がどのような過程で形成されるのかは、海洋学研究の重要課題の一つである。表層近くに存在する循環と深層の循環をつなぐものとしての深層対流は、その意味において重要な研究テーマである。

• 物理的素過程 (P.38)

気候を力学システムとしてとらえた場合、大気や海洋の流れは通常「力学的な系」と呼ばれ、それ以外の雲生成や放射などは「物理過程」と呼ばれる。物理過程のうち、モデリングの観点からより低次の過程を考慮する必要のないものを物理的素過程とよぶ。

• 時間発展系 (P.38)

たとえば一定速度の航空機の翼の周りに生じる定常的な流れは時間変化しないが、気候システムは常に時間的に変動している。このように時間とともに状態が変化する系のことを時間発展系とよぶ。

• 多重パイプライン構成のベクトル計算機 (P.40)

ベクトルパイプラインを複数個持つベクトル計算機と言う意味で、例えば二重の場合、2個で偶数番目のベクトル要素、奇数番目のベクトル要素と分担して2倍の性能を達成しようとするベクトル計算機である。

•SDRAM (P.41)

コンピュータ用のメモリの一種。Synchronous Dynamic Random Access Memory の略で、一定周期のクロック信号に同期して動作するDRAMである。DRAM とは読み書きが可能なメモリ (RAM) の一種であるが、その記憶内容保持のために一定時間ごとに書き込み (リフレッシュ) が必要である。電源を切ると内容が消失される。

•SSRAM (P.41)

コンピュータ用のメモリの一種。Synchronous Static Random Access Memory の略で、一定周期のクロック信号に同期して動作するSRAMである。SRAMとは読み書きが可能なメモリ (RAM) の一種で、DRAM と異なりリフレッシュは必要ないが、電源を切ると内容が消失される。

• 中・深層水 (P.42)

深さが200m程度より深い領域の海水。

• 海氷、中・深層水の形成過程 (P.42)

海洋循環の分布を決定する重要な要因として、地球の回転などの力学的要素の他、海水自身の物理的性質としての温度、塩分などがあり、それは水塊の特性を代表する因子でもある。海氷、中・深層水はその因子で区別される海洋大循環における重要な要素であり、その形成過程は重要な研究テーマとなっている。

• エアロゾル (P.42)

気体中に浮遊する微粒子状の物質のこと。

• 放射過程 (P.42)

太陽の放射エネルギーや地球の熱赤外線放射などの熱伝達過程のこと。

• 温暖化原因物質 (P.42)

地球温暖化は、二酸化炭素などの温室効果ガスが主因となって引き起こされているという説が主流となっている。

• 降水過程 (P.42)

大気から雲が発生し、雲の中の水滴が雨や雪になり降水するまでの一連の過程。

• 非静水圧モデル (P.42)

数値シミュレーションにおいて、鉛直方向の運動方程式に静水圧近似 (重力と気圧傾度力が釣り合っているとする近似) を用いない方式のモデルのこと。気象シミュレーションを高い分解能で予測する場合、静水圧近似では精度が悪くなるのでこのモデルが必要である。

• 輸送・拡散（過程）（P.42）

粒子、物質、熱などが散らばり広がっていく物理的な現象の過程。

• 放射性核種（P.42）

放射線を出す核種。放射線を出して異なる原子核へ変わる。

• 鉛直混合（P.42）

海水などの上層と下層が混ざり合う現象。

• 沈着過程（P.42）

粒子、物質などが沈澱し付着する物理的な現象の過程。

• 4次元変分法（P.42）

数値シミュレーションを行うために必要な初期値を、観測時間の異なるさまざまな種類の実測データから物理法則に従って作成する一つの方法。空間の3次元に時間を加えた4次元でのデータ処理を行う。

• カルマンフィルタ（P.42）

システム工学において確率過程理論に基づいたフィルタリング理論の一つで、観測ができないシステムの状態（変数）を推定するのに応用されている。たとえば、短時間の気象予測の方法に用いられている。

• データ同化（P.42）

数値シミュレーションに観測データを取り入れる手法で、気象や海洋の分野で用いられており、数値予測モデルの初期値を適切に作成するために用いられる。

• 固体地球内部のダイナミクス（P.43）

地球内部におけるマントル対流をはじめとする地球内部の物質・エネルギーの変動・挙動現象のこと。

• 3次元トモグラフィ（P.43）

地震波の伝播時間を用いて地球内部の3次元構造を明らかにする手法のこと。

• プレート（P.43）

地球の表面の厚さ10～200km程度の固い岩石の層のこと。十数枚のプレートが地球を覆っている。このプレート同士の押し合う力が地震を発生させる。

• メッシュ生成 (P.43)

コンピュータシミュレーションを行うときに、対象となる領域を細かい領域に分割すること。シミュレーションは、この分割された領域で各種の物理量などを計算する。

• 有限要素法 (P.44)

数値解析の手法であり、微分方程式の数値解法の一つ。対象となる領域を有限個の微小な領域（要素）に分割し、要素ごとの解析を行い全体領域の近似値解を求める。

• 実時間可視化 (P.44)

シミュレーションの結果などを、視覚で理解できる形にすることを可視化という。実時間可視化は、シミュレーションと同時進行で可視化を行うこと。

• ノード (分散コンポーネント) (P.54)、計算ノード (P.55)

並列コンピュータにおいて、それを構成する要素となる一つのコンピュータのこと。計算ノードともいう。

• 1ホップ (P.55)

ホップとはネットワークにおいて通信相手に届くまでの経由装置の数のこと。地球シミュレータの場合は、単段のクロスバ経由の1ホップとなっている。

• 単段クロスバスイッチ (P.55)

クロスバを構成するスイッチが複数段ではなく、一段となっているもの。

• 直交関数 (P.55)

互いに関数の内積が0（数学的に直交するという）となる関数のこと。

• スーパースカラー方式 (P.58)

命令を同時に複数個実行する方式。現在の汎用の高性能マイクロプロセッサに採用されている。

• RAM (P.58)

Random Access Memory の略で、CPU から読み書きが直接できるメモリのこと。

• ウェイ、バンク (P.58)

バンクはメモリを管理するときの単位で一定の容量を持ったメモリの集合。メモリのアクセスはこのバンク単位に行われる。

メモリのアクセス高速化技術にインターリーブと呼ばれる方式（複数バンクを並列に同時にアクセスすることで高速化を図る）があり、同時にアクセス可能なバンク数のことをウェイと呼ぶ。

• ブロック転送 (P.58)

ブロックと呼ばれる単位でデータを一括転送すること。

• 3ストライドまでのストライド付きベクトル転送 (P.58)

ベクトルデータの要素同士が隣接していないとき、その要素間隔をストライドという。このストライドが最大 3 段の構造になっている 3 次元ベクトルデータを直接転送する機能のこと。

• リストベクトル (P.58)

要素の順番に並んでいるのではなく、間接的な指標で不規則に配置されるベクトルデータ (A(L (I)) の形で表される) のこと。

• UNIX サーバー (P.58)

オペレーティングシステム (OS、基本ソフトウェア) として広く普及している UNIX 系 OS が搭載されているサーバー (コンピュータ)。

• RAID ディスク装置 (P.58)

Redundant Arrays of Inexpensive Disks の略で、ディスク装置の高速化・信頼性向上を目的として、複数のディスクを組み合わせ仮想的な 1 台のディスクを構築した装置のこと。RAID はその方式により現在 RAID0 から RAID6 までの 7 種類ある。

• ファイバチャネル (P.58)

コンピュータとディスクなどの周辺機器を接続するためのネットワーク規格。毎秒ギガビット級の転送速度がある。

• (大容量) テープライブラリ装置 (P.58)

多数の磁気テープカートリッジが格納できる大容量の外部記憶装置で、目的のデータがあるテープカートリッジを自動的にテープドライブにロードするロボット機能を備えている。

• CMOS (P.58)

Complementary Metal Oxide Semiconductor (相補型金属酸化膜半導体、シーモスと呼ぶ) の略で、半導体素子構造の一種。低消費電力が特徴である。N 型と P 型という特性の異なる MOS (金属酸化膜半導体、金属 - 半導体酸化物 - 半導体の三層構造になっている) を組み合わせた回路構造になっている。

• ベアチップ実装 (P.58)

半導体素子をプラスチックなどのパッケージに組み込んでないもの (ベアチップという) を、じかにプリント配線基板に実装すること。プラスチックなどのパッケージを使わないので小型化でき、温度・湿度による劣化が少なくなる。

• マルチハロゲン灯 (P.66)

種々の金属ハロゲン化物を封入した高圧放電灯のこと。高輝度で効率が良いので大規模建築物の他、幅広い照明用途に使われている。

• ライトガイド式照明システム (P.66)

ライトガイドとは光の伝送用として使われるガラスファイバーを多数束ねた構造のもの。各種の光源と組み合わせて照明システムが実現できる。

• アラミド繊維(補強筋) (P.66)

アラミド繊維は高強度で高弾性、低伸縮などの優れた特性、あるいは耐熱性や難燃性などの優れた特性のある芳香族ポリアミド高分子繊維である。これらの優れた特性を持つため産業資材として幅広く使われている。

• バッチ処理 (P.66)

コンピュータシステムの処理方式の一つで、一連のプログラム群やデータ群を集め、まとめて一括処理する方式のこと。これに対する処理方式には、コンピュータと対話的に処理を進める方式のインタラクティブ処理(対話型処理)や、処理要求に対して即時に処理するリアルタイム処理がある。

• スケーラビリティ (P.67)

コンピュータシステムのハードウェア、ソフトウェアの拡張性のこと。規模を拡張して行くと、性能もそれに対応し向上することをスケーラビリティがあるという。

• マイクロタスク (P.67)

並列処理プログラミングの技法の一つ。プログラム内で、ある部分が並列に実行できる場合、その部分を分割して複数の CPU に割り当て、同時並列実行する方式(合計の CPU 時間は短縮されないが、全体の処理時間は短縮が期待できる)。Fortran プログラムで、100回繰り返しの DO ループを(並列実行可能な場合)4個の25回繰り返し DO ループに分割し、4つの CPU で同時並列実行がマイクロタスクの具体例の一つ。

• OpenMP (P.67)

並列プログラミングの標準規格の一つで、共有メモリ型並列コンピュータで使われる。Fortran や C などのプログラミング言語で、並列化の指示文を挿入して使う。

• MPI (P.67)

Message Passing Interface の略で、並列プログラミングの標準規格の一つ。おもに分散メモリ型並列コンピュータで使われる。Fortran や C など、MPI ライブラリと呼ばれる専用のソフトウェアを呼び出して使う。

• HPF (P.67)

High Performance Fortran の略で、プログラミング言語 Fortran の拡張として定義される並列処理用言語。容易に並列プログラミングできる高級言語として提案され、従来の Fortran に最小限の指示文を追加して並列化を可能にすることを目指している。

• 1チップベクトルプロセッサ (P.68)

1つの LSI に実装されたベクトル処理用 CPU のこと。地球シミュレータの場合は、約 21mm×21mm の 1チップ・ベクトルプロセッサ (演算性能 8GFLOPS) が、全体で 5120 個使われている。

• ダイ (P.68)

シリコンなどのウェハ上に半導体素子回路を焼き付けて小さな四角片に切り出したもの。これをプラスチックやセラミック材質などのパッケージに組み込んで一つの半導体素子ができる。

• ビルドアップ基板 (P.68)

ビルドアップという工法で、絶縁層と配線層を積み上げて作成する多層プリント配線基板のことで、複雑な電子回路を高密度化・小型化できる。プリント配線基板とは、絶縁基板に電子部品を接続する回路パターンが構成されたもの。

• ヒートパイプ (P.68)

密閉したパイプ内に封入した微量の液体の気化・液化と対流による熱伝導を利用して、熱源の熱を拡散する装置。パイプの一端にある熱源の熱を吸収して液体が蒸発し、パイプの他端へ移動してそこで放熱して液化され、再び熱源部に還流するというサイクルを繰り返して熱源の熱を移動・拡散する仕組みになっている。CPU や電子機器の冷却などに応用されている。

• OPC (光近接効果補正) (P.69)

半導体素子製造工程でウェハに回路パターンを光露光で焼き付ける際に、回路パターンが微細なため光の回折現象で光学像が歪んでしまう (これを光近接効果という)。これを防ぎ、焼き付けるパターン形状が設計パターン形状にできるだけ近づくようにマスクパターンを補正する技術のことを光近接効果補正 (Optical Proximity Correction) という。

• マスクパターン (P.70)

半導体素子の製造工程において、ウェハに電子回路を焼き付ける際の原版 (写真のネガに相当) のことで、ガラス基板に回路パターンが描画されているもの。

• ウェハ (P.70)

半導体素子製造の材料となるシリコンなどの半導体物質を超高純度で結晶化して生成した、厚さ 1mm 程度、直径 20cm 程度の薄い円盤状の基板のこと。このウェハに電子回路パターンを焼き付けて、個別に切り出すとベアチップができる。

• 露光機（ステッパ）（P.70）

半導体素子の製造装置の一つ。半導体素子のマスクパターンを 1/4 程度に縮小してウェハ上に光照射し焼き付ける装置。

• アドレス変換機能（ATB）（P.70）

コンピュータのメモリは物理的な位置を表す一意のアドレス（物理アドレス）が割り振られ管理されている。一方プログラムの実行部分やデータ部分は、そのプログラム内だけで定まるメモリアドレス（論理アドレス）で管理されている。プログラムは、実行時には論理アドレスから物理アドレスに変換される必要があり、その変換を行う機能のことをいう。

• ファンアウト（P.71）

LSI の出力ピンに接続されている回路に入力できるデバイス数のこと。

• スルーホール（P.71）

多層構造のプリント基板に貫通させた小径の穴で、層間の接続をするために銅・銀などでメッキ加工されている。

• リバールーティング（P.71）

LSI のピンアサインと配線層の割り付けを工夫し、配線基板の配線をクロスしないように一層で（川の流れるようにきれいに）引けるようにすること。

• アンダーフィル樹脂（P.72）

半導体素子とプリント基板の隙間に封入する樹脂のことでおもにエポキシ系樹脂が使われている。熱的な応力や衝撃・基板の反りからくる物理的な応力に対する接続信頼性の向上が図れる。

• ベーキングおよびプラズマ処理（P.72）

ベーキングとは、物質に付着している様々な不純物を高温加熱して離脱させる処理のことをいう。プラズマ処理とは、物質表面をプラズマ（気体が電離した状態）放電で処理し有機物を除去し表面を洗浄する処理のことをいう。

三好甫氏の主な執筆記事・インタビュー記事

執筆資料等

1961	放物型偏微分方程式の混合境界値問題の差分法による数値解法
1961	荷電ビームによる気流密度測定の理論的考察
1961	遷音速二次元翼の揚力積分方程式の解
1962	航空技術研究所計数型電子計算機設備プログラムライブラリーI
1962	非定常遷音速流の近似解析
1963	偏微分方程式の混合境界値問題の差分法による数値解法
1964	IV-2 Characteristic Method for 2-Dimensional Quasi-Linear Hyperbolic Systems
1965	二次元準線型双曲系の特性曲線法による数値解法
1965	2次元 Aligned Flow における磁気境界層：応用数学力学
1966	弾性振動方程式の差分解に関するエネルギー不等式
1966	4階差分方程式の解の評価
1969	Navier-Stokes 方程式に対する差分法
1969	粘性圧縮流の差分解法（発展方程式とその数値解析研究会報告集）
1974	航空宇宙技術研究所における中央計算機システムについて
1977	FACOM-230-75アレイプロセッサについて I - ハードウェアの性能 -
1978	FACOM-230-75アレイプロセッサについて II：処理能力の実測とプログラムの技術
1979	科学技術計算専用機の時代 <これからの科学技術用計算機への期待>航空機設計開発等への利用
1979	FACOM230-75アレイプロセッサシステムに対するジョブプロセッシングシミュレータ
1984	数値風洞：スーパーコンピュータと航空機開発
1985	数値シミュレータ・データベースについて
1985	航空機設計におけるスーパーコンピュータの利用
1986	膨大な処理能力を誇るスーパーコンピュータ
1986	数値風洞－革新技術への挑戦を支える
1987	航技研の数値シミュレータシステムについて
1987	航技研数値シミュレータとそのガスタービン研究開発への応用
1987	大規模・超高速シミュレーション
1989	並列計算機高速利用における問題点
1989	超高速大規模並列計算機の開発導入について－航技研・航空機メーカ検討資料
1989	計算空気力学（CFD）イを廻るスーパーコンピュータの開発動向について

1990	CFD の推進に必要な計算機性能
1990	超高速数値空気力学シミュレータ (SHP) 調達について
1991	航空機空力設計推進の為に計算機性能
1991	ベクトル計算機のベクトル処理に対するソフトウェアシミュレータ VTAP
1991	数値風洞：要求要件と概略
1991	数値風洞のハードウェア (第 9 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集)
1991	航技研超高速数値風洞 (UHSNWT) の構想 - 第二期数値シミュレータ計画 -
1991	数値風洞 (NWT) の要求性能
1991	数値流体力学の発展と高速計算機
1991	数値風洞の設計 (科学者がつくるコンピュータ<特集>)
1992	<談話室>航技研数値風洞計画
1993	UHSNWT Initiative at National Aerospace Laboratory
1993	On the Japan-U.S. Supercomputer Negotiations
1993	日米スーパーコンピュータ協議に対する批評
1994	Development and Achievement of NAL Numerical Wind Tunnel (NWT) for CFD Computations
1994	科学技術庁 (全日本が対象でもよいが足元より固めよである) による計算科学の推進策
1995	21 世紀に向かって計算機開発の展望
1995	21 世紀初頭 (2000 年～ 2005 年) における高速計算機技術の動向と問題点
1995	科学技術庁における計算科学の推進に関する視点
1995	地球シミュレータ開発計画
1996	計算科学の現状と課題、高速計算機の技術動向
1996	地球科学の推進と地球シミュレータ開発計画
1996	数値地球科学の推進体制の現状と数値地球科学研究所 (仮題)
1996	地球シミュレータおよび計算 (数値) 地球科学 (工学) の研究開発について
1997	ラボラトリーズ：日本原子力研究所計算科学技術推進センター
1997	計算工学と計算機技術の共栄のために
1997	高速計算機の技術動向と航技研の計算科学への期待
1997	地球シミュレータの研究開発
1998	地球シミュレータ計画
1998	高速計算機の技術動向と地球シミュレータの開発
1998	地球シミュレータ (GS) による気象 (気候) シミュレーション job 処理モデル

1999	地球シミュレータ用性能評価システムの開発
1999	Performance Estimation of the Earth Simulator
1999	Basic Design of the Earth Simulator
1999	地球シミュレータ（GS）利用に関する検討のための資料（第0次私案）
2000	6. スーパーコンピュータで地球の未来を映し出す ―地球シミュレータ計画への期待―
2000	Outline of the earth simulator project

講演録・座談会・インタビュー

1997	講演録 高速計算機の進歩と計算科学 ―航空技術と地球科学への高速計算機の寄与―
1997	インタビュー スパコンで何ですか?【前編】超高速計算機と計算科学技術の歩み
1997	インタビュー スパコンで何ですか?【後編】 計算機?牡丹・芍薬?トルネード?―地球シミュレータ
1997	座談会 英知を集め、地球変動予測の実現を（特集：地球フロンティア研究システム始動）
1999	インタビュー 地球の未来をスパコンが映し出す
1999	インタビュー Miyoshi on the Earth Simulator
2000	記事：スーパーコンピュータで仮想地球をつくる - 地球シミュレータ研究開発センターを訪ねて

地球シミュレータ関連 PPT

1997	地球シミュレータ
1998	「地球シミュレータ」の研究開発状況について
1999	地球シミュレータ用性能評価システムの開発
1999	高速計算機（HPC）と計算科学／工学（数値シミュレーション）の発展
1999	計算科学・高速計算機技術の現状と将来展望
2001	高速計算機（HPC）と計算科学／工学（数値シミュレーション）の発展
2000	スーパーコンピュータの未来を映し出す―地球シミュレータ計画への期待

謝 辞

本書をまとめるに際して、多くの方々にご協力をいただきました。特に、ここにお名前を紹介させていただいたみなさまには、長時間のインタビュー取材によっていろいろなお話をうかがわせていただき、また、原稿への貴重なコメントをいただいたり、資料のご提供をいただいたりと、さまざまなかたちで、本書の制作にお力をお借りしました。ご協力をいただいたみなさまに、心より感謝申し上げます。

• 本書の制作に関して、お世話になったみなさま

▽ インタビュー取材協力（五十音順・敬称略）

青柳 哲雄	杉 正人	松岡 浩
稲坂 純	谷 啓二	松野 太郎
今原 淳夫	津田 義典	松本 寛
岩橋 理彦	中村 俊彦	森本 浩一
梅澤 和彦	西田 政人	横川 三津夫
太田 吉克	幅田 伸一	渡辺 貞
片桐 勝	平野 拓也	
佐藤 達夫	古井 利幸	

▽ 編集協力（五十音順・敬称略）

新井 嘉人	佐久間 弘文	平島 康敬
今村 努	佐藤 一雄	廣瀬 直喜
今脇 資郎	島田 敏明	福井 義成
岩瀬 公一	新宮 哲	星野 利彦
大倉 悟	平 朝彦	堀田 平
大塚 清	高村 守幸	満澤 巨彦
片桐 勝	田口 康	山田 泰
加藤 美志彦	千々谷 真人	渡邊 國彦
加藤 康宏	土橋 久	渡邊 正之
菊池 聡	秦 万美子	

• 本書の制作スタッフ

▽ 地球シミュレータ開発史編集チーム

リーダー	平野 哲 (独立行政法人海洋研究開発機構 情報技術審議役)
スタッフ	北脇 重宗 (独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター 調査役)
	堀木 純子 (独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター)
編集協力	滝田 よしひろ
DTP	井上 智尋 (独立行政法人海洋研究開発機構 事業推進部広報課)

地球シミュレータ 開発史

2010年12月 発行

編 集	独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ開発史編集チーム
発 行	独立行政法人海洋研究開発機構
	ホームページ http://www.jamstec.go.jp
	横須賀本部 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15 電話 046-866-3811 (代表)
	横浜研究所 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 電話 045-778-3811 (代表)

* 本書で引用した文章中の用語・表現等の一部で、文章全体の表記統一や内容の理解を考慮し、文意を損なわない範囲で、言い換えや修正を加えている場合があります。

* 本書掲載の文章、写真、イラストを無断で転載、複製することを禁じます。

印刷・製本 株式会社 神奈川機関紙印刷所

ISBN978-4-901833-03-5

