

# 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

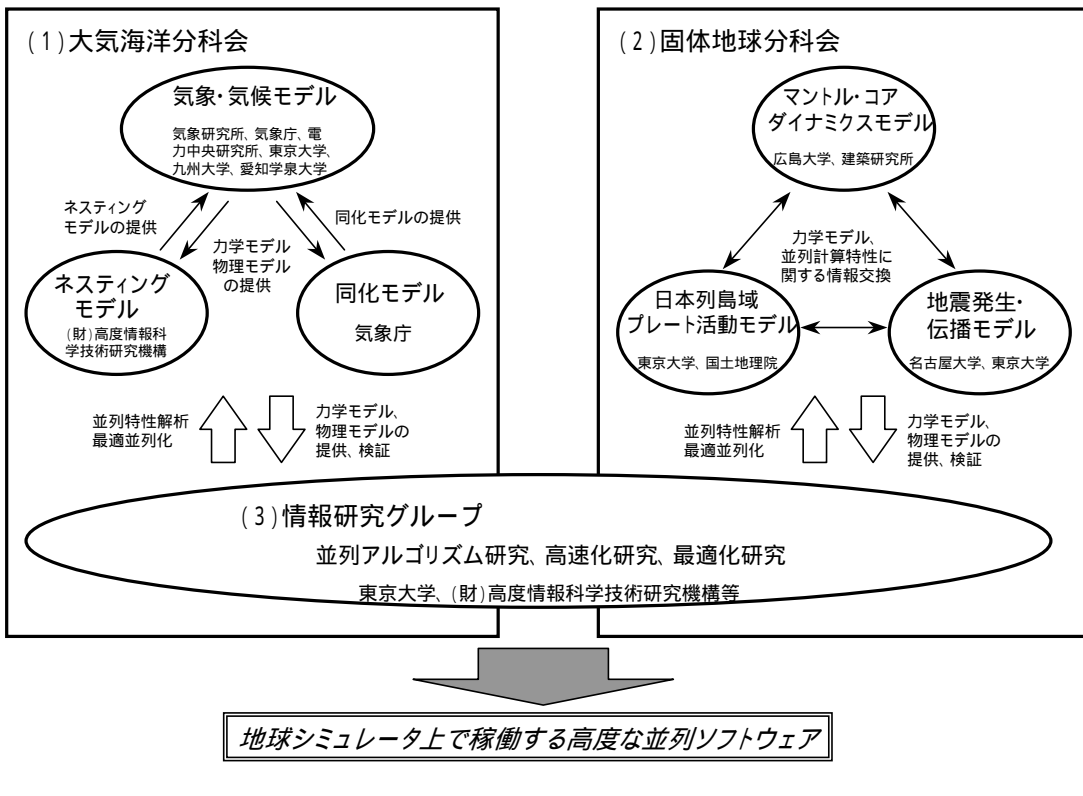
「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」

(H13～H14年、第 期)

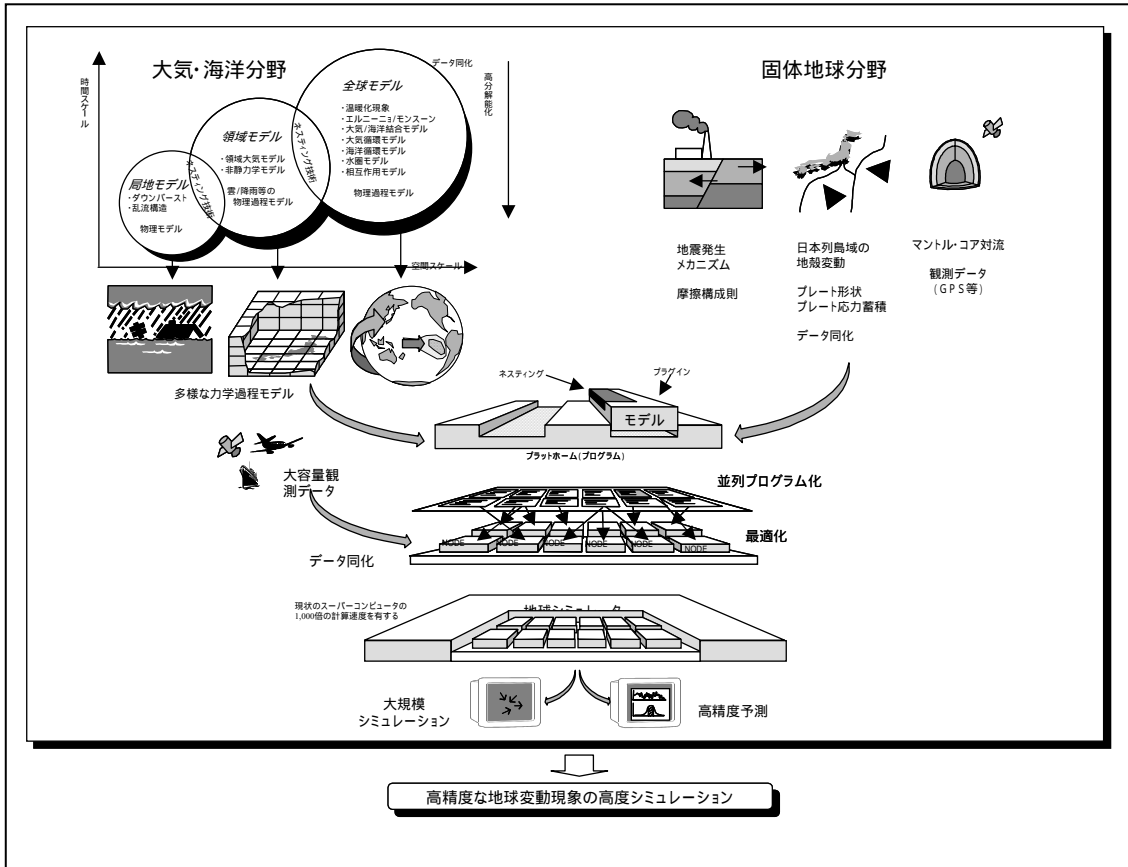
研究代表者：住 明正(東京大学) 研究体制：東京大学他12機関

研究の概要・目標	諸外国等の現状	研究進展・成果がもたらす利点
<p>1. 何を目標しているのか</p> <p>地球シミュレータ等の超高速計算機において地球変動現象をシミュレーションし、高精度に予測するための並列ソフトウェアの開発を目指す。</p> <p>I 期の目標： 各機関の地球変動予測モデルを並列化する。</p> <p>II 期の目標： 並列化モデルを地球シミュレータ向けに最適化する。</p> <p>2. 何を研究しているのか</p> <p>各機関が有する様々な地球変動予測モデルが超高速計算機を用いて効果的に稼働するよう、先端的な計算手法により最適並列化する。</p> <p>3. 何が新しいのか</p> <p>地球シミュレータという他に類を見ない超高速計算機向けの並列ソフトウェア開発であり前例がない。</p>	<p>1. 現状及び我が国の水準</p> <p>米国においては、既存の取組みに加え、2000年度から開始された21世紀情報技術(IT2)計画において超高速計算機を用いた地球変動予測研究を加速。</p> <p>欧州においては、各気象予報センターを中心としてモデル研究が行われているが、高速計算機資源が不足している状況。</p> <p>我が国においては、気象庁、大学等各機関において、様々なモデル研究が行われてきたが、特に地球シミュレータ計画により、高速計算機を用いた地球変動予測研究が加速されてきている。</p>	<p>1. 世界の水準との関係</p> <p>地球シミュレータ等の超高速計算機の整備に伴い、米国等にやや遅れ気味であった気象・気候分野におけるシミュレーション技術は世界水準に達しつつある。特に、固体地球分野では日本が誇る地震学等をベースとしたシミュレーション技術であり、我が国が世界をリードしつつある。</p> <p>2. 波及効果</p> <p>地球科学技術の観点では、研究成果である並列ソフトウェアを地球シミュレータ上で稼働することにより、地球温暖化等全球的な気候変動予測、高精度な局所的気象予測、超長期に亘る全球的な地殻変動予測等の先端的シミュレーションが可能となる。</p> <p>情報科学技術の観点では、ソフトウェアの並列化技術、大規模シミュレーション結果の可視化技術等の先端的情報技術が一般に波及する。</p>

## 「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」の研究体制



# 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



# 所要経費

(単位:千円)

研究項目	担当機関等	研究 担当者	H10 年度	H11 年度	H12 年度	合計
1. 高精度の大気・海洋変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究						
(1)気象、気候モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究						
全球気象モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究						
(a)高分解能全球気象モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	気象庁気象研究所	杉 正人	5,901	6,268	4,595	16,764
(b)分散主記憶型並列計算機対応の高精度数値予報における全球大気モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	気象庁予報部	隈 健一	1,299	4,719	941	6,959
(c)全球海洋大循環モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	気象庁気象研究所	石崎 廣	5,791	5,614	3,452	14,857
(d)全球水循環モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	防災科学技術研究所	矢崎 忍	5,010	4,895	4,015	13,920
全球気候モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究						
(a)大気海洋結合モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究						
1)全球気候モデルへの並列計算技術の高度活用に関する研究	(財)電力中央研究所	丸山 康樹	16,547	17,725	12,866	47,138
2)高分解能全球気候モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	気象庁気象研究所	野田 彰	5,721	5,674	3,637	15,032
3)エルニーニョ現象に関する大気海洋結合モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	気象庁気候・海洋気象部	栗原 和夫	8,262	8,127	995	17,384
(b)高精度気候システムモデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	東京大学気候システム研究センター	住 明正	5,061	7,714	4,626	17,401
領域モデルの最適化並列プログラムの構築に関する研究						
(a)非静力学モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	気象庁予報部 気象庁気象研究所	室井 ちあし 斉藤 和雄	2,457 6,141	2,410 6,207	1,322 4,135	6,189 16,483
(b)領域海流モデルによるオイルスピル挙動の並列シミュレーションに関する研究	海上保安庁水路部 九州大学応用力学研究所	寄高 博行 尹 宗煥	5,059 6,030	5,026 6,857	5,188 1,291	15,273 14,178
局地モデルの並列シミュレーションに関する研究						
(a)ダウンバースト現象の高度シミュレーションに関する研究	愛知学泉大学	神谷 信彦	14,417	14,693	8,316	37,426
(b)超並列計算機環境における惑星流体並列シミュレーションに関する研究	東京大学大学院理学系研究科	山形 俊男	4,308	4,826	3,298	12,432
(2)全球・領域気候モデルの並列処理環境におけるネスティング技術に関する研究	国立環境研究所	江守 正多	3,395	5,234	4,560	13,189
(3)データ同化モデルの最適並列化に関する研究						
4次元変分法・カルマンフィルタによる並列データ同化手法に関する研究	気象庁予報部	露木 義	16,887	19,347	1,863	38,097
高解像度海洋大循環モデルを用いた全球データ同化システムに関する研究	海洋科学技術センター	石田 明生	9,306	7,890	4,856	22,052
2. 高精度の固体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						
(1)地殻・マントル・コアのダイナミクスの並列シミュレーションに関する研究						
マントル・コア対流の並列シミュレーションに関する研究						
(a)マントル対流の並列シミュレーションに関する研究	防災科学技術研究所 東京大学大学院総合文化研究科	江口 孝雄 小河 正基	2,466 1,365	664 784		3,130 2,149
(b)コア対流の並列シミュレーションに関する研究	広島大学理学部 東京工業大学理学部 九州大学理学部 北海道大学大学院理学研究科	本多 了 本蔵 義守 竹広 真一 林 祥介	1,255 2,997 1,545 511	2,451 830	6,905	10,611 3,827 1,545 3,175
(c)コア・マントル相互作用系のダイナミクスの並列シミュレーションに関する研究	東京大学大学院理学系研究科 千葉大学理学部	浜野 洋三 松元 亮治	3,009 2,018	1,120		4,129 4,860

並列シミュレーションのための地球内部構造のモデル構築に関する研究						
(a)全マントル3次元地震波速度構造の並列モデルに関する研究	建築省建築研究所 名古屋大学大学院理学研究科 東京大学大学院理学系研究科	原 辰彦 須田 直樹 ゲラ・ロバート	1,578 1,518 2,068	571 655 629	3,347	5,496 2,173 2,697
(b)全マントルとプレート沈み込み帯の3次元電磁気構造のシミュレーションに関する研究	防災科学技術研究所 東京大学地震研究所 京都大学防災研究所	藤縄 幸雄 上嶋 誠 神田 径	1,527 1,708 1,448	1,676 1,082 1,240		3,203 2,790 2,688
超長期地殻変動の並列シミュレーションに関する研究						
(a)地殻変動による地形・地質構造の形成に関する並列シミュレーションに関する研究	工業技術院地質調査所 九州大学理学部	村上 裕 中田 正夫	2,520 2,532	1,590 1,407		4,110 3,939
(2)日本列島域の地殻活動の並列シミュレーションに関する研究						
地殻活動予測の統合並列シミュレーションに関する研究						
(a)日本列島域の地殻・マントル構造とプレート境界のモデル化に関する研究	東京大学地震研究所	大中 康譽	8,055	5,022		13,077
(b)プレート運動に伴う地殻変動及び地震発生サイクルのモデル化に関する研究	建設省建築研究所 防災科学技術研究所 東京大学大学院理学系研究科	芝崎 文一郎 福山 英一 松浦 充宏	1,562 1,215 9,272	1,038 780 3,890	13,295	2,600 1,995 26,457
地殻活動のデータの解析・同化手法の並列最適化に関する研究						
(a)地殻変動データのインバージョン及び同化手法の並列最適化に関する研究	建設省国土地理院	鷺谷 威	4,804	2,621	2,503	9,928
(b)地震データ同化モデルの最適並列化に関する研究	気象庁地震火山部	吉田 明夫	4,607	4,723		9,330
(3)3次元不均質場での地震発生過程と地震波伝播の並列シミュレーションに関する研究						
地震発生過程の並列シミュレーションに関する研究						
(a)地震サイクルの準静的並列シミュレーションに関する研究	工業技術院地質調査所 名古屋大学大学院理学研究科 九州大学理学部 京都大学防災研究所 埼玉大学工学部	加藤 尚之 平原 和朗 吉岡 祥一 橋本 学 濱島 良吉	1,705 1,757 1,913 1,852 1,770	707 1,334 2,539 1,559 1,370	6,659	2,412 9,750 4,452 3,411 3,140
(b)動的断層運動の並列シミュレーションに関する研究	東京大学地震研究所 茨城大学工学部 名古屋大学理学部地震火山観測地域センター	宮武 隆 呉 智深 熊谷 博之	1,637 1,772 1,015	1,052 2,947 1,515		2,689 4,719 2,530
3次元地震波動伝播の並列シミュレーションに関する研究						
(a)疑似スペクトル法による波動伝播の並列シミュレーションに関する研究	北海道教育大学 東京大学地震研究所	古村 孝志 纈纈 一起	4,750 2,541	839 589	1,296	6,885 3,130
(b)有限差分法波動伝播並列シミュレーションに関する研究	防災科学技術研究所	青井 真	1,705	661		2,366
(c)間接境界要素法による波動伝播並列シミュレーションに関する研究	建設省建築研究所	横井 俊明	1,700	1,135		2,835
地殻変動予測専用 CAD 及びモデルデータ構築に関する研究	理化学研究所	牧野内 昭武	7,431	2,673		10,104
3.大規模シミュレーション用並列プログラム開発に関する研究						
大規模シミュレーションに係わる並列プログラムの構築技術に関する研究	高度情報科学技術研究機構	中村 壽	354,786	364,877	312,720	1,032,383
固体地球プラットフォームの構築に関する研究	高度情報科学技術研究機構	中村 壽				
固体地球プラットフォームにおける統合制御化及び大規模並列可視化技術等に関する研究	東京大学院工学系研究科 高度情報科学技術研究機構	矢川 元基 中村 壽	895	1,336	4,355	6,586
合計			568,401	556,638	421,036	1,546,075

研究項目	担当機関等	研究 担当者	H13 年度	H14 年度	合計
1. 高精度の大气・海洋変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究					
1-1. 気象、気候モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究					
1-1-1. 全球気象、気候モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究					
1-1-1-1. 高分解能全球気象モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所	谷貝 勇	5,884	4,699	10,583
1-1-1-2. 高精度数値予報における全球大気モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	国土交通省気象庁	松村 崇行	895	713	1,608
1-1-1-3. 全球気候モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	財団法人電力中央研究所	丸山 康樹	11,410	9,171	20,581
1-1-1-4. 高精度気候システムモデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	東京大学気候システム研究センター	住 明正	4,054	3,160	7,214
1-1-2. 領域モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究					
1-1-2-1. 非静力学モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所 国土交通省気象庁	室井 ちあし 斉藤 和雄	3,933 3,307	3,153 1,885	7,086 5,192
1-1-2-2. 領域海流モデルによるオイルスピル挙動の並列シミュレーションに関する研究	九州大学応用力学研究所	尹 宗煥	6,536	5,267	11,803
1-1-3. 局地モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究					
1-1-3-1. ダウンバースト現象の高度シミュレーションに関する研究	愛知学泉大学コミュニティ政策学部	神谷 信彦	9,925	7,989	17,914
1-1-3-2. 惑星流体並列シミュレーションに関する研究	東京大学大学院理学系研究科	日比谷 紀之	4,024	3,202	7,226
1-2. 全球・領域気候モデルの並列ネスティングに関する研究					
1-2-1. 領域結合型全球モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究	高度情報科学技術研究機構 東京大学 気候システム研究センター	沈 学順 住 明正			
1-3. データ同化モデルの最適並列化に関する研究					
1-3-1. 4次元変分法・カルマンフィルタによる並列データ同化手法に関する研究	国土交通省気象庁	小泉 耕	2,171	1,730	3,901
2. 高精度の固体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					
2-1. 地殻・マントル・コアのダイナミクスの並列シミュレーションに関する研究					
2-1-1. 内的要因による固体地球変動の大規模並列シミュレーションに関する研究	東京大学地震研究所	本多 了	7,050	4,491	11,541
2-1-2. 外的擾乱に対する固体地球応答の大規模並列シミュレーションに関する研究	国土交通省独立行政法人建築研究所	原 辰彦	3,786	3,083	6,869
2-2. 日本列島域の地殻活動の並列シミュレーションに関する研究					
2-2-1. 地殻活動予測の統合並列シミュレーションに関する研究	東京大学大学院理学系研究科	松浦 充宏	12,560	10,028	22,588
2-2-2. 地殻活動のデータの解析・同化並列ソフトウェアの開発に関する研究	国土交通省国土地理院	鷲谷 威	4,135	3,063	7,198
2-3. 3次元不均質場での地震発生過程と地震波動伝播の並列シミュレーションに関する研究					
2-3-1. 複雑断層系での地震発生過程の並列シミュレーションに関する研究	名古屋大学大学院環境学研究科	平原 和朗	5,251	4,169	9,420
2-3-2. 3次元地震波動伝播の並列シミュレーションに関する研究	東京大学地震研究所	古村 孝志	4,776	3,120	7,896
3. 大規模シミュレーション用並列プログラム開発に関する研究					
3.1 大規模シミュレーションに係わる並列プログラムの構築技術に関する研究	高度情報科学技術研究機構	中村 壽	264,895	213,129	478,024
			(1-2-1.,3.1~3.3の計)	(1-2-1.,3.1~3.3の計)	(1-2-1.,3.1~3.3の計)
3.2 固体地球プラットフォームの構築に関する研究	東京大学情報基盤センター 高度情報科学技術研究機構 東京大学大学院工学系研究科	金田 康正 中村 壽 矢川 元基	3,000	2,400	5,400
3.3 固体地球プラットフォームにおける統合制御化及び大規模並列可視化技術等に関する研究	高度情報科学技術研究機構	中村 壽	1,377	1,104	2,481
合計			358,969	285,556	644,525

# 研究成果の概要

## 総括

地球温暖化、異常気象等の気候変動や集中豪雨・豪雪等の気象災害、また一方では地球規模のマントル対流運動からその地表への現れとしてのプレート運動に帰する日本列島域の地殻変形や局所的な地震・断層運動等の自然災害等、様々な地球変動現象の解明と予測は、国民生活の安全確保や人類社会の持続的発展のために重要かつ喫緊の課題である。地球変動現象は、その時間的・空間的スケールが大規模であること、また多様な物理的プロセスの連鎖・複合により生ずる複雑系の現象であるため、実験等によりそれらを再現することが不可能である場合が多く、その原因の解明と発生予測には大規模かつ高精度なシミュレーションが不可欠である。最近、進展が著しい地球観測や地球変動プロセス研究等の成果を基に、高度なシミュレーションを行うことにより、はじめて、自然現象全体をそのまま理解できるようになるとともに、社会的ニーズに応え得る定量的かつ精度の高い予測を実現することが可能となるものであり、これに対する社会からの期待が高まっている。本研究では、地球科学と情報技術の研究者・技術者が連携し、平成10年度から14年度にわたり、地球変動現象の予測の実現を目指し、地球規模の複雑な諸現象を再現することが可能な地球シミュレータ等を活用して、大規模シミュレーションを行える高度な並列ソフトウェアを開発した。

## サブテーマ毎、個別課題毎の概要

**(1)大気・海洋分野：**地球変動現象の時空間的な詳細メカニズムの把握と高精度の予測を目的に、全地球規模、アジアなどの領域、日本等の局域な変動現象に分けて、社会的インパクトの大きさ、また地球シミュレータの計算資源を有効に活用しうるか等を勘案して、気象、気候、海洋等の変動現象モデルを開発した。具体的には、気象庁、気象研究所、東京大学気候システム研究センター等が保有する全球、領域および局域に関する気象、気候および海洋モデル等を地球シミュレータにおいて稼動する並列ソフトウェアとして開発し、気象、気候研究における適用性及び実用性を確認した。特に、全球モデルでは、気候変化に伴う台風発生を予測する高分解能全球大気モデル(分解能20km)、スペクトル法全球大気・海洋結合モデル、さらに気候とその変動を支配する熱帯域の積雲活動を再現する非静力学全球気候並列モデル等を開発した。また、領域モデルでは、数千km四方領域の集中豪雨、豪雪、台風等の微細構造をシミュレーションする高精度の非静力学大気並列モデル、また現業予報よりも優れた強雨予測特性を示す非静力学領域数値予報モデルを開発した。さらに、領域海流モデルとして、高精度3次元海洋循環モデル等を開発し、流出重油挙動の予測システムとして完成させた。一方、局域モデルでは、ダウンバースト現象の高解像度の雲解像モデルを開発し、竜巻、集中豪雨などの検証を通じて、高速並列プログラムを開発した。加えて、惑星流体の乱流モデルを開発し、内部潮汐波エネルギーのカスケード過程、3次元大気減衰性乱流の成層効果を明らかにした。さらに、並列ネスティングとして、モデルを結合・連結し、高分解能シミュレーション(～5km)を可能とする領域結合型全球モデルを開発し、また衛星観測データなどを活用した4次元変分法やカルマンフィルタを全球大気スペクトルモデルに適用した並列データ同化システム等を開発し精度向上を図った。

**(2)固体地球分野：**地球内部の熱的非平衡状態から派生するマントルやコア内部の対流運動、また相対運動するプレート同士の相互作用の結果として理解される地震、火山活動や造山運動などの地殻活動現象について、定量的な予測の実現を目指して、固体地球の変動現象をその時間・空間の違いにより、地球規模での地殻・マントル・コアのダイナミクス、日本列島域規模でのプレート間相互作用による地殻活動および局域規模での複雑断層系の地震発生過程と波動伝播の階層に分割し、各々の階層での変動現象の要素過程を記述するシミュレーション・モデル群を構築し、これらを地球シミュレータに実装し、最適化並列プログラム群を開発した。具体的には、マントル対流及びコア対流等の大規模シミュレーションプログラムを構築し、地球史再現また地球型ダイナモの挙動を大規模に精査することを可能にした。一方、外的な擾乱を受けた固体地球の応答(地震学的、電磁気学的、力学的)をシミュレーションする並列プログラムを開発し、高精度・高解像度で3次元地震波速度構造等の把握を可能とした。次に、日本列島域の地殻活動予測の統合並列モデルとして、日本列島周辺域の3次元プレート境界形状モデル、プレートの定常沈み込みに伴う島弧・海溝系の隆起・沈降運動モデル、強度回復メカニズムを内包する断層構成則、プレート境界モデルを用いた日本列島域の準静的応力蓄積モデル、及び半無限弾性体中の3次元分岐・屈曲断層での動的破壊伝播モデルを構築するとともに、日本列島域の地殻活動予測シミュレーションモデルへGPS観測データの情報を取り込む地殻変動・地震活動観測データの解析・同化手法を開発した。また、3次元不均質構造場の複雑断層系における地震発生サイクルモデルを構築し、東北日本および西南日本の3次元粘弾性モデルにより運動学的地震発生サイクルのシミュレーションにより地殻変動場の実データ解析や応力蓄積過程とその有用性を明らかにした。さらに、高精度化、並列最適化した3次元地震波動伝播モデルを構築し、日本の被害地震である、1944年南海地震、1993年釧路沖地震、そして2000年鳥取県西部地震などの強震動シミュレーションを実施し、観測された地震動との一致を確認することにより、計算モデルの実用を示した。

**(3)情報技術分野：**高精度の地球変動予測の大規模シミュレーションを実現するため、地球科学者と情報技術者が融合的に協力し、各研究機関が保有する大気、海洋および固体地球の様々な個別現象モデルに関する並列プログラムを開発した。具体的には、地球シミュレータ

を利用しうる大気・海洋及び固体地球分野の個別現象モデルの並列プログラム化を支援し、また大規模かつ複雑系としての地球変動現象を系統的にシミュレーションする並列プラットフォームを開発、さらに大容量データ処理に対応した大規模可視化など大規模シミュレーション技術をも開発した。この中で、地球シミュレータの大規模性を活かす高分解能の非静力学領域モデル、雲解像微視的モデル等の並列ソフトウェア群を開発し、また大気と海洋現象が複雑に相互作用する連成問題について、大気、海洋、陸域モデル等をカップリングする並列ソフトウェアのフレームワーク「風神」を開発した。一方、固体地球では並列シミュレーション・プラットフォーム「GeoFEM」を開発し、解法の高安定化を図るとともに、各現象モデルのプラグイン接合及び大規模空間格子生成、並列可視化などのプラットフォーム機能等を高度化した。また、西南及び東北日本の地震断層モデル連成結合計算を通じて、大規模シミュレーションの並列技術を蓄積した。

**(4)成果の公開利用等：**本研究では、各分野の並列ソフトウェアをワークショップ、セミナー及びウェブ等を通じて研究者及び一般、産業界へ公開し、また海外研究者と積極的に交流を図った。具体的には、日米欧の大気・海洋および情報分野で「最先端コンピュータにおける次世代気候モデル開発に関わる国際ワークショップ」(5回)、環太平洋経済諸国会議の地震シミュレーション協力連合(日、米、豪、中等)とのワークショップ(4回)を開催し、米国、豪州などに地球科学プロジェクトの雛形を与えた。また、固体地球プラットフォーム「GeoFEM」、地球流体フレームワーク「風神」、さらに非静力学大気モデル「CReSS」等の並列プログラムは、セミナー等を通じて普及活動を実施するとともに、Web上で公開した。GeoFEMのダウンロードは約1300件にも及んだ。

### 波及効果、発展方向、改善点等

(1)**波及効果：**高分解能、大規模シミュレーション向けの並列ソフトウェア開発という本研究の特徴から、以下の効果が見られた。

・**並列処理プログラム構築技術の浸透と伝播：**並列プログラミングには不慣れな地球科学者が並列プログラム技術を習得し、その技術を若手研究者へ、また学会等を通じて地球科学界に広く伝播させた。これより、地球科学者が米欧よりも有利な研究環境を獲得し、今後、観測技術の充実などと相俟って、我が国の科学技術の高度化に貢献すると期待される。

・**複雑システム研究における大規模シミュレーション手法の現実化：**大規模シミュレーションを活用し複雑なシステム現象を解き明かす研究が、急速に活発化し、複雑系であるナノ材料、生物科学、プラズマ物理、大規模工学システムなどでも地球シミュレータを利用した研究を始めるなど、他分野へ影響を与えた。

・**社会への貢献：**非静力学モデルによる高分解能シミュレーションは、台風、集中豪雨等の気象予報、防災情報支援の精度向上に貢献し、雲解像モデルCReSSは、民間気象サービスなどの新しいビジネス領域に貢献している。さらに、流出重油挙動予測解析システムでは、日本近海等の海洋汚染と漁業被害回避に向けた重要な貢献を果たしている。また高分解能強震動シミュレーションにより、次世代型地震予測システムの研究が始まっている。一方、民間企業では、公開されたGeoFEMを利用し、製品の設計、製造方法等に役立てる例が見られ、産業競争力強化にも役立っている。

・**世界へのインパクト：**世界に先駆けて、高分解能シミュレーションを導入した新しい地球科学研究スタイルは、地球シミュレータの成功と相俟って、米欧諸国に影響を及ぼし、本研究方式をモデルにした地球科学研究プロジェクトが米国、豪州で発足し、我が国の科学技術の先進性を示した結果となった。

### (2)発展方向

・**計算科学の発展：**地球シミュレータの大規模計算資源、また本研究から派生する大規模シミュレーション技術等を用いて、計算科学は、未解明の現象の解明、法則の発見を促す、本格的な新しい科学領域として発展することが望まれる。

・**国民生活への貢献：**安全な国民生活を保障する国家的な観点から、地球シミュレータを活用し、高度観測システムと一体となった地球変動予測システム、また環太平洋諸国等との国際的な地震予測システムの構築が期待される。

### (3)改善点

新しい高性能計算機資源とその利用環境においては、その時点における最高性能の高性能計算機の利用と支援が不可欠である。例えば、地球シミュレータ開発の成功には、東京大学情報基盤センターの並列処理計算機の貢献があった。今後、次世代高性能計算機の開発及び応用ソフトウェア開発においては、現状の最高性能計算機を基に、飛躍的な性能向上よりも、段階的に性能向上させる開発方式が、計算機技術及び並列ソフトウェア技術の開発におけるリスク低減と技術の継続的蓄積の観点から望ましく、ひとつの改善点とも考えられる。

# 研究成果公表等の状況

## (1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合 計
国内	第 期 43 件	第 期 133 件	第 期 196 件	第 期 372 件
	第 期 51 件	第 期 56 件	第 期 311 件	第 期 418 件
国際	第 期 124 件	第 期 69 件	第 期 147 件	第 期 340 件
	第 期 125 件	第 期 13 件	第 期 102 件	第 期 240 件
合計	第 期 167 件	第 期 202 件	第 期 343 件	第 期 712 件
	第 期 176 件	第 期 69 件	第 期 413 件	第 期 658 件

## (2) 特許等出願件数

(特許ではないが、実用化された技術)

気象庁全球予報モデルの改良(配信資料に関する技術情報(気象編)第 60 号、全球モデル(GCM)の改良について、平成11年12月、気象庁予報部)

## (3) 受賞等

第 期 3件 (うち国内3件、国外 0 件)

1. 加藤輝之:「山本・生野論文賞、Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed southern Kyushu, Japan on 1 August 1993」、1999 年 11 月 25 日
2. 斉藤和雄:「日本気象学会賞、メソスケール現象の数値実験および予測に使われる非静力学モデルの開発と数値実験による研究」、2000 年 5 月 25 日
3. 古村孝志・瀧藤一起:「第 6 回 Computer Visualization Contest、優秀賞「日経サイエンス賞」、1995 年兵庫県南部地震の強震動シミュレーションと波動場の可視化」、2000 年 6 月 23 日

第 期 2件 (うち国内1件、国外1件)

1. K.Nakajima, J.Fingberg and H.Okuda:「Parallel 3D Adaptive Compressible Navier-Stokes Solver in GeoFEM with Dynamic Load-Balancing by DRAMA Library」、HPCN Europe 2001, Amsterdam, Netherlands, Lecture Notes in Computer Science 2110, p.183-193, Springer, (2001)
2. 古村孝志:「物理探査学会奨励賞、大規模3次元地震波動場モデリングのための PSM/FDM ハイブリッド型並列計算」、2002 年 5 月 23 日

## (4) 主な原著論文による発表の内訳

国内誌 (国内英文誌を含む)

1. Kato, T. and H. Goda:「Formation and maintenance processes of a stationary band-shaped heavy rainfall observed in Niigata on 4 August 1998」、J. Meteor. Soc. Japan, 79, 899-924, (2001)
2. Yoon, J.-H. and H. Kawamura:「The formation and circulation of the intermediate water in the Japan Sea」、J. Oceanography, vol. 58, (2002)
3. Masato Sugi, Akira Noda and Nobuo Sato:「Influence of the Global Warming on Tropical Cyclone Climatology: An Experiment with the JMA Global Model」、Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.80, No.2, 249-272, (2002)
4. Takikawa, T., J.H. Yoon and K.-D. Cho:「Tidal current in the Tsushima Straits estimated from ADCP data by Ferryboat」、J. Oceanogr., 39, 37-47, (2003)

国外誌



1. Fukahata, Y. and M. Matsu'ura: 'Correlation between surface heat flow and elevation and its geophysical implication', *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2703-2706, (2001)
2. Christensen, U. R., Aubert, J., Cardin, P., Dormy, E., Gibbons, S., Glatzmaier, G. A., Grote, E., Honkura, Y., Jones, C., Kono, M., Matsushima, M., Sakuraba, A., Takahashi, F., Tilgner, A., Wicht, J., and Zhang, K.: 'A numerical dynamo benchmark', *Phys. Earth Planet. Inter.*, 128, 25-34, (2001)
3. Takehiro S., Lister, J. R.: 'Surface zonal flows induced by thermal convection trapped below a stably stratified layer in a rapidly rotating spherical shell', *Geophys. Res. Lett.*, 29, 50--1 4, (2002)
4. Murata, A., K. Saito and M. Ueno: 'The effects of precipitation schemes and horizontal resolution on the major rainband in typhoon Flo(1990) predicted by the MRI mesoscale nonhydrostatic model', *Meteorol. Atmos. Phys.*, 82, 55-73, (2002)
5. Watanabe, M. and T. Hibiya: 'Global estimates of the wind-induced energy flux to inertial motions in the surface mixed layer', *Geophysical Research Letters*, 29 (8), 1239, doi: 10.1029/2001GL0144422, (2002)
6. Nagasawa, M., T. Hibiya, Y. Niwa, M. Watanabe, Y. Isoda, S. Takagi and Y. Kamei: 'Distribution of fine-scale shear in the deep waters of the North Pacific obtained using expendable current profilers', *Journal of Geophysical Research*, 107 (C12), 3221, doi: 10.1029/2002JC001376, (2002)
7. Toda, S., R. Stein and T. Sagiya: 'Evidence from the AD 2000 Izu islands earthquake swarm that stressing rate governs seismicity', *Nature*, 419, 58-61, (2002)
8. Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura: 'Detection and Monitoring of Ongoing Aseismic Slip in the Tokai Region, Central Japan', *Science*, 298, 1009-1012, (2002)
9. Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., Matsubara, M., and Ikawa, T.: 'Deep seismic profiling across Ou backbone range Northern Honshu Island, Japan', *Tectonophysics*, 355, 41-52, (2002)
10. Furumura, T., K. Koketsu and K.-L. Wen: 'Parallel PSM/FDM hybrid simulation of ground motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake', *Pure Appl. Geophys.*, 159, 2133-2146, (2002)
11. Nakanishi, A., Takahashi, N., Park, J-O, Miura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Hirata, N., Iwasaki, T. and Nakamura, M.: 'Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone', *J. Geophys. Res.*, 107, EPM 2-1-21, (2002)
12. Hong C.-H. J. H. Yoon: 'A three-dimensional numerical study of tyoons in the northwestern Pacific Ocean. Part I: A response of sea water to Typhoon Holly', *J. Geophys. Res.* (accepted in March, 2003)
13. Kato, N. and T. E. Tullis: 'Numerical simulation of seismic cycles with a composite rate- and state-dependent friction law', *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 841-853, (2003)
14. Kato, N. and T. Seno: 'Hypocenter depths of large interpolate earthquakes and their relation to seismic coupling', *Earth Planet. Sci. Lett.*, 210, 53-63, (2003)
15. Takeuchi, N. and Geller, R.J.: 'Accurate Numerical Methods for Solving the Elastic Equation of Motion for Arbitrary Source Locations', *Geophys. J. Int.*, in press, (2003)
16. Hara, T.: 'Waveform inversion for 3-D earth structure using the Direct Solution Method implemented on vector-parallel supercomputer', *Phys. Earth planet. Inter.*, submitted, (2003)
17. Furumura, T., B.L.N. Kennett and K. Koketsu: 'Visualization of 3-D wave propagation from the 2000 Tottori-ken Seibu, Japan earthquake: Observation and numerical simulation', *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 870-881, (2003)
18. L. Chen, I. Fujishiro and K. Nakajima: 'Parallel Visualization of Large-Scale Unstructured Geophysical Data for the Earth Simulator', To appear in *Pure and Applied Geophysics*, (2003)
19. L.Chen, I.Fujishiro and K.Nakajima: 'Optimizing parallel performance of unstructured volume rendering for the Earth Simulator', *Parallel Computing*, Vol. 29, No. 3, pp.355-371, (2003)
20. K.Nakajima: 'Parallel Iterative Solvers for Simulations of Fault Zone Contact using Selective Blocking Reordering', *Journal on Numerical Linear Algebra with Applications*, (2004)

## (5) 主要雑誌への研究成果発表

Journal	Impact Factor	サブ テーマ 1	サブ テーマ 2	サブ テーマ 3	合計
主要雑誌					
Advances in Engineering Software	0.205	0	0	1	0.205
Bulletin of the American Meteorological Society	3.883	1	0	0	3.883
Bulletin of the Seismological Society of America	1.231	0	4	0	4.924
Computational Mechanics	0.946	0	2	0	1.892
Computer Physics Communications	1.082	0	1	0	1.082
Computers & Graphics	0.462	0	0	1	0.462
Concurrency and Computation : Practice and Experience		0	1	6	
Eerth and Planetary Science Letters	2.700	0	1	0	2.700
Earth, Planets and Space	0.689	0	6	0	4.134
Electronic Geosciences		0	3	0	
Fluid Dynamic Research		1	0	0	
Future Generation Computer Systems	0	0	0	3	0
Geophysical Journal International	1.366	0	16	0	21.856
Geophysical Research Letters	2.516	0	15	0	37.74
Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics	0.422	0	2	0	0.844
International Journal For Numerical Methods in Engineering	1.239	0	1	0	1.239
International Journal of Computational Fluid Dynamics	0.354	0	0	2	0.708
Island Arc	0.732	0	1	0	0.732
Journal of Computational Acoustics	0.625	0	1	0	0.625
Journal of Geophysical Research	2.609	14	8	0	57.398
Journal of the Meteorological Society of Japan	1.007	2	0	0	2.014
Journal of Oceanography		5	0	0	
Journal of Physical Oceanography	2.148	1	0	0	2.148
Journal of Seismological Society of Japan		0	3	0	
Journal of the Geodetic Society of Japan		1	0	0	
Journal on Numerical Linear Algebra with Applications	0.514	0	0	1	0.514
Nature	27.955	0	1	0	27.955
Parallel Computing	0.572	0	0	1	0.572
Physics of the Earth and Planetary Interiors	1.248	0	6	0	7.488
Principles of seismology		0	1	0	
Pure and Applied Geophysics	0.728	0	22	3	18.2
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	2.302	1	0	0	2.302
Science	23.329	0	1	0	23.329
Seismological Research Letters		0	2	0	
SIAM Journal on Scientific Computing	1.293	0	0	1	1.293
Meteorology and Atmospheric Physics	0.714	1	0	0	0.714
Tectonophysics	1.473	0	2	0	2.946