

事後評価に係る報告書

戦略分野名：HPCI 戦略プログラム
分野 3
防災・減災に資する地球変動予測

平成 28 年 2 月 25 日

分野 3 統括責任者

所属 国立研究開発法人海洋研究開発機構

氏名 今脇資郎

目次

1. 戦略分野概要	1
2. 研究開発目標	1
I. 研究開発課題	
(1) 防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究	
(2) 地震・津波の予測精度の高度化に関する研究	
II. 計算科学技術推進体制構築	
III. プロジェクトの総合的推進	
3. 課題の達成状況等	4
(1) 研究開発目標の達成状況等について	4
①研究開発計画（平成 28 年 2 月 1 日時点）	4
②目標達成状況（平成 28 年 2 月 1 日時点）	6
③中間評価等指摘事項への対応	10
④研究開発成果（平成 28 年 2 月 1 日時点）	21
⑤独創性・優位性について	52
(2) 研究開発体制について	62
(3) 成果の利活用について	68
4. 今後の展望	72

1. 戦略分野概要

スーパーコンピュータ「京」（以下、「京」と記す）の性能を最大限発揮させ、戦略目標である「地球温暖化時の台風の動向の全球的予測と集中豪雨の予測実証、および次世代型地震ハザードマップの基盤構築と津波警報の高精度化」の実現に向け、海洋研究開発機構を代表機関とし、世界最高水準の研究成果を創出するとともに、本分野における計算科学技術推進体制を構築する。

2. 研究開発目標

I. 研究開発課題

(1) 防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究

台風の発生、構造については 100 km 程度の解像度を持つ気候モデルでは再現が不十分であり、このため我が国の社会・経済に重大な影響を持つ台風の温暖化時の動向の詳細がまだ分かっていない。「京」の使用が可能となれば、雲の塊までを再現できる数 km の解像度を持つ全球雲解像モデルを用いた数値実験によりマッデン・ジュリアン振動現象などを精度よく再現し、この問題に対する答えを得ることが期待できる。この成果は、我が国のみならず台風の影響下にある世界の国々における温暖化時の影響評価の基礎資料としても活用できる。また、「京」による雲解像シミュレーションの実現は、台風の発生、経路、梅雨前線に伴う豪雨ポテンシャル等の 2 週間以上の延長予測可能性についての検討を可能にする。少数例について地球シミュレータで得られた萌芽的結果を、例数を増やし、科学的知見へと引き上げることを目標とする。更に、「京」以降の地球規模の防災予測のため、コミュニティーの叢智を集結させた地球変動予測モデル=アプリケーションパッケージの実現に向けた研究開発を行う。

日本では梅雨末期や夏季に毎年のように集中豪雨や局地的大雨が発生し、人命損失を含む大きな被害を出している。集中豪雨の予測は、防災・減災上きわめて重要であるが、現在の数値予報では強雨の定量的な予測精度は十分ではない。特に局地的な大雨については、時間的・空間的にスケールが小さいため、数値モデルによる時間や場所、強度を特定した予測は困難な現状である。これらの問題を克服するには高精度の雲解像モデルに加えて、初期値の高精度化が非常に重要であり、そのために先端的なデータ同化手法を雲解像モデルに適用する必要がある。また、初期値や数値モデルには誤差が不可避であり、それが予測にしばしば大きな影響を与えることから、十分なリードタイムを確保した予測には、これらの誤差を考慮したアンサンブル予報が欠かせない。本課題では、「京」の計算資源を活用することにより、雲を解像するデータ同化技術を開発するとともにアンサンブル予報を雲解像モデルに適用した領域気象解析予測システムを構築して、集中豪雨や局地的大雨、竜巻の親雲などメソβスケール以下の顕著気象現象の力学的な直前予測と、リードタイムを持った市町村単位の定量的確率予測の可能性を実証する。また、雲解像モデルに用いられている物理過程のパラメータ化についての基礎研究を通じて、その誤差を評価するとともに領域雲解像モデルの改良につなげる。

(2) 地震・津波の予測精度の高度化に関する研究

内陸で発生する直下型地震など、M7 級の地震による強震動シミュレーションや、規模の比較的小さな海溝型地震の津波計算は、地球シミュレータ等の高速計算機により、ほぼ実用化の域にある。しかし、地震発生自体を予測するシミュレーションの開発と、その信頼性向上に不可欠となる地殻変動や地震活動の観測データ同化に基づく、地震発生予測は、「京」によりようやく実現に向けたシミュレーション研究が始められる段階にきた。地震・津波の予測精度の高度化と、将来の地震予測の実用化に

向け、そして M8～9 級の巨大地震が日本列島の広い範囲に作り出す強震動と地震地殻変動、そして津波が複雑に絡み合った複合災害を高い精度で予測して、災害軽減に役立てるために、「京」の計算資源を最大限に活かした上記研究を加速する。

地震・津波の災害軽減は、高速な計算技術だけで解決できるものではない。「京」の高い性能を背景に、大規模計算による地震学的な成果と研究の価値を点検し、大地震の発生と強い揺れの生成過程に関わる地震学的重要課題を一つずつ解決する。また、現行の強震動シミュレーションでは、周期 2 sec 程度以上の比較的長周期の地震動の計算が実用化の域にある。これを、木造家屋のように固有周期がより短い短周期構造物から超高層ビルなどの長周期構造物など、現代社会が有する多様な建築物の被害予測と耐震設計のための入力地震動に拡張することが緊急の課題である。このためには、周期 0.2 sec 程度以下の短周期地震動を含む広帯域のシミュレーションの実用化が求められる。短周期地震動の発生と伝播に寄与する、微細な震源モデルと複雑な地下構造モデルをできるだけ高精度化する。

津波の予測では、現行の想定地震の津波を予め計算して作られた津波データベースに基づく津波警報ではなく、地震発生直後に海底地震計や海底水圧計で記録された地震と津波の実データを用いた、格段に高度化した津波予測を試みる。これを警報として用いるためには災害情報の確実な伝達の仕組みの構築や災害情報の受容など工学・社会学的課題が山積みではあるが、HPCI を活用した地震津波災害軽減に向けた大きな第一歩を踏み出すことができよう。

広帯域の地震動シミュレーションが実現すれば、予測された地震動に対する既存・新設の構造物の耐震性を評価することが可能となる。設計で使われた地震動よりも予測された地震動が大きい場合、構造物には局所的な損傷が生じたり、時には構造物全体の破壊に至ることも懸念される。極めて大きい地震動に対して、損傷・破壊も含む構造物の地震応答過程を解析できるような、精緻な解析モデルの大規模数値計算を使う数値解析手法の開発が必要である。また、広域の地震動が予測できるようになると、これを入力とする構造物の応答シミュレーションを都市の全構造物に適用することで、従来の経験式を基としたハザードマップとは一線を画する、シミュレーションベースの次世代型地震ハザードマップの基盤を構築できる。さらに、近年強力に連携が進められている社会科学系のシミュレーションも地震ハザードマップに取り込むことが可能となる。

II. 計算科学技術推進体制構築

①計算資源の効率的マネジメント

計算機資源を効率的に利用するためのマネジメント計画の立案と遂行を行う。具体的には、各研究開発課題共用のファイルサーバ、大容量磁気ディスクの保守運用などを通じて、研究者へのサポートを実施する。また、これまでに実施した「京」上でのプログラム最適化技術を活かし、新たに「京」に移植するアプリケーションの最適化、高速化等の支援を行う。

②人材育成

理化学研究所計算科学研究機構の他、本事業に参加・協力する大学等関連機関や神戸地区を中心とした大学等と連携し、学部学生、大学院生等の若手研究者を対象として講座や勉強会を開催し、広範な計算科学分野における人材の育成を図る。

③人的ネットワークの形成

全国の大学・研究機関、国・地方自治体、民間、NPO 法人等を対象に、当分野の研究開発課題に関連する研究会やセミナーを年数回開催することによって関係者間のコミュニケーションの場を創出し、人的ネットワークを形成する。

④研究成果の普及広報活動

ウェブページを開設し、随時更新するとともに、シンポジウムの開催、研究施設一般公開への出展等を通じて、成果を分かりやすく広く公開する。

⑤分野を越えた取組みの推進

これまで地球シミュレータの運用を通じて蓄積した計算機科学に関する研究や技術の知見及び経験を伝承していくとともに、特定高速電子計算機施設の運営主体である理化学研究所計算科学研究機構と連携し、他分野の研究者及び技術者も交えた研究会、ミーティングやウェブページ等を通じて、分野 3 の実績を公開し情報共有を深める。

Ⅲ. プロジェクトの総合的推進

統括責任者、各課題代表者及び外部有識者からなる運営委員会を年 3 回程度開催し、運営方針を策定、当分野の活動を統括する。また、人材育成に関するワーキンググループを設置して、計算科学分野における人材育成にあり方について具体的な検討・議論を行う。

3. 課題の達成状況等

(1) 研究開発目標の達成状況等について

① 研究開発計画(平成28年2月1日時点)

研究開発項目及び小項目	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度
(1) 防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究					
(1-1) 地球規模の気候・環境変動予測に関する研究		計算性能調査、 tuning	延長予報実験、 全球 sub-km 実験		
(1-2) 超高精度メソスケール気象予測の実証 1) 領域雲解像4次元データ同化技術の開発 2) 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証 3) 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究		雲解像モデルに適用したデータ同化システムの構築システムの超並列計算への対応	稠密観測に基づく豪雨事例の雲解像データ同化実験	雲解像データ同化による豪雨短時間予測の実証実験	
		雲解像アンサンブル解析予報実験システムの構築と「京」への適用	データ同化システムと結合した雲解像アンサンブル解析予報システムの構築	豪雨の確率的予測の実証実験	
		雲解像モデルの超並列計算への対応 詳細な物理過程を用いるモデルの開発	詳細な物理過程による「京」を用いた高解像度再現実験	「京」を用いた超高解像度再現実験 雲解像モデルの物理過程の改良	
(2) 地震・津波の予測精度の高度化に関する研究					
(2-1) 地震の予測精度の高度化に関する研究		シミュレーションコード最適化	地震・地震動予測シミュレーション		
(2-2) 津波の予測精度の高度化に関する研究		波源・伝播解析の構築	遡上過程および随件事象の高度化	リアルタイムデータを用いた津波ハザード予測の構築	
(2-3) 都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究		構造物・都市地震応答手法の設計開発	構造物・都市地震応答手法の開発	構造物・都市地震応答手法のプロダクションラン	



②目標達成状況(平成 28 年 2 月 1 日時点)

研究開発項目	達成状況
(1) 防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究	
(1-1) 地球規模の気候・環境変動予測に関する研究	<p>【達成状況:◎大幅に達成】 全球雲解像モデルを用いて、世界で初めて 1 km 以下の格子での全球大気のシミュレーションに成功したほか、マッデン・ジュリアン振動については 1 カ月先、台風発生については 2 週間先まで予測が可能であることを示した。</p> <p>温暖化時の台風 14-3.5 km メッシュの全球雲解像モデルによる、地球温暖化時の台風の変化を計算しデータセットを整備した。解析の結果、地球温暖化により台風の構造が変化することが示されており、今後地球温暖化適応策への貢献が見込まれる。</p> <p>延長予測 全球雲解像モデルを用いて、マッデン・ジュリアン振動については 1 カ月先、台風発生については 2 週間先まで予測が可能であることが明らかになった。今後気象庁の予報改善への貢献が見込まれる。</p> <p>全球 sub-km 実験 全球 14- 0.87 km メッシュの全球雲解像モデルによる計算を実行し、個々の雲の表現に必要な解像度や、気象擾乱ごとの雲の形態の違いを明らかにし、世界の気象研究業界に大きなインパクトを与えた。</p> <p>アプリケーションパッケージ開発 「京」の全リソースを活用可能とすべく、超高解像度全球大気モデル NICAM の効率化・高度化にむけた開発を行った。1 km 以下のメッシュで全球を覆うシミュレーションが可能になり、今後のポスト「京」でも効率よく利活用可能となった。特に、今後の計算機環境での高速化・調整に資するため、全球非静力学モデルの力学コアを分離し、2 条項 BSD ライセンスで公開した。また地球変動予測パッケージの基盤となるカプラ開発やそれを用いたフレームワークの設計を行った。ポスト「京」に資する次世代力学コアの検討・開発も行った。</p>
(1-2) 超高精度メソスケール気象予測の実証	<p>【達成状況:○着実に達成】 領域非静力学モデルに基づくアンサンブル解析予報システムを開発し、伊豆大島や広島での豪雨事例を対象とした超高解像度(250 m 格子)の広領域再現予測実験に成功した。</p>

	<p>1) <u>領域雲解像 4 次元データ同化技術の開発</u> 非静力学モデルに基づく 4 次元データ同化技術として、従来の 4 次元変分法や局所アンサンブル変換カルマンフィルタに加え、ハイブリッド 4 次元変分法、アンサンブル変分同化法を開発し、実事例について精度比較を行った。</p> <p>2) <u>領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証</u> 領域非静力学モデルに基づくアンサンブル解析予報システムを開発し、精度検証を行った。「京」に最適化した非静力学モデルを用いて、伊豆大島や広島での豪雨事例を対象とする 250 m 解像度の広領域再現予測実験を行った。また分布型降雨流出・洪水氾濫モデルやラグランジュ土石流モデルの「京」への最適化を進めた。</p> <p>3) <u>高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究</u> 台風全域を対象とする LES 実験、10 m 解像度の再現実験に基づく竜巻の詳細構造の解析など世界に類を見ない高解像度での数値実験を行った。多次元ビン法雲物理モデルの開発と実験を進めた。</p>
(2) 地震・津波の予測精度の高度化に関する研究	
(2-1) 地震の予測精度の高度化に関する研究	<p>【達成状況:◎大幅に達成】 南海トラフ地震について、地震発生～地震波伝播～強震動・長周期地震動の発生の連成シミュレーションに成功し、成果を国の中央防災会議等に提供した。</p> <p>南海トラフ地震等の海溝型巨大地震の発生と、それに伴う強震動・地殻変動・津波の高精度予測に向け、①地震発生予測シミュレーション、②地下構造推定シミュレーション、③地震波伝播・強震動予測シミュレーション、の三つの要素シミュレーションの高精度モデルを整備し、「京」の高い性能を引き出すための性能チューニングを実施して、数万 CPU を用いた大規模・高性能シミュレーションを開発した。これにより、従来の地球シミュレータによる計算に比べて、計算規模が 50 倍、分解能が 2.6 倍の高精度シミュレーションが実用化した。「京」の高い計算性能を背景に、上記三つの地震シミュレーション要素モデルを結合して、それぞれの予測結果を入力として連成し、地震発生～地震波伝播～強震動・長周期地震動の発生の連成シミュレーションに初めて成功した。「京」を用いて南海トラフ地震の強震動・長周期地震動、地殻変動、そして津波発生の予測シミュレーションを実施し、国の中央防災会議や文科省地震調査研究推進本部に成果を提供した。</p>
(2-2) 津波の予測精度の高度化に関する研究	<p>【達成状況:○着実に達成】 仙台平野を 5 m 格子でモデル化した 2 時間分の津波浸水解析が 2 分以内で計算できることを示し、リアルタイム津波ハザード予測の実現に向けて大きく前進した。</p>

	<p>日本海溝及び南海トラフ沿いを対象として、分散波理論を適用したグリーン関数群の構築を達成したことにより、リアルタイム波源推定のための理論津波波形データベースの高度化を達成した。そして、得られたデータベースを用いた津波伝播計算を可能にする津波計算モデル(JAGURS)を高度化した。また、従来の津波氾濫計算モデルである TUNAMI-N2 を「京」に移植し、最適化を図ったことにより、仙台平野を 5 m でモデル化した 2 時間分の浸水解析を 2 分以内での計算終了を可能とし、リアルタイム津波ハザード予測の現実味が益々高まった。また、津波の遡上過程を高精度に解析するために、CADMAS-SURF/3D や SPH 法といった 3 次元流体計算の大規模並列計算に成功した。それにより、市街地における局所的な津波挙動のみならず建物に作用する流体力もまた高精度に捉えることが可能となったことは、市街地における津波対策を講じる上で大きな意義を持つ。他方、津波による複合的な被害である、漂流物の移動や衝突、土砂移動による侵食・堆積に伴う地形変化を扱う計算モデル(NDA-FD, TUNAMI-STM)の高度化に成功した。そして、こうした津波による複合的な被害への対応として、津波氾濫・漂流物移動・土砂移動を統一的に解析可能とするために、本課題において開発・高度化された計算モデルから構成される統合モデルを開発した。</p>
<p>(2-3) 都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究</p>	<p>【達成状況:◎大幅に達成】 地盤・建物・避難を連成して行う統合地震シミュレーションを開発して、東京 23 区内の 10 km 四方の領域を対象とした計算に成功し、極めて高い時・空間分解能の地震災害・被害評価を例示した。</p> <p>本研究は、「京」で性能を示す構造物地震応答解析手法と都市地震応答解析手法の開発を第一の目的とする。前者に関しては、材料・幾何非線形に対応する動的有限要素法が開発された。鉄筋コンクリート橋脚・超高層ビル・原子力発電所建屋の解析を行い、大型震動台を使った実験との比較等から、高性能計算を利用した構造物地震応答解析の有用性を示した。重要構造物の耐震性の評価という実用に向けた取組みに繋がっている。後者に関しては、地盤・建物・避難を連成して行う統合地震シミュレーションが開発された。東京 23 区内 10 km 四方の領域を対象とした計算に成功し、極めて高い時・空間分解能の地震災害・被害評価を例示した。従来の経験式に基づく災害・被害評価手法とは異なる、大規模数値計算を使う、シミュレーションに基づく災害・被害評価手法の潜在的有効性が示された。全「京」を使う優れた計算性能は計算科学の分野でも高く評価された。このため、ポスト「京」に向けた実用化を目指す研究も開始された。</p>

<p>(3) 計算科学技術推進体制構築</p>	<p>【達成状況:○着実に達成】 延べ 51 本のアプリケーションの最適化・高速化等の支援に成功し、世界初となる大規模計算の実行を可能とするなど、研究開発課題の推進に大きく貢献した。</p>
	<p><u>計算資源の効率的マネジメント</u> 各研究開発課題共用のファイルサーバ、大容量磁気ディスクの保守・運用を行い、研究者へのサポートを実施し、研究開発課題の推進に貢献した。延べ 51 本のアプリケーションの最適化・高速化等の支援に成功し、世界初となる大規模計算の実行が可能となった。</p> <p><u>人材育成</u> 理化学研究所 計算科学研究機構、高度情報科学技術研究機構及び、他の戦略分野と連携し、神戸大学の集中講義や International HPC Summer School に講師を派遣し、広範な計算科学分野における人材の育成を推進した。 また、人材育成 WG での議論に基づいて、防災・減災分野における今後の人材育成の方針について報告を取りまとめている。</p> <p><u>人的ネットワークの形成</u> 全国の大学・研究機関、国・地方自治体、民間、NPO 法人等を対象に、当分野の研究開発課題に関連する研究会やセミナーを開催した。その結果として、分野内及び、分野間のコミュニケーションの場を創出し、人的ネットワークの形成を促進し、研究開発課題の推進に大きく貢献した。</p> <p><u>研究成果の普及広報活動</u> ウェブページを開設し、イベント等の開催に伴い、随時更新を行った。また、シンポジウムの開催、パンフレットの制作、研究施設一般公開への出展等を通じて、成果を分かりやすく広く公開した。 これらの活動を通じて、事業の紹介及び、成果の普及に大きく貢献した。</p> <p><u>分野を越えた取組みの推進</u> 「京」の運営主体である理化学研究所計算科学研究機構、登録機関である高度情報科学技術研究機構及び、他の戦略分野と連携し、会合等を通じて、情報共有を深めた。 研究会、ミーティング、ウェブページ等を通じて、情報交換を行い、計算資源の効率的マネジメント、人材育成、人的ネットワークの形成、研究成果の普及広報活動について、より効果的な取組みを行い、本事業の推進に貢献した。</p>

③中間評価等指摘事項への対応
分野全体

中間評価指摘事項	対応
<p>今後は、各研究開発課題の発展に加えて、各研究開発課題間の連携や分野全体としての連携を一層強化し、分野としてより戦略的かつ有機的に活動していくことが必要である。</p> <p>分野全体としての成果を考えた場合、各課題の成果が統合されて 分野としての成果に昇華していく構図が見えにくい。</p> <p>分野として戦略目標を達成するという観点で全体を見直し、トップダウンで、課題間連携を重点的取組とすること。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>気象気候分野については、雲のモデル化が共通テーマであり、それに関する連携をすでに進めているが、さらに強化する。地震津波分野では、各課題が連携して「統合地震シミュレーション」の開発を進める。分野全体としての取組みとしては、課題間の情報交換を密にし、浸水防災等に関しての連携が可能かどうか検討する。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>分野全体としての取組みとして、2014 年 8 月 12 日に、分野 3 関係研究者を主な対象とした、分野3全体についての成果報告会を開催し、課題間の情報交換を行った。また、同報告会を通じて、浸水防災等に関しての連携が可能かどうか検討した。今後も継続して各課題間の連携や分野全体としての連携を図る。</p>
<p>今後は、得られた成果を、経済学者や社会学者も巻き込んだ上で、世間の注目が高い防災・減災分野を始めとして社会にどう役立てていくかを強く意識していく必要がある。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>運営委員会のメンバーに、社会・経済科学の有識者を加えて、得られた成果を防災・減災にどう役立てていくかの議論を深めることを検討している。また、シンポジウムのパネリスト等として、社会・経済科学の有識者の参加を求め、防災・減災の視点からのコメントを得ることを検討している。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>運営委員会のメンバーに、田中淳センター長(東京大学 大学院情報学環 総合防災情報研究センター)に参画いただき、本プロジェクトを通じて得られた成果を防災・減災にどう役立てていくかの議論を深めている。2014 年 8 月の分野 3 成果報告会、第 7 回運営委員会及び、2015 年 2 月の第 8 回運営委員会では、社会への情報発信の在り方に関して貴重なコメントをいただいた。</p> <p>平成 26 年度から平行して開始したポスト「京」重点課題では、交通障害・経済活動のシミュレーションを、本課題で開発された統合地震シミュレーションに組み込むことが進められている。</p>
<p>今後は、統括責任者や研究開発課題責任者など、分野全体を束ねる立場にある者がリーダーシップを発揮できるよう、運営委員会の機能を強化することや研究</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>運営委員会は年 2 回程度開催する予定である。実施責任者会合は年 4 回程度を目処に定期的に開催し、研究者間の意見交換を積極的に行う。</p>

<p>者間が率直に意見を出し合う機会を設けるなど、一層の体制上・運営上の工夫が必要である。</p>	<p>【フォローアップ状況】 平成26年度に運営委員会を2回開催し、各委員と情報共有を行うとともに、プロジェクトの推進にあたり助言をいただいている。実施責任者会合を定期的で開催するとともに、分野3成果報告会を通じて研究者間の意見交換を行った。平成28年1月28日に開催した最終成果報告会には、作業部会委員及び運営委員を招聘し、本事業の成果について議論を行った。今後も継続して、情報交換の場を積極的に設けるなどして、委員・研究者間の意見交換を促す。</p>
<p>「京」の有効活用が必ずしも十分ではないことが懸念点である。本プログラムも後半に入り、戦略目標の達成に向けて研究開発の加速が求められる一方で、各課題で大規模計算が増えて今以上に計算時間が確保しづらくなることが想定される中では、「京」以外の計算機の活用も進める必要がある。</p>	<p>【平成26年2月時点】 分野3の研究者は、地球シミュレータをはじめ、他の大学等の大型計算機も積極的に利用しており、今後も積極的な活用を予定している。例えば、「超高精度メソスケール気象予測の実証」では、東京大学大型計算機センターのFX10や、JAMSTEC横浜研に設置したPCクラスタなどを活用している。</p> <p>【フォローアップ状況】 分野3の研究者は、地球シミュレータをはじめ大学等の大型計算機も積極的に利用しており、今後も積極的な活用を予定している。</p>
<p>課題の統合も含めて計算資源を大胆に傾斜配分すること、課題間の進捗に優先順位を付けて実計算時間を有効利用することなども検討する必要がある。</p>	<p>【平成26年2月時点】 これまでの利用実績や計画の進捗状況を考慮し、提供される計算資源を最大限活用できるように配分を決めている。平成26年度は「地球規模の気候・環境変動予測に関する研究」、「超高精度メソスケール気象予測の実証」を重点課題としている。</p> <p>【フォローアップ状況】 これまでの利用実績や計画の進捗状況を考慮し、提供される計算資源を最大限活用できるように配分を決めている。平成26年度は「地球規模の気候・環境変動予測に関する研究」、「超高精度メソスケール気象予測の実証」を重点課題とし、重点課題追加配分枠を得たほか、下期には戦略プログラム加速枠を取得している。</p> <p>さらに、「都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究」が、平成26年度下期において、ゴードンベル賞を目指すための計算資源追加配分を取得している。</p>
<p>中間評価指摘事項 (戦略プログラム推進委員会)</p>	<p>対応</p>
<p>【必要性】 統括責任者等の更なるリーダーシップの</p>	<p>「気象・気候」分野については、雲のモデル化が共通テーマであり、それに関する連携を進めきたが、さらに意識して連携を</p>

<p>下に、分野内の連携はもちろんのこと、必要に応じて分野を越えた連携や他の研究開発プロジェクトの活用も図りながら、本質的に新しい現象の解明や真に革新的な技術開発等を通じて、戦略目標の達成や社会的・科学的課題の解決に資する、「京」や本プログラムならではの成果を創出していく必要がある。その際、「京」でなければ成し得ない成果はどの部分か、どこまで超並列化を進めるとどの様な成果が期待できるのか、という視点をこれまで以上に強く意識する必要がある。</p>	<p>強化した。「地震・津波」分野では、各課題が連携して「統合地震シミュレータ」の開発を進めた。</p> <p>(分野内の連携)</p> <p>「全球気候」課題の研究者が「メソ気象」課題の研究会に参加して、発表・議論を行うとともに、2014年9月に開催された国際非静力学ワークショップ等の機会を通じて、連携の可能性を探った。「地震・津波」関係の課題では、各課題が連携して「統合地震シミュレーション」の開発を進めた。2014年8月には分野3全体の成果報告会を開催し、連携を促進した。その後も継続して課題間や分野全体としての連携を図った。</p> <p>(分野を越えた連携)</p> <p>分野4との連携は、定期的に会合を設けて議論を進めた。</p> <p>(他の研究開発プロジェクトの活用)</p> <p>上記のプロジェクトなどに加え、ポスト「京」重点課題とも連携を図った。</p> <p>(「京」ならではの成果)</p> <p>上記の成果のほか、「台風発生 の 2 週間予測が実現可能であることを実証」、「高解像度大気海洋結合モデルにより台風強度の予測精度が大きく向上することを実証」、「地盤の揺れ・地震による建物などの振動の計算により、世界で初めて、地震災害と建物被害を統合した大規模シミュレーションを実現」などの、「京」ならではの成果を創出した。</p>
<p>【必要性】</p> <p>得られた成果の情報発信については、社会に分かりやすく伝えることはもちろんのこと、時には社会の期待や研究者の士気を高めるための大きな目標を示しながら、「京」や本プログラムが社会の「役に立つ」、「役に立った」という国民の実感が得られるようにしていく必要がある。その際、特に、国民の生命・健康や安全・安心に直結する分野については、反動を生みかねない過剰な期待を防ぐため、現在「京」を用いて到達可能な成果とその限界も正確に社会に伝える必要がある。</p>	<p>研究活動と広報活動のバランスに配慮するとともに、成果発表については等身大の発表を心がけた。</p> <p>(安全・安心に直結する分野での過剰な期待)</p> <p>成果報告会、プレスリリース等による社会への成果の発信では、等身大の発表を心がけ、国民に過剰な期待を抱かせないように配慮した。</p> <p>(研究活動と広報活動の両立)</p> <p>研究者の過度の負担にならないよう、研究者の研究活動と広報活動のバランスに配慮しながら成果の発信に取り組んだ。</p>

<p>【有効性】 「京」を用いて予測された結果、あるいは、理解された結果を実証するため、実験系研究者との連携を図りつつ、結果の検証作業も強化していく必要がある。</p>	<p>分野3で研究対象としている「気象・気候」課題や「地震・津波」課題の現象については、初期値の作成や結果の検証に必要なデータが気象庁などによってほぼ整えられており、シミュレーション結果の定量的な評価に活用している。例えば、台風、集中豪雨や竜巻、地震波や津波水位など。また、津波シミュレーションでは東日本大震災の被害状況や映像データとの比較により信頼性を検証している。地震応答シミュレーションについては、E-ディフェンス実験(実際の建物等を載せた振動台での実験)と比較し、結果の信頼性を確認している。</p>
<p>【効率性】 大学・研究機関のスーパーコンピュータ、さらには民間のクラウドサービス等のコンピュータの性能が向上していることも認識し、「京」や本プログラムならではのインパクトのある成果を迅速に創出する観点に立って、本プログラムに割り当てられた「京」の計算資源をこれまで以上に重点的に配分するとともに、「京」以外の計算資源の更なる有効活用を図る必要がある。</p>	<p>それまでの利用実績や計画の進捗状況を考慮し、提供される計算資源を最大限活用できるように配分を決めた。分野3の研究者は、地球シミュレータをはじめ、他の大学等の大型計算機も積極的に利用してきており、引き続き積極的に活用した。</p> <p>(計算資源の重点的な配分)</p> <p>それまでの利用実績や計画の進捗状況を考慮し、提供される計算資源を最大限活用できるように配分を決めている。平成26・27年度は「全球気候」課題と「メソ気象」課題を重点課題として設定した。平成26年度は、これらの課題で重点課題追加配分枠を得たほか、下期には戦略プログラム加速枠を取得した。さらに、「都市全域」課題が、平成26年度下期において、ゴードンベル賞を目指すための計算資源追加配分を取得した。</p> <p>(「京」以外の計算資源)</p> <p>分野3の研究者は、地球シミュレータをはじめ大学等の大型計算機も積極的に利用してきており、引き続き積極的に活用した。例えば、「メソ気象」課題では、「京」には不向きな多数のジョブステップに分かれるデータ同化システムの開発に、東京大学情報基盤センターのFX10を課題経費で利用した。</p>
<p>行政事業レビュー「公開プロセス」</p>	<p>対応</p>
<p>成果指標の達成度合が不明瞭なため、個々の研究開発目標の評価・分析において工夫すべき</p>	<p>研究分野の性格上、定量的な指標は立てにくいですが、今後は達成度合が分かりやすい評価指標を工夫したい。例えば、数値予測モデルでは、時・空間分解能や予測可能時間に関する目標値を設けるなど。なお、今回の達成度の自己評価では、プロジェクト開始時に立てた、「京」を用いて初めて実現できるブレークスルー的な科学目標がどれだけ達成できたかを重視した。</p>
<p>国民に対し、コストパフォーマンスを含めた事業成果についてわかりやすく表示すること</p>	<p>国民の理解を得るために、随時ホームページを更新し、成果発表会やシンポジウムをたびたび開催して、自然災害による経済的損失に対する防災・減災研究の重要性を示すなど、成</p>

	果の分かりやすい説明を心掛けた。
官と民の適切な役割分担により、民の活力を活用すべき	この分野では、実用化のフェーズに入る前の、基礎的な研究開発の段階では、民間活力の活用は難しい。
ポスト「京」に向け、これまでの課題分析、官民の役割分担、成果を見えるようにして、次の事業展開につなげるべき	<p>「気象・気候」関係の課題分析として、以下の 2 点が挙げられる。</p> <p>(1) 社会的関心が最も高いと考えられる現実問題に挑戦する必要がある。</p> <p>(2) 観測データと学術成果を最大限活用して「人的災害ゼロ」に挑戦する必要がある。</p> <p>これらの課題に対して、以下の事業展開を行う。</p> <p>(1) 予測対象を、気候変化の影響が指摘される豪雨や竜巻など社会的影響が大きく関心が高い現象に集中化し、</p> <p>(2) あらゆる観測データと最先端の予測技術によって、予測精度の向上とリードタイムの長期化の限界に挑む。</p> <p>官民学の役割分担については、主に、最先端の技術研究開発を行う学术界と、頑健で信頼性の高いシステムの実現が求められる現業界(気象庁、建設業界等を含む)からのメンバーによる推進体制を構築し、研究開発の初期段階から、実利用の際の課題と可能性を明確にできるようにする。</p> <p>「地震・津波」関係の課題では、都市の地震災害・被害をシミュレーションで予測する数値解析手法が開発されつつあるが、この数値解析手法を、国・自治体等が利用する仕組みが構築されていない。この仕組みを構築し実用化を図ることが課題である。</p> <p>実用化の具体像は、官が想定した地震に対し、民(コンサルティング産業)が解析を実行、という形である。なお、数値解析手法の開発・維持は学が担う。</p>
行政事業レビュー	対応
「京」の開発・整備に1,000 億円を超える国費が投入されていることに鑑み、投入予算に見合った成果が得られているか、成果を基礎研究面での科学的な成果と、実用的成果とに分けて、国民に分かりやすく説明すべきである。	<p>科学的な成果は、ホームページ、パンフレット、成果報告会などで、折にふれて、国民に向けて説明してきた。</p> <p>「気象・気候」課題で行われている研究開発の多くはフラッグシップ機を用いて初めて実現できる先端的研究であり、そこで得られた科学的知見の実用化には時間がかかる。気象庁のような現業センターで使われているスーパーコンピュータは、5～10 年後にはフラッグシップ機並みの性能となるので、本課題の成果は、将来の実用・応用において大いに活用されるはずである。その点も含めて、今後も国民の理解を得るべく努力する。</p> <p>「地震・津波」課題関係では、特に、南海トラフ地震に関する</p>

	<p>防災研究プロジェクトの地域研究会において、行政等の関係者にシミュレーションの有効性を説明し、地域に特化した課題解決の手段であることを強調している。高知市では、来年度から具体的な津波浸水シミュレーションと避難シミュレーションを実施し、災害時の状況を試算するプロジェクトを予定。その他、DVD を制作し、広く地震津波シミュレーションの有効性をアピールしている。</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

研究開発課題(1)防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究

課題(1-1)地球規模の気候・環境変動予測に関する研究

中間評価指摘事項	対応
<p>今後は、「超高精度メソスケール気象予測の実証」との連携を期待したい。</p> <p>全球 7km モデルによる台風変化予測結果に期待。今年度、特別枠で実施された全球 subkm ランの解析は、メソスケール気象予測課題との連携が期待できるところ。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>メソ気象課題の研究集会で本成果を発表し、連携の方向性について検討中。(2014 年 1 月 7 日 気象庁「高解像度モデルにおける対流の表現に関する検討会」、3 月 7 日のメソ気象研究会に参加)</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>両指摘について、対応案に示したとおり、メソサブ課題の研究会に参加して、発表・議論を行うとともに、2014 年 9 月の国際非静力学ワークショップ等のさまざまな機会を通じて、連携の可能性を探った。また、subkm ランのデータを希望者に提供し、連携研究を促進した。</p> <p>14km, 7km, 3.5km のデータセットを整備し、解像度依存性について解析結果をまとめている。特に、7km モデルについては、10 年分の計算を実施しており、その結果の解析を平成 27 年度に進めた。</p>

課題(1-2)超高精度メソスケール気象予測の実証

中間評価指摘事項	対応
<p>今後は、気象庁の気象予測の質的向上に向けた取組みにも期待したい。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>気象庁開発部門との連絡を密にしていく。戦略プログラムの研究成果について、気象庁数値予報課でのコロキウムでの発表を推奨し、現場開発者との情報交換を促進する。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高解像度大気海洋結合モデルによる台風強度の大規模予測実験について、気象庁予報部数値予報課でコロキウムを実施した。 ・ 分野 3 成果報告会(2014 年 8 月)に気象庁数値予報課長

	<p>が参加した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 気象研究所と気象庁予報部・観測部との研究懇談会(2014年12月)において、戦略メソ課題の研究(2014年8月広島での豪雨実験など)を紹介した。 ・ 気象庁予報部と気象研究所の研究懇談会での本庁要望事項に基づき、局地豪雨事例を対象としたデータ同化比較実験を行った。 ・ 名古屋大学での第5回超高解像度メソスケール気象予測研究会で気象研究所長が挨拶した。 ・ 気象庁長官も出席した平成27年度気象庁施設等研究報告会において、戦略プログラムのメソ課題の成果紹介を行った。
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

研究開発課題(2)地震・津波の予測精度の高度化に関する研究

中間評価指摘事項	対応
<p>全体として、成果を実際の防災・減災にどのように役立てていくかの議論が必ずしも十分ではない。</p>	<p>【平成26年2月時点】</p> <p>これまで個々の課題での成果を、内閣府防災関係や文科省地震調査推進本部の委員会で報告するとともに、地方行政やライフライン事業者等が参加する研究会を行う他、研究プロジェクトと連携して紹介することで、国や地方の防災計画等に活用されてきた。また、防災意識の向上ならびに次世代育成のために、一般向けならびに学校でも成果を紹介している。その際、従来よりも高解像度の計算が可能になったことで、極めて現実感のある可視化画像を紹介することができるようになってきている。</p> <p>今後は、さらに地震課題、津波課題、都市課題の統合解析によって、様々な地震発生シナリオに基づく揺れや津波の遡上評価および建物損壊や津波襲来下の避難最適化の検討等が可能となり、こうした成果も上記のような形で役立てていく。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>地震・津波の予測精度高度化に関する研究課題では、研究成果の社会実装に向けて、具体的に以下の活動を研究と並行して実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 内閣府防災関係会議や文部科学省地震調査推進本部の各種委員会への成果の提供 ・ 文部科学省委託事業「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」において地域防災力の強化の観点で進めている地域研究会(東海・関西・四国・九州)での各種予測・避

	<p>難シミュレーション結果を話題として提供</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 小中高をはじめとする、各種学校で講演することにより防災意識の向上に効果的な情報を提供 ・ 平成 26 年度から開始した SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」に分担機関として参加し、開発された統合地震シミュレーションを使った詳細な地震災害・被害予測情報を提供するシステムの研究開発を進めている。 ・ 平成 26 年度から平行して開始したポスト「京」重点課題では、ポスト「京」を使う数値解析手法の開発とともに、開発された数値解析手法の実用化を研究目標としている。内閣府等を協力機関に招き、実用化を進めている。交通障害・経済活動のシミュレーションを、本研究で開発された統合地震シミュレーションに組み込むことが進められている。 <p>以上のような活動により、地域の具体的防災対策や避難方法の策定に資する活動を進めている。</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

課題(2-1)地震の予測精度の高度化に関する研究

中間評価指摘事項	対応
<p>今後は、得られた結果を整理・分析し、有効活用を促す取組みに期待したい。</p>	<p>【フォローアップ状況】</p> <p>東北地方太平洋沖地震の地震津波同時シミュレーションの結果は、これをグリーン関数とする震源モデル再解析に用いられており、また国土地理院との共同研究では、GEONET 観測網と海底津波観測網のデータを用いた即時震源域推定の模擬データとして活用されている。</p>

課題(2-2)津波の予測精度の高度化に関する研究

中間評価指摘事項	対応
<p>今後は、観測データだけに因らない新たな検証方法に期待したい。なお、「京」の利用率が低いため、利用計画の再検討が必要である。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>リアルタイム予測ならびに高精細予測の両方とも大規模計算への対応が整ったため、平成 26 年度は計画通り使用できる予定である。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>「京」の活用により、大量の小波源についての高計算コスト・高精度の伝播計算を現実的な時間内で実施可能になり、データベースの高精度化が実現に近づいてきた。(4236 ノード使用で約 20 時間→ 南海トラフ沿いの全計算が完了(計算時の最適パラメータ調査のため上記計算の数回実施が必要))。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 津波浸水計算については、仙台市の港湾部を 5m でモデ

	<p>ル化した、2 時間分のシミュレーションを 96 秒で完了。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 非線形分散波理論の超高並列可能な津波計算コードの開発及び現地適用。 ・ 大規模三次元計算による高精度の被害予測の可能性。 ・ 複合的な津波被害像の構築に向けた取組みとして、津波による漂流物、土砂移動、または、構造物との連成計算モデルの精度検証及び現地適用。 ・ 津波課題グループへの平成26年度及び平成 27 年度における割当資源量を順調に利用。
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

課題(2-3)都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究

中間評価指摘事項	対応
<p>今後は、研究成果を実態に近づけていくことや、実利用する方策に期待したい。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>シミュレーション結果の妥当性確認として、E-Defense の RC 橋脚実験の再現と東日本大震災の再現を計画している。どちらも 2014 年度の研究目標である。実利用に関しては、このプロジェクトとは別のプロジェクトを進めている。次の二つが代表である。</p> <p>(1) 理化学研究所 AICS の総合防災・減災研究ユニットでの兵庫県・神戸市での次世代ハザードマップ作成</p> <p>(2) 東京大学地震研究所の全国共同利用による主要都市の地震災害シミュレーション(東工大:東京、新潟大:新潟市、山梨大:甲府市、高知工科大:高知市、香川大:高松市等)</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>妥当性確認に関する二つのシミュレーションの内、E-Defense の鉄筋コンクリート橋脚実験の再現に関しては、解析モデルと解析条件を改良することで、再現精度が大幅に改善した。成果を取りまとめ中である。東日本大震災の再現に関しては、女川地区について地震動推定と構造物応答の計算を実行し、解析モデル等の不確実性も考慮した結果を得ている。成果を取りまとめている。</p> <p>実利用に関しては、対応案で述べた二つのプロジェクトを進めている他、ポスト「京」の重点課題に、「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」が選定された。タイトルが示すように、開発中の地震津波予測システムの実用化も重視した課題であり、内閣府等の協力機関としての参加を特徴としている。</p>
<p>「京」の利用率が低いため、利用計画の再検討が必要である。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>「京」の利用率は、2013 年 10 月以降、劇的に改善したと考えている。2013 年度上期は、重点課題「巨大地震・津波に対する</p>

	<p>大型プラントの安全性評価」を実施するため、大規模解析モデルの構築・改良等に集中した。解析モデルが完成したため、下期は利用が着実以上に進んでいる。地震課題内の調整で、追加の計算資源の配分を受けた。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>「京」の利用率は、2014 年上期の実績として 100% 利用し、2014 年度下期も順調に利用している。2014 年度下期には 200 万ノード時間の追加配分を受けたが、この配分も含めての利用状況である。2015 年度も同様である。本研究には、解析コードを改良することで解析モデルの自由度を拡大し、拡大された解析モデルを高速で計算するよう解析コードを改良する、という研究のサイクルがある。したがって、一定速度で「京」を利用するのではなく、解析モデルの拡大ないし解析コードの改良が一段落すると、集中して「京」を利用する、という利用形態になる。このため、稼働率が低い時期はあったが、全体では順調な稼働率であったと判断している。</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

計算科学技術推進体制構築

中間評価指摘事項	対応
<p>人材育成に関するワーキンググループについては、役割や機能のより一層の明確化が必要である。</p>	<p>【平成 26 年 2 月時点】</p> <p>平成 25 年度中に人材育成 WG の第 1 回会合を設け、今後の人材育成の方針などについて意見交換を行う予定である。平成 26 年度以降も定期的に会合を設け、具体的な方策について検討を行う。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>第 1 回会合(平成 26 年 2 月 26 日)では、中高生の教育環境から若手研究者のキャリアパスまで幅広く意見交換が行われ、「中高生から理系学部への進学が敬遠されている」、「学生がアカデミアでも産業界でも活躍できるような教育が必要」といった点が指摘された。以降の会合においては、本会合の議論を前提にして分野 3 の研究分野に関する問題点に注目して、議論を行うことを確認した。</p> <p>分野 3 成果報告会および、第 7 回運営委員会(平成 26 年 8 月 12 日)においては、外部有識者および人材育成 WG 委員に今後の議論の方向性と委員の増員について説明を行い、承認を得た。同報告会では、「フラッグシップシステムのレベルになると、専門同士をつなぐ人材が必要になってくるが、そういう人材をどう育て、どうキャリアアップしていくのかが大きな問題と思われる。」といった意見が出された。</p>

	<p>第2回会合(平成27年1月23日)では、「実際にプログラムを書ける研究者は貴重であり、そのような研究者をこの研究分野に引き付けることも重要である。」等の分野3の研究分野における人材育成に特有の問題点を明らかにした。</p> <p>第3回会合では、分野3に参画している若手研究者のキャリアパスや、「京」の利用状況等から、今後の人材育成の方針について具体的な検討を行った。</p> <p>これまでの議論をまとめ、報告をとりまとめている。</p>
<p>今後は、防災・減災に対する世間の注目の高さを踏まえ、過去の震災の教訓を活用するような・分かるような形で世界へ情報発信していく必要がある。</p>	<p>【平成26年2月時点】</p> <p>平成26年度以降も、SC14などの国際的な展示会において研究成果の発信を行うと共に、分野3ホームページ英語版をより充実させ、国際的な情報発信を積極的に行う。</p> <p>【フォローアップ状況】</p> <p>分野3ウェブサイト(英語版)をリニューアルし、ISC'14、ISC'15、SC14、SC15では理研AICSやRISTブース等においてポスター展示を行った。</p> <p>また、積極的にプレスリリースを行うことによって研究成果を分かりやすく発信した。</p>

④研究開発成果(平成 28 年 2 月 1 日時点)

研究開発課題(1)防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究

課題(1-1)地球規模の気候・環境変動予測に関する研究

i. 地球温暖化に伴う将来の台風変化予測

[概要]

雲のふるまいを精緻に計算できる全球 14 km メッシュの雲解像モデル NICAM を用いて、30 年に及ぶ温暖化に伴う台風変化予測の計算を世界で初めて行った。モデルは現在気候における台風の発生数、移動経路、強度などの統計量を高い精度で再現しただけでなく、これまでモデルが粗く、調査することが難しかった台風の中心付近の構造までも詳細に表現できていることがわかった。

将来気候においては、台風の発生数が減少するものの、強い台風の発生数が増加し、台風の最大強度も増加する。また台風に伴う降水量が増加することも示された。さらに、中心付近の台風の構造が変化することにより、現在の台風よりもより広い範囲で強風が吹くことが示された。

従来型モデルでは積乱雲を直接計算しない代わりに、積乱雲の効果を粗いモデルでも表現できる物理量から見積もる、パラメタリゼーションと呼ばれる手法が用いられている。この手法は現在気候において気候場をよく再現するように調整されているため、同様の手法を温暖化環境で用いることに不確実性があった。我々のシミュレーションはこの問題を払拭した世界で初めてのものである。地球シミュレータでは、14 km メッシュの全球雲解像モデルを用いて、数カ月の地球温暖化シミュレーションしか行うことができなかったが、「京」を用いることによって 30 年におよぶ地球温暖化シミュレーションを行うことができた。その結果、台風の発生数が減少するものの、強い台風の発生数が増加し、台風の最大強度も増加する。また台風に伴う降水量が増加することがわかった。これらの結果は、積乱雲の振舞いを直接計算できない従来型の気候モデルで得られた結果と整合的である。前述のように、今回の計算は積乱雲を直接計算しており、それでもなお同様の傾向が予測されたということは科学的に大きな進歩である。さらに、本研究課題で用いたモデルは台風の構造を表現するのに十分な解像度である。解析の結果、地球温暖化に伴い、中心付近の積乱雲群である目の壁雲が、高い高度にまで到達するようになることが明らかになった。この構造変化により、中心気圧が 980 hPa 以下の強い台風では、中心から 50-70 km における風速が弱まるものの、70 km より外側では風速が強まること示された。半径が大きいほど、面積が大きいことを考慮すると、このことは地球温暖化により、強い台風ではより広い範囲で強風が吹くことを示している。

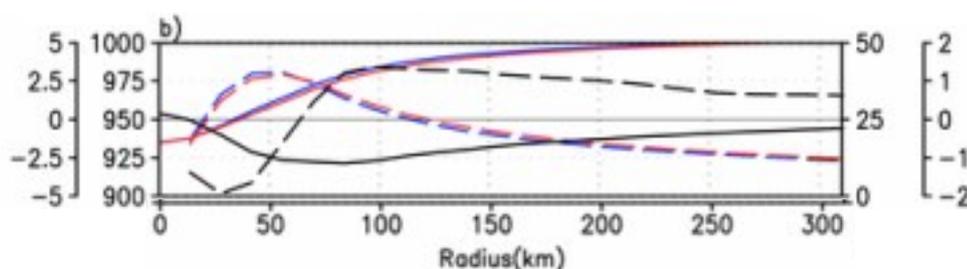


図 1: 強度(最低中心気圧; MSLP)で分類した熱帯低気圧を方位角平均した海面更正気圧[hPa](実線)と 10 m 高度の接線風速[ms⁻¹](破線)のコンポジットの半径分布を示す。青線は AMIP 型実験、赤線は温暖化実験、黒線は両者の差(温暖化-AMIP 型)を示す。スペースの都合で 920 ≤ MSLP [hPa] < 945 の例を示す。横軸は半径[km]を示し、0 は熱帯低気圧の中心を示す。左の縦軸は海面更正気圧[hPa]を右の縦軸は 10 m 高度の接線風速を示す。それぞれの外側の縦軸は AMIP 型実験からの温暖化実験の差を示す。

ii. 延長予報

[概要]

主に 14 km メッシュの全球雲解像モデルを用いて、2003 年以降の約 20 の MJO 事例と 2004 年と 2007–2012 年の約 20 の台風発生事例について、様々な初期時刻から多数の計算を行った。その結果、MJO については約 1 ヶ月先、台風発生については約 2 週間先まで予測可能であることが実証された。これらの予測スキルは世界最高レベルである。

これまでの全球雲解像モデル NICAM を用いた MJO・台風研究は、ケーススタディーに限定されており、統計的に有効な予測スキルを示すための多数の計算は、計算資源の制約上困難であった。今回の実験では、「京」の豊富な計算資源を活用することにより、全球雲解像モデルとして世界で初めて MJO と台風発生の予報スキルを計測することに成功した。

NICAM による有効な MJO 予測期間は、世界で標準的に用いられている評価手法 (Gottschalck et al., 2013) を用いて 27 日と診断された。現在、一般的には概ね 2 週間を超える有効な予報期間を持つ全球モデルは MJO の再現性能が優れていると見なされており、3 週間を超える有効な MJO 予報期間を有すると認知されているのはヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) のモデルのみである。今回の結果は NICAM の MJO 予測可能期間が、世界 1 位と同等かそれ以上であることを示唆している (図 2)。熱帯域の降水予測の延長が可能となるのみならず、MJO の動向により影響を受けることが知られている中緯度についても予測可能期間の延長が見込まれる。

台風発生についても 2004 年と 2007 年から 2012 年の多数の事例について計算を行った。従来、台風発生をモデルで予測することは困難であり、その予測スキルを計る方法はなかったが、本研究でその方法を開発した (Nakano et al., 2015)。その結果 2004 年 8 月後半に発生した台風については、4 個すべて、2007–2012 年 8 月後半に発生した台風については 13 個中 7 個の台風発生が 2 週間前から予測可能であることが示された。

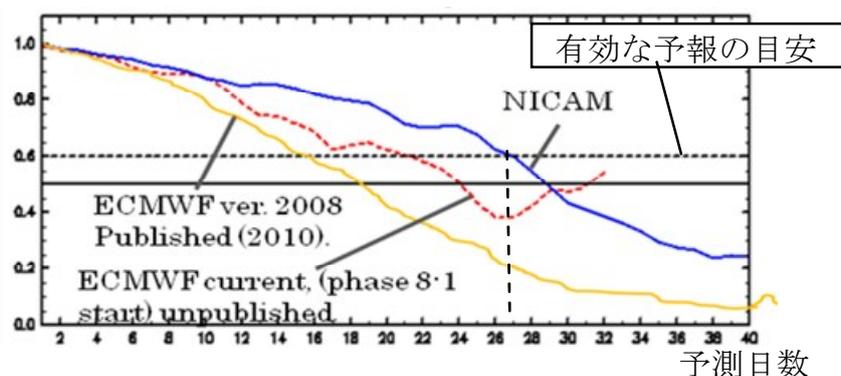


図 2: MJO 予測スコアの比較

iii. 全球 sun-km ラン

[概要]

「京」の 4 分の 1 に当たる 20,480 ノードを用いて、全球 14–0.87 km メッシュの雲解像モデルによる計算を実行し、個々の積乱雲の振舞いを解像するには、解像度が 2 km よりも細かい必要があることを明らかにした。また、熱帯域の MJO、台風、中高緯度の低気圧、前線に伴う積乱雲の構造を解析し、全球雲解像モデルがそれぞれに特徴的な構造を同時に直接計算できるモデルであることを世界に先駆けて示した。

全球 14–0.87 km メッシュの雲解像モデルによる計算により、水平解像度が 2 km よりも高い計算では対流活動が複数の格子で表現されることが明らかになった。このことはモデルが個々の積乱雲に伴う対流を解像できていることを示している。対流を十分に解像できている 0.87 km 計算の結果を、地球上の様々な気象擾乱に伴う積乱雲について解析した。その結果 MJO では熱的に不安定な大気中に対流が生じているのに対し、台風では大気の大きな質量収束によって対流が起こっていることがわかった。これらの擾乱は熱帯で発生するが、中高緯度における低気圧や前線に伴う対流は、熱帯の MJO や台風の対流よりも背が低いことも明らかになった (図 3)。

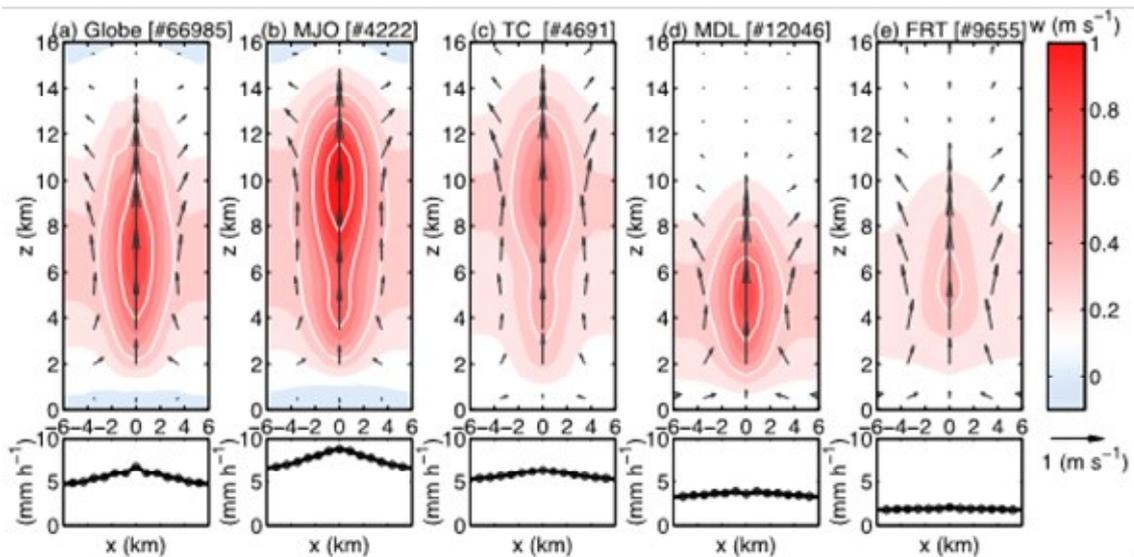


図 3: (上)各雲擾乱中で抽出された全ての対流で合成した半径–鉛直断面図(陰影:鉛直速度、矢印:動径・鉛直方向速度)。Globe は地球大気全体、TC は台風、MDL は温帯低気圧、FRT は前線を表す。括弧内は対流の個数である。(下)降水量の半径分布。(Miyamoto et al., 2015)。

iv. 地球変動予測アプリケーションパッケージの開発

[概要]

次世代の地球変動予測アプリケーション開発の基盤となる、カプラーJcup を設計し実装した。NICAM の力学コア部分を切り出し、NICAM-DC として BSD2 条項ライセンスで公開した。アプリケーションパッケージを組み合わせ、大気環境予測システムならびに超高解像度大気海洋結合モデルの開発を行った。

地球変動予測モデル開発の効率化という観点から、要素・過程モデルの連成を容易にする汎用カプラーに基づくモデル開発プラットフォームを構築し、それを適用した実例として大気環境変動予測と大気海洋結合系変動予測に関するアプリケーションの構築とシミュレーションを行うことを目的とした。

汎用カプラーは実用に堪えるものが完成した。「京」をはじめとする大規模並列計算機に対応しており、シンプルな物理計算 (3次元熱伝導方程式) による性能評価では数千並列まで良好なスケーラビリティを示している。大気環境変動予測に関しては、全球化学輸送モデルに対するデータ同化システムを開発して高並列計算向けの最適化を行った上で、窒素酸化物などの大気中化学物質の分布について人工衛星観測データを同化したデータセットを作成した。作成されたデータセットはデータ同化を用いないものとは大きく異なり、従来の統計に基づく地表面放出量の推定が十分に現実的ではないこと

や、既存の化学モデルに大きな改善の余地があることが示された。大気海洋結合系変動予測については、大気力学コアの比較実験、および超高解像度大気海洋結合モデルによる気候実験を「京」で実施した。大気力学コアに関しては、高並列計算で効率が著しく低下する従来のスペクトル法に対して、正 20 面体格子・陰陽格子・二重フーリエ級数スペクトル法の 3 種類を開発し評価した。いずれの力学コアでも従来と同様の精度が実現できるとともに、高並列実行まで高いスケーラビリティを保持することが確認された。超高解像度大気海洋結合モデルでは、海洋フロント構造の再現性向上がモデル気候場に及ぼす影響について評価した。海洋モデルの水平格子間隔を 0.1° まで細かくした結果、特に西岸境界流を中心とした領域での海洋フロント構造の再現性が格段に向上し、それに伴ってフロント上に強い降水帯が表現されるなど、モデル気候場の向上が示された (図 4)。

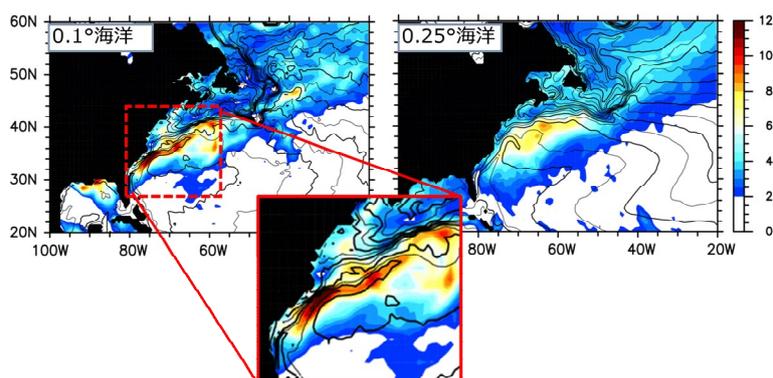


図 4 大気海洋結合モデルでシミュレートされたメキシコ湾流域における海面水温(等値線)と降水強度(色)

課題(1-2)超高精度メソスケール気象予測の実証

領域雲解像4次元データ同化技術の開発、領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証、高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究、の三つの目標に沿って研究開発を進めた。

i.「領域雲解像4次元データ同化技術の開発」

雲解像データ同化システムの開発として、気象庁非静力学モデル(NHM)に基づく局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(NHM-LETKF)のネストシステム、NHMによるアンサンブル変分法(NHM-EnVar)システム、雲解像モデルCReSSによるハイブリッドデータ同化(CReSS-Hybrid)システムの開発、カルマンフィルタによるマルチスケールデータ同化法の検討、粒子フィルタによるデータ同化システムの開発などを行った。またNHMによる4次元変分法と気象庁の現業非静力学4次元変分法の結合システムの開発、および予報誤差共分散にアンサンブル予報による予報誤差を用いるハイブリッド手法の開発を始めた。2012年5月6日につくば市など関東地方に発生した竜巻の事例について、LETKFネストシステム(図1)による同化実験を行い、水平格子間隔1.875kmの実験において竜巻の親雲に相当するメソ対流系の再現に成功した。水平格子間隔350mのダウンスケール実験において、観測された三つの竜巻に対応して3カ所で強い鉛直渦度が出現する可能性が示された。また、「京」を用いた水平格子間隔50mの実験では、竜巻に対応する非常に強い渦も再現された(図2)。

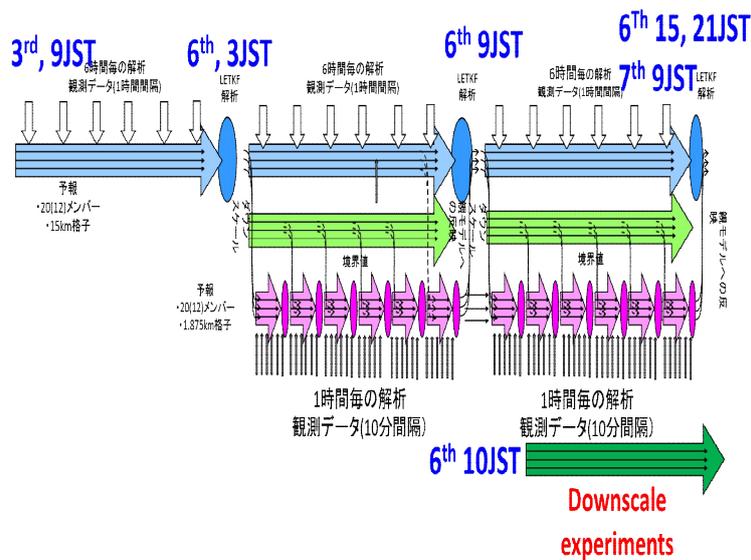


図1 LETKFネストシステムの模式図

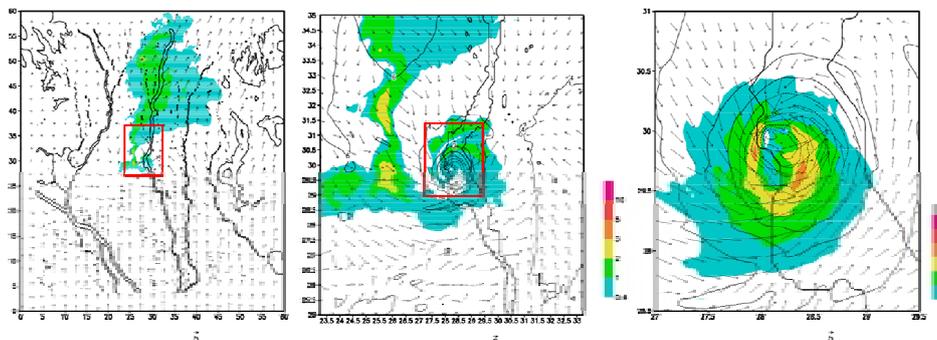


図2 2012年5月のつくば竜巻の再現実験。格子間隔50mのダウンスケール実験で得られた、アンサンブルメンバー004の降水域と水平風分布。(b)と(c)は(a)の拡大図。(c)は水平風速を示す。

「京」の計算資源を活用して、後述するように世界で初めて 1,000 メンバーという多数のアンサンブルメンバー数を用いたカルマンフィルタ同化実験を行い、サンプリングエラーを減少させるために必要なメンバー数についての科学的知見を得た。局所アンサンブル変換カルマンフィルタ、アンサンブル変分同化法、ハイブリッド 4 次元変分法についての実事例を用いた比較実験を行った。第一目標の目標担当者でもある露木義による「最も確からしい状態の決定論予測可能性と変分法データ同化の再定式化」は、4 次元データ同化技術の開発に重要な知見をもたらした成果として高く評価され、日本気象学会の気象集誌論文賞を受賞した。

ii. 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証

「京」への移植作業を進めていたメソスケール LETKF のベースシステムが一定程度完成した。また、雲解像度アンサンブル解析予報の検証として、2012 年の九州北部豪雨や新潟福島豪雨、台風第 15 号に LETKF を適用し、アンサンブル手法に基づく確率予測の有用性等を示した。図 3 は 2012 年 7 月 12 日 0000UTC における気象庁現業解析 (JNoVA) と LETKF で得られた解析値から予報した前 3 時間積算雨量である。観測値から作成された解析雨量 (c) と比較すると、JNoVA 解析を用いた予報 (a) では九州の南に降水帯が表現され、また瀬戸内海付近にも偽の降水が見られた。一方で LETKF 解析を用いた「京」による予報 (b) では、降水の位置、強度ともに改善がみられた。「京」を用いて得られた 3 時間降水量が 50 mm を超える確率分布を図 4 に示す。予報のリードタイムが短いほど、確率分布は観測の降水分布に近づいていき、より確度の高い情報となっている。24 時間予報(c)で既に 50 %程度の確率で豪雨が予測されており、顕著事例に対する確率予測へのアンサンブル予測の有用性を示している。

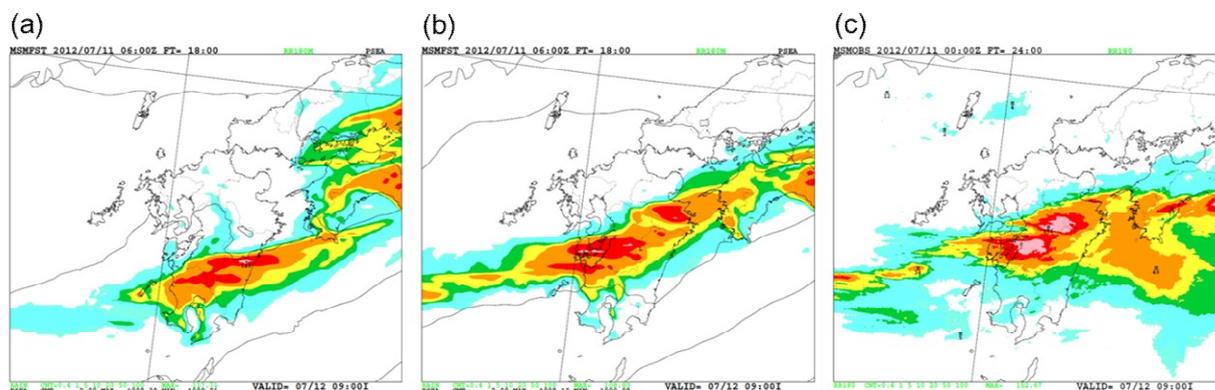


図3 2012年7月の九州北部豪雨の予測実験。(a)はJNoVA,(b)はLETKFによる解析を初期値とした水平解像度5kmのNHMによる前3時間積算雨量(mm)。2012年7月11日0600UTCを初期時刻とした18時間予報。(c)は(a),(b)と同じ対象時刻の前3時間積算解析雨量(mm)。

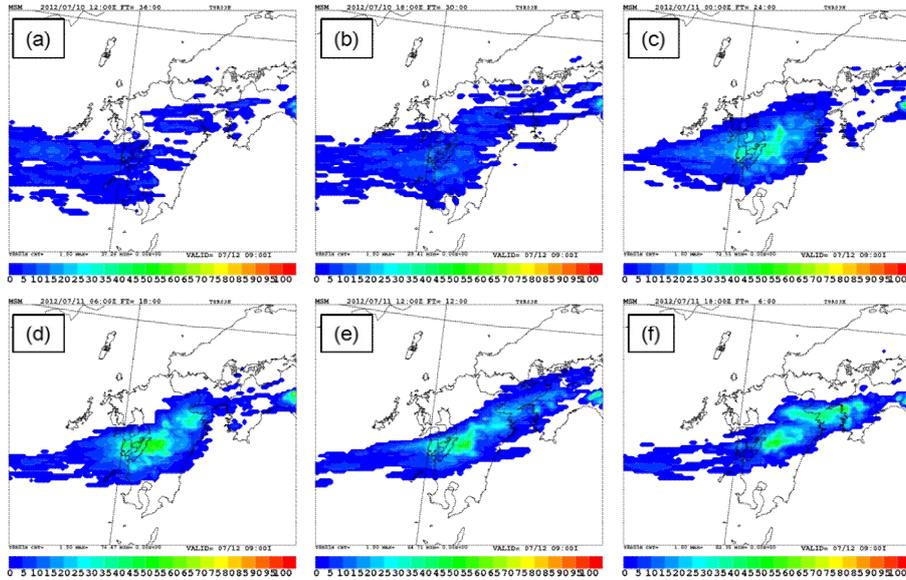


図4 2012年7月の九州北部豪雨の予測実験。前3時間積算雨量が50 mmを超える確率分布。対象時刻は2012年7月12日0000UTC。予報時間はそれぞれ、(a)36時間、(b)30時間、(c)24時間、(d)18時間、(e)12時間、(f)6時間。

高解像アンサンブル気象予報を用いたアンサンブル洪水予測として、笠堀ダム流域を対象として、アンサンブル予報の水平解像度が洪水予測に与える影響を調べた。また、格子間隔10mのビル解像モデルDS3について、LETKFで得られた局地解析からネストしてさらに高解像度の解析値を得るシステムの開発を進めるとともに、「京」に移植する準備を進めた。データ同化と予報実験の核となっているNHMについて、業務委託による最適化を進め、改良前に比べ予報計算での「京」での実行時間を30%短縮するとともに、実行効率と経過時間に与える影響を分析した。

最適化された計算コードを用いて、2013年の伊豆大島や2014年の広島での豪雨事例を対象とする250m解像度の広領域再現予測実験を行った。この二つの事例は、総観場や豪雨の空間スケールなどに大きな違いがあり、前者は台風接近に伴う前線付近の降水バンド、後者は明瞭な総観スケールの擾乱を伴わないバックビルディング形成による線状降水帯であった。これらの豪雨を数値予報で予測するために必要なモデルの解像度や領域について調べ、いずれのケースでも水平格子間隔を500mにまで高めると予測される降水の位置や強度が大きく改善すること、境界層の扱いや現象のスケールに見合った解像度が重要であることなどを示した。

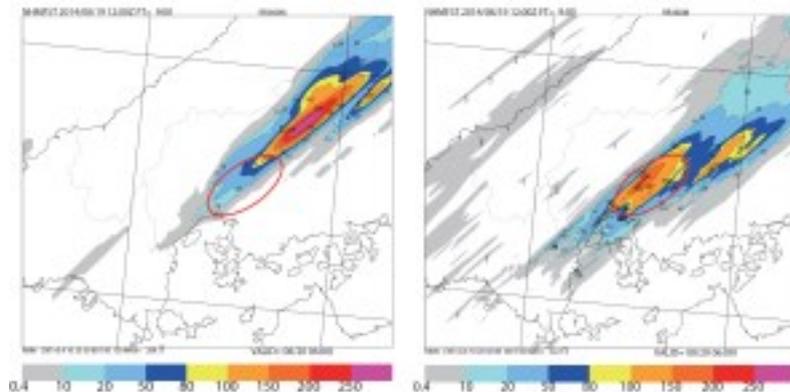


図5 2014年の広島での土石流災害の豪雨事例に対する超高解像度実験。8月20日6時の前6時間積算雨量の分布。左)水平解像度2 km、右)水平解像度250 m。

iii. 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

深い対流システムの超高解像度シミュレーションとして、2012年5月6日に発生したつくば竜巻の事例について、NHMによる水平格子間隔10mの数値実験を実施し、竜巻渦の多重渦への変化や詳細構造について詳しく解析した(図6)。

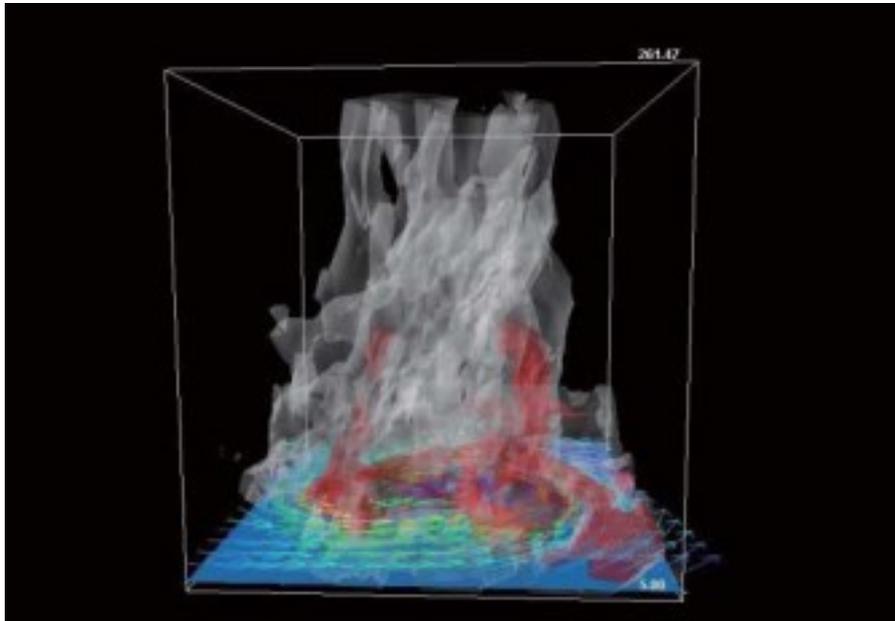


図6 2012年5月つくばでの竜巻についての、水平格子間隔10mの再現実験による竜巻の詳細構造。

また地域気候モデルの高度化を図るため、格子間隔を2kmに高解像度化したモデルにより、長期積分を実施し、降水量の再現精度の向上を確認した。さらに全球雲解像度モデルNICAMの領域対応版DiamondNICAMの側面境界条件を改良し、積雲対流の再現精度の向上を実現した。従来のベクトル機向けラージ・エディ・シミュレーション(LES)コードを基にスカラー超並列機向けの並列化とチューニングを行い、数100ノードまでのスケーラビリティと高い実効性能を達成するコードを開発した。また湿潤対流のLESにより熱帯海上の積雲対流の挙動について、観測との比較を行った。多次元ビン法雲微物理モデルと複数のバルク法モデルとで、同条件で断熱空気塊上昇実験を行い、両者の結果を比較するとともに、ビン法雲微物理モデルを組み込んだ計算結果を用いて、効率的で精度のよいバルク法の開発を進めた。

研究開発課題(2)地震・津波の予測精度の高度化に関する研究

課題(2-1)地震の予測精度の高度化に関する研究

南海トラフ地震等の海溝型巨大地震の発生と、それに伴う強震動・地殻変動・津波の高精度予測に向け、①地震発生予測シミュレーション、②地下構造推定シミュレーション、③地震波伝播・強震動予測シミュレーション、の三つ要素シミュレーションの高精度モデルを整備し、「京」の高い性能を引き出すための性能チューニングを実施して、数万 CPU を用いた大規模・高性能シミュレーションを開発した。これにより、従来の地球シミュレータによる計算に比べて、計算規模が 50 倍、分解能が 2.6 倍の高精度シミュレーションが実用化した。「京」の高い計算性能を背景に、上記三つの地震シミュレーション要素モデルを結合して、それぞれの予測結果を入力として連成し、地震発生～地震波伝播～強震動・長周期地震動の発生の連成シミュレーションに初めて成功した。「京」を用いて南海トラフ地震の強震動・長周期地震動、地殻変動、そして津波発生の予測シミュレーションを実施し、国の中央防災会議や文科省地震調査研究推進本部に成果を提供した。

i. 地震シミュレーションコードの「京」実装、性能チューニング

地震動シミュレーションコード (SEISM3D) の「京」向け性能チューニングを実施し、19.1% の高い実効性能と 99.999% 以上の並列性能を得、「京」のフルノード計算によって 2.1 PFLOPS の演算性能を達成した (図 1)。平行して、ポスト「京」等の今後の計算機環境の変化を見据え、高メモリバンド幅 (B/F) を必要としない、「省メモリコード」の開発も進めた。本コードを「京」に実装して 26% の実効性能を得ると共に、地球シミュレータや PC クラスタ等でも高い性能が得られる一般性を確認した。

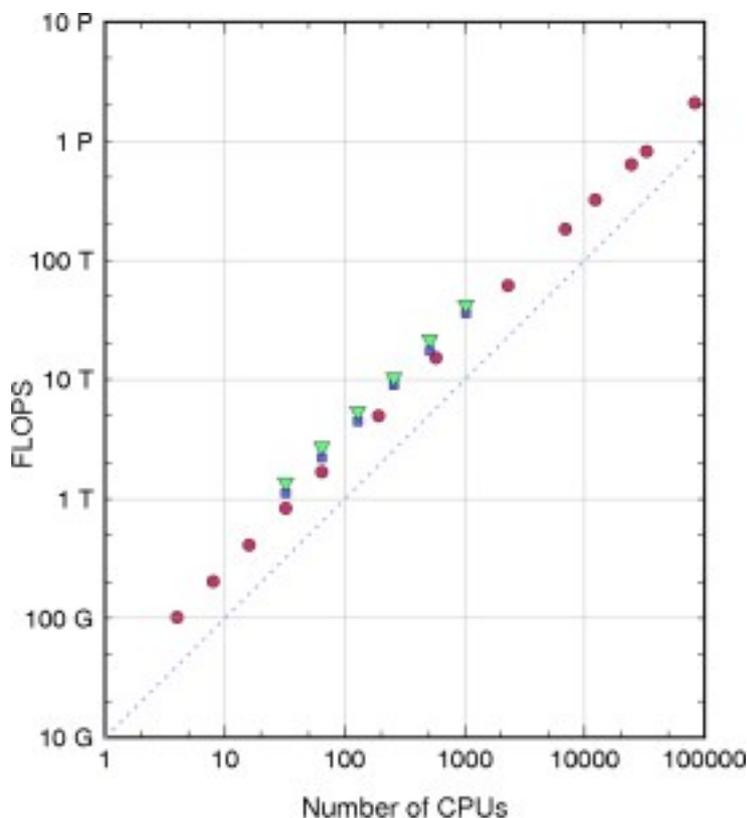


図 1 地震動シミュレーションコード(SEISM3D)の並列計算性能(Weak scaling)評価。

「京」(○)と地球シミュレータ(▽および□)との比較

地震発生サイクルシミュレーションコード (RSGDX) については、境界積分方程式法に基づく計算手法の改良を図り、積分核（密行列）を前処理で圧縮化することで、「京」での演算時間を 1/10 程度に短縮することに成功した。メモリを大幅に削減できた結果、異なる初期条件の下で数百の地震発生シナリオの同時評価が可能となり、不確定性の高い現実的な地震評価に向け大きく前進した。「京」における高並列チューニングを進め、8,192 ノード使用時に 18.7 倍の性能向上を達成した (Ando et al., 2016)。

地下構造推定シミュレーション (SPECFEM3D) では、Spectral Element 法に基づく計算手法の性能チューニングを進め、「京」の 12,288 ノードで 19% の実効性能を得た。関東平野の堆積層構造推定に適用し、関東周辺で発生した 140 個の地震に対する、広帯域地震観測網 (F-net) の 20 地点の地震計データの逆解析 (インバージョン) により、周期 5 秒程度までの地震動を高精度に評価可能な地下構造モデルを整備した。

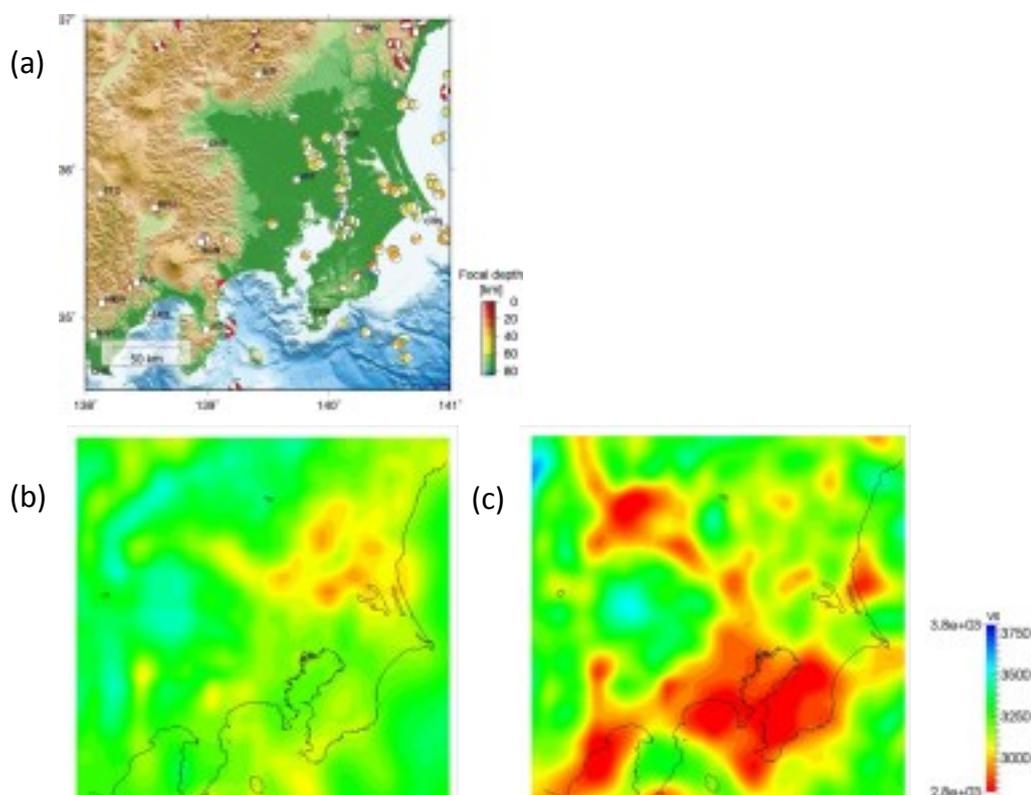


図 2 インバージョン解析により得られた、関東平野の S 波速度構造モデル。(a) 解析に用いた震源 (○) と観測点 (□)、(b) 初期地下構造モデル (深さ 5 km の S 波速度断面)、(c) 7 回の反復解析後の速度構造モデル。

ii. 東北地方太平洋沖地震の再現計算 (地震津波同時シミュレーション)

2011 年東北地方太平洋沖地震の地震断層運動と強い揺れと津波の生成、そして被害の原因を探るために、地震が引き起こす強い揺れ、地殻変動、そして津波を一度に評価することのできる、「地震津波同時シミュレーション法 (Maeda and Furumura, 2012)」を開発した。東北地方太平洋沖地震の強震動、地殻変動、津波の再現計算を行い、日本列島の強震観測網 (K-NET、KiK-net) 記録との一致からモデルの有効性を確認した。釜石沖の海底ケーブル津波計データとの比較から、海溝軸付近の浅部プレート境界での超大すべり (> 50 m) が巨大津波の発生原因であることを再確認し、また深海に地震波エネルギーの一部が閉じ込められた結果、陸地の地震動が弱められたことを初めて発見した (Maeda et al., 2013)。

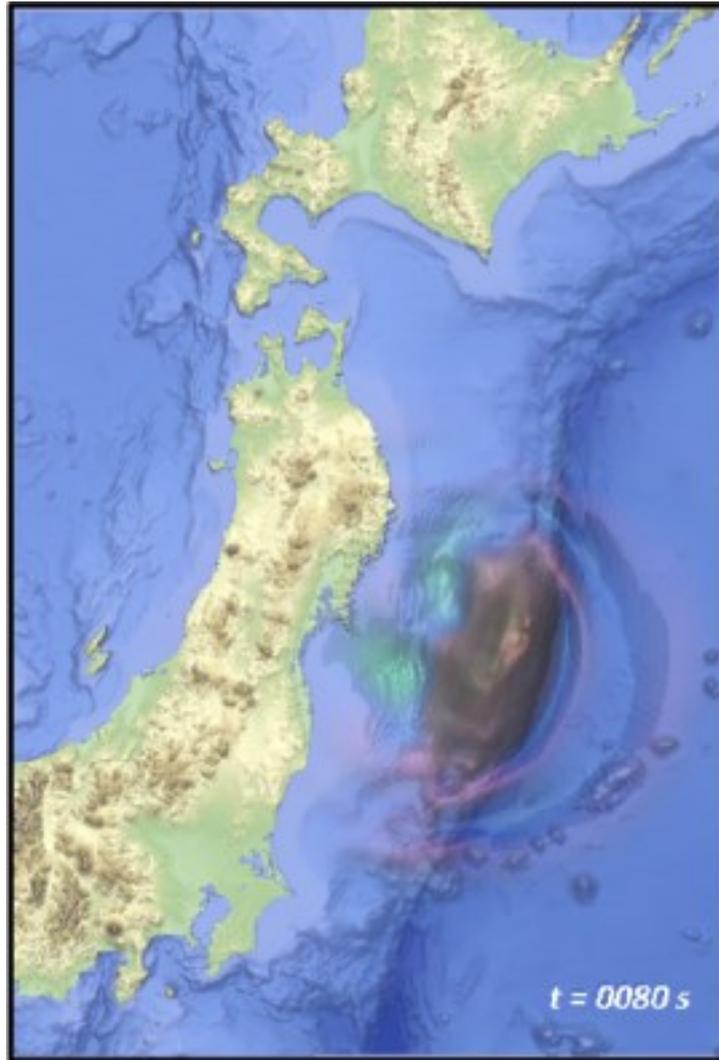


図 3 東北地方太平洋沖地震の地震津波同時シミュレーション。東北沖の震源域から強い揺れが広がり、震源域直上で地殻変動と津波が発生する様子(地震から 80 秒後)。

iii. 南海トラフ巨大地震の地震動予測シミュレーション

南海トラフ沿いで発生が危惧される巨大地震による強震動・長周期地震動と津波の高精度評価に向け、地震発生予測シミュレーション、地下構造推定シミュレーション、地震波伝播・強震動予測シミュレーション、を連成した大規模シミュレーションを実施した。シミュレーションにより評価された多様な地震発生シナリオの中には、マグニチュードと震源域がほぼ等しい地震であっても、断層すべりの動的特性により、1) 強震動と津波を伴う(通常の)地震、2) 強震動が弱い津波地震、3) 強震動・津波ともに発生しないスロー地震、の 3 つが生じる過程が確認された。断層破壊伝播速度が遅く、津波速度に近づいた場合には、破壊電波法港に津波が集まり高く増幅する現象も確認された。こうして、南海トラフ地震の多様性を考慮した、現実的な強震動・津波ハザード評価が可能になった。求められた強震動と津波の予測結果は、地震の不確定性に伴う予測のバラツキとともに津波の浸水シミュレーションや建物振動シミュレーションなど、被害予測シミュレーションに繋げた。

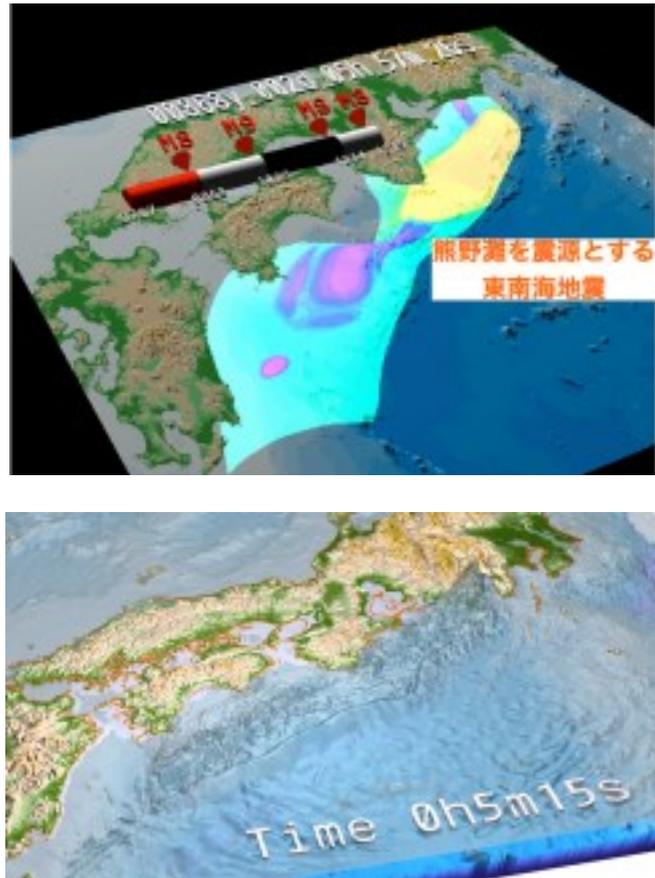


図4 地震発生サイクルシミュレーションによる南海トラフでの地震サイクルシミュレーション結果（上）、およびこれを入力とした地震動、地殻変動、津波同時シミュレーション結果（下）（地震発生から5分15秒後の海面変動）。

課題(2-2)津波の予測精度の高度化に関する研究

リアルタイム波源推定に関しては、海域での津波観測値を用いた近地津波の波源に関するリアルタイム解析手法の開発を進めるとともに、並行して沖合津波波形の予測手法の改良・高精度化を進めてきた。津波ハザード予測に関しては、理論津波波形のデータベースを作成しながら、津波の伝播および浸水計算を高速・高精度に解析するための計算モデルの高度化を図った。例として、2次元計算モデル JAGURS では、遠地津波の到達時間遅れを再現することに成功した。また、従来の津波浸水計算モデル TUNAMI-N2 を「京」に移植し最適化を実施することにより、リアルタイム浸水計算の実現可能性が益々高まった。さらに、津波複合被害の予測に関しては、建物被害の予測や漂流物の移動予測モデルを検討するとともに、津波土砂移動による侵食・堆積に伴う地形変化を予測・再現する計算モデルの高度化を実施し、地震時の津波複合災害の予測について検討した。防災・減災システムの総合化に関しては、構造・流体連成解析プログラムを構築するとともに、津波による複合的な被害への対応として、漂流物の移動や衝突、土砂移動による侵食・堆積に伴う地形変動などを高精度に予測する手法(統合モデル)を開発した。以下が、得られた主な結果である。

i. 広域かつ詳細な津波シミュレーション

太平洋に伝搬した 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の津波は、太平洋に展開した DART ブイの海底水圧計によって高品質なデータが取得された。このデータと線形長波理論モデルの比較から、これまでの検潮記録との比較では確認することができなかった長波モデルの不完全さが露呈した。それらは、遠地においては津波の到着がシミュレーションでは最大 15 分ほど早いという点と、観測では明らかに見られた第一波の押し波の前の引き波が再現できないという 2 点である。その後の研究により、これらの不一致は津波荷重による地球の弾性変形と海水の圧縮性を考慮すると解決すると指摘され、さらに、Allgeyer and Cummins (2014) は、この二つの効果を実地形を用いた差分計算に取り入れる計算コードを開発し、2011 年東北地震津波の遠地記録の再現シミュレーションにおいて、その再現性が向上することを示した。しかし、遠地津波では短波長側の分散現象が無視できない。2014 年度までに開発してきたコードではこの分散現象を扱うことができる。本研究では地球の弾性と海水の圧縮性の効果を、これまで開発してきた分散波モデルに導入し、太平洋全体の広域な津波シミュレーションの精度の向上を試みた。

図 1 は、比較的震源に近い地点(DART21418)、ハワイ付近(DART51407)、チリ付近(DART32401)における観測波形(黒)と計算波形(赤)の比較である。計算波形は、各観測点に線形長波モデル(図 3 a-c)、地殻の弾性・水の圧縮性を含む線形長波モデル(図 1 d-f, Allgeyer and Cummins, 2014)、地殻の弾性・水の圧縮性を含む線形分散波モデル(図 1 g-l、本研究)の 3 パターンを示した。

震源近く(DART21418)では、分散を考慮しないケース(図 1 a, d)では第一波の振幅が観測値よりも大きいものに対して、分散を考慮したケース(図 1 g)では、それをほぼ再現している。また、二つの矢印うち左側のもので示した最大波の前の小さな押し波が、分散有ではなだらかになっていることが確認できる。もう一方の矢印で示した最大波の後の後続波に見られる短波長成分も、分散ありのケース(図 1 g)ではよく再現できていることがわかる。一方、a と b の計算波形の間の違いはほとんどなく、この観測点では地殻の弾性や水の圧縮性の効果は明瞭ではない。

ハワイ付近(DART51407)の図 1 b と図 1 e の比較から、地球の弾性の効果と、海水の圧縮性の効果が、やや遅い津波の到着と第一波の押しの前の小さな引き波に現れている。これはすでに Allgeyer and Cummins (2014) で指摘されたものである。分散理論と合わせて解いた図 1 h では、図 1 e の

短波長成分が分散の効果で消え、観測波形の再現性はかなり向上した。

チリ近海 (DART32401) では、各効果の寄与がよりはっきりと確認できる。地殻の弾性の効果と水の圧縮性を入れることで (図 1 f)、到着時刻が遅れ、最初に引き波が生じる。分散波理論とともに扱うことにより、かなり観測波形に近づくようになる (図 1 i)。

以上のように、線形長波モデルよりも、地殻の弾性と海水の圧縮性の効果を考慮した方が、さらには、分散波理論とともに扱うことにより、波形の再現性が劇的に向上することを明らかにした。

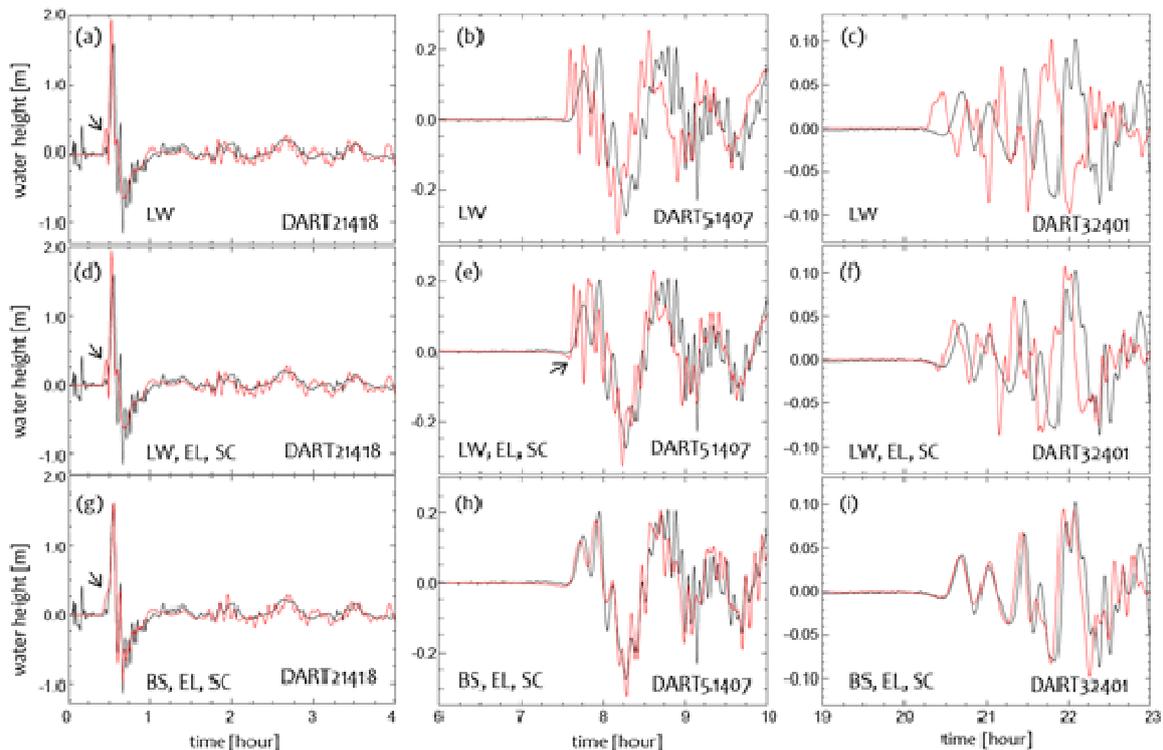


図 1 2011 年東北地震津波の、震源近く(左)、ハワイ付近(中)及びチリ近海(右)での理論波形(赤)と観測波形(黒)の比較。LW、BS、EL、SC は、それぞれ、線形長波モデル、線形分散波モデル、地殻の弾性の効果あり、海水の圧縮性の効果ありを意味する。

ii. 津波複合被害を評価するための統合計算モデルの開発

東日本大震災では、津波による浸水被害のみならず、津波複合被害が顕著であった。すなわち、津波による侵食・堆積に伴う地形変化や漂流物の移動や衝突である。津波による地盤の侵食は陸域に浸入する津波を増大させるために浸水範囲を拡大させるばかりではなく、土砂を含んだ津波の波力は増大するため、人的・建物被害の拡大に繋がる。他方、船舶等の漂流物移動は建物破壊を起こすことに加えて、火災の発生要因ともなる。従って、複雑化・多様化する津波災害に対する津波対策を講じるためには、こうした津波複合被害の評価手法を構築しなければならない。

そこで、本研究では、本課題においてこれまでに開発・高度化してきた計算モデル (3次元流体計算モデル: STOC-CADMAS、漂流物移動計算モデル: NDA-FD、津波土砂移動計算モデル: TUNAMI-STM) を統合し、津波による漂流物の移動や衝突、土砂移動による侵食・堆積に伴う地形変動などを高精度に予測する手法 (統合モデル) を開発した。これと並行して、STOC-CADMAS による3次元流体計算の代りに、TUNAMI-N2を適用した2次元版統合モデルも開発した。

統合モデルは、複雑な流れを再現できる3次元流体計算による流れ場に基づいて、土砂移動・漂流

物移動を解析できる総合的な計算モデルである。統合に当たり、図 2 のように新しいコミュニケーターを実装した。すなわち、統合前は STOC-CADMAS、STM 部内の全体通信を MPI_COMM_WORLD で行っていたものを、統合に伴い、MPI_COMM_WORLD は STOC-CADMAS および STM の全体通信として用いるため、STOC-CADMAS、また、STM 部内の通信は新たに作成した新コミュニケーター①および②を用いることにより、各モデルのデータ通信を可能とした。

図 3 に、2次元版統合モデルによる計算結果の一例を示す。ここでは、2011年東北地震津波での気仙沼湾を対象としている。当該地域では、津波による船舶移動（第18共徳丸など）や海底地形変化が大規模であったことが知られているが、津波氾濫とそれに伴う漂流物移動と土砂移動を解析することに成功した。本手法は、現地適用性といった再現性の向上に関する課題は残っているものの、津波複合被害のメカニズム解明や評価のための有効な手段となり得る。

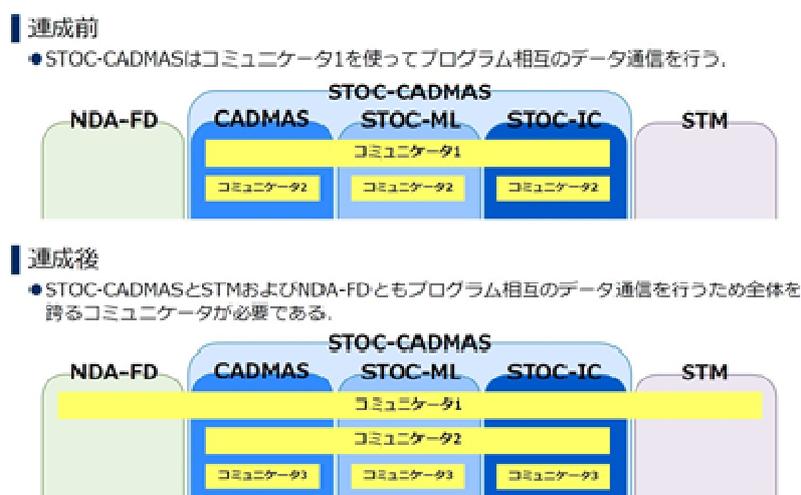
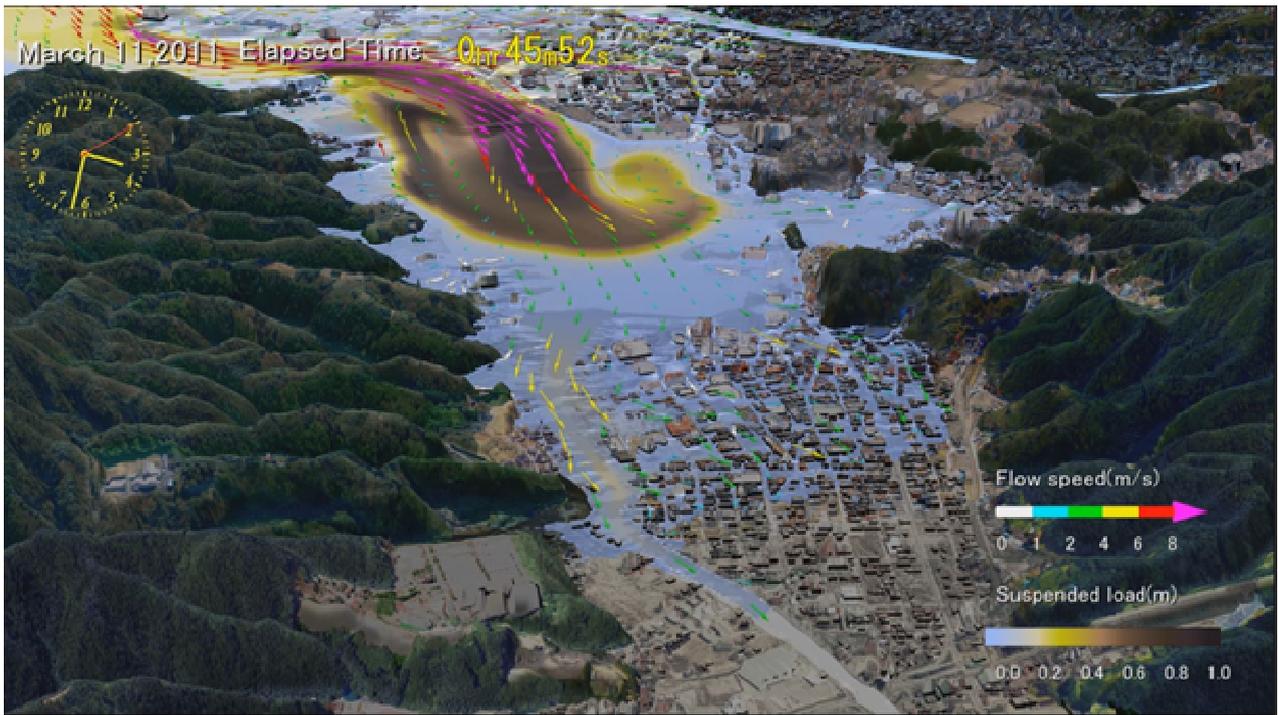
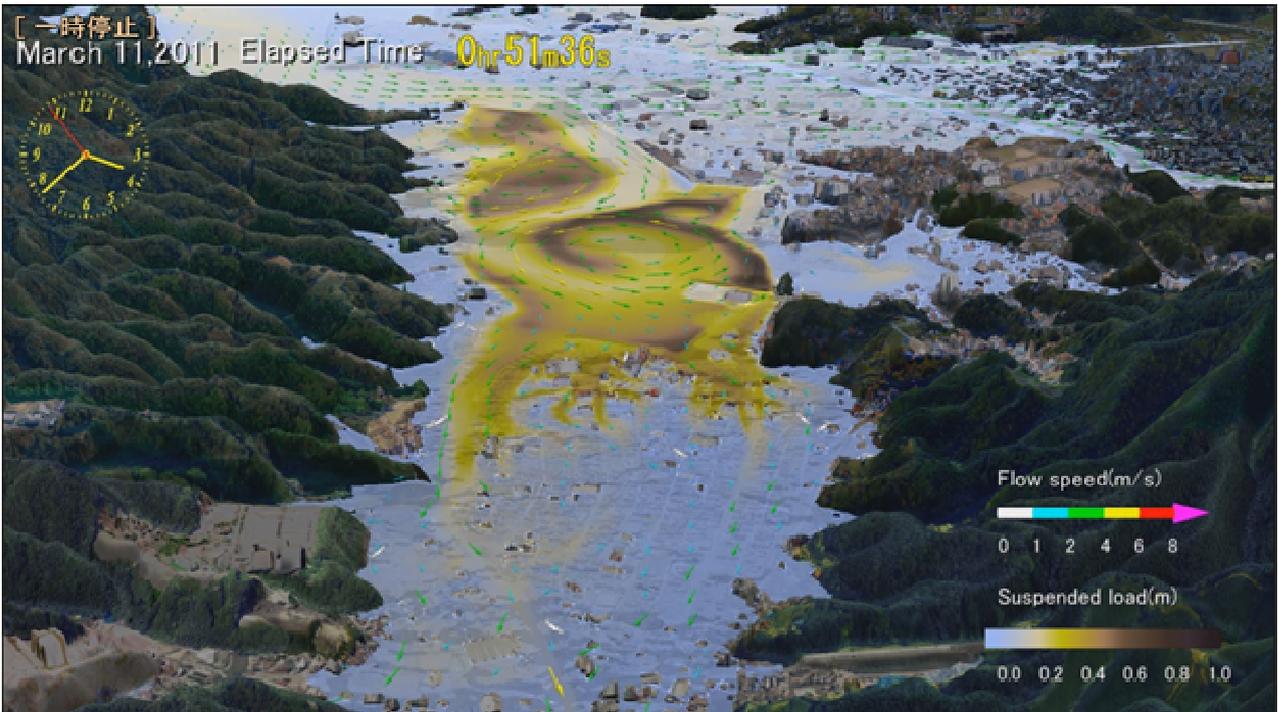


図 2 統合モデルにおける新コミュニケーターの実装



(a) 地震発生後 45 分 52 秒における第一波来襲時の様子(気仙沼湾の狭窄部において大量の土砂が巻き上げられている。また、気仙沼市街地に津波が浸水しており、漂流物も市街地へと流されている。)



(b) 地震発生後 51 分 36 秒の様子(気仙沼市街地が水没し、気仙沼湾において二つの渦が形成されている。)

図3 2次元版統合モデルによる計算例。2011年東北地震津波での気仙沼湾における土砂移動および船舶漂流の様子。図中の矢印は流速ベクトル、コンターは海水に含まれる土砂量を示す。また、白色の物体が船舶である。

課題(2-3)都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究

本研究が目的とするシミュレーションは、重要構造物を対象とした構造物地震応答シミュレーションと都市地震応答シミュレーションである。構造物地震応答シミュレーションの科学的な成果は、汎用的な動的有限要素法を開発し、鉄筋コンクリート橋脚・超高層ビル・原子力発電所建屋の解析を行い、局所的な損傷から全体的な破壊に至る過程も含む地震応答のシミュレーションが可能となったことである。特に、鉄筋コンクリート橋脚に関しては、大型震動台を使った実験との比較等から、開発された構造物地震応答シミュレーションの有用性を示した。原子力発電所建屋に関しては、耐震性評価を目的とした構造物地震応答シミュレーションの実用化が進められている。都市地震応答シミュレーションの科学的な成果は、地盤・建物・避難を連成して行う統合地震シミュレーションを開発し、東京 23 区内の 10 km 四方の領域を対象とした計算に成功し、極めて高い時・空間分解能の地震災害・被害評価が可能であることを示したことである。これは、従来の経験式に基づく災害・被害評価手法とは一線を画する、大規模数値計算を使うシミュレーションに基づく災害・被害評価手法の潜在的有効性を示すものである。全「京」を使う、優れた計算性能は計算科学の分野でも高く評価された。このため、ポスト「京」に向けた実用化を目指す研究も開始された。

i. 構造物地震応答シミュレーション

構造物地震応答シミュレーションは、非線形動的有限要素法を利用するものである。超高層ビル・鉄筋コンクリート橋梁のような重要構造物に対し、超詳細解析モデルを使った地震応答シミュレーションに成功している。これは「京」でなければ解析できない地震工学の大規模問題である。構造物とそれを揺らす地盤を同時に計算するという地盤-構造物連成を近似しないで行うために、構造物の全部材と地盤の全地層を詳細に取り込んだ 10 億程度の自由度を持つモデルを構築している。通常の地震応答解析で扱われる解析モデルが 10 万~100 万程度の自由度であることを考えると、解析モデルの規模は桁違いに大きい。解析モデルの詳細度の高さは解析結果の空間分解能を向上させ、構造物の全部材に対し、細部の地震応答が再現・予測できることがわかる。なお、非線形とはいえ 10 億次元の疎マトリクス方程式の求解は「京」の基準では大規模計算ではない。しかし、動的解析のため、この求解を 10,000 ステップ程度逐次的に行うことになる。現在、500 ノードを使った計算が最も効率的であるが、この場合、1 ステップの計算時間は 1 時間を超え、長時間の計算が必要という問題がある。

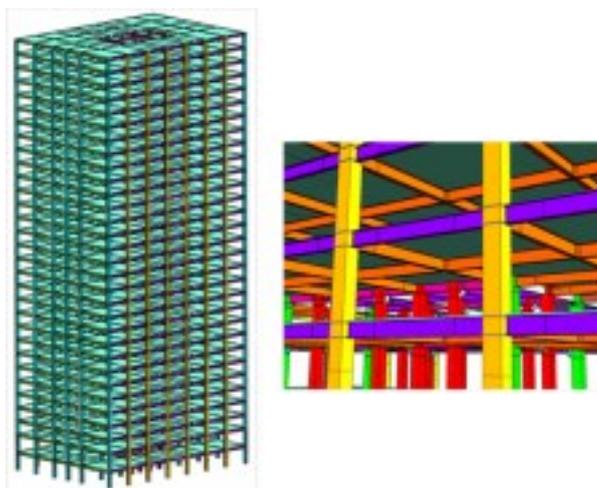


図 1 超高層ビルの超詳細解析モデル

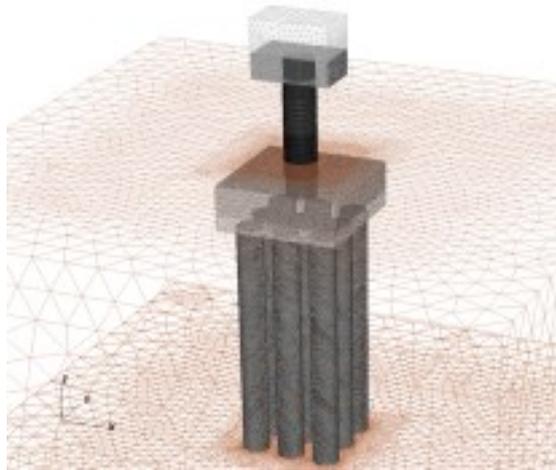


図2 鉄筋コンクリート橋脚の超詳細解析モデル

本研究でシミュレーションを行う具体的な重要構造物は鋼構造の超高層ビルと鉄筋コンクリート橋梁である。

- ・ 超高層ビル (図1参照) : 前述のように、地盤と一体となって構築された超詳細解析モデルの規模は従来にないものである。この解析モデルを使った数値解析によって、鋼材料の大変形と塑性座屈が引き起こす局所的損傷がセンチメートルオーダーの空間分解能で計算できるようになった。複雑な非線形現象である大変形と塑性座屈は大規模数値計算が要求される。「京」を使うことで可能となった大規模数値計算を実行した点は特筆すべきである。
- ・ 鉄筋コンクリート橋梁 (図2参照) : 複数の橋脚と橋桁・基礎等から構成される橋梁は大規模構造システムであるため、橋梁全体の地震応答解析は難しく、通常、一本一本の橋脚に絞って解析が行われる。「京」を使うことで初めて、複数の橋脚、橋桁、基礎、地盤から構成される超詳細解析モデルを構築し、大規模構造システムの地震応答シミュレーションが実行できるようになった。地盤-橋脚の連成の他、橋脚間の連成を評価することが可能となる。詳細な解析モデルが扱える結果、地震応答が引き起こすコンクリート内の亀裂の発生・進展過程とそれがもたらす損傷・破壊が解析できるようになった点は画期的である。

ii. 都市地震応答シミュレーション

都市地震応答シミュレーションでは、地震動・地震応答・群集避難の解析モジュールから構成されるシミュレーション手法を開発する。複数の数値解析コンポーネントの連成 (図3参照) には、システムコンピューティングと呼ばれる分野の研究も必要となる。地震動は都市の全表層地盤の解析モデルを使った非線形有限要素法、地震応答は都市内構造物一棟一棟の解析モデルを使った非線形応答解析、群集避難は群集一人一人をエージェントとしてモデル化するマルチエージェントシミュレーションである。各々の解析モジュールが大規模数値計算を必要とする他、複数のデータソースを使った解析モデルの自動構築、入出力データの制御による解析モジュールの連続実行の自動化も必要となる。さらに全「京」を使う大規模数値計算も実現し、10 km 四方の実都市を対象とした地震動と構造物応答の解析モジュールの連成に成功した。