

特別推進課題 (平成27年度第1期)

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球情報基盤センター



地球情報基盤センター長 高橋 桂子

地球シミュレータ特別推進課題は、地球シミュレー タの計算能力を最大限に活かせるよう充実した技術 サポートに加え、柔軟な運用により研究開発の飛躍的 な加速を実現するための計算資源配分の枠組みで す。本報告書は、平成27年度第1期(6月1日から9 月 30日まで)に実施された4つの特別推進課題の成 果をとりまとめたものです。

平成27年6月1日より本格稼働を開始した新地球 シミュレータは稼働開始してまもなく、ユーザの皆さん から新地球シミュレータ上へのプログラム実行環境の 移行が容易であり、また実行速度が予想以上に速い、 という感想をたくさんいただきました。これらの感想は、 新地球シミュレータ導入に際して当初より最優先事項

として念頭においてきた機能と高速性能が実現されたことを意味しており、関係者一同、胸をなでおろしたものでした。その後、新地球シミュレータの順調な稼働が進むにつれて、その声の数が次第に多くなり、私たちもやっと新地球シミュレータの導入責務を果たせたのではないかと感じているところです。

世の中の ICT 発展はめざましく、スーパーコンピュータだけではありませんが、一つの技術に安 住するのではなく、新しく強力な技術発展の波に乗り続け、それらを思う存分使い切れるだけの実 力を常に磨きながら、学術的、社会的成果に結びつけて行く必要があります。地球シミュレータは その最先端技術の一つとして単独で成り立つだけでなく、関連技術とさらに強く結びつきながら新 しい能力の開拓を行いその提示も行ってまいります。本報告書の特別推進課題の成果は、そのよ うな胎動の一端をご紹介するものでもあります。

地球シミュレータ特別推進課題は、今後も1年に3~4回の課題選定が行われる予定です。ぜひ、様々な分野のシミュレーションにかかわる多くの皆様にご関心を寄せていただき、地球シミュレ ータの実力を存分にご活用いただきたいと思っております。私たち地球情報基盤センターでは、皆様とご一緒に新たな挑戦ができることを楽しみにしております。

目次

I	地	球シミュレータ特別推進課題の概要
	1.	特別推進課題(6月~9月)の募集と応募状況1
	2.	課題の選定2
	3.	実施課題とサポート体制3
II	特	F別推進課題成果報告 ·······5
	1.	ESの全ノードを用いた全球地震波形計算による地球内部構造の解明6
		坪井誠司 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター
	2.	地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース
		高薮出 気象庁気象研究所 環境·応用気象研究部
	3.	複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験
		竹内義明 気象庁気象研究所·研究調整官
	4.	非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた台風-海洋相互作用の研究:海洋上部貯
		熱量変動の台風強度に与えるインパクト38
		坪木和久 名古屋大学地球水循環研究センター
II	I #	寺別推進課題に対する技術サポート報告

| 地球シミュレータ特別推進課題の概要

「地球シミュレータ特別推進課題」は、平成27年6月から正式運用を開始した新地球シ ミュレータの能力を最大限に活かし、海洋地球科学分野における画期的な成果創出を加 速するために平成27年度から新しく設定された資源配分の枠組みです。

「地球シミュレータ特別推進課題」に選定された課題には、地球情報基盤センターがこ れまでに培ってきた技術サポートや地球シミュレータの運用技術を駆使することにより、地 球シミュレータの一部を一定期間占有するなどの集中的な資源利用や、専任スタッフが 技術面、運用面から支援するなど強力なサポートを提供しています。これらの取り組みに より、我が国と世界の海洋地球科学分野を牽引するスーパーコンピュータとしての役割を 果たし、科学的インパクトと研究成果の創出を加速するための起爆剤としての役割を果た すことを目標にしています。また、この特別推進課題を通して企業や研究者、サポート要 員が協力することにより、新たなサイエンスや協力体制を生み出すことにも貢献が期待さ れています。

地球シミュレータ特別推進課題は年3から4回の募集を予定しており、本報告書は平成27年第1期として、6月から9月の期間で実施した成果を取りまとめたものです。

1. 特別推進課題(6 月~9 月)の募集と応募状況

募集期間: 平成 27 年 4 月 6 日(月) ~ 4 月 27 日(月)

募集対象 : 課題責任者は日本国内の機関に所属し、当該課題の研究に従事する者 対象分野及び課題:

海洋地球科学分野と関連分野全般の課題を対象とする。

地震・津波・固体地球分野、大気・海洋分野、海洋生態系分野、深海分野、 地球流体分野、地球環境分野、計算科学および計算機科学分野、数理、情 報理工学分野 など。

応募課題数:4課題(うち採択は4件)

2. 課題の選定

地球シミュレータ利用規程に従い、計算機システム運営委員会(平成27年5月18日 開催)において各課題のヒアリング及び審査を実施し、その結果により担当理事が選定した。

審査基準は以下の5項目であり、一つの審査項目に対して10点(合計50点満点)で 採点を行っている。

- 研究の目的と意義
 ・学術コミュニティへの貢献につながるか
 - ・科学的、技術的に十分な意義はあるか
- ② 研究内容の妥当性
 - ・科学的、技術的に優れているか、またオリジナリティはあるか
 - ・研究計画、研究手法、体制に問題はないか
 - ・海洋研究開発機構の中期目標・中期計画達成への貢献が期待できるか
- ③ 見込まれる成果
 - ・短期間(数か月)に科学的、技術的に十分な成果が期待できるか
 - ・成果の波及効果が期待できるか
- ④ 地球シミュレータを用いる必要性と計算資源利用計画
 - ・研究計画に対して利用計画は妥当か
 - ・要求している資源量は妥当か
 - ・実行のための準備は整っているか
- ⑤ 特記事項
 - ・他プロジェクトや他分野との連携は考慮されているか
 - ・その他のアピールポイントはあるか

3. 実施課題とサポート体制

1				
	課題責任者 所属		課題	CEIST の サポート体制
1	坪井誠司	海洋研究開発機構	ES の全ノードを用いた全球地震波 形計算による地球内部構造の解明	今任
2	高薮 出	気象庁 気象研究所	地球温暖化施策決定に資する気 候再現・予測実験データベース	池田
3	竹内義明	気象庁 気象研究所	複数の次世代非静力学全球モデ ルを用いた高解像度台風予測実 験	池田、齋藤
4	坪木和久	名古屋大学 地球水循環研究セ ンター	非静力学大気波浪海洋結合モデ ルを用いた台風-海洋相互作用の 研究:海洋上部貯熱量変動の台風 強度に与えるインパクト	齋藤

特別推進課題の実施については、地球情報基盤センター情報システム部において各 課題に対する専任の担当者を配置し、技術的サポートを実施している。具体的にはプロ グラムチューニングをはじめとする技術的サポートとともに、プログラム実行についても必 要に応じて運用面のサポートを行うことにより、各課題が目指している成果が確実に達成 されるよう支援を実施した。

Ⅱ 特別推進課題成果報告

ESの全ノードを用いた全球地震波形計算による地球内部構造の解明 Global seismic wave simulation using full nodes of the Earth Simulator

課題責任者名

坪井誠司 海洋研究開発機構・地球情報基盤センター

研究分野

固体地球分野

研究の目的と意義

地球内部の構造がどのようなものとなっているかは、表面で観測される地震や火山など の地球物理学的現象の原因を考える上で重要な研究テーマである。我々は現在、地球は 地殻、マントル、核という成層構造を成していることを知っているが、そもそも、このような成 層構造が 46 億年前の地球形成時の環境に依るものであるかは、地球が形成されてから今 日までの地球の進化を考える上でも極めて重要な問題である。このような場合、有効な手 段は電磁波を用いて構造を探査することである。しかしながら、固体地球に対して電磁波は 透過しないため、地球深部までの構造を知るために他の手法を用いざるを得ない。このた めには、地震により励起された地震波を用いる地震学的手段による研究手法が有効な手 段となる。地震により励起され地球内部を伝播する地震波は、弾性体力学の運動方程式で 記述され、地球が完全な球であるならば理論的な解析解が存在する。しかしながら、地球 は回転楕円体の形状をしており、地球内部の構造も球構造からの摂動成分は大きく、理論 的に地震波を計算するためには解析的手法を用いることは期待できない。一方、地球を構 成する岩石の弾性的性質により、地震波速度がkm/secのオーダーであり、地震波のP波お よびS波では周期1秒の波が卓越することが知られている。したがって、観測された地震波 形を再現する理論地震波形を計算する上で周期1秒の精度は到達すべき目標であった。 近年、大型計算機の発展と共に、数値的手法により理論的な地震波形を計算することは大 きな進歩を成し遂げてきたが、現実的な地球モデルに対して全球を伝播する地震波形を周 期1秒の精度で計算することは、計算規模が大きすぎるために行われたことがなかった。本 研究では、地球シミュレータの全ノードを用いて現実的な地球モデルに対して周期 1 秒の 精度で地震波形を計算することを目的とする。このような規模での理論地震波形の計算は、 我々のグループが京コンピュータを用いて行った以外には例がなく、地球シミュレータ規模 の計算機を用いることで初めて可能となるものである。このような理論地震波形が計算でき

れば、特に地球内部の核・マントル境界等の極めて不均質な領域の構造を決定するために 大きな貢献が期待できる。

研究内容

我々は、これまでも地震波動場の数値解法であるスペクトル要素法を用いて現実的な地 球モデルに対する地震波動の数値計算を実施してきた。初代地球シミュレータでは、 4056CPUを用いて周期3.5秒の精度での計算を達成したが(図1)、周期1秒の実現は困難 であった。現在、京コンピュータを用いることで周期1秒の精度での計算は実現しつつある が、京コンピュータでは計算機資源が限られており、試行的な計算に限定されているのが 実情である。京コンピュータと同じ規模の計算は、地球シミュレータの5,046ノード(20,184 コ ア)により実現可能と推測され、地球シミュレータを用いることで周期1秒の精度での理論地 震波形計算を研究に用いることが可能になると思われる。

全球を伝播する地震波形の理論計算は、これまで我々が用いてきたものと同じ、スペクト ル要素法を用いた数値解法により計算する。スペクトル要素法の計算プログラムである SPECFEM3D_GLOBE はスカラー計算機向けに開発されているので、まずこのプログラム のベクトル計算機向けチューニングを行う必要がある。プログラムのチューニングを実施した 上で、全ノードを用いた場合に予想される計算時間等の見積もりを行う。さらに、クラスタ間 通信を実施するための方策について検討する。



図1 4056CPUを用いて理論地震波形記録を計算した際のメッシュ形状

現実的な地球モデルに対して全球を伝播する地震波形を周期 1 秒の精度で計算すること は、到達すべき大きな目標であったので、それが現実的な計算時間で実現できるならば、 地震学には大きな影響を及ぼすと期待できる。地球深部の特に核・マントル境界付近は、 地球マントル内のスーパープリュームと呼ばれる熱的な上昇流の発生源と考えられ、水平 方向には熱的にも地震波速度などの物質的性質も大きく変化していることが予想されてい る。このような領域の構造を詳細に調べることは、これまでは地震波の到着時のみを用いる ことが一般的であり、高精度な地震波形を現実的な地球内部構造モデルに対して計算して、 観測波形と比べることは行われてこなかった。もし、地球シミュレータを用いて周期1秒の精 度で全球を伝播する地震波形を計算することが可能となれば、このような地球内部構造を 推定する上で極めて有効な手段を提供することになり、詳細な構造を決定することが可能と なると期待できる(図 2)。一方、周期1秒の精度で例えば震央距離 40 度程度の観測点で地 震波形を計算することが可能となれば、地震の震源破壊過程の研究にも大きな進展が期 待できる。地震の震源過程を研究する際に地震波形の周期が短いほどより詳細な破壊過 程を求めることが可能となるが、特に震央距離が10度以内のような震源に近い観測点の場 合は、水平方向に大きな不均質構造を持つ地殻内を伝播する距離が大きいために、地殻 構造の影響を受けやすい。しかし震央距離40度程度ならば、伝播経路はマントル内が大き な割合を占めるため、地殻の影響は最小限ですませることが出来るので、より詳細な震源 過程研究が可能となる。このように周期 1 秒の精度で理論地震波形を計算することは固体 地球科学全般に大きな波及効果を及ぼすと考えられる。



図2 地震波は外核・内核を通過する際に複雑な伝播経路を持つ。その中 で、赤い線で示した波線と走時曲線は PKIKP 波あるいは PKP-DFフ エイズと呼ばれ、内核の情報をもたらす。 PKIKP 波は地表から観測点 までおよそ 20 分かけて伝わるが、内核を通過する時間は 100 秒程度 であり、地殻やマントルの影響も強く受ける。地殻や上部マントルの構 造の影響は PKIKP 波と他のフェイズとの時間差を取ることによってか なり減ずることができる。他の波との時間差は 1 秒程度であり、この精 度での理論地震波形計算が望ましい。

研究成果

地球シミュレータは 2,048 ノードの拡張クラスタ 1 台と、512 ノードの基本クラスタ 6 台から構成さ れる。クラスタ間は 10G のネットワークで接続しているが、この上では MPI 通信が出来ず、全ノード を用いた MPI 通信による計算を実行するためには、10G のネットワーク上の MPI 通信を可能とする ためのシステムの開発が必要となる。今期は、この MPI ライブラリの開発を技術サポートにお願いし た。計算を効率的に行うためには、MPI 通信を行う上で、IXS 通信の方が Ethernet 通信よりも高速 のため、通信プロセスの割当を減らした方が良いが、クラスタ間の通信を効率的に行うには、通信 プロセスの割当を増やした方が良い。アプリケーションの通信パターンによって、最適な計算プロ セスと通信プロセスの負荷バランスを調整する必要がある。(図 3)



図 3 クラスタ間 MPI 通信を実現するためのイメージ

今期の開発では、適切な通信の状態を把握することが課題となり、全ノードを用いた MPI 通信を実現することは出来なかった。

想定される波及効果

今期の研究期間中には全ノードを用いた理論地震波形計算を実現することは出来なかったが、研究内容でも述べたように、地球深部の特に核・マントル境界付近は、地球マントル内のスーパープリュームと呼ばれる熱的な上昇流の発生源と考えられ、水平方向には熱的にも地震波速度などの物質的性質も大きく変化していることが予想されている。このような領域の構造を詳細に調べることは、これまでは地震波の到着時のみを用いることが一般的であり、高精度な地震波形を現実的な地球内部構造モデルに対して計算して、観測波形と比べることは行われてこなかった。もし、地球シミュレータを用いて周期1秒の精度で全球を伝播する地震波形を計算することが可能となれば、このような地球内部構造を推定する上で極めて有効な手段を提供することになり、詳細な構造を決定することが可能となると期待できる。引き続き、周期1秒の理論地震波形記録計算の実現を目指して行くことが必要と考える。

計算および計算機技術サポートとの連携

本課題の実現には、10Gのネットワーク上の MPI 通信を可能とするためのシステムの開発が必要となり、全面的なサポートを依頼した。通信と計算処理を同時に行うために、通信は開始と終了確認を分けて(非同期に)行う。この場合、仕掛り中の通信の状態を保持する

情報が増えるため、システムリソースの枯渇が起こりやすい。今期の開発では、システムリソースの枯渇について有効な対策を取ることが出来ず、全ノードでの MPI 通信を実現することが出来なかった。引き続き技術サポートにより MPI ライブラリの開発をお願いしたい。

今後の予定

より効率的に MPI 通信を 10G ネットワーク上で実行するライブラリの開発を進めることで、 全ノードでの MPI 通信を実現して、周期 1 秒の精度での理論地震波形記録計算を実行したい。

特別推進課題に対する意見

全ノードでの MPI 通信を実現した計算を実行するためには、メンテナンス時期などにお ける計算を実施する機会が必要であり、そのための機会を与えるという意味で特別推進課 題には期待したい。

地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース A Climate Projection Data Base for Decision Making

課題責任者名

高薮出

気象庁気象研究所 環境·応用気象研究部

研究分野

気候科学

研究の目的と意義

本研究は、地球シミュレータ特別推進課題として 2015 年 3~5 月期に実施したものの継続である。

IPCC 第5 次報告書を受けて、各国政府は自国における防災をはじめ温暖化適応策の 設計に取り組みを始めているところであるが、その際に、施策を決定する政府機関で共通 のシナリオを持つことが、一貫性のある適応策の実現のためには必要不可欠である。しかも、 施策を打つためにはハザードの生じる確率予測が求められており、そのためには十分な数 のアンサンブル実験結果を必要とする。これまで、文科省の「気候変動リスク情報創生プロ グラム(以下、創生プログラム)」下で地球温暖化予測の研究を行ってきたが、計算機リソー スの制約もあって、施策決定のために充分なアンサンブル数を持つ実験出力データを提供 できていなかった。そこで、本研究では高解像度大気モデルを用いた、過去と将来の気候 変化に不確実性の情報を加味した確度の高い影響評価が可能となる物理気候データベー スの作成を行った。このデータベースは、日本における地球温暖化研究ならびに影響評価 研究の標準データベースと位置付けられるもので、データベースを活用することで、各省庁 がこれまで提供してきた地球温暖化予測情報の質の向上や、実効ある施策決定への寄与 が期待できる。

本課題で作成するデータベースは、影響評価研究を主体に不確実性を適切に評価した 温暖化対策の実現に向けたものに活用することを主目的とする。一方で、高解像度の多ア ンサンブルデータにより、過去と将来の極端事象を含む気候変化についてこれまでの研究 成果について再度検討を行い、統計的に確度の高い結論を導く。また、気候変動要因分 析 (イベントアトリビューション) や気候変動解析をリアルタイムに行うことの環境整備も視野 に入れ、気候監視業務への貢献に結びつけていく。

研究内容

気象研究所の高解像度(60km格子)全球大気モデルにより、下記①~③を、日本域地域 気候モデル(20km格子)により④を、多アンサンブル実験により実施する。

- 過去60年の歴史気候再現実験、
- 同期間の非温暖化歴史実験、
- ③ RCP8.5 シナリオの 21 世紀末に相当する全球地上気温が4℃上昇時の将来気候予 測実験。
- ① ~③の結果から
- ④ ダウンスケール実験

以上の実験を、創生プログラムの課題間で協力して実施する。実験構成は創生 C(気候 変動リスク情報の基盤技術開発)の研究グループが行ってきたタイムスライス実験に相当す る。これまでのものに比べて格段に多いアンサンブル数の実験出力から将来の顕著現象や 梅雨や台風の特性変化について、実験①、③、④の出力を活用して再検討する。創生 D (課題対応型の精密な影響評価)の影響評価研究に関しても同様に、多アンサンブルモデ ル実験出力から不確実性を考慮して、河川の氾濫や高潮による浸水や生態系の変化など 多岐にわたる温暖化リスク評価を行う。これまでに研究対象とすることができなかった、過去 の多アンサンブルデータを用いたリスク評価スキームの検証についても実施する。実験①と ②の結果を用いて、創生 A(直面する地球環境変動の予測と診断)の研究グループが進 めてきたイベントアトリビューション研究を過去 60 年間に発生した気候変動イベントに対象 を広げ調査する。

3~5月の課題において上記実験の約30%に相当する計算を終了させ、これまでに得られている実験出力が上述した目的の達成に有効であることを確認している。当該期間では、 残りの計算を完了させ、各実験結果を相互に比較して、現在気候をベースとした将来気候 の変化について考察する。とりわけ、これまでにないアンサンブル数の実験であることのメリ ットを生かして、極端事象の将来変化の推定における不確実性がどれだけ低減されるかに 着目する。

研究成果

予定している 2.6 万年分の計算のうち、実験②の非温暖化実験を除いた 2 万年分の計算を完了することができた。初期解析により、全球および地域気候モデルによる過去・将来 実験計算が正常に終了したことも確認した。今回作成した本データベースを、以下、d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change) と呼称する。 本研究の d4PDF は、これまでに類の無い数のアンサンブル数を持つ気候変動評価デ ータベースである。将来気候変化では、熱波、豪雨、高潮など甚大な自然災害をもたらす 大気現象について不確実性の小さい情報が社会的に強く求められている。今回の多数 (100 から 数千)例の実験出力を用いることで、これらの現象について統計的に信頼性の高 い情報が得られることが確認された。データベースを活用することにより、100年に一度発生 する事例の再帰確率など、これまで極値統計モデルに依存することなしには求めることがで きなかった量が、d4PDF を使用するだけで求めることができるようになった。

図 1 は福岡における降水頻度の現在と将来分布を示したものである。観測データだけ では、図示したような滑らかな過去の降水発生頻度分布を描くことができない。今回のアン サンブルデータを用いれば、他の要素についても同様に、図示したような確率密度分布を 描くことができる。さらに、使用した大気モデルは気象庁において日々の天気予報に利用さ れたモデルを元に構成されていることもあって、気温、降水、台風など多くの事例について 観測との対応が良い。図1には、モデルの推定した 30 年確率日降水量も示しており(縦線)、 観測データから求めたもの(▲)と極めてよく対応しているのが分かる。一例を示したのみで はあるが、対象地域を限って顕著な大気現象に注目する多様なユーザにとって、d4PDF は有用なものである考えている。

図2は、台風が各地点を通過する数の将来変化を示している。とりわけ温暖化時の台風 の変化については、これまで精力的に取り組んできたものの、計算資源の制約のために10 数例のアンサンブルを用意するのが精一杯であった。今回の多アンサンブルの計算結果を 元に、台風の存在確率が将来どのように変化するかを再評価してやると、従来どおりの空 間パターン、すなわち、ハワイ周辺を除いて広範囲に台風が減少することが分かった。また、 今回の実験ではアンサンブルが沢山あるために滑らかな空間分布が得られていることが見 てとれる。本実験と従来実験との間では定性的な結果はなんら変わらないものの、多アンサ ンブルデータからなる d4PDF を用いて、将来の台風の振舞いについて不確実性が低減し た確度の高い結論を導くことができたことの意義は大きい。さらに、空間的な滑らかさが示 唆するように、d4PDF は、領域を狭めた影響評価にも活用できると期待している。



図 1 福岡における過去実験と将来実験における年最大日降水量の発生頻度分布。 横軸は降水量、縦軸が発生頻度。灰色陰影と色付きの曲線がそれぞれ現在気 候、将来気候。モデルに与えた 6 種類の温暖化状態についての結果を色別で 示してある。縦線はモデルが推定した 30 年確率日降水量で、▲は、観測データ (1901~2006年)に基づく30 年確率日降水量(Gumbel分布、気象庁・異常気象 リスクマップ)である。現在 220mm の 30 年確率日降水量が、将来は 300mm 近くまで増大するという推定になっている。

データベース d4PDF を用いることで、これまでサンプル数が少ないために研究の対象 とならなかった事例についての評価が可能となる。現在、日本域気候モデルの結果を用い て、発生頻度のかなり低い豪雪についての評価やライフタイムの短い事例についての評価 を進めているところである。こうした地域的に興味深い事例は国内だけでも枚挙にいとまが ないので、それぞれのケースについて解析を進めることで、科学的にも斬新な成果が今後 数多く得られるものと期待できる。

15



図 2 熱帯低気圧の 10 年あたりの通過頻度の将来変化。単位は台風の数。上段は今回の実験の結果で、下段は従来の 12 例のアンサンブル実験 (Murakami et al. 2012)の結果。

想定される波及効果

冒頭に述べたように、本課題で創出したデータベース (d4PDF) は、防災研究を始め広 く適応策策定に向けた影響評価、政策決定作業に用いられることを想定している。本デー タベースは、政府各機関が一貫性のある適応策を実現するために活用する共通シナリオの 候補になると期待できる。上述の研究成果でも繰り返し強調したように、多アンサンブルの 実験出力データということが d4PDF の最大の特徴である。一連の実験データを用いて統 計的に確度の高い論証を行うことが可能となり、施策決定のみならず、気候研究においても 科学的に価値のある成果が数多く創出されるものと期待できる。

計算および計算機技術サポートとの連携

実験で使用する高解像度モデルを新しい計算機へ対応させることと、実験出力の整理 補助作業に技術支援を得た。また、新地球シミュレータに見られた初期の不具合について は早急に改善して頂き、結果として、ほぼ想定どおりのスケジュールで計算を完了させるこ とができた。さらに。実験が効率的に実施できるように、充分な量の計算時間や記憶装置を 配分して頂いた。

今後の予定

国内において本データベース (d4PDF) が広く活用されることを目的に、官公庁、自治 体、メディア、研究機関、そして一般を対象としたシンポジウムを 2015 年 12 月 21 日に開催 し、d4PDF の普及に努める。また、d4PDF を国際的に紹介する論文や、出力データを解析 して得られた新しい知見についての論文を纏め発表する。既に 9 件の学会等での発表を 行っているが、引き続き、d4PDF を国内外の学術ミーティングで紹介していく。この研究は 今後 JAMSTEC で実施する SI-CAT の「信頼度の高い近未来予測技術の開発」課題で引き 継がれ、+2℃上昇した気候状態下における気候変動の評価が予定されている。

新聞、雑誌、テレビ等への掲載記事

「地球シミュレータ」能力 10 倍に. NHK ニュース, 2015 年 5 月 25 日. (記者発表;木本昌 秀が出席)

第3世代「地球シミュレータ」システムが本格稼働へ~1.31PFLOPS/320TB、実効性能で約10倍に. PCwatch, 2015年5月26日. (記者発表;木本昌秀が出席)

特別推進課題に対する意見

本課題の総計算量は、旧地球シミュレータの全ノードを使った場合1年半の作業期間を 要する膨大な計算であったが、新地球シミュレータでは、短期間で多数のアンサンブル計 算を効率的に進めることができた。特別推進課題は最新地球シミュレータをユーザが有効 活用して素早く研究成果を創出する制度として優れている。現シミュレータは計算能力が高 く、実験結果を素早く手に入れることもできている。課題への惜しみない技術サポートにも 感謝したい。

複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験 High Resolution Typhoon Prediction Experiments using Multiple Next-generation Nonhydrostatic Global Models

課題責任者名

竹内義明 気象庁気象研究所•研究調整官

研究分野

大気·海洋分野

研究の目的と意義

日本に接近する台風への社会の関心は高い。特に台風による自然災害は社会・経済活動に深刻な影響を与えることから、その軽減のために台風の進路や強度の予測精度向上 は常に社会から求められている。このような中、気象庁現業モデルの台風進路予測の誤差 はこの十数年でほぼ半減した一方で、強度予測の精度向上は小さく、大きな課題と なっている。この原因の一つとして、モデルの水平解像度(2015年現在 20km)が 粗すぎることが指摘されているが、水平解像度を高めて予測精度を向上させるため には、非静力学モデルの使用、解像度に見合った物理過程スキームの開発等を行い、 全般的な気象予測および台風予測に含まれる系統的なバイアスを低減する必要があ る。これまで、高解像度モデルは計算機負荷が大きいため、シミュレーションの事 例数が厳しく限定され、系統的なバイアスを特定するに至っていなかった。

本研究では、全球モデルを7kmに高解像度化し5日先までの台風予測実験を実施する。 得られた実験結果に対し、気象庁ベストトラック解析データを用いた検証及びモデル間の 相互比較を行い、台風予測精度を定量的に評価するとともにマルチモデルアンサンブル予 測の有効性を検証する。これにより、以下の成果を得ることが期待できる。

- 高解像度化することによる台風予測への効果、特に既存のモデルにも含まれている
 モデル固有の系統誤差の理解
- モデルの調整及び感度実験の実施による、台風予測改善に向けたモデル改良の ための知見の獲得
- 膨大な出力データを効率的に解析・研究する手法の確立
- 将来の気象庁現業モデル力学コアを選択する際の、参考となる技術情報の提供

本研究で得られる成果や知見は、計算機科学や大気科学の研究の進展に貢献するだ けでなく、将来の気象庁高解像度現業数値予報モデルの開発に直接的・間接的に貢献す ることが期待でき、それによる気象庁モデルの台風予測改善を通じ、自然災害による被害 軽減につながる。

研究内容

本研究では、地球シミュレータ(ES)において、2013年9-10月にかけて日本に接近・上陸 した台風を対象とした52初期時刻の5日予測実験を実施し、複数の高解像度モデルによる 台風予測の評価を実施した。

使用したモデルは以下の通り(詳細仕様は表1参照)。

- 気象研究所が現業モデルをベースに二重フーリエ級数展開を用いて高速化した非 静力学全球モデル(DFS)
- 海洋研究開発機構(JAMSTEC)、東京大学及び理化学研究所が開発した正 20 面 体格子モデル(NICAM)
- JAMSTEC が開発した陰陽格子モデル(MSSG)
- DFS と同じ物理過程で水平解像度のみ 20km 相当に変えたモデル(GSM)

また、評価に利用した台風中心位置及び中心気圧については、気象庁ベストトラックデ ータ(以下、「ベストトラック」という。http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/ rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html)を使用した。

さらに、予測実験の実施に際し、DFS を ES へ移植したほか、各モデルについて最適化 作業を実施して、計算の高速化やデータ出力の効率化を図った。加えて、大容量出力デ ータを効率的に解析・可視化する手法に関する研究も実施した。

実施体制は表2の通りである。

	DFS	GSM	MSSG	NICAM
空間分解能	7km	20km	7km	7km
格子	リデュースド等緯度 格子	リデュースドガウス 格子	有限差分法	有限体積法
力学フレーム	二重フーリエ級数を 基底とする非静力 学スペクトルモデル	球面調和関数を基 底とする静力学スペ クトルモデル	陰陽	正二十面体
雲物理	Smith(1990)	Smith(1990)	Onishi&Takahashi (2012)	Tomita (2008)
積雲対流	Randall&Pan	Randall&Pan	-	-
	(1993)	(1993)		
大気境界層	MY2(Mellor&	MY2 (Mellor&	MYNN2.5	MYNN2
	Yamada,1974,1982)	Yamada,1974,1982)	(Nakanishi&Niino,	(Nakanishi&Niino,
			2004,2006,2009)	2004,2006,2009)
放射	JMA(2013)	JMA(2013)	MSTRN-X	MSTRN-X
	Yabu(2013)	Yabu(2013)	(Sekiguchi& Nakajima, 2008)	(Sekiguchi& Nakajima, 2008)
陸面・海面	SiB (JMA,2013)	SiB(JMA,2013)	バケツモデル	MATSIRO
			(3 次元海洋)	(Takata et al. 2003)
				海面熱収支
接地境界層	Louis(1982)	Louis(1982)	Zhang & Anthes	Louis(1982)
	Miller (1989	Miller(1989, 海·不	(1982)	
	海·不安定)	安定)		

表1 各モデルの仕様

分担項目	担当者	所属		
総括	竹内義明	気象庁気象研究所		
DFS 移植、実験	吉村裕正	気象庁気象研究所予報研究部		
NICAM 実験	中野満寿男	海洋研究開発機構		
MSSG 実験	大西領	海洋研究開発機構		
	渕上弘光	(株)NEC 情報システムズ		
	佐々木亘	海洋研究開発機構		
実験設計	上記5名+			
	和田章義	気象庁気象研究所台風研究部		
	川合秀明、新藤永樹	気象庁気象研究所気候研究部		
統計的検証、事例検証	那須野智江	海洋研究開発機構		
	沢田雅洋、山口宗彦	気象庁気象研究所台風研究部		
	入口武史、杉正人	気象庁気象研究所気候研究部		
簡易可視化解析	川原慎太郎	海洋研究開発機構		

表 2 実施体制

表3に本研究で実施した52初期時刻、その時刻に存在した台風の対応、及びモデル計算の可否を示す。NICAM については、陸面過程の計算部分での不具合により11初期時刻について計算ができなかった。以下、結果の概要を記載し、キーセンテンスに下線を付す。

	初期時刻・モデル	存在した台風(ベス トトラックデータ、 <i>斜</i> <i>字</i> は熱低、 斜太字	DFS	GSM	MSSG	NICAM
		は温低)				
1	2013年9月12日0000UTC	18	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
2	2013年9月12日0600UTC	18	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
3	2013年9月12日1200UTC	18	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
4	2013年9月12日1800UTC	18	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
5	2013年9月13日0000UTC	18	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
6	2013年9月30日0000UTC	21, 22, 23	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
7	2013年9月30日0600UTC	21, 22, 23	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
8	2013年9月30日1200UTC	21, 22, 23	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
9	2013年9月30日1800UTC	21, 22, 23	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
10	2013年10月1日0000UTC	21 , 22, 23, 24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
11	2013年10月1日0600UTC	22、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
12	2013年10月1日1200UTC	22、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
13	2013年10月1日1800UTC	22、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
14	2013年10月2日0000UTC	22、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
15	2013年10月2日0600UTC	22、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
16	2013年10月2日1200UTC	22、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
17	2013年10月2日1800UTC	22 、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
18	2013年10月3日0000UTC	22 、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
19	2013年10月3日0600UTC	22 、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
20	2013年10月3日1200UTC	22 、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
21	2013年10月3日1800UTC	22 、23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
22	2013年10月4日0000UTC	23、24	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
23	2013年10月9日0000UTC	24 、25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
24	2013年10月9日0600UTC	24 、25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc

表3 実験に用いた初期時刻、存在した台風、およびモデル毎の計算可否

25	2013年10月9日1200UTC	25、26	\bigcirc	0	\bigcirc	0
26	2013年10月9日1800UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
27	2013年10月10日0000UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
28	2013年10月10日0600UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
29	2013年10月10日1200UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
30	2013年10月10日1800UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
31	2013年10月11日0000UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
32	2013年10月11日0600UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
33	2013年10月11日1200UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
34	2013年10月11日1800UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
35	2013年10月12日0000UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
36	2013年10月12日0600UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
37	2013年10月12日1200UTC	25、26	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
38	2013年10月17日1200UTC	26 , 27	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
39	2013年10月17日1800UTC	26 、27	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
40	2013年10月18日0000UTC	26 , 27	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
41	2013年10月18日0600UTC	26 , 27	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
42	2013年10月18日1200UTC	26 , 27	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
43	2013年10月18日1800UTC	27	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
44	2013年10月19日0000UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
45	2013年10月19日0600UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
46	2013年10月19日1200UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
47	2013年10月19日1800UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
48	2013年10月20日0000UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
49	2013年10月20日0600UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
50	2013年10月20日1200UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	×
51	2013年10月20日1800UTC	27、28	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
52	2013年10月21日0000UTC	27、28	0	0	0	0

a. 台風強度予測

図1に台風強度(中心気圧)の検証結果を示す。水平解像度7kmのモデルはいずれも GSMと比べて台風強度をよく再現していた。具体的にはGSMは予測1日後に既に台風の 強度を十分に再現できず、それ以降弱めに予測する特徴を有していたのに対し、高解像 度モデルはより台風を強めに予測するようになった。DFS についてはGSMとは逆に台風強 度をベストトラックより強めに予測する特徴を有していた。特に DFS と GSM はほぼ同じモデル仕様であることから(表1)、図1に示された結果は、水平解像度の高解像度化により台風 強度予測、特に台風の発達予測が改善されることを示唆する。



図1 2013年台風第 18, 22, 23, 24 26, 28 号に関する 65 ケースの台風(NICAM は 45 ケースの台風)の台風強度予測結果から計算された気象庁ベストトラックか らの中心気圧差の平均値及び標準偏差のモデル毎の時系列。

図2に、各モデルの強度予報の特徴を調べるため、ベストトラックと各モデルの中心気圧 の予報値の散布図を示す。GSMは950hPa以下に低下する事例はほぼ再現できていない のに対し、水平解像度7kmの3つのモデルではより低い中心気圧を再現している。DFSは 920hPa以下に低下する事例を再現することがあるが、予報3日目以降に過発達している事 例が顕著で、ベストトラックでは見られない900hPaを下回るものもあった。MSSGは930hPa 前後まで再現し、他のモデルに比べて予報1日目で過発達している事例が多い。NICAM はDFS、MSSGと比べて極端な低下をする事例が少なく全体的にばらつきが小さいものの、 940hPa以下に低下する事例は十分に再現できていないことが分かる。

各事例に対する強度の再現性の共通点・相違点を調べるため、生涯最大強度(最低気圧)と最大気圧低下率、それらに達したタイミング(ベストトラックとのずれ)を表4に示す。事例ごとに見ると、台風第18号(NICAMを除く)や第23号では最大強度は過発達な一方、 台風第24号や第28号でのそれは発達が不十分である。最大気圧低下率のタイミングは、 台風第24号はどのモデルもベストトラック解析よりも早く、そのほかの事例はモデル間のば らつきが大きい。最低気圧に達するタイミングはベストトラック解析に比べてほぼ全事例、全 モデルで遅れており、共通している(MSSGの台風第23号を除く)。このように、<u>複数の事例</u> を見ることで事例ごとの特徴を理解でき、かつ各モデルの得意・不得意な点を明らかにでき る。



図 2 ベストトラック解析(横軸)と各モデル(縦軸)の中心気圧の散布図。色の違い で予報時間の違いを表す。

表4 各モデルにおける生涯最大強度と最大発達率の再現性。セル内の数字は上から生涯最低気圧(Pmin:hPa)、最大気圧低下率(dPmin:hPa/day)、ベストトラックに対する生涯最低気圧(hPa)に達した日時に対するラグ(hour)、最大気圧低下率に対するラグ(hour)。

	#	GSM	DFS	MSSG	NICAM	Besttrack	事例の特徴
T1318	5	987.3	952.5	938.6	965.6	960	モデル間のばらつきやや
		-10.8	-27.6	-37.7	-18.5	-25	大きい。Pmin の差は
		12.0	9.6	12.0	18.0		NICAM が最も小さい。
		0.0	8.4	-21.6	0.0		
T1323	9	974.0	919.2	954.1	949.9	960	GSM 以外は過発達、
		-7.7	-38.0	-21.4	-22.6	-15	dPmin も大き過ぎる。
		28.0	19.3	-13.3	21.3		MSSG だけ Pmin のタイミ
		4.0	6.7	-16.7	-10.0		ンク早い。
T1324	5	993.7	942.2	974.6	971.7	935	どれも弱め。発達開始は
		-3.1	-30.1	-29.5	-18.3	-35	早い。Pmin, dPmin の差
		-18.0	21.6	14.4	20.4		は DFS が最も小さい。
		10.8	-15.6	-6.0	-2.4		
T1326	15	962.6	902.1	935.6	951.8	930	モデル間のばらつき大き
		-13.7	-55.5	-44.0	-19.5	-40	い。Pmin, dPmin の差は
		36.0	22.8	18.0	33.6		MSSG が最も小さい。
		7.2	6.8	-23.2	-10.4		
T1328	7	997.0	940.0	961.4	967.6	905	どれも弱め。 dPmin も小さ
		-2.6	-37.7	-23.8	-18.5	-70	い。眼の水平スケールが
		31.7	40.3	30.9	45.4		小さく、難しい事例
		-18.9	16.3	-0.9	30.9		
モデル		Pmin に至	Pmin に至	dPmin に至	Pmin に至		
の特徴		るタイミング	るタイミング	るタイミング	るタイミング		
		遅い、弱	遅い、過発	早い	遅い、		
		め、dPmin	達傾向、		dPmin 小		
		1,	urmin人				

b. 台風進路予測

図 3 に台風進路(中心位置)予測の検証結果を示す。解像度に依らず、どのモデルも南 西方向のバイアスをもっていたことが分かる。この結果は、<u>モデルの高解像度化が必ずしも</u> 台風進路予測の精度向上に資するわけではないことを示唆している。

南西方向へのバイアスの事例依存性を示すため、予測5日目での中心位置の差を各台 風事例で示す(図4)。予測された経路は南西側にバイアスを持っているものが多いが、事 例依存も大きいことが分かる。例えば、台風第18号はどのモデルにおいても南西方向に10 度以上ずれているが、台風第23号、25号については南西方向へのバイアスは見られない。 また、GSMと高解像度モデルの結果に大きな差がみられないことから、進路予測の向上に は高解像度化以外の要因(初期値化や物理過程の改良)が重要であることが示唆される。



図3 2013 年台風第 18, 22, 23, 24, 26, 28 号に関する 65 ケース(NICAM は 45 ケ ース)の台風進路予測結果のベストトラックに対する中心位置差の平均(丸、 四角、三角、バツ印)及び標準偏差(エラーバー)のモデル毎の 6 時間毎の 時系列(原点から最も離れている点が 120 時間予測に対応)。



図4 図3のFT=120における中心位置差の平均値を各台風事例に分けたもの (2013年台風第18,23,24,25,26,27,28号)。数字は各台風番号、色で各 モデル結果を示す。横軸は経度、縦軸は緯度方向の差。

c. 台風事例毎の特徴

ここでは個別の台風について、経路及び中心気圧に加え、台風の内部構造、特に台風 中心へ向かう流入(インフロー)層の厚さ、最大風速半径、温暖核の大きさ及び高度、台風 中心から遠ざかる流出(アウトフロー)層に着目することにより、各モデルで表現し得る台風 構造の特徴を詳細に考察する。

c.1. 2013 年台風第 18 号

2013年台風第 18 号の予測実験の結果を図 5 に示す。経路予測について、MSSG のみ 西進バイアスが顕著であったものの、大部分のケースにおいて、転向位置の予測は妥当で あった。しかしながら転向後は、各モデル及び初期値によるばらつきが大きかった。

中心気圧に関しては、MSSG は過剰に中心気圧を深める傾向にあった。一方、DFS および NICAM はほぼベストトラックに近い中心気圧を再現した。ただし台風が北緯 30 度付近 に達した 9 月 15 日の中心気圧の急降下については、再現できなかった。GSM はほとんど 中心気圧を深めていなかった。



図 5 2013 年台風第 18 号に関する5初期値の台風予測結果。(a)平均経路及び 標準偏差、(b)平均中心気圧及び標準偏差の時系列。黒線及び黒丸はベス トトラック

2013 年台風第 18 号の予測実験で得られた軸対称平均動径風及び接線風分布の例を 図 6 に示す。モデルの物理過程の設定が同じである DFS (図 6a)と GSM (図 6b)を比べると、 対流圏下層での動径成分で表される台風中心への流入、接線風速の大きさ及び最大とな る半径、対流圏上層に見られる台風中心から外へ向かう動径風の表現について大きな差 が見られ、高解像度化によってより現実的な台風の構造が再現されていることが分かる。

DFS(図 6b),MSSG(図 6c),NICAM(図 6d)は同じ水平解像度であるにも関わらず、その 軸対称構造は大きく異なる。MSSG(図 6c)では大気境界層における動径風の流入がもっと も強く、またその層は厚い。接線風速や対流圏上層での台風中心から外側へ向かう動径風 も強く、またその層厚も非常に厚い。NICAM(図 6d)の結果はGSMに近く、比較的中心から 離れたところに接線風の最大が見られ、DFSやMSSGに比べ最大風速半径が大きい。この ように非静力学系モデルで水平解像度が同じであっても、物理過程などの仕様が異なるこ とにより、シミュレートされる台風の構造に大きな違いが見られることが明らかとなった。



図 6 2013 年9月 13 日 0000UTC 初期値、48 時間後の軸対称平均動径風(コンタ ー、太線は外側、破線は内側へ向かう流れ。間隔は 4m/s 及び 2m/s。)及 び接線風(シェード)。(a)DFS、(b)GSM、(c)MSSG、(d)NICAM。

c.2. 2013 年台風第 26 号

事例による共通点と相違点を述べるために、台風第 18 号と同様に発生後北西進し、転 向後北東進した 2013 年台風第 26 号の結果を示す。台風第 18 号と異なり、南西バイアス が顕著で、どのモデル、どの水平解像度においても共通して見られた。また、MSSG が台風 第 18 号の場合とは異なり東寄りの経路を示している(図 7a)。

台風中心気圧についても台風第18号と異なる特徴が見られる。MSSG が発達期に中心 気圧をやや過剰に深めている点、DFS が最発達期を超えて過剰に中心気圧を深めている
点が顕著である。一方でNICAMの中心気圧の変化傾向はGSMの変化傾向と類似しており、その変化率がより大きいという特徴が見られた(図7b)。



図7 2013年台風第26号に関する12初期値の台風予測結果。(a)平均経路及び標準偏差、(b)平均中心気圧及び標準偏差の時系列。黒線及び黒丸はベストトラック

図 8 に軸対称平均動径風及び接線風分布の例を示す。台風第 18 号の場合と同様、 DFSとGSMの構造の違い(図 8a,b)や、MSSGの大気境界層における動径風流入層及び 対流圏上層における動径風流出層の層厚が厚い特徴(図 8c)が見られる。接線風速の分 布、特に最大接線風速半径の位置について、DFSとMSSGは整合しているが NICAM で はより外側に見られ(図 8d)、これも台風第 18 号の結果にも見られた特徴である。このように、 台風の構造には台風事例に依らずモデル毎の特性が共通して見られる。

d. 可視化・ビッグデータ処理

海洋研究開発機構・地球情報基盤センターでは、可視化結果の並列表示によるモデル 間比較を目的とした二種類の Web アプリケーションを開発した。一つは、可視化ソフトウェ ア GrADS によって別途用意した可視化結果を HTML 上で並列表示するための Java アプ リケーションである。本アプリケーションでは、表示する物理量やモデルの表示順をプルダ ウンメニューにより変更することができる。今回、各モデルの結果を並列表示できるように設 定し、結果の簡易比較を GUI で行えるようにした(図 9)。モデル別あるいは全モデルの時 間発展のアニメーション表示も可能であり、詳細で定量的な比較を行う前の俯瞰的な比較 に適した可視化ツールといえる。

もう一つは、Google Earth 用ボリューム可視化ソフトウェア VDVGE による可視化結果を 並列表示するための Web アプリケーションである。本アプリケーションでは、Google Earth APIを用いて Web ブラウザ内に複数の Google Earth を表示し、その上に可視化結果をオ ーバーレイ表示する(図 10)。図 9 に示したものと同様に、時間発展のアニメーションができ るだけでなく、三次元的な視点の変更を可能とした。これらのアプリケーションの開発により、 視覚的なモデル間比較を容易とするだけでなく、各モデルに特有な現象の表現や物理量 の特徴の把握が実現できる。



図8 2013年10月10日1200UTC初期値、72時間後の軸対称平均動径風(コン ター、太線は外側、破線は内側へ向かう流れ間隔は4m/s及び2m/s。)及 び接線風(シェード)。(a)DFS、(b)GSM、(c)MSSG、(d)NICAM。

No. No. <th>「アウト設定」</th> <th>V</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th>	「アウト設定」	V									
Image: Image:<	M 1 •	(2 •		3 •		4		非表示 •	非表示 •		
	IL GSM +	DFS +		MSSG ·		NICAM +		- •			
Image: Image:<	di sfc	• sfc	٠	sfc	•	efc	•	- •	-	•	
Image: Image:<		•] [•		,		٠	(m			
NEW STATE STATE State <th colspan="2</th> <th>6 (</th> <th>•) -</th> <th>٠</th> <th></th> <th>•</th> <th>-</th> <th></th> <th></th> <th>-</th> <th></th> <th></th>	6 (•) -	٠		•	-			-		
Experi-103M Image: 255 Image: 105M	更新										
Inge-1 DBM Inge-2 DFS Inge-2 Inge-2 DFS Inge-2 Inge-2 DFS DFS <thdfs< th=""> <thdfs< t<="" td=""><td>表示</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></thdfs<></thdfs<>	表示										
Image:1 Image:2 Image:2 <t< td=""><td></td><td></td><td>_</td><td></td><td>_</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>			_		_						
		Image-1 USM	DAINER	I PATT			Tocian	SUBSIC WHO AND B	AND DATE	Integer Missian SEA LOUD RECOURT SUPERIOR WAD AND RANEWL BATE	Image-4 NCAM
(c): (c): (c): (c): (c): (c): (c): (c):		2013/08/12 15:00	2. 1. 1 5				201	3/09/12 1500	100 10 100	2013/02/15/0	2012/02/2010
ELS 1000 100 212 212 ELS 1000 100 212	K	< movie stop > >	e.				KK	movie stop > >		< mpie stop > >	< < movie stop > >
K < move step > 9									< < movie	s stop > >	

図 9 簡易モデル結果比較 Web アプリケーションによる表示例。例として、海表面 気圧、海表面風速、降水量を表示している。



図10 VDVGEとGoogle Earth APIを利用したWebアプリケーションによる表示例。 2013 年台風第 18 号の OLR を表示している。Google Earth API を用いてイ ンタラクティブな視点位置の変更ができる。

e. 成果創出の加速について

本課題により、これまで限られた事例でしか行えなかった高解像度の全球モデルについ てまとまった事例数での実験を実施でき、台風強度・進路の系統誤差を統計的に評価でき たこと、高解像度化の台風強度精度向上への明らかな効果を確認できたこと、台風の事例 依存性を確認できたこと、台風強度に密接に関係している台風の詳細構造のシミュレーショ ンデータセットを作成できたこと、何よりこれらを気象庁および海洋研究開発機構の複数の 高解像度全球モデルで条件を揃えて実施できたことにより、気象庁のモデル開発に資する 気象研究所中期研究計画の促進とともに、海洋研究開発機構の中期目標・中期計画で行 うモデルの改良にも大きく寄与するものとなった。

想定される波及効果

複数の次世代全球高解像度(水平解像度約 7km)大気モデルによる台風予測が実現したことにより、大気科学及び計算機科学の側面で新たな進展を得た。2013 年 9-10 月の台風事例に限定されるものの、水平解像度高解像度化による台風強度予測の精度向上が見込まれるという本課題で初めて得られた成果は、次世代台風予報及びそれにかかわる情報の改善に貢献することが期待される。高解像度化モデルにおける台風発達プロセスの解明や、進路予測の系統誤差の原因究明と改善は、科学的な観点からも重要な課題であり、引き続き詳細な研究を行う必要がある。

さらに、次節で示す技術支援により次世代全球高解像度(水平解像度約 7km)大気モデ ルが高速化されたことは特筆すべき成果である。最先端の計算機科学の知見を大気モデ ルの高速化へ適用し、計算機コストを軽減した実績は、高速化の知見を今後の研究や将 来の現業モデルの開発を加速すると期待される。加えて可視化・ビッグデータ処理技術の 開発・適用により、計算された台風の移動・強化・構造変化過程を科学的に解明することが 容易となるだけでなく、各モデルの改善にも資する。以上、今回新たに得られた科学・技術 的知見は、大気科学・計算機科学のコミュニティに対して有益であり、防災上重要となる台 風の予測を通じて、社会に還元されることが期待される。

計算および計算機技術サポートとの連携

a. DFS モデルを地球シミュレータに移植する際、実行時の不具合の原因の調査、遅いサブ ルーチンのベクトル化・最適化、通信の高速化等について JAMSTEC 地球情報基盤センタ ー情報システム部計算技術グループ池田美紀子氏及び齋藤友一氏らから技術支援を受 けた結果、DFS での5日予測に必要な計算機資源が当初の約1/4 で済むようになった。

b. MSSG モデルは、本来、地球シミュレータに最適化されている。しかし、本課題のように多数の出力変数がある場合、出力サブルーチンの通信同期待ちが発生することが新たな問題として明らかになった。前項と同じく JAMSTEC の両氏らから技術支援を受けた結果、この問題は解決し、5日予測に必要な計算機資源が当初の約2/3で済むようになった。

今後の予定

得られた台風予測結果について、引き続き解析を実施する。また第2期特別推進課題が 採択されたことから、台風事例を増やすとともに、熱帯における対流雲の振る舞いから発生、 発達、成熟、衰退期及び温帯低気圧への移行期といった台風のライフステージ全体にわた り、マルチモデル実験解析を実施する。また第1期での結果及び解析から得られた知見に 基づき、モデル改良に向けた知見を得るための予備的な感度実験を実施する。

特別推進課題に対する意見

複数の次世代全球高解像度(水平解像度約7km)大気モデルによる台風予測比較実験 という研究アイデアは、誰もが夢に描くものの、その実施は計算機リソースの確保及び計算 環境の整備という観点で非常に困難と考えられていた。今回、特別推進という名目で、大規 模な計算機リソースが確保できたこと、そして専任サポート担当者による技術支援を受ける ことができたことにより、多数の台風事例について実験ができ、夢の実現に1歩踏み出せた ことに感謝する。

特別推進課題の特徴の一つである4か月という限られた研究期間について、外部から大 規模なプログラムを移植し、高速化する場合はスケジュール的に厳しいと感じたが、幸い本 課題は技術支援により移植・高速化が順調に進んだ。さらに本課題は第2期として4か月 継続が認められて事例数の拡張と充実した感度実験を行えることとなり、第1期の成果を活 用できていることに鑑み、課題毎にきめ細かくかつ柔軟に期間の設定ができるところが素晴 らしい。

参考文献

- Japan Meteorological Agency, 2013: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO technical progress report on the global data-processing and forecasting system and numerical weather prediction,188p.http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index. htm
- Louis, J. F., M. Tiedtke, and J. F. Geleyn (1982), A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF. *Proc. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 59–79.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1974), A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.

- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982), Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.
- Miller, M. J., Palmer, T. N. and R. Swinbank (1989), Parameterization and influence of subgridscale orography in general circulation and numerical weather prediction models, *Meteor. Atmos. Phys.*, 40, 84-109.
- Nakanishi, M. and H. Niino (2004), An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1–31.
- Nakanishi, M. and H. Niino (2006), An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **119**, 397–407.
- Nakanishi, M. and H. Niino (2009), Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912.
- Onishi, R. and K. Takahashi (2012), A warm-bin–cold-bulk hybrid cloud microphysical model. J. Atmos. Sci., 69, 1474–1497. doi: 10.1175/JAS-D-11-0166.1
- Randall, D. and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. The representation of cumulus convection in numerical models, *AMS Meteorological Monograph Series*, **46**, 137–144.
- Sekiguchi M and T. Nakajima (2008), A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, **109**, 2779-2793
- Smith, R. N. B. (1990), A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435–460.
- Takata K, S. Emori, T. Watanabe, (2003), Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, **38**, 209-222.
- Tomita, H. (2008), New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **86A**, 121-142. doi: 10.2151/jmsj.86A.121
- Yabu, S. (2013), Development of longwave radiation scheme with consideration of scattering by clouds in JMA global model, *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. **43**. 4.07-4.08.
- Zhang D. and R. A. Anthes (1982), A high-resolution model of the planetary boundary layer—sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 Data. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1594–1609.

非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた台風-海洋相互作 用の研究:海洋上部貯熱量変動の台風強度に与えるインパクト

Typhoon-ocean interaction study using the coupled atmosphere-ocean non-hydrostatic model: Impact of upper ocean heat content change on typhoon intensity

課題責任者名

坪木和久 名古屋大学地球水循環研究センター (2015年10月1日より宇宙地球環境研究所に改組)

研究分野

気象学

研究の目的と意義

台風などの熱帯低気圧の最大強度は海面水温によって大きく規定される(たとえば Emanuel (1986, JAS)の最大可能強度)。しかしながら、海面水温は海洋の熱エネルギーに かんする一側面と考えるべきで、むしろ海洋上部の海水が持つ貯熱量のほうが本質的であ る。このことは研究者の間では知られたことであったが、昨年のNHKスペシャルで放映され たメガディザスター「スーパー台風」で取り上げられ一般にも関心が高くなった。海洋上部の 貯熱量は、季節変化やエルニーニョ・ラニーニャなどの海洋の長期変動、さらに地球温暖 化などで変動するが、その変動が台風、特に最も強いクラスの台風であるスーパー台風の 強度変化にどのようなインパクトを与えるかは未解明である。Haiyan (2013)や Megi(2010)な どのスーパー台風に対して、海洋内部の水温上昇が関係しているという指摘もあるが、明 確な答えは得られていない。そこで本申請課題では、これまでに整備してきた非静力学大 気海洋結合モデルを用いて、海洋上部貯熱量の変動が台風の強度に与えるインパクトを 明らかにすることを目的として、台風 Haiyan (2013)、Megi (2010)、サイクロン Pam(2015)な どのスーパー台風のシミュレーションとインパクト実験を実施する。

これらの熱帯低気圧は比較的低緯度に発生するものであるが、地球温暖化の進んだ未 来では、日本付近の海面水温は現在のその領域程度にまで達する。Tsuboki et al. (2015, GRL)は、今世紀末ごろには海面水温の上昇によりスーパー台風が日本付近に達すること を示した。上記の現在低緯度に発生するスーパー台風に対する海洋内部のインパクトを明 らかにすることは、将来の日本付近の最強台風の強度予測の精度を上げることにつながる ものである。また、海洋内部の温度変化を計算する結合モデルを用いて台風のシミュレーションをすることは、台風と海洋の間の熱エネルギーの交換をより正確に計算することになり、 台風強度のより正確な予測につながるものである。さらに台風が海洋に与えるインパクトに ついても調べることが可能になり、海洋の短時間変動の一つを明らかにすることにつなが る。

研究内容

これまでの特別推進課題で整備した、放射過程を導入した非静力学大気海洋結合モデルをもちいて、海底から大気上端までを計算領域とした高解像度シミュレーションを実施する。このような結合モデルは国内では唯一であり、大気も海洋も非静力学系である結合モデルは世界的にも他にはほとんど見当たらない。結合モデルを構成する大気側のモデルは、名古屋大学地球水循環研究センターで開発された雲解像モデル CReSS であり、海洋側のモデルは海洋研究開発機構で開発された非静力学海洋モデル NHOES である。これらはともに純国産のモデルであり、地球シミュレータで開発されたモデルである。このため結合の親和性が高く、容易に任意の解像度での結合が可能で、かつ地球シミュレータで効率の高い計算が可能である。

本申請課題では、これまで実施してきた特別推進課題でより明らかになってきた、海洋 上部の貯熱量変動の台風に対するインパクトに問題点をしぼり込んで研究を実施する。 2013 年にフィリピンに甚大な被害をもたらしたスーパー台風 Haiyan や同様の台風 Megi(2010)、さらに 2015 年 3 月に南太平洋のバヌアツに大きな被害をもたらいしたサイクロ ン Pam を例として、結合モデルを用いて、これらのシミュレーション実験を行いその再現性 を検討する。さらに同じような海面水温分布で貯熱量の異なる海洋を用いて、貯熱量の変 動の台風強度に与えるインパクトを調べる。

これらのシミュレーション実験で用いる海洋のデータは JCOPE2 を用いる。近年の海洋の データは JCOPE2 により与えることができるが、1990 年代まで遡って、海洋のデータを与え ることも検討しており、その場合は地球シミュレータセンターの所有する OFES のアウトプット データを利用する。

研究成果

1. Cyclone Pam の強度に対する海洋の影響

1.1. はじめに

2015年3月9日06UTCに南半球低緯度域(8S付近)で発生したtropical stormは、その 後 Cyclone Pam として発達しながら南西太平洋を南下し、3月12日18UTCには Category 5 (Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale)まで勢力を強めた。13日12UTC頃、南太平洋島 嶼国のバヌアツ共和国域を通過し、首都ポートヴィラに最接近したのをはじめ、同国に甚大 な災害をもたらした。南西太平洋で観測されるtropical cyclone (TC)でCategory 5 に達する 非常に強いTCは少なく(2010年のUlui以来)、Cyclone Pamは興味深い事例である。本研 究ではCyclone Pamの事例について数値モデルを用いて海洋の条件を変えた実験を行い、 Pamの強度(中心気圧)の時間変化を調べた結果を報告する。海面水温(Sea Surface Temperature, SST)を通じて台風強度に影響を及ぼす海洋の効果を調べるために、SST 固 定および、一次元及び三次元の海洋モデルと結合した大気海洋結合モデルを利用し、海 洋結合・非結合の数値実験を行った。これら実験での再現された Pam についての強度比 較から、環境場、特に海洋の影響を考察する。

1.2. モデル設定

数値実験には大気及び海洋の領域モデルを用いた。大気は非静力雲解像大気モ デル CReSS (Tsuboki, 2007)を用いた。海洋結合実験では、一次元海洋結合実験(1D 実験)はモデルに海洋上層のみを扱う鉛直熱拡散方程式を解くスラブモデル、三次元 結合実験(3D 実験)では大気海洋結合モデルとして CReSS-NHOES (Aiki et al., 2015) を採用した。大気の初期値・境界値として JMA/GSM-GPV を、三次元海洋の初期値・ 境界値には、JCOPE2 再解析値を利用した。SST 固定実験には JMA/MGDSST およ び JCOPE2 の最上層を SST として利用した。

Cyclone Pam は、twin cyclone として発生し(もう一方は北西太平洋の台風 T1503 Bavi に発達)、発生時に赤道付近低緯度域には強い西風が観測された。その後 Pam は南半球の夏季のSSTの高い海上(10S-15S)をほぼ南に10日から13日にかけて発達しながらゆっくり進み、以降加速しながら15日には30S付近に到達した。これらの twin cyclone が約1週間で移動しながら強度変化する様子をシミュレーションするために、計算領域は37.89S-13.29N, 142.11E-74.57Wの広い領域をとり、twin cyclone とそれらができる環境を計算した。空間解像度は Cyclone を構成する積雲を表現できる水平解像度2kmで、格子数3587×2563、大気鉛直67層のとした。実施した実験の条件について表1にまとめる。実験は、3月10日06UTCを初期時刻とした海洋結合・非結合の実

験のほか、初期時刻による強度の違いを見るために、計算開始時刻を前後±6 時間ず らした実験も行った。それぞれの実験について7日積分を行った。

実験名・海洋条件	鉛直層	初期時刻
fix SST	surface (SST) のみ	2015/03/06 UTC
1D (slab ocean)	30m 厚さ(60 層)	2015/03/06 UTC
3D (CReSS-NHOES)	海底地形あり100層 (鉛直 stretch 座標)	2015/03/06 UTC
1D (放射あり RRTM)	30m 厚さ(60 層)	2015/03/06 UTC
1D -6	30m 厚さ(60 層)	2015/03/00 UTC
1D +6	30m 厚さ(60 層)	2015/03/12 UTC

表1 Cyclone Pam 数值実験設定

1.3. プログラム性能

本課題での計算は、海洋結合・非結合実験ともにフルフラットMPI並列で実行し、地 球シミュレータ(新 ES)の 256 から 1024 ノードを実験に利用した。利用したノード数と経 過時間、ピーク性能比を表 2 に示す。海洋結合(1D)実験 256 ノードの計算に対し、計 算コスト的にほぼ変わらない海洋非結合(fix SST)実験 1024 ノードの計算においてもピ ーク性能が 10%近出ている。海洋の三次元変動を計算するため計算コストが増える海 洋結合(3D)実験でも、7.36%と効率よく計算されている。一方、放射コードは計算式の 構造上ベクトル化できない部分が多く、コストがかかるため性能を阻害する要因となっ ている。表 2 における 512 ノード利用において 1D 実験 256 ノード利用より性能が大きく 落ちたのはこのためである。なお、この Pam の計算では、放射コードの一部をインライン 展開、ベクトル化阻害部分を取り出して別ループでの処理、ベクトル化できない部分に 作業配列を利用したスカラ処理を採用する、など新 ES 向けチューニングを最大に行っ たものを利用して実施している。

実験名	ノード数	計算時間 (elapse time)	ピーク性能比
fix SST	1024	10時間 51 分	9.72%
1D (slab ocean)	256	31 時間 40 分	11.88%
1D (放射あり RRTM)	512	14 時間 23 分	6.26%
3D (CReSS-NHOES)	512	26 時間 17 分	7.36%

表 2 Cyclone Pam 実験ノード数・計算時間

1.4. 結果

すべての実験において、積分開始後の10日から12日にかけて、10S-12S域でPam のゆっくりした南下とその後速度を上げた南下をほぼ再現した(図1)。Pamと赤道をはさ んで北半球にほぼ対称的に位置した台風T1503が発達する様子も再現された(図略)。 10日06UTCを初期値とした結合・非結合実験(fix SST, 1D, 3D)間では、経路の違いは ほとんど見られず、この10日06UTC開始が最も観測に近く、積分期間全体を通して最 も観測に近い経路を再現した(最大東へ約200 kmのずれ)。一方、初期時刻を-6時間、 +6時間ずらした1D実験では10日06UTC開始の経路よりさらに東に200 kmずれた (図1)。中心位置の緯度を観測と比較すると、計算開始から14日00Zまで観測とほぼ 同じ緯度に位置し、14日12Zごろになると観測(24.5S付近)より1度ほど北に位置し、 以後、観測より移動が遅れた。すべての実験の初期時刻で、Pamの渦中心はほぼ同じ 位置にあるが、Pamの再現において用いた初期時刻の環境場のわずかな違いがその 後の経路に影響したことが示唆される。

図 2 に観測と各実験の中心気圧の時間変化を示す。NESDIS Tropical Cyclone Products, (http://www.ssd.noaa.gov/PS/TROP/DATA/2015/tdata/spac/17P.html)によると、Pam の中心気圧は発生の 10 日頃の 980hPa から急速に低下し 3 月 13 日には 17S, 169E 付近で 880 hPa の最低気圧を示した。一方、放射を導入した 1D RRTM 以外の すべての実験において、計算開始後の中心気圧の低下の傾向は観測とほぼ同じ傾き で減少を示すが、気圧の低下は観測に約 1 日遅れて現れ、計算期間中の最低気圧は 14 日 06UTC 頃に現れた。経路が観測に最も近かった 10 日 06Z 初期値の実験間では、海洋結合 3D 実験で観測に近い最低中心気圧 885hPa を示した。一方、SST を初期時刻に固定した海洋非結合実験(fix SST)では 850hPa に達し強くなりすぎるのに対し、上 層のみの海洋結合を扱う 1D 実験では 900hPa と最低中心気圧が弱まった。どの実験 でも、計算初期(3/10~3/11)において、Pam は低緯度 10S 付近に位置し中心気圧 980hPa からゆっくり低下しながら高い海面水温(SST)の領域を移動し、この間の実験間 の気圧差は小さい。その後(3/12~3/14 12Z)、12S-23S を移動しながら中心気圧は急低

下するに従い、海洋との相互作用により気圧低下の抑制が生じ、結合(1D,3D)実験と非 結合(fix SST)実験間で差が生じる。13 日 00Z 以降は、1D 実験より 3D 実験の中心気 圧が低い(サイクロンが強い)。SST の分布をみると、3D 実験では初期に移動速度が遅 い Pam の通過に伴う海洋下層からの湧昇および混合による冷却が起こり、経路上(後 流部分)に SST の低下が現れており、これが fix SST に比べて強度抑制が起きた要因 である(図略)。一方、経路上に SST 低下がみられない 1D 実験より 3D 実験の強度が強 い理由は、Pam の強度を決める中心域の SST 分布及び海洋からの熱供給(潜熱フラッ クス)が 3D 実験では大きかったことによる(図略)。また海洋内部の水温分布ついても調 べてみると、3D 実験では熱帯低気圧の強度に影響すると考えられている海洋貯熱量 を決める水温 26 度 C の深さが経路上熱帯から 25S 付近まで十分深かった(30 m 以上)。 これが、Pam において海洋との相互作用があっても、バヌアツ通過付近でもカテゴリ5と Pam が十分強い強度を保てた理由として考えられる。

なお、海洋結合 1D 実験で放射 RRTM を 10 分間隔で計算した 1D RRTM 実験で は、他の実験に比べ気圧の低下が弱く、Pam の再現性に問題があるため、今回の解析 に用いていない。放射過程と熱帯低気圧の強度の関係に関しては物理的な検証を必 要とするため、今後の課題とする。



図1 大気海洋 1D/3D 結合・非結合実験における Pam の経路。(計算領域の一部分を拡大)



2. 台風 Haitang(T0505) の高解像度(2km)大気海洋結合実験

2005 年に台湾に上陸し、台湾島上で一度南下する特徴的な経路を取った台風 Haitang(T0505)について、1D, 3D 海洋結合実験を行った。この T0505 の事例は、先行 して行った 4km 解像度での実験で、海洋結合による台風中心気圧の抑制、通過経路 上の SST 低下のほか、台湾北東岸および台湾海峡で T0505 通過後に観測された沿岸 湧昇・上層混合による水温低下(Morimoto et al., 2009)を海洋結合 3D 実験で再現した (吉岡ほか, 2010 年気象学会秋季大会報告)。本課題では同実験設定で解像度を 2km にして実験を行った。領域 18N-28N, 118E-135E (格子数 711×483×67)で 7/15 00UTC より 10 日積分を行った。

2km の結合実験では、4km 解像度での実験と同様、台湾上陸時に一時南下する複 雑な経路も含む期間全体の経路を再現した(図 3)。中心気圧の時間変化をみると、最 低気圧の現れる時間は観測に比べて1日遅れているが、海洋結合1D,3D実験におい てほぼ観測に近い920hPaを再現した(図 4)。4km 解像度の実験では、最低中心気圧 は2km 解像度実験と同様に観測から1日遅れるが、海洋結合で950hPa、非結合でも 940hPaと弱く再現された。これは初期値・境界値に用いたJMA RANAL(40km 解像度) がT0505をあまり強く表現していないことに起因すると考えていたが、用いる数10kmの 初期値・境界値で観測より弱く表現されている台風でも、高解像度で実験にすることに より強度を観測に近く再現することができることが今回の実験で示された。海洋結合実 験で観測に近い経路および強度の時間変化を再現できることは、観測される現実の台 風の大気海洋相互作用を数値モデルによりメカニズムを調べるにあたっての有用性を 示したといえる。



図3 台風 Haitang (T0505)の海洋結合実験における経路およびベストトラック



図 4 台風 Haitang (T0505)の中心気圧変化。海洋結合 1D,3D 実験、JMA RANAL 中心気圧(初期値・境界値)およびベストトラックの値を示す。

- 3. 伊勢湾台風における放射過程のインパクト
- 3.1 はじめに

台風の上空には巻雲が広がり、その水平スケールは数 1000 km に及ぶ。このため、 放射過程を適切に取り扱うことは台風の強度予測に非常に重要である。また、放射過 程は計算負荷が大きいため、一般的には数 10 分に一度の頻度で計算を行う。そこで、 本研究では放射過程に RRTM (Mlawer et. al, 1997) および MSTRN-X (Sekiguchi and Nakajima, 2008)を組み込んだ雲解像モデル CReSS を用いて、放射過程が台風 の強度予測に与える影響について調べた。

3.2 実験設定

対象とした事例は伊勢湾台風(T5915)と2009年14号台風(T0914)である。CReSS の 水平格子間隔は T5915 に対して 2 km、T0914 に対して 0.04 度(約 4 km)と 0.02 度 (約 2 km)で実施した。RRTM による放射計算を行う間隔を T5915 に対しては 10 分 (R10)と 30 分(R30)、T0914 に対しては 5 分(R05)、10 分(R10)、15 分(R15)とした。 MSTRN-X による放射計算の間隔はいずれも 10 分 (MR10)として、実施した。また、 それぞれの事例に対して放射計算を行わない実験(NORAD)も実施した。初期・境界 条件には、T5915 に対しては JRA-55 を、T0914 に対しては GSM 及び MGDSST を用いた。表 3 にそれぞれの実験における、計算格子設定と、使用ノード数、そして実 行時間の一覧を示す。積分時間は T0914 については 5 日間とした。計算ステップ数 は 0.04 度格子実験で 108,000、0.02 度格子実験で 216,000 となる。これに対して T5915 の積分期間は 3 日間で、計算ステップ数は 129,600 である。なお、本計算に おいて、放射スキームコードの最適化を施す前に実施したもので、特に MSTRN-X を 用いた放射過程の計算を行うと、非常に実行時間が大きくなることが分かる。

表 3 各計算の設定および実行時間(単位:時間)。# の列は使用したノード数を表す。ただ し、T5915 における MR10 は 128 ノードを使用した。

	格子間隔	次元	#	NORAD	R05	R10	R15	MR10
T0914	0.04°	387x483x67	8	5.5	18.5	10.7	9.0	—
T0914	0.02°	771x963x67	16	20.5	39.8	31.5	28.0	47.5
T5915	2.0 km	1539x1539x67	64	8.1		10.5		28.2

3.3 結果

図 5 に T5915 実験における、中心気圧の時系列を示す。NORAD では、9 月 25 日 06UTC 以降、ベストトラックよりも 20 hPa 以上発達をしているのに対して、R10、R30 では、 過発達傾向にはあるものの、その差は 10 hPa 未満に改善されている。NORAD と R10 や R30 とは雲氷の分布が大きく異なっており、放射過程の計算を行うことにより、領域全 体に雲氷が広がった(図 6)。このため、地表面での正味の放射量が NORAD よりも少なく なり、台風周辺の SST が RAD よりもほぼ全領域で低くなった(図 7)。この SST の低下 が NORAD と比較して台風の中心気圧が高くなった原因の 1 つと考えられる。図 8 上は 9 月 26 日 0UTC の T5915 の中心から 800 km までの接線平均された正味の加熱率の半 径--高度断面図を示す。台風壁雲とそこから吹き出した上層雲の上部で負の加熱率、上層 雲の下部と眼の上部で正の加熱率となっていた。眼の中・下層および壁雲領域外の下層 で負の加熱率を示し、これらの領域で大気が安定化していた。中心気圧の時系列は放射 過程に RRTM と MSTRN-X の間で、計算期間前半でほぼ違いが見られなかったが、9 月 25 日 18UTC 以降約 5 hPa、MSTRN-X の方が、中心気圧が高く推移した(図 5)。放射 加熱率を比較すると(図 8)、MSTRN-X の方が上層の正の加熱率の領域が広がっていた。 また、眼上部の正の加熱率の領域が RRTM と比較して高い位置に分布していた。 T5915 において、最低中心気圧と最大地上風速は R10 と R30、そして MR10 の間 でほぼ同じであった。放射過程を入れることにより、中心気圧約 15 hPa 上昇し、地上風速 約 4m/s 弱くなった(表 4)。これに対して、T0914 では、水平格子間隔 0.04度の実験で、 最も中心気圧の高い R05 と最も低い R15 では約 10 hPa の差が見られた(表 5)。 NORAD との比較では、最も発達した R15 と比較しても約 20 hPa 放射過程を入れること で弱くなった。MSTRN-X を用いて 10 分間隔で計算した結果(MR10) は R15 と同程度の 結果を示した。水平格子間隔を 0.02 度にした実験では、R10 から R15 の間に見られた 差がやや小さくなった。このように、T0914 では、水平格子解像度や放射計算間隔依存性 が見られた。T5915 でこのような依存性が見られなかったのは、上層の氷晶雲が非常に広 範囲に広がっていたため、T0914 と比較して、水平的にほぼ一様な放射特性を示たためと 考えられる。



 図 5 T5915 の中心気圧の時系列。黒丸を 結んだ線はベストトラックを表す。太実 線は NORAD、細実線と破線はそれ ぞれ、R10、R30 を表し、点線は MR10 を表す。



図 6 T5915 実験における、鉛直積算雲 氷混合比の R10 と NORAD の 差。等値線は 0.05 kg/m² 間隔。陰 影は R10 の方が多いことを示す。 図中黒丸は台風中心を表す。



図 7 T5915 実験において、台風中心から 500 km までの接線平均された、SST の R10 と NORAD の差の時系列。 等値線の間隔は 0.1 ℃。陰影は R10 の方が低いことを示す。



図 8 T5915 実験において、台風中心から 800 km までの接線平均された、正味の放射加熱 率(カラー)。黒太線は雲の輪郭を示す。灰色の実線は温位を表し、青破線は放射なし 実験における温位を表す。水色と青色の実線はそれぞれ雲氷と固体凝結物質(雲氷、 雪、霰)が1×10⁻⁵ kg/kg の等値線を表している。

NORADR10R30MR10最低中心気圧 (hPa)891.6907.1905.9904.8最大地上風速 (m/s)64.161.260.261.8

表 4 T5915 の各実験における、最低中心気圧と最大地上風速。

表5 水平格子間隔 0.04 度の T0914 の各実験における、最低中心気圧と最大地上風速。

	NORAD	R05	R10	R15	MR10
最低中心気圧 (hPa)	912.9	940.5	941.4	932.9	931.3
最大地上風速 (m/s)	63.1	56.6	54.5	58.9	58.6

3.4 まとめ

放射過程が台風の強度予測に与える影響を調べるため、放射過程に RRTM と MSTRN-X を導入した CReSS を用いて、格子解像度および放射計算間隔依存性につい て調査を行った。T5915 では放射計算間隔にあまり依存性がなかったのに対して、T0914 では格子解像、放射計算間隔いずれにおいても、結果が異なった。今後、これらの要因及 び適切な設定について明らかにしたい。

参考文献

- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono and S.A. Clough 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for longwave, J. Geophys. Res., 102, 16663-16682.
- Sekiguchi, M. and T. Nakajima, 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., 109, 2779-2793.

想定される波及効果

大気に比べて海洋の変化はゆっくりであるため、数日単位の短時間スケールの現象に ついては、海洋の時間変化はないものとして、多くの計算が行われてきた。台風のように海 洋の影響を強く受ける現象についても、同様にその変化は考慮されていないことが多い。 本研究の一連の実験で、海面水温を初期値に固定した場合、現実と極めて異なる台風強 度となることが示された。海洋は少なくとも1次元、理想的には3次元の計算が台風の強度 予測には不可欠である。特に雲解像モデルを用いた高解像度の台風シミュレーションにお いても、海洋のプロセスのインパクトが大きいことが示されたことは、今後の台風シミュレーシ ョンでは、海洋のプロセスのないシミュレーションは信頼性が低いことを示しており、海洋の 計算が不可欠であることが認識される。

放射過程において、RRTMとMSTRNの2つを検討し、特別推進課題のサポートによ りそれらの最適化を実施した。これらのコードは、雲解像モデル CReSS だけでなく、他のモ デルでも用いられている。本研究課題で実施したこれらの放射コードの新ES における高速 化は、これらの放射コードを用いている数値モデルにおいても同様に高速化が可能であり、 多くのモデルに資する重要な結果である。

計算および計算機技術サポートとの連携

1. 新ES への CReSS 最適化

本課題では地球シミュレータセンターを通じて NEC の協力のもと、CReSS の新 ES への 最適化を実施した。最適化にあたっては実際の台風 Choiwan(T0914)の事例を用い、解像 度 4km(格子数 387×515×67)および 2km(格子数 771×1027×67)の規模で行った。

本課題ではCReSS 3.4.3m RAD1.2.1_20140825を用いた。CReSS 単体性能をフルフラットMPI並列およびMPI/OpenMPハイブリッド並列での実行速度を比較したところ、両者の性能差はほとんど見られなかった。NHOES 単体の最適化および性能は別途確認しており、結合により性能を阻害することはないことから、本課題で用いる海洋結合モデル CReSS-NHOES をフルフラット MPI で結合実験を実行する際に性能が出るように最適化を進めることとした。

また、CReSS 3.4.3m RAD1.2.1_20140825 では 2014 年 AGCM 向け放射コード RRTMG(Copyright © 2002-2010, Atmospheric and Environmental Research, Inc.)を導入し た。この放射コードを利用した CReSS の大規模ベクトル型計算機での実験は、これまで実 績がないため、今回新 ES での実行にあたって性能を調べ、最適化した。一般的に放射コ ードはループ中での配列の相対参照があるなどベクトル化に向いていない計算があり、コス トがかかることが知られているため、この負荷を減らすことが高速実行に重要であると考え た。

2. CReSS 初期性能

最適化前の Choiwan 4km で放射を 10 分ごとに計算した場合の分割方式による性能比較を表 6 に示す。この規模でベクトル長も長くとることができ、並列化率 98.23%と高い値を

出し、並列数を多くして実行した場合でも効率よく実行していることがわかる。また、64 並列 で領域の x-y 方向の分割方式を変えた実験では、y 方向のみ分割し、x 方向に長い領域を 取るほうが、性能が出ることが確認された(表略)。

放射有り無しによる性能比較を行ったところ、16並列では放射過程により2.8倍の実行時間がかかっていた。Ftraceを用いてプログラム中のサブルーチンごとの性能を調べたところ、放射過程にかかわるルーチン4個が上位を占めていることがわかった。

表7にChoiwan 2km での放射あり・なし計算での性能を示す。並列化率 99.17%で4km より高い性能を示している。ベクトル化率も高い。これらからCReSS 単体は高解像度の大規 模実験で性能が出ることが期待できる。256 並列での比較から、放射計算が高解像度でも 高速実行の阻害要因となっていることが示されており、この部分最適化が必要なことがわか る。

衣 0 Choiwan 4km 派別の9日昇の7王昭比較(INEC (こよる 2013/4/10 両直載 ロより)	表 6 Choiwan 4km 放	放射あり計算の性能比較	(NEC による 2015/4/10 調査報告より)
---	-------------------	-------------	----------------------------

並列数	Node 数	分割方式	Real(s)	MFLOPS	VLEN	V.op(%)	MEM(MB)
16	4	1x16	11181.4	3582.7	133.6	95.0	2144.0
32	8	1x32	5934.0	3515.9	133.3	94.8	1248.0
64	16	1x64	3330.4	3387.3	132.7	94.7	800.0
128	32	1x128	2071.8	3126.0	131.3	94.4	608.0
256	64	1x256	1365.3	2988.3	129.2	93.9	544.0

表 7 Choiwan 2km 計算の性能比較(NEC による 2015/4/10 調査報告より)

放射	並列数	Node 数	Real(s)	MFLOPS	VLEN	V.op(%)	MEM(MB)
あり	64	16	15691.3	4883.3	164.7	96.9	2208.0
	128	32	8788.5	4728.9	163.2	96.8	1312.0
	256	64	5304.4	4457.0	161.0	96.6	928.0
なし	256	64	2722.9	8033.4	203.1	99.2	544.0

3. CReSS 最適化

NEC協力のもと、高速実行の阻害要因になっている放射コード RRTM についての最適 化をおこなった。まず、計算コストがかかっている上位 4 ルーチンのうちの 2 つ (rrtmg_sw_vrtqdr.vrtqdr_sw, rrtmg_sw_reftra.reftra_sw)を、インライン展開することで最適 化した。コンパイル時に当該サブルーチンを含むファイルに対しインライン展開のオプショ ンを適用して実行することで対応した。

-pi line=200 expin=rrtmg_sw_vrtqdr.f90,rrtmg_sw_reftra.f90

この処理により、64 並列で 3330.4 秒→3296.7 秒、128 並列で 2071.8 秒→1194.2 秒への 高速化が見られた。

次に、rrtmg_lw_rtrn.rtm に対し、ベクトル化が阻害されているスカラ計算を、作業配列を 採用し、ベクトル化する修正を実施した。プログラムを修正することでベクトル化が促進され、 229.1 → 162.6sec 1.4 倍の性能向上が見られた。(詳細略)。

以上の最適化を実施した RRTM 最適化版を用いて、今回本課題が実行した伊勢湾台 風の実験および Pam の大規模高解像度実験を実施した。高解像度(2km)の格子数 1000×1000 を超える大規模実験では、本体の計算に関する計算コストが大きくなるため、放 射過程のコストが相対的に小さくなった。

今後の予定

本課題で目標の一つとしていた 2013 年のスーパー台風 Haiyan については、①進路、 ②最大強度、③発達率、および④発達開始時期が観測と合わないという問題点のうち、② 最大強度と③発達率については、ある程度再現できた。一方で①進路については北にず れる問題がみられ、より深刻な問題は④発達開始時期について、観測より大きく遅れる点 が問題点として残された。これらの点について、本特別推進課題で実施してきた計算結果 を詳細に検討し、必要な追加実験を行うことで解決を図りたい。台風 Megi(2010)について も同様の問題が残された。これについても今後検討を行う予定である。

また、本特別推進課題で実施した計算は大規模で、まだ十分な解析が行われていない部分がある。これまでの計算結果をさらに詳細に解析することで、台風のシミュレーションについて新しい知見を得る。

新聞、雑誌、テレビ等への掲載記事

新聞報道:

・脅威スーパー台風。毎日新聞, 10月2日, 2015年

特別推進課題に対する意見

前回に引き続き大規模な計算をさせていただき、たいへんありがとうございました。その データを詳細に解析するために特別推進課題終了後もデータを一定期間ディスク上に保 存していただき、それにアクセスできるようにご配慮いただくことをお願いします。

Ⅲ 特別推進課題に対する技術サポート報告

海洋研究開発機構地球情報基盤センター情報システム部計算技術グループ 齋藤友一、池田美紀子、今任嘉幸、上原均

1. はじめに

本稿では、平成 27 年 6 月から 9 月末にかけて実施された特別推進課題第一期課題に 対する技術サポートについて報告する。特別推進課題では、平成 27 年 6 月に全面更新さ れた世界トップクラスのスーパーコンピュータである新・地球シミュレータ(ES)の性能を十二 分に活用して短期間に画期的な成果を創出することを目的としている。特別推進課題の推 進とES の運用管理を行う地球情報基盤センターでは、利用高度化および運用管理面での 課題支援を全面的に進めるとともに、各課題ごとに担当者を設定して、技術的な支援を研 究グループと一体となって行い、各課題の研究促進と成果創出に貢献した。以下では、そ の技術サポートの概要と種々の技術的なトピックスを述べる。

2. 技術サポート詳細

2.1 各課題と技術サポート担当

			-
No.	課題代表者·所属	課題タイトル	技術支援担当
#1	坪井誠司 海洋研究開発機構 地球情 報基盤センター	ES の全ノードを用いた全球地震波形計算に よる地球内部構造の解明	今任嘉幸
#2	高薮出 気象庁気象研究所	地球温暖化施策決定に資する気候再現・予 測実験データベース	池田美紀子
#3	竹内義明 気象庁気象研究所	複数の次世代非静力学全球モデルを用いた 高解像度台風予測実験	池田美紀子
#4	坪木和久 名古屋大学 地球水循環研究センター	非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた 台風-海洋相互作用の研究:海洋上部貯熱 量変動の台風強度に与えるインパクト	齋藤 友一 池田美紀子

各特別推進課題に1~2名の担当者を設定して、技術サポートにあたった。

各課題の研究目標や学術的詳細については、各課題からの報告をご覧いただきたい。

2.2 特別推進課題への技術支援概要

新 ES は 2015 年時点で最新鋭のベクトル計算機NEC社製 SX-ACE から構成される。そ のため、各特別推進課題で用いられるプログラムは、SX-9 などの従来のベクトル機での稼 働実績こそあっても、SX-ACE での稼働実績は無かった。そのため、特別推進課題の実施 では、利用プログラムの移植と計算結果確認、性能確認が必要であり、場合によっては最 適化も必要であった。また限られた期間で成果を効率的に創出するために、効率的なプロ グラムの実行条件(1ジョブあたりの使用ノード数など)の調査検討も不可欠であった。さらに プログラムを実行するためのジョブスクリプトについて作成やテンプレートの提示、一般的な 利用方法のユーザへのレクチャなども行った。

プログラムの実行段階では、大量のジョブ投入や長時間実行、高並列実行などを可能と するために、新ESの一部占有や多数ジョブ・長時間ジョブを投入可能とするための各種制 限緩和などの調整を行い、効率的な利用環境を維持した。利用上の疑問点や不具合に関 しても随時対応して、ユーザの利便性の維持・向上に努めた。

そうして得られた計算結果は、課題によっては数ペタバイトに及ぶ膨大なものであった。 そのような大量のデータ処理等もサポートした。

このように、プログラムの実行前の段階からプロダクトラン実行、実行後の計算データの 処理に至るまで、全面的に技術サポートを行った。

2.3. 課題#1「ES の全ノードを用いた全球地震波形計算による地球内部構造の解明」 への技術支援の詳細

本節では課題#1の研究実施における概要に触れ、その技術サポートにおいて特徴的な 点について述べる。

2.3.1. 課題の手法

本課題では、より現実的な地球内部構造モデルを仮定した全球を伝播する理論地震波 形を地震波の周期1秒の精度で計算する。この理論地震波形により、地球内部、特に核・ マントル境界を通過する地震波の理論地震波形記録を計算し、この領域の微細構造を明 らかにする。さらに、深発地震により励起された地震波の遠地記録と理論波形を比較し、震 源過程モデルを構築する。スペクトラル要素法の計算プログラムである SPECFEM3D_GLOBEを用いて地球シミュレータの5,046ノード(20,184 コア)で周期1秒の 精度での理論地震波形計算を実施する。 地球シミュレータは 512 ノードの基本クラスタと 2048 ノードの拡張クラスタで構成される。 製品として提供されているMPI通信は、クラスタ内に限定されているが、研究目標を達成す るために必要な 5,046 ノードでプログラムを実行するにはクラスタ間での MPI 通信を実現す る必要がある。本課題ではクラスタを跨った MPI 通信の実現に向けて、日本電気株式会社 の協力の元、検証を実施した。検証内容は技術サポートの詳細で述べる。

クラスタを跨った通信を行う手法は以下とする。ただし、クラスタを跨った MPI 通信の手法 は本課題専用であり汎用的に利用できるものではない。



O 計算プロセス(MPI)

▲ TCP通信プロセス

この手法では計算ノードを論理山といったグループで分割する。論理山内は、IXS また はメモリを介してプロセス間通信を行い、論理山間のプロセス間通信はTCPを利用する。論 理山内で特定の物理ノードに TCP 送信・受信プロセスをペアで起動し、TCP 通信プロセス 用のノード以外に計算プロセスを生成する。TCP 経由の MPI 通信は SPECFEM3D_GLOBE で利用されている MPI 手続きを中心に一部のみ対応している。実 行は論理山に対してジョブ投入を行い、ユーザプログラム中の MPI_Init にて全プロセスで タイムアウトなく待ち合わせを行う。

2.3.2. 技術サポートの詳細

地球シミュレータ全計算ノード 5,046 ノードで SPECFEM3D_GLOBE を実行するために、 クラスタを跨った MPI 通信が可能な並列実行機能を検証、改良した。検証はシステムメンテ ナンス期間中や、拡張クラスタを専有して実施した。 検証環境を以下に示す。

MPI 通信評価テストプログラム

SPECFEM3D_GLOBE で使用されている MPI 通信を網羅した評価テストプログラム。

(2) SPECFEM3D_GLOBE 実コード

実行時のパラメータを以下とし検証を実施。

NEX_XI ($_ETA$) = 288

NPROC_XI ($_$ ETA) = 36

RECORD_LENGTH_IN_MINUTES = 1.0d0

検証と改良により以下が改善した。

◆ 立ち上がり時間

立ち上がり時間(ジョブ投入からプログラム内の MPI 初期化処理が完了する時間)を約60分から約8分(約7倍強)に改善。

◆ 山間インバランス実行

ノード間を可能な限り IXS を介した通信とするため、論理山あたりのノード数が不均一な実行が可能なように改良した。

上記に加えて、目標達成のためには、今後、データの規模によって、ストリームバッファ枯 渇が発生しにくいようにカーネルパラメータを調整する必要がある。

2.4. 課題#2「地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース」への 技術支援の詳細

本節では課題#2の研究実施における概要に触れ、その技術サポートにおいて特徴的な 点について述べる。

2.4.1. 課題の手法

IPCC 第5次報告書を受けて、各国政府は自国における温暖化適応策の設計に取り組み始めている。その際、施策を決定する政府機関で共通のシナリオを持つことが、一貫性のある適応策実現に必要不可欠である。本課題で、気候変動リスク情報創生プログラムで行ってきた地球温暖化研究をベースに、過去と将来の気候変化に不確実性の情報を加味した確度の高い影響評価が可能となる物理気候プロダクトを作成した。

基本的なデータセットの内容を以下に記す。

○ 60km 全球大気モデル実験(MRI-AGCM)	
過去気候:1950~2010年(61年間)	100 メンバー
将来気候:平均気温4℃上昇時(61年間)	90 メンバー
○ 20km 領域大気モデル実験(MRI-NHRCM)	
過去気候:1950~2010年(61年間)	50 メンバー
将来気候:平均気温4℃上昇時(61年間)	90 メンバー

上述のように、過去実験、将来実験ともに多数のアンサンブル計算を行うが、その総積分時間は約25,800年分にも上る。また、将来実験については、2040年前後の近未来の気候状態の予測精度を上げるため、4℃上昇の実験に加え、一部2℃上昇の実験も行った。

本課題で作成されたデータベースは「d4PDF(database for [4] Policy Decision making for Future climate change)」という愛称で、文部科学省地球環境情報統合プログラム(DIAS) が運営するサーバを経由して公開されている。今のところ一部のみの公開であるが、今後影響評価で使われることの多いデータを優先して、順次追加される予定である。平成 27 年 12 月 21 日にはデータベース公開のシンポジウムを開催し、データベースについての紹介 を行った。

また、前期に引き続き、効率よく多大な計算を実行できるよう、地球シミュレータおよびロ グインサーバの利用制限値を緩和した。また、状況に応じ地球シミュレータのクラスタを占 有して計算を実行した。緩和値やクラスタ占有期間を以下に示す。 地球シミュレータ

	変更前	変更後
グループあたりの最大ジョブ実行数	50	100
ユーザあたりの最大ジョブ実行数	10	30
同時実行ノード数	512	2048
最大経過時間	12 時間	48 時間

ログインサーバ

	変更前	変更後
最大プロセス数	96	192
最大 CPU 時間	4 時間	24 時間

新 ES の基本クラスタ占有期間

2015年6月1日~2015年6月30日	2 クラスタ占有(1024 ノード占有)
2015年6月30日~2015年7月10日	1 クラスタ占有(512 ノード占有)
2015年7月10日~2015年7月13日	256ノード占有

2.4.2. 技術サポートの詳細

前期に引き続き、領域モデルを用いた実験において、DATA 領域からアーカイブへのデ ータ転送等を支援した。本課題には新 ES データ領域容量の 1/3 程の膨大な DATA 領域 が割り当てられたが、それ以上に膨大なデータの出力が想定されていた。そこで DATA 領 域の空き容量が枯渇して計算を継続できない事態を防ぐため、早急に出力結果を DATA 領域からアーカイブ領域に移動する必要があった。具体的な作業としては、180GB/年のデ ータを計 3,050 年分、約 550TB 分、について、ジョブ実行と計算結果の出力が正常である 事を確認し、アーカイブ領域への移動作業を行った。

2.5. 課題#3「複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験」 への技術支援の詳細

本節では課題#3の研究実施における概要に触れ、その技術サポートにおいて特徴的な 点について述べる。

2.5.1. 課題の手法

気象研究所が開発した DFS、海洋研究開発機構と東京大学と理化学研究所が開発した NICAM、海洋研究開発機構が開発した MSSG の3 つの次世代非静力学全球モデルを使 用して、水平解像度約 7km で全球高解像度実験を行う。それぞれの結果について、気象 庁現業モデルと同等の仕様の GSM(水平解像度 20kmの静力学モデル)の結果と比較し、 台風予報における全球モデル高解像度化の有効性を示す。また、モデル間の相互比較を 行うことで、それぞれのモデルのバイアスを明らかにし、モデル改良のための知見を得、台 風進路予測の更なる精度向上を目指す。

計算に使用したモデルは以下の通り。

 \bigcirc GSM (Global Spectral Model)

格子:リデュースドガウス格子

力学フレーム:球面調和関数

雲物理·積雲対流:Smith(1990)·Randall&Pan(1993)

大気境界層: MY2(Meller&Yamada, 1974, 1982)

放射:Yabu(2013)

陸面・海面:SiB(JMA,2013)

 \bigcirc DFS (Double Fourier Series Model)

格子:リデュースド等緯度格子

力学フレーム:二重フーリエ級数

雲物理·積雲対流:Smith(1990)·Randall&Pan(1993)

大気境界層: MY2(Meller&Yamada, 1974, 1982)

放射:Yabu(2013)

陸面・海面:SiB(JMA,2013)

NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model)
 格子:正二十面体格子
 力学フレーム:有限体積法

雲物理・積雲対流:Tomita(2008)・なし

大気境界層: MYNN2(Nakanishi&Niino, 2004, 2006, 2009)

放射:MSTRN-X(Sekiguchi&Nakajima,2008)

陸面・海面: MATSIRO(Takata et al.2003)海面熱収支

O MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)

格子:陰陽格子

力学フレーム:有限差分法

雲物理・積雲対流:Onishi&Takahashi(2012)・なし

大気境界層:MYNN2(Nakanishi&Niino,2004,2006,2009)

放射:MSTRN-X(Sekiguchi&Nakajima,2008)

陸面・海面:バケツモデル(3次元海洋)

以下の52事例を実験対象とした。

- Man-Yi(1318)、Usagi(1319)
 9/12 00z ~ 9/13 00z 5 初期値 5 日積分
- ③ Wutip(1321)、Sepat(1322)、Fitow(1323)、Danas(1324)
 9/30 00z ~ 10/4 00z 17 初期値 5 日積分
- ⁽²⁾ Nari(1325), Wipha(1326)

10/9 00z ~10/12 12z 14 初期值 5 日積分

④ Francisco(1327)、Lekia(1328)
 10/17 12z ~10/21 00z 15 初期値 5 日積分

2.5.2. 技術サポートの詳細(1)

これまで ES で動作実績がなかった DFS を ES へ移植し、計算性能最適化を行った。プロダクトランで使用される解像度は TL2559L100 であるが、作業効率を考え作業には TL959L100 の環境も用いた。

まず TL959L100 について、以下の最適化を行った。

(1) ライブラリルーチンへの置き換え

FFT を行っている箇所を、対応する ASL のルーチンに置き換えた。また、LAPACK のルー チンを MathKeisan のルーチンに置き換えた。

(2) インライン展開によるベクトル化促進

Monin-Obukhovの相似則に基づいた境界条件算出のルーチンを、呼び出し元ルーチン内でインライン展開しベクトル化を促進した。

(3) ループアンローリングによるベクトル化促進

コンパイラ指示行 unroll を用い、k 方向のループをループアンローリングで完全に展開する ことで、ベクトル化されていなかったループのベクトル化を有効にした。

(4) 実 FFT ルーチンの多重 FFT ルーチンへの置き換え

1次元実 FFT 処理を1次元多重 FFT 処理に置き換えた。

(5)その他

開発者様の修正箇所をマージした。

TL2559L100 について、

(1) 配列の次元入れ替えによる連続アクセス化

(2)漸化式処理書き換えによるベクトル化促進

(3)オプション指示行による自動最適化の促進

(4)ループ分割、ループ入れ替え等によるベクトル長延長およびベクトル総和処理の抑止などの最適化を行った。

ここで実施した計算性能最適化により、DFS(TL2559L100)は最適化前の 1/4 の使用ノード数で同等の性能を実現できるようになった。

2.5.3. 技術サポートの詳細(2)

DFS について、ステージインに4時間半程かかっていたところを、初期データをそれぞれのランクで読み込まずランク0 でのみ読み込み、他のプロセスへ MPI_Bcat で受け渡すことで、ステージインにかかる時間を20分程に短縮した。

2.5.4. 技術サポートの詳細(3)

ノード数	コア数	MPI	OpenMP	Real Time	Speed	並列化効率[%]	Ideal[秒]
		プロセス数	スレッド数	[時間]	UP		
64	256	128	2	11.937	1.000	1.000	42,973
80	320	160	2	9.242	1.292	1.033	34,378
128	512	256	2	6.505	1.835	0.917	21,486
160	640	320	2	5.424	2.201	0.880	17,189
320	1,280	640	2	3.339	3.575	0.715	8,595

DFS のスケーラビリティ調査を行った。



図1スケーラビリティ(ノード数による計算時間短縮の様子)

64 ノードでも経過時間制限 12 時間以内に収まることが確認できた(図 1)が、経過時間が 若干でも延びると制限にかかってしまうため、80 ノードで実行するのがよいとの結論に至っ た。ただし、システムの状況や作業進捗によって、並列数が変更される場合もある。

2.5.5. 技術サポートの詳細(4)

GSM について、計算性能最適化を行った。GSM の高コストルーチンは基本的に DFS と 同様であるが、DFS には含まれないルジャンドル変換ルーチンが高コストとして挙がってい た。以下の最適化により、当該ルーチンは約3倍に高速化された。

(1) ルジャンドル順変換ルーチンの最適化

ルジャンドル順変換ルーチンに最適化を施した。ここで使用したソースコードは、ルジャンドル変換に行列積化が適用されたもので、SR向けに最適化されている。このバージョンでは行列積部分が matmul 関数で実装されており性能が出ていなかったため、BLAS ルーチンに置換した。当該部分の処理は[実数]*[複素数]であり ZGEMM だと冗長な計算が生じる。実部と虚部を分けてDGEMMを用いるよう修正することで、更に高速化することができた。

(2) ルジャンドル逆変換ルーチンの最適化

ルジャンドル逆変換ルーチンについても、ルジャンドル順変換ルーチンと同様の方針で 行列積化を適用した。また、MPI通信ルーチンについて以下の性能最適化を適用した。

・通信開始前のバリア同期挿入

・送受信バッファのグローバルメモリ化 (MPI_Alloc_mem および Fortran2003 C バインディン グ機能使用)

・単方向通信 MPI_Put による実装

・単方向通信高速化技法の適用

2.5.6. 技術サポートの詳細(5)

MSSG は変数の出力方法を以下の2つから選択できる。

- (1)各変数についてマージしたファイルを一括で出力する方法
- (2)各変数のファイルを分散して出力する方法

本課題では出力データを削減するため(1)の方法を選択しているが、その場合(2)と比 べて1ケースの実行にかかる経過時間が約1.8倍になっていた。原因を調べたところ、ある プロセスで変数出力の度に同期されており、出力が逐次的に実行されていた。これを各プ ロセスにファイル出力すべきデータを集めてから、各プロセスが並列でファイル出力するよう に変更したところ、メインループの実行時間を752.097秒から383.288秒に短縮することがで きた。

2.5.7. 技術サポートの詳細(6)

出力データを正 20 面体格子から緯度経度格子に変換するためのポスト処理環境を提供 した。さらに可視化動画を課題メンバーで共有するため、Web サーバ(仮想サーバ)を提供 した。
2.6. 課題#4「非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた台風-海洋相互作用の研究:海洋上部貯熱量変動の台風強度に与えるインパクト」への技術支援の詳細

本節では課題#4 の研究実施における概要に触れ、その技術サポートにおいて特徴的な 点について述べる。

2.6.1 課題の手法

本課題は 3 月期からの継続課題であり、これまで再現が困難であったとされるスーパー 台風等、特徴的な台風について非静力学大気波浪海洋結合モデル(CReSS-NHOES)を 用いてシミュレーション実験を行うことが目標であった。

技術支援として、前期は実験を進めるためのモデルの動作検証、使用するモデルのバージョン選定、大気モデル(CReSS)に放射モデル(rrtm)の導入とチューニングの検討を行った。今期はさらに大気モデル(CReSS)に放射モデル(mstrn)を導入した単体実験および結合実験を進めるための技術支援を行った。

2.6.2 技術サポートの詳細(1)

大気モデル(CReSS)は放射過程を計算する2つのモデル(rrtm/mstrn)があり、実験(計算) を行う際にオプションで各モデルの指定をする仕様となっている。

はじめに動作検証が出来ていた rrtm について、3 月から実験データを用いた性能測定 およびチューニングを実施した。rrtm は CReSS 全体の計算時間(約 1588 秒)の内約 62%を 占め、チューニングを実施したところ全体に占める割合は約 57%となった。この結果を課題 研究者に提供し、6 月期から本番環境での実験を進めた。

今期はmstrnについて動作検証を行い、その後実験データを用いた性能測定を行った。 このとき、mstrnは CReSS 全体の計算時間(約 902 秒)の内約 82%を占め、この測定結果を 基に性能分析を行い高速化作業を進めていった。

(1)放射モデル(mstrn)の高速化検討

①モデルの組込みを行い、その後実験データを用いて動作検証を実施した。

②実験データを用いて、簡易性能解析機能(ftrace)による性能分析を行った。性能分析により、コストの高いサブルーチンに対して高速化・最適化を検討した。

(2)放射モデル(mstrn)の高速化作業

(1)での高速化検討結果を基にコスト上位の2つのサブルーチンを主に以下のチューニングを実施した。

①インライン展開によるコスト削減

呼び出しの多い関数についてインライン展開を行った。

②サブルーチンAの高速化

部分配列コピーを削減し、ループ分割によるベクトル化促進を行った。

手動インライン展開とそれに伴う部分配列のコピーを削減し、配列詰め直しを行った。

③サブルーチンBの高速化

ループ展開等によるベクトル化促進を行った。

上記チューニングを行った結果、mstrn 自体の計算時間は約737秒から約231秒に短縮 された。CReSS 全体の計算時間でみると、mstrn の計算時間がチューニング前は約82%を 占めていたのに対しチューニング後は約58%となった。

2.6.3 技術サポートの詳細(2)

実験推進のため運用面での設定を行っている。これは 3-5 月からの継続設定である。

(1) ジョブ実行

大規模ジョブの長時間実行が行えるように、1 ジョブあたりの計算実行時間について 512 ノードで最大 48 時間の実行が可能な設定とした。

(2) ディスク容量

計算結果、解析データの格納のため最大 DATA 領域に110TB の割り当てを行った。

2.7 技術的な点以外でのサポートについて

第一期の特別推進課題では、事前の準備期間がなく、6月から9月末までの僅か四カ月間で新ESならではの画期的な研究成果を得なければならなかった。そのため、ここまでに述べた技術的なサポート項目以外の点でも行ったことは多々ある。

具体的な内容は各課題によって異なるが、打合せ等の開催・頻度を積極的に調整させていただき、研究実施と情報交換の促進などを図った。研究者のオフィスが遠隔地の場合でもTV 会議を定期的に開催しつつ、時に外勤・出張などで訪問させていただいた。むろん Eメイルや電話でのやり取りなども積極的に行わせていただいた。研究主体の打合せにも 担当者が参加させていただき、知見を高めさせていただいた。これらは技術サポートというより、むしろ研究推進、プロジェクトマネージメントに近いものであったように思われる。

これら全ては短期間で特別推進課題として相応しい研究成果を創出するために行った事だが、寛容かつ前向きに受け入れて下さった各先生方、関係各位には深く感謝申し上げる。

3. 各課題への支援に対する研究者からの評価

これまでに述べた特別推進課題への技術サポートについて、課題代表の先生方から以下のような趣旨のコメントを頂いているので、ここでご紹介させていただく。

- 現シミュレータは計算能力が高く、実験結果を素早く手に入れる事もできている。課題
 への惜しみない技術サポートにも感謝したい。(高藪先生)
- DFS モデルは技術支援員によって最適化され、5 日予測に必要な計算機資源が当初 の約1/4で済むようになった。MSSGについても同様に技術支援をうけ、当初推定の約 2/3 で済むようになった。(竹内先生)

今回の特別推進課題の技術サポートでは、運用面の制限緩和処置をふくめ、プログラムの移植・最適化、プリ・ポスト処理など全面的に対応させていただいた。それらの対応が各 先生方から高い評価を頂いたと考える。

4. おわりに

今回の特別推進課題は、限られた期間内、限られた人的リソースの中で、新しく稼働した ばかりの新 ES で画期的なサイエンスとしての成果を出さなければならない、という非常に強 いプレッシャーのもとで実施された。それらの研究成果は、ここでは述べないが、それら研 究成果を創出するためにサポート要員も従来以上に業務で創意工夫し、技術的な知見を 深めた。これらは今後の特別推進課題や他の課題の技術サポートに活かしていきたい。

謝辞

特別推進課題の実施およびクラスタ専有、利用制限の緩和などでは地球情報基盤セン ター情報システム部 塚越部長、基盤システムグループ各位に大変なご尽力をいただきま した。さらに運用面での調整やプログラムの移植・最適化等で日本電気株式会社の関係各 位に大変なご助力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

http://www.jamstec.go.jp/ceist/