

成果報告書

特別推進課題  
(試験運用期間)

地球シミュレータ

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



## ごあいさつ

---



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、2015年6月に稼働を開始した新しい地球シミュレータの計算能力を最大限に活かした柔軟な運用と充実した技術サポートにより、研究開発の飛躍的な加速を図った新しい計算資源配分の枠組みです。本報告書は、本格稼働を目前にした平成27年3月から5月までの試験運用期間に実施された特別推進課題の成果と技術的サポートの成果をとりまとめたものです。

各課題は、いずれにおかれましても大変目覚ましい成果を挙げていただくことができました。また、地球情報基盤センターにおいても、新しい運用とサポートの実績を

積み重ねることができ、今後、さらなる効果的な運用とサポートのために力を蓄えることができたと自負しております。

地球シミュレータ特別推進課題は、今後も年に3～4回の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います。

私たち地球情報基盤センターでは、地球シミュレータ上で皆様と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
II 特別推進課題成果報告	
1. 4次元変分法データ同化システムを用いた高分解能海洋再解析 .....	6
海洋研究開発機構 地球情報基盤センター 石川 洋一	
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 .....	12
東京大学大気海洋研究所 木本 昌秀	
3. 即時津波浸水予測に向けた高分解能・量的津波シミュレーション .....	16
徳島大学・工学部建設工学科 馬場俊孝	
4. 非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いた台風 .....	20
-海洋相互作用の研究:特に台風上部の巻雲に注目して 名古屋大学地球水循環研究センター 坪木 和久	
III 特別推進課題に対する技術サポート報告 .....	29



## I 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、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地球シミュレータの資源配分の枠組みです。本報告書は平成 27 年 6 月からの地球シミュレータ正式運用を前に、試験運用期間(平成 27 年 3 月～5 月)に実施した試験的先行課題の成果を取りまとめたものです。

「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的側面から強力に支援するなど、成果創出に向けた突破口となるよう、運用面、技術面からのサポートを実施しています。

### 1. 特別推進課題の募集と応募状況

---

募集期間:平成 26 年 11 月 24 日(月)～12 月 1 日(月)

募集対象:課題責任者は機構内外を問わない

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:15 課題(うち採択は 4 課題)

### 2. 課題の選定

---

計算機システム運営委員会(平成 26 年 11 月 13 日開催)における審議結果を受け、試験運用期間中の特別推進課題は地球情報基盤センター内の選定会議で選定した。また、選定に先立ち 12 月 5 日(金)と 8 日(月)の 2 日間にわたりオープンディスカッションミーティング(TKP 東京駅前カンファレンスセンター)を実施し、全課題について発表と質疑を行った。

なお課題の選定にあたっては、試験運用期間に実施する課題であるため、科学的側面だけではなく以下の観点から選定を行った。

- ・ 公募課題、所内課題枠には入らない可能性が高いような大規模ジョブを実行する必要

があること。

- ・ 課題実行の準備が整っていること。
- ・ 試験運用期間中に一定の成果が挙げられる可能性が高いこと。
- ・ 機構内外の協力を得た申請であること。
- ・ 実施により社会及び機構内外の学術コミュニティへの貢献が期待されること。

### 3. 実施課題とサポート体制

---

	課題責任者	所属	課題	CEIST のサポート体制
1	石川洋一	海洋研究開発機構	4次元変分法データ同化システムを用いた高分解能海洋再解析	齋藤、(中川)
2	木本昌秀	東京大学大気海洋研究所	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	馬場俊孝*1	海洋研究開発機構	即時津波浸水予測に向けた高分解能・量的津波シミュレーション	今任、安藤
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:特に台風上部の巻雲に注目して	齋藤、池田、(大倉)

\*1) 申請時の所属、平成27年4月より徳島大学・工学部建設工学科

特別推進課題の実施にあたっては、地球情報基盤センター情報システム部において各課題の専任担当者を配置し、技術的サポートを行った。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、必要に応じてプログラム実行についても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ている。

### 4. 研究成果の公表

---

平成27年5月25日(月)に記者説明会(報道機関8社参加)を開催し、地球シミュレータの説明とともに特別推進課題の成果を発表した。記者説明会の内容は以下のメディアで紹介された。

- 1) NHK ニュース (5/25 放送)
- 2) NHK News Web (5/26 放送)
- 3) PC Watch(5/26 掲載)週間アクセスランキング 2位

- 4) 朝日新聞(5/28 掲載)
- 5) 日刊工業新聞 (6/1 掲載)
- 6) 科学新聞(6/5 掲載)
- 7) 毎日新聞(6/10 掲載)



## II 特別推進課題成果報告

---

# 4次元変分法データ同化システムを用いた高分解能海洋再解析

## High-resolution ocean reanalysis using 4-dimensional variational data assimilation system

---

### 課題責任者名

石川 洋一 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター  
蒲池 政文 気象庁気象研究所

### 研究分野

海洋物理学

### 研究の目的と意義

過去の現実的な海洋循環場、特に中規模変動を再現した高分解能データセットの必要性は、海洋研究のみならず、水産や海運などの応用分野などにも重要なデータセットである。本研究で用いる 4 次元変分法の有効性は、いくつかの研究によって示されているものの、計算負荷の高さなどの理由により高分解能データセットの作成にはこれまで利用することができなかった。種々の観測データを 4 次元変分法という高度なデータ同化手法によって統合したデータセットは、これまで作成された同種のデータセットと比べ、大幅な精度向上が期待される世界初のデータセットとして非常にインパクトの大きなものとなる。

### 研究内容

4 次元変分法海洋データ同化システムを用いて、ARGO フロートデータ、海面水温、海面高度人工衛星リモートセンシングデータなどの海洋観測データを統合し、高解像度での過去の海洋状態を再現する実験(再解析)を行う。またその結果を用いて、過去の海洋顕著現象の解析を行い、現象解明を行うとともに、モデル・データ同化手法の改良を行う。現在 ES2 での実行が確認できている北西太平洋バージョン MOVE-WNP を用いて 1985 年以降のデータ同化計算を行い、30 年分の再解析データセットを作成する。

### 研究成果

図 1 は本研究でもちいた観測データ数の時系列である。1993 年に衛星海面高度データの利用を開始するまでは現場観測データのみであり、これまで再解析データが作成されなかった時期である。また、2000 年以降 Argo 計画の発展に従い特に塩分データの増加が顕著である。

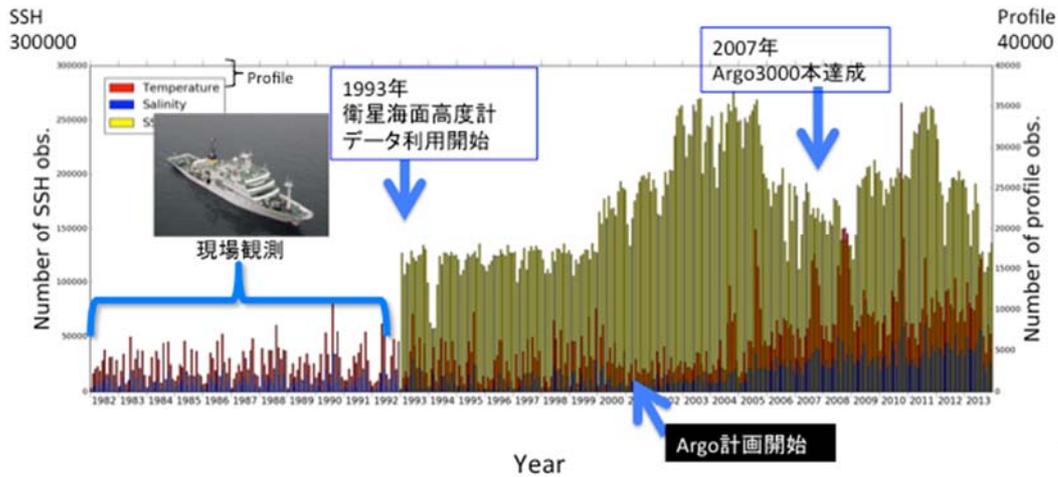


図 1 観測データ数の時系列。(緑、左軸)海面高度計、(赤と青、右軸)水温及び塩分データ

これらのデータを同化した結果について、日本周辺の主要海流に焦点を絞って性能評価を行った。図 2 は日本南岸の黒潮の流軸の緯度について観測データとの比較を行ったものである。

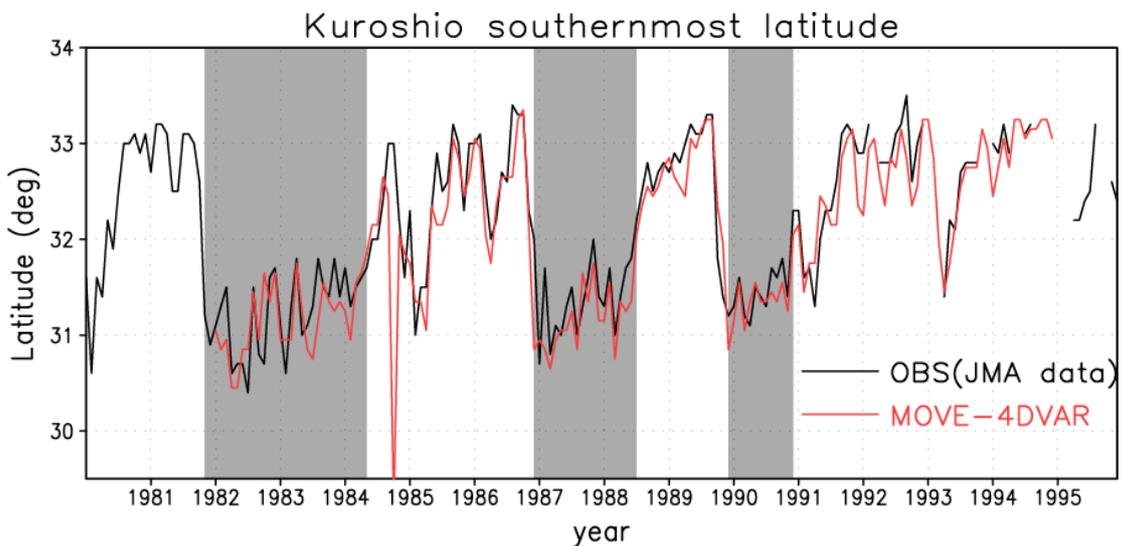


図2 黒潮流軸緯度の時系列。黒：観測データ、赤：再解析データ

比較したデータは同化にも用いられているので、必ずしも独立ではないが両者は非常によく一致している。特に、黒帯で示した期間は黒蛇行が発生していた期間であり、黒潮が南偏していたことがよく再現されている。

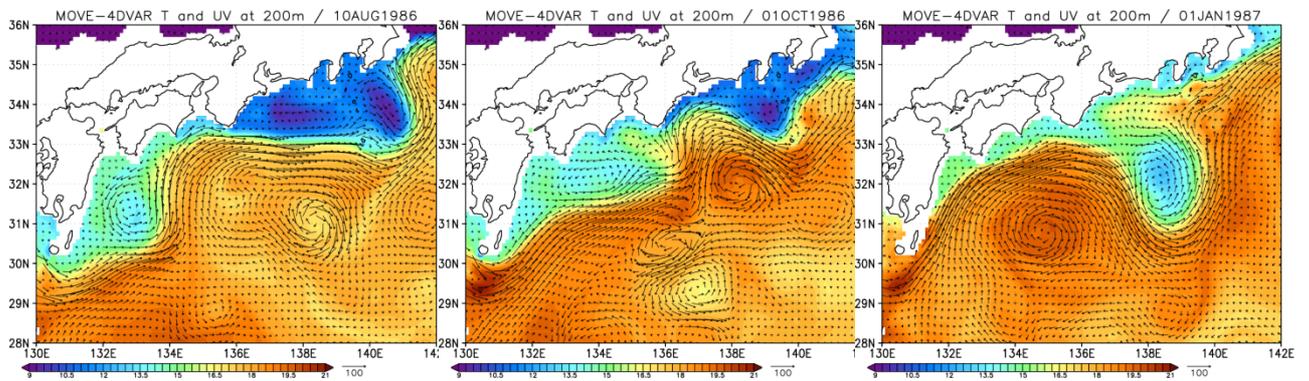


図3 1986年8月、10月及び1997年1月の200m深水温と流速分布

図3は黒潮大蛇行が発生した1996年後半の日本南岸における200m水温と流速分布を示したものである。これまでよく知られている通り、九州沖の小蛇行が東に伝搬し、紀伊半島沖で離岸する大蛇行が発生してした様子がよく再現されている。

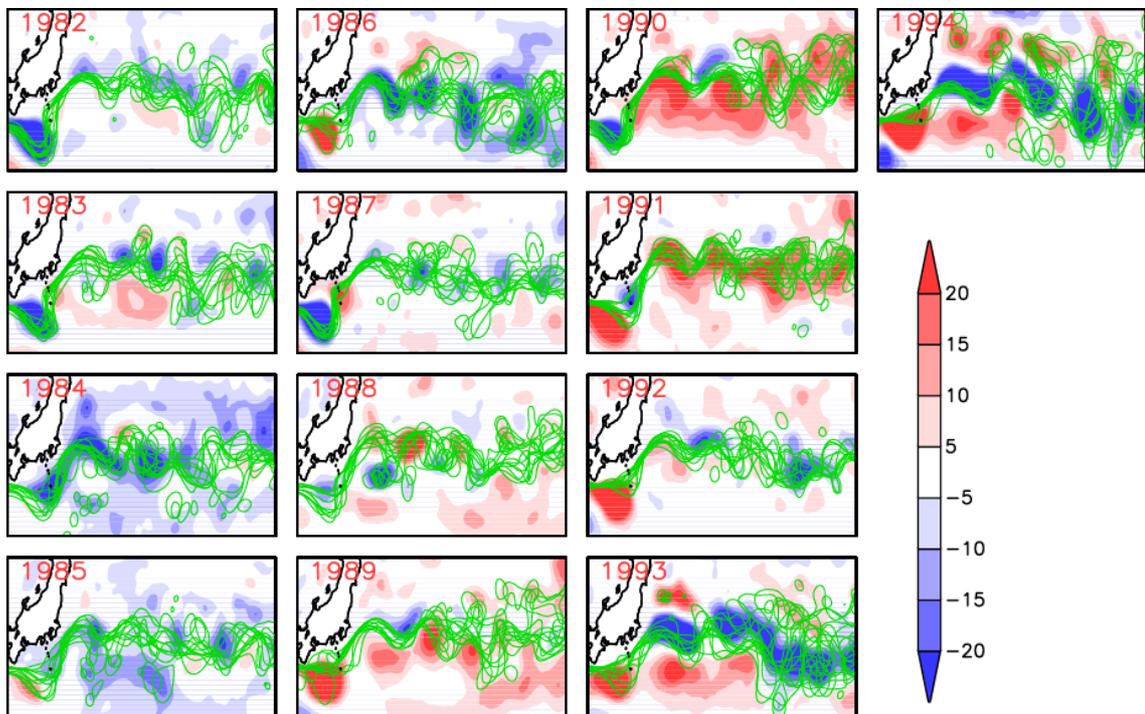


図4 黒潮続流の流軸分布(緑線)と海面高度偏差(シェード)

図4は黒潮続流の分布と海面高度偏差の年々変動を示したものである。図に見られるように黒潮続流の流軸変動が大きな時期と小さな時期が見られ、流軸の変動が小さく安定なときには南側の再循環流に正偏差が見られ、逆に変動が大きく不安定なときには負偏差が見られている。

図5は親潮の南下緯度の指標として100m深の水温が5°C以下の領域面積の時系列である。

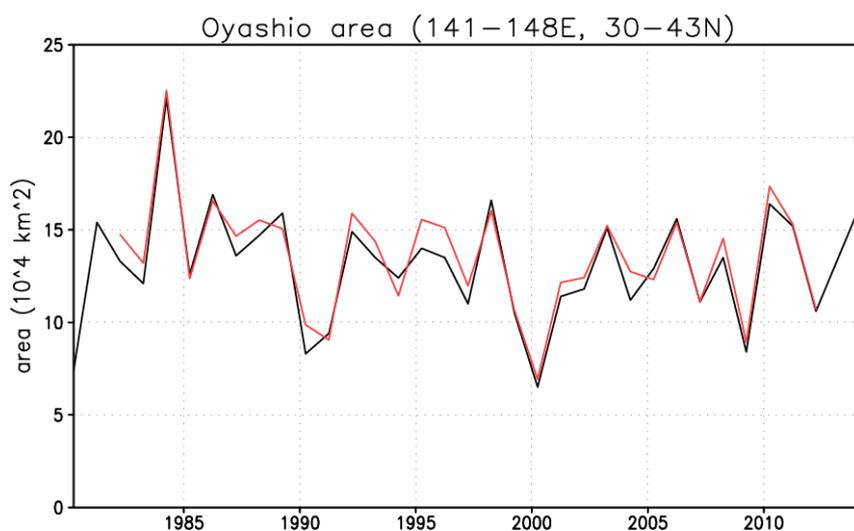


図5 親潮面積の時系列。黒：観測データ、赤：再解析データ

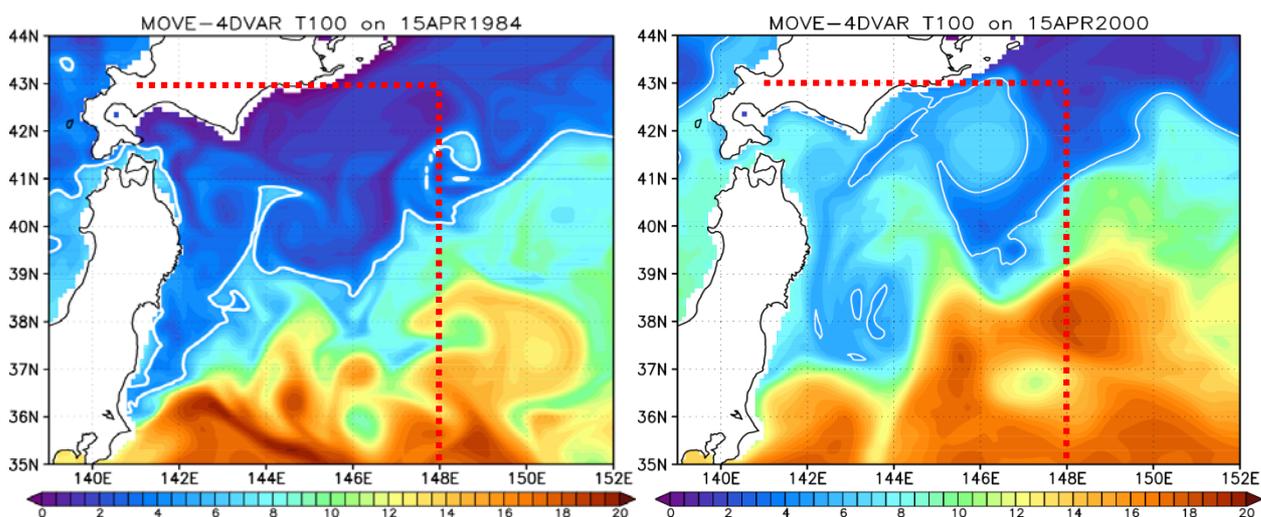


図6 1984年4月(左)と2000年4月の100m深水温。

親潮には顕著な経年変動があり、図 6 に親潮面積が最大になる 1984 年と最少だった 2000 年の水温分布を示している。このような親潮変動を支配するメカニズムについては未だ不明なところも多く、今回作成した再解析データがその解明に役立つことが期待できる。

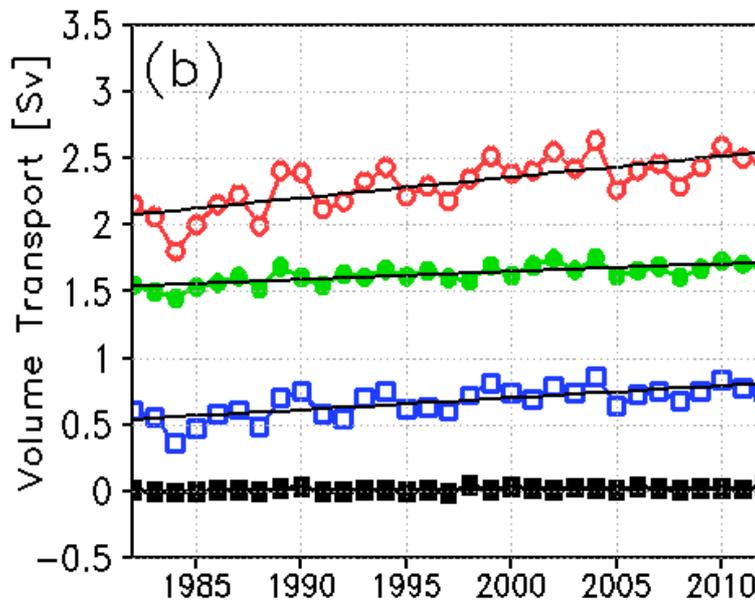


図 7 日本海通過流量の時系列。赤；対馬海峡、緑；津軽海峡、青；宗谷海峡、黒；間宮海峡。

図 7 は日本海の海峡通過流量の経年変動を示したものである。対馬暖流には増加トレンドが見られており、30 年間で 1～2 割程度増加していることがわかる。対馬暖流が増加した分は津軽暖流よりも宗谷暖流の方に多く分配されており、対馬暖流と宗谷暖流の変動に良い相関があることが示されている。

### 想定される波及効果

本研究で作成した再解析データは前節で示したように過去の海洋現象の解明といった直接的な利用に加え、海面水温データを気象モデルの境界条件として用いることにより過去の気象状態の再現や、水産資源変動に影響を与える環境場としてそのメカニズム解明に活用されることが期待できる。このような学術的な利用に加え、気象庁では本研究で用いたデータ同化システムを次期現業運用システムとして利用することを予定しており、その際には本研究で作成したデータセットをから求めた統計値を、新たな海洋の平年値とする予定である。

## 計算および計算機技術サポートとの連携実績

本研究を進めるにあたり、プログラムのチューニング及びノードの専有などのサポートを受けた。地球シミュレータ 2 では 10 日間のデータ同化計算を行うために、10 ノード使用して 10 時間かかっていたが、新地球シミュレータでは 128 ノードを用いて 1.6 時間で計算を行うことができた。このうち、チューニングによる高速化はおよそ 1 割程度であった。また、再解析計算では 128 ノードの計算を繰り返し行う必要があり、この課題では 128 ノードを専有して計算を行った。これにより、待ち時間などのターンアラウンド時間が大幅に削減され、およそ 3 分の 1 となった。その結果、地球シミュレータ 2 では専有なしでおよそ 3 年かかると見積もられる計算が、本特別推進課題では 70 日で完了した。

## 今後の予定

本研究で作成したデータセットについては、研究目的の利用については既にデータを公開しており、またそれ以外の利用についても可能とするよう調整中である。データセットの次期バージョンについてはユーザーニーズを考慮しながら、期間の延長、領域の拡張、分解能の向上、低次生態系モデルの結合などを検討している。

## 新聞、雑誌、テレビ等への掲載記事

2015 年 5 月 25 日に行われた地球シミュレータ稼働の記者説明会に関連して報道された。特にインプレス社の PC Watch では本研究に関して詳しい記事が掲載されている。

([http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150526\\_703697.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150526_703697.html))

## 特別推進課題に対するご意見

本研究のようにプロダクトを作ることを目的とする課題は、今後も地球シミュレータの性能を活用するものとして有望であると考えられる。その際に、プロダクトランを行うフェーズではノード専有などの運用や、プリ・ポストプロセスに関わる技術のサポートが重要である一方、準備段階ではチューニングなどプログラミングに関するサポートが重要であり、フェーズによって異なったサポートが必要である。特に準備段階に関しては、フィージビリティを確認するためのプリプロジェクトとしての採択があると、本格的な課題に進みやすくなると思われるので、是非検討していただきたい。

# 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

木本昌秀 東京大学 大気海洋研究所  
高藪 出 気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部  
中北英一 京都大学 防災研究所

## 研究分野

気候科学

## 研究の目的と意義

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、施策決定のために十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。

本課題で作成する予定のデータベースは、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へ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、日本地域気候モデルにより④を、多アンサンブル実験により実施する。

- ① 過去 60 年の歴史気候再現実験、
- ② 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

以上の実験は、創生プログラム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。

## 研究成果

予定している全計算のおよそ 30%に相当する計算を、3～5 月期で実施することができた。初期解析の結果、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ていること、歴史気候再現実験における台風、梅雨、極端現象等について、観測と良く対応する再現性が得られていることを確認した。本研究では、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の作成が試みられているが、当初の目論みどおり、対象地域を絞って顕著な大気現象に注目する多様なユーザに当データベースを有効に活用していただける、という確信を得た。

本研究では更新により計算能力が高まった地球シミュレータにより、高解像度大気モデルの総積分年数 2 万年を越える大規模な計算を実施する予定であり、順調に進捗している。旧地球シミュレータでは全ノードを使った場合でも 1 年半の作業期間を要する計算であるが、新地球シミュレータでは数ヶ月で完了の予定となっている。効率的に研究を進め、優れたデータベースを短期間で構築・提供することで、ユーザによるデータベース利用の

成果創生が期待できる。

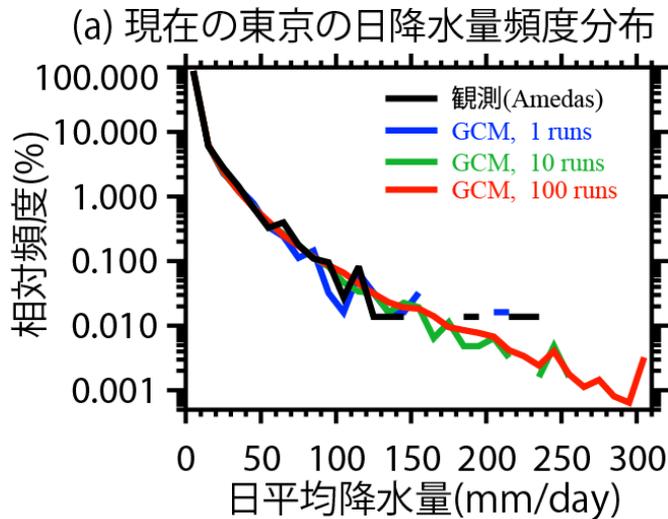


図 高解像度全球大気モデルによる東京の日降水量頻度分布の観測(黒)との比較。観測データや少ないアンサンブル数のシミュレーション(アンサンブル数 1:青;アンサンブル数 10:緑)では頻度の少ない多降水日のサンプルが少なく、統計が不安定になるが、本データセットで100 アンサンブルを実施することにより(赤)、日降水 250mm 以上の極端降水のサンプル数が増え、将来予測の信頼性も向上すると期待される。

### 想定される波及効果

冒頭に述べたように、本課題で創出するデータベースは、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。多アンサンプルの実験出力データということが本データベースの最大の特徴である。したがって、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績

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、本計算への影響は小さかった。さらに、実験が効率的に実施できるように十分な計算リソースを開放して頂いた。

## 今後の予定

残りの計算を完了するために、6～9 月期の地球シミュレータ特別推進課題に応募する。計算完了後は、解析結果を研究成果として取り纏めて発表するとともに、データベースとして広く活用されることを目的に一般向けのシンポジウム等を開催し、データベースの普及に努める。

## 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ご意見

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。

# 即時津波浸水予測に向けた高分解能・量的津波シミュレーション

## Simulation database for real-time prediction of tsunami inundation

---

### 課題責任者名

馬場俊孝、徳島大学・工学部建設工学科

### 研究分野

地震・津波・固体地球分野

### 研究の目的と意義

現在、日本では気象庁により津波警報システムが運用され、地震発生後約3分という驚異的な速さで沿岸部の津波高さの予測が完了する。これは、予め多数の震源モデルによる津波計算を実施、結果をデータベース化し、地震発生後に得られる震源情報を基にシナリオを選択することにより、高速処理を実現している。一方、津波発生直後の避難行動は、人が特性として持つ正常化バイアスなどによって阻害されると指摘されており、実際 2011年の東日本大震災では、津波警報が3分後に出されたにも関わらず、避難をしなかった人もしくは避難が遅れた人は、犠牲者のうち約半数を占めるという報告もある。このため、避難行動を促進する情報とその提供の仕方が議論されている。

津波予報として発表される沿岸部の津波高さの情報だけでは、住民が住む住居まで津波が到達するかどうか定かではないから、正常化バイアスの恰好の標的になってしまっているという側面がある。このため、住民の我が事感が増すように、沿岸部の津波高さの予測のみならず、陸上への高分解能な浸水予測を即時に高分解能で提供できれば、避難行動が促進されるものと期待される。ただ、広域・高分解能な津波浸水計算をリアルタイムで完了するのはさすがに難しい。しかし、気象庁が運用する津波警報システムの方法で、多数のシナリオに基づく津波浸水データベースを予め準備しておけば、地震発生後即時にシナリオ検索で浸水予測を提供することは可能である。この発想はこれまでもあったが、多数のシナリオを浸水が評価できるほどの高分解能、広域に実施するには膨大な計算資源が必要で実現不可能であった。ES2の後継機の登場により、これが実現できる環境になりつつある。

### 研究内容

本研究では上記の目的のため、高分解能・量的津波シミュレーションを実施する。本研究のオリジナリティは、1)ESを用いて多数のシナリオに対する高分解能な津波浸水データベースを構築することと、2)そのデータベースを利用した災害情報システムを地方自治体

(和歌山県)と連携して開発するという2点である。和歌山県とは、平成25年度から地震津波観測監視システム(DONET)のリアルタイム波形表示システムと津波増幅率を用いた津波予測システムの研究開発を実施しており、プロトタイプシステムが完成しつつある。本研究で作成される高分解能・量的津波データベースは、津波予測機能の核として、当該システムに活用される(図1)。

～研究体制図(全体)

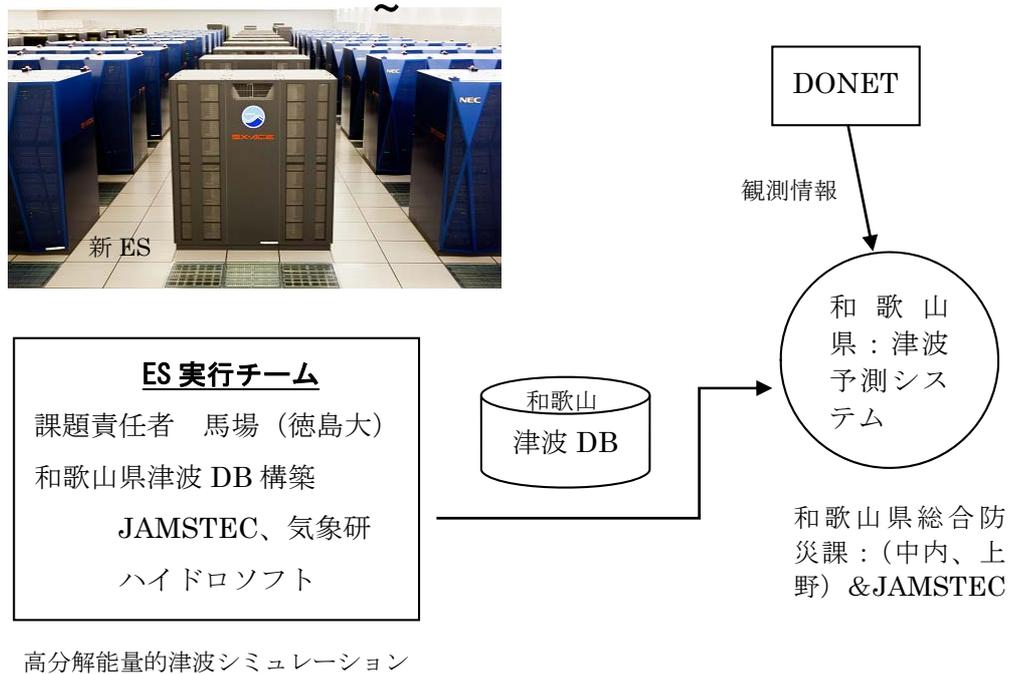


図1 本研究の全体像と体制

研究成果

津波襲来の危険性のある和歌山県沿岸部全域の約5m分解能の地形データを作成し、高分解能な津波シミュレーションを実施した(図2)。南海トラフで発生する地震群を検討し、Mw7.6～Mw8.5の1500を超える断層シナリオに対して繰り返し津波計算を行った。DONETの海底水圧計の設置位置や検潮所の設置位置での計算波形、最大津波高だけでなく、最大浸水深分布のデータもデータベース化した。

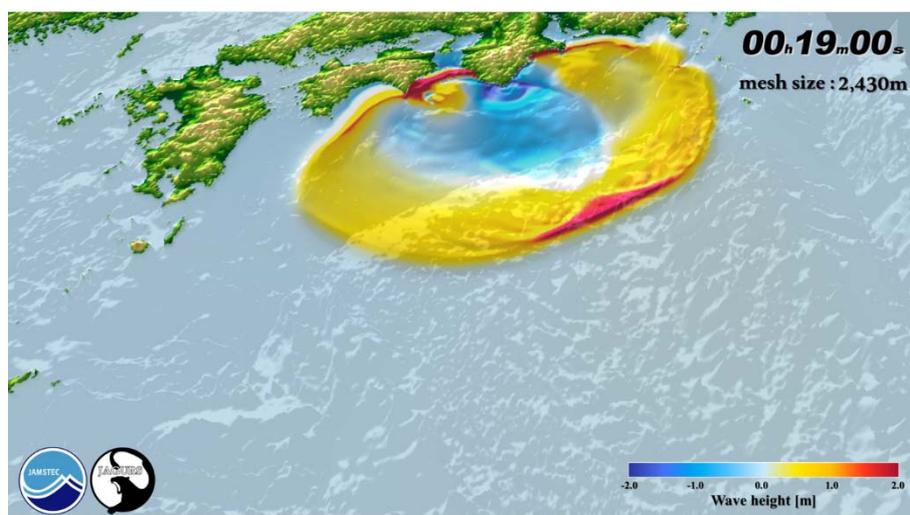


図 2 本研究で実施した津波シミュレーションの例

津波データベースの構築においては計算の効率を上げるため、和歌山県沿岸部を 24 の地域に分割して計算を実施した。新 ES の利用前には JAMSTEC の SC-ICE を利用していた。1 地域の 1500 シナリオの計算に約 3 か月要していたが、新 ES では残りの 23 地域のすべての計算を約 2 か月半、特別推進課題の期間中に完了することができた。驚異的な速さである。データベース構築の高速化は、リアルタイム津波予測システムの構築の高速化に直結し、地域の津波防災の高度化に貢献すると期待される。

### 想定される波及効果

本研究によって構築される津波データベースは、前述のとおり、すでに津波予測システム(研究開発段階)への取り込みが決定している。特に和歌山県のシステムにおいては、すでに気象庁から津波予報許可を得て、実装へ進んでいる。DB の構築も含めて、津波高さだけでなく津波浸水の即時予測が実現することにより、津波被害の軽減に資すると期待される。

さらに津波 DB は津波危険地帯に住む住民や自治体の事前訓練や対策にも役に立つ。国が公表した最大クラスの津波は重要なハザード情報ではある。しかし、実際に起こる津波は多様であるとともに、地震のマグニチュードと頻度の関係(G-R 則)を考えれば、最大クラスの津波よりも小さな地震(とはいえ、大地震)による津波のほうが確率的には大きい。そのような津波がどこまで浸水するかをきちんと把握し、対策を講じることは、実は最大クラスの津波に備えると同等に重要である。しかし、現在は最大クラスの津波ばかりが注目され、この観点が欠けている。そちらでも本津波 DB を活用する予定である。

また、津波 DB による津波予測をさらなる高度化を目的として、DONET をはじめとするリアルタイム観測情報の利用が促進されると期待される。また、逆に津波 DB の精査からどのよ

うな観測をすれば津波予測を高度化できるかなどの提案ができると考えられ、観測システムの高度化にも資する可能性がある。

### **計算および計算機技術サポートとの連携実績**

本計算プログラムの新 ES への最適化は計算機技術サポートによって行われ、ES2 に比べて 2 倍程度の高速化を実現した。

### **今後の予定**

本研究課題では和歌山県を対象として津波データベースを構築した。徳島大学では徳島県とも津波データベースを用いた予測システムの開発を進めることになった。今後については、徳島県を対象とした津波浸水データベースを構築し、さらに、津波被災地域のデータベース構築を進めていく予定である。さらに、津波 DB は、さまざまな津波ハザードを理解させる上で有効ツールとなり、多様な津波災害に対する対応力が向上する。課題代表者は、京都大学の牧教授(災害学)と、津波災害に対する地域対応力の向上に向けた取り組みも進めている。

### **新聞、雑誌、テレビ等への掲載記事**

PC watch, 第 3 世代「地球シミュレータ」システムが本格稼働へ, 2015 年 5 月 26 日公開  
([http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150526\\_703697.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150526_703697.html))

### **特別推進課題に対するご意見**

新 ES では、最新の計算モデルを用いて非常にたくさんのケースを計算して、予想の信頼性を高める計算が可能であり、データベースの構築など、直接実用的な計算に向いている印象を受けた。また、プログラムの高速化だけでなく、ジョブの投入スクリプトの作成、ジョブの投入、管理、アウトプットファイルの 1 次処理など、多くの技術サポートをいただいた。計算割り当て資源についても、フレキシブルに対応いただいた。これらのサポートがなければ、短期間で全ての計算を終えることはできなかった。記して感謝する。

## 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:特に台風上部の巻雲に注目して

Typhoon-ocean interaction study using the coupled atmosphere-ocean non-hydrostatic model: With careful consideration of upper outflow layer clouds of typhoon

---

### 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

### 研究分野

気象学

### 研究の目的と意義

台風の強度予測の精度を向上させるためには、台風を含む数千キロメートル以上の環境場を計算するとともに、雲を表現する解像度で計算を行い、さらに台風と海洋との相互作用や台風周辺の対流圏上部および成層圏下部の温度を正確に予測することが必要である。台風と海洋の相互作用は非線形性が強く、高解像度の大気海洋結合モデルを用いることが不可欠である。また、対流圏上部のような上層の温度は環境場だけでなく、台風から吹き出す巻雲により決められる。そこで本研究では雲を解像する大気モデル CReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)と、海洋研究開発機構で開発された、海洋の小スケールの運動まで表現できる非静力学海洋モデル NHOES(NonHydrostatic Ocean model for the Earth Simulator)を結合し、それにさらに波浪モデル、海洋混合層モデル、放射モデルを導入し、台風の強度をコントロールする大気海洋相互作用と巻雲の台風強度予測に対するインパクトを明らかにすることが目的である。これまでほとんど注目されていない点として、放射過程を通して台風上部の吹き出し層(アウトフローレイヤー)の巻雲が台風にどのような効果を与えるかについても注目する。

海洋上で発生する台風は、そのエネルギーのほとんどを海洋からの潜熱として受け取る。一方で海洋は表面からの冷却、上部の混合、さらに台風に誘起された鉛直運動などで冷却を受け、それはまた台風の強度を制限するなど複雑な相互作用の結果、台風の強度が決まる。このような相互作用は台風の眼の壁雲周辺の特に関風が強いところで起こっており、その精度よいシミュレーションには、数千メートル格子の高解像度シミュレーションが必要である。また、上層の巻雲については、それ自体が台風の強度に直接影響するのではなく、放射過程を通して台風の強度に強く作用する。これらのプロセスは台風の強度予測に十分考慮されてなく、そのインパクトを明らかにすることは、台風の強度予測の精度向上に不可

欠である。過去 20 年の台風やハリケーンの予測精度については、それらの進路予測については、モデルの高解像度化と共に、顕著な改善がみられるが、強度予測についてはほとんど改善がみられない。本研究はその問題における、大気海洋相互作用と上層の巻雲のインパクトを明らかにし、強度予測の改善に寄与すると共に、非常に強い台風などの熱帯低気圧のシミュレーションの精度の向上に寄与するものである。

## 研究内容

本研究で用いる非静力学大気波浪海洋結合モデル(CReSS-NHOES)は、大気と海洋のそれぞれが独立に地球シミュレータで開発されたモデルであるが、非常に親和性が高く、大気と海洋ともに非静力学で高解像度のシミュレーションが可能である。また、地球シミュレータで最も効率よく実行できるモデルとなっており、新しい地球シミュレータでさらにその性能が発揮されることが期待される。また、台風のシミュレーションには高解像度大規模シミュレーションが不可欠で、地球シミュレータの性能が必要である。

結合モデル CReSS-NHOES について、まず新しい地球シミュレータで十分な性能が出せるように最適化を行う。特に放射過程や波浪モデルについて最適化を行い、十分な性能が出せるようにする。そのうえで特徴的な台風についての結合モデルを用いたシミュレーション実験を実施し、台風と海洋の相互作用について解析するとともに、巻雲過程についての敏感度実験により、台風の強度に対する大気海洋相互作用や台風上部の巻雲のインパクトについて検討する。

シミュレーション実験の対象とする台風は、非常に強い台風で、伊勢湾台風、MEGI(2010)、HAIYAN (2013)などである。低緯度の台風を対象とする理由は、台風やサイクロンについて地球上での最大強度のものが、低緯度で発生する。すなわち現在の気候における熱帯低気圧の到達最大強度を与えるからである。また、地球温暖化が進むと今世紀後半には、日本付近の海面水温が、現在の低緯度の海面水温ぐらいに昇温するので、将来の日本付近に達する台風の強度をシミュレーションにより推定できると考えるからである。

## 研究成果

新しいESをはじめ用いる計算であったので、当初はステージインの仕方などに工夫をしなければならぬことをはじめとして、いくつかの問題点を克服する必要がある。また、特に放射過程は計算コストの高いプロセスであるので、その最適化に時間を割いて実施した。放射過程はRRTMとMSTRNの2つを検討し、今回は高速化しやすいRRTMに重点を置いて最適化を行った。また、今回はじめて南半球の熱帯低気圧であるサイクロンのシミュレーションも行った。そのためにいくつかの改良が必要であった。以下に本研究で得られた主要

な研究成果をまとめる。

### (a) 伊勢湾台風

戦後最大規模の台風災害をもたらした伊勢湾台風は、昭和 34 年 9 月 26 日、紀伊半島に上陸し東海地方に甚大な災害をもたらした。この大型台風は、暴風と高潮により 5000 人を超える死者・行方不明者を出した。伊勢湾台風襲来当時、日本には気象衛星もレーダ観測網もなく、このため伊勢湾台風の雲の様子や眼の構造などの実態が分かっていない。伊勢湾台風は台風のメカニズムの研究において重要であるだけでなく、最悪の経路をとった台風という点で、未来の最悪台風のシナリオとなる点で重要である。このため伊勢湾台風を調べ、さらに“未来の伊勢湾台風”を予測することは、学術的にも防災の観点からも大きな意義がある。

そこで雲解像モデル CReSS を用いて、水平解像度 2km で上陸のおよそ 2 日前から上陸後までのシミュレーションを実施した。図 1 に気象庁ベストトラックとシミュレーションの結果得られた台風中心の経路を示した。初期値は 1959 年 9 月 24 日 12UTC である。シミュレーションは放射過程を入れた場合と入れない場合の 2 つを行った。図から分かるように 3 本の線はほとんど重なっており、シミュレーションは経路をよく再現していることが分かる。また、中心位

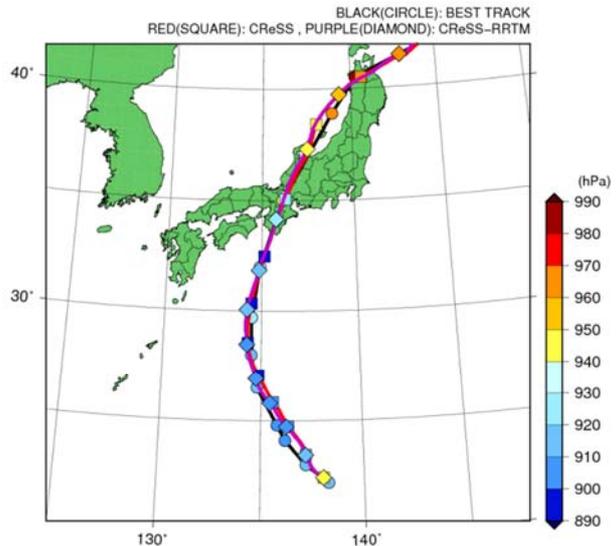


図1 伊勢湾台風の経路を観測とシミュレーションで比較したもの。黒実線と円は気象庁ベストトラック。赤実線と四角は放射過程のないシミュレーション。紫とダイヤモンドは放射過程のあるもの。

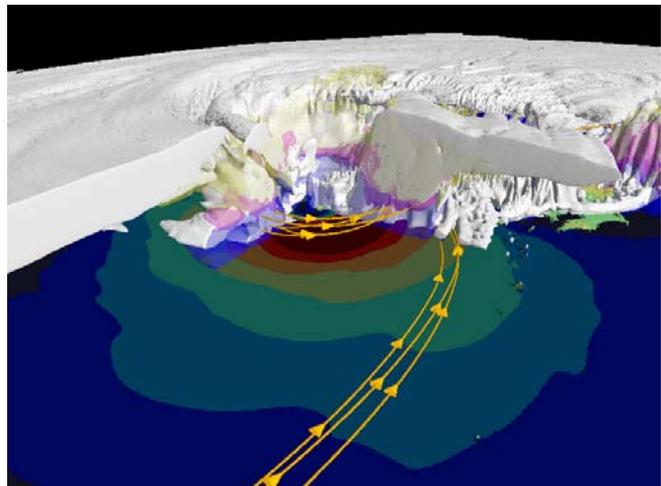


図2 雲解像モデル CReSS を用いた伊勢湾台風のシミュレーション結果を立体的に表示したもの。上陸時の雲(白)、あられ(ピンク)、雪(黄色)、雨(青)を立体的に表示した。地表の気圧をカラーレベルで表し、代表的流線を重ねてある。

置は放射過程のあるシミュレーションのほうがより観測に近づいている。放射過程はわずかであるが、移動速度にも影響している。

図 2 に雲と降水粒子の立体的な分布を示す。この図から分かるように上陸時でも眼と眼の壁雲が対称性のよい直立した構造をしている。このことは台風が強い勢力を維持していたことを示している。また、上層の厚い巻雲が眼の壁雲から周囲に広く広がっており、南西側は沖縄付近まで達している。

このような広域に広がる上層巻雲は、それ自体が直接台風の降水量などに影響することはほとんどないが、放射過程を通して台風の強度に大きく影響する。このため台風からの吹き出し層(アウトフローレイヤー)の巻雲がどのように表現されるかは、台風の強度を精度よく予測する上で重要である。図 3 は伊勢湾台風の中心気圧の時間変化を観測とシミュレーションについて比較したものである。シミュレーションの初期値では、ベストトラックと 25hPa の差があったが、6 時間程度で観測値にほぼ同じになっている。放射過程のないシミュレーションでは、そのまま中心気圧が下がり続けて、9 月 25 日 23UTC に最低中心気圧に達している。一方で放射過程のあるシミュレーションでは、9 月 24 日 18UTC に観測値と同じ程度の中心気圧に達した後、ほぼ観測値と同じ程度の中心気圧で、9 月 25 日 06UTC まで大きな変化なく推移している。この期間中にベストトラックとの中心気圧の差は最大でも 10hPa 以下で、放射過程のないシミュレーションでは最大で 25hPa の差であったのに対して、観測に近いものとなっている。上陸時刻は放射過程の有無にかかわらず、ほぼ観測に対応しており、その後、観測と同様に中心気圧が上昇している。ただ、中心気圧の上昇はシミュレーションのほうがやや遅れる傾向にあり、特に 9 月 26 日 18UTC 以降に 20hPa 以上に達している。全体として、放射過程を導入したシミュレーションは、ないものより進路や中心気圧について観測とよく合うものになった。

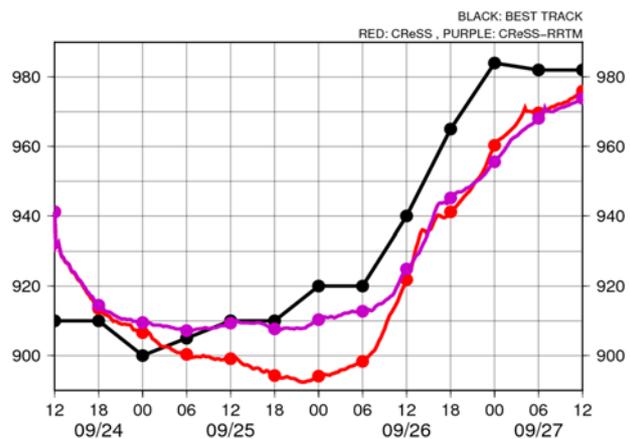


図 3 伊勢湾台風の中心気圧の時間変化。黒実線は気象庁ベストトラック。赤実線は放射過程のないシミュレーション、紫実線は放射過程のあるシミュレーション。

(b) スーパー台風 HAIYAN(2013)

2010 年の台風第 13 号 MEGI(2010)をはじめとして、フィリピンは過去に何度かスーパー台風の上陸による被害を受けている。そのなかでも 2013 年 11 月に上陸し、レイテ島を中

心とするフィリピンに甚大な被害をもたらした台風第 30 号 HAIYAN は、上陸時の中心気圧 895hPa に達し、それは 2005 年に米国に甚大な被害をもたらしたハリケーンカトリーナより 35hPa も低いものであった。その結果、7000 人を超える犠牲者と 800 億円を超える被害額となった。HAIYAN がもたらす 90m/s を超える瞬間最大風速は、風による大規模な被害をもたらし、伊勢湾台風と同様にこの強風で発生した高潮が甚大な被害をもたらした。このような低緯度の台風は、次の 2 点で重要である。一つは現在の気候で発生する最強の台風やサイクロンが低緯度で発生しているので、低緯度の台風は現在の気候における熱帯低気圧の到達最大強度と考えられることである。もう一つは地球温暖化が進むと今世紀後半には、日本付近の海面水温が、現在の低緯度の海面水温ぐらいに昇温するので、将来の日本付近に達する台風の強度を推定することに役立つという点である。

そこでスーパー台風 HAIYAN (2013)を再現することを試みた。HAIYAN のシミュレーションでは、次の 4 点が問題となっている。シミュレーションでは再現される台風の最低中心気圧が観測された台風のように低くならない。中心気圧の低下が観測に比べて遅れる。急発達が再現されない。すなわち発達速度が再現されない。そして進路がシミュレーションでは観測に比べて北に最大で 300km ほどずれるなどの点である。これらの問題を検討するために海洋を 1 次元熱拡散モデルで表現した雲解像モデル CReSS による実験と、非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES による実験を実施した。シミュレーションは水平解像度 5km の 11 月 4 日 12UTC を初期値とした計算の出力値に、水平解像度 2km のモデルをネストして、11 月 5 日 00UTC を初期値として計算を行った。

水平解像度 2km の実験では、海洋を 1 次元モデルで表現した実験では、海洋の格子数は同じで、格子間隔を 0.5、1.42、5m の 3 とおりに変えてシミュレーションを実施した。格子数が同じであるので、計算される海の深さ、すなわち海の貯熱量が変わる。図 4 にシミュレーションから得られた中心気圧の時間変化を示した。まず、ベストトラックの中心気圧と比較すると、明らかに気圧低下時刻が観測に比べて遅れている。計算では、6 日 00~12UTC 付近から急発達

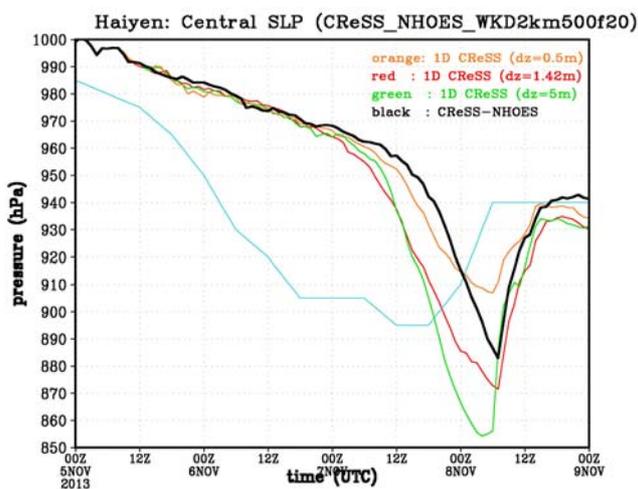


図 4 HAIYAN(2013)のシミュレーションから得られた中心気圧の時間変化を気象庁ベストトラック(水色)と比較したもの。オレンジ、赤、緑の線は雲解像モデルによるもので、鉛直 1 次元の海洋の格子幅が、0.5、1.42、5m にしたもの、太い黒実線が非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES で行った結果。

をはじめている。到達した最低中心気圧は、海が深いほど、すなわち海の貯熱量が大きいほど低くなっており、855hPa から908hPa までの大きなばらつきがある。このことはスーパー台風 HAIYAN の最大強度は、海洋の貯熱量に大きく依存していることを示している。このため台風の強度を精度よく再現するためには、海洋モデルが必要であることが分かる。図 4 の黒実線は非静力

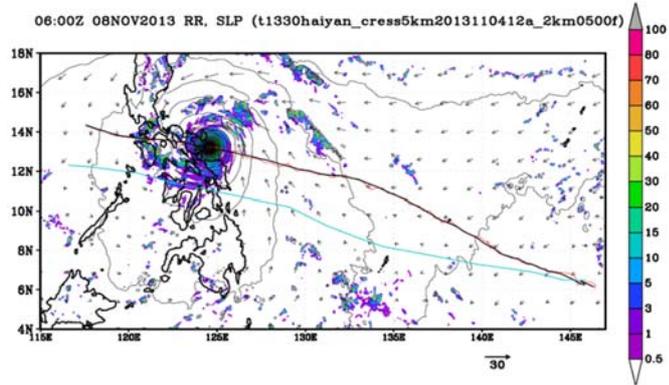


図 5 非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES を用いた台風 HAIYAN のシミュレーション結果。フィリピン上陸直前の時刻で中心気圧が885hPaに達している。黒実線はシミュレーションの中心経路、水色は気象庁ベストトラック。

学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES による結果であり、これによる最低中心気圧は885hPaで観測の895hPaに比べて10hPaほど低いが、海洋を結合しないモデルに比べて十分観測に近いものとなっている。発達時期の遅れは改善されていないが、急発達は再現されている。

非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES によるシミュレーションでは、フィリピンに上陸直前の時刻に最低中心気圧885hPaに達している。図5は水平解像度2kmの実験の11月8日06UTCの結果である。フィリピン上陸直前の時刻で、台風が最も発達していることが分かる。一方で、台風の進路は北に200kmほどずれている。

この実験では急発達のタイミングが遅れることと、進路がずれるという問題が残されたが、非静力学大気海洋結合モデルを用いることで、最低中心気圧や急発達が再現できるようになった。

### (c) サイクロン PAM

北太平洋に発生する台風と比べて、南太平洋のサイクロンは数が少なく、また強度も小さいものが多い。そのために台風と比べて研究が少ない。2015年3月、過去にほとんど例がないほどの強度のサイクロンが発生し、南太平洋の島国バヌアツに襲来し、甚大な被害をもたらされた。このサイクロン PAM はスーパー台風 HAIYAN と同様に896hPaという強度に達した。このサイクロン PAM の特徴は、台風3号と赤道をはさんで対発生した点である。すなわちツインサイクロンの南半球のものが、非常に発達したということである。

このサイクロンの対発生とサイクロン PAM の発達を再現するために、雲解像モデル CReSS により、水平解像度 2km で東西 7000km、南北 5000km という非常に大規模な計算領域を用いてシミュレーション実験を行った。図 6 は計算領域と初期値の地上気圧と地上風の分布である。図から分かるように初期値に赤道をはさんで南北に渦と低気圧がみられる。これらは両者とも低緯度に発生した熱帯低気圧で、その間に顕著な西風がみられる。パターンとしては赤道ロスビー波のように見える。北半球に比べて南半球のほうが、海面水温が高いため、対発生しても南半球の熱帯低気圧のほうがより強くなる。

図 7 は初期値から 4 日目の 3 月 14 日 00UTC の結果である。やや進路は東にずれているが、サイクロン PAM のほうは非常に発達し、シミュレーションでは中心気圧 891hPa、最大地上風速  $60\text{ms}^{-1}$  に達している。これはこの時刻の観測値である中心気圧 896hPa、最大地上風速  $69\text{ms}^{-1}$  に近いものである。観測とよく対応してサイクロンの眼がはっきりしており、非常に発達した状態でバヌアツに接近していることが分かる。また気象衛星から分かるように眼の壁雲の活動が活発で、中心の東側にはアウターレインバンドが、西側にはインナーレインバンドが形成されているなどの点もよく対応している。今後、この結果を解析することで、過去にないほどの強度のサイクロンがどのように発達したのかを明らかにすることができる。

このような大規模なシミュレーションが可能となったのは、地球シミュレータの多数のノード

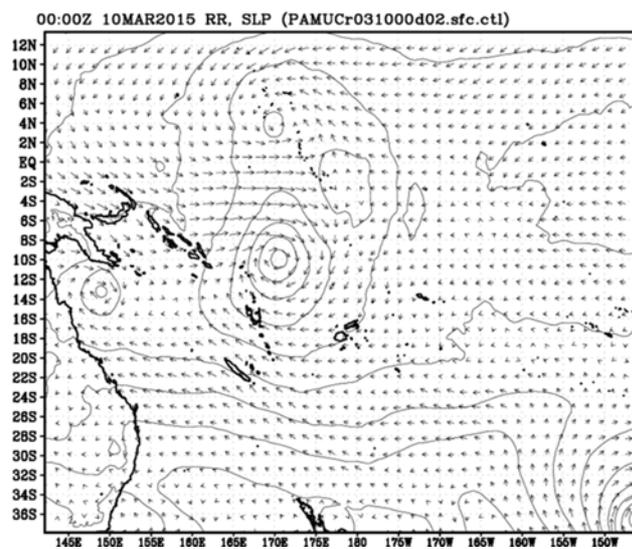


図 6 サイクロン PAM と台風 3 号のシミュレーションのための初期値、2015 年 3 月 10 日 00UTC。地上気圧(等値線)と地上風(矢印)。

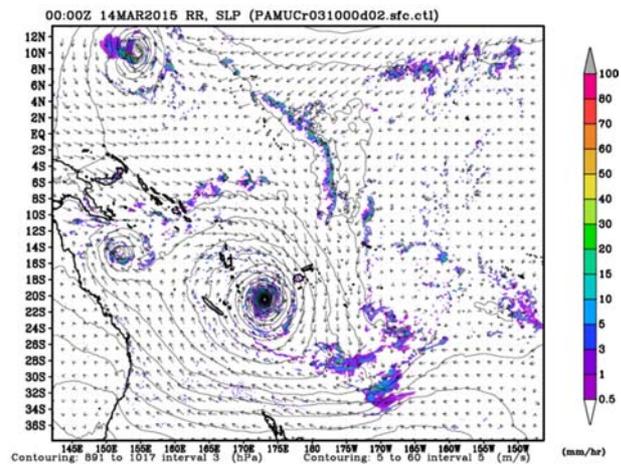


図 7 雲解像モデル CReSS を用いたサイクロン PAM のシミュレーション。初期値から 4 日目の 3 月 14 日 00UTC の地上気圧(等値線)、降水強度(カラーレベル)、及び地上風(矢印)の分布。

を利用した計算が可能となったからである。今回、大気海洋結合モデルに放射を導入し、新しい地球シミュレータに最適化することができたので、これらの計算を実施することが可能となった。

### 想定される波及効果

本研究で実施した非静力学大気海洋結合モデルによる台風のシミュレーションは、台風の強度予測において、海洋の予測が重要であることを示している。今後の台風予測のモデルにおいて、その重要性が認識され、海洋モデルが結合される方向に進むと考えられる。また、海洋パートの計算の初期値・境界値として、海洋研究開発機構で作成されているJCOPE2 が用いられているが、大気海洋結合モデルの計算において、その利用が活発になることが期待される。

これまで台風の強度や降水量にほとんど影響のないと考えられてきた上層の巻雲について、放射過程を通して台風の強度に大きく影響することが示されたことから、その重要性が認識され、巻雲に関わるプロセスの開発が進められることが期待される。特に粒径や粒子のタイプなどのデータが必要となるので、その観測が実施され、観測の結果に基づく巻雲のモデル化が進む。その結果がさらに台風の強度予測の向上につながる。

南半球の熱帯低気圧であるサイクロンについては、台風ほど研究が進んでいない。サイクロンPAMは過去に例がないほど強いもので、さらに台風と対発生したという特徴をもつ。これについての大規模シミュレーションの結果の解析は、非常に強いサイクロンの発達過程やその要因を明らかにすることが期待される。南太平洋には多くの島国があり、サイクロン PAMのようなこれまでにない強いサイクロンの強度予測は防災上重要で、このシミュレーションは、将来のサイクロン予測にも貢献す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実績

今回の特別推進課題ではじめて新しい地球シミュレータを利用したので、その利用開始時には、ステージインやジョブの実行をはじめとして、多くのサポートをしていただいた。コードの最適化については、実事例の台風を例として、スケーラビリティを調べてもらい、ベクトル化の効率を向上していただいた。放射過程について新しく導入した放射コードについて、速度測定だけでなく、放射コードそのものの最適化を実施していただいた。その過程において放射過程の結合におけるバグの修正も行った。1024~2048 ノードの実行時サポートとして、ステージングなどの教授をいただいた。これらの作業を特別推進課題推進期間中、ほぼ毎週に1回の打ち合わせを、テレビ会議システムを用いて行い、密な連携を図った。

## 今後の予定

本研究で最適化された非静力学大気海洋結合モデルは、今後さらにさまざまな台風の実験に用いられる。特に海洋の貯熱量に注目した実験を行い、台風の強度推定に海洋の重要性を強調したい。

今回のシミュレーションで得られたデータについては、さらに詳細に解析を行い、台風の構造やメカニズムの解明を進める。特に南太平洋のサイクロン PAM については、大規模なデータであるので、解析に時間がかかる。今後さらに詳細な解析を行いたい。

## 新聞、雑誌、テレビ等への掲載記事

テレビ放映：

- ・ 計算能力が10倍になった第3世代「地球シミュレータ」本格稼働のニュースに関して取材を受け、回答。NHK, ニュース7, 5月25日, 2015年.

新聞報道：

- ・ 伊勢湾台風 再現 名大チーム 列島横断の様子 3D映像に。毎日新聞, 6月10日, 2015年

## 特別推進課題に対するご意見

大規模な計算をさせていただき、たいへんありがたく思います。そのデータは大規模なものですので、詳細な解析には時間がかかります。そのため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たい。

### 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 3 月から 5 月末にかけて実施された特別推進課題に対する技術サポートの詳細について報告する。特別推進課題では、平成 27 年 3 月に更新された新しい地球シミュレータ(ES)の性能を十二分に活用しての画期的な成果創出を目的としている。ここで、世界トップクラスのスーパーコンピュータである新ESの性能を十二分に利活用するには、計算機技術面での充実が不可欠である。そこで特別推進課題の実施促進および地球シミュレータの運用管理を行う地球情報基盤センターでは、計算機技術に関する技術支援担当を各特別推進課題に設定して技術的な支援を全面的に行い、各課題の研究促進と成果創出に貢献した。本稿では、その技術サポート概要と種々の技術的なトピックスを報告する。

#### 2. 技術サポート詳細

##### 2.1 各課題と技術サポート担当

各特別推進課題に 1～3 名の担当者を設定して、技術サポートにあたった。

	課題責任者	所属	課題	CEIST のサポート体制
1	石川洋一	海洋研究開発機構	4次元変分法データ同化システムを用いた高分解能海洋再解析	齋藤、(中川)
2	木本昌秀	東京大学大気海洋研究所	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	馬場俊孝*1	海洋研究開発機構	即時津波浸水予測に向けた高分解能・量的津波シミュレーション	今任、安藤
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:特に台風上部の巻雲に注目して	齋藤、池田、(大倉)

\*1) 申請時の所属、平成 27 年 4 月より徳島大学・工学部建設工学科

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ください。

## 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当センター基盤システムグループと共に行い、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。計算結果の可視化では、当センター情報・計算デザイン研究開発グループの協力を得つつサポートした課題もある。

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「4次元変分法データ同化システムを用いた高分解能海洋再解析」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、4次元変分法データ同化システム(MOVE-4DVAR)を用いて30年分(1982年から2012年)の再解析データの作成が目標であった。これはES2では数年かかる計算だが、新ESでは短期間(3月から5月の約90日)で再解析データを作成することを目標とし、これに対応するためプログラムの高速化や最適化を行い、計算を行う上で最適な実行条件を検討した。また、長期間の実行に対応するためノードの占有を実施した。

### 2.3.2. 技術サポートの詳細(1)

はじめにコードのテスト版(新/旧 2 バージョン)を用いて ES2 および SX-ACE(評価機)上で同化システムの動作検証および性能評価を行い、さらに最適化および高速化を検討しチューニングを実施した。プログラムのチューニングについては簡易性能解析機能(ftrace)を用いて性能分析を行い、以下のような最適化を行った。

#### (1)ベクトル化の促進

- ・ループの一部だけがベクトル化されている場合、ベクトル化されている箇所について最内側ループを展開することでループ全体をベクトル化する。
- ・多重ループの入れ替えを行いベクトル化する。

#### (2)スカラ処理部分のベクトル化

- ・ベクトル化不可の依存関係があるループにおいてベクトル化可能部分と不可能部分とに分け、ベクトル化可能な形に修正することで全体をベクトル化する。

ES2 から SX-ACE へのプログラム移植により同プロセス数で約 1.6 倍、更に上記の最適化により合計約 1.8 倍速くなった。

#### ・旧バージョンの測定結果

機種	ノード数	プロセス数	実行時間(秒)	その他条件
ES2	4	32	1027	ftrace 付き
SX-ACE(評価機)	8	32	624	ftrace 付き/ASIS 版
SX-ACE(評価機)	8	32	553	ftrace 付き/TUNING 版

#### ・新バージョンの測定結果

機種	ノード数	プロセス数	実行時間(秒)	その他条件
新 ES	8	32	624	ftrace 付き/ASIS 版
新 ES	8	32	477	ftrace 付き/TUNING 版
新 ES	8	32	450	ftrace 無し/TUNING 版

この結果をもとに本データを使用した環境でのノード数(プロセス数)変更によるスケーラビリティを調査した。

テスト版での性能評価および分析結果をもとに本データを用いた 1 サイクル(10 日間)の性能測定を実施した。ここでは 2.3.2 で実施したチューニングを本番環境に適用し、本計算を行う上で最適な実行条件を検討するためノード数や分割数等の規模を変えたスケーラビリティの調査、自動最適化レベルを変更した性能調査を行った。

	ノード数	プロセス数	ノード内 使用コア 数	分割 方法	実行時 間(秒)	イタレー ション	コンパイル オプション
①	64	256	4 コア	4x64	6,185.8	26	vopt
②	64	256	4 コア	4x64	5,585.8	24	hopt
③	64	256	4 コア	8x32	5,686.0	25	hopt
④	128	128	1 コア	4x32	6,029.8	25	vopt
⑤	128	256	2 コア	4x64	4,904.7	24	vopt
⑥	128	512	4 コア	4x128	6,357.7	25	vopt
⑦	128	512	4 コア	8x64	5,843.8	24	vopt
⑧	128	128	1 コア	4x32	6,116.0	27	hopt
⑨	128	256	2 コア	4x64	4,706.5	24	hopt

上記測定結果をもとに⑤の条件で本計算を行うこととした。自動最適化レベルの変更（-Cvopt / -Chopt）は既定レベルの最適化処理、ベクトル化処理を行う-Cvopt よりレベルの上がる-Chopt のほうが実行時間は早くなるが、この処理による副作用（計算結果への影響）を考慮し-Cvopt オプションを採用した。

この結果から 1 サイクルあたりの計算時間は約 4,900 秒の見積もりとなった。この値は、ES2 では 1 サイクルあたり 10 ノード(80 プロセス)使用で約 10 時間の見積もりであったが、(1)ES2 から新 ES による効果、(2)プログラムのチューニング、(3)並列数の変更(10 ノード 80 プロセスから 128 ノード 256 プロセス)により約 7 倍計算が早くなった。観測データ等の量によりサイクル毎の計算時間に多少増減はあるが、このデータから全計算の見積もりを行い、必要な日数は約 65 日となった。

### 2.3.3. 技術サポートの詳細(2)

本計算を実行(再解析データの作成)していく上では計算を過去から順番に計算していく必要がある。30 年解析には 1100 サイクルの計算を順番に行うため、実行については計算に必要なノード数を占有し、ジョブのスケジューリングが他のジョブから影響なく実行できるようにした。

再解析データの作成計算は 1982 年から 2012 年のデータセットと、1993 年から衛星システムのデータを使わないケースについても計算することになった。そこで 1 つの計算あたり 128 ノードを占有し、2 つの計算を並行実行している期間は 256 ノードを占有して計算を進めた。なお、運用側では 4 ノードを待機させ、障害時の切り替えが迅速に行えるように対応した。

## 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。本課題では、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、今までにない大規模な物理気候プロダクトの作成を目標とした。

実験は過去気候および平均気温4度上昇時の将来、それぞれ61年間に対して行い、計算モデルには海面水温・海氷データを与えた60km 全球大気モデル(MRI-AGCM)とそれをダウンスケールする20km 領域モデル(MRI-NHRCM)を用いる。統計的に扱うのが困難な事象の不確実性を減少させるため、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25,800年分にも上る。本課題実施期間中、地球シミュレータはハーフシステム(提供ノード数は2,560)で運用されており、本課題に割り当てられたCPU資源は全体の約30%に相当する。また、計算によって得られる出力データは、約2PBと膨大である。

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

#### 地球シミュレータの基本クラスタ占有期間

2015 年 3 月 23 日～2015 年 4 月 6 日	1 クラスタ占有(512 ノード占有)
2015 年 4 月 6 日～2015 年 5 月 7 日	2 クラスタ占有(1024 ノード占有)
2015 年 5 月 7 日～2015 年 5 月 31 日	1 クラスタ占有(512 ノード占有)

更に、計算を効率よく実行するため、各計算モデルについて計算性能最適化を行った。ただし、多大な計算量から早急に計算を開始する必要があったため、作業は短い準備期間で行えるものに限られた。計算性能最適化の詳細は次節以降に記す。

#### 2.4.2. 技術サポートの詳細(1)

全球大気モデル MRI-AGCM について、計算性能最適化を行った。本作業では 8 ノード(32 コア)を使用し、積分時間は 1 ヶ月間とした。以下のコンパイラオプションによる最適化を行い、10%程計算性能が向上した。

- ・最適化オプションを vopt から hopt に変更
- ・noouterunroll を outerunroll=8 に変更

	vopt	hopt
経過時間(秒)	1915.396	1670.223
MFLOPS	6489.047	7415.397

これらのオプションは計算結果に影響する可能性があるが、確認したところ結果への影響は許容範囲に収まっていたため、採用することになった。最適化レベルの高いオプションを使用することで、ループ融合による最適化が施され、ベクトルレジスタが再利用されることでメモリアクセスが減少した等の理由により性能が向上したと考えられる。

#### 2.4.3. 技術サポートの詳細(2)

領域モデル MRI-NHRCM について、計算性能最適化を行った。本作業では 4 ノード(16 コア)を使用し、ステップ数 118,080 を既定とした。コンパイラオプションによる最適化では大幅な性能向上は見られなかったため、ソースコードの最適化を行った。性能情報から各ルーチンのコ

ストを調べ、上位コストルーチンに対し以下の最適化を行った。

- ・if 文の融合
- ・多重ループ自動入れ替えの抑制
- ・多重ループ入れ替え

ASIS	14950 秒
最適化後	14500 秒

計算結果への影響なく性能向上したため、これらの最適化はソースコードに適用されている。

#### 2.4.4. 技術サポートの詳細(3)

地球シミュレータにおいて CPU 資源を有効に活用するため、ノード数を変えた場合の経過時間を測定した。使用ノード数 4、8、16、32、64 について比較を行った。なお、実行時間短縮のため、本作業では時間ステップを 10,000 としている。結果を以下の図 2.4.6.1 に示す。この図から分かるように、8 ノードを超えるとスケーラビリティが低下しているため、計算資源の効率的な使用の観点から 8 ノードでの実行が効率がよいとの結論に至った。

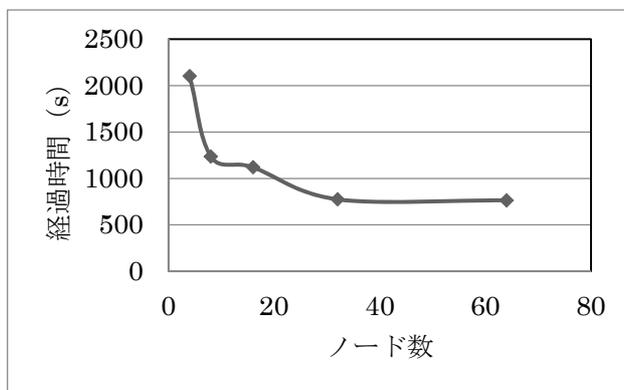


図 2.4.6.1 NHRCM のスケーラビリティ

#### 2.4.5. 技術サポートの詳細(4)

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も支援した。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ことを確認し、アーカイブ領域への移動作業を行った。

## 2.5. 課題#3「即時津波浸水予測に向けた高分解能・量的津波シミュレーション」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

本課題では、近い将来、大きな津波が発生するとされる南海トラフの一部領域を対象として、高分解能・量的津波シミュレーションを実施するとともに、量的即時津波浸水予測に向けた課題の整理、システム設計が目標であった。今回は和歌山県全域を対象とした高分解能・量的津波シミュレーションを実施し、津波浸水データベースを構築した。沿岸部 5m 分解能、約 2,000 シナリオの高分解能・量的津波シミュレーションを約 20 地域で、合計約 4 万ケースの計算を実施した。

津波シミュレーションに HPCI 戦略プログラム分野 3 にてスパコン京で実績のある津波伝播遡上計算プログラム(JAGURS)を使用した。JAGURSは地球シミュレータでの利用実績がなかったため、プログラムのチューニング、実行条件の検討を実施した。チューニングや実行条件の詳細については後ほど紹介する。

合計約 4 万ケースといった大量の計算ジョブを投入するため、地球シミュレータの利用制限値を下記の値まで緩和した。

地球シミュレータの利用制限値	変更前	変更後
ユーザあたりの最大ジョブ実行数	10	50
同時実行ノード数	512 ノード	2560 ノード

### 2.5.2. 技術サポートの詳細(1)

はじめに、スパコン京で実績のあるコード(JAGURS-D\_V181)をベースとし、ES2 にてチューニングを実施した。チューニング時には仙台周辺 5 重ネストテストデータを使用した。主なチューニング内容は以下の通りである。

- (1) 非線形流量計算部分について、ループ分割を適用しベクトル化を促進
- (2) 組み込みのタイマを無効化。

- (3) ネスト間通信を MPI\_Alltoallv から MPI\_Allreduce に変更。
- (4) サブルーチン呼び出しの度の allocate/deallocate を抑止。

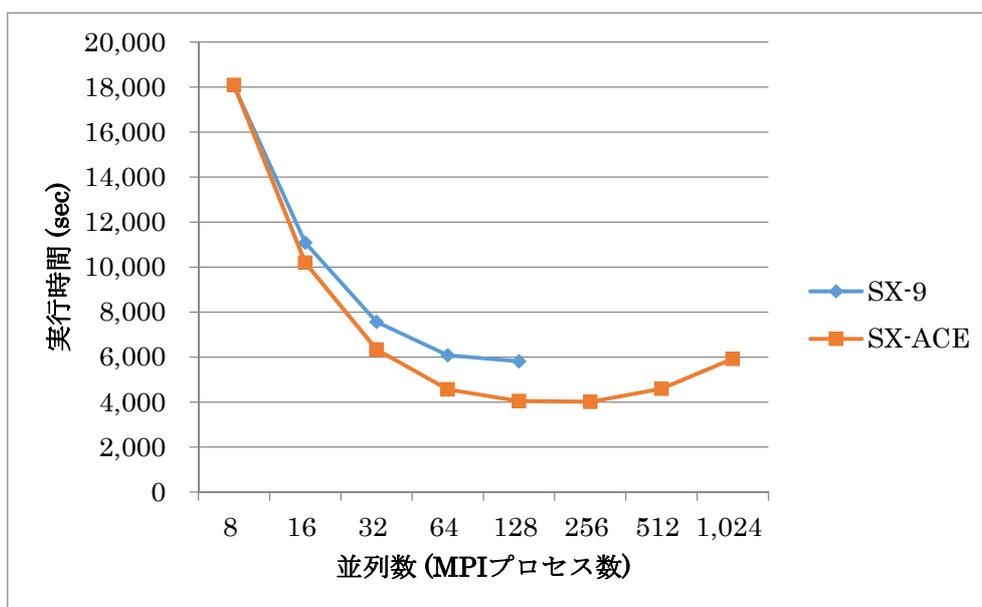
チューニングの結果、2400 ステップ実行時（64MPI）で、実行時間が 496.128 秒から 51.618 秒と、9.61 倍の性能向上が得られた。

測定バージョン	ノード数	プロセス数	分割方法	実行時間(秒)
ASIS (D_V181)	8	64	4x16	496.128
チューニング後 (SX.v10)	8	64	4x16	51.618

### 2.5.3. 技術サポートの詳細(2)

次に本番データ(和歌山県 7 重ネストデータ)を用いてストロングスケーリング性能を測定し、実計算を実施するにあたり、最適な実行条件を検討した。ここでは 2.5.2 で実施した地球シミュレータ向けチューニングコード(SX.v10)について、ES2 (SX-9) と 新 ES (SX-ACE) で性能測定を実施した。大部分の処理で東西方向のループが最内ループとなっているため、東西方向の分割数は実行可能な最小限の値とし、ベクトル長を十分長く保つようにした。

以下、ノード内 4 プロセスで測定した 1024 並列までの ES2 と新 ES の実行時間のグラフを示す。メモリ帯域を活かすため、ノード内のプロセス数を少なくした測定も実施したが、大きな効果は得られなかった。



上記測定結果では 256 並列（64 ノード×4 プロセス）が最速（4010.9 秒）という結果となった

が、計算割当資源量や計算効率を考慮し、最速の 256 並列ではなく、64 並列（16 ノード×4 プロセス）を採用した。

#### 2.5.4. 技術サポートの詳細(3)

チューニング、性能測定後、地球シミュレータと大型計算機システム(SC システム) との計算結果比較を実施したところ、データによっては計算結果に大きな差異が見られるケースがあった。計算結果への影響を考慮し、べき乗の最適化 (chgpwr)の削除、自動最適化レベルの変更 (hopt から vopt) を実施し、計算精度を重視した。

実行時間がかかるケースを用いて、コンパイルオプションによる実行時間の影響を確認した。下記結果より、最大で実行時間は 1000 秒程度増加すると想定されたが、計算資源量不足などの問題は発生しなかった。

コンパイルオプション	ノード数	プロセス数	分割方法	実行時間(秒)
chgpwr 有、hopt	16	64	2x32	4374
chgpwr 無、vopt	16	64	2x32	5462

#### 2.5.5. 技術サポートの詳細(4)

本課題メンバーのほとんどが地球シミュレータ初心者であり、また約 4 万ケースといった大量の津波計算を効率的に行う必要があるため、下記ツールを作成した。

- (1) 地形/地殻変動データマルチケース作成ツール
- (2) ジョブスクリプトサンプル
- (3) 複数ジョブ投入スクリプト

津波計算の前処理として、地形/地殻変動データの作成と領域分割が必要となるが、約 4 万ケースの入力データを逐次作成するのは効率が悪い。そこで、(1)のツールを利用することで複数ケースのデータを一度に作成することを可能にした。

津波伝播遡上計算プログラムは、マルチケース実行機能を有しており、1 ジョブで複数ケースの実行が可能となっている。ジョブの実行効率を考慮し、2 ケース 32 ノードジョブを複数ジョブ投入する方法を提案した。多くの計算ジョブを投入する必要があるため、(3)複数ジョブ投入スクリプトを利用することで同時に複数ジョブを投入することが可能となり、大幅に効率が向上した。

上記ツールについては利用マニュアルを作成し、ユーザへの説明会を実施した。さらに、実

計算前に、前処理から計算までの一連の操作を実施し、ツールの動作を確認した。その結果、本利用開始すぐに実計算を開始することができた。

## 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:特に台風上部の巻雲に注目して」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

課題#4では、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。さらに海洋モデル(NHOES)に波浪モデル、大気モデル(CReSS)に放射モデルを導入し、それぞれ単体での実験も行った。

各モデルについては動作検証を実施後にシミュレーション実験を行うが、大気モデルについては複数のバージョンがあり、本課題で使用するモデルのバージョンの検討・選定もあわせて実施した。

### 2.6.2. 技術サポートの詳細(1)

まずモデルの動作確認と本番環境バージョンの検討を行った。

#### (1)海洋モデル(NHOES)

NHOES 単体モデルおよび NHOES に波浪モデルを導入したプログラムについてそれぞれ ES2、新 ES で動作確認を行い問題ないことを確認した。NHOES を CReSS と結合した場合、NHOES で高コストとなる部分は結合モデル全体での比率が低いことから、NHOES については現状のコードのまま単体での実験を進めることとした。

#### (2)大気モデル(CReSS)

CReSS は以下 2 つのバージョンと計算方法があるため、今回の課題で使用するバージョンの検討・選定を行った。

- ・ CReSS.3.4.2(フラット MPI/ハイブリッド並列)
- ・ CReSS.3.4.3(フラット MPI/ハイブリッド並列)

ここで、以下の三つの理由から CReSS.3.4.3 フラット MPI 版で計算を進めることとなった。

- ・ NHOES および放射モデル(rrtm)はフラット MPI のみに対応(ハイブリッド未対応)、
- ・ バージョン 3.4.3 への放射モデル(rrtm)組込みは終了済み、
- ・ 4 ノード 16 コアでの性能比較において若干 CReSS3.4.3 が高速であった、

	フラット MPI 4 ノード/16 コア/16 プロセス
CReSS.3.4.2	3,213 秒
CReSS.3.4.3	3,211 秒

なお、放射モデルは mstrn、rrtm の 2 つのモデルがあり、今回動作確認ができた rrtm から計算を開始し、mstrn については引き続き動作検証を行うこととした。

CReSS で使用するバージョン、計算方法および導入する放射モデルが確定した段階で、初期化漏れの確認等の動作検証を実施し、単体での実験データを用いた計算を開始した。

### 2.6.3. 技術サポートの詳細(2)

CReSS について、放射モデル(rrtm)の組込み後に実験データを用いて、簡易性能解析機能(fttrace)による性能分析を行ったところ、放射モデルの実行時間が全体の約 50%を占め、ベクトル向きの最適化が十分ではないことが分かったが、同時にその最適化には膨大な工数・日数がかかることも判明した。特別推進課題では限られた期間内で研究成果を出さなければならないため、最適化の終了を待っているのはプロダクトランが困難であった。そこで研究者側では実験シミュレーションを進めていただき、技術サポート側で当該箇所のチューニングを並行して行った。これは高速化された当該箇所を今後の研究活動で活かしてもらうことを見据えてのことである。当該部分のチューニングでは、以下を行った。

#### (1)インライン展開

コスト上位のルーチンに対してチューニングを行い、当該ルーチンは約 1.2 倍の効果が得られた。

#### (2)ベクトル化の促進

コスト上位のルーチンに対してチューニングを行い、当該ルーチンは約 1.4 倍の効果が得られた。

(1)、(2)により当該ルーチンはそれぞれ約 1.2 倍、約 1.4 倍の効果が得られ、放射モデル(rrtm)全体で見ると効果は約 1.2 倍程度となった。CReSS+放射モデル(rrtm)全体では放射部分の実行時間が約 62%であったのに対し約 57%となった。

#### 2.6.4. 技術サポートの詳細(3)

当初、ジョブのステージング(ステージイン)に時間がかかり、計算時間以外の処理時間にもコストがかかっていた。それを改善して実験実施を効率化するため、ステージング処理の方法を見直し、それに対応したジョブスクリプトの記述方法を提案した。この結果、改良前はステージインに8~10時間を要したものが30分程度で終わるようになり、実験実施の効率化を達成できた。

##### 【変更前】

- ・全ノードに対して、全ノード分の全ファイルをステージインしていた。  
(当該ノードで使用しないデータも含まれていた。)

##### 【変更後】

- ・当該ノードで使用するデータだけをステージインするように変更。

### 2.7 技術的な点以外でのサポートについて

今回の特別推進課題では、3月から5月末までの僅か三カ月間で新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、従来は研究者の判断すべき領分として技術サポートとしては関与しなかった領分、例えば研究で用いる計算プログラムの選択や物理パラメータ値の設定などにも積極的に関与した。打合せ等の開催・頻度も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近距離の場合は週に数回程度訪問させていただき、遠隔地の場合はTV会議を定期的で開催しつつ、時に外勤・出張などでご訪問させていただいた。むろんEメー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を参加させていただき、知見を高めさせていただいた。データのネットワーク転送が速度的に難しい場合にはリムーバブルHDDでのハンドキャリーを提案・実施した。これらは技術サポートというより、むしろ研究推進、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ます。

### 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、各課題代表の先生方から以下のような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。

- ・ チューニングと運用の総合的なサポートで、ES2 では数年かかる計算が2 か月程度で結果を得ることができた。(石川 GL)
- ・ サポートスタッフによる最適化と、ジョブの管理をフレキシブルに対応していただいた。これらのサポートがなければ短期間での計算はできなかった。(馬場教授)
- ・ 運用とサポート体制で全面的にバックアップしていただき、今回の成果は JAMSTEC の強力なサポートがあったからこそ出来た。(坪木教授)

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していただいた。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既に公知であるため、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。これらのスキルアップ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/>

平成 27 年 12 月