



すべては限りある命のために



KAKUSHIN

21世紀気候変動予測革新プログラム

Innovative Program of Climate Change Projection for the 21st Century



文部科学省

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

21世紀気候変動予測革新プログラムの目的・概要

21世紀気候変動予測革新プログラムは、地球温暖化に関し、スーパーコンピュータを用いた気候モデルで予測することを目的とし、2007(平成19)年度から2011(平成23)年度まで5年間の予定で行われている。その成果は、2013年に発表が予定されている国際的な温暖化研究のとりまとめ、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」第5次評価報告書に貢献するものと期待されている。

2007(平成19)年にIPCCの第4次評価報告書が発表され、その中で「気候システムの温暖化には疑う余地はない。」や「20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い。」などをはじめとする知見が世界の専門家の一致した結論として述べられた。これを受け、世界の政治リーダー達も温室効果ガス排出削減の目標やプロセスについて具体的提案を行うようになって来た。このような状況でIPCCは2007年のノーベル平和賞を米国の元副大統領ゴア氏と共同受賞した。

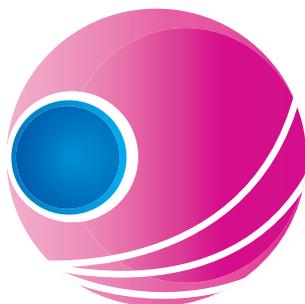
IPCC第4次評価報告書は、このように大きな意義を持ったものとなった。これに対して日本の研究陣は本プログラムの前身である「人・自然・地球共生プロジェクト(略称・共生プロジェクト)」によって数多くの研究成果をあげ、重要な貢献をした。このプロジェクトは、2002(平成14)年に完成した当時世界最高速のスーパーコンピュータ、「地球シミュレータ」を活用して、気候変化予測の進展を図ったもので、日本の関連研究機関の研究者がそれぞれの得意とする所を生かした分担によって3つのグループを作り、目的に応じたモデルを開発し温暖化予測実験を行った。開発されたモデルは当プログラムに引き継がれ更なる改良のもと新しい実験に用いられている(14ページの表参照)。

このような「分担」によるモデル開発と予測実験は、いよいよ現実のものとして重要性を増した、温暖化に関わる次のような多くの問題のそれぞれに効率的に応える為である。

- (1) 温室効果ガス濃度安定化のシナリオの下で、陸域及び海洋の生態系などによる炭素循環を含む地球システムモデルを高度化して、2300年までの長期的な地球環境の変化を予測する。さらに、濃度安定化を可能にする排出量を評価する。京都議定書後の排出削減目標に対する基礎資料を提供する。
- (2) 排出シナリオによって余り異なる今後30年程度の期間について各地の気候や海流がどのように変わるかを予測する。現在の状態(初期値)に依存する「超長期気象予測」としての自然の変動予測も同時に取組み、モデルの解像度をより高くして詳細な予測に努める。
- (3) 気候変化の中でも社会的インパクトの大きい極端な気象(台風・豪雨など)が温暖化に伴ってどう変わるのかを調べるため、20km解像度の全球大気モデルを高度化するとともに、現在の天気予報モデルと同じ細かいメッシュの領域モデルにより、温暖化条件下での「異常気象」の予測を行い、対応策立案に資する。

このように、避けられない温暖化の予測が革新プログラムの一つの中心となるが、その結果を対応策立案に結びつけるため、自然災害についての専門家による研究プロジェクトをもプログラムの中を含め、モデルで得られた予測データを直接使って影響評価・対応策の研究を行う事としている(3~4ページの実施体制中C課題)。一方、このように「実際問題」に応用するには予測の不確実性を減らす事と共に、不確実性の幅がどのくらいかの情報が必要である。このため各モデルによる将来予測実験について、いろいろな方法で不確実性の幅を推定する研究課題も含まれている(同、B課題)。

このように、革新プログラムは、いよいよ現実の問題となった地球温暖化に対して社会の必要に精一杯応えられるような体制をとってモデルによる予測を行っていく。



KAKUSHIN

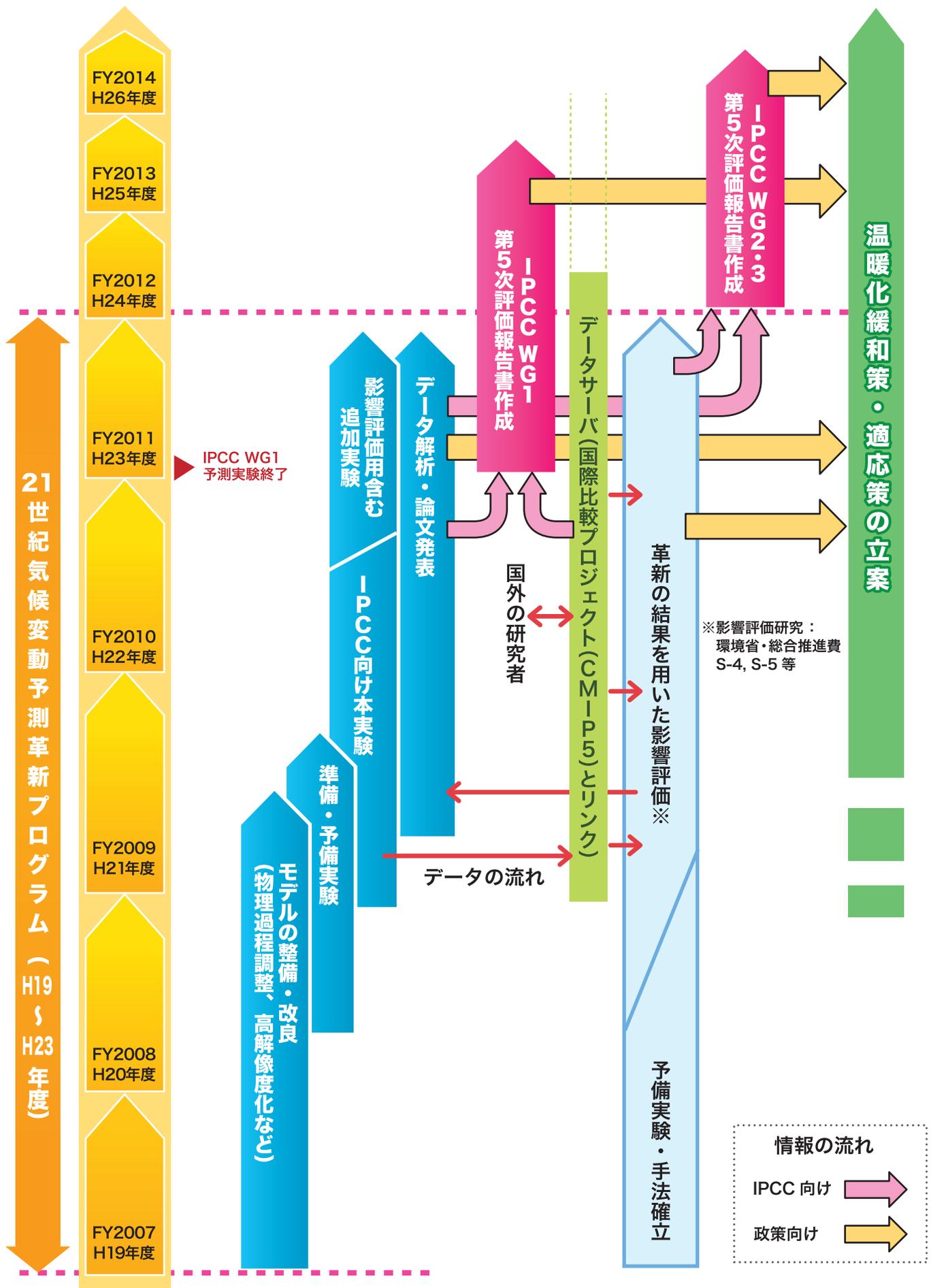
ロゴマークについて

現在・未来の2つの地球をモチーフとしている。

現在の地球を青色で、温暖化する地球を暖色で描き、IPCCレポートの象徴ともいえる気温上昇ラインをデザインした。青色の球体は現在の地球の姿であり、また将来的にもそうあってほしいと我々が目指す地球の姿である。一方、暖色の球体は温暖化する地球を表現するとともに、気温上昇ラインをデザインすることによって科学者からの警告をメッセージとして込めている。

また、KAKUSHINの“I”はInnovation(革新)の頭文字と重ねて地球温暖化のイメージカラーである暖色を使い強調することで、本プログラムの研究成果が社会へ貢献することへの願いを込めている。

21世紀気候変動予測革新プログラム ロードマップ



プログラム統括



松野 太郎
文部科学省技術参与
海洋研究開発機構
IPCC貢献地球環境予測プロジェクト
特任上席研究員



西岡 秀三
文部科学省技術参与

プログラム統括は、プログラムを効率的・効果的に運営するため、以下の全体調整を行う。

- プログラムの運営方針の決定
- 課題間の資金の配分額や配分方式の決定
- プログラムのマネジメントシステムの向上(研究調整委員会の主宰、課題間調整のための実施主体への指導、外部評価への対応の統括等)

研究調整委員会・広報委員会



事務局長：近藤 洋輝
海洋研究開発機構
IPCC貢献地球環境予測プロジェクト
特任上席研究員

研究調整委員会は、プログラム統括が主催し、各研究代表等により構成され、複数の研究課題を横断的に連携させることにより、各研究課題の達成目標の実現を促進するための委員会である。また、広報委員会は、プログラム全体としての効率的・効果的な広報活動に対応するために設置している。

チーム編成

地球環境予測 : 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験



チーム代表：時岡 達志
海洋研究開発機構
IPCC貢献地球環境予測プロジェクト
プロジェクトリーダー

海洋研究開発機構
<http://www.jamstec.go.jp/j/index.html>
農業環境技術研究所
<http://www.niaes.affrc.go.jp/index.html>
茨城大学 工学部都市システム工学科
<http://www.civil.ibaraki.ac.jp/index.html>

分類	研究課題名	課題代表機関	研究代表者
A	地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験	海洋研究開発機構	時岡 達志
	GCM と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証	海洋研究開発機構	原 登志彦
	全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上	海洋研究開発機構	佐藤 正樹
B	階層的モデル実験による長期気候変化予測の不確実性定量化	海洋研究開発機構	河宮 未知生
C	気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価	農業環境技術研究所	横沢 正幸
	長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価	茨城大学	横木 裕宗

近未来気候予測 : 高解像度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究

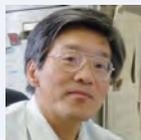


チーム代表：木本 昌秀
東京大学大気海洋研究所
副所長・教授

東京大学大気海洋研究所
<http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/index.html>
海洋研究開発機構
<http://www.jamstec.go.jp/j/index.html>
東京大学生産技術研究所
<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html>

分類	研究課題名	課題代表機関	研究代表者
A	高解像度大気海洋結合モデルによる近未来予測実験	東京大学大気海洋研究所	木本 昌秀
	海洋モデルの高精度化による気候変動予測の向上に関する研究	東京大学大気海洋研究所	羽角 博康
B	アンサンブルデータ同化手法を用いた不確実性定量化技術の開発	海洋研究開発機構	石井 正好
C	不確実性を考慮に入れた近未来予測に基づく水災害リスク変化の推定	東京大学生産技術研究所	沖 大幹

極端現象予測 : 超高解像度気候モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究



チーム代表：鬼頭 昭雄

気象庁気象研究所
気候研究部長

気象庁気象研究所
<http://www.mri-jma.go.jp/welcome-sjis.html>
海洋研究開発機構
<http://www.jamstec.go.jp/j/index.html>
京都大学防災研究所
http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/index_topics.html
土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター
http://www.icharm.pwri.go.jp/index_j.html

分類	研究課題名	課題代表機関	研究代表者
A	超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究	海洋研究開発機構	鬼頭 昭雄 (気象研究所)
B	超高解像度大気モデルによる気候変動予測の不確実性の定量化と低減に関する研究	海洋研究開発機構	楠 昌司 (気象研究所)
C	流域圏を総合した災害環境変動評価	京都大学防災研究所	中北 英一
	気候変動に伴う全球および特定脆弱地域への洪水リスク影響と減災対策の評価	土木研究所	竹内 邦良

雲解像モデリング



チーム代表：坪木 和久

名古屋大学 地球水循環研究センター
准教授

名古屋大学 地球水循環研究センター
<http://www.hyarc.nagoya-u.ac.jp/japanese/index.html>

分類	研究課題名	課題代表機関	研究代表者
A	雲解像モデルの高度化とその全球モデル高精度化への利用	名古屋大学	坪木 和久

海洋微物理過程



チーム代表：日比谷 紀之

東京大学 大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻
教授

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
<http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>

分類	研究課題名	課題代表機関	研究代表者
A	LES による海洋微物理過程の高精度パラメタリゼーション	東京大学 大学院理学系研究科	日比谷 紀之

チーム編成について

革新プロは、以下の3つの研究項目(分類)に対応する各課題を、有機的に連携しつつ研究を進めるため、3つのチームとして編成した(チーム1~3)。また、先端的なモデル開発である2課題については単独のチーム(チーム4・5)とし、革新プロ全体でその成果を活用する。

A 温暖化予測モデルの高度化および予測

地球規模から河川流域までの幅広いスケールにおいて複雑な大気・海洋・陸域の物理過程、生物・地球化学過程を考慮した温暖化予測モデルを発展させ、確度の高い高解像度の温暖化予測を実現する。

B 不確実性の定量化・低減

複数のモデル、データセットを用いた計算プロセスの比較及びデータ同手法(データの時間的、空間的補完)の開発を通じ、予測実験結果の不確実性を定量化し、その原因究明と改善策の確立により、不確実性の幅を低減する。

C 自然災害に関する影響評価

A・B課題の温暖化予測結果に基づき、気温、降水量、風速などにかかわる極端現象(台風や集中豪雨、干ばつ等)や洪水等の自然災害等の頻度や強度に注目した解析を通じて、社会的被害のリスク評価など、自然災害への影響評価を行う。

長期気候変動(2300年まで)の予測

地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

概要

人為起源 CO₂ (二酸化炭素) の排出による地球温暖化が進行している。最近の研究では、今世紀中に大気中の CO₂ 濃度を一定濃度に安定化することができたとしても、その後百年以上にわたって地球温暖化とそれに伴う海面の上昇が続くと言われている。また、地球温暖化が進めば、CO₂ を吸収する海面の条件や、森林や土壌といった陸域生態系、栄養塩やプランクトンに関する海の生態系にも影響を与えるため、人為起源 CO₂ 排出量だけに注目していたのでは、CO₂ の安定化は達成できない可能性がある。本課題では、地球システム統合モデルを使用して、西暦 2300 年までの地球温暖化予測実験を行い、CO₂ 安定化シナリオの下での、長期的な地球環境の変化を予測する。また、大気中の CO₂ 濃度を安定化させる上で許容される人為起源 CO₂ 排出量を評価する。地球環境変化予測の結果を用いて、予測の不確実性の評価・低減のための実験や、自然災害分野に対する温暖化の影響評価を行う。

予測モデルの高度化

図 1(a) は、あるシナリオで与えられた CO₂ 濃度の時間変化を示す。図 1(b) は、同シナリオを入力とした温暖化予測を地球システム統合モデルで行った結果であり、現在に比べ 21 世紀末では世界平均で約 2.8℃ の昇温を示す。北半球の高緯度で温暖化が激しい (図 1(d))。図 1(c) は、図 1(a) に対応する人為起源の CO₂ 排出量を、地球システム統合モデルを用いて計算した結果。21 世紀末で現在の 2 割以下まで排出が減っているが、それでも 2.8 度の昇温がある。図 1(e) は、樹木による純一次生産力 [※] を緯度毎に表したものであり、2000 年代 (赤) に比べ 2090 年代 (青) は増加していることがわかる。

なお以上の結果は、単一のシナリオ、モデルを用いた 1 実験の結果であり、大きな不確実性をもつことに注意する必要がある。

[※] 純一次生産力:

植物の光合成によって獲得される総炭素量から、植物自身の呼吸によって消費される炭素量を差し引いたものであり、植物が正味に獲得した炭素量を意味する。この炭素を利用して植物は成長を行う。

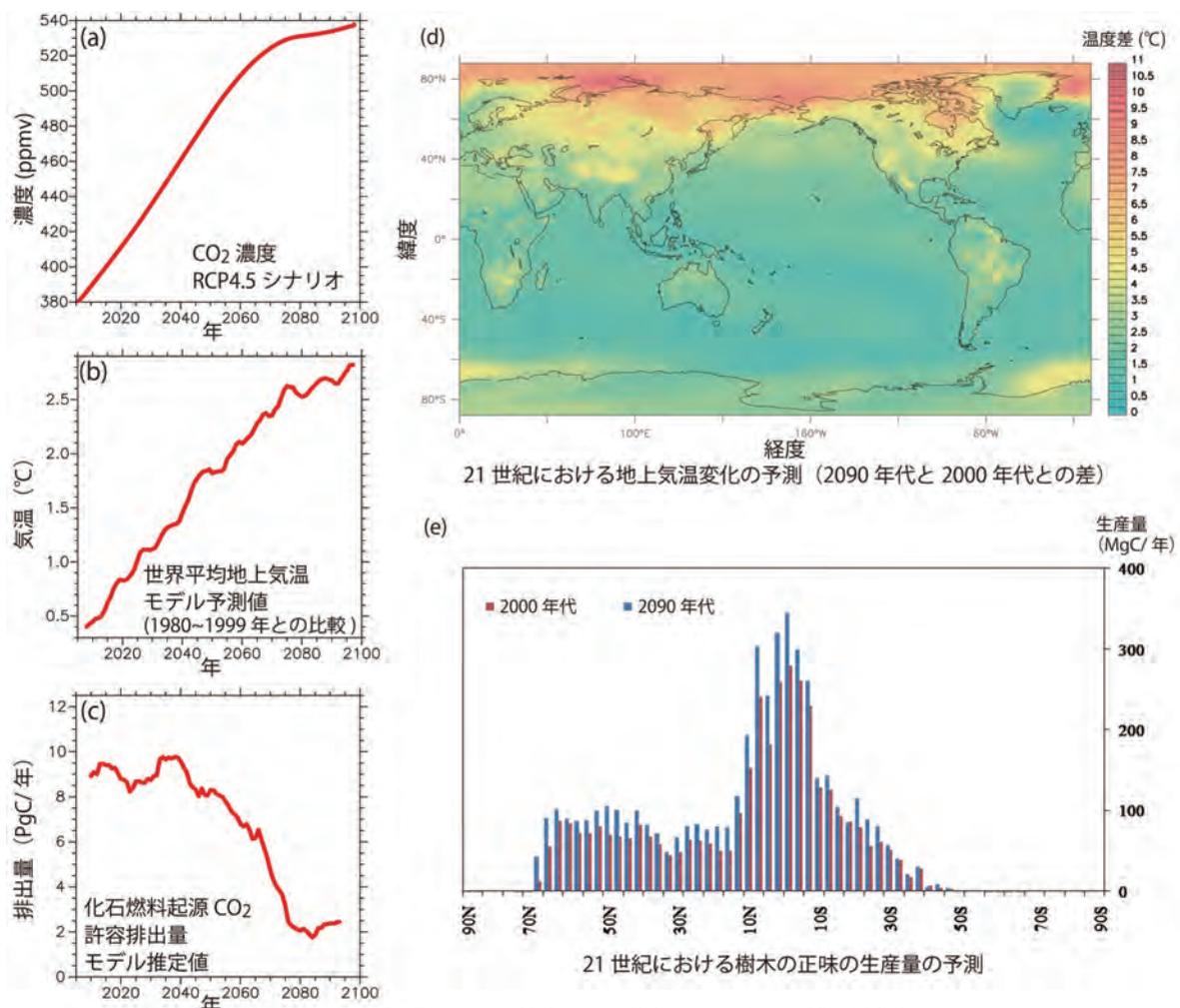


図1 地球システム統合モデルによる温暖化予測実験

不確実性の定量化・低減

大循環モデル(GCM)による温暖化予測は精緻なものである反面、多大な計算量を伴うため、その中に含まれる様々な不確実性の影響を考慮するために必要な多数の実験を行うことは困難である。こうした際に有効なのが、GCMの基本的な出力を再現しつつ細かい点を簡略化したモデルである。本研究では、簡略モデルと過去のGCMの出力を利用した簡略地球システムモデルを作成した。このモデルは、基本的な性質においてはGCMをよく模擬している(図2)。今後、このシステムを用いて多様な解析を行い、温暖化予測の不確実性に関する定量的情報を得る予定である。

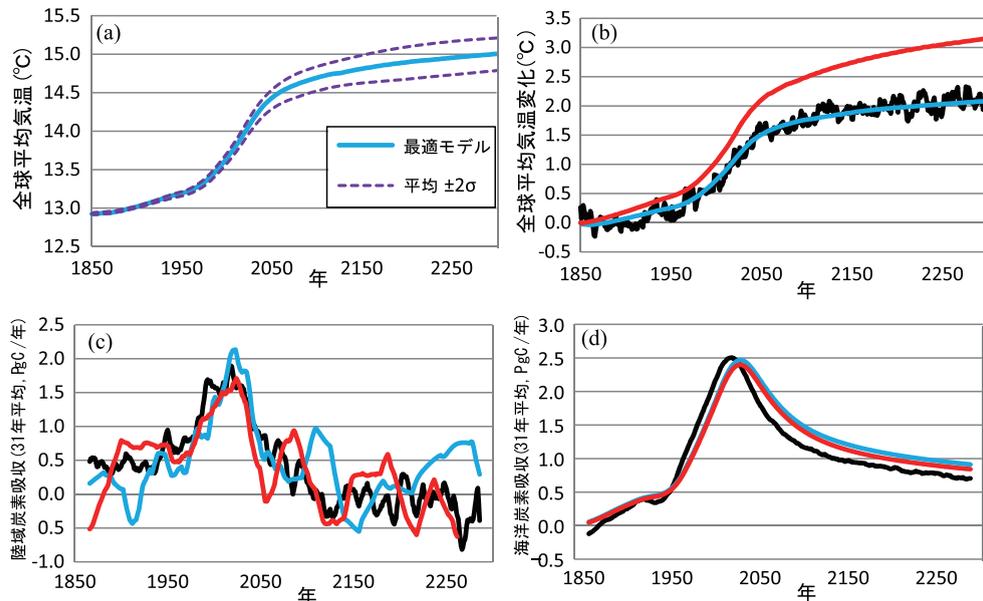


図2 本研究で構築されたシステムの挙動
(a):モデル作成時のアンサンブル実験結果(気温、300メンバー、450ppm安定化シナリオ)、(b)~(d):最適モデルによる同シナリオ下の気温(b)、陸域炭素吸収(c)、海洋炭素吸収(d)(青/赤はそれぞれMIROC低感度版/高感度版を簡略モデルで再現した場合、黒はMIROC低感度版の結果)の挙動。

自然災害分野の影響評価：海面上昇を考慮した全球の高潮災害の影響評価

高潮とは、台風などの強風で海水が押し上げられ、大きな時には沿岸で洪水となる自然災害のことである。21世紀に入ってからアメリカ、バングラデシュやミャンマーで大規模な高潮が起こり、多くの人々から生活を奪った。海面上昇が進むと高潮の高さがさらに上がり、被害が大きくなるのが心配される。図は、世界中の高潮の高さを海岸線に沿って計算した結果である。黄色から赤になるほど高潮が高いことを示している。また海面上昇と高潮により洪水の危険性がある地域を青色で示している。高潮洪水にさらされる恐れのある人々は、2100年までに世界で5億人以上も増える試算もされている。地球温暖化により台風が強大化すれば、この人数はさらに増えると考えられる。これらの試算は、温暖化への警鐘とともに防災計画に活用される。

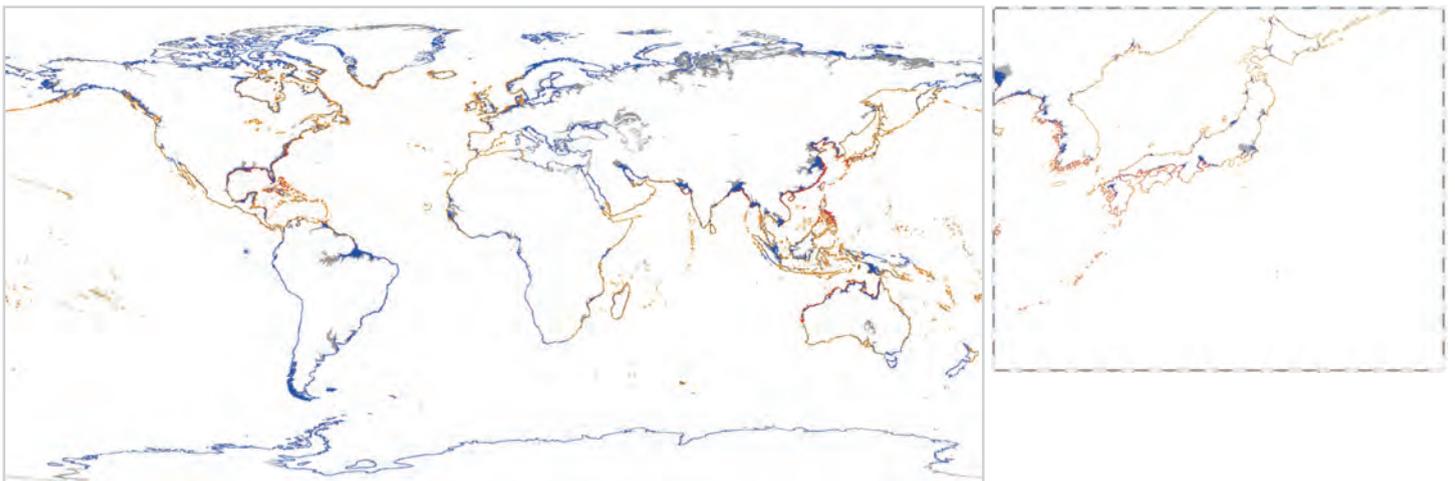


図3 全球の高潮災害の影響評価

高解像度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究

概要

IPCC第4次評価報告書によれば、二酸化炭素などの温室効果ガスの人為要因による排出量に対する制限が今後行われたとしても、この先数十年間は地球温暖化が進行することが予測されている。従って、不確実性に伴う予測誤差を定量的に把握した上で、これから数十年後の気候変動をより正確に予測し、環境に対してどのような影響があるのかを密に調べる必要がある。

本課題は、地球シミュレータを用いてこれまでにない解像度の気候モデルを構築し、人為要因による2030年程度までの近未来の気候変化の予測実験を行う。

温室効果ガスだけでなく、各種エアロゾルなど詳細な気候変化要因を取り入れ、また、過去数十年の実際の気候変動を考慮した初期値化を行ったうえで、アンサンブル手法により異常気象の変化や水災害リスクなど近未来の気候変化についての予測とその信頼性を定量的に示す。

不確実性情報を含む定量的な予測結果は、各方面に提供し、地球温暖化への対応促進に寄与する。

予測モデルの高度化

本課題では、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構の共同開発による大気海洋結合気候モデルMIROCを用いて、自然変動の予測を含む近未来予測を行う。IPCC第5次評価報告書に向けて、旧モデル(MIROC3)に改良を加え、高解像度化したMIROC4(大気水平解像度約60km)、および、放射、雲、境界層、海洋などほとんどのモデルコンポーネントを一新したMIROC5(同約150km)を完成することができた。新モデルを用いて、高解像度、中解像度の近未来予測実験を行う。前者は影響評価等での利用が期待され、後者は実験数を稼ぐことができるので、新しい実験である近未来予測に関わる種々の科学的検討を行うことができる。

新モデルでは、気候学的平均のみならず、予測に重要な自然変動の再現性も格段に向上した。図1には、その顕著な例として、エルニーニョ現象とそれに伴う大気大循環偏差を観測、旧モデルと比較して示す。旧モデルでは観測に比して弱かったエルニーニョ振幅がより現実的になり、海洋表層での温度躍層変動や、赤道太平洋以外での海面水温、大気循環偏差のパターンも現実性を増した。

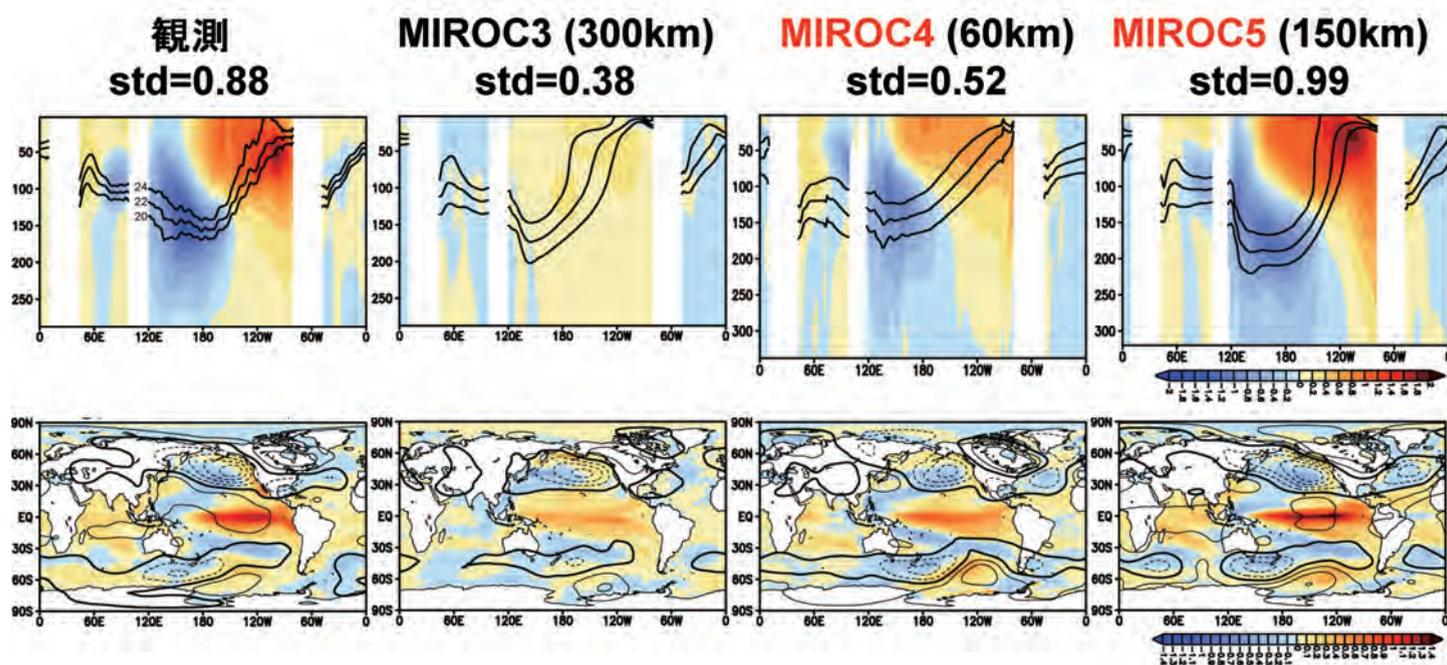


図1 観測、旧モデル(MIROC3)、新モデル(MIROC4, MIROC5)によるエルニーニョの再現性。stdは、赤道東太平洋におけるエルニーニョ監視海域における海面水温偏差の標準偏差(エルニーニョの振幅)。旧モデルでは弱かったエルニーニョ振幅が新モデルではより現実的になっている。

(上段) エルニーニョに伴う赤道表層海水温偏差の経度-深度断面図。黒線は、気候平均の温度躍層を示す。躍層に沿った東西の水温偏差が新モデルでは現実的に表現されている。

(下段) 上段に同じ。ただし、海面水温、大気上空500hPa高度偏差の緯度経度分布図。海水温は赤道東太平洋の偏差強度が増ただけでなく、インド洋、東アジアでの正偏差もよく再現されるようになった。500hPa高度では、北太平洋～北米や南半球への遠隔影響がより現実的になっている。

不確実性の定量化・低減

近未来予測では、温室効果気体濃度やエアロゾルの将来シナリオに加えて十年規模での気候の自然変動成分を観測に基づく初期値から予測しなければならない。このために、気候モデル MIROC を用いたアンサンブル予測システムを構築した。旧 MIROC3 中解像度モデル (大気約 300km) を用いた過去の事後予測実験により、海洋表層の水温・塩分観測データの同化により、北太平洋でよく知られた気候の十年規模振動 (PDO) に、5-6 年程度の予測可能性があることが世界で初めて示された。このほかにも、大西洋熱帯域での海面水温変動モードに伴う、ブラジルの降水量偏差に数年先までの予測可能性が見出されるなど、温暖化とともに自然変動を含む近未来予測成功の可能性を示すことができた。加えて、データ同化～初期値化に用いる歴史的観測データのバイアス補正法や高解像度実験における不確実性低減に有効なアンサンブル生成法の開発を行い、第 5 次評価報告書に向けた実験を実施中である。

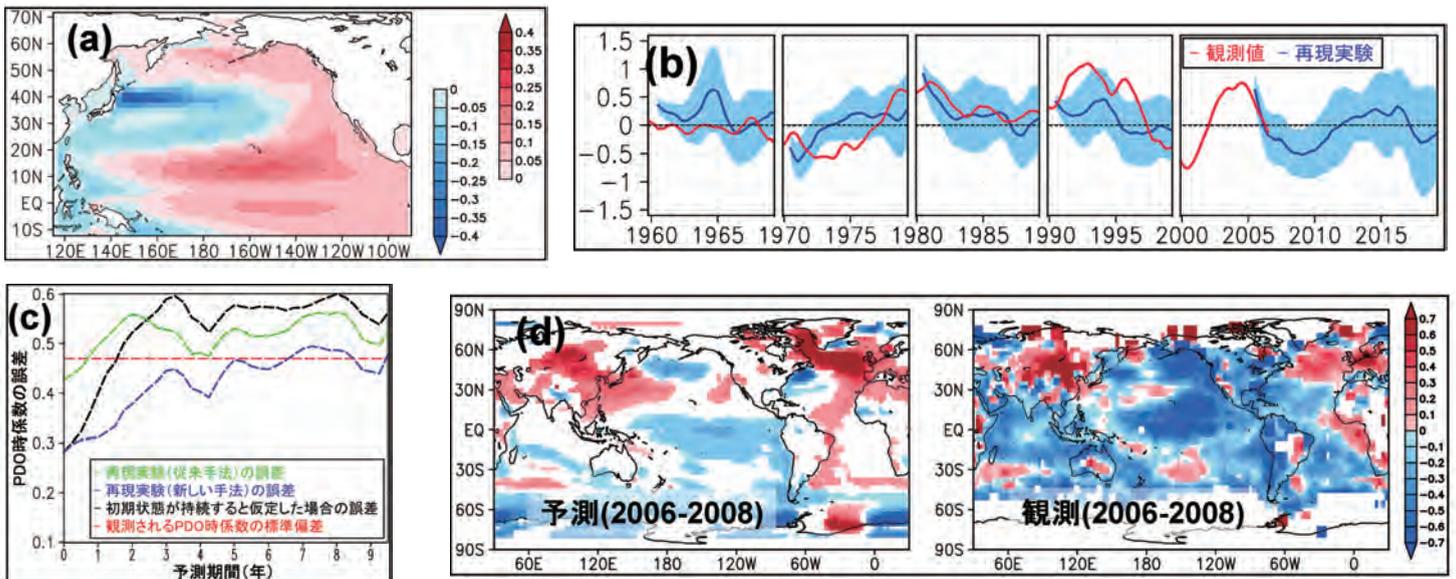


図 2 (a) 300m 深平均水温偏差にみられる空間パターン [°C]

- (b) 300m 深平均水温の長期的温暖化傾向からのずれを PDO パターン (a) に射影することによって定義した PDO 時係数。(赤) 5年平均値した観測値。(青) 再現実験結果 (10メンバーアンサンブル実験の平均値)。(青帯) 再現実験の不確実性の幅 (アンサンブル間の標準偏差)。再現実験結果は 1960, 1970, 1980, 1990, 2005 年の各 7 月予測スタートの 5 例のみを代表として描いた。
- (c) 20 世紀後半の再現実験で見られる PDO 時係数の統計的な誤差の大きさ (二乗平均誤差)。緑は初期値化を行わない従来手法、黒は初期値をそのまま予測値とする持続予測、青は初期値化した今回の実験。
- (d) 2006 ~ 08 年における長期的地球温暖化傾向からの地表気温のずれ [°C]。(左) 2005 年 7 月 1 日計算スタートした再現実験の結果、(右) 観測値。統計的に意味のある大きさのずれのみに色をつけた。

自然災害分野の影響評価

気候モデル (MIROC) の将来推計に基づいて、世界の河川流量変動をシミュレートした結果に基づき、年間何億人の人々が洪水の影響を受けるかについて算定した結果 (図 3; 黒線)。20 世紀の基準で 50 年に 1 度という稀な洪水が生起する格子 (約 100km 四方) に住む人口の総和として示している (Hirabayashi and Kanai, HRL, 2009 年より)。青線は国際災害データベース (EM-DAT) により報告されている洪水被害影響人口の統計値。背景の陰影は、極端現象に関する気候モデルの不確実性を統計的に考慮するため、モンテカルロシミュレーション [※] によって洪水影響の場所をランダムに変化させた場合の 95% 幅 (濃い陰影) ならびに最大最小値 (薄い陰影) を示す。こうした規模の洪水が発生した場合、実際にどれくらいの被害が生じるかに関する研究も進みつつある。

[※]モンテカルロシミュレーション:

乱数を用いたシミュレーション。ここでは、50年に1度の洪水が世界の陸地に発生する地点数を気候モデルから推計し、場所の組み合わせをランダムに1000通り作成して、その合計人口の幅を示した。

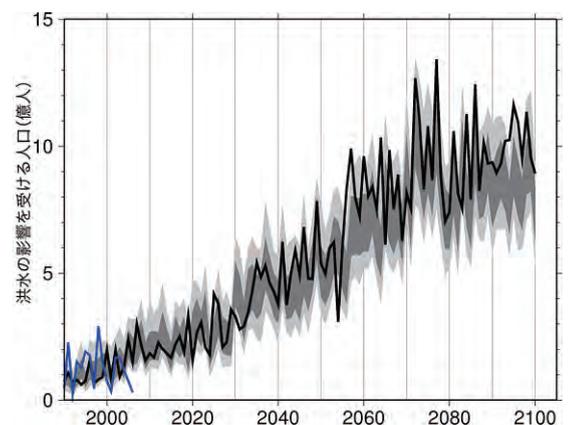


図3 21世紀における洪水の影響を受ける世界人口の推移

極端現象(台風・集中豪雨等)の予測

超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究

概要

温暖化により増加すると見込まれる極端現象について高精度かつ定量的に見積もるため、地球温暖化研究では従来用いられていなかった水平方向に非常に細かい格子を持った大気モデルを使用し、極端な現象の正確な予測を行う。20km 格子間隔(メッシュ)で地球全体を覆う大気モデルでは、世界各地における、台風など熱帯低気圧の発生数や強度の変化・梅雨などの降水強度の変化などの予測を行う。日本付近に領域を限定した5km, 2km および1km 格子間隔の大気モデルでは、日本における集中豪雨などの予測を行う。60km 格子間隔で地球全体を覆う大気モデルでは、複数の実験を行うことにより台風や梅雨の予測の不確実性を見積もり、不確実性の低減を目指す。得られた地球温暖化予測実験の結果を用い、日本の土砂災害、洪水・氾濫災害、渇水災害、高潮・高波災害、強風災害の環境変化をその不確実性ととも予測する。さらに、地球全体と特に危険な地域における洪水災害発生の変化可能性を予測する。

予測モデルの高度化：熱帯低気圧の変化

将来熱帯低気圧の強度がどのように変化するかを見積もるためには水平方向に細かい格子をもつモデルが必要となる。20km 格子全球大気モデル(以下、20kmモデル)は全球気候予測モデルとしては世界で最も高解像度であり熱帯低気圧強度の精度の高い将来予測が可能である。図1は中心からの距離毎に降水量と地上風速がどのように変化するかを示したものである。降水量、地上風速共に熱帯低気圧の中心から150km以内で顕著に強度が増しており接近時における災害リスクの増加が懸念される。

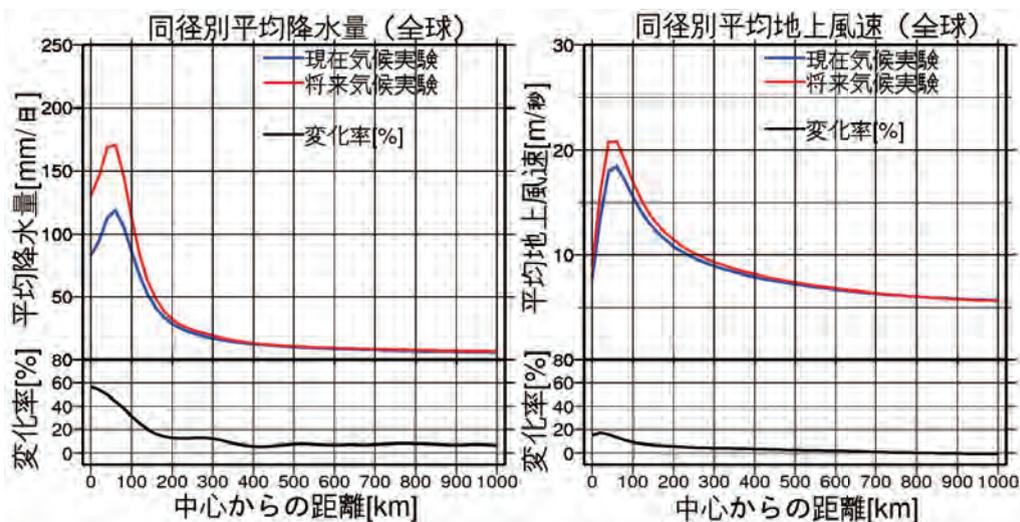


図1 現在実験(1979~2003年)と将来実験(2075~2099年)のそれぞれで出現した熱帯低気圧の平均的な強度と将来変化率(%)。 (左)は降水量、(右)は地上風速を示し、熱帯低気圧の中心からの距離毎に統計をとった。

不確実性の定量化・低減：梅雨期の強雨変化

計算機資源の制約から20kmモデルで多数の実験を行うことが出来ないため、格子間隔が60kmのモデルにより複数の実験を行い、予測の不確実性を評価した。大気モデルは海面水温の影響を強く受けるので、地理分布が異なる4つの海面水温を与えた。さらに、異なった大気の初期条件を3つ用い、合計12個の実験を行った。図2は、梅雨期の強い雨の変化である。20kmモデルの予測では、日本付近で強い雨がやや増える傾向にある。60kmモデルの予測では、日本も含めほぼ東アジア全域で強い雨が増える。特に中国大陸の南部では、20kmモデル、60kmモデルともに増加傾向が顕著であり、予測の信頼性が高いと言える。

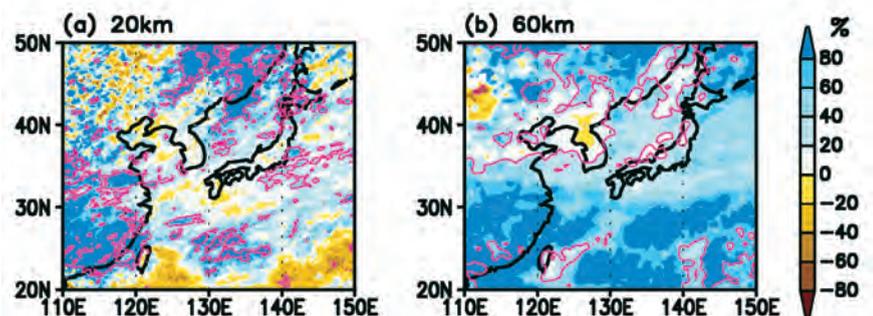


図2 梅雨期(6~7月)における強い雨(日降水量30ミリ以上)の日数変化。現在(1979~2003年)から将来(2075~2100年)への変化を現在の日数に対する割合(%)で示した。赤線は95%有意水準。(a)20kmモデル、(b)60kmモデル。

自然災害分野の影響評価1：日本における洪水リスクの増大の可能性

20kmモデルによる気候予測情報を用いて、日本全国の河川流量を1kmの空間分解能で計算し、現在気候実験、近未来気候実験、21世紀末気候実験の期間ごとに、再現期間100年の年最大流量を算定した。図3左は、現在気候実験に対する近未来気候実験での値の変化比率、図3右は、現在気候実験に対する21世紀末気候実験での値の変化比率を空間的に示したものである。分析した結果を見ると、近未来気候実験において、北海道・東北地方北部・中国四国地方・九州地方北部で年最大流量の増加傾向をみることができる。ただし、東北地方南部や北信越地方など、年最大流量が積雪・融雪に起因する地域では、積雪・融雪量の減少によって、年最大流量が減少する傾向にある。この傾向は、21世紀末気候実験でも明瞭に確認することができる。

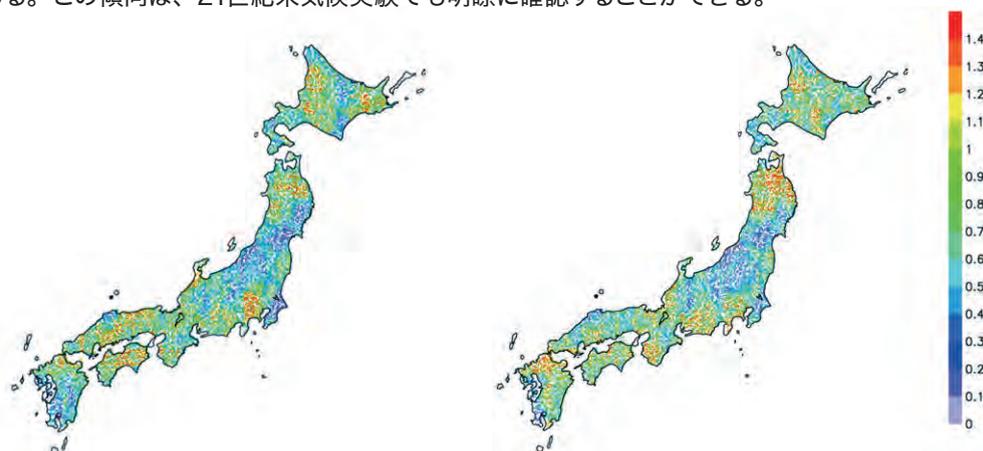


図3 年最大100年確率洪水流量の現在気候実験(1979-2004年)に対する近未来気候実験(2015-2039年)の比率(左)、現在気候実験に対する21世紀末気候実験(2075-2099年)の比率(右)。

自然災害分野の影響評価2：世界および特定脆弱地域の洪水リスクの変化

20kmモデル出力値をもとに、世界の様々な流域における将来の極端な洪水流量の変化を評価した。図4は、各河川区間における再現期間50年の年最大日流量について、それぞれ現在気候実験に対する変化比率を表示したものである。近未来気候実験・21世紀末気候実験ともに時空間分布は世界各地で様々であること、近未来気候実験では増減傾向の変動がみられるものの21世紀末気候実験では概ね増加の傾向であることがわかる。この結果は研究上の一実験例に過ぎない。しかしながら、このように複雑な世界各流域での水文事象の変化について場所や大きさを問わずに詳細に検討できるシステムによって、最先端の温暖化研究の成果を流域規模の現象に翻訳して見るのが重要である。

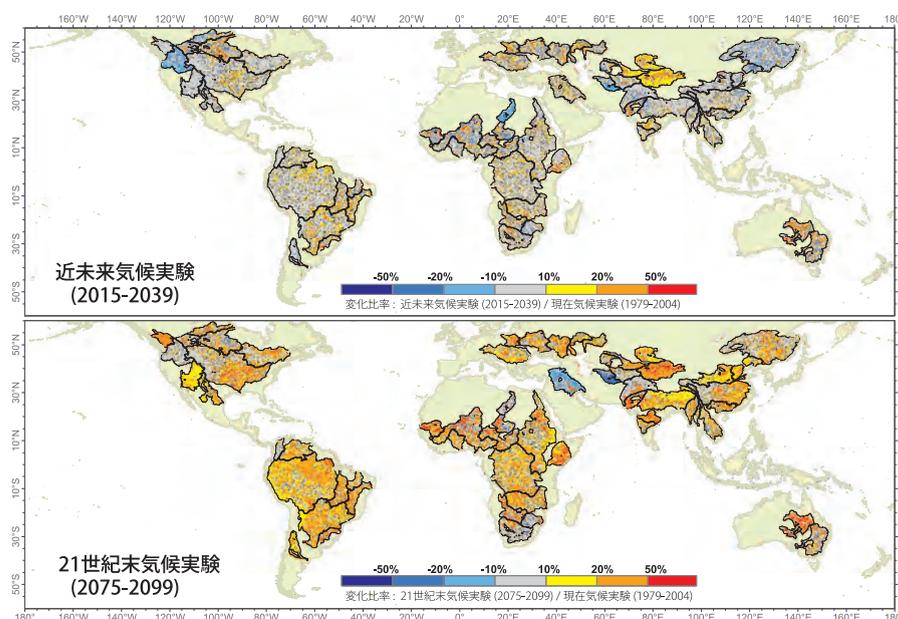


図4 世界の大河川における極端流量(年最大50年確率洪水流量)の変化比率(流域面積30万km²以上の流域を表示)
上: 近未来気候実験(2015-2039年)の現在気候実験(1979-2004年)に対する比
下: 21世紀末気候実験(2075-2099年)の現在気候実験(1979-2004年)に対する比

概要

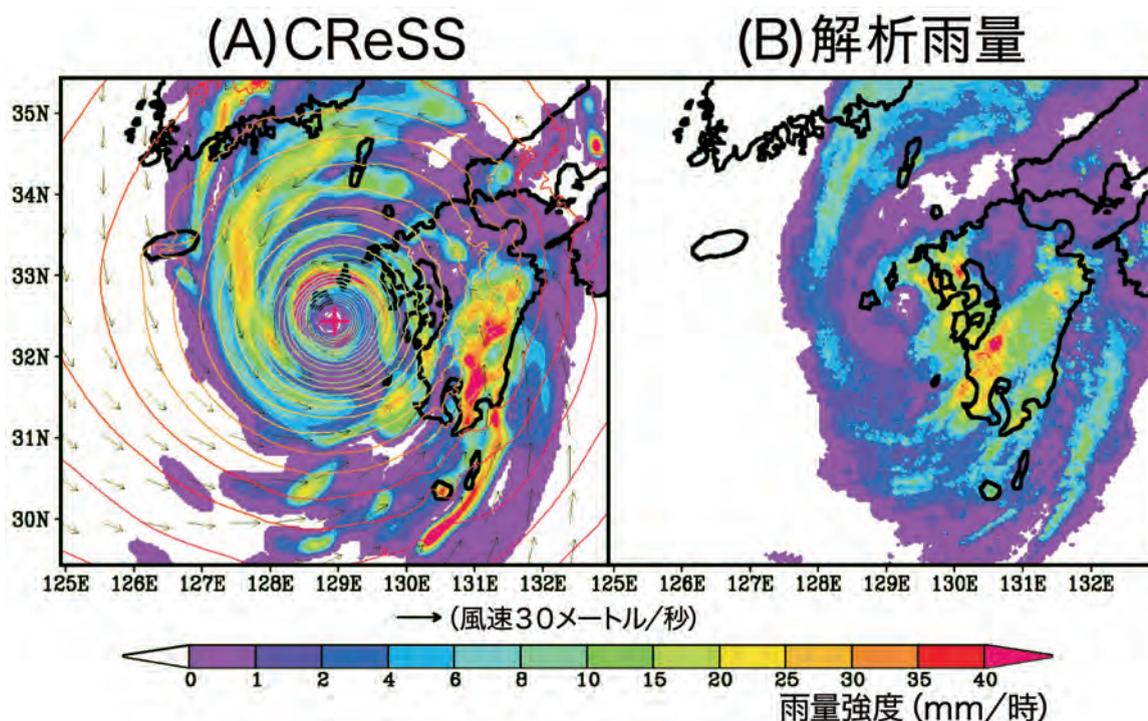
地球温暖化を含む気候変化に対して、大きな影響を及ぼすプロセスの一つに雲のプロセスがある。全球モデル・気候モデルでは、雲に関する不確定性の低減が気候予測の高精度化に不可欠である。また、雲の物理プロセスは台風や集中豪雨などの極端現象において中心的役割を担うもので、自然災害の高精度量的予測に重要である。そこでこの研究計画では先端要素モデル開発の一つとして、雲の物理プロセスの解明とその高精度なモデル化による雲解像モデルCReSSの高度化を行っている。さらにそれを用いて全球モデルの高精度化に貢献することを目的として研究を進めている。また、もう一つの重要な課題として、社会に大きなインパクトを与える台風について、雲解像モデルを用いた高解像度シミュレーションによる研究を行っている。さらに現在気候と温暖化気候において全球モデルの再現する台風について、雲解像モデルによるシミュレーションを行い、全球モデルの検証を行うとともに、温暖化気候において極端に発達する台風の強度を量的に予測する研究を行っている。

雲解像モデルを用いた台風の高解像度シミュレーション

台風は大規模災害をもたらすと同時に水資源としても重要で、その温暖化に伴う変化は社会的インパクトの大きな問題である。激しい対流で構成される台風について、その強度を量的に予測するためには、雲を解像するシミュレーションが必要である。本研究では“雲解像モデルのタイリング領域法”[※]を開発し、それを用いて台風のシミュレーションを行っている。この方法では台風の経路にそって計算領域を設定することができる。図は8月25日09時の初期値から312時間目の結果を、気象庁の解析雨量と比較したものである。初期値から13日目でも長崎県西方海上の台風の中心位置や、眼およびスパイラルバンドの分布、さらに九州の地形による降水の強化が観測とよく対応している。9月5日に中心が通過した名護では、924hPaが観測されたが、そのときの計算結果は中心気圧922hPaであった。このように雲を解像することで量的に精度よく台風の強度を予測できる。現在、極端現象予測のチームと協力し、雲解像モデルを用いて温暖化気候における台風の最大強度について研究を行っている。その結果、現在気候ではみられない強度にまで発達する台風が予測されることが示された。

[※] 雲解像モデルのタイリング領域法：

通常の領域モデルは矩形の計算領域を用いるが、計算の対象によっては矩形でない計算領域のほうが、効率よい場合がある。タイリング領域法は、計算タイルと呼ばれる矩形の小領域を、タイル張りするように対象領域に張り巡らせ、任意形状の計算領域で雲解像モデルを実行できる方法である。



図：雲解像モデルCReSS Ver.3を用いた2004年の台風18号の14日間シミュレーション。2004年8月25日09時の初期値から312時間（13日）目の結果で、図(A)はCReSSの結果の地上における降水強度（カラーレベル：mm/時）、地上気圧（等値線）、水平速度ベクトル（矢印：m/秒）、図(B)は気象庁の解析雨量（mm/時）である。

LESによる海洋微物理過程の高精度パラメタリゼーション

概要

海洋表層における諸物理過程(図1)は、高々、数mのスケールの現象であるものの、海面温度の制御を通じて大気海洋相互作用、ひいては、気候変動のメカニズムに大きく影響している。従って、海洋大循環モデルや大気海洋結合気候モデルにおいては、その効果を乱流パラメタリゼーションによって適切に評価する必要があるが、この問題は海洋物理学において未だ発展途上の段階であり、気候変動を予測する上で大きな不確定性要素として残されている。

本課題では、まず、Large Eddy Simulation (LES) [※]の手法を用いて海洋表層の諸物理過程の乱流シミュレーションを実施し、その結果に基づき既存の乱流パラメタリゼーションを検証・改良して、高精度な表層混合層モデルを開発する。次に、このバージョンアップした乱流パラメタリゼーションモデルを海洋大循環モデルや大気海洋結合気候モデルに組み込み、垂表層の水塊形成メカニズムや表層混合層の経年変動の予報を行う。最後に、この計算結果の妥当性を海洋観測と比較することで検証し、海洋物理学において長年、未解決のまま残されてきた表層混合層の不確定性を解消することで、地球温暖化をはじめとする長期気候変動予測の格段の高精度化を実現させる。

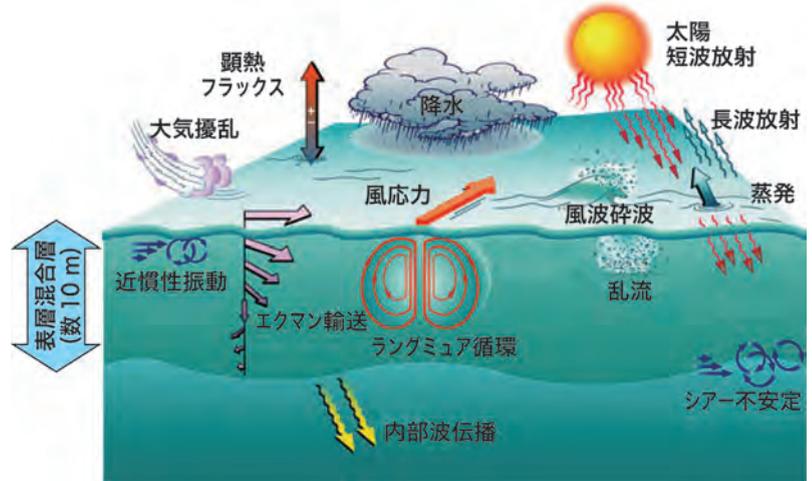


図1 大気・海洋の境界近くで発生する様々な物理過程の概念図

[※] LES (Large Eddy Simulation) :

乱流現象を直接再現する計算流体力学の手法の一つ。計算格子よりも小さなスケールの乱流渦変動については物理モデルを用いて模擬することで、計算格子で捉えられる乱流渦変動のみを直接数値的に計算する。こうすることで、乱流の全スケールを解像するDNS(Direct Numerical Simulation)と呼ばれる手法よりも粗い計算格子での乱流のシミュレーションを可能とする。従来、気象学や工学の分野で使用されていたものの、世界的にみても、海洋学、特に、海洋表層混合層の研究に関しては使用されてから10年程度しか経っておらず、特に、我が国での使用はほとんど皆無である。

LESによるシミュレーション

本課題がこれまでに実施した LES シミュレーションの一例として、台風やハリケーンの通過時を想定した非常に強い風に対する海洋表層混合層の応答の様子を示す(図2a)。上方の暖かい水と下方の冷たい水が混ざって混合層が次第に厚くなるとともに、表層付近の水温が低下していく過程が詳細に再現されている。

次に、従来の乱流パラメタリゼーションを組み込んだ表層混合層モデルによる計算結果とこのLESによる計算結果とを比較してみる(図2b, c)。従来の乱流モデルでは、混合層の深まりや海面水温の低下が LES の実験結果に比べ制限されてしまっている。これに対して、LES の計算結果に基づいて乱流の表現を修正した改良版乱流モデルでは、混合層の発達過程の再現性が著しく向上していることがわかる(図2d)。

今後は、さらに様々な条件下でLES実験を行い、その結果に基づき既存の乱流パラメタリゼーションの検証・改良を進めるとともに、このバージョンアップした乱流モデルを海洋大循環モデルや大気海洋結合気候モデルに組み込むことで、そのパフォーマンスの向上を確認していく予定である。

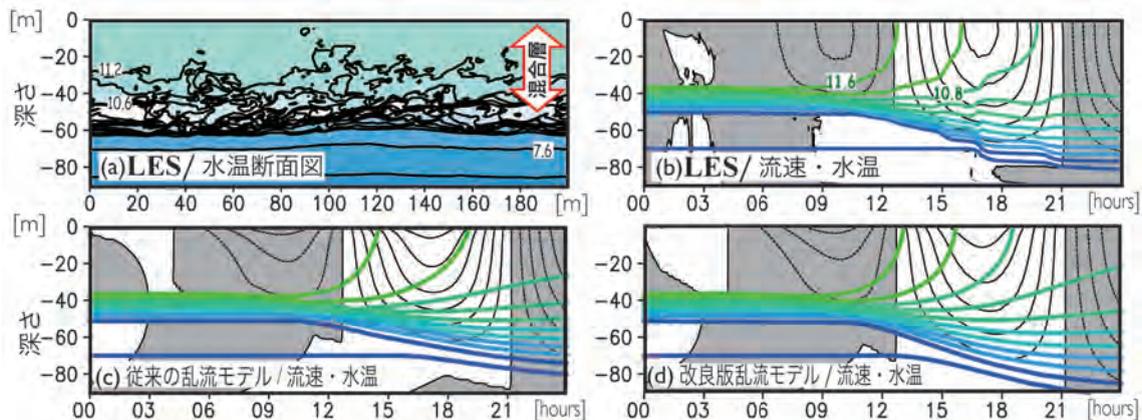


図2 (a) LESによるシミュレーション結果(水温場の瞬間断面図、等値線は 0.3°C 間隔)、(b-d) LESによる計算結果と各種の乱流パラメタリゼーションを組み込んだ表層混合層モデルによる計算結果との比較。陰影は東西流速(0.2m/s 間隔)、青緑線は水温(0.4°C 間隔)を示す。

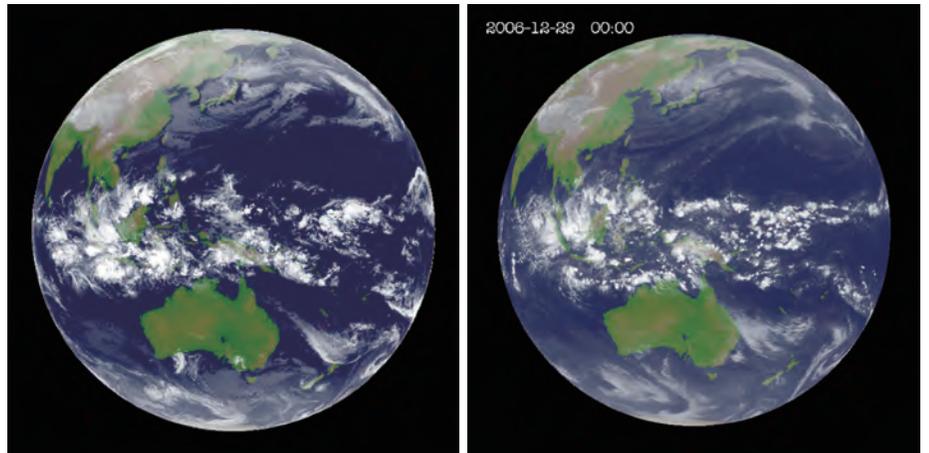
熱帯の雲シミュレーションの最新の到達点

熱帯の雲は地球環境の決定に大きな役割を果たしている。熱帯で発生する雲は大気大循環の駆動源となっており、地球全体の気候の形成に大きな影響を及ぼしている。熱帯の雲は組織化して、水平スケール10kmから数1000kmにおよぶ積乱雲、積雲クラスター等の階層構造を形成し、大陸スケールで季節変動するモンスーンの原動力となっている。熱帯の雲集団の中から熱帯低気圧・台風が生まれ、世界各地に大きな災害をもたらす。ときには梅雨期の豪雨のように、日本付近にも直接影響を及ぼすこともある。

地球温暖化予測に使われてきた今までの気候モデルは、水平解像度が100km程度であるため熱帯の雲を直接解像することはできなかった。熱帯の対流雲を表現するために「積雲パラメタリゼーション」という半経験的な手法に頼らざるを得ず、これが、気候予測の不確定性の大きな要因となっている。このような困難を打破するために、われわれは水平格子間隔を数kmとする全球雲解像モデルNICAMを開発した。新しいモデルでは、熱帯の雲をパラメタリゼーションに頼ることなく直接解像することができる。

NICAMにより、熱帯の雲をまるで人工衛星の雲画像のように忠実に再現することが可能になった。個々の積乱雲から積雲クラスター、さらに従来の気候モデルでは再現が難しかったマッデン・ジュリアン振動に伴う巨大雲集団までの熱帯の雲の階層構造を、ほぼ現実に対応したシミュレーションが可能になった。また、熱帯の雲集団から熱帯低気圧が発生する事例を現実とほぼ同じタイミングで再現することができるようになった。

NICAMは地球温暖化予測の不確定性の低減に貢献することが期待される。NICAMにより、将来の地球温暖化時の雲や降水のふるまいについて、あるいは将来の台風の発生数や強度について、今までの気候モデルよりもより信頼性の高い予測結果を得られることが期待される。



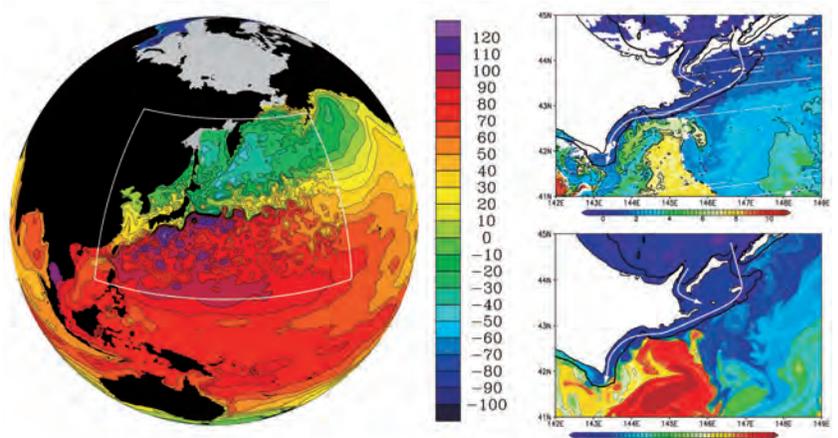
(左) ひまわり6号 (MTSAT-1R) の雲画像、(右) 全球雲解像モデル(NICAM)。
画像提供：(c)JAMSTEC

気候変動予測における海洋モデルの高精度化

海洋が気候の状態形成や変動にとって重要なことは言うまでもないが、従来の気候モデルでは強い海流やモード水などの海洋構造の表現が不十分であり、気候変動予測の不確定性要因のひとつになっている。そうした問題のうちの多くは海洋モデルの水平解像度を数kmにまで高めることで解決可能だが、それを全球に適用して気候変動予測を行うことは、十年程度先の計算機性能を見越しても不可能である。本課題では、ターゲット領域の重点的高解像度化とパラメタリゼーションの高度化を組み合わせることで全球海洋モデルを高精度化し、それが気候モデルの性能向上に及ぼすインパクトを実証することを目的としている。

開発された海洋モデルでは、パラメタリゼーションの高度化により様々な平均的海洋構造の再現性が全球的に向上したことに加え、ターゲット領域とした日本近海では平均的構造と変動性の両面から顕著な改善が見られる。例えば、日本南岸から東方へ流れる黒潮については、平均的な流路・流量はもちろん、大蛇行の生成・消滅や渦活動といった変動性もきわめて現実的に再現される。他にも、十年規模の気候変動にとって重要なモード水、日本沿岸の水産環境や太平洋中層水にとって重要な親潮など、従来の気候モデルでは表現が不十分であった様々な現象が現実的に再現される。

本課題によって開発される海洋モデルは、次世代の気候モデルによる将来変動予測の信頼性向上に寄与するのはもちろんのこと、沿岸海況や水産資源への影響評価を行う上でも有用なものになると期待される。こうした応用においては海洋モデルのさらなる局所的高解像度化も求められるが、想定される計算機性能向上の範囲内でそれらの要求に応え得るであろう。



(左) 日本近海(白枠内)を高解像度化した海洋モデルでシミュレートされた海水位(等値線は海面付近の海流の流線に相当)。(右上)人工衛星観測による海面水温(白矢印は低温な沿岸親潮の流路を示す)、(右下)モデルによる再現。

主要予測モデルの概要

21世紀気候変動予測革新プログラムでは、IPCC 第5次評価報告書や、気候変動に伴う影響評価研究に貢献するため、従来の気候変動予測モデルを改良し、より高精度・より高解像度な気候変動予測を行う。

各チームごとに、それぞれの目的に応じたモデルの開発を進めている。主な予測モデルの概要は以下の通り。

チーム	主目的	モデル種別	解像度		特色	主な担当機関
			大気	海洋		
1 長期	ポスト京都の安定化目標選定のためシナリオによる300年後までの予測	地球システム統合モデル (大気・炭素循環・陸面・化学・海洋)	280km	100km	全球の気候変化中心。炭素循環の変化、植生帯の移動も扱う	海洋研究開発機構 国立環境研究所 東京大学大気海洋研究所
	対流雲を直接計算、熱帯域の気象を正しく表わす(世界唯一)	全球雲解像モデル (大気・陸面モデル、海面温度指定)	14km 【7km】	—	世界初、唯一の全球雲解像モデルNICAM	海洋研究開発機構 東京大学大気海洋研究所
2 近未来	2030年までの近未来(シナリオによる差なし)の詳しい予測	高解像度大気・海洋結合モデル (大気・陸面・海洋)	50km	20km	黒潮のような海流の変化も予測。関東北陸等の地域差表現	東京大学大気海洋研究所 国立環境研究所 海洋研究開発機構
3 極端現象	極端な気象(台風や集中豪雨など)について、近未来と21世紀末における変化を予測	超高解像度大気モデル (大気・陸面モデル、海面温度指定)	20km	—	台風、梅雨前線、集中豪雨などをかなり正しく表現	気象庁気象研究所 海洋研究開発機構
		同上日本周辺(領域モデル)	5km 【2kmと1km】			
(参考) 人・自然・地球共生プロジェクトで利用した大気海洋結合モデル			110～280km	20～140km		

*なお、解像度での【】内の値は、扱う場合もあることを示す。

地球シミュレータの更新について

海洋研究開発機構が所有する地球シミュレータは、2002年の運用開始から2年半の間、TOP500スーパーコンピュータランキングにおいて1位に認定され、地球科学分野で利用できるスーパーコンピュータでは、今でも実質的に世界最高性能を維持している。文部科学省では、この地球シミュレータを最大限に活用した人・自然・地球共生プロジェクトを2007年3月まで実施し、IPCC第4次評価報告書に貢献した。

地球シミュレータの運用開始から7年が経過し、構成機器の先端的機能性を維持するため、新たなシステムに更新し、2009年3月から運用を開始した。このシステム更新により、表1に示すように実効性能が向上するため、地球温暖化などの地球科学分野の研究がさらに加速されることが期待されている。

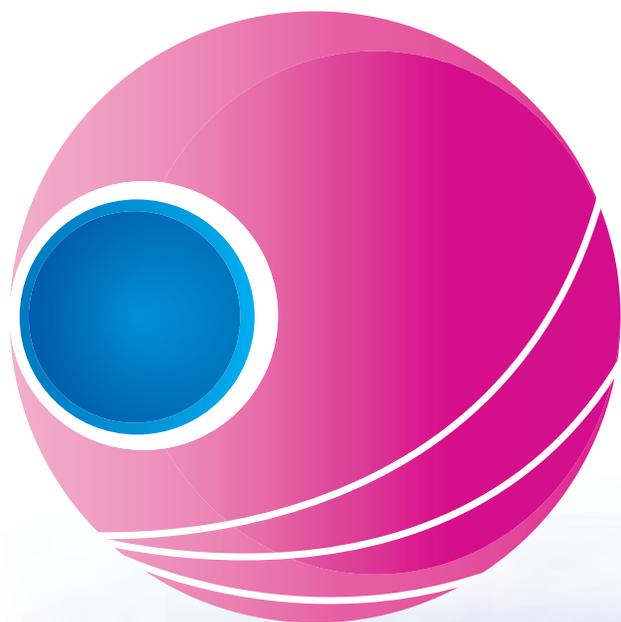
21世紀気候変動予測革新プログラムでは、これまで地球シミュレータを利用してきたが、システム更新に伴い、引き続き、地球シミュレータを活用し、IPCC第5次評価報告書に貢献していく。



更新後の地球シミュレータ(2009年3月稼働開始)

表1 システム概要

方式：ベクトル型プロセッサアーキテクチャ(共有メモリ型マルチノード)
 ピーク性能：131テラフロップス(更新前：40テラフロップス)
 アプリケーション実効性能：更新前の2倍(予測)
 主記憶容量：20テラバイト(更新前：10テラバイト)



KAKUSHIN

Innovative Program of Climate Change Projection for the 21st Century

文部科学省研究開発局環境エネルギー課
〒100-8959 東京都千代田区霞が関 3-2-2
URL: <http://www.mext.go.jp/>

<お問い合わせ先>

海洋研究開発機構

〒236-0001

神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

E-mail: KAKUSHIN@jamstec.go.jp

URL: <http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/>