

気候変動および気象予測と 超大規模・超高速シミュレーション

Toward Seamless Simulations with High Performance Computing

(独)海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

高橋 桂子

1. はじめに

昨今、地球温暖化など気候変化に伴って想定される様々な環境変化に対して、どのような緩和策や適応策をとるべきかを議論する機会が増えてきた。地球温暖化はすでに事実であるとの2009年7月米国ホワイトハウスでの“Global Climate Change Impacts in the United States”(A State of Knowledge Report from the U.S. Global Change Research Program)の報告、気候変動に適応するための政策と行動についての発表(2009年5月)、欧州連合(EU)の今後の気候変動政策についての勧告(2009年2月)など記憶に新しい。CO₂削減を含め、世界各国から地球温暖化にどう向き合うかについて、多くの発表がなされていることも周知のとおりである。第4次IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変化に関する政府間パネル)レポート[1]は、地球温暖化の原因が人為的原因であることを指摘し、100年先に地球がどうなっている可能性があるか、そのありようを示した。

全地球的な気候変化(Climate Change)するトレンド(地球温暖化など)を“気候変化”とよび、地球をシステムとみなしたときに、地球システムを形成する様々な構成要素(大気、海洋、陸、海氷など)の相互作用によって自然変動として生じる“気候変動(Climate Variability)”とを区別する重要性が指摘されている[2]。例えば、“気候変動”

現象としてよく知られているエルニーニョや熱帯、亜熱帯インド洋ダイポール現象[3]は、地球の様々な地域に、干ばつや豪雨などの異常気象をもたらすことがすでに指摘されている。また、これらの“気候変動”現象は、地球温暖化の影響をすでに受けつつあり、熱帯、亜熱帯ダイポールモード現象やエルニーニョ現象等の生起のようすが従来に比較して変化してきているとの指摘がある[4,5]。

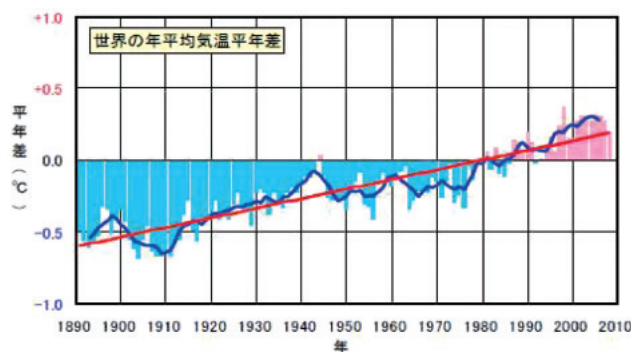
IPCCレポートでは、100年後の地球のすがたについては言及しているものの、地球温暖化(つまり“気候変化”)が進行するにつれて、“気候変動”自体がどのような影響を受けるか、あるいは“気候変動”が地域の気象や気候にどのような影響を与えるかについては、今後の研究課題としている。この課題に関連して、世界気象機関(WMO)は、2009年8月31日~9月4日にジュネーブで開催された第3回世界気候会議(WCC-3)においては、WMOと他の国連機関、及び各国政府の協力により、政策決定のための気候予測(季節予報から10年規模の予測)をテーマとし、気候情報の利活用を通じた気候変動への適応や気候リスク管理の向上について議論が行われ、その結果、気候サービスの提供者と水資源管理、農業等分野における利用者間の連携を通して、利用者が意思決定に活用しやすい気候情報の提供を推進する「気候サービスのための世界的枠組み」を構築し、その枠組みの構築と実施に向けた検討を行うタスクフォ

ースの設置を決定する「ハイレベル宣言」を採択した [6]。

この採択は、私たちの身の周りの将来環境についてどのように考えてゆくか、と深い関係がある。IPCCレポートでは言及が難しかった地球温暖化（つまり、“気候変化”）が進行するにつれて、“気候変動”がどのような影響を受けるか、さらに私たちが暮らす地域の気象や気候の変化についての知見を積み上げ、それらの成果を直接ユーザーが利用できるようにするための研究開発を積極的に展開しようとするものである。過去100年間で地球全体の平均気温が約0.7度上昇した事実（図1）が、季節から年々変動に現れる4-5度の気候変動

の振幅幅（図2）に比べて小さいことを考えあわせると、“気候変化”である温暖化トレンドが進む中で、エルニーニョなどの気候変動がどう影響を受けるのか、またその影響が私たちの周囲の環境にどのような変化を与えるのかを予測し、評価し、その結果を受けて私たちがどのように能動的に行動するかが、今後の適応策にはなくてはならないものとなる。

100年後の地球のすがた、非常にスケールの大きな気候変化のトレンドから、私たちの身近な環境への影響を推し量ることは具体的なイメージをもつことが難しく、無理があるのが現状である。本稿では、この気候変化である温暖化のトレンドのなかで、季節から



世界の年平均気温の変化（1891～2008年）
観測機器によって得られた資料にもとづく、1891年以後の世界全体の年平均気温の推移を示す。棒グラフは各年の平均気温の平年差（平年値との差）を示している。太線（青）は平年差の5年移動平均を示し、直線（赤）は平年差の長期的傾向を直線として表示したものである。平年値は1971～2000年の30年平均値。
出典：気象庁、2009

図1 気象庁から発表されている過去100年間の地球全体の平均気温の推移
赤線は、温暖化のトレンドを表す。

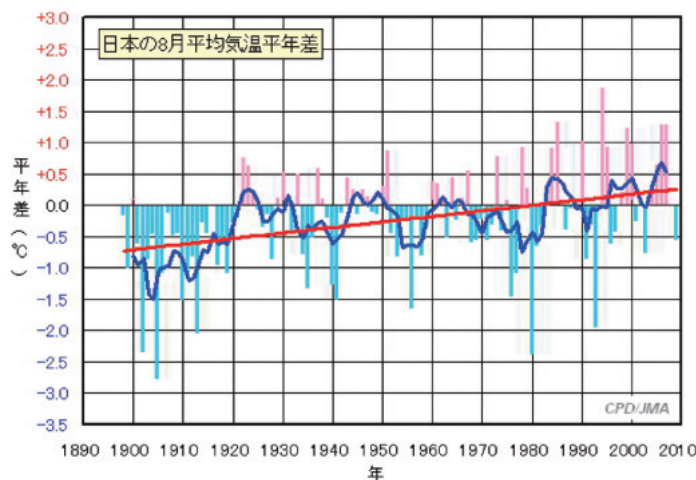


図2 気象庁から発表されている過去100年間の日本の8月平均気温平年差の推移

年々変動として現れる気候変動を予測し、さらに推し進めて、身の周りに起こる環境への影響に対して、私たちがとるべき行動指針を決定するために利用することができる「気候サービスのための世界的枠組み」へ密着した予測モデルの研究開発について紹介する。

2. マルチスケール・マルチフィジックス現象をとらえ予測する挑戦

これまで全球を対象とするような長い時間、加えて大きな空間を対象とする気候変化を対象とする予測モデルは、対象とする時間および空間スケールが大きく異なることから、天気予報に用いられる予測モデルとは異なるモデルが用いられてきた。特に、1日から1週間という気象を扱う際には、豪雨など降雨過程に直接関係する積雲対流は、大気対流を直接扱うことが求められるため、空間の水平スケールと鉛直スケールの差がない。これに対して、温暖化などの“気候変化”を予測するモデルは、水平スケールが鉛直スケールの現象より卓越していることから静水圧近似という近似を使用し、非常によく再現性を得ることが知られている。よって、気象と気候変動予測には、現象の時間、空間スケールにより異なるモデルを用いてきた(図3)。それらの中間のスケールを予測対象とする気候変動モデルとして、現時点では静水圧近似を用いたモデルを用いることが多い。

気候変化予想や気候変動予測と気象予測において異なるモデルを用いてきた理由のひとつは、計算機資源の問題である。2002年3月に稼働を開始した地球シミュレータは、その目的のひとつとして、従来の気候変動や気候変化の予測で用いられてきた水平数100kmの解像度を約10km程度とし、問題規模を約1000倍大きくして、例えば台風の特徴的な構造をより詳細にとらえ、予測精度を向上させることができるようにということを目標として掲げた。しかしながら、気象予測において重要な役割を果たす雲を解像するような数100m単位水平解像度での気候変動予測や気候変化予測において求められる長期シミュレーションは、高速化の工夫をした上に地球シミュレータをもってしても実現はできていない。雲の生成単位である数100m単位の解像度で、かつ長期の気候変動予測シミュレーションが可能となれば、温暖化が進むことを仮定して、気候変動現象であるエルニーニョやインド洋ダイポール現象がどのように影響

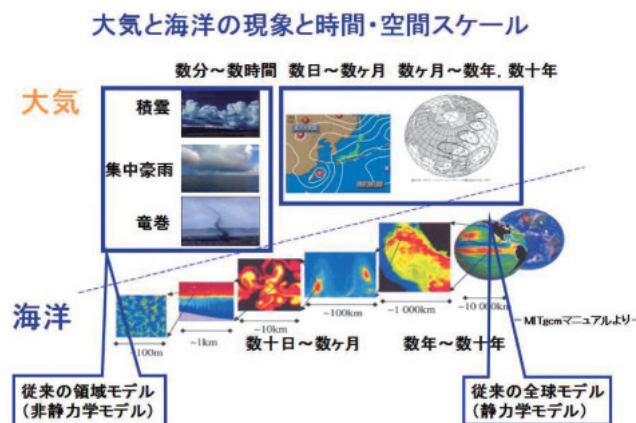


図3 大気と海洋の様々な時間、空間スケールの模式図

大気と海洋の現象では、時間と空間スケールの関係がほぼ線形にあることが知られている。大気現象を例にとると、積雲の成り立ちや集中豪雨、竜巻などは、発生から収束までが数分から数時間の時間スケールであり、局所的な空間スケールである。それに対し、低気圧や高気圧の一生はそれより長い数日から10日程度で数1000kmの空間スケールである。

を受けるのか、各地域の気象や気候の変動に大きな影響を与えるかについて、現在よりもさらに詳しい議論が可能である。

このような観点の学術的な歴史は古く、気象予測を延長して季節変動など気候変動予測を行うことがどうして困難であるのか、などの議論にさかのぼる。この難しい問題があることを認めたくえで、私たちの身近な気象予測と気候変動や気候変化の予測とをどのように結び付けることが可能なのかについて議論することは、学術的な意義だけでなく、私たちに直接影響を与え、行動する際に必要な今後の適応を考える上で必要不可欠な社会的に高い要請に応える非常に大きな意味を持つと同時に、気象予測、気候変動予測におけるグランドチャレンジと位置付けることができる。

地球シミュレータセンターでは、地球シミュレータ稼働当初から、上に述べてきたような気象と気候変動予測を結びつけるための、複数の時間、空間スケールをシームレスに扱えるようなシミュレーションモデルは、どのようなモデルである必要があるのか、また最適であるかについての検討を開始した。

まず、地球シミュレータを最大限に活用した場合、予測モデルはどこまで解像度を高く

することができ、そのモデルはどの程度の現象を再現、予測できるかについての研究開発を推進してきた。この目的を果たすために開発されたものが大気海洋結合モデル：Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) である。

大気海洋結合モデル (MSSG) の特徴、特に大気コンポーネントMSSG-Aの特徴として挙げられる点は、Large Eddy Simulationモデルという数cmから数kmのスケールを扱うことが可能な乱流モデルを採用している点、加えて、雲粒の粒子を扱うことができる雲微物理モデルを採用している点、および大気コンポーネント (MSSG-A)、海洋コンポーネント (MSSG-O) とともに同じYin-Yangグリッドという新しい座標系を採用して 大気海洋相互作用をモデル化する際の物理量の保存性の保証と超高速シミュレーションが可能である点を挙げる事ができる。これらのモデルを採用したことで、図4に示すような全球スケールから都市スケールまでの現象をシミュレーションの対象にすることができる。本章では、それぞれのスケールに焦点をあて、MSSGを用いて実施したいくつかの事例シミュレーションの結果を以下に紹介する。

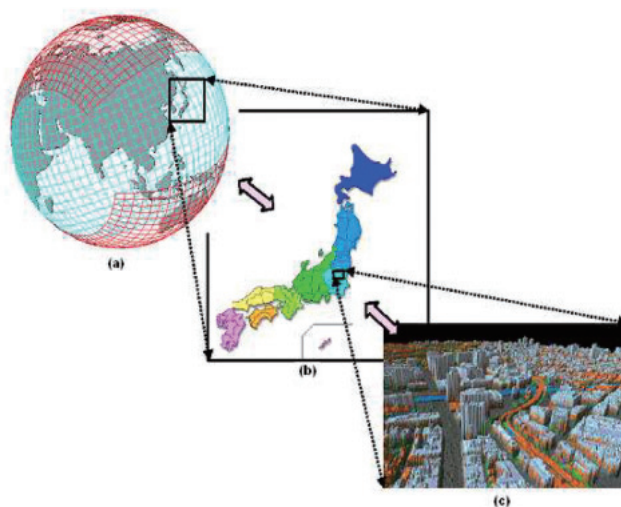


図4 MSSGが対象とするスケールの模式図

MSSGは、全球(a)から、領域スケール(b)、都市スケール(c)をネスティング手法を用いてシームレスに異なるスケールを繋げたシミュレーションが可能な大気海洋結合モデルである。

まず、大気コンポーネントMSSG-Aを使用した全球シミュレーションの結果を紹介する。図5に示すシミュレーション結果は、水平解像度1.9km、鉛直層としては30kmまでの高度を不等間隔で32層に設定した総計約50億グリッドポイント上のシミュレーションの結果である。この規模の3次元全球大気シミュレーションは世界的にも前例がない超大規模なシミュレーションであり、現実的な地形を設定して、全球大気全体の特長と地球シミュレータ上での計算の限界を同定することを目的に行ったものである。このシミュレーション結果から、台風や前線の降雨の様子

や、前線構造に沿った降雨分布が日変化としてとらえられ、地形の影響を大きく受ける熱帯域の降水分布などがとらえられていることを確認している。

水平解像度の違いが、気象現象の再現や予測精度に大きな影響があることは、従来より指摘されてきた。MSSG-Aを用いることで、全球を計算しながら、各時刻の全球シミュレーションの結果を、詳細にシミュレーションしたい対象領域の境界条件として与え、対象領域内のグリッドを詳細にしてシミュレーションを行くことが可能である。図6は、同じ2003年台風10号に対して、日本領域をさらに

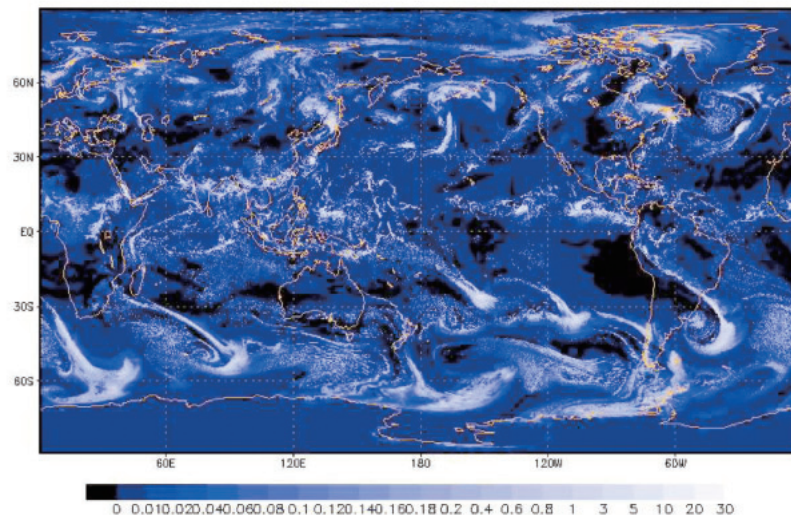


図5 水平解像度1.9km鉛直32層の全球MSSG-Aを用いたシミュレーションにおける降水分布

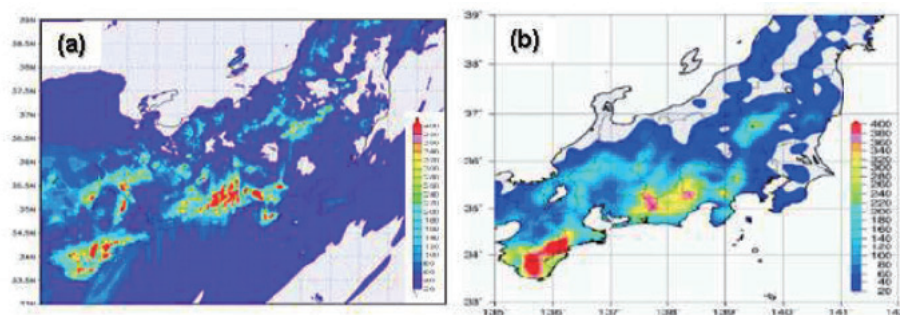


図6 2003年台風10号に対して、日本領域を水平解像度1.13km、鉛直層数32層で再現シミュレーションした結果から算出した積算降雨量と観測との比較

左図 (a) は、対象領域の水平解像度を1.13kmに設定したときのシミュレーション結果より算出した積算降水量、右図 (b) は東京管区気象台から発表されたアメダスのデータによる観測から得られた積算降水量である。

詳細に設定し、水平解像度1.13km、鉛直層数32層の再現シミュレーション結果から算出した積算降雨量である。MSSG-Aによるシミュレーション結果は、観測データのアメダスの設置間隔である約17kmより詳細な情報を提供していることになる。今後、シミュレーション結果を各観測地点ごとの積算降雨状況と詳細に比較検証する必要があるが、水平解像度を詳細にすることにより、地域に密着した地形性降雨もより詳細に再現が可能であることを示唆している。

海洋コンポーネントMSSG-Oにおいても、大気の状態を境界値データとして与えることで、全球の海洋や領域に焦点をあてたシミュレーションが可能である。ここでは、北太平洋の領域に対するシミュレーション結果を紹

介する。格子間隔は水平方向に約2.73km、鉛直層数は水深5kmの深さまでを40層に設定してシミュレーションを実行した。16年間シミュレーションした後の、水深5mの温度(図7上図)と100mの深さにおける流速の水平分布(図7下図)を示す。シミュレーションの流速の初期値は0 m/sであるが、風応力で海表面が駆動され、さらにGeostrophicバランスが形成され、赤道反流、黒潮、親潮などいくつかの特徴的な海流が再現されている。北緯30°以上は、16年の積分期間では、十分に表現されないことが知られていることから、日本に沿って流れる黒潮流域は、銚子より北で西向きに流れの方向を変えておりオーバーシュートが見られるが、妥当な海盆スケールの構造や詳細な渦構造が再現されている。

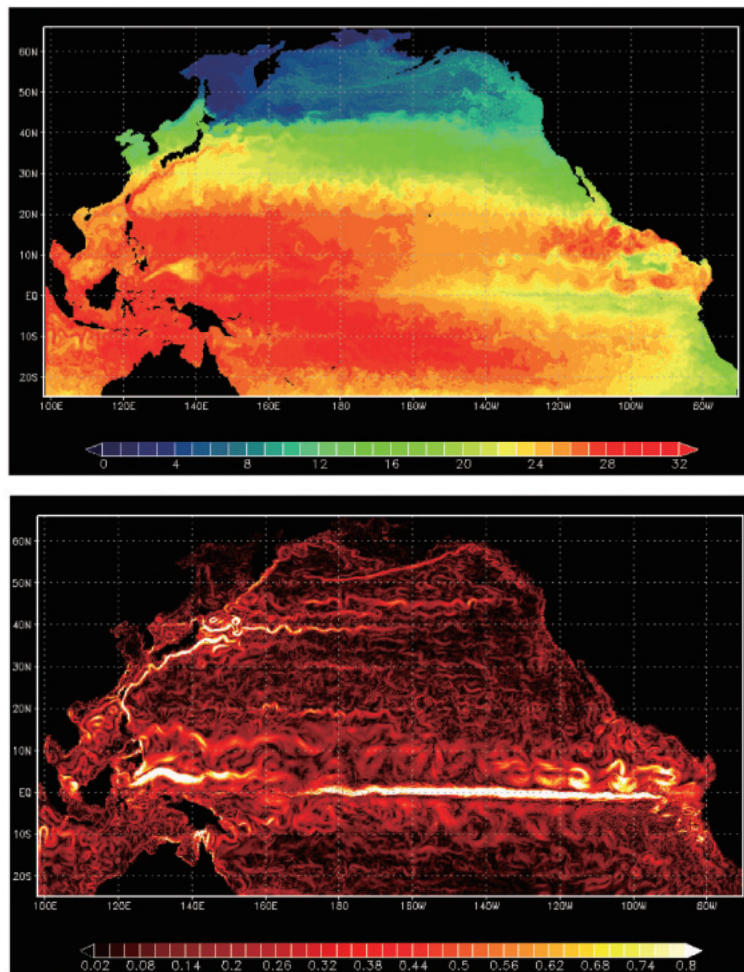


図7 MSSG-Oにより再現された北太平洋における水温と流れの場

図8は、日本領域において、大気海洋結合モデルMSSGを使用し、大気と海洋をともに水平2.78km、鉛直64層で設定した2003年台風10号の進路と強度を120時間（5日間）予測シミュレーションした結果である。台風の特徴である目の構造や豪雨をもたらすようなレイnbndの構造をよく再現している。図9は、同じく2003年台風10号の進路と強度の予測結果である。大気と海洋の相互作用は、台風の強度予測に不可欠である。海洋は、台風に熱的エネルギーを供給するだけでなく、熱的供給によって発達する台風の強い風からも水平方向、鉛直方向に運動エネルギーを受けて、流れ自体が変化する。これらのことから、台風の強度、台風の風の強さや降雨量の予測には、大気と海洋の相互作用を考慮することが重要であると広く認識されており、大気海洋結合モデルによる予測は、さらに精度のよい予測シミュレーションを可能にするものと期待されている。

MSSGによって予測シミュレーションした結果である図9下図は、台風の眼を含む特徴的な構造が、時間経過とともに衰退し変化する様子が、シミュレーションの降雨分布からとらえられていることがわかる。また、海洋表面温度変化の時系列応答から、台風の進路の東側後方の温度が、台風の移動に伴ってよ

り低い温度へ変化していることがわかる。これは、台風の風からの運動量の伝搬によって、海洋表面の流れの場が変化し発散する流れの傾向となり、より深い海洋の温度の低い海水が表面に現れたことによるものである。これらの温度変化は衛星観測からもとらえられており、海表面の温度は、台風への熱的供給源であることから、台風と海洋との相互作用は、台風の強度（風と降雨）に影響を与えると同時に予測精度へ影響を与えることを示唆している。

このような高解像度の大気海洋結合モデルの予測シミュレーションでは、これまでの観測データからは困難であった台風の発生や発達、維持、消滅に関する科学的な解明が進むことが期待できる。また、あらたに、高解像度における大気海洋相互作用をどのようにモデル化をなすべきか、あるいは予測精度の向上にどれほどのインパクトがあるのか、などについての新たなテーマに取り組む必要性があることも明記しなければならない。

次に、都市スケールでのシミュレーションをMSSG-Aを用いて実行した結果を示す。東京の都心のある街区（有楽町周辺域：図10上段）を代表例として、土地利用データ、道路、交通量、人口排熱等のデータを整備し、気象データをシミュレーション対象領域の境

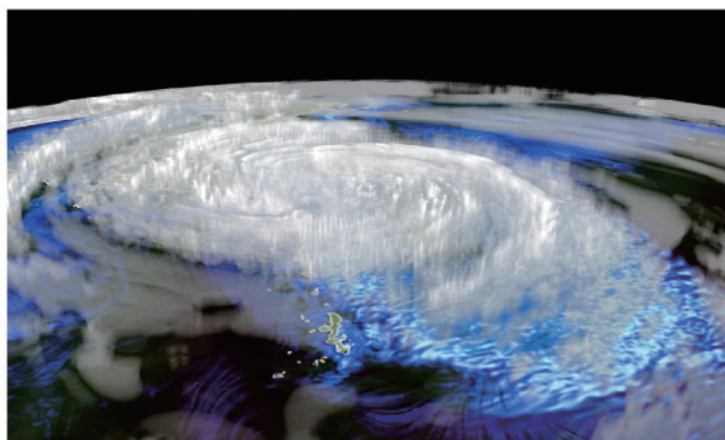


図8 2003年台風10号のシミュレーション結果
沖縄上空の台風の特徴的な構造

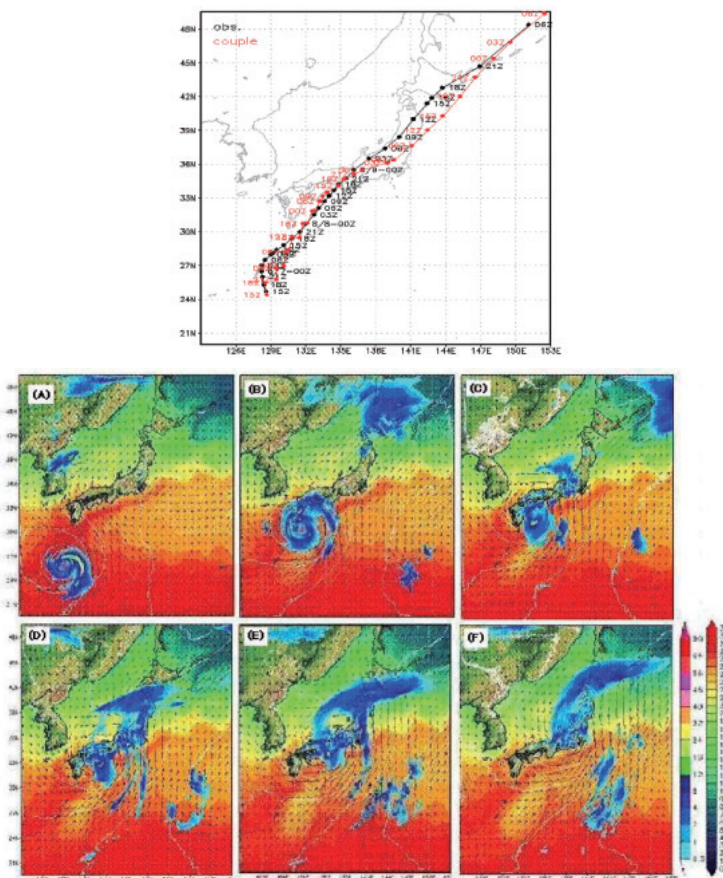


図9 大気海洋結合モデルMSSGによる2003年台風10号の8月6日9時からの120時間予測シミュレーション結果

上図は、2003年台風10号の進路を示す。黒実線は気象庁から発表されたベストトラックを示し、赤実線は予測シミュレーションの結果である。下図は、台風による強い風に応答する3時間ごとの海洋表面温度の変化と降雨分布（青色の分布）、風速ベクトル分布の変化を示す。

界値として与えた水平、鉛直ともに5mの解像度でのシミュレーション結果である。このシミュレーションは、ヒートアイランドなどに代表される都市域における熱的循環を詳細に再現し、都市域の蓄熱効果や今後のクーリング環境を効果的に選定するための基礎情報に利用することが可能である。図10中、下段は、2005年8月5日15時から10分間の変化をシミュレーションした結果のうち、異なる高さでの温度分布のスナップショットである。道路上やビルの壁面で熱せられた大気塊、地表面から暖められた大気がプルームとなって上昇する様子や、建物形状による風の非定常な流れのようすなどがダイナミックに再現されている。高さ7.5m、12.5mに分布する暖

められた40度を超える大気塊は、一定の場所に留まることはなく、揺らぎながら剥離を伴って移流する。32.5m、102.5mの温度分布において、建物に付着するような高温ポイントは、人工排熱として与えた境界条件による大気の高温化である。高温の大気塊の分布やその移流による変化が都市のヒートアイランドにどのような影響を及ぼすかについては、さらに広域のシミュレーションの統計的な解析が必要である。

図11は、ある鉛直断面の流れの様子と温度分布のスナップショットを示している。ビルの風上、風下には渦が生成され、そこで比較的温度の高い大気が渦を形成している。ビルより高い上空での大気は、ビルで囲まれる比

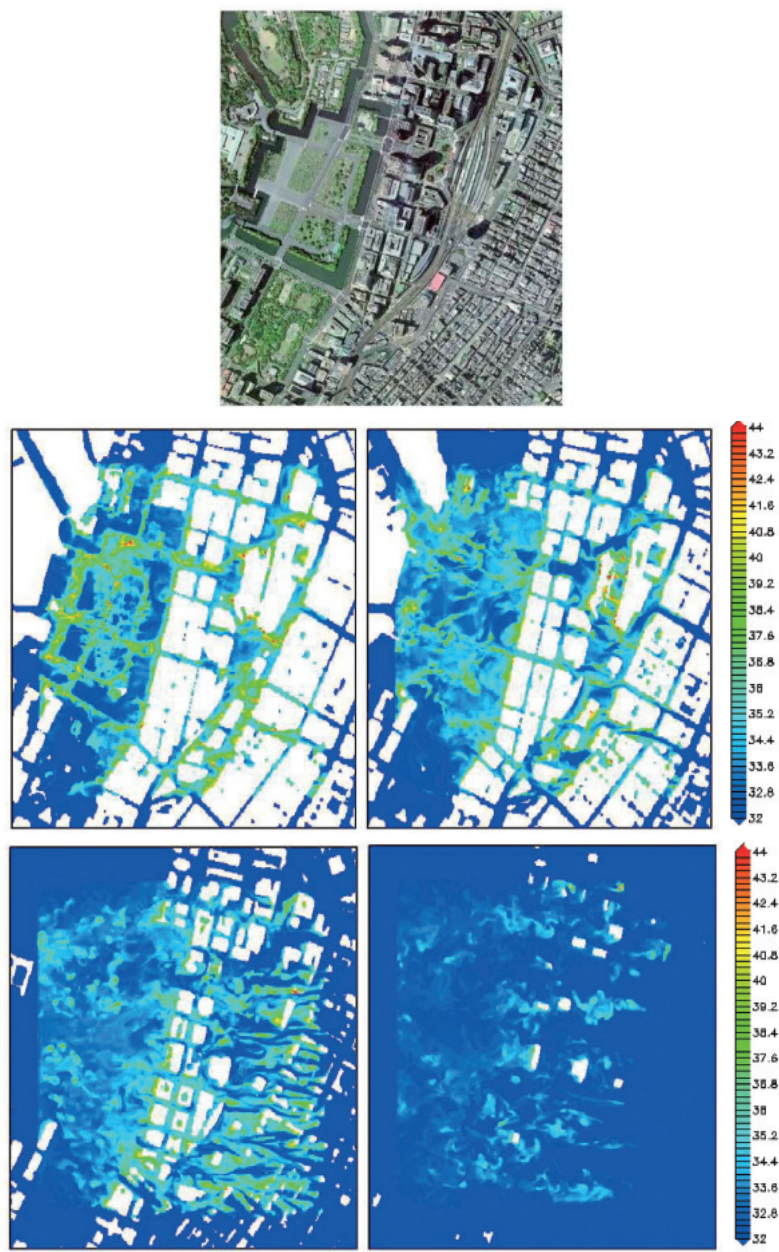


図10 2005年8月5日15時から10分間のシミュレーションを行った10分後の結果
 上段図は、対象とした有楽町域の航空写真。高さ7.5m (中段左図)、12.5m (中段右図)、32.5m (下
 段左図)、102.5m(下段右図)における温度分布の15時10分におけるスナップショット。

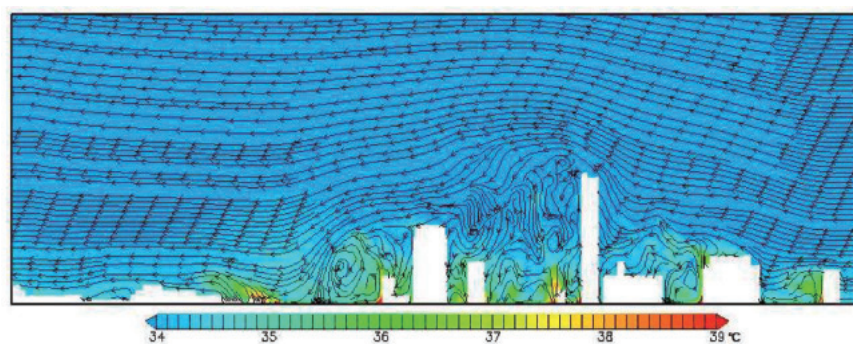


図11 鉛直断面の流れの様子と温度分布のスナップショット

較的低い大気の流れとは一線を描いて滑らかに流れており、ちょうど低層の温かい大気をパッキングするような状況がとらえられている。このような、ビルとビルに囲まれた大気の流れと、ビルより上空の大気の流れの相互作用は、都市域において、どのように熱エネルギーが蓄積されるかを理解する上で重要であり、そのメカニズムをとらえることが、今後、効果的に都市をクーリングさせる手法の検討とその選択を裏付けるための重要な情報として活用されることが期待できる。

3. 気象・気候変動予測のための超大規模計算と高速計算

大気コンポーネント (MSSG-A)、海洋コンポーネント (MSSG-O)、大気海洋結合モデル (MSSG) それぞれに対して、地球シミュレータ上での計算性能を測定した結果を表1に示す。地球シミュレータがベクトルマシンである特徴を活かし、ループ長を確保する戦略が計算性能最適化に活かされベクトル長が保持されるとともに、徹底的なベクトル化を行った結果が、高いベクトル化率に反映されている。また、ピーク性能比は、大気コンポーネントMSSG-Aでは、約60%を示し、実アプリケーションとしての地球シミュレータの性能を最大限に活用可能な性能を達成した。

MSSG-Oにおけるピーク性能比は、MSSG-Oのみに用いているポアソンソルバーの性能を反映している。しかしながら、並

列化にあまり適さないと一般的に称されるポアソンソルバーに対して、MSSG-Oでは非常に高い計算性能を達成した。本稿では、本ポアソンソルバーについての計算性能最適化に関する詳細は割愛するが、AMGCG法の計算効率の向上が本性能の達成に非常に大きく貢献していることを付記しておく。

大気海洋結合モデルMSSGにおいては、海洋コンポーネントMSSG-Oにおける性能の影響を受けてはいるが、結合モデルとしては世界的にも非常に高い計算性能を達成した。MSSG、MSSG-A、MSSG-Oにおける並列化率のいずれもが、99.99%以上を実現しており、この性能は、理論的には、地球シミュレータの約60倍の大きさの計算機まで、計算効率率が線形に向上することに相当する。また、ピーク性能比、加速率、並列化効率も実アプリケーションとしての地球シミュレータの性能を限界まで使用していると判断できる。

4. 今後の展開

“気候変化”である地球温暖化に伴い、エルニーニョ、インド洋ダイポールなどの“気候変動”が従来の統計的予測ではとらえられないような変化をきたしつつある現在、台風などの局所的な災害をもたらす気象現象がどのような変化を受けるかの予測は、世界の各機関が取り組んできた課題であり、さらに積極的な研究開発が世界的に展開されようとしている。このような世界的な潮流の中におい

表1 MSSG、MSSG-AおよびMSSG-Oの地球シミュレータ上での計算性能

ケース	ノード数	CPU数	格子点数	Mflops/CPU	ベクトル長	ベクトル化率	Tflops	ピーク性能比	加速率	並列化率
結合	512	4096	3662807040	4166.7	229	99.3%	17.07	52.1%	461.0	99.9973
	384	3072		4273.8	229	99.3%	13.13	53.4%	354.6	99.9968
	256	2048		4401.9	229	99.3%	9.02	55.0%	242.6	—
大気	512	4096	2713190400	4575.2	228	99.5%	18.74	57.2%	479.1	99.9983
	384	3072		4606.1	228	99.5%	14.15	57.6%	365.2	99.9969
	256	2048		4692.4	228	99.5%	9.61	58.7%	247.5	—
海洋	498	3984	4718592000	3629.3	240	99.3%	14.46	45.4%	401.3	99.994
	398	3184		3568.5	240	99.3%	11.36	44.6%	333.7	99.989
	207	1656		4234.3	240	99.3%	7.01	52.9%	188.2	—

て、地球シミュレータセンターでは、地球シミュレータの稼働当初から、地球シミュレータを最大限に活用してこそ可能な大気海洋結合モデルによる予測シミュレーションの問題規模はどれほどか、またその予測精度はどうか、についての研究開発を推進してきた。

本稿では、超並列かつ高速計算を実現した大気海洋結合モデルMSSGの概要と、台風の強度予測などの地球シミュレータ上でのみ可能な超大規模計算による予測シミュレーションの事例を示し、現時点における再現性と予測可能性の一端を紹介した。台風や豪雨、ヒートアイランド現象の解明など、私たちの生活環境に直結するような現象の解明は、雲の生成の単位である数10mから数100mのスケールと、それを取り巻く領域の気象や気候変動の変化を同時にとらえてゆく必要があり、また、気候変動の影響をも考えると、全球と領域、さらに都市スケールの気象や気候変動までを考えてゆく必要がある。これはまさしく、マルチスケールの気象、気候変動予測をシームレスに繋げることが可能なモデルによる予測が必要であることを意味している。

シームレスなシミュレーションは、高い解像度の非常に大規模なシミュレーションが必要であることと同時に、高解像度に対応した物理モデル、高精度の計算手法、高速計算を併せて開発、実現してゆく必要性があり、MSSGはそのための有望なひとつのツールとして位置づけることができる。地球シミュレータ上のMSSGは、地球シミュレータを最大限に活用した超高解像度でのシミュレーションを可能とし、地球シミュレータ稼働開始当初の目標である10km水平解像度のシミュレーションに比較すると、さらにその約100倍もの規模のシミュレーションを可能とした。しかしながら、地球シミュレータをもってしても、雲の単位のスケールの現象を解像し、さらに気象予測から気候変動予測までの複数のスケールの相互影響を扱うには非力である

ことも明らかである。今後は、さらに次世代のスーパーコンピュータが、シームレスシミュレーションの実現を担うことになる。そのための基盤的なツールは、地球シミュレータ上での知見の積み重ねから揃いつつある。

温暖化などの気候変化の影響は、地域によって差異があることが指摘されており、地球規模の温暖化が、地域の気象や気候変動現象にどのような影響を与えるかについては、未解決の課題が多い。しかしながら、私たちの身の周りの環境の変化とその備えに対して手遅れにならないように緩和策を考え、できるだけ早い段階から適応策を考えなければならない。今後のシームレスシミュレーションによる気象、気候変動現象の予測への挑戦とその進展がより重要性を増すことは必然である。

参考文献：

- [1] 気象庁資料：http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/spm.htm
- [2] 山形俊男、気候変動と食糧資源—その予測にむけて—、食糧産業文化振興会講演概要、日本食糧新聞社食品産業文化振興会、H21.3.
- [3] Saji N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, “1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean”, *Nature*, **401**, 360-363.
- [4] M. J. Mcphaden, “Evolution of the 2006-2007 El Nino: the role of intraseasonal to interannual time scale dynamics”, *Advances in Geosciences* **14**, 219-230 (2008).
- [5] K. Ashok and T. Yamagata, “The El Nino with a difference”, *Nature*, **461**, 24, 481-484 September (2009).
- [6] 気象庁資料：http://www.jma.go.jp/jma/press/0909/03a/wcc3_090903.html