

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名： 災害予測シミュレーションの高度化

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

高橋 桂子 ((独)海洋研究開発機構地球シミュレータセンター プログラムディレクター)

主たる共同研究者

小森 悟 (京都大学大学院工学研究科 教授)

矢部 孝 (東京工業大学大学院理工学研究科 教授)

足永 靖信 (国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 室長)(~平成 21 年 3 月)

桑沢 保夫 ((独)建築研究所環境研究グループ 上席研究員)(平成 21 年 4 月~)

### 3. 研究実施概要

本チームは、当初の目的であった、マルチフィジックス・マルチスケール現象を包括的にとらえることが可能な予測シミュレーションコードを開発し、実験とシミュレーションによる双方向のフィードバックにより、予測の精度に必要な不可欠であり、かつチームが着目した新しい大気海洋相互作用モデルおよび新しい物理過程モデルの開発、新しい高精度数値計算スキームの開発を行った。

高橋グループは、超高速な、超高解像度向けの・非静力学・大気ー海洋ー陸面ー海氷結合シミュレーションコード:Multiscale Simulator for the Geornvironment (MSSG)の開発とその高度化を行った。様々なスケールでの現象を予測の対象とできるマルチスケール・マルチフィジックス気象・気候予測シミュレーションコードとなるためには、各計算スキームの精緻化、モデルの高度化、加えて計算性能の最適化が必要であることを示し、それらの各課題を克服するとともに、事例予測シミュレーションの結果を示して、その可能性と予測性能を検証した。本プロジェクトで示した結果は、各単一スケールについての結果であるが、計算機パワーが許されるならば、複数のスケールを一度に扱うことができるコードとなっており、今後、これらのスケールを一度に扱うことによって、予測精度の向上が大いに期待できる。また、これらの成果は、温暖化などの気候変化、あるいはエルニーニョなどの気候変動の状況下で、領域および都市スケールなど身近な環境における気象・気候変動がどのように影響を与えるのか、という社会からの強い要請にこたえることにつながる。

小森グループは、大気中の  $\text{CO}_2$  濃度の上昇に伴う地球温暖化や台風の勢力・進路を精度良く予測するためには、地球の表面積の約 7 割を占める海洋と大気間、つまり風波気液界面を通しての運動量、熱および物質の輸送量を正確に評価することが重要であると判断し、本研究では、風波水槽を用いた精巧な室内実験により、風波の特性、および風波気液界面を通しての運動量と水・潜熱の輸送量を正確に評価するとともに、高精度の数値シミュレーションにより、そのメカニズムについても詳しく調べた。また、降雨装置を設置した開水路を用いて、降雨による雨滴の界面衝突が気液界面を通しての物質輸送量に及ぼす影響を明らかにした。さらに、雲粒の乱流衝突頻度モデルを取り入れた高精度の雲シミュレーション法の開発にも成功した。これらの成果は、台風の勢力・進路・降雨予測の高精度化や、地球温暖化予測に重要な海洋上の局所における炭素収支の正確な見積りに大いに役立つことが期待される。

矢部グループは、災害予測シミュレーションの高度化に向けて先進的な数値計算手法の基礎研究と気液自由界面乱流構造及び輸送機構を直接シミュレートするための数値モデルの開発の二方面において研究を行ってきた。

数値計算手法の基礎研究においては、CIP 系の手法を中心に、既存スキームの数値性能を検討するとともに新たな計算手法を提案した。また、これらの計算手法の環境流体数値モデルへの適用について研究を行った。主に、次の成果が得られた。①特性理論に基づく保存型 CIP 法を提案し、浅水波方程式に適用した。この手法はオイラー型手法の CFL 計算安定条件に束縛されることなく、且つ保存性を保証している。②ソロバン格子 CIP 法に重合格子を導入し、従来手法の計算精度を向上した。③複雑形状(地形、海岸線など)を取扱った

めに、ソロバン格子、非構造格子の導入を行い、地形や海岸線に対する高精度数値定式化を提案した。④CIP 有限体積法の改善と共に、それを用いて Yin-Yang 球面格子、立方球面格子における浅水波モデルを開発した。⑤大規模並列計算に適した自由界面多相流モデルを開発し、また風波を伴う自由界面乱流構造と輸送過程に対する数値的研究を行った。モデルの有効性の確認と共に、風波の発達とエネルギー・物質の輸送機構を調べた。

足永グループは、都市スケールの気象、気候の予測において信頼性が高い都市型モデルを構築することを目的として、都市空間を建物と大気が混在する都市キャノピー層として捉えてモデリングを行い、さらに都市スケールの気象、気候の数値シミュレーション結果を基に、都市キャノピーモデルの有効性や災害予測における都市型モデルの適用について考察を行った。都市キャノピー層の理論的取り扱いとして、空間フィルター操作による平均化理論を検討するとともに、都市キャノピー層の精緻な検証データを得るために、温度成層風洞実験や屋外模型実験等を実施した。そして、実験データに基づいて都市キャノピーモデルの各種パラメータを決定する手法を構築した。その結果、本研究で開発した都市キャノピーモデルによる都市スケールの気象、気候の予測精度はかなり高いものとなり、この手法で様々な都市形態の検討を行うことにより、省エネ対策、集中豪雨対策、熱帯夜対策等の様々な用途への適用が期待される。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本研究チームは、日本の気象学という狭い学会に属さない自由な発想のできる研究代表者を中心として、そこに計算スキームの第一人者である矢部教授や、乱流流体力学の実験と数値計算研究の第一人者である小森教授などが参加して編成されている。そのため、高度なCIPを基本スキームとして最初から導入することができ、また、気象の最も基本であり、かつ気象コードの最大の弱点である雲形成に関して、詳細な実験データに基づく乱流輸送係数を導入することができた。このように、テーマに最適な研究者の参加により、研究内容が非常に充実したものとなっており、本研究チームの編成は世界の最先端を行くものであったといえる。研究代表者が気象出身でないだけに、地球シミュレータ誕生に合わせ、自らが海洋コード開発から始めたこともあり、大気と海洋を結合することを前提として開発を行ったことは世界の他のチームに先導する業績である。しかも、コードの開発と同時に、解像度の向上と数値計算の効率化を徹底的に進めており、一つのコードで、解像度を自由に必要な空間に適応できる動的適応型格子スキーム(AMR)も取り入れている。その柔軟性のあるコード開発の思想から、都市部などの局所的異常現象をも連成できるようにデザインされており評価できる。

以上述べたように、当初目標としたことに関しては、各グループとも目標を達成したと評価できる。成果についても適切な外部発表等を行っている。特に、マスメディアに多く取り上げられていることは、成果に対する関心の高さを表しているものと思われる。

個々のテーマでは、①全球スケールから都市スケールまでを単一のモデルでシミュレーションが可能な超高解像度の気象海洋結合モデル MSSG が開発された。②高速風洞水槽による実験を実施し、高風速下での抵抗係数の計測を実施した。さらに、室内実験および直接数値計算によって、熱および運動量輸送に関する詳細な知見を得た。③ソロバン格子、非構造格子、高精度 CIP 有限体積法を提案した。特に、高速・高精度な非構造格子による大気・海洋結合モデルの開発は大きな成果である。このような高精度の結合モデルは世界的にも最高精度のシミュレーションモデルと推察する。

ただし、都市スケールの気象・気候予測のためのモデル開発においては、当初目標のモデルは完成しているものの、都市モデルと大気海洋結合モデルとの統合、自主開発した都市スケール超高解像度モデルによる数値・事例シミュレーション等が得られておらず、真の成果を出すためには、今後更なる実環境・実現象とモデルとの評価・検証が必要と考える。

得られた研究成果を概観すると、当初の目標である災害予測とのつながりが明確でないように思われる。新しいモデルの提唱、実験との共同研究など重要な成果が得られたが、各分担課題の成果が独立した感があり全体のブレークスルーが見え難い。

新たな展開で特記すべきものは、全球モデルで新たに開発したソロバン格子 CIP 法である。この格子の特長

である複雑地形の取扱いにおいて他の格子に比し優位であれば、今後の高精度シミュレーションに大いに有効なものとなる。

論文・講演等の外部発表は適切・積極的に行われたと評価する。このチームで特筆すべきは、メディアから多くの取材があったことである。社会的に関心が高いことを示していることと、社会的成果をアピールするという面で大いに評価できる。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本研究の成果の技術的なインパクトは大きい。特に、適応型動的メッシュ (AMR) を採用した高精度・高速の大気・海洋モデルを世界で初めて開発し、妥当性を検証したことは大きな成果である。

新しい全球格子系の提案、大気・海洋モデルのダイナミカルコアの開発、海水面における相互作用の解明、雲物理過程の解明等について成果が得られている。これらは、大気・海洋分野の研究者にとって重要な研究成果である。

本研究では、実現象(台風の進路予測など)との検証に加えて、実験との比較を通じた検証を行っているが、更に実現象との検証を進めることによって、多くの実証例を作ることが出来れば、今後、更なる展開が期待できる。また、モデルもかなりの程度、高並列化が出来ているようであり、将来の超並列コンピュータへの実装とその実証の準備がすでにできていることも、更なる展開が期待できる理由である。本研究領域における環境・気候関係の戦略目標は、「異常気象の原因と考えられる数年から数十年スケールの気候変動を予測する先進的な技術を創出。また、数時間から数日程度の気象現象の飛躍的な予測精度向上を実現する画期的なシミュレーション技術を創出」と言うものであり、この観点から、戦略目標の達成に貢献しており、今後の展開も大いに期待できる。

本研究は未だ多くのことが研究段階に留まっているか、もしくは実証例が少ない。このような防災のプロジェクトテーマでは、最終的なゴールは実社会に適用されることにある。そのためにも実証例を増やし、更なるモデルの高精度化を図ることが望まれる。また、開発された MSSG モデルは、CREST の当該研究課題にのみ使用されており、大気・海洋の研究コミュニティでは使用されていないようである。モデル使用者が増加することで、モデルの改良等も進展することが期待されることから、大気海洋の研究コミュニティにもっと積極的にアプローチし、モデルの特徴、ターゲットしている現象等を周知することが望まれる。

#### 4-3. 総合的評価

本研究の成果である AMR 格子による大気・海洋結合モデルや、放射も考慮にいた都市型気象予測モデルは、典型的なマルチスケール・マルチフィジックス問題であり本領域の趣旨を良く満たしており、更に達成目標として挙げられている気象・防災への貢献に関しても十分な成果が得られており高く評価出来る。

全球 1.9km 解像度シミュレーションが実行され、さらに、その中に埋め込まれた、より高い解像のシミュレーションが可能になったことは、大きな成果である。風洞実験による風波実験のデータが得られ、また新規アルゴリズムの開発も進んでおり、これらを全球モデルにいかに取り込むかが次の課題である。

今後更なる展開のためには、多くの、実現象に基づく実証を行い、モデルの高度化を図るとともに、論文・講演あるいはメディアを通して実証結果を広く公表していくことが必要である。

本アプリケーション MSSG は、大気・海洋のカップリングモデルであり、手法もAMR法を用いた新しいものである。また、このアプリを使用したモデルも京コンピュータのようなペタフロップス級の高性能コンピュータ上で実行することにより、十分な成果が見込まれる。従って、本領域のプログラムが終了した後も、継続的に本アプリの維持改良及び本アプリを利用したプログラムが継続されることが望まれる。