

「マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション」
平成 17 年度採択研究代表者

高橋 桂子

(海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター グループリーダー)

「災害予測シミュレーションの高度化」

1. 研究実施の概要

高精度の災害予測に対する社会的な要請と期待は大きく、これに応える最も有望な手段の一つとして、大気、海洋、陸面過程を総合的に表現する気象、気候の数値モデルを用いた災害予測シミュレーションの確立がある。本プロジェクトは、地球シミュレータを最大限に活用できる高速・高精度の災害予測を可能とする数値シミュレーションコードを開発し、災害予測の精度向上へ寄与することを目指すものである。

本プロジェクトは、高精度の災害予測シミュレーションへのアプローチとして、超大規模シミュレーションによる予測技術、実験室の実験を基盤とする物理過程モデリング技術、高精度・高安定な数値計算技術の確立を柱として、それらの応用課題として、都市型気象、気候に代表される局所的予測シミュレーションを挙げている。

本 17 年度のプロジェクトの発足から 6 ヶ月は、本格的なプロジェクトの稼働へ向けた準備期間と位置づけ、各課題の研究を遂行するとともに、各課題のテーマと課題間にわたる共同研究テーマについても協議のもと整理し、有機的な共同研究体制を構築する。

2. 研究実施内容

以下、各課題ごとに研究実施内容を報告する。下記の課題の成果に加えて、本年度は、全研究拠点を結ぶ会議ネットワークシステムを導入し、それらのシステムを用いた柔軟な情報交換を可能とする環境を整えたことも付記しておく。

【課題 1】高精度災害予測のための超高速・非静力学・大気－海洋－陸面－海氷結合シミュレーションコードの開発（担当代表者：(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)

本年度は、本プロジェクトの本格的な稼働への準備期間と位置づけ、以下のテーマについての研究と環境整備を推進するとともに、本年度の各テーマに対する下記の結果を得た。
(i) 課題 2 との共同研究課題のひとつである超高解像度の大気海洋相互作用解明にむけた、解像度の変化におけるバルク法の感度実験とその物理的性能についての検討を行った。

高解像度の大気海洋相互作用をモデル化する手法のインパクトを検討するために、現行で用いられているバルク法を用いて解像度を変化させたとき、物理交換量の変化についての検討を行った。その結果、水平、鉛直ともに解像度を変化することにより、物理交換量への大きな影響が示唆された。このことから、高解像度・予測シミュレーションにおいて、大気海洋総合作用とそのインターフェースのモデル化手法を、より詳細に検討する必要があることがわかった。

- (ii) 高精度移流スキームとして知られる CIP 法を用いて、球面上においても非常に精度良く計算できるセミラグランジュアン数値計算手法を提案した。ベンチマークテストを行い、その精度の高さを検証した。これは、課題 3 との共同研究課題のひとつである。
- (iii) 課題 4 で開発された都市型気象モデル(UCSS)と ESC モデル(全球/領域・非静力学・大気海洋結合モデル)とを統合し、地球シミュレータ上に実装した。

【課題 2】海水面での相変化による水の移動機構および乱流雲中の雲粒の成長機構の解明とモデル化 (担当代表者：京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 小森悟)

本グループでは、①海水面を通しての水の移動機構と②雲粒の成長機構に着目し、それらの機構を明らかにすること、およびそれらをモデル化することを目的としている。本 17 年度は、下記(i), (ii)に取り組み、以下に示す成果を得た。

- (i) 未だ解決されていない風波気液界面を通しての、温度(顕熱)や水分(潜熱)の移動現象を室内実験で再現するための実験準備を行った。次年度の本格的な実験のため、風波水槽熱伝達実験装置の整備計画の策定、および最先端の放射温度計、風速計、温湿度計を用いた計測を行うための設備の準備、実験条件の検討を行った。
- (ii) 乱流が存在することによって粒子の衝突が促進されることが指摘されているが、現状の気象モデルの殆どでは、雲粒の成長モデルにおいて、衝突成長への乱流効果が考慮されていない。そこで、直接数値計算(Direct Numerical Simulation, DNS)と呼ばれる代表的な乱流の数値計算手法を駆使して、衝突率を予測するために必要な衝突頻度因子モデルを開発した。図 1 に、マイクロスケール基準レイノルズ数(Re_λ)が 44 である乱流中における無次元化された衝突頻度因子の結果を示す。この結果から、本衝突頻度因子モデルの結果(実線)と DNS による計算結果(黒丸)はよく一致しており、本衝突頻度因子モデルが乱流中での粒子の衝突頻度因子を正確に予測できることがわかる。さらに、自然界で見られるような高レイノルズ数流れにも適用可能である Large-Eddy Simulation (LES) を用いて、粒子成長の計算を行った。図 2 に、対流雲中での粒子の衝突成長を想定したシミュレーション結果を示す。この結果から、本研究で提案した衝突頻度因子モデルを用いた LES の予測結果(破線)は DNS の結果(実線)と良く一致しており、本研究で提案したモデルが、乱流中での粒子の衝突成長を正確に予測できることがわかった。

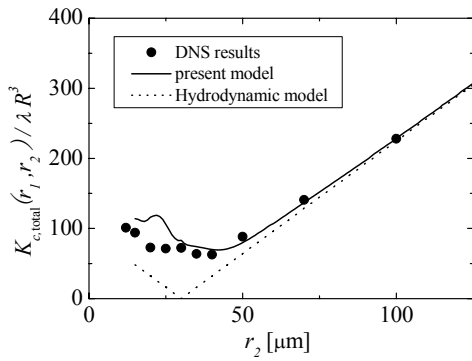


図 1. 乱流中での衝突因子
($Re_\lambda = 44$)

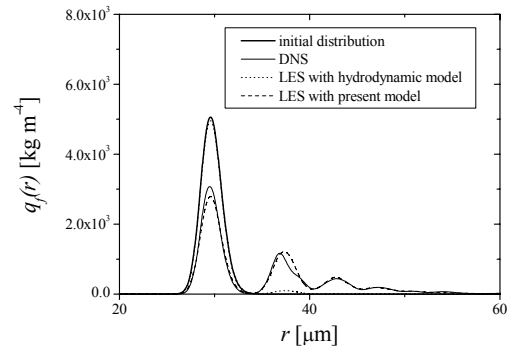


図 2. $t/Te=40$ における質量密度関数
($Re_\lambda = 44$)

【課題 3】高精度数値計算スキームの研究開発と予測精度におけるインパクト

(担当代表者：東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻 矢部孝)

本グループは次の目標に向けて研究を行っている。

- (i) CIP 有限体積法による保存型の大気・海洋モデルのダイナミック・コアの構築
- (ii) 気・液相互作用シミュレーションモデルの開発

本年度はこれらの課題において以下の研究成果を得た。

- ・ 補間関数の構築について、CIP/Multi-Moment の概念に基づき、体積積分平均値 (VIA) と点値 (PV) だけを用い、各シングルメッシュ・エレメントにおける多次元高次補間再構築を提案した。
- ・ 数値流束の計算について、従来の保存型 CIP 移流スキームに用いている補間関数の厳密積分ではなく、マルチステップ・セミ・ラグランジアンによるポイント・サンプリングによって積算する。2 次補間関数と 3 次 Runge-Kutta 法の組み合わせで VIA と PV が共に 3 次精度を有することを理論的に証明し、数値実験で実証した。
- ・ これらを経度/緯度および Yin-Yang 座標に適用し、実用的な多次元移流スキームを提案した。
- ・ 気・液多相流計算コードの改善および並列化を行った。また、並列効率について考察し、地球シミュレータにおける大規模シミュレーションに向けて、更なる改善策を検討した。
- ・ そろばん格子 CIP 法の三次元流体コードを作成し、水表面の高解像度を実現した。

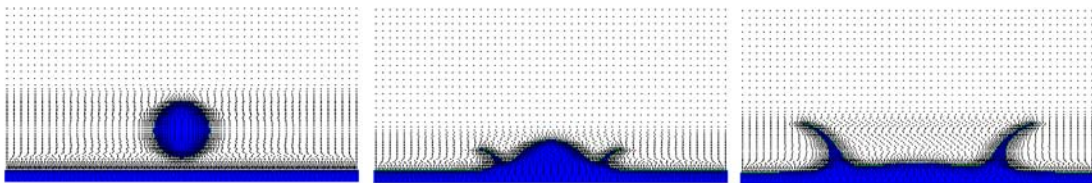


図 3. そろばん格子による水滴落下のシミュレーション (そろばん格子点を点で表す)。

【課題 4】都市スケールの気象，気候のための災害予測モデルの開発

(担代表者：(独) 建築研究所環境研究グループ 足永靖信)

当該研究グループでは、都市型気象モデルとして不可欠である建物からの排熱効果を導入した、独立行政法人建築研究所において開発された UCSS モデルを、課題 1 で開発されている ESC モデルと統合するための基礎的検証を行うことを目的とする。平成 17 年度は都市キャノピー層の温度成層風洞実験を実施することにより、都市キャノピー層の基本的な特徴を調べると共に、数値モデル検証のための実験データ及び計測システムの整備、充実を図った。図 4 は温度成層風洞の概要を表したものである。温度成層条件や建物配置のパターンを変化させて気温、風のデータ取得が可能である。今年度導入した計測機器として、熱線冷線を併用した風速計測システム、可視化用高速カメラ (1, 000Hz) などがあげられる。

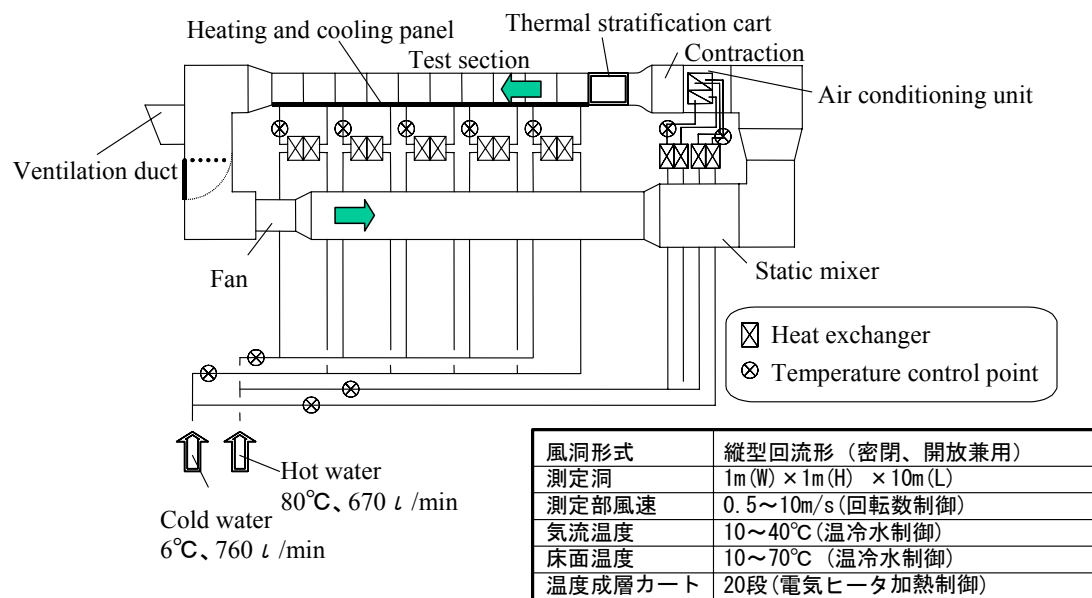


図 4 温度成層風洞の概要

3. 研究実施体制

高橋グループ

- ① 研究分担グループ長：高橋 桂子 (独立行政法人海洋研究開発機構)
- ② 研究項目：
 - 全球から都市域における気象、気候変動現象を扱うことができる超高速・超高解像度・非静力学・大気海洋結合モデルの開発と予測シミュレーションの高精度化。
 - 超高解像度の大気海洋相互作用解明にむけた、解像度の変化におけるバルク法の感度の検討 (：課題 2 との共同研究テーマ)。

- 高精度移流スキーム導入のための基礎実験（課題 3 との共同研究テーマ）。
- 都市型気象モデル(UCSS)と ESC モデル（全球/領域・非静力学・大気海洋結合モデル）との統合（課題 4 との共同研究テーマ）。

小森グループ

- ① 研究分担グループ長：小森 悟（京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻、教授）
- ② 研究項目：
 - 海水面を通しての水の移動機構を明らかにし、
 - 雲粒の成長機構に着目し、成長機構を明らかにするとともに、そのモデル開発を行う。

矢部グループ

- ① 研究分担グループ長：矢部 孝（東京工業大学工学部機械科学科機械物理専攻、教授）
- ② 研究項目：
 - CIP 有限体積法による保存型の大気・海洋モデルのダイナミック・コアの構築、
および
 - 気・液相互作用シミュレーションモデルの開発を行う。

足永グループ

- ① 研究分担グループ長：足永 靖信（建築研究所、上席研究員）
- ② 研究項目：
 - 温度成層風洞を用いた都市キャノピーの熱拡散現象に関する検証。
 - 都市型気象モデルと E S モデル統合のためのモデル設計。
 - 上記統合モデルにおける物理的性能に関する基礎検証。
 特に、
 課題 1 との共同研究：
 - 都市型気象モデルと E S モデル統合のためのモデル設計。
 - 上記統合モデルにおける物理的性能に関する基礎検証。

4. 主な研究成果の発表（

(1) 論文（原著論文）発表

- Y.Ogata, T.Yabe and K.Odagaki, " An Accurate Numerical Scheme for Maxwell Equation with CIP-Method of Characteristics", Comm. Comput. Phys. Vol.1, No.2, 311-335 (2006).

