

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・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

(高橋グループ)

本グループの主たる目標は、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である。これまでに、全球から都市スケールに対応可能な、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションのための大気海洋結合モデル MSSG(Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)の開発を推進し、高い計算性能を達成し、新たな大気海洋相互作用モデル(小森グループによる開発)の導入、動的適応型格子生成手法(Adaptive Mesh Refinement)の導入と検証、高解像度事例MSSGによる事例シミュレーションによる予測精度への影響評価を推進してきた。本年度は、上記の新しい大気海洋相互作用モデルのインパクトの解析を継続するとともに、3次元全球へのCIP-Sorobanグリッドの導入(矢部グループとの協力)を他グループとの連携のもとに推進した。さらに、MSSGによる都市スケールシミュレーションの高速化を行い約100倍の高速化を実現するとともに、圧縮性大気による密度変化を扱うことの重要性を示した。加えて、本年度からMSSGにおける動的適応型格子生成手法の計算性能の最適化を開始しており、現時点での地球シミュレータ上での予備測定において、高い計算性能を達成していることを確認した。今後は、世界的にも非常に新しい上記モデルコンポーネントのインパクトについて、さらに詳細な解析を行うとともに、MSSGの計算性能最適化を推進し、地球シミュレータ(ES2)と京速スーパーコンピュータ上での本格的なマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションの実施への準備を整える。

(小森グループ)

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 20 年度は、下記に示す研究成果を得た。

(1)風速や水温等を任意に制御可能な風波乱流水槽を用いた気液間熱伝達実験を行うことで海水面を通しての熱および水分の輸送機構を調べ、大気海洋間での熱交換量の評価モデルについて検討してきた。平成 19 年度は、真水を用いた風波乱流場において気側での熱輸送量を個別に測定し、潜熱量や顕熱量を正確に評価できるパラメータについて検討し

た。平成 20 年度は、真水を用いた室内実験で得られた結果が現実の海洋に適用できるかどうかを明らかにするため、風波気液界面を通しての熱輸送に及ぼす塩水の影響について調べた。その結果、塩水は風波気液界面を通しての全熱量および輸送機構に影響を及ぼさないことが明らかになった。

(2)雲内乱流による雲粒の衝突成長促進効果までを考慮できる気象シミュレーション手法を開発してきた。平成 19 年度には、地形による強制対流によって生じる対流雲を対象として、乱流による雲粒の衝突成長促進効果に対流雲の発達に与える影響を明らかにした。これにより、対流雲の発達を正確に予測するためには、本シミュレーション手法のような雲粒の乱流衝突成長を考慮可能な手法が必要であることが明らかになった。平成 20 年度は、使用している衝突頻度因子モデルの信頼性を確かめるための実験データを取得することを目指し、室内実験から衝突頻度因子を予測するための解析手法を開発した。また、今後の大規模数値実験の準備として、計算手法の効率化を目指して、高精度かつ高効率な凝縮計算法の開発を行った。

(矢部グループ)

本グループの主たる目標は、高精度計算スキーム CIP 法の高度化と適用事例の検討を行い、CIP 有限体積法による大気・海洋モデルのダイナミカルコアを構築すること、さらに、気・液相互作用に伴う自由界面乱流構造を再現するための気・液直接シミュレーションモデルの開発を行うことである。平成 20 年度は、昨年度に引き続き、CIP マルチモーメント有限体積法に基づく高性能数値計算モデルを開発し、立方球面座標における浅水波モデルに適用し、Williamson のベンチマークテスト問題において、数値モデルの検証を行い、良好な結果が得られた。より広い空間領域における自由界面乱流構造シミュレーションのために、LES 乱流モデルの導入を行い、気・液相互作用モデルの課題を明らかにするとともに、計算性能最適化を推進した。今後は、これまでに提案したオイラー陽解法に基づく CIP マルチモーメント法の定式化を3次元へ拡張する。また、高速計算可能な気・液界面乱流に対する DNS または LES シミュレーションのための多相流モデルの改良、および自由界面多相流のシミュレーションを実施し、気液界面の乱流構造及び物質とエネルギーの輸送機構の解明を目指す。

(足永グループ)

本グループでは都市型気象モデルの開発を行い、高橋グループで開発されている MSSG と都市型気象モデルを統合することにより、ヒートアイランド現象の予測精度向上を図る。平成 20 年度は、都市キャノピーモデルの理論的背景として空間平均の基本的考え方を整理すると共に、非静力学気象モデルを用いて都市の土地利用変化に伴う降水影響に関する基本的な検討を行った。2003 年 8 月 5 日の解析結果では、都市有りのケースにおいて夏季の午後に都市域で局所的な降水量の発生が見られた。同時期において都市無しのケースでは都市域で降水が生じておらず、当日の風の収束状況と都市域の加熱条件が重なったためと考えられる。今回の解析では、人工排熱等の都市的効果が考慮されていないため、今後検討を重ねていく予定である。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

(高橋グループ)

マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションのための大気海洋結合モデルMSSG(Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)に新たな大気海洋相互作用モデル(小森グループによる開発)を導入し、そのインパクトを解析した。新たな大気海洋相互作用モデルが、強風領域特に台風の中心部における降雨過程やレインバンドに沿った鉛直対流過程に大きな影響を与えることが明らかとなった(図1)。今後は、事例を増やして影響の詳細を解析するとともに、観測データとの比較を行う。高精度の計算手法を導入し、さらに高速のシームレスシミュレーションを実現するために、3次元全球へのCIP-Sorobanグリッド(図2)の開発^{A・1)}を、矢部グループとの連携のもとに推進した。CIP-Sorobanグリッドを適用することにより、物理量が顕著に変化する領域へ柔軟にグリッドを配置することが可能である。さらに、保存型CIP法を採用したことによりCFL条件を大きく緩和できる高速計算が可能となった。都市スケールの非定常大気の流れ場を解くために従来より課題となっていた音波の扱いにつて、fractional step法を都市スケールシミュレーションに適用し、約100倍の高速化を実現した。さらに、ブジネスク近似を用いた流れ場との比較により、都市における街路や建物の加熱や人口排熱などが流れ場に大きく影響することを明らかにし、圧縮性大気による密度変化を扱うことの重要性を示した(図3)。昨年度MSSGに導入した動的適応型格子生成手法の計算性能の最適化のために、地球シミュレータ上における計算性能最適化を行い、高い計算性能を達成していることを確認した(表1)。

計算性能最適化については、追加予算により、本年度から、次世代スーパーコンピュータ上での大規模・高速シミュレーションを想定した計算性能の最適化を開始した。本年度は、MSSGの詳細構造を明らかにし、最適化の指針を決定することが主たる目的であった。最適化の指針として、袖領域のデータ交換の集約、雲微物理モデルではループ分割による連続アクセスの向上を図ることが重要であることがわかった。

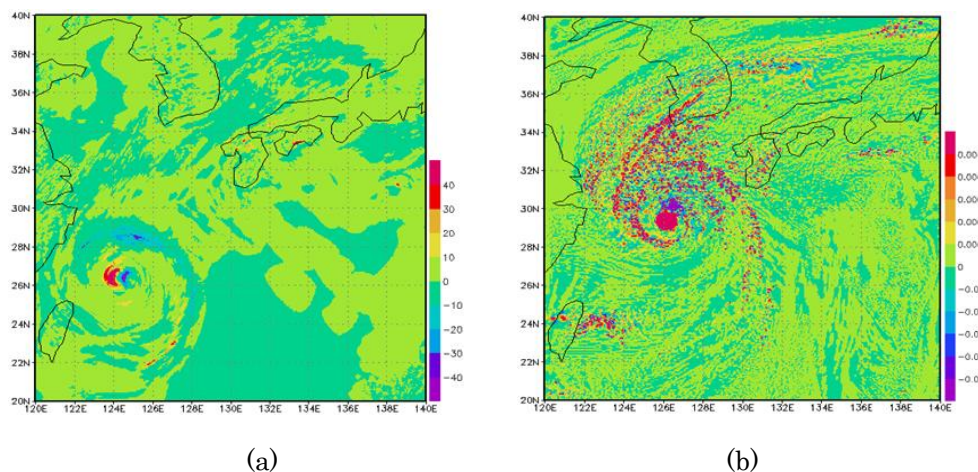


図1. 大気海洋相互作用の新しいモデルと旧モデルの差。(a)は降雨量の差、(b)は渦度の差を示す。

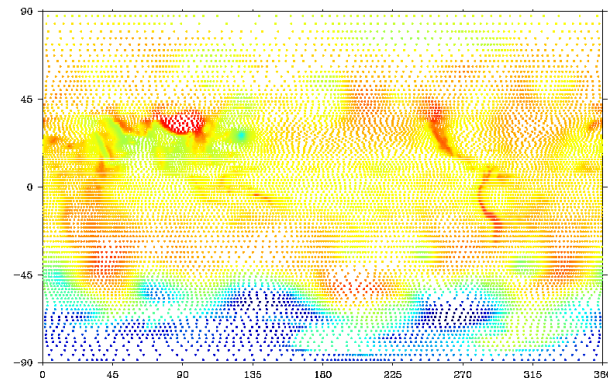


図 2. 3 次元全球 Soroban グリッドによる圧力の勾配をクライテリオンとした場合のグリッド配置。

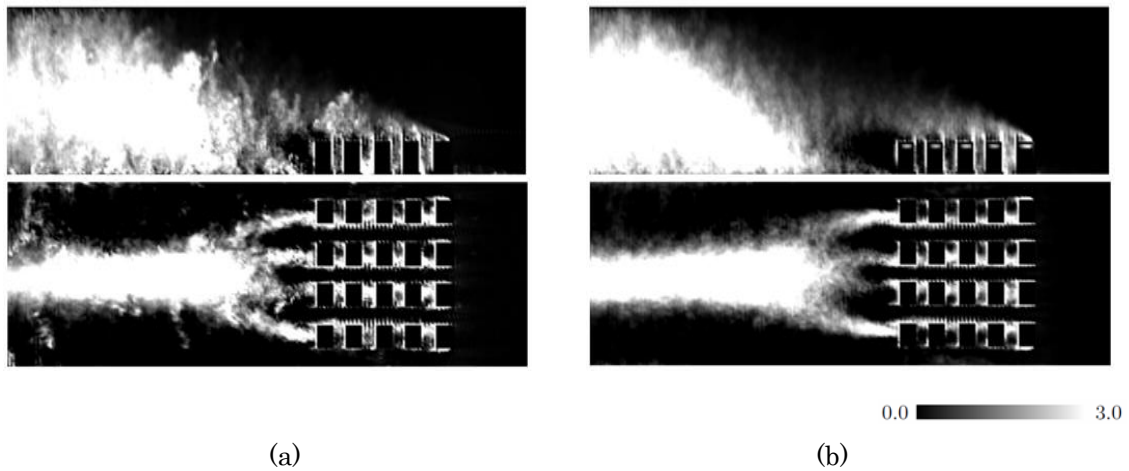


図 3. 複数建物周りの非定常シミュレーションの結果。(a)は非圧縮解法のブジネスク近似を用いた場合、(b)は完全圧縮大気の場合の流れ場を示す。

表1. 動的適応型格子法 (AMR) を用いた時の MSSG の地球シミュレータ上での計算性能。

nest 欄の 0.0, 1.1, 2.1 は、それぞれ、0.0 は、全球 11km、1.1 は日本領域 5.5km、2.1 は 2.75km の動的適応型格子上での計算時間と演算割合を示す。Mgrid は各解像度のグリッド数、step は計算したステップ数、Mgrid * step は、格子数とステップ数の積和、elaps はそれぞれの設定での計算時間、nest 関連の欄は全球と日本領域の nest 処理に必要な計算時間の割合、reinit は、動的適応型格子を設定する際に要した計算時間の割合である。nest や動的適応型格子の設定に必要な計算量はごく少ない。

	nest	Mgrid	steps	Mgrid*steps	%	elapse	%	nest関連	%	reinit	%
大気	0,0	181	17738	3210578	69%	15781.9					
	1,1	34	17738	603092	13%	2964.6					
	2,1	46	17670	812820	18%	3995.5					
				4626490		22742.0	90.9%	1028.7	5%	1.1	0.0%
海洋	0,0	77	22140	1704780	43%	964.3					
	1,1	45	22140	996300	25%	563.5					
	2,1	61	21280	1298080	32%	734.2					
				3999160		2262.0	9.0%	363.9	16%	1.4	0.1%
結合								0.7		0.0	
全体						25015.2		1393.3	6%	2.5	0.0%

(小森グループ)

本グループの研究目的は、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にある。

①については、温度制御風波乱流水槽を用いた海水面蒸発水分フラックス計測実験を行い、海水面を通しての熱輸送量を正確に評価できるモデルの構築を行った。現在、土壌砂漠化や局所的集中豪雨等の異常気象と深い関わりを持つ気候変動を予測する際には、大気海洋結合大循環モデルが一般的に用いられている。このモデルには大気海洋間、つまり風波気液界面を通しての熱交換量と風速との比例関係を仮定したサブモデルが利用されているが、海洋では大気海洋間の熱交換量の正確な測定が困難であること等が指摘されており、信頼性の高い測定結果は全く得られていない。そこで、海洋のシミュレーション装置である風波乱流水槽を用いた伝熱実験を通して、風波気液界面を通しての熱輸送機構を界面近傍の乱流構造と関連付けて詳細に解明することに取り組んでいる。平成 19 年度は、真水を用いた風波乱流場において、気側での顕熱および潜熱を個別に測定した。その結果、熱輸送量と風速との単純な比例関係を仮定した従来の気側での熱輸送量評価モデルが潜熱輸送に関しては成立しないことが明らかになった(投稿準備中)。この結果が現実の海洋に適用できるかどうかを明らかにするためには、塩水が熱輸送に及ぼす影響を調べる必要がある。そこで、平成 20 年度は、海水と同じ塩分濃度を有する 3.5wt%食塩水を用いて伝熱実験を行い、風波気液界面を通しての全熱輸送に及ぼす塩水の影響について調べた。その結果、液中の塩分の有無によらず、風波気液界面を通しての全熱輸送は液側界面近傍の乱流構造と深く関連することが明らかになった。このことは、平成 19 年度に解明した気側での顕熱輸送および潜熱輸送に関する結果もまた液中塩分の影響を受けないことを示唆している。

一方、②については、雲粒の成長プロセスの中でも雲粒の衝突成長に着目し、雲内乱流による雲粒衝突の促進効果の解明に取り組んでいる。近年、乱流が存在すると雲粒衝突が促進されることが指摘されている。しかし、現状の気象シミュレーションではこの乱流効果は考慮されておらず、この乱流効果の重要性を明らかにする必要があった。これまでに、ビン法と呼ばれる液滴径の大きさを考慮できる気象シミュレーション手法に、粒子の乱流衝突成長計算手法を組み込むことに成功した。これにより、雲内乱流による雲粒の衝突成長促進効果までを考慮できる気象シミュレーションの実行が可能になった。平成 19 年度には、地形による強制対流によって生じる対流雲の中での、乱流による雲粒の衝突成長促進効果を明らかにした。これにより、対流雲の発達を正確に予測するためには、本シミュレーション手法のような乱流による雲粒の衝突成長促進効果を考慮

できる手法が必要であることが明らかになった。そこで、平成 20 年度は、使用している衝突頻度因子モデルの信頼性を確かめるための実験データの取得を目指し、室内実験から衝突頻度因子を予測するための解析手法を開発した B-1)。また、今後の大規模数値実験の準備として、計算手法の効率化を目指して、高精度かつ高効率な凝縮計算法の開発を行った B-2)。これにより、乱流による雲粒の衝突成長促進効果を考慮した数値シミュレーションをより効率的に行うことが可能になった。

(矢部グループ)

平成 20 年度は、①次世代の大気海洋モデルのダイナミカルコアの構築と②気・液界面乱流構造及び輸送機構の数値シミュレーションの 2 つの課題についての研究を推進した。

①については、CIP マルチモーメント有限体積法に基づく全球モデルの保存性を図り C-2,3,4)、立方球面座標における浅水波モデルの開発を行った。体積分平均値と点値の二種類のモーメントを予報変数とするオイラー型の定式化を用い C-2,3,4)、4 次精度の数値モデルを構築した。Williamson のベンチマークテスト問題において、数値モデルの検証を行い、良好な結果が得られた。6 つのパーティの間にデータ通信を行う際に、マルチモーメント補間によってコンパクトなステンシルにおいて高精度の補間再構築ができる。既存のモデルに比べ、パーティの境界面における数値誤差が少ない。図4には、立方球面格子を用いる定式化の数値誤差検証によく使われるテストの計算結果を示す。パーティ境界に沿って発達する順圧不安定の様子が格子の影響を受けることなく、よく再現されている。

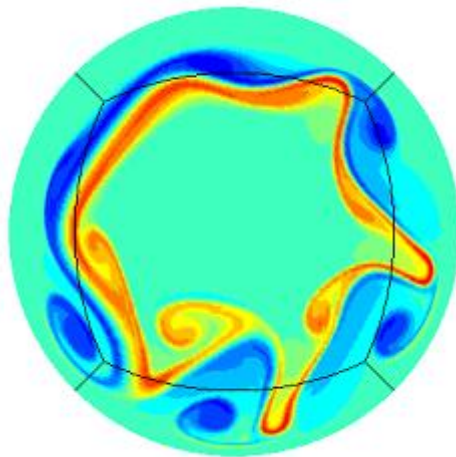


図 4. 順圧不安定性テスト (64X64 メッシュ) .

②の気・液界面乱流構造及び輸送機構の数値シミュレーションにおいては、より広い空間領域を計算するため、LES 乱流モデルの導入を行った。自由界面が存在する場合、従来の大領域平均を用いる LES モデルに問題があり、それを克服するため、ラグランジュ平均モデルとコヒーレント乱流モデルを導入した。また、計算コードの並列化をし、地球シミュレータや TSUBAME などの並列計算機において最適化を行った C-1)。

(足永グループ)

平成 20 年度は都市キャノピーモデルの理論的背景として空間平均の基本的考え方を整理すると共に、非静力学気象モデルを用い、首都圏を対象にした降水現象に関する数値実験を実施した(Matheson and Ashie, 2008)^{D-2)}。水平解像度は 5km メッシュである。解析領域を図5に示す。2001 年から 2005 年の観測データを調べ、都市域で集中豪雨が見られた 8 日分の事例を抽出した。そして、抽出した各日の気象条件において現況の土地利用のケース(都市有り)と都市域を樹林地に変化させたケース(都市無し)をそれぞれ設定し、計 16 回の数値実験を実施した。表 1 は各日の東京地域を中心とする領域(city)および山岳領域(mountain)における 12 時～24 時の平均降水量[mm/h]を一覧したものである。領域 city、mountain の配置は図5に示してある。領域 city と領域 mountain で計算結果の相違が見られた、2003 年 8 月 5 日と 2001 年 7 月 25 日の 2 日間について以下に述べる。

2003 年 8 月 5 日の 17 時における地上 10m の風速及び降水量の分布を図6に示す。これは、現況の土地利用のケース(都市有り)である。この時間帯では降水が生じているが、特に注目されるのが図中○で囲んだ東京の領域である。この地域には相模湾の風と鹿島灘の風が収束しており、局所的に降水が発生していることが分かる。アメダスデータや降水レーダーとの比較から現象の再現性をほぼ確認しているが、人工排熱等の都市的効果は計算に組み込まれておらず、今後の検討を要する。また、都市域を樹林地に変化させたケース(都市無し)ではこのような局所的な降水が見られなかったことから、都市の土地利用による加熱要因が降水の発生に影響した可能性が強い。

都市有りのケースにおいて都市無しのケースに比較して降水量が減少する事例も見られた。そのような事例として 2001 年 7 月 25 日の 17 時における湿度変化の鉛直断面分布を都市有りの絶対風速と共に図7に示す。断面位置は図5に示す。都市域の乾燥した空気の移流により山際の混合比が低下していることが分かる。

以上のことから都市の存在は気温、風速場のみならず降水量にも複雑な影響をもたらす可能性が示唆される。今後、都市型モデルの精度検証作業を継続する予定である。

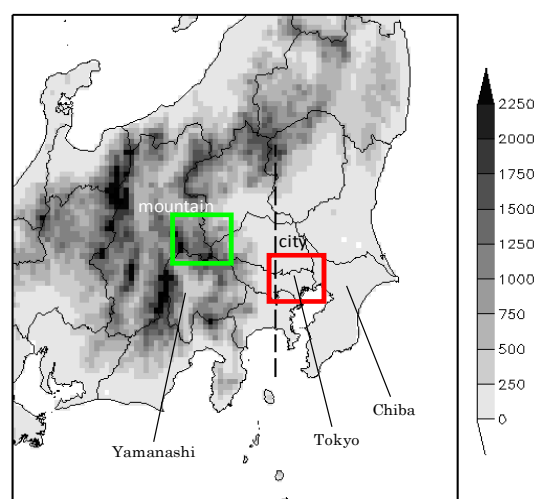


図 5 計算領域とその標高[m]

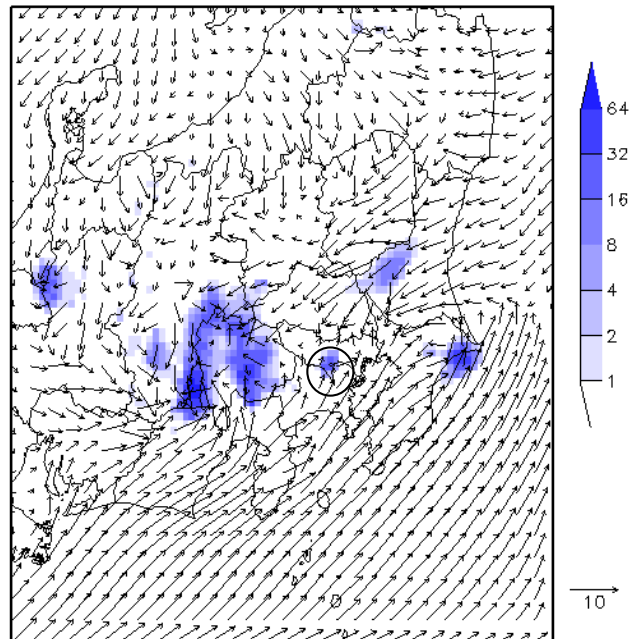


図 6 風速及び降水量の計算結果（2003 年 8 月 5 日 17 時）

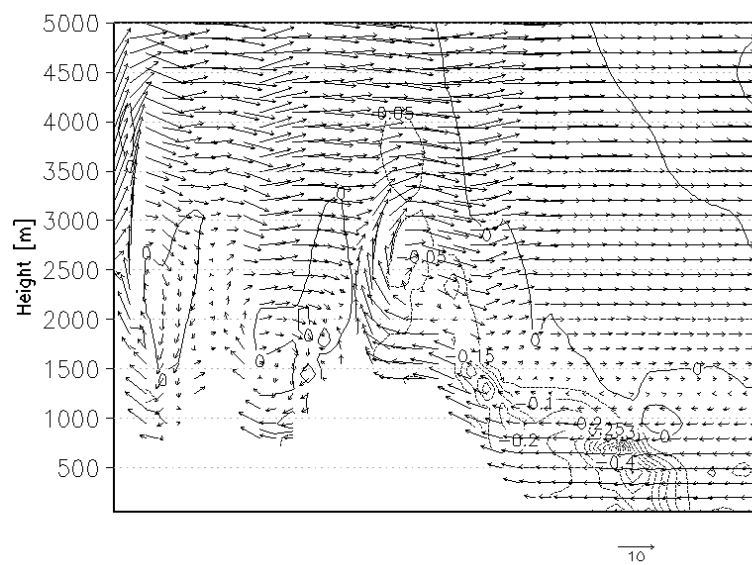


図 7 都市有無による混合比の変化と都市有りの絶対風速
（2001 年 7 月 25 日 15 時、断面位置は図 5 参照）

3. 研究実施体制

(1) 高橋グループ

①研究分担グループ長: 高橋 桂子(海洋研究開発機構、グループリーダー)

②研究項目

高精度、高計算性能マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションのための、全球から都市スケールを扱うことが可能な大気海洋結合モデルMSSGを開発する。大気海洋相互作用における新たな交換手法の導入、動的適応手法、CIP法を用いた新たなグリッド系を開発、導入し、そのインパクトを解析、評価する。さらに、京速スーパーコンピュータ上における実行を想定した計算性能の最適化も併せて行う。

(2) 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、教授)

②研究項目

大気海洋間を通してのスカラ輸送に及ぼす降雨の影響を明らかにすると共に、海水面を通しての水の移動機構を明らかにする。また、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。

(3) 矢部グループ(研究機関別)

①研究分担グループ長: 矢部 孝(東京工業大学、教授)

②研究項目

次世代の大気海洋結合モデルに向けた計算手法の開発と気・液界面乱流構造及び輸送機構の直接シミュレーションの推進。

- ・ CIP 有限体積法による大気・海洋モデルのダイナミック・コアの構築。
- ・ 気・液直接シミュレーションモデルの開発。

(4) 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

都市キャノピー層の熱輸送構造の解明と数値モデルの更新

- ・都市キャノピーモデルの理論的背景整理
- ・風洞実験データによる熱輸送構造の検討
- ・都市キャノピーモデルの更新

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

A-1. (Invited paper) Keiko Takahashi: Strategy and its impact of mesh refinement on the sphere, to be submitted to the Philosophical Transactions of the Royal Society. (to be submitted).

- B-1. Ryo Onishi, Keigo Matsuda, Keiko Takahashi, Ryoichi Kurose and Satoru Komori: Retrieval of Collision Kernels from the Change of Droplet Size Distributions with a Simple Inversion Scheme, *Physica Scripta* (in print).
- B-2. 大西 領, 杉村 剛, 高橋 桂子: CIP-CSLR 法を用いた雲粒の凝縮・蒸発計算法, 日本機械学会論文集B編, vol.74, No.748, pp2443-2451 (2008).
- C-1. S.Yamashita, C.G.Chen, K.Takahashi and F.Xiao: Large scale numerical simulations for multi-phase fluid dynamics with moving interfaces , *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **22**, 405-410 (2008).
- C-2. C.G.Chen and F.Xiao: Shallow Water Model on Cubed-Sphere by Multi-moment Finite Volume Method. *J. Comput. Phys.* **227**, 5019-5044 (2008).
- C-3. X.L.Li, D.H.Chen, X.D. Peng, K. Takahashi and F. Xiao: A multi-moment finite volume shallow water model on Yin-Yang overset spherical grid, *Mon. Wea. Rev.* **136**, 3066-3086 (2008).
- C-4. R.Akoh, S. Ii and F. Xiao: A CIP/multi-moment finite volume method for shallow water equations with source terms, *Int. J. Numer. Method in Fluid*, **56**, 2245-2270 (2008).
- D-1. 足永靖信、平野洪賓:ニューラルネットワーク分析手法による都市キャノピー幾何情報の推定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 634 号, pp. 1417-1423 (2008)
- D-2. Mark A. Matheson and Yasunobu Ashie: The Effect of Changes of Urban Surfaces on Rainfall Phenomenon as Determined by a Non-hydrostatic Mesoscale Model, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 86, No. 5, pp.733-751 (2008).
- D-3. 足永靖信, 伊藤大輔, 藤本哲夫: 建築窓ガラス用フィルムの分光特性に関する調査, 日本建築学会技術報告集, 第 14 巻, 第 28 号, pp. 487-490, (2008).

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : X0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)