

「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

(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)

19年度は、本グループで開発している大気海洋結合モデルMSSG(Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)の大気、海洋の両コンポーネントに、本年度の目標である動的適応手法(Adaptive Mesh Refinement)の導入と実装をし、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大気海洋結合モデルを構築した。AMRを導入したMSSGは、台風や前線など、物理量の変化の顕著な局所の変化をとらえることができ、実装の妥当性を示すことができた。また、大気海洋相互作用として、小森グループで検討されている、新たに提案されたバルク交換係数を用いたテストシミュレーションを実施し、そのインパクトの大きさについての検討を行った。事例シミュレーションとして、2006年台風13号の強度予測シミュレーションを行い、強風域のバルク係数が台風の強度に大きな影響を与えることを示唆する結果を得た。

(小森グループ)

本グループでは、海水面を通しての水の移動機構と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 19 年度は、下記に示す研究成果を得た。

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た。その結果、熱交換量の評価パラメータとしては、従来提案されているバルク交換係数ではなく、気液界面を通しての顕熱や潜熱の輸送速度に相当する交換係数が適切であることが明らかとなった。

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、現実的な気象現象に応用できるように拡張した。また、現実地形上で発達する乱流雲中での詳細な液滴成長計算を行った。その結果、雲内乱流によって雲粒の成長が大きく促進されるのに伴い、降

雨量も大きく増大することが明らかになった。

(矢部グループ)

平成19年度では、引き続き、高性能数値計算モデルの開発と自由界面乱流構造の直接シミュレーションにおいて研究を行った。

まず、CIPマルチモーメント有限体積法による全球保存モデルの構築に向けて、CIPマルチモーメント手法を立方球面座標に適用することによって、全球において均等な空間解像度を持ち、且つ完全に保存する浅水波モデルを構築した。数値実験により、このモデルは四次精度を有し、不連続Galerkinなどの計算モデルに遜色のない性能を確認した。

自由界面乱流をシミュレートするために、引き続き、大規模並列計算コードの検証及び性能向上を行った。移流についてより高精度のスキームを導入することによって、乱流統計量の計算結果を改善した。チャンネル乱流において、本モデルは直接シミュレーションの計算モデルとしての適性について検討した。

(足永グループ)

本研究グループでは、都市型気象モデルについて風洞実験により検証を行い、課題1で開発されている ESC モデル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 19 年度には都市キャノピーモデル(UCSS)を用いて首都圏を対象にしたヒートアイランド現象の再現シミュレーションを実施した。その結果、UCSS の計算結果は AMeDAS における気温観測値の日変動と良い一致を見せ、都市キャノピーモデルが含まれない従来型と比べて1日を通して大幅な改善効果をもたらすことが分かった。また、気温分布については夏季夕方において東京・埼玉の都県境から北西部にかけて気温が高くなり 都心部の恒常的な高温化現象と共に“V”字型に近い高温域が形成されることが分かった。このような気温分布の特徴は首都圏における最新の現地調査でも確認されており、UCSS がヒートアイランド状況の予測に活用し得ることを示唆する。

## 2. 研究実施内容

(高橋グループ)

本年度の目標である本グループで開発している大気海洋結合モデル MSSG(Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)の大気、海洋の両コンポーネントに、本年度の目標である動的適応手法(Adaptive Mesh Refinement)の導入と実装を行った。事例シミュレーションとして、2003年台風 10 号を取り上げ、大気コンポーネントにおいては、気圧の空間的変化の顕著なグリッドを再分割し、海洋コンポーネントでは、大気のグリッド分割に同調して格子を再分割する。この再分割を一定の時間間隔で行うことによって、台風を追跡し、かつその特徴的な構造を捉えることが可能であることを検証した。図1は、大気コンポーネントMSSG-Aにおける12時間ごとのAMRによるグリッド分割を示す。このシミュレーションでは、全球を水平解像度 56kmの格子でシミュレーションし、

台風が存在する領域を水平 6km格子で分割することで計算を行った。図1の格子は、見やすいように 6km格子で分割された格子をまとめて 120km×80kmの単位で描画している。

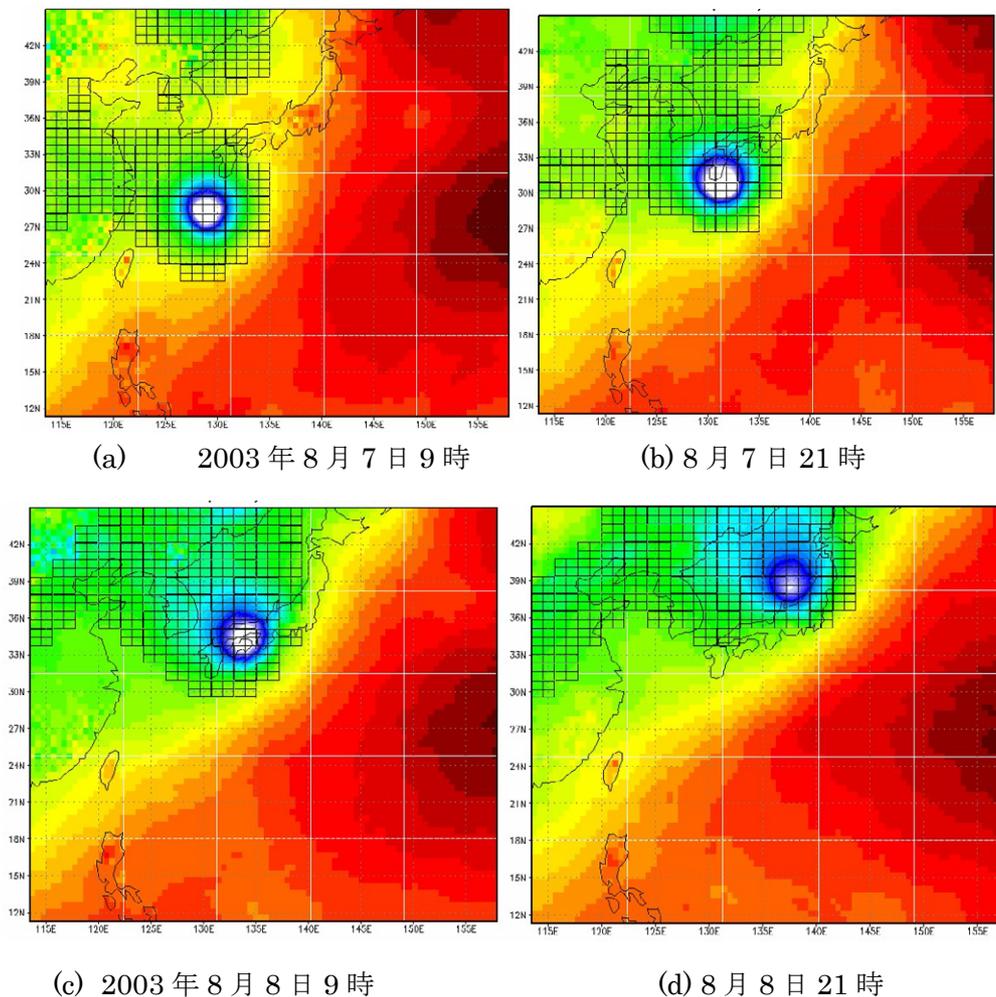


図1. 大気海洋結合モデルMSSGの大気コンポーネントMSSG-AにおけるAMRによるグリッド分割。(a)から(d)は、各時刻のシミュレーション結果であり、圧力分布と分割グリッド(黒で囲んだグリッド)を示している。グリッドが明示されていない領域は、未分割のグリッドで計算が実施され、水平解像度 56kmでシミュレーションを実行している。

#### (小森グループ)

本グループの研究目的は、①海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、温度制御風波乱流水槽を用いた海面蒸発水分フラックス計測実験を行い、海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、CGCM(Coupled General Circulation Model) と呼ばれる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、信頼性の高い予測結果も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行った。具体的には、気側で瞬間温度および瞬間流速の同時測定を行うことにより顕熱量を、液側での全熱量が気側での顕熱量、潜熱量および放射熱量の総和に等しいことから各熱量の収支を取ることにより潜熱量を、それぞれ定量的に評価した。その結果、風波気液界面を通しての熱の輸送速度を表す顕熱係数は風速とほぼ比例関係を示し、風速の増加に従って対流による熱輸送が促進されていることが明らかとなった。一方、水蒸気の輸送速度を表す潜熱係数は中風速域において風速に対する増加率が弱まる傾向が見られ、液側界面近傍での乱流渦の生成が中風速域において一旦抑制されることに起因していることが推測される結果が得られた。これらは、風波気液界面を通しての熱輸送量と風速の比例関係を仮定した従来のモデルが潜熱輸送に対しては成り立たないことを示唆している。そのため、気候変動の予測シミュレーションにおいて、大気・海洋間での熱交換量をモデル化する際には、海水面近傍での輸送機構を考慮する必要があることが明らかとなった。

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。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。本年度は、開発した手法を現実的な乱流雲シミュレーションに応用し、乱流による雲粒の衝突成長促進効果が持つインパクトを調べることを目的とした。本年度は、ある湿潤空気が京都府と滋賀県の境界に位置する比叡山を京都側から越えていく際に生じる乱流雲に対するシミュレーションを行った。ボリュームレンダリングによって雲を可視化した結果によると、比叡山上に鉛直方向に発達する乱流雲が再現されていることがわかった。また、その乱流雲によって、比叡山の京都側斜面に数十 mm/h という強い降雨が引き起こされることも明らかになった。さらに、乱流による雲粒の衝突促進効果を考慮しなかった場合と、考慮した場合の降雨の様子を比較した結果、乱流による衝突成長促進効果によって局所的には降雨強度が 20% 以上も強化されることがわかった。つまり、豪雨現象においては雲内乱流による衝突促進効果が大きな役割を果たすことが明らかになった。この衝突促進効果を考慮可能な本気象シミュレーション手法を用いることによって、豪雨の予測精度が向上することが可能になると期待される。

(矢部グループ)

平成 19 年度では、引き続き、高性能数値計算モデルの開発と気・液界面乱流構造の直接シミュレーションにおいて研究を行った。

立方球面座標において、四次精度のCIP有限体積計算法を提案した。この手法は、局所高

次再構築を用い、全球において完全な保存性を持っている。また、陽的なオイラー時間積分を使うことで、計算効率や並列化に優れている。移流及び浅水波のベンチマークテスト計算によって、四次精度を有することが確認できた。マルチモーメントによる高精度局所補間から、各表面に渡って、計算精度が落ちず、データ交換を正しく行っていることが確認された。図2には、Williamsonの山岳波標準テストの結果を示す。計算結果より、本手法は、スペクトル法や不連続Galerkin法などに比べても遜色ないことが分かる。今後、このモデルと前期開発したYin-Yang結合座標モデルの比較を行い、両者の長所を活かし、新型の全球保存結合座標系を検討する。

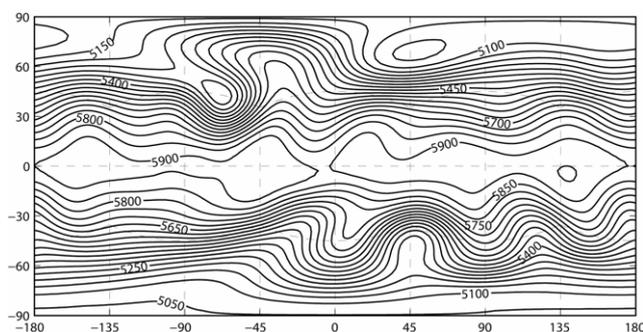


図2. The zonal flow over an isolated mountain on 32x32x6 cubed spherical grid. Shown is the height field after 15 days.

自由界面を含む乱流直接数値シミュレーションの並列計算コードを地球シミュレータ及びツバメ（東工大）スーパーコンピュータにおいてチューニングし、大規模並列計算に対してよい性能を得た。また、3次元チャンネル乱流において直接シミュレーションを行い、スペクトル法を対象に、各種の統計量について検証した。その結果を踏まえ、移流スキームの高精度化を図り、五次精度のスキームを導入した。図3には、チャンネル乱流の代表的な統計量を示す。スペクトル法の計算結果に良く一致していることが分かる。

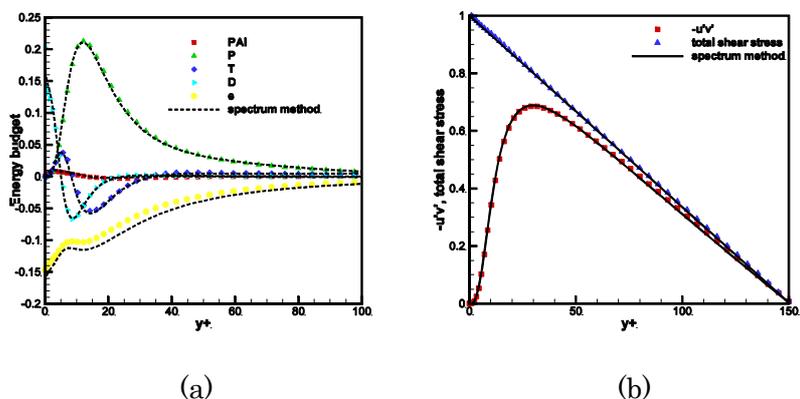


図3. Turbulent statistics of channel turbulence. (a) Turbulent kinetic energy budget, and (b) Reynolds stress and total shear stress.

(足永グループ)

平成19年度はUCSS(Urban Climate Simulation System)を用いて、首都圏を対象にして都市キャンपी層の効果を組み入れた数値シミュレーションを実施した。UCSS は建築研究所で開発された都市キャンピーモデルであり、都市キャンピー層の建物形態や人工排熱の効果を3次元的に取り扱うことにより都市域の熱、運動量の輸送量をより現実に近い形で定量化する。

解析領域を図4に示す。東西約1000km、南北約650kmの領域(Grid1、5kmメッシュ)、首都圏近辺(Grid2、500mメッシュ)の約80km四方の領域(Grid2)についてOne-Wayネスティング解析を行った。Grid2においてはUCSSを組み入れた計算を行うこととし、東京都都市計画GISデータよりメッシュ毎のグロス建ぺい率、平均建物高さ、平均建物幅等都市キャンピー幾何情報を算出すると共に、建物、自動車、工場等からの人工排熱の時空間メッシュデータを作成した。人工排熱の領域内推計値を表1に示す。

夏季の比較的高温な晴天日である2006年8月4日の計算結果について述べる。気温については、従来モデルの計算結果がAMeDAS観測値(9地点)より概ね低く、9地点の日中(10時から16時)の平均値は両者の間で2.7℃の差が見られた。一方、UCSSの場合は、AMeDASとの平均温度差が日中0.6℃以内となり、大幅な改善効果が現われた。夜間(0時から6時、20時から24時)の9地点の平均気温は、AMeDAS 24.9℃、従来モデル 23.3℃、UCSS 25.5℃となり、この場合もUCSSで良好な結果が得られた。大手町における日変化の事例を図5に示す。同日夕方における気温分布を図6に示す。東京・埼玉の都県境から北西部にかけて気温が高く、“V”字型に近い高温域が形成されている。海風により内陸部が高温化しているが、都市構造物が集中する都心部では恒常的な高温化傾向が見られる。これまで、今回のような詳細な解像度で首都圏の気温分布を再現した事例はほとんど見られない。最新の観測事例とも特徴がよく合致していることから、ヒートアイランド状況の予測に有効と考えられる。

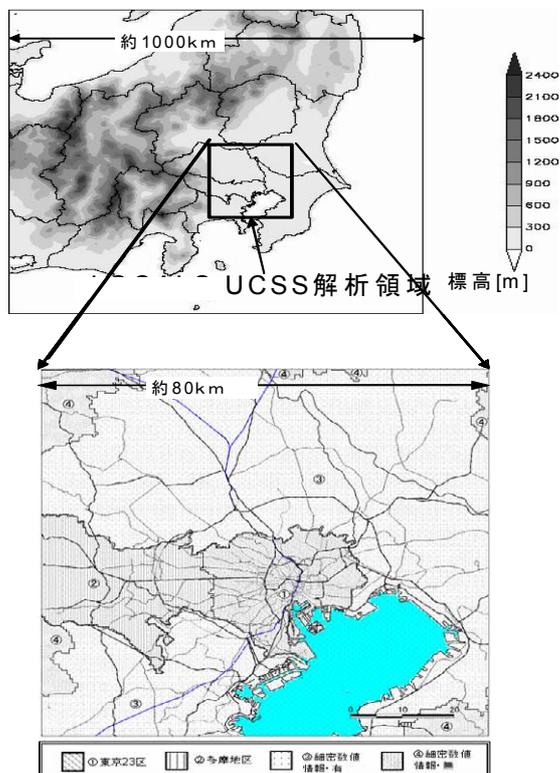


図4. 計算領域(上: Grid1、下: Grid2)

い高温域が形成されている。海風により内陸部が高温化しているが、都市構造物が集中する都心部では恒常的な高温化傾向が見られる。これまで、今回のような詳細な解像度で首都圏の気温分布を再現した事例はほとんど見られない。最新の観測事例とも特徴がよく合致していることから、ヒートアイランド状況の予測に有効と考えられる。

表1. 建物・人工排熱作成に利用したデータソース

	区分①、②	区分③、④	排熱量合計
建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>東京都都市計画GIS</li> <li>建物用途別・延床ランク別の排熱原単位</li> <li>住宅の排熱原単位</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>細密数値情報</li> <li>第2次、第3次従業者数</li> <li>夜間人口(国勢調査)</li> <li>工業系建物平均高さ*</li> <li>非住居系延床ランク別延床面積当たり排熱量*</li> </ul>	業務ビル 1991.0 TJ/day
			住宅 669.2 TJ/day
交通	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料消費量推定式</li> <li>H11道路交通センサス</li> </ul>		1972.7 TJ/day
事業所	<ul style="list-style-type: none"> <li>工業統計(3次メッシュ)</li> <li>石油等消費動向調査</li> <li>環境所一般廃棄物処理実態調査結果</li> <li>新エネルギー等導入促進基礎調査未利用熱エネルギー</li> <li>H17年度電力需要の概要</li> </ul>		製造系工場 2609.8 TJ/day
			清掃工場 277.8 TJ/day
			火力発電所 511.7 TJ/day

\*: 東京都内GIS集計結果より

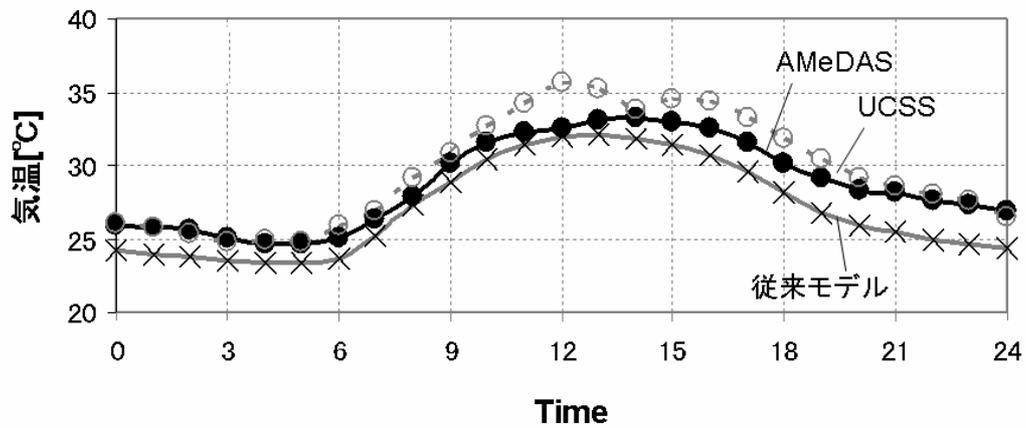


図5 気温の日変化(大手町、2006年8月4日)

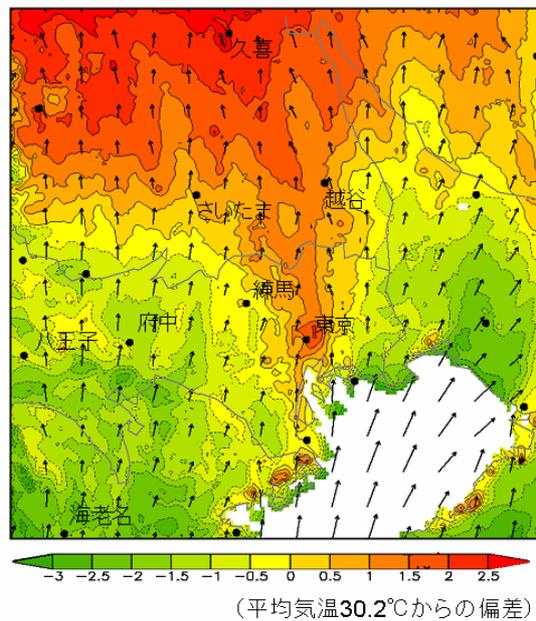


図6 気温分布(2006年8月4日18時)

### 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(独立行政法人海洋研究開発機構 グループリーダー)
- ② 研究項目
  - ・ 全球から都市スケールの、より高精度、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動的適応手法の導入を行う。また、大気海洋相互作用にお

る新たな交換手法の導入を行い、その影響を解析、検証する。

(2)「小森」グループ

① 研究分担グループ長:小森 悟(京都大学 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

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

高精度計算スキームCIP法の高度化と適用事例の検討。

- ・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(独立行政法人建築研究所 上席研究員)

② 研究項目

- ・首都圏における都市キャノピー幾何情報の整備
- ・都市キャノピーモデルを用いた関東地域の数値解析
- ・都市域の大気熱収支評価

## 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. Keiko Takahashi, Xindong Peng, Ryo Onishi, Mitsuru Ohdaira, Koji Goto, Hiromitsu Fuchigami and Takeshi Sugimura, Impact of coupled Non-hydrostatic Atmosphere-Ocean-land model with high resolution, High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean, K. Hamilton et al. (Eds.), Springer, New York, 2007.
2. Komori, S., Takagaki, N., Saiki, R., Suzuki, N., Tanno, K., “The effects of raindrops on interfacial turbulence and air-water gas transfer”,Transport at the Air Sea Interface - Measurements, Models and Parameterizations, eds. C. S. Garbe, R. A. Handler & B. Jahne, pp.169-180 (2007).

3. Takagaki, N., Komori S., "Effects of rainfall on mass transfer across the air-water interface", *Journal of Geophysical Research*, Vol.112, C06006, doi:10.1029/2006JC003752 (2007).  
S.Ii and F.Xiao: CIP/multi-moment finite volume method for Euler equations, a semi-Lagrangian characteristic formulation. *J. Comput. Phys.*, **222**, 849-871 (2007).
4. C.Chen and F.Xiao: Shallow water model on cubed-sphere by multi-moment finite volume method. *J. Comput. Phys.*, **227**, 5019-5044 (2008).
5. (in press)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.*
6. (in press) 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.*.
7. (in press) S.Yamashita, C.Chen, K.Takahashi and F.Xiao: Large scale numerical simulations for multi-phase fluid dynamics with moving interfaces, *Int. J. Computat. Fluid Dynamics*.
8. 大西 領, 小森 悟, 「乱流中における同一径粒子間の衝突因子のモデル化 (Modeling of the collision kernels on monodisperse particles in turbulent flows)」, 日本機械学会論文集B編, Vol.73, pp.1307-1314 (2007).
9. 大坪周平, 丹野賢二, 小森 悟, 「風波気液界面を通しての熱輸送と界面近傍の乱流構造との関連性 (Relationship Between Turbulence structure and heat transfer across the air-water interface in wind-driven turbulence)」, 日本機械学会論文集B編, Vol.74, pp.149-155 (2008).
10. 藤田彰利, 胡内章伸, 黒瀬良一, 小森悟, 「蒸発を伴う単一液滴表面を通しての物質と熱の移動に及ぼす相対湿度の影響 (The effect of relative humidity on mass and heat transfer across the surface of an evaporating droplet)」, 日本機械学会論文集B編, Vol. 74, pp.414-422 (2008).
11. 足永靖信、東海林孝幸、河野孝昭、地球シミュレータを用いた東京都心10km四方における高解像度のヒートアイランド解析、日本建築学会環境系論文集、第616号、pp. 67-74、2007.6.
12. 足永靖信、阿部敏雄、気象統計項目の経年変化データを用いた日本の16都市の地域性に関する統計的分類一年間日数および年間時間数による検討一、日本建築学会環境系論文集、第614号、pp. 65-70、2007.4