

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「災害予測シミュレーションの高度化」

研究終了報告書

研究期間 平成17年10月～平成23年3月

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)

§ 1 研究実施の概要

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－海洋－陸面－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 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。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かっ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する。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。この手法は従来オイラー型手法の 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)を取扱うために、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。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

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1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必要である。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することを主な目的とし、それを用いて災害予測の精度向上と予測可能性の限界にチャレンジするものである。

気象災害予測の精度向上への努力は、気象庁をはじめとするこれまでも多くの機関が取り組んできた課題であり、多くの成果が蓄積されている。しかし、これまでの延長上での予測シミュレーションでは、飛躍的な予測精度の向上は見込めない。というのも、気象・気候システムが複合的スケール現象の結果であるので、できるだけ現実に忠実なモデル化を行い、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必要があるからである。

気象災害として被害の大きい台風、集中豪雨や突風に着目した場合、災害予測シミュレーションの精度を向上させるためには、少なくとも以下の3つの課題の克服が必要不可欠であると考えられる。第一に、空間的にも、時間的にも広範囲の複合スケール現象を扱えるような、これまでに比類のない圧倒的な高速計算が可能である全球一領域対応非静力学・大気－海洋－陸面－海氷結合シミュレーションコードの必要性である。第二に、社会生活に直接の影響をもたらすほどの局所的な気象現象を対象とする高解像度(数mから数kmの水平解像度)シミュレーションが必要な降雨過程、および大気、海洋、陸面におけるマルチスケール・マルチフィジックス相互作用が表現可能な要素モデルの確立、第三に、高精度シミュレーションに必要な不可欠な高精度・高安定な数値計算手法の確立である。

上記の3つのアプローチは、これまでに個別の科学的対象、個別の学問分野において、多くの知見と成果が集積されてきた。しかし、災害予測の予測精度向上のために、その成果を十分に反映した系統的な研究開発はほとんど例を見ない。気象、気候災害予測という社会的インパクトが非常に高いテーマにおいて、従来、個別学問領域に限られてきた優れた成果を、有機的に、かつ密接な情報交換を通して結集し、災害予測精度の向上と予測可能性について徹底的な検討を行うことは、科学的にも意義があることはもちろん、本プロジェクトの非常にユニークな点である。

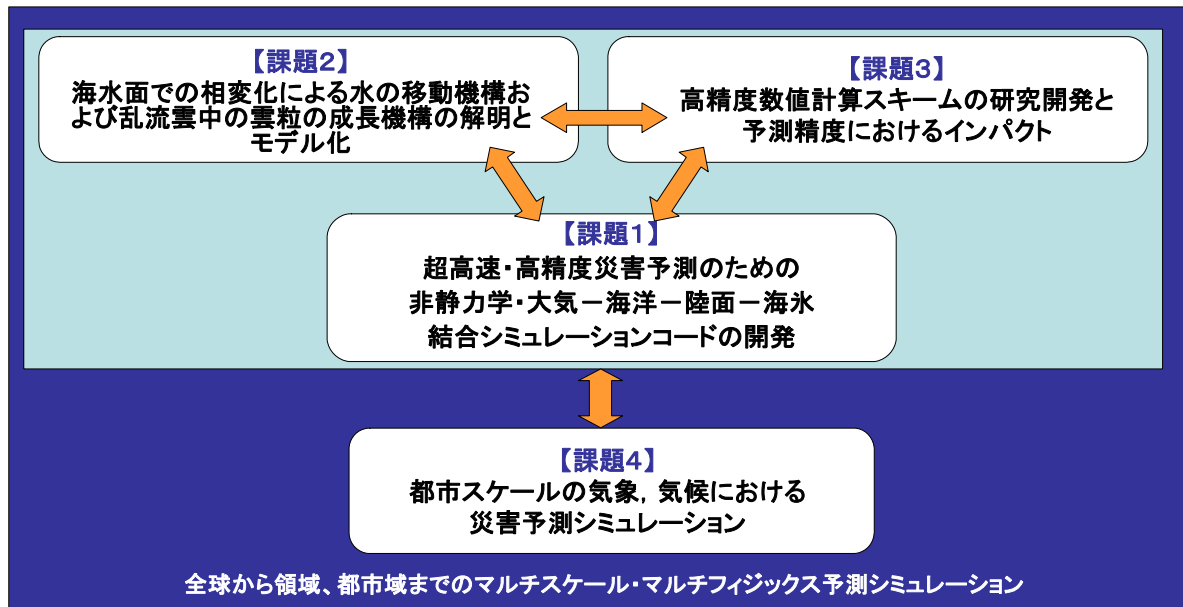
本プロジェクトでは、上記3つのアプローチの必要性とそれらアプローチの結合の重要性をよく理解し、それぞれの分野で大きな成果を挙げてきた研究者との共同研究のもとにプロジェクトを構成する。第一の課題を、(独)海洋研究開発機構地球シミュレータセンター 高橋桂子、第二の課題を、京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻 小森悟教授、第三の課題を、東京工業大学工学部機械工学科 矢部孝教授を主たる担当研究者として本プロジェクトを遂行する。

さらに、近年特に注目されている都市ヒートアイランド現象に代表される都市特有の現象に起因する都市型集中豪雨のような現象も、まさにマルチスケール・マルチフィジックス現象としてとらえることができる。とりわけ、都市における災害は非常に大きな被害をもたらす場合が多く、減災のためにはこれまで以上にきめ細かい情報提供の必要性がある。また、都市気象、気候は、局所的な都市部のみを対象とするだけでは災害予測にむすびつけることが困難であることが指摘されており、さらには、湾内や外洋の影響を受けていることも指摘されている。そこで、社会的要請の高い都市域の高精度の災害予測を目指す。本課題を第四の課題とし、上記3つのアプローチの研究開発と密接に情報交換を行いながら、(独)建築研究所環境研究グループ 足永靖信 上席研究員を主たる担当研究者として進める。

上述したように本プロジェクトは、これまで学問的にも、応用技術の確立においても必要性が認められながら実質的な共同研究が現実のものとなつてこなかった学際的な共同研究体制を実現するものである。以上の各課題の成果を有機的に統合することによって、全球から都市スケールまでを包括的に取り扱うことができるシミュレーションが可能となり、高精度の災害予測という具体的な研究開発対象を通して、新しい学際的な工学的学問領域を切り開くものである。全球から、日本域、都市スケールまでの災害現象が複合的な複雑相互作用に起因することを考えあわせると、災害予測精度の向上は、少なくとも上記のいずれの課題の成果を欠いても達成できない。本プロジェクトの遂行により、災害予測精度の向上のみならず、どのような現象が、なぜ、またどのように予測可能

なのかについての、各分野からの踏み込んだ検討と議論が可能となり、マルチスケール・マルチフィジックス気象、気候現象に対する物理的な深い洞察と理解が得られ、今後の科学的な予測シミュレーションにおいても飛躍的な進歩をもたらすものと期待できる。

下図に、本プロジェクトの共同研究体制の概要を示す。



本プロジェクトの共同研究体制

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

<プロジェクト全体>

年度ごとのコメントおよび中間評価におけるアドバイスに従って、予測精度そのものの向上というより、むしろ、予測を支える基盤的な知見の蓄積に、主軸をおいてプロジェクト全体を推進した。

<高橋グループ>

超大規模かつ超高解像度予測シミュレーションに必要な新しい格子系や、大気相互作用などのコンポーネントモデルの開発、高精度計算スキームとその物理的性能評価は、当初予定していた以上の様々な検討を追加した。スカラマシン上での超並列計算を実現するための計算性能最適化、および都市スケールのシミュレーションにおける乱流構造の解明に向けた取り組みを新たに開始した。

<小森グループ>

現有の小型風波水槽では 20m/s 程度の風速しか再現できず、台風下で発生し得る風速域を網羅することができなかったため、より高風速域の風波乱流場を再現できる高速風洞水槽を作製し、運動量輸送に関する計測を開始した。

<矢部グループ>

本研究計画の実施によって CIP 系の数値手法の地球環境流体モデルへの適性について確認することができた。将来、これらのスキームによる高性能数値モデルの構築は当分野に大きく資するものと確信している。また、本研究で構築した自由界面多相流を直接シミュレートするための大規模並列計算モデルは、界面乱流構造と輸送機構の数値シミュレーション研究ツールの基盤として確立した。次世代スーパーコンピュータ運用によって、より広範囲の風速と波長に対する大規模数値計算を実施し、画期的な研究成果が期待できる。

<足永・桑沢グループ>

「都市スケールの気象、気候における災害予測シミュレーション」において、実験による都市キャノピーの熱特性の研究をより推進するため、関連機器を追加で措置し、下記の検討を実施した。

- ・光学的可視化手法であるシュリーレン法を都市空間の熱的問題に初めて適用し、温度成層流において建築物が存在する場合の、循環流に伴う熱拡散状況を高速高解像度カメラ(1,280×1,024, 露光時間:1 μ s～5s)を用いて高分解能で可視化することに成功した。

- ・ヒートアイランド対策として今後大量導入が見込まれる波長選択性材料による熱的影響を調べるため、建物群模型を屋外に設置し、分光放射計(波長範囲:350-2,500nm, 波長精度:1nm)を用いて都市形状の分光放射特性を明らかにした。

§3 研究実施体制

(1)「高橋」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
高橋桂子	独立行政法人海洋研究開発機構	プログラムディレクター	H17.10～H23.3
馬場雄也	独立行政法人海洋研究開発機構	研究員	H20.4～H23.3
木田新一郎	独立行政法人海洋研究開発機構	研究員	H20.10～H23.3
杉村剛	独立行政法人海洋研究開発機構	研究員	H17.10～H21.3
彭新東	独立行政法人海洋研究開発機構	研究員	H17.10～H20.3
大平満	独立行政法人海洋研究開発機構	研究員	H17.10～H20.3
草野完也	独立行政法人海洋研究開発機構	プログラムディレクター	H17.10～H18.3
足立武司	三菱重工株式会社	顧問	H17.10～H23.3
後藤浩二	日本電気株式会社	社員	H17.10～H23.3
渕上弘光	株式会社 NEC 情報システムズ	社員	H17.10～H23.3

② 研究項目

- ・シミュレーションコードの高度化
 - 力学過程の高度化 (高橋, 馬場, 木田, 渕上)
 - 物理過程の高度化 (高橋, 馬場, 木田, 後藤)
 - 新規モデルの開発と導入 (高橋, 大平, 杉村, 馬場, 木田)
 - 計算性能最適化 (高橋, 後藤, 渕上)
 - 超大規模シミュレーションの実施と検証 (高橋, 後藤, 渕上)
- ・気象・気候事例のシミュレーション実験と予測精度の検証
(高橋, 彭, 大平, 杉村, 馬場, 木田, 後藤, 渕上, 足立)
- ・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開発
(高橋, 後藤, 渕上)
- ・次世代スーパーコンピュータ向け計算性能最適化
(高橋, 彭, 大平, 杉村, 馬場, 木田, 後藤, 渕上)
- ・都市気象を特徴付ける乱流場の特性についての研究
(馬場, 高橋)
- ・全球 AMR 実装と応用・計算性能最適化
(高橋, 馬場, 木田, 後藤, 渕上)

(2)「小森」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小森悟	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	教授	H17.10～H23.03
黒瀬良一	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	助教授, 後に准教授	H18.04～H23.03

伊藤靖仁	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	助手, 後に助教	H17.10～H19.03
今城貴徳	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	博士後期課程 学生	H18.04～H19.03
大西領	独立行政法人海洋研究開発機構	研究員	H17.10～H23.03
大坪周平	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	博士後期課程 学生	H19.04～H20.03
高垣直尚	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	博士後期課程 学生, 後に助教	H20.04～H23.03
藤田彰利	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	博士後期課程 学生	H21.04～H22.03
鶴飼健弘	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	修士課程学生	H21.04～H22.03
鈴木直哉	京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻	博士研究員	H17.10～H18.03

②研究項目

- ・風洞実験による風波気液界面を通しての水・潜熱の移動機構についての研究
(小森, 伊藤, 高垣, 大坪, 鈴木)
- ・直接数値シミュレーション(DNS)による風波気液界面を通してのスカラの輸送機構に関する研究
(小森, 黒瀬, 今城, 鶴飼)
- ・飛散単一液滴の蒸発および潜熱移動に関する研究
(小森, 黒瀬, 藤田)
- ・開水路実験による降雨が気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす影響に関する研究
(小森, 伊藤, 高垣)
- ・数値シミュレーションによる雲粒の衝突成長に関する研究
(小森, 大西)
- ・雲粒成長の素過程が雲の発達に及ぼす影響に関する研究
(小森, 大西)

(3) 矢部グループ(東京工業大学)

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
矢部孝	東京工業大学理工学部	教授	H17.10～H23.3
肖 鋒	東京工業大学大学院総合理工学研究科	准教授	H17.10～H23.3
尾形陽一	東京工業大学理工学部	助手	H17.10～H20.3
尾形陽一	広島大学工学部	准教授	H20.4～H23.3
李興良	東京工業大学大学院総合理工学研究科	研究員	H18.1～H19.3
松永栄一	東京工業大学理工学部	研究員	H18.4～H23.3
杉村 剛	地球シミュレータセンター	研究員	H20.4～H23.3
伊井仁志	東京工業大学大学院総合理工学研究科	博士研究員	H17.10～H20.3
赤穂良輔	東京工業大学大学院総合理工学研究科	博士研究員	H18.4～H21.3
山下 晋	東京工業大学大学院総合理工学研究科	支援協力員	H17.10～H22.3

②研究項目

- ・特性 CIP 法及びソロバン格子 CIP 法の改良
(矢部, 尾形, 松永, 杉村)
- ・ソロバン格子 CIP 法による全球モデルの開発
(矢部, 杉村, 松永)
- ・複雑形状(地形, 海岸線など)の取扱い

- (矢部, 杉村, 肖, 伊井, 赤穂)
- ・CIP 有限体積法に基づくモデルの研究開発
(肖, 李, 伊井, 赤穂)
- ・自由界面多相流モデルの開発
(肖, 山下)
- ・モデルの並列化・最適化
(山下, 肖, 高橋)
- ・モデルの検証・応用
(肖, 山下, 高橋)

(4)「足永靖信・桑沢保夫」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
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	H17.10～H23.3
桑沢保夫	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	上席研究員	H21.4～H23.3
河野孝昭	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	専門研究員	H17.10～H22.6
伊藤大輔	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	専門研究員	H19.10～H21.8
阿部敏雄	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	専門研究員	H17.10～H19.8
平野洪賓	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	専門研究員	H18.10～ H20.12
マーク・マセ ソン	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	研究支援員	H18.4～H19.4
東海林孝幸	独立行政法人建築研究所 環境研究グループ	研究支援員	H18.4～H19.4
ヴタンカ	独立行政法人建築研究所 (The Research Institute of Sea and Island Management, Vietnam)	客員研究員	H18.4～H19.4

② 研究項目

- ・実験設備の整備と実験の実施
(足永, 阿部, 伊藤)
- ・観測, 実験データ取得
(足永, 阿部, 伊藤)
- ・実験結果の検証
(足永, 東海林, 河野)
- ・都市キャンピーモデルの設計と基本構築
(足永, ヴタンカ, 河野)
- ・都市キャンピーモデルの構築と改良
(足永, 平野)
- ・都市スケール数値シミュレーションの実施と災害予測応用への検討
(足永, 東海林, 河野)

§ 4 研究実施内容及び成果

4. 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((独)海洋研究開発機構 高橋グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

(1-1) シミュレーションコードの高度化

(1-1-1) 力学過程の高度化

力学過程の数値計算法を高精度化することにより、シミュレーションの高速化と数値計算の精度を向上することが可能となった。さらに、これらの精度が向上することで、物理過程において計算される降雨過程の結果も改善することが明らかとなった。

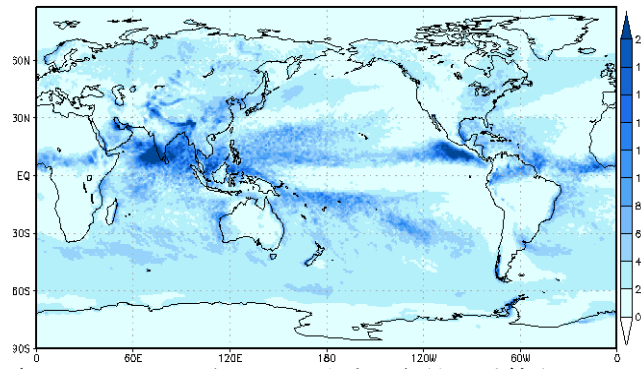
■ 水平方向における音波の取り扱いの改良と高速化

マッハ数が低い流れにおいて圧縮性流体を直接解こうとすると、時間刻み Δt は流速よりも音速に支配される。一般的に $c \Delta t / \Delta x < 1$ の条件を満たさなければ圧縮性流体を安定的に計算できないことが知られている。

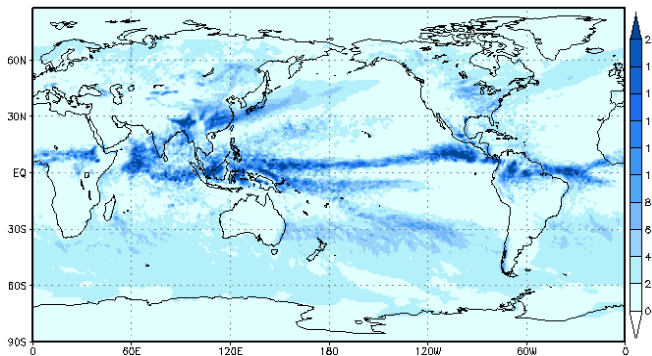
本研究では、方程式を保存形で取り扱い、特性波の伝播に対して2次の時間精度を持ち、安定な解法を都市スケールの計算に適用し、高速計算を実現した。

■ トレーサ移流計算における TVD 型計算の導入

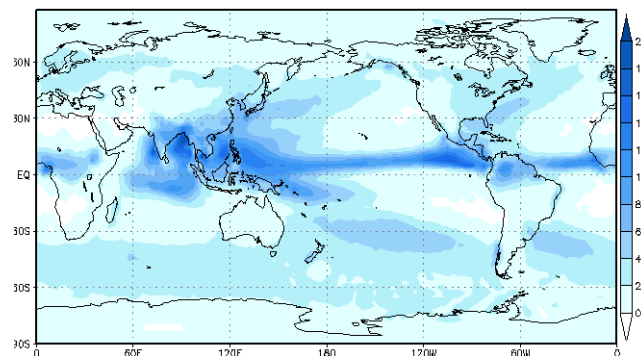
大気大循環コンポーネント MSSG-A には、Wicker-Skamalock5次風上差分スキーム、3次精度 ENO スキーム、2次精度 WAF スキーム、2次中心差分スキームなど複数の移流スキームを実装した。時間方向へは、変動が遅いモードと速いモードに分離して解く time-split 法を用いた。遅いモードについては、3次 Runge-Kutta 法を用い、速いモードについては、HE-VI 法を用いている。これらの移流スキームをトレーサの移流スキームとして使用し、比較検討した。その結果、微物理過程における移流計算では、トレーサの相変化による不連続な変化が数値振動として負値を発生する。負値の発生を回避するために、3次精度 ENO スキームや2次精度 WAF スキームが有効であることが明らかとなった。負値の発生を回避することにより、各変数の値が物理的に正しい意味を持つことを保証するだけでなく、降雨平均場の再現性も向上した。



(a) 5th W-S スキーム(トレーサ移流で負値が計算されるスキーム)



(b) WAF スキーム(トレーサ移流で負値を回避するスキーム)



(c) CMAP (観測)

図 4.1.1 6 月, 7 月, 8 月の降水分布の比較

(1-1-2) 物理過程の高度化

物理過程における数値計算法を高精度化することにより、物理過程において計算される降雨過程の結果が改善することが明らかとなった。物理過程モデルの高度化だけでなく、その数値計算手法も高精度化する必要性が明らかとなった。

■ 水平方向の計算精度と物理現象の高度化

3次元でのスコールライン実験におけるスコールラインの組織化を対象として、数値計算手法の高精度化と物理現象の再現性の関係について調べた。

(1-1-3) 新規モデルの開発と導入

数値計算法を高精度化すると同時に、物理モデル自体を高度化することも、予測精度を向上するためには必要不可欠である。本研究では、都市スケールの予測に大きな影響を与える地表

面と建物との放射過程モデルの高度化に着目し、3次元放射モデルを新たに開発した。3次元放射モデルと MSSG の大気コンポーネントを連成して、接地境界層の大気の温度をシミュレーションし、そのインパクトを解析した。

■ 3次元放射・輻射モデルの開発、および壁面形態情報の計算手法の開発

都市域における3次元放射の影響については、重要性が指摘されているにも関わらず、精確なモデルが存在しないため、ヒートアイランド等の都市域特有の現象の機構解明にはいたっていない。数 m の水平解像度で都市スケールの熱輸送問題を扱うには、ビル間の3次元放射・輻射を考慮することが必要不可欠である。ビル間の3次元放射・輻射を扱うことが可能な、計算精度のよい3次元モデルを新たに開発し、その精度を検証した。また、3次元放射・輻射計算、日陰計算に用いるための、ビル壁面間の形態情報を精度よく計算する手法を開発した。さらに、ここで作成する3次元放射伝熱及び保水関連プログラムを MSSG-A に組み込み、MSSG-A との連成計算によって、ヒートアイランド現象において3次元放射の影響を評価する。特に、高反射率塗装などの影響を考慮する場合を念頭に、分光反射率の波長依存性を考慮した波長帯域を分割した放射モデルにする必要性から、新たに各波長帯域からの射度の合計を壁面に与えて、壁面温度計算を行う。放射係数 ε を各波長帯域の放射係数に分割することによりその温度で定まる全放射エネルギーを各波長帯域に分配するモデルを開発した。

(1-1-4) 計算性能最適化

大気コンポーネント(MSSG-A)においては、主に、

- 最内側ループのベクトル化
- マイクロタスクのオーバーヘッドを削減するためのループ融合の実施
- インライン展開によるベクトル化の促進
- 依存計算のループ外への移動
- サブルーチン間における処理を移動
- サブルーチンの統合
- ライブラリ関数の計算アルゴリズム最適化
- 通信部のまとめによる通信効率の向上
- マイクロタスク優先順位の整備

の最適化手法により、計算性能の向上を行った。下記の表は、物理過程部分における計算性能最適化により達成した結果である。

表 4.1.1. 物理過程の最適化前後の計算性能

各処理	実行時間 [sec]	
	最適化前	最適化後
tendency の 0 クリア	0.37	0.37
地表面温度を決定	0.04	0.04
subfield 変数計算	4.48	3.50
微物理	24.91	24.91
放射過程	4.17	3.48
地表フラックス	7.10	0.86
陸面過程	14.25	0.84
出力	0.18	0.11
合計	55.49	34.10

海洋コンポーネントにおいては、特に以下の項目についての計算性能最適化を行った。

- 2次元ポアソンソルバにおける温度計算、塩分計算と密度計算のオーバーラップの軽減
温度、塩分の計算(移流項、拡散項の計算とLeapFrogの時間積分)とUNESCOによる密度の計

算は、依存関係がないので、温度、塩分の計算と AMGCG の計算とをオーバーラップして計算することが可能である。そこで、ノード内の 1CPU で AMGCG の計算をし、その計算と平行して 7CPU で温度、塩分の計算と密度の計算を行うようにした。測定条件として北太平洋を解像度 15,360x7,680 (1.39km)、ノード数 498 で実行した。オーバーラップをしない場合、2次元ポアソンソルバの実行時間は 247.323sec、温度、塩分の計算は 103.634sec となり、全体の実行時間は 362.267sec であった。オーバーラップをした場合には全体の実行時間は 257.951sec であった。この時間は、オーバーラップをしない 2次元ポアソンソルバの実行時間にほぼ等しいことから、オーバーラップ計算をすることで、温度、塩分の計算コストが 2次元ポアソンソルバの計算コストに隠蔽されたことになる。よって、約 30% の計算コストの向上が達成できた。

● 陸の演算の削減

従来の海洋コンポーネントは、主に 1次元領域分割法をもちいていることと、高いベクトル効率を達成するために、本来計算する必要のない陸の計算をすべて行い、計算後にマスク処理を行っていたモデルが多い。1次元領域分割、あるいは並列化をそれほど必要としない場合には、一分割領域に陸と海が混在するため、従来のマスク処理による計算は、ベクトル化効率による計算性能向上のほうがはるかに支配的であるため、陸部分の無駄な余剰計算とマスキング手法は有用であった。しかし、高い並列計算を実現するための 2次元領域分割の場合には、対象とする計算領域が、すべて陸となる場合がある。例えば、北太平洋を 256 ノード (16x16) で実行する場合、48 ノード (18.75%) の計算領域がすべて陸であった。また、512 ノード (32x16) で実行する場合には、114 ノード (22.26%) の計算領域がすべて陸であった。そこで計算対象領域が、すべて陸となる計算領域を、あらかじめ特定することで、無駄なノード確保と演算を削減するようにコードを修正した。これにより、例えば 640 ノード (32x20) では 142 ノードの計算領域がすべて陸であるため、実際には、498 ノードで実行することが可能となった。

● MSSG の計算性能高度化

各コンポーネントの計算性能最適化を行った後、大気・海洋の両コンポーネントを結合したコードの計算性能を測定した。大気・海洋結合モデルで実行した場合における結合部分の時間コストは 0.1%未満である。また、大気と海洋コンポーネントの計算時間はそれぞれ 44,169sec、2,191sec である。従って、大気・海洋結合モデルの計算時間の 95.3%が大気の計算時間である大気、海洋それぞれが同じ解像度の場合には、この計算コスト比率は変わらない。

大気・海洋結合モデルの MFLOPS 値は 3565.7MFLOPS で、ピーク性能比 44.6%である。また、大気と海洋コンポーネントの MFLOPS 値はそれぞれ、3626.0 および 1979.8MFLOPS である。これらの測定結果を下記の表 4.1.2 にまとめる。

これらの計算性能最適化を行ったコードを用いた場合には、以下の計算が地球シミュレータ上で可能であることを確認した。

- ・ 全球大気、水平解像度 5.5km、鉛直 32 層の解像度で、72 時間 (3 日間) 積分を、512 ノードを使用して、約 3 時間で実行可能であり、
- ・ 全球水平解像度 11km、鉛直 64 層と日本領域水平 2.78km、鉛直 64 層を領域結合し、日本領域において大気海洋結合 (水平 2.78km、鉛直 64 層) で、全球と領域を同時に計算した場合、120 時間 (5 日間) 積分を、512 ノードを使用することで、約 2 時間で終了することができる。

表 4.1.2 地球シミュレータ上で計測した大気、海洋、結合モデル MSSG 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	—

(1-1-5) 超大規模シミュレーションの実施と検証

高精度の予測に耐えうるシミュレーションコードに必要である高精度計算手法、および都市域の気象予測に必要な新たな物理スキームを新たに導入し、大気、海洋、それぞれのコンポーネントに対して超大規模シミュレーションを実施した。

■ 大気コンポーネント MSSG-A を用いた水平解像度 1.9km の非静力学・雲解像・全球大気シミュレーション

メモリやデータ構造の使い方、超並列性能などを含む計算性能全般を地球シミュレータ上において最適化した現在の MSSG コードを用いて、通常の使用限度である地球シミュレータ 512 ノードを最大限に使用可能な解像度を検討した結果、全球 1.9km 水平解像度、鉛直 32 層でのシミュレーションが可能であることがわかった。

水平 1.9km、鉛直 32 層(約 50 億グリッドポイント)の超大規模な全球大気のシミュレーションは世界的に前例がないため、現実的な地形を設定して、可能な限り長期積分をし、つまり、低気圧および高気圧の平均寿命以上、かつ、熱帯域や欧州からの気象の変化の伝播が日本域に伝わる 5 日以上から 15 日程度のシミュレーションを行い、波動伝播特性や気象現象の再現などの精度について、その特長と限界を同定することを目的にシミュレーションを開始した。18 年度末までに 3 日間の積分を完了した。現時点での結果からは、前線構造に沿った降雨分布や、日変化と地形に伴う降水分布などがとらえられていることを確認した。

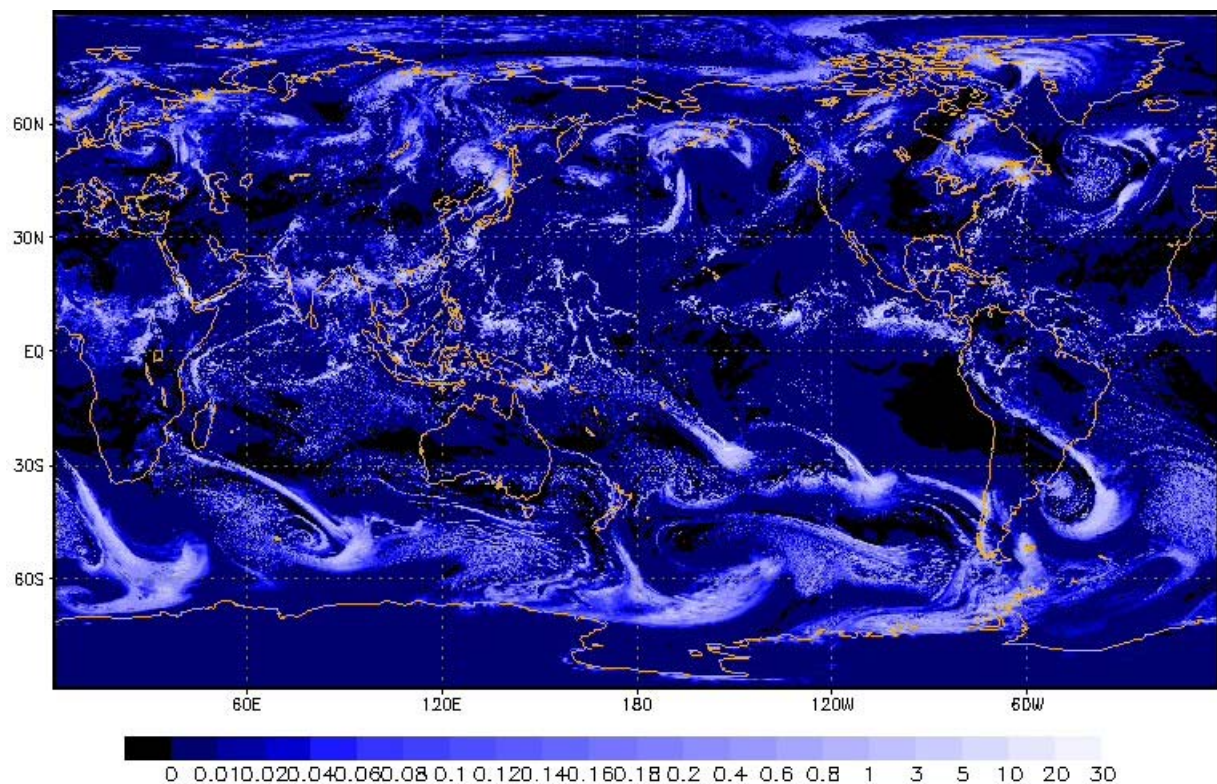
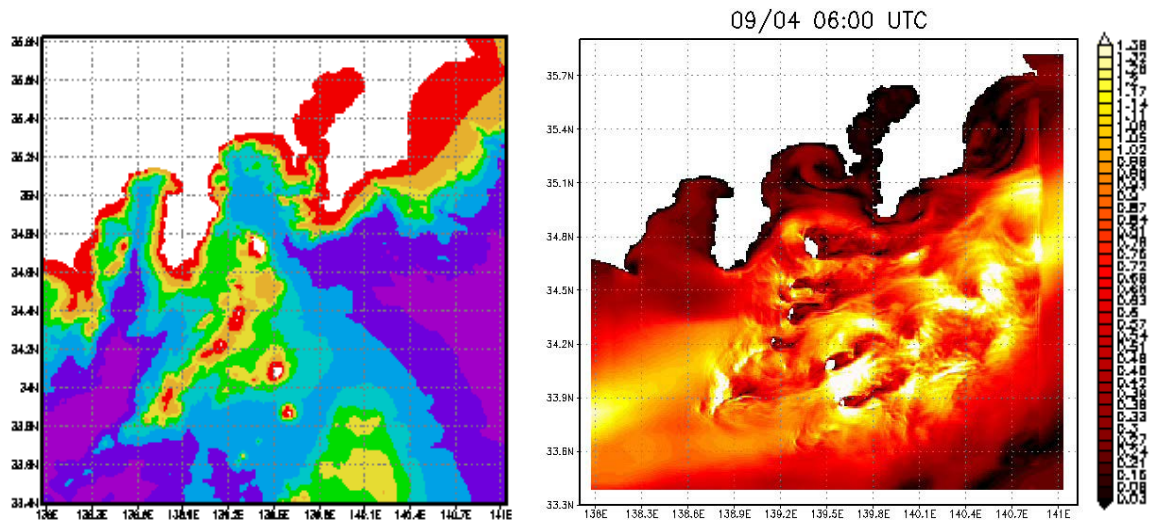


図 4.1.2 大気全球 1.9km シミュレーション結果:2 日積分後の降水量分布 (単位: mm/h)

■ 海洋コンポーネント MSSG-O による外洋(黒潮)と湾内(東京湾, 相模湾, 駿河湾)流れの再現

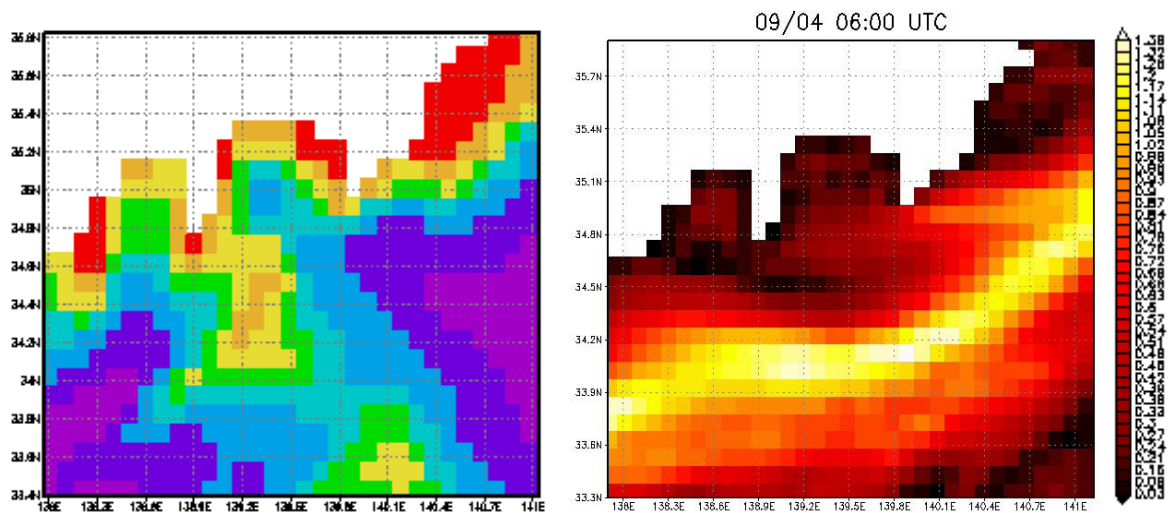
大気コンポーネント(MSSG-A)との結合シミュレーションにおいては、100m オーダーでの水平解像度でのシミュレーションを前提としているので、海洋コンポーネント(MSSG-O)においても 100m

オーダーでの再現シミュレーションを実行し、物理的性能を評価しておく必要がある。図 4.1.3 は、水平 750m 解像度での MSSG-O を用いたシミュレーション結果、図 4.1.4 は水平 11km 解像度でのシミュレーション結果である。水平 750m の水平解像度であり、海岸線や海底地形が詳細に表現でき、島や湾も解像可能である。また、海岸線と海底地形が詳細になったことに起因して、流れ場が劇的に変わる。島々の存在は、流れの下流方向に剥離渦を形成し、岬の先端からも剥離渦が形成されることを確認している。これらの渦の存在は、海表面温度の分布や流れ場の違いを生起する原因の1つである。数 100m のオーダーの水平解像度と数 km の水平解像度のシミュレーション結果とのドラスティックな違いは、雲の生成過程や降雨分布に大きな影響を与える可能性がある。



(a) 海岸線と海底地形の深さ分布 (b) 2003 年 9 月 4 日日本時間 15:00 の海表面速度分布

図 4.1.3 水平解像度 750m, 鉛直 41 層での MSSG-O を用いたシミュレーション結果.



(a) 海岸線と海底地形の深さ分布 (b) 2003 年 9 月 4 日日本時間 15:00 の海表面速度分布

図 4.1.4 水平解像度 11km, 鉛直 41 層での MSSG-O を用いたシミュレーション結果.

(1-2) 気象・気候事例のシミュレーション実験と予測精度の検証

計算精度と計算性能を向上した MSSG を用いて、全球スケールから都市スケールまでの異なる

時空間スケールの現象、全球の降雨現象、台風の進路や強度および梅雨時の集中豪雨に対して予測、再現シミュレーションを行い、シミュレーションコードの有効性と妥当性を検証した。

■ 大気コンポーネント MSSG-A を用いた夏季(6 月, 7 月, 8 月)の統計的降雨分布の再現シミュレーション

近い将来における季節予測シミュレーションを念頭に、その最初のステップとして、夏季(6 月, 7 月, 8 月)の降雨分布を再現するシミュレーションを行い、平均場を観測結果と比較した。シミュレーション結果は観測値と概ね一致している。特に、再現が困難とされるベンガル湾域の降雨分布は、同程度の解像度の他のモデルと比較すると、よく再現されている。しかしながら、40km の解像度の夏季の降水平均場において、陸面上、特に東南アジアから中国にかけての降雨量が少ない傾向があること、日本の南の海上での降雨量が少ないことが挙げられる。これらは、境界値データとして与えている海面表面温度や陸表面温度の精度の問題もあることから、検証を継続してゆく必要がある。水平 11km の夏季の降雨量予測実験は継続中である。水平 11km の解像度の 6 月のみの平均降雨量の場合、水平解像度 40km のシミュレーション結果および 6 月の CMAP 降水量分布と比較すると、水平 11km の解像度の降雨分布はノイズと考えられる領域も見られるが、ベンガル湾域、東南アジア域、日本域において、降雨分布パターンの改善が認められる。このことは、雲微物理モデルと解像度とのマッチングの妥当性を考慮することが必要であることを示唆している。

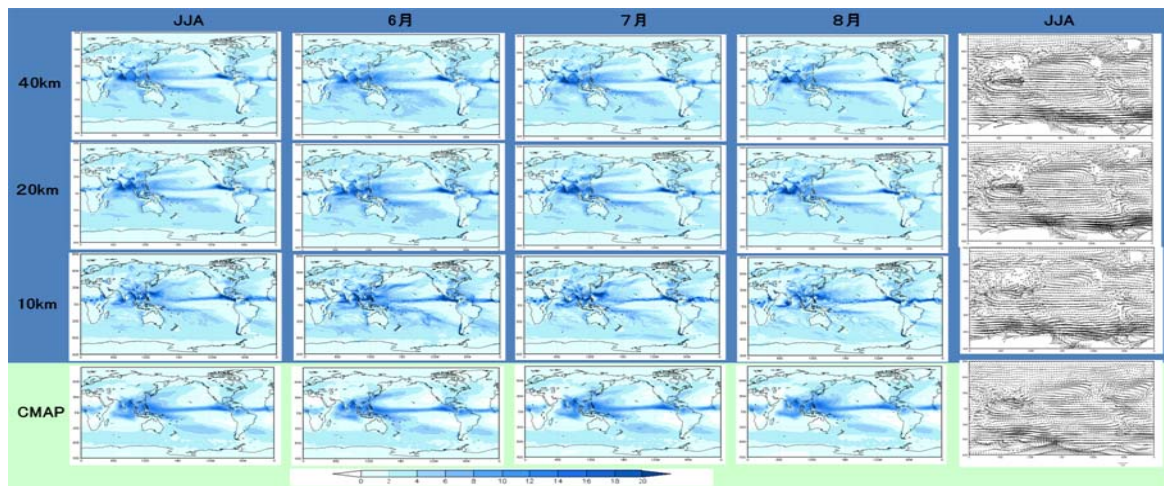


図 4.1.5 水平解像度 40km, 20km, 10km の季節予測シミュレーション結果

■ 2006 年九州豪雨を事例とする予測

梅雨時の集中豪雨の予測シミュレーションを念頭に、本研究で導入した CIP-CSLR の効果を検証する目的で、2006 年 7 月 20-25 日九州地方の豪雨(図 4.1.6)を事例として再現シミュレーションを行った。

図 4.1.7 は CIP スキームと2次中央差分スキームによる水蒸気移流計算の全球分布と九州地方 21-24 日の累積降水量の比較である。全球の水蒸気分布、および豪雨時期の積算降水分布においても、高精度の移流スキーム CIP-CSLR を使用したシミュレーション結果のほうが、より現実に近い結果を得た。このことは、移流スキームの精度が、予測シミュレーションの精度向上のために重要であることを示している。

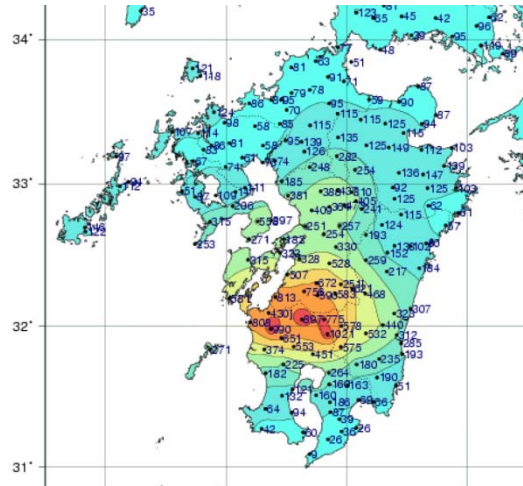


図 4.1.6 21-24 日九州地方の積算降水量(mm)

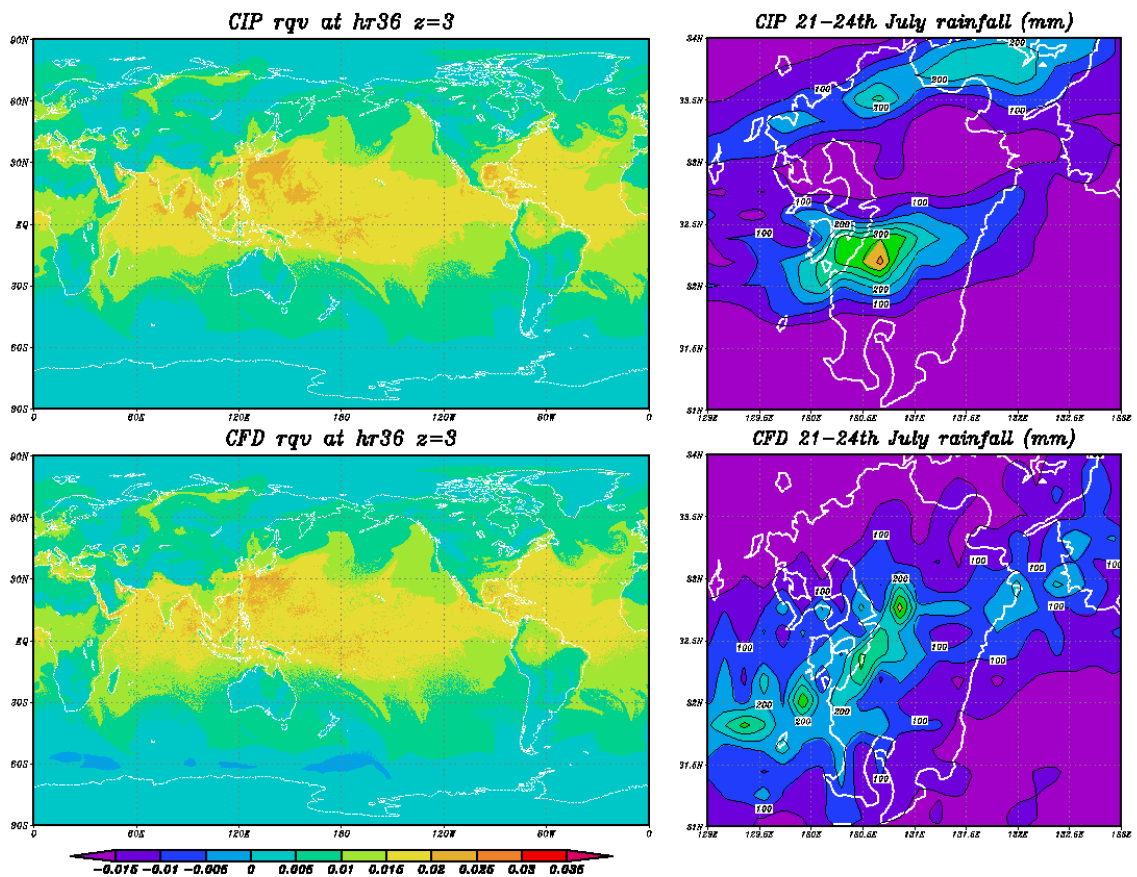


図 4.1.7 開始 36 時間後の水蒸気全球分布と 21-24 日九州地方の降水積算(mm)．CIP 法(上段)と中央差分(下段)によるシミュレーション結果

■ 台風の進路と強度の再現・予測シミュレーション

MSSG を使用した台風の予測シミュレーションでは、日本領域 2.78km の水平解像度で全球 11km 水平解像度との領域連成かつ大気と海洋との連成シミュレーションを実施した。その予測精度は他の気象モデルの結果に比較して遜色ない結果であることを確認した。図 4.1.8 に台風のリアルタイム予測シミュレーション結果の一例を示す。

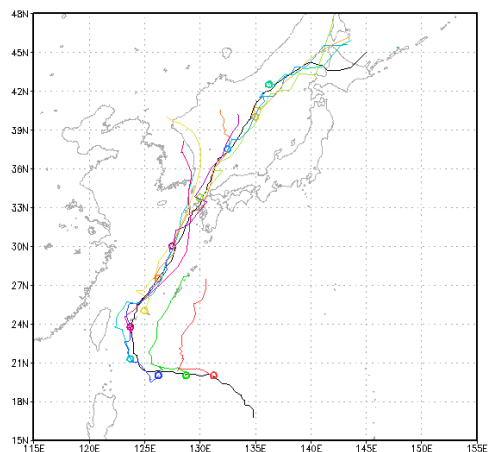


図 4.1.8 2006 年台風 13 号 9 月 12 日から 18 日まで、12 時間ごとにリアルタイムで 72 時間予測シミュレーションを実施した結果。(○は台風の中心に対応する最低気圧を示す観測データの初期位置、色は 12 時間ごとの時間に対応。○と同じ線は、リアルタイム予測シミュレーションで得られた進路予測結果、黒線は気象庁から最終的に発表された台風の進路(ベストトラック)を示す。)

MSSG の予測精度の検証を行うために、すでに観測から得られているベストトラックを参照して、転向点から離れた位置に初期値を設定した時点から事例予測シミュレーションを開始し、台風の進路が転向点をとらえて予測可能かどうかを検証した。図 4.1.9 は、2007 年 4 号の事例予測シミュレーションの結果である。全球を水平 11km の解像度、鉛直 32 層で設定し、図に示す日本領域は水平 2.78km、鉛直 32 層の設定で大気と海洋を結合した MSSG を用いて予測シミュレーションした結果、非常に高い精度で進路を予測できることを確認した。これほど高い性能で予測できる場合の条件等を詳しく分析し、高い精度で予測できるか否かの指標を確立してゆくことが、今後の課題である。

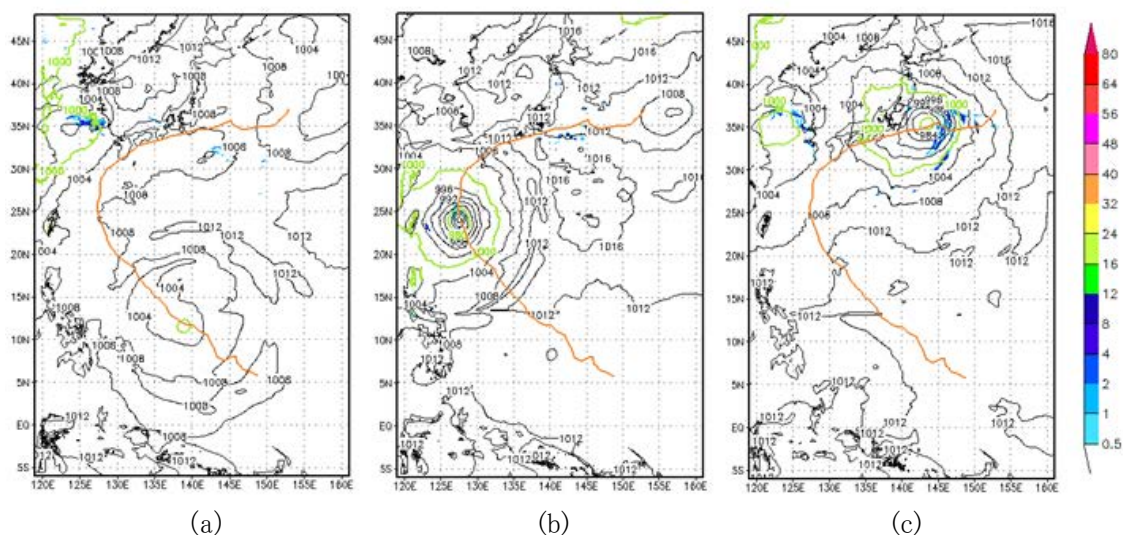


図 4.1.9 2007 年 4 号の 144 時間予測シミュレーション結果。オレンジ色の線は、観測から得られたベストトラックを示す。(a)は、2007 年 7 月 9 日 13:00 時の予測シミュレーション開始から 1 時間後の台風の気圧配置と降雨分布、(b)はモデル時間 2007 年 7 月 12 日 13:00 時点の予測気圧配置と降雨分布、(c)はモデル時間 2007 年 7 月 15 日 13:00 時点の予測気圧配置と降雨分布を示す。

■ 東京 23 区の水平解像度 50m での気象再現シミュレーション

都市特有の気象現象，例えばヒートアイランドや大気汚染等が，周辺地域にどのような影響を及ぼすか，また近年増加傾向にあるといわれている都市型集中豪雨の機構解明と予測シミュレーションを目指して，都市の熱的循環を解像し，かつ周辺領域のメソスケールの気象現象を同時にシミュレーションして，予測可能性を評価するためのテストシミュレーションを行った。

本シミュレーションでは，都市域のビル群や人工排熱を導入する前の段階において，各地域の気象現象の再現性を評価するものである．図 4.1.10(a)に計算領域，図 4.1.10(b)に地表面インデックス(地表面の利用状況データ)，図 4.1.10(c)にシミュレーション結果を示す．地表面インデックスの特徴を捉えた陸域と海洋，あるいは河川等の妥当な温度分布が得られている．また，図 4.1.10 から，各地点における日変化は，海に近い地点ほど観測値とよく一致しており，東京や練馬など比較的内陸地点では，昼間あるいは夜間の風の分布が異なっている．この不一致が，都市域の熱的循環特徴に起因する可能性があることを示唆している．

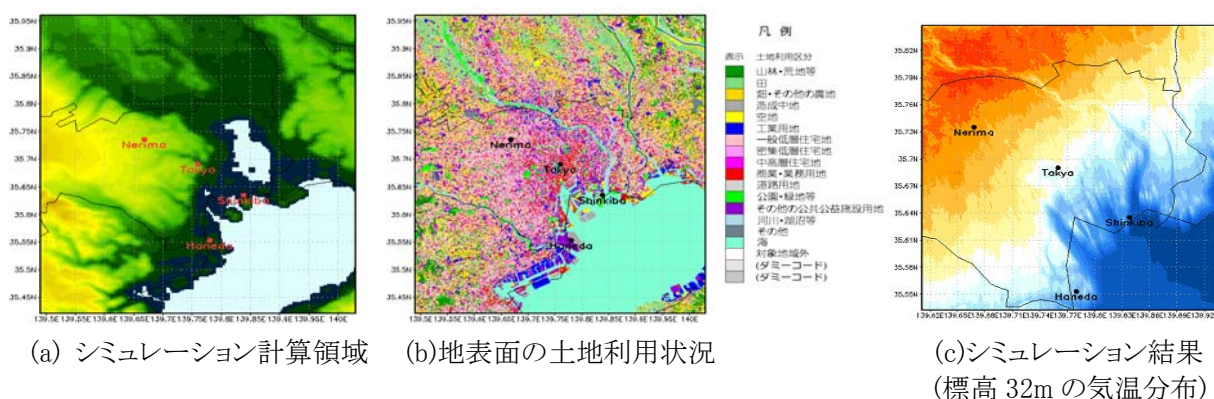


図 4.1.10 シミュレーション計算領域，地表面インデックスとシミュレーション結果．

■ 丸の内、有楽町地区の水平 5m メッシュによるシミュレーション

都市域のある街区を代表例として，道路，交通量，人工排熱等のデータを整備し，そのデータを境界値として与えた MSSG-A による水平，鉛直ともに 5m の解像度でのシミュレーションを行った．このシミュレーションは，前述の都市域における熱的循環による周辺地域の気象への影響を評価するための一環として位置づけられる．水平には，気象庁から提供されたメソスケールのデータを設定し，非定常な条件下における気温変化，風速の変化などを再現した．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中で，図 4.1.11 は，各地の観測値との比較，図 4.1.12 は，異なる高さでの温度分布のスナップショットである．地表面から暖められた空気がプルームとなって上昇する様子や，建物形状により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．図 4.1.13 は，鉛直方向の温度分布と流れ場を示している．上空の大気の流れが定常であるのに対し，接地境界層では，様々なスケールの渦が生成されていることがわかる．

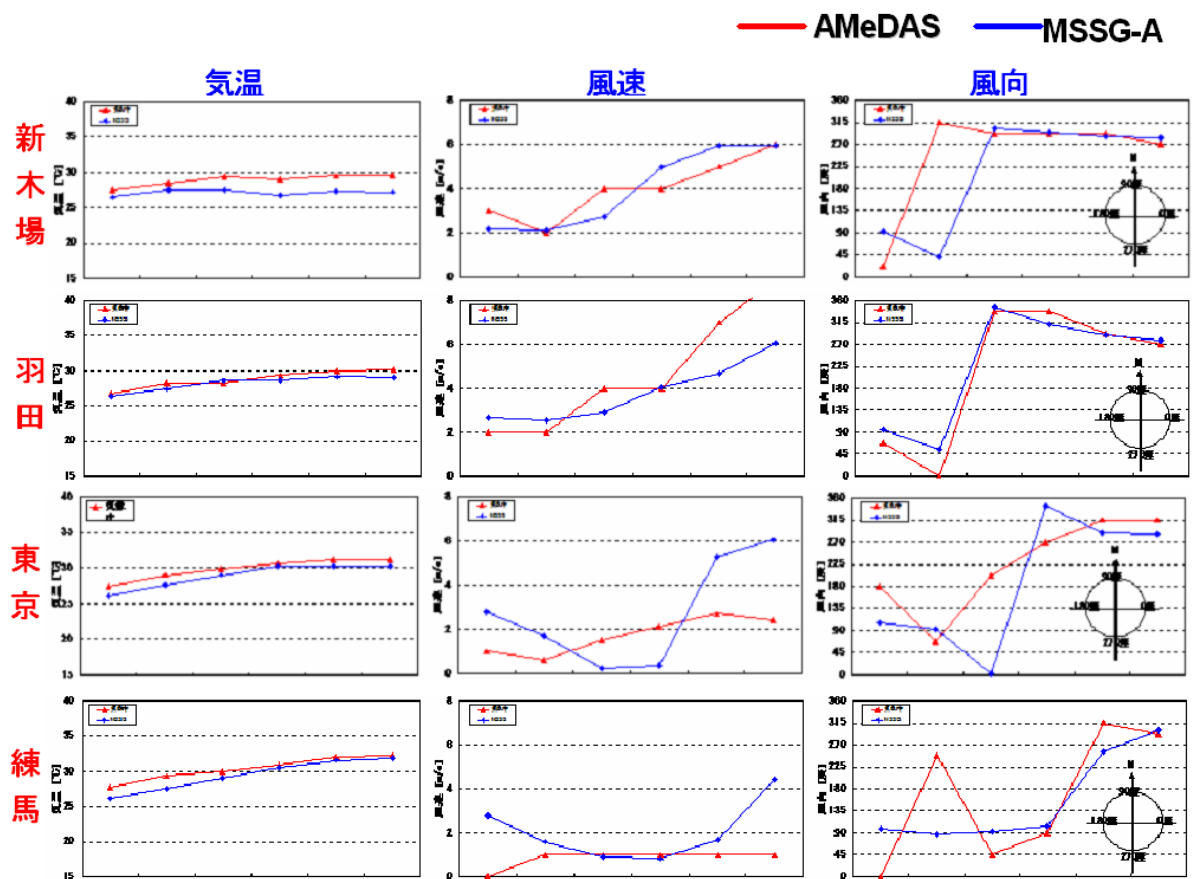


図 4.1.11 各観測地点におけるシミュレーション結果と観測値との日変化の比較

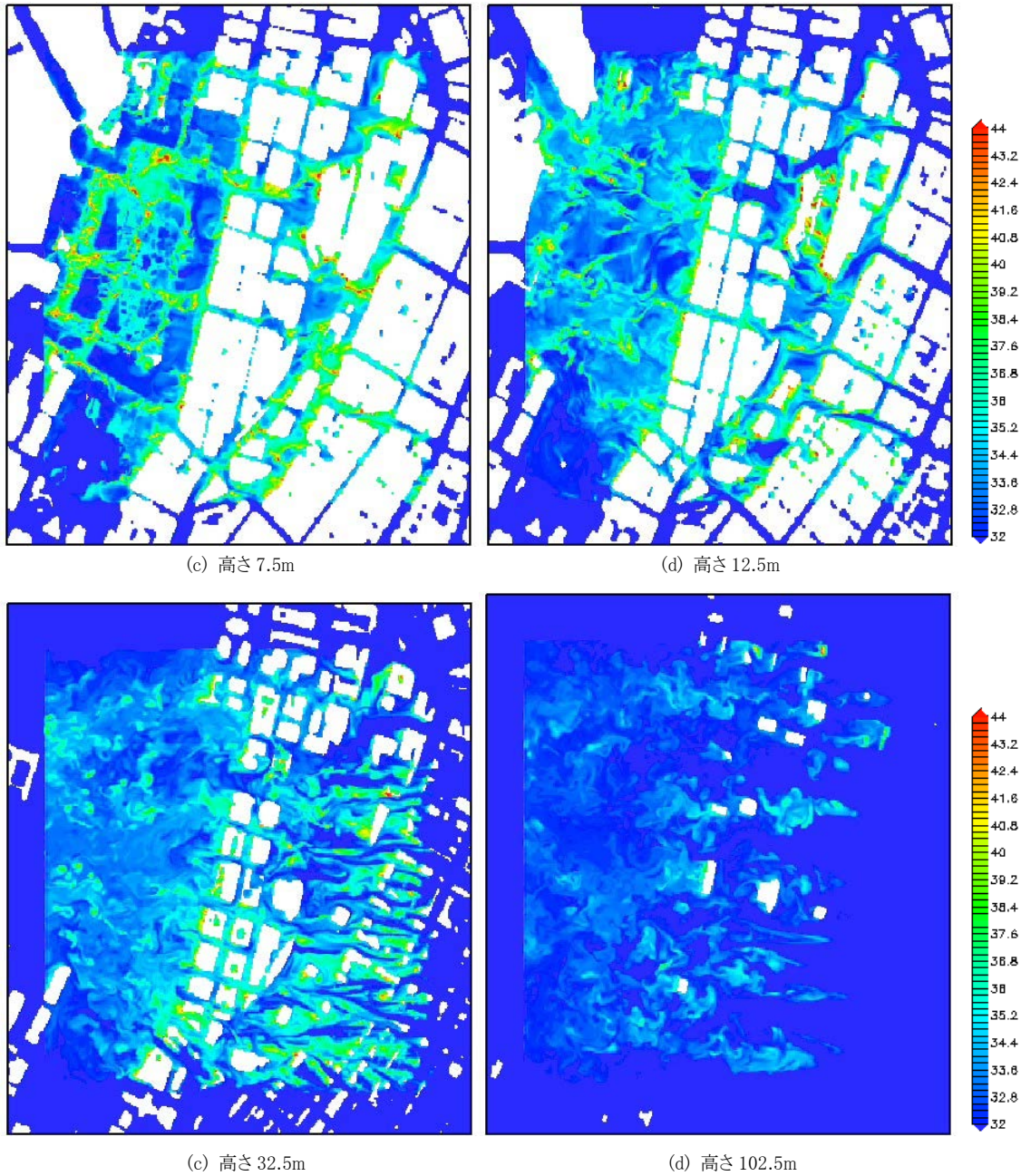


図 4.1.12 水平と鉛直 5m 解像度の有楽町周辺域のシミュレーション結果. 2005 年 8 月 5 日 15 時 10 分における気温分布

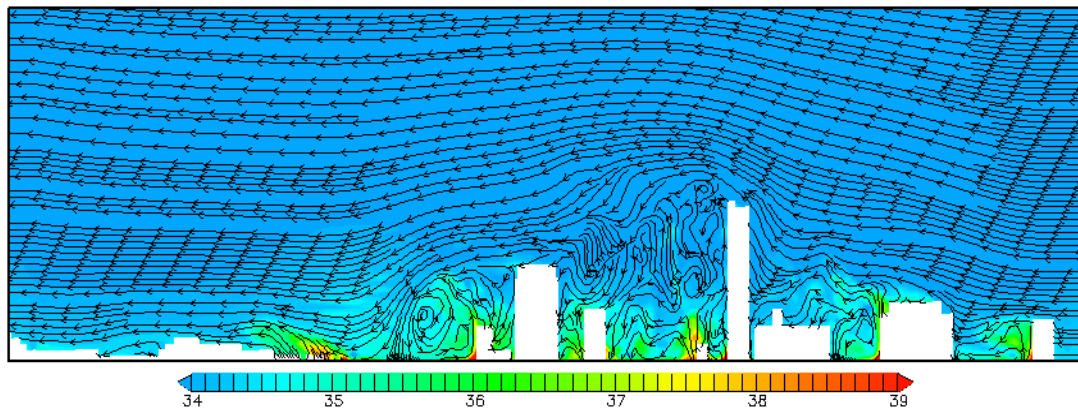


図 4.1.13 気温および流線の鉛直断面

■ 2005 年東京集中豪雨シミュレーション

MSSG-A に組み込まれている UCSS (Urban Climate Simulation System) 都市キャノピーモデルを用いて、東京集中豪雨のシミュレーションを実施した計算領域は、図 4.1.14 に示す 320km 四方を対象とし、水平解像度 100m で分割し、鉛直方向は上空 30km までを設置境界層ほど詳細に 32 層に分割した。初期値として、気象業務支援センターGPV(MSM 20km 格子データ)の 2005 年 9 月 4 日 15 時(日本時間)のデータから補間して与えた。下部境界条件として海面温度を、側面境界条件として全予報変数を、前述の GPV(MSM)から与えた。地表面温度データは、都心地区における 2005 年 8 月 5 日の気象条件から算出した 24 時間分の時系列データを与えた。土地利用データは、USGS1km メッシュデータから作成した。積分時間は、2005 年 9 月 4 日 15 時～9 月 5 日 9 時の 18 時間とし、土地利用データで都市部とされている格子に、UCSS 都市キャノピーモデルの効果を取り入れた。土壌水分は、NCEP 気候値を与え、放射過程は 15 分毎に詳細計算を行い、本研究で開発した 3 次元放射モデルは使用していない。降水過程には雲微物理の COLDRAIN (reisner2) モデルを使用した。

東京管区気象台から発表されているレーダーエコー強度図を図 4.1.15 に、積算降水量分布図を図 4.1.16 に示す。MSSG-A によるシミュレーション結果の 30 分平均降水量を図 4.1.17 に示す。シミュレーションでは、降水地域は再現されているが、いずれの時間帯でも短時間で非常に激しい降雨過程であったにもかかわらず、劇的な降雨過程は再現されず、積算降水量が少ない結果となっている。

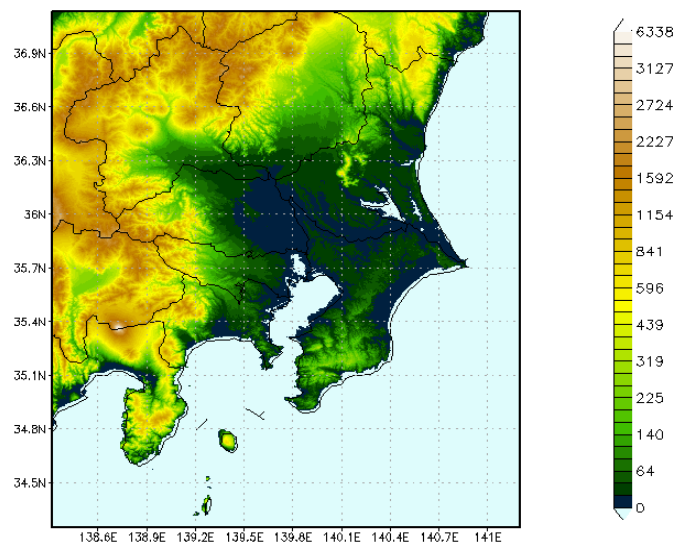


図 4.1.14 計算領域

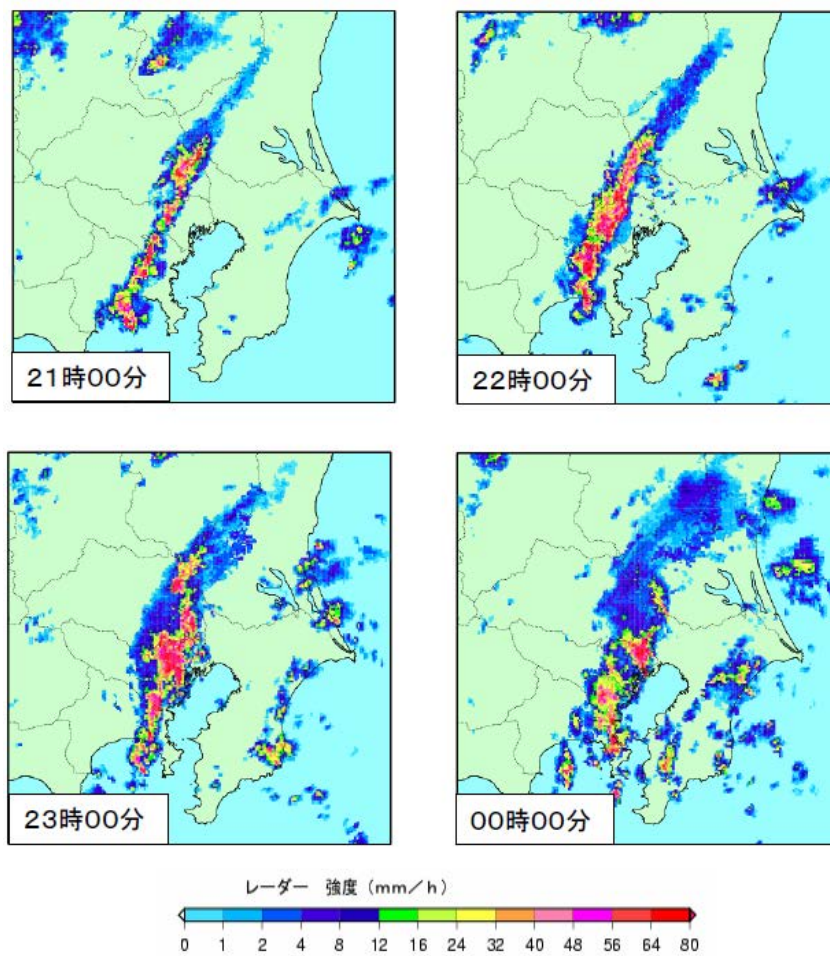


図 4.1.15 レーダーエコー強度図(東京管区气象台資料より)

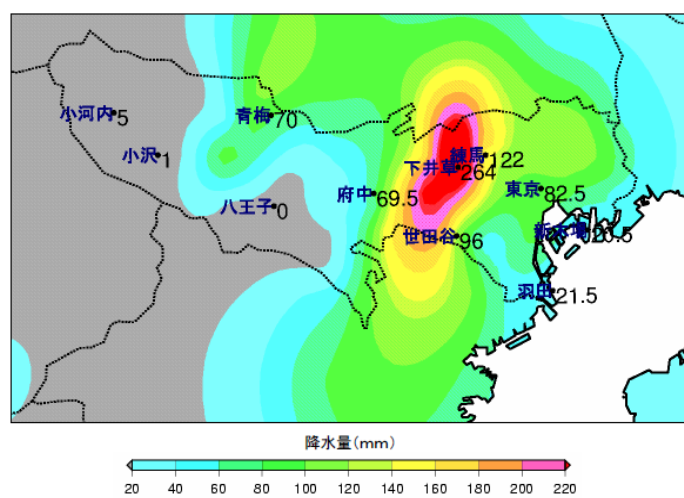


図 4.1.16 積算降水量分布図(東京管区气象台資料より)

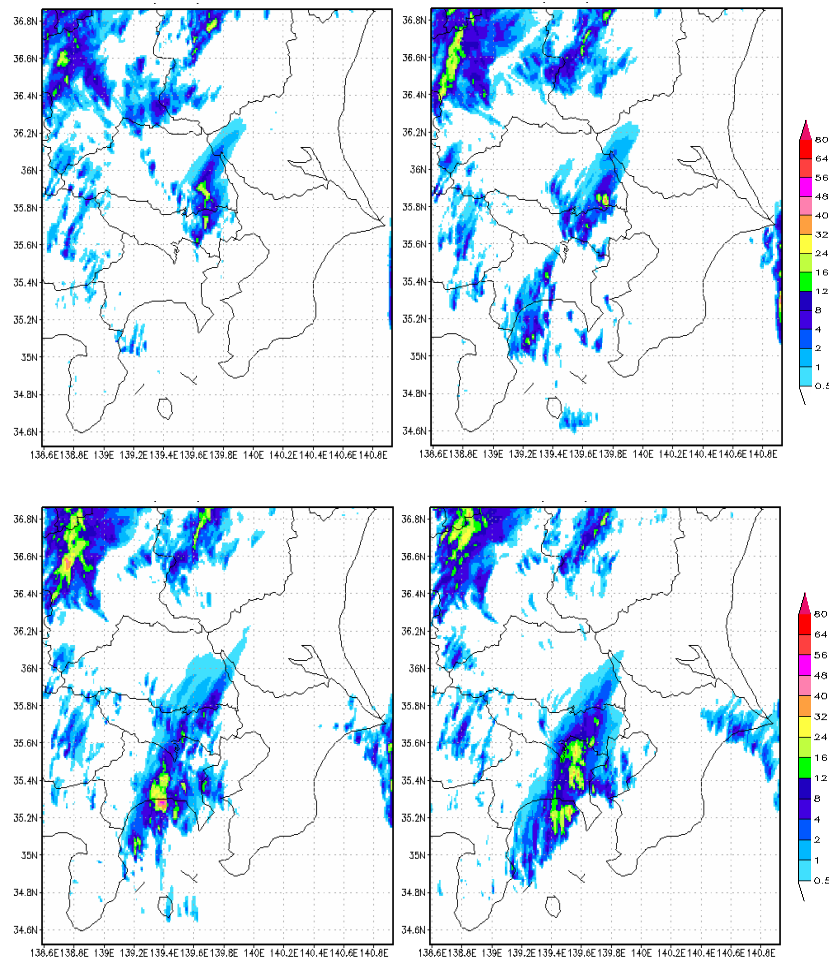


図 4.1.17 東京集中豪雨のテストシミュレーション結果(30 分平均降水量)

(1-3) 新しい大気海洋相互作用モデルの導入とそのインパクト

■ MSSG による台風進路・強度予測シミュレーション

大気海洋相互作用のモデルにおいて、共同研究を推進している小森悟教授グループ(京大)の実験室での成果をもとに、2006 年台風 16 号の強度予測シミュレーションを行った。その結果、近年において最大に発達した台風である 16 号の最低気圧の予測値は、観測値により近い結果が得られた。

(1-4) 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開発

強い降水過程において雲の単位となる水平スケールは、100m オーダーであることが観測結果から知られている。予測シミュレーションのターゲットとしている台風や梅雨時による集中豪雨は、上記のスケールの積雲とそれらを取りまく数 1,000km の環境場により決定されるので、数 100m から数 1,000km までのスケールを扱う必要がある。地球シミュレータ上においても、例えば、台風の発生領域を含む熱帯域から日本域までを、雲のスケールの単位となる 100m オーダーでの解像度でシミュレーションが不可能であることから、物理的な変化、例えば温度の傾度や渦度の大きさの時間変化などが大きな場所を非常に詳細な空間スケールで設定できるような適応型動的メッシュ(AMR)を、大気コンポーネント(MSSG-A)と海洋コンポーネント(MSSG-O)の両方に実装し、大気海洋結合モデル MSSG に AMR を実装した(図 4.1.18)。AMR を実装している大気海洋結合モデルは、本グループでの調査の限り、世界で最初のコードである。

さらに、MSSG の大気、海洋の両コンポーネントに、すでに導入を完了している動的適応手法(Adaptive Mesh Refinement)を用いて、事例シミュレーションを行い、台風の特徴的な構造をとらえ

ることが可能かどうかについての検証を行った。2003 年台風 10 号を事例として取り上げ、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 4.1.19 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 4.1.19 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。格子は、クライテリアに従って、気圧の低い領域で詳細に配置されており、現象の激しい台風の構造とよく一致して構成されている。また、AMR 実装の工夫により、MSSG の本来の計算性能を損なうことなく、高い計算性能で AMR を実行できていることも検証済である。

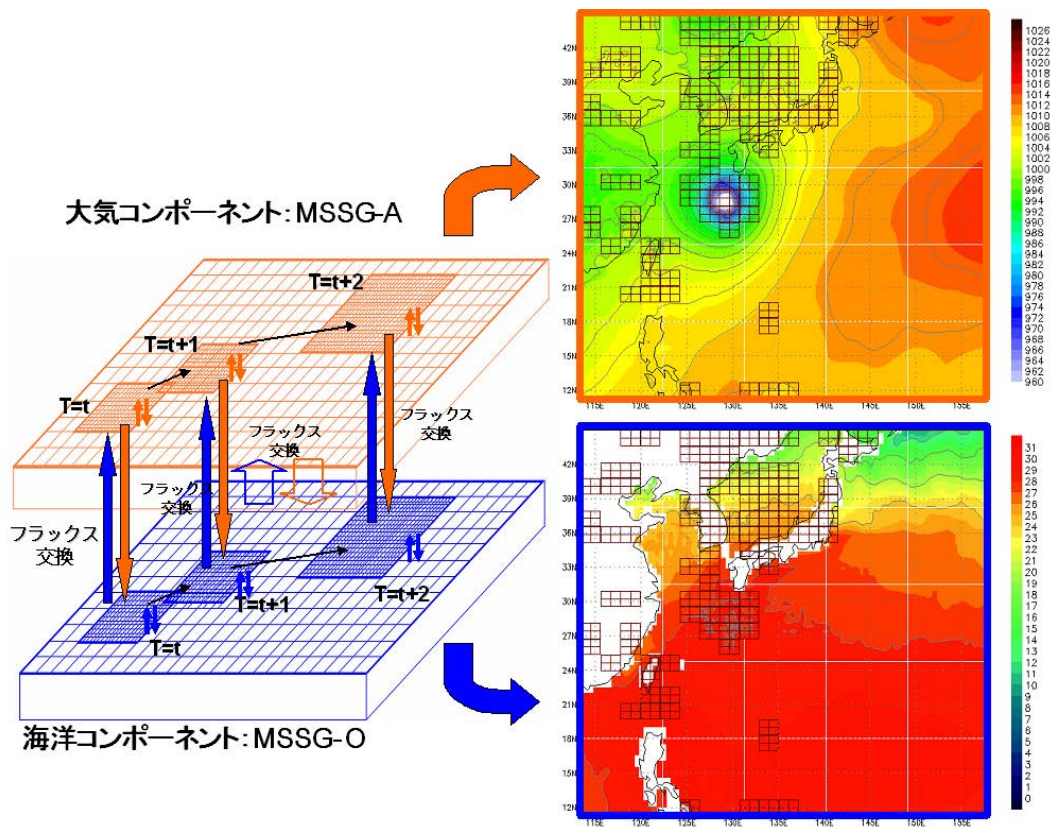


図 4.1.18 大気コンポーネントMSSG-A, 海洋コンポーネントMSSG-O のそれぞれへ実装した適応動的格子と大気海洋結合手法の概要

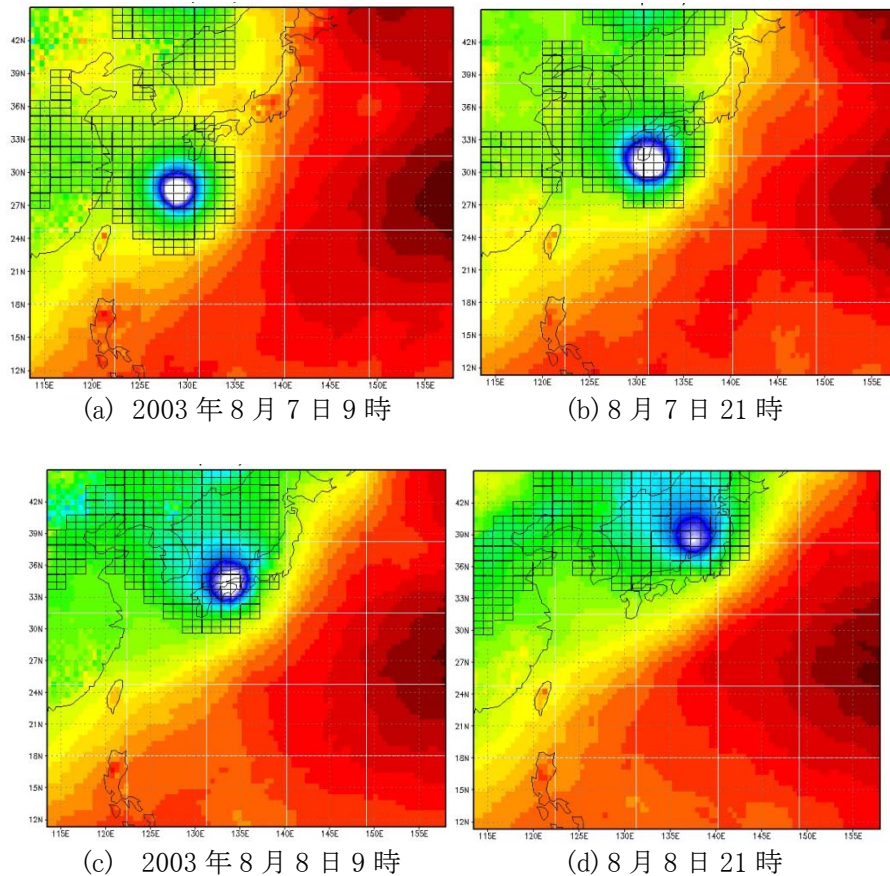
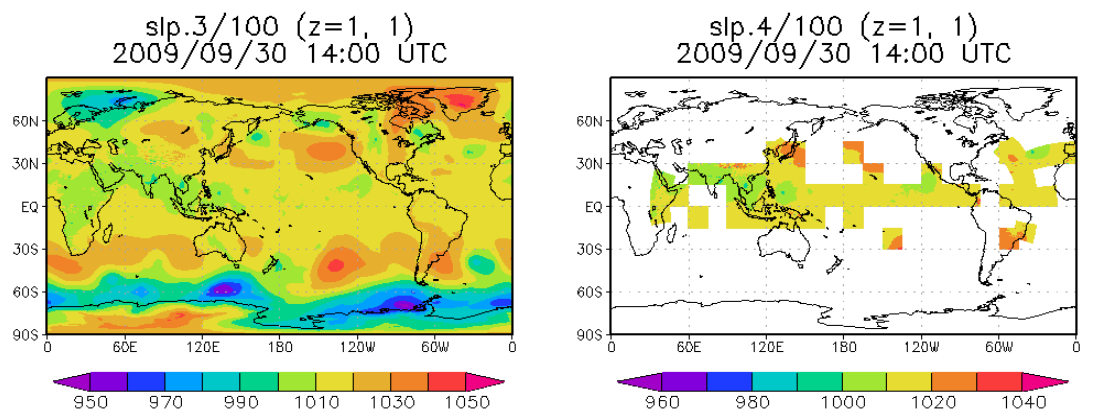


図 4.1.19 大気海洋結合モデル MSSG の大気コンポーネント MSSG-A における AMR によるグリッド分割. (a)から (d)は, 各時刻のシミュレーション結果である. 色づけした分布は大気の海面圧力分布であり, 圧力分布と分割グリッド(黒で囲んだグリッド)が一致して領域を定義していることが確認できる.

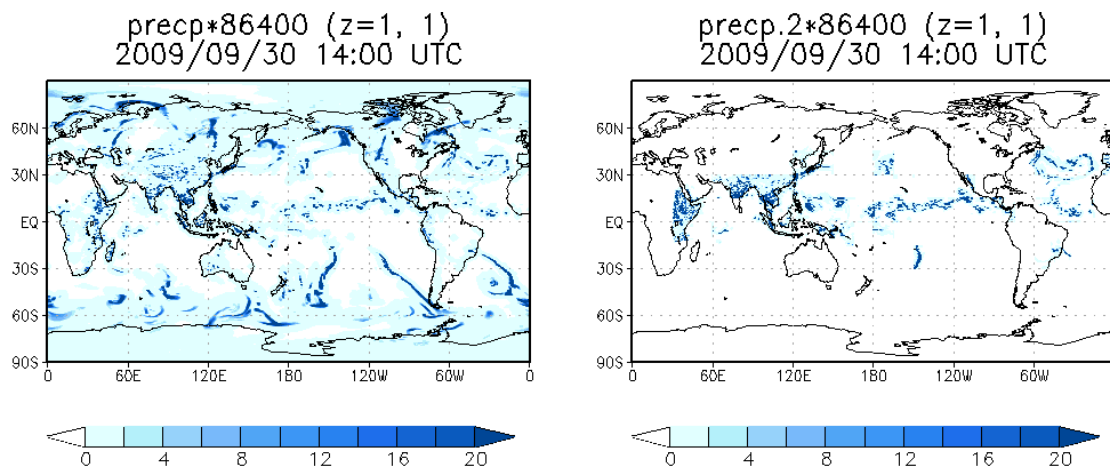
(1-5) 全球 AMR 実装と応用・計算性能最適化

限定された領域に対して実装した AMR をさらに全球に対応できるように拡張した. 適応型動的メッシュ (AMR) を, 大気コンポーネント (MSSG-A) と海洋コンポーネント (MSSG-O) の両方の全球に対して実装し, 大気海洋結合モデル MSSG に AMR を実装した (図 4.1.20). AMR を実装している大気海洋結合モデルでしかも全球を対象とするモデルは, 領域に対する AMR 同様に, 世界で最初のコードである.

図 4.1.20 は, 全球の解像度を水平 25km, AMR として可変となる格子をボックス領域として定義し, 水平 8.4km とした場合の例である. 地球シミュレータの 6 ノード 48 プロセスを使用し, フラット MPI で実装した. AMR に対応するボックスの全球被覆率は 22% とし, 降雨量単位時間当たり多い領域をクライテリアとした場合, 赤道域と気圧配置に従って, AMR によりその領域が捕獲されることを確認している.



(a) 全球の気圧配置(左図)とAMRにより格子が配置された領域(右図)



(b) 全球の降雨(左図)とAMRにより格子が配置された領域においてシミュレーションされた降雨分布(右図)

図 4.1.20 全球(Yin-Yang 格子)上に拡張された AMR のボックス格子の配置と降雨分布

(1-6) 次世代スーパーコンピュータ向け計算性能最適化

MSSGの並列性能について実測し、高並列化阻害要因の有無を判断し、要因が見つかった場合にはこれを改善する手法を提案する目的で、T2Kマシンにおいて並列性能の確認を実施した。T2KにおいてMSSG-A の性能調査を実施するとともに、MSSGのスカラマシン上での高速性を評価し、高い並列性能を実現した。

(1-7) 都市気象を特徴付ける乱流場の特性についての研究

■ ブジネスク近似の妥当性と乱流境界層へのインパクト

都市の熱・物質輸送過程メカニズムを明らかにすることは、ヒートアイランドの原因の解明やその施策において、非常に重要な課題である。ヒートアイランドを再現するための従来手法としては、平らな地表面を仮定した土地被覆モデル:キャノピーモデルが用いられてきた。しかし、より正確な流動場・熱輸送を考慮するには建物を解像できるスケールでの流動場解析が必要である。流動場の解析のためには、大気境界層で使用されるブジネスク近似が使用されてきた。ブジネスク近似は流体の非圧縮性を仮定し、浮力のみを考慮する手法であるが、熱輸送を伴い、局所的に高温となる領域が存在する都市域の流れを捉えるために適する手法であるかについての検討は十分に行われていない。

そこで、本研究で開発した3次元完全圧縮性流体場を解くための高速解法を用いて、大気境界層内の流れである建物周りの流れに適用した。その結果、まず、密度変化が及ぼす流れ場の変化

を検討した結果、鉛直熱フラックスに密度変化を考慮しなければ再現できない変化があることが明らかとなった。また、この効果は建物数により変化することが確認された(図4.1.21)。さらに、ビジネス近似を用いて解いた場合と大気境界層内の流れを圧縮性流体で解いた場合を比較すると、高温の表面温度を持つ接地面近傍の流れを圧縮性流体として捉える場合は、密度変化により流れが変化し、熱フラックスは増加する傾向があることがわかった。また、建物数が多い場合、大気が接触する高温の壁面面積は増加し、密度(物性)変化から乱れは抑制されるが、密度変化を考慮しないビジネス近似では乱れを過大評価する可能性があることを明らかにした(図4.1.22)。

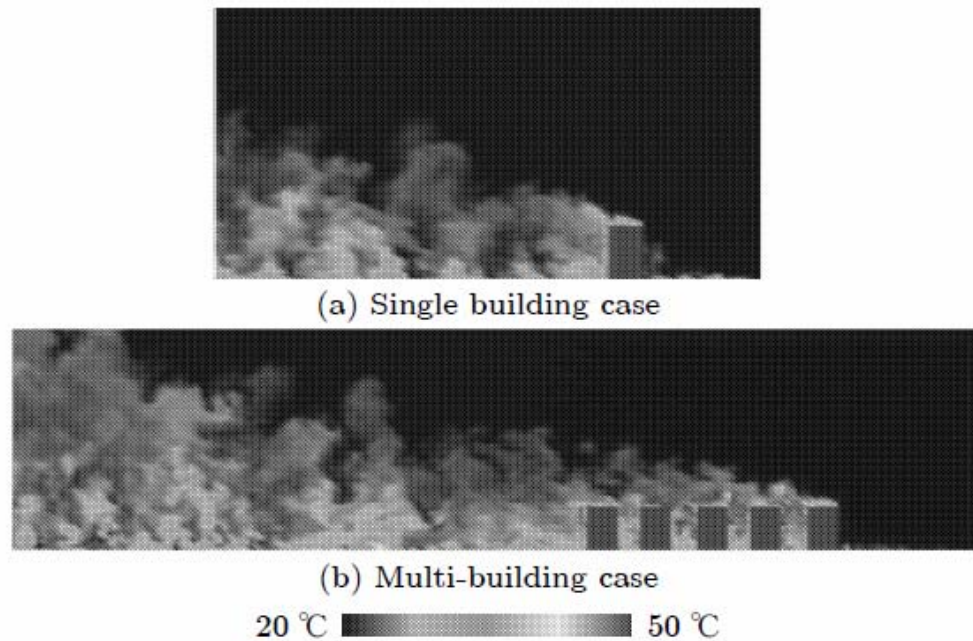


図4.1.21 単一ビルディングと複数ビルディングがある場合の流れ場の相違を示す。

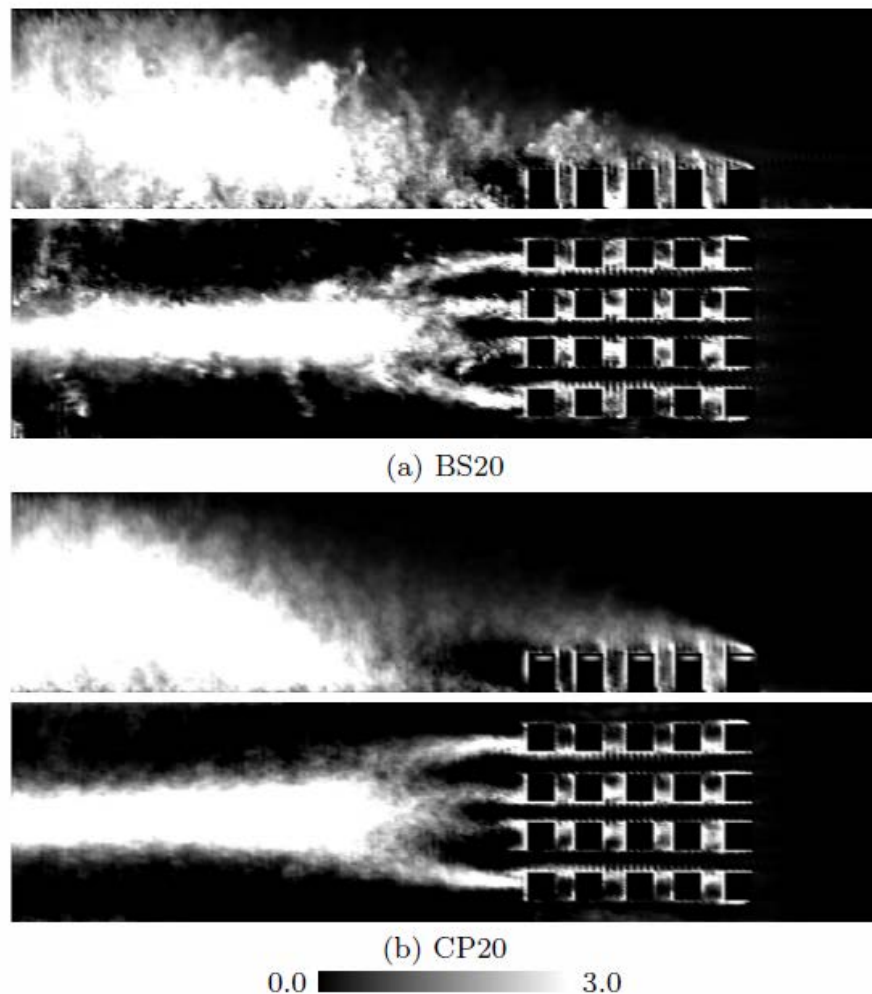


図4.1.22 20分間の積分を行った建物数2の場合の鉛直熱フラックスの鉛直および水平分布を示す. (a)は、ブジネスク近似を用いた場合、(b)は完全圧縮方程式を解いた場合である.

■ 都市部における乱流と熱輸送の相互作用による乱流構造変化の解明

遮蔽物を含む乱流境界層の研究は遮蔽物により乱流構造が大きく変化し、その変化も遮蔽物形状に依存してしまうことから、自由度が高く乱流構造を整理することが困難であった. 本研究では乱流と熱輸送の相互作用に着目し、その相互作用によりどのように乱流構造が変化するかを調べた.

(2) 研究成果の今後期待される効果

本グループでは、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ことを事例予測シミュレーションの結果で示し、そのためには、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た. 今後期待される効果を以下にまとめる.

(1) 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研究について

本研究では、従来のネストスキームを基盤として、異なる時空間スケールの現象を扱える予測シミュレーションモデルを開発し、その物理的な性能を事例予測シミュレーションの結果と観測との比較、検証から示してきた. これらの結果は、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、今後の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. 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. 今後,さらに予測期間を長くして,気候変動や季節予測から,領域・都市環境への影響を評価することが可能な予測シミュレーションコードとして, MSSGを拡張していく予定である.

(2) 大気海洋相互作用および都市スケールの気象現象に対する実験とシミュレーションの連携研究について

災害に直接結びつく台風の強度や,近年注目を浴びている都市域などに発生する集中豪雨は,温暖化などの影響はもちろんのこと,その発生メカニズムが解明されていない部分もあることから,予測が難しい. 台風では,温暖化による海洋の状態変化がどのような影響をその強度に与えるのかは,世界的にも関心が高く,各国が国費を投じて取り組んでいる課題である. どちらの現象にも予測の困難さに共通していることは,観測が難しい点である. このような場合,シミュレーションは非常に強力なツールとなりえるが,その基盤としては,実験室の詳細なデータが不可欠である. 本研究では,大気海洋相互作用に,観測から得られた新しいモデルを投入することにより,台風の強度予測に,非常にインパクトがあることがわかった. また,都市の複雑な蓄熱過程メカニズムを解明するためにも,シミュレーションと実験室からのデータとの比較検討から,非常に詳細な検討が可能になってきていることを示すことができた. これらの成果は,今後さらに協力体制を強化することで,新たな多くの学術的成果と予測精度の向上につながることを大いに示唆している.

4. 2 海水面を通しての水の移動機構と雲粒の成長機構(京都大学 小森グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

本グループでは,海水面を通しての水の移動現象と雲粒の成長現象に着目し,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た. 本研究の実施内容および及び成果を以下に示す.

(1-1) 風洞実験による風波気液界面を通しての水・潜熱の移動機構についての研究

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(CGCM)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,海洋観測による輸送量の測定結果のばらつきが非常に大きく,より正確な熱輸送量の評価に基づくモデルの構築が急務とされている. 一般に,気液界面を通しての熱輸送量 Q_T (以後,全熱輸送量と呼ぶ)は,大気側の顕熱輸送量 Q_H ,潜熱輸送量 Q_E ,放射熱量 Q_R の和で表される.

$$Q_T = \rho_w h_L (T_i - T_W) = Q_H + Q_E + Q_R \quad (4.2.1)$$

CGCMを構成するサブモデルでは,顕熱輸送量 Q_H および潜熱輸送量 Q_E は風速に比例するという仮定に基づき,バルク式

$$Q_H = \rho_a C_{p,a} C_H U_{10} (T_i - T_{10}) \quad (4.2.2)$$

$$Q_E = \rho_a L_V C_E U_{10} (q_i - q_{10}) \quad (4.2.3)$$

で表わされる. ここで, ρ_a は空気の密度, $C_{p,a}$ は空気の定圧比熱容量, L_V は蒸発潜熱である. また,顕熱に対するバルク交換係数 C_H および潜熱に対するバルク交換係数 C_E は,バルク法が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評価法であることから,定数とされる. これらの式において,海洋上 10m の位置における風速 U_{10} , 温度差 $T_i - T_{10}$ および比湿差 $q_i - q_{10}$ は全て海洋観測で直接測定することができる. したがって,大気海洋間,つまり風波気液界面を通しての顕熱および潜熱輸送量を精度よく評価するためには,式に含まれるバルク交換係数 C_H , C_E の値を正確に与えることが重要となる. 顕熱や潜熱に対する C_H , C_E の値は,これまで主に野外観測を通して数多く提案されてきた. しかし,それらの値はほぼ一定値を取るとされているにも関わらず,研究者間で大きくばらついており,信頼性がある結果は全く得られていない. そこで本研究では,風洞水

槽を用いた室内実験により、風波気液界面を通しての熱の輸送機構および界面近傍の乱流構造を詳細に調べた。

① 実験方法

図 4.2.1 に、実験装置の概略を示す。全長は 12.5m、小型風波乱流水槽のガラス製のテストセクション部分の長さは 6.5m、幅 0.3m、高さ 0.8m であり、水深を 0.5m とした。送風ファンによりテストセクションに空気を流入させ、気液界面上に風波を形成させた。熱輸送実験においては、温水を風波水槽内に貯め、気液界面上に風を吹かせることにより液流側から気流側へ熱を放散させた。本研究では、測定中の水槽内の水温を 40°C に保ち、定常状態で実験を行うため、風波水槽に温水循環装置を設置した。水槽内に貯める溶液としては、 $5\mu\text{m}$ のフィルターを有する活性炭濾過装置を通した水道水あるいは、それを基に作成した 3.5wt% の塩水を用いた。水槽内に水を供給し、ヒータにより温度調整が可能な貯水タンクと風波水槽を、パイプを介して接続することにより温水を循環させた。測定座標系は、水槽入口部中央の静止水面上を原点として主流方向を x 、鉛直方向を y 、スパン方向を z とし、風波が十分発達し、かつ端効果の無い $x=4.0\text{m}$ の位置で測定を行った。全熱輸送量 Q_T および顕熱輸送量 Q_H は渦相関法 (Komori et al., TSFP, 2009) を用いて評価した。また、潜熱輸送量 Q_E は熱収支法および水蒸気収支法の二通りの測定方法 (Komori et al., TSFP, 2009; 島田ら, 機械学会年次大会, 2010) を用いて評価した。

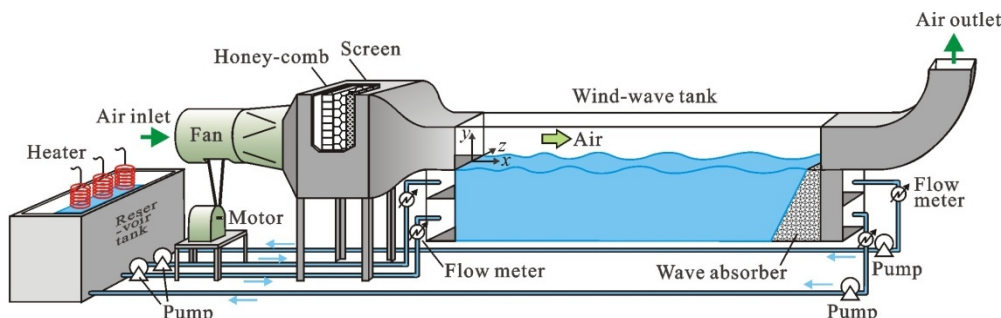


図 4.2.1 風波水槽の概略図

② 研究成果

(a) 風波乱流場における全熱輸送量

図 4.2.2 に、液側熱移動係数 h_L を気側一様流速 U_{∞} に対してプロットしたものを示す。ただし、実験で得られた水温 T における液側熱移動係数 $h_L(T)$ を、その温度におけるプラントル数 $Pr(T)$ と水温 20°C におけるプラントル数 $Pr(20)$ を用いて、水温 20°C における液側熱移動係数 $h_L(20)$ へと換算した。図より、 h_L はさざ波が発生する $U_{\infty} < 8\text{m/s}$ の低風速域では U_{∞} の増加に従って比較的単調に増加することがわかる。しかし、 $8\text{m/s} < U_{\infty} < 10.5\text{m/s}$ の中風速域では U_{∞} に対する増加率が弱まり、 h_L は少し横ばいの傾向を示す。さらに、波が激しく崩壊する $U_{\infty} > 10.5\text{m/s}$ の高風速域では h_L は再び急激に増加する。このように、 h_L は風速と単純な比例関係を持たないことがわかる。この結果は、気液界面を通しての熱輸送量が風速に対して単調増加すると仮定する従来のバルク法は信頼性に欠けることを示唆している。なお、真水の場合の値と塩水の場合の値は一致しており、塩分濃度が気液間の全熱移動に影響を及ぼさないこともわかる。

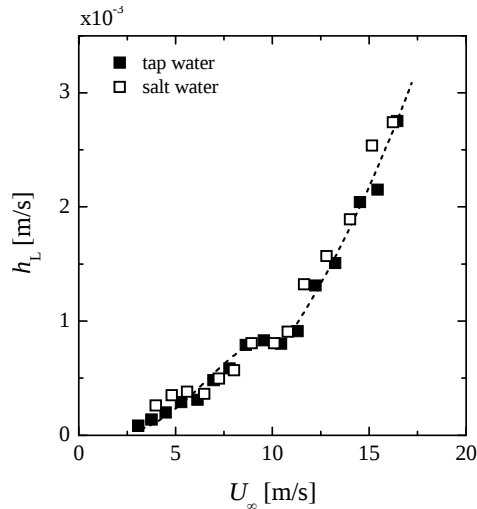


図 4.2.2 液側熱移動係数と気側一様流速との関係

(b) 液側界面近傍の乱流構造

液側熱移動係数 h_L が中風速域において横ばいの傾向を示す原因を明らかにするため、赤外線放射温度計を用いて気液界面の瞬間温度分布を撮像することにより、界面近傍の乱流構造について調べた。気側一様流速が $U_{\infty}=3.1, 13.2$ m/s の場合における気液界面の瞬間温度分布の赤外線放射画像を図 4.2.3 に示す。紙面上、主流方向は鉛直上向きに相当する。図より、液側熱移動係数 h_L が風速に対して単調に増加する低風速域 ($U_{\infty}<8.0$ m/s) では、低温部分が主流方向と平行にストリーク状に現れることがわかる。この風速域では有義波高が 10mm 以下であり、気液界面は比較的平坦となる。そのため、液側界面近傍の乱流構造は、滑面における壁面乱流に近いものと考えられる。実際、Komori et al. (J. Turbulence, 2010) は、風波乱流場でのスカラー輸送を直接数値シミュレーション (DNS) により検討し、気側一様流速 U_{∞} が約 5.0 m/s の場合、気液界面下にはストリーク状にスカラーフラックスの低い領域が存在することを明らかにしている。このように、低風速域では、界面付近に発生したストリーク状の組織的乱流渦により気液界面を通しての熱輸送が促進されるものと考えられる。一方、風速 $U_{\infty}=13.2$ m/s での画像より、高風速域 ($U_{\infty}>10.5$ m/s) では、気液界面全体がスポット状の温度分布となることがわかる。この高風速域では、風速の増加に伴って気液界面に働く摩擦抗力が増加し、液側界面近傍の横渦の発達が促進されるとともに、界面が崩壊することによって界面近傍の乱流構造はさらに複雑となる。その結果、界面領域におけるリップル状の乱流生成が促進され、気液界面を通しての熱輸送がさらに活発になると考えられる。

風速が界面温度分布に及ぼす影響をより明瞭にするために、赤外線放射温度計で撮像した界面温度分布の時系列信号より、その標準偏差を算出した。図 4.2.4 に、界面温度の標準偏差 σ_{Ti} を気側一様流速 U_{∞} に対してプロットしたものを示す。図より、 $8 \text{ m/s} < U_{\infty} < 10.5 \text{ m/s}$ の中風速域において σ_{Ti} の U_{∞} に対する減少率が小さくなり、 h_L と同様に横ばいの傾向を示すことがわかる。界面の温度変動は界面付近における乱流渦の発達と密接に関連している。つまり、界面付近に発生した乱流渦は発達するほど時間・空間スケールが小さくなるため、界面温度のばらつきもまた小さくなる。したがって、この結果は、界面近傍における乱流渦の発達が中風速域では風速が増加しても促進されないことを示唆している。

このような、液流側に発生する組織的な乱流渦 (表面更新渦) について、その発生周波数を定量的に評価するために、風波乱流場で測定された液側乱流熱フラックス $v\theta$ の時系列信号に風波の周期運動を除去するハイパスフィルタを施し、条件付きサンプリング法の 1 つである VITA 法 (Variable Interval Time Averaging technique) を適用した。図 4.2.5 に表面更新渦の発生周波数 f_s と気側一様流速 U_{∞} との関係を示す。図より、 f_s は $8.5 \text{ m/s} < U_{\infty} < 10.5 \text{ m/s}$ の中風速域において U_{∞} に対して横ばいの傾向を示すことがわかる。このことは、気液界面を通しての全熱輸送を支配する界面領域における乱流の生成が中風速域においては風速が増加しても変化せずに一定となることを裏付けており、前節で示した h_L が中風速域で横ばいの挙動を示すという結果ともよく一致する。こ

れは、風波気液界面を通しての全熱輸送が液側界面近傍に誘起される表面更新渦に大きく支配されることを示している。

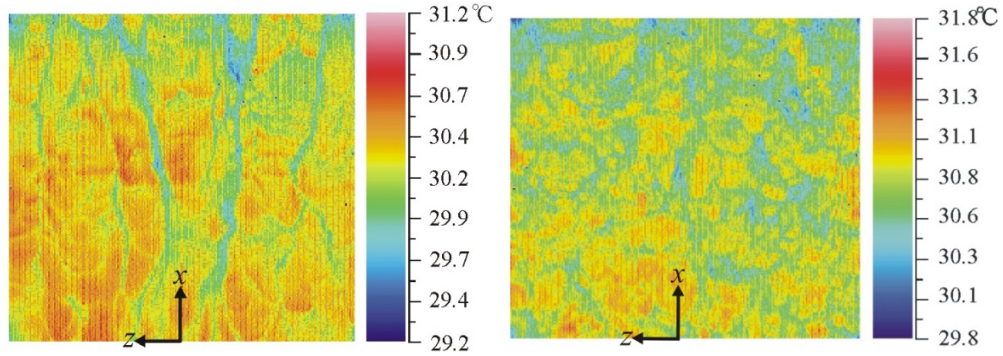


図 4.2.3 瞬間界面温度分布. $U_{\infty}=3.1\text{m/s}$ (左図), $U_{\infty}=13.2\text{m/s}$ (右図).

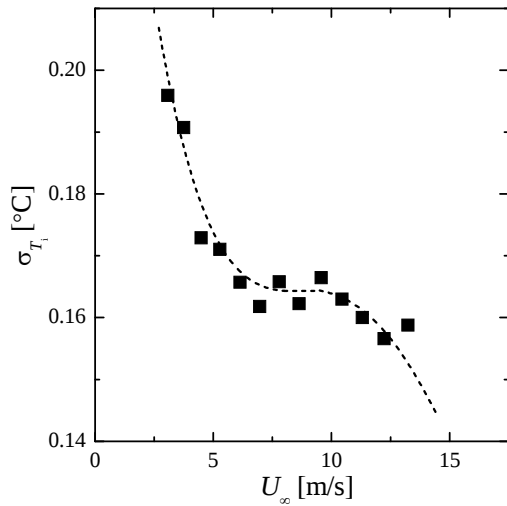


図 4.2.4 界面温度の標準偏差

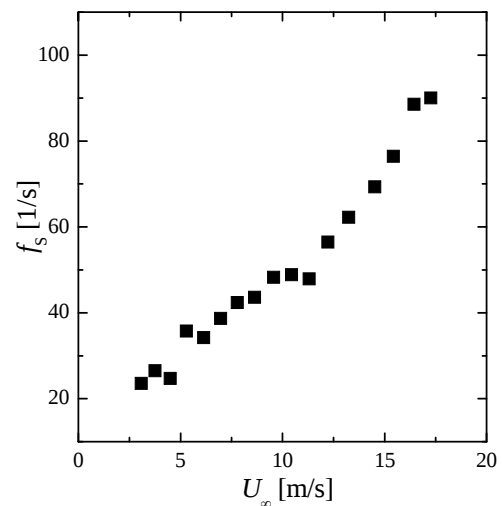


図 4.2.5 表面更新周波数

(c) 風波乱流場における顕熱および潜熱輸送量

図 4.2.6 に、風波気液界面を通しての顕熱輸送量、潜熱輸送量、及び放射熱量(Q_H , Q_E , Q_R)の全熱輸送量 Q_T に対する比率と気側一様流速 U_{∞} との関係を示す。図より、本研究では潜熱輸送量が気液界面を通しての熱輸送を支配することがわかる。

図 4.2.7 に、顕熱に対するバルク交換係数 C_H および潜熱に対するバルク交換係数 C_E を気側一様流速 U_{∞} に対してプロットしたものを示す。図より、 C_H は風速によらずほぼ一定値をとるのに対して、 C_E は風速への依存性を示し、特に低風速域ほど小さな値を示すことがわかる。従来の熱輸送量の評価モデルであるバルク法では、大気側での顕熱輸送量および潜熱輸送量と風速との比例関係を仮定していることから、その比例係数であるバルク交換係数 C_H , C_E は風速によらず一定とされている。しかし、以上の結果は、熱輸送量と風速との比例関係を仮定した従来のバルク法が潜熱輸送に対しては成立しないことを示唆している。そこで、気側での顕熱輸送および潜熱輸送に対する新たな評価パラメータとして、風波気液界面を通しての熱および水蒸気の輸送速度を表す、顕熱係数 $C_H U_{\infty}$ ($\sim h_A$) および潜熱係数 $C_E U_{\infty}$ ($\sim k_A$) を提案した。図 4.2.8 に、顕熱係数 h_A および潜熱係数 k_A を気側一様流速 U_{∞} に対してプロットしたものを示す。図より、 h_A , k_A は、図 4.2.7 で示した顕熱および潜熱に対するバルク交換係数 C_H , C_E よりも、風速に対してばらつきが小さいことがわかる。したがって、気液界面を通しての熱輸送量を精度良く評価するためには、バルク交換係数

C_H , C_E よりも顕熱係数 h_A および潜熱係数 k_A を用いる方が適切であるといえる。ここで、 h_A と k_A は、風速に対して互いに異なる傾向を持つことがわかる。 h_A は全風速域において U_∞ とほぼ比例関係にある。一方、 k_A はさざ波が発生する低風速域では U_∞ とともに増加するが、 $8.0\text{m/s} < U_\infty < 10.5\text{m/s}$ の中風速域では U_∞ に対する増加率が弱まりほぼ一定値を示し、波が崩壊を始める高風速域において U_∞ に対して再び急激に増加する。これは、顕熱輸送は気側乱流に、潜熱輸送は液側乱流にそれぞれ支配されることを示唆している。また、このことは潜熱輸送が風波気液界面を通しての全熱輸送を支配していることをも示唆している。

熱収支法の精度を確認するために、水蒸気収支法を用いて顕熱輸送量 Q_E を測定した。計測された顕熱係数 k_A の値を図 4.2.8 に追記した。図より、熱収支法および水蒸気収支法により見積もられた k_A の値は互いに良好に一致することがわかる。これは、 k_A の値が精度良く測定されていることを示している。また、同図には、3.5wt%の塩水に対する熱移動係数の値 h_A , k_A も気側一様流速 U_∞ に対してプロットされている。真水の場合の値と塩水の場合の値は一致し、全熱輸送係数 h_L の場合と同様に、塩分濃度が気液間の熱移動に影響を及ぼさないことがわかる。

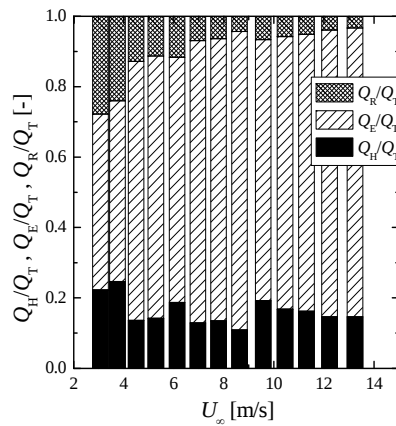


図 4.2.6 全熱輸送量に対する各熱輸送量の比と気側一様流速との関係

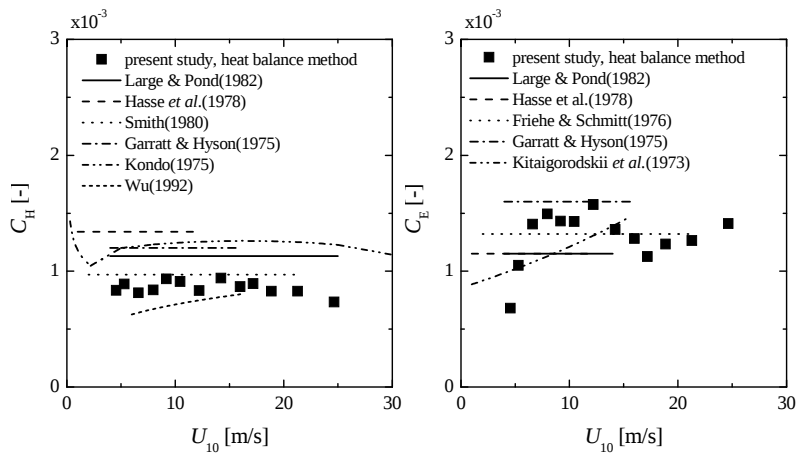


図 4.2.7 顕熱および潜熱に対するバルク交換係数と気側一様流速との関係

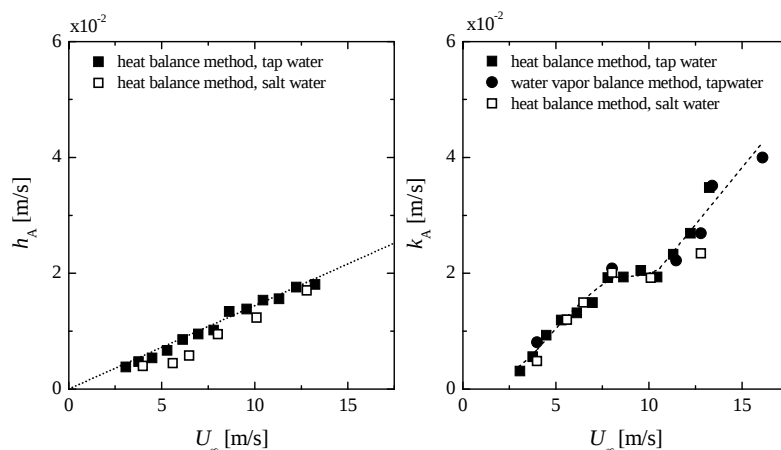


図 4.2.8 顕熱輸送係数および潜熱輸送係数と気側一様流速との関係

③ 高風速時における砕波を伴う風波気液界面を通しての運動量および水・潜熱の移動機構についての研究

上述の実験で用いた小型風波水槽では 20m/s 程度の風速しか再現できず、台風下で発生し得る風速域を網羅することができない。そこで、より高風速域の風波乱流場を再現できる高速風洞水槽を作製し、運動量輸送に関する計測を実施した。

(1-2) 直接数値シミュレーション(DNS)による風波気液界面を通してのスカラの輸送機構に関する研究

近年、地球の温暖化現象が大きな問題となっているが、この地球温暖化の正確な予測を行うためには、大気・海洋間に形成される風波気液界面を通しての熱や二酸化炭素等のスカラ輸送機構を明らかにし、その信頼性の高いモデルを構築することが重要である。これまで、海洋観測や風洞水槽を用いた室内実験により、風波気液界面近傍の流動場やスカラ場の測定が行われてきた。しかし、複雑な移動・変形を伴う風波気液界面のごく近傍において正確かつ詳細な測定を行うことが極めて困難であるため、風波気液界面を通してのスカラ輸送機構は未だ十分に解明されていないのが実状である。そこで本研究では、風波気液界面近傍の流動場およびスカラ場を対象に3次元直接数値シミュレーション(DNS)を実施することにより、風波気液界面近傍の乱流構造とスカラ輸送機構について検討を行った。

① 数値計算法

本計算では、界面追跡手法として風波気液界面の形状に合わせて計算領域全体の格子形状を境界適合座標系(Boundary Fitted Coordinate, BFC)により時々刻々再構成するALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation)法を採用した。図4.2.9に計算領域の概略を示す。 x , y , z 方向をそれぞれ主流、スパン、鉛直方向として、気液界面を挟んで鉛直上側を気相、鉛直下側を液相とした。計算領域および格子点数は主流、スパン、鉛直方向にそれぞれ $8\delta \times 4\delta \times 3\delta$, $200 \times 100 \times 180$ とした。支配方程式の数値解法には有限差分法に基づくMAC(Marker And Cell)法を用いた。本計算では、初期気側一様流速 $U_{\infty,ini}$ を5.2m/s, 初期気側摩擦速度 u_* を0.25m/sとした。この時の気側一様流速 U_{∞} と気側高さ δ ($=1.25 \times 10^{-2}$ m)基準のReynolds数 Re_{in} は4,340, 気側摩擦速度と δ 基準のReynolds数 $Re_{\tau,ini}$ は210となる。またスカラ場の計算は $t=2.35$ sから開始した。ここで、時間 t は気液界面上に風を吹かせ始めてからの時間である吹送時間を表す。本研究では、風波が発達する乱流場(以下、風波乱流場と呼ぶ)と、界面形状を平滑面に固定し風波を発達させない乱流場(以下、平滑乱流場と呼ぶ)の2ケースについて計算を行った。

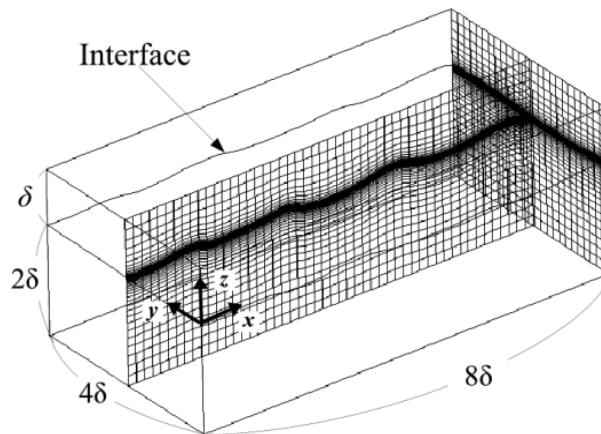


図4.2.9 計算領域

② 研究成果

図4.2.10に風波乱流場の $t = 5.5s$ における界面高さの瞬間分布を示す. 白色の領域が風波の山に, 黒色の領域が風波の谷に相当する. 図より, 気液界面には3次元的な風波が発達しており, 波頂の下流側斜面にはリップルが形成されていることが確認できる.

図4.2.11に気液界面を通してのスカラ輸送係数 k_L の時系列変化を示す. ここで, 図の横軸はスカラ場の計算を開始してから経過時間 t_s である. 図より, k_L 値は計算を開始した直後の大きな値から急激に減少し, 時間の経過に従って一定値に近づくことがわかる. また, その値は, 風波乱流場の方が平滑乱流場に比べて高いこともわかる. この風波乱流場の k_L 値が平滑乱流場に比べて高い値を示す原因を明らかにするために, 風波乱流場および平滑乱流場での $t=4.5s$ における気液界面を通しての局所スカラフラックスの瞬間分布を図4.2.12に示す. なお, 双方でカラーレンジが異なることに注意されたい. 図より, 局所スカラフラックスは, 風波乱流場の方が平滑乱流場よりも高い値を示すことがわかる. また, 風波乱流場と平滑乱流場の局所スカラフラックス分布にはともに主流方向にストリーク状の低い値をとる領域が存在するが, その低局所スカラフラックスストリークは風波乱流場の方が非一様に分布していることもわかる. このような低局所スカラフラックスストリークは, 液側の界面近傍領域に発生するバースティング現象に寄与する縦渦型の(主流方向に軸をもつ)乱流渦が界面付近のスカラを更新するために現れることが知られている. 従って, 風波乱流場では, 波動運動が乱流の発達を促進し, 液側の界面近傍におけるバースティング現象の発生を活発にするため, 平滑乱流場に比べて低局所スカラフラックスストリークが非一様に分布し, 局所スカラフラックスの値が高くなると考えられる. なお, 縦渦型の乱流渦が界面付近のスカラを更新することは, 図4.2.13に示したスカラ濃度の $x-z$ および $y-z$ 断面分布の時間変化からも確認できる. 風波乱流場のスカラは気液界面から縦渦を意味するマッシュルーム状に巻き込まれながら下方へと輸送されることがわかる. 以上から, 本研究で対象とした風速下において, 風波気液界面を通してのスカラ輸送は, 滑面乱流場と同様に液側流動場の縦渦を伴うバースティング現象に支配されると結論づけられる.

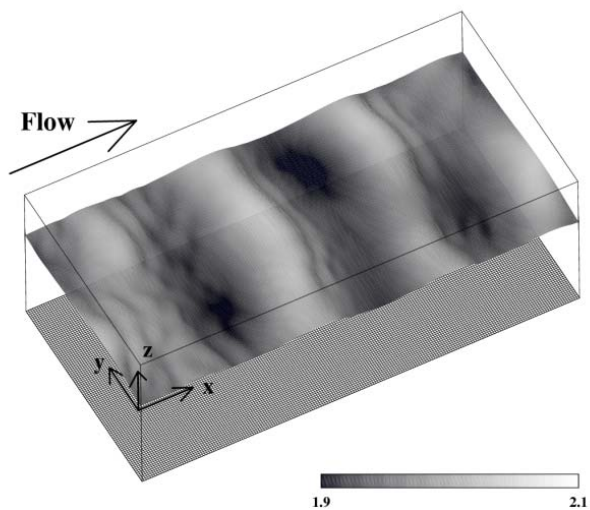


図4.2.10 風波気液界面の形状

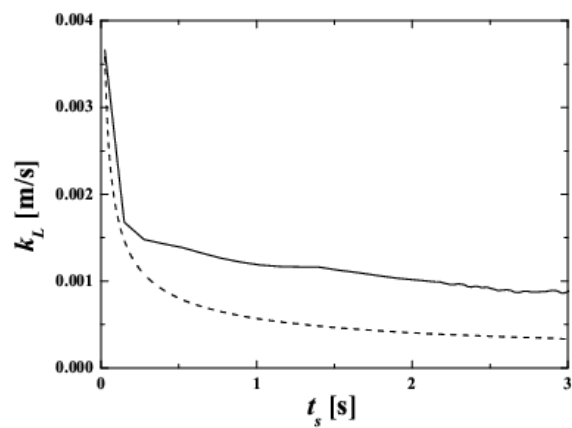
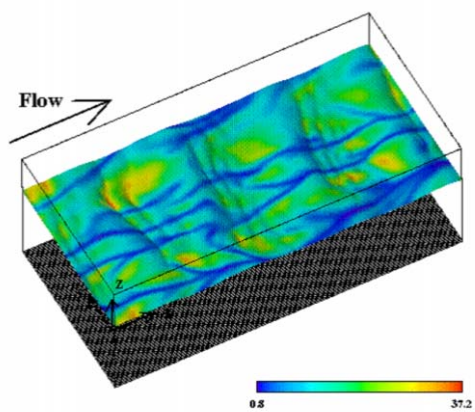
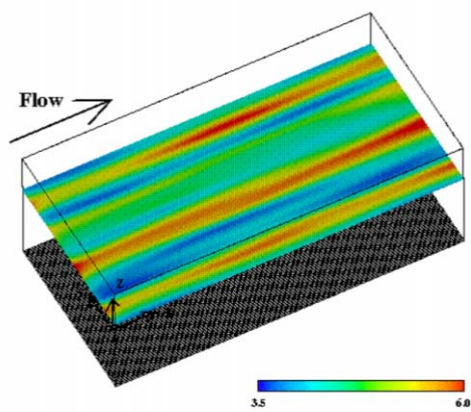


図4.2.11 スカラ輸送係数 k_L の時系列変化
(実線, 風波乱流場; 破線, 滑面乱流場)



(a)風波気液界面



(b)平滑気液界面

図4.2.12 スカラフラックスの瞬間分布 ($t=4.5s$)

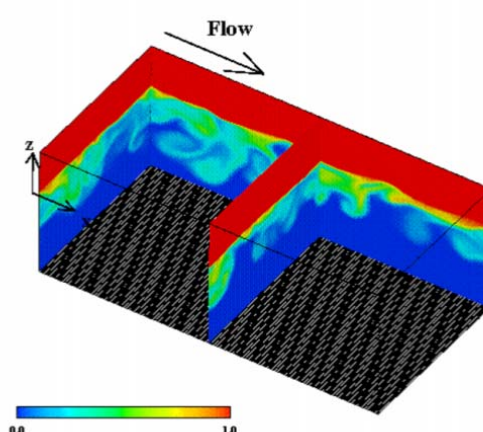
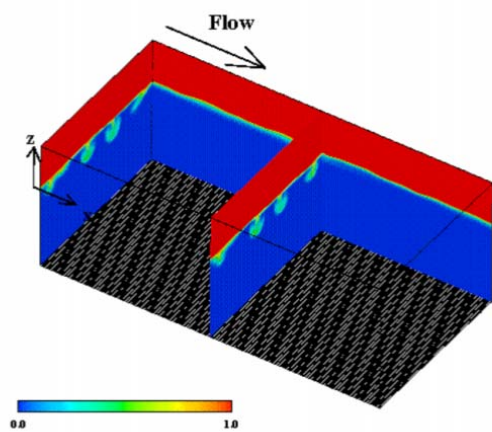


図4.2.13 スカラ濃度分布の瞬間分布(風波気液界面)

(1-3) 飛散単一液滴の蒸発および潜熱移動に関する研究

海洋上の風波乱流場では碎波による飛散液滴が数多く存在する。従って、現在問題となっている地球の温暖化予測を正確に行うためには、この飛散液滴と大気間の熱および CO_2 等の物質の移動メカニズムを明らかにすることが重要である。そこで本研究では、実験と数値シミュレーションにより、外部流の相対湿度が液滴の蒸発速度や、液滴内外部流の温度場および濃度場に与える影響について検討を行った。

① 単一液滴内外部流の数値シミュレーション

(a) 数値計算法

図 4.2.14 に計算対象とした一様流中での蒸発を伴う液滴内外部流の3次元直接数値シミュレーション(DNS)のための座標系を示す。本計算では円柱座標形(x, r, θ)を用い、液滴は表面張力の作用により変形せず、常に球形を保つと仮定した。支配方程式は、連続の式、Navier-Stokes 方程式(NS 方程式)、物質(蒸気、モル濃度)の輸送方程式、および熱の輸送方程式であり、気液界面における温度の境界条件には液滴の蒸発による気液界面からの熱損失を考慮した。図 4.2.15 に設定した計算格子の概略を示す。ここで、 d は液滴径であり、計算領域は主流(x)方向長さ $40d$ 、径(r)方向長さ $20d$ の2次元領域を x 軸に対して周(θ)方向に回転させたものである。計算格子数は ξ, η, θ 方向に、液滴外部流に対しては $35 \times 61 \times 48$ 、液滴内部流に対しては $35 \times 31 \times 48$ とし、液滴表面付近の法線方向の格子間隔を密にした。連続の式と NS 方程式を解く方法としては有限差分法に基づく MAC (Marker and Cell) 法を用いた。液滴内外部の流体はそれぞれ水および空気とし、液滴および気体の温度をそれぞれ 285K, 300K とした。DNS を実行する際のパラメータは液滴外部流の液滴レイノルズ数 Re_d および相対湿度 Hu であり、 $Re_d=1 \sim 400$ (1, 5, 10, 50, 100, 300, 400) および $Hu=0$ (0%), 0.3 (30%) の範囲で変化させた。温度場と濃度場の計算は速度場が安定し擬定常状態に達した後を開始した(以下では、温度場と濃度場の計算開始時刻を $t=0$ とする)。

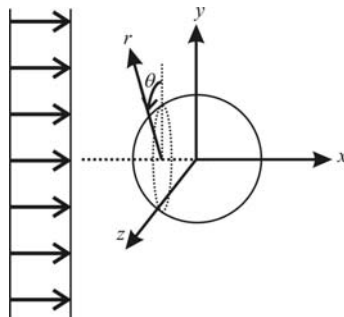


図 4.2.14 計算座標系

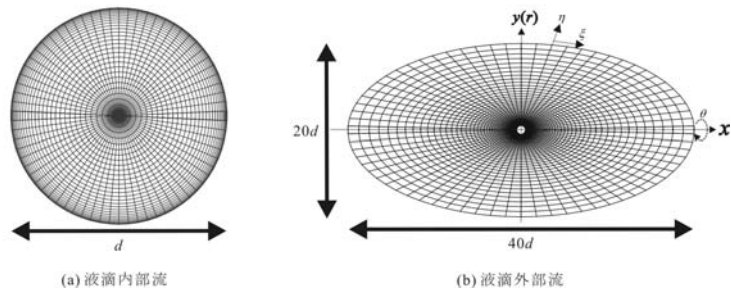


図 4.2.15 計算領域および計算格子

(b) 研究成果

図 4.2.16 に液滴内外部流の瞬間速度ベクトルおよび流線の分布を示す($Re_d=10, 50, 400$)。外部流に着目すると、 $Re_d=10$ の液滴後方にははく離は見られないが、 $Re_d=50, 400$ でははく離とそれに伴う循環流が現れることがわかる。また、そのはく離と循環流は $Re_d=50$ では x 軸に対してほぼ対称であるが、 $Re_d=400$ ではその x 軸対称性が失われていることもわかる。一方、内部流は、全ての場合において、液滴表面付近では後方へ、液滴中心付近では前方へ向かう流れとなることがわかる。これは、液滴表面の流体が外部流によって後方へ引っ張られることに起因する。さらに、内部流は、 Re_d が高い $Re_d=400$ の場合においても、外部流の影響を受けにくいとほぼ x 軸対称になる。図 4.2.17 に初期の液滴質量で無次元化された液滴蒸発量 M^* の時間変化を示す($Re_d=10, 400$)。図より、 Re_d によらず、総蒸発量は外部流の Hu の増加に伴って減少することがわかる。

図 4.2.18 に相対湿度が零の場合($Hu=0$)における液滴内外部流の瞬間温度分布(x - y 断面)の時間変化を示す($Re_d=10, 400$)。なお、図中の温度は無次元化された温度で表されており、カラーバーは上が液滴内部流の温度を、下が液滴外部流の温度を示す。これらの図より、低 Re_d 液滴の場合には x 軸に対してほぼ軸対称となる一方で、高 Re_d 液滴の場合には軸対称性が失われている

ことがわかる. また, 外部流の温度が液滴の初期温度に比べて 15K も高いにもかかわらず, どちらの Re_d の場合においても, 時間が経過するにつれて液滴の温度が低下していることがわかる. これは, 液滴周囲の相対湿度が極端に低いために単位時間当たりの液滴蒸発量が非常に多くなり, 液滴表面から奪われる熱量(蒸発熱)の方が外部流から受け取る熱量(対流熱)よりも大きくなることに起因する. また, 液滴外部の温度境界層は, 周囲速度が遅い低 Re_d 液滴の方が高 Re_d 液滴よりも厚くなる. 一方, 相対湿度が高い場合 ($Hu=0.3$) における液滴内外部流の瞬間温度分布 (x - y 断面)の時間変化を示した図 4.2.19 から ($Re_d=10, 400$), 液滴内部の温度は $Hu=0$ の場合とは逆に上昇することがわかる. これは, 液滴周囲の相対湿度が上昇したために単位時間当たりの液滴蒸発量が減少し, 液滴表面から奪われる熱量(蒸発熱)よりも外部流から受け取る熱量(対流熱)の方が大きくなるためである.

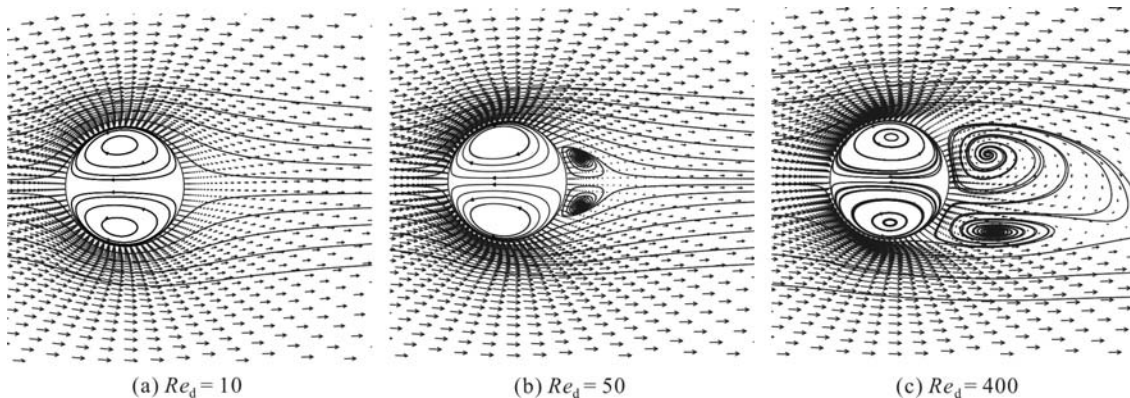


図 4.2.16 液滴内外部流の瞬間速度ベクトルおよび流線分布

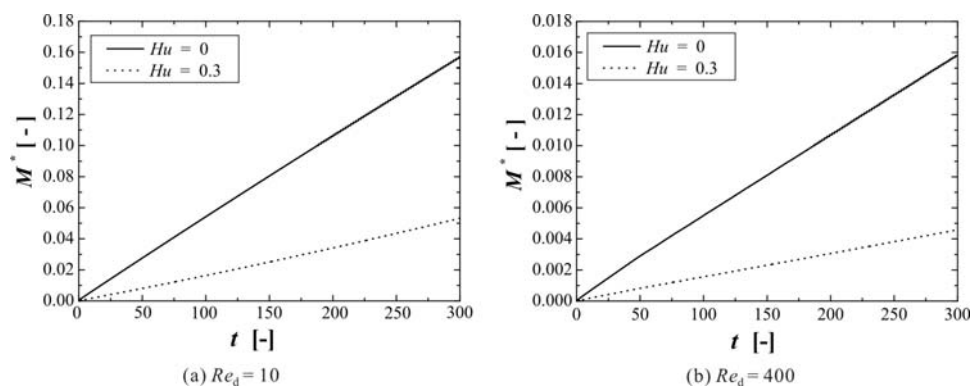


図 4.2.17 液滴からの総蒸発量の時間変化

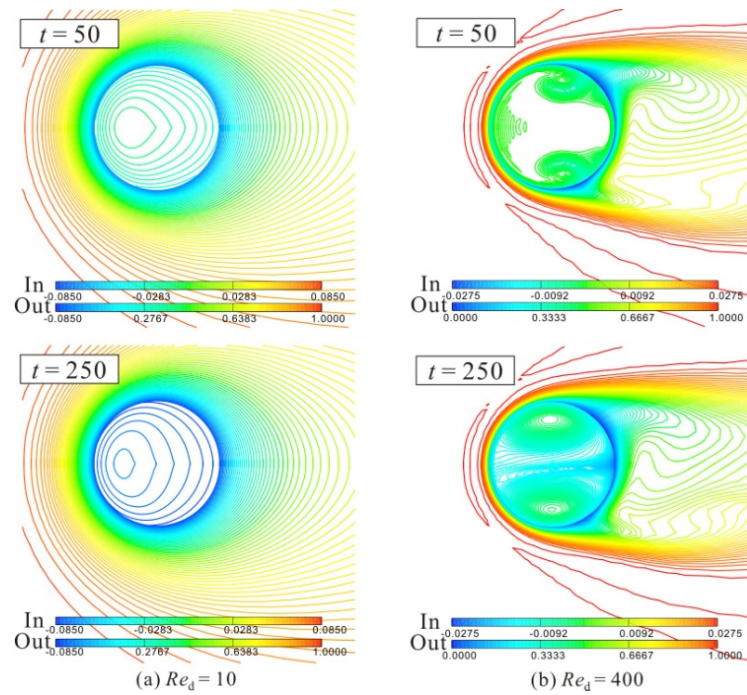


図 4.2.18 液滴内外流の瞬間温度分布の時間変化 ($Hu=0$)

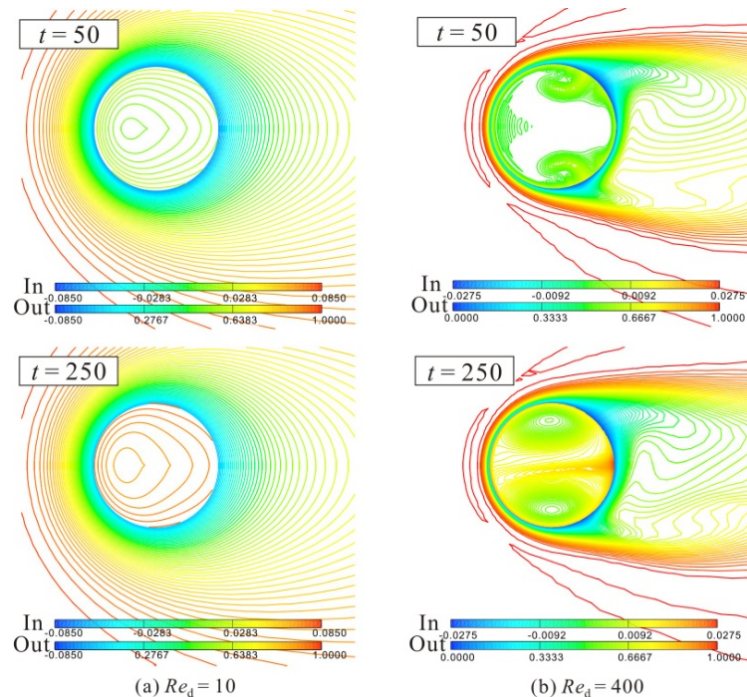


図 4.2.19 液滴内外流の瞬間温度分布の時間変化 ($Hu=0.3$)

② 単一液滴の蒸発実験

(a) 実験方法

図 4.2.20 に実験装置の概略図を, 図 4.2.21 に測定システムの概略を示す. 本実験では, 空気をブロワまたは空気ポンプから供給し, 恒温槽, バッファ部および風洞部を介してテストセクションに流入させる. テストセクション部は, 大きさが $120\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ のアクリル製である. 空気の相

対湿度は、空気ボンベからの乾き空気、もしくは吸入口を湿らせたブロアを通しての空気を用いることで変化させる。また、空気の温度は、空気を通す恒温槽内の水温度を変化させることで調整する。液滴は、テストセクション中心軸上の $x=100\text{mm}$ に設置された針(直径 0.08mm)の先端に付着させることで固定する。気流の温度をクロメル-アルメル熱電対を用いて、湿度をデジタル湿度計を用いて測定する。また、テストセクション内の流れ場を、PIV システムを用いて測定する。さらに、液滴の表面温度および直径を赤外線サーモグラフィおよびデジタルカメラを用いて同時に測定する。実験は、液滴の設置位置付近における気流温度を $T_g=303\pm0.3\text{K}$ で固定し、相対湿度を $Hu=0$ ($0\pm2\%$) または 0.3 ($30.0\pm0.5\%$) の 2 ケースに変化させて行った。また、液滴の初期径 d_0 を 1.2mm 、液滴表面の初期温度を 288K とし、液滴には蒸留水を用いた。また、上述した数値シミュレーションとの比較を行うため、液滴レイノルズ数が $Re_d=60, 120, 150$ となるように空気流量を調節した。

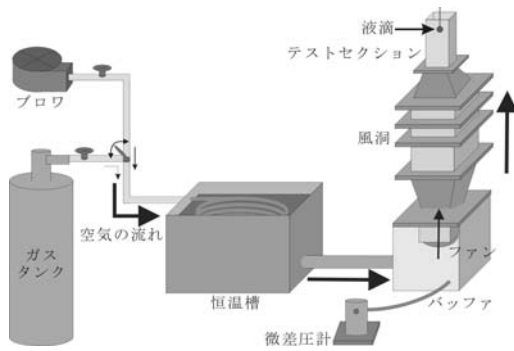


図 4.2.20 実験装置

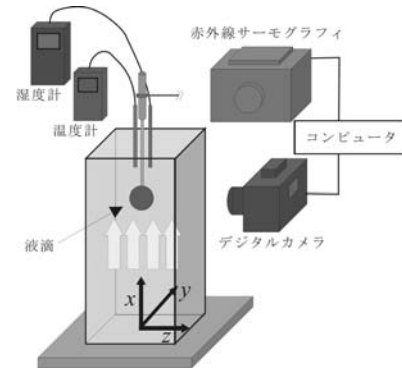


図 4.2.21 測定システム

(b) 研究成果

図 4.2.22 に液滴径の時間変化を示す。図より、 Re_d が大きい方が、また Hu が小さい方が蒸発は速く、液滴径の変化量も大きいことがわかる。また、液滴表面温度 T_s と液滴表面の初期温度 $T_s^0=288\text{K}$ の差の時間変化を図 4.2.23 に示す。図より、測定開始と同時に、液滴表面温度は、相対湿度が高い場合 ($Hu=0.3$) には上昇するが、相対湿度が極端に低い場合 ($Hu=0$) には液滴表面の初期温度が空気温度よりも 15K 低いにもかかわらず低下することがわかる。この傾向は前述した数値シミュレーション結果と良く一致している。また、全ての場合において、時間が十分に経過すると液滴表面温度がある一定の温度に収束することがわかる。これは、液滴表面から奪われる蒸発熱と気側から受け取る対流熱がこの温度で釣り合うことに起因する。

図 4.2.24 に液滴レイノルズ数 Re_d とヌセルト数 $Nu(=hd/\lambda)$ 、ここで h , λ はそれぞれ外部流の熱伝達係数および熱伝導率) の関係を示す。図より、本実験値は前述の数値シミュレーション値ならびに既往の実験値とほぼ一致することがわかる。この結果は、相対湿度の違いがヌセルト数にはほとんど影響を及ぼさないことを意味している。

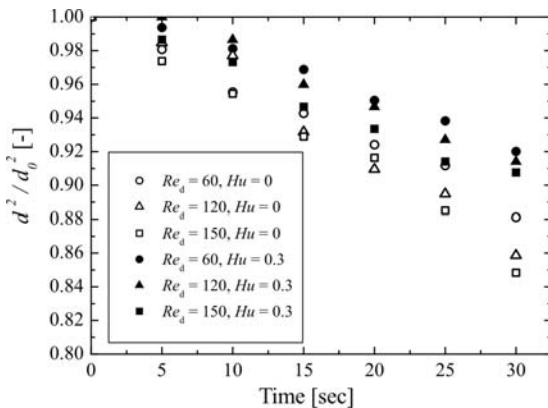


図 4.2.22 液滴径の時間変化

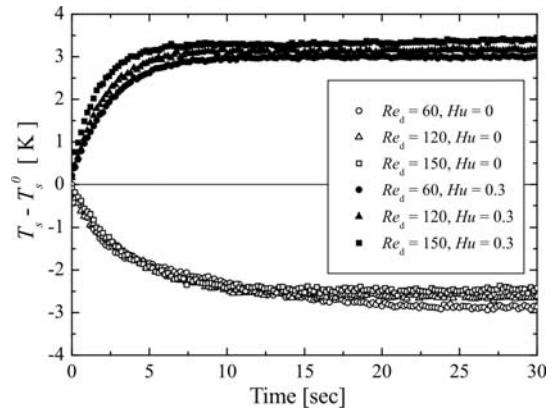


図 4.2.23 液滴表面温度の時間変化

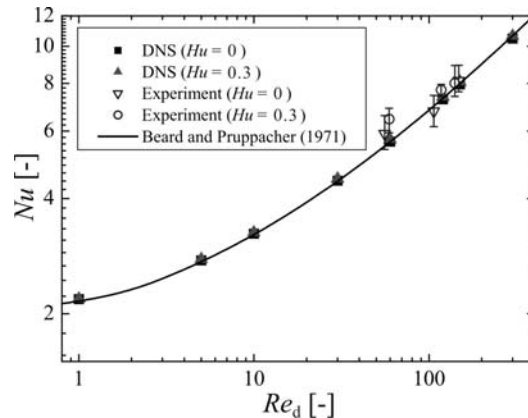


図 4.2.24 液滴レイノルズ数とヌセルト数の関係

(1-4) 開水路実験による降雨が気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす影響に関する研究

大気中の CO_2 濃度の上昇に伴う地球温暖化の予測に現在用いられている大気・海洋大循環モデルによる数値シミュレーションにおいて正確な温暖化予測を行うためには、地球の表面積の約 7 割を占める海洋と大気間での CO_2 をはじめとする温室効果ガスの交換量を正確に評価することが重要である。これまでの CO_2 における大気・海洋間の物質移動量を計算するためのサブモデルにおいては、ウィンドシアにより液側界面近傍に生成される乱流渦の影響は考慮されているが、代表的な気象現象の 1 つである降雨の影響については全く考慮されていない。しかし、自然界における気液界面を通しての物質移動に関して、Banks (J. Env. Eng. Div., 1977) および Ho (Tellus, 1997) は降雨により生成される液側界面近傍の乱流渦の影響を無視できないと結論付けている。ところが、これらの既往研究は、界面衝突時の雨滴速度や雨滴径が気液間の物質移動に及ぼす影響を及ぼすかについて十分検討せずに、降雨による気液間物質移動促進効果は雨滴の運動エネルギーフラックス KEF により一意に決定できると結論付けている。そこで本研究では、無風状態における湖や海洋のシミュレーション装置である開水路に降雨装置を設置し、降雨装置により生成された雨滴を開水路の自由表面に衝突させ、降雨が開水路流れの気液表面を通しての物質移動に及ぼす影響を比較・検討した。

① 実験方法

(a) CO_2 吸収実験

図 4.2.25 に、本実験に用いた降雨装置つき開水路の概略を示す。開水路は全長 7.6m、幅 0.5 m、高さ 0.2m であり、その側面および底面は透明のガラス製である。開水路流れの水深を 0.06m および 0.17m、断面平均流速を 0.056m/s～0.164m/s に設定した。

図 4.2.26 に、降雨装置の概略を示す。降雨装置 (1.0m×0.4m×1.5m) はアクリル製であり、開水路入口から下流へ 5～6m の位置に設置した。ヘッドタンク底面と開水路自由表面の距離を 0.38m～1.20m の間で調整することにより液滴の界面衝突速度 v_p を 2.4～4.7m/s に変化させた。降雨装置上部には、底面に複数の注射針が取り付けられたヘッドタンク (1.0m×0.6m×0.3m) が設置されており、これらの注射針から単一径の液滴を落下させた。注射針の本数は 21～532 本とした。注射針の針外径を 0.4mm～0.8mm、およびヘッドタンク水位を 45～165mm と調節することにより雨滴径 d_p を 2.1～5.6mm に変化させた。以上のように降雨装置の設定を変化させることにより、単位時間・単位面積あたりの雨量 R を 0～435mm/h の範囲で変化させた。なお、雨量 R は降雨装置の下にプラスチックのバットを置き降雨を採取し、降雨量をガラス製のメスシリンダを用いて測定した。降雨の採取時間を 180s とした。 CO_2 の吸収実験の際には、降雨装置下部にエッジを装着し、エッジと開水路中央付近の自由表面を、界面張力を利用して接触させることによりガス吸収部を密閉状態とした。開水路乱流の自由表面を通して吸収された CO_2 量を測定するために、あらかじめガス吸収部に純 CO_2 を大気圧で充満させ、開水路流れの自由表面を通しての CO_2 吸収量 Q_{CO_2} に相当するバッファタンクからガス吸収部への CO_2 の流入量を、石鹼膜流量計を用いて測定した。

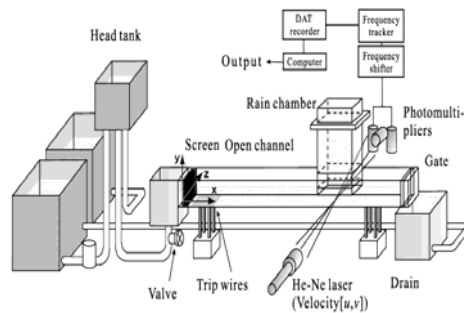


図 4.2.25 開水路の概略図

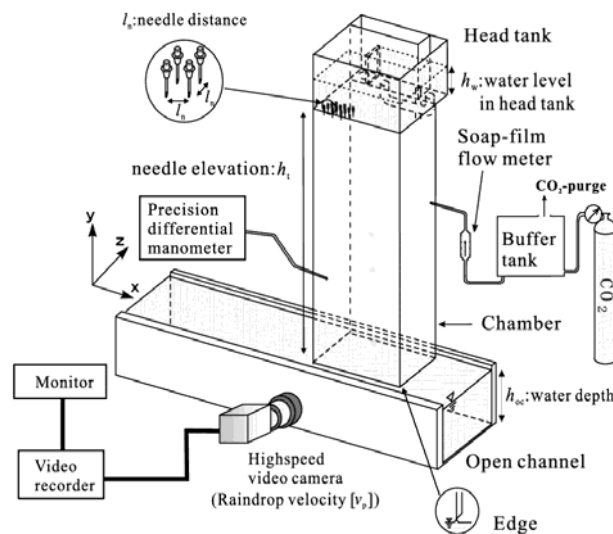


図 4.2.26 降雨装置の概略図

(b) 液側物質移動係数

CO_2 の単位面積あたりの界面を通しての物質移動フラックス F_{CO_2} は液側物質移動係数 k_L と推進力 (液相界面濃度 C_s とバルク濃度 C_B の差) の積として次式で表される. また, チャンバ内は純 CO_2 が大気圧で充満されているとみなせるため C_B は C_s と比べて無視できるほど小さい. したがって, F_{CO_2} の値は次式で計算される.

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{Q_{\text{CO}_2}}{A} \quad (4.2.4)$$

ここで, A ($=1.00\text{m} \times 0.40\text{m}$) は降雨装置下で CO_2 吸収が起こる開水路流れの表面積である. したがって, ガス吸収実験で得られた Q_{CO_2} の測定値から k_L を計算し, 温度補正式を用いて 20°C での物質移動係数 k_L^* を導いた. さらに, 気液界面を通しての物質移動に及ぼす降雨の影響を表す物質移動係数 $k_{L,R}$ として, 測定された物質移動係数 k_L^* から降雨を伴わない場合での開水路乱流による物質移動係数 $k_{L,0}$ を差し引いた値とした.

(c) 運動量フラックスおよび運動エネルギーフラックス

本研究では, 降雨の強度を表わすパラメータとして, 雨量 R と雨滴速度 v_p により定義される2つの降雨パラメータを用いた. 1つは, 本研究で新しく提案する単位面積の気液界面に衝突する雨滴のもつ鉛直方向運動量フラックス MF である. もう1つのパラメータは, Banks および Ho の既往研究で使用された雨滴の運動エネルギーフラックス KEF である. ここで, MF および KEF は, 雨滴が単位時間・単位面積に界面に与える運動量および運動エネルギーである. 質量 m を持つ単一雨滴の運動量 M および運動エネルギー E_k はそれぞれ

$$M = mv_p = \rho_w V_p v_p \quad (4.2.5)$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv_p^2 = \frac{1}{2}\rho_w V_p v_p^2 \quad (4.2.6)$$

で表される。ただし、 V_p は雨滴の体積である。したがって、 MF および KEF は次式で表される。

$$MF = nM = \rho_w V_p n v_p = \rho_w R v_p \quad (4.2.7)$$

$$KEF = nE_k = \frac{1}{2}\rho_w V_p n v_p^2 = \frac{1}{2}\rho_w R v_p^2 \quad (4.2.8)$$

ここで、 n は単位時間・単位面積に衝突する雨滴の個数であり、 $R=nV_p$ である。

② 研究成果

図 4.2.27 に、雨量 R に対する 20°C での物質移動係数 k_{LR}^* の関係を示す。白抜きのプロットはヘッドタンク高さが 0.38m と 0.49m 、雨滴の衝突速度が $v_p \sim 2.6\text{m/s}$ の場合を表しており、塗りつぶしのプロットはヘッドタンク高さが 1.09m と 1.20m 、雨滴の衝突速度が $v_p \sim 4.2\text{m/s}$ の場合を表している。図より、 v_p が異なる場合には、 k_{LR}^* の値が異なることがわかる。これは、 R と v_p は独立した降雨パラメータであること、および、 R は気液界面を通しての物質移動を支配する最適な降雨パラメータではないことを示している。図 4.2.28 に、 k_{LR}^* と雨滴の運動エネルギーフラックス KEF および雨滴の運動量フラックス MF の関係を示す。ここで、図(b)中の実線は次式

$$\begin{aligned} k_{LR}^* &= 1.35 \times 10^{-3} MF \quad \text{for } 0 < MF \leq 0.011 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 \\ k_{LR}^* &= 3.5 \times 10^{-4} MF^{0.7} \quad \text{for } MF \geq 0.011 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

で示される実験相関式である。図(a)より、既往研究により降雨のパラメータとして提案されている KEF を用いた場合にも、 v_p が異なると k_{LR}^* の値は異なる。このため、降雨パラメータとして v_p を考慮することは重要であるが、 KEF は気液界面を通しての物質移動を支配する最適な降雨パラメータではないと言える。一方、図(b)より、降雨パラメータとして本研究で提案する MF を用いた場合は、 v_p が異なる場合にも、すべての MF の値の範囲において、 k_{LR}^* は一本の線で相関できることがわかる。したがって、 R や KEF よりも MF の方が気液界面を通しての物質移動を相関するための降雨パラメータとして最適であるといえる。

降雨による物質移動量を評価するために、風波気液界面を通しての物質移動係数と降雨による物質移動係数を比較した。図 4.2.29 に、液側物質移動係数 $k_L^*(\text{CO}_2)$ と海上 10m の地点における風速 U_{10} の関係を示す。ただし、点線および破線はそれぞれ McGillis (JGR, 2001)および Wanninkhof (JGR, 1992)により提案された相関式である。また、実線は自然界での最大の降雨時 (140 mm/h)での降雨による物質移動係数 $k_L^*(\text{CO}_2)$ の値である。図より、自然界での降雨による $k_L^*(\text{CO}_2)$ の最大値は風波乱流場における $U_{10} \sim 13\text{m/s}$ での k_L に相当し、降雨の効果は高風速域での風波気液界面を通しての物質移動促進効果と同等であることがわかる。これは大気・海洋大循環モデルにおいて大気・海洋間の物質移動について考慮する際、降雨の影響を考慮する必要があることを示唆している。

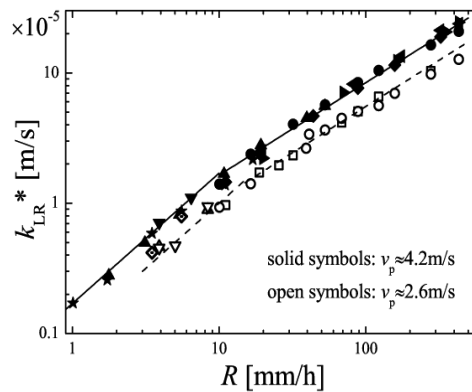


図 4.2.27 物質移動係数と雨量との関係

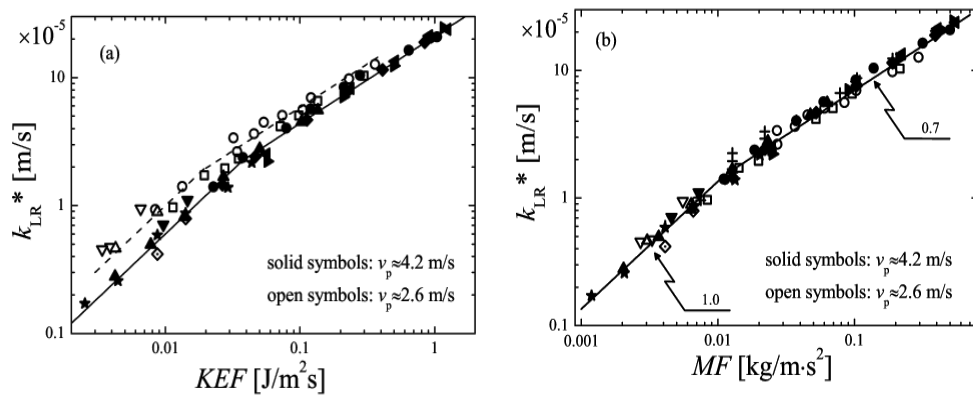


図 4.2.28 物質移動係数と雨滴の運動エネルギーフラックスおよび雨滴の運動量フラックスとの関係

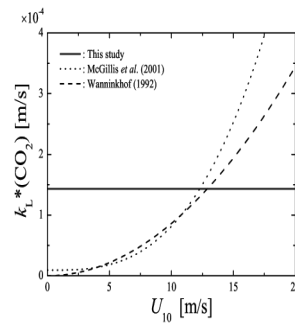


図 4.2.29 自然界における最大降雨時の降雨による物質移動係数と風波気液界面を通過する物質移動係数との比較

(1-5) 数値シミュレーションによる雲粒の衝突成長に関する研究

気相乱流中で液滴粒子が互いに衝突するという現象は工学流れだけでなく環境流れの中でも広く見られる。最新の研究によれば、雲粒の衝突頻度が乱流によって増大させられることが明らかになっている。Lynn et al. (Mon. Wea. Rev., 2005) は Penn State-NCAR Mesoscale Model (MM5) を用いてフロリダで発生したスコールラインを計算し、雲粒の衝突成長に及ぼす乱流効果を調べた。その結果、乱流による衝突促進効果を考慮すると降雨の発生時期や発達をよりよく予測できることを明らかにした。彼らの研究は、実地形上で発達するメソスケール雲における乱流効果を調べた初めての研究である。しかしながら、彼らは乱流効果として衝突確率を一律に定数倍しており、乱流効果を詳細に調べたとは到底言えない。乱流効果を詳細に解明するためには、局所的な乱流場に応じた衝突頻度を用いて、雲シミュレーションを行う必要がある。しかしながら、そもそも、雲粒の

ような慣性を持った粒子の乱流中での衝突頻度を予測するモデルの開発が進んでいない状況である。流れの無い、もしくは層流の場合の慣性粒子の衝突頻度因子 $K_{c,hydr}$ は以下の Hydrodynamic 因子モデルで良く予測される。

$$K_{c,hydr} = \pi R_{12}^2 |V_{\infty,1} - V_{\infty,2}| \quad (4.2.10)$$

ここで、 $R_{12}(=r_1+r_2)$ は衝突半径、 V_{∞} は粒子の終端速度を表す。

一方、乱流中での慣性粒子の衝突頻度 $K_{c,turb}$ は以下のように定式化される。

$$K_{c,turb} = 2\pi R_{12}^2 \langle |w_r| \rangle g_{12}(R_{12}) \quad (4.2.11)$$

ここで、 w_r は接触時相対接近速度、 $g_{12}(R_{12})$ は近接粒子分布関数と呼ばれる量である。後者は粒子が偏分布することによる衝突頻度の増大を表す。これら2つの項のうち、 w_r に関してはいくつかのモデルが提案され、その信頼性も確認されている。しかし、 $g_{12}(R_{12})$ に対する現実的なモデルは提案されていなかった。そこで、 $g_{12}(R_{12})$ に対して適切なモデルを提案することによって、新たな衝突頻度因子モデルの開発を行った。また、最新のスーパーコンピュータを持ってしても、乱流の最小渦スケール(コルモゴロフスケール $\sim 1\text{mm}$)を解像して雲シミュレーションを行うことは不可能である。そのため、雲乱流を考慮した雲シミュレーションには、Large-Eddy Simulation (LES) が用いられる。しかし、雲粒の乱流衝突成長までを考慮した3次元雲シミュレーションに対する LES は行われてこなかった。そこで、対流雲に対する信頼性の高い数値シミュレーション手法を開発するための第一歩として、乱流の影響までを考慮して粒子の衝突成長を計算できる Large-Eddy Simulation (LES) 手法の開発を行った。

① 研究手法

(a) 乱流衝突頻度モデルの開発

気相乱流場の運動を擬スペクトル法による直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) を用いて計算した。時間発展には4次精度のルンゲクッタ法を用い、また、三分の二法を用いてエイリアシング誤差を除去した。 $2\pi \times 2\pi \times 2\pi$ の立方体計算領域に $64 \times 64 \times 64$ 個もしくは $96 \times 96 \times 96$ 個の計算格子数を等間隔に配置した。壁面境界条件として周期境界条件を用い、また、波数が1である渦の強さを一定に保つ強制外力によって定常な流れ場を形成させた。

定常な気相乱流場が形成されたことを確認後、4,096 個の粒子を混入させ、さらに緩和時間 τ_p の10倍以上の時間経過後から衝突を開始させた。本研究では雲粒を主対象と考えて、粒子として微小水滴を仮定し、水滴に働く抗力としてストークス効力を仮定した。衝突は二粒子間衝突のみを考慮し、二粒子間の距離が粒子の直径以下になれば衝突したとみなした。衝突判定を行う場合には、時間ステップ毎に粒子が最大でもその直径の5分の1程度しか移動しないように時間刻みを設定した。また、衝突による運動量交換によって引き起こされる余分な衝突を避けるために、衝突後には一方の粒子を消滅させた。一回衝突が起これば粒子の総数が一個減少するので、粒子の減少率から衝突頻度因子 K_c を算出した。

(b) Large-Eddy Simulation (LES) による雲粒の衝突成長計算法

本研究では、流体相だけでなく粒子相の計算にもオイラー法を適用する。オイラー法に基づいて粒子を計算する場合には、各計算格子における粒子の数密度分布関数、もしくは質量密度分布関数が計算される。そして、粒子の衝突成長方程式は次の Stochastic Collection Equation (SCE) で表される。

$$\frac{\partial n(m, t)}{\partial t} = \int_{m_{\min}}^{m_h} K_{coal}(m', m) n(m', t) n(m, t) dm' - \int_{m_{\min}}^{\infty} K_{coal}(m, m') n(m, t) n(m', t) dm' \quad (4.2.12)$$

ここで、 m は粒子質量、 n は粒子の数密度分布関数、 $K_{coal}(m_a, m_b)$ は質量 m_a を持った粒子と質量 m_b を持った粒子の衝突合体因子をそれぞれ表す。 $m' = m - m'$ であり、積分区間に現れる $m_{\min}$ は粒子をサイズで離散化した時の最小粒子質量、 m_h は m の半分の質量をそれぞれ表す。衝突合体因子 K_{coal} は衝突頻度因子 K_c と合体率 E_c の積で表される ($K_{coal} = E_c K_c$) が、本研究は衝突した2粒子は必ず合体する ($E_c=1$) と仮定したので、 $K_{coal} = K_c$ であった。

式(4.2.10)で示された乱流衝突頻度因子は気相乱流の状態に依存する. そのため, LES を用いる場合, 格子スケール(Grid-scale, GS)の統計量から格子以下のスケール(Subgrid-scale, SGS)の統計量を見積もる必要がある. 例えば, 本研究では粘性消散率 ε を次式のように GS 成分(ε_{GS})と SGS 成分(ε_{SGS}) から近似した.

$$\begin{aligned}\varepsilon &\approx \varepsilon_{GS} + \varepsilon_{SGS} \\ &= \nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + (C_s \Delta)^2 \left| \bar{D}_{ij} \right|^3\end{aligned}\quad (4.2.13)$$

ここで, ν は動粘性係数, $\bar{U}$ は流体速度の GS 成分, C_s はスマゴリンスキー係数, $\bar{D}_{ij}$ はひずみ速度テンソルの GS 成分である. この ε からコルモゴロフスケールなどを算出して, 乱流衝突頻度モデルの入力とした.

② 研究成果

(a) 乱流衝突頻度モデルの開発

DNS により得られた液滴間の衝突成長に関するデータベースを基にして, 雲中にも適用出来る雲粒衝突成長モデルを構築した. 図 4.2.30 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. 一方の粒子の半径を $30[\mu\text{m}]$ に固定し, もう一方の粒子の半径を横軸にとった. 本図より, 本衝突頻度因子モデルの結果(実線)と直接数値計算(Direct Numerical Simulation, DNS)の結果(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. また, 乱流の効果を考慮しない Hydrodynamic モデルの結果(破線)は DNS の結果よりも小さい. つまり, 既存の代表的な衝突頻度因子モデルである Hydrodynamic モデルは乱流中での衝突頻度因子を正しく予測できないことがわかる.

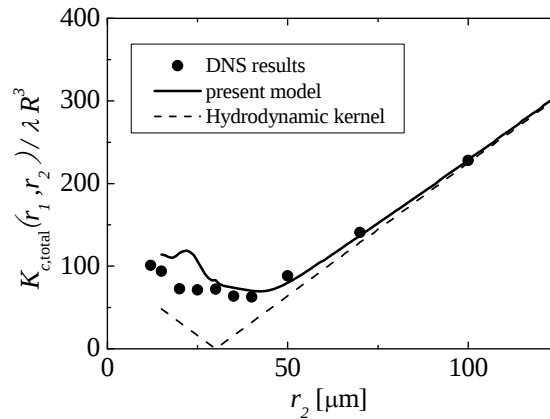


図 4.2.30 液滴粒子の衝突頻度の計算値の比較

(b) Large-Eddy Simulation (LES) による雲粒の衝突成長計算法

対流雲中での粒子の衝突成長を想定して LES による粒子の衝突成長計算を行った. 図 4.2.31 に, 初期粒子径分布として対流雲の成長初期段階に見られる代表的な粒子径分布(太実線)を用いたときの, $t/T_e=40$ (T_e は積分時間スケール)における質量密度関数の結果を示す. 本図より, (a) で開発した乱流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 LES 手法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る. 一方, Hydrodynamic 因子モデルを用いた LES は粒子成長を過小評価することがわかる.

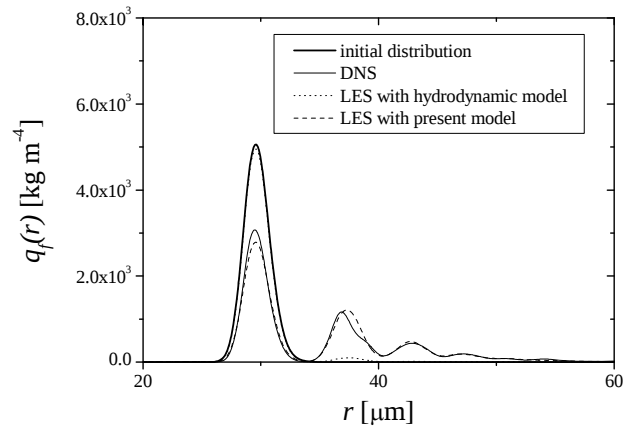


図 4.2.31 $t/T_e=40$ における質量密度関数 ($Re_\lambda=44$)

(1-6) 雲粒成長の素過程が雲の発達に及ぼす影響に関する研究

豪雨による人的・経済的被害の軽減のためには、その発生予測精度の向上が急務の課題である。雲には層状雲(層雲)と対流雲(積雲)の大きく2種類あるが、その中で豪雨をもたらすものは後者である。そのため、対流雲の発達の正確な予測が、豪雨の予測精度向上に大きく寄与すると考えられる。雲微物理分野において、長い歴史を持つ議論がある。それは、対流雲の中で水滴が半径 $10\ \mu\text{m}$ 程度から有意な落下速度を持つ $50\ \mu\text{m}$ 程度の大きさまでに急激に成長する現象をうまく説明できない問題である。水滴は、そのサイズが小さい間は、主に凝縮成長によって成長する。小さい水滴ほど半径の成長速度が大きいので、凝縮成長に伴って水滴サイズは揃っていく。同程度の大きさの水滴は落下速度差が小さく、なかなか衝突しない。なんらかの理由でいったんサイズ分布が拡大すれば、大水滴と小水滴の持つ大きな落下速度差によって衝突成長が一気に進む。しかし、サイズ分布の初期の拡大を引き起こすものが何かについて諸説が議論されてきた。この議論の解決無くしては、雲シミュレーションの信頼性向上は成し得ない。諸説の中の代表的なものとして、乱流エントレインメント説、巨大雲凝結核(Giant Cloud Condensate Nuclei, GCCN)説、そして、雲乱流による衝突成長促進説がある。これらの説に関する議論では、大気の流れ力学と熱力学(いわゆる力学過程)と雲微物理過程とが切り離された簡易なパーセルモデルや、2次元気象モデルが用いられてきた。現実に近い条件下で、3次元空間内で発達する雲を対象として行われた検証は非常に限られていた。そこで本研究では、GCCNおよび雲乱流による衝突成長促進が雲の発達に及ぼす影響を3次元雲シミュレーションによって明らかにすることを目的とした。

① 研究手法

MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) モデルは(独)海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・マルチスケールモデリング研究グループ(高橋グループ)が開発を進めている全球・大気海洋結合気象モデルである。

このMSSGにはMSSG-ビン法と呼ばれる雲微物理計算法が実装されており、その中では液水をサイズによって多数のビン(クラス)に分割した上で、凝結核活性化過程、凝縮成長過程および衝突成長過程が詳細に計算される。このMSSG-ビン法に(1-5)節で開発した雲粒の乱流衝突成長計算法を実装した。そして、式(4.2.12)のSCEを計算する際に、式(4.2.10)のHydrodynamic因子モデルを用いた場合と、式(4.2.11)の乱流衝突因子モデルを用いた場合の結果を比較することによって、雲粒の乱流衝突が雲の発達に及ぼす影響を調べた。

対象とする雲として、海洋上で発達する自由熱対流雲を取り上げた。実験条件には、集中観測データを基にした気象モデルの比較実験であるRICO(Rain In Cumulus over the Ocean field campaign)実験の設定を用いた。計算領域は $12.8\text{km} \times 12.8\text{km} \times 4\text{km}$ であり、そこに $128 \times 128 \times 100$ 個の計算格子を配する(図 4.2.32 参照)。水平方向には周期境界条件を用い、上部境界には

スリップ条件を課す。下部境界(地表面)では、運動量、熱および水蒸気フラックスをバルク式によって与える。初期値には観測で得られた温位、水蒸気、風速の鉛直分布を与え、また、準平衡状態を実現するために、外力として下降流や水平移流、放射冷却を与えながら 24 時間積分する。解析は最後の 4 時間を対象とする。

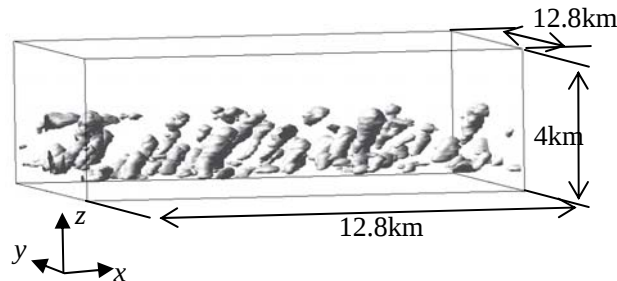
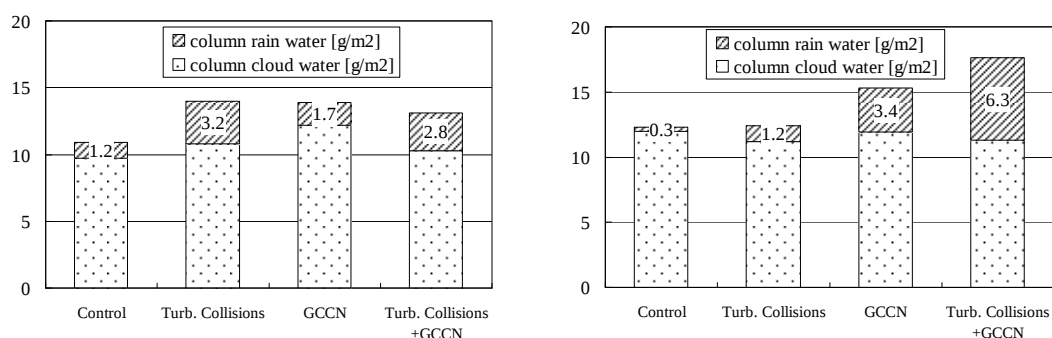


図 4.2.32 海洋上で発達する浅い積雲に対する数値計算領域

② 研究成果

図 4.2.33(a)に、背景のエアロゾルとして海洋性エアロゾル(数密度が小さく、サイズの大きな CCN を生成する)を仮定した場合の気柱雲水量と気柱雨水量の結果を示す。ただし、半径 $40\mu\text{m}$ よりも小さな水滴を雲粒、大きな水滴を雨粒とした。標準設定(control)では、衝突頻度因子に Hydrodynamic 因子モデルを用いることにより乱流衝突を考慮せず、さらに GCCN の存在を考慮しない。図より、乱流衝突を考慮した場合には、気柱雨水量が増大されることがわかる。これは、乱流衝突によって衝突成長が促進され、雲粒から雨粒への変換速度が大きくなるためである。GCCN を考慮した場合にも、気柱雨水量は増大される。しかし、乱流衝突よりも影響は小さい。乱流衝突と GCCN の両方を考慮した場合にも大きな相乗効果は見られない。これは、海洋性エアロゾル自体がそもそも比較的大きな CCN を生成するので、GCCN の影響が隠れてしまうためだと考えられる。

図 4.2.33(b)に背景のエアロゾルとして大陸性エアロゾル(数密度が大きく、サイズの小さな CCN を生成)を仮定した場合の結果を示す。図より、乱流衝突を考慮した場合、GCCN の影響を考慮した場合、ともに気柱雨水量は増大されることがわかる。また、海洋性エアロゾルを仮定した場合とは異なり、GCCN の影響は乱流衝突の影響よりも大きく、乱流衝突も GCCN も考慮した場合には大きな相乗効果があることがわかる。



(a) 海洋性エアロゾル

(b) 大陸性エアロゾル

図 4.2.33 気柱雲水量、および気柱雨水量

(2) 研究成果の今後期待される効果

本グループでは、海水面を通しての水の移動現象と雲粒の成長現象に着目し、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研究を進めてきた。今後期待される効果を以下にまとめる。

(1) 海水面を通しての水・潜熱の移動機構に関する研究について

本研究では、砕波を伴わない場合の風波特性、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、風波水槽を用いた精巧な室内実験により正確に評価し、そのメカニズムを高精度の数値シミュレーションにより明らかにした。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、界面上に風が吹いていない場合のみについて明らかにした。これらの成果は、台風の勢力予測・進路予測の高精度化や、地球温暖化予測に重要な海洋上局所での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。今後は、高速風洞水槽が完成から半年しか経過していないために未だ十分に検討が行えていない、砕波を伴う場合の風波特性、および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明らかにすると共に、界面上を風が吹く場合についての降雨の影響を明らかにする予定である。

(2) 雲粒の成長機構に関する研究について

本研究では、慣性粒子の衝突現象に着目し、直接数値計算を用いることによって粒子衝突に関するデータベース、偏分布モデル、および衝突頻度モデルの構築を行った。また、ここで開発した高精度の衝突頻度モデルと経験パラメータの少ないMSSG-ビン法を使用した雲シミュレーション法、つまり気象予測シミュレーション法を開発した。今後、より高いレイノルズ数における粒子衝突のデータベースを構築していくことにより、これらの成果は、実際の雲の中で見られる雲粒の衝突成長現象の解明に大いに役立つことが期待される。また、本気象予測シミュレーションコード法を用いることによって、豪雨の予測精度が飛躍的に向上することが期待される。

4.3 高性能数値解法に関する基礎研究及び大規模気液乱流数値モデルの開発(東京工業大学 矢部グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

本グループでは、CIP法を基本とする高性能数値解法の開発および検証、さらに、環境流体力学における1つの難問である気・液界面を通しての物質とエネルギーの輸送機構に対する大規模・高速数値シミュレーションモデルの開発を目的とした。各研究項目の実施内容および成果を以下に報告する。

(1-1) 特性曲線CIP法及び完全2次元保存CIP法の開発

計算機性能の急速な発達により、理学・工学分野におけるシミュレーション技術は目覚ましい発展を見せている。現在の流体計算はMAC法・SMAC法などに代表される圧力ベース解法に基づくものがほとんどであり、圧力に関するポアソン方程式を反復法で解く必要がある。そして、流体計算の演算のほとんどは、この反復計算に費やされている。近年の計算規模の大型化に伴い、処理を分散させる並列計算機が普及しているが、割り当てた計算領域における反復回数のバラつきなどが計算負荷における深刻な問題となっている。

反復計算を必要としない解法の1つに、流体方程式を対角化し、特性方程式を解く特性曲線法がある。特性理論を用いれば、反復計算を必要とせず、領域によって計算負荷が変化しない陽的な解法が可能となる。尾形らは浅水波方程式の特性方程式にCIP法を適用し(CIP-MOC)、移流計算における位相誤差をなくし、コリオリ力も含め2次元まで計算し、高い精度と効率を示した。

しかし、特性方程式では元の保存式を直接解かないため、CIP-MOCでは保存が保証されないという問題が残っていた。CIP法は非保存型にもかかわらず高い保存性を示すことが知られているが、例えば地球の海流に適用したときに0.1%の精度で保存したとしても、実際の海水の体積に換算すると消滅(あるいは増大)する海水は膨大な量となる。保存保障型CIP法としては、矢部らが保存方程式に対する保存型CIP(CIP-CSL)を開発し、様々な問題に応用されてきた。

そこで今回、CIP-CSLを特性曲線法に適用した手法の開発に取り込んだ。ここではこの手法を浅水波方程式に適用した結果を紹介する。浅水波方程式は単純な式であるが、気象モデルの基礎式であり、津波のモデルなどにも用いられるなどで、幅広く研究されてきた。特性理論によって重力波速度にとらわれない、かつ質量保存を保証する保存型CIP特性曲線法(CSL-MOC)を開発

することを目的とした。

① 保存保障型CIP特性曲線法の考え方

保存保障型 CIP 特性曲線法の考え方を, 1次元の場合で説明する. 1次元の浅水波方程式は,

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u & h \\ g & u \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} h \\ u \end{pmatrix} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{W}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} = 0 \quad (4.3.1-1)$$

であるが, (4.3.1-1)の行列 $\mathbf{A}$ を対角化すると, $\mathbf{L}$ を対角化行列として,

$$\mathbf{L}^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + (\mathbf{L}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{L}) \mathbf{L}^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} = \mathbf{L}^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \begin{pmatrix} C^+ & 0 \\ 0 & C^- \end{pmatrix} \mathbf{L}^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} = 0 \quad (4.3.1-2)$$

と書け, $C^\pm$ は行列 $\mathbf{A}$ の固有値として次のように求められる.

$$C^\pm = u \pm \sqrt{gh} \quad (4.3.1-3)$$

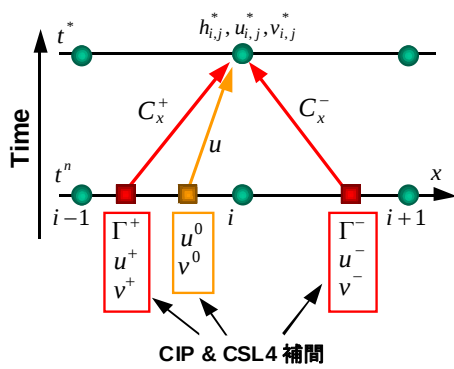


図 4.3.1 特性線による伝播

$C^\pm$ は特性速度である. (4.3.1-2) を分離して書けば, 次の 2 本の移流方程式を導くことができる.

$$\frac{\partial R^\pm}{\partial t} + C^\pm \frac{\partial R^\pm}{\partial x} = 0 \quad (4.3.1-4)$$

ここで

$$R^\pm = \Gamma \pm \frac{u}{2} \quad (\Gamma = \sqrt{gh}) \quad (4.3.1-5)$$

である. 図 4.3.1 に示すように, $R^\pm$ はリーマン不変量であり, 特性曲線 (の赤矢印) に沿って一定の値で伝わる量である. (4.3.1-4) が意味するのは, ある時刻のある座標の表面高さ h と速度 u は, 2つの特性速度に沿って伝わってくるリーマン不変量によって決まるということである.

元の浅水波方程式に比べ (4.3.1-4) は, 特性速度 $C^\pm$ に非線形性が存在するものの, 単純な移流方程式なので, CIP 法を適用するのに都合の良い形をしている. CIP 法は移流方程式に対して時間空間共に3次精度を持っているので, このリーマン不変量に関する移流方程式を CIP 法で解けば, 浅水波方程式全体を3次精度で解けることになる.

また CIP 法では値だけでなく, その空間微分値の情報も必要となる. これについては (4.3.1-4) の空間微分をとった次式に CIP 法を適用することにより求めることができる.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\partial_x R^\pm) + C^\pm \frac{\partial}{\partial x} (\partial_x R^\pm) = -\partial_x R^\pm \frac{\partial C^\pm}{\partial x} \quad (4.3.1-6)$$

特性速度 $C^\pm$ がほぼ一定の場合には式 (4.3.1-6) の右辺は無視でき, リーマン不変量の微分値も単に特性速度で伝播することになる. これが尾形らによって提案された CIP 特性曲線法であるが, 彼らの方法は効率・精度共に高かったが, 保存が保障されないという欠点が残っていた.

そこで表面高さ h とその微分値 $\partial_x h$ について, 格子間のセル体積も用いた保存保障型の CSL4 補間を行い, その h とその微分値 $\partial_x h$ により Γ を次式のように定義する方法を提案する.

$$\Gamma^\pm = \sqrt{gh_{\text{CSL4}}^\pm} \quad (4.3.1-7)$$

$$\partial_x \Gamma^\pm = \frac{\partial_x h_{\text{CSL4}}^\pm}{2} \sqrt{\frac{g}{h_{\text{CSL4}}^\pm}} \quad (4.3.1-8)$$

添え字の CSL4 は CSL4 スキームによって補間したことを意味する. これらを式 (4.3.1-3), (4.3.1-4), (4.3.1-5), (4.3.1-6) に代入することにより, 格子点上の次ステップの Γ_i^{n+1} と $\partial_x \Gamma_i^{n+1}$ を求めることができる. これが新たに提案する保存保障型 CIP 特性曲線法 (CSL-MOC) である.

② 2次元保存型 CIP 特性曲線法 (方向分離法の場合)

2次元浅水波方程式をベクトル行列形式に書けば

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u & h & 0 \\ g & u & 0 \\ 0 & 0 & u \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v & 0 & h \\ 0 & v & 0 \\ g & 0 & v \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} h \\ u \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -fv \\ fu \end{pmatrix} \\ \equiv \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{W}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} + \mathbf{B}(\mathbf{W}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial y} + \mathbf{F} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.3.1-9)$$

となる. 2次元に直接特性理論を適用した従特性曲線法も提案されているが, ここでは方向分離を用いた方法を紹介する. 方向分離解法は, 特性曲線を x と y 方向それぞれ別に追跡する方法であり, 1次元の解法を容易に多次元に拡張することができる. 方向分離の概念図を図 4.3.2 に示す.

図 4.3.2 は, $t^n \rightarrow t^*$ では x 方向の伝播, $t^* \rightarrow t^{n+1}$ では y 方向の伝播を行った様子を示している. 式(4.3.1-9)を図4.3.2の観点で, コリオリ力も含め, x 方向と y 方向に分離すると以下のよう

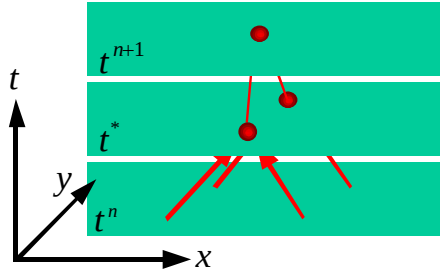


図 4.3.2 方向分離解法の概念図

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{W}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} + \frac{1}{2} \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad \mathbf{W}^n \rightarrow \mathbf{W}^* \quad (4.3.1-10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \mathbf{B}(\mathbf{W}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} + \frac{1}{2} \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad \mathbf{W}^* \rightarrow \mathbf{W}^{n+1} \quad (4.3.1-11)$$

この分離でコリオリ力は半分ずつ各相に振り分けた. また行列 $\mathbf{A}$ と $\mathbf{B}$ は不可換であるため, $\mathbf{W}^{n+1}$ は時間1次精度となっている. この精度低下を防ぐため, これらの相を次の順で解く.

$$\mathbf{W}^{n+2} = L_x L_y L_x \mathbf{W} \quad (4.3.1-12)$$

L_x と L_y はそれぞれ式(4.3.1-10)と式(4.3.1-11)のオペレータに対応する. このように解くことで $\mathbf{W}^{n+2}$ の解は時間2次精度を保つことができる. 式(4.3.1-10)と式(4.3.1-11)を解く過程は, ほとんど同じであるため, 以下では式(4.3.1-10)の x 方向の相を主に述べる.

1次元の場合と同様, 式(4.3.1-10)の行列 $\mathbf{A}$ を対角化する.

$$\begin{aligned} L_x^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + (L_x^{-1} \mathbf{A} L_x) L_x^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} + L_x^{-1} \frac{1}{2} \mathbf{F} \\ = L_x^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \begin{pmatrix} C_x^+ & 0 & 0 \\ 0 & C_x^- & 0 \\ 0 & 0 & u \end{pmatrix} L_x^{-1} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} + L_x^{-1} \frac{1}{2} \mathbf{F} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.3.1-13)$$

ここで

$$C_x^\pm = u \pm \sqrt{gh} \quad (4.3.1-14)$$

である. 式(4.3.1-13)を3式に書き下せば, 次の3式が導かれる.

$$\frac{\partial R_x^\pm}{\partial t} + C_x^\pm \frac{\partial R_x^\pm}{\partial x} \mp \frac{1}{4} f v = 0 \quad (4.3.1-15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} f u = 0 \quad (4.3.1-16)$$

ここで $R_x^\pm = \Gamma \pm u/2$ である. これら 3 式が意味するのは, ある時刻のある座標における値(高さおよび 2 方向の速度成分)は, それぞれの特性速度 $C_x^\pm$, u で伝わってくる3つのリーマン不変量によって決まり, かつ, 伝播の間にそれぞれの特性線に沿ってコリオリ力が加わるということである.

上記で説明した2次元浅水波方程式の CSL-MOC 法について, 不安定帯状ジェット気流 (Zonal Jet) ベンチマーク問題を用い, その安定性・特性を調べる. この問題では始めに帯状のポテンシャル渦度を, 擾乱を与えた座標 $\hat{y}$ を用いて定義する.

$$q(x, y, t = 0) = 4\pi \cdot \left\{ 1.0 + \text{sgn}(\hat{y}) (0.5 - \|\hat{y} - 0.5\|) \right\} \quad \text{if } |\hat{y}| < 1.0 \quad (4.3.1-17)$$

$$= 4\pi \quad \text{otherwise}$$

$$\hat{y} = y + C_m \sin(mx) + C_n \sin(nx) \quad (4.3.1-18)$$

C_m , C_n , m , n は擾乱パラメータであり, それぞれ $C_m = -0.1$, $C_n = 0.1$, $m = 2$, $n = 3$ と定めた(図 4.3.3). このような帯状の渦度分布は非常に不安定なため, 擾乱によってすぐにいくつか

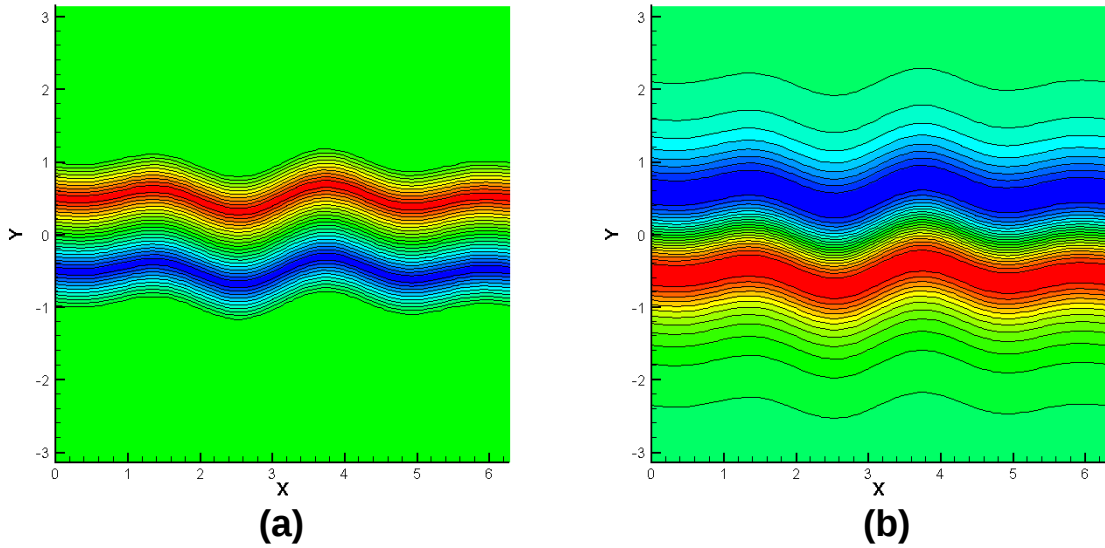


図 4.3.3 不安定帯状ジェット気流の初期条件 (a) ポテンシャル渦度等高線図, (b) 高さの等高線図.

の渦に分裂していく. 本手法による結果を以下に示す(図 4.3.4). 格子数は 400×400 である. 渦が分裂したり, 他の渦に巻き込まれたり, あるいは渦自身が渦巻いていく様子を詳細に観察することができる.

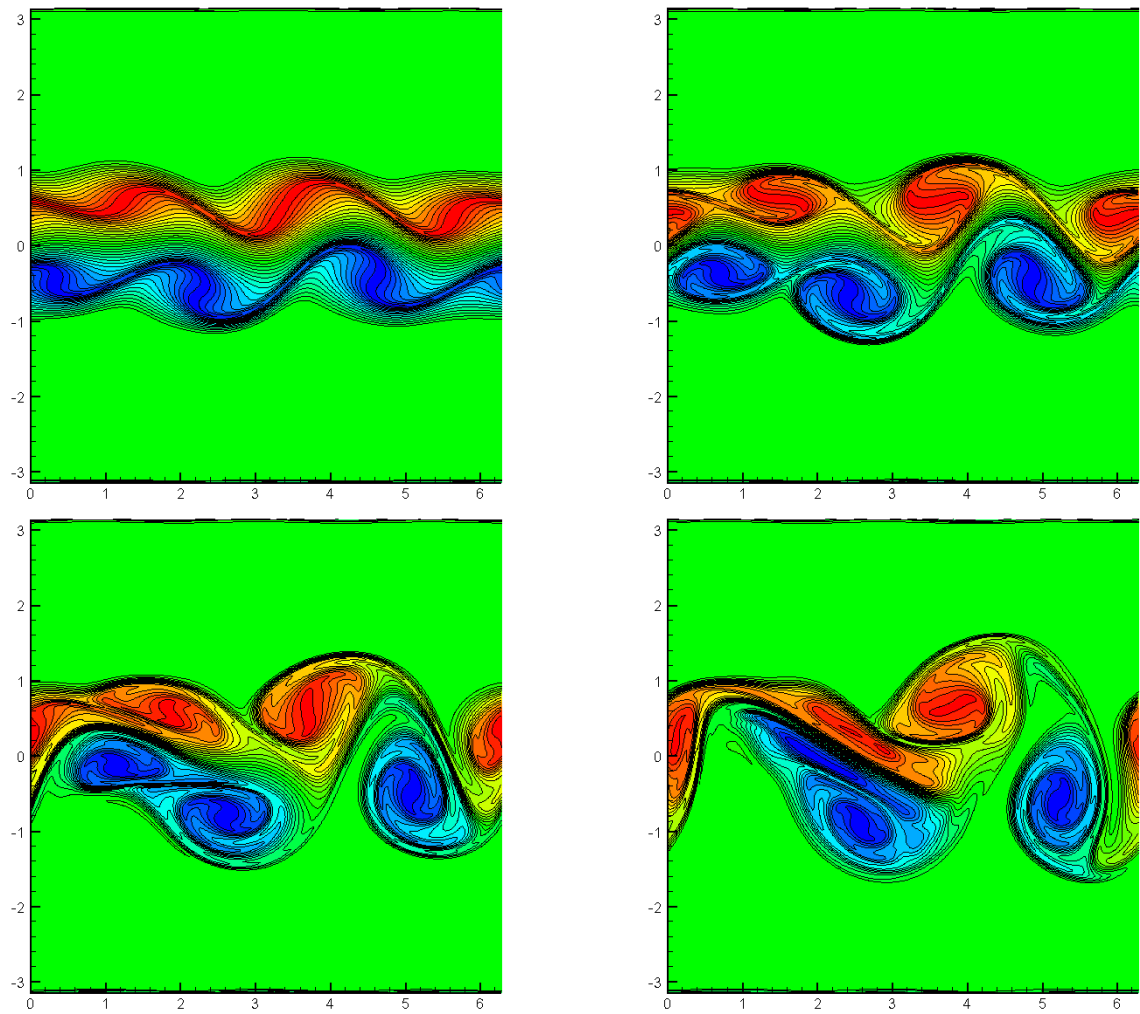


図 4.3.4 不安定ジェット気流の時間発展 (400×400 格子) (左上) $t = 0.5\pi$, (右上) $t = \pi$, (左下) $t = 1.5\pi$, (右下) $t = 2\pi$.

この計算で CFL を変化させたときの違いを CIP-MOC と比較したものを図 4.3.5 に示す. これらのグラフはそれぞれ, 高さ, 絶対渦度およびポテンシャル・エントロピーの保存誤差についての結果を示している.

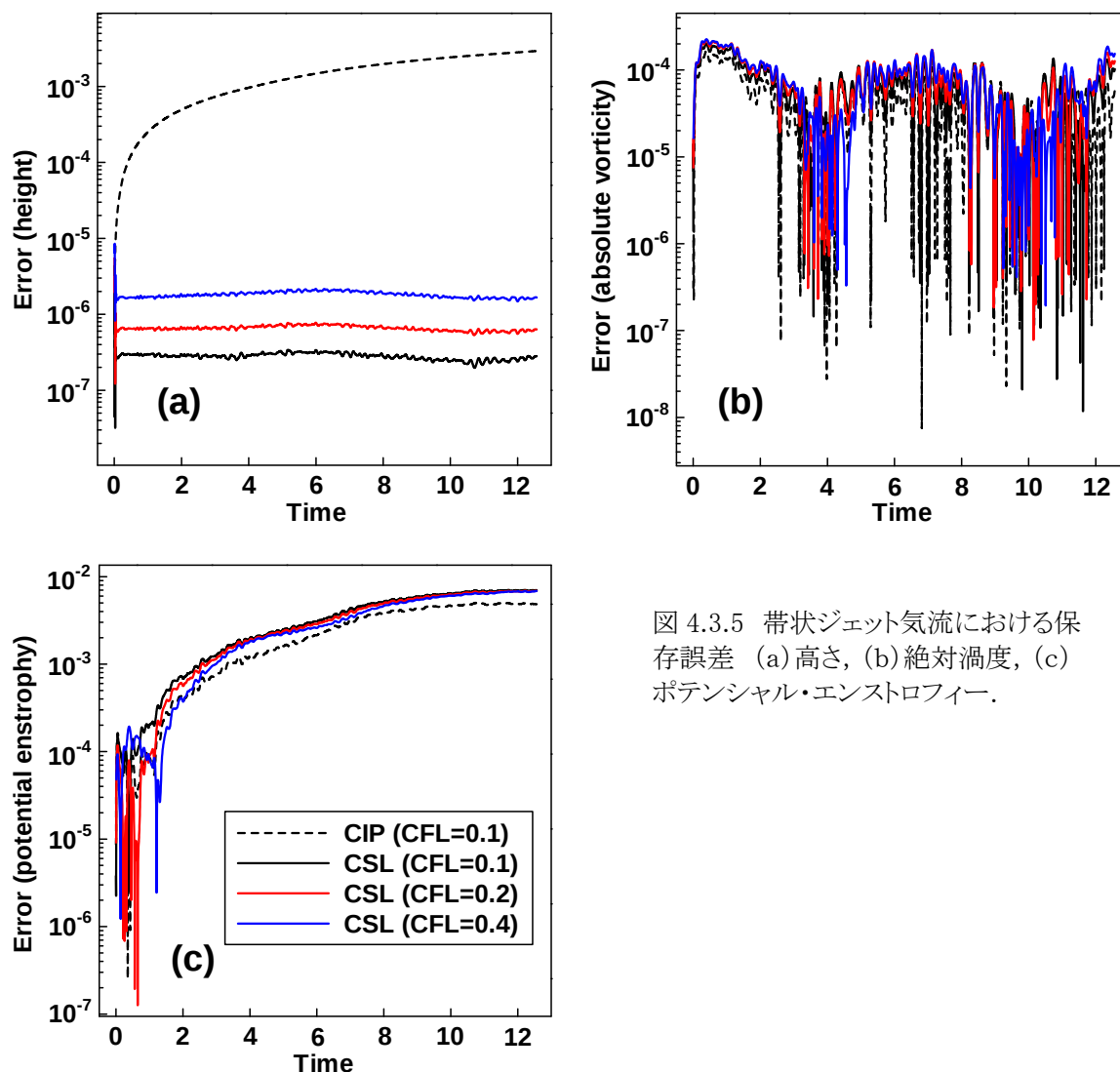


図 4.3.5 帯状ジェット気流における保存誤差 (a) 高さ, (b) 絶対渦度, (c) ポテンシャル・エンストロフィー.

ここで、各保存量について、時刻 $t = 4\pi$ における誤差を格子幅 Δx に対してプロットしたのが図 4.3.6 である。高さの保存誤差(図 4.3.6(a))に注目すると、CIP-MOC と CSL-MOC は 100×100 格子の時点で既に数オーダーの誤差の違いがある。またそれだけではなく、傾きに注目すると、CIP-MOC が1次精度で誤差が小さくなるのに対し、CSL-MOC は2次精度を持っていることがわかる。よって、高解像度シミュレーションを行う場合や解適合格子を用いるときなど、保存性の観点から本手法の方がより効率的である。他の保存量も CIP-MOC と同等の保存を示している。

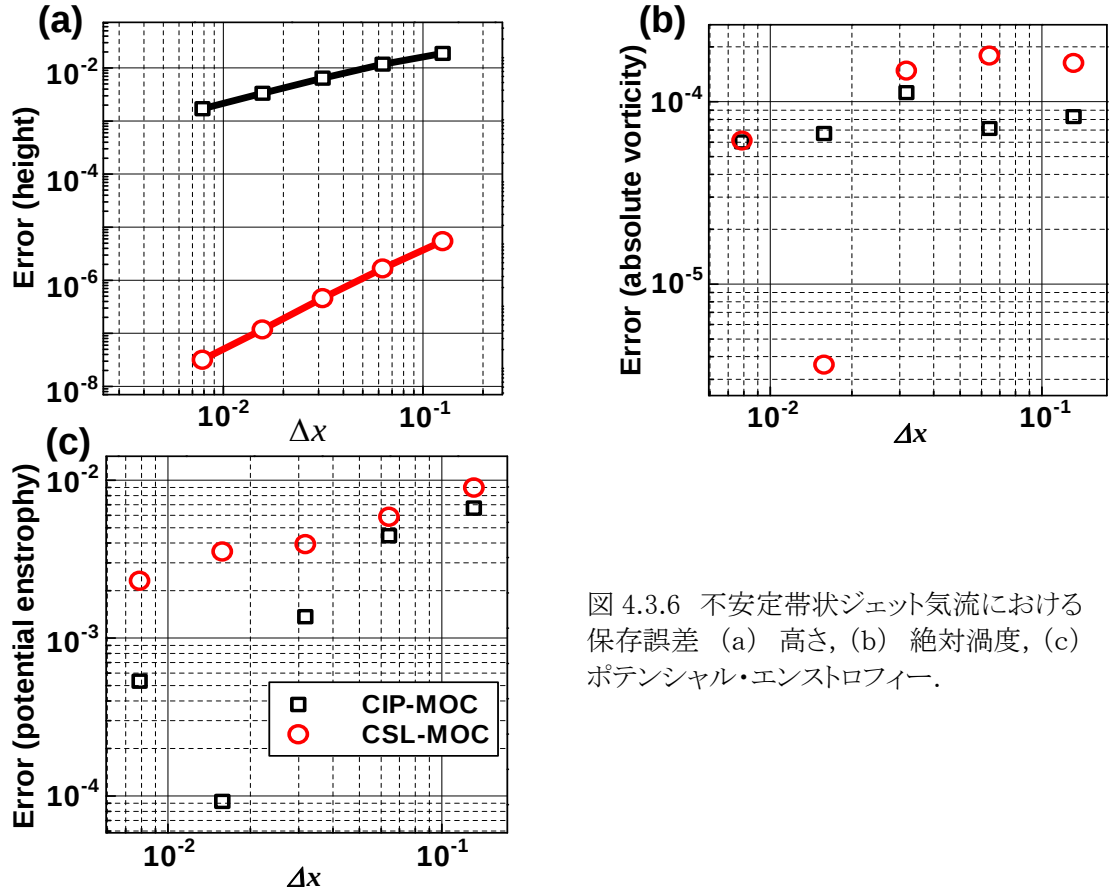


図 4.3.6 不安定帯状ジェット気流における保存誤差 (a) 高さ, (b) 絶対渦度, (c) ポテンシャル・エンストロフィー.

③ 次元分割をしない保存型2次元 CIP 法の開発

多次元の計算に対して CIP 法を用いる場合、従来から次元分割が良く使われてきた。次元分割とは、多次元の計算を1次元ごとに分割して解く方法である。これにより、多次元の問題を1次元の問題に帰着させて考えることができるので、方程式を簡単に捉えられ、計算手法も1次元のシンプルなものを使えるというメリットがある。しかしながら、CIP 法の利点の1つである高 CFL 数での計算を行う場合、波の位相がずれてしまうという欠点がある。このため、速い波が存在し、高 CFL 数の計算が必要な場合には、次元分割を行わないで計算を行うのが有効となる。非保存型の CIP 法の場合、B 型 CIP 法などの手法がいくつか存在するが、保存型 CIP 法には次元分割をせずに安定に計算出来る手法が存在しなかった。そこで次元分割を行わずに保存する CIP 法を開発する。

1次元の保存型 CIP 法は、格子内積分値と格子点の値から補間係数の条件を決めている。同様に、2次元の場合、4つの格子点上の値と4つの線積分値、そして格子点の面積積分値から補間係数の条件を決める。これにより、格子点 (i,j) 、 $(i+1,j)$ 、 $(i,j+1)$ 、 $(i+1,j+1)$ の4点で囲まれた格子内の補間関数 $f(x,y)$ は、以下の式により決定される。

$$f(x,y) = \sum_{m,n=0}^2 C_{m,n} x^m y^n$$

$$C_{m,n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -4 & 6 & -2 \\ 3 & -6 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{i,j+1} & \sigma_{i+1/2,j+1} & f_{i+1,j+1} \\ \sigma_{i,j+1/2} & \rho_{i+1/2,j+1/2} & \sigma_{i+1,j+1/2} \\ f_{i,j} & \sigma_{i+1/2,j} & f_{i+1,j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -4 & 3 \\ 0 & 6 & -6 \\ 0 & -2 & 3 \end{pmatrix}$$

ここで、 $f_{i,j}$ は格子点 (i,j) 上の値、 $\sigma_{i+1/2,j}$ は線分 $(i,j)-(i+1,j)$ 上の積分値、 $\rho_{i+1/2,j+1/2}$ は格子内の積分値を表す。これにより、現在の物理量から補間関数を作ることができる。

次に、補間関数から次のステップの物理量を求める方法を考える。格子点上の値は、通常と同

様にして、①格子点の上流点を求め、②補間関数からその位置での値を補間し、③次ステップの値とする。線積分値、面積積分値の計算は、格子の変形を考慮するために多少複雑になる。線積分値は、両隣の格子点の計算で求めた上流点の位置 (x'_0, y'_0) 、 (x'_1, y'_1) を結んだ線分上で補間関数を積分する。

$$\sigma^* = \int_0^1 f((1-s)x_0 + sx_1, (1-s)y_0 + sy_1) ds$$

積分自体は解析的に求まるため、始点 (x'_0, y'_0) と終点 (x'_1, y'_1) を代入することで積分値は求まる。面積積分も同様にして積分を行う。

$$\rho^* = \int_0^1 \int_0^1 f(X(s, t), Y(s, t)) ds dt$$

$$X(s, t) = x_0 + s(x_1 - x_0) + t(x_3 - x_0) + st(x_2 - x_1 - x_3 + x_0)$$

$$Y(s, t) = y_0 + s(y_1 - y_0) + t(y_3 - y_0) + st(y_2 - y_1 - y_3 + y_0)$$

ここで、 x_n, y_n ($n=1\sim4$)は格子を囲む4点を反時計回りの順番で番号付けした座標値である。

以上の計算により、格子形状が変形した場合においても、2次元の保存型計算が可能となる。

(1-2) Soroban 格子に関する研究開発

流体シミュレーションにおいて、格子構造は非常に重要な要素である。現在、複雑な境界などをもつシミュレーションにおいては境界適合格子を用いることが一般的である。これにより、等間隔な格子に比べ、同じ格子点数でも境界形状を的確に再現し、また流れの中でも複雑な分布を持つ部分を重点的に計算することが可能となる。しかし、不等間隔な格子を形成・利用することで計算負荷が大きくなってしまう。また、移流方程式を高精度かつ安定的に解くスキームであるCIP法は、直交構造格子でなければその簡便性や精度を損ねてしまう。

このような理由により、我々は簡単な構造とCIP法への適合性を兼ね備えた境界適合格子として、ソロバン格子を開発してきた。本研究ではこのソロバン格子に存在する方向依存性を改善することを目的とし、流体計算に適用することでその有効性を検証する。

① 重合ソロバン格子

ソロバン格子の構造は、以下のように生成される。2次元においては、まずX座標についての配列を生成し、得られた各X座標位置に直交するようにライン状のY座標の配列群を生成する(図4.3.7)。

3次元に拡張する場合は、こうして得られる面をさらに直交する方向に配置していくことで得られる。

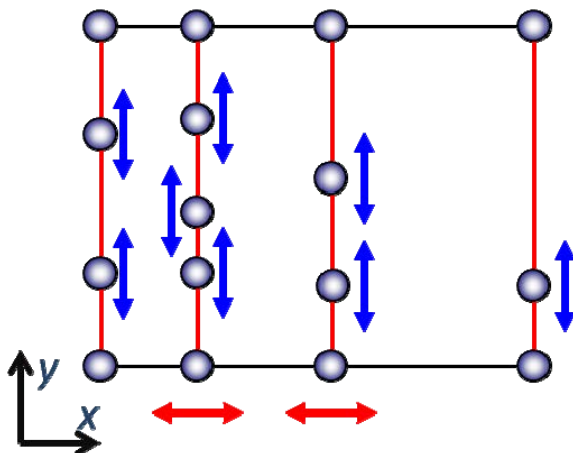


図 4.3.7 ソロバン格子模式図

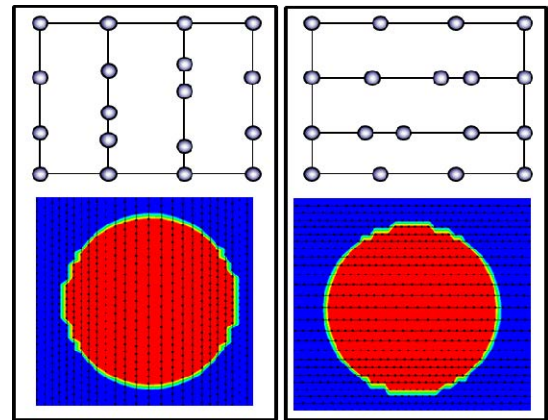


図 4.3.8 ライン方向による境界捕獲の違い

それぞれの座標配列は1次元であり、流れ場を適切なモニター関数によって解いて得られた解に適合した位置にあらかじめ設定した格子数を移動させていくことで得ることができる。また、領域の分割や、任意の場所に強制的に格子点を配置することも容易である。

このようにソロバン格子では格子の分割・結合により格子を形成する AMR 法などと比べ自由に格子点を配置することができる。しかし、完全に自由に移動することができるのはライン方向のみであり、他の方向については多少の拘束が存在するため、ラインと平行に近い形状の境界については完全に捕獲することが困難である(図 4.3.8)。また、セルの形状が変化するため、補間を行うときに方向によって補間長に差がでてしまうことになる。これらの理由により、ソロバン格子には方向依存性が存在する。

ソロバン格子の方向依存性を解消する手法として、重合ソロバン格子を提案する。これは、計算領域の次元数だけ存在するソロバン格子を計算の時間ステップにあわせて使い分けるものである。これにより、ソロバン格子の方向依存性による誤差を各方向に分散・修正し、蓄積しないようにすることが目的である。

2次元計算の場合に、図 4.3.8 に示したライン方向がX軸方向とY軸方向の2種類のソロバン格子を使い分けたものが2次元重合ソロバン格子である。

重合ソロバン格子の実装方法を説明する。まず、通常のソロバン格子と同様に時間ステップの最初に新しい格子を生成する。この際、前のステップと別の方向をX座標方向とすることでライン方向の入れ替えを行う。そして、移流項の計算時に微分値を入れ替えて代入することで格子方向の入れ替えが完了する。

移流にあわせて行うため、微分値の入れ替えによる計算量の変化はない。そのため計算のオーバーヘッドは、流体計算の都合上発生する1ステップ前の格子配列を保持するのに必要なメモリとそのコピーのみとなる。これは流体計算の場合、全体の必要メモリに比べれば2%未満と極端な増加ではない。

重合ソロバン格子を使用することによる補間精度を、2次元の移流問題を解くことによって検証した。速度を式(4.3.2-1)で与えられる 1×1 の回転速度場において初期分布を(4.3.2-2)式で与える(図 4.3.9)。

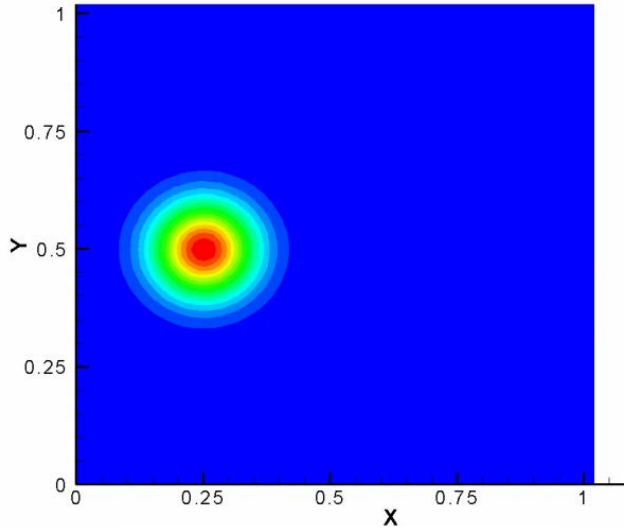


図 4.3.9 初期分布

$$\begin{aligned} U(x, y) &= -\omega(y - 0.5) \\ V(x, y) &= -\omega(x - 0.5) \end{aligned} \quad (4.3.2-1)$$

$$\omega = \frac{\pi}{4}$$

$$F(x, y) = \frac{1}{10\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x - 0.25)^2 + (y - 0.25)^2}{\sigma^2}\right) \quad (4.3.2-2)$$

$$\sigma = 0.1$$

800step で一周する設定とし、その時点での理論値との誤差を(4.3.2-3)式で評価する。

$$\text{error} = \frac{\sqrt{\sum_x \sum_y (f_{\text{exact}} - f_{\text{numerical}})^2}}{\sum_x \sum_y f_{\text{exact}}} \quad (4.3.2-3)$$

精度評価のため、各軸格子数を 50, 100, 200, 400 として、等間隔格子、ソロバン格子、重合ソロバン格子でそれぞれ計算した場合の(4.3.2-3)の誤差を比較した結果を以下に示す(図 4.3.10)。

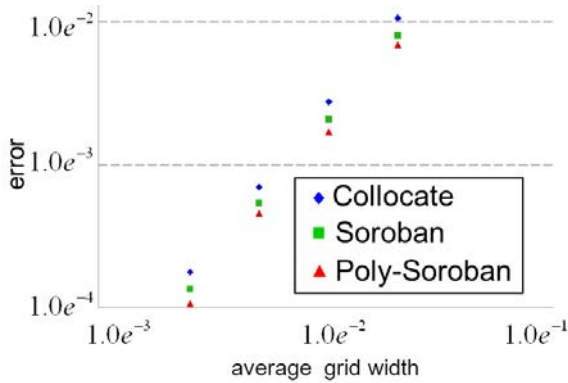


図 4.3.10 回転速度場での誤差

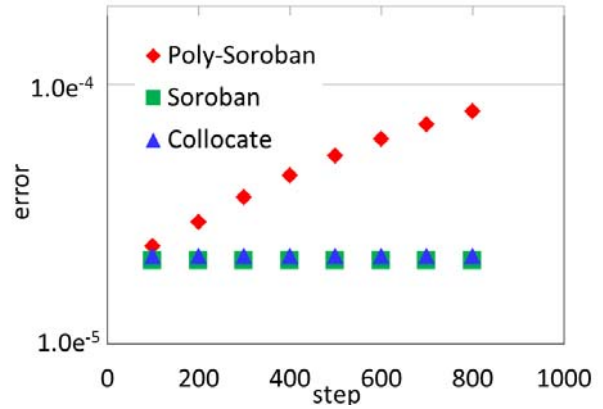


図 4.3.11 静止状態での誤差

図 4.3.10 から、重合ソロバン格子では同程度の精度を保ったまま最大 20%ほど誤差を低減することが確認できる。次に格子の入れ替えに伴う値の補間によって発生する誤差の計測を行った。先ほどと同様の初期分布において速度を 0 として各軸格子数 100 としたときの時間経過に伴う誤差の変化を比較した結果を示したのが図 4.3.11 である。これによると、800 ステップ経過後も移流によって発生する誤差に対して十分小さい値かつ、固定格子に対しても 3 倍程度と同じオーダーとなっている。

なお、通常のソロバン格子においてはこの条件ではステップ毎の格子の更新が発生しないため時間経過による誤差の累積がないが、移流を行うことで格子が変化するため重合ソロバン格子と同様に誤差が累積していくと考えられる。

以上により、重合ソロバン格子を用いることにより、通常のソロバン格子や等間隔格子に比べてより少ない誤差で計算をすることができることを示した。

② 重み付け重合ソロバン格子

これまでの重合ソロバン格子では、2種類のソロバン格子を単純に交互に用いていた。しかし、流体計算においては主流の方向や領域形状によりそれ自体が指向性をもっている。そのため、用いる格子方向の割合に重み付けを行うことでより正確な計算を行うことができるのではないかと考えた。Karman 渦の計算に適用し、有効性を検証する。

重み付けには様々な方法が考えられるが、今回はモニターパラメータである渦度 ω の微分値の絶対値の領域積分と領域長さ L を用いた。渦度の微分値については、ソロバン格子はライン方向によりよく追従するという特性に注目し、変化量の大きい方向にライン方向を割り当てることを目的とした。一方領域長さについては、一般に流れ場においては流路方向に大きな変化が存在するため、格子をより大きく集めることができるようにラインを流路垂直方向に割り当てることを目的としている。

垂直型(V)と平行型(P)の利用比 R を、流路方向を x 座標、垂直方向を y 座標とし、以下の式(4.3.2-4)で定義する。

$$R = \frac{V}{P} = \frac{\sum \left| \frac{\Delta \omega}{\Delta y} \right|}{\sum \left| \frac{\Delta \omega}{\Delta x} \right|} \times \frac{L_x}{L_y} \quad (4.3.2-4)$$

例として、 R が 1/2 であった場合、垂直型、平行型、平行型、垂直型、平行型、平行型、のように使用する。

計算結果の渦度分布を図 4.3.12 に示す。

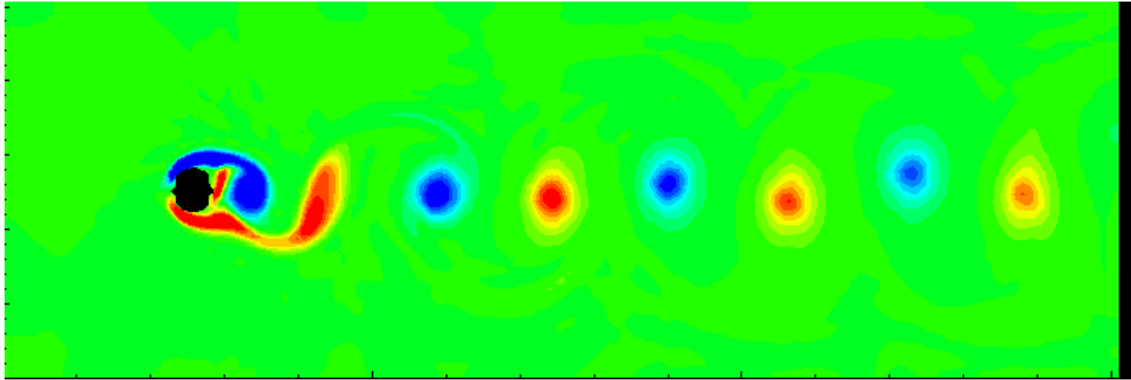


図 4.3.12 計算結果(渦度分布)

渦列安定後の格子利用比 R はこの計算では $7/3$ となった. この計算結果による渦列は, これまでの交互に用いる重合ソロバン格子に比べより安定していた. また, St 数は約 0.170 であり, やはり通常の重合ソロバン格子よりも実験値に近い値を示した.

このように, 重合ソロバン格子において, 用いる格子の割合に重み付けを行うことでさらに流体計算に適した格子構造が得られることが分かった.

以上, 固体の2次元移流計算において, 重合ソロバン格子を用いることによる誤差の低減を実証した. また, 2次元流体計算において重合ソロバン格子を用いることで, 同じ格子間隔を維持したままでも従来のソロバン格子を用いるよりもさらに高精度かつ方向依存性を解消した汎用性の高い計算を行うことができることを実証した. また, ある程度粗い境界捕獲でも固体を比較的正しく扱うことができたことから, 地形など全体的に複雑な形状をもち, 細かい部分を理想的に捕獲できないような境界においても, 全体的により少ない誤差で計算することができると考える.

また, 状況に合わせて用いる格子方向に重み付けを行うことで, さらに高い計算精度を得ることができることを確認した. これについては今後重み付け割合の定義をより適したものに改良していく予定である.

③ 3次元全球 Soroban 格子の開発

球面上に Soroban 格子を適用することにより, 全球計算における流れの変化が大きい場所に格子点を集めることが可能となる. Soroban 格子は, 格子点と格子軸, および格子面で構成されている. 格子点は格子軸上に不等間隔で配置されており, 格子軸は格子面内に不等間隔で配置されている. 点と軸, および面の位置は時間ステップごとに変えることができ, これらの総数も変えることが可能である.

本研究では, 図 4.3.13 に示すように, 格子面を等緯度面上に定義し, 格子軸は鉛直軸に平行に配置した. このように配置することで, 格子点は鉛直方向に移動でき, 格子軸は等緯度面内で移動できる. さらに, 格子面は緯度方向に移動可能となる.

格子の移動方法は, Yabe (2004) において提案されている手法を用いた. 格子の移動が正しく行われることをテストするため, 現実的な気圧配置に対して格子移動の移動を行う. 初期条件として, 2003 年 8 月 1 日の気圧配置を与え, 気圧の変動をモニターすることにより格子点を移動し, 気圧変動が激しい場所に格子が集まるかをテストした. 格子移動後の格子点位置と気圧分布を図 4.3.14 に示す. 図からわかるように, 気圧の変化が激しい山岳地帯や, 南極周回流辺りの気圧変動に対して格子軸が集まっている. また, 鉛直方向には, 地面近傍に格子が集まっており, 大気境界層を表現しやすくなっていると考えられる.

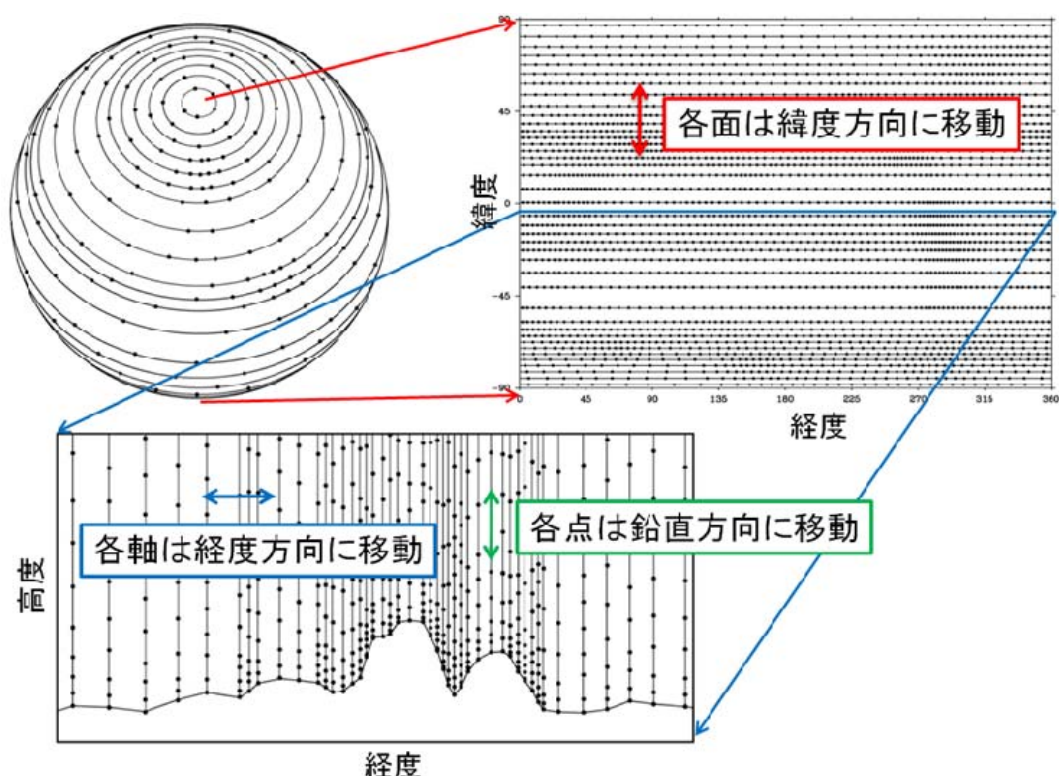


図 4.3.13 3次元全球 Soroban 格子の格子点, 線, 面の配置

全球 Soroban 格子上での計算の妥当性を検証するため, 移流テストと音波伝播テストを実施した. 以下では, 移流スキームは2次元の CIP 法を用いた. また, 上流点の探索スキームは4次精度の Runge-Kutta 法を用いた.

移流テストは, Williamson (1979) において提案されている手法で行った. 初期に赤道上に配置したコサイン型の山を移流させるテストである. 計算の結果, 良好な結果が得られた. コサイン型の山の周りに格子点が集まり, 山の周りだけ解像度が高い計算を行えた. 1周後の状態も, コサイン型の山の形状は崩れておらず, 初期の状態からのずれも小さい.

また, 格子点を固定し, 形状に合わせて格子が移動しないという計算も実施し, 2つの方法での二乗平均誤差を調べた. その結果, 格子点を集めることにより, 数値誤差が2~3割程度に小さくできることが分かった.

次に音波の伝播計算をテストした. 初期に圧力擾乱を赤道上に与える. その後, Euler 方程式を解くことにより, 音波が全球に伝播するという実験である. 計算の結果を図 4.3.15 に示す. 2時間後, 6時間後, 10時間後の結果から音波の波面が伝播する様子が良く再現されていることが分かる. また, 10時間後の様子を見ても, 極点を通過した影響は見られず, 適切な計算が行えていると言える. 格子点の位置に関しても, 音波の波面を捉えるように格子点が集まっている様子が分かる.

格子解像度を自由に移動させることが可能な Soroban 格子を全球モデルに適用した全球 Soroban 格子を開発した. これにより, 全球の計算においても, 注目したい現象の周りの格子解像度を細かくすることが可能となり, 十分な精度の結果が得られると考えられる.

格子の移動テストを実施することにより, 現実の大気に対して格子の移動が適切に行えることを検証した. 格子の移動には, 特定の物理量をモニターし, その空間変化を感知して移動する方法を用いている. この物理量を適切に選ぶことが格子移動を制御するための課題であると言える.

次に, 移流計算と音波伝播計算に対する検証実験を行った. これにより, 波の波面に格子点が集まり, 現象の周りの格子解像度を高く保つことが可能となることが分かった. また, 格子を移動させない場合と移動させた場合の数値誤差の発生具合を調べたところ, 格子を移動させることによって数値誤差が小さくなることも分かった.

今後、物理過程を導入し、現実大気の現象を再現するとともにモデルの検証も行っていく予定である。

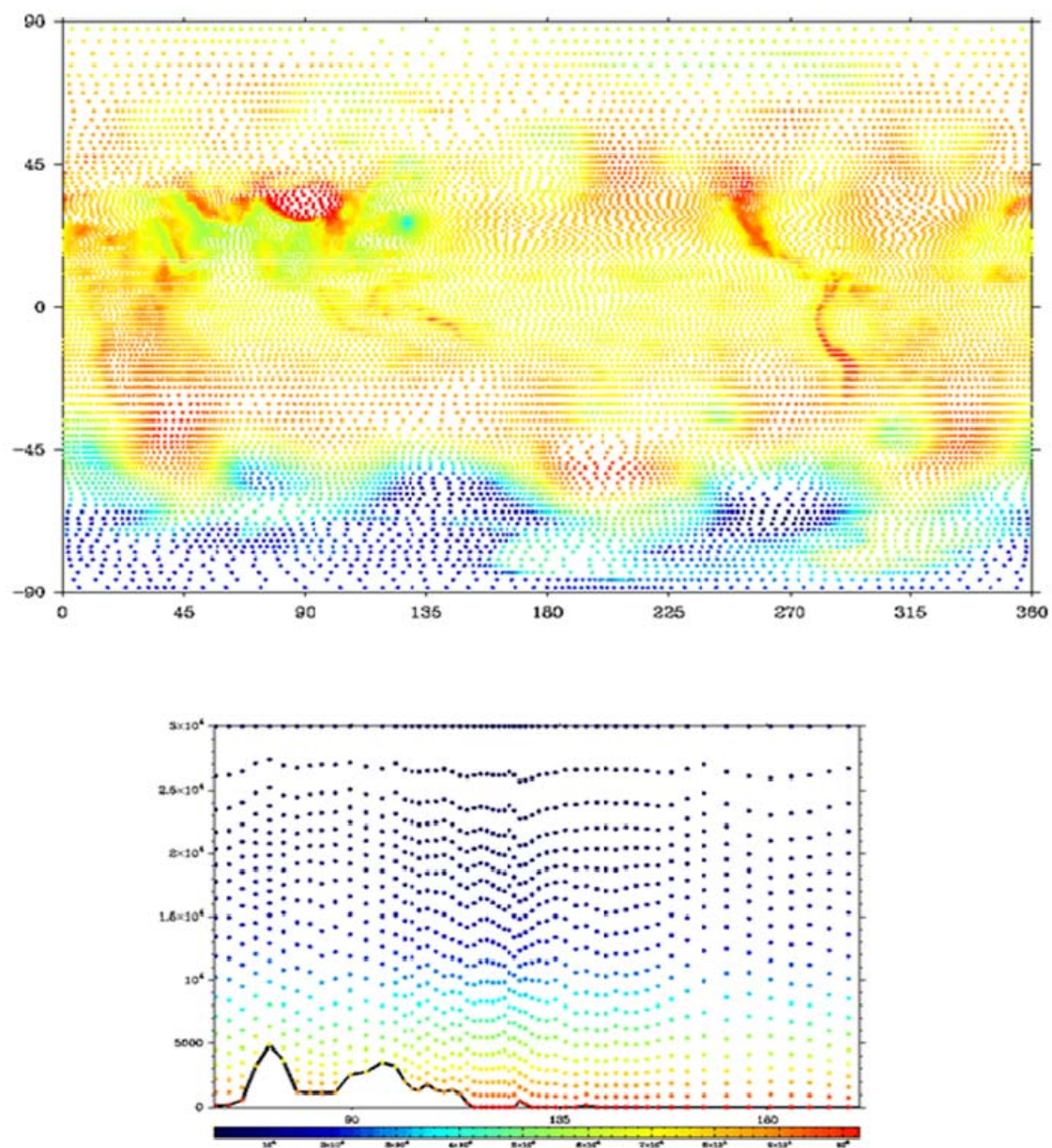


図 4.3.14 格子移動後の格子点位置と圧力分布

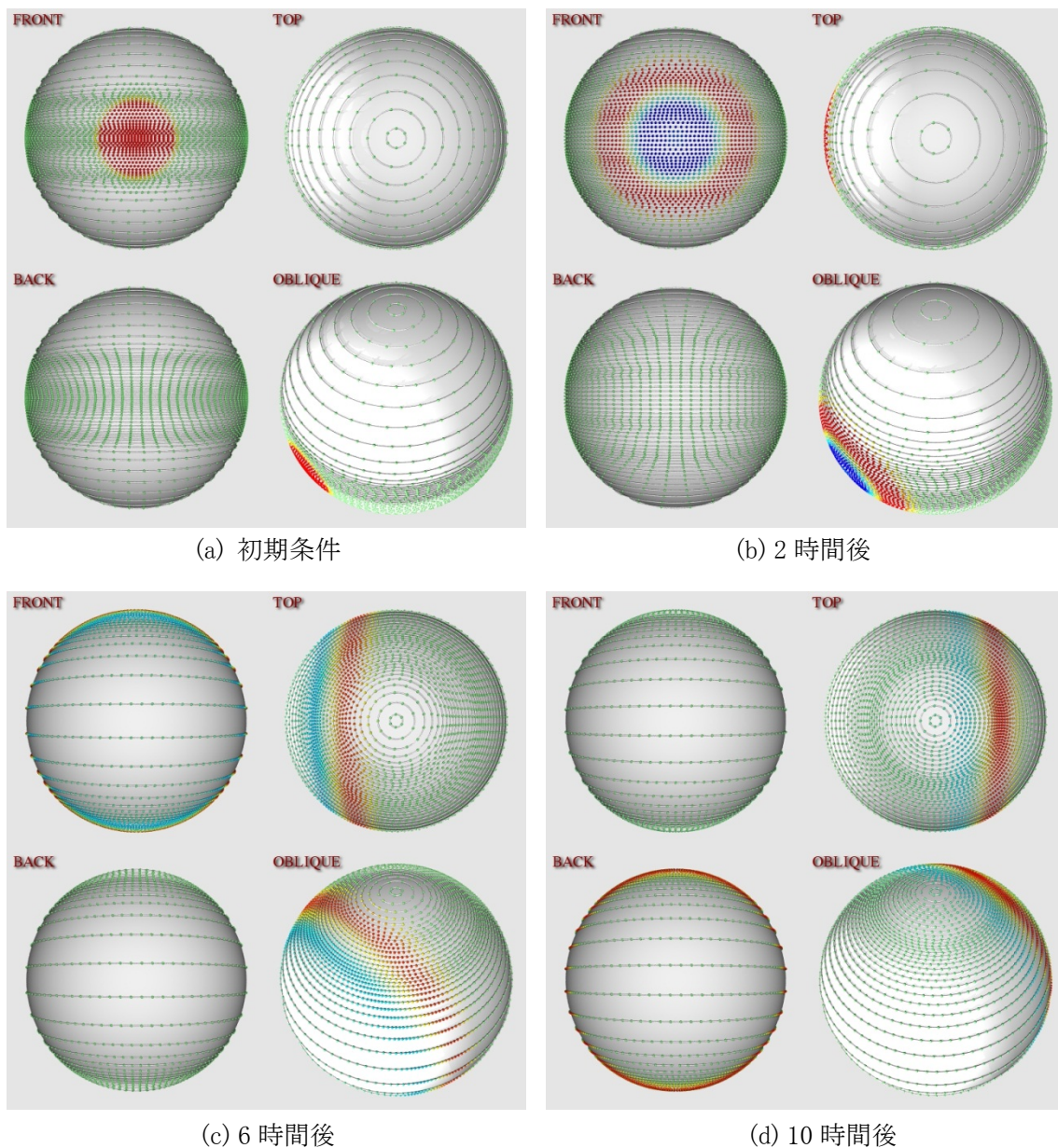


図 4.3.15 音波伝播テストの計算結果.

(1-3) CIP マルチモーメント有限体積法による高性能保存数値フレームワークの開発

CIP マルチモーメント有限体積法は、従来の CIP 法のマルチモーメントの基本概念に基づき、保存量である体積積分平均値 (VIA) を新たな従属変数として導入することによって、保存性が保持できる. 基本的に、VIA は流束に基づく有限体積法を用いて求めなければならないが、それ以外のモーメントは、保存量として取り扱う必要がなく、より効率かつ柔軟な手法で求めることができる.

様々なモーメントの選び方はあるが、数値手法の簡潔さや計算効率などを考えると、積分値 (VIA) と点値 (PV) を用いる. 例として図 4.3.16 に構造格子 (a) 及び非構造格子 (b) における 3 次精度スキームのモーメント配置を示す. このように、多種類のモーメントを用い、局所的な自由度を増やし、高精度の補間関数を構築することがで

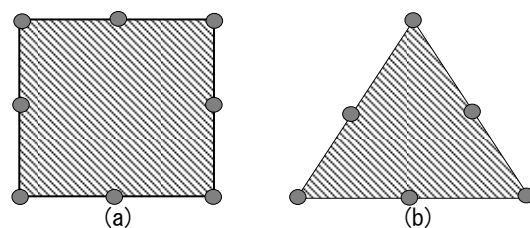


図 4.3.16 マルチモーメントの定義 (3 次精度スキーム). ●: 点値 (PV), ■: 積分値 (VIA)

きる．PV モーメントの予報にあたって，これまでに主に一般化セミ・ラグランジアン (semi-Lagrangian) 法と点ベースの微分リーマン・ソルバーを用いるオイラー法を提案してきた．以下にそれぞれを説明する．

① 一般化セミ・ラグランジアン法

Li and Xiao (J. Comput. Phys., 2007) は，上流方向の軌跡における点値に基づいて近似的に数値流束を求める手法を提案した．双曲型保存則

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} = 0 \quad (4.3.3-1)$$

に対し，各セル境界 $x_{i-\frac{1}{2}}$ の上流点を定める計算も含めて，先ず Runge-Kutta 法などマルチステップ法を用いて特性線に関する初期値問題を解く．各サブステップにおける PV モーメントの値は次の解によって求める．

$$q_{i-\frac{1}{2}}^{<m>} = Q_{i(X_m)}(X_m) \quad (4.3.3-2)$$

ただし， m は各サブステップを意味する．対応する上流点の位置は X_m で表す． $Q_{i(X_m)}$ は X_m を含む格子区間における分断的な補間関数である．このように，各 Runge-Kutta サブステップにおける PV モーメントを求めれば，セル境界の数値流束 $\hat{f}_{i-\frac{1}{2}}$ を PV モーメントの重みつき平均で計算する．これによって VIA モーメントは

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\hat{f}_{i+\frac{1}{2}} - \hat{f}_{i-\frac{1}{2}}) \quad (4.3.3-3)$$

を用いて計算する．ただし $\Delta x_i = x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}$ は格子間隔， Δt は時間積分刻みである．本式は，従来の CIP-CSL 移流スキームと異なり，補間関数に対する厳密な積分を行う必要がなく，多次元への拡張は簡単になる．方向分離による多次元化も不要である．

Li and Xiao (J. Comput. Phys., 2007) は，特性線を用いたセミ・ラグランジアン (semi-Lagrangian) 法による PV モーメントの計算法を提案し，それをオイラー方程式に適用し，強い衝撃波を含む圧縮性気体動力学問題の数値解析に成功した．Akoh et al. (Int. J. Numer. Method in Fluid, 2008) はそれを浅水波方程式に適用し，複雑地形を表すソース項を含んだ場合の平衡を保つ定式化を提案した．Li et al. (Mon. Wea., 2008) はこの定式に基づき，体積積分平均値 (VIA) と点値 (PV) だけを用い，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．検証の結果，球面座標における移流問題を精度良く計算できることが示された．本手法は，将来に向けて実用的な手法として様々な全球モデルに適用できると期待される．さらに，球面座標における高性能全球モデルの実現に向けて，マルチモーメントの概念に基づくセミ・ラグランジアン/セミ・インプリシット CIP 有限体積計算法の一般的な数値枠組を提案し，Yin-Yang 球面座標において実現した．新たなモデル変数として導入した体積分平均値は完全に保存されている．本定式化は，既存のセミ・ラグランジアン/セミ・インプリシット計算法に取り入れ，従来の手法とほぼ同等な計算負荷で保存化させることができる．浅水波方程式のプロトタイプモデルにおいて検証を行った結果，ベンチマーク問題に対し，良好な計算結果を得られた (図 4.3.17)．本研究によって既存セミ・ラグランジアン/セミ・インプリシット計算法を保存化させる普遍的な手法を確立した．当分野に大きなインパクトを与えることになる．

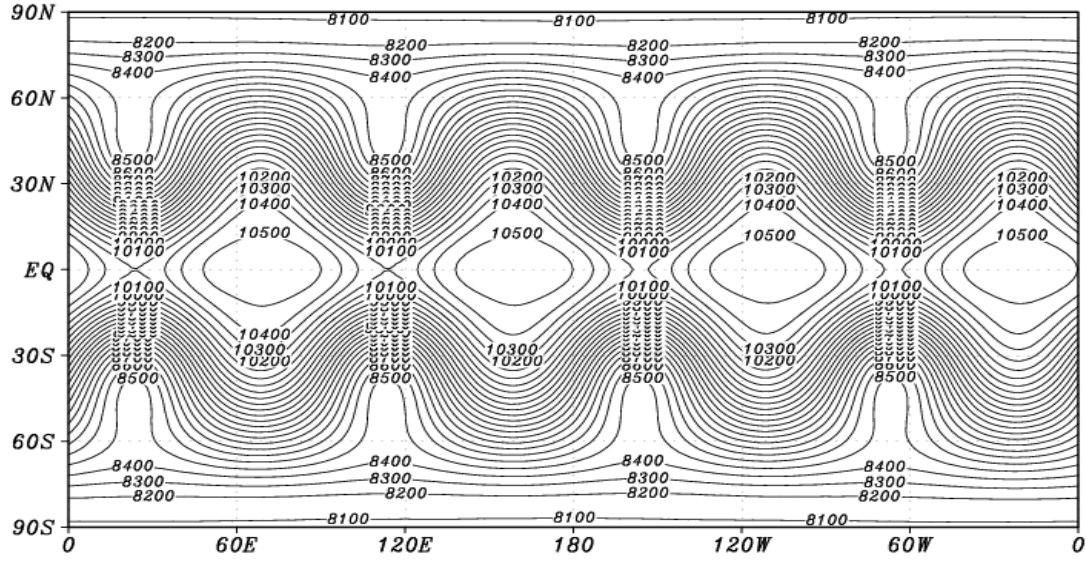


図 4.3.17 Yin-Yang 座標における CIP マルチモーメント有限体積型のセミ・ラグランジアン/セミ・インプリシット計算モデルの計算結果. 14 日後の Rossby-Haurwitz 波を示す.

② 微分リーマン・ソルバーに基づくオラー法

上記に示すように, セル境界における PV を求めれば, VIA の時間発展に必要な数値流束の計算ができる. 上述のセミ・ラグランジアンは PV を求める1つの選択肢であるが, その他に, セル境界の PV の時間変化は一般にリーマン (Riemann) 問題の解として取り扱い, 隣接するセルの状態から厳密または近似のリーマン・ソルバー (Riemann Solver) を用いて求めることもできる. このような解法は, オイラー型のフレームワークを用いるため, オイラー CIP マルチモーメント有限体積法と位置づける.

方程式 (4.3.3-1) より, セル境界 $x_{i-\frac{1}{2}}$ における PV の時間発展式が以下ようになる,

$$\partial_t q_{i-\frac{1}{2}} = -\partial_x \hat{f}_{i-\frac{1}{2}} \quad (4.3.3-4)$$

ここで $\partial_x \hat{f}_{i-\frac{1}{2}}$ は流束の一階微分値の数値近似である. $x_{i-\frac{1}{2}}$ において $\partial_x q_{i-\frac{1}{2}}$ または $\partial_x f_{i-\frac{1}{2}}$ が連続しないため, その左右隣接セルの状態から求めなければならない. 左右側において状態変数 q^L と q^R またはそれらの微分値が分かれば, 数値流束はリーマン・ソルバーで求める.

$$\partial_x \hat{f}_{i-\frac{1}{2}} = \text{Riemann}(f(q^L, q^R))$$

一方, VIA モーメントを有限体積の定式化

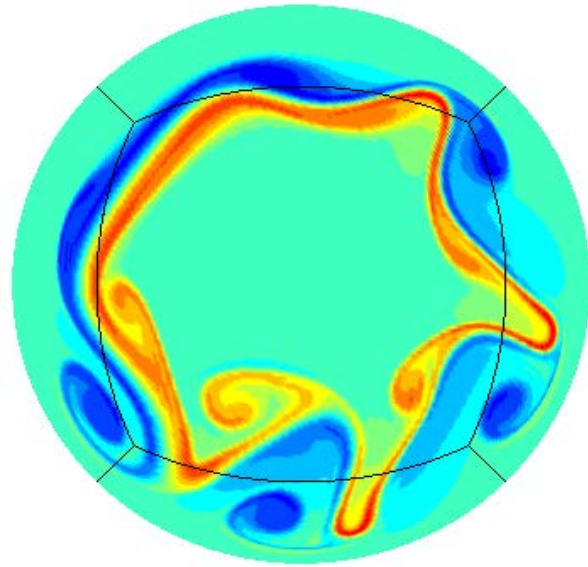


図 4.3.18 順圧不安定性テスト (64X64 メッシュ).

$$\partial_t q_i = -\frac{1}{\Delta x_i} (\hat{f}_{i+\frac{1}{2}} - \hat{f}_{i-\frac{1}{2}}) \quad (4.3.3-5)$$

で計算する. ここで, 発展方程式(4.3.3-4)及び(4.3.3-5)の時間積分に関しては, 計算精度または安定性を考え, 通常 Runge-Kutta 法が用いられる.

Chen and Xiao (J. Comput. Phys., 2008)は上記の微分リーマン・ソルバーに基づくマルチモーメント有限体積法を用い, 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2種類のモーメントを予報変数とし, 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 4.3.18 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順圧不安定ベンチマーク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ず, よく再現されている.

マルチモーメント法では, 局所に高次精度の補間再構築ができ, 非構造格子に適している. Akoh et al. (J. Comput. Phys., 2010)は三角形非構造における浅水波モデルを開発した. 本モデルにおいても水底地形ソース項と数値流束間のバランスが良く保てられている. 図 4.3.19 には, 地形による影響を受ける浅水波ベンチマークテストの計算結果が示されている. 非構造格子を用いることによって複雑境界を高精度で表現でき, 実際問題に適している. 図 4.3.20 には, 2004 年インド洋大津波のシミュレーション例を示す. 本計算では, 三角形非構造格子を用い, 実際の海岸線と海底地形が精度よく表現されている. 計算結果の検証として, 海岸に到達の最高波高について観測との比較を行った. よく一致した結果が得られた.

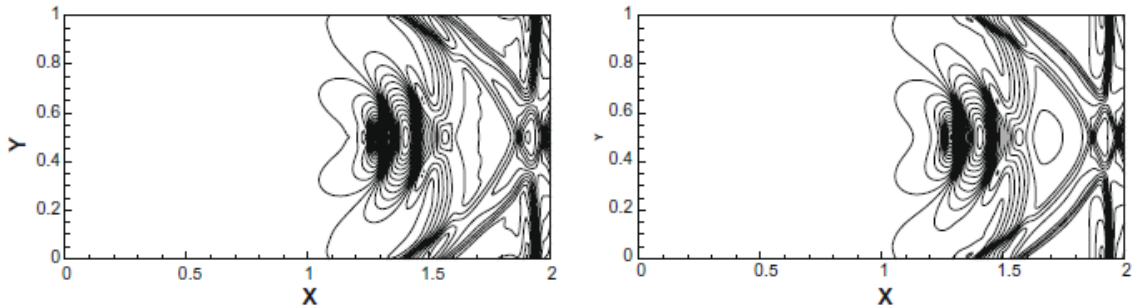


図 4.3.19 地形の影響を受ける浅水波反射テスト. 右: 三角形非構造格子, 左: Cartesian 構造格子.

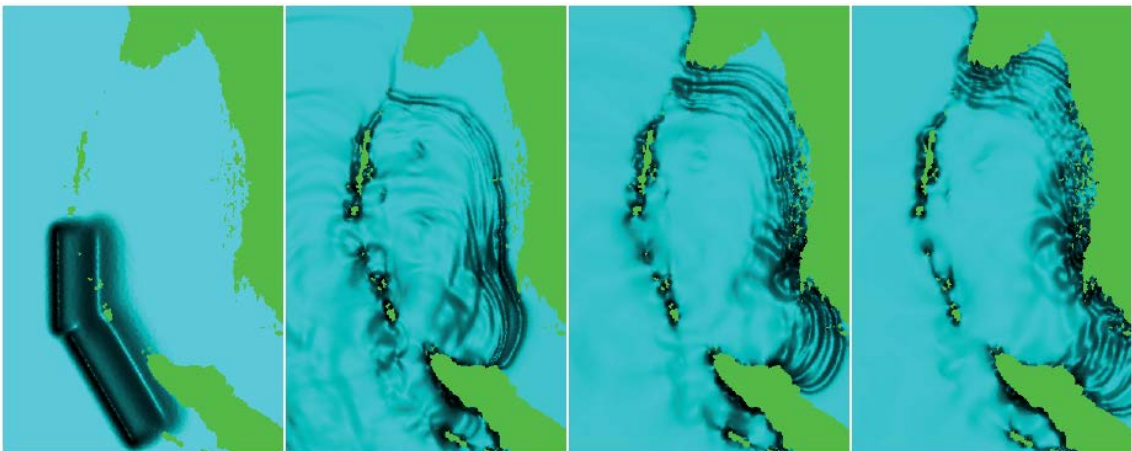


図 4.3.20 インド洋津波シミュレーション. 左(初期値)から右へと時間が進行する.

(1-4) ネスト計算における安定性の検証

MSSG モデルでも用いられているネスト計算手法の安定性を解析する。これにより、振動の発生しやすい条件を見つけることができ、MSSG 上でのネスト手法の改良が行えると考えられる。

① 格子幅の不連続面における安定性解析

ネストの格子解像度を変更する境界面における移流方程式に着目して考える(図 4.3.21 上)。移流される波の位相速度は、格子解像度に依存している。N 次の中心差分計算の場合の位相速度は、

$$\frac{\omega}{k} = u \sum_{l=1}^{N/2} \alpha_l \frac{\sin(lk\Delta x)}{lk\Delta x}$$

とあらわされる。ここで、 α_l は差分の係数である。これにより、格子幅が大きいほど位相速度が遅くなり、格子幅が小さくなると位相速度は速くなる。このため、ネスティングにより格子幅の不連続面が生じると、波の位相速度も不連続になる(図 4.3.21 中)。

このような位相速度の不連続が生じた場合、1次元の特性理論から、移流される物理量の時空間的な特性曲線は交わる(図 4.3.21 下)。すなわち、不連続面において衝撃波が生成されることになる。通常、衝撃波の計算には Riemann 解法を用いる必要があり、中心差分法ではいくら高精度にしても衝撃波を捉えることができない。このため、中心差分法による計算では、いくら高精度にしても数値振動を抑えることはできないと考えられる。

この問題は、位相速度の格子幅による変化が小さいスキームを用いることにより解決できる。このような特性を持った計算手法として CIP 法が考えられる。中心差分法と CIP 法の位相速度を比べると、中心差分法をいくら高精度にしても、高波数の波に対する位相速度に誤差があることが分かる。これに対して、CIP 法は、高波数の波に対しても適切な位相速度で計算が行える。これにより、格子幅の不連続があっても位相速度が不連続とならないため、数値誤差の発生を抑えることができる。これを実証するために、検証計算を行う。

まず、1次元の移流計算で検証を実施した。格子幅が不連続となる1次元の格子を用いて、波の移流に対する計算を行った。計算領域は $x \in [0,1]$ とし、 $x \in [0.3,0.7]$ の格子幅が 1/120、その他の場所の格子幅を 1/40 とし、移流計算を行い、初期のベル型の形状からの変形を調べた。6次精度中心差分法、QUICK、CIP 法の3種類のスキームを比較した。また、CFL 数は 0.8 として計算を行った。

6次精度中心差分の場合、ベル型の後方に発生した振動が格子幅の不連続面を通過する際に振動を増幅した。これは、単一の格子幅で計算した場合には発生しない振動であるため、ネストを用いたことにより発生したノイズであると考えられる。

QUICK を用いて計算を行った場合、数値粘性により山の振幅が小さくなった。この粘性効果により、格子幅をすべて 1/40 にした場合の結果とほとんど変わらない結果となっており、ネスト格子を用いた効果がなくなっている。

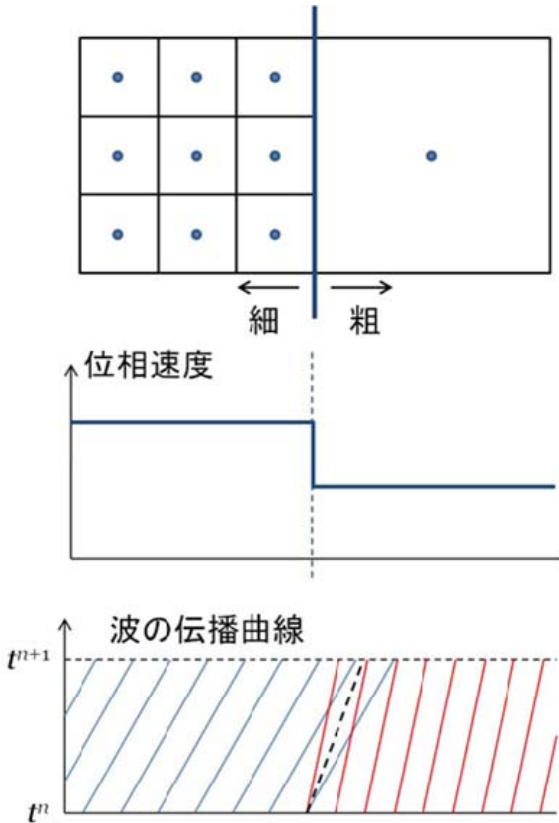


図 4.3.21 格子解像度と位相速度、特性曲線の関係

CIP 法を用いた結果は、格子の不連続面を通過する際にも振動が発生しておらず、ベル型が一周したあとにも形状の崩れが小さい。すべてを粗い格子で計算した場合と比較しても、ネスト格子を用いて計算した結果のほうがベル型の形状を正確に計算できており、ネスト格子を用いるメリットがよく表れている。

次に、1次元浅水波計算により、浅水波の伝播の検証を行った。6次精度中心差分の結果は、非線形性により生じる高波数の波に対して振動が発生している。この高波数の振動が格子の不連続面を通過する際に増幅している。これは、粗い格子から細かい格子に移流される際に発生する位相速度の不連続性が原因である。これにより、単一の格子幅で計算した結果よりも大きな振動が発生してしまっている。

QUICK の場合、数値粘性により波面がなだらかにしてしまい、浅水波の波面が捉えられていない。

CIP 法による計算結果は、波面をかなり正確に捉えることができている。数値振動も発生していない。また、単一の格子幅による計算と比較しても、ネスト格子を用いることにより波面をよりシャープに捉えることができている。

以上のことから、ネスト手法を用いた計算において、中心差分系の計算手法を用いて計算を行うと、格子幅の不連続面において位相速度の不連続が生じ、この不連続性による振動が発生することが分かった。この振動を抑える方法は3種類考えられる。

1つは、数値粘性が入った計算スキームを用いることで、不連続面自体をなだらかにし、そこから生じる振動を抑える方法である。しかしながら、この方法では、ネスティングによる格子の不連続面以外で発生している波の波面もなだらかにしてしまい、計算精度の低下に繋がる。

2つ目の方法は、不連続面自体を正確に解くことである。これにより、不連続面を解像できるため、振動は発生しない。ただし、不連続面を正確に解くためには、Riemann 解法系のスキームが必要となり、計算量が増えてしまうという欠点がある。

最後の方法は、格子幅の不連続面で波の位相速度の不連続を無くすことにより、不連続面自体を発生させないという方法である。この方法を実現するためには、波の位相速度が格子幅に依存しないという計算スキームを用いる必要がある。中心差分系の計算スキームの場合、いくら高次精度のスキームにしても、位相速度に差が生じてしまう。これに対し、CIP 法は、格子幅に関わらず位相速度がほとんど一定となっている。このため、CIP 法を用いて計算を行うことにより、格子幅の不連続面において振動が発生しないような計算が可能となる。

(1-5) 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モデルの開発

大変形を伴う高風速域での風波気液界面間物理量輸送の数値的評価に向けて、CIP 有限体積分法 (VSIM3) を用いて一流体モデルによる大規模数値シミュレーションに適する風波数値計算コードを構築し、気液界面間の乱流物理量輸送機構に関する数値計算を行った。

本研究で用いた非圧縮性一流体モデルに基づく基礎方程式系は、下記のように、連続の式、Navier-Stokes 方程式、密度関数の移流方程式から構成される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.3.5-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho(\psi)} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho(\psi)} \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu(\psi) D_{ij}] \\ & - \frac{\sigma}{\rho(\psi)} \kappa(\psi) \delta(\psi) n_i + f_i \end{aligned} \quad (4.3.5-2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u_j \phi}{\partial x_j} - \phi \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.3.5-3)$$

ここで、 $u_i, \rho, p, D_{ij}, \mu, \sigma, \kappa, n_i, g_i, f_i, \psi, \phi$ はそれぞれ、速度ベクトル、密度、圧力、速度歪テンソル、粘性係数、表面張力係数、界面曲率、自由界面の法線ベクトル、重力加速度、外力、level set 関数、密度関数を表す。式 (4.3.5-3) は自由界面を表す VOF (Volume Of Fluid) 関数の輸送

方程式である。 ϕ は水或いは空気の体積率と定義すれば、それを時間的に予報することによって自由界面を追跡することができる。空間離散化について、VSIAM3 (Volume/Surface Integrated Average based Multi-Moment Method) 定式化を用いる。任意物理量に対して、2種類のモーメント、すなわち、検査体積表面における面積分平均値および検査体積における体積分平均値をモデル変数として定義する。自由界面追跡の計算に THINC 法を用いている。

この3次元自由界面モデルの並列化を行い、国内の代表的なスーパーコンピュータである地球シミュレータ(地球シミュレータセンター)と TSUBAME(東京工業大学)において性能評価を行った。計算流体力学の並列化に良く使われる領域分割を用いる。様々な計算資源を自由に対応できるように、分割方式は1次元から3次元まで用意されている。汎用性を考慮し、MPI (Message Passing Interface) によってコードを作成した。3次元自由界面モデルの数値解法について、速度のプロジェクトン計算以外はすべて陽解法であり、並列計算には適しているが、プロジェクトンを計算するための圧力 Poisson 方程式が計算負荷の主な原因であり、高効率の解法は求められる。ここで大規模計算に優れている代数多重格子法(AMG: algebraic multigrid)を用いる。

並列性能の指標として、次のように

$$\text{加速率: } S_{n1/n2} = \frac{T_{n1}}{T_{n2}} \quad \text{と} \quad \text{並列効率: } E_{n1/n2} = S_{n1/n2} \times \frac{n1}{n2} \quad \text{を定義する。}$$

ただし、 T_n は n 個プロセッサでの実行時間を示す。ここで、 $n1 < n2$ と仮定する。明らかに、理想加速率は $S_{perfect} = n2/n1$ である。

TSUBAME における並列性能評価結果を表 4.3.1 に示す。数百プロセッサにおいて十分な加速率が得られていることを分かる。地球シミュレータスーパー・コンピュータにおける大規模並列計算性能を表 4.3.2 と表 4.3.3 に示す。地球シミュレータの全ノードを利用した大規模計算(2007 年時点)においても十分な加速率を得られた。

表 4.3.1 TSUBAME での並列性能評価. 格子数は 300^3 である。

node	CPU	Time[s]	$S_{perfect}$	$S_{n1/n2}$	$E_{n1/n2}$
16	256(n1)	70.17			
24	384(n2)	56.13	1.5	1.25	0.833

表 4.3.2 地球シミュレータでの並列性能評価. 格子数は $800 \times 6400 \times 400$ である。

node	CPU	Time[s]	$S_{perfect}$	$S_{n1/n2}$	$E_{n1/n2}$
156	1,248(n1)	425.086			
256	2,048(n2)	265.677	1.641	1.6	0.975

表 4.3.3 地球シミュレータでの並列性能評価. 格子数は $1600 \times 6400 \times 400$ である。

node	CPU	Time[s]	$S_{perfect}$	$S_{n1/n2}$	$E_{n1/n2}$
480	3,840(n1)	153.486			
512	4,096(n2)	144.976	1.0667	1.0587	0.9925

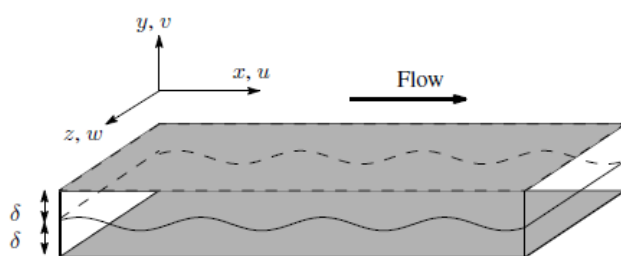


図 4.3.22 風波シミュレーションの模擬図。

数値粘性が SGS モデルと同様に格子サイズ以下の散逸を担うことによって従来の LES と同様な計算を可能にする陰的 LES (Implicit LES: ILES) の適用が有効であると考えられる。既往では、本研究でも用いているマルチモーメント上流化移流スキームである CIP-CSL (CIP Conservative Semi-Lagrangian) スキームによる ILES を 1 次元 Burgers 乱流に適用し、エネルギースペクトルを DNS と従来の LES と比較した結果、CIP-CSL は ILES のスキームとして十分適用可能であることを示し、3 次元計算に対する有効性を示唆した。ILES は移流スキーム固有の数値粘性を用いているため、複雑な SGS モデルの構築をする必要が無く、二相流の場合でも比較的安定に計算が行うことができる。本数値計算モデルの ILES としての有効性を確認するために、代表的な乱流検証問題の 1 つである平行平板間乱流計算を行い、本数値計算モデルによって得られた統計量を既存の DNS の結果と比較することにより、本数値計算モデルが乱流現象シミュレーションに適用可能かどうかの検討を行った。摩擦速度による Reynolds 数 $R=395$ において、格子点数を 64^3 とし、最も大きな乱れが生じるバフファ領域 ($y^+ = 20$) でのエネルギースペクトルの DNS 及び既存の Dynamic global-coefficient SGS LES モデルの平均流速分布との比較結果を用いて検討した。その結果、粘性底層は良好に一致し、対数則域では LES よりもやや大きな値を示すが、対数則に従うことが確認された。エネルギースペクトルの比較では、本計算モデルでは慣性小領域までの渦構造を再現できることを示した。以上より、本数値計算手法は平行平板間乱流に対する ILES として、妥当な結果を与えることが分かった。計算スキーム固有の数値粘性による散逸は、物理的な SGS モデルとの違いがあるが、本数値モデルによる計算は格子解像度以上のスケールを持つ流れに対して SGS の乱流散逸効果を適切に再現できたことを示している。一方、高 Reynolds 数では格子解像度によって数値粘性項の影響が大きくなる可能性があるため、適切な格子解像度を設定する必要がある。これについても数値実験によって示されている。

本計算モデルを用いて風波発達の数値実験を行った。本数値計算は気相のみの平行平板間乱流計算により十分発達した乱流場を作成し、得られた乱流場を初期値として気相のみに適用して気液二相流計算を行った。図 4.3.22 に示すように、上部の気相から気液界面を通じて運動量は液相に輸送される。初期で水平面だった界面は、風による剪断力によりスパン方向にほぼ一様な 2 次元的な風波が発達し、風波の峰の下流側には表面張力に起因するリップルが形成されていることが確認できた(図 4.3.23)。これは、低風速域の風波水槽での風波と視覚的に一致する。風波水槽の実験などでは、図 4.3.23 で示した比較的大規模な 2 次元的な波の存在により波のエネルギースペクトルには顕著なピークがあることが知られている。そこで、本数値計算においても同様な結果が得られることを確認するために、

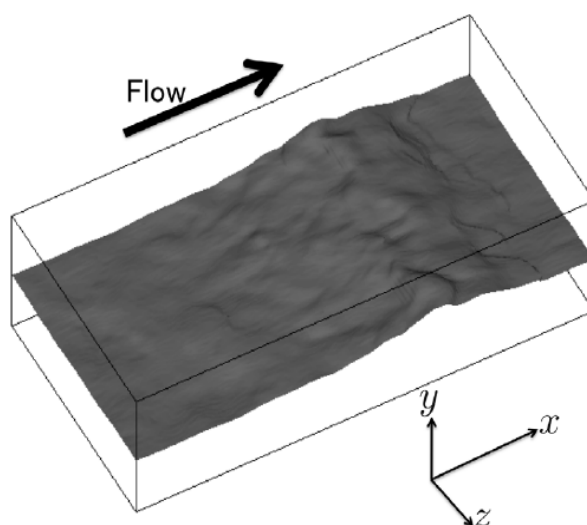


図 4.3.23 発達した風波の気・液界面。

風波が発達した後の波の変位時間平均から波のエネルギースペクトル密度関数を求めた。図 4.3.24 に界面変動に対するパワースペクトルを示す。ピーク周波数より高周波数領域では Elfouhaily らの Short-wave curvature spectrum にも良好に一致することからも、本数値計算で得られた風波の界面挙動は概ね妥当であると判断できる。

運動量輸送機構を界面近傍における圧力分布と Reynolds 応力分布から調べ、圧力は風波の峰の上流側で大きく、下流側で小さくなることが確認された。Reynolds 応力は峰の上流側で正を示し、従来の知見と一致することが確認され、本数値計算モデルによる運動量輸送の妥当性が確認された。

界面近傍の乱流エネルギー輸送構造を圧力歪相関項から調べ、自由界面近傍において乱流エネルギーは波の峰の上流側では鉛直方向から主流方向へ、下流側では主流方向から鉛直方向へ配分されていることが分かった。

界面近傍から上端壁及び下端壁へ離れるに従い、圧力歪相関項の主流方向成分は負に転じ、鉛直成分は正に転じることが分かった。即ち、主流方向成分から圧力歪相関項による他の二成分への乱流エネルギー輸送は、界面近傍より若干離れたところで起きていることが分かった。

摩擦速度に関して、本数値計算モデルの ILES による結果と実験結果とを比較した結果、風速 5.15m/s までは実験結果と概ね一致した結果が得られた。本研究の評価方法では摩擦速度が若干低く見積もられ、摩擦 Reynolds 数も実験と異なるが、マルチモーメント手法は従来の手法と同一格子点数で 2 倍の解像度を有するという性質により、妥当な結果が得られているものと考えられる。

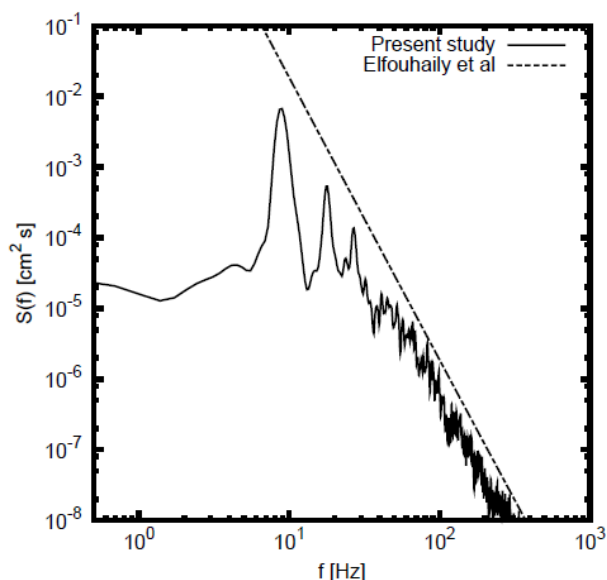


図 4.3.24 パワースペクトル（破線は Elfouhaily らの提案式を表す）。

(2) 研究成果の今後期待される効果

本グループでは、CIP 法を基本とする高性能数値解法の開発および検証を行い、保存性を確保しつつ計算負荷の小さい数値スキームの開発に成功した。開発された CIP スキームは工学流体だけでなく環境流体に対する数値計算において採用されていくものと期待される。本グループは環境流れに対する CIP 法の応用として、全球ソロバン格子の開発にも成功した。現時点では、力学場のみを対象としているが、今後、物理過程を導入することにより、全球からメソ、都市スケールまでを 1 つの格子系で計算できる気象モデルが開発されると期待される。

さらに、本グループでは環境流体力学における 1 つの難問である気・液界面を通しての物質とエネルギーの輸送機構に対する大規模・高速数値シミュレーションモデルの開発も行った。本モデルの地球シミュレータ上での高い並列性能は実証済みである。本モデルは砕波とそれに伴う飛沫の計算も可能なデザインになっているため、より高風速域でさらなる威力を発揮する。今後、「京速スーパーコンピュータ」に代表される次世代スーパーコンピュータの運営に伴い、より高解像度のシミュレーションが可能となり、更なる高風速域での数値シミュレーションが実現されると期待される。そして、実験では測定が非常に困難な、高風速域における有用なデータが得られることが期待される。

4.4 都市スケールの気象, 気候における災害予測シミュレーション (独立行政法人建築研究所 足永靖信・桑沢保夫グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

都市域の存在は, 幾何形状に伴う体積効果や排熱・蓄熱など特異な作用を大気に及ぼしており, 気象, 気候分野における重要な要素の1つである. 都市境界層の研究を実施する上で, 特に都市キャノピー層の物理過程の検討を行い, 実験等により熱特性を把握することにより, 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. 本研究グループで取り組んだのは, 下記の2つの課題である.

- (A) 都市キャノピーモデルの構築
- (B) 都市スケール数値シミュレーション

(A) 都市キャノピーモデルの構築

(1-1) 都市空間の平均化手法

都市キャノピーモデルとは, 水平数百メートル～数キロメートルの分解能で都市域を分割し, 建物が存在する都市大気層を空間平均することにより, 幾何形状に伴う体積効果や排熱・蓄熱などの都市的効果が組み入れたものである. 空間平均においては建物(固体)を含む場合と含まない場合があり, 前者は固体含有平均, 後者は固体除外平均と言われている(図4.4.1). どちらの方法によっても算出される数値解は変わらないが, 固体含有平均の場合は埋め込み境界(IB: immersed boundary)法を適用するとLESフィルター理論からの導出過程が明確になる. 本研究では, IB法による運動方程式の固体含有平均化手法として次に示す理論的検討を実施した.

平均化の際の積分空間に固体が占める空間を含む固体含有平均は次式で表される.

$$\langle \phi \rangle_{inc}(\mathbf{x}) \equiv \frac{1}{V_f + V_s} \int_{V_f + V_s} \phi(\mathbf{x} + \mathbf{x}') d^3 \mathbf{x}' \quad (4.4.1)$$

固体が占める空間を含まない固体除外平均は次式で表される.

$$\langle \phi \rangle_{exc}(\mathbf{x}) \equiv \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \phi(\mathbf{x} + \mathbf{x}') d^3 \mathbf{x}' \quad (4.4.2)$$

ここで, ϕ は任意の物理量, V_f と V_s は平均化体積内でそれぞれ流体と固体が占める空間の体積である. 記号 $\langle \rangle$ は空間平均を示す.

IB法は固体が占める空間も含め全空間が流体で満たされているものと仮定し, Navier-Stokes 方程式に付加した外力項 f_i

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (4.4.3)$$

により, 固体壁面と一致する箇所で No-slip 条件を満足させる計算手法である. ここで, Direct forcing 手法 (Fadlun *et al.* 2000) に基づき f_i の導出を行う. 式(4.4.3)に対して時間方向に離散化を行うと

$$\frac{u_i^{l+1} - u_i^l}{\Delta t} + \frac{\partial u_i^l u_j^l}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^l}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i^l}{\partial x_j^2} + f_i^l \quad (4.4.4)$$

を得る. ここで, Δt は時間刻み隔, l は時間ステップレベルである. Dirichlet 条件

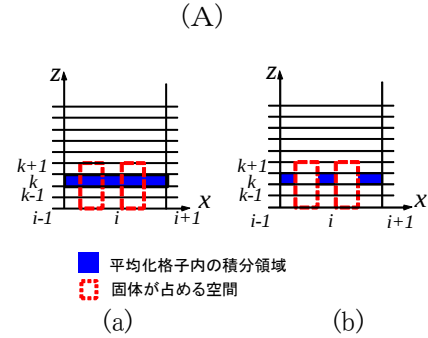


図 4.4.1 都市空間の空間平均. 計算格子 $(x:i, z:k)$ において, (a)の固体含有平均では建物を含めて大気層を平均する. (b)の固体除外平均では平均化の対象に建物を含めず流体部分(建築物の外部)のみとする.

$$u_i^{l+1} = u_d \quad (4.4.5)$$

を常に成立させる f_i^l は

$$f_i^l = \frac{u_d - u_i^l}{\Delta t} + \frac{\partial u_i^l u_j^l}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^l}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 u_i^l}{\partial x_j^2} \quad (4.4.6)$$

と表すことが出来る.

静止固体の壁面上では, 常に

$$u_i^l = u_d = 0 \quad (4.4.7)$$

であるから, 静止固体の壁面 B_{sb} と一致する箇所の f_i は

$$f_i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (4.4.8)$$

と表せる. ここで, 静止固体と流体からなる系全体の運動量保存の観点から, V_s 内での流速が 0 である運動量場を想定すると, これを実現する f_i は

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}, & V_s \text{ 内} \\ 0, & V_f \text{ 内} \end{cases} \quad (4.4.9)$$

と整理される. 式 (4.4.9) により支配される運動量場は, p , u_i 及び $\partial u_i / \partial x_j$ が全空間で積分可能な導関数を持つため, 式 (4.4.1) に示される固体含有平均操作が適用可能であり, 空間平均運動量方程式

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle_{inc}}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle_{inc}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle_{inc}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle_{inc}}{\partial x_j^2} + \langle f_i \rangle_{inc} \quad (4.4.10)$$

$$\langle f_i \rangle_{inc}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{\rho\{V_f + V_s\}} \int_{B_{sb}} p(\mathbf{x} + \mathbf{x}') n_i(\mathbf{x} + \mathbf{x}') \delta(\mathbf{x}') d^3 \mathbf{x}' & \text{空間平均化セ} \\ -\frac{1}{V_f + V_s} \int_{B_{sb}} \nu \{ \nabla u_i(\mathbf{x} + \mathbf{x}') \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x} + \mathbf{x}') \} \delta(\mathbf{x}') d^3 \mathbf{x}', & \text{ルが } B_{sb} \text{ を分割} \\ & \text{しない場合} \\ \frac{1}{\rho\{V_f + V_s\}} \int_{V_s} \frac{\partial p(\mathbf{x} + \mathbf{x}')}{\partial x_i} d^3 \mathbf{x}' & \text{それ以外} \\ -\frac{1}{V_f + V_s} \int_{V_s} \nu \frac{\partial^2 u_i(\mathbf{x} + \mathbf{x}')}{\partial x_j^2} d^3 \mathbf{x}', & \text{の場合} \end{cases} \quad (4.4.11)$$

を導出することが出来る. ここで, $\delta(\mathbf{x})$ は Dirac のデルタ関数である. 次に, (4.4.9) 式の両辺に $\partial \langle u_i \rangle_{inc} \langle u_j \rangle_{inc} / \partial x_j$ を加えると, 以下の様に移流項と SGS 応力 (T_{ij}) 項を持つ空間平均運動量方程式を得ることが出来る.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle_{inc}}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle_{inc} \langle u_j \rangle_{inc}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle_{inc}}{\partial x_i} - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle_{inc}}{\partial x_j^2} + \langle f_i \rangle_{inc} \quad (4.4.12)$$

$$T_{ij} = \langle u_i u_j \rangle_{inc} - \langle u_i \rangle_{inc} \langle u_j \rangle_{inc} \quad (4.4.13)$$

ここで, 固体含有平均に関する式 (4.4.10), 式 (4.4.11) を基に, 固体除外平均についても整理することが可能である. $\langle \phi \rangle_{inc} = m \langle \phi \rangle_{exc}$, $m = V_f / \{V_f + V_s\}$ が成立すると仮定すると,

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \langle u_i \rangle_{exc}}{\partial t} + \frac{1}{m} \frac{\partial m \langle u_i \rangle_{exc}}{\partial x_j} \frac{\langle u_j \rangle_{exc}}{\partial x_j} = - \frac{1}{m} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle_{inc}}{\partial x_i} \\
& - \frac{1}{m} \frac{\partial m \left\{ \langle u_i u_j \rangle_{exc} - \langle u_i \rangle_{exc} \langle u_j \rangle_{exc} \right\}}{\partial x_j} + \frac{1}{m} v \frac{\partial^2 m \langle u_i \rangle_{exc}}{\partial x_j^2} \\
& + \frac{1}{\rho V_f} \int_{B_{sb}} p n_i dS - \frac{1}{V_f} \int_{B_{sb}} v \frac{\partial u_i}{\partial n} dS
\end{aligned} \tag{4.4.14}$$

圧力については、静止固体の壁面 B_{sb} 上での連続条件を除き V_s 内での物理的な拘束条件が存在しないので $\langle p \rangle_{inc}$ と $\langle p \rangle_{exc}$ の関係を規定することはできない。以上で述べた都市空間の平均化手法については原著論文に投稿した (Kono *et al.* *Boundary Layer Meteorol.* 2010a)。

(1-2) 都市キャノピー層の熱気流特性

① 都市空間における気温場に関する温度成層風洞実験

都市キャノピー層を対象にした気温場の数値モデルを構築する上で、熱の検証データは極めて重要である。本研究では温度成層流を人工的に発生させる温度成層風洞(独立行政法人建築研究所)を用いて建物模型周りの気温場を詳細に調べ、モデルパラメータの同定手法を検討する。

図 4.4.2 に実験概要を示す。助走区間(8m)においてラフネス配置により気流の乱れを十分発達させた後、建物群(1m×2m)に流入させる。建物群の地表面を温度制御して温度成層流を作成する。アスペクト比、リチャードソン数等を変化させた 5 ケースの実験を実施し、建物群中央付近の気温、風速の詳細な3次元分布データを取得する。図 4.4.3 に無次元気温分布の計測事例を示す。建物間で形成される循環渦により、都市キャノピー内では風上の地面付近が高温化していることが分かる。

次に、数値モデルのパラメータに関する検討を行う。 $k-\varepsilon$ モデルの場合、乱流熱拡散は次式で表される。

$$-\overline{T'u_j} = \frac{C_\mu}{Pr_T} \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \tag{4.4.15}$$

ここで、 Pr_T は乱流プラントル数である。都市キャノピー層においては空間平均からの偏差による熱拡散の影響が考えられるが、その実態は明らかにされていない。温度成層風洞の実験値を用いて空間平均(体積除外平均)を行い、その鉛直分布を都市キャノピーモデルによる計算結果と比較したのが図 4.4.4 である。ここで、 α は建物表面における対流顕熱のバルク式における熱伝達率、 β は次式で表される空間偏差による熱拡散係

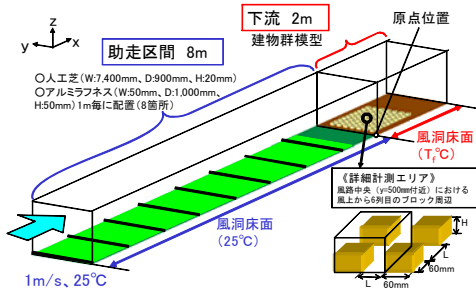


図 4.4.2 都市空間における気温場に関する風洞実験の概要。建物模型を正方配置し、地表面部分を加熱もしくは冷却する。

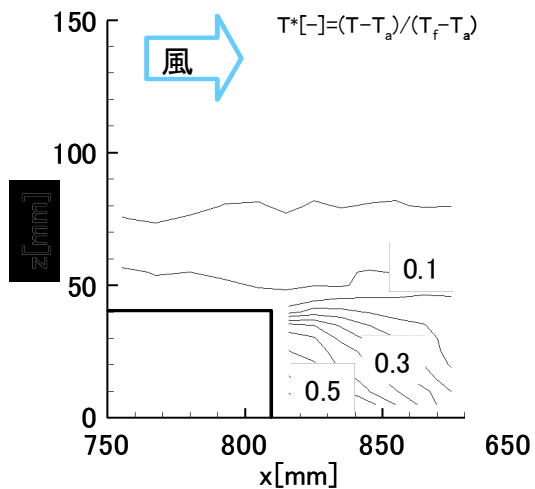


図 4.4.3 気温の鉛直断面分布。地表面温度 T_g 、上空気温 T_a による無次元気温をコンターで表示している。

数である。

$$\left\langle (\bar{T})'' (\bar{u}_3)'' \right\rangle = -\beta \frac{\partial \langle \bar{T} \rangle}{\partial x_3} \quad (4.4.16)$$

式(4.4.15)の乱流拡散式に式(4.4.16)を追加することにより、 β の値が大きくなると、熱的混合が促進されて温度分布が変化する(図4.4.4a)。適切な β 値を設定すると計測との照合が改善することが分かる。通常の都市キャノピーモデルでは計測との乖離が大きい($\beta=0$ に相当)。これは、スカラ風速の空間平均値が都市キャノピー内で小さくなりシアーが得られないため、従来の熱拡散モデルによると実際の熱混合を再現出来ないためである。建物間で形成される循環渦に伴う空間平均場の熱拡散効果を実験に基づき補正する必要がある。図4.4.4bでは α の値を変化させた計算を行い、 α の増加に伴い温度分布が全体的に上昇する。以上で述べた都市キャノピーの熱拡散の研究内容については国際会議で発表した(Kono and Ashie *The 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology- Climate Analysis for Urban Planning* 2005)。

② 抗力係数

次式で示される効力係数は都市キャノピーモデルの重要なパラメータの1つである。

$$C_D(z) = -\overline{\langle f_1 \rangle}_{inc}(z)h / \left\{ 0.5 \overline{\langle u \rangle}_{inc}^2(z) \lambda_f \right\} \quad (4.4.17)$$

ここで、 λ_f はfrontal area densityである。本研究では、正方配列や千鳥配列の建物群を対象に、抗力係数に関して風洞実験と数値計算による検討を行う。

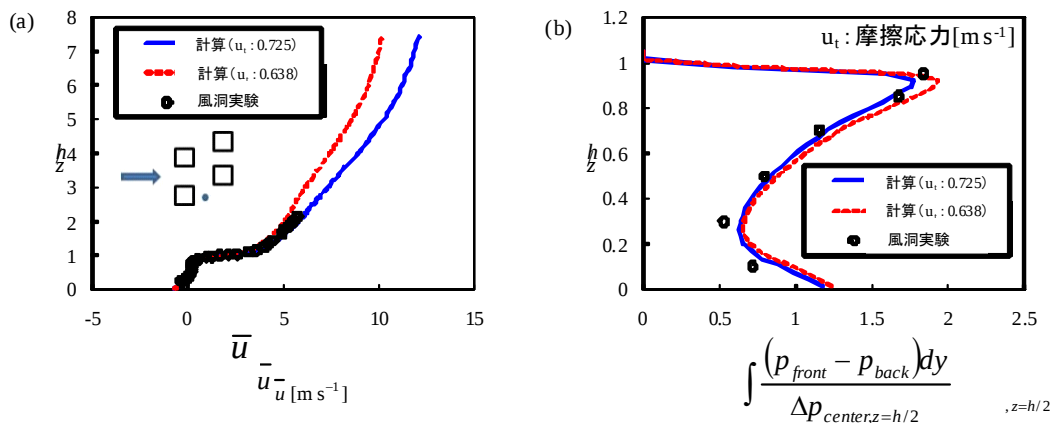
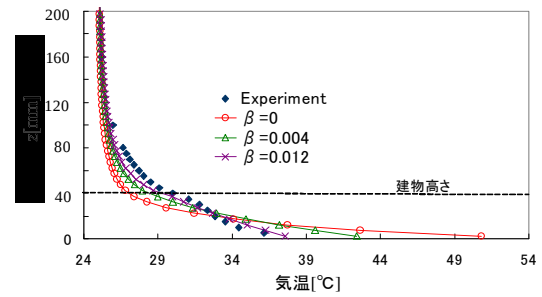
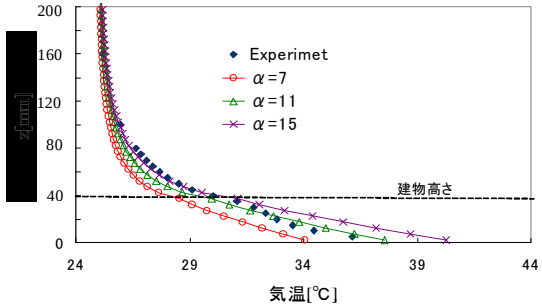


図 4.4.5 LES 計算と風洞実験の比較. u_t は LES 計算における摩擦応力であり、0.725, 0.638 の2種類を設定している。(a)は風速の鉛直分布である。(b)は建物前後における圧力差の鉛直分布である。



(a) β の影響. $\alpha = 11$ [Wm⁻²K⁻¹]に固定.



(b) α の影響. $\beta = 0.012$ [m² s⁻¹]に固定.

図 4.4.4 空間平均気温の鉛直分布に関する計算と実験の比較. α は熱伝達率, β は空間偏差による熱拡散係数である。

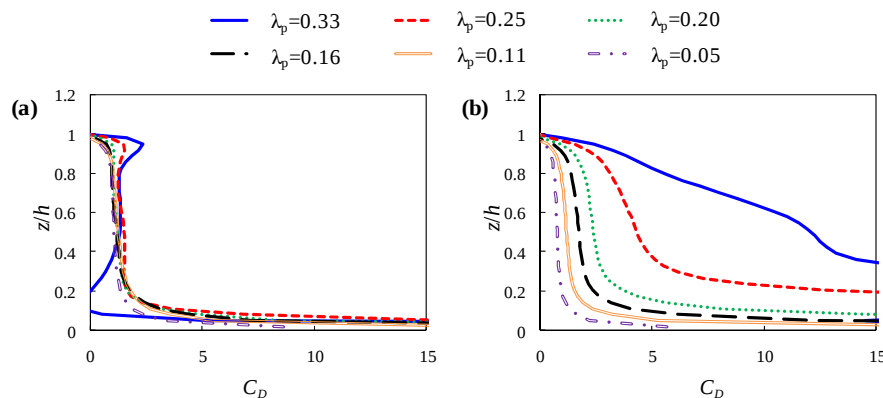


図 4.4.6 LES による抗力係数の算出結果. λ_p はグロス建ぺい率であり, 0.05 から 0.33 の 6 段階を設定している. (a) 正方配列. (b) 千鳥配列.

図 4.4.5 は建蔽率 25% の千鳥配列を対象に, 主流方向風速および圧力に関し, LES 結果と風洞実験結果を比較したものである. 計算と計測は良く合致している. なお, LES 計算においては流れの駆動源として摩擦応力を設定している ($u_\tau = 0.725, 0.638$).

抗力係数に関して LES による計算結果を基に整理した結果を図 4.4.6 に示す. 正方配列と低建蔽率の千鳥配列の建物群の抗力係数は, 鉛直方向にほぼ均一な分布であることを確認した. 一方, 建蔽率 25% 以上の千鳥配列の建物群の抗力係数は, 鉛直方向に大きく変化していることが分かった. 建蔽率 25% 以上の千鳥配列の建物群の抗力係数が非常に大きくなるのは, 風速 (空間平均) が地表に向かって急激に減衰するためである. 建蔽率が 25~40% 以上になる市街地も多いことから実態に即した都市キャノピーモデルの抗力係数等のパラメタリゼーションが必要であると考えられる. 以上で述べた LES による抗力係数の同定方法と検討結果は原著論文に投稿した (Kono *et al. Boundary Layer Meteorol.* 2010b).

③ シュリーレン法による可視化

シュリーレン法は空気の屈折率の空間勾配を特殊な光学装置により光の濃淡に変換し映像化する方法である. シュリーレン法を温度分布を有する気流に適用することにより, 熱をトレーサとした新たな気流の可視化が可能になり, 温度場の形成メカニズムの解明に役立つと考えられる.

温度成層風洞に導入したシュリーレンシステムを図 4.4.7 に示す. キセノンランプを光源として平面鏡 (有効径 150mm ϕ), 凹面鏡 (有効径 300mm ϕ) を介して計測胴を横切るように観測部で光を往復させる仕組みである. また, 建物周辺における熱塊の流動を観察するため, 高速高解像度カメラ (1,280×1,024, 露光時間: 1 μ s~5s) を用いる.

都市キャノピー層を対象にした風洞実験の概要を以下に述べる. 助走 7m (中立), 模型部 1m (地表面: 70°C, バルクリチャードソン数: -0.8), 模型部には 2D 木製ブロック (W:35mm, D:1,000mm, H:35mm) をスパン方向に 11 列配置し, 建物配置のアスペクト比 (= 隣棟間隔/建物高さ) は 1.6 とした.

実験の結果, 図 4.4.8 に示す明瞭なシュリーレン画像が得られた. シュリーレン画像の明度は温度勾配と理論的に対応する. シュリーレン画像と風洞内の気温分布との比較を通じて, 都市キャノピーの上端と地表面付近においてシュリーレン画像では濃色に現れており, これらの箇所では温度勾配が大きいことを確認した. シュリーレン実験で得られた明度の時空間データを用いた主成分分析の事例を図 4.4.9 に示す. 主成分得点の絶対

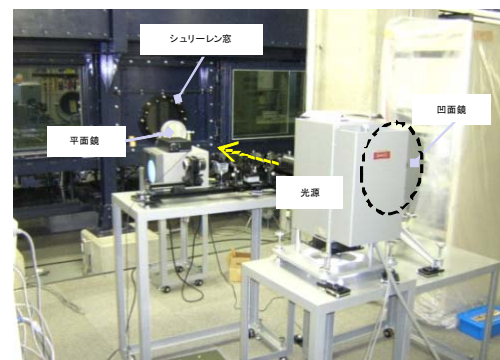


図 4.4.7 温度成層風洞に導入したシュリーレンシステム.

値が大きい領域が連続的に存在しており、その分布形状は建物間の循環流に対応している。これらの研究成果は都市キャノピー内の熱的挙動を解明する上で極めて貴重である。シュリーレン法は衝撃波等の高速流体を対象にした研究が多数行われているが、都市キャノピー層を対象にしたシュリーレン可視化は世界的に見ても例がほとんど見られず、シュリーレンの画像分析により、都市境界層におけるストリーク構造の解明や数値モデルの検証データの提供等、様々な研究に活用が期待される。シュリーレンに関する研究内容は原著論文に投稿した(足永・阿部日本建築学会環境系論文集2005)。

(1-3) 都市空間における放射特性

① 都市形状のスケールモデル実験

都市域の熱収支を調べる上で重要な要因の1つとしてアルベドが挙げられる。都市域のアルベドを観測した事例は数多く見られ、その中には都市形状をスケールモデルで模擬してアルベドの特性を調べた報告が幾つか存在する(Aida 1982)。最近ヒートアイランド対策として高反射率塗料等の波長選択性を有する材料が都市空間に大量に導入されている。しかし、都市空間の放射熱の挙動に関して十分な調査は進んでいない。そこで、本研究では都市形状のスケールモデル実験により分光放射特性に関する検討を行う。

スケールモデルは、建物を模したコンクリートブロック 81 個(普通・舗装コンクリート、150mm×150mm×150mm)を、道路面を模したコンクリートプレート(同材質、2.89m×2.89m)上に正方配列したものである。建ぺい率は 25%である。図 4.4.10 にスケールモデルの写真を示す。測定に用いた計器は分光放射計(波長範囲:350-2500nm、波長精度:1nm)である。

時刻毎の都市形状の分光アルベドを図 4.4.11 に示す。いずれの時刻とも波長が長くなるにつれて都市形状の分光アルベドは高くなっている。太陽高度が低い時間帯では特にその傾向が見られる。平板および都市形状の波長帯別アルベドについて太陽高度との関係を図 4.4.12 に示す。都市形状のアルベドはいずれの波長帯においても平板のそれと比較して小さい。都市形状による日射の捕捉効果が分光アルベドにおいても現れている。また太陽高度との関係を見ると、都市形状のアルベドは平板より太陽高度の影響を受けにくいことが分かる。都市形状の場合、太陽高度が低くなると壁に入射する日射の割合が増え、地面よりも壁面の反射影響が相対的に高まると予想される。さらに、

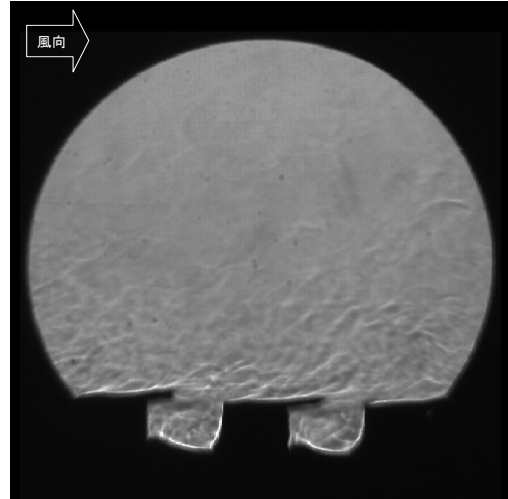


図 4.4.8 都市キャノピー層を対象にしたシュリーレン可視化事例。バルクリチャードソン数:-0.8.

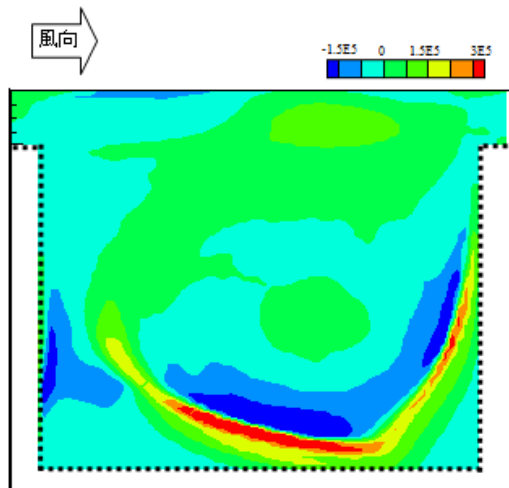


図 4.4.9 シュリーレン実験データを用いた主成分分析の事例。第 3 主成分得点の空間分布を示す。



図 4.4.10 建築研究所実験棟屋上に設置したスケールモデル(つくば)

材料の入射角特性や多重反射の影響も相まって平板とは異なる結果が得られたと考えられる。

② 都市形状の分光放射解析

都市形状の分光放射解析は、日陰判定や形態係数の算出等に加え、任意の波長ごとに放射計算ができるようにしたものであり、入射角特性については実測データから経験関数を導き計算に反映している。夏期正午前後の実験および計算について筆者らの結果と既往の調査事例を比較したのが図 4.4.13 である。都市形状のアルベドは建ぺい率の増加に伴い低下し、建ぺい率 40～50%以降は上昇に転じている。今回得られた観測、計算の結果は、既往の調査事例による傾向と良く一致している。図 4.4.14 に相対分光アルベドの実測値と計算値を示す。相対分光アルベドとは全波長域の反射率を基準とし、分光アルベドの分布を相対的に表したものである。両者は良く合致しており、分光アルベドの評価に有効な計算方法であると言える。以上の都市形状の分光放射特性に関する研究内容は、原著論文に投稿した(伊藤・足永日本建築学会環境系論文集 2009)。

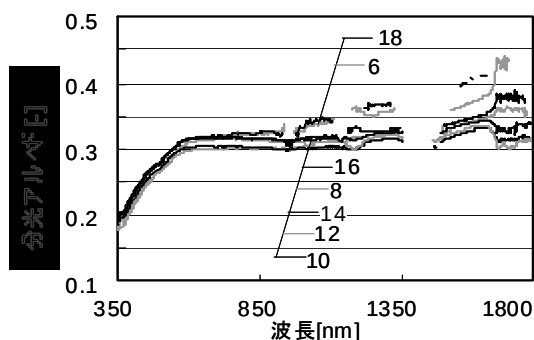


図 4.4.11 時刻毎の都市形状の分光アルベド (2008 年 7 月 12 日)

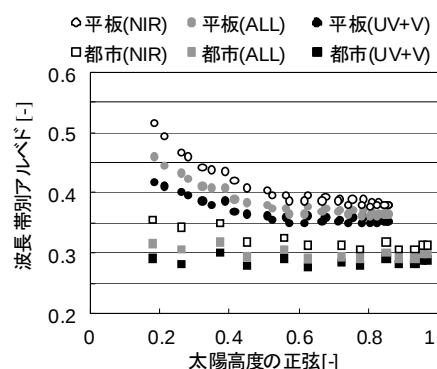


図 4.4.12 平板と都市形状に関する波長帯別アルベドと太陽高度の関係

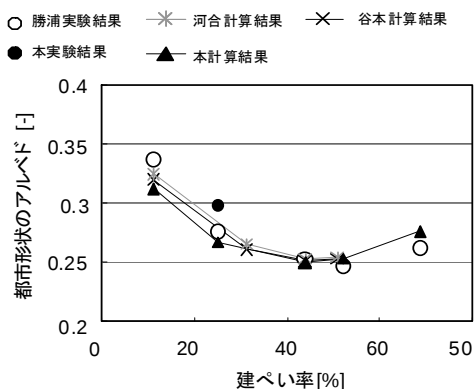


図 4.4.13 都市形状のアルベドの既往の研究との比較(夏期正午前後)

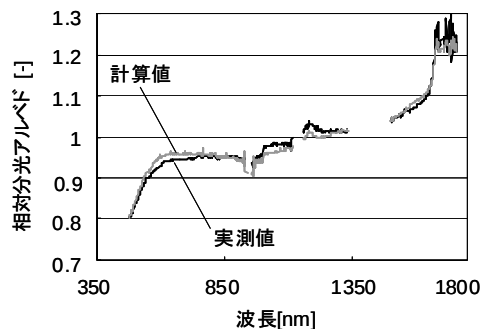


図 4.4.14 相対分光アルベドの実測値と計算値の比較(2008 年 7 月 12 日 17 時)

(B) 都市スケール数値シミュレーション

(1-4) 都市情報のニューラルネットワーク解析

都市キャノピーモデルを用いた数値シミュレーションを実施する場合、建物の面積や高さを都市キャノピー層において幾何的な情報として集約する必要がある。しかし、自治体が管理する建物 GIS データを入手困難なケースに遭遇することが多い。そこで、一般に入手が容易い細密数値情報、国勢調査等により都市キャノピーモデルの入力データベースを簡易に整備する手法を検討する。都市キャノピーモデルの多くは、単純な建物形状および均一な建物配置を想定している。したがって、都市キャノピー幾何情報は、建物用途ごとの建築面積率、建物高さ、建物の平均的な水

平幅で特徴付けられ、これらを予測する方法を検討することになる。

解析対象は東京都の区部および多摩地域である。ただし、多摩地域の山間部は建物 GIS データが整備されていないため解析対象から除外し、3,903 メッシュ(4次メッシュ: 25ha)を分析に用いる。居住用地、商公用地、工業用地の3つを考え、建築面積率、建物高さおよび建物の平均的な水平幅を都市 GIS のポリゴンデータから正確に算出し、これを教師データとする(3×3=9 項目)。入力データとしては、細密数値情報、国勢調査および事業所・企業統計調査から、13 項目を選出する。入力データから教師データを予測するに当たり、単回帰分析、重回帰分析、ニューラルネットワークの適用を試みる。単回帰分析については、単回帰の近似式として、1次式、2次式、指数関数、べき乗関数の中から相関が高いものを選択した。重回帰分析では、トレーニングデータの入力(独立変数13項目)と出力(従属変数9項目)について重回帰分析を実施した。ニューラルネットワーク解析では中間層数を1～5、ユニット数を4～24の間で変化させ、ネットワーク構造を試行錯誤で決定する。その結果、全データ(3,903 個のターゲット)を学習データに使用した場合、中間層数3(各層のユニット数 8, 12, 8)のネットワークが今回の組み合わせの中で最も優れていることが分かった。学習回数については、住宅系を対象に 100,000 回までのテスト学習を実施しパフォーマンスが 2,000 回学習時と 5%しか変わらないため学習回数は 2,000 回とした。今回の分析に用いた Levenberg-Marquardt 法においては、係数 μ の初期値を 0.001、ステップごとの係数 μ を 10(増加時)と 0.1(減少時)に設定している。Levenberg-Marquardt 法の更新式を以下に示す。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (4.4.18)$$

ここで、 $\mathbf{I}$:単位行列、 μ :係数、 $\mathbf{e}$:誤差ベクトルである。

全データ(3,903 メッシュ)を使用した場合における建物用途ごとの都市キャノピー幾何情報の推定精度を表 4.4.1 に一覧する。単回帰分析では商公系建物の階数、住居および商公系建物の建築面積率においては 0.5 前後の決定係数を示したが、その他の項目では決定係数が低い。重回帰分析による推定結果は概ね単回帰予測より良い。しかし、1 棟当たりの平均建築面積の推定精度は全体的に低く、特に住居系建物の決定係数はわずか 0.082 であった。一方、ニューラルネットワークはすべての項目において良好な推定精度が得られた。ニューラルネットワークは回帰分析では扱えない複雑な関係を持つ項目についても高精度でターゲットを予測可能である。

次に、汎用性の確認を行うため、東京 23 区のみトレーニングデータをニューラルネットワークに学習させ習得したネットワークを用いて多摩地域の都市キャノピー幾何情報を推定する。東京 23 区の都市構造は他の地域と異なることが予想されたため、マハラノビス(Mahalanobis)距離を活用し、両地区の統計的な類似度を判定した。未知ベクトル $\mathbf{x}$ が平均ベクトル $\mathbf{u}$ を持つ群に対するマハラノビス距離 D_M は次式で表される。

$$D_M(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = (\mathbf{x} - \mathbf{u})^T \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{u}) \quad (4.4.19)$$

ここで、 Σ は群の共分散行列である。

表 4.4.1 推定精度の比較.

用途と幾何情報		単回帰		重回帰		ニューラルネットワーク*	
		RMS	R ² [-]	RMS	R ² [-]	RMS	R ² [-]
住居系	建築面積率 [-]	0.115	0.532	0.067	0.648	0.039	0.880
	階数 [階]	1.415	0.296	1.136	0.512	0.387	0.943
	1棟建築面積[m ²]	192.535	0.079	192.009	0.082	14.850	0.995
商公系	建築面積率 [-]	0.093	0.495	0.091	0.500	0.071	0.702
	階数 [階]	0.978	0.522	0.802	0.644	0.470	0.878
	1棟建築面積[m ²]	304.139	0.155	269.396	0.316	74.971	0.947
工業系	建築面積率 [-]	0.193	0.195	0.154	0.371	0.103	0.719
	階数 [階]	0.769	---	0.624	0.272	0.463	0.622
	1棟建築面積[m ²]	271.747	0.345	190.324	0.342	63.296	0.927

*ニューラルネットワークの中間層数:3, 中間層ユニット数:8→12→8

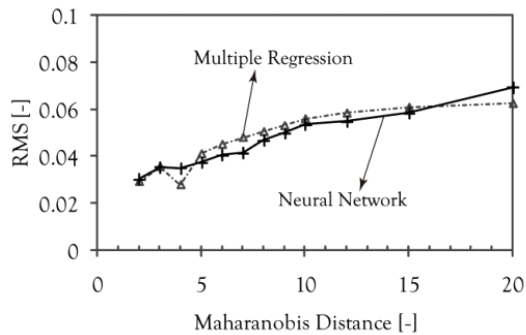


図 4.4.15 マハラノビス距離と推定精度(住居系, 建築面積率)

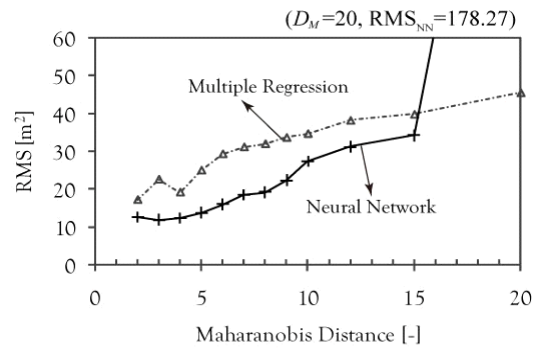


図 4.4.16 マハラノビス距離と推定精度(住居系, 1 棟建築面積)

本研究が解析対象とする 3,903 メッシュの中に東京 23 区に属するメッシュは 2,601 個存在し, 多摩地域に属するメッシュは残り 1,842 個である. ニューラルネットワークのトレーニングデータの入力 13 項目について東京 23 区の統計分析を行い, 多摩地域のメッシュデータを適用するとマハラノビス距離は 1.157 から 307.077 の数値を示した. 多摩地域のメッシュの内, マハラノビス距離が 20 以下のメッシュは全体の約 90% を占める. マハラノビス距離とニューラルネットワークによる推定精度の関係を重回帰分析による結果と合わせて図 4.4.15 と図 4.4.16 に示す. マハラノビス距離が 15 以下においては, 住居系建物の建築面積率, 1 棟建築面積ともにニューラルネットワークの RMS 誤差はそのほとんどが重回帰分析と比べ値が小さいことが分かる. 特に 5 以下では, 東京都 GIS 全データを用いた表 4.4.1 の分析結果と遜色ない予測精度である. しかし, マハラノビス距離が 15 以上になるとニューラルネットワークの誤差が急増し, 両者の関係は逆転する. したがって, ニューラルネットワークで他地域の解析を行う場合, マハラノビス距離などで類似の地区を選定することが望ましい. 以上の都市情報のニューラルネットワーク解析に関する研究内容は, 原著論文に投稿した(足永・平野日本建築学会環境系論文集 2008).

(1-5) 土地利用の変化が降水に及ぼす影響

非静力学気象モデルを用い, 関東地方における都市表面の変化が降水量に及ぼす影響について数値シミュレーションを行った. 2001 年から 2005 年の観測データから台風日等を除いた上で都内 5 箇所のアメダス観測点において一定量の降水(27mm 以上)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(都市有ケース)と都市を樹林地に変化させた土地利用(都市無ケース)をそれぞれ設定し, 計 16 回の数値実験を実施した. メソスケールモデルの解析領域を図 4.4.17 に示す. メソスケールモデルは伊藤忠テクノソリューションズが開発した局地気象評価予測システム(LOCALS: Local Circulation Assessment and Prediction System)を使用し, メッシュ解像度は 5km である. 初期・境界条件には気象庁客観解析データ RSM を用いた.

解析結果を基に, 図 4.4.17 に示す「都市エリア」「山岳エリア」における都市の有無による降水量の変化を集計したのが表 4.4.2 である. ケー

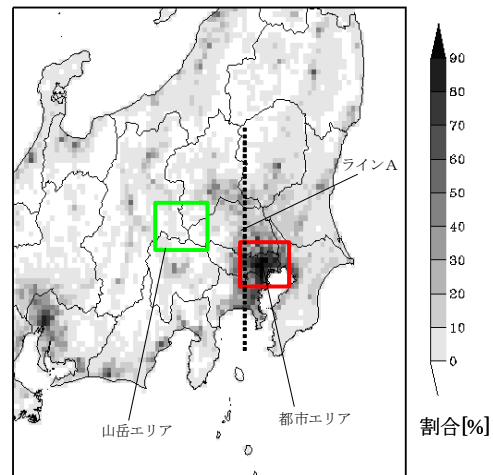


図 4.4.17 メソスケールモデルの解析領域. 背景には樹林面積率の変化(都市無ケースー「都市有ケース」)を示している. また, 表 4.4.2 で集計対象とする「都市エリア」「山岳エリア」, 図 4.4.20 の断面位置であるライン A を示している.

表 4.4.2 都市の有無による降水量の変化(数値計算). 図 4.4.17 で示す「都市エリア」,「山岳エリア」において該当日午後の降水量をエリアで積算した値[mm]. 差分とは「都市有」-「都市無」を表す.

日付	都市エリア			山岳エリア		
	都市有	都市無	差分	都市有	都市無	差分
2001 年 7 月 18 日	0	0	0	1.256	1.275	-0.019
2001 年 7 月 25 日	0.004	0.004	0	1.553	1.608	-0.055
2002 年 8 月 2 日	0.031	0.045	-0.014	0.020	0.018	0.002
2003 年 8 月 5 日	1.308	0.768	0.540	2.218	2.171	0.047
2003 年 9 月 3 日	0	0.001	-0.001	0.051	0.055	-0.004
2004 年 9 月 4 日	5.129	5.187	-0.058	2.441	2.386	0.055
2005 年 8 月 15 日	0.001	0.001	0	0.976	0.969	0.007
2005 年 9 月 4 日	0	0	0	0.502	0.532	-0.030

スタディーの対象 8 日のうち,「山岳エリア」ではすべての日で降水が生じているのに対して,「都市エリア」で降水が生じたのはほぼ半分であり,都市域における降水予測の複雑性が示唆される.「都市エリア」において都市の有無による降水量の変化を調べると,ケーススタディーの対象 8 日のうち,降水の変化がほとんど見られないものが 5 日,都市有で降水量が減少したのが 2 日,降水量が増加したのが 1 日であった.「山岳エリア」についても同様に調べると,降水量の変化がほとんど見られないものが 7 日,降水量が減少したのが 1 日であった.特徴的な結果が現れた 2003 年 8 月 5 日,2001 年 7 月 25 日の 2 日について以下に説明する.

2003 年 8 月 5 日の計算事例について説明する.図 4.4.18 は,都市の有無による降水量の変化の地域分布を表している.図中の地点 a において局所的に降水量の変化が見られる.同地点における降水量の日変化を図 4.4.19 に示す.計算値は観測と似た挙動を示している.降水のイベント発生 1 時間前における都市の有無による気温,風速の変化の鉛直断面分布を図 4.4.20 に表す.東京都の地点 a の上空において局所的な上昇流が顕著に発生しており,地上 1000m 以上では気温が上昇している.地上付近では降水により気温が低下する.降水のイベント数時間前における都市の有無による気温,風速の変化について地域分布を表したのが図 4.4.21 である.都心に風が収束しており,気温が上昇している様子が分かる.これは地表面の変化(都市化)により,大気への顕熱放出量が増加したためであり,そのため都市上空ではヒートアイランド化に伴う上昇流が発生していたと考えられる.

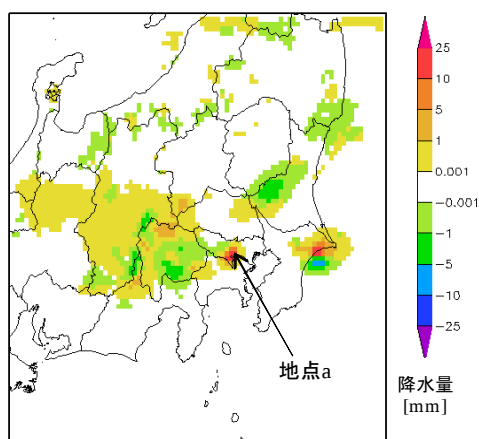


図 4.4.18 降水量の変化(「都市有」-「都市無」)の地域分布. 2003 年 8 月 5 日 17 時における計算結果を使用した. 図 4.4.19, 図 4.4.20 で取り扱う地点 a の位置を示している.

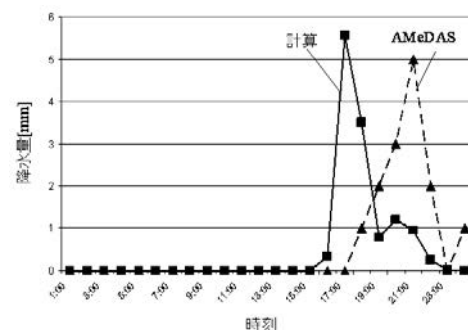


図 4.4.19 降水量に関する計算と観測の比較(2003 年 8 月 5 日). 図 4.4.18 の地点 a に該当する計算メッシュにおける計算値, 地点 a 近傍のアメダス観測値(府中)を使用した.

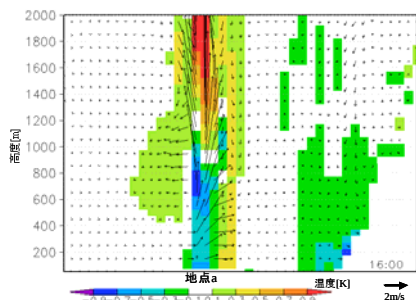


図 4.4.20 図 4.4.17 のラインAにおける気温、風速の変化(「都市有」-「都市無」)に関する断面分布. 2003 年 8 月 5 日 16 時における計算結果を使用した. 地点 a の地理的位置は図 4.4.18 に示してある. 鉛直風速は水平風速の 10 倍の大きさで表示している.

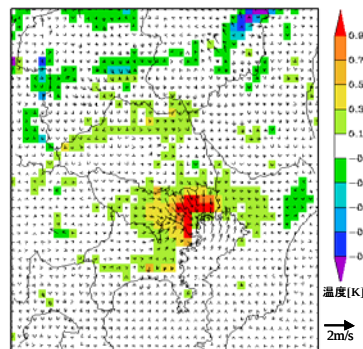


図 4.4.21 気温、風速の変化(「都市有」-「都市無」)に関する地上 10m における地域分布. 2003 年 8 月 5 日 14 時における計算結果を使用した.

次に 2001 年 7 月 25 日の事例について説明する. 図 4.4.22 は、都市の有無による降水量の変化の地域分布を表している. 図中の地点 b において局所的に降水量の変化が見られる. この場合は、都市化によって降水量が減少している. 図 4.4.23 は同時刻における比湿の変化に関する鉛直断面分布を表したものである. 地上付近の風向を見ると、平地から地点 b に向かって吹いており、地上付近の比湿変化はマイナスになる傾向が見られる. これは地表面の変化(都市化)により、大気への潜熱放出量が減少したためである. そして、都市域から乾燥した空気が山岳方面に流れ込み、その結果山際における降水量の減少を招いたと考えられる.

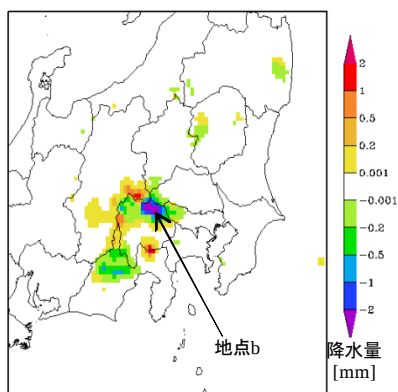


図 4.4.22 降水量の変化(「都市有」-「都市無」)の地域分布. 2001 年 7 月 25 日 19 時における計算結果を使用した. 図 4.4.23 で取り扱う地点 b の位置を示している.

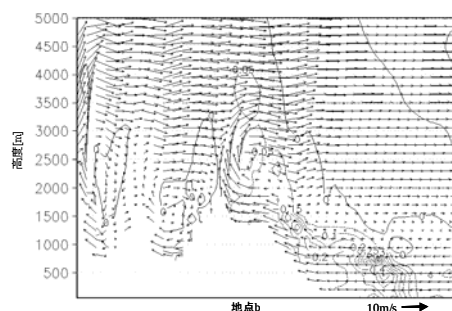


図 4.4.23 比湿の変化(「都市有」-「都市無」)に関する断面分布(東西方向)と「都市有」の風速分布. 2001 年 7 月 25 日 19 時における計算結果を使用した. 地点 b の地理的位置は図 4.4.22 に示してある. 鉛直風速は水平風速の 10 倍の大きさで表示している.

地表面の条件を仮想的に設定した数値計算を実施した結果、都市域において局所的に降水の生じる現象が再現可能であることが分かった. 都市域における降水の発生においては海風の収束域とヒートアイランドの関係が指摘されており、発生メカニズムを解明する上で数値計算は有力な手法であると言える. 一方、都市化により降水量が減少する事例も見られた. 現在、都市域における集中豪雨の発生が大きく注目されているが、都市化イコール降水増加とも言い切れない. また、解析日により異なる降水現象の複雑性についても十分に考慮しなくてはならない. 以上の土地利用の変化が降水に及ぼす影響に関する研究内容は、原著論文に投稿した(Matheson and ASHIE *Journal of the Meteorological Society of Japan* 2008).

(1-6) 都市キャノピーモデルによる首都圏のヒートアイランド数値シミュレーション

首都圏を対象にして都市キャノピーモデルによる数値シミュレーションを実施する。本研究では、都市キャノピーモデルについては、筆者らが開発した都市気候予測システム(UCSS: Urban Climate Simulation System)を使用する。解析領域は、関東エリアを中心とした東西約1,000km, 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四方である(図4.4.24)。本研究では、Grid2において都市キャノピー幾何情報と人工排熱を考える。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ノピー幾何情報を算出する。人工排熱は、建物、車、工場からの顕熱および潜熱の24時間値を推計し、地理的配置状況に即して当該メッシュに設定した。

解析対象日は2006年8月4日である。都市キャノピーモデルを含まない従来モデルと都市キャノピーモデルを用いて、同日を対象にして数値解析を行い、得られた計算結果をアメダス観測と比較する。数値モデルの呼称は、都市キャノピーモデル無をLOCALS, 都市キャノピーモデル有をLOCALS-UCSSとする。

図4.4.25にAMeDAS観測(東京)と計算結果の比較を示す。気温については、LOCALSの計算結果がAMeDAS観測値より概ね低く現れている。一方、LOCALS-UCSSの場合は、AMeDASと日変動および平均温度のレベルが良く合致している。風速の計算値はLOCALS-UCSSの場合、AMeDAS観測値とある程度符合する。図には示さないが、風速に関しては都市キャノピーモデルの有無による違いは小さい。気温に関してはUCSSを組み込むことによって、LOCALSと比較してよりAMeDAS観測値に近い結果が得られた。例えば9箇所のAMeDAS観測地点(東京、練馬、熊谷、府中、久喜、さいたま、八王子、青梅、海老名)を対象にした場合、UCSSの組み込みにより気温のRMS誤差は2.6℃から1.2℃に縮減する。

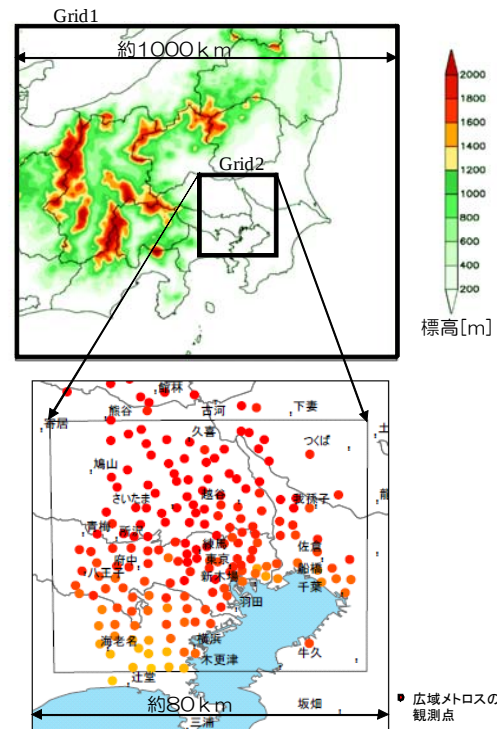


図 4.4.24 2 階層ネスティングによる解析領域。Grid2 に都市キャノピーモデルを適用しており、メソスケールモデルと連成している。Grid1 の背景に標高を示している。Grid2 には広域メトロスの気温観測点を記載している。

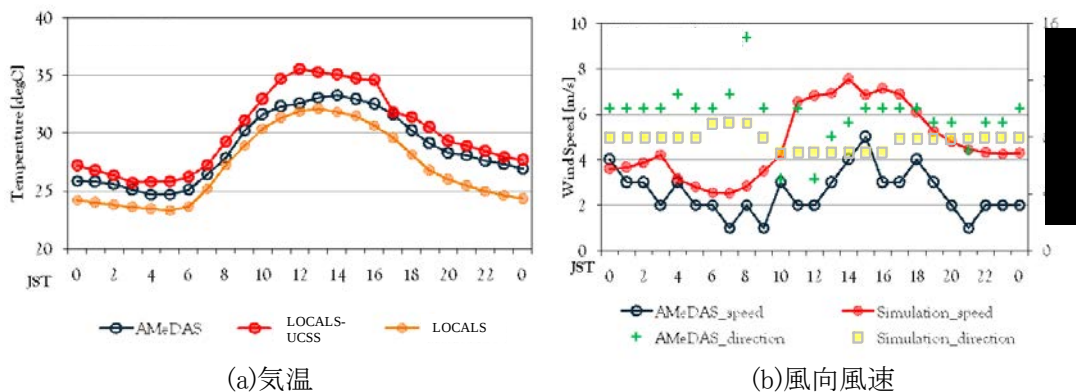


図 4.4.25 AMeDAS 観測(東京)と計算結果の比較。2006 年 8 月 4 日。

次に、気温分布に関する検討結果を述べる。広域 METROS とは、複数の大学機関(研究代表：三上岳彦教授)が 2006 年 5 月から共同で実施している首都圏の気温観測網の名称であり、計測地点は約 200 地点である。広域 METROS では小学校の百葉箱を利用した気温計測が行われており、首都圏の詳細な気温分布が得られている。図 4.4.26 は LOCALS-UCSS の計算結果と広域 METROS による観測結果を比較したものである(14 時)。気温分布は領域内の平均気温に対する偏差で表示している。相模地域および京葉地域の沿岸部の気温が低く、相対的に東京・埼玉の都県境から北西部にかけて気温が高くなる。数値計算では埼玉地域において風が収束しており、このような気温場を形成する1つの要因と考えられる。

図 4.4.27 は同日の 18 時における比較である。この時間帯では全体的に南風が卓越しており、

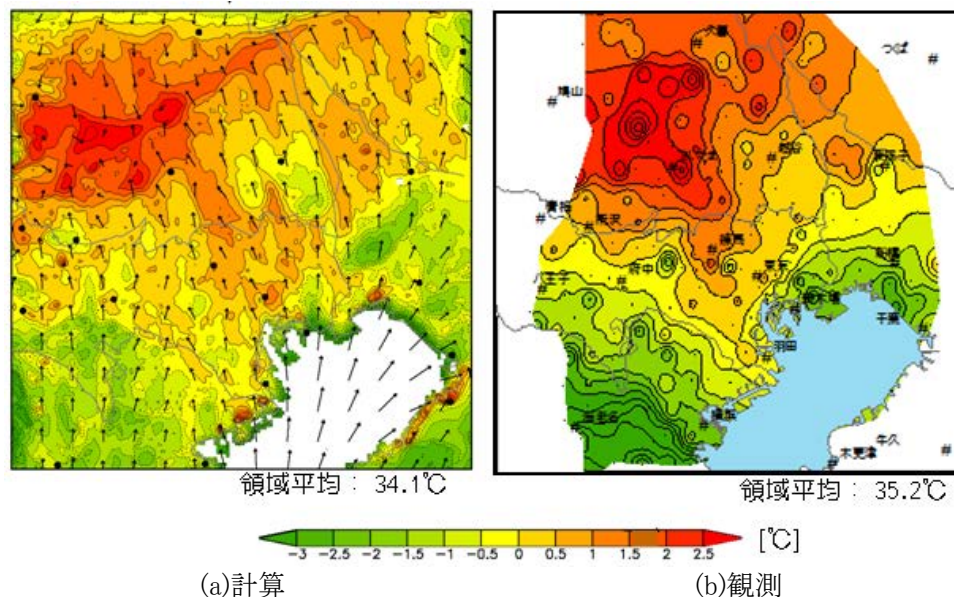


図 4.4.26 広域メトロス観測と計算結果の比較. 2006 年 8 月 4 日 14 時における気温偏差(その場所の気温－領域平均気温)の分布

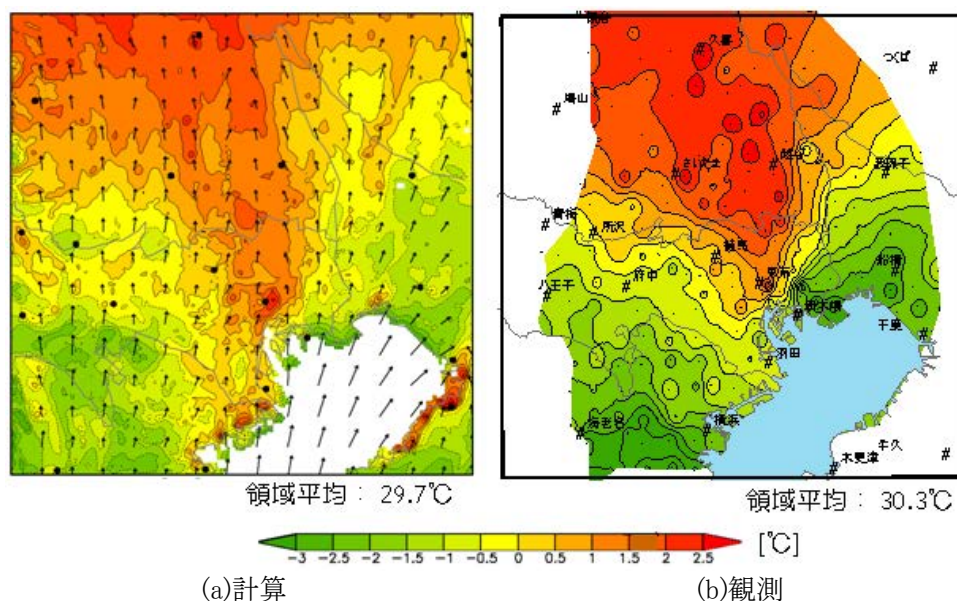


図 4.4.27 広域メトロス観測と計算結果の比較. 2006 年 8 月 4 日 18 時における気温偏差(その場所の気温－領域平均気温)の分布

風下側が高温になる。ただし、都心部の高温域は維持され、都心から風下の郊外に渡って V 字型の高温域が形成されていることが分かる。都市キャノピーモデルによる首都圏の数値シミュレーション結果は、広域メトロスの観測による気温分布の傾向を良く捉えている。以上の都市キャノピーモデルによる首都圏の数値シミュレーションに関する研究内容は、国際会議に発表した (HIRANO and ASHIE *Proc. of The 7th International Conference on Urban Climate* 2009)。

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究では、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ため、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、その熱的特性を検討した。そのために、空間平均の理論的背景を精査すると共に、風洞実験および数値シミュレーションを組み合わせた検討を行い、都市キャノピー層の気温、風速に関するパラメータ(空間偏差熱拡散係数、抗力係数等)を取得する手法を提案した。

実際の都市空間は建物配置による複雑な幾何形状を有しており、精密なアプローチとしては建築物を解像する CFD(数値流体力学)による方法が考えられる。しかし、都市スケールで計算を行うには、データ整備の労力と計算機のコスト面が制約になり、具体的作業の推進はとても大変である。建築物を解像する CFD がメソスケール解析の領域まで拡張されるのは、40～50 年先であると言われている(COST: European Cooperation in Science and Technology 2007)。したがって、都市キャノピーモデルを、この 10～20 年の間で完成させ、気象、気候の評価に研究蓄積が豊富なメソスケールモデルと連成させた検討を行うと、都市設計に反映しやすい。

本研究で実施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であり、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。近年は地球温暖化に伴う沿岸地域の環境条件の変化が指摘されており、それに伴い都市域への影響が考えられる。例えば海陸風の前線位置が地球規模の環境変化により今後変化すれば、その結果ヒートアイランドや降水の状況も影響を受けるからである。これらの問題は重要かつ新しい視点を提供するものであり、国際的観点からも我が国が率先して取り組むことにより、本研究成果と今後の展開は持続可能な社会構築における基幹技術として位置づけられる。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表(国内(和文)誌 24 件, 国際(欧文)誌 41 件)

〈欧文〉

1. Ashie, Y., Kono, T., Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area, *International Journal of Climatology*, **31-2**, 174-188 (2011)(DOI: 10.1002/joc.2226)
2. Akoh, R., Li, S. and Xiao, F., A multi-moment finite volume formulation for shallow water equations on unstructured mesh, *J. Comput. Phys.*, **229**, 4567-4590 (2010).
3. Fujita, A., Kurose, R. and Komori, S., Experimental study on effect of relative humidity on heat transfer of an evaporating water droplet in air flow, *Int. J. Multiphase Flow*, **36**, 244-247 (2010).
4. Komori, S., Kurose, R., Iwano, K., Ukai, T. and Suzuki, N., Direct numerical simulation of wind-driven turbulence and scalar transfer at sheared gas-liquid interfaces, *J. Turb.*, **11**, 1-20 (2010).
5. Kono, T., Ashie, Y. and Tamura, T., Mathematical derivation of spatially-averaged momentum equations for an urban canopy model using underlying concepts of the immersed boundary method, *Boundary-Layer Meteorol.*, **135**, 185-207 (2010a)
6. Kono, T., Tamura, T. and Ashie, Y., Numerical investigations of mean winds within canopies of regularly arrayed cubical buildings under neutral conditions, *Boundary-Layer Meteorol.*, **134**, 131-155 (2010b)
7. Li, S. and Xiao, F., A global shallow water model using high order multi-moment constrained

- finite volume method and icosahedral grid, *J. Comput. Phys.*, **229**, 1774–1796 (2010).
8. Onishi, R., Sugimura, T. and Takahashi, K., Condensation/evaporation calculation method for cloud droplets using the CIP-CSLR scheme, *J. Env. Eng.*, **5**, 1–14 (2010).
 9. Onishi, R., Matsuda, K., Takahashi, K., Kurose, R. and Komori, S., Linear and non-linear inversion schemes to retrieve collision kernel values from droplet size, *Int. J. Multiphase Flow*, **37**, 125–135 (2011).
 10. Onishi, R., Baba, Y. and Takahashi, K., Large-scale forcing with less communication in finite-difference simulations of stationary isotropic turbulence, *J. Comput. Phys.*, **230**, 4088–4099 (2011).
 11. Komori, S., Kurose, R., Ohstubo, S., Tanno, K. and Suzuki, N., Heat and mass transfer across the wavy sheared interface in wind-driven turbulence, *Proc. of 6th International symposium on turbulence and shear flow phenomena*, Seoul National University, Seoul, Korea, 399–407 (2009).
 12. Ii, S. and Xiao, F., High order multi-moment constrained finite volume method. Part I: Basic formulation, *J. Comput. Phys.*, **228**, 3669–3707 (2009).
 13. Onishi, R. and Takahashi, K., Impact of urban aerosols on convective precipitations, *The 7th International Conference on Urban Climate*, CD-ROM (2009).
 14. Onishi, R., Takahashi, K. and Komori, S., Influence of gravity on collisions of monodispersed droplets in homogeneous isotropic turbulence, *Phys. Fluids*, **21**, 125108 (2009).
 15. Takahashi, K., Multi-Scale Simulation in the Earth Simulator and its impacts, *Multiscale Phenomena in Biology*, *Proc. of the 2nd Conference on Mathematics and Biology*, Okinawa, Japan, 2008 (2009).
 16. Toda, K., Ogata, Y. and Yabe, T., Multi-dimensional conservative semi-Lagrangian method of characteristics CIP for the shallow water equations, *Journal of Computational Physics*, **228**, 4917–4944 (2009).
 17. Yabe, T. and Ogata, Y., Conservative Semi-Lagrangian CIP to the Shallow Water Equations, *Proceedings of 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems*(the FEF09), Tokyo, Japan (2009).
 18. Akoh, R., Ii, S. and Xiao, F., A CIP/multi-moment finite volume method for shallow water equations with source terms, *Int. J. Numer. Method in Fluid*, **56**, 2245–2270 (2008).
 19. Baba, Y. and Kurose, R., Analysis and flamelet modelling for spray combustion, *Journal of Fluid Mechanics*, **612**, 45–79 (2008).
 20. Baba, Y. and Kurose, R., Flamelet characteristics of geous and spray lifted flames on two-dimensional direct numerical simulations, *J. Fluid Sci. Tech.*, **3**, 864–856 (2008).
 21. Baba, Y., Takahashi, K., Sugimura, T., Goto, K., Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid, *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3988–4005 (2010).
 22. Baba, Y., Takahashi, K., Large-eddy simulation of convective boundary layer with density stratification, *J. Meteorol. Soc. Jpn*, **89**, 105–117 (2011).
 23. Chen, C. G. and Xiao, F., Shallow Water Model on Cubed-Sphere by Multi-moment Finite Volume Method, *J. Comput. Phys.*, **227**, 5019–5044 (2008).
 24. Kurose, R., Michioka, T., Kohno, N., Komori, S. and Baba, Y., Application of flamelet model to LES of turbulent reacting liquid flows, *AIChE J.*(doi:10.1002/aic.12328)(2010).
 25. Iida, M., Sugimura, T., Arakawa, C., Takahashi, K. and Kamio, T., Large-eddy simulation of wind for numerical site calibration technology, Phase I: basic study of numerical simulation on complex terrain, *Annual Report of the Earth Simulator Center*, 341–344 (2008).
 26. Li, X. L., Chen, D. H., Peng, X. D., Takahashi, K. and Xiao, F., A multi-moment finite volume shallow water model on Yin-Yang overset spherical grid, *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3066–3086 (2008).
 27. Matheson, M. A. and Ashie, Y., 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*, **86-5**, 733-751 (2008)
28. Onishi, R., Matsuda, K., Takahashi, K., Kurose, R. and Komori, S., Retrieval of Collision Kernels from the Change of Droplet Size Distributions with a Simple Inversion Scheme, *Physica Scripta*, **T132**, 014050 (2008).
 29. Yamashita, S., Chen, C. G., Takahashi, K. and Xiao, F., Large scale numerical simulations for multi-phase fluid dynamics with moving interfaces, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **22**, 405-410 (2008).
 30. Chen, C. G. and Xiao, F., The Implementation of the CIP-CSL3 scheme for implicit large-eddy simulation, *Computational Fluid Dynamics Journal*, **15**, 515-523 (2007).
 31. Li, S. and Xiao, F., CIP/multi-moment finite volume method for Euler equations, a semi-Lagrangian characteristic formulation, *J. Comput. Phys.*, **222**, 849-871 (2007).
 32. Komori, S., Takagaki, N., Saiki, R., Suzuki, N. and Tanno, K., The Effects of Raindrops on Interfacial Turbulence and Air-Water Gas Transfer, In *Transport at the Air Sea Interface-Measurements, Models and Parameterizations*, eds. C.S. Garbe, R.A. Handler and B. Jahne, 169-180, Springer Verlag (2007).
 33. Ohtsubo, S., Tanno, K. and Komori, S., Heat Transfer Across the Air-Water Interface in Wind-Driven Turbulence, *Advances in Turbulence*, **117**, 594-596 Porto, Portugal (2007).(doi:10.1007/978-3-540-72604-3_188)
 34. Takagaki, N. and Komori, S., Effects of Rainfall on Mass Transfer Across the Air-Water Interface, *J. Geophys. Res.*, **112**, C06006 (2007). (doi:10.1029/2006JC003752)
 35. Takahashi, K., Peng, X., Onishi, R., Ohdaira, M., Goto, K., Fuchigami, H. and Sugimura, T., Multiscale Simulator for the Geoenvironment: MSSG and Simulations, In *Use of High Performance Computing in Meteorology*, eds. George Mozdzynski, World Scientific, (2007).
 36. Toda, K., Ogata, Y. and Yabe, T., Multi-dimensional conservative semi-Lagrangian method of characteristics CIP for shallow water equations, *Proceedings of APCOM'07-EPMESC XI*, Kyoto, Japan (2007).
 37. Komori, S., Kurose, R., Ohtsubo, S., Tanno, K. and Suzuki, Y., Heat and mass transfer across the wavy sheared interface in wind-driven turbulence, Proc. of *The Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Seoul National University, Seoul, Korea, 399-407 (2009).
 38. Li, X, Chen, D., Peng, X., Xiao, F. and Chen, X, Implementation of the semi-Lagrangian advection scheme on a quasi-uniform overset grid on a sphere, *Advances in Atmospheric sciences*, **23**, 792-801 (2006).
 39. Onishi R., Takagi H., Takahashi K. and Komori S., Turbulence Effects on Cloud Droplet Collisions in Mesoscale Convective Clouds, *Turbulence, Heat and Mass Transfer* **5** (K. Hanjalic, Y. Nagano and S. Jakirlic editors), 709-712 (2006).
 40. Peng, X., Xiao, F. and Takahashi, K., Global conservation constraint for a quasi-uniform overset grid on sphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 979-996 (2006).
 41. Takahashi, K., Peng, X., Onishi, R., Ohdaira, M., Goto, K., Fuchigami, H., and Sugimura, T., Impact of coupled Non-hydrostatic Atmosphere-Ocean-land model with high resolution, In *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, eds. K. Hamilton et al., Springer, (2007).
 42. Xiao, F., Akoh, R. and Li, S., Unified formulation for compressible and incompressible flows by using multi integrated moments II: multi-dimensional version for compressible and incompressible flows, *J. Comput. Phys.*, **213**, 31-56 (2006).
 43. Xiao, F., Peng, X. and Shen, X., A finite volume grid using multi-moments for geostrophic adjustment, *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2515-2526 (2006).
 44. Takahashi, K., Peng, X., Komine, K., Ohdaira, M., Goto, K., Yamada, M., Fuchigami, H.,

Sugimura, T., Non-hydrostatic atmospheric GCM development and its computational performance, In *Use of High Performance Computing in Meteorology*, eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzynski., World Scientific, 50-62 (2005).

〈和文〉

45. 伊藤大輔, 武田仁, 藤本哲夫, 近藤靖史, 足永靖信, 高反射率塗料の屋外曝露による性能変化に関する研究, 日本建築学会技術報告集, **17-35**, 217-220(2011)
46. 河野孝昭, 足永靖信, 田村哲郎, Large-Eddy Simulation のフィルター操作に基づく都市キャノピーモデルのスカラー輸送方程式の導出, 日本ヒートアイランド学会論文集, **5**, 47-55 (2010)
47. 伊藤大輔, 武田仁, 足永靖信, 藤本哲夫, 既存の窓面を対象にした遮熱化技術の光学特性及び熱特性の調査と空調負荷削減効果に関する数値計算, 日本建築学会技術報告集, **16-32**, 185-190 (2010)
48. 鍵屋浩司, 足永靖信, 増田幸宏, 大橋征幹, 平野洪賓, 尾島俊雄, 大規模な都市再開発が熱環境に及ぼす効果・影響に関する実験的検討, 日本建築学会環境系論文集, **649**, 305-312 (2010)
49. 河野孝昭, 足永靖信, 田村哲郎, SGS 運動エネルギー方程式の導出と評価ーLES フィルター操作に基づく都市キャノピーモデルの構築(その1)ー, 日本建築学会環境系論文集, **648**, 227-236 (2010)
50. 小林武徳, 鶴飼健弘, 今城貴徳, 黒瀬良一, 小森悟, 風波気液界面近傍の乱流とスカラー輸送の直接数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, **76**, 520-527 (2010).
51. 山下晋, 肖鋒, 青木尊之, 高橋桂子, CIP 有限体積法による風波シミュレーション, ながれ, **29**, 277-286(2010).
52. 飯田誠, 宮川圭介, 荒川忠一, 杉村剛, 高橋桂子, 数値サイトキャリブレーションにおける方位区分に関する研究, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, **B43**, pp.284-287 (2009).
53. 飯田誠, 宮川圭介, 神尾武史, 荒川忠一, 杉村剛, 高橋桂子, 複雑地形 CFD における地形解像度に関する考察, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, **B43**, pp.296-299 (2009).
54. 伊藤大輔, 足永靖信, 都市形状の分光アルベドに関するスケールモデル実験と数値計算, 日本建築学会環境系論文集, **641**, 863-868 (2009)
55. 赤穂良輔, 伊井仁志, 肖鋒, 三角形非構造格子における CIP/Multi-Moment 有限体積法による浅水波方程式の数値モデル, 日本計算工学会誌, Paper No.20080013 (2008).
56. 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, **634**, 417-423 (2008)
57. 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, **14-28**, 487-490 (2008)
58. 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, **74**, 2443-2451(2008).
59. 肖鋒, 伊井仁志, 計算流体力学における CIP/Multi-Moment 有限体積法, 応用数理, **18**, 21-31(2008).
60. 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, 日本機械学会論文集 B 編, **74**, 414-422 (2008).
61. 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, **616**, 67-74 (2007)
62. 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ー, 日本建築学会環境系論文集, **614**, 65-70 (2007)
63. 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, 日本機械学会論

文集 B 編, **73**, 1307-1314 (2007)

64. 杉村剛, 高橋桂子, 坂上仁志, Voronoi Reduced Grid の開発と球面浅水波による実験, 日本計算工学会誌, Paper No.20070003 (2007).
65. 足永靖信, 東海林孝幸, 東京 23 区の用途毎建物高さの集計ー航空機レーザー計測データを活用した場合ー, 空気調和・衛生工学会論文集, **115**, 51-54 (2006)
66. 大西領, 高橋桂子, 小森悟, 乱流中での粒子の衝突成長に対する Large-Eddy Simulation, 日本機械学会論文集 B 編, **72**, 2441-2448 (2006).
67. 杉村剛, 高橋桂子, 坂上仁志, 重合格子法における数値誤差の発生とその解消法, ながれ, **25**, 247-256(2006).
68. 足永靖信, 阿部敏雄, 建物キャノピー内およびその上空を対象にしたシュリーレン法による気温分布の定量化, 日本建築学会環境系論文集, **596**, 103-108 (2005)

(2)その他の著作物(総説, 書籍など)

<欧文>

1. Ashie, Y., Urban environment management and technology, In *cSUR-UT Series: Library for sustainable urban regeneration Volume 1*, 215-238, Springer (2008)
2. Akoh, R., Ii, S. and Xiao, F., Development of High Performance Simulator for Tsunami, in *Systems modeling and simulation*, eds. Koyamada, K. et al., 29-33, Springer (2006).
3. Ii, S., Xiao, F. and Ono, K., The Fluid-Structure Interacting Simulations with the Immersed Interface Method on a Cartesian Grid, in *Systems modeling and simulation*, eds. Koyamada, K. et al., 118-122, Springer (2006).

<和文>

4. 足永靖信, 都市におけるエネルギーと熱のマネジメント, シリーズ土木工学選書: 地域環境システム, 52-66, 朝倉書店(2011)
5. 足永靖信, 都市建築空間の広域熱環境解析における工学モデルの適用, ながれ, **29-1**, 15-20 (2010)
6. 高橋桂子, 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, RIST NEWS (2010).
7. 足永靖信, 低炭素まちづくりに向けた研究, 都市環境エネルギー, **94**, 8-11 (2009)
8. 足永靖信, ヒートアイランド緩和と建築都市, 建築の研究, **194**, 15-18 (2009)
9. 足永靖信, ヒートアイランドのない街へー数値シミュレーション技術の活用事例ー, ベース設計資料 建築編 前, **141**, 49-52 (2009)
10. 足永靖信, 平野洪賓, 都心部ケーススタディー, 環境浄化技術, **8-2**, 24-28 (2009)
11. 肖鋒, 伊井仁志, 小野寺直幸, 計算流体力学, コロナ社(2009).
12. 肖鋒, 赤穂良輔, 山下晋(分担), 計算力学シミュレーションハンドブックー超ペタスケールコンピューティングの描像, 丸善(2009).
13. 高垣直尚, 小森悟, 鈴木直弥, 大気・海洋間の CO2 移動に及ぼす降雨の影響, 日本海水学会誌, **63**, 231-236 (2009).
14. 高橋桂子, 地球シミュレータによる大規模シミュレーション, 大規模シミュレーションの現状と課題・将来展望, 化学工学誌 5 月号 (2009).
15. 高橋桂子, 気象・気候変動予測シームレスシミュレーション, 『東京大学情報基盤センタースーパーコンピューティングニュース』特集号 (2009).
16. 大西領, 高橋桂子, 小森悟, 雲シミュレーションにおける混相流計算の高度化(豪雨予測の高度化を目指して), 混相流, **23**, 276-283 (2009).
17. 足永靖信, 第2回全国大会 行政セッション, 日本ヒートアイランド学会誌, **3**, 55-56 (2008)
18. 足永靖信, 平野洪賓, 都心再開発とヒートアイランド緩和, えびすくら, **42** (2008)
19. 足永靖信, 都市のヒートアイランド現象と「風の道」, 中学校 社会科のしおり, 7 月号, **12** (2008)

20. 足永靖信, 都市のヒートアイランド現象と「風の道」, 現代社会へのとびら, 1 学期号(2008)
21. 足永靖信, 建築研究所におけるヒートアイランドの研究, 建築の研究, **183**, 5-9 (2007)
22. 足永靖信, 都市環境の数値解析, 伝熱, **46-197**, 12-18 (2007)
23. 足永靖信, 都市空間における熱環境とみどり, 都市緑化技術, **66**, 6-9 (2007)
24. 足永靖信, ヒートアイランド対策へのスーパーコンピュータ利用の展望, 日本ヒートアイランド学会誌, **2**, 10-14 (2007)
25. 大西領, 高橋桂子, 松田景吾, 小森悟, 微小液滴の乱流衝突成長に対する Large-Eddy Simulation, 数理解析研究所講究録, **1567**, 31-39 (2007).
26. 足永靖信, 今後の展開に向けて－セッション 11 からの報告－, IBEC, **157**, 48-51 (2006)
27. 足永靖信, ヒートアイランド対策の現状と研究の視点, 日本ヒートアイランド学会設立記念特集号, 12-17 (2006)
28. 足永靖信, 阿部敏雄, シュリーレン法による建物周辺気流の可視化, 可視化情報, **26-102**, 187-192 (2006)
29. 足永靖信, 河野孝昭, 汐留の再開発に伴う周辺環境の変化, 日本風工学会誌, **31-2**, 115-120 (2006)
30. 高橋桂子, 彭新東, 大平満, 大西領, 杉村剛, 地球シミュレータ上で目指すマルチスケール・マルチフィジックス気象・気候シミュレーション, 応用数理, **16**, 6-18 (2006).

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 42 件, 国際会議 27 件)

<国際会議>

1. Takahashi, K., Multi-scale Multi-physics approaches for forecasting weather and climate variability, Korean Meteorological Agency, December 2010.
2. Takahashi, K., Computing of MSSG and its Physical Performance, Korean Ocean Research and Development Institute, December 2010.
3. Takahashi, K., Multi-scale Multi-physics approaches for forecasting weather and climate variability, Research Seminar, Laboratory for Scientific Computing, Cambridge University, November 2010.
4. Takahashi, K., Global Control, SICE Annual Conference 2010 @Taipei, August (2010)
5. Takahashi, K., Multi-scale multi-physics seamless simulation for weather and climate prediction, *2nd German-Japan Computational Mechanics Workshop*, Yokohama, March (2010).
6. Takahashi, K., High performance computation of MSSG implemented adaptive mesh refinement grid system, *Climate 12 Special Meeting*, Tsukuba, March (2010).
7. Xiao, F., Li, S. and Chen, C. G. (keynote), Multi-moment high order schemes for CFD, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM/APCOM 2010), Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
8. Xiao, F., A conservative projection method for all Mach flows using multi-moment formulation, International Workshop on Innovative Computations on Incompressible Flow, CMMSC, National Chiao Tung University, Taiwan, May 17, 2010.
9. Suzuki N., Toba Y., Komori S., Examination of drag coefficient with special reference to the windsea Reynolds number: Conditions with counter and mixed swell, *Journal of Oceanography*, **66**(5), 731-739 (2010)
10. Ashie, Y., Application of the Earth Simulator to a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area, *The 7th International Conference on Urban Climate*, PACIFICO Yokohama, Yokohama, Japan (2009).
11. Ashie, Y., Urban climatology application in Japan, *Development of Eco-City construction based on energy saving and resource recycling techniques*, Ubiquitous & Ecology City R&D Center, Pusan, Korea (2009).

12. Ashie, Y., Research on urban planning with consideration to climate –Application of the Tokyo thermal environmental Map–, *CHUK Interdisciplinary Architectural Postgraduate Workshop 2009*, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (2009).
13. Ashie, Y., Seminar on Urban Climatology Application in Japan, *Professional Green Building Council Technical Seminar*, The Hong Kong Institute of Architects, Hong Kong, China (2009).
14. Ashie, Y., Urban heat island and mitigation technology, *Conference on Engineers' Responses to Climate Change*, The Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, China (2009).
15. Komori, S., Kurose, R., Ohstubo, S., Tanno, K. and Suzuki N. (Kyoto Univ.) (Invited Lecture), Heat and mass transfer across the wavy sheared interface in wind-driven turbulence, *6th International symposium on turbulence and shear flow phenomena*, June 22–24, 2009, Seoul national university, Seoul, Korea.
16. Takahashi, K., Ultra-high resolution climate model development for societal applications using the Earth Simulator, *Symposium on Climate Variations in Southern Africa and Roles of Subtropical Oceans*, Tokyo, 3rd Dec (2009).
17. Yabe, T. and Ogata, Y., Conservative Semi-Lagrangian CIP to the Shallow Water Equations, Computational Mechanics, the 15th international Conference on Finite Element in Flow Problems, Tokyo, Japan, April 1–3, 2009.
18. Ashie, Y., Hirano, K., Kono, T., Large-scale CFD simulation of heat island phenomenon in Tokyo's 23 wards using the earth simulator, *5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology*, Albert-Ludwig University of Freiburg, Freiburg, Germany, (2008).
19. Takahashi, K., Seamless Simulations in Climate Variability and HPC, *9th Teraflop Workshop*, Sendai, 12–13 Nov. (2008).
20. Takahashi, K., Multi-scale Simulations on the ES and its Impacts, *2nd Okinawa Conference on Mathematics and Biology*, Okinawa, 4–6 Nov. (2008).
21. Takahashi, K., Peng, X., Onishi, R., Sugimura, T. and Ohdaira, M., Introduction of our activities on high-order numerical methods for coupled atmosphere-ocean model on the sphere, *Workshop on Mathematical Model and Numerical Simulation of Environmental Problems*, Trent Univ., Italy, 5th November (2007).
22. Takahashi, K., Ohdaira, M., Onishi, R. and Sugimura, T., Toward Forecasting and Understanding the Mechanisms of Extremes in Urban Area, *Seventh Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction and Processes joint with the Seventh Symposium on the Urban Environment*, San Diego, USA, 10–13 September (2007).
23. Takahashi, K., Challenging to the Weather and Climate Forecast Simulation with Dynamic Adaptive Model, *World Science Fiction Convention 2007*, Yokohama, 31st Aug. (2007).
24. Xiao, F., Li, S., Chen, C. G., Akoh, R. and Yamashita, S. (keynote), Development of Numerical Models for Geophysical Flows by Multi-moment Finite Volume Method, APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
25. Komori, S. (Kyoto Univ.) (Keynote Lecture), Gas Transfer and Turbulence at the Air-Water Interface, *2006 AIChE Annual Meeting*, November 12–17, 2006, San Francisco, CA U.S.A.
26. Takahashi, K., Earth Simulation on the Earth Simulator, *The Interacademy Panel on International Issues*, Alexandria, Egypt, 1–6, December (2006).
27. Xiao, F. (keynote), Numerical simulations for multi-scale interfacial flows using CIP/Multi-moment finite volume method, WCCM-7, Los Angeles, USA, July 16–22, 2006.

<国内会議>

28. 高橋桂子, スパコン地球シミュレータで紐解く地球環境の変化と変動, シンポジウム「環太平洋の海洋問題」, 横浜国立大学統合的海洋教育・研究センター, 横浜市開港記念会館, 横浜市 2010 年 11 月 29 日.
29. 足永靖信, 広域 CFD 解析手法の開発と都市開発事例への適用, 第 43 回建築設備技術会議,

- 建築設備技術者協会・日本能率協会, 東京, 2010 年 11 月 17 日.
30. 高橋桂子, 気象・気候変動予測の最前線, 日本学術会議科学と社会委員会・サイエンスカフェ, 東京, 2010 年 9 月 17 日.
 31. 高橋桂子, 気象災害予測のためのシミュレーションの最前線, 市民講座・日本技術士会北海道支部防災委員会, 2010 年 9 月 6 日.
 32. 足永靖信, ヒートアイランドとシミュレーション, 第 17 回スーパーコンピューティング・セミナー, スーパーコンピューティング技術産業応用協議会, 東京, 2010 年 6 月 17 日.
 33. 足永靖信, スマートメガシティの構築に向けた環境共生技術の研究ー都市のヒートアイランド対策, 水素活用社会など環境とエネルギーの基幹技術の取り組みと今後の課題ー, 第 44 回空気調和・冷凍連合講演会, 空気調和衛生工学会・日本冷凍空調学会・日本機械学会, 東京, 2010 年 4 月 22 日.
 34. 高橋桂子, スパコンが拓く地球環境予測と私たちの新しいつながり, 「次世代スパコンってなあに?」神戸市市民セミナー, 神戸市, 2010 年 2 月.
 35. 高橋桂子, 大気海洋結合モデルにおけるコンポーネントの特徴と超高速計算, 第2回第 2 回マルチスケール・マルフィジックスの数理検討小委員会(日本学術会議), 東京, 2010 年 2 月.
 36. 足永靖信, 低炭素型社会での持続可能な都市空間実現に向けた取り組み, 文化財の保存環境を考慮した博物館の省エネ化, 東京文化財研究所, 東京, 2009 年 12 月 8 日.
 37. 足永靖信, ヒートアイランド対策と低炭素都市づくり, 都市環境セミナー, 都市機構, 横浜, 2009 年 10 月 16 日.
 38. 足永靖信, ヒートアイランド対策と省 CO2 等効果, 2009 年度日本建築学会(東北)地球環境部門パネルディスカッションー低炭素社会とヒートアイランドー, 日本建築学会, 仙台, 2009 年 8 月.
 39. 足永靖信, 都市環境分野, 009 年度日本建築学会(東北)環境工学部門研究懇談会ー建築環境のシミュレーション技術と将来展望ー, 日本建築学会, 仙台, 2009 年 8 月.
 40. 足永靖信, ヒートアイランド対策技術の現状と今後, 2008 年度第3回事例研究会ー「ヒートアイランド」を持続可能な「スマート・メガシティ」に改造ー, グリーンフォーラム 21, 東京, 2009 年 2 月 10 日.
 41. 鍵屋浩司, 足永靖信, 環境モデル都市構築に向けた行政の取り組み事例, 仙台の気候・自然とそれを活かしたまちづくりー杜の都まちづくり広場 2009 ワークショップー, 仙台, 2009 年 2 月 18 日.
 42. 高橋桂子, 安全・安心のための気候変動予測と緩和・適応にむけた予測シミュレーション, 東洋大学・読売新聞連続国際シンポジウム, 東京, 2009 年 6 月.
 43. 足永靖信, ヒートアイランドと都市の環境管理, 日本冷凍空調学会年次大会, 大阪, 2008 年 10 月 21 日.
 44. 足永靖信, 都市再生とヒートアイランド対策, 日本気象学会 2008 年度春季大会専門分科会「持続可能で安全な都市環境への気象研究の役割」, 日本気象学会, 横浜, 2008 年 5 月 21 日.
 45. 足永靖信, 都市域のヒートアイランド対策と最先端シミュレーション技術について, UR都市機構講演会, 都市機構, 東京, 2008 年 2 月 6 日.
 46. 高橋桂子, 気象・気候変動予測のための超大規模シミュレーションとこれから, 東京大学物理 G-COE 計算物理・化学研究連絡会, 東京大学, 2008 年 10 月.
 47. 高橋桂子, 「都市の微気象シミュレーションー東京のヒートアイランド緩和と風の道のデザインにむけてー」, 第 10 会地球大学アドバンス, 東京, 2008 年 9 月.
 48. 高橋桂子, これからの気象予測と気候変動予測, 日本学術会議第 27 回混層流シンポジウム, 会津, 2008 年 8 月.
 49. 高橋桂子, これからの気象予測と気候変動予測ー何を指すか何ができるかー, レーザー核融合研究所, 大阪, 2008 年 7 月.
 50. 高橋桂子, 気象・気候変動予測の超大規模シミュレーションと初期値データ制御, 計測自動制御学会制御技術部会研究会, 東京, 2008 年 6 月.

51. 高橋桂子, シミュレーション科学と 21 世紀社会へのインパクト, 工学部システム創成学科特別講演, 東京大学, 2008 年 4 月.
52. 高橋桂子, 近未来の気象・気候予測—よりよい都市環境を目指して—, 杉並ロータリクラブ月例講演, 東京, 2008 年 4 月.
53. 足永靖信, 「風の道に配慮した都市計画」簡易シミュレーションソフト(パソコンプログラム)を利用した解説と説明, 平成 19 年度自治体職員研修「都市のヒートアイランド」, 財団法人特別区協議会, 東京, 2007 年 8 月 27 日.
54. 足永靖信, ヒートアイランド対策技術の現状と今後の課題, クールシティ 2007, 環境省, 東京, 2007 年 7 月 27 日.
55. 足永靖信, ヒートアイランド数値解析における入力データ整備について, 日本リモートセンシング学会ヒートアイランドシンポジウム, 日本リモートセンシング学会, 東京, 2007 年 1 月 30 日.
56. 高橋桂子, スーパーコンピューティングの展望-明日へのメッセージ-, 次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2007, 東京, 2007 年 10 月.
57. 高橋桂子, 気象予測・気候変動予測におけるシミュレーション科学最前線, 第 17 回国際土岐コンファレンス市民学術講座, 土岐市, 2007 年 10 月.
58. 高橋桂子, 会津地域を対象とした気象シミュレーションの可能性について, 地球シミュレータフォーラム, 会津, 2007 年 7 月.
59. 高橋桂子, 地球シミュレータ上での超大規模シミュレーション予測, 第 11 回 CAE 懇話会, 名古屋, 2007 年 6 月.
60. 足永靖信, ヒートアイランド対策の効果を知ら—スーパーコンピュータによる解析建物から都市・地域まで—, 日本ヒートアイランド学会第 9 回イブニングセミナー, 日本ヒートアイランド学会, 東京, 2006 年 11 月 22 日.
61. 足永靖信, 都市の熱環境から見た都市緑化のあるべき姿, 公開シンポジウム「魅力的都市構築のための都市・屋上緑化」, 日本学術会議農学基礎委員会農業と環境分科会・農業生産環境工学分科会, 東京, 2006 年 11 月 9 日.
62. 足永靖信, 都市のヒートアイランド現象と地域対策, 財団法人国有財産管理センター講演会, 国有財産管理センター, 東京, 2006 年 11 月 9 日.
63. 足永靖信, 都心のヒートアイランド現象について, 第 120 回講演会, 土地総合研究所, 東京, 2006 年 10 月 31 日.
64. 足永靖信, 地球シミュレータを用いた東京臨海部における環境の予測, 第 15 回空気シンポジウム「都市空間の換気・通風と風の道」, 横浜, 2006 年 9 月 6 日.
65. 高橋桂子, マルチスケール・マルチフィジックス気象気候シミュレーションのいまとこれから, 第 20 回数値流体力学シンポジウム特別講演, 名古屋大学, 2006 年 12 月 18-20 日.
66. 高橋桂子, 災害予測シミュレーションの高度化, CREST 第 18 年度公開シンポジウム, 東洋大学, 2006 年 11 月 20-21 日.
67. 高橋桂子, ローカル気象予測への挑戦, 第 5 回地球シミュレータセンターシンポジウム, 女性と仕事の未来館, 2006 年 9 月 22 日.
68. 高橋桂子, 台風のサイエンス, 第 20 回『地球大学』シリーズ地球災害第 4 回, 2006 年 9 月 20 日大手町カフェ.
69. 高橋桂子, シミュレーションとしての台風予測, 第 9 回東京事務所セミナー, JAMSTEC 東京連絡所, 2006 年 8 月 25 日.

② 口頭発表 (国内会議 101 件, 国際会議 65 件)

<国際会議>

1. Baba, Y. and Takahashi, K., Ultra high resolution and high performance simulation of compressible atmospheric flows over urban area, *14th SIAM Conference on Parallel Processing and Scientific Computing*, Seattle, Washington, 26th Feb. (2010).
2. Baba, Y. and Takahashi, K., Ultra high resolution and high performance simulation of compressible atmospheric flows over urban area, *14th SIAM Conference on Parallel Processing*

- and Scientific Computing*, Seattle, Washington, 2/26 (2010).
3. Onishi, R., Takahashi, K. (JAMSTEC,•ESC), and Komori, S. (Kyoto Univ.), High-Resolution Simulations for Turbulent Clouds Developing over the Ocean, *The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces*, May 17-21, 2010, Kyoto.
 4. Sugimura, T., Takahashi, K. and Yabe, T., Development of non-splitting semi-lagrangian scheme for fully compressible flow on global soroban grid, The Joint International Conference of the 7th Supercomputing in Nuclear Application and the 3rd Monte Carlo (SNA + MC2010), Tokyo, Japan, Oct.17-21, 2010.
 5. Sugimura, T., Takahashi, K. and Iida, M., Numerical wind power prediction and site calibration on complex topography using the MSSG-A, Renewable Energy 2010, Yokohama, Japan, June 27-July 2, 2010.
 6. Takahashi, K., High performance computing of MSSG and its physical performance, Fourteenth Workshop on Use of High Performance Computing in Meteorology, ECMWF, UK, 1-5 November 2010.
 7. Takahashi, K., Seamless Simulations for Forecasting of Weather/Climate and High Performance Computing, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC2010), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, 19 October, 2010.
 8. Takahashi, K., Impacts of Atmosphere-Ocean Coupled Interaction in Typhoon Simulations on the Earth Simulator, The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, Kyoto, Japan, 19 May, 2010.
 9. Takahashi, K., Ultra-high resolution climate model development for societal applications using the Earth Simulator, Japan Geoscience Union Meeting 2010, Makuhari, Japan, 23-28 May 2010.
 10. Xiao, F., Yamashita, S. Chen, C. G., Aoki, T. and Takahashi, K. One-Fluid Unified Numerical Simulations of Turbulent Structures and Transport Processes over Air/Water Interfaces, The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, Kyoto, Japan, May 17-21, 2010.
 11. Xiao, F., Yamashita, S., Chen, C. G. and Takahashi, K., Large scale simulations of interfacial multi-fluid flows, The Joint International Conference of the 7th Supercomputing in Nuclear Application and the 3rd Monte Carlo (SNA + MC2010), Tokyo, Japan, Oct.17-21, 2010.
 12. Xiao, F., Yamashita, S., Aoki, T. and Takahashi, T., Turbulent mass transport over wind-waves by parallel numerical simulations, The Joint International Conference of the 7th Supercomputing in Nuclear Application and the 3rd Monte Carlo (SNA + MC2010), Tokyo, Japan, Oct.17-21, 2010.
 13. Ashie, Y. and Itoh, D., Study on the characteristics of solar radiation in the geometrically complex urban spaces by using a spectroradiometer, Proc. of 2nd International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA (2009).
 14. Baba, Y. and Takahashi, K., High performance scheme and characteristics for fully compressible flows resolving buildings in urban area, *The 7th International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, 29.June-3.July (2009).
 15. Baba, Y. and Takahashi, K., High performance fully compressible scheme for atmospheric flows over real urban area, *6th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer 6 (THMT'09)*, Roma, Italy, 17th Sep. (2009).
 16. Hirano, K. and Ashie, Y., Comprehensive Analysis of Urban Effects on Local Climate in Tokyo Metropolitan Region Using an Urban Mesoscale Numerical Model, Proc. of The 7th International Conference on Urban Climate, PACIFICO Yokohama, Yokohama, Japan (2009).
 17. Kagiya, K. and Ashie, Y., National Research Project on Kaze-no-michi for City Planning:

- Creation of Ventilation Paths of Cool Sea Breeze in Tokyo, Proc. of 2nd International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA (2009).
18. Kida, S. and Takahashi, K., The impact of open ocean circulation on marginal sea overflows, *ESC-IPRC workshop*, Dec. (2009).
 19. Kida, S. and Takahashi, K., The role of the Indonesian Season tropical climate, *APL workshop*, Dec, (2009).
 20. Kida, S. and Richards, K. J., Seasonal Sea Surface Temperature variability in the Indonesian Seas. *15th Pacific-Asian Marginal Sea Meeting*, May, (2009).
 21. Onishi, R., Sugimura, T. and Takahashi, K. (JAMSTEC•ESC), CIP-CSLR scheme for condensation and evaporation calculations in spectral-bin cloud microphysics, *15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems*, April 2, 2009, Tokyo.
 22. Onishi, R. and Takahashi, K. (JAMSTEC•ESC), Impact of urban aerosols on convective precipitations, *The 7th International Conference on Urban Climate*, July 2, 2009, Yokohama.
 23. Sugimura, T., Takahashi, K. and Iida, M., Numerical wind analysis on complex topography using multiscale simulation model, *The 7th International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, June 29–July 3, 2009.
 24. Sugimura, T., Takahashi, K. and Yabe, T., Global fluid simulation for fully compressible fluid using adaptive Soroban grid, *The 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems*, Tokyo Japan, April 1–3, 2009.
 25. Takahashi, K., Baba, Y., Onishi, R. and Sugimura, T., Ultra-high resolution and non-stationary simulation to understand heat storage mechanism in urban area, *The 7th International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, 29.June–3.July (2009).
 26. Takahashi, K., Baba, Y., Onishi, R., Sugimura, T., Modeling of Urban Canyon with Three Dimensional radiation and its Impact to Urban Weather, *89th American Meteorological Society Annual Conference*, Phenix, Arizona (USA), 11–15 January 2009.
 27. Yamashita, S., Xiao, F. and Takahashi, K., Large-eddy simulation of wind-driven surface waves, 15th international Conference on Finite Element in Flow Problems, Tokyo, Japan, April 1–3, 2009.
 28. Watanabe, H., Tanno, K., Baba, Y., Kurose, R., Komori, S., Large-eddy simulation of coal combustion in a pulverized coal combustion furnace with a complex burner, *6th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer 6 (THMT'09)*, Roma, Italy,.1027–1030 (2009).
 29. Akoh, R., Xiao, F. and Ii, S., Development Of Tsunami Simulator On Unstructured Mesh Using CIP/Multi-Moment Finite Volume Formulation, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2008), Boston, USA, Oct.31–Nov.6, 2008.
 30. Akoh, R., Ii, S. and Xiao, F., Development of Tsunami Simulator on Unstructured Grid by Multi-Moment Finite Volume Method, 2nd Int'l Workshop on Numerical Simulation for Disastrous Phenomena, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, Jan. 11, 2008.
 31. Sugimura, T. and Takahashi, K., Atmospheric flow simulation including the convective effect over complex terrain, The 3rd SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, Atlanta, USA, 12–14 Mar. 2008.
 32. Takahashi, K., Goto, K. and Fuchigami, H., Multi-scale simulation for the Geoenvironment (MSSG) with dynamic adaptive mesh refinement, *13th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing*, Atlanta, USA, 12–14 Mar. (2008).
 33. Xiao, F., Development of Numerical Models for Environmental Flows by Multi-moment Finite Volume Method, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2008), Boston, USA, Oct.31–Nov.6, 2008.
 34. Yamashita, S., Takahashi, K. and Xiao, F., Large-scale simulations for multi- phase

- environmental flows, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2008), Boston, USA, Oct.31–Nov.6, 2008.
35. Yamashita, S., Xiao, F. and Takahashi, K., Large Scale Numerical Simulation of Air/Water Interfacial Flows, Society for Industrial and Applied Mathematics(SIAM) conference “ Parallel Processing for Scientific Computing”, Atlanta, Georgia, USA, Mar.12–14, 2008.
 36. Akoh, R., Ii, S. and Xiao, F., Development of Tsunami Simulator on Unstructured Grid by Multi-Moment Finite Volume Method, APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
 37. Chen, C. G. and Xiao, F., A global shallow water model on the spherical-cubic grid by using CIP/multi-moment FVM, International Symposium on Computational Mechanics, Beijing, China, July 30–Aug. 1, 2007.
 38. Cho, K., Ashie, Y. and Kono, T., Thermal environmental effect of route 2 ring road project by numerical simulation with over 400 million meshes, Proc. of APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan (2007).
 39. Hu, C. H., Kashiwagi, M. and Xiao, F., 3D numerical simulation of violent sloshing by conservative CIP method, International conference on violent flows, Fukuoka, Japan, Nov. 25–27, 2007.
 40. Ii, S. and Xiao, F., High-Order Multi-Moment Constrained Finite Volume Method on Unstructured Mesh, APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
 41. Kono, T., Ashie, Y. and Tamura, T., Large eddy simulation of airflow around regular arrays of cubical buildings, Proc. of APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan (2007).
 42. Ohtsubo, S., Tanno, K. and Komori, S. (Kyoto Univ.), Heat Transfer Across the Air–Water Interface in Wind-Driven Turbulence, *the 11th EUROMECH European Turbulence Conference*, June 25–28, 2007, Porto, Portugal.
 43. Onodera, N. and Xiao, F., Free Interface capturing scheme on unstructured grid, APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
 44. Peng, X. D., Takahashi, K. and Xiao, F., Application of Flexible Numerical Techniques into a Non-hydrostatic Model on Yin–Yang Grid, APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
 45. Peng, X. and Takahashi, K., A non-hydrostatic global model and the multi-scale simulation of server storms, *IUGG 2007*, Perugia, Italy, July 2–13 (2007).
 46. Shen, X. S., Wang, M. H. and Xiao, F., Application of a high-order positive-definite advection scheme in the GRAPES model, APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
 47. Sugimura, T., Iida, M. and Takahashi, K., Numerical wind analysis on complex terrain using the MSSG–A, APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3–6, 2007.
 48. Takahashi, K., Peng, X., Onishi, R., Sugimura, T. and Ohdaira, M., Multi-scale interactions between atmosphere and ocean in high resolution simulations of typhoons, *APCOM’07–EPMESC XI Congresses*, Kyoto, Japan, 3–6 December, 2007.
 49. Xiao, F., Ii, S. and Chen, C. G., High order multi-moment finite volume method and the applications to fluid dynamics, International Symposium on Computational Mechanics, Beijing, China, July 30–Aug. 1, 2007.
 50. Xiao, F. and Ii, S., High order multi-moment finite volume model, International Conference on Spectral and High Order Methods, Beijing, China, June 18–22, 2007.
 51. Xiao, F., A practical CIP/multi-moment finite volume model for multi-fluid simulations, International Conference on Computational Methods, Hiroshima, Japan, April 4–6, 2007.
 52. Yamashita, S., Xiao, F. and Takahashi, K., Numerical simulations of wind-driven waves,

- APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, Dec. 3-6, 2007.
53. Akoh, R., Ii, S. and Xiao, F., Development of tsunami simulator with CIP/multi-moment finite volume, Fourth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Mar. 6-7, 2006.
 54. Akoh, R., Ii, S. and Xiao, F., Development of high performance simulator for tsunami based on shallow water equations, Third International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Mar. 6-7, 2006.
 55. Chen C. G. and Xiao, F., Implementation of CIP-CSL3 scheme for implicit large eddy simulations, 5th Asian CFD workshop, Xi'an, China, Aug. 19-24, 2006.
 56. Ii, S. and Xiao, F., A high CIP/Multi-moment finite volume method on unstructured grid, WCCM-7, Los Angeles, USA, July 16-22, 2006.
 57. Komori, S., Takagaki, T., Saiki, R. and Suzuki, N. (Kyoto Univ.), The effects of raindrops on interfacial turbulence and air-water gas transfer, *International Workshop on Transport at the Air Sea Interface*, September 6-8, 2006, Heidelberg, Germany.
 58. Onishi, R. (JAMSTEC, •ESC), Takagi, H. (Kyoto Univ.), Takahashi, K. (JAMSTEC, •ESC) and Komori, S. (Kyoto Univ.), Turbulence Effects on Cloud Droplet Collisions in Mesoscale Convective Clouds, *Fifth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, September 25-29, 2006, Dubrovnik, Croatia.
 59. Takahashi, K., Multi-scale coupled atmosphere-ocean GCM and simulations, *12th Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, ECMWF, UK., 30 October - 3 November (2006).
 60. Weiming SHA, Abe, T. and Ashie, Y., Development and applications of an urban meteorological numerical model in Cartesian coordinate, Proc. of The 6th International Conference on Urban Climate, Goteborg University, Goteborg, Sweden (2006).
 61. Xiao, F., CIP/Multi-moment finite volume method for CFD, 5th Asian CFD workshop, Xi'an, China, Aug. 19-24, 2006.
 62. Yamashita, S. and Xiao, F., Numerical simulations of wind-driven waves, WCCM-7, Los Angeles, USA, July 16-22, 2006.
 63. Abe, T. and ASHIE, Y., Observation of thermal structure in and above the urban canopy layer by the Schlieren method, The 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology-Climate Analysis for Urban Planning -, Tsukuba, Japan (2005)
 64. Komatsu, N. and ASHIE, Y., High resolution analysis of urban heat island phenomenon in Tokyo with earth simulator, The 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology-Climate Analysis for Urban Planning -, Tsukuba, Japan (2005)
 65. Kono, T. and ASHIE, Y., Numerical simulation of air temperature within and above urban canopies using the spatially averaged $k - \epsilon$ model, The 4th Japanese-German Meeting on Urban Climatology-Climate Analysis for Urban Planning -, Tsukuba, Japan (2005)

〈国内会議〉

66. 赤穂良輔, 肖鋒, 非構造格子に基づく浅水流計算モデルの開発と数値実験, 日本土木学会第54回水工学講演会, 北海道, 2010年3月3~5日.
67. 足永靖信, 澤地孝男, 桑沢保夫, 宮田征門, 秦良昌, 三浦尚志, 低炭素コミュニティ形成のための水素エネルギー活用技術に関する研究(第1報)研究目的と計算方法, 空気調和・衛生工学会大会, 山口大学, 2010年9月1~3日.
68. 伊藤大輔, 武田仁, 藤本哲夫, 近藤靖史, 足永靖信, 高反射率塗料の適切な普及に向けた調査研究 その2 屋外曝露による性能変化を考慮したヒートアイランド緩和等の数値計算, 日本建築学会大会, 富山大学, 2010年9月9~11日.
69. 木田新一郎, 高橋桂子, 南極底層水と沿岸流の相互作用, 日本海洋学会春季大会, 2010年3月.

70. 島田暁, 高垣直尚, 岩野耕治, 黒瀬良一, 小森悟(京都大学), 砕波を伴う高風速域における潜熱輸送量の評価, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 名古屋工業大学, 2010 年 9 月 5～9 日.
71. 秦良昌, 足永靖信, 澤地孝男, 桑沢保夫, 宮田征門, 三浦尚志, 低炭素コミュニティ形成のための水素エネルギー活用技術に関する研究(第2報)ケーススタディー, 空気調和・衛生工学会大会, 山口大学, 2010 年 9 月 1～3 日.
72. 藤本哲夫, 伊藤大輔, 武田仁, 近藤靖史, 足永靖信, 高反射率塗料の適切な普及に向けた調査研究 その 1 日射反射率の保持率の試験結果, 日本建築学会大会, 富山大学, 2010 年 9 月 9～11 日.
73. 宮田征門, 足永靖信, 澤地孝男, 桑沢保夫, 秦良昌, 三浦尚志, 低炭素コミュニティ形成のための水素エネルギー活用技術に関する研究(第3報)省エネルギー・省CO₂効果の評価, 空気調和・衛生工学会大会, 山口大学, 2010 年 9 月 1～3 日.
74. 赤穂良輔, 肖鋒, 三角形非構造格子におけるマルチモーメント有限体積法を用いた浅水波方程式の解法, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, 2009 年 12 月 16～18 日.
75. 飯田誠, 宮川圭介, 荒川忠一, 杉村剛, 高橋桂子, 数値サイトキャリブレーションにおける方位区分に関する研究, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, 東京, 2009 年 11 月 26～27 日.
76. 飯田誠, 宮川圭介, 神尾武史, 荒川忠一, 杉村剛, 高橋桂子, 複雑地形 CFD における地形解像度に関する考察, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, 東京, 2009 年 11 月 26～27 日.
77. 伊藤大輔, 足永靖信, 都市形状の分光アルベドに関する数値シミュレーション, 日本建築学会大会, 東北学院大学, 仙台市, 2009 年 8 月 26～29 日.
78. 鶴飼健弘, 小林武徳, 黒瀬良一, 小森悟, 今城貴徳(京都大学), 風波気液界面近傍の乱流とスカラ輸送の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2009, 東洋大学(東京), 2009 年 9 月 4 日.
79. 大西領, 高橋桂子(JAMSTEC・ESC), 小森悟(京都大学), 巨大雲凝結核の存在が雲の発達に与える影響, 第 23 回数値流体力学会シンポジウム, 仙台市民会館(仙台), 2009 年 12 月 17 日.
80. 木田新一郎, 高橋桂子, 縁辺海と外洋の相互作用, 日本海洋学会秋季大会, 2009 年 9 月.
81. 木田新一郎, 高橋桂子, 南極底層水と沿岸流の相互作用, ワークショップ「海氷生成とそれに伴う高密度水・底層水形成過程: 今後の南大洋の観測とモデリングへ向けて」, 2009 年 7 月.
82. 木田新一郎. Richards, K.J., Seasonal Sea Surface Temperature variability in the Indonesian Seas. 2009 年度日本海洋学会春季大会, 2009 年.
83. 河野孝昭, 足永靖信, 田村哲郎, LES のフィルター操作に対応した空間平均操作による多層型都市キャノピーモデルの運動量輸送方程式の導出, 日本建築学会大会, 東北学院大学, 仙台市, 2009 年 8 月 26～29 日.
84. 河野直紀, 黒瀬良一, 小森悟, 道岡武信, 馬場雄也, 液相反応乱流場の Large-eddy simulation (Flamelet モデルの適用), 日本流体力学会年会 2009, 2009 年 8 月.
85. 河野直紀, 黒瀬良一, 小森悟, 道岡武信, 馬場雄也, 液相反応乱流場の Large-eddy simulation, 化学工学会第 74 年会, 2009 年 3 月.
86. 小森悟(京都大学), 室内実験と数値計算による大気・海洋間の熱および物質の輸送機構の解明と輸送量の評価, 災害予測シミュレーションの高度化公開シンポジウム, 笹川記念会館(東京), 2009 年 3 月 11 日.
87. 肖鋒, 伊井仁志, MCV 法におけるチェビシェフノードについて, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会, 金沢, 2009 年 10 月 10～12 日.
88. 杉村剛, 高橋桂子, 矢部孝, 全球3次元 Soroban-CIP 法における保存型計算手法の開発, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, 2009 年 12 月 16～18 日.
89. 杉村剛, 高橋桂子, CIP 法における方向分離計算の安定性解析, 日本機械学会第 22 回計

- 算力学講演会, 金沢, 2009 年 10 月 10~12 日.
90. 高橋桂子, 温暖化(気候変化)が進む中, 気候変動と異常気象に適応できるか, 地球シミュレータシンポジウム, 東京, 2009 年 11 月 19 日.
 91. 馬場雄也, 高橋桂子, 完全圧縮解法を用いた安定・不安定境界層下での建物回り流れのシミュレーション, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月.
 92. 藤本哲夫, 伊藤大輔, 武田仁, 近藤靖史, 森川泰成, 足永靖信, 既存の窓面を対象にした遮熱化技術とその性能に関する調査研究 その3遮熱化技術の2007年度調査, 日本建築学会大会, 東北学院大学, 仙台市, 2009 年 8 月 26~29 日.
 93. 矢部孝, 尾形陽一, 保存保証型セミラグランジュ解法とソロバン格子, 災害予測シミュレーションの高度化公開シンポジウム, 東京, 2009 年 3 月 11 日.
 94. 山下晋, 青木尊之, 肖鋒, 高橋桂子, CIP 有限体積法による風波乱流場の数値シミュレーション, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会, 金沢, 2009 年 10 月 10~12 日.
 95. 山下晋, 青木尊之, 肖鋒, 高橋桂子, 風波シミュレーションにおける気液界面近傍の乱流輸送機構, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, 2009 年 12 月 16~18 日.
 96. 赤穂良輔, 伊井仁志, 肖鋒, 非構造格子に基づく高性能津波シミュレーターの開発および数値実験, 第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008 年 5 月 19~21 日.
 97. 足永靖信, 張洪賓, 河野孝昭, 東京 23 区を対象にした高解像度ヒートアイランド数値シミュレーション (その1) 計算概要, 日本建築学会大会, 広島大学, 2008 年 9 月 18~20 日.
 98. 伊井仁志, 竹内伸太郎, 杉山和靖, 高木周, 松本洋一郎, 肖鋒, 非圧縮性流体に対する高精度マルチモーメント制約型有限体積法, 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 沖縄, 2008 年 11 月 1~3 日.
 99. 伊藤大輔, 藤本哲夫, 足永靖信, 日射遮蔽フィルムの光学的性能の調査研究, 第 29 回日本熱物性シンポジウム, 日本女子大学, 東京都文京区, 2008 年 10 月 8~10 日.
 100. 伊藤大輔, 藤本哲夫, 武田仁, 近藤靖史, 森川泰成, 足永靖信, 既存の窓面を対象にした遮熱化技術とその性能に関する調査研究 その 2 日射遮蔽フィルムの光学的性能の分析, 日本建築学会大会, 広島大学, 2008 年 9 月 18~20 日.
 101. 大西領, 高橋桂子(JAMSTEC・ESC), 小森悟(京都大学), 雲粒の乱流衝突成長を考慮したビン法雲物理計算, 第 22 回数値流体力学会シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京), 2008 年 12 月 17 日~19 日.
 102. 大西領, 高橋桂子(JAMSTEC・ESC), 小森悟(京都大学), MSSG ビン法を用いたメソスケール対流雲のシミュレーション, 第 10 回非静力学モデルワークショップ, 名古屋大学, 2008 年 11 月 27 日~28 日.
 103. 河野直紀, 黒瀬良一, 小森悟, 馬場雄也, 道岡武信, Flamelet 法を用いた液相反応乱流場の Large-eddy simulation, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 12 月 17 日~19 日.
 104. 河野孝昭, 張洪賓, 足永靖信, 東京 23 区を対象にした高解像度ヒートアイランド数値シミュレーション (その2) 気温分布の地域的特徴の整理, 日本建築学会大会, 広島大学, 2008 年 9 月 18~20 日.
 105. 杉村剛, 高橋桂子, 矢部孝, Soroban-CIP 法を用いた3次元全球計算, 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 沖縄, 2008 年 11 月 1~3 日.
 106. 杉村剛, 高橋桂子, 重合格子法における接合部からの数値誤差の発生と CIP 法の有効性, 第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008 年 5 月 19~21 日.
 107. 張洪賓, 足永靖信, 都市キャノピー幾何情報の推定におけるニューラルネットワーク分析手法の適用, 日本建築学会大会, 広島大学, 2008 年 9 月 18~20 日.
 108. 中島裕一郎, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森悟, 馬場雄也, Level-set 法を用いた自由海面への単一液滴衝突現象の数値シミュレーション, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 12 月 17 日~19 日.
 109. 馬場雄也, 高橋桂子, 圧縮性流体の高速解法による建物周り流れのシミュレーション, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 12 月 17

- 日-19 日.
110. 半田和大, 大坪周平, 小森悟(京都大学), 塩水風波乱流場における気液界面を通しての熱輸送および物質輸送, 日本流体力学会年会 2008, 神戸大学, 2008 年 9 月 4 日～7 日.
 111. 藤本哲夫, 伊藤大輔, 武田仁, 近藤靖史, 森川泰成, 足永靖信, 既存の窓面を対象にした遮熱化技術とその性能に関する調査研究 その 1 日射遮蔽フィルムの性能調査, 日本建築学会大会, 広島大学, 2008 年 9 月 18～20 日.
 112. 松田景吾(京都大学), 大西領, 高橋桂子(JAMSTEC・ESC), 黒瀬良一, 小森悟(京都大学), 線形および非線形逆解析手法による気相乱流中液滴の衝突頻度因子の導出, 化学工学会第 40 回秋季大会, 東北大学, 2008 年 9 月 24 日～27 日.
 113. 山下晋, 肖鋒, 高橋桂子, CIP 有限体積法による風波シミュレーション, 第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008 年 5 月 19～21 日.
 114. 若島幸司, 肖鋒, 山下真央, Immersed Boundary 法を用いた固体・流体の連成解析, 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 沖縄, 2008 年 11 月 1～3 日.
 115. 渡邊裕章, 丹野賢二, 黒瀬良一, 馬場雄也, 複雑なバーナ形状を有する微粉炭燃焼炉の Large-eddy simulation, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2008 年 12 月 17 日-19 日.
 116. 赤穂良輔, 伊井仁志, 肖鋒, 非構造格子に基づく高性能津波シミュレーターの開発, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2007 年 12 月 19～21 日.
 117. 赤穂良輔, 伊井仁志, 肖鋒, 非構造格子に基づく高性能津波シミュレーターの開発, 第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007 年 5 月 22～24 日.
 118. 足永靖信, 張洪賓, 河野孝昭, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 16) 地球シミュレータによる水平 1m メッシュ解像度の数値計算, 日本建築学会大会, 福岡大学, 2007 年 8 月 29～31 日.
 119. 足永靖信, 張洪賓, 首都圏における細密数値情報および国勢統計資料を活用した都市キャノピー幾何情報の整備, 空気調和・衛生工学会大会, 東北工業大学, 仙台市, 2007 年 9 月 12～14 日.
 120. 阿部敏雄, 足永靖信, 温度成層風洞を用いたアスペクト比が異なる規則配列の建物周辺における気温場の計測, 日本建築学会大会, 福岡大学, 2007 年 8 月 29～31 日.
 121. 阿部敏雄, 足永靖信, 高速高解像度カメラを用いたシュリーレン法による温度分布を有する気流の可視化, 第 35 回可視化情報シンポジウム, 工学院大学, 東京都新宿区, 2007 年 7 月 24～25 日.
 122. 伊井仁志, 肖鋒, マルチ・モーメント有限体積法, 第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007 年 5 月 22～24 日.
 123. 大平満, 都市スケール流れの非定常シミュレーション, 第 4 回 CREST 全体 meeting, 横浜, 2007 年 4 月.
 124. 大坪周平, 半田和大, 小森悟(京都大学), 風波気液界面を通しての熱輸送量の評価, 化学工学会第 39 回秋季大会, 北海道大学, 平成 19 年 9 月 13 日～15 日.
 125. 小野寺直幸, 肖鋒, 伊井仁志, 非構造格子における自由界面捕獲スキーム, 第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007 年 5 月 22～24 日.
 126. 鍵屋浩司, 足永靖信, 大橋征幹, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 13) 市街地改造の効果に関するケーススタディー, 日本建築学会大会, 福岡大学, 2007 年 8 月 29～31 日.
 127. 河野孝昭, 張洪賓, 足永靖信, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 17) 現況ケースの計算結果, 日本建築学会大会, 福岡大学, 2007 年 8 月 29～31 日.
 128. 肖鋒, 伊井仁志, CIP/multi-moment finite volume method with arbitrary order of accuracy, 第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007 年 5 月 22～24 日.
 129. 杉村剛, 高橋桂子, 重合格子法における接合部からの数値誤差の発生と CIP 法の有効性, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2007 年 12 月 19～21 日.

130. 杉村剛, 高橋桂子, 重合格子法における接合部からの数値誤差の発生と CIP 法の有効性, 第 20 回計算力学講演会, 同志社大学, 2007 年 11 月 26~28 日.
131. 田代直人, 松本圭太, 山下晋, 肖鋒, ダム崩壊問題における浅水波モデルと3次元自由界面モデルの比較研究, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会, 京都, 2007 年 11 月 26~28 日.
132. C.G.Chen and F.Xiao, The implementation of CIP/multi-moment finite volume method on boundary-fitted coordinate systems, 第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007 年 5 月 22~24 日.
133. 張洪賓, 足永靖信, 河野孝昭, 三上岳彦, 都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルを用いた首都圏の熱環境解析, 空気調和・衛生工学会大会, 東北工業大学, 仙台市, 2007 年 9 月 12~14 日.
134. 張洪賓, 河野孝昭, 足永靖信, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 18)再開発後ケースの計算結果, 日本建築学会大会, 福岡大学, 2007 年 8 月 29~31 日.
135. 彭新東, 高橋桂子, 肖鋒, CIP 法によるマルチスケール大気移流, 第 21 回計算流体力学シンポジウム, 2007 年 12 月, 東京.
136. 彭新東, 高橋桂子, 全球非静力モデル MSSG とマルチスケールシミュレーション, 日本気象学会秋季大会, 2007 年 10 月, 北海道.
137. 彭新東, 高橋桂子, 非静力モデル MSSG によるマルチスケールシミュレーション, 非静力モデルに関するワークショップ, 2007 年 9 月, 京都.
138. 彭新東, 高橋桂子, MSSG による 2006 年 7 月九州豪雨のシミュレーション, 日本気象学会春季大会, 2007 年 5 月, 東京.
139. 彭新東, CIP-CSLR による MSSG モデルの豪雨シミュレーション, 第 4 回 CREST 全体 meeting, 横浜, 2007 年 4 月.
140. 松本圭太, 肖鋒, CIP multi-moment 有限体積法への Immersed-Boundary 法の適用, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会, 京都, 2007 年 11 月 26~28 日.
141. 山下晋, 肖鋒, 高橋桂子, 風波の大規模数値シミュレーション, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2007 年 12 月 19~21 日.
142. 赤穂良輔, 伊井仁志, 肖鋒, マルチ・スケール津波警報システムの開発, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006 年 9 月 18~22 日.
143. 足永靖信, 東海林孝幸, 航空機レーザー計測データを活用した東京 23 区の用途毎建物高さの集計, 空気調和・衛生工学会大会, 信州大学, 長野市, 2006 年 9 月 27~29 日.
144. 足永靖信, 河野孝昭, 阿部敏雄, 東海林孝幸, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 10)地球シミュレータによる計算, 日本建築学会大会, 神奈川大学, 横浜市, 2006 年 9 月 7 日~9 日.
145. 阿部敏雄, 足永靖信, 日本 16 都市における気温の経年変化, 空気調和・衛生工学会大会, 信州大学, 長野市, 2006 年 9 月 27~29 日.
146. 阿部敏雄, 河野孝昭, 東海林孝幸, 足永靖信, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 11)東京駅・汐留・新橋周辺の計算結果, 日本建築学会大会, 神奈川大学, 横浜市, 2006 年 9 月 7 日~9 日.
147. 天田拓哉, 瀬野太郎, 田村健, 増田幸宏, 高橋信之, 尾島俊雄, 鍵屋浩司, 足永靖信, 成田健一, 三上岳彦, 東京都心における「風の道」の実態調査(その 2. 日本橋川), 2005 年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2006)
148. 伊井仁志, 肖鋒, 正二十面体球面格子における CIP/Multi-moment 有限体積法について, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006 年 9 月 18~22 日.
149. 大坪周平, 丹野賢二, 小森悟(京都大学), 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, 第 84 期日本機械学会流体工学部門講演会, 東洋大学(川崎市), 平成 18 年 10 月 28 日~29 日.
150. 大西領, 高橋桂子(JAMSTEC・ESC), 小森悟(京都大学), メソスケール対流雲における雲粒

の乱流衝突成長, 第20回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 平成 18 年 12 月 18~20 日.

151. 鍵屋浩司, 足永靖信, 大橋征幹, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 2) 研究の概要と課題, 日本建築学会大会, 神奈川大学, 横浜市, 2006 年 9 月 7 日~9 日.
152. 小松信義, 足永靖信, 河野孝昭, 阿部敏雄, 一ノ瀬俊明, 都市キャノピーモデル検証のための規則的建物配置群周りの熱環境解析, 第 55 回理論応用力学講演会, 京都大学, 2006 年 1 月 24~26 日.
153. 齋田美怜, 瀬野太郎, 田村健, 増田幸宏, 高橋信之, 尾島俊雄, 鍵屋浩司, 足永靖信, 成田健一, 三上岳彦, 東京都心における「風の道」の実態調査(その3. 品川駅周辺), 2005 年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2006)
154. 肖鋒, 伊井仁志, CIP/Multi-moment 有限体積法とDiscontinuous Galerkin 法, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006 年 9 月 18~22 日.
155. 東海林孝幸, 河野孝昭, 阿部敏雄, 足永靖信, 東京臨海・都心部におけるヒートアイランド現象の実測調査と数値計算(その 12) 品川駅・目黒川・大崎周辺の計算結果, 日本建築学会大会, 神奈川大学, 横浜市, 2006 年 9 月 7 日~9 日.
156. 杉村剛, 高橋桂子, Voronoi Reduced Grid による球面浅水波解析, 第 20 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 2006 年 12 月 18 日~20 日.
157. 高橋桂子, CREST 災害予測シミュレーションの高度化プロジェクト第 3 回全体会議, 東工大 大岡山キャンパス, 2006 年 10 月 20 日.
158. 陳春剛, 肖鋒, Accurate and conservative scheme on cubic-spherical grid, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006 年 9 月 18~22 日.
159. 彭新東, 高橋桂子, 肖鋒, 陰陽グリッド上球面浅水波モデルの特性線解法, 第 8 回非静力モデルシンポジウム, つくば, 2006 年 11 月 29-30 日.
160. 彭新東, 高橋桂子, 特性解法による球面浅水波モデルの数値解, 日本気象学会 2006 秋季大会, 名古屋, 2006 年 10 月 25-27 日.
161. Mark Matheson, Takaaki KOHNO, Takayuki TOKAIRIN, Yasunobu ASHIE, Coupling an urban canopy model and a non-hydrostatic meteorological model to predict urban heat island phenomena, 日本建築学会大会, 神奈川大学, 横浜市, 2006 年 9 月 7 日~9 日.
162. 宮下悠子, 瀬野太郎, 田村健, 増田幸宏, 高橋信之, 尾島俊雄, 鍵屋浩司, 足永靖信, 成田健一, 三上岳彦, 東京都心における「風の道」の実態調査(その 1. 東京駅周辺), 2005 年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2006)
163. 李興良, 肖鋒, 陳春剛, 陳德輝, 沈学順, Conservative schemes on Yin-Yang spherical grid, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006 年 9 月 18~22 日.
164. 山下晋, 肖鋒, CIP/MM 有限体積法による自由界面風波乱流の数値シミュレーション, 日本機械学会 2006 年度年次大会, 熊本, 2006 年 9 月 18~22 日.
165. 伊井仁志, 肖鋒, 特性理論に基づくCIP/Multi-Moment 有限体積法: 一次元オイラー方程式への拡張, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2005 年 12 月 13~15 日.
166. 笥雅行, 永野勝尋, 足永靖信, 市街地熱環境の大規模数値解析, 日本機会学会第 18 回計算力学講演会, 筑波大学, 2005 年 11 月 19~21 日.

③ ポスター発表 (国内会議 13 件, 国際会議 7 件)

<国際会議>

1. Kida, S., and Richards, K.J., Seasonal Sea Surface Temperature variability in the Indonesian Seas, *Ocean Sciences Meeting*, Feb. (2010).
2. Xiao, F., An immersed boundary method for Boussinesq convective flows, International Workshop on Non-Hydrostatic Numerical Models, Kyoto, Japan, Sept.29-Oct.1, 2010.
3. Abe, T. and Ashie, Y., Quantification of temperature distribution inside and over the urban canopy layer by using the Schlieren method, Proc. of The 6th International Conference on

- Urban Climate, Goteborg University, Goteborg, Sweden, 396-399 (2006)
4. Itoh, D. and Ashie, Y., Study on the spectral albedo in the geometrically complex urban spaces, Proc. of The 7th International Conference on Urban Climate, PACIFICO Yokohama, Yokohama, Japan (2009)
 5. Kono, T., Ashie, Y. and Tamura, T., Derivation of spatially averaged momentum equations of urban canopy model using the concept of the immersed boundary method, Proc. of The 7th International Conference on Urban Climate, PACIFICO Yokohama, Yokohama, Japan (2009)
 6. Abe, T. and Ashie, Y., Quantification of temperature distribution inside and over the urban canopy layer by using the Schlieren method, Proc. of The 6th International Conference on Urban Climate, Goteborg University, Goteborg, Sweden, 396-399 (2006)
 7. Ashie, Y. and Kono, T., Numerical simulation of urban thermal environment of the waterfront area in Tokyo by using a five meter horizontal mesh resolution, Proc. of The 6th International Conference on Urban Climate, Goteborg University, Goteborg, Sweden, 615-618 (2006)

〈国内会議〉

8. 足永靖信, 河野孝昭, 東京ヒートマップの開発, 日本ヒートアイランド学会第4回全国大会, 東京工業大学, 横浜市, 2009年8月22~23日.
9. 伊藤大輔, 武田仁, 足永靖信, 藤本哲夫, 開口部遮熱化と空調負荷の関係, 日本ヒートアイランド学会第4回全国大会, 東京工業大学, 横浜市, 2009年8月22~23日.
10. 伊藤大輔, 足永靖信, 都市形状におけるアルベドの分光特性に関する研究, 日本ヒートアイランド学会第3回全国大会, 名古屋工業大学, 2008年8月22~24日.
11. 平野洪賓, 足永靖信, 谷川亮一, LCOALS-UCSSによる首都圏熱環境の解析, 日本ヒートアイランド学会第3回全国大会, 名古屋工業大学, 2008年8月22~24日.
12. 大平満, 高橋桂子, 足永靖信, MSSG-Aによるメソ気象モデルと都市モデルとの統合, 日本ヒートアイランド学会第2回全国大会, 東京, 2007年8月.
13. 大平満, 高橋桂子, 足永靖信, 全球/領域/都市域統合・非静力全球大気海洋シミュレーションコードMSSG-Aの開発, 日本気象学会春季大会, 2007年5月, 東京.
14. 河野孝昭, 足永靖信, 都市キャノピーモデルによる開口部の高反射化が室内外熱環境に及ぼす影響の検討, 日本ヒートアイランド学会第2回全国大会, 立教大学, 東京都豊島区, 2007年8月24~26日.
15. 杉村剛, 高橋桂子, Voronoi Reduced Grid, 日本気象学会2007年度春季大会, 東京, 2007年5月13~16日.
16. 高橋桂子, 後藤浩二, 湊上弘光, 彭新東, 大西領, 大平満, 杉村剛, MSSGによる夏季の降水分布再現実験, 2007年度日本気象学会春季大会, 2007年5月.
17. 高橋桂子, 湊上弘光, 後藤浩二, 彭新東, 大西領, 大平満, 杉村剛, MSSGによる水平解像度1.9km全球大気シミュレーション, 2007年度日本気象学会春季大会, 2007年5月.
18. 張洪賓, 河野孝昭, 鍵屋浩司, 足永靖信, 大規模数値シミュレーションによる市街地改造の熱環境改善効果研究, 日本ヒートアイランド学会第2回全国大会, 立教大学, 東京都豊島区, 2007年8月24~26日.
19. 阿部敏雄, 足永靖信, 日本16都市における気温の経年変化の特徴, 日本ヒートアイランド学会第1回全国大会, 大阪市立大学, 2006年7月27~29日.
20. 河野孝昭, 足永靖信, 東京湾沿岸部の5km四方の領域における熱環境の大規模数値解析, 日本ヒートアイランド学会第1回全国大会, 大阪市立大学, 2006年7月27~29日.

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
- ②海外出願 (0 件)
- ③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

① 受賞

杉岡健一, 小森悟, 日本機械学会賞(論文賞) (2006.4)
小森悟, 日本機械学会流体工学部門フロンティア表彰(2006.10)
大西領, 日本機械学会奨励賞(研究) (2008.4)
小森悟, 黒瀬良一, 日本流体力学会 論文賞(2008.2)
大西領, 平成 21 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2009.4)
大西領, 高橋桂子, 第 23 回数値流体力学シンポジウムベスト CFD グラフィックス・アワード, 最優秀賞(2009.12)
大西領, 日本機械学会奨励賞(研究), (2008.4)
黒瀬良一, 平成 22 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2010.4)
馬場雄也, 日本機械学会賞(論文), (2008.4)
馬場雄也, 社団法人日本機械学会熱工学部門部門一般表彰(講演論文表彰)(2008.10)
足永靖信, 社団法人 日本建築学会賞(論文) (2011.4)
足永靖信, 社団法人 空気調和・衛生工学会学会賞(学術論文部門) (2007.5)

② マスコミ(新聞・TV等)報道

2006/1/1(日), 科学新聞, JAMSTEC 南海トラフプロジェクト
2006/5/23(火), 読売新聞 (朝刊 2 面), ヒートアイランド現象 街路 1 本 1 本まで再現.
2006/5/29(月), 河北新聞, 台風進路ピタリ予測.
2006/5/30(火), DAILY YOMIURI ONLINE Researchers use models to defang heat island effect.
2006/6/6(火), NHK 総合, おはよう日本(首都圏版), 「ヒートアイランド現象」を再現.
2006/6/7(水), NHK 水戸, 茨城県版地上デジタル放送番組「いばらき・わいわいスタジオ」, 「ヒートアイランドを詳細表現」.
2006/7/15(土), TV神奈川, 「ニッポン早わかり」, 「都市の暑さを和らげる」.
2006/7/18(火), フジサンケイビジネスアイ, ヒートアイランドを「クール」に
2006/8/7(月), 日本経済新聞, 局所の気象変動⇒地球の気候に影響
2006/8/14(月), 読売新聞, スパコン威力温暖化に迫る
2006/8/22(火), NHK 総合, 「ニュースウオッチ9」, 「都心の”涼”意外な場所に」.
2006/8/25(金), 日刊工業新聞, ヒートアイランド対策 東京都が効果を試算 丸の内など4地区モデル.
2006/10/20(金), 朝日新聞, 気候判断難しかった
2006/11/1(木), 読売新聞, 都市型気象災害の仕組み, スパコンで解明へ
2006/11/2(木), 読売新聞(朝刊 2 面), 都市型気象災害スパコンで予測一仕組み解明へ共同
2006/12/4(月), 日経産業新聞, 風力発電量予測
2006/12/4(月), 日刊工業新聞, 風力発電機の性能評価技術確立へ共同研究
2006/12/25(月), 毎日新聞, 風力発電高い精度で出力予測
研究一.
2007/7/12(木), 読売新聞(朝刊 33 面), 都市を冷やせ.
2007/7/31(火), NHK ラジオジャパン, 「街を冷やそう〜東京のヒートアイランド対策」.
2007/9/12(水), 朝日新聞(夕刊 4 面), 都市冷却 緑化が一番.
2008/3/24(月), 朝日新聞(朝刊 1 面), 発熱する東京.
2008/4/10(木), 福島民友新聞, 局所気象予測に挑む.
2008/8/7(木), 京都新聞(朝刊23面), 東京涼模様 第2回 風.
2008/10/13(月), フジサンケイビジネスアイ(朝刊10面), 時間軸でヒートアイランド究明〜大手町は猛暑のち豪雨.
2008/12/1(月), 日刊建設工業新聞(朝刊12面), ヒートアイランドを解析 環境対策”.
2009/3/5(木), 化学工業日報(朝刊10面), 都内のヒートアイランド状況ひと目で 建築研がマ

ップ作成 地球シミュレータ活用.

2009/3/10(火), 日経 BP 社ケンプラッツ, 東京 23 区のヒートアイランド状況が分かるマップが完成.

2009/3/10(火), 電気新聞(5 面), 23 区の気温明らかに「東京ヒートマップ」.

2009/3/17(火), 朝日新聞(夕刊 31 面), 東京のヒートマップ作成 建築研究所仮想の 23 区温度分布色分け.

2009/3/19(木), 日刊工業新聞(朝刊 12-13 面), 水, 緑, そして風「ヒートアイランド」を持続可能な「スマート・メガシティ」へ.

2009/3/28(土), 建設工業新聞(朝刊 1 面), 建築研究所 東京ヒートマップ 来月 19 日施設公開で配付.

2009/4/13(月), 建設技術新聞(朝刊 20 面), 東京ヒートマップを見学者に配付へ 建築研究所.

2009/6/6(土), BSジャパン(テレビ東京系衛星放送), ヒートアイランド対策としての「風の道」.

2009/7/12(日), 青森放送, ニュートンのリンゴ, ”熱の島”を冷やせ! ~ヒートアイランド対策最前線~.

2010/9/5 テレビ朝日, 奇跡の地球物語.

2010/11/13 日本経済新聞夕刊, 「世界の都市の温暖化予測」.

2009/12/6(日), テレビ朝日, 近未来創造サイエンス 奇跡の地球物語「日本建築 今に生きる先人の知恵」.

2010/12/12 NHK総合, 週間こどもニュース.

§ 6 研究期間中の主なワークショップ, シンポジウム, アウトリーチ等の活動

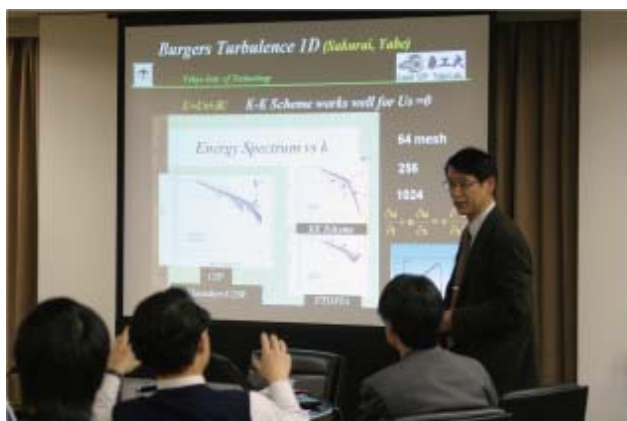
年月日	名称	場所	参加人数	概要
2005/12/14	キックオフミーティング	JAMSTEC 東京事務所	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2006/03/30 -31	第2回全体ミーティング	京大 桂キャンパス	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2006/10/20	第3回全体ミーティング	東工大	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2007/04/02 -03	第4回全体ミーティング	地球シミュ レータセン ター (ESC)	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2007/10/23 -24	第5回全体ミーティング	建築研	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2007/12/3- 6	国際会議 APCOM'07) in conjunction with EPMESC XI	Kyoto International Conference Hall, Kyoto	約 30 名	APCOM-EPMESC 会議の中で, ” Multi-Scale Multi-Physics Models and Simulations for Extremes on the Earth Simulator”セッションの 開催(12/5)
2008/06/09 -10	第6回全体ミーティング	京大 桂キャンパス	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2008/12/15	TITEC-ESC joint workshop	ESC	20 名	東工大とESC 共同主催のHPCお よびCFD に関するワークショップ
2008/12/15	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者: Prof. T. Tezduyar (Rice University)
2009/1/23	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者: 長谷川洋介先生(東大)
2009/2/13	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者: 青木尊之先生(東工大 学術国際情報センター・国際共 同研究分野)

2009/2/26	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：磯辺篤彦先生(愛媛大学/沿岸環境科学研究センター)
2009/2/26	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：高嶋恭子先生(東京海洋大)
2009/3/10	第7回全体ミーティング	JAMSTEC 東京事務所	15 名	CREST プロジェクト全体の会合
2009/3/11	「災害予測シミュレーションの高度化」公開シンポジウム	笹川記念会館	80 名	一般向け公開シンポジウム
2009/3/13	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：津島将司先生(東工大/炭素循環エネルギー研究センター)
2009/4/6	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：Prof. M. Vazquez (Barcelona Supercomputing Center)
2009/6/4	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：芳村 圭先生(Scripps Institution of Oceanography, UCSD)
2009/6/15	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：Prof. N. Nikiforakis (University of Cambridge)
2009/7/17	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：Prof. C. Vassilicos (Imperial College London)
2009/10/22	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：古市 尚基先生(東京大学)
2009/12/10	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：桑沢保夫先生(独立行政法人建築研究所)
2010/3/2	MSSG-CREST セミナー	ESC	15 名	講演者：Prof. V. Malyskin(会津大; Russian Academy of Sciences)
2010/3/31	第8回全体ミーティング	京大 桂キャンパス	12 名	CREST プロジェクト全体の会合
2010/5/17-21	The 6 th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces (GTWS-6) -CREST session-	Kyoto Garden Palace, Kyoto	約 30 名	GTWS-6 会議の中で，“CREST session”の開催(5/21)

§ 7 結び

本プロジェクトは、異なる分野であるシミュレーションと実験の両方を結び付けたユニークな構成で開始した。どちらの分野においても、双方の重要性を認めつつ、新しいテーマとして1つの目的に向かって研究を進めることができた。また、大変貴重な経験とともに、多くの新しい成果を生むことができ、大変有意義であった。すでに、これからの発展的な協力についても話し合いがもたれており、継続的な研究が非常に重要であると考えている。

プロジェクトの推進に関しては、コアメンバーだけでなく、興味を持っていただけた先生方からも激励をたくさんいただいた。特に、鳥羽良明先生(東北大学名誉教授)には、多くの励ましやご助言、ご協力をいただいた。厚く御礼申し上げます。また、プロジェクト、研究の推進には、各機関のスタッフの方々、JSTのご担当の皆さまにも、数多く支えていただいたことに心からの感謝を申し上げます。

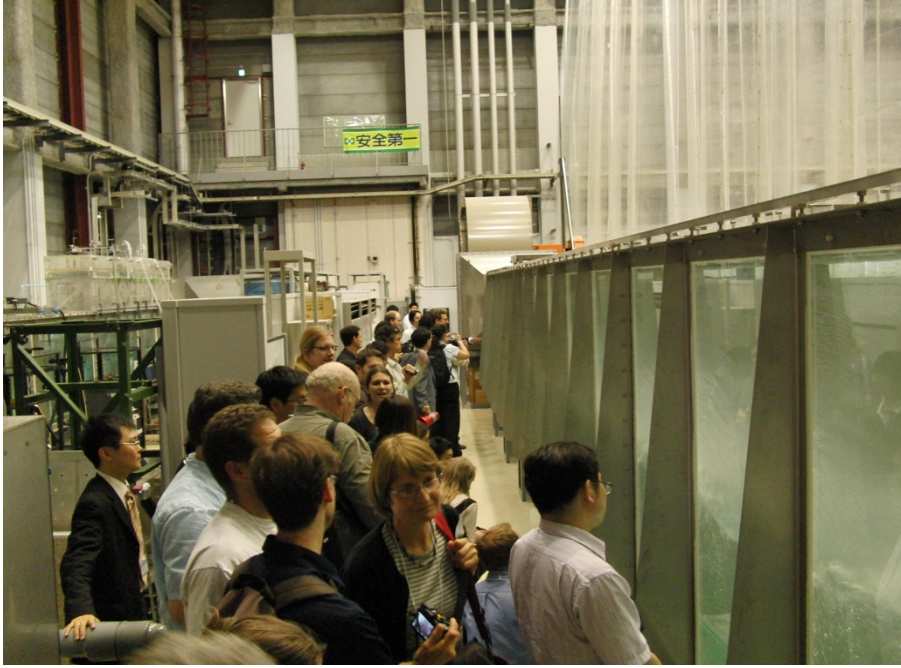


ミーティング風景



公開シンポジウム





高速風洞見学