

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	(やまざき ひろえ) 山崎 弘恵
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 24 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 地球惑星科学専攻
(学位論文題目) 直交格子に基づく 超高解像度大気モデルの開発	
論 文 調 査 委 員	(主査) 里村 雄彦 教授 竹見 哲也 准教授 町田 忍 教授

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山崎 弘恵
論文題目	直交格子に基づく超高解像度大気モデルの開発		

(論文内容の要旨)

急峻な斜面を含む複雑地形上でも精度良く計算可能な 2 次元完全圧縮非静力学大気数値モデルを開発し、その有効性と精度を検証した。主な内容は以下の 2 つである。

(1) 直交直線格子系を用いた複雑地形上の大気数値モデルの開発

大気数値モデルで広く行われている境界適合格子 (地形準拠格子) を生成するための座標変換を本研究では用いず、直交直線格子上で地形を表現する「カットセル法」を導入した 2 次元完全圧縮非静力学大気数値モデルを新たに開発した。カットセル法は、地形を折れ線で表現し、上空は通常の四角形格子で、地上付近の地形でカットされた格子では残った部分の大気を多角形格子で、それぞれ流体運動を計算する手法である。このため、地形によってカットされた小さな格子が生じると数値計算を安定に行うために時間刻みを小さくとらなければならない、大気の数値計算においては、そのままでは実用的な計算時間で現象を再現することができない。本研究では、カットされた小さな格子と周辺の格子とを地形の斜度に合わせて鉛直又は水平に結合させることにより、時間刻みを長くすることを可能にした。さらに、格子での変数配置を、スカラー変数を格子の中心に、総ての速度変数をスカラー格子の各頂点の同じ点に配することにより、カットセルでの速度計算を省略できることを見だし、セルの結合にかかる計算コストを大きく削減することに成功した。さらに、この開発したモデルを用いて山岳波の再現実験を行った結果、大局的にはモデルが 2 次精度を保っていること、緩い斜面だけでなく座標変換を用いた従来のモデルでは深刻なエラーが生じるような急斜面上の大気の流れをも精度良く再現できることを示した。

(2) 地形付近の高精度・高解像度化手法の開発

開発したモデルにおいて、特に鉛直方向の高い分解能が必要な地面付近の大気境界層を効率的に高解像度化するため、マルチブロック構造の格子を用いた局所格子細密化手法を導入した。この手法は、計算領域を多数のブロックに分割し、地形近傍でブロックの分割を繰り返すことで任意の地形近傍を高解像度化すると同時に、各ブロックに同数の直交格子を配置することでブロック毎の計算負荷を均等化し、並列計算効率を確保することを可能にする手法である。しかし、この手法は、大きさの異なるブロック境界において一般には物理量の保存則を満たすことができないため、本研究では、ブロック境界にフラックス修正アルゴリズムを導入することでスキームに質量保存性を持たせた。さらに、数値計算の安定性から一部の領域での格子の細分化によって全領域の時間刻みを小さくせざるを得ない事態を防ぎ、計算時間の増大を最低限に押さえるため、各ブロックでブロックの大きさに比例した時間ステップをそれぞれ用いるサブサイクリング積分を採用した。これら一連の手法を導入したカットセルモデルを用いて再び山岳波再現実験を行った結果、モデルが地形近傍の解像度を高め、かつ大局的に 2 次精度を保ったまま並列効率を落とすことなく計算時間を実現可能な範囲に収めることを実証した。

(論文審査の結果の要旨)

近年の計算機能力の向上に伴い、大気数値モデルにおける初期値作成手法の改善や物理過程表現の精緻化などと共にモデル空間分解能が向上し、大気モデルの予測精度が飛躍的に向上してきた。今後、人命を脅かす激甚で短時間に発生消滅する竜巻や突風、ゲリラ豪雨など中小規模現象の予測には、水平分解能百m～数mでの計算が必須と考えられている。しかし、モデルの高分解能化によって地表面の凹凸もモデル内に現実的に表現されることとなり、例えば山岳地帯では傾斜角40～50度を超える非常に急峻な斜面やほぼ直立した崖がモデル下部境界条件として現れてくる。これまでの大気数値モデルでは、そのような急峻な斜面や崖の近傍では誤差が大きく、数値計算が不可能または無意味となることが分かっているため、急峻地形の問題は計算機能力の向上に見合ったさらなる大気数値モデルの高精度化の前に立ちふさがった高い壁となっていた。この障害を突破し、急峻複雑地形上で精度良く計算可能な大気数値モデルを開発することが大気科学での緊急の課題であるが、これまでに物理的にきちんとした計算手法の実装どころか提案さえもなかった。

申請者は、大気数値モデル内の急峻地形を物理的にきちんと取り扱う手法の開発と実装を行い、種々の急峻なモデル地形上で精度良い大気の流れの計算に成功した。それは、既存の手法（直交直線座標系での結合カットセル法）に予報変数の独特な格子点配置を組み合わせ、計算負荷もアルゴリズムの複雑さも低く押さえつつ精度良く複雑境界を扱えるようにしたものである。カットセル法を用いた大気数値モデルは既に複数提案されていたが、それらの手法は境界を非現実的に取り扱っており、計算精度上の問題を抱えていた。申請者が開発したモデルは、大局的に2次精度を保ちつつ境界を物理的に合理的な方法で取り扱う初めての直交直線格子大気数値モデルであり、高く評価できる。

また、大気数値モデルで必須となる地上付近の大気境界層内の鉛直高分解能化について、これまでの直交直線格子モデルでは複雑地形上で実際に実行可能な鉛直高分解能化手法が提案されていなかった。申請者は、プログラムコードの並列計算効率を保ったままモデル下部境界付近のみ格子を細かくして計算負荷を下げるため、ツリー型データ構造を持つマルチブロック構造格子を採用し、さらに物理量の保存性と計算効率を両立させたアルゴリズムを考案した上で、世界で初めて大気数値モデルに実装することにも成功した。開発したモデルを複数のテストで検証し、並列性能と大局的な2次精度を保ったまま計算時間の大幅な削減が達成されていることも示している。

このように、本研究は申請者の大気数値モデル開発における優れた独創性の賜であり、申請者によって開発されたこの超高解像度モデルは、今後の大気科学の発展に大きな寄与をするものと、高く評価できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月24日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。