

学位論文の要約

重合格子法に基づく急峻地形解像大気モデルの開発

武村 一史

第1章 研究の背景と目的

急速な計算機の発達に伴い、大気モデルの高解像度化が進んでいる。高解像度での数値実験では地形が詳細に表現され、急峻複雑な地形が解像されることになる。現在、大気モデルの地形表現に広く用いられている地形準拠座標系では急峻地形上で格子の歪みに伴う深刻な誤差が生じることが指摘されている。急峻地形の表現の問題に対する先行研究の地形表現法は座標変換を伴わないデカルト座標系に基づくものと地形に沿って座標変換を行う境界適合格子に基づくものの大きく二種類に区分される。デカルト座標系に基づく地形表現法は、地形近傍にて解像度を高めにくいことや座標系が流れに沿わないため誤差が大きくなる問題があるが、境界適合格子に基づく地形表現法では地形近傍の解像度を高め易く座標系を流れに沿わすことも可能となる。境界適合格子に基づく地形表現では格子を適切に生成し、格子の歪みを軽減することによって急峻地形の表現を改善してきたが、高解像度での数値実験で現れる崖のような斜度が急激に変化する急峻地形において適切に格子を生成できない問題があった。そこで、本研究では数値流体力学分野で複雑境界の表現に用いられている重合格子法に着目し、重合格子法に基づき急峻地形の表現を行う非静力学モデルを開発した。

重合格子法は計算領域を複数の格子を重ね合わせて表現する手法であり、各格子は独立して計算を行った後に、重合領域にて格子間の情報交換のために互いに補間を行う。重合格子法の大気科学分野での利用は Yin-Yang (陰陽) 格子のような全球モデル上の全球表現に限られており、急峻地形の表現に適用するのは本研究が初である。地形準拠座標系や一般座標系では表現できない崖のような急峻地形が、重合格子法を用いて局所

的に格子を重ね合わせることで表現可能になる。しかし、重合格子法では格子間の補間の際に重合領域において保存性及び無振動性を損なう問題がある。保存性及び無振動性は物理的な特性を満たす適切な計算や数値振動の抑制による安定した計算につながり、非静力学モデルの性能として重要である。重合格子法の局所的な保存性及び無振動性を満たすためには移流スキームと補間法又は補正法が必要になる。移流スキームには局所的な保存性および無振動性を満たす Constrained Interpolation Profile Conservative Semi-Lagrangian Scheme with Rational function (CIP-CSLR 法) を用いた。大気科学分野では直交で準均一な Yin-Yang 格子を主な対象として補間法や移流補正法が開発されていたが、局所的な保存性と無振動性をともに満たすことができなかった。そこで、本研究ではフラックスに基づいた局所的な保存性及び無振動性を満たす補間法を開発した。

はじめに第 2 章にて保存性及び無振動性を考慮せずに重合格子法に基づく非静力学モデルを開発及び検証した。続いて局所的な保存性及び無振動性を満たすために、第 3 章にてフラックスに基づいた新たな補間法の開発及び検証を行い、第 4 章にて非静力学モデルへの実装及び検証を行った。

第 2 章 重合格子法に基づく非静力学モデルの開発

第 2 章では重合格子法に基づく非静力学モデルを開発し、急峻地形の表現に関して従来の地形表現法と比較した。格子間の情報交換のために行う補間の際には、大気の成層性に伴う鉛直方向の補間誤差を避けるために密度や温位のような熱力学変数は擾乱成分のみの補間を行った。山岳波の数値実験から、従来の地形表現法では深刻な誤差が生じる急峻山岳に対して重合格子法を用いることで適切な計算が可能になることが示された。特に、一般座標系では表現できない斜度が急激に変わる崖を模した急峻な地形上で山岳波の定性的な再現に成功している。また、補間法の精度向上は非静力学モデル全

体の精度向上につながらず、非保存性補間法には双線形補間で十分であることが示された。

第 3 章 局所的な保存性及び無振動性を満たす補間法の開発

第 3 章では重合格子法の保存性及び無振動性を満たすフラックスに基づいた補間法を開発し、移流実験により検証を行った。本研究で開発した補間法は先行研究の保存性補間法と移流補正法の考えを組み合わせしており、保存性補間法に基づき保存性を満たすための補正値を算出し、移流補正法に基づき無振動性を満たすように補正を行う。移流実験の結果から、開発した補間法は保存性と無振動性を満たし、先行研究の保存性補間法に比べて誤差を減少させることが示された。また、先行研究の保存性補間法では格子の歪みが激しい場合に流れが停滞し局所的な誤差が著しく増加したが、本研究で開発した補間法では補正を風下側に行うことで流れを停滞させず誤差の増加を回避したことが示された。これらの結果は、先行研究の保存性補間法に比べて開発した補間法が格子の歪みが生じる可能性のある重合格子法による地形表現に適していることを意味する。

第 4 章 開発した補間法の非静力学モデルへの実装

第 4 章では、第 3 章で開発した補間法を第 2 章で開発した非静力学モデルに実装し、検証を行った。保存性及び無振動性を満たすために移流スキームには CIP-CSLR 法を実装した。暖気塊の数値実験では開発した非静力学モデルは無振動性を満たす CIP-CSLR 法と補間法により数値振動を抑制し非常に安定して計算可能であること、開発した補間法を用いることで保存性を満たすことが示された。また、山岳波の数値実験から、開発した補間法が保存性及び無振動性を満たすために行う補正による誤差の増加は非常に小さく、顕著な誤差を生じさせることなく計算可能であることが示された。これらの数値実験の結果から、本研究で開発した非静力学モデル及び補間法は急峻地形上の保

存性, 無振動性を満たした計算を顕著な誤差を生じさせることなく可能にするものであると言える。

第 5 章 まとめ

第 2 章～第 4 章の結果から, 開発した重合格子法に基づく非静力学モデル及び補間法により, 従来の地形表現法では表現できない急峻な地形上で保存性及び無振動性を満たす計算が可能であることが示された。これは本研究が将来的に行われる急峻な地形を含む微地形の影響を取り入れた高解像度での数値実験の実現に寄与することを意味する。

本研究で開発した非静力学モデルを基礎として必要に応じて各種物理過程を実装することで急峻地形が様々な大気現象に与える影響の数値実験的な研究が可能となる。特に, 保存性及び無振動性を満たしているために, 雲微物理過程を実装することで, 水物質を含んだ降水の適切な計算が可能となる。これは, 急峻地形による上昇流や下降流の局所的な強化が降水の局所的な強化や分布に与える影響の研究につながる。