

カットセル大気モデルへの局所格子細密化手法の導入

*山崎弘恵・里村雄彦（京都大学大学院理学研究科）

1. はじめに

急峻な山岳の取扱い、高解像度大気モデリングにおける最重要の課題のひとつである。従来の地形準拠座標系による地形表現は、地形の勾配が大きいところで水平圧力勾配の計算に大きな誤差を生じさせる。そこで本研究では、直交直線座標系において複雑地形を取り扱うことができるカットセル法を導入した非静力学大気モデルの開発を進めている。カットセルモデルは、急峻な崖を含む幅広い斜度の斜面まわりの流れを精度良く再現できる一方、従来の地形準拠座標系モデルに比べて地面近くの境界層の解像度を局所的に高めることが難しい。そこで今回、ブロック構造のメッシュを用いた局所格子細密化手法をモデルに導入した。

2. 局所格子細密化手法

本研究では、まず、数値流体力学分野で用いられているマルチブロック構造の局所格子細密化手法 “Building Cube Method (BCM)” (Nakahashi 2003) に着目した。BCM では、計算領域は多数の Cube に分割され、各 Cube には Cell と呼ばれる等間隔直交格子が配置される (図 1)。すべての Cube にはその大きさに関わらず同数の Cell が配置されるため、Cube が小さくなるほど細かいメッシュが生成される。そのため、高分解能が必要な場所では Cube を再帰的に分割することで局所的に解像度を上げることができる。このとき、大きさの異なる Cube 境界では Cube の大きさの比が 1:2 になるように調整される。計算は Cube 単位で実行され、Cube 境界では隣接 Cube との物理量の情報交換が行われる。

BCM は、地形近傍で Cube の分割を繰り返すことにより、任意の複雑地形の地面近くにおける境界層の効率的な局所格子細密化を可能にする。さらにすべての Cube が同数の Cell を持つことで、Cube 毎の計算負荷が均等になり、並列計算に容易に対応することができる利点がある。一方、BCM を大気モデルに適用する上での課題として、大きさの異なる Cube 境界で物理量の保存性が崩れることがある。そこで本研究では、BCM に独自のフラックス修正アルゴリズムを導入することで保存性を持たせ、新たに Conserved Building Cube Method (CBCM) と名付けて 2 次元大気カットセルモデルに導入した (Yamazaki and Satomura 2011)。CBCM では、

各 Cube の境界に配置された Cube 境界フラックスを用いて、大きさの異なる Cube 間で交換されるフラックスをコントロールし、セル中心に配置された物理量を保存する (図 2)。また、格子の細分化にともなう計算時間の増大を最小限に抑えるため、Cube の大きさに比例した時間ステップを用いるサブサイクリング積分を導入している。Cube の細分化レベル l を $0 < l < l_{max}$ とするとき、時間ステップは、

$$\Delta t(l) = 2^{-l} \Delta t_0 \quad (1)$$

で表される。ここで $\Delta t_0 \equiv \Delta t(0)$ は最も大きな Cube に用いられる時間ステップである。時間積分は最も小さな Cube から開始され、レベル $l-1$ の Cube が 1 回積分される間にレベル l の Cube は 2 回積分される。

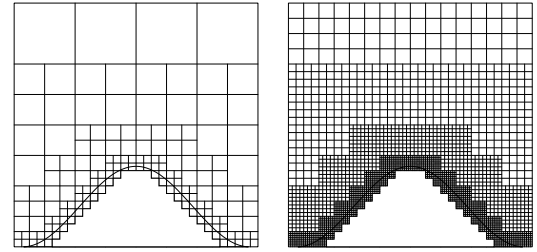


図 1 2 次元山岳まわりの Cube (左) と Cell (右) の例。ここでは各 Cube が 4 × 4 個の Cell をもつ。

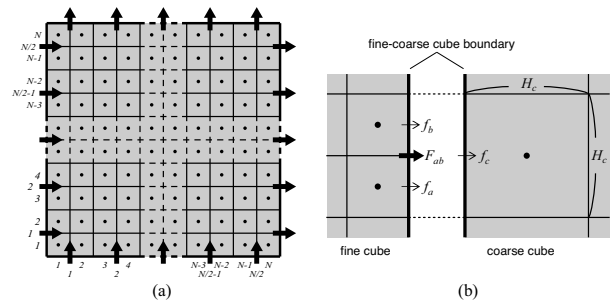


図 2 Cube 境界フラックスとフラックス修正アルゴリズムの模式図。太線は Cube 境界、細線は Cell 境界、太矢印は Cube 境界フラックス、細矢印は Cell 境界フラックスをそれぞれ表す。(a) Cube 境界フラックスの配置。(b) Cube 境界フラックス F_{ab} は、小さい Cube が 2 回積分される間の Cell 境界フラックス f_a, f_b の積算値を保持する。大きい Cube の積分計算では、Cell 境界フラックス f_c の値が F_{ab} の値で置き換えられて用いられる。

3. 検証実験

開発した局所格子細密化スキーム CBCM の性能を検証するため、以下の 2 次元数値実験を行った。まず、熱拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{for} \quad -L \leq x \leq L, \quad -L \leq z \leq L \quad (2)$$

を用いて、スキームの保存性と並列性能を検証した。正方形領域に図 3(a) のように Cube を配置し、初期条件として中央部の高温域を 1 に、その他の領域を 0 に設定して、温度の時間変化を計算した。また、領域境界では断熱条件となるよう、温度勾配を 0 とした。

100 時間後の実験結果を図 3(b) に示す。大きさの異なる Cube 境界でフラックス修正をしないときの実験結果 (図 3(c)) と比較すると、領域全体で温度が高く計算されている。そこで、両実験における領域平均温度の推移を計算したところ、フラックス修正をしないときの結果では 100 時間後の領域平均温度が初期状態の 85% 以下にまで減少しているのに対し、フラックス修正をした場合は一定に保たれていることが分かった (図 3(d))。このことから、CBCM に導入されたフラックス修正アルゴリズムが、局所細密化格子上で物理量の保存を実現していることが確かめられた。さらに、同実験について、6 コア AMD Opteron プロセッサを 2 基搭載した Linux PC による並列計算を行い、計算の高速化率を調べた。ここで、コードの並列化には OpenMP を用いた。結果を図 3(e) に示す。フラックス修正を用いた場合と用いない場合の双方の計算において、8 スレッド並列で約 80% の並列化効率を得られた。また、この結果から、フラックス修正アルゴリズムがスキーム全体の並列化効率に悪影響を及ぼさないことが確かめられた。

次に、2 次元移流方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{for} \quad -L \leq x \leq L, \quad -L \leq z \leq L \quad (3)$$

を用いてスキームの精度を検証した。計算格子は熱拡散実験と同じものを用い、領域境界は周期境界条件とした。初期値としてコサインベル型の擾乱を領域左下に配置し、擾乱が領域を斜めに伝播して $2L$ 秒で元の位置に戻ってくるように設定した。結果を図 4 に示す。コサインベルが様々な大きさの Cube 上を歪みや分断を生じさせることなく伝播する様子が再現された。また、1 周期後の計算結果を解析値と比較したところ、CBCM が大域的に空間 2 次精度を有していることが確かめられた。

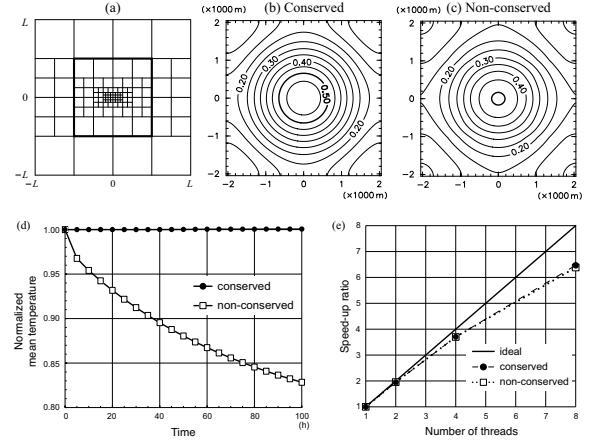


図 3 熱拡散実験の設定と結果。(a) 計算格子。実線は Cube 境界を表し、各 Cube に 64×64 個の Cell を配置した。太枠内は初期条件における高温域。(b) フラックス修正を導入したときと (c) 導入しないときの 100 時間後の温度場の計算結果。等値線間隔は 0.05。(d) (b), (c) における領域平均温度の時間変化。値は初期の領域平均温度で正規化したもの。(e) スレッド数に対する速度向上比の比較。

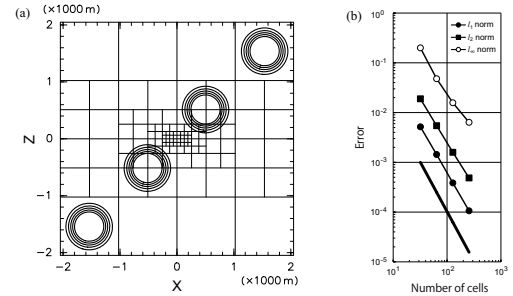


図 4 移流実験の結果。(a) 左下から順に $t = 0, L/2, L, 3L/2$ における高度場。等値線間隔は 0.2。(b) 各 Cube に $N \times N$ 個の Cell を配置し、 N を変化させたときの 1 周期後の計算誤差の推移。太線は 2 次精度に相当する傾きを表す。

4. まとめ

直交直線座標系大気モデルにおいて、地面近くの境界層の解像度を局所的に高めることを目的として、ブロック構造のメッシュを用いた局所格子細密化手法 CBCM を開発した。講演では、CBCM を導入したカットセル大気モデルによる山岳波再現実験の結果も併せて紹介する。

参考文献

- [1] K. Nakahashi, 2003: Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length. *Computational Fluid Dynamics 2002*, Springer, 77-81.
- [2] H. Yamazaki and T. Satomura, 2011: Nonhydrostatic atmospheric cut cell model on a block-structured mesh. *Atmos. Sci. Lett.*, doi:10.1002/asl.358, in press. [Available online at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asl.358/abstract>]