

z 座標系非静力学モデルによる山岳波の高解像度シミュレーション

*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

急速な計算機能力の向上にともない、大気数値モデルの高解像度化が進んでいる。現在は水平解像度数 km が主流であるが、今後は水平解像度数百 m の超高解像度シミュレーションが活発に行われると想定される。モデルの高解像度化にともなう難題のひとつとして、地形表現の問題があげられる。従来用いられている terrain following 座標系による地形表現は、急斜面のまわりで座標の歪みが大きくなるため、大きな打ち切り誤差が生じる。特に地形が急峻になりやすい高解像度シミュレーションにおいては、この誤差が実質的なものとなり、山付近に人工的な循環をつくり出すため (Sundqvist 1976)、このままでは地形に影響された局地現象を正確に再現することが出来ない。したがって高解像度モデルには、座標を歪ませることなく、例えば z 座標系のまま地形を表現するような方法が望ましいと考えられる。

z 座標系の地形表現として、これまで大気モデル及び海洋モデルで広く使われてきた方法に box cell 法がある (例えば Mesinger et al. 1988)。この方法は、地形をモデルのセルの大きさに合わせた階段状に近似するもので、急峻な地形でも座標を歪めずに表現することができる。しかし、この方法では水平鉛直解像度が非常に高い場合しか地形を正確に表現することが出来ない上に、なめらかな地形のまわりの流れを再現する際に大きなエラーをとまうことが指摘されている (Gallus and Klemp 2000)。

現実地形を高解像度で扱うためには、なめらかな地形と急峻な地形の双方のまわりの流れを精度良く再現できるような地形表現を用いる必要がある。そこで本研究では、もうひとつの z 座標系の地形表現である shaved cell 法を導入した 2 次元高解像度非静力学ドライモデルを開発した。

2 開発したモデルの概要

shaved cell 法は、海洋モデルの地形表現として Adcroft et al. (1997) により提唱された方法で、地形に応じてカットされた非構造格子 'shaved cell' で

地形を表現し、離散化は有限体積法で行う。box cell 法と異なり、地形とセルとが任意の高さで交わることができるので、より連続的かつ正確に地形を表現することができる。この方法は Steppeler et al. (2002a) によって大気モデルにも応用され、ベル型のなめらかな地形のまわりの流れを、box cell 法のような大きなエラーを生じることなく、terrain following 座標系を用いて表現した場合と遜色なく再現できることが示されている。

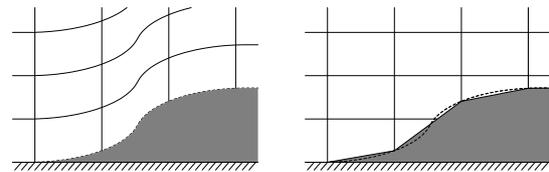


図 1 地形表現の概念図。(左)terrain following 座標系。(右)shaved cell 法。

shaved cell 法を導入する際の留意点として、地形によってカットされたセルが非常に小さくなった場合、CFL 条件により積分の時間間隔を極めて小さくとらなければならないことが考えられる。そこで本研究では、計算の安定性を損ねるほど小さなセルはひとつ上のセルと結合させることで CFL 条件を回避する方法を用いた。これにより、計算時間を抑えつつモデルの保存性を維持することが出来る。

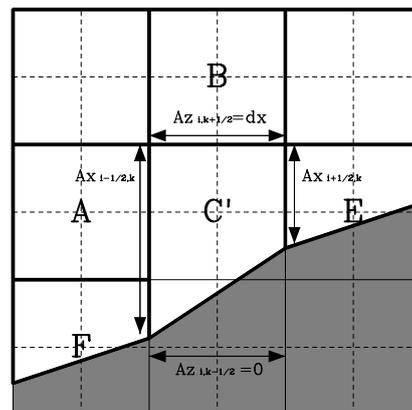


図 2 結合セルの例。結合セル C' は隣接するセル A・B・E・F とフラックスの交換を行う。

表 1 実験設定

	$a(m)$	$h(m)$	$N(s^{-1})$	$l(m^{-1})$	$dx, dz(m)$	$\theta(deg)$	$a * l$	$h * l$
A1	5000	100	2×10^{-2}	2×10^{-3}	1000, 50	0.57	10	0.2
A2	500	100	2×10^{-2}	2×10^{-3}	100, 50	5.7	1	0.2

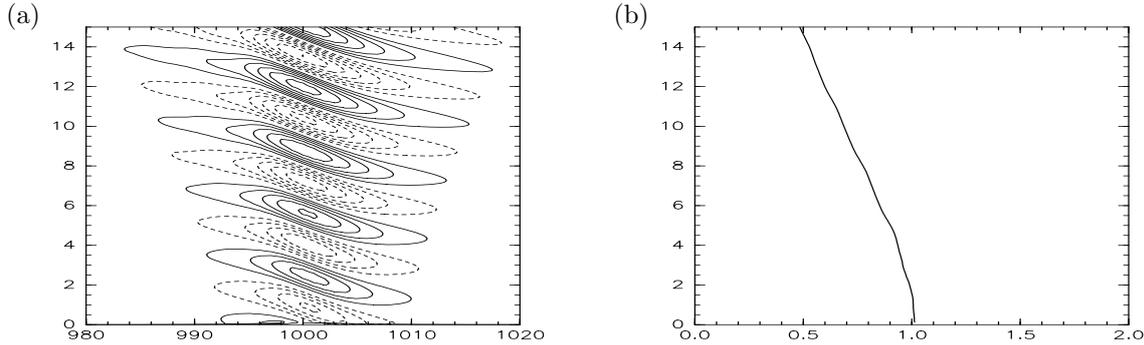


図 3 A1 の積分開始から 5 時間後の結果。(a) 山岳波の鉛直風。コンター間隔は $0.05m/s$ 。(b) モデルの鉛直運動量フラックス。

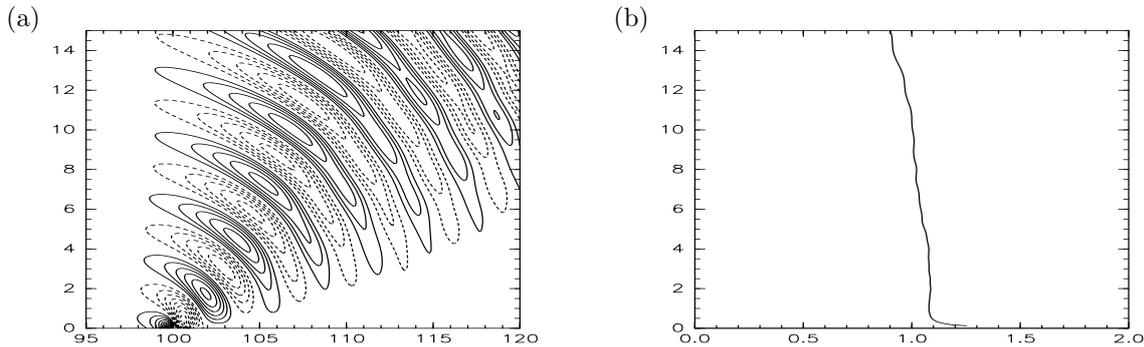


図 4 A2 の積分開始から 2 時間後の結果。(a) 山岳波の鉛直風。コンター間隔は $0.1m/s$ 。(b) モデルの鉛直運動量フラックス。

さらに、shaved cell 法が有限体積法に基づいていることに着目し、モデルの支配方程式系として準フラックス形式完全圧縮系方程式 (Satomura and Akiba 2003) を採用した。フラックス形式の方程式系は、保存性が良い点で有限体積法に適しているため、shaved cell 法と組み合わせることにより高解像度かつ高精度なシミュレーションが可能となる。

3 実験設定と結果

shaved cell 法による地形表現の妥当性を評価するため、水平風速と浮力振動数一定の大気中におけるベル型孤立峰による山岳波の再現実験を行った。実験の設定条件は Satomura et al. (2003) による急斜面モデル比較プロジェクト (St-MIP) を参照し、まずは表 1 に示すような緩斜面を持つ 2 つの山 A1, A2 について行った。ここで初期水平速度は $u_0 = 10m/s$ とした。実験結果を図 3, 図 4 に示す。A1, A2 とともに鉛直風の再現結果は線形論と良く一致している。山岳

波による運動量の鉛直フラックスも計算したが、それぞれ実験開始から 5 時間後、2 時間後には線形論に近い値となった。これにより、モデルの力学過程及び地形表現の妥当性が示された。

4 まとめ

地形に影響された局地現象を高解像度かつ高精度に再現することを目的として、 z 座標系の地形表現である shavedcell 法を用いた高解像度非静力学モデルを開発した。 z 座標系の地形表現は急峻な地形に対してもエラーを生じることがないため、地形が急峻になりやすい高解像度モデルに適していると考えられる。また、準フラックス形式完全圧縮系方程式を採用しているため、保存性が良い点が本モデルの特徴である。

講演では、斜度が 45 度を超えるような急峻な山による山岳波再現実験の結果も併せて紹介する予定である。