

水平格子間隔 5km の asuca から見えてきた問題とその解決

松林 健吾、原 旅人、荒波 恒平、河野 耕平、伊藤 享洋、倉橋 永、石田 純一
(気象庁予報部数値予報課)

1 はじめに

気象庁では 2007 年に次世代非静力学モデル asuca の開発を始め、2015 年 1 月に水平格子間隔 2km の現業モデル(局地モデル:LFM)の予報モデルを従来の JMA-NHM(Saito et al., 2006) から asuca へと変更した(Aranami et al., 2015)。現在は、水平格子間隔 5km の現業モデル(メソモデル:MSM)への asuca 導入を目指して開発を進めているが、その中で様々な問題が顕在化してきた。ここでは、これらの問題について紹介する。

2 asuca の概要

asuca は、

- 近年の数値流体計算の知見を元にした手法を用いることによる計算安定性と精度の向上
- 近年の計算機に最適化した設計
- 開発の効率化

を目指して開発を進めたものであり、力学フレームとして有限体積法による空間離散化、RK3 による時間積分、風上 3 次差分と flux limiter による移流スキームを採用している。また、スカラ計算機に最適化した設計を行うことで、従来の JMA-NHM に対しておよそ 70% 以下の計算機資源で LFM を実行することが可能となっている。さらに、物理過程を asuca とは独立にライブラリ化することで各物理過程単体での開発・テストがしやすいように設計しており、開発の効率化につながっている。

3 5kmMSM としての asuca の開発

前述の通り、これまで水平格子間隔 2km のモデルとして asuca を開発してきたが、現在は 5km 格子間隔モデルへ拡張するために開発を進めている。低解像度モデルから高解像度化を進めていくというプロセスが一般的であるのに対し、現在我々が取り組んでいる開発はその逆に当たる。その開発過程においては、高解像度モデルでは格子平均値で表現できていた現象を、低解像度モデルではパラメタリゼーションによって評価する必要がある。

3.1 物理過程の解像度依存性

ある予報変数 ϕ 、風速 w の格子平均値を $\bar{\phi}$ 、 \bar{w} とすると、格子平均のフラックスは $\overline{w\phi} = \bar{w}\bar{\phi} + f'_\phi$ で表される。一般的に $f'_\phi (= \overline{w'\phi'})$ は 0 ではなく、格子平均値で表現できない輸送、すなわちサブグリッドスケールの輸送を表す。この f'_ϕ を求めることがパラメタリゼーションに相当し、解像度に応じて評価すべき f'_ϕ は変わってくる。このため、低解像度化を行う際にはただ高解像度モデルと同じ物理過程を用いて水平格子間隔だけを変えるのではなく、解像度に応じた物理過程を考える必要がある。

例えば、水平格子間隔 $\Delta x = 2\text{km}$ 程度以下の高解像度モデルでは、格子平均の鉛直流 \bar{w} で対流による鉛直輸送を表現できる、すなわち $f'_\phi \simeq 0$ であるとして、積雲対流パラメタリゼーションを使用しない場合が多い。しかし、 $\Delta x = 5\text{km}$ 程度以上の低解像度モデルでは対となる上昇流と下降流がどちらも 1 格子の中に入ってしまうため、格子平均の鉛直流が非常に小さくなる。つまり、 $\bar{w} \simeq 0$ となるため、熱・水蒸気の鉛直輸送が格子平均値では計算されない。このため、低解像度モデルでは鉛直輸送による f'_ϕ を見積るために積雲対流パラメタリゼーションを用いることが必須となっており、その影響は非常に大きい。

3.2 これまでに分かった問題と改良

これまで 5km 格子間隔の asuca を開発してきた中で、物理過程の解像度依存性を考慮した開発として以下のような調査・改良を行ってきた。

- 積雲対流スキームの基礎特性調査(1次元テストを活用)
- 格子内の物理量の非一様性を考慮した雲物理過程

また、次のように Δx や積分時間間隔が大きくなったことで顕在化した問題もある。

- 雲物理過程の計算安定性の問題
- 一般座標系の離散化における問題

ここでは、これらの中で、積雲対流スキームの特性調査及びそこから見えてきた問題と、 Δx が大きくなることで顕在化した一般座標系の離散化における問題について取り上げる。

4 積雲対流スキームの 1次元テストを活用した基礎調査

前述の通り、 $\Delta x = 5\text{km}$ のモデルでは積雲対流パラメタリゼーションは重要な役割を担う。このため、現在 MSM で使われている積雲対流スキーム(Kain Fritsch スキーム; Kain and Fritsch (1990)) について 1次元テストなどを用いて調査を行なっている。その中で様々な問題が明らかになった。

例えば、Kain Fritsch スキーム内で計算する積雲の上昇流が強く(場合によっては 20m/s 以上)、その結果、現実大気における積雲の雲頂に比べてサブグリッドスケールの積雲の雲頂が明らかに高すぎる(同 18km 以上)、といったことが分かった(図 1)。これは、サブグリッドスケールの積雲におけるエントレインメントにより上昇流が弱められる効果などが適切でないことを示唆するものである。

さらに、熱帯アマゾンを想定した鉛直 1次元モデルによる理想実験(TRMM-LBA; Grabowski et al. (2006))の結果から、浅い対流から深い対流への遷移が不自然で

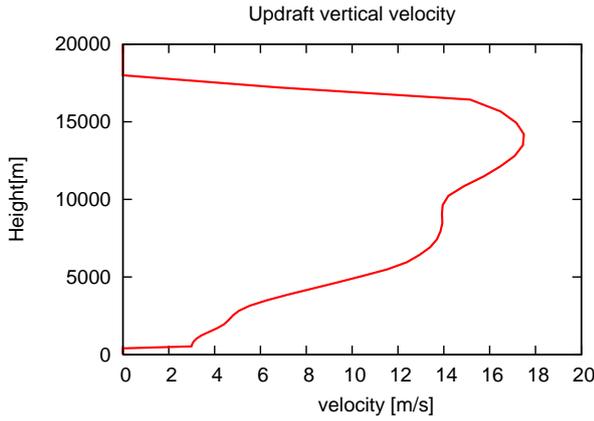


図1 MSMの積雲対流スキームにより計算されるサブグリッドスケールの積雲の上昇流の鉛直プロファイル(赤線)。LNBは約13500mであるのに対し、雲頂が18km程度まで達している。

あることなどが分かり(図2)、対流の強さを決める手法が浅い対流と深い対流で異なることに問題があることが分かった。

また、これまでMSMでは山の風上斜面や海岸に沿った降水を予想し続けるということが問題となっていたが、1次元テストを元に得られた知見から、海上から不安定な成層の空気が流入する場合に、海上では積雲対流スキームが働かず、山の風上斜面や海岸に到達した途端に積雲対流スキームにより蓄積されたCAPEが開放されていることが原因であると判明した。これは、サブグリッドスケールの対流が生じるかどうかを診断するトリガーという仕組みに問題があると考えられる。

このように、1次元テストを用いた調査を行うことで、個々の物理過程の性質や問題点が明らかになってきており、それぞれの物理過程の相互作用に対する理解も深まっている。

発表では1次元テストを元にした調査やその結果を紹介し、そこから得られた問題点について議論を行う。

5 メトリックの離散化における問題

asucaでは一般座標系を採用しており、気圧傾度力は次のように表される。

$$\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \hat{x}^n} p \quad (1)$$

p は気圧を表し、 $\partial \hat{x}^n / \partial x^i$ は実空間 x^i と計算空間 \hat{x}^n の変換を行うメトリックというファクター、 J は計算空間と実空間のセル体積比に当たる。ここで、運動量の保存性を高めるために、

$$\frac{\partial}{\partial \hat{x}^n} \left(\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i} \right) = 0 \quad (2)$$

という関係を用いて、式(1)を

$$\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \hat{x}^n} p = \frac{\partial}{\partial \hat{x}^n} \left(\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i} p \right) \quad (3)$$

としてフラックス形式にし、離散化を行っている。

しかし、離散化したモデル内の $\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i}$ が、

$$\left[\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^1}{\partial x^i} \right]_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^2}{\partial x^i} \right]_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^3}{\partial x^i} \right]_{k-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = 0 \quad (4)$$

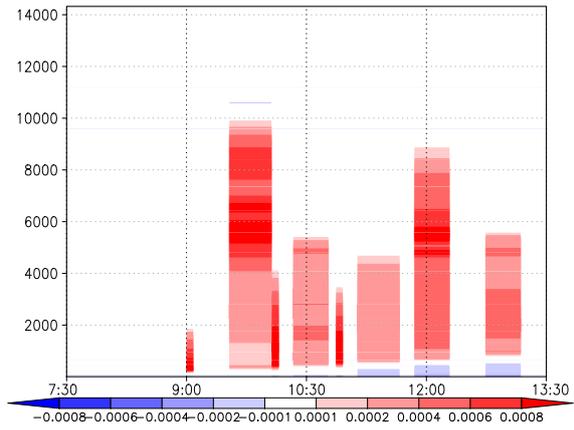


図2 TRMM-LBAによるMSMの積雲対流スキームによる温位時間変化率。縦軸は高度、横軸はローカルタイムを表す。雲頂が高度4000mより低い浅い対流と、高度4000mより高い深い対流で時間変化率が大きく異なることが分かる。

すなわち、式(2)の関係を満たしておらず、気圧傾度力の計算に誤差が生じていることが判明した。格子間隔が大きいほど J は大きくなるため、メトリックの差分誤差は大きくなる。このため、2km格子間隔でモデルを開発していた際には誤差が比較的小さく、また予報時間が短いために問題が顕在化しなかったが、5km格子間隔にした際に高度場の誤差が非常に大きくなる(12時間予報の500hPaの高度場で-30m~30mの誤差)という形で顕在化した。

式(4)を満たすように $\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i}$ を離散化すればよいのであるが、曲がった実座標系に対して $\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i}$ をどのように離散化すべきかは、まだはっきり分かっていない。このため、式(3)によらず式(1)のまま離散化することで気圧傾度力におけるメトリックの誤差が生じないようにしている。

しかし、式(1)はフラックス形式になっていないため、運動量が保存しない。運動量の保存性を高めるため、式(2)を満たすメトリックを作成するためにはどのように離散化すればよいか、現在調査を行っている。

参考文献

- Aranami, K., T. Hara, Y. Ikuta, K. Kawano, K. Matsubayashi, H. Kusabiraki, T. Ito, T. Egawa, K. Yamashita, Y. Ota, Y. Ishikawa, T. Fujita, and J. Ishida, 2015: A new operational regional model for convection-permitting numerical weather prediction at JMA. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling.*, **5**, 5–6.
- Grabowski et al., 2006: Daytime convective development over land: A model intercomparison based on LBA observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 317–344.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784–2802.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.