

気象庁における非静力学モデル asuca の開発状況

河野耕平¹、荒波恒平¹、原旅人¹、北村祐二²、室井ちあし¹

1: 気象庁予報部数値予報課、2: 気象研究所

1. はじめに

気象庁は、計算安定性、保存性、計算効率の向上を目指して新たな非静力学モデルの力学コアの開発に取り組んでいる。現在は、メソスケールモデルとしての実用に必要な物理過程を組み込み、その動作・問題点を確認しながら開発を続けているところである。

2. asuca の概要

2.1 力学コア

支配方程式は完全圧縮非静力学方程式系である。保存性に対する見通しをよくするためフラックス形式で記述される。方程式系は一般座標へ変換する。asuca の方程式系を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho u^i}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{x}^j} \left(\frac{\rho u^i \hat{u}^j}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{x}^n} \left(\frac{1}{J} \frac{\partial \hat{x}^n}{\partial x^i} p \right) - \frac{\rho g^i}{J} = \frac{F^i}{J},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{x}^i} \left(\frac{\rho \hat{u}^i}{J} \right) = \frac{F_\rho}{J},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho \theta_m}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{x}^i} \left(\frac{\rho \theta_m \hat{u}^i}{J} \right) = \frac{F_{\rho \theta_m}}{J},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{x}^i} \left(\frac{\rho q_x \hat{u}^i}{J} \right) = \frac{F_{\rho q_x}}{J},$$

$$p = R_d \pi(\rho \theta_m)$$

予報変数は ρu , ρv , ρw , $\rho \theta_m$, ρ , ρq_x に座標変換のヤコビアン J の逆数が掛かったものである。 ρ は全ての水物質を含めた全密度、 q_x は水物質 x の密度と全密度 ρ の比である。乾燥大気と湿潤大気で同じ状態方程式を用いるために $\theta_m = \theta (\rho_d / \rho + \varepsilon \rho_v / \rho)$ を導入している（ここで $\varepsilon = R_v / R_d$ ）。水物質 x の移流速度 u_x は大気速度に対して相対的な落下速度を有する場合は両速度の和となる。上記の式の右辺 F には物理過程による変化項のほかコリオリ項、曲率項、水物質の落下による質量変化に関する項も含めている。

上記の方程式系を有限体積法で空間離散化する。水平方向には Arakawa-C 格子を、鉛直方向には Lorentz 格子を採用している。時間積分は3次の Runge-Kutta スキームを用い、音波項に対しては Split-Explicit 法 (klemp et al. 2007) を用いる。移流項の計算には単調性を保つよう流束制限関数 (Koren 1993) を用いた。落下する水物質は、各々の移流速

度（大気速度と終端落下速度の和）についての CFL 条件による制限に応じて time-split して時間積分する。表 1 に asuca と現行の気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) の力学コアの比較を示した。JMA-NHM に導入されている線形・非線形拡散、適応水蒸気拡散は asuca には導入していない。

2.2 システムデザインの特徴

ここに記しておくべきシステムデザインの特徴のひとつとして、変数の配列の次元のとり方を $a(nz, nx, ny)$ のように鉛直方向を表す次元 nz を先頭にしていることがある。これは、スカラ機を念頭に、鉛直方向に依存性のある処理においても外側の ny のループで並列化ができること、かつ外側のループ長が大きいと並列化効率が高くなること、カラムに含まれる必要な変数がキャッシュにのったまま計算を行える可能性が高まること、を期待したものである。特に鉛直方向にのみ依存性のある物理過程の組み込みにおいて、その効果が見込まれる。

3. 物理過程の組み込み

JMA-NHM に組み込まれている物理過程のうち、現業数値予報モデルにおいて使われているものと同様の放射過程、地表面過程、境界層過程、雲物理過程の asuca への組み込みを行った。物理過程の組み込みにあたって、

- ・物理過程はモデル予報変数を直接修正しない、
- ・鉛直カラムベースの物理過程については、鉛直 1 次元のループのみを内包する、
- ・物理過程内部でのみ必要な配列は、格子ごとに必要なものについては、鉛直 1 次元配列とする、
- ・OpenMP による並列化は外側の水平ループで行う、

等の事項を基本方針とした。

放射、地表面、雲物理過程は、鉛直 1 次元のモデルとして asuca とは独立に数値予報課で開発が進められている「物理過程ライブラリ」を利用している。このライブラリは上記の基本方針を完全に満たしており、そのまま利用可能である。境界層過程は、「物理過程ライブラリ」を利用するほか、asuca の一般座標方程式系に沿った独自の実装も進められている。

物理過程を組み込んだ asuca による計算結果の例を第 1 図に示す。計算の設定は、水平格子間隔 2km、積分時間間隔 20s、物理過程は気象庁現業メソモデル (MSM) と同等の放射、地表面、境界層、雲物理過程である。対流パラメタリゼーションは用いていない。第 1 図に示した事例は、夏の午後に山岳域を中心に発生した熱雷の事例である。ここに示すよう

に、地表面からの加熱に起因するような対流性降水も表現できるようになった。

上記と同じ計算設定で、関東付近の領域において毎日1回9時間予報を実行している。これまでの数カ月間にわたって実施してきたこの日々の実験において、計算不安定による異常終了は一度も発生しておらず、実用に耐えうる高い計算安定性を有するという感触を得ている。質量保存性については、物理過程の組み込み後も、水物質を含めた全質量についてモデル領域内の総質量変化とモデル境界における質量フラックス（側面境界、地上降水、地表面水蒸気フラックス）の総和とのつじつまが厳密に一致することを確認できている。物理過程を組み込んだことによる計算時間の増加については、想定した範囲（全体の計算時間の3割強）に収まっており、鉛直1次元の物理過程の組み込みにおいて懸念されたデメリット（サブルーチンコールの回数増）は顕在化していない。

4. おわりに

現在、実用のため必要な物理過程についてひとと

おりの組み込みが完了し、これによってメソスケールモデルとしての asuca の性能・問題点について JMA-NHM と比較して検証することが可能な段階となった。

講演では、開発状況および把握された性能・問題点のうちのいくつかについても報告する予定である。

謝辞

この開発は21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」の一環として行っています。

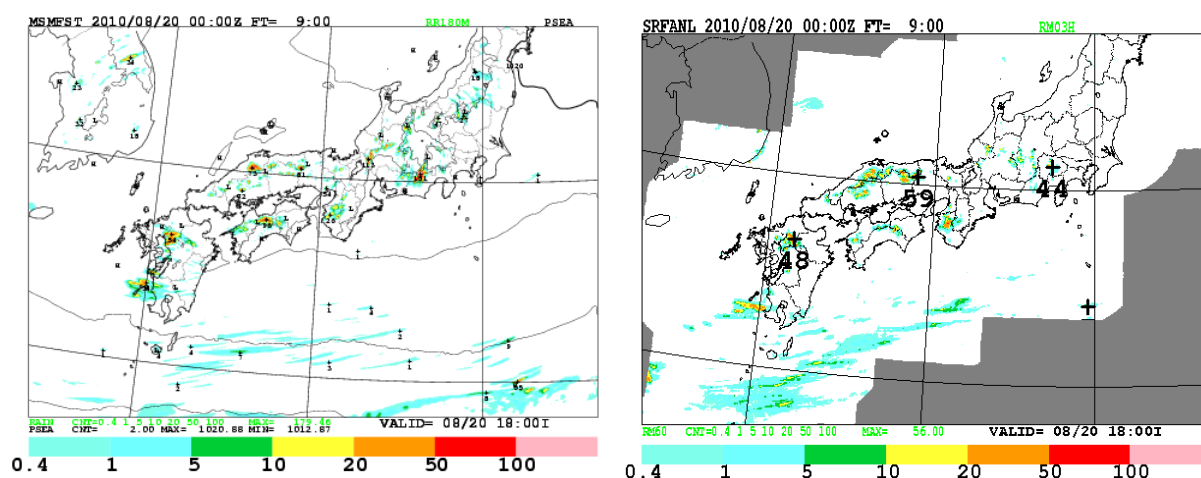
参考文献

Klemp, J. B., W. C. Skamarock, J. Dudhia, 2007: Conservative Split-Explicit Time Integration Methods for the Compressible Nonhydrostatic Equations. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 2897–2913.

Koren, B., 1993: A robust upwind discretization method for advection, diffusion and source terms. *CWI Report NM-R9308*.

	asuca	JMA-NHM
支配方程式	完全圧縮非静力学方程式系 (フラックス形式)	完全圧縮非静力学方程式系 (準フラックス形式)
予報変数	$\rho u, \rho v, \rho w, \rho \theta, \rho$	$\rho u, \rho v, \rho w, \theta, p$
空間離散化	有限体積法	有限差分法
時間積分法	Runge-Kutta 3 rd (Long・Short)	Leap-Frog and time filter (Long) Forward-backward (Short)
移流	流束制限関数 (Koren, 1993)	水平4次、鉛直2次+移流補正
座標系	一般座標系 / Map factor + 鉛直ハイブリッド	Map factor + 鉛直ハイブリッド
音波の扱い	Conservative Split-Explicit	Split-Explicit
水物質の落下	Time-Split	Box-Lagrangian

表1: asucaとJMA-NHMとの力学コアの比較



第1図 (左): asuca による予報結果 (3時間雨量積算雨量、海面更正気圧). 2010年8月20日00UTC初期値による9時間予報. (右): レーダーアメダス解析雨量.