

4-ICE バルク法微物理過程の開発

*橋本明弘 (気象研究所)・三隅良平 (防災科学技術研究所)・村上正隆 (気象研究所)・

Richard D. Farley (South Dakota School of Mines and Technology)

1. はじめに

非静力学モデルを用いた予報精度向上と降水メカニズム解明のためのモデル高度化の一環として、気象庁非静力学モデル(JMANHM)の微物理過程の精緻化に取り組んでいる。JMANHMには、大気中の水粒子として雲水・雨・雲氷・雪・霰の5つのカテゴリを仮定したバルク法に基づく微物理スキームが組み込まれているが、さらに電も予報する4-ICE微物理スキームを現在開発中である。開発中の4-ICEスキームの概要と初期結果を紹介する。

2. 4-ICEスキームの概要

粒径分布

従来からJMANHMに組み込まれていた3-ICEスキームは水粒子のクラス毎に異なる分布関数を用いていたのに対し、4-ICEスキームでは、これらを全てガンマ分布に置き換え、異なるクラスの間でパラメータや方程式を統一的に記述している。ガンマ分布を用いる利点は、パラメータの値に依って凸型から凹型まで様々な形状の粒径分布を表現できることであるが、この利点を全ての粒子クラスで活かせるようになった(図1)。これによって、雲・降水粒子の粒径分布に関する直接観測の結果等をモデルに反映させやすくなる。

微物理過程の詳細に関して、雲水・雨についてはCohard and Pinty (2000)、雲氷・雪・霰・雹については、概して、Ferrier (1994)に従っている。このため雲水・雨クラスを除き、JMANHM従来の3-ICEスキームとの整合性は考慮していない。

定式化の基礎

各粒子クラスの粒径分布 n_x を、3つのパラメータ

($N_{0x}, \lambda_x, \alpha_x$)のガンマ分布

$$n_x = N_{0x} D_x^{\alpha_x} \exp(-\lambda_x D_x) \quad (1)$$

で近似する。ここで、 D_x は粒子直径(m)、添字 x は雲水 c 、雨 r 、雲氷 i 、雪 s 、あられ g 、ひょう h を表す。3つのパラメータの内 N_{0x} 、 λ_x は、(3.3.2)式、(3.3.3)式を用いて、2つの予報変数 Q_x (混合比 kg kg^{-1})と N_x (数濃度 kg^{-1})からタイムステップ毎に診断する。残りの α_x は定数とする。

$$N_{0x} = \rho_a N_x \frac{\lambda_x^{1+\alpha_x}}{\Gamma(1+\alpha_x)} \quad (2)$$

$$\lambda_x = \left[\frac{\pi \rho_x N_x \Gamma(3+\alpha_x)}{6 Q_x \Gamma(\alpha_x)} \right]^{1/3} \quad (3)$$

雲水を除く粒子クラス $x(x \neq c)$ の直径 D_x の粒子の落下速度は、

$$U_x(D_x) = \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) a_x D_x^{b_x} \exp(-f_x D_x) \quad (4)$$

$$\rho_0 = 1.28 \text{ kg m}^{-3}$$

とおく。ここで、 ρ_a は湿潤空気密度である。粒子の質量 m_x については、粒子の形状に関する因子も考慮して、

$$m_x(D_x) = c_x D_x^{d_x} \quad (5)$$

とおく。4-ICEスキームにおける主要なパラメータを表1にまとめた。

表1. 4-ICEスキームにおける主要なパラメータの値

	cloud water	rain	cloud ice	snow	graupel	hail
α_x	4.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
a_x	—	842.0	71.34	8.966	19.30	143.8
b_x	—	0.80	0.66	0.42	0.37	0.50
c_x	$\pi \rho_c / 6$	$\pi \rho_r / 6$	440	$\pi \rho_s / 6$	$\pi \rho_g / 6$	$\pi \rho_h / 6$
d_x	3	3	3	3	3	3
f_x	0	0	0	0	0	0
ρ_x	1.0	1.0	0.9	0.1	0.4	0.9

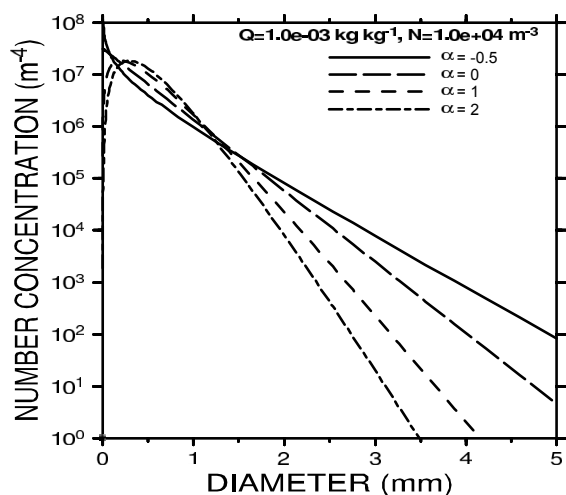


図1. シェイプパラメータ α と粒径分布の関係。

表2. 2007年5月10日つくばにおける降雹事例についてのモデル設定

計算領域	つくば市を中心とする 150 km × 150 km × 21.8 km
格子数	100 × 100 × 38
格子間隔	水平 1.5km、鉛直方向は最下層 40m–最上層 1240m の可変格子
時間間隔	5 秒
初期時刻	2007 年 5 月 10 日 5:00UTC
積分時間	4.5 時間
初期値・境界値	5km メッシュNHM(加藤 2007)
微物理過程	4-ICE

3. テスト

3 次元モデル

JMANHM に導入した 4-ICE スキームの初歩的な性能評価のために、2007 年 5 月 10 日関東地方に農業被害をもたらした降雹事例の再現実験(表2)を行った。2007 年 5 月 10 日 17-18 時(JST) 頃、茨城県内では 10 分間降水量最大 12 mm(下館アメダス) に達する降水が観測され、つくば市では 17 時(JST) すぎから数 10 分の間、降雨と一時降雹にみまわれた。レーダー観測によると、つくば市付近で最大 80 mm h^{-1} 相当のエコーが認められた。

モデル結果では、茨城県内で所により降雹を再現していた(図2)。モデルが再現した降雹量を換算すると、直径 5 mm 大のひょうが 1 m^2 あたり高々 7-8 個降った程度だった。降雹量の観測値はないが、目視による推定に比べると 1-2 桁小さいオーダーであった。降水量・降雹量の定量的な予測を除けば、降雹をおおまかに再現できていた。

パーセルモデル

4-ICE スキームの特性をより基礎的な観点から把握するために、パーセルモデルを使ってテストを行った。初期条件を気圧 1000hPa、気温 20°C 、湿度 80%とした場合(Ex.I)と、気圧 850hPa、気温 4.7°C 、湿度 63%とした場合(Ex.II)の2通りの実験を行った。空気塊の上昇速度はいずれも 5 ms^{-1} とした。空気塊を 1000hPa から持ち上げる Ex.I(図3a)では、凍結水滴が雲粒捕捉を通じて霰(赤実線)や雹(赤破線)を形成していた。一方、空気塊を 850hPa から持ち上げる Ex.II(図3b)では雲水量(青実線)が比較的少なく、不均質核形成によって生成された雪結晶(緑実線・緑破線)の昇華成長が卓越し、霰(赤実線)・雹(赤破線)の生成量はわずかだった。

この結果の妥当性をチェックするために、詳細な微物理過程を組み込み降水粒子の密度変化まで再現できる多次元ビン法パーセルモデル(Misumi *et al.* 2010)を、ほぼ同じ条件で実行した。ビン法による計算結果と比較すると(図略)、Ex.I では霰・雹の形成に関して概ね妥当といえる結果を得ていた。一方 Ex.II では霰・雹の過小評価が顕著であり、雲水が比較的豊富でない場合の霰・雹形成について改善の余地があることが分った。

4. 今後の課題

実大気実験を行い、実際の降水粒子の多様さをどれだけ表現できるかをチェックするとともに、パーセルモデルや 2 次元モデル等を持ちいた理想実験を行い、4-ICEスキームの基礎的な特性を把握する必要がある。

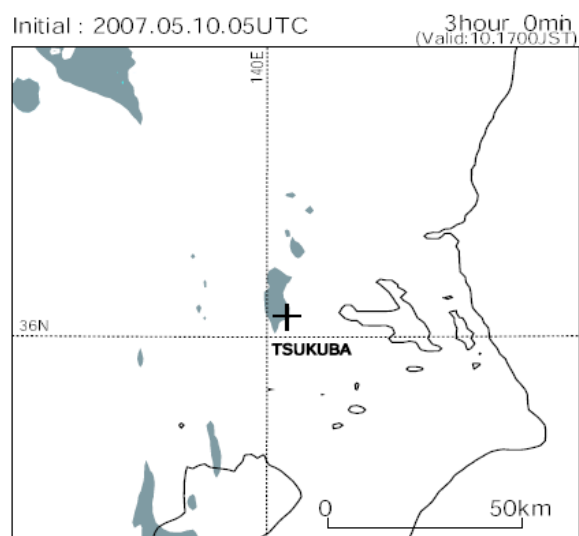


図2. 4-ICE 微物理スキームを組み込んだ JMANHM によって予想された降雹域。

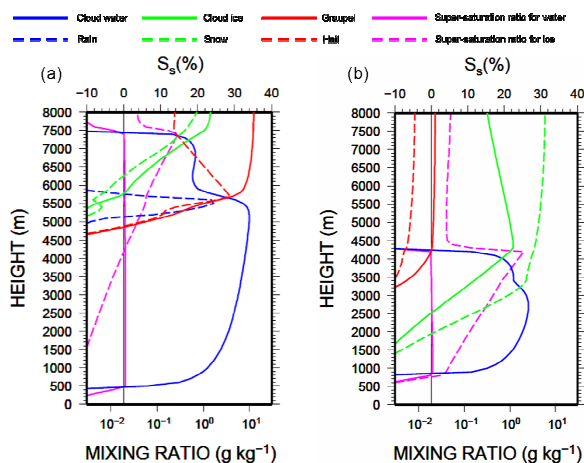


図3. 4-ICE スキームを用いたパーセルモデル実験の結果。5つの氷晶核パラメタリゼーションによる降水量予想値の分散。実線は分水嶺の位置。