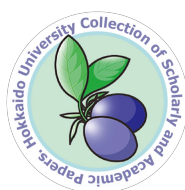




Title	高精度ビン法雲微物理モデルの開発
Author(s)	橋本, 明弘
Description	II. 詳細雲微物理モデルの開発と応用
Citation	低温科学, 72, 71-78
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55019
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_009.pdf



高精度ビン法雲微物理モデルの開発

橋本 明弘

雲・降水機構からエアロゾル-雲相互作用にわたる種々の素過程の精緻なモデル化を目的として開発された多次元ビン法雲微物理モデルについて解説する。このモデルは、エアロゾルや雲粒子の物理化学的属性を表すいくつかの物理量を多次元の格子空間に保持することで、2種類のエアロゾルの内部混合と外部混合をシームレスに取り扱うとともに、氷粒子の形状のみならず密度の連続的な変化を任意の解像度で表現できる。これによって、従来のビン法に比べて飛躍的に詳細なエアロゾル・雲・降水粒子の表現が可能となった。本稿では、モデルの概要を示した上で、雲核としてはたらく2種類のエアロゾルの外部混合比率が雲生成に与える影響を評価するための実験、バルク法雲物理過程改良のための基準参照モデルとしての活用を念頭においた実験の初歩的な結果について述べる。

Development of sophisticated bin-microphysics model

Akihiro Hashimoto

A new version of the multi-dimensional bin-microphysics model, which employs five dimensions to represent the diversity of physicochemical properties of aerosol, cloud and precipitation particles, was developed. The model is able to seamlessly represent internal and external mixings of two different aerosol components, and to express various shape and density of an ice particle in a given resolution. The model was incorporated into an adiabatic parcel model to perform two simulations. One simulation is to examine the sensitivity of cloud formation to the externally-mixing ratio of two types of cloud condensation nuclei. Another is to provide reference data for improvement of bulk microphysics model. This article shows brief description of the model and the simulation results.

1. はじめに

自然界で起きる様々な大気現象は、そこに存在する多種多様な粒子の物理化学特性の影響を受けている。大気放射におけるエアロゾル粒子・雲粒子の効果、相変化を伴いながら移流・落下する雲・降水粒子の熱・水循環に対する効果等についてよく理解し、適切なモデル化を行うことは、気象・気候モデルやリモートセンシング・リトリバル技術の高精度化を通じて、豪雨・豪雪・突風、気候変動、物質循環等の理解と予測に資する極めて重要な取り組みである。

大気中の粒子はそれぞれの化学組成・粒径・形状等の物理化学特性に応じて、たとえ同じ環境下でも異なる振舞いをする。このことが、モデル化において困難な点で

ある。つまり、適切なモデル化にあたって考慮すべき物理化学的属性が多岐にわたる上、それぞれの変化の振幅が大きいのである。実際のモデル化に当たっては、解くべき問題と利用可能な計算資源に応じ、現象を適度に粗視化した上で支配方程式を構成する必要がある。

雲微物理過程のモデル化には、バルク法・ビン法・粒子法に属す3つの手法がある(図1)。

バルク法は、ある空間内に存在する粒子群の総体としての状態を表す物理量(粒子の総数や総質量)を予報変数として時間発展を解く。粒子の多様さは、雲粒・雨滴・氷晶・雪片・霰・雹など、数種類のクラスを設けて限定的に表現される。粒子の成長や粒子間の相互作用は粒子サイズに強く依存するため、それらの定式化は、各クラスの粒子のサイズが対数正規分布やガンマ分布等の分布関数に常に従うと仮定した上でなされる。バルク法雲微物理過程は比較的計算コストが低いため多くの気象・気候モデルに組み込まれ大気科学研究に広く用いられるとともに(Lin et al. 1983; Rutledge and Hobbs 1984; Murakami 1990; Ikawa and Saito 1991; Ferrier 1994; Meyers et al. 1997; 村上, 1999; Morrison and Grabowski 2008), 世界各国の気象センターにおい

連絡先

橋本 明弘

気象研究所

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan

e-mail: ahashimo@mri-jma.go.jp

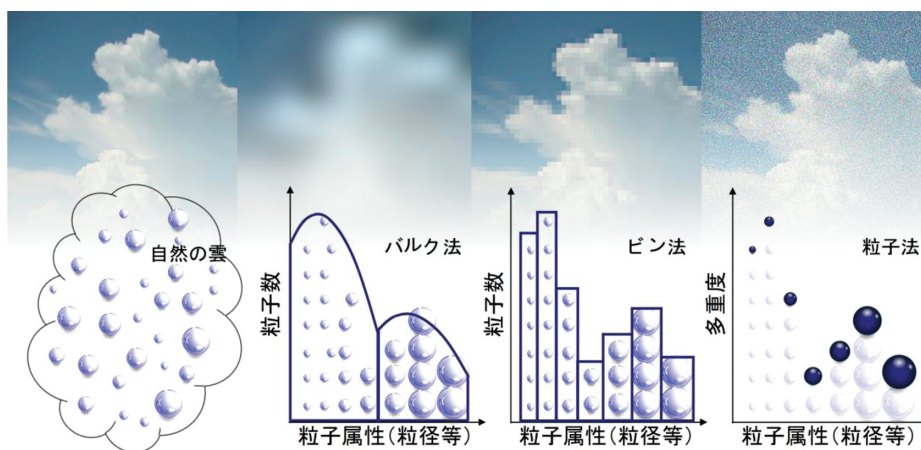


図1：バルク法・ビン法・粒子法における粒子属性の表現方法に関する概念図。

Fig. 1: Conceptual diagrams for the expression of attribute of particles in bulk, bin, particle methods.

て業務用モデルに導入されている。

バルク法に対してビン法は、通常、粒子サイズを離散化し分布関数の仮定によることなく支配方程式を解くことが特徴である (Takahashi 1976; Kogan 1991; Reisin et al. 1996; 川野 1999; Khain et al. 2004; 橋本 2009)。近年、地上・衛星リモートセンシング技術の進歩により、雲・降水粒子の形状等の物理特性に関する観測データが得られるようになってきたことから、粒子形状を含む多様な粒子特性を表現しうる雲微物理モデルの開発が進められている (Hashino and Tripoli 2007; Morrison and Grabowski 2010; Van Didenhoven et al. 2012)。さらに、雲の気候影響評価の観点からエアロゾル-雲相互作用に関する問題に対して精緻なモデルを用いたアプローチが望まれるようになった。ビン法は、より物理法則に忠実な解法である反面計算負荷が著しく大きいため、実際的な問題に適用するには莫大な計算資源を必要とするが、計算機性能が年々向上してきたことにより、研究面での利用が増えている (Feingold and Kreidenweis 2002; Hashino and Tripoli 2007, 2008, 2011a, b; Suzuki et al. 2010; Xue et al. 2010; Iguchi et al. 2012; Sato et al. 2012a, b)。

ビン法が、予め想定される粒径範囲に有限個のビン(格子)を配置して粒子状態の時間発展を解く、つまり、オイラー法にもとづくモデル化手法であるのに対し、粒子法は、粒子状態(位置・速度・サイズ・化学組成等)が同一な実粒子の集合を代表する仮想粒子を設け、ラグランジュ法によってその時間発展を解く (Shima et al. 2009)。この手法は、考慮すべき粒子属性の数が多い場合にビン法よりも効率的な計算が実現可能である。

本稿で述べるモデルは、ビン法の範疇に属すが、従来のものより多様な粒子状態を表現できるよう多次元の格子空間を設けた Chen and Lamb (1994, 1999) のモデルをもとにしている。彼らのモデルは、液滴に対して溶質質量と水質量の2次元、氷粒子に対して溶質質量・水

質量・アスペクト比の3次元の格子空間を設けている。アスペクト比の出現度数を十分な数の格子点で保持することで、氷晶の縦軸・横軸の成長率の温度による変化を連続的に表し、多様な氷晶の成長速度を精度よく表現できるのが特徴である。これを発展させ、表現できる粒子状態の多様性を拡張した、多次元ビン法雲微物理モデル (Misumi et al. 2010; 橋本ほか 2013) の概要と初歩的な計算結果を紹介する。

2. 多次元ビン法雲微物理モデル

多次元ビン法雲微物理モデルにおいて、液滴と氷粒子の粒子属性を表す変数 $\{x_j; j=1, 2, 3\}$, $\{y_j; j=1, 2, 3, 4, 5\}$ は、それぞれ、以下のものからなる。

$$x_j = \left\{ \begin{array}{l} \text{mass of water} \\ \text{mass of aerosol I} \\ \text{mass of aerosol II} \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$y_j = \left\{ \begin{array}{l} \text{mass of water} \\ \text{volume} \\ \text{aspect ratio} \\ \text{mass of aerosol I} \\ \text{mass of aerosol II} \end{array} \right\} \quad (2)$$

これらの変数により、液滴は3次元、氷粒子は5次元の格子空間が構成される (図2a)。それぞれの変数に対して生成すべき格子点の数 m_j , n_j は、要求される精度と利用可能な計算資源を考慮して決められる。各格子点上で評価される液滴・氷粒子に関する予報変数 $f_i(x_1, x_2, x_3)$, $g_i(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$ は、以下の要素からなる。

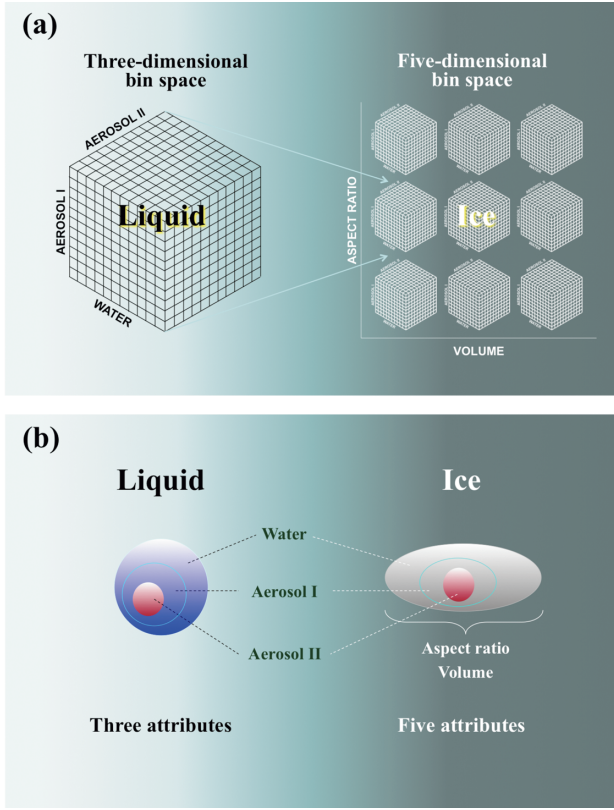


図2：(a)多次元ビン法の格子空間，(b)粒子状態を表す属性についての概念図。

Fig.2：Conceptual diagrams of (a) the grid space for multi-dimensional bin microphysics model and (b) the attributes of a particle.

$$f_i = \left\{ \begin{array}{l} \text{total number concentration} \\ \text{total potential energy} \\ \text{total heat} \\ \text{total mass of aerosol I} \\ \text{total mass of aerosol II} \\ \text{total mass of chemical element I} \\ \text{total mass of chemical element II} \\ \text{total mass of chemical element II} \\ \text{total mass of chemical element IV} \\ \text{total mass of chemical element V} \\ \text{total mass of chemical element VI} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$g_i = \left\{ \begin{array}{l} \text{total number concentration} \\ \text{total potential energy} \\ \text{total heat} \\ \text{total volume} \\ \text{total aspect ratio} \\ \text{total mass of aerosol I} \\ \text{total mass of aerosol II} \\ \text{total mass of chemical element I} \\ \text{total mass of chemical element II} \\ \text{total mass of chemical element II} \\ \text{total mass of chemical element IV} \\ \text{total mass of chemical element V} \\ \text{total mass of chemical element VI} \end{array} \right\} \quad (4)$$

液滴に含有される成分として、水の他に2種類のエアロゾル（水溶性のもの1種類と任意のもの1種類）が想定されている。水の質量が無視できるほど小さい格子点は、2種類のエアロゾルが内部混合した乾燥粒子に相当する。さらに、片方のエアロゾル種の質量が無視できる格子点は、単成分のエアロゾルに相当する。これにより、エアロゾルの内部混合と外部混合をシームレスに表現できる。混合した複数種のエアロゾルによる雲生成を再現できるよう、 κ -Köhler 理論に基づく定式化（Petters and Kreidenweis 2007）を導入した。図3は、過飽和度0.01, 0.1, 1%における、硫酸アンモニウム（ $\kappa=0.61$ ）と塩化ナトリウム（ $\kappa=1.28$ ）が混合した粒子の臨界条件を表している。ある割合で2成分が混合した粒子が、与えられた過飽和度で核化できるかどうかは、粒径と κ に依存して決まる。これと同様に、凝結成長率も粒径と κ に依存して決まる。

液滴の形状は球体と仮定される。一方、氷粒子は回転楕円体であると仮定され（図2b）、アスペクト比に与えられる最大値・最小値と格子サイズ（解像度）に応じて、どの程度多様な粒子形状を表現できるかが決まる。さらに、氷粒子の質量のみならず、体積も格子空間の構成要素としていることから、氷粒子の密度の多様性を表現できる。各格子点における液滴・氷粒子の時間変化率は次のように表せる。

$$\left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{m_j} = \left(\sum_{j=1}^3 \frac{dx_j}{dt} \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)_{m_j} \quad (i=1, 2, \dots, 11) \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial g_i}{\partial t} \right)_{n_j} = \left(\sum_{j=1}^5 \frac{dy_j}{dt} \frac{\partial g_i}{\partial y_j} \right)_{n_j} \quad (i=1, 2, \dots, 13) \quad (6)$$

$(dx_j/dt)_{m_j}$, $(dy_j/dt)_{n_j}$ は個々の粒子の成長率にあたり、液滴については雲粒核化・凝結／蒸発・衝突併合／衝突分裂・自然分裂、氷粒子については氷晶核化・昇華／蒸発・凝集・自然分裂、液滴・氷粒子双方に影響するものは雲粒補足・融解の各過程が考慮される（表1）。

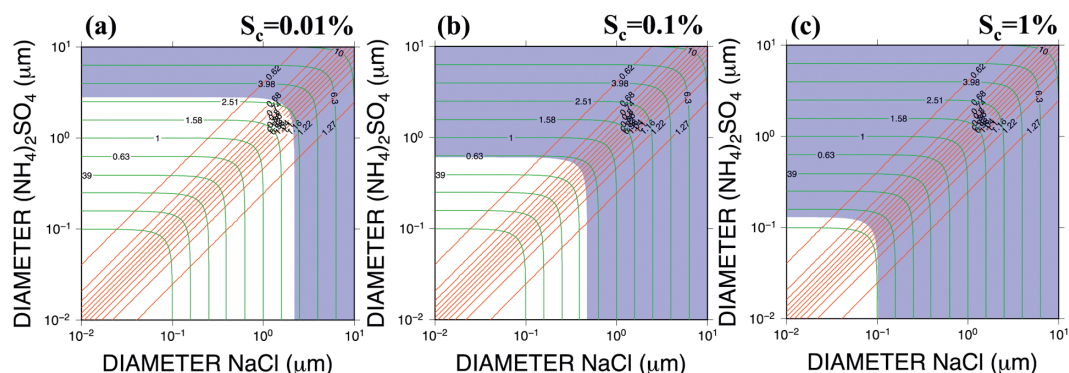


図3：過飽和度が(a)0.01%，(b)0.1%，(c)1％の場合における硫酸アンモニウム ($\chi=0.61$) と塩化ナトリウム ($\chi=1.28$) の混合粒子の臨界条件．赤線は χ ，緑線は混合粒子の直径．青と白の境界が混合粒子の臨界直径に当たる．

Fig. 3 : Critical condition of droplet nucleation for the mixed aerosol particles composed of ammonium sulfate ($\chi=0.61$) and sodium chloride ($\chi=1.28$) in the cases of super-saturation of (a) 0.01 %, (b) 0.1 %, and (c) 1 %. Red and Green lines indicate χ and diameter of a mixed particle, respectively. The boarder between blue and white areas indicates the critical diameter of mixed particle.

表1：モデルで考慮される微物理過程．

Table 1 : Microphysical processes involved in the model.

Related production terms	Microphysical processes
$\left(\frac{dx_j}{dt}\right)_{m_j}$	Droplet nucleation Condensational growth/Evaporation Collision coalescence/breakup Spontaneous breakup
$\left(\frac{dy_j}{dt}\right)_{m_j}$	Ice nucleation Depositional growth/Evaporation Aggregation Spontaneous breakup
$\left(\frac{dx_j}{dt}\right)_{m_j}, \left(\frac{dy_j}{dt}\right)_{m_j}$	Riming Melting

3. 吸湿性エアロゾル2成分系における雲生成に関する数値実験

多次元ビン法雲微物理モデルは、多様な物理化学特性に応じて雲核活性条件の異なる粒子の混合状態を表現できる．この点を活かし、硫酸アンモニウム粒子と塩化ナトリウム粒子の外部混合状態を初期条件とした雲粒生成実験を行い、吸湿度の異なる2種類のエアロゾルの存在比率がどのように雲粒生成に影響を与えるかを調べた．

3.1 実験設定

雲粒生成の初期段階を調べるため、雲粒に関する核化・凝結過程のみを考慮した断熱空気塊上昇実験を行った．空気塊の初期条件は、気圧 850 hPa、湿度 80%、温度 16°Cとした．硫酸アンモニウム粒子は対数正規分布に従うと仮定し、中央直径 0.1 μm 、分散 0.6、数濃度については 3000, 9000 cm^{-3} の2通りを与えた．塩化ナトリウム粒子についても対数正規分布を仮定し、中央直径 1 μm 、分散 1.0、数濃度は 1 cm^{-3} から 3000 cm^{-3} の間で値を変えて数通りの条件を与えた．それぞれについて、さらに、上昇速度を 0.3 m s^{-1} と 10 m s^{-1} の間で値を変え4通りの数値計算を行なった．液滴の粒子状態

を表す格子数は、水、硫酸アンモニウム、塩化ナトリウムの各質量に対して 45, 32, 32 とした．

3.2 結果

図4は、4通りの上昇速度について、雲粒の数濃度と質量荷重平均直径を塩化ナトリウム粒子の初期数濃度の関数として表している．塩化ナトリウム粒子が 1-10 cm^{-3} オーダーの場合、生成された雲粒の数濃度や粒径は硫酸アンモニウム粒子の活性化特性によって決まるが、塩化ナトリウム粒子の数濃度が 10 cm^{-3} 以上になると、塩化ナトリウム粒子の活性化特性の影響が徐々に表れ始め、100 cm^{-3} 以上で支配的となった．今後、室内実験との整合性を確認する必要があるものの、雲核特性の大きく異なる2種類のエアロゾル粒子が共存する場において、雲核活性を支配するエアロゾル種がどのような条件で入れ替わるかについて定量的な議論を可能にするアプローチとして期待できる．

4. 基準参照モデルとしての活用

多次元ビン法雲微物理モデルは、氷粒子の形状および密度の多様性を表現できることから、氷粒子成長に関し

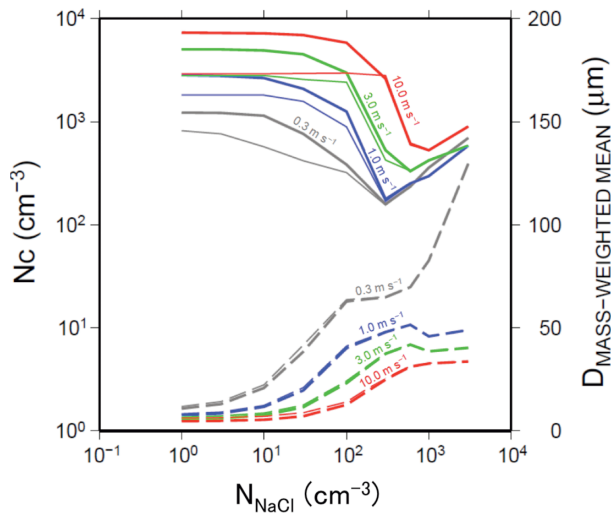


図4：雲粒数濃度（実線）と質量過重平均直径（破線）．それぞれ、初期高度から900 m, 600 m上昇後の値．濃線と薄線は、それぞれ、硫酸アンモニウム粒子の初期数濃度9000, 3000 cm^{-3} に対応．赤, 緑, 青, 灰色は、それぞれ、上昇速度10, 3, 1, 0.3 m s^{-1} ．

Fig. 4: Droplet number concentration (solid lines) and mass-weighted mean diameter (broken lines). The former and later are the values after 900-m and 600-m ascent from the initial point, respectively. Thick and thin lines correspond to 9000 and 3000 cm^{-3} , respectively, of initial number concentration of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ particles. Red, green, blue, and grey indicate the ascending speed of 10, 3, 1, 0.3 m s^{-1} , respectively.

てより簡易なモデルに対する基準参照モデルとしての活用が期待される．そのための取り組みとして様々な初期温度のもとで行った断熱空気塊上昇実験について述べる．

4.1 実験設定

気圧と湿度の初期条件を1000 hPa, 95%とし、初期温度については、 -8°C から 16°C の間を 4°C 毎に変化させ、7通りの数値計算を行った．空気塊の上昇速度は 4.0 m s^{-1} とし、積分時間は1500秒（上昇距離6000 m）とした．粒子状態を表す格子数は、水、水溶性成分、不溶性成分の各質量に対して、それぞれ、45, 16, 16とし、アスペクト比、体積に対して、それぞれ、16, 11

とした．

4.2 結果

氷粒子の質量と体積から粒子密度を求めた上で、アスペクト比・密度・質量の3つの属性を用いて、氷晶・雪片・霰・雹の4つの粒子タイプに分類した（表2）．水滴については、半径 $50 \mu\text{m}$ を境界として雲粒と雨滴に分類した．

図5aは、各初期温度（横軸）に対してそれぞれ断熱上昇の結果得られた、粒子タイプ別の混合比プロファイルである．縦軸は上昇中の空気塊の温度であり、各初期温度を始点（黒破線）として断熱冷却しつつ水粒子が生成されていく様子を表している．初期温度が比較的高い条件では、雲粒（青実線）生成に続く雨滴（青破線）生成の後に、霰（赤一点鎖線）・雹（赤二点鎖線）の生成が進むのに対し、初期温度が低い場合には雨滴生成はみとめられず、雲粒生成から氷生成へと移行していた．図5bは、同じ初期条件におけるバルク法モデル（橋本, 2008）の結果である．粒子タイプの定義は、概ね、表2と同様である．バルク法による結果は、多次元ビン法による結果に比べ、雲粒・雨滴・霰・雹の生成開始はよくあっているものの、雪片の生成がやや遅く、雲粒の消費が過小であった．この結果の相違は、粗視化の度合いが低く物理法則により忠実な解法である多次元ビン法に対して、バルク法の計算結果がどの程度劣っているかを示している．気象・気候モデルで広く用いられているバルク法雲物理過程の検証・改良のために、実験・観測との比較を通じたアプローチは重要であるが、その際、実験・観測結果とモデル結果との差がどのような原因によるか（見落とされた物理過程があるのか、モデル化手法に問題があるのか等）は明瞭でないことが多い．一方、より精緻なモデルとの比較を通じたアプローチは、モデル化手法（粗視化の度合い）の違いによってどれだけの差が生じるかを明瞭に評価できる点が優れており、実験・観測を通じたアプローチと相補的な位置づけで取り組まれるべきである．

従来のビン法は、バルク法と同様、氷粒子タイプを予

表2：氷粒子タイプの分類．
Table 2: Classification of ice particles.

Aspect ratio	Density (kg m^{-3})	Mass (kg)	Type
$0.8 < \alpha < 1.2$	$\rho < 2.5$	$m < 1.35 \times 10^{-10}$	Ice crystal
		$1.35 \times 10^{-10} < m$	Snowflake
	$2.5 < \rho < 0.8$		Graupel
	$0.8 < \rho$		Hail
$\alpha < 0.8, 1.2 < \alpha$	$\rho < 2.5$	$m < 1.35 \times 10^{-10}$	Ice crystal
		$1.35 \times 10^{-10} < m$	Snowflake
	$2.5 < \rho < 0.8$		Graupel
	$0.8 < \rho$		Hail

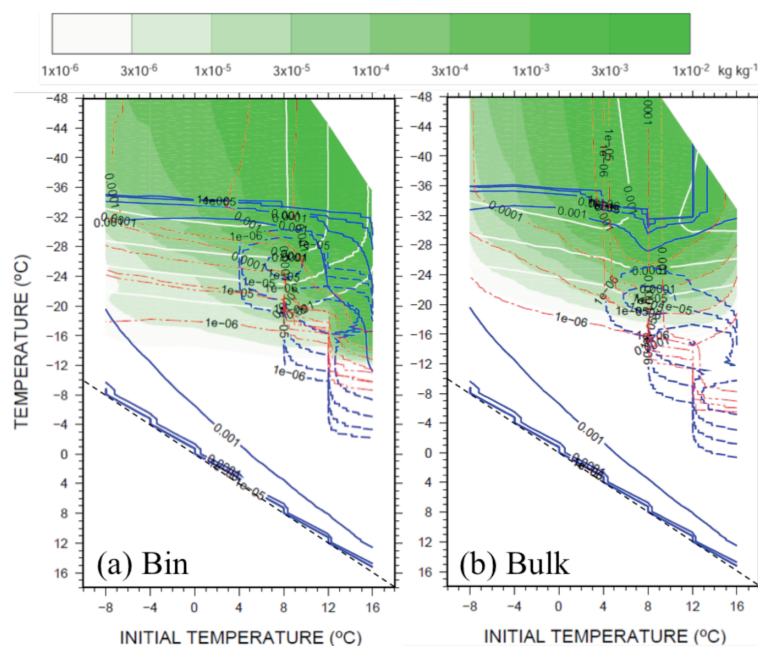


図5：氷粒子タイプ別混合比。横軸は初期温度，縦軸は上昇する空気塊の温度。緑の濃淡は，雪片の混合比。青実線・青破線は，それぞれ，雲粒・雨滴の混合比，赤一点鎖線・赤二点鎖線は，それぞれ，霰・雹粒子，白実線は氷晶を表す。

Fig. 5: Mixing ratio of each hydrometeor as a function of the temperature of ascending air parcel (ordinate) and its initial value (abscissa). Green shade indicates the mixing ratio of snow. Blue solid and broken lines correspond to cloud water and rain, respectively. Red dashed and double dashed lines indicate the mixing ratio of graupel and hail, respectively. White line corresponds to cloud ice.

め限定的に定義している。そのため，バルク法モデルの性能を評価する際に，粒子タイプの定義が両者の間で整合的であるかどうかが問題となる。一方，多次元ビン法雲微物理モデルは，粒子タイプを多次元のスペクトルとして定義しているとみなせる。このため，バルク法モデルの粒子タイプの定義に合わせて，計算結果から必要な成分を抜き出すことにより，粒子タイプ毎に厳密な比較が可能となった。多次元ビン法は，雲・降水粒子の多様性を表現するために，ビン空間を多次元化する方法である。他方，ビン空間の各格子点において予報される粒子特性を多変数化することで雲・降水粒子の多様性を表現する方法も提案されている (Hashino and Tripoli 2007; Morrison and Grabowski 2010)。今後，このような精緻化された手法によるバルク法雲物理過程の検証・改良が期待される。

5. まとめ

エアロゾルや雲粒子の物理化学的属性を表す物理量を多次元の格子空間に保持し，エアロゾル-雲相互作用および雲・降水過程による時間発展を精度良く計算するための多次元ビン法雲微物理モデルについて概説した。このモデルは，2種類のエアロゾルの内部混合と外部混合をシームレスに取り扱えるとともに，氷粒子の形状のみならず密度の連続的な変化を任意の解像度で表現できる。これによって，従来のビン法に比べて飛躍的に詳細なエアロゾル・雲・降水粒子の表現が可能となった。

本稿で述べた実験結果の他に，Misumi et al. (2010)はこのモデルを用い，対流性雪雲の雲・降水粒子の特徴と微物理過程について議論した。本号II章 (山下ほか)では，このモデルをもとに，エアロゾルを水溶性粒子と非水溶性粒子の内部混合粒子と定義し，ダスト粒子の雲核活性から氷晶核活性にわたる広範な条件下での数値実験を行った。さらに，HPCI (High Performance Computing Infrastructure) 戦略プログラム分野3 防災・減災に資する地球変動予測 (<http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/index.html>)において，多次元ビン法雲微物理モデルを気象庁非静力学モデル (NHM) に導入した多次元ビン法 NHM の開発と，それを用いた詳細雲物理実験への取り組みがなされている。今後，雲・降水機構はもとより，エアロゾル-雲相互作用に関する問題における活用と成果が期待できる。

謝辞

本稿で解説した多次元ビン法雲微物理モデルの開発は，国立台湾大学の Jen-Ping Chen 教授，東京大学大気海洋研究所特任研究員の久芳奈遠美博士，防災科学研究所の三隅良平博士，気象研究所物理気象研究部第一研究室 (現予報研究部第四研究室) の村上正隆博士をはじめとするスタッフ各位の協力のもと，文部科学省科学技術振興調整費「渇水対策としての人工降雨降雪に関する総合的研究」(平成 18-22 年度) の支援を受けて実施されました。 κ -Köhler 理論の導入にあたり，気象研究所

客員研究員山下克也博士から貴重な助言をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- Chen, J. -P., and D. Lamb (1994a) The theoretical basis for the parameterization of ice crystal habits: growth by vapor deposition. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 1206-1222.
- Chen, J. -P., and D. Lamb (1994b) Simulation of cloud microphysical and chemical processes using a multicomponent framework. Part I: Description of the microphysical model. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2613-2630.
- Chen, J. -P., and D. Lamb (1999) Simulation of cloud microphysical and chemical processes using a multicomponent framework. Part II: Microphysical evolution of a winter-time orographic cloud. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 2293-2319.
- Feingold, G., and S. M. Kreidenweis (2002) Cloud processing of aerosol as modeled by a large eddy simulation with coupled microphysics and aqueous chemistry. *J. Geophys. Res.*, **107** (D23) AAC 6-1-AAC 6-15. doi:10.1029/2002JD002054
- Ferrier, B. S. (1994) A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 249-280.
- Hashino, T., and G. J. Tripoli (2007) The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). Part I: Model description and simulation of the vapor deposition process. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2210-2237.
- Hashino, T., and G. J. Tripoli (2008) The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). Part II: Simulation of nucleation and depositional growth of polycrystals. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3071-3094.
- Hashino, T., and G. J. Tripoli (2011) The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). Part III: Description of the ice particle model and the habit-dependent aggregation model. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1125-1141.
- Hashino, T., and G. J. Tripoli (2011) The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). Part IV: Box model simulations of the habit-dependent aggregation process. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1142-1161.
- 橋本明弘 (2008) 4-ICE 雲微物理過程の導入, 数値予報課報告・別冊, **54**, 93-97.
- 橋本明弘 (2009) ビン法, 天気, **8**, 75-76.
- 橋本明弘, 山下克也, 村上正隆 (2013) 吸湿性エアロゾル 2 成分系における雲形成に関する数値実験. 第 30 回エアロゾル科学・技術研究討論会予稿集, A 18.
- Iguchi, T., T. Nakajima, A. P. Khain, K. Saito, T. Takemura, H. Okamoto, T. Nishizawa, and W.-K. Tao (2012) Evaluation of cloud microphysics in JMA-NHM simulations using bin or bulk microphysical schemes through comparison with cloud radar observations. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2566-2586.
- Ikawa, M., and K. Saito (1991) Description of a nonhydrotatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **28**, 238.
- Khain A., A. Pokrovsky, M. Pinsk, A. Seifert, V. Phillips (2004) Simulation of effects of atmospheric aerosols on deep turbulent convective clouds using a spectral microphysics mixed-phase cumulus cloud model. Part I: Model description and possible applications. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2963-2982.
- 川野拓也 (1999) Bin 法雲物理とモデルへの導入. 気象研究ノート, **196**, 85-102.
- Kogan, Y. L. (1991) The simulation of a convective cloud in a 3-D model with explicit microphysics. Part I: Model description and sensitivity experiments. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1160-1189.
- Lin, Y. L., R. D. Farley, and H. D. Orville (1983) Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Meyers, M. P., R. L. Walko, J. Y. Harrington, and W. R. Cotton (1997) New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. *Atmos. Res.*, **45**, 3-39. doi:10.1016/S0169-8095(97)00018-5.
- Misumi, R., A. Hashimoto, M. Murakami, N. Kuba, N. Orikasa, A. Saito, T. Tajiri, K. Yamashita, and J. -P. Chen (2010) Microphysical structure of a developing convective snow cloud simulated by an improved version of the multi-dimensional bin model. *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 186-191. doi:10.1002/asl.268
- Morrison, H., and W. W. Grabowski (2008) A novel approach for representing ice microphysics in models: description and tests using a kinematic framework. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1528-1548.
- Morrison, H. and W. W. Grabowski (2010) An Improved Representation of Rimed Snow and Conversion to Graupel in a Multicomponent Bin Microphysics Scheme. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1337-1360.
- Murakami, M. (1990) Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud: the 19 July 1981 CCOPE cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68** 107-128.
- 村上正隆 (1999) 雲の微物理パラメタリゼーション. 気象研究ノート, **196**, 57-84.
- Petters M. D., and S. M. Kreidenweis (2007) A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 1961-1971.
- Reisin, T., Z. Levin, and S. Tzivion (1996) Rain production in convective clouds as simulated in an axisymmetric model with detailed microphysics. Part I: Description of the model. *J. Atmos. Sci.*, **53** 497-519.
- Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs (1984) The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, **41** 2949-2972.
- Sato, Y., K. Suzuki, T. Iguchi, I. -J. Choi, H. Kadowaki, T. Nakajima (2012a) Characteristics of correlation statistics between droplet radius and optical thickness of warm clouds simulated by a three-dimensional regional-scale spectral bin microphysics cloud model. *J. Atmos.*

- Sci.*, **69**, 484–503.
- Sato, Y., T. Y. Nakajima, and T. Nakajima (2012b) Investigation of the vertical structure of warm-cloud microphysical properties using the cloud evolution diagram, CFODD, Simulated by a three-dimensional spectral bin microphysical model. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2012–2030.
- Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama, and S. Kawahara (2009) The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 1307–1320, doi:10.1002/qj.441
- Suzuki, K., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, and A. P. Khain (2010) A study of microphysical mechanisms for correlation patterns between droplet radius and optical thickness of warm clouds with a spectral bin microphysics cloud model. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1126–1141.
- Van Diedenhoven B. A., M. Fridlind, A. S. Ackerman, and B. Cairns (2012) Evaluation of hydrometeor phase and ice properties in cloud-resolving model simulations of tropical deep convection using radiance and polarization measurements. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3290–3314.
- Xue, L., A. Teller, R. Rasmussen, I. Geresdi, and Z. Pan (2010) Effects of aerosol solubility and regeneration on warm-phase orographic clouds and precipitation simulated by a detailed bin microphysical scheme. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3336–3354.