

全球非静力学モデルを用いた高解像度計算による気象擾乱の発生・発達メカニズムとその予測可能性に関する研究

課題責任者

那須野 智江 海洋研究開発機構 地球環境研究部門 環境変動予測研究センター

著者

清木 達也^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 地球環境研究部門 環境変動予測研究センター

キーワード：全球非静力学モデル，雲微物理過程，巻雲，レーダエコー，ドップラー速度

1. はじめに

本課題では、全球非静力学大気モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]; JAMSTEC および連携研究機関において共同開発)の高度化およびこれを用いた数値実験を行うことにより、雲に関する気候再現性を向上させるとともに、台風等の気象擾乱の発生・発達のメカニズムを明らかにし、それらの予測に関する知見を拡充することを目的とする。NICAMの特色は、全球において、雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する点である。

上記目的を達成するために、本課題では雲の微物理過程の精緻化を重点的に行い、全球的な雲放射分布の改善や台風等の気象擾乱に対するインパクトを示してきた (Seiki and Ohno 2023[2]; Seiki and Nagao 2024[3]; Seiki et al. 2025[4]; Nirasawa et al. 2026[5])。雲微物理過程の高度化においては、素過程の理論的理解と、観測に基づく実態把握が不可欠である。雲微物理過程の中でも、対流圏上層（高度 10km 以上）の巻雲（氷雲）内での氷粒子の成長過程については観測例が少なく、再現性の評価が難しい。本稿では、今回新たに開発した地上レーダ観測に巻雲内の雲微物理過程の評価手法およびこれを用いた NICAM の検証結果について報告する。

2. 雲微物理評価手法の開発

2.1 ドップラー速度観測が拓く雲微物理理解

降水粒子を含む雲微物理過程は、気候変動予測の精度向上に不可欠であり、衛星搭載雲レーダ観測の発展とともに理解が大きく進展してきた。W 帯雲プロファイリングレーダによるレーダエコーは、粒子の数濃度 N と平均粒径 $\bar{D}$ の双方に感度を持ち、特に雲粒から降水粒子への成長過程を捉える点で有効である。一方、ドップラー速度は粒子の鉛直運動を観測し、落下速度を通して平均粒径に感度を有する。このため、レーダエコーとドップラー速度を組み合わせることで、数濃度—粒径という独立した二つのパラメータ平面から雲微物理を理解できる利点がある。

2024 年に打ち上げられた EarthCARE 衛星は、W 帯ドップラーレーダにより雲内部の鉛直運動を全球規模で初めて観測可能とし、新たなプロセス指向解析の展開が期待されている。本研究はその先駆けとして、同周波数でドッ

ラー速度を観測可能な地上レーダを用い、特に巻雲における粒子成長過程を多変数で制約する手法の有効性を示すことを目的とする。

2.2 プロセス指向解析

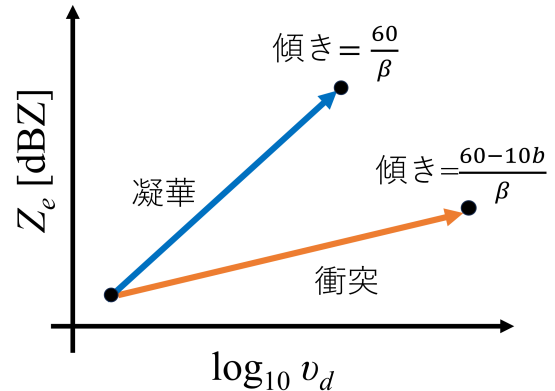


図 1. Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムの模式図。横軸に常用対数表記のドップラー速度 v_d 、縦軸にデシベル表記の等価レーダ反射因子 Z_e を取することで、傾きが雲微物理過程の情報を持つ。

ここでは、Seiki et al. (2025)が提案したプロセス指向解析手法で用いる Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムの説明を行う(図 1 参照)。レーダ反射因子 Z はレーダ反射強度を表す物理量であり、雲微物理パラメータに対して以下の依存性が有る：

$$Z \propto N \bar{D}^6 \propto M \bar{D}^{6-b}, (M \propto \bar{D}^b, 2 \leq b \leq 3) \quad (1)$$

ここで、平均質量濃度 M を平均粒径 $\bar{D}$ のべき乗で表している。次に、ドップラー速度 v_d が終端落下速度 v_t と等しいと仮定すると、 v_d を平均粒径に関係づけられる：

$$v_d \propto \bar{D}^\beta, (0.5 \leq \beta \leq 2) \quad (2)$$

ここで、 β は観測から求まる指数である。

まず、 Z のデシベル表記 ($Z_e = 10 \log_{10} Z$) に併せ、 v_d も常用対数表示にすることで、 Z_e と $\log_{10} v_d$ は相互に線形関係にあることが分かる。

$$Z_e \propto 10 \log_{10} M + (60 - 10b) \log_{10} \bar{D},$$

$$\log_{10} v_d \propto \beta \log_{10} \bar{D}.$$

これらの定義より、ある雲システム内の観測データを取得し、縦軸に Z_e 、横軸に $\log_{10} v_d$ の散布図(以降、 Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムと呼ぶ)を描くと、直径が増加する粒子成長過程では左下から右上の方へ観測点が推移していき、質量が増加する粒子成長過程だと下から上の方へと観測点が推移していくことが予想される。つまり、 Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムの傾き($\Delta Z_e / \Delta \log_{10} v_d$)の値によって、雲システム内における代表的な雲微物理過程を同定する事が原理的に可能である(図 1)。

Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムの傾きは、粒子成長に伴う Z_e と $\log_{10} v_d$ の変化の関係性であり、以下のように表記することが出来る：

$$\Delta Z_e / \Delta \log_{10} v_d = (10/\beta)(\bar{D}\Delta M / M \Delta \bar{D}) + (60 - 10b)/\beta. \quad (3)$$

式(3)の右辺第一項は平均粒径に対する質量の変化率を意味し、雲微物理毎に異なる振る舞いを示す。以降、この項を雲微物理感度項と呼ぶ。

例えば、衝突併合過程では平均粒径は増加する($\Delta \bar{D} > 0$)一方で、総質量は保存される($\Delta M \sim 0$)。つまり、雲微物理感度項はほぼ無視でき、傾きは右辺第二項の定数と一致する。他にも、凝華過程では数濃度が変化しない為、質量変化は粒径変化のみに起因する。この場合、式(1)より($\bar{D}\Delta M / M \Delta \bar{D}) = b$ となり、傾きは $60/\beta$ の定数になる。一般的に、雲システム内では単一の雲微物理のみによって支配されることはなく、例えば、傾きの値は凝華と衝突の中間的な値を取ることが予想される。

2.3 解析手法の検証

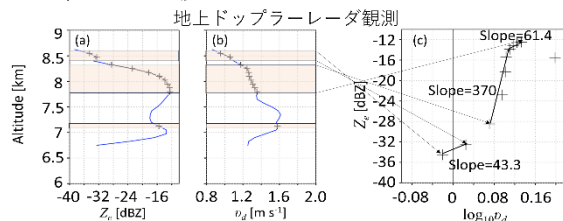


図 2. 地上ドップラーレーダによる Z_e および v_d 観測の 1 例。

本研究では、 Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラム解析手法の有効性を検証するため、情報通信研究機構 (NICT) が東京都小金井市で運用している地上ドップラーレーダ観測データと、高解像度全球気候モデル NICAM を用いた。地上観測については通年データを解析対象とし、NICAM シミュレーションについては、四季(春分・夏至・秋分・冬至)それぞれに対応する 1 週間積分の北半球中緯度域 (30° N - 45° N) のデータを用いた。

従来の雲微物理過程の検証では、雲微物理パラメータの鉛直分布を比較する手法が一般的に用いられてきた(図 2a, b)。しかし、このような鉛直分布の比較は視覚的判断に依存する部分が大きく、モデル性能の良否を定量的に評価することは必ずしも容易ではない。

これに対して、 Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラム解析では、分布の傾きを指標として定量的な評価が可能である。さらに、

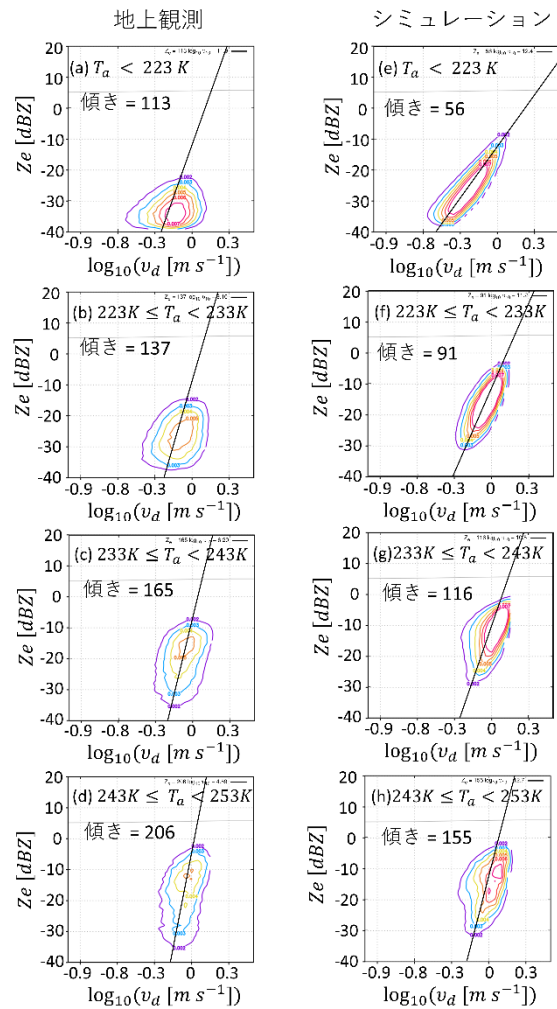


図 3. 地上観測データおよび高解像度気候シミュレーションから作成した Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムと、その傾きの比較。代表的な傾きは主成分分析による第一主成分として定義した。図は上から下へ、圈界面付近から順に気温が高くなる 4 つの気温帯においてサンプリングした巻雲内部の結果を示す。

雲頂から雲粒子が鉛直下方へ落下する過程において、傾きが急激に変化する様子が確認される(図 2c)。この変化は、鉛直方向において粒子成長を支配する主要な微物理過程が遷移していることを示唆している。

次に、1 年を通して多数の巻雲をサンプリングし、雲内における代表的な雲微物理過程が気温条件に応じてどのように変化するかを調べた。本解析では、雲頂付近で氷晶核形成により生成された微小な雲氷が、落下に伴って水蒸気の凝華成長および衝突成長を繰り返し、最終的に降雪に至る過程を想定している。解析手法として、 Z_e と $\log_{10} v_d$ の散布図に基づく Joint Probability Density Function (JPDF) を作成し、観測結果とシミュレーションによる Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラムの比較を行った(図 3)。

観測およびシミュレーションのいずれにおいても、雲層の代表気温が高くなるにつれて Z_e - $\log_{10} v_d$ ダイアグラ

ムの傾きが大きくなるという共通した特徴が認められた。2.2 節で示した粒子成長過程の解釈に基づけば、氷粒子の落下に伴い、水蒸気による凝華成長が次第に卓越していく様子を示唆している。この傾向は、レーダ反射因子 Z_e が混合比ではなく質量濃度に依存する量であることから、気温上昇に伴う水蒸気質量の増加に起因すると考えられる。

一方、両者を比較すると、すべての気温帯においてシミュレーションの傾きは観測よりも小さいことが分かった。この結果は、気候モデルにおいて凝華成長以外の粒子成長メカニズムが十分に表現されていない可能性を示唆している。こうした差異は、JPDF における分布の広がりやシミュレーションで小さいことにも現れており、モデル内では粒子成長過程の多様性が限定されていることを示している。

数値モデルでは、粒子形状や粒径分布関数の表現に全球様のパラメータが用いられており、自然界に存在する氷粒子成長の不規則性を十分に再現できていない。また、乱流がドップラー速度に及ぼす影響や、モデル格子内の空間的不均一性も考慮されていない。これら平均場からのずれが、非線形的な粒子成長を通じて、ドップラー速度とレーダ反射因子の共分散として可視化されていると考えられる。

このように、 Z_e - $\log_{10} u_d$ ダイアグラム解析は、気候モデルを定量的に評価するための指標を提供し、モデルが内包する不完全さを明確化する手法である。今後は、巻雲に限らず、全球に分布する多様な雲システムを対象とした解析へと発展させたい。さらに、W 帯よりも低周波数のドップラーレーダ観測へ適用することで、降水粒子の微物理過程の理解にも応用可能である。

3. 今後の展望

本稿で報告した、雲微物理過程の評価手法を衛星観測データに適用することで、地球上の巻雲内のプロセスについてモデル再現性を評価することが可能となり、EarthCARE 衛星データとの比較検証に関するモデル間比較プロジェクトも立ち上がっている。

本課題では、これまでに行った一連の雲微物理過程の改善を適用し、巻雲の気候変動に対する応答や、台風の強度変化に関する研究を進めている。台風や豪雨等の極端現象の気候的な特性や変動を理解し、変化傾向を予測するために、大気海洋結合モデルを用いた高解像度シミュレーションは必要不可欠である。今後、雲微物理過程の高度化と並行して、大気海洋結合モデルによる気候実験に向けたモデル開発も重点的に行う。

謝辞

これらの研究では、NICT との共同研究を基に提供された HG-SPIDER 地上観測データを利用した。また、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 第 3 回・第 4 回地球観測研究公募による支援を受けて行われた。数値実験は地球シミュレータを用いて実施された。

文献

- [1] Satoh, M., and 17 co-authors, “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development”, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, (2014).
- [2] Seiki, T., & Ohno, T., “Improvements of the Double-Moment Bulk Cloud Microphysics Scheme in the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM)”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 80(1), 111-127, (2023).
- [3] Seiki, T., & Nagao, T.M., “Evaluation of the aggregation efficiency modeling at colder atmospheric temperatures in comparison to satellite observations”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 81(10), 1689-1710, (2024).
- [4] Seiki, T., H. Horie, Y. Hagihara, and A. T. Noda, “Dominant Ice Cloud Microphysics Characterized by Simultaneous Observations of Radar Reflectivity and Doppler Velocity”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 82, 2677-2692, (2025).
- [5] Nirasawa, Y., T. Seiki, Y. Yamada, and C. Suzuki, “Impact of Aggregational Growth Modeling on the Intensification of Extreme Tropical Cyclones through Radiative Feedbacks”, *Atmospheric Science Letters*, 27, e70023. doi.org/10.1002/asl2.70023, (2026).