

2018年度秋季大会専門分科会

「雲微物理モデリングの現状と可能性」報告*

橋本明弘^{*1}・佐藤陽祐^{*2}・後藤俊幸^{*3}・齋藤泉^{*4}
 野田暁^{*5}・大西領^{*6}・島伸一郎^{*7}・端野典平^{*8}
 Woosub ROH^{*9}・清木達也^{*10}

1. はじめに

雲・降水粒子と、それに関わる素過程は、その粒子的な特性や相変化を通して、地球大気の大気熱・水循環に深く関わっている。それら粒子の振る舞いや素過程を理解することは、リモートセンシングによる地球環境監視や大気科学に関するモデリング研究等にとって重要な取り組みである。その理解を深めるための研究手法として、観測・実験・モデリングが挙げられるが、本分科会は、特に、モデリングにテーマを絞って講演を募った。その結果、10件の応募を得ることができ、大会3日目午前(10月31日09:30~11:30)に、C会場(仙台国際ホール展示・レセプションホール「桜2」)にて開催された。

雲微物理モデリングの歴史は、その創成期から数えると、今や概ね半世紀にわたっている。近年、新しい

モデリング手法や精緻で巨大な観測データの利用によって、雲・降水粒子の性状や素過程、乱流や放射との相互作用、種々の観測データによる物理パラメータの拘束等、一段と微物理的本質に迫る研究が進められている。それらモデリング研究の現状と将来にわたる可能性について、100人ほどの聴者とともに共有することができた。

(橋本明弘)

2. 講演概要

C301 雲乱流と雲微物理

雲粒子集団と乱流は様々な時空間スケールで相互作用しており、リチャードソンやコルモゴロフの古典的乱流描像には取り込まれていない特徴を備えている。我々はこのような乱流を雲乱流と呼んでかねてよりその挙動の解明を進めてきた。雲の中心部分を上昇気流により移動する小さな立方体内部の雲粒子の運動、凝結・衝突・併合過程、および乱流場を微視的視点からの第1原理的計算によって長時間積分する雲マイクロ物理シミュレータ(Cloud Microphysics Simulator, CMS: Saito and Gotoh 2018)を開発した。この計算は相当量の計算資源を必要とする。最初の挑戦は、雲質量粒径分布に雨粒子形成を示す第2ピークの出現までをシームレスに計算できるかであり、粗削りながらもこの目的を達成することができた。さらに乱流場、特に温度・水蒸気混合比揺らぎのスペクトルは変形を受け高波数側から低波数側に向けて進展するという興味深い現象を観測した。一方、CMSの検証を2つの観点から行い、満足のいく結果を得ていることを報告した。当セッションの開催は新しい研究分野が生まれつつあることを感じさせてくれる。今後、この分野の

* A report of the special session "Cloud microphysical modeling, its current status and future potential"

^{*1} (連絡責任著者) Akihiro HASHIMOTO, 気象研究所, 分科会世話人. ahashimo@mri-jma.go.jp

^{*2} Yousuke SATO, 名古屋大学, 分科会世話人.

^{*3} Toshiyuki GOTOH, 名古屋工業大学.

^{*4} Izumi SAITO, 名古屋工業大学.

^{*5} Akira T. NODA, 海洋研究開発機構.

^{*6} Ryo ONISHI, 海洋研究開発機構, 分科会世話人.

^{*7} Shin-ichiro SHIMA, 兵庫県立大学, 分科会世話人.

^{*8} Tempei HASHINO, 高知工科大学, 分科会世話人.

^{*9} Woosub ROH, 東京大学.

^{*10} Tatsuya SEIKI, 海洋研究開発機構.

さらなる発展を期待している。

(後藤俊幸)

C302 乱流-雲粒相互作用に関する統計理論の DNS による検証

上記後藤の講演「雲乱流と雲微物理」に引き続き、直接数値シミュレーション(DNS)を用いて微視的観点から雲微物理過程を調べる研究について説明した。

温度場や水蒸気場の乱流揺らぎに由来する過飽和度の時空間変動が存在するとき、雲粒は凝縮・蒸発によってその粒径分布を広げるとともに、過飽和度揺らぎの振幅を減衰させる、このような雲内の乱流と雲粒の相互作用を室内実験で再現したのが、ミシガン工科大学のグループによって開発された実験チャンバー「 π チャンバー」である。本研究ではDNSモデル「雲マイクロ物理シミュレータ」を用いて π チャンバーの実験結果の再現を試み、領域サイズ等のパラメータが室内実験と同程度であれば、室内実験の結果と定量的によく一致する結果が得られることを示した。今後の雲微物理パラメタリゼーションの研究にも有用となることが期待される。

気象学会で、DNSまで含む統一的な視点に基づいた雲微物理モデリングに関するセッションが開かれたのはおそらく初めてであり、発表の機会を頂いたことは光栄である。企画・運営に携った先生方および当日参加された方々に感謝申し上げたい。

(齋藤 泉)

C303 液滴を陽に考慮した境界層雲の3次元放射伝達モデルの開発

ラグランジアン雲シミュレーション技術は着実に向上している一方、その様なシミュレーションでは雲放射過程は非常に簡略化されるか考慮されることが多い。しかし、例えば、気候学的に重要である層積雲では雲頂周辺における強い雲放射冷却が雲の生成に重要であることが知られているなど、放射過程を適切に扱う必要がある。本発表ではMatsuda *et al.* (2012)が開発した、液滴を陽に考慮するモンテカルロ法3次元放射伝達モデルのより一般的な境界層雲への適用手法に関する取組みを報告した。雲層の透過率、反射率、吸収率等の光学特性について、3次元放射伝達モデルを1次元平行平板放射伝達モデルと比較検証した結果、前者は後者の結果をよく再現することがわかった。更に、より現実的な層積雲の事例(DYCOMS-II, Stevens *et al.* 2003)を対象とした試験結果では液滴を陽に考慮することで局所的に強い放射加熱や冷却が起

こり、これが乱流場に強く影響を与える可能性を示した。

(野田 暁)

C304 粒子解像・直接ラグランジアン雲粒子計算法

本発表では、まず、直接ラグランジアン雲粒子計算法を概説した。その直接雲粒子計算法を用いた最新研究を紹介した後、従来計算では質点近似を用いている点を指摘し、大雨滴までを扱う場合には、粒子解像計算が必要であることを説明した。その上で、開発した体積型埋込み境界法に基づく粒子解像計算法の概説、および、乱流中での大球形粒子の衝突頻度解析に適用した例を報告した。大規模並列計算を行えば、粒子解像計算によって大球形粒子の乱流衝突頻度統計量までを取得できることを示すことができた。会場からは、水粒子間の衝突現象の重要性を問う質問があった。粒子解像計算ならば、非球形粒子(氷粒子)同士の衝突過程も高精度に再現できる点を回答した。ラグランジアン追跡法による雲微物理計算研究は、ちょうど質点近似から脱却し、大粒子や非球形粒子の物理の解明へと踏み出そうとしている段階にあると感じている。

(大西 領)

C305 超水適法の混相雲へ適用

超水滴法は粒子ベースの確率的な雲微物理過程の数値解法である。数値拡散や計算コストといったビン法の直面する数値的問題を解決あるいは低減できると考えられることから、その将来性が期待されている。

既に温かい雲への応用事例は多数ある。雲がエアロゾルに与える影響を直接的に評価することも可能であり、液相反応を考慮することでHoppelギャップ(Hoppel *et al.* 1986, 1994)を再現できたという報告が最近あった。また、超水滴法の枠組みを利用した雲微物理過程のSGS乱流モデリングの研究も進み始めている。

今回我々は、氷粒子の形態変化を陽に予報できる精緻な数値モデルに対して超水滴法を適用し、混相雲の中で水晶が生成・成長し霰・雹・雪片を形成していく様をより忠実に表現することのできる数値モデルを構築した。ただし、粒子の自発的あるいは衝突による分裂過程は、混相雲を考える上で重要であるものの、簡便のため今回は考慮されていない。

開発したモデルの性能検証のため、孤立した積乱雲の2次元LES計算を行った。氷粒子の大きさと質量の関係が経験則と概ね整合しているなど、妥当な結果が得られた。より詳細な性能検証と素過程の精緻化が必

要であるが、今後のさらなる発展と応用が期待できる。

(島 伸一郎)

C306 SHIPS を用いた北極混合相雲の研究

北極の混合相層雲は、特に長波放射の射出を介して地表面のエネルギー収支に影響を与えるため、その物理過程の理解は、気候変動の理解において重要である。本発表では、氷粒子の晶癖を予測する雲微物理スキーム (SHIPS: Hashino and Tripoli 2007) を用いて、この雲の氷晶核形成過程について議論した。3つの雲水浸水凍結スキーム (雲水体積依存の半経験式 V-SF, 古典核形成理論に基づく定式を、活性化した雲水のみに適した場合 C-AC と、エアロゾル粗粒モードを含む雲水に適した場合 C-CM) を扱う。SHEBA (Uttal *et al.* 2002) の事例では、六角平板の軸比が凍結した雲水の直径に依存することが再現された。リモートセンシングにより軸比が観測できれば、凍結過程に関連付けられる可能性があることを示唆する。ISDAC (McFarquhar *et al.* 2011) の事例でも、晶癖の分布、地上雲レーダ観測量の比較において良好な結果を得ている。現在、ドップラー速度スペクトラムの比較を進めている。

質疑では、下降流域で雲水が凍結する理由について質問があった。SHEBA の事例では、上昇流域よりも下降流域に $30\mu\text{m}$ 以上の雲水が多く存在しており、V-SF では凍結率の雲水体積依存性が働く。雲水とエアロゾルのサイズには相関があるので、C-CM の場合には間接的に雲水体積に依存する。いずれのスキームでも、凍結率は気温への感度が卓越するので、下降流域でも凍結する結果となった。

(端野典平)

C307 山岳性降雪雲における降水形成過程に関するバルク法雲微物理モデルを用いた解析

雲・降水粒子の成長量を素過程別 (昇華・雲粒捕捉過程等) に予報変数として計算することで、表現可能な粒子タイプの多様性を飛躍的に向上させられる素過程追跡型雲微物理スキームを、バルク法雲微物理スキームをもとに開発し、冬季季節風下の山岳性降雪雲に関する2次元理想化実験に適用した。実験結果は、雲粒子ゾンデ観測から得られた柱状・板状・樹枝状結晶の分布と整合的であり、新しいスキームの有効性が示された。

質疑では、素過程情報をもとに決めた粒子特性が、その後の粒子の成長率に対してどのようにフィードバックされるかについて聴者から質問を受けた。現段

階では、粒子形状は計算のあいだ不変で、従来と同様 (球形粒子を仮定) であり、計算終了後に、出力された素過程要素をもとに粒子形状を再構成している。そのため、粒子形状と成長率のフィードバックの輪は閉じていない。今後、粒子形状等の粒子特性を粒子の成長率等に関連付け、これを閉じたサイクルにする必要がある。

(橋本明弘)

C308 次世代気象気候ライブラリで利用可能な雷モデルの開発

本発表では将来の数値気象モデルでの雷予測を見据えて、次世代気象気候ライブラリ (SCALE: Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015) に、雷を取り扱うコンポーネント (以下、雷モデルと表記) を実装し、理想実験によりモデルの妥当性を確認したことを報告した。実装した雷モデルは、各グリッド内の雲粒の平均的な電荷密度を予報変数とし、雲内であられと雪・氷晶が衝突する際に生じる電荷分離、電位・電場分布を求める計算、放電 (中和) を計算するコードから構成される。この雷モデルは通常の計算に比べて予報変数が多いことに加え、全通信を含む計算が含まれるため、並列計算では計算性能を出すことが難しい。そのため、大型計算機で雷モデルを用いた計算を行うことが困難で、一部の気象モデルでしか雷モデルの大規模な計算は行われていない。我々は開発した雷モデルを、大型計算機での使用を見据えて開発された SCALE に実装したため、大規模並列条件下でも計算が可能である。

質疑では電荷・電場が雲粒の衝突併合過程に与える影響に関する質問があった。雷モデルを用いることで、そのような影響がモデルで考慮でき、今後の発展が期待される。

(佐藤陽祐)

C309 An Evaluation of mixed-phase clouds over the Southern Ocean in NICAM using Joint-Simulator (NICAM によって再現された南大洋上混相雲の Joint-Simulator を用いた再現性評価)

全球雲解像モデル NICAM で表現される混相雲の再現性を Joint-Simulator (Hashino *et al.* 2013) を用いて評価する方法を紹介した。まず NICAM の領域モデル版を用いて、バルク法雲微物理過程の1モーメントスキームと2モーメントスキームによる南大洋上混相雲の再現性を評価した。境界層付近での後方散乱係数をカリブソ衛星 (CALIPSO) 観測データと比較

したところ、2モーメントスキームは1モーメントスキームよりも観測をより良く再現した。これは、2モーメントスキームの方が境界層付近の過冷却水雲の再現がうまく出来ていることを表している。この2モーメントスキームの結果と鉛直1次元モデルを用いて得られた知見に基づいて、1モーメントスキームの過冷却水雲に関連する改良を加えた。次に、改良された1モーメントスキームを実装した全球モデル版NICAMを用いて水平解像度14kmの全球シミュレーションを行い、外向き短波放射と外向き長波放射に対する過冷却水雲の影響を調べた。改良した1モーメントスキームでは、過冷却水雲の表現が改良されたことで、南大洋上空の外向き短波放射が改善された。また、改良された1モーメントスキームでは、改良前の1モーメントスキームおよび観測に対して、熱帯上空の外向き長波放射が増加しており、これは、氷雲の雲頂が低くなったためと推測される。

発表後の質疑では、1モーメントスキームをどのように改良したか、および、混相雲の再現計算にとってどのような微物理過程が重要かについて質問を受けた。それに対して、1モーメントスキームと2モーメントスキームの間で雪粒子の粒径分布が異なることと、雪粒子の昇華成長過程の影響を示した。また、長波放射の改善に関して、数値実験をさらに高解像度化すると熱帯上空の外向き長波放射は減少するのではないかコメントを受けた。

(Woosub ROH)

C310 全球・領域実験併用のすゝめ～普遍的な雲微物理の理解に向けて～

本発表では高解像気候モデルNICAMのシングルモーメントバルク法雲微物理モデル(Roh and Satoh 2014)に見られる極域低層雲の過小評価バイアスを軽減する試みを紹介した。シングルモーメントバルク法雲微物理モデルとダブルモーメントバルク法雲微物理モデル(Seiki *et al.* 2014)を比較したところ、数濃度の診断方法に問題があることが分かった。この結果を受け、氷粒子の昇華成長や雲水と氷粒子間の衝突を抑えることでバイアスを軽減できることを示した。

全球、もしくは様々な領域で用いられる雲微物理モデルを開発する場合(国内モデルではasuca, CReSS, MSSG, NICAM, SCALEなど)、様々な地域の雲降水システムに対応可能な汎用的な定式・パラメータ選択が求められる。今回の解析では「氷粒子(特に雪やあられ)の数濃度の診断方法は極域・中緯度・低緯度に

耐えられるものが必要である」という結論に至った。他の雲システムにおいても同様の問題が潜在している可能性に鑑み、雲微物理モデルの検証には全球実験と特定の領域実験の併用が望まれる。

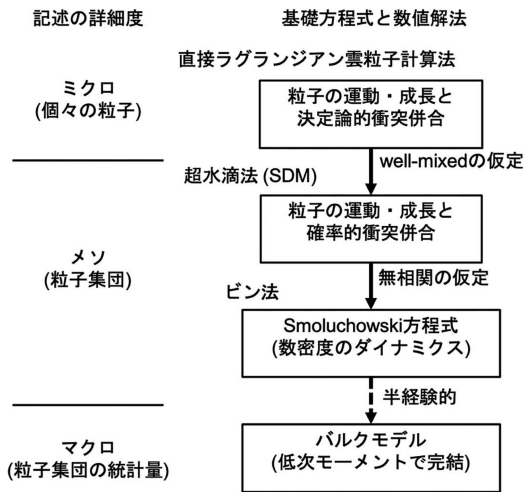
(清木達也)

3. 総合討論とまとめ

本分科会は、前半(C301～C305)は、乱流と雲の相互作用や3次元放射の影響の解明に、DNSやラグランジアン追跡法に基づく雲微物理計算によって取り組む研究発表に始まり、直接ラグランジアン雲粒子計算法の粒径適用範囲の拡張、さらに、超水適法を氷相過程にまで拡張する取り組みなど、新しいモデル開発とそれらを用いた研究に関する発表が行われた。後半(C306～C310)は、気象学で広く用いられているオイラー型の雲モデルに新たな物理過程を実装する取り組み、粒子の形状や粒径といった雲微物理特性を詳細に取り扱ったモデルでの計算、バルク法雲モデルを、衛星シミュレータやシングルカラムモデルを用いて、雲物理の素過程に基づいて改良する取り組みの発表という構成であった。

雲物理の素過程に基づいて雲モデルを改良するという取り組みは、近年盛んに行われている。この取り組みは衛星観測網から得られたデータの有効活用という側面を持つだけでなく、Roh(C309)、清木ほか(C310)の発表でも解説されたように雲物理モデルに含まれている様々な仮定の適用限界を明らかにし、雲モデルを改良するという試みと位置付けることができる。また、直接ラグランジアン雲粒子計算法、超水適法、DNSの導入は、高解像度化に伴い、既存のモデル化が前提としてきた仮定を適用し得ない範囲にまで拡張しつつある雲物理・乱流モデリングを、より原理的な手法によって新たに構築する取り組みと位置付けられる。その点で、本分科会での発表の多くは雲物理モデルに含まれる様々なレベルの仮定の妥当性を検証する内容であった。

島ほか(C305)の発表で解説されたように、本分科会の発表で扱われたのは、直接ラグランジアン雲粒子計算法、超水適法、ビン法、バルク法といった異なる階層にある雲微物理モデルであり(第1図)、現在気象の分野で多く用いられているバルク法雲モデルは、ラグランジアン雲粒子計算法や超水適法といったより原理的なモデルを、様々な仮定に基づいて簡略化したモデルと位置付けることができる。異なる階層に



第1図 雲微物理モデリングにおける階層性 (島ほかの発表資料を一部改変)。

属するモデルが相互に連携することによって、階層間にまたがる仮定の妥当性を評価することが可能になり、気象モデルで用いられるモデル化の検証や再構築が可能になる。これにより、雲・降水形成機構とそれに関する素過程の解明が一層進むことになるだろう。本分科会で発表されたこのような取り組みの重要性を気象学会の参加者と共有できたことは本分科会の重要な成果である。

また会場から意見があったように、雲微物理モデルに限らず、このような階層性が気象モデルには多数存在している。モデルに含まれる仮定や階層構造を常に意識してモデルの開発・利用に取り組むことで、数値モデルの適用限界を超えた利用を防ぐことや、階層の間にまたがる新たな物理現象の理解を切り拓くきっかけになることを期待したい。

(佐藤陽祐・橋本明弘)

略語一覧

asuca : Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere
 CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
 CMS : Cloud Microphysics Simulator
 CReSS : Cloud Resolving Storm Simulator
 DNS : Direct Numerical Simulation
 DYCOMS-II : The second Dynamics and Chemistry of Marine Stratocumulus
 ISDAC : Indirect and Semi-Direct Aerosol Campaign

LES : Large Eddy Simulation
 MSSG : Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model
 OLR : Outgoing Longwave Radiation
 OSR : Outgoing Shortwave Radiation
 SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment
 SDM : Super-Droplet Method
 SGS : Sub-Grid Scale
 SHEBA : Surface Heat Budget of the Arctic Ocean
 SHIPS : Spectral Ice Habit Prediction System

参考文献

- 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., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno and H. Okamoto, 2013: Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 7273-7292.
- Hoppel, W. A., G. M. Frick and R. E. Larson, 1986: Effect of nonprecipitating clouds on the aerosol size distribution in the marine boundary layer. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 125-128.
- Hoppel, W. A., G. M. Frick, J. W. Fitzgerald and R. E. Larson, 1994: Marine boundary layer measurements of new particle formation and the effects non-precipitating clouds have on aerosol size distribution. *J. Geophys. Res.*, **99**, 14443-14459.
- Matsuda, K., R. Onishi, R. Kurose and S. Komori, 2012: Turbulence effect on cloud radiation. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, doi: 10.1103/PhysRevLett.108.224502.
- McFarquhar, G. M. *et al.*, 2011: Indirect and Semi-Direct Aerosol Campaign (ISDAC): The impact of Arctic aerosols on clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 183-201.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419.
- Roh, W. and M. Satoh, 2014: Evaluation of precipitating hydrometeor parameterizations in a single-moment bulk microphysics scheme for deep convective systems over the tropical central Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2654-2673.
- Saito, I. and T. Gotoh, 2018: Turbulence and cloud

- droplets in cumulus clouds. *New J. Phys.*, **20**, 023001, doi:10.1088/1367-2630/aaa229.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- Seiki, T., M. Satoh, H. Tomita and T. Nakajima, 2014: Simultaneous evaluation of ice cloud microphysics and nonsphericity of the cloud optical properties using hydrometeor video sonde and radiometer sonde in situ observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, doi: 10.1002/2013JD021086.
- Stevens, B. *et al.*, 2003: Dynamics and chemistry of marine stratocumulus-DYCOMS-II. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 579-593.
- Uttal, T. *et al.*, 2002: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 255-275.
-