

## 第47回メソ気象研究会・第10回気象庁数値モデル研究会の報告

## —数値モデルによる積乱雲とその効果の表現—

コンビーナー：加藤輝之\*1・永戸久喜\*2

## 1. はじめに

メソ気象の事例解析では、不十分な観測データを補完するためには数値モデルによるシミュレーションが欠かせない。特に積雲対流にともなう降水事例の解析においては、数値モデルにおける積乱雲そのものやその効果の表現が非常に重要となる。積乱雲そのものの表現については、雲・降水粒子の盛衰の過程を扱う雲微物理スキームが数値モデルに導入され、水平解像度が100~500 mになれば可能と言われている。積雲対流の特性を支配する様々なスケールの現象を全て表現可能かどうかや、雲微物理スキームや解像度の依存性など、幾つかの検討すべき課題がある。一方、個々の積乱雲を表現できない、概ね5 km以上の水平解像度の数値モデルでは、積雲対流の効果をパラメタライズしたスキーム(積雲対流スキーム)が用いられている。気候モデルや季節予報モデルはもとより、気象庁で短期・中期予報用に現業運用されている全球モデルやメソモデルにおいても積雲対流スキームが用いられており、予測精度への影響が大きいことからその改良や高度化は重要な開発課題の一つとなっている。積雲対流の特性を支配する様々な現象の効果を適切に表現するためには、積雲対流に関する様々な知見を基にそれらを適切にモデル化するための取り組みが必要となる。

このような趣旨のもと、メソ気象研究会と気象庁数値モデル研究会との共催で、高解像度数値モデルにおける積乱雲や降水の振る舞いに加えて、積雲対流のパラメタリゼーションに対する取り組みについて講演を

行っていただき、積乱雲やその効果の表現に関する双方の現状と課題を共有し、それぞれの知見をどのようにして互いの課題解決に活かしていくべきかを議論することにした。研究会は2017年度春季大会前日の2017年5月24日(水)に気象庁講堂で開催され、150名を超える多くの方々に参加して頂いた。

## 2. 対流活動における大気成層の構造変化・上昇流に対する数値モデルの水平解像度の影響

加藤輝之(気象研究所/現所属  
気象庁観測システム運用室)

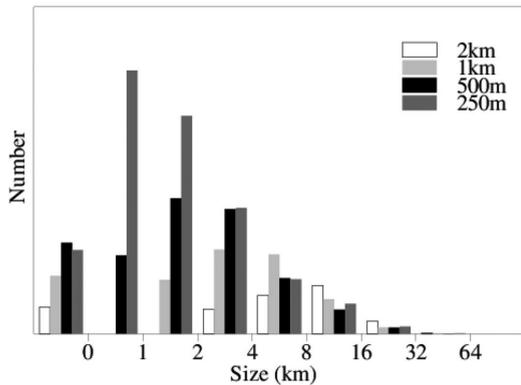
大気状態が不安定で、自由対流高度まで下層気塊が持ち上げられると湿潤対流が発生し、不安定の一部が解消される。大雨時には大量の湿潤対流が発生し、大気成層は相当温位 $\theta_e$ がほぼ一定の状態に近づくことが期待される。そこで2014年8月20日の広島での事例を対象に、前日19日18時初期値の水平分解能2 km, 1 km, 500 mと250 mの気象庁非静力学モデル(以降、2 kmモデルのように表記)を用いて、大気成層の構造変化や強い上昇流の出現頻度について調査し、モデルの水平分解能による違いを調べてみた。初期値・境界値は気象庁局地解析(なお250 mモデルの境界値は2 kmモデルの予報値)から作成し、降水過程としては氷相のみ2モーメントのバルクスキームを単独で、乱流スキームとしてはMYNNレベル3を用いた。どの水平分解能のモデルも大雨をもたらした線状降水帯を再現し、解析雨量積算3時間降水量232 mm前後の降水量をも予測することに成功した。

まず線状降水帯の鉛直構造やその降水帯を作り出す降水セルの動きを比較してみた。2 kmモデルでは気象レーダーで見られた線状降水帯の階層構造の再現性が不十分で、個々の積乱雲の再現には250 mモデルが必要であることがわかった。また1 m/s以上で判断

\*1 (連絡責任著者) Teruyuki KATO, 気象研究所/現所属 気象庁観測システム運用室.  
teruyuki\_kato@met.kishou.go.jp

\*2 Hisaki EITO, 気象庁数値予報課.

© 2017 日本気象学会



第1図 高度7kmでの上昇流コアサイズ(km)別の出現数(最大出現数で規格化)。0km以下はモデルの水平分解能よりも小さいサイズを持つ上昇流コア数。

した上昇流コアの平均水平サイズやコアサイズ2km以上の出現数(第1図)は500mモデルと250mモデルでほぼ同じ結果になった。このことは水平解像度を500m程度まで細かくすることで、積乱雲の代表的な構造を再現できることを示している。一方、2kmモデルでは降水セルの水平スケールが大きくなり、積乱雲発達中の混合の影響が小さくなることで、中層の高相当温位の出現頻度が高くなっていった。

最大上昇流強度は高分解能になるほど大きくなったが、全てのモデルで相当温位が保存される強い上昇流は限られた領域に存在していた。このことは大きな鉛直シアが存在することで、継続的に環境場を作り出す空気が周辺から流入したことが原因だと考えられる。広島での大雨のケースのように鉛直シアが大きい場合、対流活動によって成層構造は大きく変化しない、すなわち $\theta_e$ がほぼ一定の鉛直プロファイルは作られないことが示唆された。

### 3. 積雲対流の発達と環境の安定度・水蒸気量との関係

竹見哲也(京都大学防災研究所)

積乱雲の発達や組織化は、環境の安定度や湿度の影響を受ける。例えば、熱帯の積雲・雄大積雲・積乱雲の各モードは、中下層の安定度のみならず、湿度の違いにも規定される。熱帯海上の積雲対流を対象とした数値実験によって中層の安定度や対流圏の湿度に対する感度を調べたところ、湿度の違いによって積雲対流

の発達モードが決まることが分かっている。一方、中緯度のメソ対流系の発達においても、下層の湿度に変化がなければ中層の湿度が高い場合に強い対流が発達するなど、湿度変動が、熱帯のみならず中緯度でも重要な役割を果たしていると考えられる。

それでは、熱帯と中緯度とで比べると、どのような環境条件の違いが積雲対流の発達や組織化の違いを生じさせるのであろうか。中緯度に比べて熱帯では、気温減率がより湿潤中立に近い。このため、地上の空気塊を断熱的に持ち上げたときに得られる浮力は、熱帯の環境のほうが小さくなる。浮力が小さければ、環境との混合によって上昇流が弱められる傾向が強くなり、結果として対流も弱くなる。したがって、熱帯と中緯度とで仮にCAPEが同程度であったとしても、気温減率の大きな中緯度の場合のほうが上昇流は強くなり、結果として対流による降水も強くなる。一方、気温減率が同程度であれば、可降水量が多いほど、またCAPEが大きいほど、対流の発達や組織化に好都合である。

また、熱帯と中緯度とでは、地上の空気塊に対するCAPEが同程度であっても、上空の空気塊のCAPEには大きな違いが生じる場合が多い。そこで高度別のCAPEを熱帯と中緯度とで同じにした場合の感度を調べる数値実験をした結果、気温減率が大きな中緯度の場合に対流は強く発達することが分かった。このことも浮力の鉛直プロファイルの違いによって理解することができる。すなわち、気温減率が大きければ、浮力が大きくなり、強い上昇流が発達し、周囲との混合を受けにくくなり、広域の上昇流が形成され、強い対流系となる。さらに、気温減率が同じならば、CAPEの鉛直分布の違いによって降水特性が決まる(Takemi 2014)。

以上の数値実験では、水平分解能を500mとし、個々の対流が十分解像できる程度のものでした。しかし、対流内部と周囲大気とのエントレインメントなどの混合過程を詳細に表現するためには、さらなる高分解能化が必要である。今後は、より現実的な問題設定により、湿潤対流のLESを実行することで、積雲対流の発達と環境場との相互作用を理解することが大事である。

#### 4. 超高解像度全球雲解像実験からわかる対流の統計的性質

富田浩文 (理化学研究所計算科学研究機構)

2000年代前半, 非静力学方程式に基づく雲をあらわに表現する全球雲対流システム解像モデルが登場した。これにより, 積雲ライフサイクルの表現が改善され, 雲擾乱の階層構造, 位相速度などが物理的に表現できるようになった。一方で, 当初は全球をカバーするために解像度を落とさざるを得ず, 定量的には不満が残るものであった。2013年, 全球モデル (NICAM) において, 対流雲の解像度依存性を調べるため, 格子間隔 1 km を切るまでの数値実験を実施し, 対流雲の全球での統計的な性質を調べた (Miyamoto *et al.* 2013)。これによると, マッデンジュリアン振動や台風などの大規模擾乱による環境場による違いはあるものの, おおよそ格子間隔 2 km を境に対流間距離は収束の兆しをみせ, 対流コアも複数の格子で表現されることが分かっている。

上記の問題は, ある数値モデルにおける数値解の収束性問題ととらえることができるが, 未だ収束性の担保はなされていない。更なる高解像度化が必要になるが, その数値計算方法においては雲微物理過程の精緻化とともに乱流のグレーゾーン問題 (RANS (Raynolds Averaged Navier Stokes) における高解像度化の理論的境界の問題) が残っている。今後飛躍的に信頼性の高い計算を行うには, より原理的な手法である LES を使う必要があるが, 実用化へ持っていくための必要な計算機リソースと現在可能な計算機リソースには相当なギャップがある。当面は, グレーゾーン領域での乱流過程になんらかの処方箋を施していく必要がある。この目的のためには, まず RANS と LES での解像度依存性, 更には数値収束点の把握が必要不可欠である。この情報は, LES を仮に正解と見たときグレーゾーン領域における RANS をどのように改善していくべきかの第一の指針となり得る。

もう一点, 本質的に解決しておくべきことがある。LES は, RANS に比べてより普遍的な理論をよりどころとしているが, 乾燥大気の理論に基づいている。雲の生成消滅時には潜熱の出し入れが局所的に起こり, これに対する影響を LES に組み込んでいかねばならない。すなわち湿潤 LES 理論の構築が必要である。雲粒の生成消滅を考慮した DNS (Direct Numerical Simulation) との併用によってスペクトル空間でのエネルギー注入領域の様子を調べるととも

に, 深い理論的考察が必要になる。一筋縄でいかない問題であるが, 気象・気候モデルにおける LES の信頼性を大幅に向上させるためには必須課題である。

#### 5. 積雲対流パラメタリゼーションの概要と気象庁現業メソモデルの積雲対流スキーム

松林健吾 (気象庁数値予報課)

積雲対流という現象は浮力を起源とする熱・水蒸気・運動量の鉛直輸送であり, 数値予報モデルにおいては, 格子平均の鉛直流による輸送と, サブグリッドスケールの輸送に分離される。低解像度モデルにおいては格子平均の鉛直流がほとんどゼロとなるため, サブグリッドスケールの鉛直輸送を積雲対流パラメタリゼーションによって見積もる必要がある。

現在主要な現業数値予報センターで用いられているマスフラックス型の積雲対流スキームでは, サブグリッドスケールの鉛直輸送をマスフラックスという質量輸送量で記述する。マスフラックスには質量保存が成り立ち, 積雲側面の水平乱流による積雲内への空気の流入 (エントレインメント) と, 積雲外への空気の流出 (デトレインメント) によって増減するものとしてモデル化する。また, 雲底におけるマスフラックスの大きさを求める仕組みをクロージャーといい, 環境場から見積もれるものと考え, 熱・水蒸気・運動量の鉛直輸送量はマスフラックスおよびエントレインメント・デトレインメント, クロージャーを用いてモデル化でき, これにより格子平均の熱・水蒸気・運動量の時間変化率を算出する。これらエントレインメント・デトレインメント, クロージャーは精度を大きく左右する一方で, 未解明な部分が多い。

積雲対流パラメタリゼーションは, 近年まで, 水平格子間隔数 km の高解像度モデルでは使わなくてもよいといわれてきた。しかし, LES を用いた研究により, 例え水平格子間隔が 2 km となっても, 本来必要とされる鉛直輸送の 50% 程度しか計算されないことが指摘されている。また, 水平格子間隔 2 km の気象庁局地モデル (Local Forecast Model, LFM) でも, 積雲対流パラメタリゼーションを用いないと, 対流の立ち上がりが遅れる, 対流の上昇流が強すぎる, といった問題が見られている。これは, 対流の発生を引き起こすプロセスや, 上昇流を弱めるエントレインメントといったプロセスは, 非常にスケールが小さく, 水平格子間隔 2 km であっても格子平均値として計算されないことが原因と考えられる。高解像度モデルであっ

ても、既存の積雲対流パラメタリゼーションを使わないのであれば、これらのプロセスをパラメタライズする必要はあるだろう。

後半では、2017年1月に改良した気象庁メソモデル (Meso-Scale Model, 以下 MSM) の積雲対流スキームの開発手法について紹介した。近年のモデル開発では、スキームの単純な取替えだけでは精度が向上することは稀であり、逆に他の物理過程との間で打ち消しあっていたバイアスが顕在化することが多い。このため、MSMの積雲対流スキームの開発では、既存のスキームを徹底的に調査し、スキームの挙動の理解や特性把握のみならず、各物理過程間の相互作用についての理解を図った。このような調査には一次元モデルが非常に有用である。講演では、一次元モデルで見つかった問題の例をいくつか挙げ、一次元モデルを用いた調査の有用性、およびスキームの特性理解の重要性について強調した。

## 6. 気象庁現業全球モデルの積雲対流スキーム

氏家将志 (気象庁数値予報課)

気象庁で運用されている、全球モデル (Global Spectral Model, 以下 GSM) の積雲対流スキームについて解説した。一般に、積雲対流パラメタリゼーションによる格子平均の場の時間変化率は「サブグリッドの鉛直輸送」と「相変化等のソース項」の和で表されるが、この点は GSM の積雲対流スキームも同じである。この「輸送+ソース項」を解くためになんらかの積雲モデルを適用するのであるが、GSMの積雲対流スキームは Arakawa and Schubert (1974) の積雲モデルを基に構築されており、分類としてはアンサンプル型の積雲対流スキームに属する。GSMでは境界層を雲底に、モデル面の各層 (100 hPa まで) を雲頂に持つ、最大47種類の積雲を考慮している。それぞれの積雲について、プリュームモデルを基にした積雲モデルを適用し、対流域内の物理量のプロファイルを計算する。積雲モデルによって計算された雲域での物理量と、クロージャーによって決まった雲底でのマスフラックスを用いて方程式を閉じさせ、最終的に「輸送+ソース項」を「補償下降流+デトレインメント」の形に変形して、格子平均の水・熱・運動量の時間変化率を計算する。

GSMの積雲対流スキームは継続的に改善が加えられているが、特に近年は積雲モデルの見直しや改善に注力されてきた。これは、積雲対流スキームの概念モ

デルを明確にしないまま、パラメータチューニングによる精度向上を図ることが限界に達したことの反省に基づいている。積雲モデルの近年改善の例としては、2016年3月 (米原 2016) および2017年5月に行われた GSM の更新が挙げられる。前者について、積雲モデルの見直しによって、対流性上昇流途中での雲から降水への変換や固体降水の融解過程等の本質的に必要な過程が GSM の積雲対流スキームでは考慮されていないことや、これらを補償する人工的な調整が問題を隠蔽していたことが判明した。これら必要な過程の導入、人工的な調整の廃止の結果、対流性の降水が生成される高度や加熱率の鉛直プロファイルの改善、積雲の三層構造 (Johnson *et al.* 1999) の表現が改善された。更に、後者の変更では、融解過程に改良が加えられ、計算安定性を確保しつつより適切な融解層を表現し、積雲の三層構造がより明瞭に表現されるようになった。

今後の積雲対流スキームの改善に向けては、環境場の違いによる積雲の応答の違いについての理解やその適切なモデル化、将来の衛星輝度温度の全天候同化を見据えた、雲・降水の3次元構造の表現の改善が重要であるという認識である。

## 7. 気象研究所地球システムモデルの積雲対流スキーム

吉村裕正 (気象研究所)

気象研究所大気モデルでは、YS積雲対流スキーム (Yoshimura *et al.* 2015) が使用されている。YS積雲スキームでは、Arakawa-Schubert積雲スキーム (スペクトル型) と、Tiedtke積雲スキーム (Tiedtke 1989; バルク型) の両方の考え方を取り入れている。エントレインメント率の小さいものと大きいものの2つのTiedtkeタイプの積雲上昇流を計算し、その間のエントレインメント率を持つ積雲中の気温や水蒸気量等を近似的に2つの積雲上昇流での値から線形内挿で求めることにより、エントレインメント率の異なる複数の背の高さの雲を表現している。また、補償下降流の計算時に、保存性・単調性を満たすセミラグランジュ法を使用している。このことにより、単調 (物質移流の場合非負) で保存性を満たす自然な物質輸送が可能になり、また CFL 条件を満たすようにマスフラックスの大きさを制限する必要がなくなる。

気象研究所地球システムモデルの大気モデルは海洋モデルと結合しており、海水温の予測向上のために

雲・放射が重要になる。雲の表現の改善のために積雲スキームや雲スキーム、層積雲スキームの改良・調整が行われている (Kawai *et al.* 2017)。また、エアロゾルモデル、オゾンモデルとも結合しているため、エアロゾル、オゾン等の物質輸送も重要になる。エアロゾルモデル・オゾンモデルでの積雲スキームによる物質輸送の計算のために、大気モデルで計算された積雲マスマックスの情報をカップラー経由でエアロゾルモデル、オゾンモデルに渡すようにしている。

2014年3月に現業化された気象庁 GSM にテスト的に YS 積雲スキームを導入し、更に YS 積雲スキームについて、格子で水平収束のあるところではなく、乾燥している所で組織的エントレインメントを大きくする変更 (Bechtold *et al.* 2008等) を行った。組織的エントレインメントの変更により、MJO のシグナルが強くなり、また 7 km 解像度での台風付近の降水に不自然な縞模様が見られなくなる等の改善が見られた。

多くの積雲スキームにとっての課題の1つとして、降水の日周期で降水増加のタイミングが早いことが挙げられる (Arakawa *et al.* 2015等)。地表付近・境界層での気温上昇にすぐに反応するのではなく徐々に積雲対流が強まるようにする仕組みが必要であり、積雲に関する変数を予報変数にし、予報方程式に基づき時間発展の計算をすることが改善のための1つの方法と考えられる。Piriou *et al.* (2016) では、積雲中の雲水・雲氷・雨・雪や鉛直速度を (おそらく積雲の占める割合も) 予報変数にしており、降水日周期や降水強度が改善される結果が得られている。このような積雲の変数の予報変数化は、難易度は高いが今後の積雲スキーム開発で目指すべき1つの方向性であると考えられる。

## 8. 総合討論

総合討論では主に、積乱雲の発達を決定する上で重要な要因となるエントレインメントとデトレインメントの効果について取り上げた。高解像度数値モデルにおいては、それらの効果は乱流スキームによる拡散と数値拡散によって表現されており、それらを分離して評価することが難しく、評価手法を検討する必要であるとの意見が多数出た。何が正しいのか分からないという問題意識から、湿潤過程を取り込んだ LES を用いて、熱帯での単純な大気状態を与えてシミュレートした、孤立積乱雲をリファレンスとして議論すればと

いう意見が上がった。

気象庁の全球モデルの水平分解能は 20 km であり、今後さらなる高分解能化が予定されている。そのような分解能では、積雲対流のパラメタリゼーションで仮定されている格子での鉛直流の平均場がゼロという仮定が成り立つとは思えないというコメントがあった。また、モデル格子内の対流域の面積が格子より十分小さいという仮定をもとに積雲対流パラメタリゼーションを構築すると、補償下降流が格子内で閉じてしまうため、モデルが高解像度した際に、格子平均の収束・発散に対応するような組織的エントレインメントが考慮できないという問題点も指摘された。さらに鉛直シアの効果として、積乱雲の組織化やエントレインメントとデトレインメントに与える影響が考えられ、その効果の導入や、積雲対流による運動量輸送の効果の理解やそのパラメタリゼーションも課題であることが共有された。

## 謝 辞

今回の合同研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた気象庁企画課・数値予報課ならびに気象学会員の有志のみなさまに感謝します。

## 略語一覧

CAPE : Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー  
 JMA : Japan Meteorological Agency 気象庁  
 LES : Large Eddy Simulation  
 MJO : Madden Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動

## 参 考 文 献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974 : Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Arakawa, O., H. Kawai and H. Yoshimura, 2015: The impact of convective parameterization schemes on the tropical precipitation diurnal cycle simulated by MRI-AGCM3. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, (45), 7.05-7.06.
- Bechtold, P., M. Köhler, T. Jung, F. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. Rodwell, F. Vitart and G. Balsamo, 2008 : Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**,

- 1337-1351.
- Johnson, R.H., T. M. Rickenbach, S. A. Rutledge, P. E. Ciesielski and W. H. Schubert, 1999 : Trimodal characteristics of tropical convection. *J. Climate*, **12**, 2397-2418.
- Kawai, H., S. Yukimoto, T. Koshiro, N. Oshima, T. Tanaka and H. Yoshimura 2017 : Improved representation of clouds in climate model MRI-ESM2. CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO, in press.
- Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro and H. Tomita, 2013 : Deep moist atmospheric convection in a sub-kilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, doi:10.1002/grl.50944.
- Piriou, J.M. et al., 2016 : Development of a new prognostic convection scheme for NWP and climate Arpege global model. WGNE-31, Pretoria, South Africa.
- Takemi, T., 2014 : Convection and precipitation under various stability and shear conditions: Squall lines in tropical versus midlatitude environment. *Atmos. Res.*, **142**, 111-123.
- Tiedtke, M., 1989 : A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1779-1800.
- 米原 仁, 2016 : 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, (49), 1-3.
- Yoshimura, H., R. Mizuta and H. Murakami, 2015 : A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-Lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 597-621.
-