

ビン法雲微物理モデルの結果を使った 暖かい雨のバルク法モデルの改良

*中村晃三¹、藤吉康志²、坪木和久^{1,3}、久芳奈遠美⁴

1:海洋研究開発機構、2:北大低温研、3:名大地球水循環、4:東大大気海洋研

1. はじめに

境界層上部にできる雲は、放射過程を通じて気候に大きな影響を与えるため、その生成・消滅過程を適切にモデル化することは、気候学的研究の上で大変重要な問題である。特に、雲から雨への変換、雲の寿命、雲の放射特性などが重要なポイントであるが、それらの過程、特性には、雲粒径分布が大きく影響するため、その過程を正確に再現することが求められている。大規模モデルをはじめ多くのモデルで使われているバルクモデルでは、例えば、水粒を落下を無視できる雲粒と、落下を考慮する雨粒に分けて表現するが、雲粒から雨粒への変換速度などは、粒径分布を仮定した実験式などから得られた経験式を使っており、その不確実性が重大な問題となっている。

雲粒から雨粒への変換などをうまく表現する方法としてよく使われているのが、ビンモデルである。ビンモデルでは凝結した水粒を、その大きさによってビンと呼ばれるいくつかのグループに分け、それぞれのビンに含まれる水粒の混合比、数密度などを予測変数とし、その変数の時間変化によって、雲粒から雨粒への変換などを表わす。この過程には、バルク法で使われるような経験式は含まれておらず、より正確な再現が可能だと考えられている。

しかし、ビンモデルでも、さまざまな過程に経験的な式が含まれており、それらの違いによって異なった結果が得られる。これまで、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) シームレス環境予測研究分野 (DSEP) では、坪木らが開発してきた CReSS に、久芳・藤吉が開発したビン法モデル (以下、KF モデル。詳しくは、Kuba and Fujiyoshi 2006 を参照) を組み込み、大西洋の貿易風帯で行われた RICO (Rain in Cumulus over the Ocean Experiment 2004-2005) で観測された積雲の再現実験を行ってきた。

その結果、観測や他モデルの結果と比較して、雲内の平均雲粒数密度が高さとともに大きく減少するという結果が得られた。その原因を調べるために、KiD (KiD については謝辞を参照してください) と呼ばれる設定を使って、Tel-Aviv university のビンモデル (TAU モデル) などと比較し、エアロゾルの活性化＝初期雲粒粒径分布の決定方法に問題があることが分かった。そこで、初期雲粒粒径分布の決定法に修正を加えた結果について報告する。

なお、本来の KF モデルでは隣り合ったビンの質量比が $\sqrt{2}$ の 70 のビンを使ったが、ここでは、TAU に合わせて、隣り合ったビンの質量比が 2 の 34 のビンを使った結果を示す。

2. モデルと数値実験の設定、結果

RICO の貿易風帯積雲のシミュレーションのための設定などは、<http://projects.knmi.nl/rico/> を参照していただきたい。

暖かい雨のビンモデルには、以下の 3 つの過程が含まれる。それは、

- ① 凝結核の活性化による初期雲粒生成、
 - ② 凝結成長、
 - ③ 落下、衝突併合成長、および、分裂、
- である。今回、新しくしたのは、①過飽和になった時の雲粒初期分布の決定方法で、その詳細は以下のとおりである。(記号の意味は後述)

1. $q_c(K) < q_{c_{cr}} \vee (S(K) > 1.01 \wedge n_c(K) < n_{c_{cr}})$ の場合
 - (a) $n_c(K) > n_{c_{cr}}$ の場合
 - i. $q_c(K-1) < q_{c_{cr}} \wedge n_c(K-1) < n_{c_{cr}}$ 流入途中での活性化分を計算
 - ii. 他 何もしない
 - (b) $n_c(K) < n_{c_{cr}}$ の場合
 - i. $\Delta q_v > q_{c_{cr}}$ この場での活性化 (Δq_v) を計算
 - ii. 他 何もしない
2. $q_c(K) > q_{c_{cr}} \wedge q_c(K-1) > q_{c_{cr}}$ の場合
 - (a) $n_c(K-1) > n_{c_{cr}}$ 何もしない
 - (b) $n_c(K-1) < n_{c_{cr}}$ 流入途中での活性化分を計算

ここで、 q_c は、雲水混合比、 n_c は、雲水数密度、 S は相対湿度、 K は鉛直方向の格子番号、 $q_{c_{cr}}$ と $n_{c_{cr}}$ は雲水混合比と雲水数密度の臨界値で、雲水混合比と雲水数密度がそれ以上の値であったら、十分な雲粒があり、その成長のため活性化は起こらないと考える値である。今回は、 $q_{c_{cr}} = 2.0 \times 10^{-5} [\text{g/kg}]$ 、 $n_{c_{cr}} = 20 [\text{cm}^{-3}]$ を使った。また、 Δq_v は、過飽和分の水蒸気混合比である。

ここで、活性化を計算する場合は、観測されたエアロゾル分布をパーセルモデルに入れ、様々な上昇流によって得られる活性化する凝結核の数を求め、上昇流速の関数として全雲粒数密度を与え、 Γ 分布によって各ビンに分配することにした。ここで、 $\Delta q_v > q_{c_{cr}}$ になるまで活性化を考えないのは、その程度の凝結水量がないと十分な意味のある Γ 分布が作れないからである。なお、流入途中での活性化とは、同様にして得られる分布を流入体積の割合分だけ加えることである。

この方法と前の方法での結果を比較したものが図 1 と図 2 である。図 2 右に示されたように、新しい方法を使った場合、これまでのように雲粒数密度が高さとともに極端に減少する傾向は見られなくなった。雲頂高度がやや高くなっていて、他のモデルに比べても高いので、

これが新しい雲微物理過程によるものかどうか、確認中である。

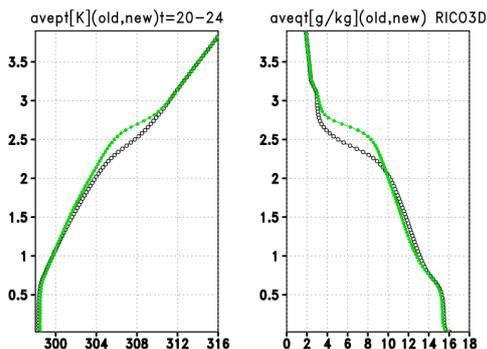


図1 水平平均した温位 [K] と全水混合比 [g/kg] の鉛直分布。20時から24時までの時間平均値。緑(白黒では灰色)が新しい方法の結果。

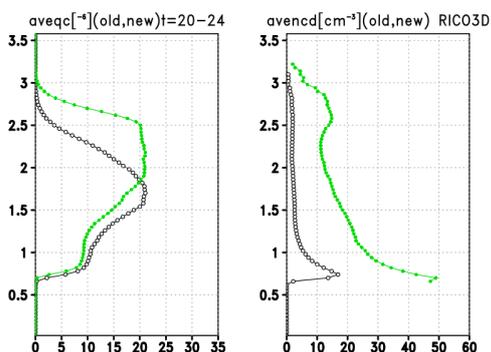


図2 水平平均した雲水混合比と、雲格子でのみ平均した雲粒子数密度の鉛直分布。20時から24時までの時間平均値。但し、雲格子は、雲水混合比が0.01g/kg以上の格子として定義している。色は図1と同じ。

3. KiD を使って得られた各プロセスの影響

KF モデルの影響を詳しく調べるために、KiD を使って、TAU モデルと比較した結果を示す。

KiD は、単純な流れ場を与え、雲微物理過程モデルをいろいろと入れ替えることで、雲微物理過程モデルの特徴を調べることができるものだが、ここでは、RICO の再現実験で得られるような実際的な流れ場での影響を調べた。そのため、CReSS を2次元で RICO の設定で動かし、その流れ場を全ステップで保存し、それを読み込みながら、いろいろな雲微物理過程モデルで動かすことができるようにした。ここでは、久芳・藤吉モデル (KF) と Tel-Aviv university モデル (TAU) の2つのビンモデルを比較する。全体の比較だけでは分かりにくいので、それぞれのモデルを、①凝結核の活性化による初期雲粒生成、②凝結成長、③落下、衝突併合成長、および、分裂、の3つの部分に分け、それぞれの過程をどちらのモデルでも選択できるようにした。

図3のそれぞれの列のなかでの赤と緑の差を見ると、左列で差が大きいことがわかる。これは、①にKFとTAUのどちらを使うかということが結果に大きな影響を与えることを示している。エアロゾルの活性化、つまり、初期雲粒粒径分布の決定は、初期だけでなく、その後の雨への発達にも関係する重要、かつ、難しい問題である。過飽和度の関数として活性化する凝結核の数を決

める Twomey の式などがよく使われるが、このときの過飽和度は通常の雲解像モデルで扱われる 100 m、数秒程度の解像度では不十分であると考えられており、その欠点を回避するための方法もいくつか提案されている。

KF モデルでは、パーセルモデルによる数値実験から作られたパラメタリゼーションを使って活性化する凝結核数(雲粒子数密度)を求めているが、他のケースへ拡張する場合など、いちいちパーセルモデルを使わずに済む方法を考案する必要があり、今後の検討課題である。

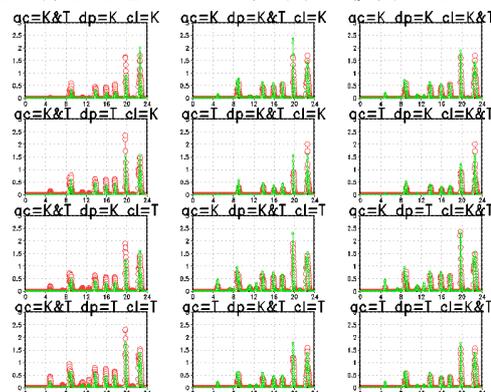


図3 3つの過程を久芳・藤吉 (KF) モデルと Tel-Aviv university (TAU) モデルのどちらかを選択できるようにした場合の地表降水の時間変化。左列は①としてKF(赤、白黒では大きな丸)とTAU(緑、白黒では小さな丸)を使い、他の②と③の過程は、上から順に、KF-KF、TAU-KF、KF-TAU、TAU-TAU を使った結果を示す。中列は②がKF(赤)とTAU(緑)で、①と③は、左列と同じ順番に変えた結果、右列は③がKF(赤)とTAU(緑)で、①と②は、左列と同じ順番に変えた結果である。

4. バルクモデルの改良

ビンモデルの結果をバルクモデルの改良に使うために、ビンモデルの結果を、適当なビンで雲と雨に分け、バルクモデルでの各プロセス(凝結成長、autoconversion、衝突併合、蒸発)に相当する過程を調べ、それぞれの過程を表現するのに、何の物理量を用いるのがもとももらしいかを調べてきた。物理量の候補としては、これまで、過飽和度、雲水混合比、雲粒子数密度、雨水混合比、雨水数密度などを使っていたが、最近のバルクモデルでは、乱流強度も使うような複雑な表現も使われるようになってきている。今回のビンモデルでは、衝突係数に乱流の効果が入っていないが、今後、そのようなビンモデルも使う可能性があるため、それらも候補に入れられるように修正していく予定である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省 HPCI 戦略プログラム(課題番号: hp130012, hp140220, hp150214)の助成を受けた。

KiD は、Kinematic Driver for microphysics inter-comparison の略称で、運動学的場(力学場)は外的に与え、雲微物理過程だけを様々なサブルーチンで置き換える環境で、英国 MetOffice の Shipway によって提案され、雲微物理過程研究者が自由に使えるように提供されたものである。ここに感謝の意を記す。なお、詳しい設定は、<http://appconv.metoffice.com/microphysics/index.shtml> を参照していただきたい。