LESを使った境界層内の雲のモデリング

*中村晃三 (FRCGC,JAMSTEC)、野田暁 (FRCGC,JAMSTEC)

1. はじめに

GCSS (GEWEX Cloud System Studies) は、気候に重大な影響を与える雲について、その物理過程をよりよく理解し、モデル化することを目標とするもので、いくつかの特徴的な雲に関して、それぞれ Working Group(以下、WG) を作り、比較実験などを行っている。その１つが、境界層雲 (BL)WG である。

境界層上部にできる雲は、よく知られているように、大きな反射率をもち、また、しばしば広い領域を覆うため、熱収支に大きな影響を与えるが、その大きさ（鉛直スケール、もしくは、水平スケール）が小さいため、通常の大規模モデルではうまく扱えず、パラメタリゼーションも試みられているが、未だ満足できるスキームは確立されていない。

そこで、境界層雲 WG では、多くの雲解像モデルでのシミュレーション結果を持ち寄り、その相互、ならびに、観測結果との比較を行い、物理過程の理解を深め、他方、大規模モデルのためのパラメタリゼーションスキームを使った結果との比較を通じて、その改良を目指している。

地球環境フロンティア (FRCGC) では、坪木らが開発してきた CReSS と気象庁・気象研究所が開発してきた NHM を用いて、この再現実験に取り組んでいる。本報告では、霧雨を伴う層雲（DYCOMS-II － RF02）のケースと、降水を伴う浅い対流雲（RICO）のケースについて、雲解像モデルを使った比較実験を紹介する。特に、モデルに使われている暖かい雨のバルク法の autoconversion のパラメタリゼーションに対する依存性について議論する。

2. DYCOMS-II の層積雲のケース

１つめのケースは、2001 年７月にカリフォルニア沖で行われた DYCOMS-II と呼ばれる観測実験の時の層積雲のケースである。このとき、平均的な下降流の下で、およそ 800m 程度に雲頂高度をもつ層雲が、下層の流れに沿って移動しながら長時間維持されていた。RF02 のケースでは、雲頂高度は流れと共にわずかに上昇し、いくらか霧雨が起きていた。特に、霧雨がどのように層積雲に影響するか、また、雲粒分布を決定するエアロゾルの個数濃度分布がどのように層積雲に影響するかが注目されている。

初期値は、観測で得られた温位、水蒸気、風速の鉛直分布で、高度 400m から 800m の間に雲層があることが特徴的である（図１右の細い実線とｘマークの違いが液水量を表す)。

外力として、地表面からの顕熱（16 $\mathrm{W\,m^{-2}}$）潜熱（93 $\mathrm{W\,m^{-2}}$）と、平均下降流（一定の水平発散 $D = 3.75 \times 10^{-6}\,\mathrm{s^{-1}}$ から計算される鉛直流）による移流を与える。放射効果は、液水量を鉛直積分した値を使って、観測されたフラックスに似た形になるように関数形を決めている。水平格子間隔は 50m、鉛直格子間隔は、地表付近と、雲頂付近では、5m、その間ならびに上層では最大 50m まで変化させて、領域トップの 1500m までに 96 層をとっている。水平方向は周期境界条件を使う。計算は、「雨の生成と霧雨の落下」がある場合とない場合で、６時間行う。

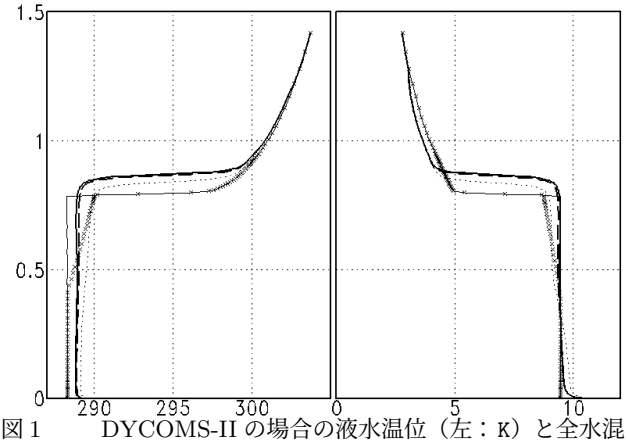

図１　DYCOMS-II の場合の液水温位（左：K）と全水混合比（右：$\mathrm{g\,kg^{-1}}$）の鉛直分布 (単位は km)。細い実線が初期条件 (x マークは温位と水蒸気混合比の初期分布)。太い実線、点線、破線が、それぞれ、Kessler 型、Berry 型、改良 Berry 型を使った 5.5 時間～6 時間の間の平均値。

図２は、モデルで使われた雲水混合比の関数として表した autoconversion の変換率を示している。実線は Kessler 型と呼ばれるもので、閾値以上で雲水混合比の１次関数になっている。閾値は NHM の default の設定の $1\,\mathrm{g\,kg^{-1}}$ とした。点線は Berry 型で、雲水混合比の２次関数の変換率である。破線が Berry の改良型として提案されているものである。

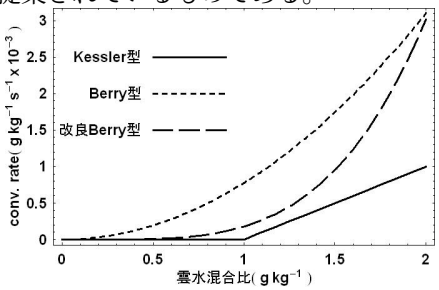

図２　モデルで使われた雲水混合比の関数として表した autoconversion の変換率。横軸：雲水混合比 ($\mathrm{g\,kg^{-1}}$)、縦軸：変換率 ($10^{-3}\,\mathrm{g\,kg^{-1}\,s^{-1}}$)。実線：Kessler 型、点線：Berry 型、破線：Berry の改良型。

図１の太い実線、点線、破線が NHM で得られた６時間後の水平平均した液水温位と全水混合比の鉛直分布である。雲を含む境界層の分布がよく再現され、雲頂高度の上昇率は、６時間で 100m 程度以下に抑えられ

ている。Berry 型（点線）では、初期に多くの雲水・雨水が形成し降水となって落下し、その後も、少ない雲水量でも雨の生成が活発で、上層の液水量は少なくなっているが、持続的な降水が維持される。対流が弱く、上層との混合（上層空気の取り込み＝エントレインメント）が少ないため、雲層の上昇が遅い。また、降水量が大きいため正味の凝結熱が多くて温位は高めの分布になる。Kessler 型では、ほとんど雨は生成しないため、降水は小さく、鉛直積分液水量は大きな値になる。Berry の改良型は全体的には Kessler 型に似ているが、ある程度の地表面降水が起きるなど、観測結果とよくあう結果を与えた（図３参照）。

図３左は、他のモデルを含めた積算液水量と地表面降水量の結果をまとめた図である。各点がそれぞれのモデル（13 のモデルのうち２つがビンモデル）の結果を、楕円が観測結果の代表値を示している。K(Kessler 型)、B(Berry 型)、N(改良 Berry 型) の３つの点が NHM の３つのパラメタリゼーションスキームを用いた結果を示している。モデルによるばらつきは大きいが、NHM の３つの結果も同じ程度の変動幅を示し、autoconversion のパラメタリゼーションへの依存性の大きいことを示している。Berry の改良型が観測結果とよくあう結果を与えていることがわかる。なお、降水の影響に関しては、入れた場合のほうが入れない場合に比べて、対流が不活発になり、雲頂高度の上昇率が下がる傾向などが議論されている。

3. RICO の積雲のケース

２つめのケースは、2004 年 12 月から 2005 年１月にカリブ海で行われた RICO(Rain In Cumulus over the Ocean field campaign) と呼ばれる観測実験の時の積雲のケースである。「貿易風帯で、浅い積雲からの降水が雲の構造や統計をどのように変化させるか」、その過程が数値モデルでうまく表現できるかが興味のポイントである。

初期値は、観測で得られた温位、水蒸気、風速の鉛直分布で、高度 400〜1200m が雲層であるが、積雲の層なので、成層は条件附き不安定な成層である。（図４の x マークが附いた細い実線）。外力としては、海面条件を SST=299.8 K とし、平均下降流（水平発散は $D = 2.38 \times 10^{-6}\ \mathrm{s}^{-1}$ 程度）と、平均的な水平移流を与え、高度の関数としての放射冷却率も与えて、ほぼ平衡になるようにしている。水平格子間隔は 100m、鉛直格子間隔は 40m で、格子数は、128x128x100 である。水平方向は周期境界条件を使う。計算は、24 時間行う。

図３右が RICO の結果をまとめた図で、NHM の３つのパラメタリゼーションスキームを用いた結果は層雲の場合と比べると比較的よくまとまっている（モデル間の違いはより大きい）。しかし、図４からわかるように雲層の発達率には大きな影響を与えるようである。

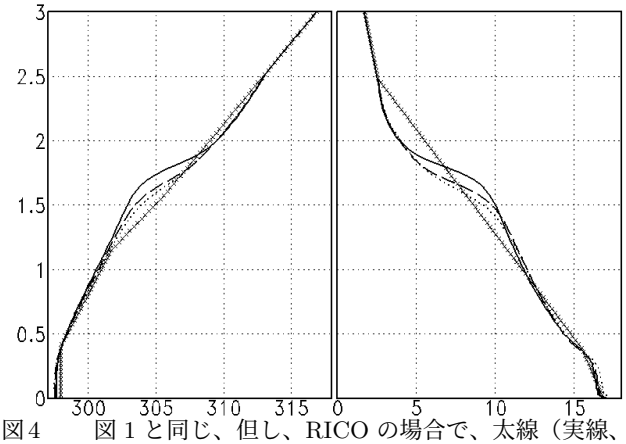

図４　図 1 と同じ、但し、RICO の場合で、太線（実線、点線、破線ともに）は 23 時間〜24 時間の間の平均値。

4. まとめ

GCSS 一境界層雲 WG で行っているモデル比較実験について紹介した。大雑把に見ればかなりの程度で観測結果と似たような結果を与えるようになってきているが、まだまだ、モデル間でのばらつきも大きい。特に、層雲の場合、モデルに使われている暖かい雨のバルク法の autoconversion のパラメタリゼーションが大きく結果に影響することが示された。ビン法での結果も参考にしながら、パラメタリゼーションスキームを確立することが重要だと考える。

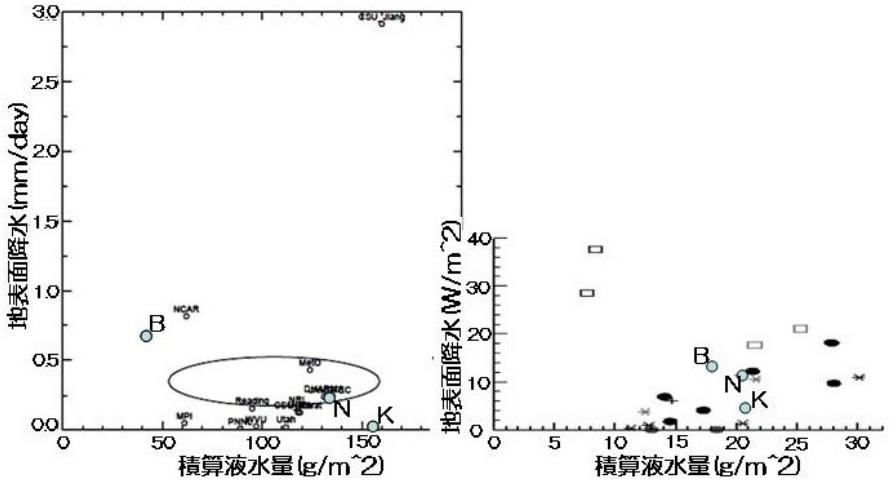

図３　層雲（DYCOMS-II）の場合（左）と、積雲（RICO）の場合（右）の積算液水量と地表面降水の関係。

左では、13 の小さな丸が 13 のモデルの結果を示す。K、B、N をつけた３つの大きな丸が NHM の３つのパラメタリゼーションスキームを用いた結果を示している。K:Kessler 型、B:Berry 型、N:改良 Berry 型。

右では、モデルの数は 11 で、点は半日程度後と一日程度後の２つづつ記されている。

この 2 つの図は、9 月に行われた Joint GCSS-GPCI/BLCI-RICO Workshop での Ackerman と Zanten の発表の図に NHM の３つの結果を書き加えたものである。

参考ホームページ　DYCOMS の層状雲のケース http://sky.arc.nasa.gov:6996/ack/gcss9/index.html
RICO の積雲のケース http://www.knmi.nl/samenw/rico/