

気象モデルにおける雲の取り扱い

*中村晃三 (独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター)、

1. はじめに

まず、「気象のモデルで雲をなぜ考えるか？」を考えよう。その第一の理由は、気象予報でもっとも重要なものの1つが、雨の降り方であり、それは、例えば、短期的、局所的に起こる豪雨の予報も重要だし、また、季節的に考えたときに、例えば、今年の梅雨の雨量が平年に比べて多くなるのかどうかというような予報も重要であるからということである。

しかし、雲の重要性はそれだけにはとどまらない。実は、雲および雨の予測が正しくできないと、他の要素にも大きな影響を与えることがわかっている。それは、例えば、雲ができるということは、それだけ熱の放出があるということ、その熱の分配によって大きな力学場の変化がもたらされることであり、また、他の例としては、雲ができることによって、太陽からの放射による加熱や、地表や大気からの赤外放射による冷却の分布が変化することもあげられる。例えば、台風が水蒸気の凝結熱によって発達するのは、前者の典型的な例であるし、梅雨ややませのような時期は夏至に近く太陽による日射がもっとも大きくなる時期であるにもかかわらず、雲が多くできるために、それほど大きな加熱がもたらされないのは後者の例である。

このように雲は様々な気象に影響を与えるため、気象モデルに組み込まれる物理過程（流れによる変化以外の過程のこと）の中でも特に注目を浴び、初期の頃から様々な扱いが提案されてきた。ここでは、そのような「気象モデルにおける雲の取り扱い方」について、簡単な紹介をしていきたい。なお、ここでの話は氷晶過程を考えないいわゆる暖かい雨についてのみに限らせていただく。

2. 気象モデルとスケールの話

さて、この話は、「気象モデルにおける雲の取り扱い方」と題をつけたが、気象モデルといっても様々なものがある。一般に、日常の天気予報に使われるような気象モデルは、大気全体を覆うような格子を考え、その格子点ごとの代表的な物理量について、その時間変化を近似的に表す差分方程式を時間積分することによって解いていくものである。天気予報に重要な中緯度の総観規模と呼ばれる水平規模が数 1000km の高低気圧を表すのに十分に細かい格子間隔を用いることで、数値予報が実

用的なものになったわけだが、日々の天気には、低気圧内部の構造や、より小さなスケールの低気圧なども重要であり、計算機の発達に伴ってより細かな格子を使ったモデルが使われるようになった。最近では日本周辺を扱うモデルの水平格子間隔は 5km 程度になっている。

これらの格子モデルでは、格子点での物理量の時間変化を表すのに、格子ごとの物理量の空間変化から期待される量（格子スケールの運動による変化量）だけでは不十分で、格子スケール以下のスケールの運動による効果も考える必要がある。これは、例えば、格子間隔が 5km ならば、もっとも粗く見積もって水平スケールが 10km 以下の運動の効果は格子ごとの物理量では表すことができないということである。（もちろん、格子ごとの物理量として、平均値以外に変動量を考えるなどの方法もあるが、ここではわかりやすい単純な場合の話に限定する。）ここで 5km とか 10km というのはかなり微妙なスケールで、例えば、真木（気象学会 2007 春季大会 B 3 0 1）が梅雨期のレーダー解析から、降水セルの平均面積は 16km² 程度としているのと比較すると、非常に大きく発達した積乱雲はぎりぎり解像できるかもしれないスケールだが、基本的には個々の積乱雲は解像できないスケールであることがわかる。

つまり、この程度の格子間隔でも、対流運動は、格子スケール以下のスケールの運動として考え、その効果をどのように取り入れるかを考える必要がある。これは例えば、格子スケール（格子平均）では未飽和であっても、格子内の変動を考えると、格子内の一部の領域では飽和して、活発な対流が起こり、暖かい空気を上へ運ぶ運動が起こっている可能性があり、その可能性を判断し、もし、そのような運動が起こるべきであると判断されるなら、そのような効果を格子スケールの物理量の予測に組み込む必要があるということである。一般に、このように格子スケール以下のスケールの運動の効果を適当な格子スケールの物理量で表す方法をパラメタリゼーションと呼んでいるが、この場合は、格子スケール以下のスケールの運動として、積雲対流を考えているので、積雲対流パラメタリゼーションと呼ぶ。

3. 積雲対流のパラメタリゼーション

初期のモデルで使われた積雲対流のパラメタリゼーションの1つに、対流調節と呼ばれる方法がある。これ

は、相対湿度が基準値未満の場合には、凝結が起こらないと考え、下層の温位が上層の温位よりも大きな値（これは不安定な成層を表す）のときには対流が起こって共通の温位になる（不安定が解消される）とし、一方、相対湿度が基準値以上の場合には、凝結が起こると考えるため、下層の相当温位が上層の相当温位よりも大きな値のときには対流が起こって共通の相当温位になるとするものである。非常に単純な方式で、パラメタリゼーションの意図するところをうまく表現したものであると考えられ、浅い対流を表現するものとして Betts and Miller が提案したその発展形がよく使われている。

このころのモデルの格子間隔は 100km 程度のオーダーであり、1つの格子の中に多くの様々な大きさの対流雲が共存するが、それらの運動は、格子スケールの運動とは別のスケールの運動であって、対流の平均的な効果のみを格子スケールに与える一方、格子スケールの運動の効果は一様に対流に与えられると考えることができるとされていた。さらに、その延長として、Arakawa-Schubert は準平衡の仮定と呼ばれる仮定を導入した。これは、対流は、大規模な収束などによってできる不安定化を解消するように働くとするものである。大規模な条件によって不安定度（例えば下層から持ち上げた空気が得る運動エネルギー：CAPE と呼ばれる）が増加するとき、対流の効果はこの増加を打ち消すように働くと考えられるわけである。不安定度そのものが対流強度を決めるのではなく、その時間変化が対流強度を決めることになるところが特徴的である。このモデルでは、成層状態から計算される「対流による単位量の質量輸送が起きたときのエネルギー生成率、および、そのときの安定化効果」をもとに、大規模場の不安定化を解消するのにどの程度の質量輸送が必要かが計算される。

最近では、格子間隔が小さくなったため、準平衡の仮定というよりは、不安定度そのものによって対流強度を決める方法もよく使われるようである。例えば、このようなモデルでよく使われる Kain and Fritsch のモデルでは、成層から決まる CAPE をある程度解消するように対流の質量輸送を決めている。また、対流モデルも対流スケールの上昇流と下降流とより広い範囲の補償下降流を考えたり、グリッドスケールの鉛直流による温位変動を考慮して対流が起こるかどうかを考えるなど複雑なモデルになっている。

このように複雑化している対流雲パラメタリゼーションだが、それに伴って熱や水蒸気の分配も行われるが、放射に影響する雲分布（雲量）は直接的には扱われないことが多く、別の式を使って表されることが多い。

4. 対流雲の運動を直接表すモデルと雲物理過程のパラメタリゼーション

前節の対流雲のパラメタリゼーションを使うモデルに対して、対流の運動を直接表すような気象モデルも多く使われている。これは例えば、格子間隔が 1km 程度で、前述の 5km のモデルの中に埋め込んで使われるようなもので、例えば地形による発達などのより詳細な対流雲の構造を再現するのに使われる。格子間隔 1km というのは空間スケール 4km 程度の降水セルを解像するのがやっとという感じで、より小さなスケールの雲も多く存在することを考えると、もう少し小さな格子を考えたいところである。

このような対流運動を表すような格子を用い、対流雲のパラメタリゼーションを使わないモデルは、雲解像モデルと呼ばれている。前節で述べたようなモデルで使われる対流雲のパラメタリゼーションをよりよいものにしていくためには、雲の中での物理量（温位、雲水量、雲粒の粒径分布、鉛直速度など）の観測が必要だが、そのような観測は十分にできているとは言えず、また将来的にも難しいと言わざるを得ない。そこで、雲解像モデルを用いて、実際に近い状態を再現し、そのデータを用いて対流雲のパラメタリゼーションを改良していくことがもくろまれている。GEWEX 雲システム研究と呼ばれる研究はこれを共同で行おうとするものである。この研究では気候学的に重要ないくつかの種類の雲のそれぞれについて、雲解像モデルで再現したものを多くの研究者が持ち寄り、観測と比較することでモデルの改良が行われている。例えば、カリフォルニア沖で観測された境界層上部にできる層状雲について、水平格子間隔 50m 鉛直格子間隔 5m での実験を行い、霧雨のような小さな雨粒の落下がその維持・寿命に重要な影響を与えることが明らかになってきている。

このようなモデルでは、通常モデルに使われる物理量、つまり、3成分の速度、気圧、温度、水蒸気量以外に、雲水量と雨水量が予報変数として使われる。ここで、雲と雨のでき方について考えてみよう。通常、雲は、水蒸気を多く含む気塊が上昇し、断熱膨張のために冷却し、飽和水蒸気以上の部分が凝結することで生成するとされている。しかし、水蒸気は飽和量を超えたらすぐに必ず雲粒になるわけではない。実は、飽和水蒸気量というのは平らな水面に対して蒸発と凝結が同じ程度に起こる場合の値で、曲面に対しては状況が異なる。水滴のように凸型の表面では、水の分子間の引力が弱まるので、より蒸発しやすい傾向になる。粒が小さくなればなるほどこの傾向が強まるため、水蒸気だけから最初の小さな雲粒ができるには飽和水蒸気量の数倍の水蒸気

が必要になる。ところが、実際の大气中ではこのような大きな水蒸気量は観測されていない。これは、空気中にはエアロゾルと呼ばれる目に見えない微小な粒が無数に浮かんでいて、その粒を中心に水蒸気が凝結するために大きな水蒸気量にならずに雲粒ができるからである。(例えば、湿った空気が山を越えるときに上昇中に凝結が起こり、その水が落下した後、山を越えて下降するとき、上昇するときの温度変化と下降するときの温度変化が異なるためにフェーンが起こるとされるが、このような状況もエアロゾルがなかったらなかなか起きにくいと考えられる。) エアロゾルには山火事や工場物が燃えるときの煙、大气中の微量ガスの化学反応によるもの、土壌粒子や海水のしぶきなどからできるものなど、様々なものがあり、典型的な半径 $0.1\mu\text{m}$ 程度のもので 1mm^3 に数個ぐらいの割合で存在する。また、エアロゾルが、例えば、海のしぶきからできる塩化ナトリウムのように水に溶けるものの場合、溶液の場合の蒸気圧降下の法則にしたがい、水に溶けている物質のモル濃度に応じて飽和蒸気圧が減少するため、100% 未満の相対湿度でも水滴が生成する。

こうしてできた水滴はたいへん小さなもので、その落下速度は、例えば、直径 $0.1\mu\text{m}$ では 0.03mm s^{-1} 程度と小さく、雲粒として空气中に浮かんでいるのにふさわしいものである。(これは、エアロゾルに関しても言えることだが、これらの小さな粒は、周囲の空気に対しては必ず落下しているので厳密に言うと「浮いている」という言い方が正しいかどうか、疑問を感じず、落下速度が無視できる? という意味で日常的には使われている。) この水滴は、十分に湿った空气中では周囲の水蒸気を凝結させて大きくなっていく。この成長を凝結成長と呼んでいる。直径 $10\mu\text{m}$ まで成長してもその落下速度は 3mm s^{-1} で、そのままでは例えば 1km 落下するのに 100 時間もかかり、なかなか降水として地表に到達しない。

落下速度が数 m s^{-1} と大きくなるのは半径が 1mm 程度になったもので、この程度のもを雨粒と呼んでいる。しかし、大きくなるにつれて、凝結成長での半径の増加速度は小さくなる。そのため、凝結成長だけで落下速度が数 m s^{-1} というような大きな粒に成長する時間を評価すると数? 時間も掛かることになる。実際の雨を降らす雲の中では、雲ができてから数十分程度で雨が降り出すことが多いが、このときの雨の成長には、いくつかの水滴が互いにぶつかって合体することが重要である。この過程は併合成長と呼ばれている。このとき、水滴の落下速度は水滴の大きさで決まるため、同じ程度の大きさの水滴どおしではぶつかりにくい。そのため、大きな水滴が生成するには、異なった大きさの水滴ができ

ることが重要で、雲が生成するとき、どのような大きさの水滴がどのくらいの個数できるか(粒径分布と呼ばれる)が雨粒の生成速度、言い換えると雲の寿命を決めているということが出来る。例えば、基になるエアロゾルが同じ程度の大きさで大量にある場合、過飽和の分の水蒸気をもとに同じ程度の大きさの水滴が多量にできるため、1つ1つの水滴の大きさはごく小さくなり、しかも、同じ程度の大きさのためその成長は非常に遅くなり、なかなか雨粒に成長しないということになる。

このような過程を数値モデルにいれるとき、これまでの多くのモデルでは、凝結した水を雲水と雨水に分けて考えている。ここで、雲水は落下しない水、雨水は落下する水を表すものとして扱われ、雨水の落下速度は雨水量などの関数として決められる。このとき、飽和水蒸気より多い量の水は、まず、雲水になるとされる。ある程度の量の雲水が生成すると、雲水量(と雨水量)の関数として表される雲水雨水変換率(雲水から雨水への変換率)に従って雲水から雨水への変換が起こる。雨水が落下によって未飽和中の移動した場合、また、雲水を含む空気が下降して未飽和になった場合、雲水は瞬時に蒸発させるが、雨水はある時間スケールで徐々に蒸発させる。このため、ある程度以上の量の雨水が生成されれば地上まで落下することができ、これが地上降水になるということである。このようなモデルをバルクモデルと呼んでいる。このモデルには、いくつか経験的に決めなくてはならない関数がある。それは、雨水の落下速度、雲水雨水変換率、雨水の蒸発の時間スケールである。このうち、雨水の落下速度と雨水の蒸発の時間スケールは、雨水量の関数として表すことになるが、それは、どの大きさの雨粒がいくつつあるかという粒径分布に依存する。ある大きさの雨粒ならば、その落下速度と蒸発の時間スケール(相対湿度の部分は別にした関数)は実験的に決められるので、各雨粒についてその大きさを評価し、それを足し合わせたものが全体の雨水の落下速度と蒸発の時間スケールとすることができる。

バルクモデルにもいくつかの種類があり、もっとも単純なものは、雨水量だけを使う予測変数とするモデルで、より複雑なものとして、雨水量以外に雨粒の個数も予測変数とするモデルがある。前者を1モーメントモデル、後者を2モーメントモデルと呼んでいる。1モーメントモデルでは、観測で得られる粒径分布と雨水量との関係を基にして、経験式をつくり、雨水量から求まる粒径分布に対応する雨水の平均的な落下速度と蒸発の時間スケールを使うことになる。通常、雨粒の粒径分布は、小さい雨滴ほど多く、大きな雨滴が急激に少なくなる指数分布を考えるが、雨水量だけの関数として考える場合、小さな雨粒の数は変化せず、強い雨ほど大きな雨粒

の数が大きくなるような分布 (Marshall Palmer 分布) で表すことになる。この場合、それらは雨水量だけの関数のため、雨粒生成のエアロゾル数への依存性を表現することはできない。これに対して、2モーメントモデルでは、雨粒全体の個数だけではあるが、その情報も使えるため、元になるエアロゾル数の影響を反映した表現になる。例えば、同じ雨水量の場合、個数が多いほど落下速度は小さくなるし、蒸発の時間スケールは小さくなる。この違いは放射への影響を考える場合にも重要で、小さな雲粒が大量にできた場合の方が、大きな雲粒が少ししかできない場合よりも雲の放射の効果が大きくなる。また、落下速度が小さくなって雲の寿命が長くなって放射に影響するという効果もある。

雲水雨水変換率については、2つの過程を考える。1つは、雨水量に関係しない autoconversion と呼ばれる過程で、もう1つは、雨水量と雲水量の関数で書かれた併合による変換率を表す過程である。ここで autoconversion と呼ばれるのは、雲粒 (雲粒と雨粒の境として考えた大きさよりも小さな粒) が凝結成長によって境を越えて大きくなる部分と雲粒どおしが衝突して境を越える過程を表すもので、雨粒と雲粒が衝突して、雨粒が成長する過程は併合の方で表されることになる。これらの値も、どの大きさの雨粒がいくつずつあるかという粒径分布を与えれば、衝突の起こる確率に従ってその成長率を計算することができるが、1モーメントモデルでは雨水量と雲水量だけの関数として扱うので、雨粒生成のエアロゾル数への依存性などを表現することはできない。

雲水、雨水の質量だけでなく、それぞれの個数を扱う2モーメントモデルの方が、より正確に雨水に生成、落下をあらわすことができるが、さらに、粒径分布の広がり幅を考える3モーメントモデルも考案され、その有効性が議論されている。

これらのバルクモデルに対し、雲粒・雨粒の成長をより直接的に表すのがビンモデルである。ビンモデルでは、全体の水滴をその質量 (大きさ) に応じて分類し、それぞれのグループ (ビンと呼ぶ) の質量の時間変化を予測する。ここでもそれぞれのグループの質量だけを予測する1モーメントモデルと、質量と個数を予測する2モーメントモデルがある。1モーメントモデルの場合には、グループを代表する大きさの粒の質量でそのグループ全体の質量を割れば個数を求めることができる。もちろん2モーメントモデルの方がより正確な予測ができるが、例えば、隣どおしの質量の比を2の平方根とすると、半径が2倍のところまでに6つのビンが必要になり、半径 $1\mu\text{m}$ から 1mm までの1000倍までには約60のビンが必要で、つまり、各ビンの1つの変数について全体で60の変数が必要になるため、計算機容量、

計算時間を考えると1モーメントモデルにしたいところである。

ところが、1モーメントビンモデルには、ちょっとした問題がある。それは、数値拡散の問題である。1モーメントビンモデルでは、各ビンの中での粒径分布は固定 (通常は一定) して考えるため、ある粒径分布が表されたとき、その中で最大の雨粒を含むビンの質量はそのビン全体に分布すると考える。このとき、そのビンの中で最大の粒径の雨粒も存在するため、次の時間ステップでは、(飽和の状態が保たれている場合) その隣のビンにも雨粒が成長する。その新しく成長した雨粒を含むビンでは、その質量はビン全体に分布すると考えるため、その次の時間ステップでは、またその隣のビンにも雨粒が成長する。もちろん、質量は非常に小さなものだが、このように次々と大きなビンの質量が生成されると、大きな速度で落下し、他の水滴を併合するということが、非常にもっともらしくない結果を与えることがある。このような現象は数値拡散と呼ばれ、それを避けるための工夫が必要になる。これに対し、2モーメントビンの場合は、個々のビンに対して、その質量と個数を変数とするため、その中で粒径分布を考えることができ、最大の雨滴のあるビンの中では、大きな方の端の付近の個数が0になるため、数値拡散を自動的に避けることができる。

もちろん、このようなビンモデルを直接大きなスケールの例えば、数値予報モデルに組み込むことは、現在の計算機環境でも、困難である。そのため、このようなモデルは、実際に起こっていることを理解し、再現するという観点で使われ、さらに、そこで理解できた物理過程に基づいて、その結果を用いて、バルクモデルのパラメタリゼーションを改良、拡張を目指すことになる。前述した3モーメントバルクモデルはそのような結果を使って提案されたものである

5. 終わりに

現在、地球温暖化に関する議論が活発であるが、人間活動によって変化するもののひとつにエアロゾルがある。エアロゾルの分布の変化が雲を通じてどの程度の影響を与えるかは、非常に重要な問題であるが、まだよくわかっていない問題である。それらの効果を考えるためには、エアロゾルがどのように雲生成過程に関係するかをうまくモデルに取り込むことが必要である。最近のモデルでは、細かな雲解像モデルの結果を使ったパラメタリゼーションを組み込んで全球のエアロゾル分布から雲の特徴を再現するようなシミュレーションも行われるようになってきた。今回のお話のような議論の理解に少しでも役立てば幸である。