

大気大循環モデルにおける雲物理過程に関する ワークショップに参加して*

萬納寺 信 崇**

1. はじめに

1995年5月23日から25日まで、カナダのカルガリの近くのカナナスキスという場所で行われた「大気大循環モデル (GCM) における雲物理過程に関するワークショップ」に参加した。GCM で雲をより精密に扱うにはどうすればよいか、という事がこのワークショップのテーマである。参加者は約25人 (写真1) というこぢんまりしたワークショップで、参加者はほぼ全員が発表を行った。3日間で23件の発表が行われ、一人の持ち時間は45分というゆったりした日程だった。主催者である D. Randall (Colorado State Univ.) は、これはインフォーマルなワークショップであり、その証拠に registration がない、と言っていた。

従来、気候変動の研究や数値予報に使われる GCM では、雲量は相対湿度などから診断されるのが普通であった (例えば Slingo, 1987)。雲量と湿度の観測から経験的に求められた関係式、モデルの OLR (外向き長波放射量) が観測に合うように作られた関係式、などが使われる。

近年、気候変動における雲の重要性が指摘されている。雲は放射を通じて気候に大きな影響を与える。気候変動に対する雲のフィードバックを正しく評価するには雲の放射特性をモデルが表現する事が必要である。しかし経験的、統計的な関数で雲量を表すだけでは不十分であろう。

そこで GCM に雲水を予報するという手法を導入することが考えられた。H. Sundqvist はこの分野の先駆的研究者である。積雲モデルやメソスケールモデルでは精密な雲物理過程がすでに使われている。しかし格子間隔の違いや計算機の能力により、これをそのまま



写真1 参加者の記念写真

GCM に使うわけにはいかない。気候変動の研究に使われるような GCM では格子間隔は 200 km 程度、数値予報に使われるモデルでもせいぜい 50 km 程度である。このような格子間隔では格子の中に雲のかかる部分と雲のない部分が存在する。格子スケールで飽和した場合だけ凝結する、という簡単な仮定では不十分である。これが格子間隔が数10～数100 m の積雲モデルと大きく違うところである。また、雲水、雲氷、雨水、雪、あられ等の量、粒子の平均の大きさ、粒子の総数、さらに粒子の数の大きさ別の分布等を予報変数にするような精密な雲物理過程は、変数の数が多すぎて、現在の計算機能力では GCM には不適當である。このような状況でワークショップが開かれた。

2. ワークショップの内容

まず、Randall が現在の状況を概観し、GCM における雲量の表現にどんな方法があるかを次のように大まかに分類した。

- (1) 雲量 (f) を診断的に求める方法。Sundqvist (1978) は雲水量 (m) を予報しているが雲量は相対湿度の

* Report of the Workshop on Cloud Microphysics parameterizations in GCMs.

** Nobutaka Mannoji, 気象庁数値予報課.

© 1996 日本気象学会

関数にしている。Randall は予報した雲水と相対湿度から雲量を計算する経験的関数を示した。

- (2)格子の中の 'total water' の値の分布関数を仮定する方法。温度と水蒸気 (T, q) の代わりに次のように定義される Liquid water temperature と total water (T_l, q_t) を予報変数にする。

$$T_l = T - (L/C_p) m$$

$$q_t = q + m$$

この2つの変数は、水蒸気が凝結して雲水になっても、雲水が空気と共に動くならば保存する量なので、凝結を考える場合には都合がいい。 T_l と q_t を求めた後、1つの格子内での q_t の値の分布関数を仮定して q_t を q と m に分配し、雲水量が分かる。格子の中で雲水の存在している部分が雲であることから雲量も求まる。この方法は、雲水に対する乱流の効果も容易に組み込める。例えば Smith(1990), Le Treut (1990)。

- (3)雲量と雲水を新たに予報変数に付け加える方法。雲水の予報方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} dm/dt = & (\text{移流項}) + (\text{積雲による増加}) \\ & + (\text{層雲による増加}) \\ & + (\text{降水による減少}) + \dots \end{aligned}$$

雲量についても同様な方程式が書ける。そして右辺の各項をモデルの格子点値で何とか表現してやろう、という方法である。例えば Tiedke (1993), Randall は、これが一番有望な方法であろう、また、積雲による増加を表現するには荒川-シュートのようなマスフラックスを計算するパラメタリゼーションが適している、といていた。

続く発表でも、雲の作り方はいくつかの方法があるが、降水過程はほぼ共通の方式を使っていた。例えば、雲から雨への変換速度 P は次のような式を使う。

$$P = C_T m \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{m/f}{m_c} \right)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

これは雲の中での雲水の濃度 m/f があるしきい値 m_c 以下では雨への変換は小さく、それ以上であれば C_T という時定数で雨に変換される事を示す。水と氷が共存すれば変換の効率がよいこと、上からの降水があれば変換の効率がよいことを表現するための工夫がこの式に付け加わる。

液体の雲の落下速度は無視できるが、氷の雲の落下速度は無視できない事がこの分野での共通する認識である。氷の雲の落下速度 v を良く近似する次のような

関数が使われている。

$$v = a (\rho m)^b \quad (2)$$

ここで a, b は観測から決められる量、 ρ は空気の密度である。

0°C以下でも過冷却の液体の雲は存在する。水(液体)と氷の混合状態も考慮するため、多くのパラメタリゼーションは雲水(液体)と氷の比率を温度の関数で表していた。雲氷を別の予報変数にする方法もある。

主要な数値予報センターは雲水予報を実用化、あるいは試験中である。C. Jakob (ECMWF) は氷の雲をどのように取り扱えば物理的に矛盾が少なく、観測に合うかという感度実験の結果を発表した。例えば、氷の雲が落下した場合、その下の層では温度が0°C以下なら氷だけが増えるはずである。しかしこのパラメタリゼーションは水と氷は温度の関係で区別しているため、水も増えることになる。さてどうするか、という問題である。水と氷で放射特性が異なるため、この問題は結構大きな影響を持つ。水と氷を違う変数にするとこの問題は解決するかもしれないが、そのつもりはないようだ。ECMWF はすでに現業用モデルに Tiedke (1993) のパラメタリゼーションを組み込んでいる。初期値は前の予報値をそのまま使っている(つまり雲の観測は使わない)が、不都合はないそうだ。また、雲の移流は入っていない。

S. Ballard (Univ. Reading) は UK Met. Office のモデルを使い、水と氷を区別する関数の感度実験の報告を行った。また、雲氷を新たに変数として付け加えるパラメタリゼーションを試している。UK Met. Office のモデルは Smith (1991) のパラメタリゼーションを使っている。対流性の雲による雲氷は考慮していないので熱帯での雲が少ない。

Q. Zhao (アメリカ NMC) は Sundqvist のパラメタリゼーションを NMC の全球モデルに入れた。テストの結果、雲水の予報は数値予報の精度向上に貢献しそうである。雲の移流は入っている。このモデルでも対流性の雲は考慮していないが、熱帯の雲は少ない。UK Met. Office のモデルとは様子が違う。同じパラメタリゼーションを組み込んだ NMC の領域モデルでは雨の予報が良くなった事も報告した。

筆者は気象庁の全球モデルに雲水予報を導入して行った予報の一例を紹介した。

雲予報を組み込んだ気候モデルの研究結果も発表された。H. Le Treut (フランス CNRS) は T_l, q_t を予

報変数にするパラメタリゼーションを使っている。 q_t をどのように雲水と水蒸気に分配するかにより、モンスーンの表現がかなり変わる事を示した。

E. Roeckner (Hamburg Univ.) は、ECHAM モデル (ECMWF モデルの Hamburg 版) を使い、異なる分解能のモデルに対して式 (1), (2) のパラメタを変える、ということをやっていた。式 (1) の雲水が雨に変わる時定数を調節してアルベドを観測に合わせ、式 (2) の雲水が落ちる速さを決める定数を調節して OLR を観測に合わせる。別の機会に、マックスプランク研究所のモデルはぎちぎちにチューニングをやっているようだという話を聞いたことがあり、このようなことか、と思った。

S. Ghan (Pacific Northwest Lab.) のパラメタリゼーションはほかのものと少し変わっていた。 T_L , q_t を予報変数にするパラメタリゼーションを基本として、それに新たに雲水量と雲氷粒の数を予報変数として付け加えた。

Cloud Ensemble Model (CEM), または Cloud Resolvable Model (CRM) と呼ばれるモデルによる研究の紹介もあった。CEM とは、2 次元または 3 次元の狭い領域で、高い分解能と精密な雲物理過程により、雲を一つ一つ陽に (explicit に) 表現するモデルである。外部強制力となる境界条件として観測データ、あるいは理想的な条件が与えられる。

M. Moncrieff (NCAR/MMM) は観測に基づいた境界条件を CEM に与え、組織化する雲としない雲が、観測と同様にモデルで表現されることを示した。

J. Kiehl (NCAR/CGD) は、CEM で anvil の数値実験を行い、積雲活動が活発な時には 400 hPa より上層で水が多い事を示した。この結果を用いて、雲氷の生成率は 500 hPa のマスマックスに比例するというパラメタリゼーションを提案した。

雲の観測もパラメタリゼーションの検証、開発に必要である。A. Heymsfield (NCAR/MMM) は CEPEX の観測データを示し、熱帯の anvil は温度が低いほど雲水量は少なく、雲粒の断面積が小さいことを示した。いくつかの数値モデルで熱帯の anvil は温度が低くても雲水量が多いという結果を出しているが、これとは対照的である。

雲水量が分かったとしても放射の計算のためにはまだパラメタリゼーションが必要である。雲の放射特性を決めるには雲水量のほかに、水 (液体) か氷か、雲粒の大きさ、雲氷の形などが必要である。K. N. Liou

(Univ. Utah) は平均氷晶有効半径などを求めるパラメタリゼーションを提案した。

最後に総合討論が行われた。まず Randall がこのワークショップで明らかになったことを 3 つ挙げた。

(1) 最近 5 年間の間に雲水予報を行うモデルが増えてきた。(2) CEM の結果を雲水予報のパラメタリゼーションの開発、改良、検証に使う事が有効である。(3) 雲氷の量、雲氷の粒の数の観測が不足している。

その後出されたいろいろな意見を並べておく。CEM の境界条件には GATE のデータが使えるのではないが、TOGA/COARE のデータも使えるかも知れない。地上からの目視観測もいずれ雲予報の検証に役立つであろう。ある格子点に濃い雲と薄い雲がある場合の放射量は平均の濃度の雲がある場合とは随分違うので、どうにかしたい。雲水が衛星からの観測と合わないが OLR は合う、というようなモデルは変だ。(Roeckner のように、とは言わないが) 観測で決めることのできる定数をチューニングして変えるのはおかしい。水と氷が共存する場合は水はすみやかに蒸発して氷の上に凝結するので、水と氷の混合状態にそんなに神経質になることはない。また、この分野のゴッドファザーである Sundqvist は、数値予報モデルに雲水予報を取り入れるようになったことは喜ばしい、というようなことを述べていた。

3. おわりに (または筆者の行動)

このワークショップはモンレーで AMIP の会議 (鬼頭ほか, 1995) があった次の週に行われた。筆者はその AMIP の会議に参加した後、土曜日の夜にカルガリに着いた。カルガリではその晩は雪が降り、翌朝は銀世界だった。ワークショップの行われたカナナスキスは、カナディアンロッキーのすぐ東側、国立公園の名前にもなっているバンフまで約 50 km の所にある。ワークショップは火曜日に始まる。どうやらその前日の月曜日がカナダの祝日だったからのようだ。おかげでワークショップ前の 2 日間はずぐ近くのバンフ国立公園で過ごせた。緯度が高く、夏時間で、時間帯の西端に近いところに位置するため、夜は 9 時過ぎまで明るく、外を歩くには良い。写真 2 に示すように、ワークショップの行われたカナナスキスロッジのまわりは森が広がり、その奥には岩山がそびえている。ワークショップに集中でき、かつのんびりとできる良い環境である。ワークショップに参加したヨーロッパの人に、いつ帰るのか聞いてみると、来週の月曜だ、来週は夫



写真2 ワークショップの行われたカナダスキス
ロッジ周辺の風景.

婦でカナディアンロッキーのパケーションを楽しむ、
などという答えが返ってきた。中にはキャンピング
カーを借りた人もいた。筆者もワークショップの後、
3日程バンフ国立公園とその北に接するジャスパー国
立公園内にいた。3日ともとても良い天気だった。
天気予報でUV インデックスの予報をやっていた。紫
外線が日本より強いかも知れない。このようなカナ
ディアンロッキーの中の素晴らしい場所でワーク
ショップが開かれた事が、強く印象に残った。

参 考 文 献

- 鬼頭昭雄, 田中 博, 萬納寺信崇, 沼口 敦, 長谷川 聡,
1995: 大気大循環モデル相互比較実験 (AMIP) 第1
回国際会議の報告, 天気, 42, 853-857.
- Le Treut, H., 1990: Sensitivity and validation studies
with a prognostic cloud generation scheme.
ECMWF/WCRP Workshop. Clouds, Radiative
Transfer and the Hydrological Cycle, 12-15,
November, 1990, 223-239.
- Slingo, J. M., 1987: The development and verification
of a cloud prediction scheme for the ECMWF
model, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113, 899-927.
- Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer
clouds and their water content in a general circula-
tion model, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 116, 435-
460.
- Sundqvist, H., 1978: A parameterization scheme for
non-convective condensation including prediction
of cloud water content, Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,
104, 677-690.
- Tiedtke, M., 1993: Representation of clouds in large-
scale models, Mon. Wea. Rev., 121, 3040-3061.

月例会「第40回山の気象シンポジウム」のお知らせ

日 時 (予定)

平成8年6月15日 (土) 13時から

場 所

専修大学付属高校梅田記念館

(東京都杉並区和泉4-4-1)

京王線代田橋駅下車北へ約1km

講演希望の方は演題に200字以内のアブストラクト
をつけて4月末までに下記に郵送して下さい。

〒183 東京都府中市西原町4-22-1

高橋 博 気付 山の気象研究会