



天 気

1988年9月
Vol. 35, No. 9

602 (雲; 気候; 研究集会報告)

clouds in climate II 研究集会 (1987年10月) の報告*

1. 概 要

武田喬男 (名大・水圏研)

1987年10月19日～23日, アメリカ・メリーランド州のコロンビアで、『WCRP: 気候における雲——モデリングと観測——研究集会(clouds in climate II—a WCRP Workshop on modeling and observations)』が, WCRP, NASA, NSF, NOAA, DOE (Department of Energy) の協力の下に開かれた。日本からは, 名古屋大学の武田喬男, 気象研究所の谷貝勇が参加し, 他に, アメリカの NASA Goddard Space Center に滞在中の東北大学の中島映至, NCAR に滞在中の小林隆久が参加した。以下, 集会の概要とそれぞれの印象を述べる。

ほぼ7年前の1980年10月, NASA の研究集会 “clouds in climate—Modeling and Satellite Observation Studies” が開かれた。これは, clouds processes の理解の不足, および気候モデルにおける雲のとり扱い方の不十分さが気候とその変化を理解する上で大きな障害の一つになっているとして, 雲—気候の問題において衛星雲データについてどのようなことを優先させるかを提言することを目的とした。その結果, 雲の radiative properties と interaction の地球規模の climatology を明らかにすること, 衛星データの処理・解析方法を開発するための研究を組織することについて作業グループをつくることなどが提言された。

これらの提言に対応して, その後多くの研究が行われてきた。今回の研究集会は, 地球規模の雲の分布, およびその気候への影響に関する研究の進展状況を, モデリングと観測の両方について再評価し, 次の数年の研究と

目標と優先度を検討するために行われた。

コロンビアは, 1963年以後意図的に新しい都市としてつくられたところで, 施設もよく整い, “アメリカの most successful new town” としてよく知られている。会場の The Columbia Inn はコロンビアの Kittamaquandi 湖に面していて, ちょうど紅葉の美しい時季でもあり, 素晴らしい環境の中での研究集会であった。集会には, アメリカ, イギリス, フランス, ドイツ, オーストラリア, ノルウェー, 日本などから, 約150名の研究者が集まり, 熱心に, ただし気楽に, 発表, 討論が行われた。

研究集会は次の5つの session を5日間に分けて行われた。

Session IA: Cloud observational studies—ISCCP/regional programs

Session IB: Cloud observational studies—other

Session II: Clouds and radiation

Session III: Clouds and dynamics

Session IV: Clouds in the global hydrological cycle

Session V: Clouds and CO₂, ENSO and other contemporary climate problems

それぞれの session での発表論文数は, invited paper も含めて, IA～IIIで15から20編, IVとVで5～10編であった。

詳細は後の3人の報告を参考にして頂くことにし, ここでは全体としての印象を述べることにする。観測計画の結果については, cirrus に関するものを除いて, 観測データはこれから解析されるものが多く, 質疑は必ずしも活発ではなかった。今回の研究集会の一つの話題は cirrus に関する研究発表であり, 後でも述べられている

* On clouds in climate II Workshop

ように, cirrus の物理的性質の新しい観測事実, 衛星データあるいは他のデータを用いた cirrus の雲量の評価, GCM における cirrus の取扱いなど, 種々の発表が行われた。しかし, cirrus に関する定義, cirrus と判定する criterion が立場によりかなりまちまちであり, 時には cirrus-level の雲という言い方がなされていた。GCM と衛星データ解析の cirrus には, ある共通性があるようであるが, むしろ, それらと航空機などで観測される cirrus との間に, 概念としての gap が大きいようである。

この事は, cirrus に限らず, 他のタイプの雲についても同様で, GCM と衛星データ解析との間には雲に対して共通概念をつくることのある程度可能であり, 両者の結果を比較することができるようになった。しかし雲についての field experiment の結果を, 気候の研究として, GCM あるいは衛星データ解析と比較しながら, 述べることができるようになるには, まだ時間が必要のようである。

似たようなことは, ISCCP と関連して, 衛星雲データの側からも指摘されている。つまり衛星データから得られる“雲量”とは何か, という問である。その疑問は, この研究集会における一つの中心的な語句でもあった cloud radiative forcing をめぐっても, 問いかけていた。衛星がちがえば, 波長, 分解能など測器の性能が異なるため, “雲量”が定量的に異なる。いい換えれば, 衛星観測で定義される“雲”は, 決して地上から目視で観測される雲そのものではない。衛星データから, いかにして晴天領域を定義するかという問題でもある。空間的, 時間的に平均した cloud radiative forcing の地球規模での分布を評価する際, 誤差にもなる。対象とする研究課題にもよるが, 気候の研究でも, 正しい根拠のあるデータで議論することが大事であり, また衛星データはこれまでの気象データとは一味も二味もちがうものであり, 今後, この問題に対する研究はますます重要になる。雲に関する field experiment の意義の一つは, 衛星データの better interpretation のための良いデータセットをつくることにある。ただし, よくいわれる ground truth では必ずしもない。研究集会での発表・討論をおおざっぱにまとめてしまえば, 気候における cloud-radiation の問題は, ①凝結水量, (liquid water, ある時は solid water), ②雲量, 雲の分布, ③放射量, 放射特性, 光学的特性の平均量と変動量を, さまざまな空間スケールで評価し, それらを比較することであり, それら

の関係を物理的に理解しようとするこのようである。そして, それらの関係において, 大気の構造, 気候域, 季節をどう考慮し, 微物理過程の関与のしかたを正しく理解しようとしている。もちろん, 数値モデリングと観測のいずれにおいても, すでにこれらの関係が得られているわけではなく, 測定すら十分にできないものもあるのが現状である。

現在のところ, cloud-radiation field experiment としては, アメリカの FIRE (First ISCCP Regional Experiment) について, cirrus とカルフォルニア沖の夏の層雲に関する第一回の観測, およびヨーロッパの ICE (International Cirrus Experiment) の第一回の観測が終わったところである。研究集会では FIRE の cirrus experiment を除いては, まだ観測成果は発表されなかったが, 今後, 続々と発表されるであろう。日本の field experiment (Western North-Pacific Cloud-Radiation Experiment) は, 気象研究所が, 関東地方周辺の各種の雲を対象に, 大学が南西諸島海域の冬の下層雲と cirrus を対象によくスタートしたところである。研究集会でも, 今回は計画の概念のみを発表し, 成果の発表はされなかった。欧米のものに比べて規模は小さいながらも, 日本の計画は, アメリカとヨーロッパのものと同様ものとして位置づけられており, 研究集会の Dr. Schiffer の closing remarks では, 次は日本の計画に期待すると述べられている。後発隊グループとして, また, 北西太平洋の雲を対象とするものとして, 日本の計画の特徴を明確にすることの大事さを痛感する一方, 次回の研究集会 (数年後) では, 日本の成果がいろいろと発表されることを期待したい。

2. 放射過程を中心に

中島映至 (東北大・理学部)

FIRE 中の Cirrus IFO (International Field Observation) は, 秋に Wisconsin 上空で成功裏に行われ, 現在 ETO (Extended Time Observation) が続行中であるが, これまでの観測についてのいくつかの解析結果が報告された。航空観測の報告例としては, NCAR/King Air aircraft による 6 例の cirrus cloud 中の粒径分布と氷晶の形状の観測 (Heymsfield *et al.*), 放射場の特徴の観測 (Cox), NASA/ER2 aircraft の走査型雲放射計 (MCR) とライダーによる cirrus の光学的な構造の特徴の観測 (Spinhirne and Boers) 等があった。これらの報告は, cirrus の発生機構と大規模場との間の関連や氷晶の発達

過程を把握するために重要である (Starr). Heymsfield *et al.* は, -34°C 程度の低温下でもしばしば水滴を観測した. 又 Spinhirne and Boes によるライダーと FSSP のデータ解析によって, $-49\sim-62^{\circ}\text{C}$ 程度では $30\ \mu\text{m}$ 以下の小さな氷晶が形成されていることが見出された.

これに対して, Marine stratocumulus, IFO は, 1987年7月に California 沖で行われたばかりであり, 地上, 航空機, 衛星によって得られたデータの解析が目下順調に進んでいるところである (Albrecht and Randall). 航空機観測の概要は cirrus IFO とほぼ同じであるが, 雲粒の微小な吸収係数を得るために雲中の放射強度分布を計測する放射計が追加された (King).

衛星による雲の研究は, ISCCP においてデータが整備されはじめたこと, それに対する Scheme check がさかに行われていることから, データ解析, 理論の両面から多くの発表があった. 特に, FIRE との関連では, NOAA9/AVHRR と ER2 搭載の AVHRR simulator, MCR 及びライダーとの比較研究 (Arking *et al.*), LANDSAT センサーによる雲の粒径分布の解析 (Welch *et al.*) などの発表があった. Arking *et al.* によると衛星から得られる雲の光学的厚さ, 雲量, 雲頂温度は, 航空機に対する微小スケールの解析結果と良く一致する. これらの研究では, 放射計の分解能と雲の放射場の水平非一様性について, 十分な配慮がなされなければならない (Kobayashi), フラクタル特性を持つ broken cloud による散乱放射場のモンテカルロシミュレーション (Wiscombe and Ridgway), 三次元放射場の closure 理論 (Stephens) などがそれらの理論的解釈の助けになると思われた. 特に Welch *et al.* が行ったような現実の雲の形状解析では, 雲判定の規準となる輝度のしきい値が結果に影響を与えることが指摘された. これに関連して, Wielicki *et al.* は, LANDSAT/TM 画像を調べて, 衛星の分解能が雲の端やうすい雲の処理に重要で, 雲パラメーターの算出に大きな影響を与えることを示した. 地上観測から雲量を求める試みも行われている (London *et al.*), この場合には, 衛星の場合と異なる種々の誤差の原因が指摘された (Warren *et al.*). London *et al.* によって得られた雲量分布は, 海上での観測点が少ないのを反映して, 衛星より得られたものに比べて, 経度方向に一様な傾向を示した.

さて, 衛星からの remote sensing の新手として, GOES/VAS の CO_2 チャンネルを利用した雲頂高度と emissivity の評価 (Wylie *et al.*), SAGE の limb-

sounding sensor を利用した cirrus の観測 (McCormick) 等が注目される. これらの成果は, 他の手段によって得られてきた雲量分布等と, 個々の測器に含まれる系統的な誤差を考慮して, 十分に比較される必要がある.

Kyel *et al.* による NIMBUS-7/THIR, TOMS の6年間の雲量解析では, 極域の雲量が過大に評価されている可能性があり, これらの新たな手法の利用や, 極域での雪氷, 特異な温度成層, 低い太陽高度を考慮した理論的な研究が必要であると思われた (Gratzki and Gerstl). 衛星間のデータの比較, モデルとの比較も ISCCP のターゲットとして, さかに行われている. Suskind and Wu によると, AVHRR で得られた OLR (Out going Longwave Radiation) は ERBE に比べて振幅が小さい傾向を持つ一方, Remote Sensing から得られた温度プロファイルを使って理論計算した OLR は ERBE の測定結果とよく一致することが見出された. 一方, 一次及び二次元ヒストグラム法を利用した GOES 雲量は, ISCCP のそれとかなり違うことも指摘され (Schmetz), センサー間のマッチングについて注意深い考察が必要ながわかった (Rossow).

GCM 等のモデルを利用した研究は大きく分けて, 衛星データとの比較と, モデルの感度テストがあげられる. 前者では, GCM で生成される雲分布, 日変化パターン等がおおむね ERBE 等の観測と矛盾しない (Randall and Harshvardhan) が, 一方, 雲量の自己相関が現実のものに比べてモデルではかなり小さく, ノイズ的な要素を多く持っていることが指摘された (Cambell *et al.*). それ故, GCM における雲に関するパラメタリゼーションも一層の改良が必要であると思われた (Harshvardham). Harshvardham は, 雲水量, 消滅係数などが温度の強い関数であることに着目して, パラメタリゼーションを行っている.

CO_2 doubling の問題など, 現実の観測だけでは予想できない気候変動の問題についてはモデルの感度評価が不可欠であるが, この点についても多くの問題があることが指摘された. 現在稼働中の GCM の感度の違いは, 主にモデルのコントロール状態の平均温度に依存していて, 雲の生成の仕方や海洋表層の取り扱い方の違いは, 平均温度を通して感度に影響していることが指摘された (Cess and Potter). 雲自身がモデルの感度を増す方向に作用するか否かは, 生成過程が他の物理過程と深くむすびついていて単独に取り出して議論することはむづかしいが, 地表付近では雲は negative feedback を形

成し、大気に対しては positive feedback を形成する (Roeckner): 雲の生成される高度及び緯度によって feedback の方向が変わる (Ou and Liau) 等の特徴が指摘された。上に述べた三者の一致した意見は、これらが相殺しあった結果、全球に対しては弱い positive feedback になるということのようであった。議論の全般にかかる問題として Shukula は、ZAPE (Zonal Available Potential Energy) の生成が主に対流活動によっており、大気循環の問題では、放射過程の寄与は、相対的に重要でないという見解を述べた。これに対して、Betts は、放射冷却によって引き起こされた大規模な、沈降流によって生じる precipitation heating が大規模循環の中で重要な役割を果たしており、cloud forcing は convective forcing に匹敵することを示した。

3. 印象記

小林隆久 (気象研究所)

この Workshop は WCRP の今までの成果報告と今後の研究の方向づけを行うために開かれたもので、1980年の第1回に続く2回目である。内容は ISCCP, FIRE, GCM 関連の3つに大別される。

ISCCP は 1983 年 6 月から METEOSAT, GMS, GOES 等のデータを集めており、そのデータが多少累積したのでこのデータによる報告が多くみられた。内容としては、雨量や放射温度の日変化、地理的分布、GCM との相関等のデータ解析、地上観測、FIRE, AVHRR や NIMBUS7 と ISCCP の比較、Resolution やデータの解析法による BIAS など衛星データの質を吟味するものも多かった。これは、現在まだ確固としたデータ解析法が決まっておらず (たとえば雲量では Threshold 法, Hybrid bispectral 法, Special coherence 法等が提案されているが必ずしも一致しない)、また、衛星データからいかにして真値を求めるかをまだ模索 (今までに数多くの解析法の報告があるにもかかわらず) している状態が続いているためと思われる。

FIRE は、WCRP に関連して US (英国、仏も参加) が行っているもので、1986~1989 年の間観測を行う予定である。NASA, NCAR, Univ. Washington 等の Aircrafts が雲の microphysics, 放射, chemical, turbulent を測定しているがまだ始めたばかりで解析はそれ程すすんでいない感じがした。あと目についたものは、Cirrus (これは FIRE の主目的の1つ) 関連、IR のマルチスペクトル観測で、その特性を推定するなど今後も重要な

テーマのつとして続くと思われる。

4. 大気大循環モデルを中心に

谷貝 勇 (気象研究所)

1年前の NWD シンポジウムの流行語を“gravity wave drag parameterization”とするなら、今回のは“Cloud Radiation Forcing (CRF)”ではないだろうか。衛星観測の解析や GCM 結果の解析にこの量を用いている発表が多かった。しかしながら、筆者としては衛星データの整理の手段としてはやむを得ないかなと思いつつ、この直観的な量に対しては批判的である。「clear sky と cloudy sky では温度場や水蒸気場の構造が違うのに、単に放射 flux (albedo) の差をとって何になるのか? 熱力学の式に結びつけるには、flux divergence を求めなければ不十分」と考えていたので、Shukla が同趣の発言をして、昼の食事時間を大幅に遅らせる大議論を巻き起こしたのには喝采を送った。

5日間に渡ったこの大規模なワークショップも、日本ではあまり知られていないのではないだろうか (天気には案内が載らなかった)。筆者は Schiffer から手紙ももらって、その存在を知った。ただし、第1回のワークショップに関しては、その結果の報告が WMO から1982年に出版されており、GFDL の Manabe による雲量のシミュレーションの先駆的な論文が発表されているので、よく承知していた。

会議には、アメリカの研究者を中心に各国から集まり、活発な議論と joke がかわされた。NIMBUS による Earth Radiation Budget Experiment のデータが NASA の研究者によって解析され、雲量の7年平均分布図が作成された (Kyle)。ただし、この ERBE のデータは、冬の北極付近で cirrus を非常に多く観測したことになっており、この点が問題になった (筆者が極域の雲の解析をしている Barry に確かめた所、雪のアルビードの影響があって、彼も自信はないとのこと)。

放射と力学に関連したセッションでは、英国気象局と CCC の GCM による雲のシミュレーションがあり、かなり良い climate を作っていた。ただし、そのやり方には結果を合わせるために無理をしているところが見られた。英国気象局のモデル (Smith) では、下降流の所では飽和しても雲を作らない。こうすれば冬の高緯度の大陸で雲が作られ易い共通の欠点 (GFDL, NCAR, UCLA, そして気象研の GCM) がなくなる。CCC の Blanchet の方法は、zonal mean の雲量を予報して、それを経度

方向に水蒸気量等で配分するものである。Blanchet とは、その後、GCM に関して楽しく話し合えた。

筆者は、気象研の GCM による雲量、および OLR, downward solar radiation と観測との比較の話をし、さらに北半球の夏で地表アルビードとして気候値を与えた case と、陸上で一定の値をとる Standard case I との比較をして、雲と放射、地表アルビード、そして large scale dynamics にフィードバックプロセスがあり、大気大循環に重要な影響を与え得ることを示した。かぜ気味のもので、どの程度伝えられるか心配であったが、終わってから、誉められて握手を求められたのはうれしかった。

他の講演では、Julia Slingo による延長予報に対する雲の効果、および Schlesinger による CO₂ 感度実験に対する model response の評価 (いずれも invited paper) が面白かった。Julia による ECMWF のモデルを用いた no cloud experiment は、筆者による MRI-GCM-I を用いた実験と微妙に前提と結果が異なっていることが、その後 2 人で議論をしていて分かり興味深かった。Julia の夫の Anthony は (こう表現した方が数値予報モデルを扱っている人達には分かり易い) 転進して、今後は夫妻で NCAR の GCM を使った実験をするそうで、Slingo and Slingo (1987) の紹介をしていた。その実験の中で、雲のインパクトとして CRF をコントロールランに与えると、中高緯度の雲の影響によって PNA に類似したパターンが見られることを示した。NASA の Randall は、UCLA の 9 層モデルを使った解析を、CRF と関連して報告していた。UCLA モデルと MRI: GCM とは低緯度の雲量が観測に比べて少なく表現される共通の欠点があり、この点を Randall と議論した。GCM の中で積雲の先から放出される cirrus の life time が短かすぎることが主要因らしい。現在、cirrus の life time は物理過程の計算間隔と同じ 1 時間であるが、実

際の大気中では、1 度形成された cirrus はもっと長時間存在して放射収支に影響を与えているようである。いずれにせよ、低緯度の cirrus の平均の life time を観測から評価するのは面白いテーマではないだろうか。

GCM でこれらをきちんと計算するためには雲水量を予報しなければならない。その試みをフランスの LMD-GCM (Treat) や西ドイツハンブルグ大学の Roeckner が行っているが、未だ十分な成功はおさめていない。ハンブルグ大学の GCM は格子間隔 110 の粗さであり計算機事情の苦勞がしのばれる。他には Sundqvist がノルウェー付近の limited area model (水平格子 50 km, 10 層) を使って雲水を予報するスキームのテストをしていた。ノルウェーでは、全球の予報は ECMWF にまかせて、その予報値をもらって境界条件として limited area model を動かすとのこと。彼とはレセプションで地形の効果や重力波の影響について楽しく話せた。

ワークショップが終わってから、武田氏、小林氏と一緒に NASA にきている中島氏の案内で Goddard の Space Flight Center を見学した。中島さん一家に感謝!

今回のワークショップでは、数値予報モデルや GCM を扱っている研究者とかなり話し合えた。その内容の大部分は、普段、研究室で雑談の中で話していることだが、結局それが大事なのではなかろうか。雲と放射、そして GCM に関して共通の認識と問題意識を各国の研究者と確認できたところは大きい。時差 13 時間のワシントンまでは確かに遠いが、研究者の数 (質ではない) の比率に向こうと差のある現状では、我々が出向いて議論をするのが最善なのかもしれない。ワークショップの翌週には、TRMM のシンポジウムがあり、ワークショップに出席した研究者も何人か来訪しており、再び話す機会ができた。国際交流は、特に大型の施設やスーパーコンピューターを使う研究では必要であり重要かつ楽しいものである。