

第27回メソ気象研究会報告

1. はじめに

メソスケールから総観・惑星規模にわたる雲・降水過程の階層構造の全貌を理解する上で、衛星観測は重要な研究手段の1つである。とくに、地上観測ネットワークの及ばない熱帯海洋上などの地域では、衛星モニタリングは欠かせない観測手段といえる。過去10年のあいだに、地球観測衛星史上特筆すべき進歩が相次いだ。日米協力プロジェクトである熱帯降雨観測計画 (TRMM) や米国 AQUA 衛星が軌道に乗り、また2006年4月には米国の CloudSat 衛星が打ち上げられた。こういった技術革新を受け、衛星リモートセンシングによる雲・降水気象/気候学研究は大きく前進しつつある。

2006年10月24日(火)に名古屋市ウィルあいちにて開催された第27回メソ気象研究会では、「宇宙から観る雲と雨」と銘打ち、衛星観測研究の最前線で活躍する中堅・若手研究者を講師に招いた。各講演の概要を以下にまとめる。

増永浩彦 (名古屋大学地球水循環研究センター)

2. 衛星搭載マイクロ波放射計データの非静力雲解像モデルへの同化法の開発

青梨和正 (気象研究所)

衛星搭載マイクロ波放射計 (MWR) の輝度温度 (TB) データは、降水粒子や CLWC 等に感度を持つため、非静力雲解像モデル (CRM) に同化することが期待される。但し現状の CRM 雲物理スキムにはバイアスがあるため、CRM に MWRTB を直接的に同化するより、MWRTB からリトリーバルされた物理量を CRM に同化するほうが適当である。

このため本研究は以下の2つを目標とする：

- 1) MWRTB から降水強度をリトリーバルする手法を開発し、リトリーバルされた物理量の観測誤差を評価する。
- 2) CRM で降水強度とその他の物理量の予報誤差

の関係を調査し、これに基づいて MWR からリトリーバルされる降水強度を CRM へ同化する方法を開発する。

本研究は、MWRTB から降水強度をリトリーバルするアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは、陸上では高周波 (37.85 GHz) の散乱シグナルを降水強度に変換する。また、海上ではこれに加えて、低周波 (10.19 GHz) の雨からの放射シグナルも利用する。このアルゴリズムでリトリーバルされた降水強度を TRMM PR, 地上レーダ, GPCP のデータと比較検証した。その結果、海上では、検証データとよい対応がみられたが、陸上では、強い降水を過小評価する傾向がみられた。

本研究は、地上降水強度と CRM 物理量の予報誤差の関係を、Ensemble 予報の出力を用いて調べた。このため、様々な初期摂動を用いた Ensemble 予報実験や、異なる事例についての Ensemble 予報を実行した。その結果、以下のことがわかった：

- 1) 降水強度は、直接関係する水物質の混合比、RHW2の他、風速 (特に鉛直速度)、水物質の数密度などと予報誤差相関を持つ。一方、降水強度と温位の予報誤差相関は小さい。
- 2) 地上降水強度対物理量の予報誤差相関の大きさ、スケールは、流れの場に依存して大きく変化する。

この予報誤差の研究結果に基づいて、降水強度を CRM に同化する以下のような方法を開発した：

- 1) 流れの場に依存して変動する降水強度と CRM 物理量の予報誤差共分散を推定するため、Ensemble Square Root Filter (EnSRF) を用いる。
- 2) EnSRF で解析する物理量として、降水強度と直接関連する、水物質の混合比、RHW2の他、風速場、水物質の数密度を選ぶ。

上空寒気低気圧の事例 (2003年1月29日) についての初期的な実験の結果、このデータ同化法によって、降水物理量や風速場の改善がみられた。

3. 衛星搭載降雨レーダによる潜熱加熱プロファイル推定

重 尚一 (大阪府立大学大学院工学研究科)

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) は、日本によって開発された世界初の衛星搭載型降雨レーダ (PR) によって、1997年11月の打ち上げ以来、降雨の3次元構造を高い精度で観測し続けている。TRMMの主要な科学目的の1つは、観測された降雨データを用いて潜熱加熱の4次元 (時間+3次元空間) 構造を推定することである。我々は、PR降水プロファイルのスペクトル表示 (Takayabu, 2002) を基礎に、PRによって観測された降水プロファイルから潜熱加熱プロファイルを推定する Spectral Latent Heating (SLH) アルゴリズムを開発した (Shige *et al.*, 2004)。SLHアルゴリズムは、雲解像モデルによる TOGA-COARE (西太平洋) シミュレーション・データから作成した Look-up テーブルに基づいて潜熱加熱プロファイルを推定する。対流性・層状性降雨量比のみから潜熱加熱プロファイルを求める既存の推定法 (Tao *et al.*, 1993, 2000; Schumacher *et al.*, 2004) に比べて、

- 1) 降雨タイプや地上降雨強度だけでなく降雨の高さ情報を用いているために、浅い対流と深い対流の潜熱加熱の違いを現実的に推定できる。
- 2) 層状性降雨に対しては融解層の降雨強度を用いているために、地上無降雨でも潜熱加熱を推定できる。

という特徴を持っている。SLHアルゴリズムの初期的適用結果として、台風及び熱帯メソ対流系に伴う潜熱加熱プロファイル (Tao *et al.*, 2006) や、Madden-Julian 振動に伴う潜熱加熱プロファイル (Morita *et al.*, 2006) がある。

グローバルな PR データに適用するため、GATE (東大西洋)、SCSMEX (南シナ海)、および KWAJEX (西太平洋東部) シミュレーション・データを用いて SLH アルゴリズムを吟味し、

- 1) 対流降雨における液相過程と氷相過程の相対的重要度の差異
- 2) 融解層高度の差異

を考慮した改良を行った (Shige *et al.*, 2007)。改良したアルゴリズムを TRMM PR データに適用した結果、SCSMEX 領域でゾンデデータから診断的に求められた Q_1 プロファイル (Johnson and Ciesielski, 2002) と良く一致し、これまでよく知られている西太平洋 (対流圏上層で最大値) と東大西洋 (対流圏中層

で最大値) の潜熱加熱プロファイルの特徴の違い (Thompson *et al.*, 1979) も示していることがわかった。また、熱帯太平洋における潜熱加熱プロファイルが対流性・層状性降雨比だけでなく、対流性加熱プロファイルの変化に伴って大きく東西に変化していることを示した。

4. 衛星搭載降雨レーダによる降水システムの地域特性

広瀬正史 (宇宙航空研究開発機構)

TRMM PR による観測は、広域に渡る様々な地域時刻の降水3次元構造の研究を可能とした。現在、約9年の運用期間を経て220億を越える観測サンプルが蓄積され、気候学的特徴を解像するデータセットとしてその利用価値はさらに拡大しつつある。本発表では、降水量の気候値を構成する各降水システムの群特性に関する研究を紹介し、長期データの蓄積により可能となった衛星データ利用と衛星降水リトリバル開発における地上観測との接点について議論した。

本研究では降水システムを TRMM PR によって観測された個々の連続した雨域として定義し、各降水システムに含まれる降水タイプ (層状性降雨など) の雨域面積や降雨強度・含水量・レーダ反射因子の各鉛直分布等をパラメータとしたデータセットを作成した。1998-2006年夏季のアジア域では約400万の降水システムが観測されている。この降水システムデータベースを用いて、降水量の日周変化に見られる類似性・局所性や、構成要素である降水システムの形態的特徴 (空間規模や降水タイプ) の集合特性を調べることにより、降水システム群の地域固有性の検出を試みた。水平規模の小さい降水システムは主に浅い対流性降雨やブライトバンドを伴わない弱い層状性降雨により構成されており、午後の早い時刻に陸域全体でほぼ均一に降水量が極大となっていた。水平規模が100 km を超える降水システムによる降水変動は地形分布と関連が深く、各地域の降水日変化の地域差に強いインパクトを与えることが明らかとなった。降水量が極大となる時刻の降雨強度鉛直分布を幾つかのクラスターに分類した結果、水平規模・日周特性が似通った降水システムにも鉛直構造の地域差が顕著であることが示された。さらに、間欠的な低軌道衛星データの現象学的な解釈に向けて、台風など特定の降水システムのコンボジット解析等についても紹介した。

また TRMM PR のアルゴリズム開発や他データと

の比較検証を経て、仮定している物理過程の不確実性や観測し得ない地表近傍の降水推定誤差等の問題が改めてクローズアップされている。衛星降水観測の改良・限界把握を目的とした地上観測による知見の必要性についても数例を述べた。

5. CloudSat 衛星と領域・全球雲解像モデル：現状と将来展望

鈴木健太郎（東京大学気候システム研究センター）
近年の衛星観測技術の進歩は、雲・降水の全球スケールでの観測を可能にしつつある。特に、2006年4月下旬に打ち上げられた CloudSat 衛星は能動型の雲レーダを搭載しており、受動型センサーを搭載した従来の衛星では得られなかった雲物理量の鉛直構造を全球規模で観測することが可能となる。本講演では、まず、最近公開され始めた CloudSat データの概要について紹介した。CloudSat 衛星に搭載された雲レーダから直接得られる物理量はレーダ反射因子であり、そこからアルゴリズムを介在させることで雲水量や有効粒子半径といった雲物理量を導出することができる。CloudSat の標準プロダクトであるこれらの雲物理量を求めるためのアルゴリズムの概要についても述べた。

このような衛星観測の発展によって雲・降水に関する全球規模での観測が可能になると、それらの観測データを各種モデルと比較する研究も重要となる。こうした比較はモデルの検証に役立つだけでなく、雲・降水の観測データをモデルによって理解・解釈することにもつながる。このような研究の一例として、雲の光学特性に関する衛星観測データを大循環モデルおよびビン法雲解像モデルの結果と比較した著者らのこれまでの研究を紹介した。

計算機の性能向上に伴ってモデルも大きく進歩しつつある。地球フロンティア研究センターで開発されている全球雲解像モデル NICAM は地球シミュレータ上で稼働し、全球を3.5 km ないし7 km の水平解像度で覆った計算が行われている。著者は現在、この NICAM モデルに全球3次元エアロゾル輸送モデル SPRINTARS を結合し、エアロゾルとの相互作用を取り入れた全球雲解像実験を進めている。これにより、従来の GCM では陽に扱われることのなかった対流雲とエアロゾルの相互作用など、新たな研究課題に取り組むことが可能になる。このような雲解像モデルと CloudSat 衛星との比較の際には、雲解像モデルで

出力される雲物理量を用いて衛星からの直接の観測量であるレーダ反射因子をシミュレートすることが有効であると考えられる。このためのツールである CloudSat Simulator についてもその概要を紹介した。

6. 総合討論

最後に総合討論の時間を30分ほど設け、メソ気象学研究と衛星観測研究の関わりにおける現状と将来について自由な議論を行った。メソ気象学研究と衛星気象観測研究はどちらかという点と接点の少ない分野同士だといえるが、その理由として低軌道衛星データの時空間サンプリング率がメソスケール現象の解析において必ずしも有用ではない点が指摘された。一方、大規模大気場とメソ対流システムとの相互作用といったマルチ・スケール現象を研究の視野に入れるなら、継続的・広域観測を得意とする気象衛星データを伝統的なメソ気象研究の方法論にどのように活用していくかが、今後の真剣な研究課題になり得ると思われる。

また、衛星データはアーカイブへのアクセスや解析処理手法が煩雑であり門外漢にはいささか敷居が高いとの意見も出された。衛星データを使いこなすには若干の経験が要求されることは事実であるが、データセットの簡便化においては最近いくつかの進展が見られる。たとえば熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 3G68 データでは、地表面降水量が全球0.5°グリッドのアスキーファイルとして収められており、衛星軌道・衛星センサのスキャンジオメトリ・HDF 形式などについての予備知識がなくともすぐにデータを解析することができる。とりあえず未知のデータに手を出してみる、という試みからやがて新たな研究テーマへと発展していく期待を込めて、メソ気象研究コミュニティと衛星観測研究コミュニティのさらなる交流を願いつつ研究会を閉会した。

増永浩彦（名古屋大学地球水循環研究センター）

略語一覧

AQUA：(米国の地球観測衛星プログラムの1つ)
CloudSat：(米国の地球観測衛星プログラムの1つ)
CLWC：Cloud Liquid Water Content 雲水量
CRM：Cloud-Resolving Model 雲解像モデル
EnSRF：Ensemble Square Root Filter アンサンブル平方根フィルタ
GATE：GARP Atlantic Tropical Experiment
GARP 大西洋熱帯研究計画

GPCP : Global Precipitation Climatology Project 全
球降水気候学プロジェクト
KWAJEX : Kwajalein Experiment ケジェレン諸島
実験
MWR : Microwave Radiometer マイクロ波放射計
NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric
Model 非静力学正20面体格子大気モデル
PR : Precipitation Radar 降水レーダ
SCSMEX : South China Sea Monsoon Experiment
南シナ海モンスーン実験
SLH : Spectral Latent Heating スペクトル潜熱加熱
SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model
for Aerosol Species エアロゾル各種のスペクトル放
射-輸送モデル
TB : Brightness Temperature 輝度温度
TOGA-COARE : Tropical Ocean and Global Atmo-
sphere Program-Coupled Ocean and Atmosphere
Response Experiment 熱帯海洋全球大気研究計画-
西太平洋大気海洋相互作用研究計画
TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission 熱帯
降雨観測計画

参 考 文 献

- Johnson, R. H. and P. E. Ciesielski, 2002 : Characteris-
tics of the 1998 summer monsoon onset over the
northern South China Sea, *J. Meteor. Soc. Japan*,
80, 561-578.
- Morita, J., Y. N. Takayabu, S. Shige and Y. Kodama,
2006 : Analysis of rainfall characteristics of the
Madden-Julian oscillation using TRMM satellite
data, *Dyn. Atmos. Oceans*, **42**, 107-126.
- Schumacher, C., R. A. Houze and I. Kraucunas, 2004 :
The tropical dynamical response to latent heating
estimates derived from the TRMM precipitation
radar, *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1341-1358.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao and D. E.
Johnson, 2004 : Spectral retrieval of latent heating
profiles from TRMM PR data. Part I : Develop-
ment of a model-based algorithm, *J. Appl. Meteor.*,
43, 1095-1113.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao and C.-L. Shie,
2007 : Spectral retrieval of latent heating profiles
from TRMM PR Data. Part II : Algorithm
improvement and heating estimates over tropical
ocean regions, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1098-
1124.
- Takayabu, Y. N., 2002 : Spectral representation of
rain profiles and diurnal variations observed with
TRMM PR over the equatorial area, *Geophys. Res.
Lett.*, **29**, doi : 10.1029/2001GL014113.
- Tao, W.-K., S. Lang, J. Simpson and R. Adler, 1993 :
Retrieval algorithms for estimating the vertical
profiles of latent-heat release-Their applications
for TRMM, *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 685-700.
- Tao, W.-K., S. Lang, J. Simpson, W. S. Olson, D.
Johnson, B. Ferrier, C. Kummerow and R. Adler,
2000 : Vertical profiles of latent heat release and
their retrieval for TOGA COARE convective sys-
tems using a cloud resolving model, SSM/I, and
ship-borne radar data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**,
333-355.
- Tao, W.-K., E. A. Smith, R. F. Adler, Z. S. Haddad, A.
Y. Hou, T. Iguchi, R. Kakar, T. N. Krishnamurti, C.
D. Kummerow, S. Lang, R. Meneghini, K. Na-
kamura, T. Nakazawa, K. Okamoto, W. S. Olson,
S. Satoh, S. Shige, J. Simpson, Y. Takayabu, G. J.
Tripoli and S. Yang, 2006 : Retrieval of latent
heating from TRMM measurements, *Bull. Amer.
Meteor. Soc.*, **87**, 1555-1572.
- Thompson, R. M., S. W. Payne, E. E. Recker and R. J.
Reed, 1979 : Structure and properties of synoptic-
scale wave disturbances in the intertropical conver-
gence zone of the eastern Atlantic, *J. Atmos. Sci.*,
36, 53-72.