

Scott, S. G., T. P. Bui and K. R. Chan, 1990: The meteorological measurement system on the NASA ER-2 aircraft, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 525-540.

Smith, S. A., D. C. Fritts and T. E. VanZandt, 1987:

Evidence of a saturation spectrum of atmospheric gravity waves, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1404-1410.

VanZandt, T. E., 1982: A universal spectrum of buoyancy waves in the atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 575-578.

105: 501 (メソ降水雲系; メソモデル; 雲内測定)

## 2. メソ降水観測

### —メソ降水雲系の研究発展と航空機—

藤 吉 康 志\*

#### 1. はじめに

航空機(観測)の魅力は、短時間に広域を調査できる点と、他の手段では手の届かない上空の目的とした場所に素早く行け、その場で作業・測定・サンプリングができる点である。従って、正に見てきたような実証データを作ることが可能である。その一方、高額な使用料、自分で操縦・管理できないこと、飛行時間・範囲の制限、搭載装置の重量・電源・大きさ・応答時間の制限等の短所もある。更に、時間・空間変化の大きい雲を対象とした場合、航空機で得られる点・線状データの代表性の問題は、どうしても避けきれない。今回のシンポジウムでは、このような航空機観測の長所・短所を踏まえ、メソスケール現象の解明に我が国では今後どのような航空機観測が必要かについて考えてみたい。その為に、先ず、メソスケール現象の研究発展にこれまで航空機がどのような役割を果

たしてきたかを概観する。

#### 2. 1980年以前の航空機観測

この時代にどのような観測機が使用されていたかを見る為に、*J. Atmos. Sci.* と *Quart. J. Roy. Met. Soc.* に登場した使用頻度の高い上位5つの機種と、その航空機の参加したプロジェクトが行われた年次を第1表に示した。これを見ると、NCARのElectraとSabrelinerが早くから活躍していたことが分かる。また、測器の発展を見るために、各年次に初めて論文中に登場した測器名を第2表に示した。勿論、測器は論文にその名前が登場する以前に既に開発が終了しているはずであり、第1、2表共にひとつの目安を示したものである。

メソ降水雲系の航空機観測のはしりは、1955年から開始された National Hurricane Research Project で

第1表 J. Atmos. Sci.と Quart. J. Roy. Meteor. Soc.に登場した、1970年代に頻繁に使用された航空機種名と、その航空機が参加したプロジェクトの行われた年次。

使用航空機	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77	'78	'79
Electra (NCAR)			○		○	○	○	○	○	○
P-3 (NOAA)						○		○	○	○
Queen Air (NCAR)			○	○		○	○	○	○	○
Queen Air (ワイオミング大学)			○		○				○	○
Sabreliner (NCAR)	○		○	○	○		○			○

\* 北海道大学低温科学研究所。

第2表 J. Atmos. Sci.と Quart. J. Roy. Meteor. Soc.の1970年代の各年次の論文中に初めて登場した測器名, あるいはサンプリング手法.

年次	使用機器
1970年	マイクロ波湿度計, Rosemount 型白金抵抗温度計, J-W 雲水量計, メンブランフィルター (氷晶核採取), 熱拡散箱 (雲凝結核測定), 煤付きスライドガラス (雲粒採取), ドップラー慣性航法装置, チャフ散布
1971年	ドロップゾンデ
1972年	リバースフロー型温度計 (RFT), 油膜付きスライドガラス (雲粒採取), パーティクルカメラ, PMS (FSSP), ケンブリッジ式露点計, 乱流計 (MRI Universal turbulence system)
1973年	フォルムパールレプリケーター (氷晶採取), ミリポアフィルター (エアロゾル採取), メタルフォイルインパクター (降水粒子), 光学式カウンター (100 $\mu$ m 以上), 電場計, 電荷計, AADS (Airborne Atmospheric Data System)
1974年	ホットフィルム温度計, PMS (ASSP), AWRS (Airborne Weather Reconnaissance System)
1975年	鏡面式湿度計, ライマン $\alpha$ 湿度計, レーダ高度計, ガストプローブ, ビーズサーミスター温度計
1976年	PMS (2DC), 濾紙 (雨滴), 雨水量測定装置 (特製), 黒棒 (着水検出用), PMS (OAPX), Direction-Finding System, 慣性航法装置 (INS)
1977年	NCAR 式氷晶核カウンター, ドップラー式航法装置, PMS (2D-C, 2D-P), C, Xバンドデジタルレーダ
1978年	ラドン採取, Roto-rod (雲水量測定), 光学式氷晶カウンター (OIPC)
1979年	オメガ式ドロップゾンデ (ODW)

あろう。この頃から1960年代前半までは、航空機は写真撮影や、ドロップゾンデの投下を行う程度であった。1970年代前半でも、窓を開けて30km毎にゾンデを放り出したとか、メータを15秒毎に目で読み取って気温を測定したという記述が論文に見られる。ただし、当時の白金抵抗温度計の応答時間は約20秒であったので、この方法でも特に問題は無かったようである。J-W 式雲水量計は1970年、FSSP は1972年には既に使われていたが、氷晶、雲粒、降水粒子の粒径分布は、煤や油でコーティングしたスライドガラス、パーティクルカメラ、フォルムパールレプリケーター、メタルフォイルインパクター等による直接サンプリングから作成していた。ところが、1975年には、40Hz、水平距離にして2.5m間隔で磁気テープにデータを記録したり、1976年には自動粒子測定装置 (PMS 2D-C や2D-P) も登場し、僅か数年で測定技術が飛躍的に向上した。

1970年代前半に開始されたメソ降水系に関連した重要なプロジェクトは、NHRE (National Hail Research Experiment), GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment), そしてワシントン大学の

CYCLES (Cyclonic Extratropical Storms) である。NHRE では、4台のドップラーレーダと、6台の航空機 (Sabreliner, Sailplane (長距離飛行用グライダー), 3台の Queen Air, T28) が使われた。このプロジェクトの特徴は、航空機とドップラーレーダのコーディネートに力点が置かれたことと、発達した積乱雲を対象として、観測データとモデルの結果とを比較することにより、雲のダイナミクスと雲物理過程を同時に議論するという、当時としては画期的な試みを行った点である。このような試みを行うことができたのは、3次元の非静水圧メソスケールモデルの出現と、デュアルドップラーレーダによって雲内の気流系の観測が可能になったという背景がある。

GATE で使われた航空機は、Electra, DC-6, C-130, DC-7, IL-18CAO, Sabreliner, CV-990, CYCLES では、Sabreliner (気温, 風, 降水粒子の粒径分布) と B-23 (気象要素と乱流, 微物理過程の雲内観測) が使われた。GATE, CYCLES 共に、複数のドップラーレーダを用いた観測は行われなかった。しかし、ゾンデデータやレーダデータと組み合わせることによって、熱帯域のクラウドクラスター及び中緯度の低気圧に伴う降

雨帯の微物理過程, ダイナミクス, 水収支, 運動量フラックスについての詳細な議論が可能なデータセットを作成することに成功した. 以降連続としてこれらのデータセットを基にした重要な研究成果が報告されている.

1970年代後半には, 境界層及び下層雲の形成・維持・組織化に関する重要なプロジェクトである, AMTEX (Air Mass Transformation Experiment) と MONEX (Monsoon Experiment) が行われた. これらのプロジェクトでは, メソスケール対流システムの観測とは異なり, 使用される航空機の数はいくつか少ないが広い空間範囲を長時間測定する飛行方法がとられた. 例えば, アフリカ東岸の下層ジェット (幅50~300km, 長さ500~800km, 厚さ1km程度)の観測が Electra を用いて行われた. MONEX では連続して5個まで投下可能なオメガ式ドロップゾンデが使用され, それまでに比べて観測が容易になると同時に精度も向上した. その他, 夏季北極層雲や, 五大湖に発生する水平ロール状対流の観測も行われた.

PMSプローブとドップラーレーダの普及で, HI-PLEX (High Plain Experiment) & PACE (Precipitation Augmentation for Crops Experiment),

SPACE (South Park Area Cumulus Experiment), SESAME (Severe Environmental Storms and Mesoscale Experiment), SCPP (Sierra Cooperative Pilot Project) 等, メソ降水雲系の観測的研究はより加速された. それに加えて, NCAR の PAM (Portable Automated Mesonet) が登場し, メソ地上観測網も充実してきた. 更にこの時代に有力な武器として加わったのが, 航空機搭載デジタルレーダである. 例えば, 1977年フランスでは DC7/AMOR に35GHz レーダが搭載され, NHRL (National Hurricane Research Laboratory) では, WP-3D にCバンドレーダ (水平用) 2台と Xバンドレーダ1台 (垂直用) が1978年に装備された. これによって, これまで線状の観測データしか取ることができなかった航空機で, メソ降水雲系の3次元構造を捉えることができるようになり, 画期的に航空機利用の範囲が広がった.

3. 1980年以降の航空機観測

第3表と第4表は, それぞれ第1表と第2表の続きである. 1970年代に比べると, C-130と King Air の使用頻度が高くなっているが, 相変わらず Electra と Sabreliner も良く使われている. 使用測器の特徴は,

第3表 第1表と同じ. 但し, 1980年以降.

使用航空機	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93
C-130 (Hercules; イギリス気象局)		○	○	○	○			○			○	○	○	○
C-130A, C-131A (ワシントン大学)							○	○	○	○		○	○	
Electra (NCAR)	○			○		○	○	○			○		○	
P-3 (NOAA)	○	○	○	○	○	○	○	○		○			○	○
King Air (ワイオミング大学)		○	○	○	○	○	○	○				○		
King Air (NCAR)				○		○	○	○	○	○		○		
Sabreliner (NCAR)		○	○	○	○					○			○	

第4表 第2表と同じ. 但し, 1980年以降.

年次	使用機器
1980年	ホログラフィーカメラ
1981年	MAPS (Multiple Aircraft Positioning System), オゾンセンサー
1982年	航空機搭載ドップラーレーダ
1983年	航空機搭載レーザー, CSIRO 式雲水量計
1987年	MCR (10.7μm, Multichannel Cloud Radiometer), AMMS (92, 183 GHz, Advanced Microwave Moisture Sounder), SF6散布
1989年	赤外線式湿度計, RICE (Rosemount Icing Probe)
1990年	GPS 航法装置, PMS (ASASP; Active Scattering Aerosol Spectrometer Probe)
1992年	PVM (Particle Volume Monitor), CVI (Counter Flow Virtual Impactor)
1993年	MARSS (Microwave Airborne Radiometer Scanning System)

NOAA がドップラーレーダを、NASA が ADLS (NASA's Airborne Doppler Lidar System) を、ドイツの DLR が ALEX-F ライダーを搭載するなど、多くのリモートセンサーが航空機に搭載されるようになったこと、赤外線式湿度計や GPS 航法装置など、より応答が早く精度の高い測器が組み込まれたことである。これらにより、乱流スケール (1cm 程度) からメソスケールまで同時に観測できるようになった。

1980年代前半は、積雲・層積雲のエントレインメントと混合過程の解明のための航空機観測が盛んであった。なかでも CCOPE (Cooperative Convective Precipitation Experiment) では、積雲内の混合と雲粒粒径分布の変化をメインテーマとして、2台の Queen Air, Sabreliner, King Air, Twin Otter, そして Sailplane を用いて観測が行われた。その際、複数の航空機による観測の安全性を高めるために、MAPS (Multiple Aircraft Positioning System; 精度 0.5km 以内) が用いられた。

境界層、積雲の氷晶化、降水形成過程、雷雲の帯電機構の観測は、従来とほぼ同様な手法で KONTUR, Lake Effect Snow Storm Project, MASEX (Mesoscale Air-Sea Exchange Experiment), MIZEX (Marginal Ice Zone Experiment), Project Haar (海霧), COSE (Colorado Orographic Seeding Experiment), Bethlehem Precipitation Research Project, SCPP (Sierra Cooperative Pilot Project), SPTVAR (Special Purpose Test Vehicle for Atmospheric Research) 等で行われた。重要なプロジェクトとして FIRE が開始され、その一環として巻雲のメソとマイクロ構造の研究が開始された。

一方、これまでとは異なった観測で、かつ航空機無くしてはできない観測が、ドップラーレーダを搭載した航空機によるハリケーンの本質・対流スケール構造の観測と、2台の航空機で 2000km×2000km の範囲に 50 個のゾンデを投下しながらハリケーンを 3 日間追跡した観測である。更に、航空機観測に新たな意味づけを与える観測・解析上の進展が、1980年代前半に見られた。それは、マルチパラメータレーダの登場と、リトリーバル法の登場である。マルチパラメータレーダから得られた情報を或るアルゴリズムを用いて解析することにより、散乱粒子の形、相、粒径分布の推定が可能である。このアルゴリズムの検証のためには、航空機による雲内観測が不可欠であり、これを行ったプロジェクトが、MAYPOLE (Many Polarization

Experiment) である。更に、ドップラーレーダ観測データを用いたリトリーバルでは、雲内の熱力学量の 3 次元分布が得られるが、その計算の為の大気条件や、計算結果の検証は航空機によって与えられる。これらの手法は、航空機観測と相補的であり、航空機観測データの活用範囲を大いに広げるものである。

PMS プローブもほぼ出そろい、航空機観測が頻繁に行われるようになった 1980 年代後半以降になると、次第に統計的な研究も現われ始めた。例えば、ワシントン大学の B-23 を使って 1978 年から 1984 年にかけて測定した、90 の積雲と 72 の層状雲内の氷晶濃度のまとめ (Hobbs and Rangno, 1985), HIPLEX と CCOPE の 80 ケースの積雲エントレインメントのまとめ (Blyth and Raymond, 1988), 13 年間の航空機搭載レーダで得られた 900 枚の画像から、ハリケーン内の降水バンドについてまとめたもの (Willoughby, 1990), 1979 年の FGGE (First GARP Global Experiment), 1969 年の ATEX (Atlantic Trade Wind Experiment), 1969 年の BOMEX (Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment) で投下された計 180 個のドロップゾンデデータから対流混合層の構造を解析した研究 (Betts and Albrecht, 1987) 等が報告されている。ユニークなデータセットとしては、GASP (Global Atmospheric Sampling Program) の一環として 1975 年から 1979 年にかけて商業用航空機を用いて測定された、広域の気温と風の AIREPs (Conventional Aircraft Reports) である (Nastrom and Gage, 1985)。このデータは、航空機による観測データ (風) の有無がラージスケールの解析と数値予報に与えるインパクトを調べるのに用いられた。

境界層に発生する下層雲、積雲内の微物理過程、巻雲の観測は、JHWRP (Joint Hawaii Warm Rain Project), CASP (Canadian Atlantic Storm Program), FIRE (First ISCCP Regional Experiment), COHMEX (Cooperative Huntsville Meteorological Experiment), USG (Upper Spencer Gulf, South Australia Experiment), ICE (International Cirrus Experiment) 等で継続して行われたが、HAPEX (Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment) では、これまでの大気-海洋相互作用から離れて、大気-陸面相互作用の研究に移行した。TAMEX (Taiwan Area Mesoscale Experiment), MFDP (Mesoscale Frontal Dynamics Project), EMEX (Equatorial Mesoscale Experiment), AMEX (Australian Mon-

soon Experiment), ERICA (Experiment on Rapidly Intensifying Cyclones over the Atlantic) 等のメソスケールシステムの観測では、複数の航空機が使用された。新しい観測手法としては、エントレインメントと混合の研究に SF<sub>6</sub> というトレーサー物質が使われるようになった (Stith and Polifovich, 1989) ことと、DYCOMS (Dynamics and Chemistry of Marine Stratocumulus) や、GALE (Genesis of Atlantic Lows Experiment) では、これまでの気象・雲物理要素の測定以外に、大気化学的測定も平行して行われ、メソモデルの中に雲内反応、鉛直輸送、除去等のプロセスが組み込まれるようになったことである (Hegg *et al.*, 1989)。

1990年代前半に行われた航空機を用いた主な観測プロジェクトは、EMFS (Eulerian Model Evaluation Field Study), HaRP (Hawaiian Rain Band Project), IBLEX (Internal Boundary Layer Experiment), CODE (California Ozone Deposition Experiment), ASTEX (Atlantic Stratocumulus Transition Experiment), CaPE (Convection and Precipitation/Electrification Experiment), Pre-EUCREX (European Cloud Radiation Experiment), FRONTS, そして TOGA-COARE (Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Research Experiment) である。これらの観測方法はほぼ従来通りであるが、センサーの感度と精度が良く、境界層、積雲、巻雲、メソ降水システムの乱流からメソスケールまでの幅広い構造、このような構造に対応した熱・エネルギーフラックスの見積り、そして、乱流と微物理過程との関係を解析した論文が目立ってきている。また、航空機搭載ドップラーレーダデータから、3次元的な気流を作成することも可能となった (Marks *et al.*, 1992)。こうなると、微物理過程も含んだリトリバル法 (Marecal and Lemaitre, 1995) と、航空機による in situ 測定との組み合わせによって、メソ降水雲系の研究の更なる発展が期待できる。

#### 4. 我が国における今後のメソ降水雲系研究と航空機観測

我が国で研究対象としなければならないメソ降水雲系を含む擾乱を挙げよと言われれば、台風、低気圧、梅雨前線、寒気吹き出し時の雪雲、メソサイクロン、熱雷、そしてこれらの擾乱と地形との相互作用ということになるであろう。しかし残念ながら、地上観測と

連携したこれらの擾乱の総合観測に、我が国の航空機が重要な役割を果たしたことはこれまでに数える程度しか無かった。そのため、極端に言えば我が国のメソ降水雲系の研究発展は、航空機観測抜きで語ることが可能である。それでは、航空機観測は不必要であったのかといえば、少なくとも私が参加した豪雨・豪雪プロジェクトでは、海上のデータ不足で発生メカニズムについての十分な議論ができなかった。

はじめに述べたように、航空機観測の短所は、高額の使用料、自分で操縦・管理できない点、飛行時間・範囲の制限、搭載装置の重量・電源・大きさ・応答時間の制限、航空機で得られる点・線状データの代表性の問題である。第1表に示したように、NCARとワイオミング大学が早くから観測用航空機を用意したことが、アメリカでの航空機観測の立ち上げに役立ったことは間違いなく、ドイツでは同様な役割をDLR (German Air and Space Research Agency) が、イギリスではMRF (Meteorological Research Flight) が果たした。幸い、測器に関してはここ数年で、北海道大学、気象研究所、名古屋大学、通信総合研究所でほぼ欧米並のものが揃ってきているので、我が国でも観測専用(チャーター)機が準備されれば、プロジェクトを組んで比較的安価に航空機観測が可能となるであろう。

もともと航空機のみでやれることには限界があり、気象要素、雲物理要素の in situ 観測 (サンプリングも含む)、リモートセンサーの搭載、ドロップゾンデやトレーサー物質・チャフの散布といったところである。しかし、これまでの研究経緯から明らかな様に、近年、熱力学及び微物理過程のリトリバルが3次元で可能になり、観測データと比較可能な3次元モデルもできてきた。従って、航空機で1次元的に測定した情報を、リモートセンサーと組み合わせることによって、3次元的な空間情報に置き換えることが可能になりつつある。リモートセンサーでは短時間の3次元探査が可能であるので、航空機の長所を生かしつつ短所が補える。但し、このような研究の進め方はオフライン的であり、その場観測が可能な航空機の利点を十分に生かしたものは言い難い。真に生かした観測とは、オンライン型である。即ち、複数の長距離・高速型観測機で投下されたドロップゾンデや、船舶や地上から放球されたゾンデデータをリアルタイムでモデルにインプットし、その計算結果から発達が予想される地点にドップラー・マルチパラメータレーダ等のリモートセンサー及び気象センサーを搭載した中距離観測機を派遣し

て、メソ擾乱の発生前からのデータを取得する。この事前に取った気象データを使って高解像メソモデルを走らせる。擾乱発生後は、メソ物理・化学モデルとレーダ等を使ってリアルタイムにリトリーバルされた3次元熱力学、気流、及び微物理構造を基に、短距離観測機が直接サンプリングのために雲内に突入する。更にモデル結果と実測値とが一致しない場合には、モデルは観測前にあらかじめ作成していたマニュアルに従って、食い違いを生じさせた可能性が高い要素についての再測を観測者側に要請する。このような観測は現段階では夢物語であるが、コンピュータの進歩、通信の進歩、そしてリアルタイム観測用簡便モデルの進歩を考えれば意外と早く実現できそうな気がしている。

#### 参 考 文 献

- Betts, A. K. and B. A. Albrecht, 1987 : Conserved variable analysis of the convective boundary layer thermodynamic structure over the tropical oceans, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 83-99.
- Blyth, A. M. and D. J. Raymond, 1988 : Comparison between observations of entrainment in Montana cumuli and results from a simple model, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1965-1972.
- Hegg, D. A., S. A. Rutledge, P. V. Hobbs, M. C. Barth and O. Hertzman, 1989 : The chemistry of a mesoscale rainband, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 867-886.
- Hobbs, P. V. and A. L. Rangno, 1985 : Ice particle concentrations in clouds, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2523-2549.
- Marecal, V. and Y. Lemaitre, 1995 : Importance of microphysical processes in the dynamics of a CSI mesoscale frontal cloud band, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 301-318.
- Marks, F. D. Jr., R. A. Houze, Jr. and J. F. Gamache, 1992 : Dual-aircraft investigation of the inner core of hurricane Norbert. Part I : Kinematic structure, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 919-942.
- Nastrom, G. D. and K. S. Gage, 1985 : A climatology of atmospheric wave number spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 950-960.
- Stith, J. L. and M. K. Polifovich, 1989 : Observations of the effects of entrainment and mixing on the droplet size spectra in a small cumulus, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 908-919.
- Willoughby, H. E., 1990 : Temporal change of the primary circulation in tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 242-264.

102 : 501 (放射, 航空機観測)

### 3. 放射構造の観測

#### —放射に関する最近の話題と航空機観測による検証—

中 島 映 至\*

#### 1. はじめに

放射場の航空機観測は、エネルギー収支の研究のための放射フラックスの観測から、多波長イメージャーによる大気組成のリモートセンシングに至るまで幅が広い。リモートセンシングそのものが放射の観測である以上、そのほとんどすべてが放射場の研究にとって興

味がある。しかし、ここではテーマを絞って、著者が主にたずさわってきた可視・赤外放射計に関する話題を中心に議論をすることにする。マイクロウェーブ放射計による観測やレーダー、ライダーに関する観測については他の場所で語られるであろう。

可視・赤外放射計による大気放射場の観測と大気組成のリモートセンシングは、扱う波長域が太陽放射と地球放射のエネルギーの大部分が存在するスペクトル

\* 東京大学気候システム研究センター。

© 1997 日本気象学会