

2. 雲・降水研究における航空機観測の役割

村 上 正 隆*

1. はじめに

雲・降水システムは、日々の天気にはもちろん、水・エネルギー循環を通して将来の気候の変化にも重要な役割を果たしている。近年、雲核・氷晶核として働くエアロゾル粒子の物理化学特性およびその空間分布が雲の微物理構造を決定し、雲・降水過程に大きなインパクトを持つことも認識され、多くの研究がなされるようになってきた。

本講演では、筆者のこれまでの経験に基づき、1990年代以降に行われた雲・降水システムを対象とした航空機観測から得られた主な成果を紹介するとともに、雲核・氷晶核として働くエアロゾルも含めた雲・降水研究における航空機観測の役割や課題、今後の方向性について考えてみたい。

2. 観測プラットフォームとしての航空機

航空機を用いた雲・降水観測と一口にいても様々な手法があるが、それらに共通して挙げられる長所は機動性を活かして、現象を至近距離で詳細に把握できることである。例えば、飛行経路に沿った詳細なその場観測や試料のサンプリングは、現象の本質（ありのままの姿、TRUTH）を与えてくれるので、自然現象の把握という観点から大変重要である。また、航空機に搭載したリモートセンシング（レーダ、ライダーやマイクロ波放射計、以下「リモセン」）を用いた雲・降水・気流の三次元構造の把握や雲内の雲・降水粒子の微物理構造の推定、モデルの初期値の補強（データ同化）を目的としたドロップゾンデや航空機搭載の一般気象測器による雲・降水システム内部やその周辺の

熱力学・気流場の把握なども、地上リモセンなどと比べて、対象とする現象を詳細に観測することができる。

一方、航空機観測の短所は機内の利用可能なスペースや電力の制約によって搭載する観測機材が制限されたり、航続時間によって観測時間が制限されたりすることである（機種にもよるが一般的には3～5時間程度）。その場観測の場合には、空間的にも飛行経路上に限定され、対象とする現象の時空間スケールによっては、観測値の代表性もよく吟味する必要がある。また、航空機によるその場観測から、正確で信頼性の高いTRUTHを得るためには、様々な工夫も必要である。例えば、エアロゾル Inlet（取り込み口）の粒子透過率や雲物理プローブの shattering（取り込み口への衝突・分裂）による二次粒子生成や焦点深度に関係する粒径計測誤差などには十分な注意が必要である。このような短所を補完するためには、レーダ等を搭載した航空機で飛行経路周辺の雲・降水粒子および気流の三次元構造を同時に観測することが望まれる。

3. 国内における航空機を用いた雲・降水研究の歴史

本章では、筆者がこれまで従事してきた気象研究所の航空機観測を中心に国内の航空機による雲・降水研究を概観する。

雲・降水システムを対象とした本格的な航空機観測は、航空機観測の先進国である米国では1970年代中頃から実施されていたが、国内では科学技術振興調整費「降雪機構の解明と降雪雲調節の可能性に関する基礎的研究」（1988～1992年度、研究代表者：松尾敬世）の一環として、ワイオミング大学の観測用航空機 B200T を用いて日本海降雪雲の内部構造（メソγスケール）観測が実施されたのが初めてである（気象研

* 名古屋大学宇宙地球環境研究所。
mamuraka@rain.isee.nagoya-u.ac.jp
© 2018 日本気象学会

究所 2005)。

その後、海洋地球科学研究推進費「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する研究」(1991～1999年度、研究代表者：浅野正二)において、我が国に初めて導入された気象観測用航空機(B200, 中日本航空)を用いた雲の微物理構造・放射特性観測技術が開発・整備され、冬季東シナ海上に発生する水雲(層雲・層積雲)を対象に放射観測用航空機C404と同期観測が実施された。

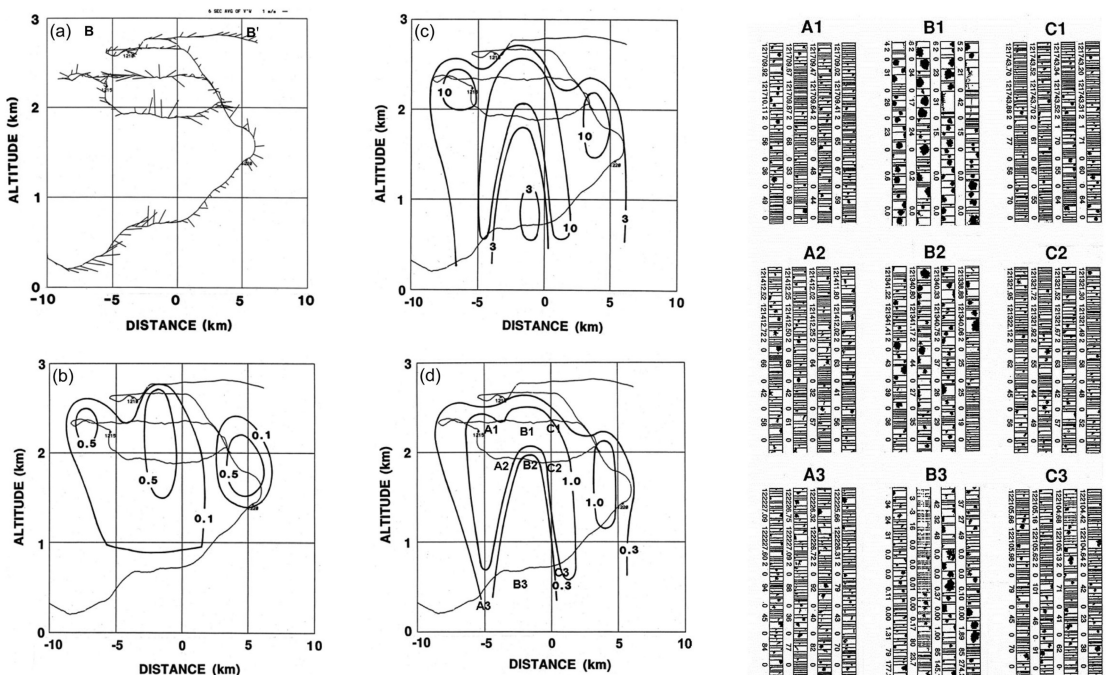
科学技術振興機構戦略的基礎研究費「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズム解明に関する研究」(1998～2003年度、研究代表者：吉崎正憲)においては、中型ジェット機(G-II, ダイヤモンドエアサービス)を用いた気象観測技術が開発され、冬季日本海上および梅雨期九州南西海上に発生する種々の雲システムのなかで働く降水メカニズムが調べられた(吉崎ほか 2005)。

利根川ダム統合管理事務所との共同研究「山岳性降雪雲の人工調節に関する研究」(1997～2002年度)、科学技術振興調整費「渇水対策のための人工降雨・降雪

に関する総合的研究」(2006～2010年度)、東京都水道局との共同研究「東京都水道局人工降雨施設更新に伴う調査研究」(2011～2014年度)等の人工降雨研究においても、引き続き各種航空機(MU-2, B200T, ダイヤモンドエアサービス; B200, 中日本航空)を用いた観測技術の高度化が図られ、シーディング前後の雲の微物理構造の変化、それに引き続く降水過程の変化が調べられた。特に、上記の科学技術振興調整費プロジェクトでは、エアロゾルの物理化学特性・雲核・氷晶核・雲・降水を総合的に測定する航空機観測システムが整備され(B200T, ダイヤモンドエアサービス)、ドライアイス、ヨウ化銀、吸湿性粒子等によるシーディング効果の解明だけでなく、エアロゾルの間接効果に関する実証的データも取得可能になった(村上ほか 2015)。

4. 国内における航空機利用の現状とその将来性

上記の研究プロジェクトから得られた幾つかの研究成果を紹介して国内の航空機利用の現状を示すとともに、新たな研究の展開も議論する。



第1図 降水コアを通る鉛直断面図内のシステムに相対的な風の水平 (v') および鉛直 (w) 成分; 右上の線分は風速 $1\ m\ s^{-1}$ に対応 (a), 雲水量; $g\ m^{-3}$ (b), 氷晶数濃度; L^{-1} (c), 降水粒子数濃度; L^{-1} (d) と (d) の A1～C3地点で観測された2D-Pイメージ (降水粒子の2次元イメージ; 一対の縦線の間隔は $6.4\ mm$)。

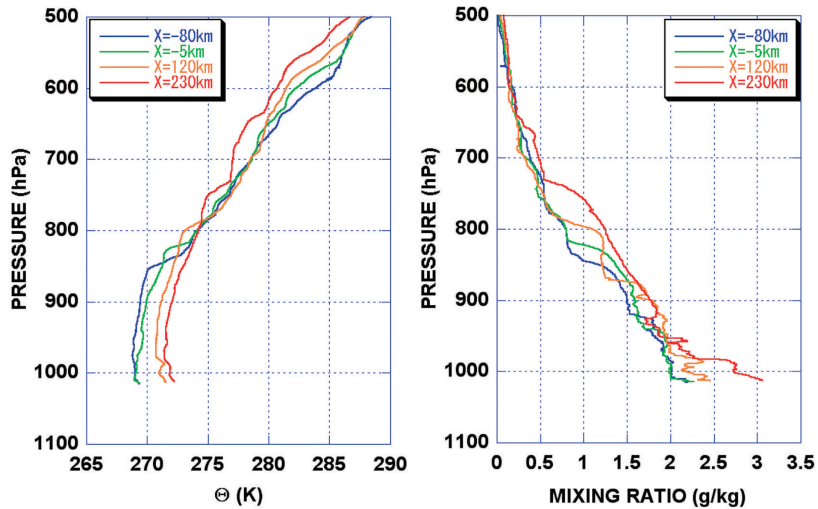
最初に、1993年1月に山形県酒田沖で実施した各種雲物理測定装置を搭載した小型双発プロペラ機（ワイオミング大学 B200T）による航空機観測とデュアルドップラーレーダ観測から明らかとなった、寒気吹き出し時の代表的な雲である背の低い平行型筋状降雪雲の内部構造を示す。この時に得られた直接観測データは、対流セルが緩やかに組織化し、個々の対流セルは移動する雲に相対的な気流で見ると最下層を除いてほぼ軸対称な構造となっており、上昇流域（コア）では氷晶や降雪粒子の数濃度は低いが5～6 mmの大粒のあられが存在するというものであり（第1図）、雲内の上昇流域と高反射強度域が対応するというデュアルドップラーレーダ観測の結果と整合的なものであった。このデータは、1996年、2000年の国際雲モデリングワークショップで非静力学モデルの検証データとして使用され、雲物理2-モーメントスキームと動的氷晶発生スキームの組み合わせでこのような構造が再現できることが示された。

次に、各種雲物理測定装置・雲レーダ（W-band）・マイクロ波放射計・ドロップゾンデを搭載し、水平方向に密なその場観測と鉛直方向に密なりモセン・ドロップゾンデ観測を組み合わせた中型ジェット機（ダイヤモンドエアサービス所有のG-II、第2

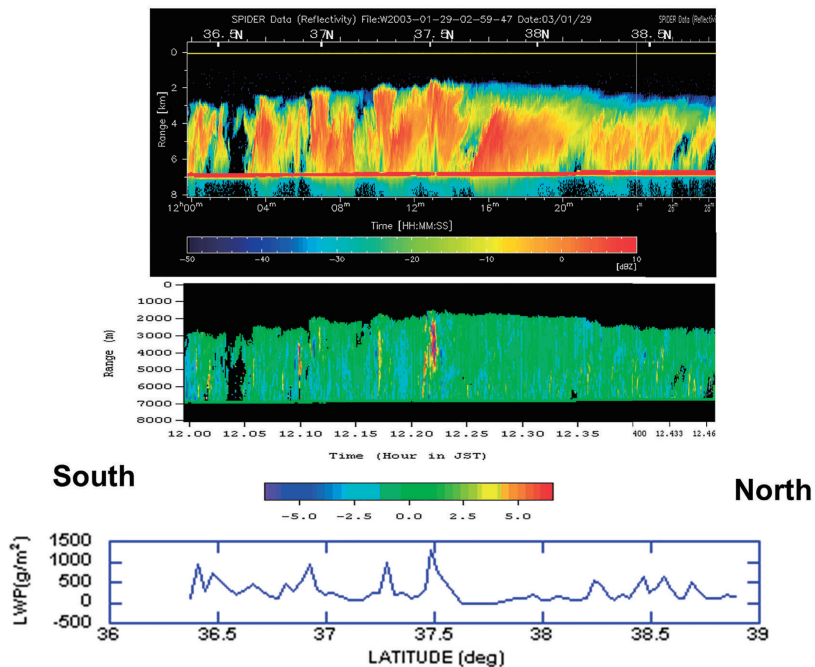
図）を用いた気団変質過程と混合層内の層積雲形成過程に関する研究成果を紹介する。観測では、空気塊が日本海上から日本列島に向かって約200 kmの距離（ $X = -80$ km から $X = 120$ km まで）を吹走する間に、海面からの熱と水蒸気フラックスにより混合層全体が2.5 K、 0.3 g kg^{-1} 加熱・加湿されると同時に混合層の厚さも0.4 km増加することが示された（第3図）。積分雲水量も風下に行くにつれて徐々に増加する傾向にはあったが、 3.5°C の雲頂温度の低下に伴う氷晶・雪粒子の数濃度増加による雲水消費の増大が混合層内における雲水量の増加を抑制し、ほとんどの場所で断熱冷却から推定される凝結量よりかなり小さめの値であった。風下に行くにつれて、降水粒子は雪片や雲粒付き結晶から濃密雲粒付きに変化した。渦相関法から直接求めた海面からの顕熱フラックスは $100 \sim 130 \text{ W m}^{-2}$ 、潜熱フラックスは $150 \sim 250 \text{ W m}^{-2}$ であった。雲内における降水強度（氷水フラックス）は海面からの水蒸気フラックスの1/2程度であったが、雲底下の蒸発により海面に到達するのは海面からの水蒸気フラックスの1～2割で、海面からの熱と水蒸気フラックスはほとんどが混合層の発達と層積雲中の雲粒子の増加に使われていたことが示された。先行研究では主に環日本海の高層気象観測データを用いた水・



第2図 観測用航空機 G-II とその搭載観測機器。左上：G-II の全体，右上：航空機搭載型雲レーダ，左下：翼端の雲物理プローブ，2 DP（降水粒子測定プローブ）と2 DC（雲粒子測定プローブ），右下：レドームを改修した5孔ガストプローブ。



第3図 ドロップゾンデにより観測された温位（左）と水蒸気混合比（右）の鉛直分布の変化。図中の X は東経136.55度に対する東西方向の相対距離。



第4図 東経135.5度線に沿った雲レーダの反射強度；dBZ（上段）とドップラー速度； m s^{-1} （中段）の鉛直断面と鉛直積分雲水量； g m^{-2} （下段）。上段の太赤線は海面を示す。

エネルギー収支解析によって顕熱・潜熱フラックスが推定されてきたが、日本海上における顕熱・潜熱フラックスの直接測定がこの航空機観測によってはじめて実施された。

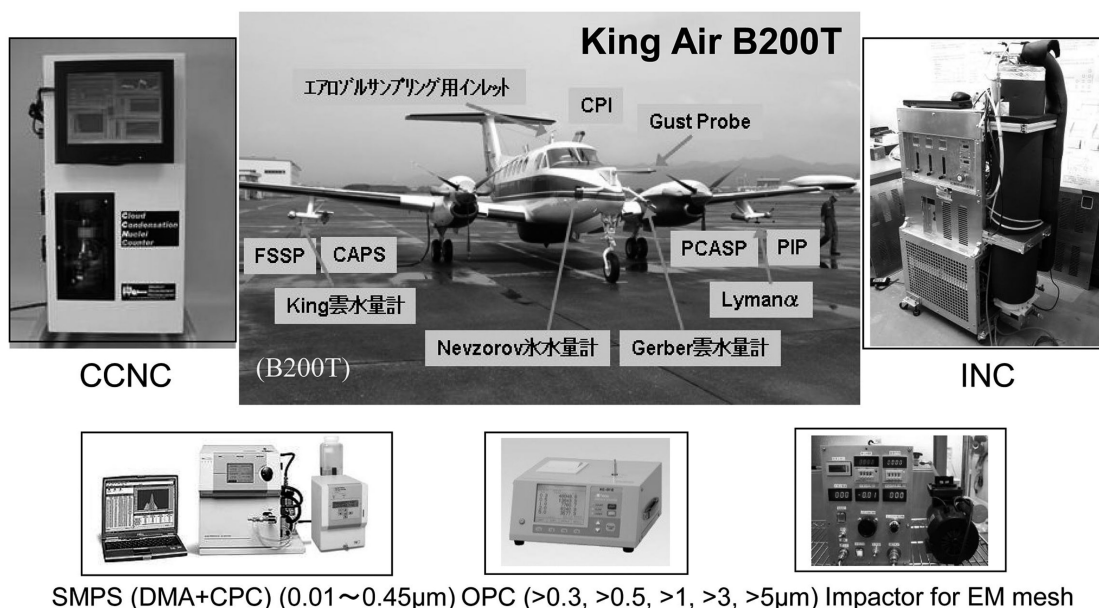
次に、2003年1月29日に航空機（G-II）で観測された東西に弧状に延びる、上空5 km まで発達した幅の広い日本海寒帯気団収束帯（JPCZ）帯状降雪雲の東経135.5度線に沿った内部構造を紹介する。高度7.5

km (-40°C) で北上中に4個のドロップゾンデを投下しながら雲レーダ観測が実施された(第4図)。その後、4.9 km (-40°C)、3.0 km (-27°C)、2.1 km (-18°C)、1.2 km (-13°C)、0.5 km (-6°C) の5高度でレベルフライトが実施され、帯状降雪雲付近の熱力学構造・気流構造・雲微物理構造が調べられた。帯状降雪雲の南側の西よりの気流の方が北側の北よりの気流より温暖で、下層の南北温度傾度は100 km 当たり 0.6°C であった。相当温位は中央部(10 m s^{-1} 近い上昇流を伴う発達した対流雲列)付近が凝結による非断熱加熱で最も高くなっていた。発達した対流雲の中・上部には弱風帯が見られ、一方で発達した対流雲の北側に雲の上部で南西風の強化が見られた。雲頂付近からのアンビル状の雲は強い南西風に流され、その走向は南西-北東となっていた。その下方には、直交型筋状降雪雲が見られ、上層のアンビルの雲との間で seeder-feeder メカニズムにより降水が強化されていた。一方、発達した対流雲列、南側と北側の平行型筋状降雪雲では雲粒捕捉成長が主な降水形成メカニズムであることが示された。日本海寒帯気団収束帯に伴う雲システムは、その上陸地点で大雪をもたらすため1970年代から多くの研究がなされ、1980年代には航空機から撮った連続雲写真のステレオ解析、観測船によるレーウィンゾンデを飛揚しながらの横断観測、静力

学モデルを用いたシミュレーション等に基づくそれぞれの概念図が提案されていた。しかし、この雲システムは海上の擾乱で直接観測が難しいため、これらの概念図には幾つかの相違点が残されていたが、プロジェクト期間中3シーズンで7例の航空機観測を通して、その一般的特徴が明らかとなった。

ここまでは、雲・降水過程に限定した航空機観測の結果を紹介してきたが、冒頭でも述べたように、今後は雲核・氷晶核として働くエアロゾルも含めた雲・降水に関する総合的な観測が望まれる。そのような研究の例としては、一般気象計測装置の他に各種雲物理プローブと雲核計・氷晶核計を含むエアロゾル計測装置を搭載した航空機(第5図)を用いて暖候期の層積雲・積雲を対象に、雲底下の雲核の過飽和スペクトルと雲底付近の雲粒数濃度や上昇流の関係、雲粒数濃度と雨滴生成の関係、氷晶核数濃度と雲内氷晶数濃度の関係等が調べられたものがあるが、このような研究は世界的に見ても緒に就いたばかりである。

雲核・氷晶核として働くエアロゾルの雲・降水影響を観測に基づきモデル化することにより、水・エネルギー循環を通して日々の天気予報や気候変動予測の精度向上につながる新たな研究も可能となる。また、近年、航空業界では深い対流雲のアンビルから広がる高濃度の氷晶雲を飛行中のジェット旅客機のエンジンが



第5図 観測用航空機(B200T)と搭載測定機器。

停止、あるいは破損するエンジンアイシングが深刻な問題となっており、高濃度の氷晶雲の実態把握、発生予測が急務である。高高度と中・低高度観測用の2機の航空機の他に、地上リモセン、衛星リモセン、数値気象モデルを有機的に組み合わせることによって、上記の基礎研究と応用研究の両面を兼ね備え、多くの研究者が相乗り可能な多目的研究という新たな展開も期待される。

5. 航空機観測の役割

これまで紹介してきたのは、いずれも航空機観測によって初めて明らかとなった日本周辺に起こる気象擾乱の内部構造である。しかし、これは国内（あるいはアジア）の航空機を用いた雲・降水観測の創成期であったからで、機動性に優れた観測プラットフォームということだけを頼りに、航空機により初めて観測される現象を追及してもこれまでのような成果をあげ続けることはできないであろう。

航空機観測が機動性をはじめとするその有用性を活かし、大気科学の研究においてさらに重要な役割を担っていくためには、研究目的（何を知りたい）に応じた測定装置・観測手法の開発等も含めた、新たな切り口による研究が求められる。雲・降水研究、あるいは大気科学研究の分野における航空機観測以外の進展も踏まえ、時代に応じた航空機観測の役割を認識し、いろいろな研究手法と連携して総合的大気科学研究の一翼を担っていく必要がある。このような戦略的な航空機観測の実施のためには、安定的運用の可能な占有航空機の整備が必要である。

6. 共同利用施設としての観測用航空機の実現に向けて

今後、航空機観測を実施していく際には、航空機観測の制約（飛行時間、飛行高度、使用可能な電力・スペース等）を考慮して、目的に応じた効果的・効率的な（場合によっては国際協力も視野に入れた複数の航空機を用いた）フライトプランを練る必要がある。例えば、航空機以外の観測手法との連携や、色々な研究目的で観測データの利用が可能になるよう工夫が求められる。また、大型航空機を使用する場合には、異なる観測手法・目的をもった複数のグループが乗り合わせるようになるので、それらの調和を図ることも必須となる。これまで国内では、気象研究所も含めて幾つかのグループが外部資金等を用いて個々に航空機観測を実施してきたが、今後、国内に航空機観測を定着させるためには、これまで直接航空機観測に携わったことのない多くの研究者も航空機観測の有用性を理解し利用していくことを通じて、航空機観測利用の裾野を広げていくことが必要である。

参 考 文 献

- 気象研究所, 2005: 日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究. 気象研究所技術報告, (48), 221pp.
村上正隆, 藤部文昭, 石原正仁, 2015: 人工降雨・降雪研究の最前線. 気象研究ノート, (231), 336pp.
吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之, 2005: メソ対流系. 気象研究ノート, (208), 386pp.