

**地球環境変動の研究と
自然災害現象の実態とメカニズムの解明のため
の航空機の利用に関する提案**

**気象学会学術委員会
「航空機観測に関する検討部会」
報告書**

2013年4月22日

部会長 近藤 豊

計画概要

地球温暖化を含む地球環境の変動が急速に進行しつつあり、人間の経済社会活動や水・食糧供給など生活の基盤に大きな影響を与えるようになってきた。そのため地球環境変動の現状を把握し将来を予測し、対策を講じることが重要である。文部科学省科学技術・学術審議会の「我が国における地球観測の実施方針」において緊急に解明すべき問題として、温室効果気体の循環、雲物理・降水過程、対流圏大気の変化、極域の気候変化、水循環の変動などが挙げられている。

これらの地球環境問題に対応するには、地上からの観測ばかりでなく航空機を用いた地球観測システムの構築と、そのための広い分野の研究者が長期的な視点から利用できる航空機の運用体制を確立することが必要である。先端的な計測器を用いた航空機による直接観測は、測定項目、精度、時空間分解能の点で優れている。上記の問題の解明にはたとえば気象要素や温室効果気体などの精密な高度分布が必要であるが、それらは航空機観測でしか得ることができない。地球規模での観測では人工衛星も重要な役割を果たしている。航空機観測と人工衛星の観測を組み合わせることにより大きな相乗効果が生じる。

上記の問題に加え、地震・津波・洪水などの自然災害や原発事故・海洋汚染などの深刻な事故が起きている。このような災害・事故の際に、的確な観測器を搭載して機動的に観測できる体制を構築することが急務である。これにより迅速な対策を講じることが可能になる。欧米では既にこのような体制がとられており、アイスランドの火山噴火やメキシコの石油流出事故の際には航空機による調査が重要な役割を果たしてきた。また福島原発事故の初期段階での放射能の広域分布の測定はアメリカの航空機により行われた。

日本が知的リーダーシップを取りながら、諸外国の研究者と共同してアジアの環境問題の研究を推進することが重要である。そのためには国内外の研究機関の枠を超えて共同利用できる航空機観測の研究基盤を安定的に供給することが必要である。また、航空機は最先端の測定機器（人工衛星搭載センサーを含む）の基礎開発・試験のための重要なプラットフォームとなる。このことは長期的に日本の研究レベルのさらなる向上と国際的学術交流に寄与すると期待される。

上記の目的を達成するために、国が観測専用機を保有し、大学や各種機関が

中心となった研究者組織により、地球観測・監視システムを構築することを提案する。現在開発している国産機（MR J）は機体の性能が優れておりその改修が効率的に行えるため、この計画に最適である。予算規模としては、MR J機の機体改修・運用、運用組織の5年間の経費、および測定器の整備で、約70億円を想定している。

1 航空機観測の位置づけ

文部科学省の科学技術・学術審議会の「23年度の我が国における地球観測の実施方針」に提示されているとおり、地球観測体制の整備が国家戦略として求められている。これは全球地球観測システム（GEOSS）等の国際的な枠組みと連携したものであり、緊急に解明すべき問題として、気候変動メカニズムの理解と精度の高い予測のための地球観測（温室効果気体の循環、雲物理・降水過程、対流圏大気変化、極域の気候変化、水循環など）が挙げられている。この実施方針では、人工衛星・地上・船舶・航空機を統合した観測の重要性が述べられている。

人工衛星による観測は JAXA を中心に実施されており、地上観測は気象庁や環境省のモニタリングサイトで推進されている。また船舶観測は JAMSTEC が中心となって組織的に運用されている。しかしながら航空機観測は個別の研究プロジェクトにおいて短期的に実施されており、国家戦略としての位置づけがなされていない。

上記の問題の解明のためには、多くの気象要素や大気成分の空間分布、特にそれらの鉛直構造を高精度で観測することが必要であり、航空機観測はこれを実現できる唯一の手段である。また、3次元モデルの検証のために航空機観測データは必要不可欠である。

航空機観測が特に必要とされている重要課題を以下に挙げる。

1. 温室効果気体の変動と循環

気候変動と炭素循環の間の正のフィードバックの大きさの不確実性が、二酸化炭素濃度の将来予測の不確実性の大きな原因になっている。シベリアから北東アジアの広大な森林地帯は重要な CO₂ の吸収源といわれている。また、シベリアや東アジア、東南アジアの湿地帯や水田地帯は世界的にも重要なメタン発生域である。しかしながら、これらの生態系からの CO₂ やメタンのフラックスやその気候応答は不明な点が多い。

2. 対流圏オゾン

対流圏オゾンの増加は農作物を含む植生に悪影響を与え、農業生産の低下をもたらす。またオゾンは重要な温室効果気体である。アジアにおけるオゾン生成の前駆気体（NO_x や揮発性有機炭素など）の排出量の増加により、オゾン濃度が経年的に増加している。関連する化学成分の発生・輸送・反応過程など多くの不確実性が残されている。

3. エアロゾル・雲の相互作用

雲の分布・物理特性は地球の放射エネルギー収支・気候を決める重要な要素である。雲の生成過程が人間活動によって放出されるエアロゾルによって影響を受けることが知られている。しかし、IPCC の第 4 次報告書で指摘されている通り、関与する過程の複雑さのため雲の気候に与える影響の不確定性は極めて大きい。

4. 雲・降水システム

熱帯における降水過程の定量的な理解は、大気大循環のエネルギー源、ひいては全球気候の変動の理解に極めて重要である。これらを表現する気候モデルには大きな不確実性が残されている。この改善には衛星による降雨観測とともに、これらを検証できる航空機による直接観測が必要である。

5. 台風・集中豪雨

台風や集中豪雨による被害は日本やアジアの国々にとって甚大であり、被害の軽減のためには的確な予報が必要である。しかしながら海洋に囲まれた日本では、海洋上の観測データの不足が、予報精度の向上に支障となっている。海上の気象要素や水蒸気の航空機観測により台風の進路や豪雨の予測精度を向上させることができる。また海上の観測として重要な衛星データの利用技術の開発においても、飛行機観測による検証が極めて有効である。

2 これまでの航空機観測

2.1 海外の航空機観測

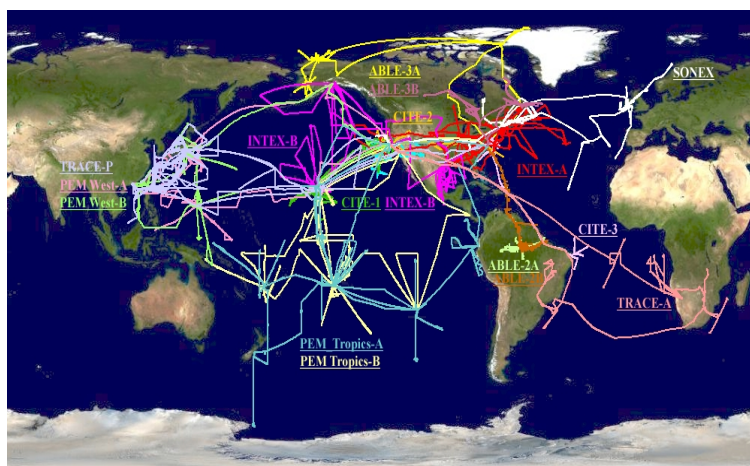
世界的に見てみると、各種の研究機関が所有した観測専用機による地球観測により、大きな成果があがってきている。米国 NASA (航空宇宙局) の GTE (Global Tropospheric Experiment) 航空機観測プロジェクトでは、NASA の保有する DC-8 を用い、1980 年代前半から東アジア・西太平洋域を含む世界各地において系統的な観測を実施してきた (図 x)。これらの観測から、グローバルな対流圏オゾンの分布やその生成・輸送過程、エアロゾルの時空間変動と気象場との対応、各種温室効果気体の南北両半球での動態、そしてそれら各種大気成分への人為的発生源やバイオマス燃焼 (森林火災や焼畑など) の影響など、重要な結果が得られてきた。この NASA の一連の観測は、対流圏大気成分のグローバルスケールのほぼ唯一の系統的な観測であり、その蓄積されたデータは今日までグローバルモデルの検証データとして広く活用されてきている。これらの研究からグローバルモデルの鉛直輸送の計算手法の改良や、人為起源の排出量の見直しなどが行われてきている。

NASA では DC-8 やそれ以外の機体 (ER-2 など) を使った航空機による地球観測を実施してきており、南極オゾンホールの原因の解明をはじめとする、多大な成果をあげてきている。また米国では NASA 以外でも、NOAA (海洋大気庁)、NCAR (大気研究センター)、PNNL (パシフィック・ノースウェスト国立研究所) などの国立研究機関や大学が専用の観測機を保有しており、独自の地球観測プロジェクトを推進してきている。例えば、NCAR の G-V 航空機を使用して 2009 年から毎年継続的に実施されている HIPPO 航空機観測プロジェクトでは、北極から南極までの緯度帯を対流圏全域の高度の上下しながら繰り返し観測し、温室効果気体など大気中の各種成分の高精度データを得つつある。また米国以外へ目を向けても、ドイツの DLR (航空宇宙センター) やイギリスの気象局をはじめとする多くの国々で専用の観測機を使った研究が実施されてきている。この結果、南米ペルー沖での大気海洋観測 (VOCALS) などの大規模な国際共同観測では、アメリカやヨーロッパなど複数の研究機関からの複数の機体が持ち込まれ、それぞれの国の貢献がなされている。

これらの諸外国のプロジェクトでは、航空機搭載専用の高感度かつ高時間分解能の測定器が継続的に開発されてきている。継続的にプラットフォームである航空機が使用できる環境があってはじめて、航空機搭載という特殊目的の高精度測定器の開発が可能となっている。このように観測専用機は、地球観測のひとつの推進力として機能している。

専用航空機の機体の保有や運用は、多くの経費を必要とする。それでも世界の多くの研究機関が機体を保有しているのは、航空機観測で得られるデータの価

値、あるいはそれを利用した研究の質が高いからに他ならない。1990年代後半からは人工衛星により、対流圏オゾンなどの対流圏大気成分の気柱全量（鉛直積分量）のデータが得られるようになってきている。しかしながら、これらの成分の高度分布がその物質の変動プロセスの解明の鍵となるとともに、その放射などへの影響も大きく変化する。また人工衛星観測ではほんの一部の物質の情報しか得られない。このため諸外国では航空機観測を地球観測の重要な柱として位置づけ、人工衛星や地上観測との相補的な観測研究を実施している。また国益という観点からも、諸外国では航空機を活用してきている。今後、隣国や大陸間での越境汚染問題やその有効な対策の策定においても、境界層内での輸送や、移動性擾乱に伴う境界層から自由対流圏への輸送など系統的な観測が不可欠である。



米国 NASA の GTE 対流圏航空機観測プロジェクトの実施領域

3. 研究計画

3.1 温室効果気体の変動と循環

温室効果気体は大気中の寿命が長いので、地球規模での循環を理解するためにはそれらの気体の定点における季節変動や経年変動をとらえることが不可欠である。上空における大気成分の季節変動や経年変動を明らかにするには定期的に長期にわたって航空機をチャーターすることが最も確実な方法であるが、航空機のチャーターには多額の資金が必要であり、観測頻度や観測領域は限られたものにならざるを得ない。これに対して民間航空機は、観測装置を搭載するための細心の注意と準備、場合によっては機器開発の時間とコストが必要になるが、観測頻度の高さや観測領域の広さを考えると極めて魅力的な大気観測のためのプラットフォームであると言える。

日本では日本航空（JAL）が運航する5機の航空機に自動大気サンプリング装置（Automatic Air Sampling Equipment: ASE）とCO₂濃度連続測定装置（Continuous CO₂ Measuring Equipment: CME）を搭載して定期的に高頻度で温室効果ガスの観測を実施するCONTRAIL（Comprehensive Observation Network for Trace Gases by Airliner）プロジェクトが2005年より始まった。この中でも特にCMEを使った観測は、民間航空機を使ったCO₂濃度の定常観測として世界に先駆けた取り組みであり、炭素循環の解明ばかりでなく、CO₂をトレーサーとした大気輸送の解釈、さらには衛星観測の検証データとしても広く利用されている。また、ASEを使った観測ではCO₂以外の温室効果ガスであるメタン（CH₄）、亜酸化窒素（N₂O）、六弗化硫黄（SF₆）や関連気体である一酸化炭素（CO）、水素（H₂）およびこれらの気体の同位体成分が観測可能であり、上空における緯度別の長期観測データとして貴重な情報が得られている。

しかしながらCONTRAILプロジェクトでは大気境界層内の観測が空港周辺に限られてしまうので、人為汚染を受けた観測値が少なくない。上部対流圏（緯度によっては下部成層圏）から地上付近にかけての温室効果気体のバックグラウンド値を得るには、民間航空機と観測専用機を組み合わせた包括的な観測網を構築することが必要である。

また、民間航空機はさらなる大気成分の観測に応用が可能であるが、新たなセンサーや観測システムを航空機観測に応用するには、地上での綿密な試験の他にテスト飛行による実機試験が不可欠である。観測用専用機にはこのように民間航空機観測を発展させることにも貢献できるメリットがある。

なお、CONTRAILでは大気サンプルをエアコンダクトから取り入れているために、温室効果気体等の化学的に安定したガス成分は測定可能であるが、オゾンなどの短寿命の気体成分やエアロゾルなどの粒子状物質を観測することはで

きない。これらの気体成分や物質の空間分布を知るためには観測専用機の利用が必要である。

3.2 対流圏オゾン

大気中で化学反応により生成・消失する成分のうち、大気質および気候影響の観点から最も重要なのは、対流圏オゾンである。地表付近の対流圏オゾン濃度の上昇は、農作物を含む植生への悪影響により、農業生産物の収量の減少や植生による二酸化炭素吸収量の減少を引き起こす可能性がある。また対流圏界面付近のオゾンの経年的増加は、 CO_2 、 CH_4 などの長寿命温室効果気体に引き続き三番目に大きい温室効果をもつとされ、短寿命温室効果気体としてその影響が懸念されている。オゾンは大気中での化学的寿命（化学反応による消失の時定数）が数週間から数か月であり、またオゾンの化学的生成速度を都市周辺を除いて律速する活性な窒素酸化物（ $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ）の化学的寿命は1日から1週間程度である。このため、オゾンおよびこれらのオゾンを生成する前駆気体は空間的にも時間的にも大きく変動し、その3次元的な動態の把握において航空機観測はこれまで主要な役割を果たし、また今後もさらに重要性が増すものと考えられる。

3.3 エアロゾルと雲

大気中に浮遊する微粒子（エアロゾル）は、太陽放射を散乱・吸収することにより直接的に地球の放射バランスに影響する一方、雲凝結核として働き雲物理量を変化させることにより間接的な効果ももつ。さらにエアロゾルは、都市域などでは健康への悪影響ももつ。エアロゾルは微小粒子（乾燥直径が1ミクロン以下のエアロゾル）の多くが大気中で前駆気体から化学反応により生成するとともに、大気中での寿命（雲粒となり降水粒子として大気中から除去される湿性沈着などによる除去の時定数）が1週間程度であるため、その空間的・時間的変動が大きい。したがって、その発生源、輸送過程、あるいは以下に述べるその地球科学的影響の評価のためには、航空機観測による三次元的な動態の把握が不可欠である。

エアロゾルの放射への影響は、エアロゾルの粒径や混合状態などの物理化学特性と、その高度分布に強く依存する。例えば、太陽放射を例外的に強く吸収するブラックカーボンエアロゾルを含む空気は、他のエアロゾルと同一粒子として内部混合しているか外部混合しているかにより、放射効果の鍵となる単一散乱アルベドが大きく変化する。またこのブラックカーボンは、雲層との上下の位置関係により光吸収量が大きく変化する。このため、エアロゾルの放射に関わる物理化学特性とその高度分布の把握は、エアロゾルの動態そのものにと

もに重要である。これらは現在ではリモートセンシングでは測定不可能であり、航空機観測の果たす役割が大きい。

一方、間接効果については、エアロゾル粒子が雲粒や氷晶の生成過程を通して雲粒粒径分布や水粒子と氷粒子の混合状態を決定し、雲の放射特性に影響を与えるだけでなく、雲システムの寿命・空間的広がり・降水効率、ひいては雲・降水システムによる水・エネルギー循環にまで影響することが指摘され、メソモデルや気候モデルのなかでエアロゾル・雲・降水を統一的に扱うことの重要性が広く認識され始めてきた。このようなエアロゾルの第一種・第二種間接効果をモデルのなかで適切に取り扱うためには、エアロゾル粒子の物理化学特性と雲核・氷晶核としての活性化特性の関係解明、および、雲核・氷晶核活性化スペクトルの変化に対応する雲の微物理構造の変化と降水過程への影響解明と、そのモデル化が急務である。

そのために、航空機観測でエアロゾルの物理化学特性、雲核・氷晶核の活性化特性、雲の微物理学・熱力学的・力学的特性を総合的に観測することによって、種々の雲システムそのものの動態を理解するとともに、それらの雲システムにおけるエアロゾルの間接効果の解明を図ることが重要である。これらの観測は、人工衛星観測による気柱平均量や雲頂付近の積算量の推定とも相補的である。これらの詳細な航空機観測データは、大気中の雲物理過程を再現する室内実験にも重要である。これらの動態把握およびプロセス研究に基づき構築されたエアロゾル・雲・降水統一モデルの再現性を検証し、さらなる改良を図る必要がある。

雲・降水システムの雲核・氷晶核の活性化特性の変化に対する応答は非常に複雑であるため、人工雲核や人工氷晶核を用いた意図的気象変化に関する実験手法（航空機を用いたシーディング実験）を準実スケールの感度実験と位置づけ、より一層のエアロゾルの間接効果の解明とエアロゾル・雲・降水統一モデルの精度向上を図る必要がある。

このように、エアロゾルの間接効果の解明には、エアロゾル粒子の物理化学特性と雲核・氷晶核としての活性化特性の測定、降水雲の微物理学・熱力学的・力学的特性の測定が必須であり、航空機観測抜きでは目的を達成できない。

3.4 上部対流圏・成層圏の物質交換

対流圏と成層圏の物質交換（STE）は、圏界面を通して行われる。この交換は、成層圏、対流圏双方の大気化学にとって重要である。例えば、成層圏の水蒸気量は、この交換に大きく依存するが、その濃度は、2000-2009年の間に、約25%増加しており、その結果、地表付近の温度上昇を抑制している（Solomonら2010）。水蒸気増加の原因は、人間活動の影響とも考えられるが、明らかではない。また、

下部成層圏のメタン濃度が増加しているという指摘もある。また、SO₂放出量の増加により、上部対流圏での硫酸による新粒子生成が増加している影響も考えられる。

圏界面付近の微量気体やエアロゾル分布の変化は、温度分布の変化を通して、力学的構造の変化をもたらし、それは様々な影響として現れる可能性がある。成層圏循環は対流圏からの傾圧波の伝搬によって駆動されているが、それは、圏界面付近の大気安定度や風構造に依存する。また、巻雲の生成、QBO（準2年振動）への影響(Garfinkel and Hartmann, 2010)が懸念され、さらには、亜熱帯ジェットの変化を通して、アジアモンスーンや、低気圧の発達など短期の気象予測にもかかわる問題となる可能性がある(Gettelmanら2011)。

以上のように人間活動の圏界面付近への影響は、未解明であり、今後大きな問題として顕在化する可能性がある。航空機は、圏界面付近の、オゾン、水蒸気、メタン、CO₂、CO、NO_x、NO_y、SO₂、エアロゾル等を直接測定あるいは採取することにより、それらの濃度分布を精査することを可能とする。このため、高度 12-15km を飛行可能な航空機の導入が望ましい。これまでに実施された航空機観測キャンペーンにより、圏界面付近の重要さは認識されたが、観測データは、まだ断片的である。今後、季節変化や長期トレンドについての調査が必要である。また、衛星データによるトレンド解析においても、航空機観測による検証は重要である。

3.5 雲・降水システム

気象・気候モデルには雲に関する不確定があり、不確定性を低減するための観測が不可欠である。静止気象衛星や CloudSat/CALIPSO などの衛星リモートセンシングによる全地球的な観測がモデルの雲検証に大きな役割を果たしてきた。しかし、実際に雲がどのような特性をもつのかの詳細については、リモートセンシングでは不十分であり、雲の存在する場所で直接計測をする必要がある。航空機観測は、雲の *in situ* の観測手段として、雲微物理の計測に重要な役割を果たしている。

近年、雲微物理のモデリングは多次元ビン法やマルチモーメントビン法などますます精緻化している。このような雲微物理のモデリングには、雲粒のサイズ分布、形状、相状態、運動速度などの非常に精緻な情報を要する。このような情報が広範囲の雲の中で実際どのようになっているかを測定する手段として、飛行機観測は最も有効である。

雲降水のメソシステムの生成・発展などにおいて、雲のマクロ構造の理解が必要である。たとえば、空間スケール数 10 m のプリュームの特性が積乱雲の発展に重要な役割を果たしていることが知られてきた。プリュームの熱力学特性、

速度やスケールなどの統計的性質、時空間的な分布について、雲の内部を計測可能な航空機観測が重要である。

航空機による雲観測は、人工衛星観測にとっても必要不可欠な重要性をもっている。衛星観測のリトリバルアルゴリズムを開発するためには、雲からの放射量やレーダーやライダーの反射強度などが、実際の雲の微物理特性とどのような関係にあるのかを正確に理解する必要がある。最近、数値モデルの検証にフォワードモデルのパッケージである「衛星シミュレータ」が利用されるようになってきた(増永 2011)。モデルで出力される大気のプロファイルや雲微物理量を入力値として、衛星から観測されるシグナル値をフォワードモデルで疑似的に計算し、衛星観測量と直接比較検証するというものである。「衛星シミュレータ」の改良・開発のためには、現実の雲特性と衛星観測によるシグナル値の対応をつけておく必要がある。航空機により、人工衛星の観測領域の雲を広域に観測することにより、リトリバルアルゴリズムやフォワードモデル・衛星シミュレータの検証が可能になる。

3.6 集中豪雨・台風

台風を対象とする航空機観測の歴史は長く、多くの成果が得られている。例えばハリケーンの発生する大西洋域では、1950年代初めころから航空機によるハリケーンの直接観測が行われており (Aberson et al. 2006)、ハリケーンの発生、発達、移動等のメカニズム解明に寄与している。また観測データは予報精度の向上にも貢献しており、1997年から2006年の間に行われた全176回の航空機観測の進路予測へのインパクトを調査した結果、予報時間60時間までで予測誤差が10~15%改善することが示されている (Aberson 2010)。台風の発生する西太平洋では、台湾が年に数回、台湾に影響を及ぼすことが予想される台風に対して航空機観測を行っている。大西洋域と同様、台風の進路予測誤差が減少することが示されている (Wu et al. 2006; Yamaguchi et al. 2009)

台風航空機観測は、予測精度の改善だけでなく、台風の強度推定にも貢献する。現在、気象庁が発表する台風の中心気圧や最大風速は、衛星による観測データから「推定」して求められており、その値には誤差が含まれている。特に強い台風ほど誤差は大きくなる。航空機により「直接」台風を観測すれば、推定による誤差が無くなり、精度良く台風を解析することができる。このような正確な観測データは台風による自然災害の防災・減災という観点から非常に重要であると考えられる。また、このような解析精度の向上は、台風の歴史的な変動を解析する研究、及び IPCC の気候変動予測等に関わる研究にも貢献すると考えられる。

数値予測モデルは高度化一途をたどり、台風の発生、発達、移動を対象とし

て様々な数値シミュレーションが行えるようになった。しかし、台風の観測データが乏しいためにシミュレーションの結果を正しく評価することができないという現状があり、研究者は「手探り」で数値予測モデルの開発・改良を行っている。航空機による台風の直接観測データがあれば、シミュレーション結果を正當に評価することができ、数値予測モデルの高度化、更には予報精度の向上が期待できる。

4. 衛星との連携

4.1 GOSAT

GOSAT に搭載されている短波長赤外 (SWIR) センサーは CO₂ とメタンのカラム量を測定し、熱赤外 (TIR) センサーは特に上部対流圏に高い感度を有した CO₂ とメタンの鉛直分布を測定する。両センサーの検証にはこれらの気体の鉛直分布データが不可欠であり、最も高い信頼度で鉛直分布を得るには航空機観測が必要である。実際に GOSAT 検証チームは、前述の CONTRAIL と米国 NOAA の定期航空機観測および環境研のシベリアでの定期航空機観測データを利用して SWIR の CO₂ カラム量の検証を実施している。最近ではメタンカラム量についても CONTRAIL 観測値を利用して TIR と SWIR の検証を実施した。また、これらの定期観測では得られない特定点での CO₂ やメタンの鉛直分布を取得するために、GOSAT 検証チームではチャーター航空機を使った観測も実施している。最後に、GOSAT プロジェクトでは地上に設置した FTS による CO₂ とメタンのカラム量の観測値も重要な検証データとして使われるが、FTS 観測も航空機観測データで検証することによってその精度を保証されている。以上のように、GOSAT のような衛星による温室効果気体のカラム量または鉛直分布観測は航空機観測による検証がデータの信頼度を支える根幹になっていると言える。

4.2 EarthCare

2015 年に打ち上げが予定されている人工衛星、雲エアロゾル放射ミッション (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer、以下 EarthCARE) に関して、雲レーダー(CPR)の校正と、EarthCARE 標準プロダクトについて、航空機観測による検証が検討されている。

ドップラー速度の検証について、観測されるドップラー速度 V_d は、雲粒子の落下速度に CPR の波長である 95GHz でのレーダー反射因子の重みがかかった粒子の終端速度 V_{dz} と雲内の鉛直流 V_z との和で与えられる。 V_d 自体の検証について、地上/船舶設置型もしくは航空機搭載の 95GHz ドップラーレーダーとの比較が考えられる。鉛直流が粒子の終端速度に比べ十分小さい場合、ドップラー速度は V_{dz} で近似される。この場合、検証用の航空機観測によって得られた粒子サイズや粒子形状から再現された V_{dz} と比較することで、衛星で観測された V_d との比較を実施できる。雲の水平不均質性に関して、衛星軌道に沿って飛行させた航空機搭載ドップラー雲レーダーとの比較を行うことによって検証が可能であろう。航空機搭載の現場観測測器としては、直接雲氷量の測定が可能な CVI センサー、サイズ分布測定が可能な FSSP, 2DC, 2DP の使用が考えられる。

雲レーダー(CPR)とライダー(ATLID)を使ったリトリーバル結果について、雲

と降水に関するプロダクト（雲マスク、雲タイプ、雲水・氷雲・降雨粒子・降雪量の微物理量（有効半径や雲水量・氷水量）、降雨量、降雪量、鉛直流速、落下速度）に関する検証が必要である。これらは、航空機搭載の現場観測測器によって検証可能である。また航空機搭載や地上・船舶搭載雲レーダーとライダー等によってアルゴリズムを適用することで得られる物理量との比較も間接的検証として有効であると考えられる。

ライダー（ATLID） 単体から得られる標準プロダクトとして、雲、エアロゾル、大気中の分子等による散乱の判別、雲タイプやエアロゾルタイプ等の識別、エアロゾルの光学特性、雲の光学特性、大気境界層の高度を予定している。これらのプロダクトはライダー、太陽放射測定器（サンフォトメーター）、そして現場測定器（ネフェロメーター等）を搭載した航空機観測によって検証可能である。

EarthCARE 衛星搭載多波長イメージャ MSI は、可視から赤外波長までの7チャンネルを用いて雲とエアロゾルの水平分布の把握と光学及び微物理特性の広域推定を行い、CPR と ATLID から得られる鉛直方向の雲とエアロゾル情報を水平方向に補間する。また、MSI から得られた雲エアロゾルプロダクトを用いた放射シミュレーションの結果は、BBR から得られる広帯域放射データの整合的説明のために利用される。MSI データの検証について、MSI 処理では、雲フラグ、雲とエアロゾルの光学のおよび微物理特性の推定が行われる。より正確な雲エアロゾルの検証を行うために、航空機による直接観測データが必要である。

衛星搭載BBRについての航空機を用いた検証では、飛行高度より上空の放射場は間接法（同化された放射場から推定）による。従って、航空機による検証を行う場合には、飛行高度より上空において間接法で誤差の比較的少ない快晴を仮定する。雲上飛行による航空機観測を用いたBBR の検証で最も重要なことは、雲上のBBR 視野内における雲の3D 構造の把握である。BBR の視野(IFOV)は10km x 10km が想定されているので、直接これに対応する視野を持つ放射計（検定済み狭視野日射計、放射計）を用いれば実行可能である。その場合にも CERES と同様に、角度分布取得のための天頂角、方位角方向の走査を必要とする。これによって、ターゲットとした領域のADM（Angular Distribution Model）を収集することが可能となる。これは、BBR の検証に用いると同時に、大気上端における放射収支推定時のADM データとして利用する。こうした精度の高い放射計を用いた航空機からの走査は、これまでほとんど国内的には経験がなく、信頼できる高速走査をとまなう航空機搭載型放射計の作成など多くの課題がある。しかし、これが実施されれば最も直接的な検証となる。一方、直接ADMを計測する代わりに、航空機搭載ライダーによる雲の3D 構造把握の可能性がある。

衛星と同期した雲の形状を観測して対応させている点で、比較的信頼度の高い検証となる。航空機を用いた検証では、適切なターゲットとなる雲を対象にして、衛星飛来に完全に同期した航路での飛行を行う必要がある。また同時に、各種地上支援観測も必要となり、SKYNET等の既存観測施設を対象とした計画を立案する必要がある。

5. 運用形態案

Appendix 1

日本が主導した航空機観測

熱帯

主たる実施機関 観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	主要な成果
気象研 PACE-4 1997年1月 グアム	Swearingen Merline-IV エアロゾル、オゾン	亜熱帯域の微小粒子鉛直分布を測定
気象研、CSIRO PACE-5&6 1997年9-10月、1998年9-10月 オーストラリア-カリマンタン	Fokker-F27 エアロゾル、オゾン、CO	カリマンタン森林火災による煙霧粒子の組成解明
NASDA, 名古屋大学 BIBLE-A 1998年9-10月 インドネシア	Gulfstream-II オゾン、窒素酸化物	雷で生成したNO _x が熱帯のオゾンを生成していることを発見
NASDA, 名古屋大学 BIBLE-B 1999年8-9月 オーストラリア	Gulfstream-II オゾン、窒素酸化物	北部オーストラリアのバイオマス燃焼のオゾン生成への影響を評価
NASDA, 東京大学 BIBLE-C 2000年12月 オーストラリア	Gulfstream-II オゾン、窒素酸化物	熱帯の雷の単位フラッシュあたりの窒素酸化物の生成量を推定

JAMSTEC, CRL, NIES PALAU2002 2002年12月 西太平洋	Gulfstream-II ドロップゾンデ、雲レー ダ、ライダー	研究船「みらい」との同 期による熱帯海洋上の境 界層変動の把握
JAMSTEC, CRL, NIES PALAU2004 2004年3月 西太平洋	Gulfstream-II ドロップゾンデ、雲レー ダ、ライダー	研究船「みらい」との同 期による降水システム環 境場の把握
JAMSTEC PALAU2005 2005年6月 西太平洋	Gulfstream-II ドロップゾンデ	地上レーダとの同期によ る降水システム環境場の 把握及び機動的観測デー タ同化インパクトの熱帯 から中緯度への伝播
JAMSTEC PALAU2008 2008年6月 西太平洋	Gulfstream-II ドロップゾンデ	研究船「みらい」との同 期によるメソ対流系環境 場の把握
気象研 T-PARC2008（科研費 「航空機を用いた力 学・熱力学場の直接観 測による台風の予測可 能性に関する研究」） 2008年8-9月 西太平洋	DLR Falcon ドロップゾンデ ライダー	台風最適観測法の有効性 の評価
JAMSTEC PALAU2010 2010年6月 西太平洋	Gulfstream-II ドロップゾンデ	全球非静力雲解像モデル （NICAM）による準リア ルタイム予報実験との比 較検証

中緯度

観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	主要な成果
NASDA, 東京大学 PEACE-A 2002年1月 日本近海	Gulfstream-II オゾン、窒素酸化物	冬季のアジア大陸からの汚染大気の輸送経路・分布とオゾン生成への影響評価
NASDA, 東京大学 PEACE-B 2002年4-5月 日本近海	Gulfstream-II オゾン、窒素酸化物	春季のアジア大陸上の汚染物質の自由対流圏への輸送とオゾン生成への影響評価
JAXA, 東京大学 PEACE-C 2004年3月 日本近海	Gulfstream-II エアロゾル、オゾン	大気中でのブラックカーボンの変質過程の解明
東北大学 大気の定期サンプリング 1979年- 日本上空	小型機（セスナ？）およびMD-9？ 温室効果気体	CO ₂ を始めとする温室効果気体およびその同位体の高度別の時間変動。CO ₂ の航空機観測では世界最長レコード。
気象研 科振費「降雪機構」 1993年1月 日本海	B200T 雲物理	日本海上に発生する降雪雲の降水機構と人工調節の可能性を評価
気象研 JACCS 1995年～2000年寒候期 日本海、東シナ海	B200, C404 雲物理、放射	雲の内部構造とその放射特性を評価
気象研 利根ダム共同研究「山岳性降雪雲」 1998年～2002年寒候期 本州中部	MU-2, B200 雲物理	山岳性降雪雲の降水機構の解明と人工降雪の可能性評価
気象研、名古屋大学、NICT、防災科研 戦略「メソ対流系」 1999年～2003年寒候期（日本海）・暖候期（東シ	B200、G-II、Citation V 雲物理、雲レーダ、ドロップゾンデ、マイクロ波放射計	冬季季節風時および梅雨期に出現する組織化した対流雲の内部構造の解明

ナ海)		
気象研 科振費「人工降雨・降雪」 2007年～2010年寒候期 (本州中部)・暖候期(四 国)	B200T、MU-2、Merlin-4 雲物理、エアロゾル、シ ーディング	山岳性降雪雲の降水機構 の解明と人工降雪技術の 高度化および暖候期四国 上空にかかる雲の降水機 構と人工降雨の可能性評 価

高緯度極

観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	主要な成果
国立極地研究所 AAMP	Gulfstream-II	
国立極地研究所 AAMP-2	Gulfstream-II	
国立環境研究所 シベリア温室効果気体観 測キャンペーン 1992-1994の夏季 シベリア全域	IL-18 温室効果気体、同位体、 オゾン	シベリア湿地帯やガス田 からのメタン発生量の推 定や発生源特定。森林の CO ₂ 吸収。
国立環境研究所 シベリア温室効果気体定 期観測 1993- Surgut, Novosibirsk, Yakutsk	An-24, An-30, An-2, L-410, Tu-134 温室効果気体、同位体	温室効果気体の高度別季 節変動や経年変動、なら びに大陸と沿岸域の差を 明らかにした。

グローバル

観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	主要な成果
気象研 INSTAC-1 1989年3月 日本ーイン ドネシア	Swearingen Merline-IV エアロゾル、メタン、NO、 オゾン	中部対流圏(高度4.5km) のエアロゾル組成の緯度 分布を測定
気象研	Gulfstream-II	海塩粒子の上部対流圏へ

INSTAC-2 1990年2-3月 北緯 65° -南緯 65	エアロゾル、オゾン	の輸送を発見
気象研 INSTAC-3 1991年2月 北緯 65° - 南緯 65°	Gulfstream-II エアロゾル、オゾン	下部成層圏・上部対流圏 でのエアロゾル分布の測 定
気象研、CSIRO PACE-1-3 1994年1月-1996年7月 メルボルン-仙台	Fokker-F27 エアロゾル、オゾン、CO	西太平洋域自由対流圏 (高度 5-6km)のエアロゾ ル粒子濃度・組成分布を 季節別に測定
気象研 PACE-7 2000年2月名古屋-アン カレジ-グアム	Gulfstream-II エアロゾル、オゾン、CO	圏界面付近のCO・エアロ ゾルを測定
気象研究所 JAL 観測 1993-2005 日本-豪州間	Boeing747 温室効果気体	上空における緯度別の温 室効果気体観測では世界 最長。炭素循環、森林火 災、衛星検証などの成果。
国立環境研究所、気象研 究所 CONTRAIL 2005- 日本-欧州、アジア、オ セアニア、北中米間	Boeing747-400 Boeing777-200 温室効果気体、同位体	炭素循環解明、モデルの 検証、大気輸送メカニズ ムの解明、衛星観測の検 証。

日本が参加した海外の航空機観測

熱帯

主たる実施機関 観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	主要な成果
DOTSTAR 2003年より 西太平洋	ASTRA SPX ドロップゾンデ	ドロップゾンデの観測デ ータを使用することによ り気象庁の全球モデルに

		よる台風進路予測が改善した。
--	--	----------------

中緯度

観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	日本の研究者による主要な成果
NASA PEM-West A 1991年10月西太平洋	NASA/DC-8 オゾン、窒素酸化物	大陸性、中緯度海洋性、熱帯性の各種空気塊中での窒素酸化物の平均的描像を解明
NASA PEM-West B 1994年2-3月西太平洋	NASA/DC-8 オゾン、窒素酸化物	総反応性窒素酸化物 NO _y の構成比率を解明
NASA SONEX 1997年10-11月北大西洋	NASA/DC-8 オゾン、窒素酸化物	航空機の排気ガスによる大気中の窒素酸化物や微粒子数濃度への影響を評価
NASA PEM-West B 2001年4月西太平洋	NASA/P-3B オゾン、窒素酸化物、エアロゾル	窒素酸化物や硫黄酸化物の大陸からの輸送効率を定量化

高緯度極

観測キャンペーン 時期・場所	航空機と主な測定項目	主要な成果
NASA SOLVE 1999年12月-2000年1月 北極圏	NASA/DC-8 オゾン、窒素酸化物	極成層圏雲の形成と落下による成層圏窒素酸化物の高度方向の再分配過程の解明
NASA ARCTAS 2008年4月および6-7月	NASA/P-3B ブラックカーボンなど	シベリアのバイオマス燃焼やアジアの人為起源エアロゾルの北極域への影響評価

航空機を用いた地球環境観測、大気観測等プロジェクト一覧表

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間	観測内容	
平成20年度	G-II	JAMSTEC	H20.6.15~H20.6.30	16 日間	パラオ気象観測(ドロップゾンデ投下)
		NICT	H20.4.1~H20.5.28	58	高性能合成開口レーダ(X-SAR)修理改造検査及び観測飛行
			H20.8.2~H20.9.3	32	
			H20.11.27~H20.12.5	9	
			H21.1.26~H21.1.30	5	
	計	104 日間			
	JAXA	H21.2.1~H21.2.5	5	航空機SAR(L-SAR) 災害模擬実証実験	
		H21.2.12~H21.2.17	6		
		H21.3.4~H21.3.8	5		
		計	16 日間		
200T		H20.3.3~H20.4.4	32 日間		東アジア大気観測
200T	気象研	H20.4.7~H20.7.3	56 日間	人工降雨実験	
	環境研(気象協会)	H20.12.16~H21.1.16	17 日間	GOSAT検証のための航空機温室効果ガス測定業務	
	東京大学	H21.3.9~H21.4.26	49 日間	航空機による日韓共同大気観測	
	計	124 日間			

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間	観測内容	
平成21年度	G-II	NICT	H21.9.14~H21.10.5	23 日間	高性能SAR機材追加のための飛行
			H21.12.19~H21.12.23	5	高性能SAR機材周辺データ取得飛行
			H22.1.28~H22.2.5	9	高性能SAR機上処理システム性能確認飛行
		計	37 日間		
		JAXA	H21.11.24~H21.11.30	5 日間	航空機SARによる観測実験
			H22.2.12~H22.2.28	17	高分解能ホリゾントSARを用いた水害状況把握技術の開発
	H21.12.24~H22.1.26		20	高高度ライダーのシミュレーションによる飛行評価実験に関する作業	
	計	42 日間			
	JAROS	H21.12.1~H21.12.3	3 日間	潮流観測	
		H22.3.29~H22.3.31	3	潮流観測	
	計	6 日間			
	200T	気象研	H21.5.18~H21.6.23	34 日間	人工降雨実験
			H21.11.9~H21.11.20	12	人工降雪実験(修理改造作業)
			H21.12.1~H21.12.23	23	人工降雪実験
H22.2.25~H22.3.13			17	人工降雪実験	
計		86 日間			
JAXA		H21.8.5~H21.9.1	23 日間	二酸化炭素差分吸収レーザ分光計の飛行機搭載実験の実施	
環境研(気象協会)	H22.2.2~H22.2.24	23 日間	GOSATプロダクト検証航空機観測		
東京農工大	H21.9.24~H21.10.19	26 日間	東アジアにおける越境大気汚染解明のための航空機調査		

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間	観測内容	
平成22年度	G-II	JAMSTEC	H22.6.9~H22.6.22	14 日間	パラオ気象観測(ドロップゾンデ投下)
		JAXA	H22.7.30~H22.8.5	8 日間	高分解能ホリゾントSARを用いた水害状況把握技術の開発
			H22.9.6~H22.9.10	5	
			H22.11.13~H22.11.26	11	
			H23.1.6~H23.1.21	14	
			H23.1.31~H23.2.5	7	
			計	45 日間	
	NICT	H23.1.14~H23.1.27	14 日間	高性能SAR ATI観測モード性能確認飛行	
	200T	気象研	H23.3.9、3.12、3.18	3	災害観測実験
			H23.3.25~H23.3.31	7	ETS-VIII航空機実験
		計	24 日間		
	200T	気象研	H22.5.24~H21.6.25	33 日間	人工降雨実験
		東京農工大	H22.11.23~H22.12.16	24 日間	東アジアにおける越境大気汚染解明のための航空機調査
		JAXA	H23.1.25~H23.2.7	14 日間	二酸化炭素差分吸収レーザ分光計の飛行機搭載実験の実施
茨城大		H23.2.25~H23.3.15	19 日間	太陽散乱光紫外可視分光観測および大気オン観測(修改)	

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間	観測内容	
平成23年度	G-II	JAXA	H23.4.1~H23.4.5	5 日間	L-SAR東日本大震災被災地観測
			H23.4.11~H23.4.13	4	
			H23.9.18~H23.9.30	12	
			H23.11.1~H23.11.30	30	
			H24.1.16~H24.2.10	26	
			計	77 日間	
		NICT	H23.8.18~H23.8.26	9 日間	
	200T	JAXA	H23.10.3~H23.10.14	12	X-SAR災害状況把握観測実験飛行
			H24.1.5~H24.1.13	9	X-SAR災害被害想定観測実験飛行
		計	30 日間		
	200T	JAXA	H24.1.5~H24.1.16	12 日間	二酸化炭素差分吸収レーザ分光計の飛行機搭載実験
		東京大学	H24.1.30~H24.2.20	22 日間	大気エアロゾル観測(修改)、エアロゾル数値濃度観測
		筑波大学	H24.2.24~H24.2.27	4 日間	人工降雨実験
		東京農工大	H24.3.2~H24.3.16	15 日間	東アジアにおける越境大気汚染解明のための航空機調査
MU-300	JAXA	H23.11.21~H23.11.28	7 日間	騒音計測実験	
		H23.12.19~H24.2.24	61	航空機による電場観測	
計	68 日間				

(平成24年9月4日現在 確定のみ)

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間	観測内容	
平成24年度	G-II	JAXA	H24.4.2~H24.4.23	21 日間	L-SAR2修改及び校正検証、撮像実証
			H24.6.15~H24.6.21	7	L-SAR2校正検証及び撮像実証(その2)
			H24.7.12~H24.7.13	2	九州北部豪雨災害緊急観測
			H24.7.30~H24.8.9	11	インドネシア森林、火山、海外監視等観測
			H24.8.10	1	農水作付け撮像実証実験
			H24.8.31~H24.9.10	2	対空標識撮像及び農水作付け撮像
	計	44 日間			
	200T	茨城大/環境研	H24.9.3~H24.9.14	12 日間	太陽散乱光紫外可視分光観測および大気オン観測(茨城大)
			計	12 日間	二酸化炭素・メタン濃度連続測定装置実地試験(環境研)