

航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進
研究計画書

Promotion of Research on Climate and Earth System
Science by Advanced Aircraft Observations:
Plans for the New Aircraft Program of Japan

日本気象学会 学術委員会（第 38 期）
航空機観測に関する検討部会

The Aircraft Observation Planning Committee
of the Meteorological Society of Japan

2015 年 10 月 1 日
October 1, 2015

はじめに

気象学会は日本学術会議の大型研究計画に関するマスタープラン2014に、地球観測専用の航空機を導入して大気科学・気候システム科学研究を推進するという提案を行ったが、残念ながら重点計画には採用されなかった。本計画書は気象学会が中心となり、広く地球惑星科学連合の研究者と連携することにより、マスタープラン2017の重点課題への採択、予算化、そして観測・研究の実施により世界的な成果を確実に実現するために準備された。

地球温暖化を含む地球環境の変動が急速に進行し、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つつある。しかし環境変動に重要な役割を果たす温室効果気体や雲・エアロゾルの挙動の解明や台風・集中豪雨の予測研究などに必要な、航空機からの直接観測が世界的に不足している。特に日本には地球観測専用の航空機が存在しないため、これまで個々の研究プロジェクトにおいて民間航空機をレンタルした観測しかできなかった。このためそれぞれの研究では成果が得られつつも、アジアは気候・地球システム科学研究に不可欠な体系的な航空機観測が実施されてこなかった。

本研究の目的は、わが国初となる地球観測専用の航空機を導入し、大気科学・気候システム研究と、それらの研究を内包する地球システム科学研究を飛躍的に推進することである。そのために航空機を幅広い分野の研究者が長期的な視点から利用できる、共同利用・共同研究拠点制度に基づく研究者主体の運用体制を確立する。長期的な運用（10年間）により地球科学の重要な課題に対して計画的に観測・研究を実施することで、革新的な成果をあげることが可能となる。本研究で得られた基礎科学的知見は各種予測モデルの改善などを通じて、我が国や世界の国々の社会貢献となることが期待される。

2015年10月

日本気象学会 学術委員会

航空機観測に関する検討部会 部会長

小池 真

第 38 期 気象学会 学術委員会 航空機に関する検討部会

部会長	小池真	東京大学	大学院理学系研究科
副部会長	北和之	茨城大学	理学部
委員	新野宏	東京大学	大気海洋研究所
委員	佐藤正樹	東京大学	大気海洋研究所
委員	茂木信宏	東京大学	大学院理学系研究科
委員	岩崎晃	東京大学	先端科学技術研究センター
委員	石坂丞二	名古屋大学	地球水循環研究センター
委員	坪木和久	名古屋大学	地球水循環研究センター
委員	高橋暢宏	名古屋大学	地球水循環研究センター
委員	篠田太郎	名古屋大学	地球水循環研究センター
委員	持田陸宏	名古屋大学	大学院環境学研究科
委員	久世宏明	千葉大学	環境リモートセンシング研究センター
委員	青木周司	東北大学	大学院理学研究科
委員	岩崎俊樹	東北大学	大学院理学研究科
委員	山田広幸	琉球大学	理学部
委員	竹川暢之	首都大学東京	大学院理工学研究科
委員	近藤豊	国立極地研究所	研究教育系・気水圏研究グループ
委員	金谷有剛	海洋研究開発機構 (JAMSTEC)	地球表層物質循環研究分野
委員	村上正隆	気象庁気象研究所	予報研究部
委員	山口宗彦	気象庁気象研究所	台風研究部
委員	町田敏暢	国立環境研究所	地球環境研究センター
委員	沖理子	宇宙航空研究開発機構	地球観測研究センター(JAXA/EORC)

この報告書の作成にあたり、下記の方々に御執筆・御協力いただきました。

豊田 威信	北海道大学 低温科学研究所
宮崎 雄三	北海道大学 低温科学研究所
本多 嘉明	千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
伊藤 耕介	琉球大学 理学部
阿保 真	首都大学東京 システムデザイン研究科
鈴木 力英	海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地球表層物質循環研究分野
永井 信	海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地球表層物質循環研究分野
城岡 竜一	海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 大気海洋相互作用研究分野
足立 光司	気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部
大木 真人	宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター(JAXA/EORC)
三枝 信子	国立環境研究所 地球環境研究センター
高橋 保旨	ダイヤモンド・エア・サービス株式会社
佐藤 浩	ダイヤモンド・エア・サービス株式会社

目次

航空機に関する検討部会名簿・執筆協力者	2
研究計画概要	5
1. 航空機観測の位置づけ（内外の状況）	13
2. これまでの研究成果	
2. 1. 研究成果概要	18
2. 2. 温室効果気体	20
2. 3. 反応性気体	26
2. 4. エアロゾル	37
2. 5. エアロゾル・雲・降水相互作用	48
2. 6. 集中豪雨・台風	57
3. 研究計画	
3. 1. 研究計画概要	66
3. 2. 温室効果気体	71
3. 3. 反応性気体	75
3. 4. エアロゾル	80
3. 5. エアロゾル・雲・降水相互作用	88
3. 6. 集中豪雨・台風	100
4. 地球科学諸分野との連携	
4. 1. 概要	112
4. 2. 海洋・海氷	116
4. 3. 海洋・沿岸	124
4. 4. 陸上生態系	128
5. 人工衛星観測との連携	138
6. 数値モデル研究との連携	143
7. 運用計画	
7. 1. 機体（MRJ、G-II）	150
7. 2. 運用組織	162
7. 3. 年度計画と予算	169
8. 資料	
8. 1. 日本の航空機観測の実績	172
8. 2. ダイヤモンド・エア・サービス社所有の航空機による地球観測実績	177
8. 3. JAXA の航空機搭載 合成開口レーダー（Pi-SAR-L2）のデータ利用例	179
8. 4. FAQ（よくある質問とその回答）	181
8. 5. 執筆者一覧	184
Summary of the report	185

「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」 研究計画概要

1. 研究目的と重要性

1. 1. 背景

地球温暖化を含む地球環境の変動が急速に進行し、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つつある。地球環境変動の現状を把握しその変動メカニズムを解明することにより、将来を予測し対策を講じることが重要である。しかし環境変動に重要な役割を果たす温室効果気体や雲・エアロゾルの挙動の解明や台風・集中豪雨の予測研究などに必要な直接観測が不足している。

1. 2. 研究目的と計画の概要

本研究の目的は、わが国初となる地球観測専用の航空機を導入し、大気科学・気候システム研究と、それらの研究を内包する地球システム科学研究を飛躍的に推進することである。地球観測のニーズに適した航空機を導入し、幅広い分野の研究者が長期的な視点から利用できる、共同利用・共同研究拠点制度に基づく研究者主体の運用体制を確立する。従来の個別の研究費に基づく研究とは異なり、長期的な運用（10年間）により地球科学の重要な課題に対して計画的に観測・研究を実施し、世界的な成果を目指す。これまで航空機観測の経験がない幅広い研究者も取り込むとともに、新しい機器の開発や若手人材の育成を行い、我が国の地球科学研究のレベルを飛躍的に向上させる。またアジアや世界の研究者と連携し、アジアの航空機観測の拠点を形成する。本研究で得られた基礎科学的知見は各種予測モデルの改善などを通じて、我が国や世界の国々の社会貢献となることが期待される。

観測プロジェクトは長期計画に基づいて公募により実施する。日本の航空機観測等の中核を担うために共同利用・共同研究拠点として設置された、名古屋大学の宇宙地球環境研究所の飛翔体観測推進センターが中心となり観測研究を推進する。観測課題ごとに観測部会を設け、東京大学、気象研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の研究者がそれぞれ責任をもって観測研究を推進する。機体は民間に運用を委託し、研究者は専有する形で利用する。幅広い地球科学の観測ニーズに対応するために、専用機以外の機体をレンタルして観測・研究することに対してもルールに基づいて支援する。

1. 3. 航空機観測の必要性

地球環境・気候変動の解明・予測に必要とされるエアロゾル・雲・降水粒子や温室効果気体の変動・影響プロセスは、これらの物質の濃度や粒径分布・化学組成などに依存している。これらのマイクロ量とその高度分布は、航空機からの直接測定が唯一の観測手段である。人工衛星は全球を効率的に観測するが、基本的に大気の高高度方向の積分量（マクロな物理量）しか測定できない。本研究では、環境変動が顕在化しつつあるアジアにおいて、航空機観測によりマイクロ量の正確かつ体系的な観測を実施し、重要なプロセスを解明して科学的なブレークスルーを実現する。また人工衛星観測の高精度化や検証に資する正確な観測データをもたらし、基礎的プロセスの理解と検証データの提供を通じて地球環境変動予測モデルの高精度化に寄与する。

日本はGCOMシリーズ、GOSAT、GPM、EarthCAREなど人工衛星からの世界最先端の地球観測を実施しつつある。また日本は数値モデル計算においても、世界初の全球非静力モデルNICAMの開発に成功するなど世界をリードしている。しかし大気環境変動の実態把握や支配プロセスの理解に必要な航空機観測は、体系的に実施されていないために世界に遅れをとっている。日本は世界最先端の航空機観測技術を持っているため、この技術を最

大限発揮するためにも航空機を導入し、日本の人工衛星観測・数値モデル研究の強みを生かした統合的な気候・地球システム研究を目指す。

1. 4. アジアでの観測研究の重要性と我が国の責務

アジアはPM2.5に代表されるように、人為的な各種物質の排出量が世界的に見ても最も高いレベルにあるホットスポットであるため、環境・気候影響が強く出ている可能性がある。またアジアは多様な気象場が現れるため、地球温暖化時の大気の応答を調べる上でも適した研究領域である。このためアジアでの大気科学・気候システム研究は、きわめて価値が高い。これまで日本は個別の研究グループが競争的資金により航空機観測を実施し、IPCC レポートをはじめとする大きな貢献をおこなってきた。しかし体系的な観測が実施されてこなかったために依然としてアジアは航空機観測の空白域となっている。本研究ではアジアを中心とした航空機観測を展開することにより、大気科学・気候システムの普遍的知見を得ることにより、その研究の飛躍的發展を目指す。アジアの大気環境把握は日本の果たすべき国際的な責務である。北半球を、アメリカ、ヨーロッパ、アジアの3領域に分割して監視する上において、日本がアジアのリーダーシップを取ることが必要である。東アジアの諸外国が地球観測専用航空機を準備しつつある現状から、一刻も早く整備することが望まれる。航空機観測に基づく越境汚染を含む実態解明と気候変動プロセス研究は、国際的・社会的貢献が大きい。

1. 5. 気候システム科学研究に関わる3つの重要課題

本研究では、地球科学研究のうち、これまで我が国の研究者が航空機を用いて大きな成果をあげてきた気候システム科学研究に関わる以下の3課題を、重要課題として位置づける。

- 地球温暖化の原動力となる「温室効果気体」
- 放射強制力や気候応答の最大不確定要因である「エアロゾル・雲・降水」
- 気候変動に伴う影響の増大が危惧され、社会的インパクトの大きい「台風・集中豪雨」

これらの実績のある課題を強力に推進し、人工衛星観測・数値モデル研究との連携も強めることにより、世界的な研究成果をあげることが期待できる。「温室効果気体」では、アジア域の二酸化炭素の収支の不確実性が特に大きいため、過去の他の地域での研究で実証されているように航空機観測を導入することにより、その不確実性を大きく改善させる。「エアロゾル・雲・降水」では、気候影響で重要な役割を果たしていると考えられているにも関わらずほとんど観測されてこなかった北西太平洋の下層雲などの変動要因などを、航空機からの直接観測とリモートセンシングの同時観測という世界でもほとんど例のない観測により明らかとする。また「台風・集中豪雨」では観測データがきわめて限られているため、従来のドロップゾンデ観測に加えて新しいレーダー観測や雲微物理量の観測を組み合わせることにより、甚大な被害を与える台風の急発達や集中豪雨のメカニズムに迫る革新的な研究を実施する。

1. 6. 幅広い地球システム科学研究と災害対応

航空機からの地球観測は、陸上生態系や海洋・海氷、火山・地殻変動などの幅広い気候システム科学・地球システム科学分野においても、独創的な研究の進展への寄与が見込まれる。これらの分野でも、航空機からの高精度観測の欠如が研究のボトルネックとなっており、地球観測専用の航空機の導入が研究のブレークスルーをもたらす可能性がある。植生の種類や海氷のサイズ分布などの相対的にマイクロな地球科学量を航空機観測により明らかにすることにより、人工衛星からのマクロ量観測との対応づけや、数値モデル開発で必要な素過程の解明が期待される。

日本気象学会の研究者と地球惑星科学連合の広い分野の研究者とはこれまで継続的な議論をしてきた。その成果は2014年の地球惑星科学連合大会や、2015年の日本気象学会主催・地球惑星科学連合共催の研究集会などで報告してきた。これらの研究集会では、日本気象学会の他、日本海洋学会、日本雪氷学会、日本大気化学会、日本地球化学会、日本地理学会、日本リモートセンシング学会、東京地学協会など地球惑星科学連合の8学会の関係者が集うとともに、日本生態学学会、日本航空宇宙学会、日本写真測量学会など地球惑星科学連合以外の計11学会の関係者も参加した。また本計画書でもこれらの分野の研究者にも協力いただき、観測計画や連携についても示した。航空機観測を軸として、これらの分野と連携した気候システムの統合的研究も目指す。

さらに地震・津波・洪水などの自然災害時に、機動的に観測できる体制の構築も急務である。これまで宇宙航空研究開発機構/地球観測研究センター（JAXA/EORC）や情報通信研究機構（NICT）が、災害時に航空機搭載の合成開口レーダー観測などを実施してきた。地球観測専用の機体を確保することにより、これらの災害時にも迅速な対応・把握が可能となることが期待される。

1. 7. 日本学術会議 第三部（理学・工学） 夢ロードマップにおける位置づけ

航空機による地球観測は「地球惑星科学分野の夢ロードマップ」における「地球システム全容の理解と社会への貢献」で重要な役割を担うものである。特に「表層環境の変動機構の解明と高精度予測」、「災害・地球環境問題の克服」などの重要課題に大きく貢献することが期待されている。

上記の全体概要の下に位置づけられている「大気水圏科学」に関するロードマップでは、航空機は「機動的観測システム」を実現する「新たな観測プラットフォーム」と位置づけられている。気候システム科学研究に関わる3つの重要課題で述べたとおり、「温室効果気体」、「エアロゾル・雲・降水」、「台風・集中豪雨」の実態把握とプロセス解明のためには、航空機が不可欠であり、地球表層観測における主要な観測手段である。また「結合モデルの充実」や「観測・モデルの統合化」においても、モデルの開発・改良・検証において航空機からのマイクロ量の直接観測にもとづく基礎過程の解明と実態把握は不可欠なものである。

航空機観測はまた「地球人間圏科学」のロードマップにおいても重要な役割を担うことを目指している。地球温暖化や越境大気汚染などの「地球人間圏が直面する諸問題の実態と改善の筋道を明らかにする」ことは、「持続可能な日本・アジア・世界」の構築に不可欠なものである。また甚大な被害をもたらす自然災害のメカニズム解明・予測は防災の最も重要な課題であり、地球科学者が分野を越えて解決に取り組むべき課題である。さらに航空機は植生や森林、沿岸・縁辺海・海洋の生態系などの人間活動により改変されつつある多様な「地球人間圏科学」の領域において、重要な観測手段を提供する。

航空機は地形変動の高精度観測にも使用可能であり、「固体地球科学」の分野における、地殻変動や火山噴火予知、さらに噴煙観測などにも利用されることが期待される。

航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進

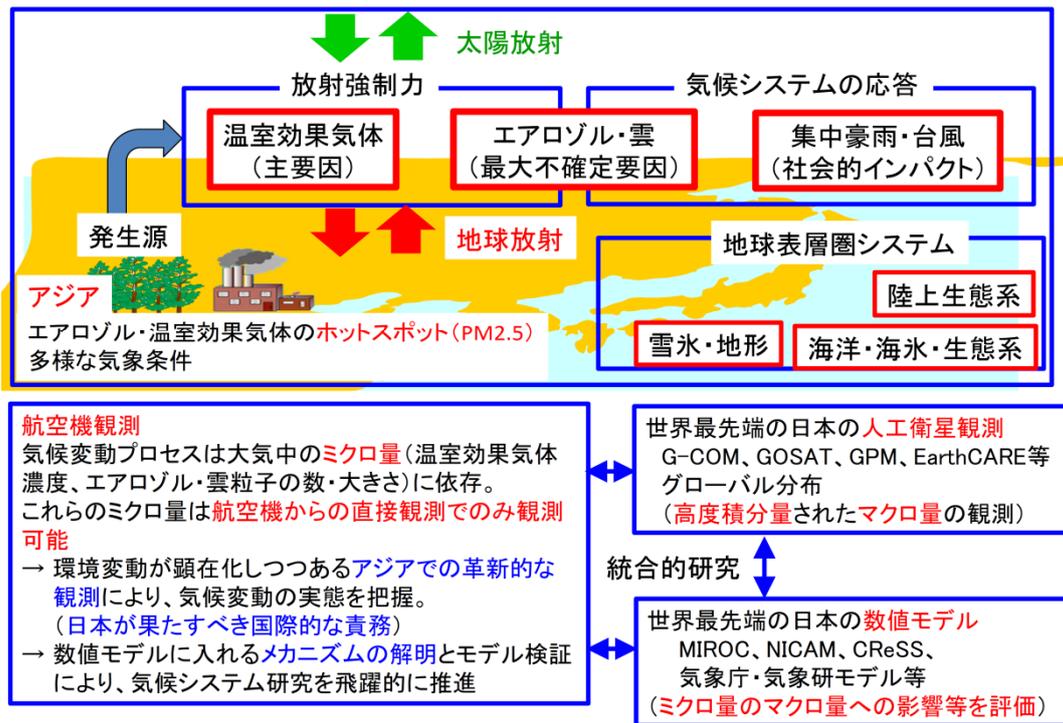


図1. 航空機による地球観測研究の目的と重要性

温室効果気体の放出量・吸収量の評価

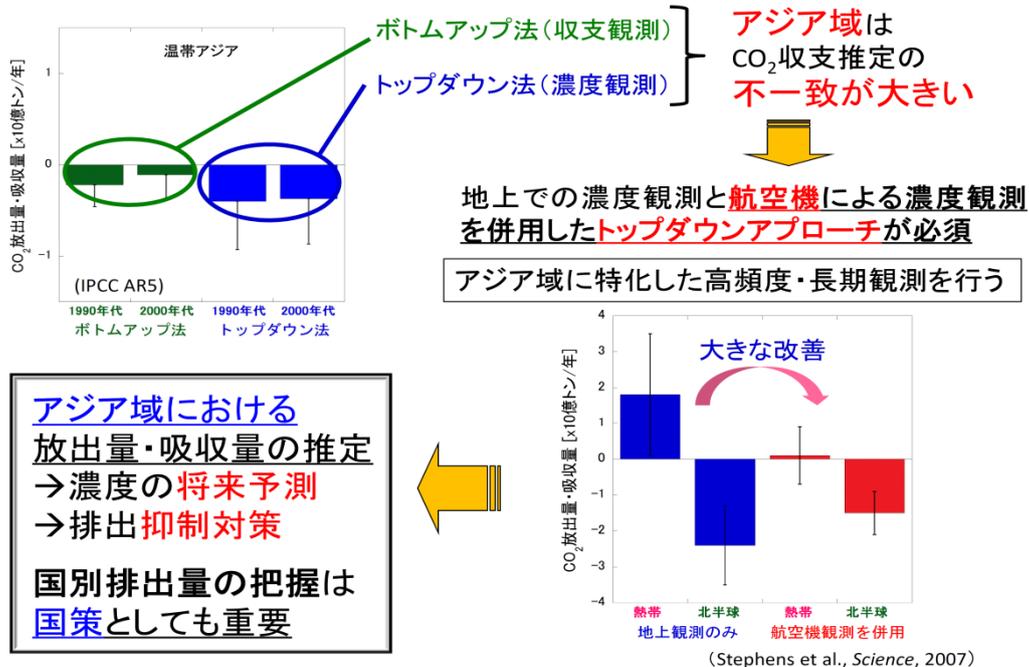


図2. 温室効果気体研究の目的と重要性

エアロゾル・雲・降水 相互作用の解明

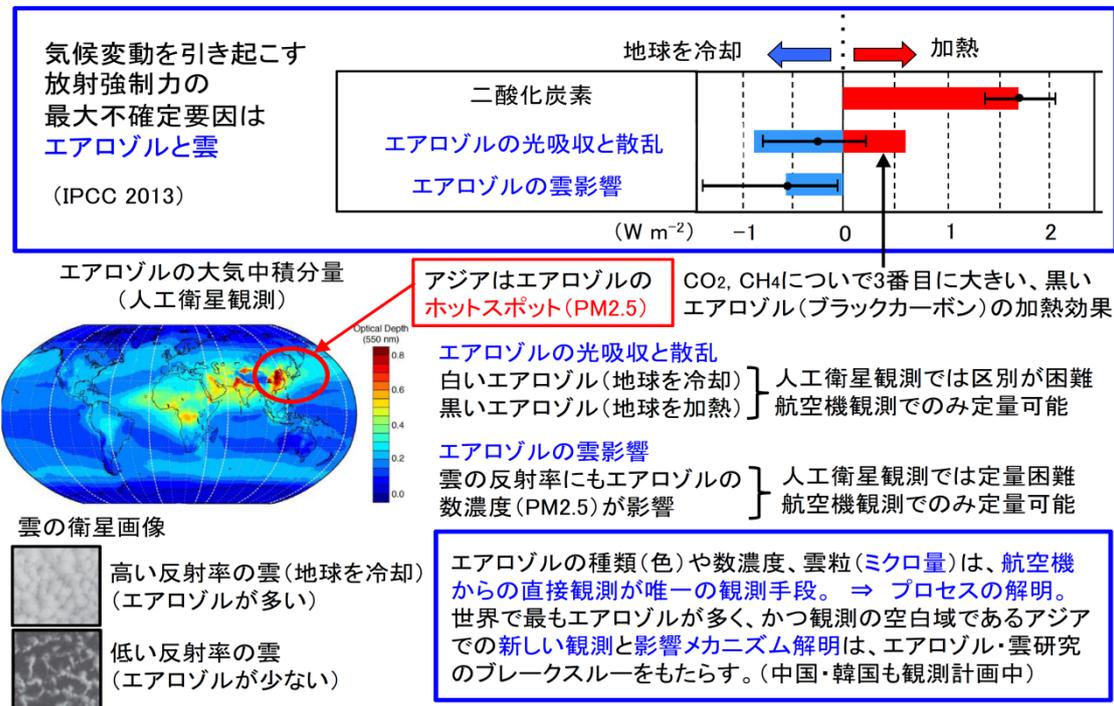


図 3. エアロゾルー雲・降水研究の目的と重要性

台風・集中豪雨の研究

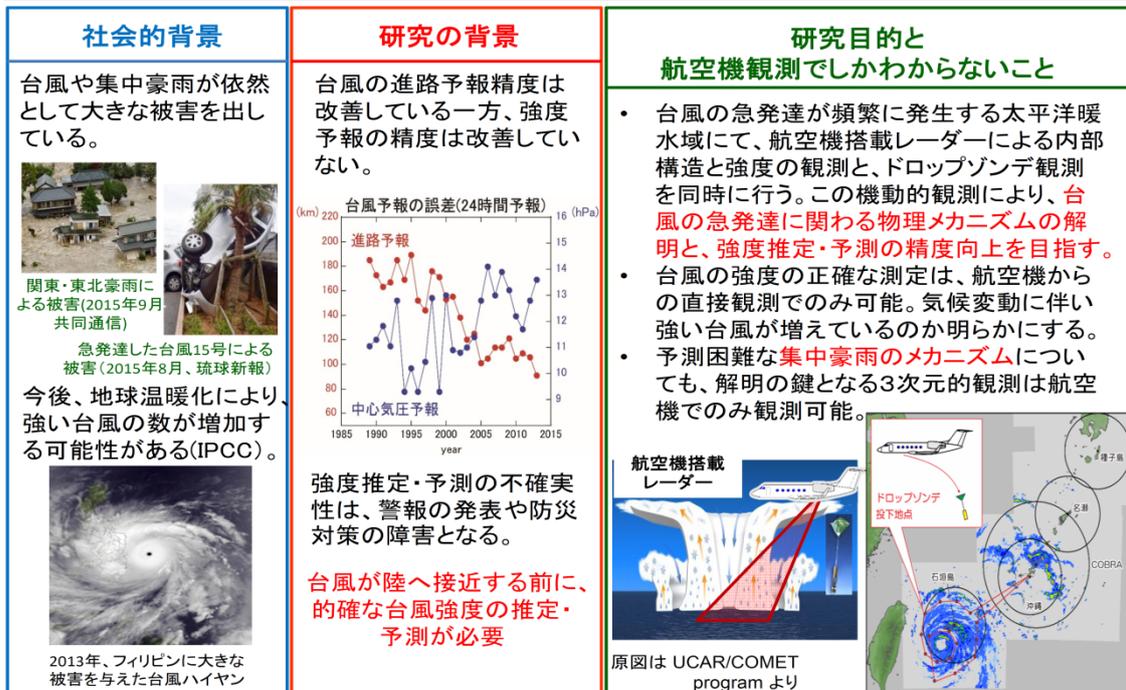


図 4. 台風や集中豪雨の研究の目的と重要性

2. 運用体制

2015年10月に全国共同利用研究所である名古屋大学の宇宙地球環境研究所に、日本の航空機観測等の中核を担うために飛翔体観測推進センター(教授3、准教授1)が設置された。本研究の観測推進および機体の運用は、このセンターと、このセンターを中心として組織される共同利用運営委員会により実施する。また観測課題ごとに観測部会を設け、東京大学、気象研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構(JAMSTEC)などの研究者がそれぞれ責任をもって観測研究を推進する。機体は民間に運用を委託し、研究者は専有する形で利用する。

2.1 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 飛翔体観測推進センター

飛翔体観測推進センター・共同利用運営委員会は、長期的な視点から航空機観測研究全体を統括・推進する。同センター・委員会は各観測部会の計画を審査・採択し、観測・研究終了後には事後評価を実施する。同センター・委員会は各観測部会・支援組織(後述)との連携により、観測研究課題の調整、スケジュール管理、予算管理、ユーザ拡大(広報、説明会)、ユーザ支援、国際協力の推進(国際研究集会他)、成果報告、若手教育、データベース整備などを実施する。

これまで航空機観測の経験が全くない研究者が参加できるように、各観測部会と連携をとりながら、航空機運用組織(ダイヤモンド・エア・サービスなど)の専用の技術支援チームや、航空機観測のサポートの豊富な実績のある組織(日本宇宙フォーラムなど)などを使って支援する。また飛翔体観測推進センターは国際共同研究を積極的に推進する。アジアや欧米の研究者が測定器を搭載し、共同観測研究を実施できるように、広報・支援を行う。また得られたデータを幅広く世界の研究者に利用してもらえよう、データベース整備や広報を実施する。

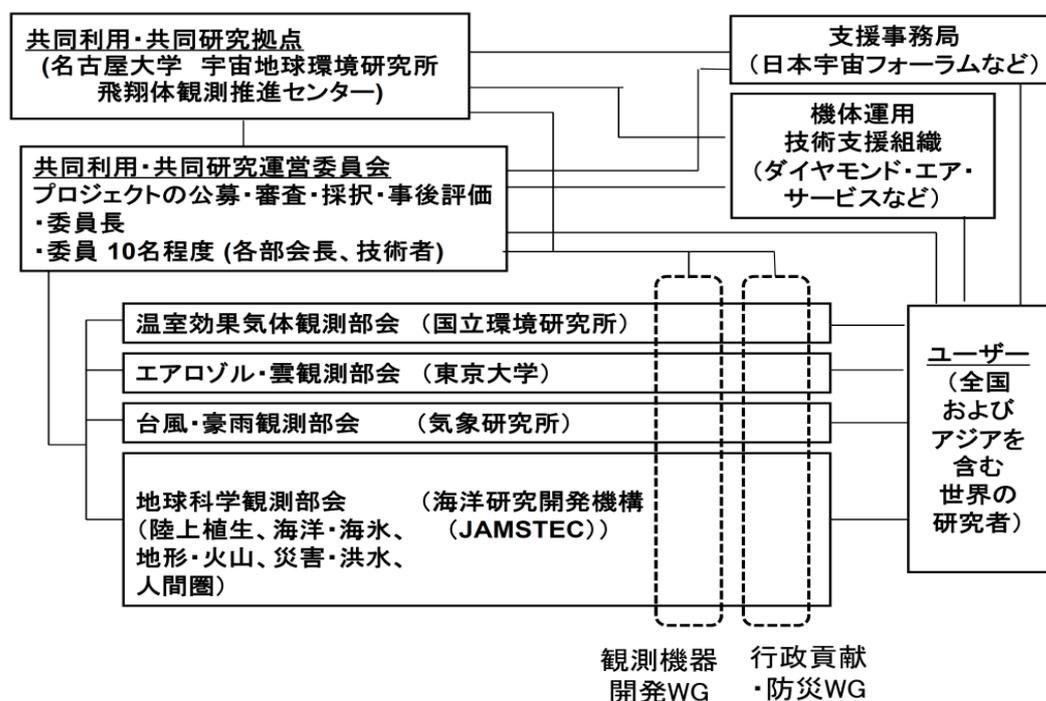


図5. 航空機観測の推進および機体運用の組織図。括弧内は、各観測部会を取りまとめる研究者の機関名。

ヨーロッパでは、EUFAR (European Facility For Airborne Research) が EU の 15 カ国の所有する 43 機あまりの観測航空機を弾力的に運用し、地球観測研究を推進している。飛翔体観測推進センターはアジアでの EUFAR の役割を果たし、アジアでの航空機観測のリーダーシップをとり、世界の研究者との交流を促進させる。

2. 2. 観測部会

本研究で重要課題とする「温室効果気体」、「エアロゾル・雲」、「台風・集中豪雨」の 3 課題 (コア・プロジェクト) と、幅広い地球科学分野をカバーする「地球科学」課題 (応用プロジェクト) に、それぞれに観測部会を設置する。東京大学、国立環境研究所、気象研究所、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) などの研究者がそれぞれ責任をもって観測研究を推進する。各観測部会は長期的な視点から 10 年間に渡る観測計画・機器整備計画を立案し、年度毎により具体的なプランを策定する。共同利用運営委員会で承認を得た年度計画に基づき研究の公募・採択を行う。そして、採択された国内外の研究者と支援組織とともに観測研究を実施し、確実に成果を積み重ねる。

また観測部会を横断する「観測機器開発 WG」を設置し、長期的な視点から地球観測に必要な機器を開発・整備する。また「行政貢献・防災 WG」を設置し、航空機観測で得られた科学的知見を行政や防災に貢献できる形で提供する筋道を検討する。

2. 3. 航空機運用組織と支援組織

航空機運用組織 (ダイヤモンド・エア・サービスなど) は観測専用航空機の維持・管理、観測機器の搭載の技術支援、観測飛行の実施、標準データ (機体の位置情報など) の取得と提供などを実施する。また航空機観測のサポートの豊富な実績のある組織 (日本宇宙フォーラムなど) は、様々な事務支援、すなわち、共同利用運営委員会の支援、研究の公募・採択・調整、航空機の運用スケジュール管理、予算管理、ユーザ拡大 (広報、説明会)、ユーザ支援 (機器の搭載支援、測定器の改良、安全性確保)、国際協力の推進 (国際研究集会他)、データベース整備、成果報告、若手教育などを実施する。これらの支援組織により、これまで航空機観測の経験が全くない研究者が参加できるように、さまざまな技術支援を実施する。

3. 観測機と予算

本研究では国産航空機である MRJ (Mitsubishi Regional Jet) 航空機を専有利用する。国産機は外国の機体と異なり、機体改造が容易であるという非常に大きな利点がある。最初の 2 年間で機体改修や測定器の準備を行い、その後の 8 年間にわたり計画的に地球観測を実施する。コア・プロジェクトなどの大規模観測 (80-100 フライト時間) を毎年 2 回実施する。一般公募観測・研究や災害対応などあわせて、全体で年間 200 時間のフライトを実施する。このフライト費用に加え、機体の専有、修理改造、運用 (各種人件費を含む)、観測機器整備、教員・事務員人件費 (外部委託を含む)、雑費 (会議、広報など) を合わせて、10 年間で 180 億円の費用が必要である。

予算が十分でない時のバックアッププランとしては Gulfstream II (G-II) クラスの機体の専有を想定している。MRJ と同様に、最初の 2 年間で機体改修や測定器の準備を行い、その後の 8 年間にわたり地球観測を実施する。このクラスの機体の専有には、10 年間で 110 億円の費用が必要である。

搭載可能重量は MRJ が 8 トン (航続距離 4170km 確保時) に対し G-II が 2 トン、キャビン長さは MRJ が 21.9m に対し G-II が 6.0m と、MRJ の方がだいぶ大きい。航続距離はともに 4000km 程度である (MRJ の搭載重量を 8 トンとした時)。従って、今後の海外からの研究者の参加を含めた多くの機器の搭載を考えると MRJ が必要である。これらの機体の運用

は、これまでの数多くの地球観測運用実績のある DAS（ダイヤモンドエアサービス）を想定しており、確実に実現可能である。

大気科学分野以外の地球科学分野では、本研究計画で観測機として専有を予定しているジェット機以外の、プロペラ機や飛行艇の利用を希望している研究者がいる。このため、地球観測専用の航空機の利用以外に、本研究の目的にかなう研究については、一定のルールに基づいて、他の機体をレンタルする研究についても、サポートを行っていく。

1. 航空機観測の位置づけ（内外の状況）

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。

航空機観測が大気科学分野で特に必要とされている重要課題は

1. 温室効果気体の変動と循環
2. 対流圏オゾン
3. エアロゾル・雲の相互作用
4. 雲・降水システム
5. 台風・集中豪雨

と考えられている。

人工衛星観測・地上観測との相補性

人工衛星観測は同一測器でグローバルかつ継続的な観測が可能であるが、観測できる物理量が限られ、高度分布が得られないものも多い。また地上観測は多くのパラメータを継続的に観測可能であるが、ほとんどの情報は地表面に限られる。このため国際的には航空機観測は、人工衛星、地上観測と並ぶ地球観測の主要なプラットフォームとして位置づけられている。

航空機を用いた国外・国内の研究の状況

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 1)。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) の影響の解明など、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 年から数年間実施された 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た。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。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。世界諸国の有力な研究機関の航空機保有状況を表 1 にまとめた。

一方、日本は競争的資金などにより民間の航空機をプロジェクト毎に利用してきた。しかし、航空機観測の先端的な測定器は、継続的な観測計画に基づいて初めて系統的な開発を進めることが可能となる。このため地球観測を担う若手研究者の育成も十分ではない。現時点では、欧米との対比においてアジアは系統的な航空機観測の空白域である。これまでの国内の主な研究実績を表2に挙げる。これらの成果の多くは学術誌、IPCC、UNEP、WMOなどの論文・報告書に結実している。

気象学会における立案・検討の経緯

気象学会では1980年より航空機観測システムの導入を検討してきたが2014年現在実現に至っていない。この立ち遅れた状況を考慮し、2012年に気象学会学術委員会と理事会において「航空機の利用に関する提案書」を承認した。2013年4月-8月には気象学会会員に対する意見照会を行い、幅広く強い支持を得た。2013年5月には地球惑星科学連合大会で本計画に関して気象学会理事長が講演し、多くの分野の研究者に説明し、討議した。2014年5月には地球惑星科学連合大会で日本気象学会主催のセッション「最新の大気科学：航空機による大気科学・地球観測研究の展開」が開催され、地球科学の多くの分野の研究者による講演・議論がなされた。

国際連携

経済成長や人口増加の著しいアジアは、多くの大気成分が放出される環境変動のホットスポットである。この放出の直接的影響（健康・植生被害など）やそれに起因する気候変動（領域規模・地球規模）の影響の解明は急務である。アジアはこのような環境・気候変動の影響を受ける人口が多いという点でも重要な地域である。それにもかかわらず、これまで航空機観測の空白域であり、アジアに位置する日本の果たす役割は大きい。今後、日本がリーダーシップをとりアジア・欧米の研究者が参画する国際共同研究を推進することを目指す必要がある。またIPCC、UNEPなどの活動を通し、アジアの健全な発展にも大きな国際的貢献が可能となる。具体的な問題の解決に向けた環境対策の実施においては国際交渉が生じることになるが、高度な観測・モデル研究に基づく知見はこのような議論の前提であり、国策としても不可欠である。

次世代育成

航空機を利用した高度な研究を維持・発展させるためには、先端的機器開発を継続的に行う必要がある。航空機観測の計画的実施は、より多くの優れた若手研究者が参加を促すことになり、ひいては地球科学の大きな発展の推進力になる。また学術研究を通して、高度な国際的学術交流に大きな寄与をすることになる。

継続的な機器開発に対応して、航空機の機体の継続的な改修も必要となる。想定される航空機は国産のため、観測のための機体の改修が容易である。また航空機内部のスペースや供給電力を持つ機種の利用を考え、多様な要素の同時観測を行っていくことが必要である。

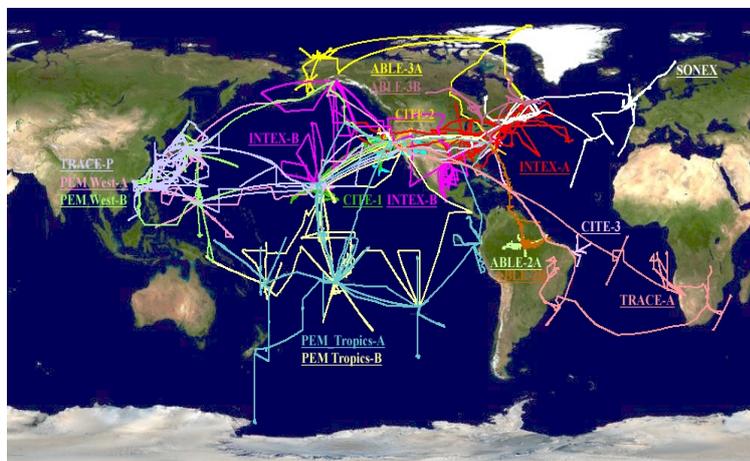


図 1. 米国 NASA の GTE 対流圏航空機観測プロジェクトの実施領域

表 1. 世界の各研究機関の観測・研究用航空機の保有数

アメリカ		
NASA	29 機	DC-8, P-3, ER-2, Twin Otter, WB-57 など
NOAA	5 機	WP-3D Orion, G-IV, Gulfstream Commander 1000, Twin Otter, Beechcraft
NCAR	2 機	GV(HIAPER), C-130
CIRPAS	3 機	Twin Otter, Pelican, UAV
NRL	1 機	P-3 Orion
ワイオミング大学	1 機	King Air
ドイツ		
DLR	5 機	Falcon, Dornier 228 (2 機), Gulfstream G550 (HALO), Cessna C-208
AWI	2 機	Basler BT-67 (POLAR 5), Basler BT-67 (POLAR 6),
イギリス		
FAAM (K Met Office & NERC)	1 機	BAe 146-301
NERC	2 機	Twin Otter, Dornier 228
マンチェスター大学	1 機	Cessna 182J
フランス		
CNRS	1 機	Fokker 27
SAFIRE	3 機	Falcon, ATR42, Piper

表 2. 日本の主な航空機観測プロジェクト

自由対流圏の温室効果気体の観測（民間旅客機も利用）	1979-2013 年
東アジアエアロゾル・雲観測	2009-2013 年 (A-FORCE)
大気放射観測	(1990-2005 年)
雲・降水のレーダー観測	(2001-2013 年)
人工降雨実験	(2009-2013 年)
オゾンの化学・輸送過程の観測	
NASDA	: 1998-2004 年
NASA との共同研究	: 1998-2008 年
日本主導の国際地球観測が可能であることを実証	
タイ洪水の観測と気象予測	(2012 年)
人工衛星観測の検証	(GPM、GOSAT など多数)
東北地方太平洋沖地震による地殻変動の実態把握	(2011 年)

2. これまでの研究成果

2. 1. 研究成果概要

これまで日本は個別の研究グループが競争的資金などにより航空機観測を実施し、質の高い研究成果をあげるとともに、世界の研究者が使用を希望する貴重なデータを得てきた。

1) 温室効果気体

これまで観測機をチャーターあるいは民間航空機に測定装置を搭載するなどして、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) などの温室効果気体の収支の理解に必要な、各成分の時空間分布測定が実施されてきた。温室効果気体のほとんどの観測は地表面で実施されているため、上空のデータの有用性は高い。1970年代末からの日本上空の CO₂ 濃度観測は、自由対流圏中の観測としては世界最長のデータであり、きわめて貴重である。また民間航空機観測からは世界で初めて上部対流圏の緯度別の CO₂ の季節変化を示すことに成功し、世界的に高い評価を受けている。さらに民間航空機観測による世界の自由対流圏中の CO₂ データは公開されており、国内外の研究者により広く利用されるなど、多くの優れた成果があがっている。

2) 対流圏オゾン

対流圏オゾンは強い放射強制力をもつとともに、人間の健康や生態系に悪影響を及ぼす。日本はこれまでアメリカ NASA の航空機観測に参加し、また日本主導の国際航空機観測をアジアで実施するなどにより、オゾンとその生成に関わる前駆気体（窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素類など）を観測してきた。この結果、東南アジアのバイオマス燃焼のオゾン生成影響、同領域の雷活動による窒素酸化物生成、アジア大陸から西太平洋へ輸送されるオゾン前駆気体の輸送過程とオゾン生成などについて、多くの知見が得られた。これらは数多くの研究論文として報告されるとともに、観測で得られたデータは各種数値モデル計算の検証・改良のために、現在も活用されている。

3) エアロゾル

エアロゾルの地球放射収支に対する直接効果（エアロゾル自身の太陽放射の散乱・吸収）と間接効果（水雲・氷雲の雲量・放射特性等の変化）は、放射強制力の最大不確定要因である。日本はこれまで二酸化炭素、メタンについて3番目に大きな正の放射強制力をもつブラックカーボン (BC) エアロゾルの質量や微物理特性（他のエアロゾル成分により被覆されているかどうか等）など、放射強制力の鍵となるパラメータの観測をアジアや北極圏で成功させ、IPCC レポートなどにも貢献してきた。また間接効果の鍵となるエアロゾルの吸湿特性と化学組成の関係を地上観測などから解明し、航空機観測につながる重要な研究

成果をあげてきた。さらに航空機からのエアロゾルサンプリングと電子顕微鏡観察から、直接・間接効果両方に関わる個別粒子の物理化学形態を明らかとしてきた。

4) エアロゾル・雲・降水相互作用

エアロゾルが雲凝結核・氷晶核として作用することによる水雲・氷雲の雲量・放射特性等の変化（エアロゾルの間接効果）の解明のためには、雲システムが形成される気象場（レジーム）ごとの観測的研究が必要である。日本は1980年代から航空機からの雲・降水システムの観測を実施し、雲の微物理特性や放射特性を明らかとするなどの研究成果をあげてきた。また航空機から雲凝結核・氷晶核をシーディングする人工降雨・降雪実験も実施し、エアロゾル間接効果の重要な知見を得ることに成功した。雲底下のエアロゾルと雲微物理量との対応関係を多くの雲システムで観測することにより、西太平洋で人為的エアロゾルの雲微物理影響を直接観測から初めて示すとともに、西太平洋特有の温暖な海面の存在がエアロゾル-雲相互作用に影響を与えていることを見出した。

5) 集中豪雨・台風

集中豪雨・台風は社会的にインパクトが大きい現象であるが、航空機観測はそのメソ気象現象の理解と予測能力の向上をもたらす。夏季の大雨や台風予測誤差の大きな要因のひとつは日本の南方海上の観測の不足である。日本は台風進路の予測精度向上に効果の高い観測領域を割り出し、その場所で集中観測を実施する最適観測法の有効性を調べる日本主導の国際観測 T-PARC を実施し、予測誤差が改善される可能性を示すことに成功した。これはユーザの要請から最適観測を実施する双方向型気象予測システムという新しい次元の気象予報・観測の実現へ向かう重要な一歩である。また中緯度の気象現象の重要な要素である前線について、東シナ海の航空機観測から複数の収束線（水蒸気前線）が存在することを明らかにした。

2. 2. 温室効果気体

気候変動に関する政府間パネルの第5次報告書（IPCC AR5 2013）では、「1750年以降の二酸化炭素（CO₂）の大気中濃度の増加は、地球のエネルギー収支の不均衡に最も大きく寄与している」とされ、その地球温暖化に対する寄与は疑いようのないものになっている。将来のCO₂排出量削減目標を制定するためには地球上の炭素循環メカニズムを理解することが不可欠であるが、IPCC AR5に「気候変動は陸地と海洋の炭素吸収を一部相殺してしまうことの確信度は高い」などの記述があるように、人間活動の結果として大気中に放出されたCO₂の吸収については不明な点が多く残されている。2014年に発表になった世界気象機関（WMO）の温室効果気体年報では、CO₂以外の温室効果気体であるメタン（CH₄）や亜酸化窒素（N₂O）といった成分も依然として増加を続けており、2013年の大気中濃度がそれぞれ産業革命前の253%と121%に達したとされている。これらの気体の人為放出源は多岐にわたっており、将来の濃度予測はCO₂以上に困難なものとなっている。

これらの気体の循環を定量的に把握するには大気中の濃度変動や分布を知ることが最も有力な方法の1つである。全球にはすでに多くの温室効果気体の観測点が置かれているが、そのほとんどは地上に位置しており、上空の観測データは地上に比べて極めて限られている。近年の炭素循環研究は物質循環モデルを利用した放出源強度の定量的解析が主流となっているが、現状のモデルは鉛直方向の大気輸送に最も多くの不確実性が残っており、モデルの検証のためにも上空の観測データの必要性がますます高まっている。実際、我々も参加した国際共同研究の結果は、CO₂濃度の鉛直分布を概ね再現する大気輸送モデルのみを用いると、熱帯域はこれまで考えられていたほど強いCO₂の放出源ではなく、逆に北半球中高緯度は従来の推定より弱い吸収源であるという可能性を示しており、国際的に大きな関心を集めている（Stephens et al., 2007）。

上空における温室効果気体を観測するには航空機が最も有効なプラットフォームである。温室効果気体の航空機観測の分野では日本からは世界の中でも先端を行く成果が多く公表されている。将来的に日本が観測専用機を保有するにあたっては、これらの知見や技術を最大限に活かした観測を実施すべきである。以下にこれまでの成果の一部を記す。

東北大学では1970年代後半に航空機を利用した日本上空の温室効果気体の定常観測を開始し、現在でも継続して実施している。この観測は高度約3km以下については単発プロペラ機（セスナ式172型）をチャーターして観測者が航空機に搭乗し、金属製およびガラス製の容器（フラスコ）に大気を加圧充填するサンプリング法によって実施している。サンプルの吸引および圧縮には電動ダイアフラムポンプを使用している。一方、高度3kmから対流圏界面までの観測には民間のジェット旅客機（DC9, MD90, CR-J200など）を利用し、やはり観測者が航空機に搭乗してサンプリングを実施している。民間旅客機を利用することから電源の仕様が制限されるので、手動の加圧ポンプを使用し、機体のエアコンダクトの再循環前の空気を吸引することによって汚染のないサンプルを得ている。この観測は当

時の東亜国内航空、日本エアシステム、日本航空の協力を得て、仙台—福岡、仙台—新千歳などの路線で実施してきた。

本観測で得られた日本上空における高度別の CO₂ 濃度の変動を図 1 に示す(Nakazawa et al., 1993)。化石燃料の放出が有意に存在する日本にありながら、観測値には汚染空気の影響がほとんどなく、いずれの高度においても CO₂ 濃度の経年増加や季節変動が明確に捉えられている。航空機を利用した観測はこのように一定の範囲の地上付近にある放出源・吸収源の影響を平均化した情報が得られるという利点もある。図 1 の観測結果は、上空の CO₂ 濃度の観測データとしては世界で最も長期にわたる貴重な記録となっている。この観測で得られたサンプルからは、CH₄ や N₂O など他の温室効果気体の濃度や CO₂ などの同位体比および CO₂ 収支に関連する O₂ 濃度のデータも得られており、北半球におけるこれらの温室効果気体の放出源・吸収源の定量的な評価に関する成果が得られている (Umezawa et al., 2014, Ishidoya et al., 2012, Ishijima et al., 2010, Nakazawa et al., 1993)。

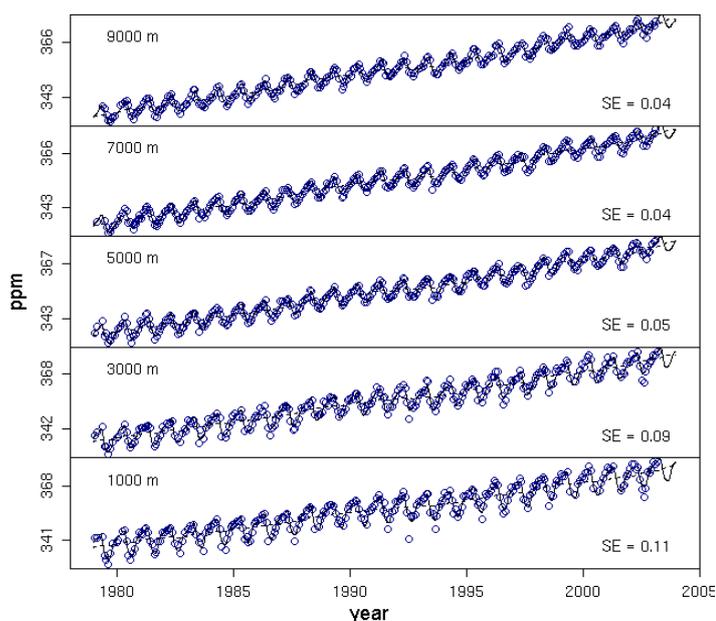


図 1. 日本上空の高度 1000m から 9000m における CO₂ 濃度の変動

東北大学ではより広い範囲の観測を行うために、当時の国内最長路線である仙台—那覇間で全日本空輸の協力を得て上空における緯度別の CO₂ 濃度の観測を実施した (Tanaka et al., 1988)。さらに、1980 年代半ばには南北両半球にわたる上空の CO₂ 濃度を観測するために、日本航空の協力を得て成田—シドニーおよび成田—アンカレジ間での空気サンプリングを実施した。民間の国際便を使ったこの観測は、訓練を受けた日本航空の職員がサンプリングを実施した。このプロジェクトはわずか 2 年の期間であったが、上部対流圏におけ

る緯度別の CO₂ 濃度の季節変動を示した初めての研究であり (図 2)、発表論文は現在においてもなお引用が絶えない(Nakazawa et al., 1991)。なおこの観測からは下部成層圏における CO₂ 濃度の季節変動が対流圏と位相が大きく異なっていることも示され、上部対流圏と下部成層圏の大気輸送に関する重要な知見も得られている (図 2)。

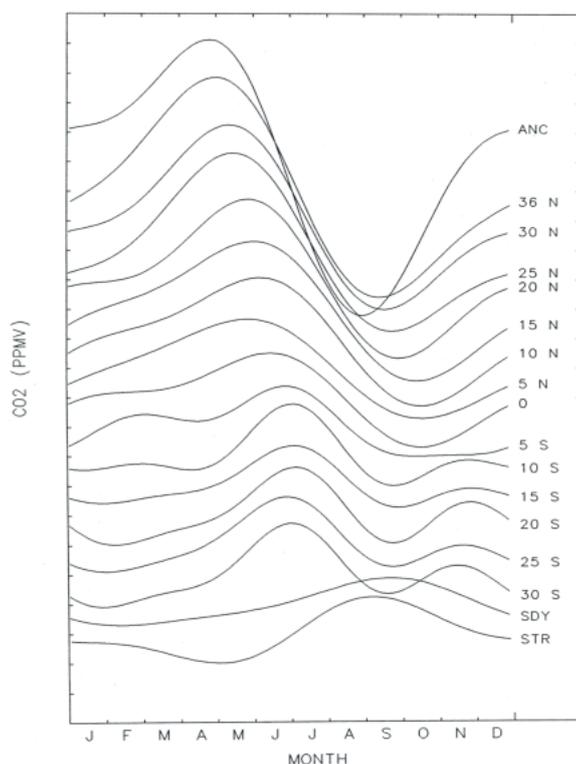


図 2. 上部対流圏と下部成層圏における緯度別の CO₂ 濃度の平均的な季節変動

上記の国際定期便を利用した観測が 1985 年で終了したことを受けて、気象研究所は日本航空、日航財団と協力して自動大気サンプリング装置 (ASE) を開発し、1993 年に成田とオーストラリアのケアンズ間で定期的な温室効果ガスの観測を再開した (Matsueda et al., 2002)。当時「JAL 観測」の名で知られたこの観測は翌年より成田ーシドニー間でのフライトとして継続された。この観測は後継となる CONTRAIL プロジェクトの観測結果と合わせて、上空の北半球から南半球までの緯度帯をカバーする CO₂ 濃度データとしては世界最長の記録であり、炭素循環の解明に貢献しているほか、近年では熱赤外を利用した CO₂ 濃度の衛星観測のための貴重な検証データとしても広く利用されている。JAL 観測では CH₄ や一酸化炭素 (CO) の分析も実施されており、1997 年に起きた大規模なエルニーニョに伴うインドネシアでの森林火災のシグナルを捉えることにも成功し、熱帯の活発な対流活動による大気輸送を裏付ける重要な成果となっている (Matsueda et al., 1999)。

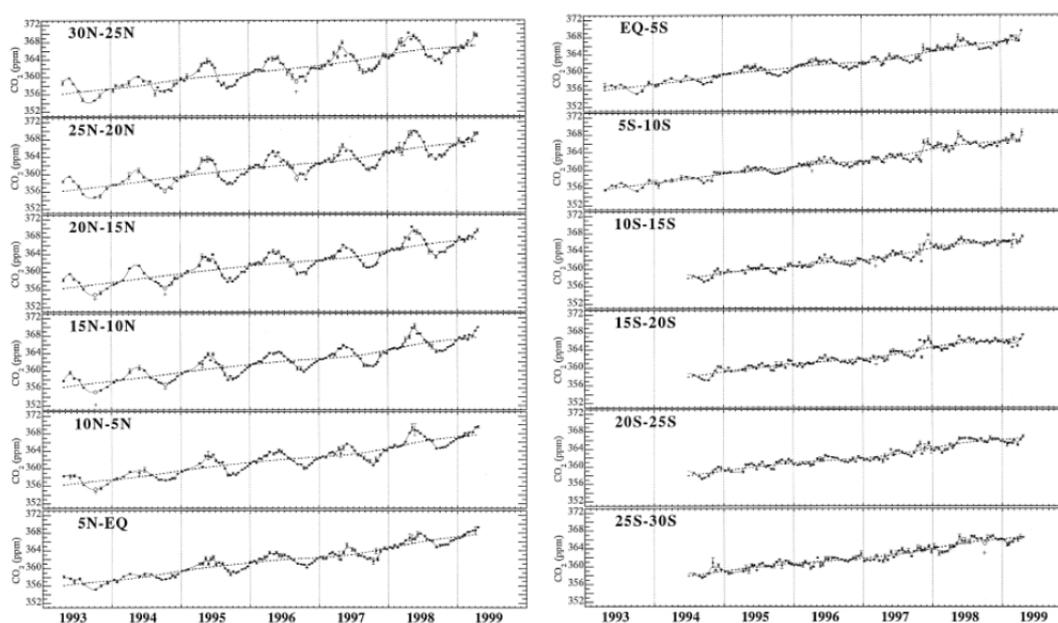


図 3. 日本ーオーストラリア間の太平洋上空で観測された緯度別の CO₂ 濃度の変動

2000年代に入り JAL 観測を実施していた航空機が退役するにあたり、国立環境研究所と航空機部品製造会社であるジャムコ社がプロジェクトに加わり、民間航空機に搭載するための CO₂ 連続測定装置 (CME) を開発した。2005 年より旧 JAL 観測を発展的に継承して、日本航空が運航する航空機に改良型 ASE と CME を搭載した CONTRAIL プロジェクトによる観測が開始された (Machida et al., 2008)。CME は離陸から着陸まで連続して CO₂ 濃度を観測できるため、航空機の離着陸時に CO₂ 濃度の鉛直分布を、水平飛行時に上部対流圏または下部成層圏における CO₂ 濃度の水平分布を得ることができる。CME 観測によって世界の上空における CO₂ 濃度のデータはこれまでに比べて著しく増えることになった。図 4 に CME で観測された上部対流圏における 4 月と 7 月の CO₂ 濃度の分布を示す (Sawa et al., 2012)。このプロジェクトでは CONTRAIL 観測データを用いて CO₂ フラックスの推定を行った (Niwa et al., 2012) ほか、大気輸送モデルの検証 (Niwa et al., 2011)、成層圏ー対流圏間の大気輸送 (Sawa et al., 2008)、衛星観測の検証 (Inoue et al., 2013) など、多岐にわたる成果が得られている。さらに CONTRAIL 観測データは公開されており、国内外の研究者にも広く利用されている。

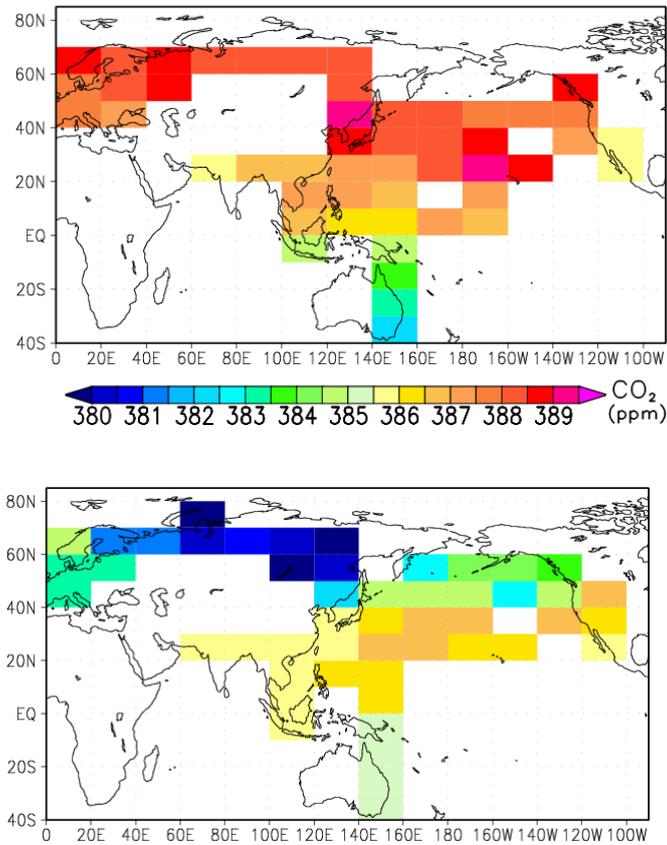


図 4. 高度 8km 以上の上部対流圏における 4 月と 7 月の CO₂ 濃度の分布

参考文献

- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Miyamoto, Y., Yoshida, Y., Yokota, T., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P. P., Andrews, A. E., and Patra, P. K. (2013), Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9771-9788, doi:10.5194/acp-13-9771-2013.
- Ishidoya, S., S. Aoki, D. Goto, T. Nakazawa, S. Taguchi and P. K. Patra, Time and space variations of the O₂/N₂ ratio in the troposphere over Japan and estimation of global CO₂ budget, *Tellus*, **B64**, 18964, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.18964>, 2012.
- Ishijima, K., P. K. Patra, M. Takigawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, P. Steele, P. Krummel, R. Langenfelds, S. Aoki and T. Nakazawa (2010), Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, D20308, doi:10.1029/2009JD013322.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa and T. Ogawa, (2008), Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace

- gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 25 (10), 1744-1754, DOI: 10.1175/2008JTECHA1082.1.
- Matsueda, H., H. Y. Inoue and M. Ishii, (2002) Aircraft observation of carbon dioxide at 8-13 km altitude over the western Pacific from 1993 to 1999. *Tellus*, 54B, 1-21.
- Matsueda, H., H. Y. Inoue, M. Ishii and Y. Tsutsumi, (1996) Large injection of carbon monoxide into the upper troposphere due to intense biomass burning in 1997. *J. Geophys. Res.*, 104, 26867-26879.
- Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki, and M. Tanaka, (1991) Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, 43B, 106-117.
- Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki, and M. Tanaka, (1993) Time and space variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, 45B, 258-274.
- Niwa, Y., P. K. Patra, Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, D. Belikov, T. Maki, M. Ikegami, R. Imasu, S. Maksyutov, T. Oda, M. Satoh, and M. Takigawa, (2011), Three-dimensional variations of atmospheric CO₂: aircraft measurements and multi-transport model simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13359-13375, doi:10.5194/acp-11-13359-2011.
- Niwa, Y., T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, T.J. Schuck, C.A.M. Brenninkmeijer, R. Imasu, and M. Satoh, (2012) Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements, *J. Geophys. Res.* 117, D11303, doi:10.1029/2012JD017474.
- Sawa, Y., T. Machida, and H. Matsueda (2008), Seasonal variations of CO₂ near the tropopause observed by commercial aircraft, *J. Geophys. Res.*, 113, D23301, doi:10.1029/2008JD010568.
- Sawa, Y., T. Machida, and H. Matsueda, (2012), Aircraft observation of the seasonal variation in the transport of CO₂ in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, D05305, doi:10.1029/2011JD016933.
- Stephens, B.B., K.R. Gurney, P.P. Tans, C. Sweeney, W.Peters, L. Bruhwiler, P. Ciais, M. Ramonet, P. Bousquet, T. Nakazawa, S. Aoki, T. Machida, G. Inoue, N. Vinnichenko, J. Lloyd, A. Jordan, M. Heimann, O. Shibistova, R. L. Langenfelds, L. P. Steele, R. J. Francey, A. S. Denning, Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO₂, *Science* 316, 1732-1735, doi:10.1126/science.1137004, 2007.
- Tanaka, M., T. Nakazawa, S. Aoki and H. Ohshima (1988), Aircraft measurements of tropospheric carbon dioxide over the Japanese islands, *Tellus* 40B, 16-22.
- Umezawa, T., D. Goto, S. Aoki, K. Ishijima, P. K. Patra, S. Sugawara, S. Morimoto, T. Nakazawa, (2014) Variations of tropospheric methane over Japan during 1988-2010, *Tellus B* 2014, 66, 23837.

2. 3. 反応性気体

対流圏においてオゾン、窒素酸化物や一酸化炭素、炭化水素類といったオゾン前駆気体から光化学反応で生成し、人の健康や生態系に悪影響を及ぼす。オゾン、窒素酸化物、炭化水素類を主成分とするオキシダントの増加による光化学スモッグにより健康被害が起こることは広く知られているほか、植物の成長にも無視できない影響を与える。またオゾンは、大気の窓である波長 9.6 μm 付近に強い吸収帯をもつため温室効果により気候にも大きな影響を与える。IPCC 第 5 次報告書では、対流圏オゾンの増加による放射強制力は 0.4 W/m^2 と推定されており、二酸化炭素、黒色炭素エアロゾル、メタンに次いで大きい。オゾン濃度が比較的大きい北半球中～低緯度域では、放射強制力がメタンを上回ると推定されている。

対流圏のエアロゾルは、生成プロセスの異なる様々な化学組成の粒子から構成される。特に微少エアロゾルの多くは、二酸化硫黄や一酸化窒素、アンモニアや様々な揮発性有機物などの反応性気体が大気中で化学反応を起こす中で生成された硫酸塩や硝酸塩、有機物などの粒子である。これら大気中の反応で生成した 2 次エアロゾルは、PM_{2.5} の大部分を占め、人体にとり有害であると共に、太陽光を散乱することによる直接効果や雲凝結核となることによる間接効果によって気候にも大きく影響していると考えられる。

様々な大気条件下においてオゾンやエアロゾルが、自然および人間活動により大気に放出された様々な前駆気体から生成される速度や、また風や降水などの気象プロセスが異流・拡散および(湿性)沈着を通じ濃度分布に与える影響など、その動態についての理解は未だ不十分である。地上観測により、オゾンやエアロゾルとその生成・消失に関わる様々な物質の濃度の精密な測定が可能になってきているが、一ないし少数地点での地上観測からは特に広域的な視点で見て十分な情報を得ることは困難である。また人工衛星からのリモートセンシングは広域的な情報をもたらすが、詳細なプロセスの理解に十分な精度での観測は現状では困難である。それに対し航空機観測では、広域的に様々な履歴を持つ空気塊について地上観測並みに高精度での濃度分布測定が可能であること、および特に高度方向の濃度分布についての情報を得ることができる。一連の航空機観測とそのデータ解析を通じて、オゾン・エアロゾルおよびそれらの前駆気体の広域的なデータから、以下で述べるようにオゾンの生成・消失速度とそれを左右する化学過程、およびオゾン・エアロゾル分布の決定に重要な広域輸送プロセスが明らかになってきた。また、航空機観測を人工衛星観測と同期して行うことにより衛星データの検証を行い、衛星データを組み合わせた解析も重要な要素となってきている。以下では、これまでに日本の研究者が中心となって行った航空機観測プロジェクトとそれにより得られた成果について、具体的な例を挙げて説明する。

1) アジア～グローバルスケールでの航空機観測プロジェクト

1990年代に、グローバルなスケールでの対流圏オゾンを中心とする大気化学を理解するため、アメリカ (NASA, NCAR, NOAA など) やヨーロッパの研究機関 (DLR, Max-Planck Institute など) を中心に大型の航空機を用いた観測計画プロジェクトが実施された。当時は、オゾン・エアロゾルおよびそれらの前駆気体の放出・反応・輸送過程をグローバルな視点から調べるためのデータが著しく欠落しており、これらの計画は、特に初期では、どのような現象が起こっているのかよくわかっていない状態での探索的な調査研究という性格を持っている。特に NASA の Global Tropospheric Experiment (GTE) において、カナダ・南米・アフリカと並んで、西太平洋域での観測を早い段階で実施した先見性は注目に値する。この20年あまりの間に、東～東南アジア域は、新興国での急速な経済発展に伴い、様々な前駆気体やエアロゾルの最大の放出源地域となっている。早い段階で、この地域の放出の影響を受けた気塊中でのオゾンやエアロゾルおよび前駆気体の分布や化学変化についての大まかな描像が得られ、その後のこの地域およびグローバルな大気化学についての研究を行う上で重要な基礎的知見となった。日本の研究グループもこれら GTE 等のプロジェクトに参加し、重要な貢献をすると共に、その経験は、日本の航空機観測を最先端のレベルのものとする上で非常に役立つものであった。

日本独自の大気反応性気体の航空機観測として、比較的小規模のプロジェクトは、より早い段階から行われてきたが、1990年代後半にそれまで世界的にもほとんど知見がなかった東南アジア～熱帯オセアニアを主な対象地域として、それまでにない規模での観測プロジェクトが立案、実行された。日本では、研究機関が保有する大気観測用航空機がないため、大規模なプロジェクトの実行にはより多額の費用を要する。また、航空機観測を成功させるためには、1) 反応過程などを調べるため関連する多種類の成分の同時測定を可能とする、複数の2) 定量的な解析に十分な測定精度があり、3) 高速移動 (100-200 m/s) する航空機上で十分な空間分解能で測定するため高い時間分解能をもち、4) 狭い機内に設置するため小型で、飛行中および離陸着陸時の振動に耐える堅牢性を持ち、また航空法に定められた基準を満たす安全性をもつ測定装置が必要である。さらに、観測対象域に外国を含む場合は、当該国の飛行・着陸許可が必要になりそのための交渉や、現地での拠点設営や物品輸送などの準備も必須である。例えば、後述の BIBLE (Biomass Burning and Lightning Experiment) プロジェクトにおいては、2年あまりの準備期間中に、JAXA/EORC はじめ大学、国内国外の国立研究機関、航空機の運用を行ったダイヤモンドエアーサービス株式会社などの極めて多くの人々によって、上記要件を満たす国際的にも高い水準の測定器を短期間に開発・整備し、航空局の検査・認証を受け、また観測対象域のインドネシアやオーストラリアでの飛行許可や拠点設営の交渉など、実現までに多くの難題を解決する必要があった。

日本独自のアジア～グローバル規模の反応性気体の航空機観測としては、気象研究所による International Strato/Tropospheric Air Chemistry (INSTAC) プロジェクトおよび Pacific Atmospheric Chemistry Experiment (PACE) プロジェクトを嚆矢とする。INSTAC では3回、PACE では7回のキャンペーン観測が行われ、西太平洋の広い範囲でオゾンやエアロゾルの

観測を実施し、この地域の様々な空気塊における大気化学的な特徴を明らかにした[Tsutsumi et al., 2003 など]。そのころ、それまでオゾン前駆気体濃度が極めて低くオゾンの消失域と考えられてきた熱帯太平洋対流圏が、バイオマス燃焼が盛んになり乾季にはオゾン前駆気体やエアロゾルの重要な発生源となることが示された。例えば、1994年、1997年のエルニーニョの期間、乾季の後半(9-10月)に大規模なバイオマス燃焼がインドネシアで起きインド洋の広い範囲でオゾンが大きく増大したことが観測されていた[Fujiwara et al., 1999, 2003; Kita et al., 2000; Kitada et al., 2001]。1997年および1998年に実施された PACE-5 および PACE-6 においては、オーストラリアからカリマンタン島での観測を行い、バイオマス燃焼の影響を強く受けた気塊中でのオゾン濃度分布やエアロゾル組成を明らかにした。カリマンタンでのバイオマス燃焼による非常に濃い haze 層中で、オゾン前駆気体の一酸化炭素や窒素酸化物も濃度が高かった。haze 層中のオゾン濃度は中部対流圏では約 80ppb と高濃度であったが、逆に下部対流圏では約 20ppb と低濃度であり、太陽光が届かずオゾン光化学生成よりエアロゾル表面などでの消失の影響が大きいと考えられた [Tsutsumi et al., 1999]。

ほぼ同時期の 1998-2000 年に、Biomass Burning and Lightning Experiment (BIBLE) 観測が JAXA/EORC により実施された。これは国際的には IGBP/IGAC International Global Atmospheric Chemistry の計画の枠組みの中で位置づけられる。BIBLE 計画は Gulfstream II (G-II) 航空機による直接観測、衛星・地上同時観測、数値モデル研究からなっている。東南アジア～北部オーストラリアにおいて、乾期には前述のようにバイオマス燃焼の影響を受けた空気塊中でオゾンが光化学的に生成し多量のエアロゾルが放出される一方、雨期には活発な熱帯の雷活動により上部対流圏で窒素酸化物が生成し、オゾン増加が起こると推定される。BIBLE-A,B,C の 3 回の航空機観測キャンペーンが、バイオマス燃焼や雷放電により発生するオゾン前駆気体やエアロゾルの量およびその影響を受けた気塊中でのオゾン生成・消失率を推定し、また鉛直・長距離輸送プロセスを明らかにするために実施された。

BIBLE 観測の飛行経路を図 1 に示した。このプロジェクトで得られた成果は、2 回の Journal of Geophysical Research (JGR) の special section に掲載されるなど、多くの論文にまとめられており、以下にハイライトを示す。

・1998 年に実施された BIBLE-A では、サイパン、ピアック、ダーウィンを經由してバンダラまで飛行した。観測期間はラニーニャであったためインドネシア域ではバイオマス燃焼は不活発であったにも拘わらず、インドネシア域を 3 日以内に通過した上部対流圏の空気塊中での窒素酸化物 $\text{NO}_x (= \text{NO} + \text{NO}_2)$ や炭化水素などの混合比は中部太平洋域起源の空気塊に比べ系統的に高かった。陸上の活発な対流活動はバイオマス燃焼など地表の発生源の影響を受けた空気を対流圏上部に輸送し[Kita et al., 2002]、また雷により窒素酸化物濃度を増大させる[Koike et al., 2002]、一方海上での対流活動では雷活動が弱く、オゾンの前駆物質濃度が低い大気を上空へと汲み上げるという対照的な役割を果たしていることが明らかとなった。トラジェクトリー解析から、インドネシアから北部オーストラリアに輸送され

た空気塊中でオゾン混合比は 1.8 ppbv/day の速度で増加すると推定された (図 2)。この結果は光化学ボックスモデルによる推定と一致する[Kita et al., 2002; Ko et al., 2002]。

・1999 年に実施された BIBLE-B キャンペーンでは、名古屋を起点に、サイパン、ポートモレスビーを経由してダーウィンまで飛行した。観測期間は北部オーストラリアの安定した高気圧の存在下で発達した逆転層と強い下降流のために、バイオマス燃焼からの放出成分の自由対流圏への輸送は強く抑制されていた。バイオマス燃焼起源の窒素酸化物の大部分は境界層内に留まり、一酸化炭素との相関から窒素酸化物の 60%は 2-3 日以内に硝酸の乾性沈着により失われていたと推定された[Takegawa et al., 2003a]。しかし、バイオマス燃焼の影響を受けた空気塊中では、オゾンと一酸化炭素濃度の相関関係から北オーストラリアから輸送されるオゾンの正味フラックスは 0.3 Gmol O₃/day と推定された[Takegawa et al., 2003b]。

・2000 年に実施された BIBLE-C キャンペーンでは、雨期のダーウィンにおいて観測飛行を実施し、世界で初めての熱帯での系統的な雷放電による NO_x 生成の観測的研究となった。高度 11.5-14 km で最大 1000 pptv の NO_x を含んだ空気が、水平スケール 620 x 140 km という過去に観測されたことがない広域に広がっており、その影響の多きさが確認された。また地上の雷観測や人工衛星 OTD および TRMM/LIS の雷観測との比較から、雷フラッシュあたり (対地および雲間放電の平均)、3.1-35x10²⁵ 個の NO 分子が生成していると見積もられた[Koike et al., 2007]。

2) 東アジアにおける大気汚染気塊の航空機観測プロジェクト

近年の中国をはじめとする新興国での経済活動の急速な発展に伴い、アジア域は世界最大のオゾンやエアロゾルの前駆気体の放出源となってきている。この地域での放出の影響を受けた汚染気塊の広域輸送により、日本において光化学オキシダントや PM2.5 による越境汚染が問題となる一方、北半球全体スケールでの対流圏オゾンの増加などへの寄与など、地球温暖化や健康影響等、地球規模での環境問題の要因となると考えられている。しかし、輸送中の化学物質の反応過程や除去過程は十分に解明されているとは言えず、定量的理解を阻んできた。そこで、この地域に焦点を絞った航空機観測プロジェクトが行われ、東アジアから輸送された汚染気塊の大気化学的特徴の記述、そこで起こる化学反応とオゾン生成やエアロゾルの変化、オゾンや前駆気体の広域分布とモデルの比較による化学・輸送過程の検証等が行われている。

地球大気化学国際協同研究／北太平洋地域研究(IGAC/APARE)の一環として国立環境研などの研究グループにより 1995 年から 1998 年にかけて実施された Perturbation of East Asian Continental Air Mass to Pacific Oceanic Troposphere (PEACAMPOT)観測プロジェクトは、黄海・東シナ海・日本海上空での航空機観測を中心とした、中国や韓国の研究者との共同研究も含めた国際共同観測である。複数年にわたる航空機観測によって、アジア大陸から洋

上に輸送されてきたオゾン、エアロゾルとそれらの前駆気体である酸性ガス、炭化水素類の濃度分布およびそれらの相関関係についての知見が得られた[Hatakeyama et al., 1995 他]。

Pacific Exploration of Asian Continental Emission (PEACE) 観測プロジェクトは、アジア由来のオゾン、エアロゾルおよびその前駆体の放出・輸送・化学反応による北太平洋上での対流圏大気に及ぼす影響を定量的に解明するため、JAXA/EORC と東京大学が中心となり、IGBP/IGAC の ITCT タスク (Intercontinental Transport and Chemical Transformation) の一環として、2002 年のアジアから太平洋に向けての長距離輸送が盛んになる冬季(PEACE-A)および春季(PEACE-B)の 2 回のキャンペーンとして実施された。後者は、NOAA により米国西海岸域での観測プロジェクト ITCT-2K2 と同期して行われた。以下にその主な成果を挙げる。

- ・PEACE-A,B および TRACE-P 航空機観測データを元にボックスモデルを用い北西太平洋上でのオゾン収支を計算し、冬季にはアジア大陸由来の窒素酸化物により下部対流圏でのオゾンの正味生成量が高いが、春季に光化学分解が活発化するにつれ消失に転ずる (図 3) こと、また生成されたオゾンの大部分が観測領域外へ輸送されていることが示された [Kondo et al., 2004]。

- ・大陸起源の汚染気塊の起源および経路、放出からの経過時間を後方流跡線および炭化水素類濃度比から推定することで、PEACE-A 観測データから冬季に境界層内を輸送される汚染気塊中における窒素酸化物類の除去速度を明らかにした (図 4)。NO_x の光化学寿命は 1.2 ± 0.4 日と短く、夜間に酸化され硝酸として除去される過程の寄与が示唆されるとともに、オゾン生成を左右する窒素酸化物の大気中濃度分布を決定する上で放出源近くにおける化学・物理過程が重要な役割を果たしていることが示された[Takegawa et al., 2004]。

- ・PEACE-B 観測データを用い、春季に東アジアから排出された汚染空気が広域輸送されるプロセスとして、中国華中地域の前線帯での積雲対流活動による上方輸送と、この前線帯に対応して蛇行する上空のジェット気流によって効果的に長距離輸送されていることを明らかにした [Oshima et al., 2004]。

- ・全球 3 次元輸送モデル GEOS-CHEM を用いて、アジア起源の汚染物質が米国の地表オゾンに与えた影響を明らかとした。ITCT 2K2/PEACE-B 期間には、比較的安定な PAN が輸送先で分解して窒素酸化物を放出する過程がオゾン生成に最も寄与していることが示された。また、輸送された汚染気塊が境界層に取り込まれる際に大幅に希釈されることで、米国での地表オゾン濃度への影響が抑えられているということがわかった [Hudman et al., 2004]。

以上、これまでに行われてきたオゾンとその前駆気体を中心とする反応性気体の航空機観測による成果の例を示してきた。航空機観測によりこれらの気体成分濃度の広域分布が明らかになることで、流跡線解析およびトレーサーとなるガスとの相関解析やボックスモデルなどの手法によって、放出源地域と輸送プロセス、輸送中の正味のオゾン生成率とその値を左右する窒素酸化物の収支、除去過程や寿命などが推定され、さらに領域～グロー

バルモデルとの比較によりオゾンやエアロゾル分布への影響の総合的・定量的な理解へと結びついていく。

参考文献

- Fujiwara, M., K. Kita, S. Kawakami, T. Ogawa, N. Komala, S. Saraspriya, and A. Suropto, 1999: Tropospheric ozone enhancements during the Indonesian forest fire events in 1994 and in 1997 as revealed by ground-based observations, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2417-2420.
- Fujiwara, M., Y. Tomikawa, K. Kita, Y. Kondo, N. Komala, S. Saraspriya, T. Manik, A. Suropto, S. Kawakami, T. Ogawa, E. Kelana, B. Suhardi, S.W.B. Harijono, M. Kudsy, T. Sribimawati, M.D. Yamanaka, 2003: Ozonesonde soundings in the Indonesian maritime continent in September-October 1998 and in August-September 1999, *Atmospheric Environment*, 37, 353-362.
- Hatakeyama, S, K. Murano, H. Bandow, F. Sakamaki, M. Yamato, S. Tanaka and H. Akimoto, 1995: The 1995 PEACAMPOT aircraft observation of ozone, NO_x, and SO₂ over the East China Sea, the Yellow Sea, and the Sea of Japan, *J. Geophys. Res.*, 100, D11, 23143-23151.
- Hudman, R. C., D. J. Jacob, O. C. Cooper, M. J. Evans, C. L. Heald, R. J. Park, F. Fehsenfeld, F. Flocke, J. Holloway, G. Hubler, K. Kita, M. Koike, Y. Kondo, A. Neuman, J. Nowak, S. Oltmans, D. Paarish, J. M. Roberts, and T. Ryerson, 2004: Ozoneproduction in transpacific Asian pollution plumes and implications for ozone air quality in California, *J. Geophys. Res.*, 109, D23S05, doi:10.1029/2004JD004974.
- Kita, K., M. Fujiwara, and S. Kawakami, 2000: Total ozone increase associated with extensive forest fires over the Indonesian region and its relation with El Niño-Southern Oscillation, *Atmos. Environ.*, 34, 2681-2690.
- Kita, K., S. Kawakami, Y. Miyazaki, Y. Higashi, Y. Kondo, N. Nishi, M. Koike, D.R. Blake, T. Machida, T. Sano, W. Hu, M. Ko, and T. Ogawa, 2002: Photochemical production of ozone in the upper troposphere in association with cumulus convection over Indonesia, *J. Geophys. Res.*, 107, 8400, doi: 10.1029/2001JD000844.
- Kitada, T., M. Nishizawa, G. Kurata, and Y. Kondo, 2001: Numerical simulation of the transport of biomass burning emissions in Southeast Asia-September and October, 1994-, *J. Global Environ. Engin.*, 7, 79-99.
- Ko, M., HU. Wenjie, J. Rodriguez, Y. Kondo, M. Koike, K. Kita, S. Kawakami, D. Blake, and S. Liu, 2002: Photochemical ozone budget during the BIBLE-A and B campaigns, *J. Geophys. Res.*, 107, 8404, doi: 10.1029/2001JD000800.
- Koike, M., Y. Kondo, D. Akutagawa, K. Kita, N. Nishi, S.C. Liu, D.R. Blake, S. Kawakami, N. Takegawa, M. Ko, Y. Zhao, and T. Ogawa, 2002: Reactive nitrogen over the tropical Western

- Pacific: Influence from lightning and biomass burning, *J. Geophys. Res.*, *107*, 8403, doi: 10.1029/2001JD000823.
- Koike, M., Y. Kondo, K. Kita, N. Takegawa, N. Nishi, B. Liley, T. Kashihara, S. Kudoh, S. Kawakami, D. Blake, T. Shirai, M. Ko, Y. Miyazaki, Z. Kawasaki, and T. Ogawa, 2007: Measurements of Reactive Nitrogen Produce by Tropical Thunderstorms during BIBLE-C, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2006JD008193.
- Kondo, Y., M. Ko, M. Koike, S. Kawakami, and T. Ogawa, 2002a: Preface to special section on Biomass Burning and Lightning Experiment (BIBLE), *J. Geophys. Res.*, *107*, 8397, doi:10.1029/2001JD002401
- Kondo, Y., K. Nakamura, G. Chen, N. Takegawa, M. Koike, Y. Miyazaki, K. Kita, J. Crawford, M. Ko, D. R. Blake, S. Kawakami, T. Shirai, B. Liley, and T. Ogawa, 2004: Photochemistry of ozone over the western Pacific from winter to spring, *J. Geophys. Res.*, *109*, D23S02, doi:10.1029/2004JD004871.
- Oshima, N., M. Koike, H. Nakamura, Y. Kondo, N. Takegawa, Y. Miyazaki, D.R. Blake, T. Shirai, K. Kita, S. Kawakami, and T. Ogawa, 2004: Asian chemical outflow to the Pacific in late spring observed during the PEACE-B aircraft mission, *J. Geophys. Res.*, *109*, D23S05, doi:10.1029/2004JD004976.
- Takegawa, N., Y. Kondo, M. Koike, M. Ko, K. Kita, D. R. Blake, N. Nishi, W. Hu, J. B. Liley, S. Kawakami, T. Shirai, Y. Miyazaki, H. Ikeda, J. Russell-Smith, and T. Ogawa, 2003a: Removal of NO_x and NO_y in biomass burning plumes in the boundary layer over northern Australia, *J. Geophys. Res.*, *108*, doi:10.1029/2002JD002505.
- Takegawa, N., Y. Kondo, M. Ko, M. Koike, K. Kita, D. R. Blake, W. Hu, C. Scott, S. Kawakami, J. Russell-Smith, and T. Ogawa, 2003b: Photochemical production of O₃ in biomass burning plumes in the boundary layer over northern Australia, *Geophys. Res. Lett.*, *30*, doi:10.1029/2003GL017017.
- Takegawa, N., Y. Kondo, M. Koike, G. Chen, T. Machida, T. Watai, D. R. Blake, D. G. Streets, J.-H. Woo, G. R. Carmichael, K. Kita, Y. Miyazaki, T. Shirai, J. B. Liley, and T. Ogawa, 2004: Removal of NO_x and NO_y in Asian outflow plumes: Aircraft measurements over the western Pacific in January 2002, *J. Geophys. Res.*, *109*, D23S04, doi:10.1029/2004JD004866.
- Tsutsumi, Y., Y. Makino, J. B. Jensen, 2003: Vertical and latitudinal distributions of tropospheric ozone over the western Pacific: Case studies from the PACe aircraft missions, *J. Geophys. Res.*, *108*, D8, doi:10.1029/2001JD001384.
- Tsutsumi, Y., Y. Sawa, Y. Makino, J. B. Jensen, J. L. Gras, B. F. Ryan, S. Dihato, and H. Harijanto, 1999: Aircraft measurements of ozone, NO_x, CO, and aerosol concentrations in biomass burning smoke over Indonesia and Australia in October 1997: Depleted ozone layer at low

altitude over Indonesia, *Geophysical Research Letters*, 26(5), 595-598. DOI:
10.1029/1999GL900054.

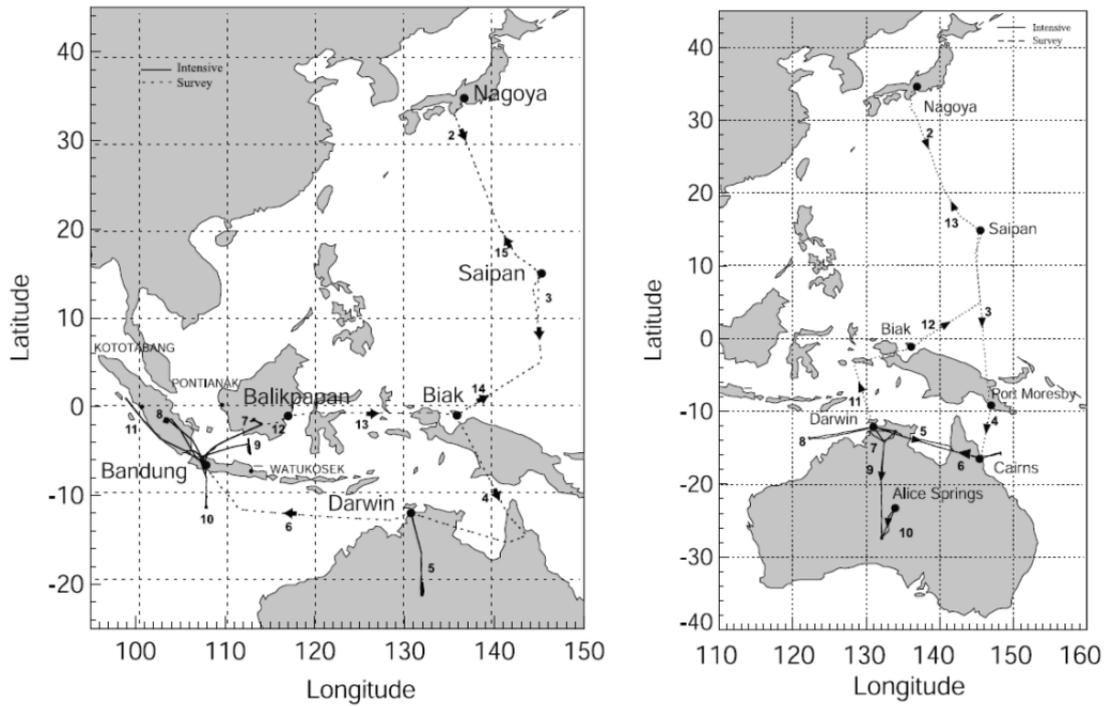


図 1. BIBLE-A, B での飛行経路 [Kondo et al., 2002]

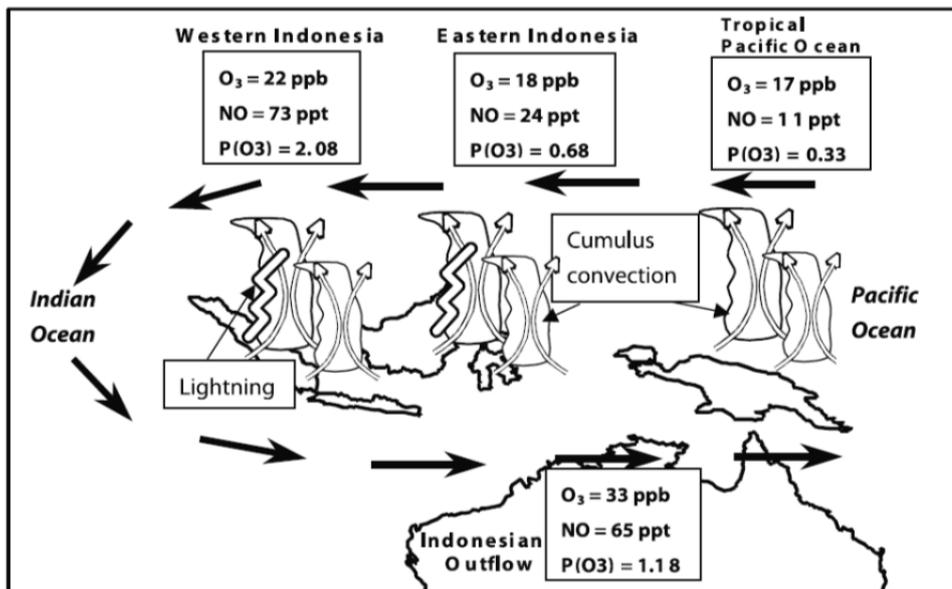


図 2. インドネシア上空での対流活動が上部対流圏オゾンに与える影響の模式図。上部対流圏での水平移流を黒い矢印で示し、BIBLE-A 期間の NO とオゾンの濃度およびオゾン生成速度の変化を数値で示す。

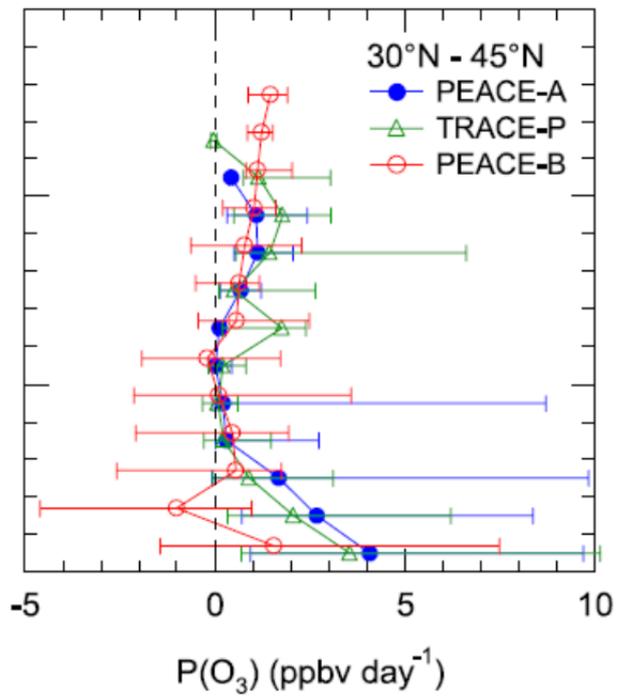


図 3. PEACE-A, B での 30-45°N における正味のオゾン生成率

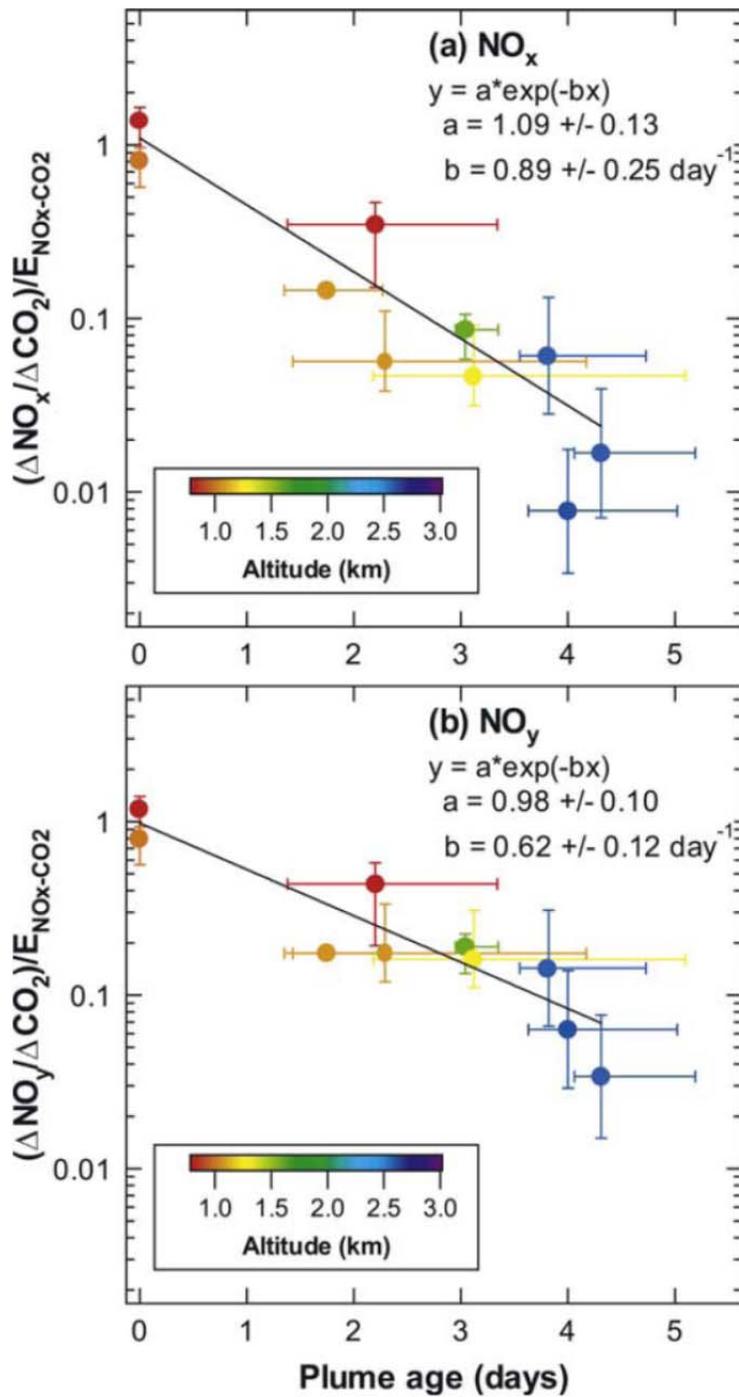


図 4. 空気塊の age に対する窒素酸化物類の混合比の減少 (PEACE-A)。ここから大気中の光化学寿命が推定できる。

2. 4. エアロゾル

エアロゾルは太陽放射を散乱・吸収することにより大気の放射収支に直接影響を及ぼす（直接効果）。またエアロゾルは雲凝結核や氷晶核として作用する事で水雲・氷雲の生成や性質を変化させることで放射収支に影響を及ぼす（間接効果）。炭素性物質（化石燃料やバイオマス、森林）の燃焼により発生するエアロゾルの大部分は粒径範囲 0.05~1 μm 程度で大気中に存在する。この粒径範囲のエアロゾルは大気滞在時間が長く、また太陽放射（可視波長）の散乱・吸収効率が高く、さらに雲凝結核の数に大きな寄与をするため、直接・間接効果による気候影響を議論する上で特に重要である。本節では、主にこの粒径範囲のエアロゾルについて、直接・間接効果を支配する微物理特性の測定手法の開発実績や、その測定法を採用した地上・航空機観測キャンペーンで得られた観測的知見を紹介する。ただし、間接効果に直接関連する話題は2.5節で詳しく述べられるため、本節では、エアロゾルの微物理特性そのものの観測や、直接効果に関連する研究を中心に紹介する。

（1）気象研究所が中心となった研究

気象研究所では、先端的な電子顕微鏡技術を駆使し、大気中のエアロゾルの単一粒子性状の物理・化学的変質過程についての詳細な観測研究に力を入れてきた。これまで、メキシコシティ上空における汚染空気塊のエイジングやその周辺でのバイオマス燃焼由来のエアロゾル粒子の観測（MILAGRO）、アメリカ北西部におけるバイオマス燃焼由来粒子の観測（BBOP）、東アジアにおける汚染空気や雲エアロゾル相互作用の観測（AFORCE2013）、を目的とした航空機観測キャンペーンに参加し、エアロゾル試料の電子顕微鏡観測を行ってきた。それぞれのキャンペーンで、人為起源エアロゾルのエイジング過程、バイオマス燃焼由来のエアロゾルの変化、雲とエアロゾルの相互作用について研究を行ってきた。

人為起源エアロゾルに関する研究では、大都市域で発生した高濃度汚染空気中のエアロゾルが、風下に輸送される過程に起こる様々な大気化学反応により光学・吸湿特性が変化していく過程を解明した。発生源から時間がたった空気塊中のすす粒子は、発生源付近で採取されたものに比べ、その表面が他の物質によって被覆されることと（Adachi and Buseck, 2008）、またその被覆が進むに従い、より効果的に光を吸収する状態になっていくことを理論計算により明らかにした(図 1. Adachi et al., 2010)。

また、東アジアにおける観測では、汚染空気塊と非汚染空気塊中で、すす粒子の他の成分による被覆量が前者のほうで大きくなることを観測した。

バイオマス燃焼由来エアロゾルは、人為起源エアロゾルとほぼ同等量大気中に存在し、その気候影響は大きい。発生源近傍の煙から採取されたエアロゾルと、風下で採取された数時間エイジングが進んだエアロゾルでは、各々の粒子の微物理特性が大きく異なることが分かっている。特に、バイオマス燃焼由来特有と考えられている光吸収性の有機エアロゾル（ターボール）は、正の放射強制力に寄与する可能性が示唆されているが、定量的な

ことはほとんど理解されていない。我々は航空機観測により、発生直後の煙中ではターボールはほとんど存在しないが、その後一部の有機エアロゾルが大気変化によって粘性を上げていくことにより、ターボールが二次生成するメカニズムを発見した(図 2. Adachi and Buseck, 2011).

メキシコにおける観測では、吸湿性の高い硫酸塩が、二次生成有機物に被覆されることによってその吸湿特性が減少していくことを発見した (Adachi et al., 2011, GRL). また、東日本上空の雲中で採取されたエアロゾル中で、非晶質の硫酸塩が確認され、雲粒とエアロゾルの反応によって何らかの化学反応が促進されていることが示唆された。

このように、エアロゾル粒子を電子顕微鏡で観測することにより、オンライン分析手法では測定不可能な、詳細な単一粒子性状の観測的知見を得る事ができ、エアロゾルの微物理特性の変化過程を本質的に理解することが可能となる。このように、電子顕微鏡の試料サンプラーを航空機に搭載して試料を採集し観察する方法により、上空での詳細なエアロゾルプロセスの解明に貢献してきた。

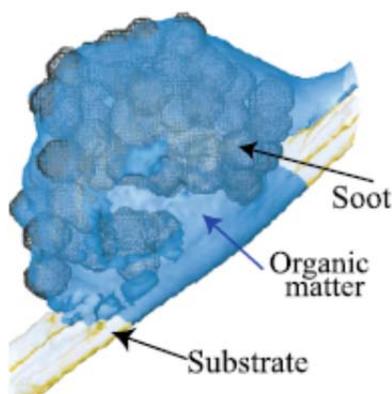


図 1. メキシコシティ上空で採取された被覆されたすす粒子の三次元トモグラフィ像 (Adachi et al., 2010).

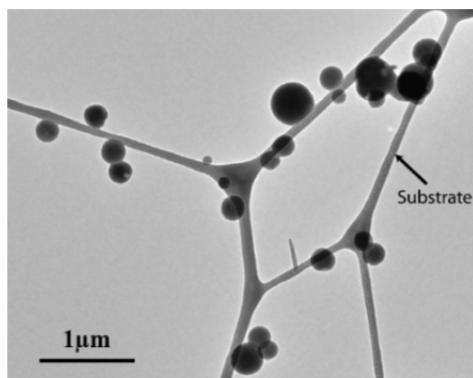


図 2. メキシコ上空で採取されたバイオマス燃焼由来のターボール粒子 (Fig. 1 in Adachi and Buseck 2011).

(2) 名古屋大学が中心となった研究

大気エアロゾルの吸湿特性は、光散乱・吸収効率の相対湿度への依存性を計算するために必要不可欠なパラメータである。また、雲凝結核能 (CCN 活性) は、間接効果の観点で重要であるだけでなく、エアロゾルの湿性除去の受け易さを支配するパラメータとして重要であり、直接効果に大きな影響を及ぼす大気エアロゾルの鉛直分布や長距離輸送過程を理解する上でも必要である。理論・実験的には、吸湿性は CCN 活性を規定する因子であることが分かっている。吸湿性と CCN 活性の関係の観測的解明は、雲粒生成を介したエアロゾルの雲に対する作用を理解する上で重要である。

名古屋大学ではこれまで、大気エアロゾルの吸湿性の特徴の把握、また、その規定要因や雲凝結核 (CCN) 活性との関係の解明を目的とし、地上・船舶のプラットフォームを利用して吸湿タンデム電気移動度分析器 (HTDMA) による吸湿成長度の測定を行ってきた。アジア大陸起源の空気塊の受容域となる春季の沖縄辺戸岬における観測と、海洋エアロゾルを対象とした西部北太平洋域における観測では、ともに高吸湿性で一峰の吸湿性分布で特徴付けられることを明らかにした (Mochida et al., 2010; 2011) (図 3)。これらの研究では、空気塊の経路の違いに対応した吸湿性の特徴の違いも指摘している。一方、日本の都市・工業域である東京および名古屋における大気観測により、遠隔地とは対照的に二峰の吸湿性分布を持つエアロゾルの特徴を得た (Mochida et al., 2008; Kawana et al., 2014)。東京の観測研究では、化学成分の濃度と吸湿性別の粒子濃度の関係から吸湿性別の組成を推定し、また、二次有機エアロゾル成分の凝縮による、高吸湿性粒子から中間的な吸湿性を持つ粒子への変質を示唆した。そのほか、国内の森林域を対象に、生物起源有機物の影響が強いと考えられるエアロゾルの吸湿性について研究を進めている (Kawana, 2015)。

沖縄・西部北太平洋における観測研究では、大気エアロゾルの吸湿成長度と CCN 活性の同時測定を行い、吸湿成長度をもとに Köhler 式から活性化粒径を導出し、実測値と比較した。推定値と実測値は概ね良い一致を示し、吸湿成長度の計測により得られる情報から、CCN 活性をよく推定できることを示した。名古屋の都市大気を対象とした観測研究では更に踏み込み、吸湿成長度別に選別した粒子の活性化粒径の推定値と実測値を比較し、吸湿成長度から CCN 活性を推定する手法の妥当性を確かめた。また、エアロゾルの吸湿成長度の分布を考慮した雲パーセルモデルの計算を行い、吸湿性の低い粒子も雲粒の数濃度・有効半径に強く寄与し得ることを示した (図 4)。これらの結果は、雲生成過程や雲粒化を経たエアロゾル粒子の変質を理解する上で、吸湿性分布の知見が有用であることを裏付けている。

大気エアロゾルの吸湿性に関しては、化学組成との関係の解明も重要な課題として残されている。雲生成に強く寄与する微小粒子の主要成分のうち、硫酸塩・硝酸塩の吸湿性は既に解明されており、残る主要成分である有機物の吸湿性の把握が求められる。名古屋大学の研究グループでは、日本の都市域・森林域の大気エアロゾルの吸湿成長度と化学組成の測定を行い、そのデータに基づいた有機物の吸湿性パラメータの導出に取り組んでいる。

(Kawana 2015; 小川ほか, 未公表データ). 大気有機エアロゾル成分の吸湿性パラメータの報告は既に複数あるが, その変動の程度や規定因子は十分に理解されていない. 上記の取り組みは, これらの解明に寄与するものとなり得る.

このように日本国内・周辺の代表的なエアロゾルの種別に対する吸湿性の理解は進みつつあるが, より上方の大気エアロゾルの吸湿性の特徴付けやエアロゾルの輸送に伴う吸湿性の変化の把握など, エアロゾルの気候影響の理解において重要でありながら, 地上・船舶の観測のみでは達成が難しい課題は未解決のまま残されている. この解決には航空機を用いる大気観測の取り組みが有効だと考えられるが, 海外で航空機を利用する吸湿性研究の実績 (HTDMA の使用を含む) が積み重ねられつつある一方, 現状では我が国における取り組みは乏しい. HTDMA の原理をもとに航空機観測に適した吸湿成長度計測装置を開発・整備し, 日本発の航空機観測を企画・推進することでエアロゾルの気候影響研究に貢献することが強く望まれる.

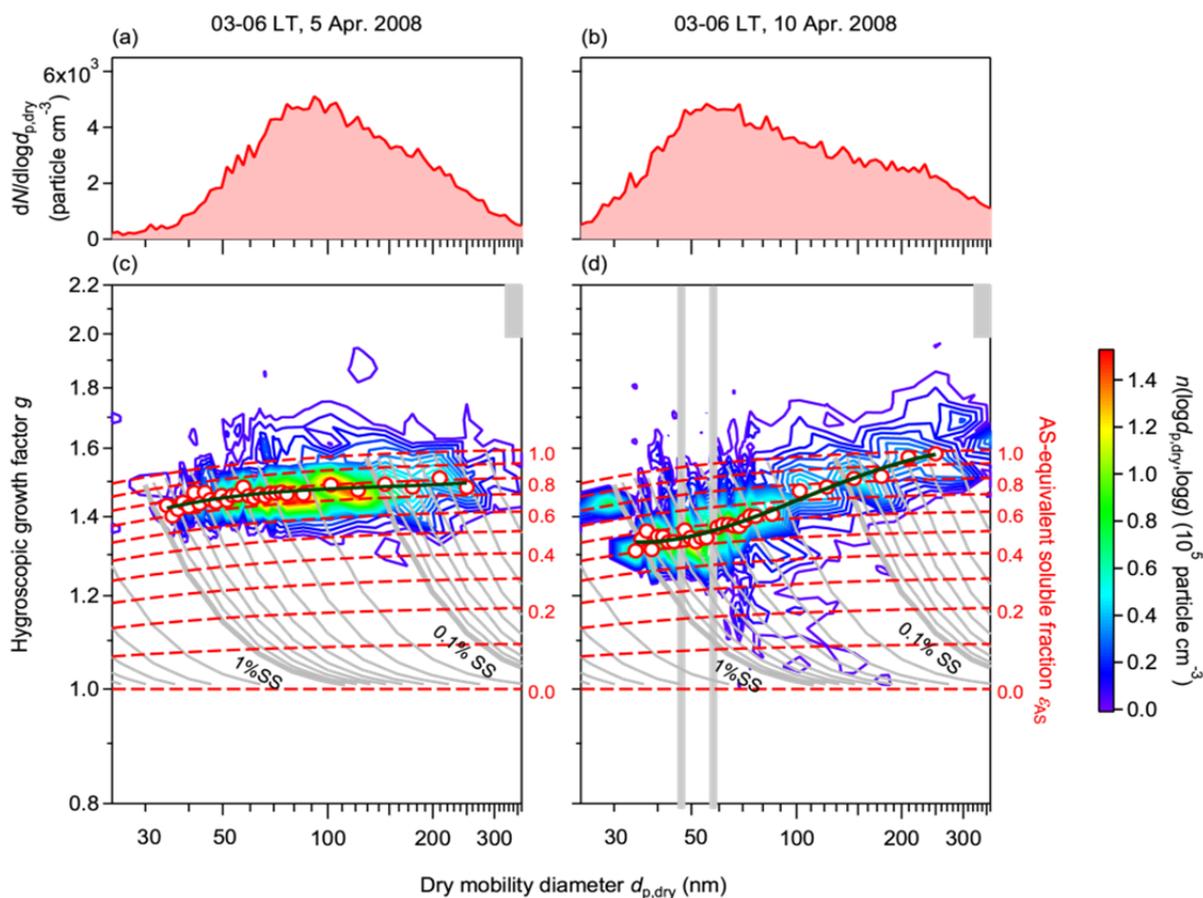


図 3. 沖縄における大気エアロゾルの吸湿成長度の測定例. Mochida et al. (2010)より American Geophysical Union (AGU) の許諾のもとに転載 (Copyright 2010 AGU).

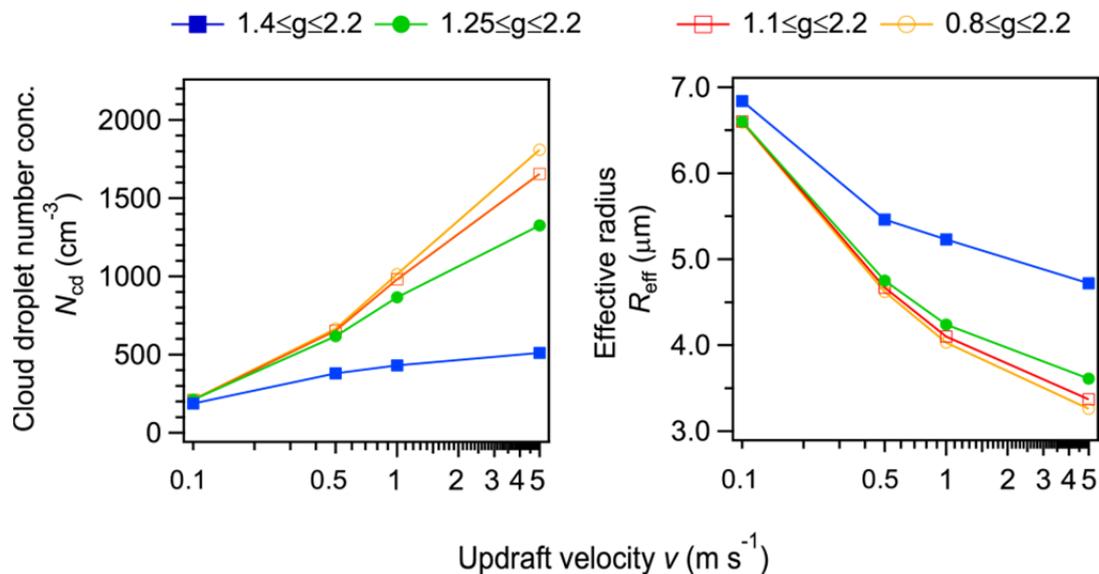


図 4. 名古屋における大気エアロゾルの吸湿成長度の測定値に基づく，雲パーセルモデルの計算結果．記号 g は吸湿成長度を表す．Kawana et al. (2014)より American Geophysical Union (AGU)の許諾のもとに改写 (Copyright 2014 AGU)．

(3) 東京大学が中心となった研究

大気微粒子 (エアロゾル・雲) と太陽放射の相互作用を規定する，消散係数・吸収係数・散乱角度依存性のうち，吸収係数は，遠隔放射観測が原理的に困難であるし，in-situ 観測ですら技術的な困難が伴う．そのため大気微粒子による光吸収量とその成分別寄与の解明は，大気放射学研究における重要かつ最難問の1つとして残されている．

「すす」あるいはブラックカーボン(Black Carbon: BC)は，可視光を著しく効率的に吸収するため，鉱物粒子と並び，大気微粒子による光吸収量に支配的な寄与をもつエアロゾルである．BCは，大気中における直接効果や雲粒中の光吸収，雪氷面への沈着によるアルベド効果などにより，CO₂の次に強い気候強制力をもつと推算されているが，その推算の前提となっている空間分布・存在量や光吸収効率の理解・シミュレーションには依然として不確実性が大きい (Bond et al., 2013)．BC含有粒子の光吸収効率は，1)BC質量，2)他の成分との混合状態，3)BCの複素屈折率に強く依存する．そのため，BCによる光吸収量を評価するためには，これらの微物理特性の観測が必要となる．

東京大学ではこれまで，BCによる太陽放射吸収量と放射強制力を理解するために，空間分布と光吸収効率を支配するBCの微物理特性の観測手段を開発し，大気におけるその実態と変化過程を理解することに貢献してきた (図 5)．特に，個々のBC含有粒子の上記3つの微物理特性を同時にかつ高速に観測するためのレーザー誘起白熱法(Laser-Induced Incandescence: LII法)の開発を行ってきた．LII法は，個々の粒子を高強度の共振器内レーザ

ービームを横断させ、ビーム中で粒子から放出される散乱光と熱輻射光を同時に測定し、その測光量から BC 含有粒子の微物理特性を導出するものである (Moteki and Kondo 2010)。我々は、東アジア域や北極域上空にて LII 測定器を搭載した航空機観測を行い、以下 4 つの研究成果を得た。

(i) 都市域を起源とする汚染空気のエイジング過程を太平洋上空で航空機観測し、BC の他の成分による被覆量が、硫酸塩や有機物の二次生成の進行とともに大きくなることと、そのプロセスがどのくらいの時間で起こるのかを観測的に明らかにした。この観測データは、グローバルモデルにおける BC の疎水性から親水性への変換のパラメタリゼーションに利用され、BC の空間分布と放射強制力のシミュレーションの精緻化に役立てられている (Goto et al. 2012)。

(ii) 湿潤対流により境界層から自由対流圏へ鉛直輸送された空気塊を多数観測し、湿潤対流において全体粒径の大きな BC 含有粒子が優先的に湿性除去を受け、全体粒径の小さな BC 含有粒子ほど効率的に自由対流圏に輸送されること統計的に示した (Moteki et al. 2012)。このことにより、エアロゾルの鉛直輸送/湿性除去の相対比率を決める微物理的因子として CCN 活性が重要であるという仮説が実証された。

(iii) 東アジア域や北極域において、BC 質量濃度の鉛直分布の統計観測データを取り、国内外の気候モデル群の BC 鉛直分布の再現性についての検証データを初めて提供した (IPCC 第 5 次報告書に記載)。

(iv) 顕微鏡観察によれば、大気中の BC と他のエアロゾル成分が粒子内で混合する形態は、BC の周りに非 BC 成分が被覆したもの (被覆形態) と、BC 粒子が非 BC 粒子の表面に付着したもの (付着形態) に分類される。BC の光吸収効率は二つの形態で大きく異なるため、BC による光吸収量の理解・計算のためには実大気中においてこれらの形態の存在比を把握することが必要である。我々は LII 法で BC 含有粒子の被覆形態と付着形態を高速かつ自動に判別する観測技術を初めて開発し (Moteki et al. 2014)、東京地上や東アジア上空など、実大気におけるこれら 2 形態の存在比の統計的観測に初めて成功した。

このように、新しい測定手法の開発により BC による光吸収を支配する微物理特性の詳細な観測データを取得する事が可能になったため、大気微粒子による光吸収量とその因子別寄与を解明するために必要な、航空機による光吸収クロージャ観測研究の土台が整えられつつある。

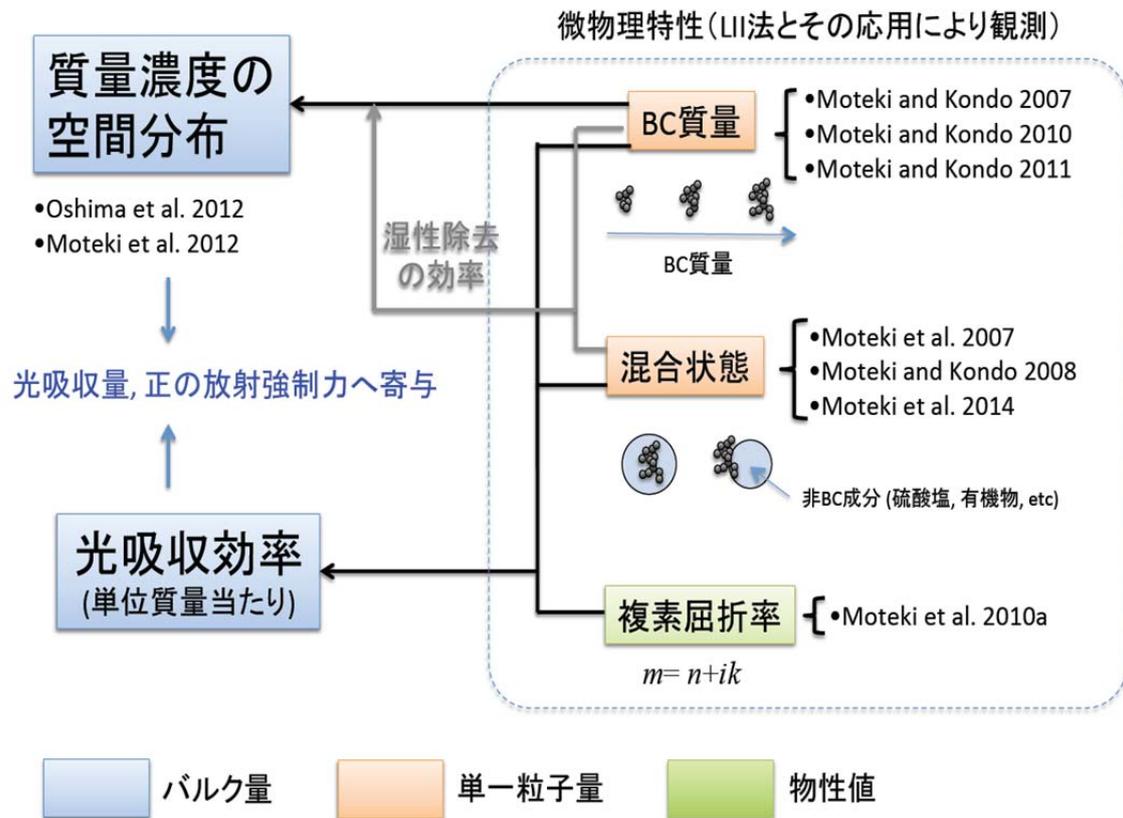


図5. BCによる光吸収量・放射効果の支配メカニズムとこれまでの研究成果

(4) 北海道大学が中心となった研究

大気エアロゾル中の有機物は硫酸塩と同様に主要成分であるにもかかわらず、その巨大な放出源である海洋・陸上生態系のような自然発生源からの生成経路や生成量、その物理化学特性の理解は極めて不十分である。これらを正確にモデルで表現し予測することは、大気エアロゾル研究における主要なテーマの一つである。揮発性有機化合物 (VOCs) の酸化反応等により生成される二次有機エアロゾル (SOA) は極性官能基を有することから水溶性有機エアロゾルと密接に関係している。また人為発生源とは異なり、海洋・陸上生態系から直接放出される有機物も糖類など高い水溶性成分を多く含むと考えられている。これら粒子に凝結する水 (水蒸気) は普遍的に存在する大気成分であり、硫酸塩と有機物との相対的な存在比や混合状態などは、凝結水分量を決定づけるなど、粒子の化学・物理的性質、吸湿特性などと密接に関係する。

北海道大学では、海洋・陸上生態系における有機エアロゾルの起源と化学組成、生成メカニズムを明らかにすることを目的とし、水溶性特性の観点を軸に船舶・陸上をプラットフォームとした観測研究を行ってきた。

西部北太平洋における海洋大気有機エアロゾルの起源に関する観測研究では、分子レベルの化学トレーサーと安定炭素同位体および元素分析の測定による複合的な化学分析・解析手法を確立してきた。これらを駆使することで、海洋大気エアロゾル炭素質量に占める

海洋表層微生物起源の寄与を定量的に見積ることに成功した(Miyazaki et al., 2010a)。雲凝結核に寄与する粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の微小粒子質量に関して、硫酸塩以外にはこれまで海洋表面の砕波に伴って直接放出される有機物の寄与が支配的であると考えられてきた。これに対し、大気の酸性度や吸湿性、光吸収特性などを制御する重要な因子である窒素が有機物中に多く含まれ、この含窒素有機物は、これまで見過ごされてきた海洋表層から直接放出された海洋微生物起源の非水溶性成分であることを発見した(Miyazaki et al., 2011)。さらに微小粒子中には海洋表層微生物に由来する水溶性有機物の寄与も同程度に大きいことを明らかにし(図6)、大気エアロゾル中の揮発性・極性を変化させる水酸基を含む有機酸を初めて見出した。その大部分は粒子相に存在し、大気光化学反応と併せて海洋微生物による水溶性有機物の生成過程を提唱した(Miyazaki et al., 2010b; 2014)。これらの研究では、三次元モデル等における海洋上で生成する有機エアロゾルの正確なパラメタリゼーションには従来のクロロフィル *a* 濃度だけではなく、海水中の溶存態有機炭素の濃度も用いる必要性も指摘している。

一方、水溶性前駆体の放出量がより多い陸域植生環境などで、雲粒の生成を伴わずとも相対湿度が高く、かつ NO_x 濃度が高い条件下(例えば汚染性空気塊の影響を受ける森林など)での液相 SOA 生成が SOA 質量全体に大きく寄与する可能性が室内実験等から示唆されている。これら陸上植生由来の有機エアロゾルの生成機構を明らかにするため、国内の森林域における大気有機エアロゾルの観測プロジェクトを推進してきた。このなかで有機エアロゾル二次生成量に対する植生起源別寄与の定量化とその季節依存性、植生起源有機エアロゾル(特に α -ピネンの高次酸化生成物)生成の強い温度依存性、汚染大気の流入による新粒子生成・SOA 生成の促進などを実大気測定から明らかにしてきた(Miyazaki et al., 2012a; 2012b; 2014b; Jung et al., 2013; Mochizuki et al., 2015)。なかでも水溶性有機炭素(WSOC)の安定炭素同位体比が、植生起源のエアロゾル有機炭素の有用な指標となることを示し、植生起源 VOCs と OH ラジカル・オゾンとの反応による二次有機エアロゾル生成指標の提案なども行ってきた。硫酸塩等によるエアロゾル酸性度の上昇や人為起源窒素が、イソプレン酸化生成物など二次有機エアロゾル生成促進の大きな駆動要因になっている(図7)ことを観測から明らかにするなどの成果が得られた。

西太平洋域は人為起源・自然起源ともに有機エアロゾル生成に深く関与する窒素酸化物やアンモニア等、反応性窒素の放出量影響が大きく、多湿な大気条件という独自性を有する。これら諸条件の下、人為起源物質による生成促進を含む自然起源有機エアロゾルの生成ポテンシャルは高いと考えられる。航空機を用いたコンパクト ToFMS 搭載型エアロゾル質量分析計によるオンライン分析や粒子液化捕集装置によるオフライン分析などにより、海洋・陸上生態系で生成される有機物組成および無機物との混合状態とエアロゾル含水量・吸湿特性・雲凝結核能との定量的な対応の解明が期待され、自然起源有機エアロゾルの気候影響研究への貢献が望まれる。

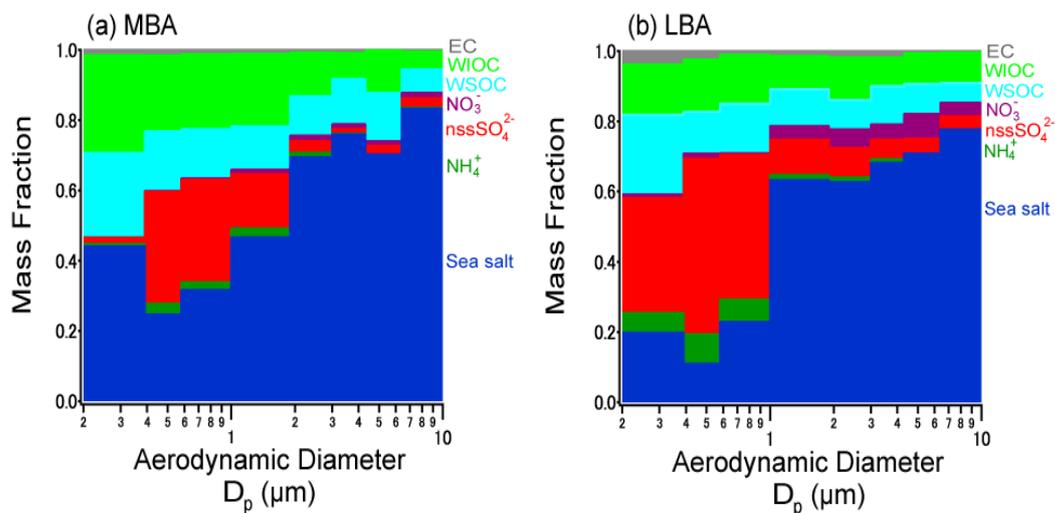


図 6. 亜寒帯西部北太平洋上にて学術研究船白鳳丸により観測された粒径ごとのエアロゾル組成比の例。海洋基礎生産データ、海洋表層のクロロフィル *a* 濃度に基づき、海洋表層微生物の影響が(a)大きいデータと(b)小さいデータに区分。Miyazaki et al. (2010)より American Geophysical Union (AGU) の許諾のもとに転載 (Copyright 2010 AGU)。

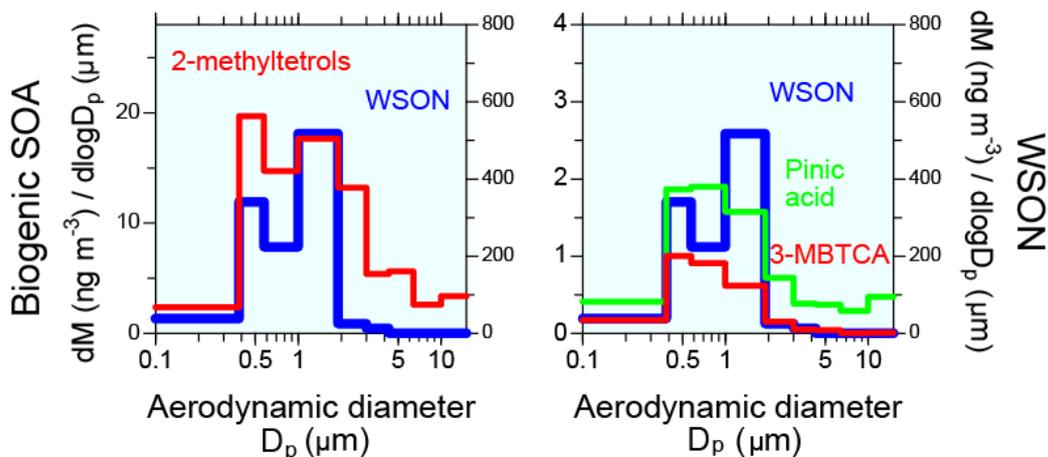


図 7. 夏季の森林における水溶性含窒素有機エアロゾル (WSON) 及びイソプレン酸化生成物 (2-methyltetrols) (左図)、 α -ピネン酸化生成物 (Pinic acid, 3-MBTCA) (右図) の質量粒径分布の観測例。この観測例では WSON は全窒素エアロゾルの 20-40% を占め、汚染空気塊流入時にイソプレン・ α -ピネンの反応による生成 (植生起源 VOCs + 人為起源 N による SOA 生成) を示唆している。Miyazaki et al. (2014b) の図を改訂。

参考文献

Adachi, K. and P. R. Buseck (2008), Internally mixed soot, sulfates, and organic matter in aerosol particles from Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 6469-6481.

- Adachi, K. et al. (2010), Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D15206.
- Adachi, K. and P.R. Buseck (2011), Atmospheric tar balls from biomass burning in Mexico, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116, doi:10.1029/2010JD015102.
- Adachi, K. et al. (2011), Shapes of internally mixed hygroscopic aerosol particles after deliquescence, and their effect on light scattering, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13804.
- Bond T. C., et al. (2013), Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 1–173.
- Goto, D. et al. (2012), Impact of the aging process of black carbon aerosols on their spatial distribution, hygroscopicity, and radiative forcing in a global climate model, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 12, 29801-29849.
- Jung, J. et al. (2013), Different characteristics of new particle formation between urban and deciduous forest sites in northern Japan during the summers of 2010–2011, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 51-68.
- Kawana K. et al. (2014), Assessment of cloud condensation nucleus activation of urban aerosol particles with different hygroscopicity and the application to the cloud parcel model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 3352-3371, doi:10.1002/2013JD020827.
- Kawana K. (2015), Hygroscopicity and cloud condensation nucleus activity of atmospheric aerosol particles at urban and forest sites and their contribution to cloud droplet formation, doctoral thesis, Nagoya University.
- Miyazaki, Y. et al. (2010a), Size distributions of organic nitrogen and carbon in remote marine aerosols: Evidence of marine biological origin based on their isotopic ratios, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L06803, doi:10.1029/2010GL042483.
- Miyazaki, Y. et al. (2010b), Size distributions and chemical characterization of water-soluble organic aerosols over the western North Pacific in summer, *J. Geophys. Res.*, 115, D23210, doi:10.1029/2010JD014439.
- Miyazaki, Y. et al. (2011), Latitudinal distributions of organic nitrogen and organic carbon in marine aerosols over the western North Pacific, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 3037-3049.
- Miyazaki, Y. et al. (2012a), Seasonal variations of stable carbon isotopic composition and biogenic tracer compounds of water-soluble organic aerosols in a deciduous forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1367–1376.
- Miyazaki, Y. et al. (2012b), Evidence of formation of submicrometer water-soluble organic aerosols at a deciduous forest site in northern Japan in summer, *J. Geophys. Res.*, 117, D19213, doi:10.1029/2012JD018250.
- Miyazaki, Y. et al. (2014a), Low-molecular-weight hydroxyacids in marine atmospheric aerosol: Evidence of a marine microbial origin, *Biogeosciences*, 11, 4407–4414, doi:10.5194/bg-11-4407-2014.

- Miyazaki, Y. et al. (2014b), Seasonal cycles of water-soluble organic nitrogen aerosols in a deciduous broadleaf forest in northern Japan, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1440–1454, doi:10.1029/2013JD020713.
- Mochida, M. et al. (2008), Significant alteration in the hygroscopic properties of urban aerosol particles by the secondary formation of organics, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02804, doi:10.1029/2007GL031310.
- Mochida, M. et al. (2010), Size-segregated measurements of cloud condensation nucleus activity and hygroscopic growth for aerosols at Cape Hedo, Japan, in spring 2008, *J. Geophys. Res.*, 115, D21207, doi:10.1029/2009JD013216.
- Mochida, M. et al. (2011), Hygroscopicity and cloud condensation nucleus activity of marine aerosol particles over the western North Pacific, *J. Geophys. Res.*, 116, D06204, doi:10.1029/2010JD014759.
- Mochizuki, T. et al. (2015), Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a *Larix kaempferi* forest, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, 10739–10771, doi:10.5194/acpd-15-10739-2015.
- Moteki, N. et al. (2007), Evolution of mixing state of black carbon particles: Aircraft measurement over the western Pacific in March 2004, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11803, doi:10.1029/2006GL028943.
- Moteki, N., and Y. Kondo (2008), Method to measure time-dependent scattering cross section of particles evaporating in a laser beam, *Journal of Aerosol Science*, 39, 348-364.
- Moteki, N. et al. (2010), Method to measure refractive indices of small nonspherical particles: Application to black carbon particles, *Journal of Aerosol Science*, 41, 513-521.
- Moteki, N., and Y. Kondo (2010), Dependence of laser-induced incandescence on physical properties of black carbon aerosols: Measurements and theoretical interpretation, *Aerosol Sci. Technol.*, 44, 663-675.
- Moteki, N. et al. (2012), Size dependence of wet removal of black carbon aerosols during transport from the boundary layer to the free troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L13802, doi:10.1029/2012GL052034.
- Moteki, N. et al. (2014), Identification by single-particle soot photometer of black carbon particles attached to other particles: Laboratory experiments and ground observations in Tokyo, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1031-1043.
- Oshima, N. et al. (2012), Wet removal of black carbon in Asian outflow: Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) aircraft campaign, *Journal of Geophysical Research*, 117, D03204, doi:10.1029/2011JD016552.

2. 5. エアロゾル・雲・降水相互作用

エアロゾルは雲凝結核として働くため、エアロゾル数濃度の増加は雲粒数濃度の増加を引き起こす。この結果、雲水量が同じでも雲の光学的厚み、従って雲のアルベド（反射率）が高くなる。雲粒数増加に伴う雲粒粒径の減少は降水や雲粒の蒸発過程に影響し、雲の厚さ（従って光学的厚み）や雲量を変化させ、地球のアルベドを変化させる。気候変動に関する政府間パネルの第5次報告書（IPCC AR5 2013）では、エアロゾルと雲の相互作用による有効放射強制力の不確定性の幅（ $-0.06 \sim -1.33 \text{ W m}^{-2}$ ）が、各種の有効放射強制力の中で最も大きいこと、またその不確定性の幅が6年前の第4次報告書（IPCC, AR4 2007）の放射強制力と同程度（ $-0.3 \sim -1.8 \text{ W m}^{-2}$ ）であることが示された。このことはエアロゾルと雲の相互作用の定量化が、依然として困難であることを示している。また第4次報告書までは、瞬時に働く放射強制力（アルベド効果）が評価されていたのに対し、第5次報告書ではグローバルな気温の上昇と比較して時定数が十分に短い雲の応答（雲の厚さや雲量変化などの調節効果, adjustment）を含めた「有効」放射強制力が評価されている。これは妥当な評価方法であると考えられるが、エアロゾルにより変化する鉛直積算雲水量や雲量の変化を含めた雲の調節効果は、瞬時に働く放射強制力よりもメカニズムレベルでの理解がはるかに遅れており、その評価には大きな不確定性がある。またエアロゾルの氷雲や混合相雲（mixed-phase clouds）への影響の不確定性は、水雲への影響よりもさらに大きい。これらのエアロゾルに対する鉛直積算雲水量、雲量、降水量などの変化は、雲システムのおかれた気象条件（大気安定度や下層・雲層上の水蒸気量など）とエアロゾル量の絶対値に応じて異なることがわかってきている。従ってそれぞれの条件（レジーム）ごとの検討が必要である。

一方、放射強制力に対する気温の応答（変化の度合い）を表す気候感度の主要な不確定要因も、下層雲の雲量変化などの雲のフィードバックであることがIPCC AR5で指摘されている。このような雲のフィードバックに対してエアロゾルがどのように影響するかなどの見積にはさらに不確定性がある。このようにエアロゾルと雲の相互作用は気候変動研究において最も重要な課題のひとつである。

東アジアは世界的に見ても特にエアロゾル濃度が高い領域であり、その雲への影響も強く出ている可能性がある。また西太平洋は東太平洋と比較して、多様な気象場において雲・降水システムが形成されるため、エアロゾルと雲の相互作用もそれらの気象場に応じて研究していく必要がある。

日本ではこれまで、エアロゾル－雲・降水－放射の航空機観測研究は主として気象研究所と東京大学が中心となって実施されてきた。これらの観測研究では、必ずしもエアロゾルと雲の相互作用を主目的としないものもあるが、これらの要素は密接に関連しているため、広い意味でのエアロゾル・雲相互作用研究として捉えることができる。

(1) 気象研究所が中心となった研究

気象研究所の研究グループは1980年代から雲微物理の航空機観測を行ってきた。これらの一連の研究においては、エアロゾルの影響（間接効果）や、雲と放射との関係なども観測・研究された。1980年代には「中層大気の研究」（1986～1990年度）の一環として双発のプロペラ機（C404、昭和航空）を用いたエアロゾルと放射測定や赤外分光装置による微量気体成分測定等が行われた。また航空機を用いた雲・降水の内部構造の直接観測は手作りの測定機器を用いた好天積雲観測や「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」（1987～1990年度）の一環として実施した層積雲観測などが行われた。しかしこれらはいずれも断片的なものに限定されていた。

1990年代以降に気象研究所が中心となって行った本格的な雲・降水システムを対象とした航空機観測は、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）観測を実施したのが最初である（Murakami et al. 2005; 村上 2005a; 村上 2005b）。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・放射特性観測技術を開発し、冬季東シナ海上に発生する層積雲を対象にC404と同期観測を実施し、当時論争となっていた日射の異常吸収はないと結論した（Asano et al., 2000）。雲の微物理構造の観点からは、雲粒子濃度は500個 cm^{-3} を超えることが多く、海洋性気団としては高濃度であり、アジア大陸東岸からの汚染大気の影響が示唆された。さらに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、図1）を用いた気象観測技術を開発した。この技術を駆使した雲の微物理構造・力学構造・熱力学構造（メソ β スケール）の観測から、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を解明した（村上 2005c; 村上 2005d; 村上 2005e; 村上 2005f、図2）。

2000年代には気象研究所では利根川ダム統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年度から2002年度）を実施し、人為的に氷晶数濃度を増加することによる雲の微物理構造の変化、それに引き続く降水過程の変化を観測用航空機（MU-2、ダイヤモンドエアサービス；B200、中日本航空）を用いて調べた。その結果、数100個 L^{-1} の氷晶を人為的に導入することによって微物理構造は劇的に変化し、降水能率・総降水量・降水の場所・タイミングが大きく変化することが確認された（Murakami et al., 2007）。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）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を整備し（B200T、ダイヤモンドエアサービス、図3）、寒候期のドライアイスシーディング、暖候期の吸湿性粒子シーディングによるシーディング効果を解明するとともに

に、シーディング効果に影響を与える大気中（バックグラウンド）エアロゾルの物理化学特性および雲核・氷晶核特性を測定した。雲の微物理構造との比較から、雲核・氷晶核として働くエアロゾルの間接効果に関する実証的データも取得した(村上ほか 2015; 斎藤ほか 2015、図4)。

気象研究所ではさらに世界最先端の雲チャンバーを製作し、大気中の様々なエアロゾルからの氷晶形成過程を、さまざまな大気状態をシミュレートすることにより調べている (Tajiri et al. 2013)。航空機観測とこのような室内実験を組み合わせることにより、航空機観測で得られた知見（特にエアロゾルの氷晶形成過程）の確認と一般化研究の実施が期待される。



図1. 雲微物理測定器および雲レーダを搭載したDASのGII 航空機

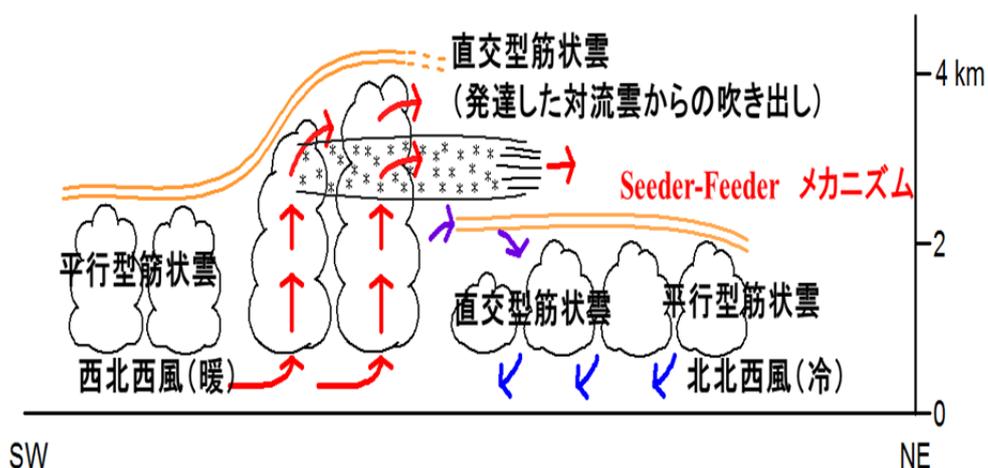


図2. G-IIからの雲・降水の直接観測・雲レーダ観測・マイクロ波放射計観測・ドロップゾンデ観測、Vitatio-V、観測船と特別観測点からの（ドロップ）ゾンデ観測、気象庁レーダ観測・衛星データから得られた日本海寒帯気団収束帯に伴う带状降雪雲の概念図。



図3. 雲微物理測定器を搭載したDASのKing Air 航空機

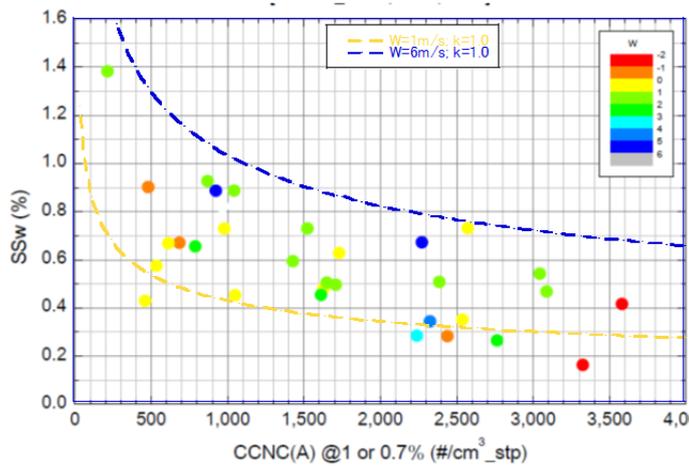


図4. 雲底直下で観測された水過飽和度1.0または0.7%で活性化するCCNC数濃度と雲底直上の上昇流コア中の雲粒数濃度とCCN過飽和度スペクトルから推定した最大水過飽和度の関係. マークの色は雲底高度付近の上昇流速度を表し、寒色ほど上昇流が強い (紺色で 6 m s^{-1}).

(2) 東京大学が中心となった研究

東京大学は2001年に参加したNASA TRACE-P航空機観測以降、NASA ARCTAS (2008)、A-FORCE 2009, 2013W, 2013S 航空機観測などで、エアロゾルの降水による除去過程などに着目したエアロゾル-雲相互作用の研究を行ってきた。これらの研究から、アジアから西太平洋へ輸送されてくるブラックカーボン (BC) やその他のエアロゾル成分の降水除去過程 (Koike et al., 2003; Oshima et al., 2012, 2013; Moteki et al., 2012)、さらには北極へ輸送されるBCの除去過程 (Matsui et al., 2011) などが明らかとなってきた。

2009年に東シナ海および黄海で実施されたA-FORCE 2009航空機観測からは、雲微物理測定装置 (DMT社のCAPSなど) を搭載して本格的なエアロゾル-雲相互作用研究が行われた。A-FORCE 2009では、非降水性の下層雲 (水雲) を対象として、雲低下でエアロゾルの測定をし、雲中で雲微物理量を測定する観測を7フライトの9ケースで実施した。東アジア・西太平洋域では日本も参加したACE-Asia航空機観測で限られたケースでエアロゾルと雲との対応が調べられたが (Adhikari et al. 2005)、A-FORCE 2009の系統的な観測から、エアロゾ

ル数濃度の増加にともない雲粒数濃度が増加していることが初めて確認された(Koike et al., 2012、図5)。

またより詳細な解析の結果、下層大気鉛直安定度の指標として採用した海面水温 (SST) と 950hPa の気温の差 (SST-T950) が大きく、下層大気鉛直安定度が低いほど、同じエアロゾルに対して雲粒数濃度が高いことが明らかとなった。これは SST-T950 が高くなると、SST の大気加熱によって生じる対流において上昇流速が高くなり、その大気中での過飽和度が高まり、より活性化されにくい (一般的により小さな) エアロゾルまで雲粒へと活性化されたためと考えられる。さらにパーセルモデル計算の結果から、エアロゾル数濃度の増加量 (ΔN_a) が同じでも SST が高く上昇流速が大きいほど雲粒数濃度の増加量 (ΔN_c) が大きい ($\Delta N_c/\Delta N_a$ が大きい) ことが分かった。すなわち高い SST はエアロゾルの雲微物理影響を増幅させることがわかった。SST-T950 が高いデータは SST の高い黒潮領域において観測されていた一方、SST-T950 が低いデータは SST の低い黄海上で観測されていた。A-FORCE で観測された春季の黄海・東シナ海には、大陸からの寒気移流がたびたびおこる。この結果、SST の低い黄海においては、SST-T950 が低下する一方、SST の高い黒潮上においては高くなる。この北西季節風は同時に大陸から高濃度の人為起源エアロゾルを輸送する。この結果、エアロゾル濃度の増大と高い SST-T950 の両方の効果により、雲粒数濃度が増大する可能性が示唆された。SST-T950 が高い黒潮上では雲頂高度も高い一方、低い黄海では雲頂高度が低く霧状となっていた。本研究の結果は、下層大気鉛直安定度の指標 SST-T950 により雲のマクロな様相 (雲頂高度、層厚、鉛直積算雲水量) とミクロな雲物理量 (雲粒数濃度) の両方に影響している可能性が初めて明らかとなった (図 6)。

また世界の他地域での観測との比較を実施した結果、A-FORCE-2009において黄海・東シナ海で観測された雲粒数濃度平均値 $650 \pm 240 \text{ cm}^{-3}$ が世界各地の大陸性大気中の平均値 $250 \pm 170 \text{ cm}^{-3}$ と比較して高いレベルにあることを示した。黄海・東シナ海のエアロゾルは比較に用いた他の地域と比べて、エアロゾル総数濃度が高いにも関わらず、エアロゾル全体に対する雲凝結核として働きうる粒径のエアロゾルの割合も比較的大きいという特徴があった。これはエアロゾルの粒径分布の形がより大粒径側の割合が大きくなっていたことを反映するものである。

さらにA-FORCE-2009航空機観測の結果を用いて、エアロゾルによる雲粒数濃度増加に起因する雲アルベド変化と放射強制力 (Twomey効果) を推定した。人為的なエアロゾルの増加により 25°N - 35°N かつ 125°E - 135°E の範囲の水雲の雲粒数濃度が雲層の全高度で一様に増加したと仮定すると、雲のアルベドは $11.3 \pm 0.5\%$ 増加し、 $-4.7 \pm 0.2 \text{ W m}^{-2}$ の放射強制力が働いていると見積もられた。

A-FORCE 2013S (2013年7月) では、仙台沖の黒潮続流域において海洋研究開発機構の観測船との同時観測を実施し、海洋前線帯のSSTの急激な変化に対する雲の応答などが調べられた。また同観測では、地球の放射収支に重要な役割を果たしている北海道東方沖 (北西太平洋) の下層雲の観測も実施された。北海道東方沖の下層雲は人工衛星の画像で見ると

比較的一様に見えるが、実際には降水をしている場所としていない場所があるなど、ダイナミックに時空間的に変動している様子うかがえた。また航空機からの直接観測で得られた雲粒数濃度と人工衛星MODISの3.7 μm チャンネルから得られた情報を使って計算された雲粒数濃度は、比較的良好に一致していることがわかった（図7）。これは人工衛星観測の検証として航空機からの直接観測が有効であることを示す一方、航空機観測と人工衛星観測の両方を使ってエアロゾル・雲・降水の様相を調べたり、数値モデル計算の検証が行えることなどを示すものである。

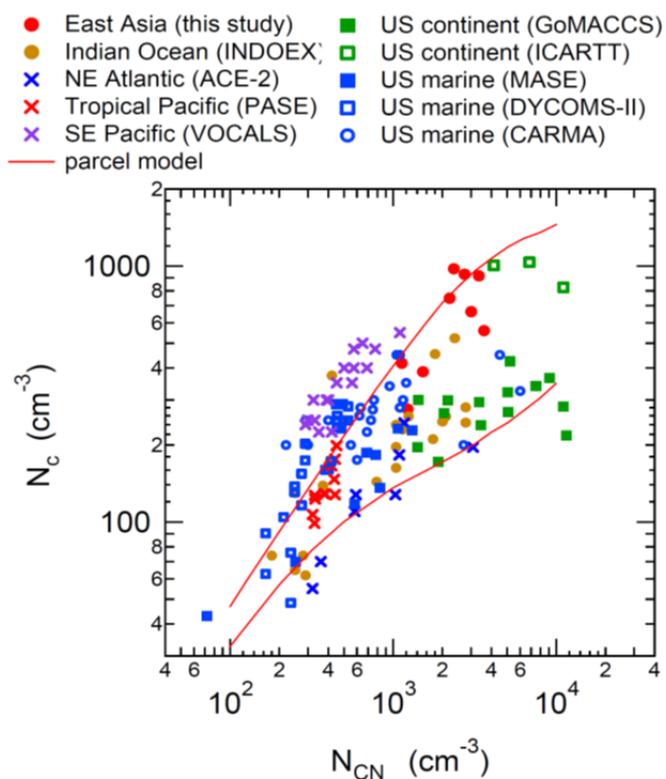


図5. A-FORCE-2009において黄海・東シナ海で観測された雲粒数濃度（平均雲粒数濃度）と全エアロゾル数濃度（直径10 nm以上）を、世界各地の観測と比較した結果。2本の赤線は上昇流速100 cm s^{-1} （上側）と10 cm s^{-1} （下側）の時のパーセルモデル計算結果。

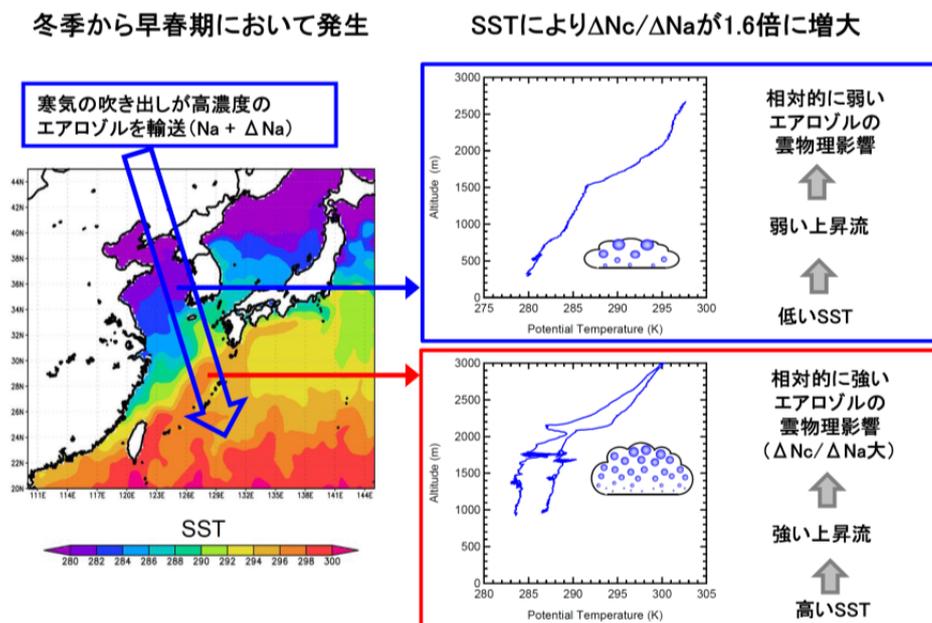


図6. 冬季から春季での大陸からの北西季節風による雲物理量への影響。高い濃度の人為的エアロゾルの輸送と、寒気の吹き出しによる黒潮上での大気最下層の鉛直安定度の低下が、黒潮上の雲粒子数濃度を効果的に増大させている。エアロゾル数濃度の増加に対する雲粒子数濃度の増加割合 ($\Delta N_c/\Delta N_a$) は、SSTが高い黒潮上で高い。西太平洋に特徴的な高いSSTが雲のマクロな様相（雲頂高度、層厚、鉛直積算雲水量）とミクロな雲物理量（雲粒子数濃度）の両方に影響している可能性を示している。

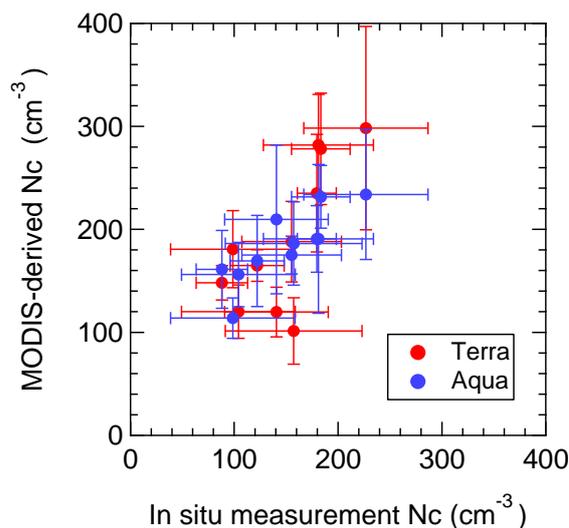


図7. A-FORCE-2013Sにおける航空機からの直接観測と、MODIS人工衛星からの雲粒子数濃度の推定値の比較。MODISの観測データは、中島孝氏（東海大学）と永尾隆氏（JAXA）提供。

参考文献

- Adhikari, M., Y. Ishizaka, H. Minda, R. Kazaoka, J. B. Jensen, J. L. Gras, and T. Nakajima, Vertical distribution of cloud condensation nuclei concentrations and their effect on microphysical properties of clouds over the sea near the southwest islands of Japan, *J. Geophys. Res.*, *110*, D10203, doi:10.1029/2004JD004758, 2005.
- Koike, M., Y. Kondo, K. Kita, N. Takegawa, Y. Masui, Y. Miyazaki, M. W. Ko, A. J. Weinheimer, F. Flocke, R. J. Weber, D. C. Thornton, G. W. Sachse, S. A. Vay, D. R. Blake, D. G. Streets, F. L. Eisele, S. T. Sandholm, H. B. Singh, and R. W. Talbot, Export of anthropogenic reactive nitrogen and sulfur compounds from the East Asia region in spring, *J. Geophys. Res.*, *108(D20)*, 8789, doi:10.1029/2002JD003284, 2003.
- Koike, M., N. Takegawa, N. Moteki, Y. Kondo, H. Nakamura, K. Kita, H. Matsui, N. Oshima, M. Kajino, and T. Y. Nakajima, Measurements of Regional-Scale Aerosol Impacts on Cloud Microphysics over the East China Sea: Possible Influences of Warm Sea Surface Temperature over the Kuroshio Ocean Current, *J. Geophys. Res.*, *117*, D17205, doi:10.1029/2011JD017324, 2012.
- 斎藤篤思ほか, 2015 : 航空機によるIN観測, 「人工降雨・降雪研究の最前線」(村上正隆, 藤部文昭, 石原正仁 編), 気象研究ノート, 231, (出版予定) .
- Matsui, H., Y. Kondo, N. Moteki, N. Takegawa, L. K. Sahu, Y. Zhao, H. E. Fuelberg, W. R. Sessions, G. Diskin, D. R. Blake, A. Wisthaler, and M. Koike, Seasonal variation of the transport of black carbon aerosol from the Asian continent to the Arctic during the ARCTAS aircraft campaign, *J. Geophys. Res.*, *116*, D05202, doi:10.1029/2010JD015067, 2011.
- Moteki, N., Y. Kondo, N. Oshima, N. Takegawa, M. Koike, K. Kita, H. Matsui, and M. Kajino, Size dependence of wet removal of black carbon aerosols during transport from the boundary layer to the free troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L13802, doi:10.1029/2012GL052034, 2012.
- Murakami, M., Y. Yamada, T. Matsuo, K. Iwanami, J.D. Marwitz and G. Gordon, 2003: The precipitation process in convective cells embedded in deep snow bands over the Sea of Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, *81*, 515-531.
- 村上正隆, 2005a : 降雪雲の航空機観測—背の低い降雪雲のアンサンブル平均—, 気象研究所技術報告第48号「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」, 101-108.
- 村上正隆, 2005b : 種々の降雪雲の降水(雪)機構種々の降雪雲の降水(雪)機構—筋状降雪雲種々の降雪雲の降水(雪)機構—, 気象研究所技術報告第48号「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」, 152-161.
- 村上正隆ほか, 2005c : 航空機による混合層及び筋状対流雲の発達過程の観測, 「メソ対流系」(吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之 編), 気象研究ノート, 208, 53-64.

- 村上正隆ほか, 2005d : 航空機による日本海寒帯気団収束帯帯状降雪雲の内部構造観測, 「メソ対流系」(吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之 編), 気象研究ノート, 208, 53-64.
- 村上正隆ほか, 2005e : 航空機による日本海ポーラーローの内部構造観測, 「メソ対流系」(吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之 編), 気象研究ノート, 208, 53-64.
- 村上正隆ほか, 2005f : 梅雨前線に伴う降水雲の航空機観測と数値実験, 「メソ対流系」(吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之 編), 気象研究ノート, 208, 53-64.
- Murakami, M., N. Oriyasa, M. Hoshimoto, K. Kusunoki, M. Seki, and A. Ikeda, 2007: Recent Japanese activities in weather modification research, 9th WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMP-No.44.
- 村上正隆ほか, 2015 : 航空機によるバックグラウンドエアロゾル・雲核・雲粒観測, 「人工降雨・降雪研究の最前線」(村上正隆, 藤部文昭, 石原正仁 編), 気象研究ノート, 231, (出版予定) .
- Oshima, N., Y. Kondo, N. Moteki, N. Takegawa, M. Koike, K. Kita, H. Matsui, M. Kajino, H. Nakamura, J. S. Jung, and Y. J. Kim, Wet removal of black carbon in Asian outflow: Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) aircraft campaign, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JD016552, 2012.
- Oshima, N., M. Koike, Y. Kondo, H. Nakamura, N. Moteki, H. Matsui, N. Takegawa, and K. Kita, Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 13,175–13,198, doi:10.1002/2013JD020262, 2013
- Tajiri et al., A Novel diabatic-expansion-type cloud simulation chamber, *J. Meteor. Soc. Japan*, 91, 687-704, 2013.

2. 6. 集中豪雨・台風

2. 6. 1. はじめに

雲・降水システムや台風を対象として航空機観測を行う目的は、相互に関連しあう以下の2点に集約される。一点目は雲・降水システムや台風というメソスケールの気象現象、および雲物理過程の理解を進めることである。そのためには、雲・降水システムや台風内部とその周辺域（以下、大気環境場と称する）における気流場、温湿度場の観測が必要である。また、雲・降水システムや台風内部の雲微物理場（雲・降水粒子の3次元分布）についての観測も必要である。

二点目は航空機観測の結果を用いることによる天気予報（数値予報）の改善である。中緯度の総観規模現象に伴う気象現象については数日間にわたる予報が可能となっているものの、梅雨期から夏季の大雨や台風の予報は現時点でも困難である。この点については、日本の南側の海上における現業観測点が不足していることによるものであるとの指摘がある（Kato et al. 2003）。今後、数値予報の改善において、日本の南側の海上における気象観測の影響を見積もるためにも、航空機観測は有効な手段であると考えられる。そのためには、一点目と同様に、雲・降水システムや台風内部と大気環境場における気流場、温湿度場の観測が必要である。さらに、これらの観測結果を観測と同時に地上に送信するデータ伝送技術の開発も必要である。二点目については、数値実験の結果から、天気予報の精度に大きな影響を及ぼす観測領域（図 2.6.1 のターゲット域）を見出し、その領域で集中的に観測を行うという「最適観測法」が提案されており、その実証実験が行われるようになっている。

上空の物理量を高精度かつ高密度に観測するのは、航空機観測でなければ難しいことが多く、とりわけ、洋上では他の手法で良質のデータを得ることが難しい。現象の理解および防災実証研究の観点から、航空機を用いた観測の実施は必要不可欠である。

2. 6. 2. 過去の観測事例

以下に、これまでに日本が主体的に実施した雲・降水システムや台風を対象とした航空機観測の事例を示す。

(1) WMO 日本海航空機観測

2001年冬季に日本海上で雪雲を対象として気象庁気象研究所の村上正隆博士の主導により実施された航空機観測である。既に2.5節で記述されているため、本節では詳しく記述しない。

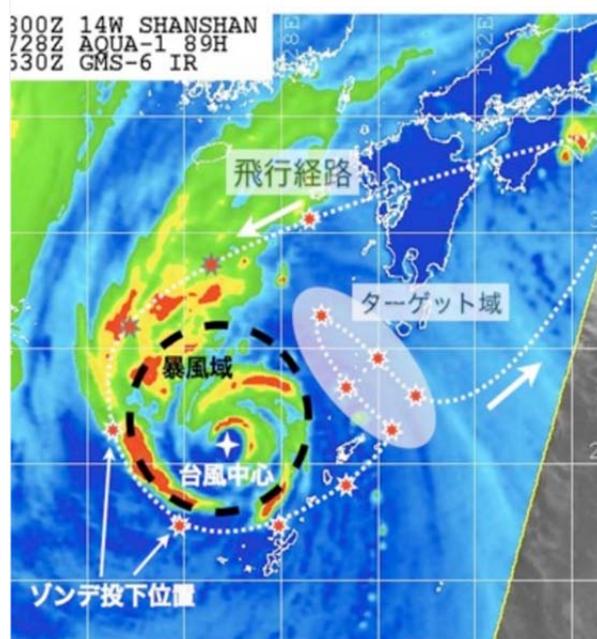


図 2.6.1. 台風を対象とした最適観測法の概念図。最適観測法では、ターゲット域と呼ばれる、天気予報の精度に大きな影響を及ぼすと考えられる領域で集中的に観測を行う。得られた観測データを天気予報に利用することによって予報精度の改善が期待される。

(2) 東シナ海航空機観測

2004 年と 2005 年の梅雨期に東シナ海上で梅雨前線を対象として名古屋大学地球水循環研究センターの上田博教授の主導により実施された航空機観測である。この航空機観測は Moteki et al. (2004a, b)により提唱された、梅雨期に東シナ海上に存在する複数の収束線（水蒸気前線）の存在を観測により確認することを目的として行われた。これらの複数の収束線が重なり合う時に大雨がもたらされると考えられる (Moteki et al. 2004a)。この航空機観測では、計画立案の段階で明確にすべき対象を「水蒸気前の存在を観測により示す」という形で明確化できたことが有効であったと考えられる。

この観測では、航空機を用いて東シナ海上の対流圏下層（高度 500 m）を前線を横切って一定高度で飛行し、気流場、温湿度場の変化を確認する。その後、対流圏上層（高度 12000 m）より収束線の上にドロップゾンデを投下し、気団の鉛直プロファイルを得るというものである（図 2.6.2）。航空機観測の結果、想定通り、梅雨前線と水蒸気前線を確認することができた（図 2.6.3, Moteki et al. 2006, Maeda et al. 2008）。航空機観測の結果より、水蒸気前線は太平洋高気圧に伴う海洋性の湿潤気塊と西側の中国大陸から侵入してくる大陸性の湿潤気塊の境界面であることを確認した。また、境界面には雲列が存在していることも目視で確認した。

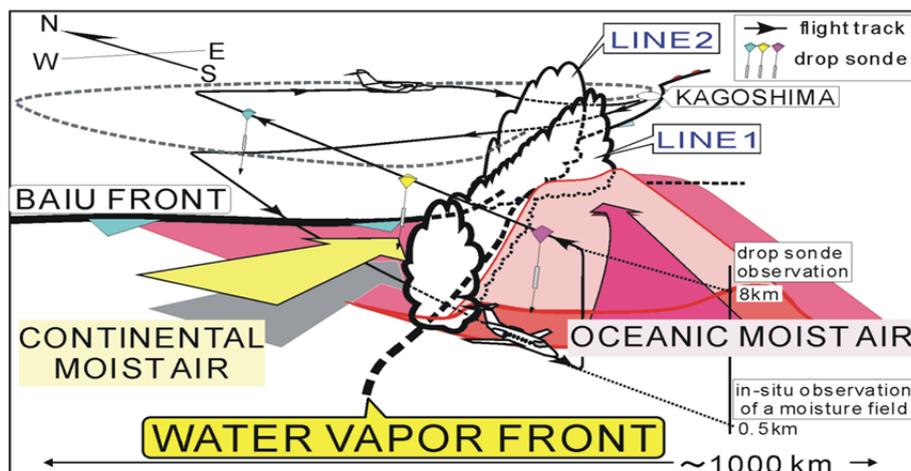


図 2.6.2. 東シナ海上における梅雨前線を対象とした航空機観測の計画 (名古屋大学上田博教授の好意による)。

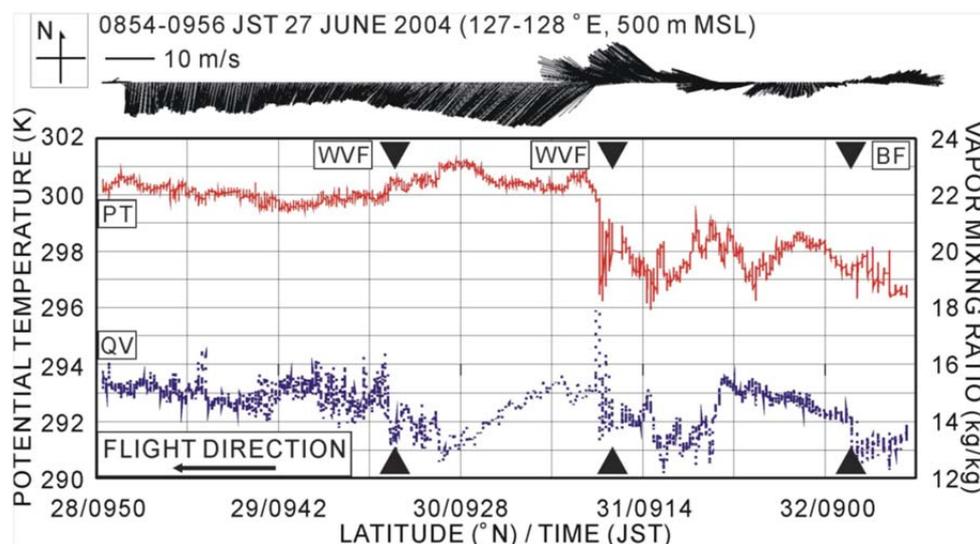


図 2.6.3. 2004 年 6 月 27 日に実施された高度 500 m におけるレベルフライトで取得された水平風 (上部の線)、気温 (赤実線)、水蒸気混合比 (青点線) を示す (Moteki et al. 2006 より)。

本観測では、航空機観測の計画を立案する際に、雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS: Tsuboki 2008) を用いてシミュレーション (予報) 実験を実施し、観測予定時刻における梅雨前線や収束域の位置を想定して、飛行計画を立案した。現在、名古屋大学地球水循環研究センターでは、この観測の時の手法を踏襲・改良して、日本周辺域を

対象とした毎日のシミュレーション実験を実施している。この数値実験の結果を解析することで、顕著現象の発生時に様々な気象要素を迅速に検討できるようになっている。

(3) 西太平洋における航空機観測

2002年から2010年にかけて、西部熱帯太平洋のパラオ共和国コロール空港を基地として、海洋研究開発機構の城岡竜一チームリーダーにより主導された航空機観測が実施された。船舶や地上のレーダとの同期や数値モデルとの連携に重点を置いて、航空機を用いてドロップゾンデ観測を行うことで、台風や季節内変動を構成する降水システムの内部構造や海洋上の境界層変動の理解を目指したものである。

2002年12月と2004年3月には、海洋地球研究船「みらい」の定点観測と同期し、レーダを搭載した船舶からの指示に基づいてドロップゾンデの投下点を決定することにより、メソスケールの降水システム周辺の大気環境場や大気境界層内の水蒸気変動をとらえることを目指した。観測結果より、台風縁辺に発生した雲バンド周辺の大気環境場を捉え、数値モデルとの比較からその構造を明らかにした (Ushiyama et al. 2006)。また、情報通信研究機構の雲レーダと国立環境研究所のライダーを同時に搭載し、フェリーフライトと観測フライトでの異なるミッションを試みた。測器の動作可能温度帯とドロップゾンデを投下する最適高度との関係により、全てを同期させた観測を行うことは難しかったものの、個別にデータを取得することができた。この経験に基づいて、その後、ドロップゾンデ単体の観測を行うこととなった。

2005年6月には、パラオ共和国に設置されたドップラーレーダを活用し、地上レーダからの指示によるドロップゾンデ観測を実施し、観測データの同化インパクト (Moteki et al. 2007) や北進する降水システムの構造 (Moteki et al. 2008) を明らかにした。

2008年6月と2010年6月には、台風の発生過程を対象として航空機観測を実施した。全球雲解像非静力モデル Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM: Satoh et al. 2008) による準リアルタイム予報実験と連携したフライトプランの構築を行ったが、観測可能期間が短く、観測期間内の観測実施機会が少なかったため、熱帯低気圧を観測することはできなかった。これらの観測では、熱帯低気圧とは異なる構造をもつ渦状擾乱や、孤立した降水システム周辺場の観測を実施し、数値モデルとの比較を行った。

これら一連の航空機観測の実施により、海外の空港における機体のハンドリングや、複数の航空管制領域にまたがるフライトプランの立案、現象に即応した飛行経路の変更等のノウハウを蓄積することができた。今後、熱帯海洋上で刻々と変化する降水システムや台風を対象とした航空機ドロップゾンデ観測の実施には、これらのノウハウが必要不可欠である。

(4) 台風の最適観測法

台風は、ゲリラ豪雨や地震・火山噴火と同様、国民の生命、財産に甚大な被害を及ぼす自然現象の一つであり、過去には伊勢湾台風や室戸台風など数千人規模の犠牲者を出した台風が存在する。2015年9月には、2つの台風に伴う継続的な水蒸気の流入により関東・東北地方で大雨が発生し、各地に大きな爪痕を残した。一方、地球温暖化に伴い2013年にフィリピンを襲った台風T1330(Haiyan)のようなスーパー台風が今後日本に上陸する可能性が指摘されている。このような背景の中、台風による壊滅的な被害を回避、軽減するためには、台風の正確な予測情報が重要であり、なかでも高精度の台風進路予測が必須である。

台風進路の予測精度は、数値予測システムの高度化により年々着実に向上している(山口2013)。しかし、今日の数値予測技術を持ってしても、3日予測で1000km程度の誤差(東京-鹿児島間の距離に相当)が生じてしまう予測の難しい台風が存在する。このような、台風進路の予測誤差の軽減を目指し、最適観測法と呼ばれる研究が提案されている(Yamaguchi et al. 2009)。最適観測法は、数値予測システムを使った感度解析によって、予測精度向上に効果の高い観測領域を割り出し、その領域で集中的に観測を行う技術であり、次世代の数値予測システムとして提案されている。

従来の天気数値予測システムは、観測→データ同化→数値予測→ユーザー利用という、観測からユーザー利用までが一方向のシステムである。一方、次世代の数値予測システム(双方向型気象予測システム(図2.6.4, 余田2007))では、観測からユーザー利用にわたる従来型の予測に加えて、1) ユーザーが特定する大気現象に対して大きな予測誤差をもたらす領域(高感度領域と呼ぶ)を推定し、2) 高感度領域内で機動的に集中観測を行い(最適観測と呼ぶ)、3) その新たに得られた観測データを利用して再度数値予測を行う。高感度領域における観測データをデータ同化に追加して利用することにより、より高精度の予測結果を期待することができる(図2.6.5)。

台風を対象とした最適観測法の有効性を調査するために、T-PARC (THORPEX Pacific Asian Regional Campaign, Nakazawa et al. 2010, 中澤2013)と呼ばれる日本が主導した国際研究計画のもと、2008年に航空機による台風の機動観測が行われた。航空機観測で得られた台風周辺のドロップウィンドゾンデデータ(風、気温、水蒸気などの観測データ)を利用して台風進路予測を行った場合、データを使用しなかった場合と比べて予報誤差が20~40%程度減少する事例が存在した。また、予報誤差の減少の割合は、使用するデータ同化手法によって異なることが分かり(Yamashita et al. 2010)、航空機観測データを最大限に活用するためには、数値予報システム開発との有機的な連携が重要であることが明らかとなった。

T-PARCにおいて、台風の最適観測法の有効性を確認できたものの、まだ十分な実績を積んでいる訳ではない。最適観測法による次世代の数値予測システムの有効性を実証するためには、感度解析手法に関する基礎研究と、更なる研究観測の積み重ねが必要である。また、将来の地球温暖化時のスーパー台風の日本を含む東アジア諸国への上陸に備え、台風

の進路に加えて、台風の強度や降水量などの予報精度を改善するための技術基盤を確立することも喫緊の課題である。

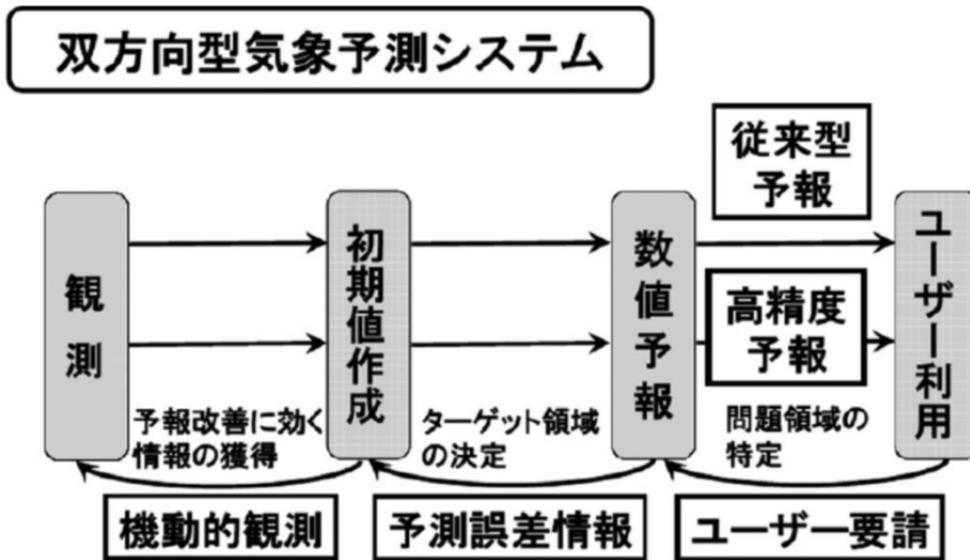


図 2.6.4. 次世代予報システム、双方向型気象予測システムの概念図(余田 2007)。

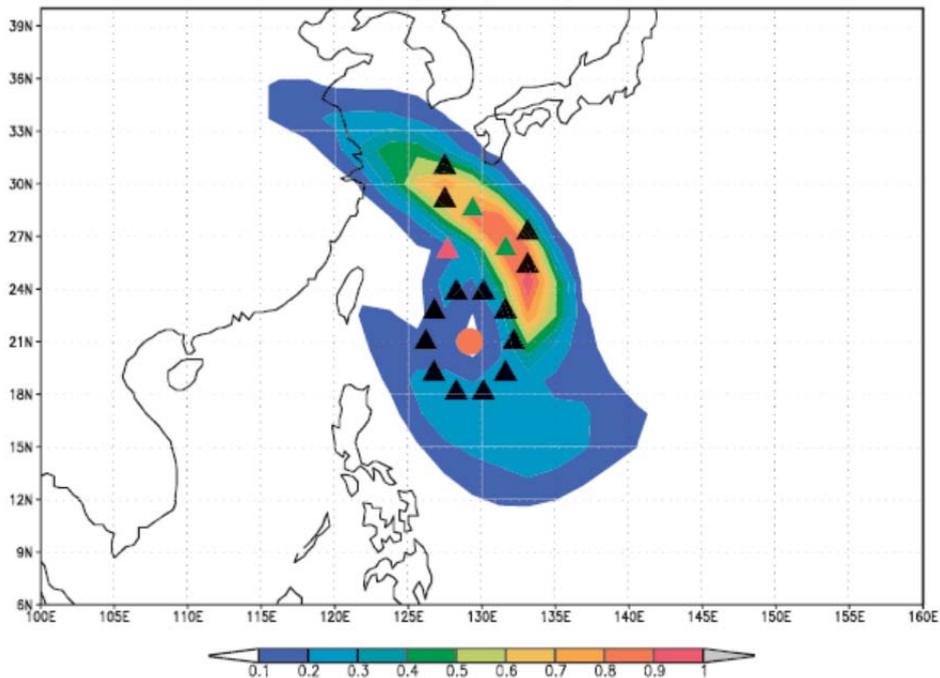


図 2.6.5. 感度解析結果とそれに対応する航空機のフライトプランの例(余田ほか、2008)。彩色部は2007年7月12日00UTCの台風第4号(台風中心位置は赤丸)を対象に感度解析を行った結果で、暖色系がより感度が高いことを表している。赤三角は沖縄でフライトプランを設計する際に想定した航空機の離着陸ポイントである。黒三角がドロップゾーンの投下位置を表す。緑三角は名瀬と南大東島で高層気象観測の定常観測地点を表す。

参考文献

- Kato, T., M. Yoshizaki, K. Bessho, T. Inoue, Y. Sato, and X-BAIU-01 observation group, 2003, Reason for the failure of the simulation of heavy rainfall during X-BAIU-01 -Importance of a vertical profile of water vapor for numerical simulations-. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 993-1013.
- Maeda, S., K. Tsuboki, Q. Moteki, T. Shinoda, H. Minda and H. Uyeda, 2008: Detailed structure of wind and moisture fields around the Baiu frontal zone over the East China Sea. *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, **4**, 141-144.
- Moteki, Q., H. Uyeda, T. Maesaka, T. Shinoda, M. Yoshizaki, and T. Kato, 2004a: Structure and development of two merged rainbands observed over the East China Sea during X-BAIU-99 Part I: Meso- β -scale structure and development processes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 19-44.
- Moteki, Q., H. Uyeda, T. Maesaka, T. Shinoda, M. Yoshizaki, and T. Kato, 2004b: Structure and development of two merged rainbands observed over the East China Sea during X-BAIU-99 Part II: Meso- α -scale structure and build-up processes of convergence in the Baiu frontal region. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 45-65.
- Moteki, Q., T. Shinoda, S. Shimizu, S. Maeda, H. Minda, K. Tsuboki, and H. Uyeda, 2006: Multiple Frontal Structures in the Baiu Frontal Zone Observed by Aircraft on 27 June 2004. *SOLA*, **2**, 132-135.
- Moteki, Q., R. Shirooka, K. Yoneyama, B. Geng, M. Katsumata, T. Ushiyama, H. Yamada, K. Yasunaga, N. Sato, H. Kubota, K. K. Reddy, H. Tokinaga, A. Seiki, M. Fujita, Y. N. Takayabu, M. Yoshizaki, H. Uyeda, and T. Chuda, 2007: The impact of the assimilation of dropsonde observations during PALAU2005 in ALERA. *SOLA*, **3**, 97-100.
- Moteki, Q., R. Shirooka, H. Kubota, T. Ushiyama, K. K. Reddy, K. Yoneyama, M. Katsumata, N. Sato, K. Yasunaga, H. Yamada, B. Geng, M. Fujita, M. Yoshizaki, H. Uyeda and T. Chuda, 2008: Mechanism of the northward propagation of mesoscale convective systems observed on 15 June 2005 during PALAU2005. *J. Geophys. Res.*, **113**, D14126, doi:10.1029/2008JD009793.
- Nakazawa, T., K. Bessho, S. Hoshino, T. Komori, K. Yamashita, Y. Ohta, and K. Sato, 2010: THORPEX – Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC), *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **12**, 1-4.
- 中澤哲夫, 2013: 最適観測法. 気象研究ノート 台風研究の最前線(下), **227**, 1-14.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic isosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comp. Physics*, **227**, 3486-3514.

- Tsuboki, K., 2008: High-resolution simulations of high-impact weather systems using the cloud-resolving model on the Earth Simulator. K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds., *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, Springer, 141–156.
- Ushiyama, T., R. Shirooka, T. Chuda, H. Kubota, S. Iwasaki, J. Chen, K. Takeuchi, and H. Uyeda, 2006: An isolated cloud band around a typhoon in the western tropical Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L12808.
- Yamaguchi, M., T. Iriguchi, T. Nakazawa, and C.-C. Wu, 2009: An observing system experiment for Typhoon CONSON (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2801-2816.
- Yamashita, K., Y. Ohta, K. Sato, and T. Nakazawa, 2010: Observing-system experiments using the operational NWP system of JMA, *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **12**, 29-44.
- 山口宗彦, 2013: 台風の進路予報. 気象研究ノート 台風研究の最前線(下), **227**, 15-35.
- 余田成男, 2007: THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画), 天気, **54**, 156-162.
- 余田成男・中澤哲夫・山口宗彦・竹内義明・木本昌秀・榎本剛・岩崎俊樹・向川均・松枝未遠・茂木耕作・三好建正・新野宏・斉藤和雄・瀬古弘・小司禎教, 2008: 日本における顕著現象の予測可能性研究, 天気, **55**, 117-126.

3. 研究計画

3. 1. 研究計画概要

これまで日本は個別の研究グループが競争的資金などにより航空機観測を実施し、大きな研究成果をあげてきた。しかし研究資金の不足等により体系的な観測が実施されてこなかったために、アジアは依然として航空機観測の空白域となっている。また予算の性質上、ある程度の予算と期間を必要とする測定装置の開発は不十分な状態である。本研究では、10年間という長期的なスパンの中で、どのような測定器により、どのような航空機観測を実施し、どのような研究成果があがるかが期待されるかの検討を行った。

航空機からの直接観測の最大の利点は、大気中のマイクロ量、すなわち温室効果気体の濃度、エアロゾルの数濃度や化学組成、雲・降水粒子の数濃度や大きさを測定する唯一の手段であるということである。気候変動プロセスはこれらのマイクロ量に依存している。人工衛星観測は基本的に高度方向に積分されたマクロ量しか測定できない。本研究ではこれらのマイクロ量を体系的に測定し、これら気候システム・地球システムの鍵となる物理・化学量の実態を把握する。そして数値モデルが表現するマイクロ量とそのプロセスを検証・改良することにより、気候変動予測の精度向上や地球システムの統合的理解を目指す。

1) 温室効果気体

二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4)、亜酸化窒素 (N_2O) などの温室効果気体の将来の濃度変動予測のためには、現在の収支の理解が必要である。本研究ではアジアにおいて、これらの成分の各場所・高度での季節変化・経年変化を観測し、地上の放出・吸収量を逆計算（インバージョン）法で定量化する。さらにこれらの温室効果気体の放出・吸収源の情報を持つ同位体比や CO_2 の収支に密接に結びついた O_2 濃度の広域観測を実施し、定量の高精度化を実現する。アジアは地上濃度測定（トップダウン法）と収支観測（ボトムアップ法）での CO_2 収支推定の不一致が大きい。その最大原因は収支推定に用いられる三次元輸送モデルでの地表面（境界層）から上空（自由対流圏）への輸送過程（ CO_2 の鉛直フラックス）の不確定性である。従来の研究により航空機による境界層と自由対流圏観測がこの不確定性を大きく改善できることが示されているため、アジアでの体系的な航空機観測により、 CO_2 を含む温室効果気体の収支推定精度を格段に向上させる。アジアは急激な発展により人為排出源が増加しており、同領域での体系的な観測に基づく収支解明やその手法の確立は、世界的に重要な研究成果となると期待される。

このためにこれまでの観測技術に基づき、航空機搭載型の多成分濃度連続測定装置や質量分析計などの革新的な装置の開発を 2-4 年で行う。そしてアジアに設定した観測エリアにおいて、多成分の濃度や同位体比観測を繰り返し、インバージョンにより放出・吸収量を得る。さらに多くの成分をトレーサーとして、対流圏・成層圏大気交換についても明らかとする。

2) 対流圏オゾン

対流圏オゾンは、大気環境・大気化学の鍵となる物質であり、越境大気汚染の主要成分である。光化学スモッグ注意報・警報もオゾン濃度（オキシダント濃度）が基準となっており、陸上植生にも被害を与える。このような対流圏オゾンの動態理解と将来予測のためには、オゾンとその前駆気体（窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素類など）の時空間分布を航空機観測により把握するとともに、オゾンの化学的生成・消失の中核をなす HOx ラジカル（OH、HO₂ ラジカル）の反応系の理解が不可欠である。特に近年、東アジアからの前駆物質の排出が著しく増加し、大気汚染が越境～半球規模へと広域化しており、気候への影響の観点から重要である。

本研究では航空機からの HOx 測定を目指す。同時に窒素酸化物や揮発性有機化合物などを測定することにより、HOx ラジカルの化学反応系を明らかとし、HOx の南北半球の濃度差予測と間接的観測の不整合性問題や、海洋生態系起源の臭素・ヨウ素などのハロゲン類の役割を解明する。また温室効果気体やエアロゾル研究と同様に、東アジアから西太平洋への人為起源物質の輸送過程を明らかとし、東南アジア・南アジアへの発生源の拡大やバイオマス燃焼域の変化などの影響を定量化する。また次世代衛星センサーによるオゾンなどの大気成分観測の測定器開発や検証のためにも航空機観測の果たす役割は大きい。

3) エアロゾル

エアロゾルの直接効果・間接効果の不確実性を低減させるために観測研究に求められている事は、(i)光学・雲凝結核・氷晶核特性を支配する個々の粒子の微物理・化学特性の観測手法を確立し、(ii)微物理・化学特性と、光学特性などの間の理論・実験的關係を実大気で実証し（クロージャー研究）、(iii)重要な微物理・化学特性をできるだけ多くの場所・季節において対流圏全高度範囲に渡り観測することである。

直接効果に関わる放射クロージャー研究においては、特に放射強制力の大きな不確定要因となっているブラックカーボン（BC）などの光吸収性エアロゾルの微物理特性と光学特性を観測し両者を物理法則により関係づける（ローカル放射クロージャー）研究と、太陽からの直達および拡散放射フラックス測定と関係づける（積算放射クロージャー）研究を、航空機観測で実施する。BC は CO₂、CH₄ について 3 番目に大きな正の放射強制力を持ち、またアジアは BC の大発生源となっている。さらに現在の気候計算に使用されているエアロゾルモデルと地上放射観測とにおいて、BC などの光吸収量にはグローバル平均で 3 倍もの不整合性がある。本研究では BC（物質）とその光学特性（放射効果）の同時観測により、その不整合性の原因を明らかとする。

また間接効果に関わるエアロゾルの吸湿・雲凝結核・氷晶核特性に関しては、エアロゾルの化学組成との対応づけをするクロージャー研究を実施する。航空機搭載型のエアロゾル吸湿特性測定装置を開発し、アジアの多様なエアロゾルについてそのクロージャーを体系的に明らかとする。さらにこれらのエアロゾルの光学特性や雲凝結核・氷晶特性に関わ

る大気中での物理化学的変容過程を明らかとするために、航空機からのラグランジュ的なエアロゾルサンプリング観測を実施する。

さらにこれら大気中のエアロゾルが、陸上植生や海洋によりどのようにコントロールされ、また人為的な影響がどのようにおよんでいるのかを、多圏相互作用・地球システム科学的な観点から研究する。

これらの研究で得られると期待される知見は世界共通の普遍的なものであり、世界最先端のこれらの研究によりエアロゾルの気候影響評価に大きな貢献ができると期待できる。

4) エアロゾル・雲・降水相互作用

エアロゾル-雲相互作用の大きな不確定性には、(i) エアロゾルによる水雲の雲微物理量の変化が引き起こす雲層厚・雲量などのマクロな物理量への影響、(ii) エアロゾルの氷晶核特性と氷晶形成（雲微物理量）への影響、そして(iii) エアロゾルの氷晶形成による氷雲・混合雲（mixed-phase cloud）のマクロな物理量への影響がある。

本研究では(i)について、気候影響で重要な役割を果たしていると考えられているにも関わらずほとんど観測されてこなかった北西太平洋の下層雲の変動要因などを、航空機からの直接観測と、航空機に搭載された雲レーダーなどのリモートセンシングの同時観測という世界でもほとんど例のない観測により明らかとする。また(i)-(iii)に関連して、アジア大陸で排出された多量の人為的エアロゾルや黄砂が、春季の東シナ海・日本海・西太平洋の移動性擾乱に伴う雲・降水システムに与えている影響を評価するとともに、前線帯でのエアロゾルの上方輸送・降水除去過程を明らかとする。さらに人工雲核・人工氷晶核の航空機からのシーディングによる意図的気象改変実験により、エアロゾルの変動に対する雲・降水システムの応答を明らかとする。

アジアは人為的エアロゾル濃度が世界的に見ても高濃度でありダスト粒子も多く存在するため、エアロゾルの影響が強く出ている可能性がある。またアジアモンスーンなど様々な気象場で雲・降水システムが形成されるため、将来予測に必要な気象の多様性がある。航空機観測からの詳細な微物理観測と人工衛星からの広域観測とを組み合わせることにより、エアロゾルの雲のミクロな影響とマクロな影響の関係を明らかとする。これらのメカニズムを数値モデル計算に反映させる。これらの統合化研究により、エアロゾル-雲相互作用の定量化について画期的な研究成果が得られると期待できる。

5) 集中豪雨・台風

雲・降水システムや台風を対象として航空機観測を行う目的は、雲・降水システムや台風というメソスケールの気象現象と雲物理過程の理解の推進、および台風などの顕著現象の予測精度向上の可能性を検討するための基礎研究である。そのために既存の雲微物理量などの直接測定器に加え、航空機搭載ドップラーレーダや偏波レーダなどの次世代レーダの開発が必要である。また複数のドロップゾンデの同時観測を可能とするシステム、

雲粒子ゾンデ、放射計、水蒸気ライダー、投下型海洋観測機器などの開発・整備も必要である。

本研究ではこれらの観測装置を用い、沖縄ー台湾ーフィリピンーパラオープログラムで囲まれる領域での台風の観測を行う。急発達する台風の大气（海洋）環境場をドロップゾンデを用いて観測する。可能であれば台風内部の雲・降水粒子の分布を雲粒子ゾンデを用いて観測し、台風の急発達における雲物理過程の寄与を明らかにする。また将来的には次世代レーダを使った観測も実施する。台風・ハリケーン観測で実績のある台湾やアメリカとの共同研究として実施する。また集中豪雨研究においては、日本に南から移流される水蒸気量を観測し、その影響を定量化する画期的な研究を試みる。

これら5つの研究課題の共通する点は以下の通りである。

第1に、10年間という長期の研究が可能となることにより、それぞれ新しい観測装置の開発・導入を目指している。新しい測定器は研究のブレークスルーをもたらす可能性がある。航空機観測は人工衛星観測と比較して、測定器の開発とその試験にかかる時間が短い。そのため、新しい測定器の開発と新しいサイエンスのフィードバックが働くものと期待される。これも航空機観測を競争的資金で実施するのではなく、継続的に航空機というプラットフォームが使用可能であることによる重要な利点である。航空機搭載偏波レーダのように本研究予算の中ではカバーしきれない測定器の開発もあるが、これも継続的な航空機の利用が可能となれば、メーカーとの連携により別途開発が進むことが期待される。このような様々なフィードバックサイクルにより、若手研究者の育成も進むと期待される。

第2に、アジアが人為的な影響を強く受けているという特殊性を生かした研究となっている。これらの研究はアジアという固有の環境場・気象場での研究ではあるものの、その核となる普遍的な原理の解明とその手法の確立を目指したものとなっている。またアジア大陸から西太平洋や自由対流圏への物質輸送は多くの課題で共通したテーマであり、化学物質をトレーサーとするなどにより、統合的・相補的な観測研究も可能となると期待される。

第3に、航空機観測と人工衛星観測、数値モデル計算とが連携・統合した研究を目指している。気候システム研究のひとつの共通目標は、気候システムモデルの高度化である。経験的ではなく物理化学法則に基づいたパラメタリゼーションの開発・導入のために、航空機観測は鍵となる物理量を提供し、メカニズムの解明をもたらすことが期待される。また航空機観測とともに数値モデル計算の検証に用いられる人工衛星観測の検証にも資する。航空機観測で観測可能な時間・空間は限られたものである。人工衛星観測、数値モデル計算とを統合した観測計画が不可欠である。

最後に、特に個別の課題で触れられてはいないが、本研究で得られる観測データはデータベース化し、広く世界の研究者に有効利用してもらうことが必要である。研究者が簡便

に検索、アクセスできる場所にデータベースを整備し、航空機観測の時間、場所、観測項目、精度といったメタデータと共にアーカイブする予定である。

3. 2. 温室効果気体

3. 2. 1. 概要

人間活動によって大気中に大量に放出されている二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) 等の温室効果気体の将来の濃度変動予測を可能にするためには、まず現在の地球表層における収支を定量的に明らかにする必要がある。そのためには、大気中の温室効果気体濃度の季節変化および経年変化を高精度で観測し、それらを再現する地上の放出・吸収量を逆計算 (インバージョン) 法で定量化する方法が行われるようになってきた。更に、これらの温室効果気体の放出・吸収源の情報を持つ同位体比や CO₂ の収支に密接に結びついた O₂ 濃度の広域観測も実施されつつある。

また、温室効果気体が大気中で化学的に比較的安定であることや、独自の放出源・吸収源情報を持っていることを利用して、これらをトレーサーとして用いることにより、空気塊の起源を探る研究も行われている。

以上を踏まえて、観測用航空機を用いた温室効果気体の観測として以下の提案を行う。

3. 2. 2. 観測装置

我々は、新たに導入が計画されている航空機に以下の装置を搭載する予定である。既存の観測装置に加えて、計画 1 年目と 2 年目に新たな装置の開発も行う。

(1) 二酸化炭素濃度連続測定装置 (CME)

CONTRAIL プロジェクトで実際に稼働している装置である。民間航空機に搭載するための厳しい耐空検査を通過しており、観測専用機についても搭載許可の取得が容易であると考えられる。また、観測実績も豊富であり、確実にデータを取得することができると期待される。観測項目は CO₂ 濃度のみである。

(2) 自動大気サンプリング装置 (ASE)

CME と同様に CONTRAIL プロジェクトで使用している機器であり、搭載承認の取得や観測の確実性について問題が少ない。CO₂ 以外の温室効果ガスの濃度や同位体比の観測にも利用可能であるが、一度のフライトで 12 地点の観測を行うのが限度である。

(3) 多成分濃度連続測定装置 (MME)

キャビティリングダウン分光分析計および燃料セル型酸素濃度計を航空機用に改造した装置であり、CO₂ と CH₄ および O₂ の濃度の連続測定が可能である。改良型として N₂O や一酸化炭素 (CO) の濃度、さらには CO₂ の安定同位体比を連続測定できるモデルも選択できる。これまで航空機に搭載した実績がないために、開発と機能試験に 2 年ほどの時間が必要と見込まれる。また、必要に応じて O₃ 計の搭載も行う。

(4) 改良型サンプリング装置

ASEと同様の機能であるが、多くのサンプリング容器（フラスコ）を搭載する。新たな装置であるが、構造はフラスコとポンプおよびバルブだけであり、開発と搭載許可の取得は比較的容易である。

（５）航空機搭載型質量分析計

同位体測定用質量分析計を航空機用に改造した装置であり、大気主要成分の窒素および酸素の同位体比や窒素・酸素比（ O_2 濃度）などの連続測定が可能である。実験室では高精度測定が実現しているが、航空機に搭載可能な小型質量分析計を改造し、実験室と同程度の性能を確保するために、3-4年程度の開発期間が必要になると考えている。

3. 2. 3. 観測計画

（１）アジアにおける温室効果気体放出源・吸収源の定量化のための観測

（現状）アジアにおける急激な経済発展に伴う人為排出源増加の定量化や、世界の中でも未知な熱帯林や湿地帯などの自然発生源・吸収源からのフラックス定量化は世界の注目度が極めて高い。

（アプローチ）近年発達が著しい光学的連続測定装置を航空機観測に応用し、 CO_2 のみならず、 CH_4 や N_2O の連続観測を行い、これまでにない規模で詳細に大量の時空間データを取得する。さらにサンプリング法によってこれらの気体の同位体比観測も同時に行い、得られたデータをインバージョンモデルに適用することにより、それぞれの温室効果気体のフラックスを推定する。

（国際的プレゼンス）これまでの実績を考えれば、アジア域で航空機を用いた温室効果気体観測を高頻度で行えるのは日本だけであり、極めて価値の高いデータが取得できる。また、日本の民間航空機による温室効果気体の観測はすでに世界を大きくリードしているので、これらのデータを有機的に結合すれば他の追随を許さない信頼度の高いフラックス推定ができる。アジアの環境問題を責任持って解明するのは日本の役割であり、国際的な信頼の向上につながる。

1-1) 観測頻度

最低でも季節変動を捉えるために年に4回の観測を行う。温室効果気体以外の観測キャンペーンの際にも可能なかぎり観測予定領域に立ち寄ってもらい、データ取得を行いたい。なお、近年では大気輸送モデルを用いたデータ同化法による解析によって温室効果気体の放出・吸収源を推定することが可能になってきた。季節変動を捉えたデータに比べると推定の拘束力は弱いと考えられるが、上空の観測値は極めて限られているため、できるだけ多くのデータを取得しておくことが重要である。

1-2) 観測候補地

- ・これまでの民間航空機を利用した観測ではカバーされていないアジアの領域

1-3) 搭載する観測装置

- ・定期観測には、CME、MME、ASE および改良型サンプリング装置
- ・他のキャンペーンとの相乗り観測では、CME、MME

(2) アジア・アウトフローの立体観測

(現状) 温室効果気体のトップダウン推定を行う上で、最も不確定性が大きいものの1つが境界層から自由対流圏への輸送過程である。また、アジアからの温室効果気体や汚染物質の大陸間輸送は世界でも注目度が高い。

(アプローチ) 温室効果ガスの多成分連続観測、オゾンやCOなど汚染関連物質の連続観測を行う。特にこれまでほとんど観測例がない前線付近の断面観測による Warm Conveyor Belt の輸送メカニズムや、地上観測や定期航空路観測で押さえられていない中部自由対流圏での集中観測による大陸間輸送メカニズムの解明を行う。

図1はHIPPOで観測されたCO₂濃度の南北断面観測データの例である。米国のHIPPO計画のように航空機で対流圏内を上昇・下降しながら南北面のカーテン状観測を行う。HIPPOのような北極から南極までの広域断面の観測は行わないが、HIPPOでは観測できなかったアジア域での断面観測を行うことが特徴である。

(国際的プレゼンス) アジア大陸と太平洋の境界に位置する日本はアウトフロー研究を行う上で極めて有効な地域であり、高頻度観測も可能で、質の高い観測ができる。前線の断面観測は世界でもほとんど例がなく、中部対流圏の観測は3次元輸送モデルの検証データとして世界から多くの利用が見込まれる。

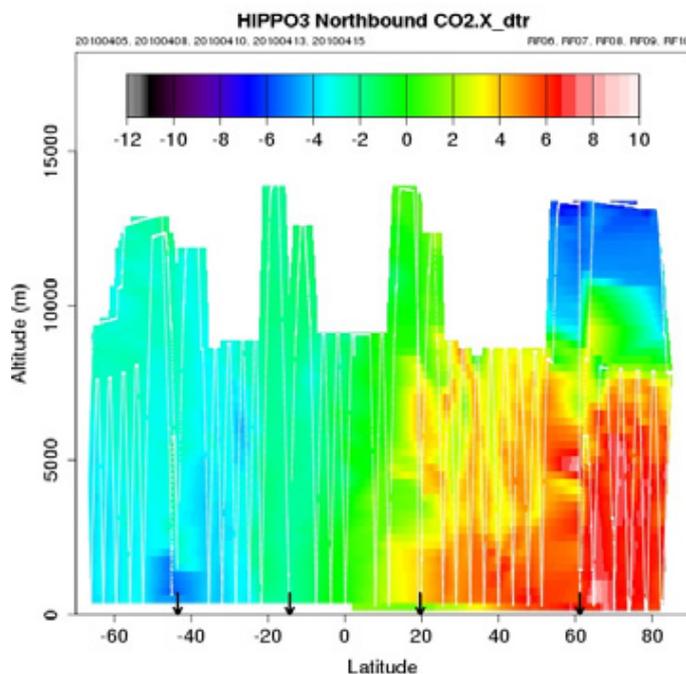


図1. HIPPO 航空機観測で得られたCO₂濃度の緯度—高度分布

2-1) 観測頻度

大規模な観測であるので頻度の高いフライトは見込めないが、年を跨いだとしても春・夏・秋・冬の4つの季節をカバーすることが重要と考えられる。

2-2) 観測候補地

・大陸の outflow を捉えるために、日本海北部から東シナ海を経て南シナ海まで

2-3) 搭載する観測装置

・CME、MME、ASE および改良型サンプリング装置

(3) 成層圏・対流圏空気塊交換の観測

(現状) 全球の大気循環を理解する上で成層圏・対流圏交換は極めて重要であるが、未知の部分が多く、大気力学の分野でも注目度が高い。

(アプローチ) CO_2 、 SF_6 、 CH_4 、 N_2O は大気輸送のトレーサーとして極めて有効であり、特に CO_2 と SF_6 は成層圏大気の age トレーサーとして活用されている。また、航空機に質量分析計を搭載できれば、大気主要成分の窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) や酸素同位体比

($\delta^{18}\text{O}$)、 O_2/N_2 比、 Ar/N_2 比などを現場分析することが可能となる。

(国際的プレゼンス) アジアモンスーン地域は成層圏流入の活発な領域であり、世界の他の地域では観測し得ない成層圏・対流圏交換の事実を解明できる。特に、 CO_2 や SF_6 の観測は、Brewer-Dobson 循環の年々変動やトレンドを検出できる可能性があり、気候変動に伴う全球循環の検証という画期的な成果につながる。また、大気主要成分の現場観測が実現すれば、下部成層圏における重力波の砕波や各種混合過程で重力分離がどう反応するかなど全く新しい研究が可能になる。

3-1) 観測頻度

CME および MME は常設装置として航空機に搭載し、大気観測のみならず全てのフライトでデータを取得する。得られたデータは空気塊の起源を知るためのデータ解析に利用する。

3. 3. 反応性気体

CO₂、メタンに次ぐ第3の温暖化気体である対流圏オゾンや、直接効果・間接効果により気候へ影響するエアロゾル粒子のうち微小なものの大部分は、大気中で化学反応により二次的に生成したものと考えられている。したがって、それらの原料となる前駆物質(NO_x、揮発性有機化合物、一酸化炭素など)の発生源の分布、前駆物質およびオゾンやエアロゾルの大気中での3次元分布、生成・消失の化学反応・物理過程を一連のものとして総合的に把握することが重要である。とくに近年東アジアでは経済発展に伴い前駆物質の排出が著しく増加し、大気汚染が越境～半球規模へと広域化しており、気候への影響の観点からも重要視されている。しかしながら、産業活動や農業、自然の発生源(森林火災等)に由来する排出の実態、対流圏化学反応で中核をなすHO_xラジカル(OH, HO₂ラジカル)の反応系(図1)などについては理解が十分でなく、正確な現状把握や将来予測を阻んでいる。航空機観測は高度分布を正確に把握できる点で優れており、地上定点観測のスケールを、衛星観測等のより大きなスケールへ結びつける役目も果たす。オゾンは上部対流圏に存在するほど気候影響が大きいとされるなど、存在高度毎に役割が異なる場合もある。このような反応性気体の過程やインパクト理解の向上のために資する観測計画を以下に述べる。

■OH, HO₂を中心とする対流圏光化学理論の検証とオゾン化学

大気環境中でのOH, HO₂濃度の変動とその生成・消失過程を理解することは大気化学現象解明の根底となる。その際、地表付近から上部対流圏まで、あるいは都市域からリモート地域まで、NO_x・揮発性有機化合物等の濃度が変化するあらゆる物理化学環境中での動態把握が必要となる。このような大気酸化能の変動を捉えることは、オゾン生成だけでなく、二次エアロゾル生成速度を理解するうえでもきわめて重要である。OH濃度は1pptv以下と超微量であり、寿命も1秒以下に達するなど、測定は非常に困難であるが、国際的な航空機観測実績、国内でも地上設置型の測定装置開発実績がある(Kanaya et al., 2007 など)。

現在の理論に基づくと、OHの平均濃度は北半球のほうが南半球より2割程度高いと推測されるが、トレーサー(メチルクロロホルム)の収支解析では両半球で差がないこと(Patra et al., 2014 など)が示唆され、北半球では未知のHO_x消失過程が存在するのではないかと考えられているが、特定されていない。オゾン、一酸化炭素、非メタン炭化水素、NO_x/NO_y、水蒸気、J値、エアロゾルなど、ラジカル化学に関わることが知られる、または可能性がある化学種・パラメータを総合観測し、ラジカル収支を解析し、未知過程に関する仮説を検証する。OHの消失過程の理解を向上させるOH反応性の測定も重要となる。HO_x化学の良いトレーサーとなる過酸化水素の3次元分布を把握することも意義が大きい。人間活動の影響が大きいアジアの都市域から、大陸のアウトフローまで、HO_xの挙動は十分知られていない。例えば2000年以降ボトムアップ推計からは一酸化炭素(CO)濃度の増加トレンドが予測されるが、実大気中(太平洋縁辺地域)ではほぼ横ばいであり、OHに支配される消失項

の変動の影響を受けている可能性もある。また、森林大気は近年注目される系の1つであり、VOC濃度が高く、NO_x濃度が低い環境中においてHO_x濃度に理論との差が大きく、未知の反応の存在が示唆されている。

対流圏化学反応理論の検証を通じて、オゾン生成の理解度（正味生成速度・制御因子）を高めることが重要である。NO_xとVOCのどちらがオゾン生成速度の制限因子となっているか、また、化学種が多様なVOCについて、地域・季節毎に、人為起源・自然起源のどちらがオゾン生成に強く影響しているかを理解し、「コントロール可能な」オゾン量を把握することは重要であり、前駆物質の総合観測を通して解明することが求められている。

対流圏オゾン収支の消失項には、海洋生態系などを起源とする臭素・ヨウ素などのハロゲン類が関与している可能性があるが、それらの発生源分布や存在量は極めて未知であり、その寄与は解明されていない。BrO, IOなどを差分吸収などの原理に基づいて測定する装置を開発し、その3次元分布や発生メカニズムを把握することは重要である(Saiz-Lopez and von Glasow, 2012)。産業革命以前に記録された低オゾン濃度を説明するメカニズムは依然として不明であり、ハロゲン化学や、HO_xのエアロゾル粒子上不均一反応による消失等の理解を向上させる必要がある。

航空機観測では、その場の空気を吸引し分析する測定器に加え、到達する太陽散乱光や地表面反射光を用いたリモートセンシングも有効である(Baidar et al., 2013など)。放射伝達を考慮することにより、航空機の到達範囲よりも水平・鉛直方向に広い領域の情報を取得することができる(例：図2)。紫外可視分光からは、NO₂, HCHO, CHOCHO, BrO, IOなどの微量気体の情報が導出できる。

また近年、有機エアロゾルの二次生成には、揮発性有機ガスがOHラジカルと反応して、低揮発性成分が多段階的に生成していく「エイジング過程」が重要であると考えられるようになり(Robinson et al., 2007など)、エアロゾル生成に対して気相の光化学が果たす役割は、硫酸塩・硝酸塩の生成以上に大きいことが知られつつある。オゾン化学に加えてエアロゾルに関する過程解明のためにも、気相成分の動態に関する正しい理解をもつことは前提として重要となっている。

■反応性微量気体と輸送場の相互作用

アジアモンスーンや深い対流現象は、オゾンや反応性微量気体の水平・高度分布を大きく変化させ、放射収支の変動やそれを介した化学気候相互作用を生みだしていると考えられるが、理解が進んでいない。とくに、東南・南アジア地域の人口増に伴う農業・工業の拡大やバイオマス燃焼は、地表面からの前駆物質排出の拡大をもたらしていると考えられており、化学・輸送過程を介して気候にもたらす影響を明らかにする必要がある。対流圏オゾンの成層圏からの流入や成層圏・対流圏交換過程、およびそれらの気候変動との相互作用についても十分な理解は得られていない。これらの過程理解のために、起源毎のトレーサーや前駆物質の総合的な観測が重要と考えられている。

■オゾンの間接的な温暖化影響

オゾンは紫外可視光・赤外線吸収による直接的な温室効果を示すだけでなく、植生へのダメージを引き起こし CO₂ 吸収能を弱める「間接的な温暖化影響」をもつと考えられる。その影響は直接効果を上回るとする報告(Sitch et al., 2007)もあるが、定量的には理解されていない。オゾン濃度の森林上での変動を、植物の光合成の指標となるクロロフィル蛍光などと合わせて繰り返し計測し、地上観測(フラックス計測を含む)や衛星観測の併用によって時空間的に情報を補完することで、間接的な温暖化影響の定量的な評価に貢献することが期待される。

■衛星やリモートセンシングの検証

次世代の衛星センサからの対流圏大気組成観測では、複数の波長帯における同一分子(オゾンや一酸化炭素など)の吸収(たとえば紫外可視と赤外)の解析を組み合わせることにより、波長ごとに存在高度に対する感度が異なることを利用して、高度分布を導出することが計画されている。このような新しい衛星プロダクトに対して、高度分布の真値を与えることができるのは航空機観測の使命の一つである。また、地上からのライダー計測や MAX-DOAS 法などのリモート計測でも NO₂, エアロゾル光学的厚さ等について高度分布が導出されるようになり、同様に航空機観測による検証が重要となる。これらを総合し、従来「カラム量」でしか議論できなかった成分について、高度分布の情報を加味したうえで、大気化学や気候に対する影響の評価を進めることは重要である。

また、技術的な面でも、衛星データの向上のために、航空機によるガス・エアロゾル同時計測は有意義である。衛星観測による対流圏 NO₂ カラム濃度の決定には、光路を攪乱するエアロゾルの存在量・存在高度や光吸収特性が影響しうるが、現在の衛星観測解析アルゴリズムではエアロゾルの効果は雲と同様に取り扱われ、エアロゾルそのものの効果が陽に表現されていない。航空機によるエアロゾル・ガスの高度分布同時観測を実施し、衛星観測の解析法を評価し、適正化していくことも重要な戦略となる。

参考文献

- Baidar, S., Oetjen, H., Coburn, S., Dix, B., Ortega, I., Sinreich, R., and Volkamer, R.: The CU Airborne MAX-DOAS instrument: vertical profiling of aerosol extinction and trace gases, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 719-739, doi:10.5194/amt-6-719-2013, 2013.
- Kanaya, Y., R. Cao, H. Akimoto, M. Fukuda, Y. Komazaki, Y. Yokouchi, M. Koike, H. Tanimoto, N. Takegawa, Y. Kondo, Urban photochemistry in central Tokyo: 1. Observed and modeled OH and HO₂ radical concentrations during the winter and summer of 2004, *J. Geophys. Res.*, 112, D21312, doi:10.1029/2007JD008670 (2007).

Patra, P. K., M. C. Krol, S. A. Montzka, T. Arnold, E. L. Atlas, B. R. Lintner, B. B. Stephens, B. Xiang, J. W. Elkins, P. J. Fraser, A. Ghosh, E. J. Hintsa, D. F. Hurst, K. Ishijima, P. B. Krummel, B. R. Miller, K. Miyazaki, F. L. Moore, J. Mühle, S. O'Doherty, R. G. Prinn, L. P. Steele, M. Takigawa, H. J. Wang, R. F. Weiss, S. C. Wofsy, D. Young, Observational evidence for interhemispheric hydroxyl parity, *Nature*, 513, 219-223, 2014.

Robinson, A. L., N. M. Donahue, M. K. Shrivastava, E. A. Weitkamp, A. M. Sage, A. P. Grieshop, T. E. Lane, J. R. Pierce, and S. N. Pandis, Rethinking organic aerosols: Semivolatile emissions and photochemical aging, *Science*, 315, 1259-1262, 2007. Saiz-Lopez, A. and R. von Glasow, Reactive halogen chemistry in the troposphere, *Chem. Soc. Rev.*, 41, 6448-6472, 2012.

Sitch, S., P. M. Cox, W. J. Collins, and C. Huntingford, Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink, *Nature*, 448, 791-794, 2007.

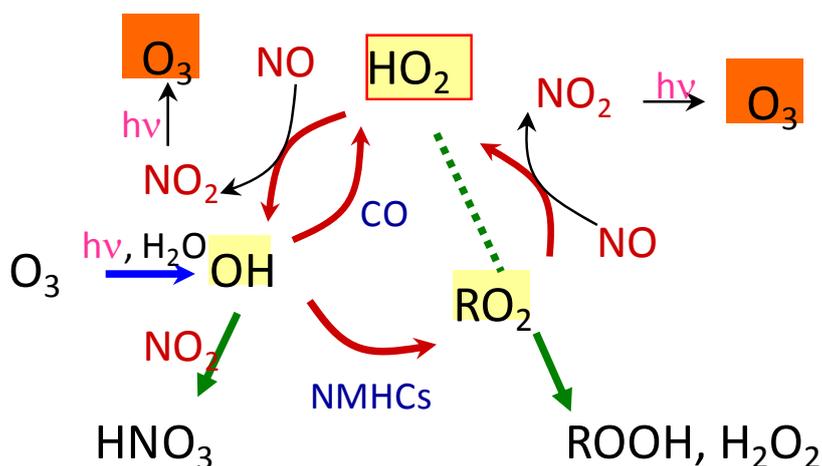


図1. OH, HO₂ ラジカルを中心とする対流圏光化学理論と、その連鎖反応によるオゾン生成メカニズム。これらの反応系には描かれていない未知過程が潜んでおり、あらゆる大気物理化学環境中での検証が求められている。

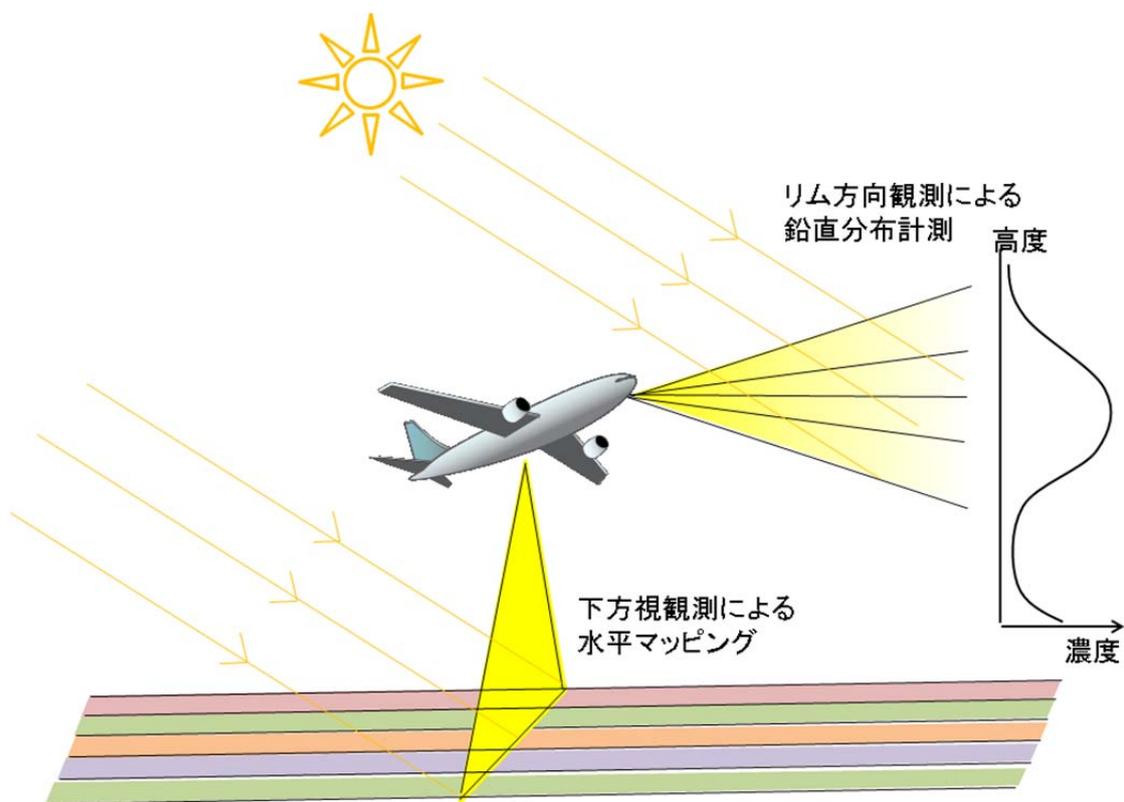


図 2. 航空機からのリモートセンシング計測による NO_2 等の物質濃度の水平マッピング、鉛直分布計測の模式図。

3. 4. エアロゾル

エアロゾルの直接効果・間接効果の不確実性を低減させるために求められている事は、(i)光学特性・CCN 活性・IN 活性を支配する個々の粒子の微物理・化学特性の観測手法を精緻化し、(ii)微物理・化学特性と、光学特性・CCN 活性・IN 活性の間の相関関係を実大気で実証し、(iii)本質的な微物理・化学特性をできるだけ多くの場所・季節において対流圏全高度範囲にわたり観測することである。これらの観測的知見が得られて初めて、エアロゾル・雲の数値モデルに実際の物理化学プロセスを組み込み、その計算結果を検証することが可能となる。この目的を達成するため、新たな測定法の開発、航空機を用いたクロージャ研究、様々な場所・季節における航空機観測を行う。この3.4節では、以下の4つのテーマについてのクロージャ航空機観測の構想を述べる。

① エアロゾルの微物理・化学特性の変質過程

航空機で汚染空気塊を追跡し、放出直後から下流域までに個々の粒子の粒径・組成・形状・混合状態・表面の状態が変化する過程を主に電子顕微鏡観察の方法で観測する。下記②の研究課題と連携し、吸湿性・CCN 活性を支配する有機物と無機物の組成・混合状態や、IN 活性を支配する粒子の表面性状を直接観察によって明らかにする。下記③の研究課題と連携し、吸収性エアロゾル(BC, 鉍物粒子, ターボールなど)の光学特性を支配する因子(混合状態・形状)とそれらの変質過程を観測的に解明する。さらに、雲プロセスを経る前後のエアロゾルの比較観測により、現在までほとんど観測的知見のない、雲粒が蒸発することで再生成したエアロゾルの性状を調べ、雲粒内におけるエアロゾルの化学変質過程の詳細を明らかにする。

② エアロゾルの吸湿性・CCN 活性・IN 活性

対流圏全高度域において、エアロゾルの吸湿性・CCN 活性・IN 活性の空間分布とその支配因子である微物理・化学特性との関係を、新たに開発する高い時間分解能の Humidity Tandem Differential Mobility Analyzer(HTDMA)と CCN カウンターを用いて観測する。各々の汚染空気塊を追跡観測し、エイジングによるこれらの特性の変化過程を明らかにする。さらに、雲過程を経る前後の大気中のエアロゾルの吸湿・CCN 活性と、Counterflow Virtual Impactor (CVI)を用いた雲粒・氷粒の中のエアロゾルの同時観測により、どのようなエアロゾルが選択的に雲粒化するのか直接観測し、また雲粒内のエアロゾル変質過程について詳細な観測的知見を得る。

③ 大気微粒子の光吸収量とその成分別寄与

大気微粒子(エアロゾル・雲)の光吸収の支配因子である BC について、光学特性を支配する微物理特性の全てを直接観測(上記①の研究と連携)し、粒子光学計算と光学係数の

直接観測と組み合わせて、全エアロゾルの消散・吸収係数とその中における BC の寄与を解明する。新たに、可視波長帯における BC の複素屈折率の測定装置と、BC 含有粒子の吸湿特性の測定装置（加湿 LII 法）を開発して航空機に搭載する。さらに分光放射計の放射観測結果と放射モデル計算結果を比較することにより、太陽放射波長帯における大気の放射収支と大気微粒子の微物理特性の関連を定量的に解明することを目指す。このクロージャ観測研究により、これまでに切り分けることが困難であった鉱物粒子・BC・有機物の光吸収量の寄与割合を解明する事ができ、リモートセンシング手法や光吸収性エアロゾルの放射強制力のシミュレーションの検証基盤となる。

④ 自然起源有機エアロゾルの化学的同定

有機物は、硫酸塩と並び、直径 $1\mu\text{m}$ 以下のエアロゾルの主要な成分であり、その化学種と物理化学特性は極めて複雑である。有機エアロゾルの生成機構・発生源別寄与・吸湿能を観測的に理解することは、間接効果の大きさを決める雲凝結核数をモデリングするための基礎的知見として重要である。本研究では、特に有機エアロゾルの発生量と濃度の高い東アジア上空における有機エアロゾルの粒径別化学種をカスケードインパクト・液化捕集装置によるオフライン分析、飛行時間型質量分析計によるオンライン分析を組み合わせ、明らかにし、発生源寄与率や、実大気中の生成・変質機構、粒径・組成と雲凝結核（吸湿）能との相関関係を解明することを目指す。

3. 4. 1. エアロゾルの微物理特性の変質過程のクロージャ観測

航空機を用いた大気観測では、1) 発生源から大気に放出されたエアロゾルが大気中で輸送される過程で酸化・光反応等で性質を変化させていくことによって、その気候に対する影響が変化していくプロセスの解明、2) 雲とエアロゾルの上空での実際の反応を観測、などの点において地上観測では得られないデータが得られる。特に、エアロゾル表面でのナノスケールでの反応を直接観測する方法として、航空機で捕集した様々な発生源、濃度、エイジング過程を経たエアロゾル粒子を電子顕微鏡で直接観測する方法がある(図 1)。この分析によって、航空機で捕集されたエアロゾルの表面や内部で生じる混合・化学変化などが解明されることが期待される。

日本周辺の上空は世界で最も大きな人為発生源の一つである中国からのエアロゾル粒子、シベリアなどからのバイオマス燃焼エアロゾル、また黄砂の飛来といった様々な発生源から由来するエアロゾルが輸送され、その観測はエアロゾルが地球気候に与える影響を見積もる上で重要である。特に西日本や日本海・東シナ海上空では発生から比較的時間がたっていないエアロゾル粒子が観測することができ、また東日本や太平洋上空ではそれらのエアロゾル粒子が変質し、長距離移送によって北半球に広がっていく様子が観測できる。ここで、大気中のエアロゾルの気候影響を詳細に見積もるためには、1) それらが移送中の

変質によってどのように変化してその吸湿性（雲凝結核特性）や光学特性（太陽光放射強度）を変化させていくか、2）大気中の変質や雨による除去によってどの程度大気寿命があるかを知ることで地球上のエアロゾル総量を見積もる、などを明らかにすることが重要になる。このように、エアロゾルの地球気候影響を見積もる上で重要な日本上空のエアロゾルを1）発生源近傍、2）大気中に放出されて1-2日程度たったエアロゾル、3）数日から一週間程度たった太平洋上空のエアロゾル、を発生起源やイベントごとに追跡して観測し、粒子表面で起こる酸化、吸湿特性、混合状態変化などの分析を行い、それらの変質過程の理解を得る。また、航空機観測によりエアロゾルの雲との相互作用や拡散・沈降の分布を観測し、そのメカニズムや実際の平均大気寿命を推測することなどが可能である。

電子顕微鏡を用いた分析に焦点を当てると、それぞれの空気塊や異なった変質過程のエアロゾル粒子を航空機観測で採取し、1）どのようなエアロゾルがどの空気塊で存在するかを調べる、2）個別粒子の元素分布を計測することでその粒子変質過程を比較する(図1)、3）個々粒子の混合状態や形態を観測し、ブラックカーボンの光吸収特性についての詳しい解析やエアロゾル混合状態変化が吸湿特性に与える影響を解析する、4）雲の中・下でのエアロゾルの違いを測定し、雲による除去過程を理解する、などが可能である。その結果、エアロゾルの変質過程・大気寿命・光学特性変化などが詳細に理解でき、エアロゾルの気候影響の理解が進むことが期待される。

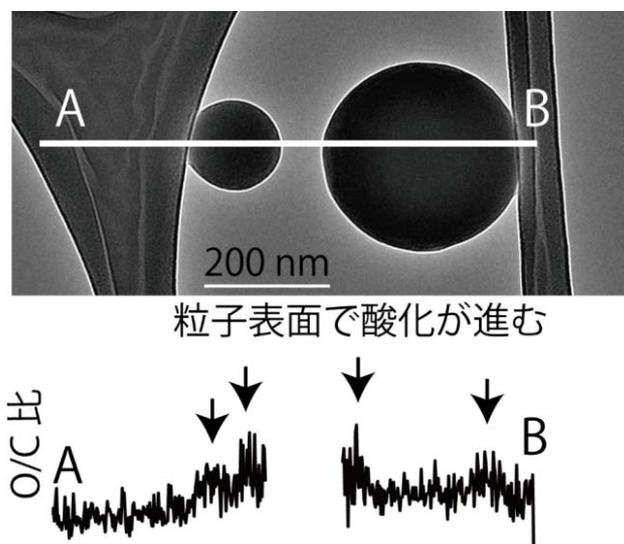


図1. 電子顕微鏡で大気エアロゾル粒子の表面酸化を分析した例。A-Bの線に沿って炭素・酸素比を分析し、球状粒子の表面で酸化が進む様子を示す。

3. 4. 2. エアロゾルの吸湿性・CCN活性・IN活性のクロージャ観測

大気エアロゾルの吸湿性を解明する研究を推進する上で、航空機観測は地上・船舶観測に対して以下の優位性を持つ。まず、輸送過程や、雲水内の化学反応や低温下での半揮発

性物質の凝縮など、地上付近とは異なる過程を経たエアロゾルを観測し得ることや、水雲における粒子の吸湿成長や、粒子の吸湿成長が関与する氷晶形成（凝結凍結・接触凍結・内部凍結において）が生じる現場付近での観測が可能な点が挙げられる。また、高速に移動するプラットフォームであり、大気エアロゾルのエイジングに伴う吸湿性の変化を、速やかに広範囲のサーベイで捉え得る点も挙げられる。ただし、航空機による吸湿性に関する研究は、海外を中心に進んできているものの、現状では地上・船舶観測と比べると豊富な成果を得ているとは言い難い。吸湿成長度を測定する標準的な機器である HTDMA が大型であり、また時間分解能が高くないためか、HTDMA の航空機での運用 (Kaku et al., 2006; Shinozuka et al., 2009 ほか) が少ない点が影響しているといえる。別の手法として、光散乱を利用した吸湿成長測定があるが (Hegg et al., 2006; Sorooshian et al. 2008), 精細な吸湿成長度分布の計測は困難だと考えられ、現状で HTDMA と同程度の能力を有するとはいえない。このように、航空機を利用する粒子吸湿成長の研究は発展途上の段階にある。

このような状況の下、航空機によるエアロゾル吸湿性の研究の重要性・発展性を鑑み、以下の研究を提案したい (図 2)。まず、エアロゾル粒子の吸湿成長度を精細に測定可能で、航空機に搭載し得る大きさ・仕様の計測器の開発・整備を行う。精細な測定のためには HTDMA の計測原理の適用が有望だと考えられ、地上観測用の HTDMA の構成をベースに、小型化と計測の高速化を測る。高速化に関しては、通常の HDMA とは異なり初段の DMA (乾燥条件) の印加電圧を掃引して次段の DMA (加湿条件・1 台~数台) の印加電圧を固定する構成で計測を行い、乾燥粒径・吸湿成長度に対して粒子数濃度のマッピングを行うなどの方法の実現性について検討したい。

続いて、開発した計測器を用いた航空機観測を実施する。都市域などエアロゾルの供給域周辺における水平分布の把握は、エアロゾルの輸送中の変質に伴う吸湿性の変化の解析に結びつくと考えられる。また、雲の上・下部の比較 (Santarpia et al., 2011) により、雲過程に伴うエアロゾルの変質に関する知見も得られると期待できる。更に、化学組成のその場測定や粒子の CCN 活性の計測と組み合わせた観測により、既往の地上・船舶の観測研究と同様に、組成/吸湿性/CCN 活性の関係が明らかになり得る。そのほか、半揮発性物質のガス/粒子分配など、これまで十分に解明されていないエアロゾルの挙動に結びついた吸湿性の特徴についても知見が得られる可能性がある。なお、上述の点はエアロゾルの性状や大気過程に関わるものであるが、エアロゾル組成などの観測との連携により、東アジア域のエアロゾル広域輸送の理解への貢献も期待できる。

さらに、雲内部においてバーチャルインパクト (CVI) を利用して水雲中の雲粒化した粒子と雲粒間粒子のそれぞれの吸湿性を把握することで雲生成過程の詳細を調べる研究への発展も目指す。雲内部の計測で CCN 測定も行うことで、粒子の吸湿性と CCN 活性化の対応を調べることができれば、粒子の表面張力、粒子表面の水の質量適応係数 (速度論的効果)、また雲粒化に伴う化学的変質について手掛かりが得られる可能性がある。また、長期的には、氷晶核の計測を組み合わせ、氷雲内における雲微物理過程の詳細に迫る研究への展開

も視野に入れる。なお、これらの雲内粒子を対象とした観測では高い時間分解能での計測が求められ、目的に対応し得る計測器の開発・整備を推進することが重要となる。

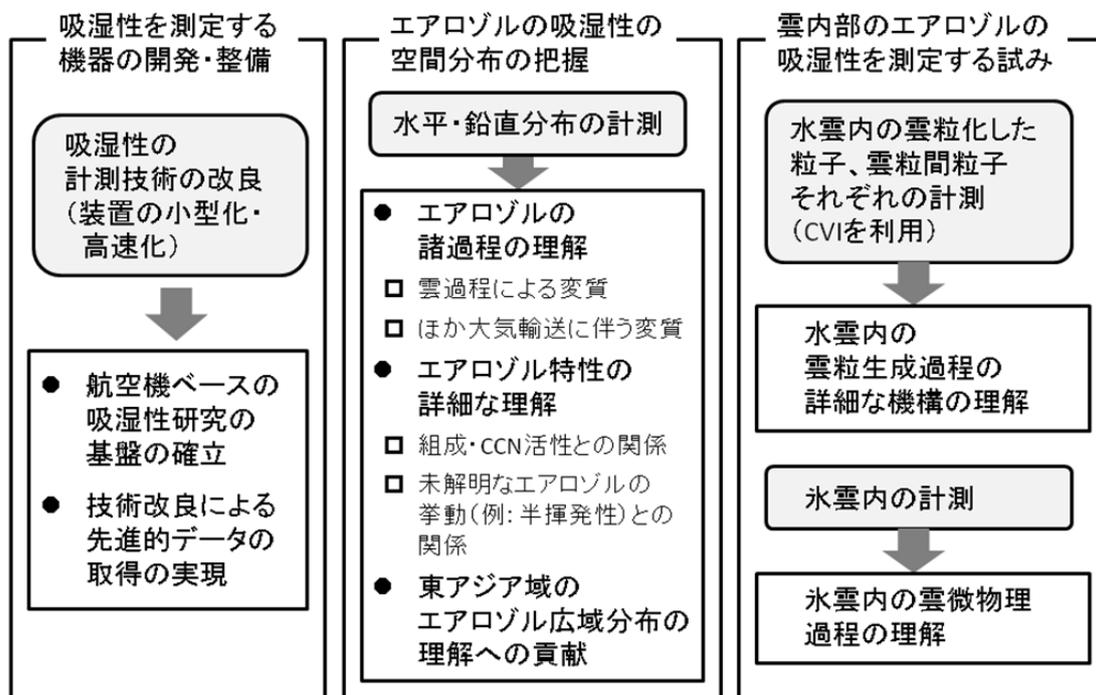


図2. エアロゾルの吸湿性・CCN活性・IN活性のクロージャ観測

3. 4. 3. 大気微粒子の光吸収量とその成分別寄与のクロージャ観測

大気微粒子（エアロゾル・雲）の放射問題の中で重要かつ最も困難なもの1つは、微粒子による太陽放射の吸収量とその成分別寄与の解明である。実大気中の粒子の中で光吸収性の成分は、鉍物粒子、Black Carbon(BC)、光吸収性有機物がある。これらの成分がグローバルにあるいは地域的にどの程度光吸収係数に寄与をしているのかを解明する事が、各々の成分による放射強制力を算出するために必要とされる。特に光吸収はリモートセンシングでは直接観測できないため、光吸収係数とその支配要因を解明するためには、航空機を用いた in-situ 観測と放射観測を同時に行うクロージャ研究が必要である。

今後大型の観測用航空機が利用可能になる場合は、実大気での放射クロージャ観測研究を行うために、エアロゾルの微物理特性（粒径、複素屈折率、混合状態、化学組成、吸湿性）の測定器と、光学係数（消散・散乱・吸収係数）の測定器と、放射量を測定する機外装置を同時に搭載することを検討している（図3）。第一に、主要な光吸収性成分でかつ微物理特性の測定法がほぼ確立されているBCによる吸収係数への寄与を定量的に解明する

ことを目指す。BCの寄与が解明できれば、微物理特性の測定法が確立されていない鉱物粒子や光吸収性有機物の光吸収への寄与の推定の不確実性を大幅に減らす事ができる。

国際的に新しい要素は、新たに開発するBCの複素屈折率を測定する装置と、乾燥状態と加湿状態のBC含有粒子の微物理特性をLII法で測定する装置である。これらのオンライン高速測定と、電子顕微鏡観察を組み合わせることにより、乾燥・加湿状態におけるBC含有粒子の光学計算に必要な微物理特性を把握する事ができる。BCの吸収係数への寄与が粒子光学計算から演繹できるため、乾燥状態においては、吸収係数の測定値からの差分によりBCでない物質（鉱物粒子、光吸収性有機物）による吸収係数への寄与も算出することができる。この観測システムから得られるデータにより、吸収係数だけでなく、散乱・消散係数についても乾燥・加湿状態の各々について成分別寄与を解析することができる。

この航空機観測システムは、地上や宇宙からエアロゾル（とりわけ光吸収性成分）の組成別濃度の空間分布を観測するためのリモートセンシング手法の主要な検証手段となる。リモートセンシングでのみ可能なグローバルな長期観測データは、グローバルモデルの計算結果を検証・補正するために不可欠であるため、本航空機観測システムによるリモートセンシング手法の実大気検証は、エアロゾル（とりわけ光吸収性成分）の気候影響の計算・予測の不確実性を低減させることに本質的に貢献することが期待される。

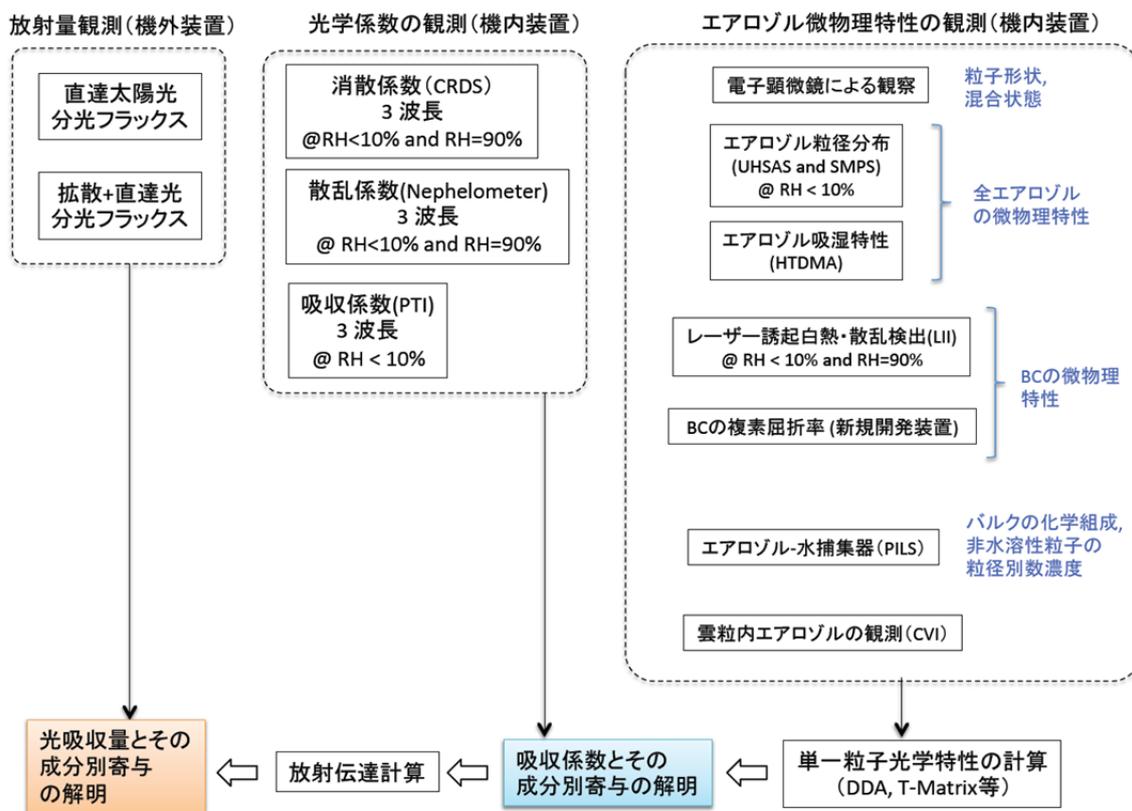


図 3. 大気微粒子の光吸収とその成分別寄与のクロージャ航空機観測

3. 4. 4. 自然起源有機エアロゾルの研究

アジア-西太平洋域は自然起源・人為起源ともに反応性窒素 (NO_x , NH_3) や硫黄 (S) 化合物および自然起源の揮発性有機化合物 (BVOCs) の放出・大気反応による大気化学場への影響が大きいと考えられる。また高い相対湿度はエアロゾル含水量の変化を通して有機物と無機物の液相反応を促進するなど、自然起源有機エアロゾルの生成ポテンシャルは高い。これらは有機エアロゾルの観測フィールドとして世界的にみても高い独自性を有すると云えよう。

航空機観測による清浄な海洋大気上やブルーム上、沿岸域、陸域植生影響の見られる領域上空でのエアロゾル有機物組成、無機物との混合状態の観測、含水量の推定により、エアロゾル個数・質量に対する自然起源の一次放出有機エアロゾル (Primary Organic Aerosol: POA) と BVOCs から生成する二次有機エアロゾル (SOA) の寄与度とその変動支配要因を明らかにすることが重要となる。また、自然起源有機物のエアロゾル液相反応や BVOCs から生成するエアロゾル質量に対する人為起源物質 (反応性窒素、硫酸塩など) の寄与度と組成、BVOCs の反応経路・反応量の変化を通して促進される SOA 生成量を理解することで、将来的な人為起源物質放出量の「制御」によるエアロゾル個数・量の変動把握が可能となる。

航空機による観測手段として、コンパクト ToF-MS 搭載型エアロゾル質量分析計などのオンライン測定と粒子液化捕集装置によるオフライン化学分析や雲水中の有機物組成のオフライン分析などが挙げられる。海洋表層で生成される有機エアロゾルの起源に関する研究では、船舶による大気・海洋化学・海洋生物観測との同時観測も重要である。さらにこれらエアロゾルの自然起源有機物と吸湿特性・雲凝結核能との定量的対応の理解も求められる。

参考文献

- Hegg, D. A. et al. (2006), Measurements of aerosol size-resolved hygroscopicity at sub and supermicron sizes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21808, doi:10.1029/2006GL026747.
- Kaku, K. C., et al. (2006), Organics in the Northeastern Pacific and their impacts on aerosol hygroscopicity in the subsaturated and supersaturated regimes, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4101-4115.
- Santarpia, J. L. et al. (2011), Estimates of aqueous-phase sulfate production from tandem differential mobility analysis,
- Shinozuka, Y. et al. (2009), Aerosol optical properties relevant to regional remote sensing of CCN activity and links to their organic mass fraction: airborne observations over Central Mexico and the US West Coast during MILAGRO/INTEX-B, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6727-6742.

Sorooshian, A. et al. (2008), Rapid, size-resolved aerosol hygroscopic growth measurements: Differential aerosol sizing and hygroscopicity spectrometer probe (DASH-SP), *Aerosol Sci. Technol.*, 42, 445-464.

3. 5. エアロゾル・雲・降水相互作用

3. 5. 1. 概要

エアロゾル・雲相互作用では下記の課題の解明が必要である。

- (1) エアロゾルによる水雲の雲微物理量の変化が引き起こす雲層厚・雲量などのマクロな物理量への影響
- (2) エアロゾルの氷晶核特性と氷晶形成（雲微物理量）への影響
- (3) エアロゾルの氷晶形成による氷雲・混相雲（mixed-phase cloud）のマクロな物理量への影響

このような背景から、本研究では以下の課題を研究目的とする。

- (1) 地球の放射収支に重要な夏季の北西太平洋の下層雲（水雲）へのエアロゾルの影響を、雲や境界層の時空間的構造や物理過程・力学過程を含めて理解し、放射収支への影響を明らかとする。
- (2) アジア大陸で排出された多量の人為的エアロゾルや黄砂が、春季の東シナ海・日本海・西太平洋の移動性擾乱に伴う雲・降水システムに与えている影響を評価するとともに、前線帯でのエアロゾルの上方輸送・降水除去過程を明らかとする。
- (3) 人工雲核・人工氷晶核の航空機からのシーディングによる意図的気象改変実験により、エアロゾルの変動に対する雲・降水システムの応答を明らかとする。

アジアはエアロゾル・雲相互作用研究において以下の点で特徴的な領域である。

- (1) 人為的エアロゾル濃度が世界的に見ても高濃度。ダスト粒子も多く存在。エアロゾルの影響が強く出ている可能性がある。
- (2) アジEMONsoonなど様々な気象場で雲・降水システムが形成される。将来予測に必要な気象の多様性がある。

新しい研究のアプローチとして以下のことを提案する。

- (1) 新しい測定器の開発による、航空機からの直接およびリモートセンシングの複合的観測の実施。室内雲チェンバー実験により、航空機観測で得られた知見（特にエアロゾルの氷晶形成過程）の確認と一般化研究の実施
- (2) 航空機観測、人工衛星観測、数値モデル計算を統合化した研究の実施

以下にこれらの詳細を述べる。

3. 5. 2. 科学的に重要な課題

2.5章で述べたように、エアロゾルは雲凝結核や氷晶核として働くことにより、雲粒の相

(水滴/氷晶) やその粒径分布に影響を与える。このような雲微物理特性の変化は、降水や雲粒の蒸発などを介して雲の厚さや雲量といった雲のマクロな構造に影響を与える(図1)。これまでの世界各地でのさまざまな航空機観測的研究から、水雲に関しては、雲凝結核からの雲粒活性化プロセスは基本的に定量的に理解できていると言える。すなわち空気塊中のエアロゾルの粒径分布・化学組成と空気塊の上昇流速が分かれば、そこから活性化される雲粒数濃度は(粒径分布には不確実性があるが)基本的に予測できる。従って水雲に関しては、エアロゾルによる雲微物理特性の変化が、降水や、雲の厚さ・雲量といった雲のマクロな構造にどのように影響を与えているのか、雲・降水システムのレジームごとに理解することが課題となっている。カリフォルニアやペルー沖の層積雲ではこのような研究が進んでおり、エアロゾルの増減が降水への影響を通じて、オープンセルとクローズドセルというアルベドの大きく異なる2つの準安定状態の維持・遷移に寄与している可能性が指摘されている。そしてエアロゾル濃度変動に対する降水量変動の感度がどのようにし

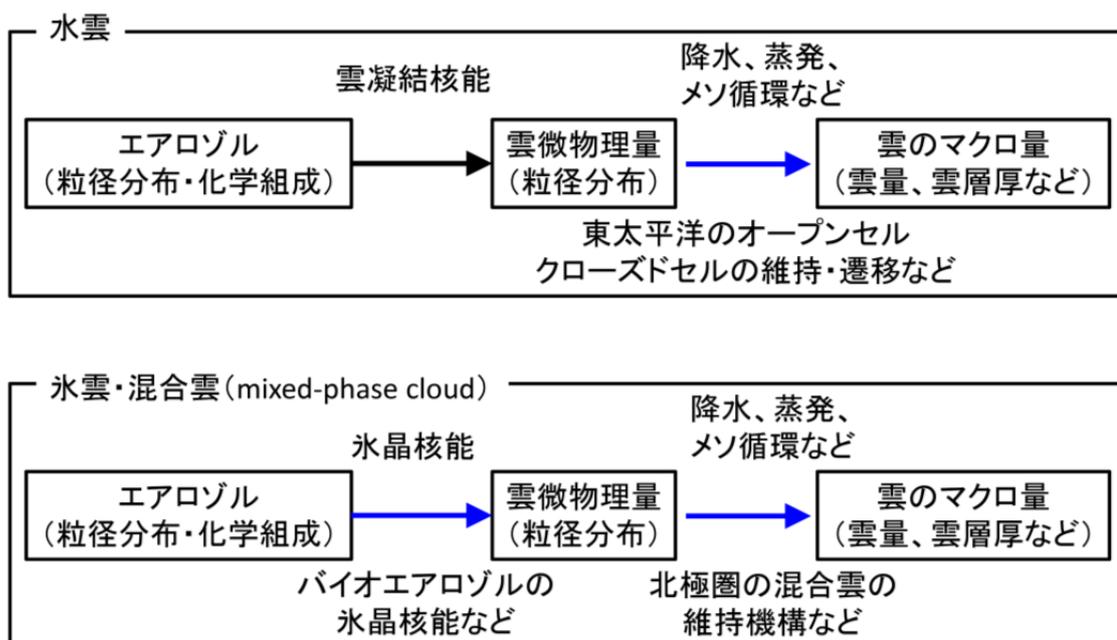


図1. エアロゾルの雲への影響。黒矢印は比較的 understanding が進んでいるプロセス。青矢印は今後の研究が必要なプロセス。

て決まるのか、その一般法則導出の試みなどがなされている。

一方において氷雲に関しては、どのようなエアロゾル(化学組成・表面積)がどのような気温で氷晶核として機能するのかといったエアロゾルの氷晶核特性、氷晶への活性化プロセスの理解が極めて不十分である。また-38°C以下程度でおこる氷晶の均一核生成においても、その数濃度がどのように決まるのかには不確実性がある。さらに水雲と同様に、エ

エアロゾルによるこのような雲微物理特性の変化が、雲・降水システムにどのような影響を及ぼすかの理解が必要である。

このように氷雲においてはエアロゾルの氷晶への活性化そのものの研究が必要である。そして水雲・氷雲ともにエアロゾルが雲の微物理特性への影響を通じて、雲システムの寿命・空間構造・降水効率、ひいては雲・降水システムによる水・エネルギー循環にどのように影響するのか、微物理過程とマクロ過程をつなぐプロセスレベルの理解が必要である。そしてメソモデルや気候モデルの中でエアロゾル・雲・降水の微物理とマクロなダイナミクスを統一的に扱うフレームワーク作りが必要とされている。

3. 5. 3. アジアの特異性

アジアは世界的に見ても人間活動により大気中のエアロゾル濃度が高いレベルにあり、雲・降水に対し他の領域よりも強く影響していると考えられる (図2)。また黄砂として知られるダスト濃度も高く、氷晶核として強く影響している可能性がある。一方においてアジアはアジアモンスーンに代表されるように、多様な気象場において雲・降水システムが形成されるため、将来の気候変動・変化の予測において必要とされるさまざまな環境下での知見が得られることが期待できる。このようにアジアは航空機によるエアロゾル・雲観

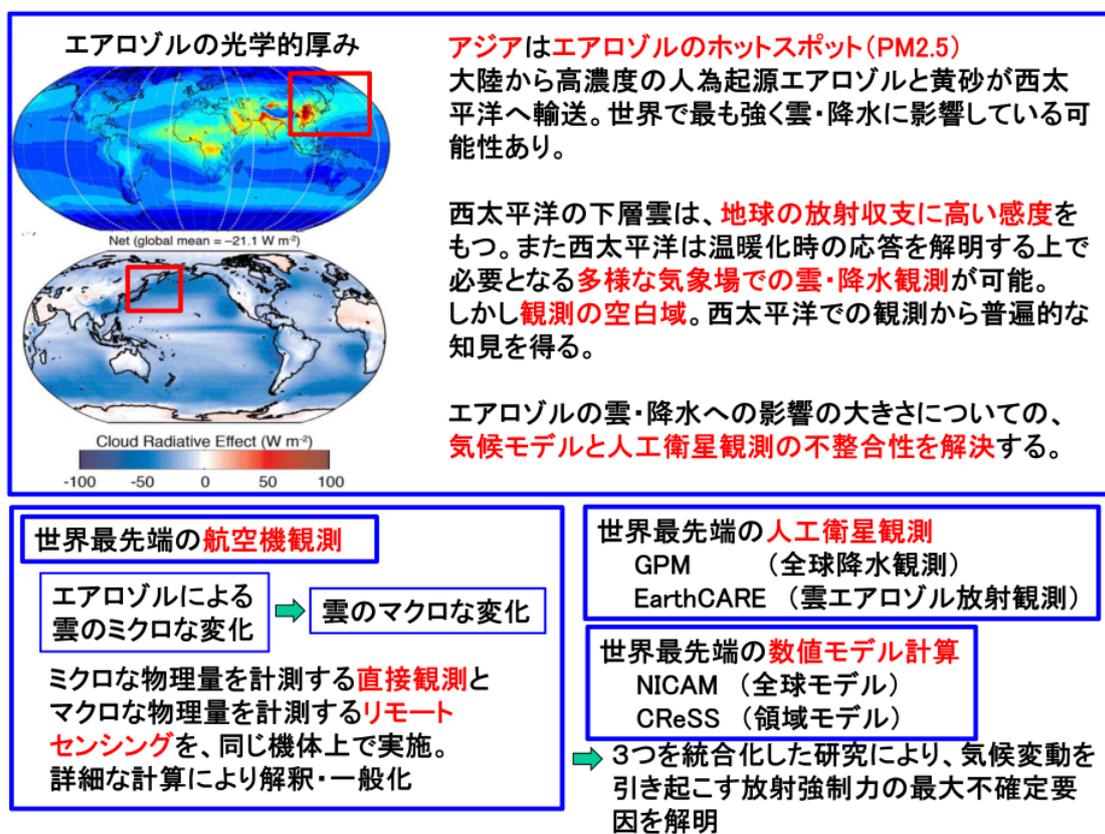


図2. アジアの特異性と新しい研究アプローチ。

測研究に適した場所であるが、これまでの観測研究は少なく、観測の空白域となっている。そのため、本研究では世界最先端の測定器を用いた観測により、エアロゾルと雲との相互作用について、その実態把握とメカニズムの解明を目指す。

3. 5. 4. 新しいアプローチ

新しいサイエンスを切り開くために新しいアプローチが必要である。第一に、エアロゾル・雲相互作用の鍵となるエアロゾルの物理化学量（粒径分布、化学組成など）や雲微物理量（雲粒の相・形態や粒径分布などのマイクロな物理量）は、航空機の直接観測でしか精度良く測定することができない。しかしながら、雲のマイクロ（微物理量）な変化と、雲・降水システムのマクロな変化の対応づけをするためには、航空機からのマイクロ・マクロの両方の物理量の測定が必要である。すなわち、雲レーダー・ライダー、あるいはマイクロ波放射計などのリモートセンシングを同時に行い、直接観測で得られた雲微物理量が雲全体の構造の中でどのような場所で観測されたものかを把握する必要がある。近年、ひとつの航空機上において、このような直接観測とリモートセンシングを組み合わせた観測が世界的には試み始められている(図 3)。同時性になどにおいて複数の航空機を組み合わせた観測よりも優れた点がある。また予算などが許せば2機の航空機を用い、中・下層におけるエアロゾル・雲・降水の直接観測を受け持つ双発のプロペラ機と上・中層のエアロゾル・雲・降水の直接観測やリモセン観測を受け持つ中型以上のジェット機との同期飛行観測が望まれる。本研究ではこのような世界最先端の測定器による直接観測とリモートセンシングを組み合わせた新しい観測を目指す。そのために必要となる各種測定器の開発も実施する。

また気象研究所には世界最先端の雲チャンバーがあり、大気中の様々なエアロゾルからの氷晶形成過程を、さまざまな大気状態をシミュレートすることにより調べることが可能である。航空機観測とこのような室内実験を組み合わせることにより、航空機観測で得られた知見（特にエアロゾルの氷晶形成過程）の確認と一般化するための研究を実施する。またチャンバー内で形成される氷晶の光散乱特性などの測定も今後、検討していく。

第二に、日本は GMP や CloudSAT などの世界最先端の人工衛星観測を実施しつつある。また日本は数値モデルにおいても、世界初の全球非静力モデル NICAM の開発に成功するなど世界をリードしている。しかし、この人工衛星観測で得られている雲・降水の実態の解明や、それらを支配しているプロセス理解に必要な航空機観測は世界に遅れをとっている。本研究では世界最先端の航空機観測を実施することにより、日本の人工衛星や数値モデル計算の強みを生かした統合的な研究を目指す。気候変動予測において最大の不確定要因であるエアロゾル・雲プロセスは、エアロゾル・雲の粒径などの微物理量（マイクロ量）に依存する。人工衛星観測は基本的に大気中の高度積分量（マクロ量）しか観測できないため、これらのマイクロ量は航空機からのその場観測（in situ 観測）からしか得ることはできない。すなわち航空機からの直接観測により、気候変動を予測する数値モデルに入れるべきメカニズムを解明することが必要である。一方において人工衛星観測は、航空機による限られ

た時空間領域での観測を、さらに広い領域や異なる発達段階の雲・降水システムの中に位置づけることを可能とする。また数値モデル計算は、観測された物理量間の因果関係を明確化できるとともに、エアロゾルの影響を予測・評価する上で不可欠である。これらを統合化した研究は世界的に見てもまだ始まったばかりである。日本はこれらの研究コミュニティを統合しやすい環境にあるため、航空機観測の実現により、格段に研究を進展させることが期待できる。

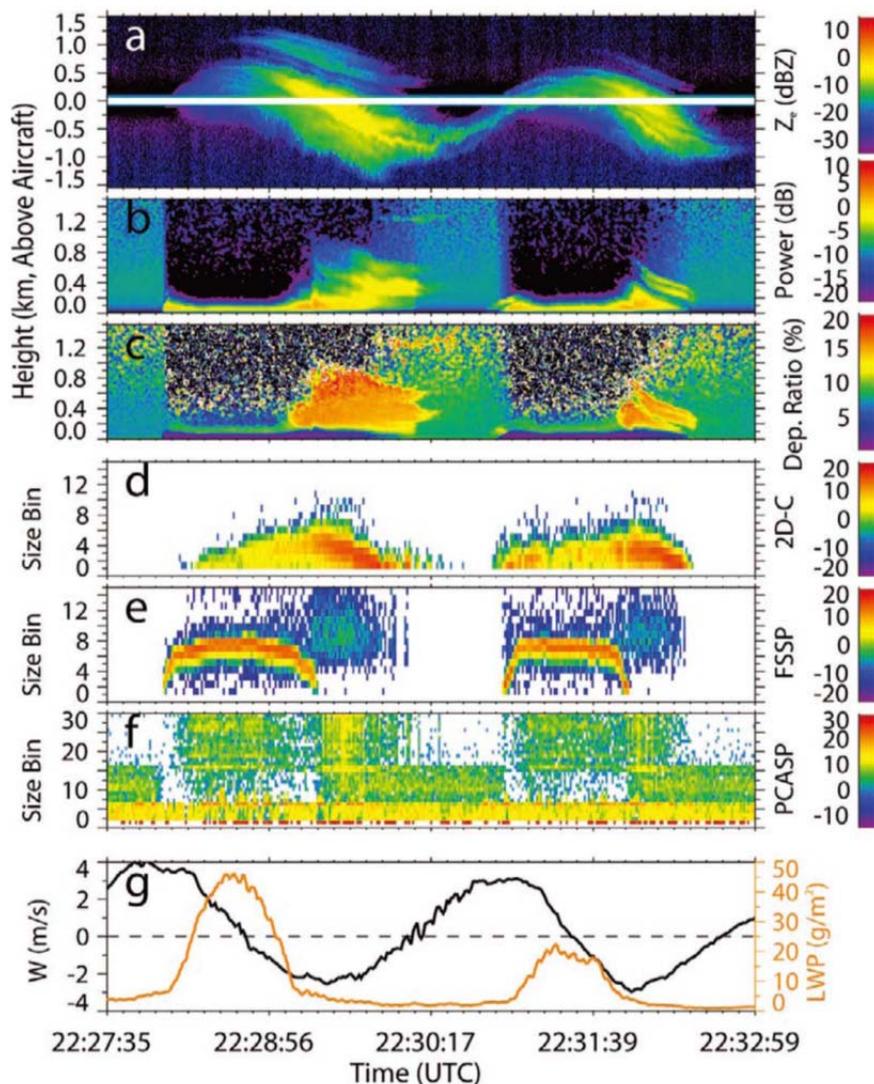


図 3. 航空機からの雲微物理量の直接観測とリモートセンシングの同時観測例 (Wang et al., 2012)

3. 5. 5. 観測項目と測定器

10 年間の大型研究の最初の 2 年間で、搭載可能な直接観測およびリモートセンシング測定器の搭載および機体改修検査を実施する。継続的に新しい測定器の開発を実施し、研究

期間の後半にはこれらの装置を搭載し、観測を実施する。GII は直接観測および雲レーダーの搭載の実績があり、また MRJ は機体の大きさや電力にさらに余裕があるため、直接観測とリモートセンシングの両方を搭載した観測は十分可能である。MRJ クラスの機体を第一候補とし、各種直接測定の実験器と、リモートセンシング測定器を搭載した観測を目指す。予算的な制限があれば搭載機器を絞り込んで、GII クラスの機体を使用する。現在、地上のレーダー観測ではフェーズドアレイ方式によりビーム方向を早い速度で振ることにより広い空間の測定を可能としつつある。日本は伝統的に高い技術レベルに基づくレーダー開発を行ってきたため、将来的にはフェーズドアレイ式のレーダーを航空機に搭載し、観測を実施することを目指す。

直接観測（括弧内は現在想定される測定器）

エアロゾル総数 (TSI 社 CPC)、エアロゾル粒径分布 (DMT 社 UHSAS)、エアロゾル化学組成 (各種測定器)、雲粒粒径分布 (DMT 社 CAS、SPEC 社 FFSSP)、雲・降水粒子の粒径分布と形状 (DMT 社 CIP、SPEC 社 2D-S および CPI)、雲水量 (hot-wire センサー、ガーバープローブ)、氷雲水量 (Nevzorov プローブ)、鉛直風速度 (Aventech AIMMS-20)、ドロップゾンデ (気象要素)、一酸化炭素濃度、気温、気圧、RH

リモートセンシング

X-, Ka-あるいは Ku-, W-band の雲・降雨レーダー（上下2方向、可能であればドップラーや偏波機能つき）、マイクロパルスライダー（可能であれば偏光機能付き）、マイクロ波放射計、可視・赤外ブロードバンド放射計

3. 5. 6. 具体的な研究目的と計画

【観測計画1】 夏季の北西太平洋の下層雲とエアロゾル影響

(1) 目的

夏季の北西太平洋は下層雲（水雲）が多く発生し、地球の放射収支においても重要な役割を果たしていることが知られている（図4）。この領域には、気象場などに応じて人為起源やバイオマス燃焼起源のエアロゾルが輸送されてくると考えられ、その結果、鉛直積算雲水量（CWP）や雲量が変化し、結果的に領域全体のアルベドが変化する可能性がある。本研究の目的は、この夏季の北西太平洋の下層雲へのエアロゾルの影響を、雲や境界層の物理過程・力学過程を含めて理解し、放射収支への影響を明らかとすることである。

世界的な研究の動向を見ると、下層雲（水雲）に関するこれまでの多くの研究が亜熱帯高気圧下で形成されるカリフォルニア沖やペルー沖の層積雲に焦点があてられてきた。一方において中緯度の下層雲の研究としては、近年、南大洋の研究も少なからずされている。これらはいずれも地球の放射収支において重要な役割を果たしていることがその理由である（図4）。一方、北半球中緯度では北大西洋の研究が多少行われているが、北西太平洋は

ほとんど観測されていない。東京大学のグループが2013年夏にプロペラ機（King Air）により、その西端である44N、150Eより西側を数回観測したのが唯一の観測である。この2013年夏の観測の初期的なデータ解析によると、雲粒子数濃度は100個/cm³程度と人為起源の影響を受けていない世界各地の海洋上の観測値と近かった。また雲は高度300m程度以下で薄い一方で、しばしば降水していた。この降水は、雲のマクロな構造や境界層の構造にも影響を与えている可能性がある。このように低濃度エアロゾル環境下で形成される雲システムは、エアロゾル濃度の増加に対する感度が高い。今後、アジアや極東ロシアの開発などがさらに進むと、この領域のエアロゾルの雲・降水への影響が強まると考えられる。またこの領域で支配的な雲・降水レジームの理解とエアロゾルの影響解明は、より低緯度の亜熱帯域や、南半球中緯度（南大洋）の下層雲の研究との対比から、下層雲全般に通じる普遍的な知見の獲得が期待される。

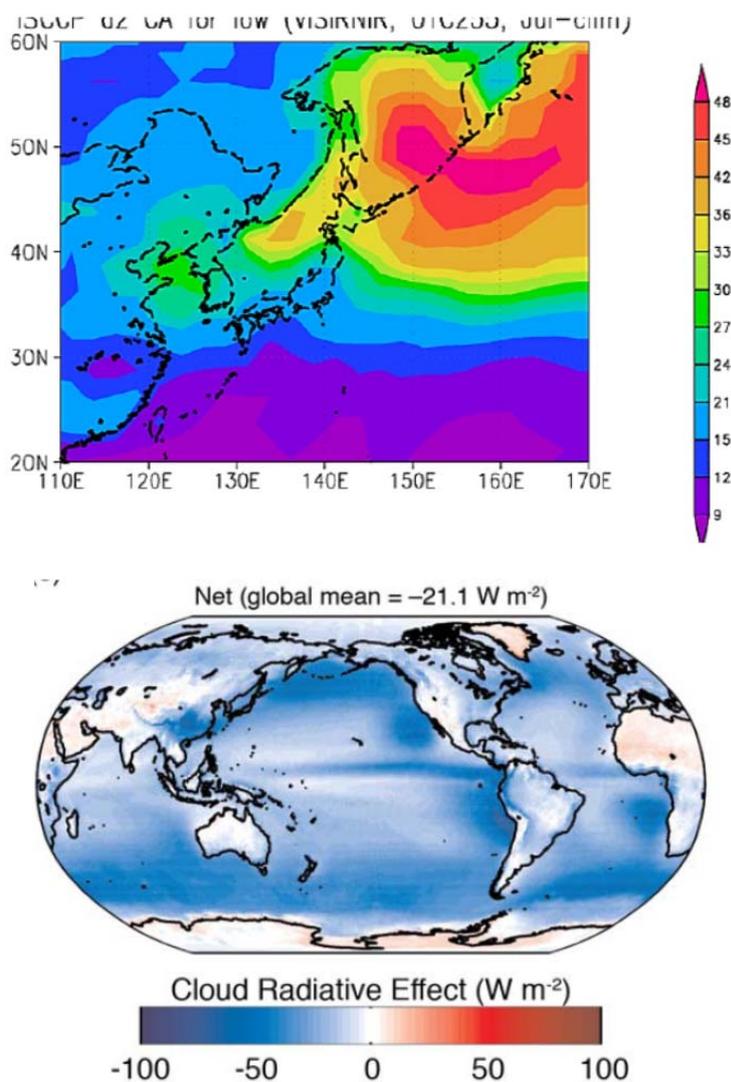


図4. (上) 7月の下層雲量の気候値 (ISCCP)。(下) 雲の正味の放射強制力 (IPCC AR5)。

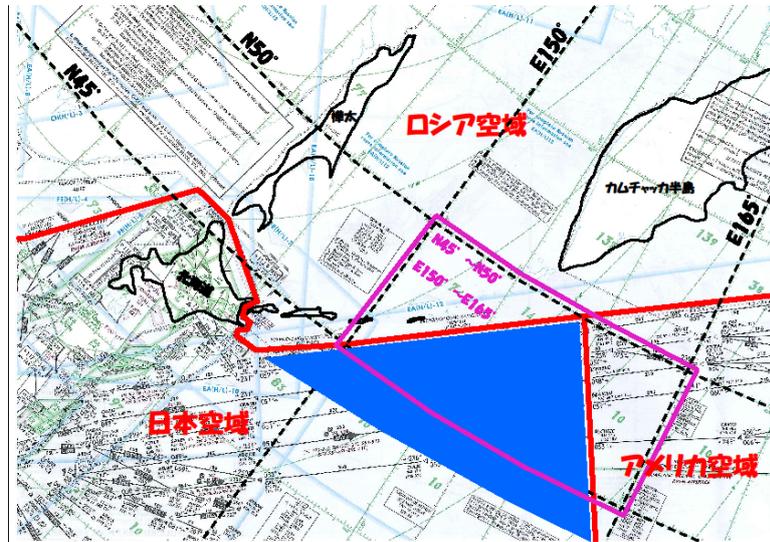


図 5. 北西太平洋下層雲研究の観測エリア

(2) 観測計画

観測は、図 5 の青色で示した日本の空域で夏季に実施する。観測拠点は実績のある女満別空港を使用する。釧路から青色領域の北端および東端までの直線距離はそれぞれ 1450 および 1700 km 程度であるため、航続距離約 4000 km の GII や MRJ (8 トン搭載時) は往復が可能である。

フライトパターンとしては、観測対象領域までは、高度 1 km 以上の高度領域を一定高度、あるいは他の観測目的に応じて高度を変えながら飛行する。雲レーダーなどのリモートセンシングにより雲・降水の状況を把握する。観測対象領域では、雲底下と、雲層内 2-4 高度をそれぞれ 5 分観測し、雲層を抜けて上昇し 1-2km 程度まで上昇後、再び雲低下の観測をする観測パターンを場所を移動しながら繰り返す。これまでの観測実績のある北海道の女満別空港を拠点とし、10-15 フライト程度の観測（合計 50-75 時間程度）を実施する。気象場により人為起源エアロゾルが輸送されてくるケースとクリーンなケースを観測し、そのコントラストを調べる。

(3) 予想される成果

北西太平洋の大気下層に輸送されてくるエアロゾルの発生源や輸送経路、エアロゾル微物理的特徴（数濃度、粒径分布、化学組成など）を明らかとする。また同領域の下層雲の雲微物理特性（数濃度、粒径分布、降水粒子の粒径分布など）とマクロな特性（時空間分布、雲量、雲底・雲頂高度、雲層厚など）、そして境界層の構造（気温・水蒸気の高度分布、乱流の強さなど）を明らかとする。これらエアロゾル・雲・境界層構造の特徴解明

(characterization) が航空機からの直接およびリモートセンシング観測により初めて可能となる。

その上でエアロゾルの雲微物理や雲量・雲層厚への影響を評価する。そのために航空機観測データの相関解析などにより、エアロゾル・雲の微物理量と降水や雲のマクロ量との関係を明らかとする。そして同領域を対象とした LES や領域数値モデル計算との比較により、エアロゾルの変動に対する、雲の応答、すなわち、降水形成、鉛直積算雲水量の変化、雲量の変化、領域全体のアルベドの変化を定量化する。これらの雲微物理と雲のマクロな特徴や境界層構造との対応をより広域の時空間スケールの中で位置づけるために、人工衛星データを利用する。またこれらの観測に基づき領域・グローバルモデルに使用するパラメタリゼーションの改良を試みる。雲やエアロゾルは気候モデルのグリッドスケールよりはるかに小さな空間スケールの変動をもっているため、エアロゾル・雲・降水の微物理とマクロなダイナミクスを統一的に扱う詳細な LES モデル計算を実施することによりパラメタリゼーションを開発する新しいフレームワーク作りを目指す。これらの改良されたモデルを用いて、エアロゾルの雲への影響を通じた放射収支や水循環への影響を定量化する。

〔観測計画 2〕 早春期の東シナ海・日本海・西太平洋の低気圧の雲・降水システムとエアロゾル影響

(1) 目的

早春期（3月）には東シナ海・日本海・西太平洋を低気圧が頻繁に通過する。一般に中高緯度の海洋上での移動性擾乱に伴う雲は、雲出現頻度や降水頻度のグローバルにおいても顕著である（図6）。アジア大陸で排出された多量の人為的エアロゾルや黄砂は、この移動性擾乱に伴う雲・降水システムにさまざまな影響を与えていると考えられる。特にアジアの多量の黄砂は氷晶の形成に影響を与え、氷晶を介した降水に影響を与える可能性がある。本研究では、エアロゾルと雲微物理量の直接観測と、雲・降水のリモートセンシングにより、前線帯付近に形成される雲・降水に対して、アジアのエアロゾルがどのような影響を与えているのかを調べる。

一方においてこの低気圧は、大陸で排出されるエアロゾルなどの汚染物質の輸送に重要な役割を果たしていることが知られている。汚染大気が寒冷前の温暖側にある場合には、温暖コンベヤーベルトにより自由対流圏へと輸送される（図7）。これは地表で排出される汚染大気の自由対流圏への重要な輸送経路であると考えられている。ただし、この温暖コンベヤーベルトに沿った輸送過程では一般に降水を伴うために、エアロゾルが湿性沈着する可能性がある。あるいは液相反応によりエアロゾルの生成もありうる。本研究では、観測により、エアロゾルの上方輸送過程、降水による湿性除去過程を明らかとする。

(2) 観測計画

観測は早春期（3月）に東シナ海・日本海・西太平洋で実施する。暖かい雲（暖かい雨）と冷たい雲（冷たい雨）の両方のシステムを観測し、エアロゾルの影響を明らかにする。G-II や MRJ を使用した場合、前線付近の強い降水帯を飛行することは困難であるが、ある程度弱ければ高度を選んで横切ったフライトも可能である。前線付近に流入してくる下層のエアロゾル、雲・降水システムの雲微物理量の鉛直構造、雲・降水システムの上層下流側に形成される巻雲の雲微物理特性、温暖コンベヤーベルトで上方輸送されたエアロゾルなどを観測する。

東シナ海の観測（暖かい雲・降水システム）はこれまでの観測実績のある鹿児島空港を拠点とし、また日本海の観測（冷たい雲・降水システム）は DAS の基地である名古屋空港を拠点とする。東シナ海・日本海でそれぞれ6フライトずつ程度の観測（合計60時間程度）を実施する。1回のフライトで温暖コンベヤーベルトの入口と出口を観測することはできないので、それぞれ複数回の観測を実施する。また前線に伴う降水の観測では、前線を2-4高度で横切るフライトを実施する。西太平洋域の観測は優先順位は低いが、実施する場合には夏の観測の実績がある北海道女満別空港を拠点とする。

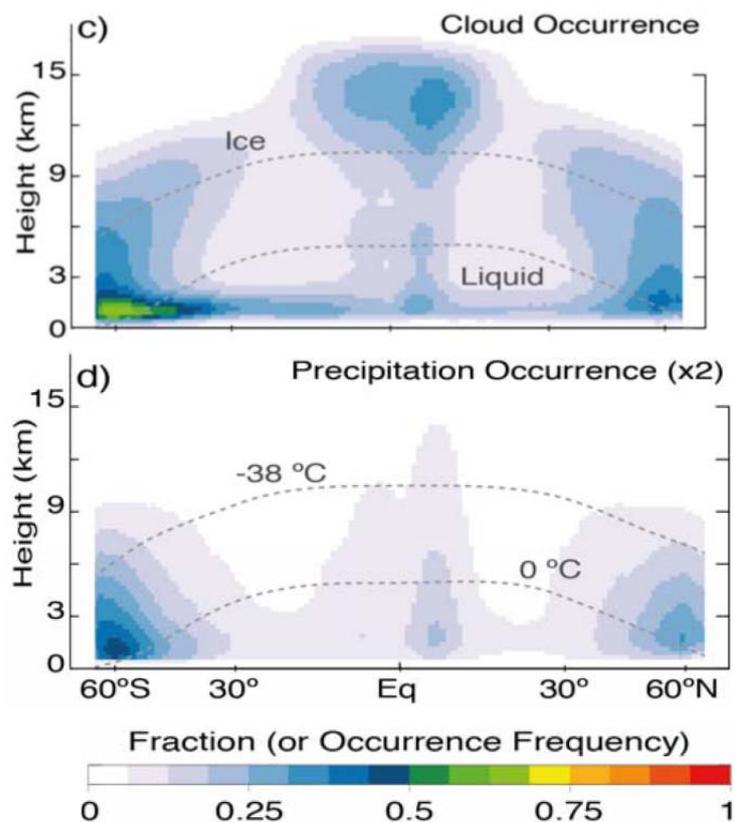


図6. 人工衛星観測（CloudSat/CALIPSO）による、雲および降水の出現頻度の緯度－高度分布（年平均）（IPCC AR5）。

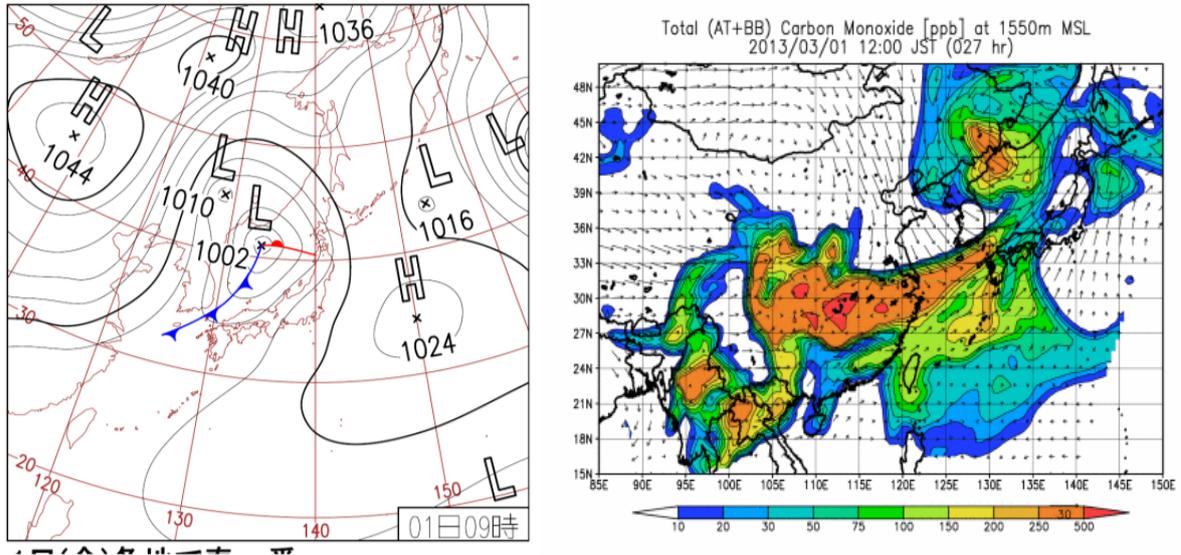


図7. (左) 2013年3月1日9時の地上天気図。(右) その時の汚染大気の指標である一酸化炭素 (CO) の高度 1550m における濃度 (気象研究所、梶野瑞王氏提供)。

この観測では、CVI (Counterflow Virtual Impactor) により氷晶中のエアロゾルを抽出し、どのようなエアロゾルが氷晶核として重要であるのか評価するなど、新しい観測を実施する。また温暖コンベヤーベルトに入る前と、降水を経た後の大気を観測し、BC をトレーサーとしてどのようなエアロゾルが除去されるのか明らかとする (2. 4章参照)。また暖かい雨と冷たい雨の2つのシステムを観測し、エアロゾルの除去過程の違いを明らかとする。

(3) 予想される成果

早春期の低気圧に伴う雲・降水システムへのエアロゾルの影響を明らかとし、エアロゾルの雲微物理影響・降水影響について数値モデルの検証と改良を行う。特に暖かい雲・雨と冷たい雲・雨への影響の差を明らかとする。

また低気圧によるアジアのエアロゾルの上方輸送過程 (境界層から自由対流圏への輸送) を明らかとする。これにより、エアロゾルの湿性除去過程の数値モデル計算の検証と改良を行う。

【観測計画3】 人工雲核・人工氷晶核の航空機からのシーディングによる意図的気象改変実験

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改変に関する実験手法 (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。

また台風上層でのアウトフロー領域での巻雲の微物理特性と台風のマクロ量の関係など、メソ降水系・台風課題と連携した観測研究も実施する。

3. 6. 集中豪雨・台風

3. 6. 1. 概要

前章でも記述した通り、雲・降水システムや台風を対象として航空機観測を行う目的は、雲・降水システムや台風というメソスケールの気象現象と雲物理過程の理解の推進、および台風などの顕著現象の予測精度向上の可能性を検討するための基礎研究である。このため、本節では以下の項目について記述する。

- ・ 現在、雲・降水システムや台風を対象とした航空機観測に使用できる測器
- ・ 航空機観測のために開発していくべき測器
- ・ 雲・降水システムや台風を対象とした航空機観測計画

3. 6. 2 観測項目と測器

降水システムや台風を対象とする場合、観測に使用する航空機としてはジェット機で高い高度まで上昇できる G-II もしくは MRJ を想定している (表 3.6.1)。しかしながら、両者とも航続距離 (航続時間) と最高到達高度に問題がある。想定される観測基地 (例えば那覇空港) から離陸することを考えると、台風が沖縄から 1000 km 程度まで接近しないと十分な観測時間が取れないという欠点がある。また、台風の上層雲よりも高い高度からドロップゾンデを投下しようとする、最高到達高度に難がある。

表 3.6.1. 降水システムや台風を対象とする航空機の仕様

航空機	G-II	MRJ
航続距離	4,260 km	4,000 km (8 t 搭載時)
最高観測可能高度	13,106 m (43,000 ft)	11,887 m (39,000 ft)
搭載可能重量	2 t	8 t (4,000 km 確保時)
使用可能電力	4.5 kVA	70 kVA

現在、降水システム・台風を対象とした航空機観測で使用できる測器の一覧を表 3.6.2 に示す。ほとんどの機器が気象研究所予報研究部の所有のものであり、気象研究所の協力なしには航空機観測を行えない。これらの測器を用いることで降水システムや台風近傍の大気環境場 (風速場・温湿度場) の観測や、様々な粒径の雲・降水粒子の観測を行うことができる。併せて、エアロゾル粒子と雲粒子の同時観測を行うことができる。

台風やメソ降水システムという激しい気象擾乱を観測対象とするため、航空機の航続距離と運用の安全性を考慮すると、将来は無人航空機を用いた観測も考慮すべきかもしれない。しかしながら、無人観測機を用いた観測に用いる測器開発や運用ノウハウを蓄積するためにも、現時点においては、有人航空機を用いた観測を行っていく必要があると考えられる。

表 3.6.2. 降水システムや台風を対象とした航空機観測で使用できる観測測器の一覧。気象庁気象研究所村上正隆博士・斎藤篤思氏とダイヤモンドエアサービス株式会社 (DAS) よりいただいた資料による。

観測測器	観測対象	所有機関	メーカー
Cloud Droplet Probe (2D-C: 25-800 μ m)	雲水量・粒径分布	気象研究所	PMS, Inc.
Precipitation Probe (2D-P: 200-6400 μ m)	雨水量・粒径分布	気象研究所	PMS, Inc.
雲粒子散乱センサ FSSP (2-47 μ m)	雲水量・粒径分布	気象研究所	PMS, Inc.
CAPS Probe (0.5-50 μ m, 25-1550 μ m)	雲水量・粒径分布	気象研究所	DMT
PIP Probe (100-6400 μ m)	雲水量・粒径分布	気象研究所	DMT
CPI Probe (2-2000 μ m)	雲水量・粒径分布	気象研究所	
King LWC Proce	雲水量	気象研究所	PMS, Inc.
Gerber PVM Probe	雲水量	気象研究所	Gerber Scientific, Inc.
Nevzov LWC probe	雲水量	気象研究所	
Nevzov TWC probe	総水量・氷水量	気象研究所	
TAT Probe	温度	気象研究所	Rosemount
Lyman-Alpha Hygrometer	湿度	気象研究所	AIR, Inc.
Aircraft Hygrometer System	湿度	気象研究所	EG&G International, Inc.
CCN counter	CCN 数濃度 (SSw)	気象研究所	
PCASP	CCN 数濃度	気象研究所	
SMPS ((DMA+CPC)	CCN 数濃度	気象研究所	
IN counter	IN 数濃度 (SSi)・ 温度	気象研究所	
OPC	IN 数濃度	気象研究所	
ガストプローブ	3次元風速	気象研究所	
ドロップゾンデ投下装置・ UHF アンテナ	温湿度・水平風速 (鉛直分布)	DAS	DAS, DM Inc.
ドロップゾンデ受信システム (1チャンネル)	同上	極地研究所	VAISALA

3. 6. 3. 測器開発の必要性

上記の観測測器では、降水システムや台風の観測には十分ではない。今後の観測のためには以下の測器の再開発や新規開発が必要である。

●ドロップゾンデ

表 3.6.2 の通り、現在観測で使えるドロップゾンデは 1 チャンネルのものである。これはドロップゾンデを投下した後、そのドロップゾンデが観測を終えるまで（着水するまで）次のドロップゾンデ観測を行えないことを意味する。ドロップゾンデの落下速度を 5 m/s と仮定すると、高度 12000 m より投下した場合には着水までに約 40 分を、高度 15000 m より投下した場合には約 50 分を要する。この間、次のドロップゾンデ観測を行えないことは、観測機会を逸する可能性が高いことを意味する。そのため、少なくとも VAISARA 製の 4 チャンネルのドロップゾンデ受信機の導入を行うか、より多くのチャンネルをもつドロップゾンデ受信機（観測高度と観測時間間隔を考慮すると 8 チャンネルあれば有効である）の開発が必要となる。

●雲粒子ドロップゾンデ：対流域（降水コア）の粒子観測

現在、地上から放球する雲粒子ゾンデ（Murakami and Matsuo 1990）を用いた観測が行われている。この測器で取得できた画像（図 3.6.1）より、雲内に分布する雲・降水粒子の形状、粒径分布、混合比の推定を行うことができる。しかしながら、地上から放球する雲粒子ゾンデでは、観測対象として適切な領域が頭上を通過しない限り観測を行うことができない。また、台風などの強風下では観測を実施できない。このような条件下において雲粒子の鉛直分布の観測を行うために、積乱雲の上部から対流性降水域の降水コアにピンポイントで雲粒子ゾンデを投下することで、雲・降水システム内部の粒子分布の観測が有効である。特に、他の手法では観測することのできない積乱雲内部や台風中心付近の壁雲域における雲・降水粒子の分布を観測することにより、降水システム内部の雲微物理過程の理解を進めることができると考えられる。このような雲粒子ドロップゾンデはおよそ 20 年前に開発されたことがある（Murakami et al. 1994）ものの、様々な問題により開発が中断している状態である。現在の技術を用いて雲粒子ドロップゾンデの再開発を行い、航空機観測による可能性を検討していく必要がある。このような測器はリモートセンシング（航空機搭載偏波レーダ）の検証にも必要であるが、日本以外では開発された例がなく、開発されたあかつきには世界で唯一の積乱雲内部の雲粒子を観測できる測器となることが見込まれる。

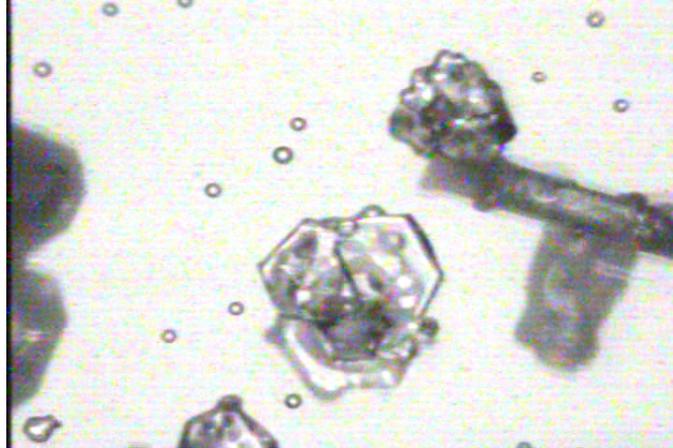


図 3.6.1. 2013 年 6 月にパラオで実施された地上放球型の雲粒子ゾンデにより取得された粒子画像。

●航空機搭載水蒸気ライダ

大雨をもたらす降水システムが発生する必要条件として、対流圏下層が湿潤であることが挙げられる。大雨を予測するためには、降水システムに流入する気塊の水蒸気量を定量的に把握する必要がある。現状では、水蒸気量は主として高層気象観測によって得られているものの、日本周辺域における現業観測の水平解像度は数 100 km 以上、時間解像度も 1 日あたり 2 回と粗い。このため、水蒸気量の時空間変動が降水システムの発達や維持に果たす役割や、大雨の発生に必要な下限の水蒸気量についての知見は明らかにされていない。また、大雨の発生に寄与する気塊は対流圏下層の海上から侵入してくると考えられるが、海上における水蒸気量を地上観測、もしくは衛星観測により時空間的に密に観測する技術は、現状では確立されていない。海上における水蒸気量の観測は航空機による水蒸気プローブやライダを用いる以外に手段は無い。

近年、航空機に差分吸収ライダ (differential absorption lidar (DIAL), Browell et al. 1997) を鉛直下向きに搭載し、水蒸気量の鉛直プロファイルを観測するプロジェクトが行われている。アメリカ合衆国では、中西部域における深い対流の初期発生過程を研究するための大規模なプロジェクト (International H₂O Project (IHOP_2002), Weckwerth et al. 2004) において、複数の航空機による DIAL を用いた観測が行われ、積乱雲の発生時の水蒸気場の観測が実施された (図 3.6.2)。このプロジェクトでは、DIAL の光を航空機から水平方向に照射することで、一定高度における水蒸気量の水平分布を観測する試みも行われている。日本においても航空機搭載用の DIAL の開発は行われており (Uchino et al. 1995, Nagasawa et al. 1995)、大雨の発生が予想される領域の風上側における下層水蒸気量の鉛直分布や水平分布を観測することで、降水量の予測精度の向上が見込まれる。

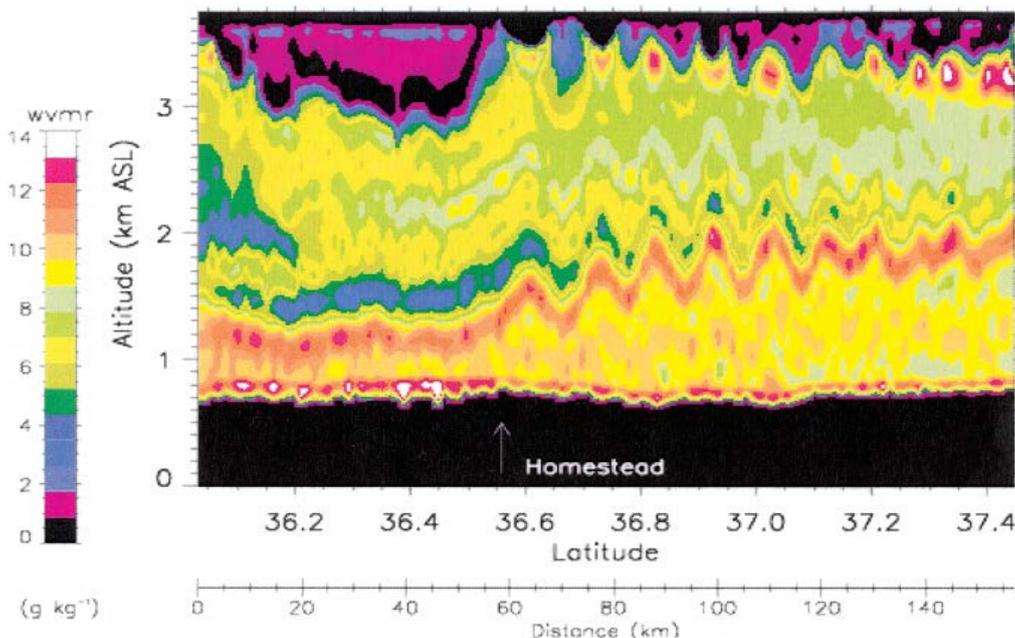


図 3.6.2. IHOP 期間中の 2002 年 6 月 20 日に航空機に鉛直下向きに搭載された DIAL により得られた水蒸気量鉛直プロファイル。ボアに伴う水蒸気量の変動を捉えている。Weckwerth et al. 2004 より引用。

●航空機搭載ドップラーレーダ

アメリカでは P-3 や C130 などに導入されており、数多くの実績を挙げている観測手法である。台風内部の 3 次元気流場を台風周辺を飛行しながら観測を行うことが出来るため、内部構造の理解に非常に有効な観測手段である。例えば、台風の発達に渦をもつ積乱雲 (Vortical Hot Tower, VHT) の存在を確認した研究 (Houze et al. 2009) や MJO の活発期と不活発期の降水システム内の鉛直流の統計的な特徴を示した研究 (Guy and Jorgensen 2014) が行われている。ドップラーレーダを用いた航空機観測により海洋上の降水システムや台風内部の詳細な 3 次元気流場を観測することで、数値モデルの結果の検証やデータ同化による予測精度の向上に寄与することが期待できる。また、これまでに日本では航空機観測により取得されたドップラー速度場から 3 次元気流場を計算する手法についての研究も行われていない。この点についても、先行研究 (例えば、Guimond et al. 2014) を参考にアルゴリズムの検討を行っていく必要があると考えられる。

●航空機搭載偏波レーダ

航空機搭載レーダとしてドップラー速度だけでなく、偏波機能をもたせて降水システム内部の降水粒子の形状を観測可能にするレーダである。この結果、広い範囲における降水粒子の種類分布を得ることができる。この技術はアメリカでは航空機の外壁にフェーズドアレイレーダを貼り付けることで実現しようとしている (W.-C. Lee et al. 私信)。日本では

航空機搭載の気象レーダは開発した経験がないが、フェーズドアレイレーダの技術を生かして、今後 10 年以上の開発期間をかけて開発していく価値があると考えられる。

●航空機からの投下型海洋観測機器

海洋の水温プロファイルを観測する Airborne eXpendable BathyThermograph (AXBT)、水温と塩分濃度のプロファイルを観測する Airborne eXpendable Conductivity, Temperature, and Depth probe (AXCTD) とドロップゾンデを組み合わせることで、台風海洋相互作用について有効な研究を行うことが可能となる。2010 年に西太平洋で行われた International Typhoon Observation over the Pacific Ocean (ITOP: D'Asaro et al. 2014, Lin et al. 2013) では、3 つの台風 にドロップゾンデと AXBT を同時に合計で 200 基以上投下し、台風直下での海面からの顕熱・潜熱フラックスの推定と海洋表層の水温低下量などを推定する観測を行った。海洋中の水温や塩分濃度の分布はアルゴフロートを用いた観測が有効であるが、台風直下や台風通過直後の変動が大きな部分についての観測を行うためには、アルゴフロートの時空間分解能では不十分である。このため、航空機による台風近傍におけるドロップゾンデと AXBT（もしくは AXCTD）を組み合わせた測器による観測が有効であると考えられる。これらの測器による観測結果は、台風が海面水温の時間変化から受ける影響と、海洋の水温・塩分濃度のプロファイルの台風による変化についての知見を与えると期待できる。また、最近開発されている雲解像大気海洋結合モデルを用いた台風実験の検証を行う際にも、このような観測結果は有益である。

今後、ドロップゾンデと AXBT（もしくは AXCTD）を結合した測器の開発を行っていく必要がある。その際、測器の重量、大きさ、送信周波数、多チャンネル化などの検討とともに、高速で高高度を飛行するジェット機からの投下の可否についても検討を行っていく必要がある。測器の重量については、特殊なパラシュートの使用の可否に影響する。測器の大きさは、航空機の投下装置の大きさの設計に影響する。送信周波数については、ドロップゾンデと同じ周波数の使用の可否に影響する。そして、多チャンネル化は、海洋観測を行う場合に一つの測器による観測時間が長くなるために、頻度の高い観測を行っていく上で必要不可欠の機能である。

3. 6. 4. 観測計画

現状、航空機を用いた観測として、ドロップゾンデ観測、プローブを用いた粒子観測、DIAL を用いた水蒸気量の観測を行うことが可能である。この条件のもとで、考えられる観測計画を示す。

(1) 台風観測

沖縄ー台湾ーフィリピンーパラオーグアムで囲まれる領域での台風の観測を行う。台風 に成長する可能性のある降水システムや熱帯低気圧の近傍、急発達する台風の内部領域（積

乱雲近傍以外) や上層雲中、台風の上層雲よりも上層を飛行し、ドロップゾンデ観測やプローブを用いた粒子取得観測を実施する。想定される観測領域を図 3.6.3 に示す。台風の発生や発達に合わせて、観測用航空機を那覇やグアムに待機させておき、1 日 1 回程度の観測飛行を行う。各空港から 500 km 以内に台風が位置している場合には、観測用航空機を避難させる必要があるために、観測を行うことはできないと考えられる。このため空港から 500 km ~ 2000 km に台風が位置している場合に観測を行うことができると考えられる。沖縄に接近したのち本土に迫る台風も多いことから、この計画は、単にその沖縄周辺域の台風について知ることにとどまらず、本土に迫る台風の予測・構造の理解などにおいても有益である。

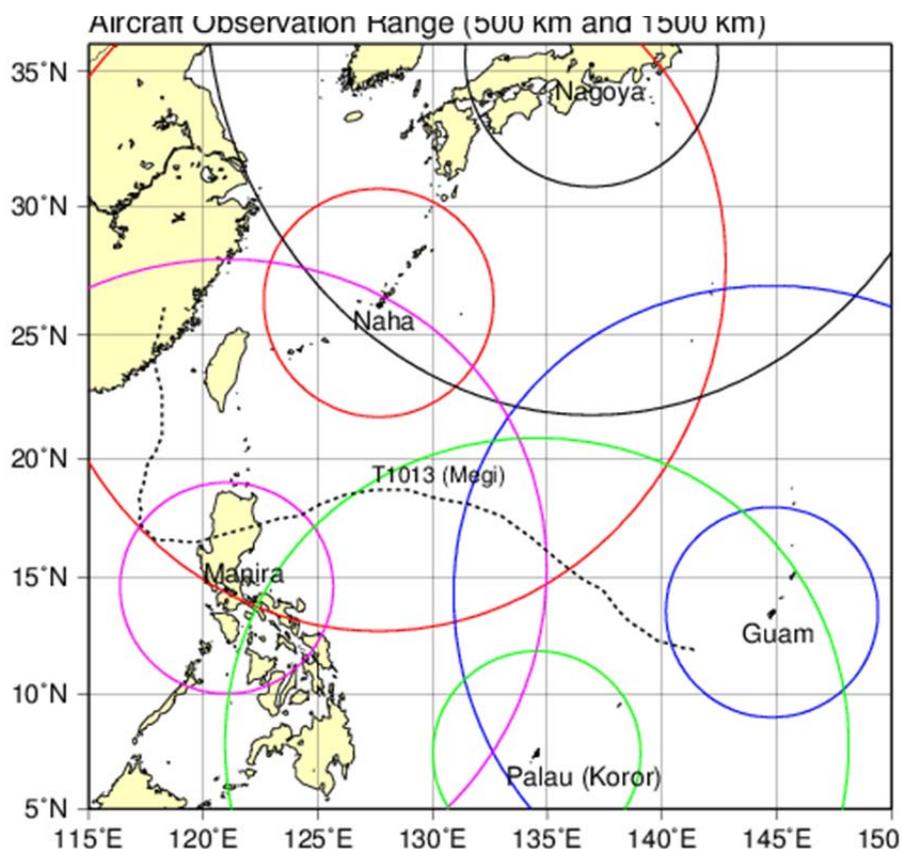


図 3.6.3. 台風を対象とした観測範囲。名古屋空港（黒）、那覇空港（赤）、グアム国際空港（青）、パラオ・コロール空港（緑）、マニラ国際空港（ピンク）から 500 km（内円）と 2000 km（外円）の範囲を示す。点線は事例として 2013 年の台風 13 号 (Megi) の進路を示す。航空機観測を行える範囲はそれぞれの空港の内円と外円で囲まれる領域に台風が位置している時である。

発達する台風や急発達する台風の気象環境場をドロップゾンデを用いて観測する。測器の開発・調達を行うことができれば、ドロップゾンデに加えて AXBT や AXCTD を用いた観測も実施する。台風自身にも影響の大きな海中の水温や塩分濃度の鉛直プロファイルの変化を観測することで、台風海洋相互作用の研究を行う。

また、台風内部の雲・降水粒子の分布をプローブを用いて観測し、数値モデルを用いた検証実験と連携して台風の急発達における雲物理過程の寄与を明らかにしていく。プローブを用いた雲・降水粒子の観測は降水コア（強反射強度域）以外でしか実施できないが、雲粒子ドロップゾンデの開発・調達を行うことができれば、降水コアの上空から測器を投下することで、降水コアにおける雲物理的な構造の理解も目指す。

図 3.6.3 で示される西太平洋域ではアメリカ合衆国や台湾も台風を対象とした観測を行ってきた実績がある。それぞれの国で観測プロジェクトが立案・実施される場合には、積極的に同時観測を行うことで、データや観測手法の共有を行うことは有効である。

また、ドロップゾンデ観測を行うために最適な空域を推定するために、前章で記述した「最適観測法」を実施し、ノウハウと実験データの蓄積を行う。

(2) 南西諸島のドップラーレーダと航空機を組み合わせた台風の構造と強度の観測

台風の強度変化、特に中心気圧が 24 時間で 30 hPa 以上も低下する「急発達」に関わるメカニズムの解明は、台風予報だけでなく学問的にも待ち望まれている課題である。このため、台風の急発達がしばしばみられる熱帯・亜熱帯の海洋上で、台風内部の力学的・熱力学的なデータをいかに取得するかが、台風の発達機構を理解するための鍵となる。その解決として、理想的には航空機に搭載したドップラーレーダにより、海洋上の台風の気流系を 3 次元的に観測することが望まれるが、高速で 3 次元走査が可能な航空機搭載のレーダは、世界的にも開発途上の段階である。そこで、地上に設置されたドップラーレーダと航空機からのドロップゾンデとを組み合わせた特別観測により、台風の構造と強度の関係を明らかにする。

南西諸島には、ドップラー機能を有し、台風の強雨の観測にも適する C バンドレーダが合計で 5 台運用されており、台風の接近時にも安定して観測データを取得することが可能である。南西諸島の島々は標高が低く面積が小さいため、台風に対する陸の影響が限定的であり、夏季には中緯度のジェット気流の影響を受けない地域にある。これまで、強度を維持したまま通過する台風だけでなく、島嶼に接近する約 7 時間前から急発達して石垣島で被害をもたらす事例も既に得られている。琉球大学と気象庁気象研究所では、レーダによる観測データを利用して、台風に伴う接線風速を計算し、中心気圧を推定する手法を開発している。推定した中心気圧を予報現業に提供するだけでなく、接線風の 3 次元データを用いて台風の構造と調べ、強度との関係を理解することを目指しているが、気温や湿度など熱力学的なデータが不足している。ここで計画する特別観測（図 3.6.4）では、レーダの観測範囲（半径 150~250 km）の中に台風の中心が進入する場合を対象として、航空機か

らドロップゾンデ観測を実施し、熱力学的なデータを取得する。台風の強雨域内では着氷のリスクとゾンデ観測の精度低下が懸念されるため、レインバンドと壁雲との間の弱降水域を飛行し、台風の中心部を取り巻く領域でのデータを取得する。この航空機観測で得られる学問的知見は、台風の急発達に関わる物理メカニズムの解明に貢献するだけでなく、台風の強度を現在より正確に推定することに貢献することが期待される。また、航空機搭載レーダの開発を見据えて、航空機搭載レーダによる大洋上での台風強度推定手法の開発にも着手する。

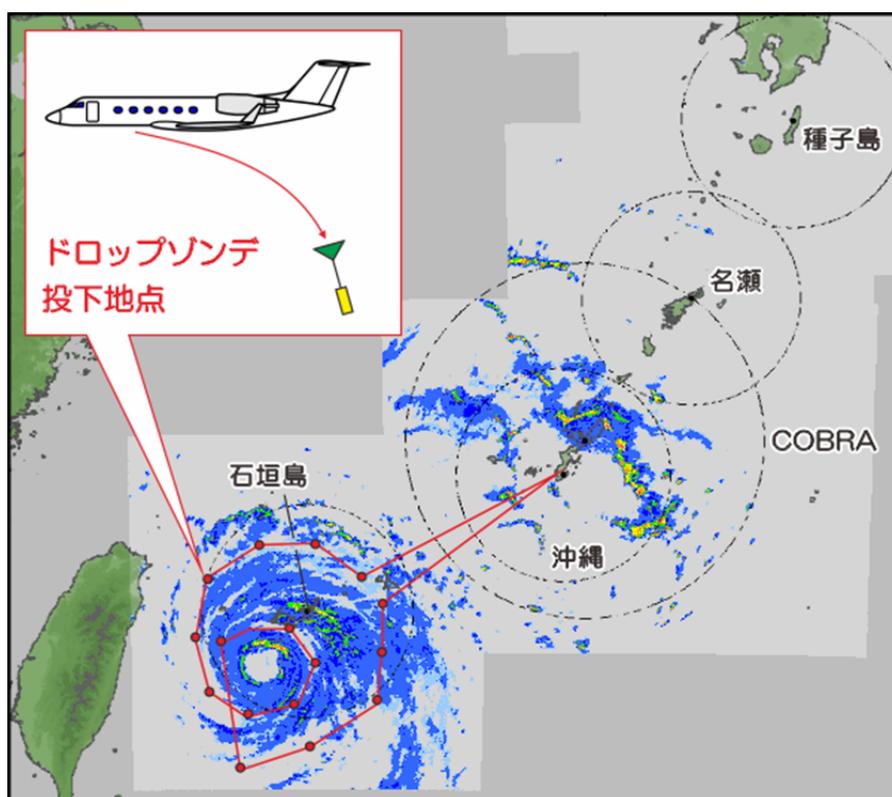


図 3.6.4. 南西諸島のレーダと航空機ドロップゾンデとを組み合わせた特別観測の模式図。破線の円は、各レーダのドップラー速度の探知範囲(150 km または 250 km)を表す。赤い線は那覇空港からの飛行経路を表し、赤丸はドロップゾンデの投下地点を表す。

(3) 日本列島南岸における水蒸気量の観測

領域モデルの初期・境界条件となる全球モデルの格子内の水蒸気量は一意に出力される。しかしながら、その格子内における水蒸気量の分散や確率密度分布関数の形状についての

理解は進んでいない。数値モデルによって大雨の発生が予測されるような状況において、数値モデルで出力された格子内の気温、水蒸気量とその格子内でプローブや DIAL を用いた航空機観測結果から高空間分解能で得られる値を比較することで、格子内の気温、水蒸気量の平均値、分散、確率密度分布の形状などの観測を行う。これらの値を領域モデルに同化することで、大雨の量的な推定の精度向上への寄与の評価を行っていく。特に平年値よりも高温かつ高水蒸気量の状況下で得られる観測データは、将来気候における大気環境場を疑似的に再現したものであると考えることができる。これらの観測データを用いた数値実験の結果を解析することで、将来気候における降水量の推定に資する結果が得られると考えられる。

図 3.6.5 に大雨発生が予測されている場合の水蒸気量観測の例を示す。梅雨前線や台風の外縁部において、数値モデルにおいて下層水蒸気の陸上への流入量が多く、大雨発生が予測されている風上側海上の対流圏下層（高度 500~2000 m 程度）において、一定高度での飛行を行いながら、プローブにおいて気温、水蒸気量、風向・風速などを高時間分解能（高



図 3.6.5. 大雨を対象とした日本南岸における水蒸気量の航空機観測計画。大雨が発生しそうな場合に、暖湿気塊の流入域における温度、水蒸気量、風向・風速の観測をレベルフライトで行う。モデルとの水蒸気量のずれを観測するとともに、水蒸気量の水平変動量を調べ、格子内水蒸気量の分散や確率密度分布の形状を検討する。

空間分解能) で取得し、数 km から数十 km スケールでの水蒸気量や水蒸気フラックスの確率密度分布を求める。同時に、DIAL を航空機に搭載し、ライダーを航空機から側方(上方)に向けて水蒸気量の水平分布(鉛直プロファイル)の観測を行う。もしくは、同フライト線に沿って高度 10 km から鉛直下向きに設置した DIAL により水蒸気量の鉛直プロファイルを取得する。観測された水蒸気量を数値モデルに同化し、降水の位置や量的な評価を行う。

3. 6. 5. おわりに

現在、わが国では雲・降水システムや台風を対象とした航空機観測の経験は極めて少なく、航空機観測で使用できる測器も観測のための組織・ノウハウが不足している。測器開発を行うとともに航空機の運用能力を向上させることが必要である。

参考文献

- Browell, E. V., and Coauthors, 1997: LASE validation experiment. *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux, and U. Wandinger, Eds., Springer Verlag, 289-295.
- D'Asaro, E. A., P. G. Black, L. R. Centurioni, Y.-T. Chang, S. S. Chen, R. C. Foster, H. C. Graber, P. Harr, V. Hormann, R.-C. Lien, I.-I. Lin, T. B. Sanford, T. Y. Tang, and C.-C. Wu, 2014: Impact of typhoon on the Ocean in the Pacific. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1405-1418.
- Guimond, S. R., L. Tian, G. M. Heymsfield, and S. J. Frasier, 2014: Wind retrieval algorithms for the IWRAP and HIWRAP airborne Doppler radars with applications to hurricanes. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**, 1189-1215.
- Guy, N., and D. P. Jorgensen, 2014: Kinematic and precipitation characteristics of convective systems observed by airborne Doppler radar during the life cycle of a Madden-Julian oscillation in the Indian Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1385-1402.
- Houze, R. A. Jr., W.-C. Lee, and M. M. Bell, 2009: Convective contribution to the genesis of Hurricane Ophelia (2005). *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2778-2800.
- Lin, I.-I., P. Black, J. F. Price, C.-Y. Yang, S. S. Chen, C.-C. Lien, P. Harr, N.-H. Chi, C.-C. Wu, and E. A. D'Asaro, 2013: An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1878-1882.
- Murakami, M., and T. Matsuo, 1990: Development of hydrometeor videosonde (HYVIS). *J. Atmos. Ocean Technol.*, **7**, 613-620.
- Murakami, M., T. Matsuo, H. Mizuno, and Y. Yamada, 1994: Mesoscale and microscale structures of snow clouds over the Sea of Japan Part I: Evolution of microphysical structures in short-lived convective snow clouds. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 671-694.

Nagasawa, C., M. Abo, T. Sugisaki, and O. Uchino, 1995: Simulation for atmospheric water vapor measurements from spaceborne DIAL, *SPIE*, **2581**, 161-167.

Uchino, O., T. Nagai, T. Fujimoto, C. Nagasawa, M. Abo, T. Moriyama, T. Y. Nakajima, N. Murate, K. Tatumi, and Y. Hirano, 1995: Diode-pumped solid state laser for spaceborne water vapor DIAL. *SPIE*, **2581**, 154-160.

Weckwerth, T. M., D. B. Parsons, S. E. Koch, J. A. Moore, M. A. LeMone, B. B. Demoz, C. Flamant, B. Geerts, J. Wang, and W. F. Feltz, 2004: An overview of the International H₂O Project (IHOP_2002) and some preliminary highlights., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 253-277.

4. 地球科学諸分野との連携

4. 1. 概要

航空機からの地球観測は、陸上生態系や海洋・海氷、火山・地殻変動などの幅広い気候システム科学・地球システム科学分野においても、独創的な研究の進展への寄与が見込まれる。これらの分野でも、航空機からの高精度観測の欠如が研究のボトルネックとなっており、地球観測専用の航空機の導入が研究のブレイクスルーをもたらす可能性がある。植生の種類や海氷のサイズ分布などの相対的にマイクロな地球科学量を航空機観測により明らかにすることにより、人工衛星からのマクロ量観測との対応づけや、数値モデル開発で必要な素過程の解明が期待される。

2014年5月の地球惑星科学連合大会では、ユニオンセッション「U-04:最新の大気科学:航空機による大気科学・地球観測研究の展開」を企画し、日本気象学会以外の地球惑星科学分野の研究者にも幅広く呼びかけて、航空機を用いた研究の話題提供をお願いした。また、2015年9月には、日本気象学会主催、地球惑星科学連合共催で研究集会「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」を開催した。これらの会合には、日本気象学会の他、日本海洋学会、日本雪氷学会、日本大気化学会、日本地球化学会、日本地理学会、日本リモートセンシング学会、東京地学協会など地球惑星科学連合の8学会の関係者が集うとともに、日本生態学学会、日本航空宇宙学会、日本写真測量学会など地球惑星科学連合以外の計11学会の関係者も参加した。そして各地球科学分野で、日本あるいは世界の航空機観測によりどのような研究成果が挙げられているか、地球観測専用航空機が導入された場合どのような観測・研究を実施すべきかなどを議論した。

1) 海洋・海氷

海氷は海洋から大気に放出される熱や水蒸気フラックスを遮断し、また高い反射率（アルベド）により海洋が受け取る放射エネルギーを減ずる。一方において海洋側から見ても海氷成長にともない放出される高塩分濃度水は海洋大循環に大きな影響を及ぼしている。海氷の大気へのインパクトは海氷変動の大きい季節海氷域が鍵となるが、従来の数値モデルは多年氷を対象として構築されているために、季節海氷の形成や融解過程の表現に問題がある。この季節海氷域の空間変動スケールは数十mから数十kmであるために、人工衛星観測では十分に捉えられない。このため航空機観測が唯一の観測手段となり、これまでに個々の氷盤のサイズ、形状、厚さの分布の把握などで大きな成果をあげてきた。また合成開口レーダー観測などにより人工衛星観測の検証でも重要な役割を果たしてきた。

これらの成果に基づき、地球観測専用航空機が導入された場合には、レーザースキャナーなどの新しい測定器をもちい、オホーツク海などでの氷盤の形態把握や乱流熱フラックス測定などにより季節海氷域の海氷の形成と融解過程の解明などで大きな成果をあげることが期待される。

2) 海洋・沿岸

時空間変動の大きい沿岸海洋の観測手段として、航空機観測は重要と考えられる。これまで世界的には、可視域の分光放射計により海色を観測（リモートセンシング）し、植物プランクトン、懸濁物質、溶存有機物などを測定したり、海底の海藻や珊瑚礁などが観測されてきた。近年では航空機から海洋へレーザーを照射してライダー観測により、水中の植物プランクトンの深さ分布を測定する試みも行われている。

海洋観測では、航空機から測定器を海洋に投入し、観測を実施することが行われている。船舶が近づきにくい海氷の間での観測や、機動的な観測で成果をあげることが期待される。特に台風時の水中の水温や塩分の測定などでは威力を発揮することが期待され、アメリカでは実験的な観測も実施されている。

地球観測専用航空機が導入された場合には、上記のようなリモートセンシングや投入式測定器による観測を体系的に実施し、海洋生物を含めた海洋観測で成果をあげることが期待される。

3) 陸上生態系

陸上生態系（特に植生）は、光合成と呼吸により炭素循環で主要な役割を果たすとともに、エアロゾルなどを生成する揮発性有機化合物を排出したり、水蒸気の蒸散量やアルベド（反射率）の変化を通じて、気候システムに多大な影響を与えている。近年の人工衛星観測の発達により、陸上植生に関わるグローバルスケールの様々な情報が得られている一方において、気候に関わる重要なプロセスを支配する個々の森林の情報や、森林の樹冠と林床との区別は人工衛星では観測できない。このような森林の3次元分布の把握は、航空機からの光学センサー（分光放射計）やレーザースキャナ（木々の高さ測定器）による観測でのみ可能である。

地球観測専用航空機が導入された場合には、航空機から樹冠から林床までの構造を見通すことが容易であり、また温暖化による変化が注目されている、アラスカやシベリアなどの北半球高緯度の亜寒帯林での観測が期待される。また衛星観測からの植生構造の推定のために、植生の分光反射特性を決める2方向性反射分布関数（BRDF）を、さまざまな植生および放射条件で観測することにより大きな成果があがることが期待される。

また世界的には、生物多様性や生態系サービスの観点から陸上生態系を捉えることが重要となってきた。その基盤となるのは航空機からのみで観測可能な個々の植物を識別した分析・評価である。実際に航空機からの可視から短波長赤外までの広い分光放射観測（ハイパースペクトル観測）やレーザースキャナ観測により、葉重、葉の光合成色素、水、窒素、セルロース、リグニン、フェノールなどの化学組成の推定などが盛んに行われている。地球観測専用航空機が導入された場合には、生物多様性や生態系サービスの観点からも、これらの測定器を用いて東南アジアの熱帯林などの観測を実施することが期待される。

4) 固体地球・火山・氷河

本研究計画書では独立した章としての記述は行われていないが、情報通信研究機構 (NICT) や宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の地球観測研究センター (EORC) の合成開口レーダー (Pi-SAR) による火山などの地形観測もさかんに行われている。合成開口レーダーは、雲や火山噴煙を透過して地表面を測定することが可能であり、可視画像では噴煙に隠れてしまう噴気孔の様子も観測可能である。このような技術をもちいて 2013 年 11 月には西之島噴火による地形の変化が観測された。またこれまでに地殻変動や氷河の構造の研究にも活用されている。

合成開口レーダー観測は、次で述べる災害監視とも密接に関連している。実際に、御岳山の火山噴火 (2014 年 9 月) や伊豆大島の台風豪雨に伴う土砂災害 (2013 年 10 月) では機動的かつ、正確な地形観測で被災状況の把握のための観測が実施された。

合成開口レーダー観測はこのような固体地球・火山・氷河の他にも、海氷や波浪監視や農作物の把握、土地被覆の分類など幅広い地球科学分野で活用されている (8. 3. の資料を参照)。これらの研究は、JAXA・EORC の観測研究公募に応募し、観測されたデータを解析するなどの方法で行われている。

地球観測専用航空機が導入された場合には、世界的に見ても高いレベルにある日本の合成開口レーダー技術をさらに発展させ、地球科学の幅広い分野への応用が期待される。ハイパースペクトル分光放射計などとの組み合わせにより、陸上生態系研究などさまざまな分野での成果が期待される。

5) 災害監視

上記のとおり、情報通信研究機構 (NICT) と宇宙航空研究開発機構/地球観測研究センター (JAXA/EORC) では、航空機搭載型の合成開口レーダーにより火山噴火・地震・津波・洪水などの自然災害時に機動的な観測を実施し、大きな成果をあげるとともに社会貢献を実現してきた。これらの観測では、各省庁の緊急観測要求などに基づき、1 日で機体にレーダーを搭載し、次の日には観測を実施している。また観測後には速やかに画像処理や解析を実施し (機上でも画像化可能)、関係機関に配信している。上記のとおり、御岳山の火山噴火 (2014 年 9 月) や伊豆大島の台風豪雨に伴う土砂災害 (2013 年 10 月) の他、東日本大震災被災地での浸水域の同定や瓦礫の集積状況の確認 (2011 年 4 月)、タイの洪水災害状況把握 (2011 年 11 月)、北九州豪雨 (2012 年 7 月)、山口・島根県豪雨災害 (2013 年 7 月) をはじめ、多くの災害観測が実施されてきた。しかしながら、これらの緊急観測が必要とされる場合でも、民間の航空会社の特定の 1 機の機体のみが使用可能であるため、他のユーザーが利用していたり、定期点検時などでは観測が不可能となる。地球観測専用航空機が導入された場合には、このような災害時にも迅速な対応・把握が可能となることが

期待される。このように地震・津波・洪水などの自然災害時に、機動的に観測できる体制の構築も急務である。

以下の各章では、広い地球科学分野のうち、海氷、沿岸・海洋、および陸上生態系という地球システム科学に深く関わる分野における航空機観測計画を示す。これ以外の分野は観測計画として明確にはまとめていないが、上記のとおりさまざまな分野で地球科学観測・災害監視観測が行われているとともに、取られたデータが幅広い研究に使用されている。本研究によりこれらの幅広い地球科学分野での観測研究や、データの2次利用研究が進展するとともに、航空機という共通の観測プラットフォームの整備により、地球惑星科学研究の統合化が促進されることが期待される。

4. 2. 海洋・海氷

4. 2. 1. 概要

海氷は冬季に海洋から大気に放出される多大な熱を遮断し、また、高いアルビードの故に日射量を大幅に減ずる役割を持つ。このため、大気側から見ると海氷域の変動は熱エネルギー的に非常に大きな影響を及ぼす。一方、海洋側から見ても、海氷成長の際に放出する高塩分濃度水はオホーツク海や南大洋で中層および底層に独特の水塊を生み出して海洋大循環に大きな影響を及ぼすことが知られている。このように、海氷域の変動は大気側にも海洋側にも大きな影響力をもち、グローバルな地球の気候システムの中で重要な役割を果たしている。近年、北極域では10年間で約4%の割合で海氷域が急速に減少傾向にあることが衛星モニタリング観測から示されており（Cavalieri and Parkinson, 2012：図1）、気候システムに与える影響が懸念されている。一方で、南極域では10年間で約1.5%の割合で海氷域は微増傾向にあることが示されており（Parkinson and Cavalieri, 2012：図2）、その動向が注目されている。

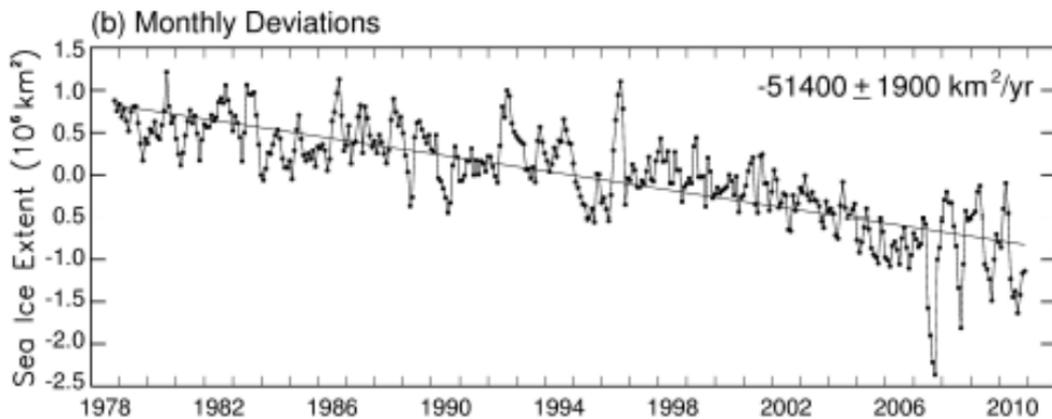


図1. 北半球海氷域の毎月平均面積の時間変動を平年値からの差で示したもの

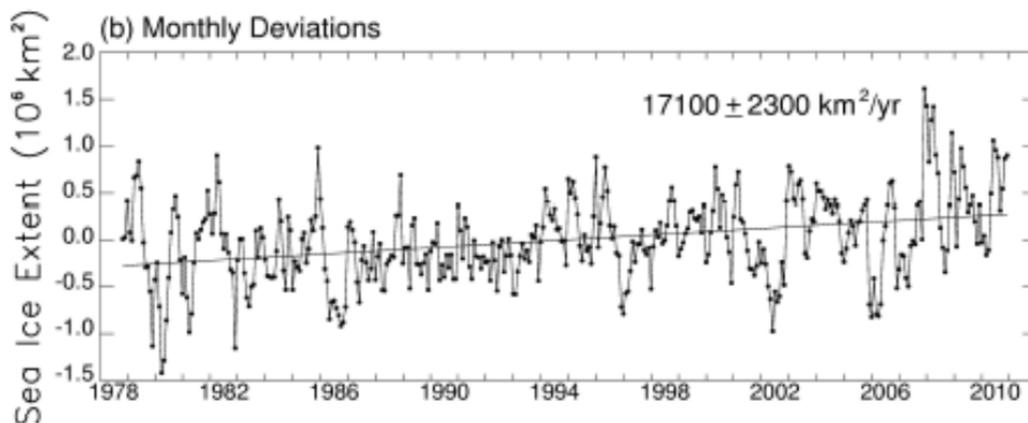


図2. 南半球海氷域の毎月平均面積の時間変動を平年値からの差で示したもの

大気に与えるインパクトは、海氷域の中でも特に変動の激しい季節海氷域が鍵を握ると考えられる。季節海氷域は極域と温帯域の狭間に位置しており、アルビードフィードバックなどの効果を考慮すると、その消長が気候変動にも大きな影響を及ぼすことが十分予想される。従って、気候変動の解明のためには季節海氷域の振る舞いを正しく予測することが重要な課題である。

季節海氷域の変動が気候変動に及ぼす影響を定量的に見積もるには、数値海氷モデルを気候モデルに組み込むのが最も一般的な手法であり、これまでも1970年代に北極域で実施されたプロジェクト（Arctic Ice Dynamics Joint Experiment）の成果である Hibler (1979)以来、数多くの研究がなされてきた。しかしながら、従来の海氷モデルは元来北極多年氷を対象として発展したものであり、必ずしも季節海氷域の実態に基づいたものではない。実際、IPCC 報告書で用いられている気候モデルはいずれも北極海の海氷の急激な減少を過小評価しており (Rampal et al., 2011)、海氷力学過程の改善の必要性を考える研究者も多い。

現実の季節海氷域では氷盤の大きさ分布や氷厚分布など、多年氷とは様々に異なる性質を持っている。特に、季節海氷域のように薄い海氷が多数存在する海域では、正しく氷厚分布を見積もることが大気との熱交換を見積もる上で多年海氷域以上に重要であることが知られており、この複雑さもある程度再現することが要求される。また、近年の北極域では多年氷域の減少に伴って季節海氷域の占める面積が増えており、減少傾向が特に著しいのは融解期であることを考慮すると、季節海氷域の融解過程を正しく数値モデルで表現することが益々重要になってきている。しかしながら、この過程は最も理解が進んでいない過程の一つである。気候変動の解明が重要な課題となっている現在、海氷の実態を基盤とした数値海氷モデルの構築が早急に求められている。

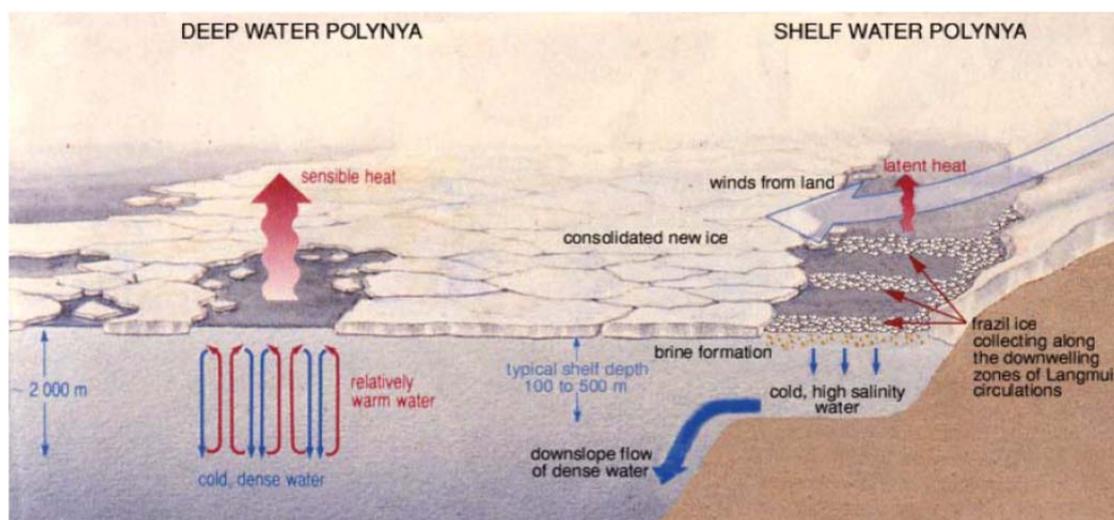


図3. ポリニヤ域が大気や海洋に及ぼす影響を示した模式図 (Maqueda et al., 2004)

一方、海洋に与えるインパクトが特に大きいのは海氷生産量が多くて高塩分濃度の海水が作られるポリニヤと呼ばれる、海氷域の中でも開放水面あるいは薄い海氷で覆われた海域である（図3）。ポリニヤでは大量の海氷を生産すると同時に大量の熱を大気に放出するので大気に対する影響も大きい。海氷生産量はポリニヤの薄氷厚に大きく依存するため、生産量を精度よく求めるためには氷厚を正しく見積もる必要がある。

4. 2. 2. 航空機観測に関して北海道大学が取り組んだ研究

季節海氷域の海氷特性の空間変動の代表的なスケールは数十m～数十kmであり、現場観測のスケールから見ると大きく、衛星画像のスケールから見ると小さい。そこでその間のスケールを埋める航空機観測は有用に用いられてきた。前節で述べたことを背景として、北大低温研では航空機観測としてオホーツク海や南極海を対象として海氷域の気団変質の観測、氷盤の形態観測、氷厚推定のための衛星データ検証などを目的として取り組んできた。ここでは氷盤形態の観測および衛星データ検証について実例を紹介する。

1) 氷盤の形態観測

季節海氷域面積の消長を決定するのは外洋との境に位置する氷縁域の振る舞いであり、その後退過程を予測するためには氷縁域の融解過程を正しく理解する必要がある。氷縁域

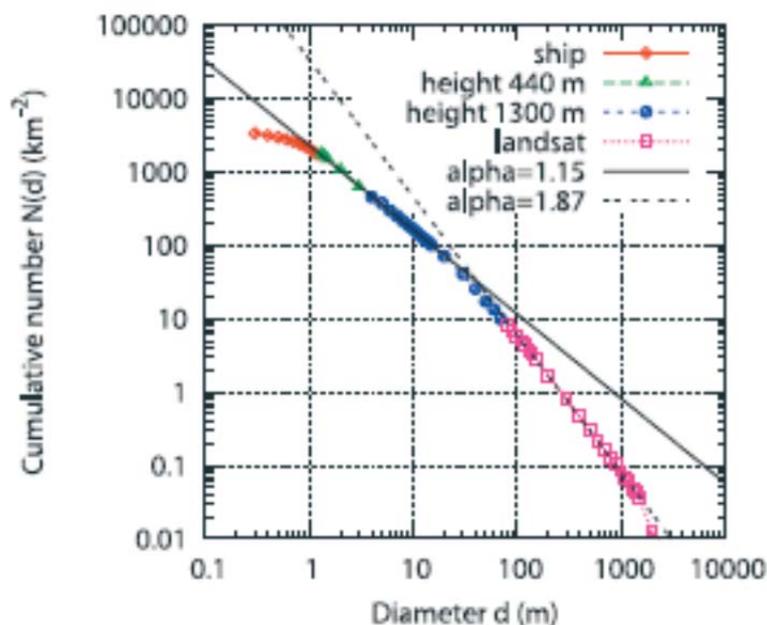


図4. オホーツク海南部における氷盤の大きさの積算個数分布図(Toyota et al., 2006)

横軸は氷盤の直径(d)であり、積算個数(N)とは単位面積あたりに各々の氷盤の直径よりも大きな氷盤の個数を表す。 $N = A d^{-\alpha}$ で表される時、フラクタルの特性があるため、図中で直線関係はフラクタルであることを示している。

は外洋に接するため、波との相互作用が活発な領域として特徴づけられる。すなわち、氷によって波が急速に減衰する一方で、波による屈曲で海氷が破碎し比較的小さな氷盤が形成される。このことは海氷の融解過程に大きな影響を及ぼす。というのは、特に南極氷縁域の融解過程においては春先に氷盤間の開水面で吸収した短波放射の熱が海氷に輸送される過程が本質であることが知られている (Nihashi et al., 2005) が、海氷の占める面積が同じ海氷域であっても小さな氷盤が数多く存在する方が海水に接する面積が大きいため効率的に融解することになる。従って、氷盤の大きさ分布は数値海氷モデルで融解過程を再現する上で大変重要なパラメータと言える。

氷縁域においては大小様々な氷盤が存在している。これらは乱雑に分布しているというよりは、一般的には氷盤分布は自己相似性 (フラクタル) の特徴を持つことが知られている。しかしながら、従来の知見は直径 100m 以上の比較的大きな氷盤を対象とするものが主流であり、比較的小さな氷盤の大きさ分布についてはまだ良く知られていなかった。また、従来の解析結果は、多くの場合にフラクタル次元が 2 を超えるという問題を抱えていた。このことは、小さな氷盤は異なる分布の特徴を持つことを意味する。そこで、オホーツク海や南極海においてヘリを用いた氷盤分布の観測を実施した結果、直径 20~40m を境に異なるレジームが存在することが見出された (Toyota et al., 2006, 2011)。これには波—海氷相互作用が関連していることが推測されている。

2) 衛星データ検証

海氷域の氷厚分布推定のために近年衛星データを用いた手法が開発されているが、変動の激しい季節海氷域では今なお解決すべき課題の一つである。そこでその一つの可能性として L-band の合成開口レーダー (SAR ; 波長 24cm) の有用性を吟味した。これは季節海氷域の氷厚発達には図 5 に示すように力学的な変形過程が本質的であるため、表面凹凸の度合いが氷厚分布の良い指標となりうるという仮定に基づく。表面凹凸を衛星から捉えるには、その凹凸のスケールに近い波長を持つ L-band が有用と考えられる。航空機を用いて船舶との同期観測の結果、オホーツク海 2 月の海氷に関しては L-band SAR の後方散乱係数、表面凹凸の度合い、氷厚の間には良い相関関係があることが見出され、確かに L-band SAR は有用であることが示された (Toyota et al., 2009 : 図 6)。また、極域においてもある程度有用性が確かめられた。現在、ALOS2 衛星において L-band SAR を搭載しており、今後の応用が期待される。

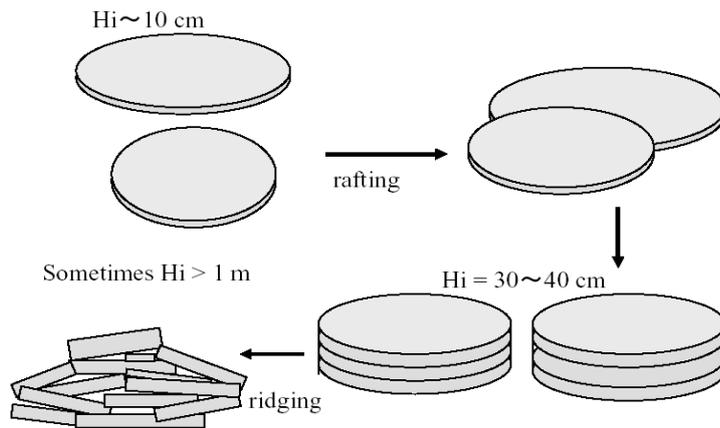


図 5. 季節海氷域の氷厚発達過程

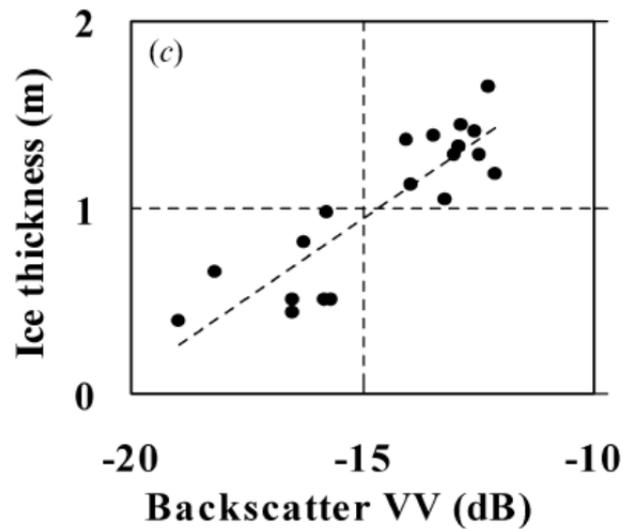


図 6. オホーツク海南部で得られた航空機搭載 L-band SAR の後方散乱係数と氷厚との相関図

一方、ポリニヤにおける海氷生産量を見積もることは海洋大循環を理解する上で重要な課題であるため、薄氷の厚さを衛星マイクロ波データなどから見積もるアルゴリズムを確立し、南極全体の沿岸ポリニヤにおける海氷生産量のマッピングを行った (Tamura et al., 2008 : 図 7)。しかしながら、衛星データに関してはなお現場検証が必要な状況にある。そこで衛星に搭載されているマイクロ波放射計をヘリに搭載してオホーツク海および南極海で検証観測を行った。その結果、その有用性をある程度検証できた。

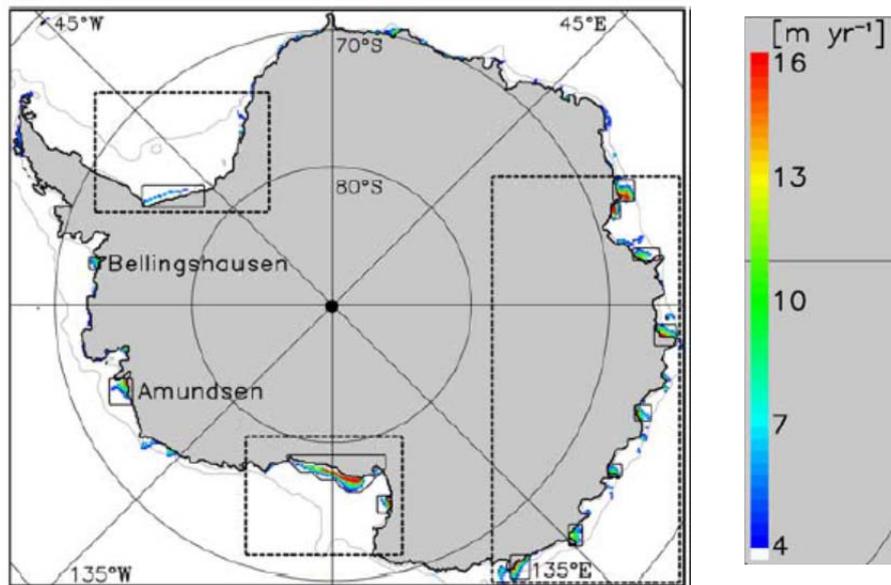


図7. 衛星マイクロ波および気象再解析データを用いて見積もられた海水年間生産量の分布図

4. 2. 3. 今後の海氷に関わる航空機観測の必要性

航空機観測はその機動性や比較的広い観測幅の特性を生かして、これまで季節海氷域の数十m～数十kmのスケールを持つ特性の把握や衛星データ検証に有意義に用いられてきた。特に海氷の形態の把握には航空機は大変有用な手段であった。海氷形態の観測の結果得られた氷厚分布や氷盤大きさ分布は融解過程に留まらず、季節海氷域の力学過程（特にレオロジー）を理解する上で必須のものであり、まだ実態解明からは遠い状況にある。ビデオカメラやレーザー距離計などを航空機に搭載することにより、少しでも多くのデータを収集して解析を行い、海氷域の動態を正しく理解することが求められている。例えばレーザースカナーを用いた2次元的な表面の凹凸状況が分かれば季節海氷域における氷厚分布および氷厚発達過程を知るための有力なデータとなり得るであろう。また、衛星検証という観点からは、現場と衛星の観測幅の大きなギャップを埋める有用な手段であった。合成開口レーダーやマイクロ波の特性など、衛星情報を正しく解釈するためにはまだ多くのデータを必要としている。海氷の実態を把握することは数値海氷モデルの発展にとって必須のものであり、可能であれば季節変化が捉えられるようなりピート観測が望まれる。

4. 2. 4. 予定されている極域国際観測研究プロジェクト

観測時期は海氷に関わる他の国際共同観測計画に合わせて実施するのが効率的である。現在、2017年10月～2019年9月にWMOが主催するPolar Prediction Projectの一環として

Year of Polar Projection (YOPP)、IASC が主催する Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC)が 2019 年 10 月～2020 年 9 月に計画されている。

前者は極域観測システムの改善、予測のために用いられるモデルの重要な過程の改善、海氷に焦点を置いて極域の大気－雪氷圏－海洋システムの予測などを目的としたものであり、大学・研究機関・現業機関の連携を強化することを目指している。

(<http://www.polarprediction.net/yopp/yopp-summit-presentations.html>)

一方、後者はドイツ砕氷研究観測船「Polarstern」(Alfred Wegener Institute)を用いて北極海横断観測を実施して北極海の気候システムの各々のプロセスを理解すること、北極気候予測に用いられるモデルの改良などを目的としている。(<http://www.mosaicobservatory.org/>)

このように、どちらも実施期間も目的も航空機を用いた本観測研究計画と合致するので、これらの計画と連携して実施するのが有効と考えられる。

4. 2. 5. 想定される観測計画案

観測海域は航空機の運用上、日本に比較的近い北極海とオホーツク海が想定される。観測内容としては、1) 基礎となる氷盤の形状や大きさの分布、2) ridging の履歴を示す表面凹凸の分布、3) (北極海融解期の) 表面のメルトポンドの分布、4) 表面乱流熱フラックスの観測、5) 衛星データ検証 (合成開口レーダー、マイクロ波放射計) を提案したい (図 8)。3) は北極海の熱収支においては重要であるものの衛星からの詳細な観測が困難であるため、4) は気象モデルにおいて海氷域の表面熱フラックスは重要であり現場検証観測が望まれるために提案した。必要な観測機器は 1) はビデオと GPS、2) はレーザースキャナ (Riegl-Japan) や合成開口レーダー、3) はビデオやマイクロ波放射計、4) は気象計や放射収支計、5) は携帯用の合成開口レーダーやマイクロ波放射計などが想定される。飛行高度は図 8 に示すように、低い高度は熱フラックスの観測を考慮して約 170m、高い高度はレーザースキャナの測定限界を考慮して約 2 km を提案する。

以上は理想であるが、ロシアとの国境の問題もあり、現実的には観測海域はオホーツク海南部の排他的経済水域内 (EEZ) に限定されることも十分考えられる。たとえこの場合であってもオホーツク海南部の同じ航路を定期的に飛行して上記観測を実施すれば (図 8 中の破線)、海氷の形態変化を知るためのデータが蓄積される。気候変化に伴う海氷域の変化は面積や厚さのみならず、海氷形態の変化を定量的に把握することもまた予測を行う上で重要な情報であるため、十分意味がある観測と考えられる。

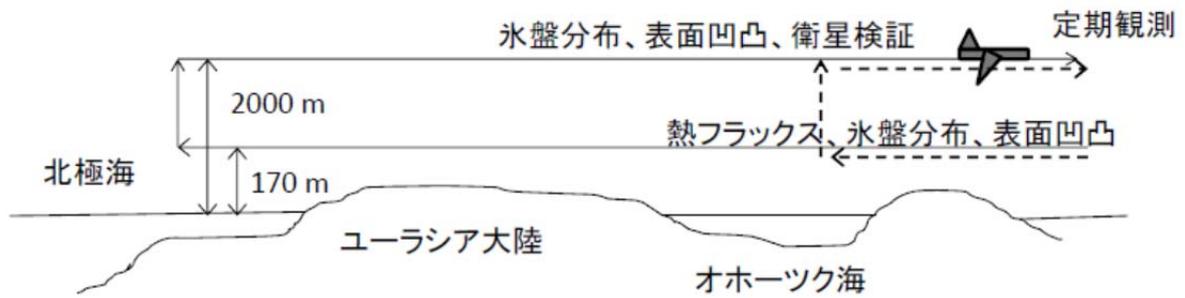


図 8. 想定される観測飛行高度

(実線は北極海も含める場合、破線はオホーツク海南部に限定される場合)

参考文献

- Cavalieri, D.J., and C.L. Parkinson: Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010. *The Cryosphere*, 6, 881-889, 2012a.
- Hibler, W. D., III: A dynamic thermodynamic sea ice model. *J. Phys. Oceanogr.*, 9, 815-846, 1979.
- Morales Maqueda, M.A., A.J. Willmott, and N.R.T. Biggs: Polynya dynamics: a review of observations and modeling. *Rev. Geophys.*, 42, RG1004, doi:10.1029/2002RG000116, 2004.
- Nihashi, S., K.I. Ohshima, M.O. Jeffries, and T. Kawamura: Sea-ice melting processes inferred from ice-upper ocean relationships in the Ross Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 110, C02002, doi:10.1029/2003JC002235, 2005.
- Parkinson, C.L., and D.J. Cavalieri: Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2010. *The Cryosphere*, 6, 871-880, 2012.
- Rampal, P., J. Weiss, C. Dubois, and J.-M. Campin: IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: Consequences in terms of projected sea ice thinning and decline. *J. Geophys. Res.*, 116, C00D07, doi: 10.1029/2011JC007110, 2011.
- Tamura, T., K.I. Ohshima, and S. Nihashi: Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07606, doi:10.1029/2007GL032903, 2008.
- Toyota, T., S. Takatsuji, and M. Nakayama: Characteristics of sea ice floe size distribution in the seasonal ice zone. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02616, doi:10.1029/2005GL024556, 2006.
- Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K.I. Ohshima, and N. Ebuchi: Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from airborne L-band SAR. *Int. J. Remote Sensing*, 30(12), 3171-3189, 2009.
- Toyota, T., C. Haas, T. Tamura: Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter. *Deep-Sea Res. II*, 58, 1182-1193, 2011.

4. 3. 海洋・沿岸

4. 3. 1. はじめに

海洋は大気と熱や水を含めた様々な物質のやり取りを行うことで、地球の気候を決定する重要な役割を果たしている。一方沿岸域は、水産業や海運業など人間活動が盛んであり、また陸域からの水を含めた物質の供給が大きく、直接的・間接的に人間活動の影響が大きい。このような海域の調査には、主に船舶や人工衛星、ブイなどが用いられている。一方で、航空機を利用したリモートセンシングおよび投入型の観測機器も、一部で利用されており、今後さらに手法を開発することによって、これまでの観測手法では困難な情報が得られることが期待される。

4. 3. 2. リモートセンシング

航空機を利用した海洋のリモートセンシング技術は、衛星センサーが開発される前段階として多くのセンサーが開発されている。熱赤外を利用した海面水温計、可視を利用した分光放射計は長い歴史もあり、商業用のセンサーも存在している。その他に、マイクロ波放射計、SAR、海面高度計などが存在しているが、ここでは主に可視域のリモートセンシングのみ取り扱う。

可視域の分光放射計によるリモートセンシングに関しては、海の水の色自体を観測し、その中の植物プランクトンや懸濁物質、溶存有機物などを測定する海色リモートセンシングと、主に沿岸域の海底の海藻や珊瑚礁などの観測がありえる。これらは、特に人工衛星では、そのセンサーの感度やS/N、波長分解能、時空間解像度などが異なっている。いずれのリモートセンシングでも、大気中のエアロゾル等の散乱の影響や、海面における太陽光の直接反射などの影響を少なくする方法が必要であり、航空機観測は衛星以上に定量的におこなうのは難しい部分もある。しかし、航空機で特に高い波長分解能を持ったセンサーによる頻繁な観測が他の様々な情報とともに行われれば、これらの問題の解決につながる事が望まれ、様々な新しい現象の解明につながる可能性がある。分光放射計以外にも、ハイパースペクトルカメラなども開発されており、陸域観測と同様に海洋観測に利用できる可能性もある。

一方、航空機からのレーザーを利用したライダー観測も、NASA等では行われてきた。特に水中の植物プランクトンは深さ方向に一定に分布しているわけではないため、その分布を把握することに利用できる。CALIPSOでは、衛星から植物プランクトンの鉛直分布を求めた試みも行われている(Churnside et al., 2013)。航空機を利用して、短期的な気象・海象の変化やエアロゾルの供給等に伴って、表面の植物プランクトン量だけでなく、その鉛直的な分布の変化を明らかにする手段が開発されることが期待される。

4. 3. 3. 投入式測器

航空機から投入する海洋測器としては、これまで AXBT (Airborn eXpedable Bath Thermograph) が利用されてきている。AXBT は航空機から投入する水温計であり、投入後パラシュートで海面に着水すると、センサーが重力によって沈降する。センサーは海面に残る送信機と細いケーブルでつながっており、水温が送信機から航空機側の受信機に時々刻々とデータが伝達される。この測器には水深センサーはついていないために、水深は沈降速度から求める。AXBT は、日本でも(株)鶴見精機が販売をしているが、

(<http://www.tsk-jp.com/index.php?page=/product/detail/6>) 実際に運用するにはいくつかの問題がある。上記したように、航空機で受信をする必要があるために、航空機が送信機からあまり遠くに離れることができない。さらに、沈降速度から水深を求めるために、台風のような混合が盛んな状態で水深の精度がどの程度保たれるのかははっきりしていない。それでも、船舶が近づきにくい、海氷の間等での観測にはこれまで利用された実績がある (Ushio et al., 1999)。また、海水の密度を計算するのに重要な塩分を測定するために、電気伝導度を測定できる XCTD (eXpendable Conductivity Temperature Depth sensor) も存在する (Hamilton et al., 2002; Childers and Brozena, 2005) が、日本での使用実績はない

(<http://www.tsk-jp.com/upload/product/pdf/AXCTD.pdf>)。また、海外では生物光学的な情報を得ることのできる、光学測器のついた AXBT も開発されている (Hoge et al., 1998)。

一方、最近では ARGO フロートと呼ばれる、自動浮沈式のセンサープラットフォームが開発されている。世界の海洋で 3800 以上が稼働しており、海洋の水温、塩分を正確な位置と水深とともに、衛星経由で取得でき、データベースが公開されている

(http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html)。このようなフロートは日本でも開発されている (<http://www.tsk-jp.com/index.php?page=/product/detail/10>)。また、BioARGO と呼ばれる一部のフロートには、溶存酸素計や植物プランクトンの量を測定するクロロフィル蛍光光度計、さらに水中分光放射計などがつけられ、生物化学的な観測も可能になってきている (<http://satlantic.com/sites/default/files/documents/satlantic-wetlabs-BOSS.pdf>)。

これまで、台風時の水中の水温・塩分構造の変化の観測に ARGO フロートのデータが利用された場合もあるが (Siswanto et al., 2008)、多くの ARGO フロートは数日に 1 回程度しか、浮き上がらないために、利用できるデータは多くはない。台風のような、急速に変化する現象での海洋の状況を把握する上では、航空機で観測海域の周辺にフロートを投入し、状況を測定することが望まれる。そのため、ワシントン大学では、航空機からパラシュートを付けた EM-APEX (Electromagnetic Autonomous Profiling Explorer) と呼ばれる ARGO のような自動浮沈式フロートを台風の予想進路上に、いくつも投入して、そこでの水温・塩分・流速の変化を調べる実験を行っている (図 1, 図 2; Sanford et al., 2011)。彼らは、航空機の後部ハッチから手で投入しているが、これは特殊な航空機を利用する必要があり、また危険を伴う。そのため、2014 年からウッズホール海洋研究所と MRV システムズは、航空機のランチャから投入できる比較的小型の ARGO フロート (ALAMO: Air-Launched Autonomous

Micro Observer) を開発し、販売もしているようである

(<http://www.mrvsys.com/products-and-services/mrv-alamo>)。しかし、現実にこれらのプラットフォームを利用可能とするためには、様々の形状の測器を投入できるランチャが必要であるとともに、航空機の飛行速度や高度等、詳細な計画検討が必要である。

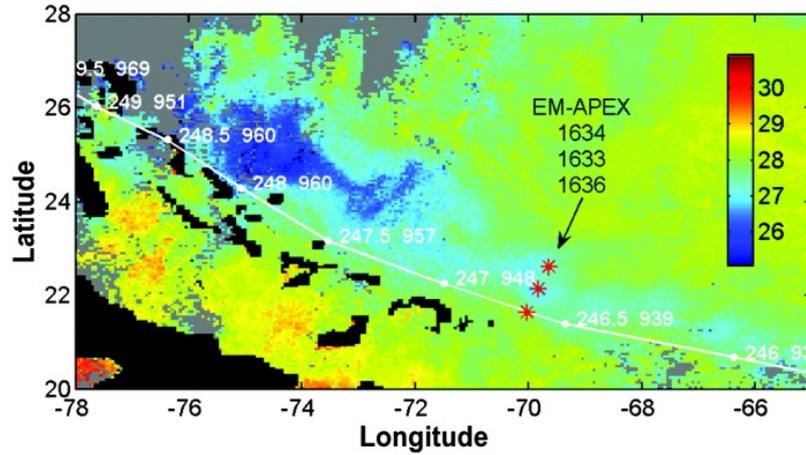


図 1. Sanford et al. (2011)で EX-APEX フロートが航空機から投入された地点 (赤星)。白い線は台風の進路。

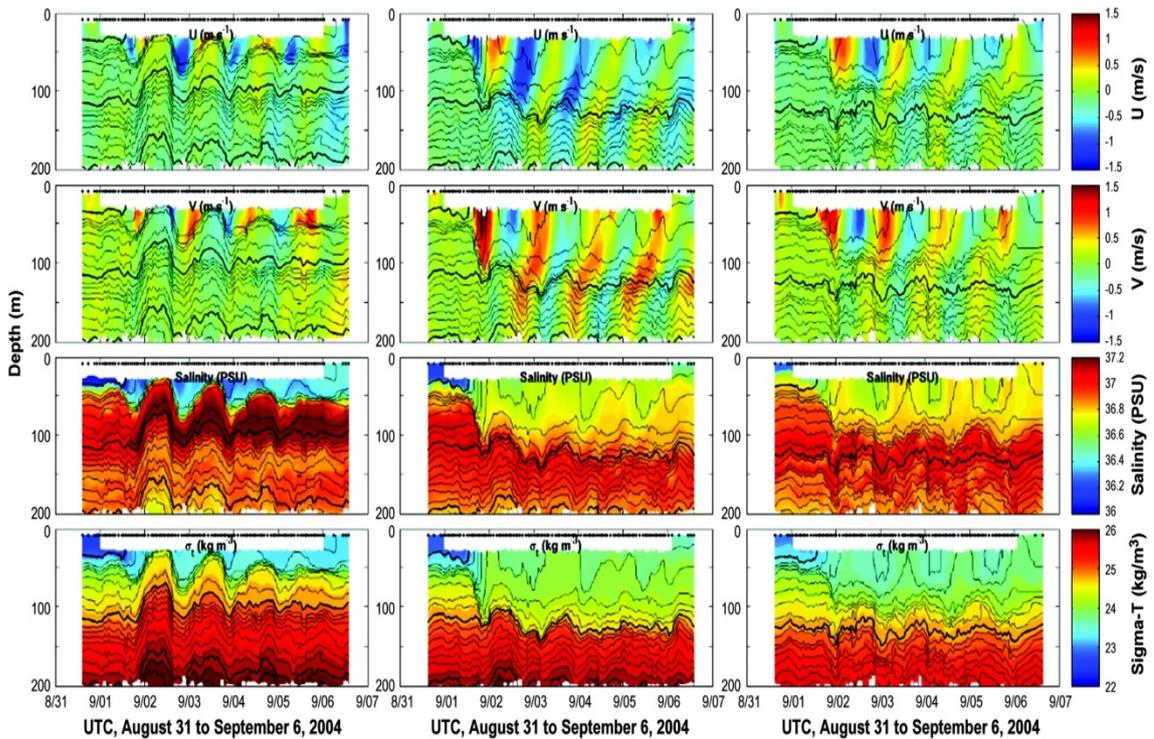


図 2. Sanford et al. (2011)によって、EX-APEX フロートで観測された東西・南北方向の流速 (U, V)、塩分 (Salinity)、密度 (Sigma-T)。等値線は水温。

その他にも、現在海洋用の測器として、海洋グライダーや ROV と呼ばれる様々な自走式のセンサープラットフォームが開発、使用されている。このような、海洋ロボットを航空機から投入する方法も検討はされているようである。このような、プラットフォームの開発も日本で将来のために必要である。

4. 3. 4. 終わりに

現状では、リモートセンシングと投入型の海洋観測機器の利用は限られているが、今後さらに手法の開発が進むことが期待される。一方で、物理的・化学的な大気海洋相互作用は重要な研究テーマであり、これまで船舶等外洋側だけ行われていた観測に、航空機を利用した大気側の観測を組み合わせることによっても、大気・海洋両側の研究が飛躍的に進むことが考えられる。また、将来的には、航空機のメリットを持ちながら、海上に直接降り観測することが可能な、飛行艇の海洋観測への利用も期待される。

参考文献

- Childers, V.A. and J.M. Brozena (2013) Long-range aircraft as an Arctic Oceanographic platform. *Deep-Sea Research Part I*, 52(12), 2366-2375.
- Churnside, J.H., B.J. McCarty and X. Lu (2013) Subsurface ocean signals from an orbiting polarization lidar. *Remote Sensing*, 5, 3457-3475; doi:10.3390/rs5073457.
- Hamilton, P., T.J. Berger and W. Johnson (2002) On the structure and motions of cyclones in the northern Gulf of Mexico, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 107(C12): 3208; doi: 10.1029/1999JC000270.
- Hoge, F. E., C. Wayne Wright, R. N. Swift, J. K. Yungel, R. E. Berry and R. Mitchell (1998). Airborne bio-optics survey of the Galapagos Islands margins. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 45(6): 1083-1092.
- Sanford, T.B. J.F. Price and J.B. Girton (2011) Upper-Ocean Response to Hurricane Frances (2004) Observed by Profiling EM-APEX Floats. *Journal of Physical Oceanography*, 41, 1041–1056. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JPO4313.1>.
- Siswanto, E., J. Ishizaka, A. Morimoto, K. Tanaka, K. Okamura, A. Kristijono, T. Saino (2008) Ocean physical and biogeochemical responses to Typhoon Meari passage in the East China Sea observed from Argo float and multiplatform satellites, *Geophysical Research Letter*, 35, L15604, doi: 10.1029/2008GL035040.
- Ushio, S., T. Takizawa, K.I. Ohshima and T. Kawamura (1999) Ice production and deep-water entrainment in shelf break polynya off Enderby Land, Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 104(C12), 29,771-29,780.

4. 4. 陸上生態系

4. 4. 1. 気候システムに対する陸上生態系の役割の把握

植生を主体とする陸上生態系は気候システムに対して大きな機能を担っている。そのうち最たるものは、植物の光合成や呼吸による大気と陸面間の炭素交換であろう。IPCC (2013)によれば、化石燃料の燃焼などによる人為起源の二酸化炭素の大気中への年間放出量のうち、4割を陸が吸収しているとされる。一方、生態系はバイオマスや土壌有機物のような形で炭素を地表面付近に固定し、大気中から隔離する機能も担っている。IPCC (2013)によれば、その量は植生だけでも 450~650PgC であり、これは現在大気中に存在する炭素量に匹敵する。そのほか、生態系はメタンなどの温室効果気体や、雲形成に影響を与える可能性のある生物起源揮発性有機化合物(BVOC : Biogenic Volatile Organic Compound)の発生とも強く関連する。林野火災が発生すれば、大量のエアロゾルが大気中へと拡散していくだろう。さらに、植生は蒸散や降水の遮断を通じて、水収支にも影響を及ぼすほか、地表面のアルベドや空気力学的粗度にも密接に関わってくる。

気候システムを理解しようとした場合、以上のような陸上生態系の地理的分布とその時間変動を把握することが必須である。これまでも衛星による観測データを使って、その動態が研究されてきた。衛星搭載センサーMODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)のデータを基に全球陸域の植生が分類され、その分布が地図化されている(たとえば、Tateishi et al., 2011)。また、近赤外域と可視域における反射率の差を利用して計算される植生指数からは、各地の植生の 1980 年代以降のトレンドが明らかにされてきた。たとえば、アラスカの北極海沿岸では 1982 年から 2006 年において植生指数の増加トレンドが指摘されている(Wang et al., 2011)。そのほか、シベリアでは 1980 年代から 1990 年代前半までは植生指数の増加傾向が指摘されてきたが、1990 年代後半から 2000 年半ばまでは減少傾向があることが発見されている(Piao et al., 2011)。また、植生指数の季節変化から、植生の年間の生産性を決める展葉や落葉といったフェノロジーを衛星データからとらえようとした研究も発展した(たとえば、Suzuki et al., 2003; Nagai et al., 2014)。衛星データからは、さらに光合成ポテンシャルを代表する葉面積指数(単位土地面積あたりに存在する緑の葉の面積)の広域の分布も推定されている(たとえば、Kobayashi et al., 2010)。森林の地上部バイオマスの分布も、衛星 ALOS(Advanced Land Observing Satellite)のマイクロ波合成開口レーダー PALSAR(Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar)のデータを使って、推定が試みられている(例えば、Avtar et al., 2013; Suzuki et al., 2013)。

以上のように、衛星観測は大陸規模から全球といった広域について、陸域生態系の分布やその変動をとらえることができるが、数 100 キロメートルよりも上空からの測定であるので、その水平解像度にはどうしても限界がある。図 1 に衛星 QuickBird によるアラスカの内陸域の画像を例示した。QuickBird といえば、代表的な高解像度衛星である。しかし、画像上には森林が認められるものの、森林の個々の立木(個木)を分離することは、実際には解

像度が不足し困難である。また、衛星観測による画像では森林の樹冠と林床を分離することも一般に困難である。このため、衛星観測による植生指数に現れた季節変化が、樹冠の変化によるものか、林床の植生や積雪の変化によるものかは、わからない。



図1. QuickBirdによる画像の例。アラスカの内陸部の都市フェアバンクスから約35km北東に位置するポーカーフラット試験地の2009年8月27日のトゥルーカラー画像。

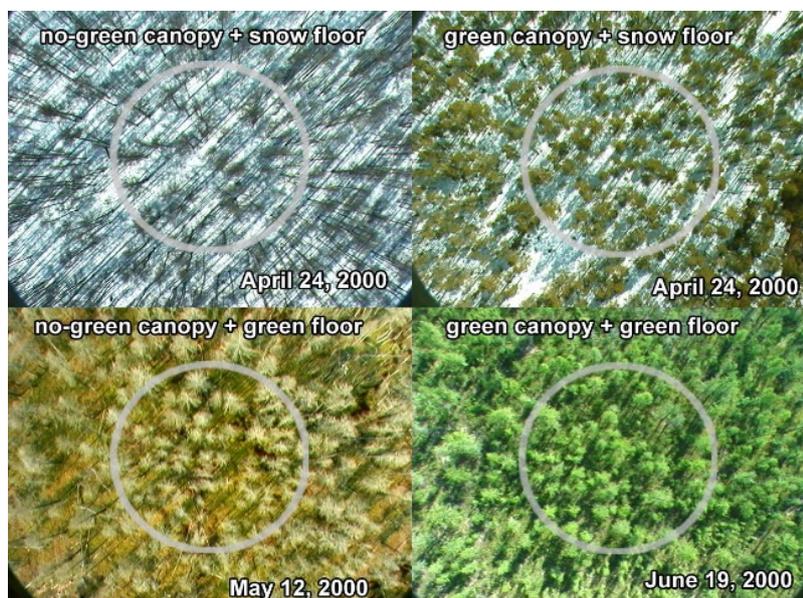


図2. 東シベリアのヤクーツク付近で2000年の春から夏にかけて行われた航空機観測で、搭載したビデオカメラで撮影された森林の画像。(Suzuki et al., 2011)

航空機に搭載された家庭用のビデオカメラで 100~150m 上空から撮影された東シベリアの森林の画像を図 2 に示した。家庭用のビデオカメラという必ずしも解像度が高くない機材であっても、一本一本の立木がはっきりと判読できることがわかる。また、樹冠と林床の状態をそれぞれ別々に判読できることもわかる。2000 年 4 月 24 日の左上の画像では、林床に雪があり、一方樹冠には緑の葉は認められない。同日の別の森林をとらえた右上の画像には雪に覆われた林床と緑の葉が着いた樹冠が見える。下の 2 枚の画像はともに林床に雪がないが、樹冠の緑の葉の存否ははっきりとわかる。

本節の冒頭で述べたように、植生は光合成や呼吸による陸面と大気間での炭素交換や、蒸散やアルベドなどを通じて、気候システムを形作っている。そのプロセスの中で、森林の樹冠や林床、さらに複雑な場合は下層植生や中層植生といった構造が、重要な意味を持っている。同じ葉面積指数であっても、樹冠と林床の葉では光環境が大きく異なるため、光合成による生産性や蒸散に及ぼす影響の差異は大きいだろう。また、葉が持つ降水に対する遮断の効果も、林床と樹冠の葉とでは遮断蒸発量や土壌の保水機能に及ぼす量は著しく違ふと考えられる。また、林床の積雪はその高いアルベドゆえ、植生指数を小さくする働きを持つ。

以上のような森林の性質を考慮し、気候システムにおけるその役割を理解するには、森林が 3 次元的構造を持っている前提に立ち、航空機に搭載された光学センサー(分光放射計)やレーザースキャナによって、個木や樹冠と林床が識別できる高解像度の画像を得ることが必須である。さらに、植生は太陽からの照明を受ける方向とその反射光を観測する方向によって分光反射特性が変化する。その特性は 2 方向性反射分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)と呼ばれる。航空機によって植生の分光反射を多季節、多時刻において多方向から観測することで、対象となる植生の 2 方向性反射分布関数を明らかにでき、その植生の精密な 3 次元放射伝達モデルの開発を可能とするだろう。その結果、葉面積指数を含めた植生の構造の衛星観測データによる高度な推定が可能となる。また、森林地上部バイオマスの分布は、航空機搭載レーザースキャナを使えば、マイクロ波合成開口レーダーによる推定にはつきもの後方散乱強度の飽和の問題も起こらず、得られた樹高データにアロメトリ式を組み合わせることにより、高精度で推定することができる(たとえば、Hayashi et al., 2013)。

このように、航空機観測では、衛星では一般に困難な植生の 3 次元構造をとらえることが可能であり、実際の航空機観測ではその点が活かされるべきである。観測対象としては、樹冠が密で林床までの構造を見通すことが難しい熱帯林より、たとえば亜寒帯のように疎で、上空からその林床から樹冠までの構造の把握が容易な森林が相応しいだろう。その意味から、近年の温暖化による変化が注目されている、アラスカやシベリアなど、北半球高緯度を広く覆う疎な亜寒帯林を対象とした観測は意義深いと思われる。

4. 4. 2. 生物多様性、生態系機能とサービスの把握

「生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム (IPBES: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)」が2012年4月に設立された。IPCCは気候変動に関する政府間の仕組みであるが、かたやIPBESは生物多様性及び生態系サービスに関する政府間の仕組みである。IPCCでは気候変動や温室効果ガスを軸に議論が行われるが、IPBESの軸は生物多様性と生態系サービスである。IPBESの設立に象徴されるように、気候変動によって引き起こされる生物多様性及び生態系サービスの变化が近年注目されるようになるにつれ、その評価を行うための基盤となる科学的知見を観測で得ることの重要性も高まってきた。陸域生態系の地理的な広がりや時間変動は、生物多様性及び生態系サービスの量と質に密接に関わるため、その特徴を統一された手法によ



図3. 北茨城市の試験林において、数10メートル上空を飛行するヘリコプターに取り付けられたカメラによって撮影された森林。2011年11月29日撮影。画像は図4に示した地形によって、オルソ補正してある。

って客観的に提示することが喫緊の課題となっている(鈴木、2015)。地球観測グループ(GEO: Group on Earth Observations)の下に設けられた生物多様性観測ネットワーク(GEO BON: GEO Biodiversity Observation Network)(矢原、2008)は、その作業部会として生態系サービスを対象とする第6作業部会のほか、衛星や航空機による観測(すなわち、リモートセンシング)データと現地観測データを統合し、生物多様性及び生態系サービスを評価しようとする第7作業部会を持つ。また、アジア太平洋地域や日本の生物多様性観測に関するネットワーク

であるアジア太平洋生物多様性観測ネットワーク(APBON: Asia-Pacific BON)や日本生物多様性観測ネットワーク(JBON: Japan BON)でも同様に生態系サービスに関する分科会のほかに、衛星や航空機観測に関する分科会が設定されている(Muraoka et al., 2012)。

Nagendra (2001)によれば、生物多様性の分布を衛星や航空機観測で推定する手法は、基本的に以下の三つに分類される。

1. 個体や群集を直接識別する方法
比較的大きな植物の個体や群集を直接識別した上でマッピングする。
2. 生態系の分布を推定する方法
種の生息域を推定できる生態系の分布を分類しマッピングする。
3. 代理指標によって分布を推定する方法
観測によって得られた物理量を現地調査情報と組み合わせることで代理指標化し、地図化する。

以上のうち、「2」と「3」は生態系の分布や代理指標(たとえば、葉面積指数や森林地上部バイオマス)の広域分布を分析することで生物多様性や生態系サービスを推定する方法なので、低解像度な衛星観測データであっても研究することがある程度可能である。他方、「1」は個々の生物(植生であれば個々の植物)を識別した上で分析を行うので、前述の通り、たとえ QuickBird のような高解像度衛星画像を使っても、解像度は依然不足する。よって、ずっと高い解像度での観測を可能とする航空機による観測に委ねることになる。「1」に分類さ

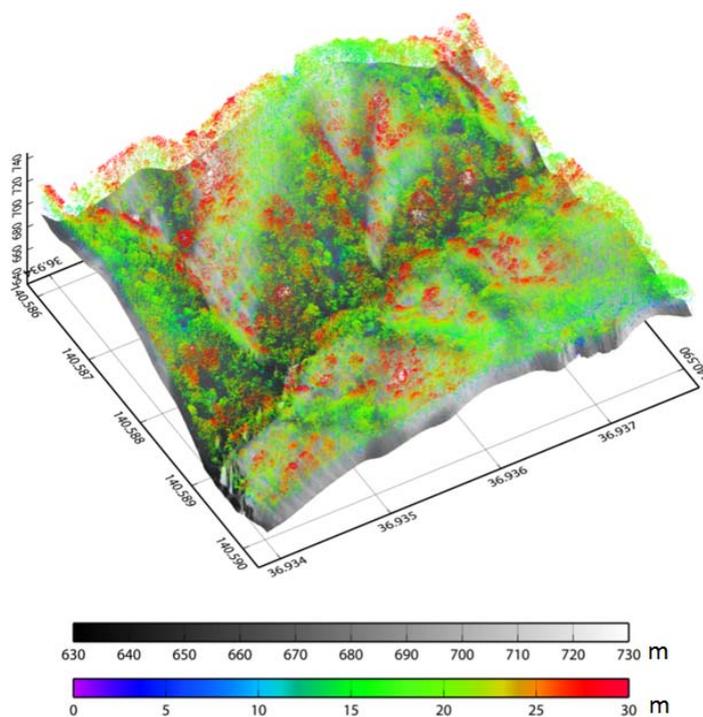


図4. 北茨城の試験林において、ヘリコプターに搭載されたレーザースキャナのデータによって描き出された現地の地形(グレースケール)と森林の樹冠の形状(カラースケール)。図の南北の距離は430m、東西の距離は400mである。(Inoue et al., 2014)

れる観測を航空機で実施することで、生態系の構造や、構成する生物個体の種やその形質など、生物多様性や生態系機能、サービスを評価するための最も根本的な基盤情報を得ることができる。

航空機観測では原理上、十分低空を飛行して観測すれば、1cm以下の解像度も得られる。図3にInoue et al. (2014)が紹介した北茨城市の温帯林における無人ヘリコプターによる観測において、数10メートル上空から通常のカメラで撮影した森林の画像を例示した。落葉後だったので樹冠に葉が無く、枝が鮮明に写っている。また、林床には落葉のほか、倒木を確認することもできる。ヘリコプターにはカメラのほかレーザースキャナが搭載され、そのデータより対象地域の地形(DEM: Digital Elevation Model)と森林樹冠の形状が図化された。こういった植物の個体や地形に関する情報は、衛星ではなく、航空機による高解像度観測だからこそ得られる。

1990年頃から、生態系機能と密接な関係のある葉の化学組成をハイパースペクトル放射計によって推定する研究が盛んになった。通常の分光放射計が可視から近赤外域において観測波長帯を数バンドしか持っていないところ、ハイパースペクトル放射計は100以上のバンドを持ち、分光反射に関する詳細な特徴を測定することができる。低高度を飛行する航空機にハイパースペクトル放射計を搭載した場合、通常の分光放射計では計測することのできない葉の化学組成に踏み込んだ観測が可能となる。

その例として、米国航空宇宙局(NASA)が1991年から1992年にかけて行ったプログラムACCP (Accelerated Canopy Chemistry Program)が挙げられる

(<http://daac.ornl.gov/ACCP/accp.shtml>、2015年9月17日確認)。植生群落におけるリグニンと窒素の含有量を推定することを試みている。ACCPと同時期にヨーロッパを中心にLOPEX93 (Leaf Optical Properties Experiment 93)も行われ(Hosgood et al. 1994)、葉の光学モデルを発展させるべく、50種に及ぶ葉の分光と化学組成に関するデータセットを創成した。



図5. Carnegie Airborne Observatory (CAO)で使用されている観測用航空機。

http://cao.stanford.edu/?page=cao_systems

(2014年11月17日確認)

こういったモデルは、葉の光合成色素、水分、炭素といった成分がどのように分光特性に寄与するかについての理解を飛躍的に高めた。

その後、米国カーネギー研究所の G. Asner のグループは、航空機に搭載したハイパースペクトル放射計とレーザースキャナによる葉の化学組成にまで踏み込んだ観測的研究を精力的に進めた(<http://cao.stanford.edu/>、2015年9月17日確認)。図5に観測で利用されている航空機の写真を挙げた。オーストラリアの熱帯林では、化学組成データに対して葉の分光反射特性(400–2500nm)を組み合わせ、樹冠の分光反射特性と葉の化学特性との間の関係を構築した(Asner and Martin, 2008)。また、熱帯林の樹冠では、可視から短波長赤外におけるハイパースペクトル測定値を基に、葉の光合成色素、水、窒素、セルロース、リグニン、フェノール、葉重を推定した(Asner et al., 2011)。さらに、図6に示したようにハワイの熱帯林を対象に、ハイパースペクトル画像に教師付分類を施すことによって樹種を同定し、最終的に個木レベルで識別可能な17種に分類された地図を作っている。Asner のグループの航空機を使った観測システムとその手法は、マレーシアの熱帯林にも応用され、天然林やプランテーションの分布やその特質を明らかにした。生物多様性や生態系サービスを評価するための基盤的な情報となりうるだろう。

以上のように、航空機で観測した場合、その解像度の高い画像からは森林の個木を識別する分析が可能となるうえ、ハイパースペクトル仕様のカメラとレーザースキャナを搭載すれば、陸域生態系についての航空機観測としては現在考えられる最も詳しい情報が得られるだろう。IPBES の設立に象徴される生物多様性や生態系サービスの研究の必要性の高まりに呼応し、航空機を使った観測システムの開発と導入が期待される。

生物多様性や生態系サービスに対する航空機観測が期待される対象は、第一に生物多様性が高い熱帯の森林だろう。また、熱帯の森林はバイオマスとして膨大な炭素を大気から隔離することで、温室効果を抑制する生態系サービスを人類に対して行っている一方で、燃料、工業や医薬品の原料の供給サービスのほか、野生動物などの生息域を提供することで、エコツーリズムを通じた文化的サービスも提供する。そのような多様な価値がせめぎ合う中で、樹種や生態系機能、構造の分布や、その伐採などによる人的な変化を航空機観測で明らかにすることの意義は多大であろう。具体的には、日本から比較的近距離にある東南アジアの熱帯林が対象となるだろう。また、国内であっても、人間の社会経済活動と密接に関係する森林や草地は、生態系サービスを評価する見地から熱帯林と同様に観測対象となると考える。

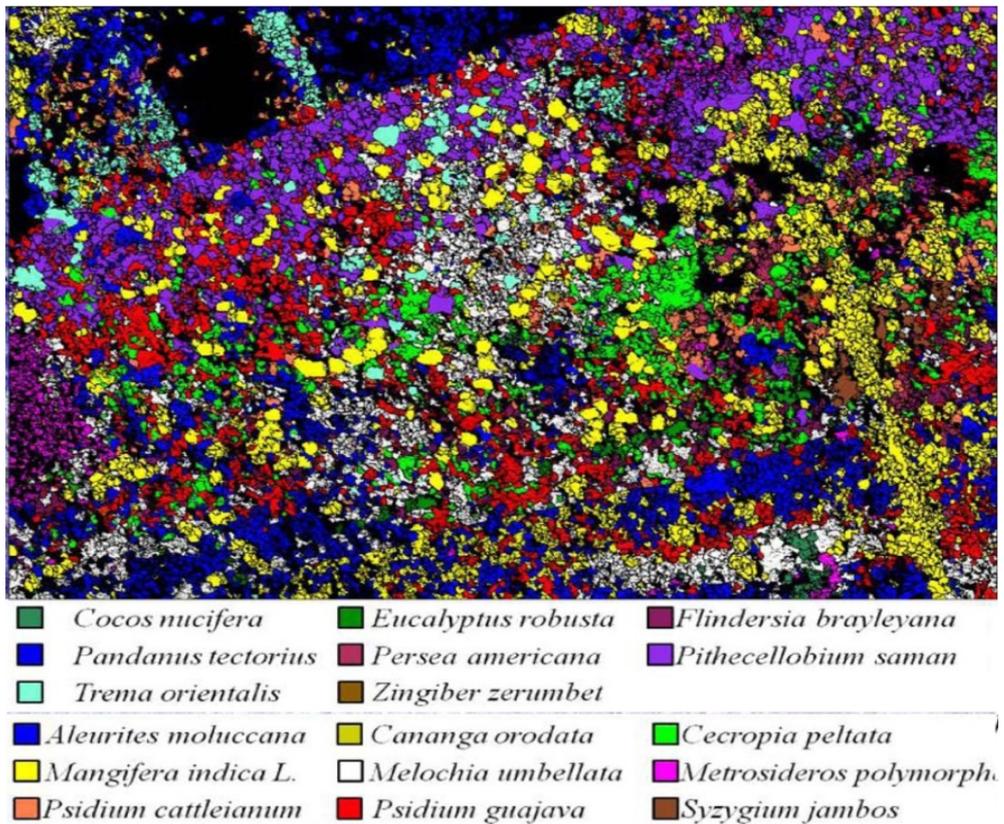


図 6. Carnegie Airborne Observatory-Alpha システムによって得られた画像を基に分類した
ハワイの Nanawale 森林保護区における 17 種の植物のマップ。(Féret and Asner, 2012)

参考文献

- Asner, G.P., Martin, R.E., Knapp, D.E., Tupayachi, R., Anderson, C., Carranza, L., Paola, M., Houcheime, M., Sinca, F., and Weiss, P. (2011): Spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests. *Remote Sensing of Environment*, **115**, 3587-3598.
- Asner, G.P. and Martin, R.E. (2008): Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 3958-3970.
- Avtar, R., Suzuki, R., Takeuchi, W., and Sawada, H. (2013): PALSAR 50m mosaic data based national level biomass estimation in Cambodia for implementation of REDD+ mechanism. *PLoS ONE*, 8: e74807.
- Féret, J.-B., Asner, G.P. (2012): Tree species discrimination in tropical forests using airborne imaging spectroscopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **51**, 73-84.
- Hayashi, M., Yamagata, Y., Borjigin, H., Bagan, H., Suzuki, R., and Saigusa, N. (2013): Forest biomass mapping with airborne LiDAR in Yokohama City. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, **52**, 306-315.

- Hosgood, B., Jacquemoud, S., Andreoli, G., Verdebout, J., Pedrini, G., and Schmuck, G. (1994): Leaf Optical Properties Experiment 93 (LOPEX93). European Commission, Luxembourg.
- Inoue, T., Nagai, S., Yamashita, S., Fadaei, H., Ishii, R., Okabe, K., Taki, H., Honda, H., Kajiwara, K., and Suzuki, R. (2014) Unmanned Aerial survey of fallen trees in a deciduous broadleaved forest in eastern Japan. *PLoS ONE*, 9, doi:10.1371/journal.pone.0109881.
- IPCC (2013): Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch/>.
- Muraoka, H., Ishii, R., Nagai, S., Suzuki, R., Motohka, T., Noda, H.M., Hirota, M., Nasahara, K.N., Oguma, H., and Muramatsu, K. (2012): Linking remote sensing and *in situ* ecosystem/biodiversity observations by “Satellite Ecology.” In: The biodiversity observation network in the Asia-Pacific region (eds. Nakano, S., Yahara, T., Nakashizuka, T.), 227-308, Springer, Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht, London.
- Nagai, S., Saitoh, T.M., Nasahara, K.N., and Suzuki, R. (2014): Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan. *International Journal of Biometeorology*, in press, doi: 10.1007/s00484-014-0822-8.
- Nagendra, H. (2001): Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, **22**, 2377-2400.
- Piao, S., X. Wang, P. Ciais, B. Zhu, T. Wang, and J. Liu (2011): Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, **17**, 3228-3239.
- Suzuki, R., Kim, Y., and Ishii, R. (2013): Sensitivity of the backscatter intensity of ALOS/PALSAR to the above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forest in Alaska. *Polar Science*, **7**, 100-112.
- Suzuki, R., Kobayashi, H., Delbart, N., Asanuma, J., and Hiyama, T. (2011): NDVI responses to the forest canopy and floor from spring to summer observed by airborne spectrometer in eastern Siberia. *Remote Sensing of Environment*, **115**, 3615–3624.
- Suzuki, R., T. Nomaki, and T. Yasunari (2003): West-east contrast of phenology and climate in northern Asia revealed using a remotely sensed vegetation index. *International Journal of Biometeorology*, **47**, 126-138.
- Tateishi, R., Uriyangqai, B., Al-Bilbisi, H., Ghar, M.A., Tsend-Ayush, J., Kobayashi, T., Kasimu, A., Hoan, N.T., Shalaby, A., Alsaaidh, B., Enkhzaya, T., Gegentana, and Sato, H.P. (2011) Production of global land cover data – GLCNMO. *International Journal of Digital Earth*, 4: 22-49.
- Wang, X., Piao, S., Ciais, P., Li, J., Friedlingstein, P., Koven, C., and Chen, A. (2011): Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006, *PNAS*, 108, 1240-1245.

鈴木力英(2015)：陸域生態系機能と生態系サービスのリモートセンシングによる評価法。
日本生態学会誌, 65, 125-134.

矢原徹一 (2008)：GEO BON：生物多様性観測ネットワーク。ワークショップー21世紀の生物多様性研究ー「環境・生物多様性関連の大規模情報ネットワークの構築と利用」, 国立科学博物館, <https://www.kahaku.go.jp/research/symposium/img/yahara.pdf>

5. 人工衛星観測との連携

(検証、リトリバルの改善、連携した観測による研究の展開)

航空機観測を利用したリモートセンシング研究の新展開

New phase remote sensing stimulated by the use of airborne observation

5. 1. 気候システムの変動要因としての地表面環境とその広域計測の必要性

気候システムの変動要因としては、地上における人間活動が排出する温暖化気体や汚染気体はもちろん、人為的な地表面環境の大規模改変や灌漑などともなう農地、湖沼環境の変動も看過できない要因となっている。また、こうした地表面被覆状況の変化は、必然的にその地域から発生するエアロゾル粒子の量や組成にも影響を与えている。IPCCによる放射強制力の評価においても、地表面改変の影響が独立した項目として挙げられており、このようなエアロゾル発生状況へのフィードバックを考慮すると、大気と地表面を一体として捉えた広域の地球表層環境についての科学的な把握、および地球表層環境が中長期的な視点で気候システムに与える影響についての科学的理解を深めていくことが欠かせない。

5. 2. 衛星データの定量的解析のための条件

衛星観測データは数 10 km から 1000 km の空間的なスケールにわたって広域の分光画像データをほぼ同時に取得できる点に大きな利点がある。一方、異なる時刻において取得された衛星分光画像データから地表面状態について季節変動や長期変動などの変化に関して定量的な知見を得るためには、地上検証と呼ばれる地表面での測器を利用した分光反射率計測、とくに可視域や近赤外域のデータにおいては光源となる太陽光照射条件と衛星センサの視線方向を考慮した二方向反射特性の定量的な把握が不可欠である。また、熱赤外領域においては、地表被覆に応じた放射率の計測が必要となる。

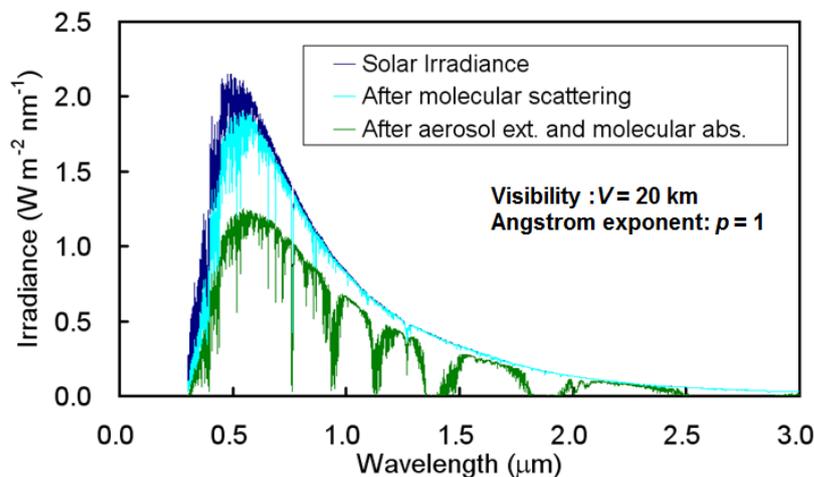


図 1. 大気上端での太陽光スペクトルと地上で観測される直達光スペクトル

衛星観測データを定量化する際の大きな障害となっているのが、エアロゾルによる散乱と吸収の影響である。エアロゾルは放射の散乱と吸収を通じて短波放射に直接的な影響を与えるほか、雲の凝結核として放射収支に大きな影響を及ぼすことが指摘されている。エアロゾルには主として人為起源で放出される汚染気体が大気中で粒子へと転換されて生じる微小粒子と、海塩や土壌粒子などの自然起源の粒子を主要な成分とする粗大粒子から成っており、こうした成分の多様性によって時間的にも空間的にも量的な面を含めて変動が極めて大きい。可視域の衛星データは大気分子による Rayleigh 散乱に加え、Rayleigh 散乱より数倍大きなエアロゾル粒子による Mie 散乱の影響を受けているのが普通であり（図 1 参照）、可視域の RGB バンドで計測される放射輝度値から地表面情報を正しく抽出するためには、エアロゾル情報を評価して取り除く大気補正の過程が欠かせないことになる（図 2 参照）。

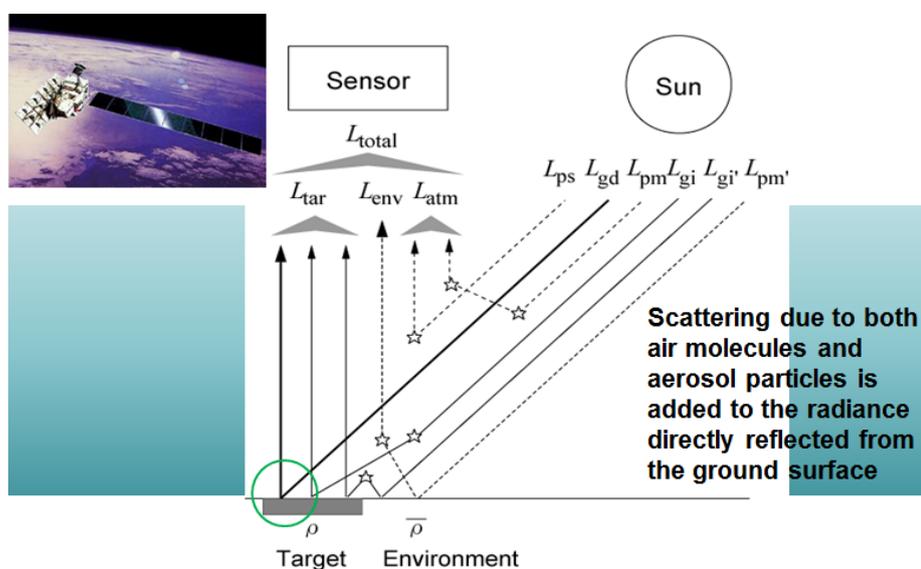


図 2. 衛星センサが観測する輝度値成分

5. 3. 航空機観測の利点

従来、大気補正に必要なエアロゾル情報を取得するには地上計測に基づく直接的な手段と、衛星データと既知の地表面反射率情報を組み合わせて用いる間接的な手段の二つがあった。

地上計測としてはサンフォトメータやスカイラジオメータなど、太陽追尾と狭帯域フィルターによる分光計測性能を有する測器によって直達太陽光や散乱太陽光を自動的に計測し、観測地点におけるエアロゾル情報を連続的に取得する方法がもっとも一般的である。この方法は観測地点においては正確な情報が取得できるものの、衛星が観測するような空間スケールにおいて 1 点での観測データを適用してよいかどうかについては、衛星データ自体

や地上サンプリングデータなどを活用した検討が必要となる。こうした地上測器によってエアロゾル光学的厚さデータが取得できれば、それに基づいて放射伝達計算を行うことになる。

衛星データ自体を用いる方法では、観測領域において二方向反射特性を含めた地表面の反射率情報が既知である地点・領域があれば、放射伝達計算においてエアロゾルパラメータ、とくにエアロゾルの光学的厚さを調整して放射伝達計算を行い、その反射率が再現されるようにして画像全体での地表面反射率情報を導出できる。この方法における最大の問題点は、ピクセル分解能が 500 m や 1 km といった中分解能の衛星データの場合において、被覆が十分に均一な地表面が存在しているかどうか、である。均一でない場合にはいわゆるミクセル (mixed pixel) として扱う必要があり、解析が複雑になる。

航空機観測は、このいずれの場合においても、地上と衛星という上端と下端の中間的なデータを提供し得る点において従来にない利点を提供する。すなわち、航空機から上方および下方に向けた放射観測データ、および航空機によるサンプリングのデータからエアロゾルの鉛直分布についての直接的な知見が取得でき、その地域、その時点における正しいエアロゾル高度プロファイルを考慮した放射伝達計算が可能になる (図 3 参照)。また、高度を変えた航空機プラットフォームからの地表面分光画像の取得によって、当該地域について高分解能の画像が取得でき、衛星測定と同期した計測であれば長年懸案であったミクセル問題や隣接効果についても明確な根拠をもった解析手法の提案が可能となる。空間分解能の高い同期画像の取得はまた、衛星による沿岸海域データや海洋域データの解析においても従来にない知見を提供し、新しい海洋リモートセンシングの展開に資するものと考えられる。なお、サンフォトメータなど太陽追尾型の測器を航空機に搭載する場合、航空機の姿勢のゆれへの対処が大きな問題となる。この点、ハイパースペクトルカメラなど分光計測と同じに画像取得が可能な測器を活用することによって、観測方位を精度よく推定できるものと考えられる。

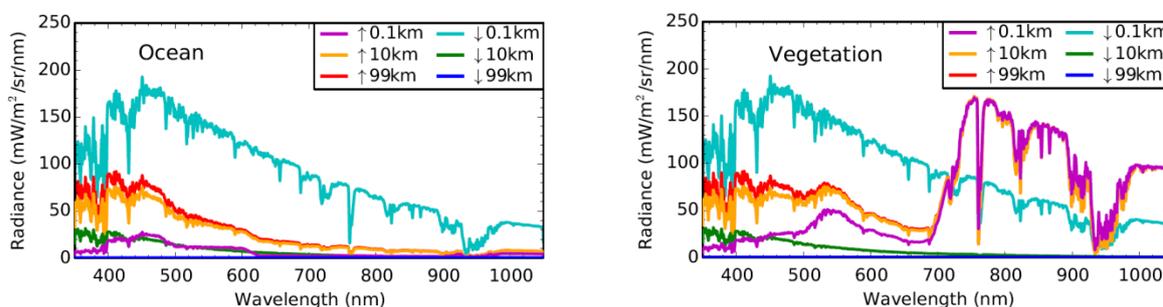


図 3. 海上と植生上で観測される上向き・下向き放射のシミュレーション

5. 4. アジアにおける衛星・航空機リモートセンシング

東アジア地域は世界でも有数の人口密度が高い地域であり、活発化する経済活動にともなう大気環境はもとより、地表面環境や沿岸海域などの環境にも大きな人為的影響が生じている地域である。さらに、今後の気候変動、地球温暖化の進行にともなう自然および人為的な環境変動が加速することも予想され、災害の防止や減災を目的とした国境を越えた協同活動の必要性も高まるものと考えられる。衛星データおよびこれを補強する航空機観測や地上ネットワーク観測によってしっかりと科学的基礎に立脚した観測データを常時取得し、その時系列解析によって環境変動を監視する活動は、この地域にあって我が国が主導的に行っていくべき課題であると言えよう。さらに、航空機観測は緊急時には衛星観測の代替としても不可欠であり、航空機による環境監視を定常的に行えることは大規模災害対応としても極めて有益である。その意味から、ここで提案している航空機観測による大気科学気候システム研究の将来の発展的な形態として、航空機を有している現業機関や民間等との連携を提言していくこともできよう。

5. 5. 新しい研究のアプローチ

航空機からの雲・エアロゾルの直接観測および航空機からのリモートセンシングによる最先端の複合的観測結果を活用し、数値モデル計算の協力も得て人工衛星観測データの検証を行い、航空機観測結果の広域化に貢献する。すなわち、人工衛星観測は、航空機によって実施される限定的な時空間領域での観測結果を、さらに広い領域や発達段階の異なる雲・降水システムの中に位置づけることを可能とする。衛星による地球表層計測の精密化の観点からは、従来、衛星と地上という極端に離れた上端と下端からの計測に限定されていた地表面計測に有人航空機という新しいプラットフォームを導入し、上下方向の放射計測、衛星センサと同期した可視・近赤外・マイクロ波センサによる地表面計測を高い地表面分解能で実施可能になることによって、高精度の大気補正を実施し、衛星データ情報から大気情報と地表面情報を分離して抽出することが可能になる。表1に、航空機搭載可能と考えられるセンサの一覧を示した。今後、これらのうちから航空機による大気科学・気候システム研究に最適の組み合わせを検討していく。

5. 6. 航空機搭載センサから衛星搭載センサへのシームレスな接続

航空機実験は衛星搭載センサよりも革新的な計測手法を検証する場であると同時に、比較的短時間に実験と理論の比較が可能となるために、人材育成の場として有効である。理学と工学が融合したチーム作りを行い、総合的な研究を実施する。ここで得られた知見は、将来においては衛星搭載センサの着実な進歩に繋がり、よりグローバルな貢献が期待される。また、アルゴリズム開発、校正・検証の分野で衛星搭載センサ開発から運用まで、シームレスな接続が可能となる。

表 1. 航空機搭載が可能なセンサー一覧

計測装置	仕様	対応する衛星搭載センサ
マルチバンドイメージャー	可視・近赤外 10-20nm 幅 9 バンド	MODIS, GCOM-C/SGLI 等
赤外マルチバンドイメージャー	1.6-13.3 μm 12 バンド	MODIS, ひまわり 8 号等
ハイパースペクトルイメージャー	350-1100nm、5nm 幅	Hyperion, HISUI
フーリエ分光系	TBD	GOSAT, OCO
ライダー	532nm、1064nm、偏光観測	Calipso
ドップラーライダー	TBD	
雲レーダ	95GHz 帯	Cloudsat, EarthCare

6. 数値モデル研究との連携

航空機観測に限らず、数値モデルはさまざまな観測を統合するプラットフォームとしての機能をもつようになっている。航空機による気象観測、例えば、雲の物理的性質（雲物理）やエアロゾル・大気質の観測データを、数値モデルの比較や検証、あるいはそれらの相違によるモデルの改良のために利用することが考えられる。さらに、飛行機観測のデータがルーチンの得られる場合には、数値モデルへのデータ同化への利用も考えられるが、集中的な航空機によるキャンペーン観測の場合のように継続的にデータ入手ができない場合には、飛行機観測データはデータ同化利用に馴染まないだろう。航空機観測と数値モデル連携として、次のようなアプローチがある。

・航空機観測による物理的理解の深化とモデル化

雲物理の氷晶過程など、物理的な理解が未解明な現象について、飛行機観測による物理過程の理解の深化が期待される。これらの知見をモデル化して、数値モデルに組み込むことによって、物理スキームの高度化、より現実的な数値シミュレーションが期待される。

・航空機運行プランへのインプット

数値モデルの結果を利用した航空機の運行プランの検討。Grid Point Value (GPV; 初期値となる解析値込みの予報データ) 等の現業センターの予報結果の利用の他、自分で数値モデルを走らせてカスタマイズした気象予測データを入手することが容易になっている。台風やメソ降水システムを対象とする観測の場合、将来の観測時点でのメソ降水システムの動態を予測し、飛行機の運行プランに役立てることができる。また、雲やエアロゾル等を観測対象とする場合には、風や温度などの気象場だけでなく、雲やエアロゾルについての予測結果をもとに、航空機の航路上の擬似観測データを得ることができる。このような結果をもとに、飛行機のより適切な運行プランを検討することが可能になる。

・航空機観測とのモデル結果の比較・検証

航空機観測と数値モデルの結果を比較し、モデルの結果を検証することは比較的容易である。比較について、観測と同じ場所・時刻で比較を行えば直接的である。しかしシミュレーションの再現性・予測精度が不十分の場合には、観測とシミュレーションとの気象場に差異があり、同一時刻・同一場所の比較が意味をもたなくなる。そのため、多数の観測結果を統計的に処理した結果どうしを比較する統計的検証の方法が採用されてきた。近年では、数値モデルにおける総観規模擾乱についての再現性が良好であるため、観測とシミュレーションとの対応づけがある程度可能であり、少ないサンプリングのデータでも観測と数値モデルの比較が可能になっている。

・航空機観測によるモデルの改良

航空機観測と数値モデルの比較・検証の結果、両者に有意な差異があれば、数値モデルに何らかの改良すべき点があることを意味する。何が原因で差異が生まれるかを追求し、その差異を解消するためのモデルの改良が望まれる。原理的には、観測とモデルの比較・

検証から、モデル改良へと進むことが期待されるが、一般に原因の究明・モデルの改良は容易ではなく、人員と時間を要する。一つの観測キャンペーンに対して、上記のアプローチを踏むことが望ましいが、モデルとの比較・検証、モデルの改良まで進めるには、一般には数年の継続的な研究を要する。

・航空機観測データの数値モデルへのデータ同化

民間航空機を利用した大気質観測等、準ルーチ的な観測結果が得られる場合には、数値モデルへのデータ同化が可能である。データ同化により排出源のより精度のよい推定等が可能になる。

雲・エアロゾルは数値モデルの不確定性の大きな要因であり、数値モデルで使われる雲物理スキームには大きな任意性がある。航空機による雲物理・エアロゾル過程（あるいは化学過程も加えて）の観測は、航空機観測における重要な課題の一つである。例えば、数値モデルにおいて、雲や氷晶・雪等のサイズ分布、氷晶の形状、氷晶の表面状態、それらと温度や循環等の気象場（対流性的であるか、乱流状態等）との関係等のモデル化の精緻化が求められている。これらの数値モデルの弱点を理解した上で、適当な気象場の状態をターゲットにおいた航空機による雲・エアロゾル物理の適切な観測計画を立案する必要がある。

メソ数値モデルにおける雲物理・エアロゾルスキームは、従来は雲・降水粒子をカテゴリーに分けてそれぞれのカテゴリーの質量密度を予報するシングルモーメントバルク法が主体であったが、近年は数濃度の予報も加えたダブルモーメント法やサイズ分布の情報を精緻化したトリプルモーメント法や、スペクトルビン法も使われるようになってきており、スキームの複雑化・高度化が著しい。しかし、これらのスキームには従来からの飛行機観測の知見が十分に使われているわけではない。過去の飛行機観測データを今日的に再評価し、雲物理・エアロゾルスキームに活用することが必要であろう。すなわち、新たな観測計画を待つのではなく、過去の航空機観測のデータを利用することで、航空機観測と数値モデルの連携研究が進められる可能性がある。

例えば、国内での、東京大学での近藤豊・小池真グループによる 2009、2013 年に行われた A-FORCE09/13 (Koike et al. 2012; Oshima et al. 2012, 2013)、気象研究所での村上正隆らによる 2007 年の人工降雨実験 (Ohtake et al. 2014) や、衛星ミッションの NASA/Precipitation Measurement Missions (PMM) 関連の Mid-latitude Continental Convective Clouds Experiment(MC3E; <http://pmm.nasa.gov/node/301>)、GCPeX (<http://pmm.nasa.gov/GCPEX>)、OLYMPEX: A Ground Validation Campaign on the Olympic Peninsula in the Pacific Northwest (2015 年 11 月－2016 年 2 月) 等の航空機観測データの利用を念頭においた数値モデルとの連携研究が現実的な目標であろう。

航空機観測を用いた数値モデルの検証・改良の例として、Roh and Satoh (2014) は、Field et al. (2007) がまとめた航空機観測による氷晶のサイズ分布関数を利用して、数値シミュレーションにおけるシングルモーメントバルク法の改良を行った。また、Heymsfield et al. (2013)

では、過去の飛行機観測の結果をコンパイルして、より包括的に氷晶粒子のサイズ分布の温度依存性を示した（表1、図1）。このような、航空機観測の結果を数値モデルにより活用していくべきであろう。Ohtake et al. (2014) では、2007年の人工降雨実験における飛行機観測の結果を数値モデルと比較した。図2に観測の経路と数値モデルの計算領域を、図3に比較例を示す。Hashimoto et al. (2014) はこれらの観測結果を用いて、ダブルモーメントバルク法による雲微物理モデルの改良を行っている。また、Seiki et al. (2014) では、航空機観測ではないが、筑波におけるビデオゾンデの結果を使って、ダブルモーメントバルク法を用いた数値モデルの氷晶過程の評価を行った。この論文では、筑波という1点観測のデータでさえも、数値モデルの比較・評価に使うことができることを示している。Iguchi et al. (2012) は Canadian CloudSat/CALIPSO validation project (C3VP) における飛行機観測結果について、より詳細なビン法の数値モデルを用いて氷晶過程について調べた。

飛行機観測計画とモデル連携の必要性として以下の点を指摘できる。観測ターゲットの選定には数値モデルによるフィービリティの検討が可能である。特に、観測のサンプリングに関しては、数値モデルを用いた予備実験が可能である。例えば、ビン法の雲物理スキーム等の詳細雲モデルによる高解像度雲シミュレーションデータを用いて、仮想的な観測を行い、擬似観測データを得ることができる。どのようなフライトを行うか、どのようなサンプリングを行えば意味のあるデータを取得できるか検討可能であろう。

観測データと数値モデルとの比較については、作業としては比較的容易であるが、観測結果をモデルの改良にまで結びつけるには時間がかかる。しかし、それに向けて研究を進めるべきである。数値モデルの進展が著しい今日、新たな観測計画を待つまでもなく、今からでも可能な作業として、過去の飛行機観測のデータを利用したモデル検証・改良が可能である。そのために、過去の飛行機観測のデータを整備することが必要であろう。

今後の飛行機観測を計画する際に、念頭におくべき点として、数値モデルの弱点を改善するような観測計画を立案する必要があるだろう。現状の数値モデルの弱点を理解し、可能な観測によってその弱点を解決する道筋が描くことが必要である。そのために、観測で得られるデータによって、どのようにモデルが検証・改良されるかの方針を事前に検討する必要がある。また、数値モデルとの連携研究をすすめる際には、いくつかの数値モデル、物理スキームの依存性・比較の検討が必要である。さらに飛行機観測研究には、地球温暖化問題といった気候的な視点と防災科学としての気象学的な視点のどちらかをもつことが必要であり、逆に、飛行機観測研究のアウトカムとして地球温暖化予測研究や防災科学研究への貢献を意識する場合には、予測能力の向上のための数値モデルとの連携は不可欠であろう。

参考文献

Field, P. R., R. J. Hogan, P. R. A. Brown, A. J. Illingworth, T. W. Choullarton, and R. J. Cotton,
2005: Parametrization of ice particle size distributions for mid-latitude stratiform cloud.

- Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 1997–2017.
- Hashimoto, A., H. Ohtake, and M. Murakami, 2014: Improvement of bulk microphysics model based on airborne and ground-based observation data: Part 2. Japan Meteorological Society Meeting 2004 Spring, P304 (in Japanese).
- Heymsfield, A. J., Schmitt, C., Bansemer, A., 2013: Ice Cloud Particle Size Distributions and Pressure-Dependent Terminal Velocities from In Situ Observations at Temperatures from 0° to –86°C. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 4123-4154.
- Ohtake, H., M. Murakami, N. Orikasa, A. Hashimoto, A. Saito, and T. Kato, 2014: Statistical Validation of a Cloud Resolving Model Using Aircraft Observations of Orographic Snow Clouds. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **92**, 287-304.
- Koike, M., N. Takegawa, N. Moteki, Y. Kondo, H. Nakamura, K. Kita, H. Matsui, N. Oshima, M. Kajino, and T. Y. Nakajima, 2012: Measurements of regional-scale aerosol impacts on cloud microphysics over the East China Sea: Possible influences of warm sea surface temperature over the Kuroshio ocean current. *J. Geophys. Res.*, **117**, D17205, doi:10.1029/2011JD017324.
- Oshima, N., Y. Kondo, N. Moteki, N. Takegawa, M. Koike, K. Kita, H. Matsui, M. Kajino, H. Nakamura, J. S. Jung, and Y. J. Kim, 2012: Wet removal of black carbon in Asian outflow: Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) aircraft campaign, *J. Geophys. Res.*, **117**, D03204, doi:10.1029/2011JD016552.
- Oshima, N., M. Koike, Y. Kondo, H. Nakamura, N. Moteki, H. Matsui, N. Takegawa, and K. Kita, 2013: Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 13175–13198.
- Roh, W., and Satoh, M., 2014: Evaluation of precipitating hydrometeor parameterizations in a single-moment bulk microphysics scheme for deep convective systems over the tropical open ocean. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2654-2673.
- Seiki, T., Satoh, M., Tomita, H., Nakajima, T., 2014: Simultaneous evaluation of ice cloud microphysics and non-sphericity of the cloud optical properties using hydrometeor video sonde and radiometer sonde in-situ observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 6681-6701, doi:10.1002/2013JD021086.

TABLE 1. Summary of field program datasets.

Project	No. of flights	Cloud formation designation	Lat, lon	In-cloud temperatures (°C)	No. of 5-s PSDs
ARM2000	7	Stratiform	37°, -98°	-52° to 0°	6637
CF	11	Convective	25°, -82°	-63° to 0°	13052
TC4	11	Convective	16°, -84°	-57° to 0°	17715
NAMMA	12	Convective	16°, -24°	-54° to 0°	15913
AIRS	9	Stratiform	44°, -79°	-47° to 0°	9573
C3VP	4	Stratiform	46°, -74°	-42° to -1°	6471
REPLICATOR	3	Stratiform	37°, -96°	-63° to -40°	31
SCOUT	5	Stratiform	13°, -85°	-87° to -65°	3379
SUBVIS	3	Stratiform	30°, -95°	-83° to -57°	455
			16°, -84°		
			-12°, 131°		
MPACE	13	Stratiform	71°, -157°	-57° to 0°	9579

表 1. Heymsfield et al. (2013) において用いられた、航空機観測プログラム。

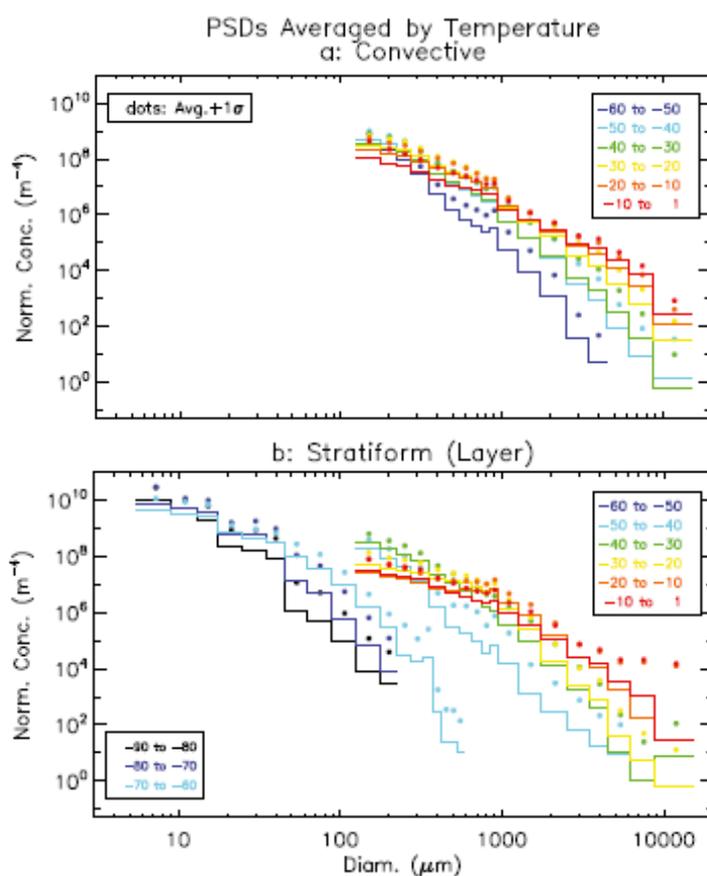


図 1. 上：対流性、下：層状性の雲における氷晶のサイズ分布の温度依存性。Heymsfield et al. (2013) による。

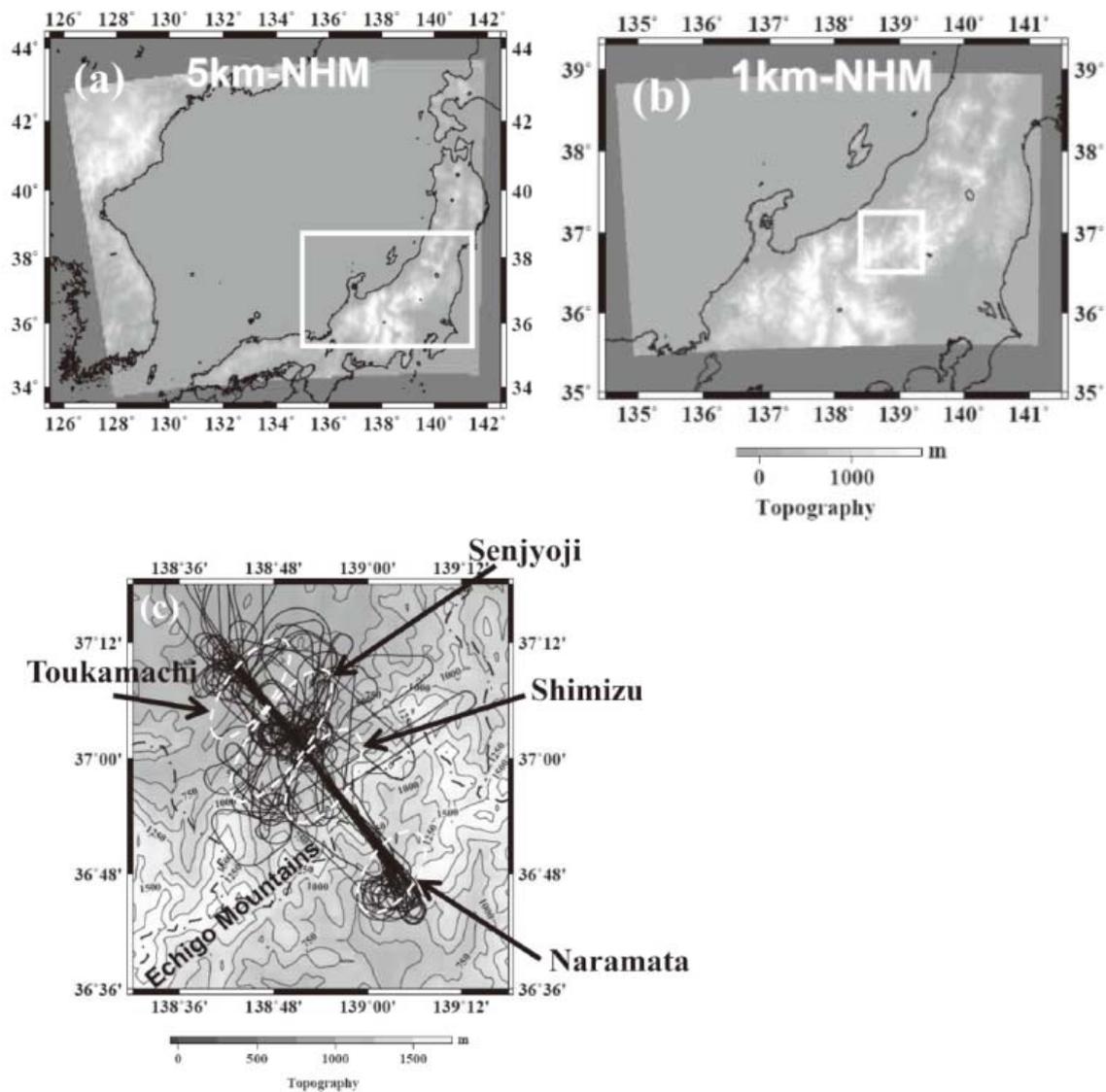


図 2. Ohtake et al. (2014) で用いられた数値モデルの計算領域（上左：5km 格子、上右：1km 格子）と、飛行機観測のフライト経路（下）。

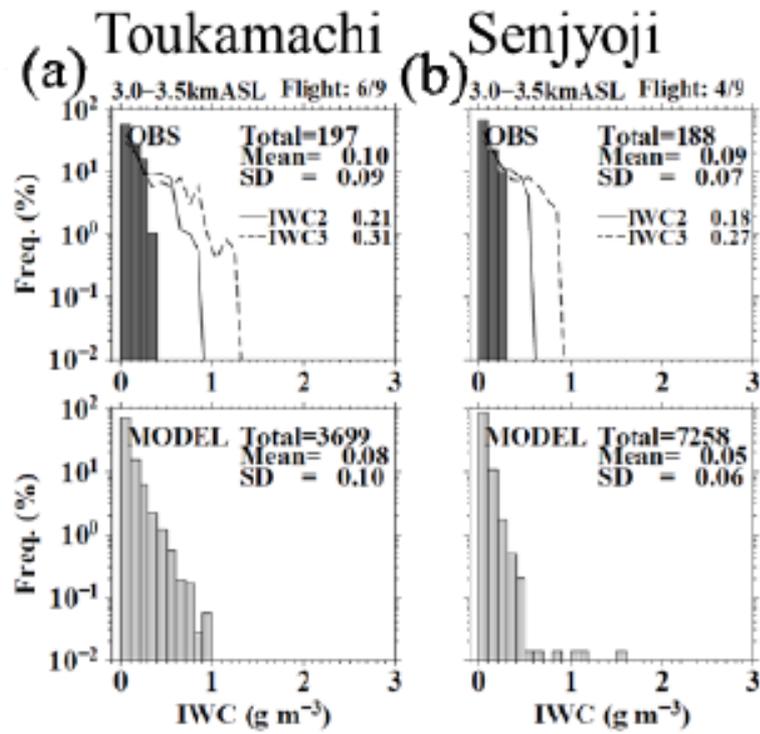


図3. Ohtake et al. (2014) による、数値モデルと観測との氷の質量濃度の頻度分布の比較例。
 左：十日町、右：泉盛寺における観測。

7. 1. 機体 (MRJ、G-II)

7. 1. 1. 機体

航空機観測に使用可能な機体として、MRJ とガルフストリーム II (G-II) が想定される。

MRJ (三菱リージョナルジェット:Mitsubishi Regional Jet) は、三菱航空機を筆頭に開発・製造が進められている小型旅客機であり、その飛行試験機等を活用することにより、航空機観測を計画することが可能である。



図 7.1.1.-1 MRJ

G-II は、日本では、唯一、ダイヤモンドエアサービス (株) が保有している機体である。

ダイヤモンドエアサービスでは、この G-II を使用して、微小重力実験飛行を初めとして、各種の観測及び実験飛行を実施しており、また、修理改造等の航空局認可取得の経験も豊富で、現在、航空機観測に最も適した機体である。



図 7.1.1.-2 G-II

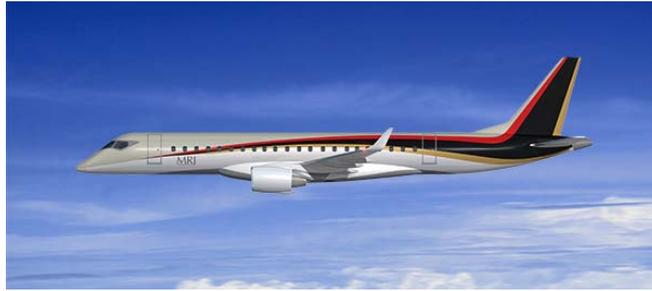
7. 1. 2. 機体諸元

MRJとG-IIの機体諸元を、表7.1.2.-1及び図7.1.2.-1～7に示す。細部条件にもよるが、飛行領域（速度,高度,航続距離）については、G-IIの方が若干大きく、機内スペース、ペイロードについては、MRJの方が大きい。

表 7.1.2.-1 MRJとG-IIの機体諸元

項目	MRJ90LR	Gulfstream II
機体寸法	全巾 29.2 m 全長 35.8 m 全高 10.4 m 図7.1.2-1 参照	全巾 21.0 m 全長 24.4 m 全高 7.5 m 図7.1.2-5 参照
最大離陸重量	42.8 ton (94,358 lbs) 図7.1.2-1 参照	28.1 ton (62,000 lbs) 図7.1.2-5 参照
最大の「10-1」	9.3 ton (92PAX x 102kg) 図7.1.2-3 参照	2.4 ton (5,400 lbs) 図7.1.2-5 参照
最大実用高度	11,887 m (39,000 ft) 但し、機体重量や外気温の変化により変動。	13,106 m (43,000 ft) 但し、管制制限上、29,000～41,000ftの間は運用できない。
航続距離 (@ Full Passenger Payload)	3,310 km (1,780 nm) 図7.1.2-1 & 3 参照	4,260 km (2,300 nm) 図7.1.2-5 & 7 参照
最大運用速度/最小運用速度	図7.1.2-4 参照	1,000 ft 10,000 ft 20,000 ft 30,000 ft 40,000 ft 最大運用速度 250 kt TAS 350 kt TAS 490 kt TAS 500 kt TAS 500 kt TAS 最小運用速度 160 kt TAS 230 kt TAS 290 kt TAS 340 kt TAS 410 kt TAS
室内ハーフ高さ 奥行	図7.1.2-2 参照 2.8 m 2.0 m 2.19 m	図7.1.2-5 & 6 参照 2.2 m 1.8 m 6.5 m
天井観測穴の装備	*1	FS 412 LBL 3.7'に、45 x 324 mmの開口部追加実績あり。
床面観測穴の装備	*1	FS 333 LBL 26.4'に、φ125 mmの開口部追加実績あり。
ドローアップの装備	*1	Vaisala Drop Sonde RD83型用投下装置(床面観測穴)、受信機(機内)、受信アンテナ(機体上部及び下部)の装備実績あり。
使用可能電力	70 kVA (発電能力 120 kVA — 機体使用電力 50 kVA)	28 VDC 160 Amp 115 VAC 7 kVA
地上の飛行可能最低高度	—	航空法では対地 300 m であるが、市街地では騒音問題があるので、600 m (2,000 ft) 程度。海上では、法律上 300 m 以下、150 m (500 ft) も可能。

*1: 改造の詳細内容や難易度次第となるが、技術的には対応可能。実際の改修詳細については、その際の状態による。



MRJ90

	MRJ90STD	MRJ90ER	MRJ90LR
座席数	92 (Typical single class)		
外寸法 (L×W×H)	m (ft) 35.8 × 29.2 × 10.4 (117.4 × 95.9 × 34.2)		
エンジン推力	kN (lbf) 78.2 (17,600) × 2		
最大離陸重量	kg (lb) 39,600 (87,303)	40,995 (90,378)	42,800 (94,358)
最大着陸重量	kg (lb) 38,000 (83,776)	38,000 (83,776)	38,000 (83,776)
航続距離 (@Full Passenger Payload)	km (nm) 1,670 (900)	2,400 (1,290)	3,310 (1,780)
最大運用マッハ数 / Maximum Operating Mach Number	M 0.78	M 0.78	M 0.78
離陸滑走路長 (MTOW, SL, ISA)	m (ft) 1,490 (4,890)	1,600 (5,250)	1,740 (5,710)
着陸滑走路長 (MLW, Dry)	m (ft) 1,480 (4,860)	1,480 (4,860)	1,480 (4,860)

MRJ70

	MRJ70STD	MRJ70ER	MRJ70LR
座席数	78 (Typical single class)		
外寸法 (L×W×H)	m (ft) 33.4 × 29.2 × 10.4 (109.6 × 95.9 × 34.2)		
エンジン推力	kN (lbf) 69.3 (15,600) × 2		
最大離陸重量	kg (lb) 36,850 (81,240)	38,995 (85,969)	40,200 (88,626)
最大着陸重量	kg (lb) 36,200 (79,807)	36,200 (79,807)	36,200 (79,807)
航続距離 (@Full Passenger Payload)	km (nm) 1,530 (820)	2,730 (1,470)	3,380 (1,820)
最大運用マッハ数 / Maximum Operating Mach Number	M 0.78	M 0.78	M 0.78
離陸滑走路長 (MTOW, SL, ISA)	m (ft) 1,450 (4,760)	1,620 (5,320)	1,720 (5,650)
着陸滑走路長 (MLW, Dry)	m (ft) 1,430 (4,700)	1,430 (4,700)	1,430 (4,700)

図 7.1.2.-1 MRJ 主要諸元

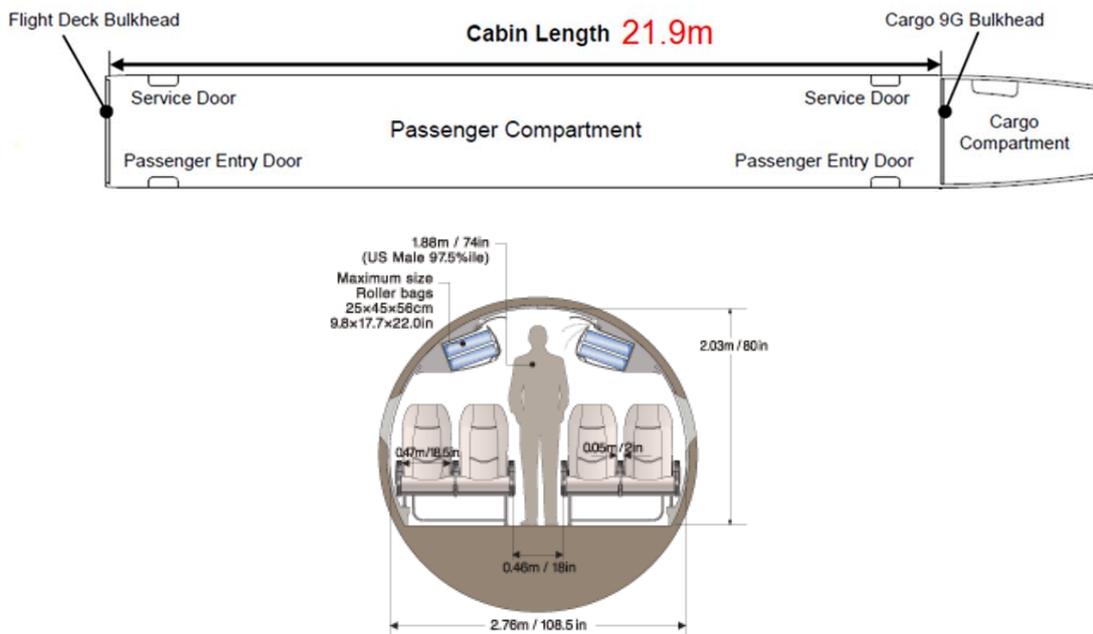
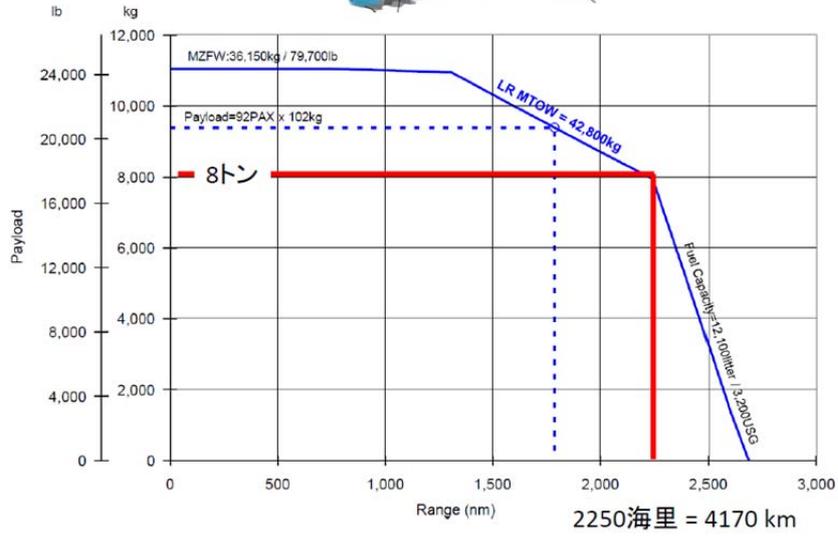


図 7.1.2.-2 MRJ 機内スペース

MRJ



MRJ 90人乗り旅客機
 ペイロードを8トン積載して4000km飛行可能。
 電力 50kVA
 最高高度 12km以上

図 7.1.2.-3 MRJ 航続距離

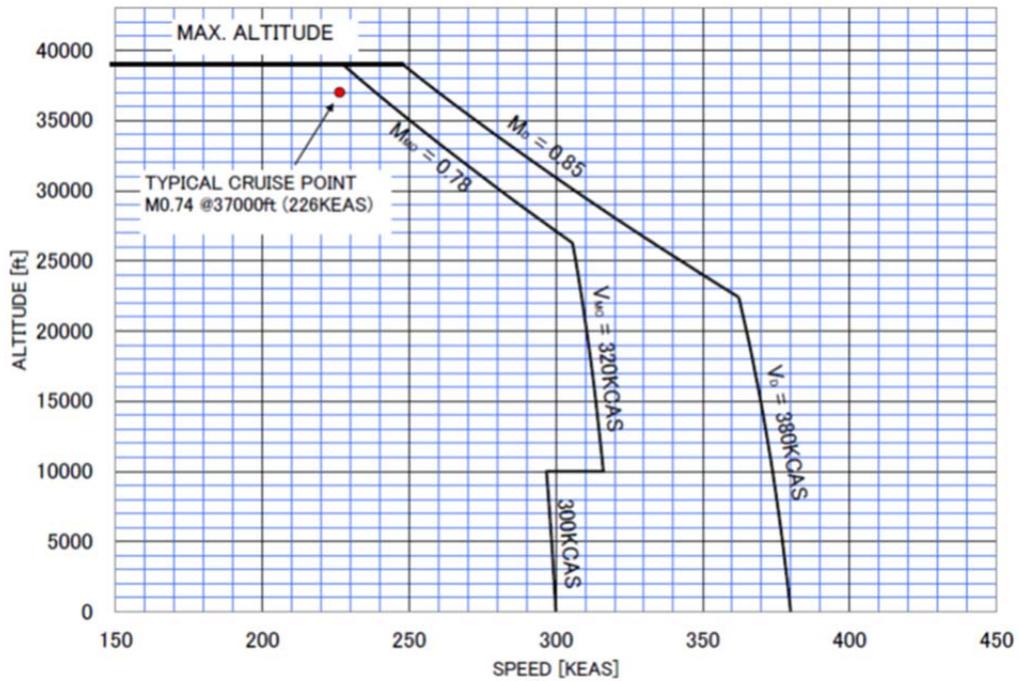
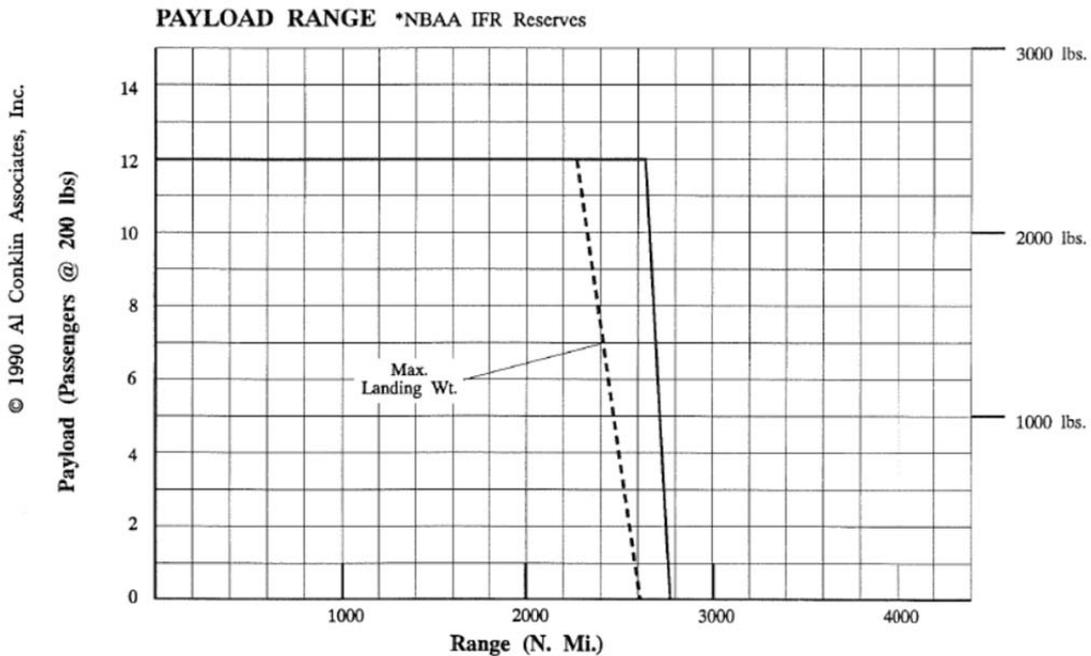


図 7.1.2.-4 MRJ 90 設計速度



「THE AIRCRAFT COMPARATOR」より

尚、上表は概算値であり、飛行高度、速度及び機体の形態により、実際の飛行時のRangeは都度異なる。

図 7.1.2.-7 G-II 航続距離

7. 1. 3. 機体改修

航空機観測を実施するためには、その観測システム及び観測機器を搭載することが必要であり、それにより、機体の改修が必要となる可能性が高い。

航空機の搭載機器或いは機体形態が変更となる場合は、航空法第十六条に基き修理改造検査を受検するか、或いは、航空法第十一条但し書きに基き試験飛行等の許可を受ける必要がある。その手続きに対し、技術検討、機体改修、航空局調整等を実施するために、通常、3～6ヶ月の期間が必要であり、機体外部の形状が大きく変わる場合、規模の大きい機体構造の変更が発生する場合、或いは機体の本来の機能が変更となる場合には、それ以上の期間が必要である。

G-IIは、これまで、微小重力実験、レーダー観測、大気観測、気象観測、通信、空撮等、多種多様な観測及び実験飛行を実施し、豊富な機体改修の実績があり、観測機器の搭載において、これまでに搭載した機器のハードポイントが利用できる場合には改修不要或いは小規模の改修により、また、利用できない場合にも柔軟な対応が可能である。

MRJについては、今後、開発、製造状況に即して、機体の活用手段、機器の搭載方法、機体改修内容等について、調査、検討、議論していく必要がある。

図 7.1.3.-1 及び図 7.1.3.-2 に過去に G-II に機体観測システムを搭載した際の外観図及び観測機器の概要を示す。

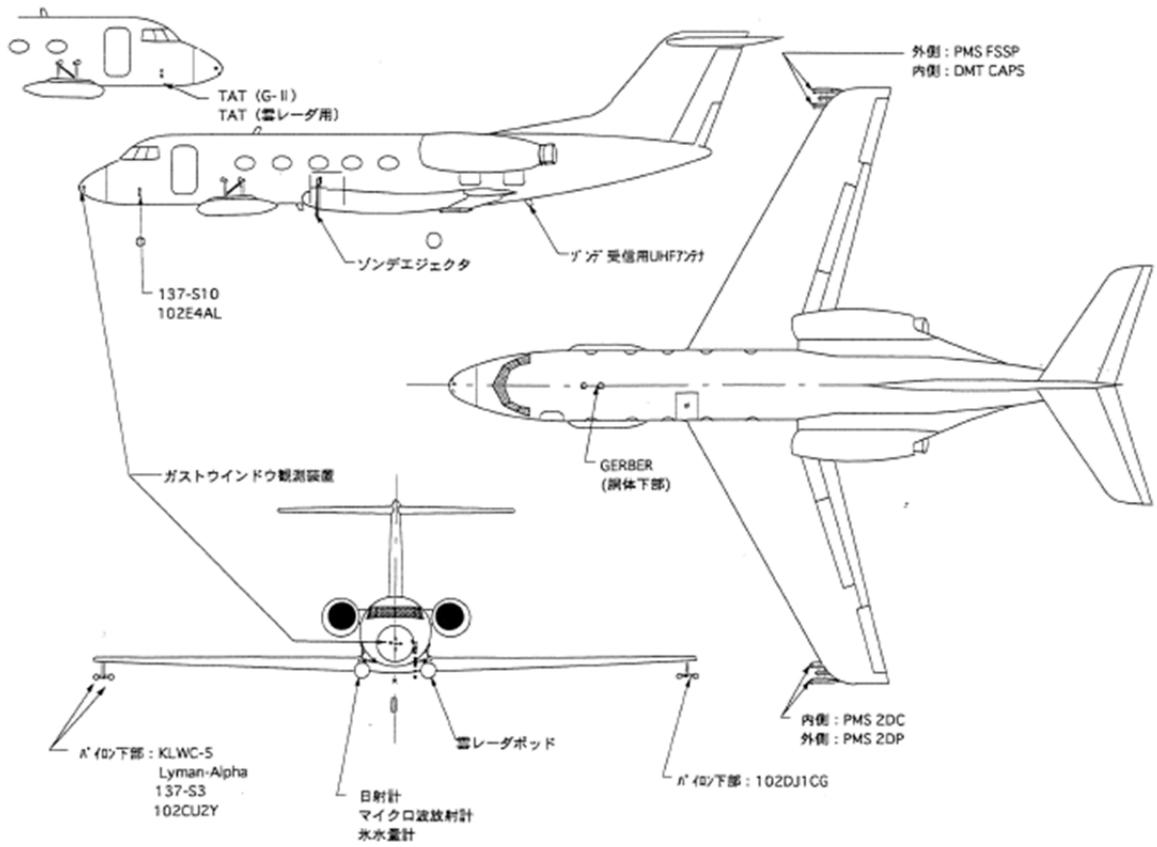


図 7.1.3.-1 G-II機体観測システム搭載外観図

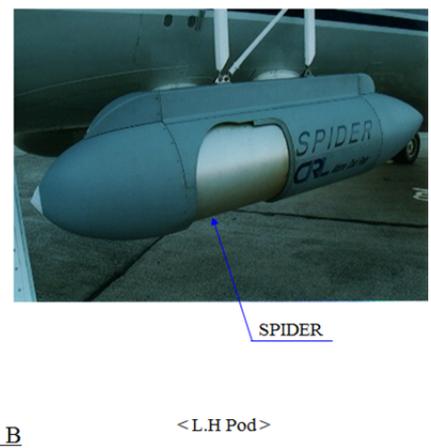
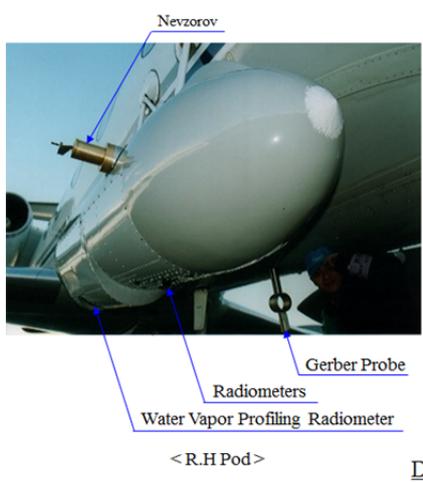
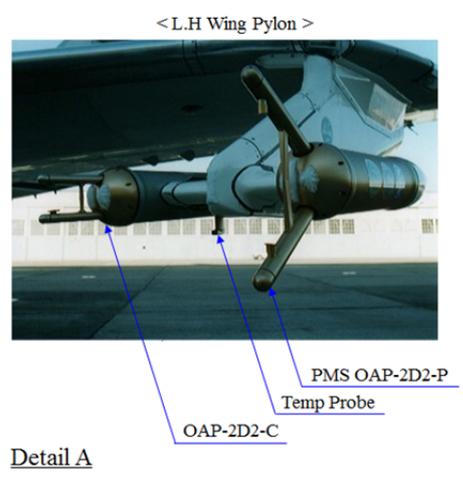
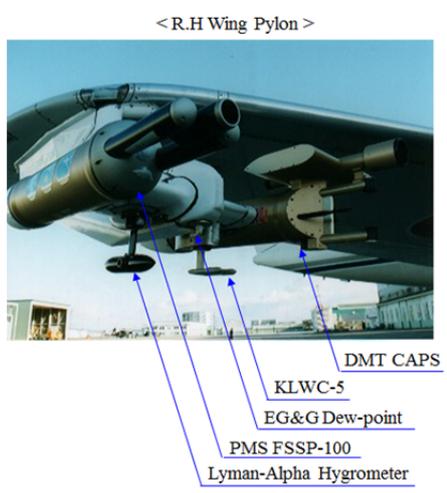


図 7.1.3.-2 G-II 気象観測機器概要 (1/2)



< Nose Radome >

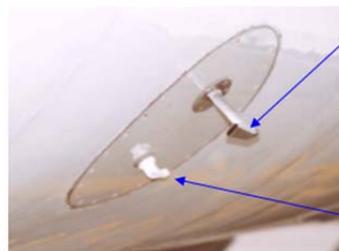
Detail C

5 holes



< Lower fuselage >
Gerber Probe

Detail D



TAT Probe

EG&G Hygrometer

Detail E

- Drop Sonde (RD93)



Sonde Shooter



Sonde Shooter
(Inside Cabin)



Sonde Receiver
(Inside Cabin)

图 7.1.3.-2 G-II 气象观测机器概要 (2/2)

7. 1. 4. 観測気象条件

G-IIは、台風や豪雨等の悪天候でも、飛行経路を柔軟に設定することにより、観測飛行が可能である。

台風においては、その規模や周辺の雲の状況にもよるが、雲の弱い方向や上層の雲からの進入が可能である。気象レーダーの強いエコーの雲(エコーが赤い部分)に入ることは危険であるが、台風の近くでもエコーの比較的弱い雲域があり、近づくことは可能と思われる。

また、高度の高いところは基本的に着氷しないこともあり、着氷についても問題ない。

7. 1. 5. 観測地域

G-IIは日本国内全域はもちろんのこと、タイ、インドネシア、パラオ、オーストラリア、北極及び南極で、観測及び実験飛行の実績があり、どこでも行くことが可能である。

但し、遠方になると、その分、空輸が必要となり、更に、海外の場合は、種々の調整や手続きが必要となり、スケジュールの融通性が損なわれる場合がある。

また、台風においては、台風の影響で地上が強風や悪天候の場合は着陸できない、或いは、駐機できない場合があり、進路等を良く考えて基地を選定する必要がある。

利用可能な格納庫は、現在、把握されているのは、鹿児島空港が最南端であり、その鹿児島空港をベースとして、運用できる空港まで移動して燃料を補給した後に観測を行う方法が良いと考えられる。また、空港によって運用可能時間が違うので注意が必要である。観測基地として使用できる空港は以下のとおりである。

- ・鹿児島空港（格納庫のある最南端の空港）
- ・那覇空港（格納庫はあるが運用上かなり制約がある）
- ・奄美空港（燃料補給可能）
- ・徳之島空港（燃料補給可能）
- ・宮古空港（燃料補給可能）
- ・新石垣空港（燃料補給可能）
- ・与那国空港（燃料補給不可）

観測範囲の西端と南端については、日本の管制範囲は東経 124 度以東であり、この領域での観測は可能と思われるが、日本の管制と事前調整を行う必要がある。また、日本の管制範囲の南限は北緯 21 度であり、航続距離の観点から北緯 21 度以南での観測は難しいと考えられる。

上記の各空港の位置関係を、図 7.1.5.-1 に示す。

台風以外も含めて、気象観測に利用可能な全国の空港を、図 7.1.5.-2 に示す。

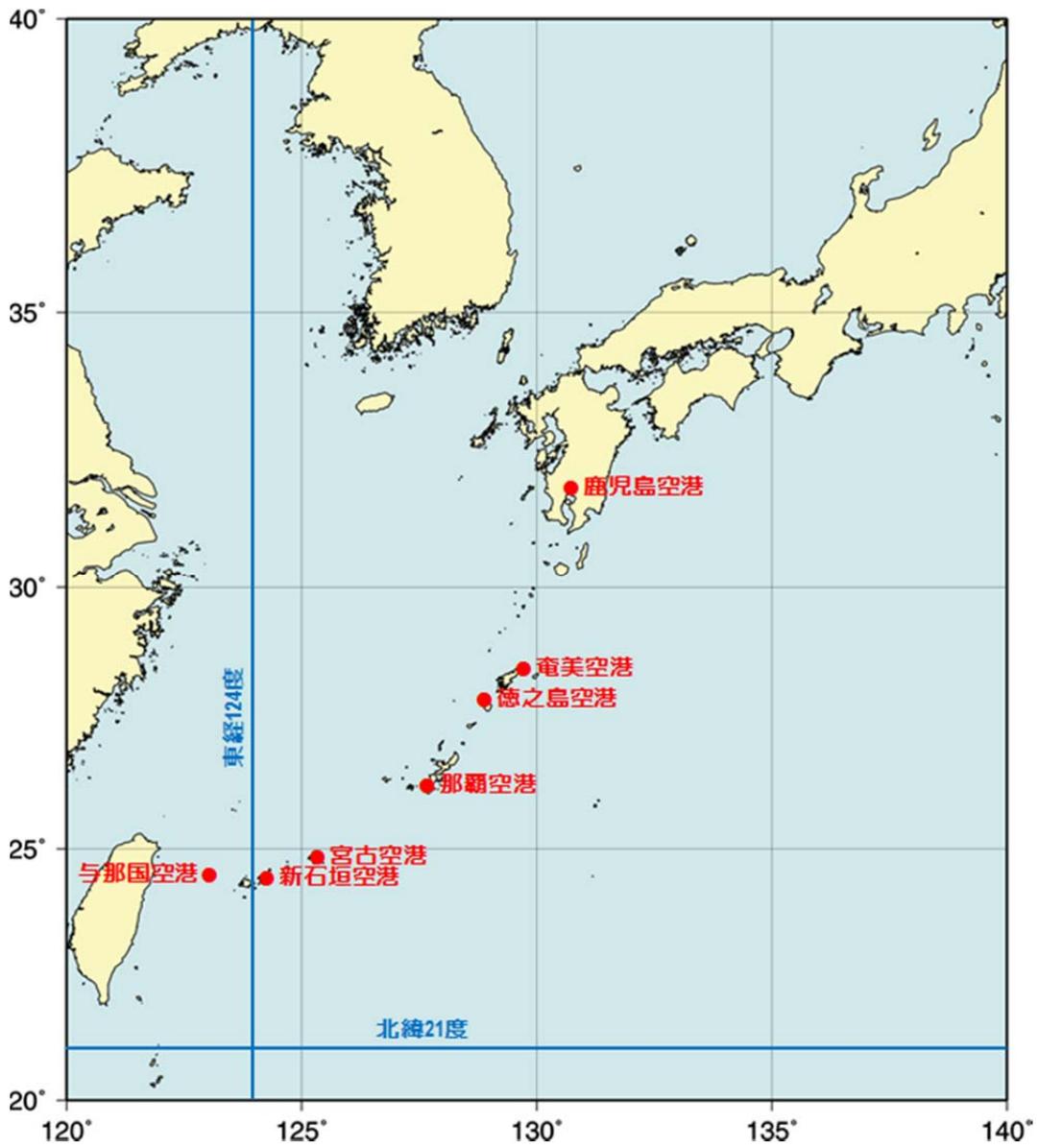


図 7.1.5.-1 各空港の位置関係

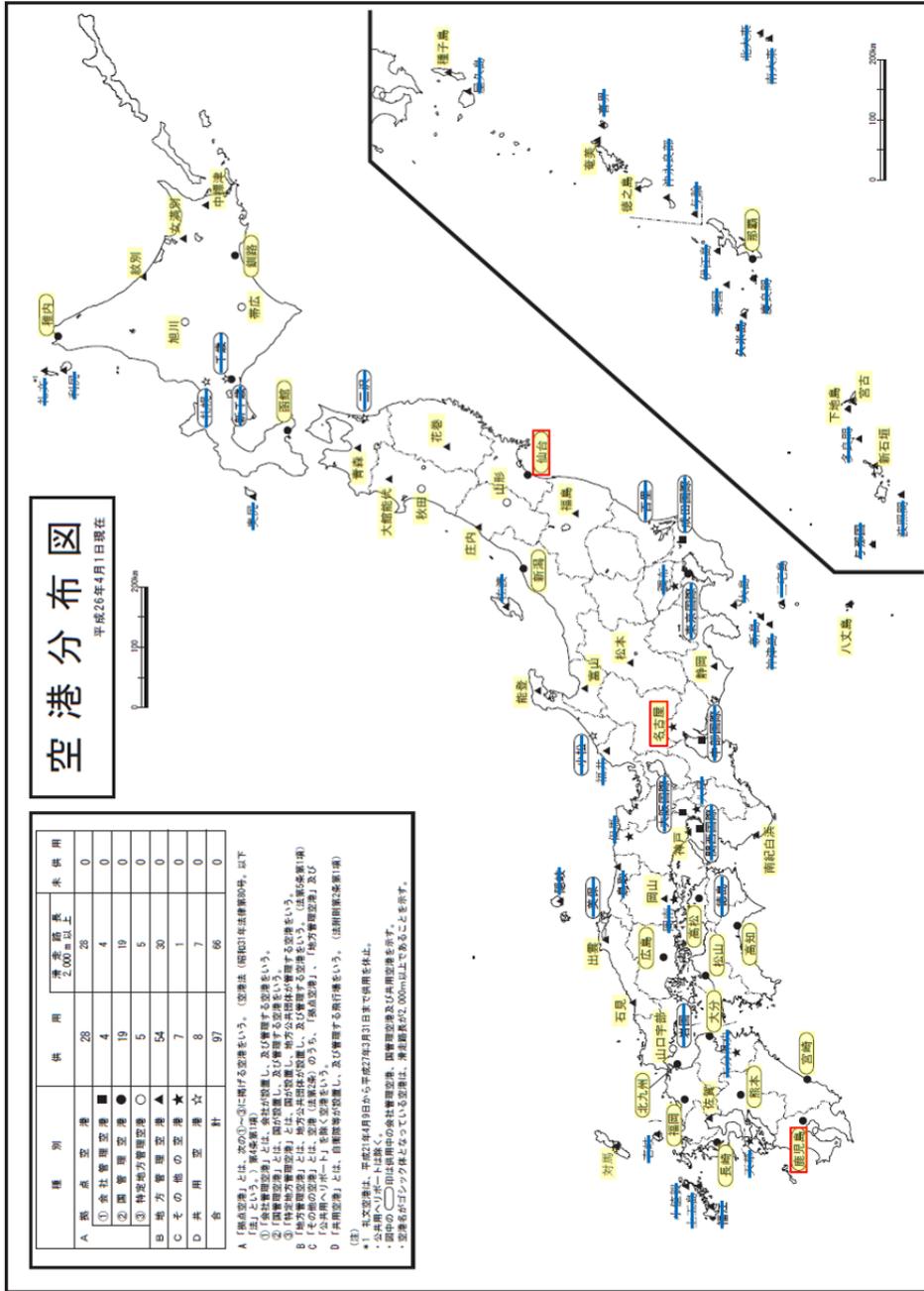


図7.1.5.-2 G-IIによる航空機観測が利用可能な全国の空港

7. 2. 運用組織

2015年10月に名古屋大学の宇宙地球環境研究所が発足し、日本の航空機観測等の中核を担うために飛翔体観測推進センター（教授3、准教授1）が設置された。本研究の観測推進および機体の運用は、このセンターが中心となる共同利用運営委員会により実施する。また観測課題ごとに観測部会を設け、東京大学、気象研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構などの研究者がそれぞれ責任をもって観測研究を推進する（図1、2）。機体は民間に運用を委託し、研究者は専有する形で利用する。

これらの共同利用・共同研究の運営は、東京大学大気海洋研究所の2隻の観測研究船の過去50年にわたる運用の経験を参考にしており、これらの運用体制により共同利用研究観測用航空機の運用は十分可能である。

7. 2. 1. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 飛翔体観測推進センター

飛翔体観測推進センターは共同利用・共同研究拠点のセンターとして、共同利用運営委員会を組織し、長期的な視点から航空機観測研究全体を統括・推進する。同センター・共同利用運営委員会は各観測部会の計画を審査・採択し、観測・研究終了後には事後評価を実施する。同センター・委員会は各観測部会・支援組織（後述）との連携により、観測研究課題の調整、スケジュール管理、予算管理、ユーザ拡大（広報、説明会）、ユーザ支援、国際協力の推進（国際研究集会他）、データベース作成、成果報告、若手教育などを実施する。

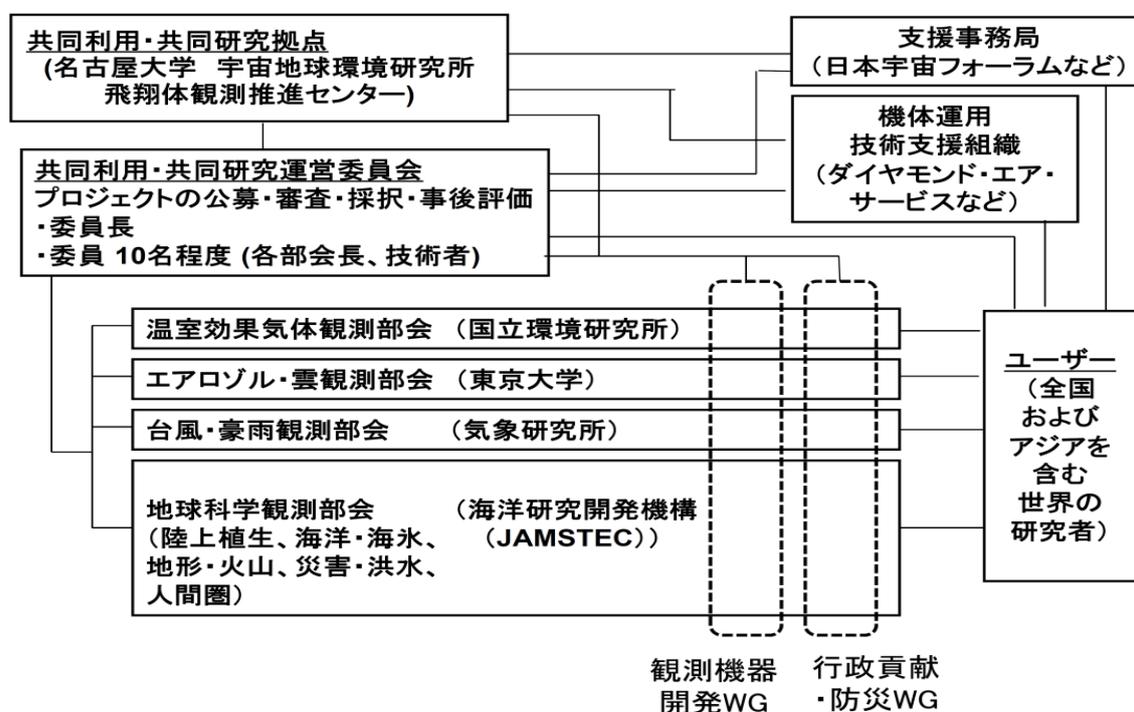


図1. 航空機観測の推進および機体運用の組織図。括弧内は、各観測部会を取りまとめる研究者の機関名。

3つの重要研究課題（温室効果気体、エアロゾル・雲・降水、台風・集中豪雨）については、それぞれの観測部会の観測・研究計画に基づき公募制により観測を推進し確実に研究成果をあげる（コア・プロジェクト）。またこれら以外の幅広い地球科学分野の研究課題（応用プロジェクト）についても、地球科学観測部会が公募制により実施する。さらに災害時などには迅速な観測を実施する。

これらのプロジェクトの成果については、飛翔体観測推進センター・共同利用運営委員会が事後評価を行うとともに、広く成果を公表する。また得られた観測データはデータベース化し、適宜、公開する。これまで航空機観測の経験が全くない研究者が参加できるように、各観測部会と連携をとりながら、航空機運用組織（ダイヤモンド・エア・サービスなど）の専用の技術支援チームや、航空機観測のサポートの豊富な実績のある組織（日本宇宙フォーラムなど）などを使って支援する。これらの体制により、宇宙地球環境研究所は10年間にわたる航空機観測研究の統括機関としての役割を確実に果たすことが可能である。

飛翔体センターは国際共同研究を積極的に推進する。アジアや欧米の研究者が測定器を搭載し、共同観測研究を実施できるように、各観測部会と連携をとりながら広報・支援を行う。また得られたデータを幅広く世界の研究者に利用してもらえよう、データベース整備や広報を実施する。

ヨーロッパでは、EUFAR（European Facility For Airborne Research）がEUの15カ国の所有する43機あまりの観測航空機を弾力的に運用し、地球観測研究を推進している。飛翔体センターはアジアでのEUFARの役割を果たし、アジアでの航空機観測のリーダーシップをとり、世界の研究者との交流を促進させる。

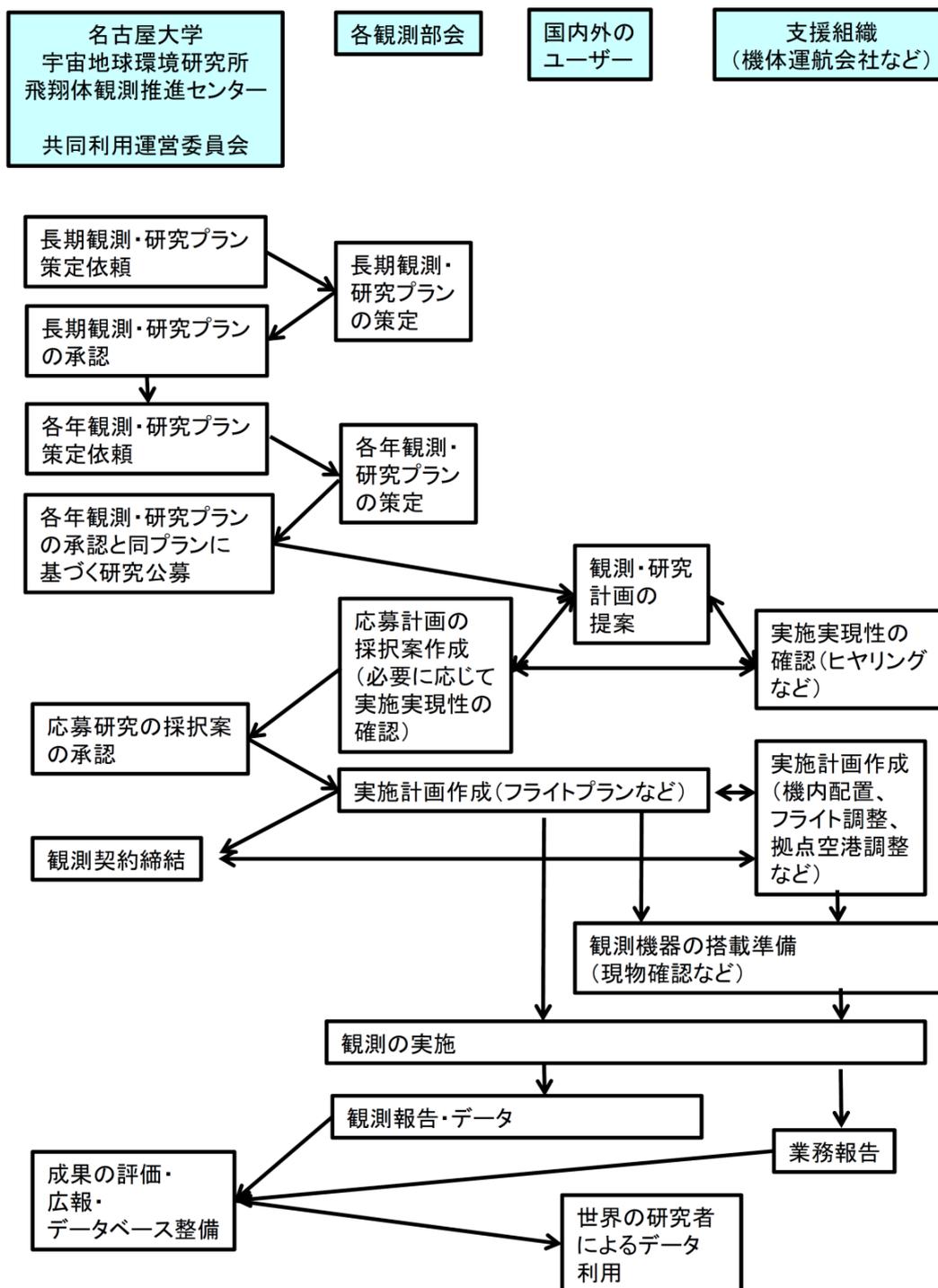


図 2. 飛翔体観測推進センター・共同利用運営委員会および各観測部会の役割。この図には明示していないが、外部の事務支援組織（日本宇宙フォーラムなど）が各段階の作業の業務支援をする。

7. 2. 2. 観測部会

本研究で重要課題とする「温室効果気体」、「エアロゾル・雲・降水」、「台風・集中豪雨」の3課題と、幅広い地球科学分野をカバーする「地球科学」課題に、それぞれ観測部会を設置する。東京大学、国立環境研究所、気象研究所、海洋研究開発機構（JAMSTEC）などの研究者がそれぞれ責任をもって観測研究を推進する。地球科学観測部会では、研究分野や研究者層の拡大に応じて、独立した観測部会に分化させていく。

図2に示されているとおり、各観測部会は長期的な視点から10年間に渡る観測計画・機器整備計画を立案し、年度毎により具体的なプランを策定する。これらの計画は共同利用運営員会で承認を得る。承認を得た年度計画に基づき研究の公募と採択を行う。公募は海外の研究者を含めて実施する。これまで航空機観測の経験が全くない研究者が参加できるように、航空機運用組織（ダイヤモンド・エア・サービスなど）の技術支援チームや、航空機観測のサポートの豊富な実績のある組織（日本宇宙フォーラムなど）とともに支援を行う。

観測部会を横断するワーキンググループ（WG）として、「観測機器開発WG」と「行政貢献・防災WG」の2つのWGを設置する。観測機器開発WGでは、長期的な視点から地球観測に必要な機器を開発・整備する。特に「エアロゾル・雲・降水」および「台風・集中豪雨」に関わる雲・降水レーダー・ライダーについては、計画的な整備を進める。行政貢献・防災WGでは、航空機観測で得られた科学的知見を行政や防災に貢献できる形で提供する筋道を検討する。台湾では台風の進路・発達予測のために航空機からのドロップゾンデ観測研究を実施してきたが、その成果が認められて現在では台湾の気象局が現業の台風観測として取り組んでいる。日本の航空機観測でも、このような行政貢献・防災を積極的に進めることを検討する。

7. 2. 3. 航空機運用組織と事務支援組織

航空機運用組織（ダイヤモンド・エア・サービスなど）は観測専用航空機の維持・管理、観測機器の搭載の技術支援、観測飛行の実施、標準データ（機体の位置情報など）の取得と提供などを実施する。10年間の観測計画の最初では、観測部会からの提案に基づき飛翔体観測推進センター・共同利用運営委員会が取りまとめた機体改修計画に基づき、観測機の改修を実施し、改修検査をクリアさせる。これまで航空機観測の経験が全くない研究者が参加できるように、さまざまな技術支援を実施する。

航空機観測のサポートの豊富な実績のある組織（日本宇宙フォーラムなど）は、様々な事務支援を行う。例えば宇宙フォーラムの場合これまで宇宙航空研究開発機構

（NASDA/JAXA）からの委託により航空機を使った無重力実験の支援を行ってきている。これらの実績に基づき、共同利用運営委員会の支援、研究の公募・採択・調整、航空機の運用スケジュール管理、予算管理、ユーザ拡大（広報、説明会）、ユーザ支援（機器の搭載支援、測定器の改良、安全性確保）、国際協力の推進（国際研究集会他）、データベース整備、成果報告、若手教育などを実施する。

航空機運用組織（ダイヤモンド・エア・サービスなど）と事務支援組織（日本宇宙フォーラム）のより具体的な機体運用・技術支援組織への委託事項は以下のとおりである。

1. 観測専用航空機の維持・管理とインフラ整備

(1) 観測専用航空機の維持・管理

2018年より2027年迄の観測期間に観測専用航空機として運航するための、新規登録関連業務、機体改造/改修作業の実施、並びに航空法規定の各種検査、点検業務を実施する。

- ・観測専用航空機として新規登録業務を実施（新規登録、耐空検査、無線検査、飛行規程、整備規定等）
- ・観測部会からの提案に基づき飛翔体観測推進センター・共用運用利用運営委員会が取り纏めた機体改修計画に基づいて、航空機製造メーカーからの支援を含めて民間航空機仕様を観測専用航空機仕様へと機体を改造する。
（主たる改造：電源部、飛行データ装置、空気インレット部、ガスインレット部、機外排気部通信装置、左右翼端 PMS パイロン、ペリポッド等）
- ・搭載する観測機器及び外装等飛行形態が航空法に適合することを証明し、航空局の承認を得る
- ・個々の飛行ミッションでの形態変更に際し、変更形態に対する航空局の承認を得る。
- ・航空機を継続使用可能とするための法的整備（耐空検査、各種点検等）を実施し、航空局の承認を得る。

(2) 観測専用航空機に係るインフラの整備

観測専用航空機の運航を実施するための各種インフラを整備する。

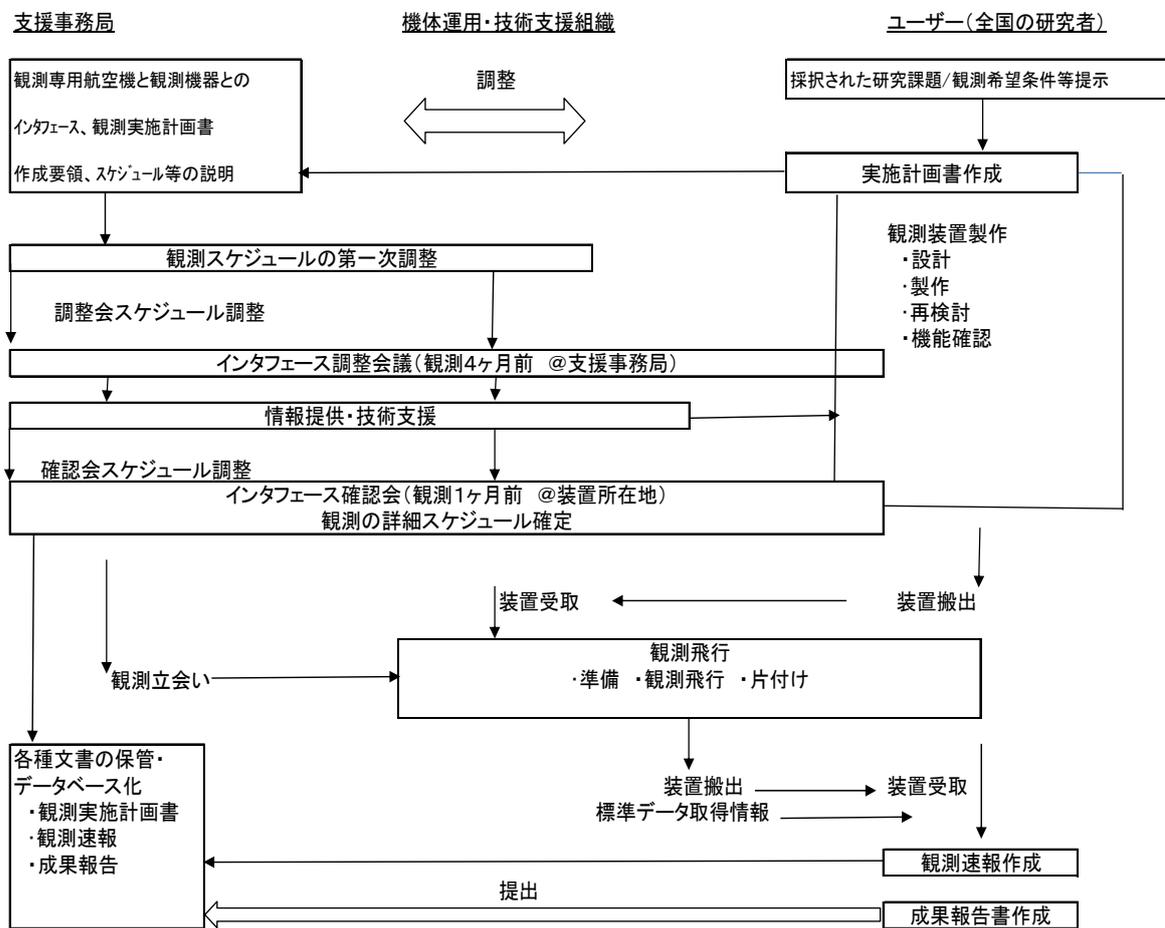
- ・観測専用航空機の定置場を確保（観測機器搭載及び整備作業実施のための格納庫）
- ・観測専用航空機に適合するパイロット、運航管理員及び整備士の確保
- ・観測者、研究者のための控え室及び会議室の確保

2. 観測機器搭載のための技術支援

飛翔体観測推進センター・共同研究運営委員会により採択された研究課題について、支援事務局と共に、ユーザーに対し航空機とのインタフェースに係る情報提供・技術支援により観測計画作成支援、観測装置等の製作支援を実施。また、研究課題の相乗りに際し搭載観測機器の搭載ラック内配置及び搭載ラックの機内適正配置等の設計検討を実施

観測専用航空機による観測飛行実施フロー

観測飛行実施に向け支援事務局(JSFなど)、機体運用・技術支援組織(DASなど)、ユーザー(研究者)の役割分担



観測実施計画書: 航空機観測の内容、装置、観測実施手順を記載した基本文書
 インタフェース調整会議: 観測装置に航空機の制約(観測装置スペース、電源等)を反映させ航空機観測に適した装置を製作する準備としてユーザー/支援事務局/機体運用・技術支援組織の三者で行う
 インタフェース確認会: 製作された観測装置の動作を確認し、予定した日時に観測ができるかユーザー/支援事務局/機体運用・技術支援組織が確認・判定するために行う

図 3. 航空機運用組織 (ダイヤモンド・エア・サービスなど) と事務支援組織 (日本宇宙フォーラム) の役割。

3. 観測機器の搭載～観測飛行/観測標準データ取得～観測標準データの提供

(1) 観測飛行前準備

- ・ 観測計画について、航空局へ説明し航空局修理改造検査日程を確保
- ・ 観測計画に基づきユーザーより受領した観測装置をラック内に搭載及び機器搭載ラックを機内配置し、配線・配管接続を実施
- ・ 社内地上試験 (電磁干渉試験等) 及び官立会い地上試験を実施

- ・社内飛行試験及び官飛行試験を実施し修理改造検査合格証を取得
- ・観測空域に対する各航空管制、自衛隊管制、米軍管制等の飛行計画許可を取得

(2) 観測の実施

- ・飛行空域の気象情報の取得／提供と共に飛行前ブリーフィングを行う。
- ・飛行空域での観測の実施／観測標準データ（ADC、TAT、POS等）の取得

(3) 観測飛行後処置

- ・搭載観測機器の取り出し及びユーザーへの機器返送
- ・観測標準データのユーザーへの提供

7. 3. 年度計画と予算

本研究では国産航空機である MRJ (Mitsubishi Regional Jet) 航空機を専有利用する。最初の2年間で機体改修や測定器の準備を行い、その後の8年間にわたり計画的に地球観測を実施する。コア・プロジェクトなどの大規模観測(80-100フライト時間)を毎年2回実施する。一般公募観測・研究や災害対応などあわせて、全体で年間200時間のフライトを実施する。このフライト費用に加え、機体の専有や修理改造など、機体運航に直接関わる経費として10年間で150億円が必要である(表1)。また観測機器整備、教員・事務員人件費(外部委託を含む)、雑費(会議、広報など)として、10年間で30億円が必要である。これらを合わせると、10年間で180億円の費用が必要である(表2)。表3には、機体運航に直接関わる経費が必要となる項目を示した。

予算が十分でない時のバックアッププランとしては Gulfstream II (G-II) クラスの機体の専有を想定している。MRJと同様に、最初の2年間で機体改修や測定器の準備を行い、その後の8年間にわたり地球観測を実施する。このクラスの機体の専有・運用には10年間で80億円が必要である。観測機器整備などの30億円と合わせて、10年間で110億円の費用が必要である。1年あたりの最大予算は、MRJを使用した場合には25.8億円、GIIクラスの機体を使用した場合には13.3億円である。

7.1章で述べた通り、搭載可能重量はMRJが8トン(航続距離4170km確保時)に対しG-IIが2トンである。またキャビン長さはMRJが21.9mに対しG-IIが6.0mと、MRJの方がだいぶ大きい。航続距離はともに4000km程度である(MRJの搭載重量を8トンとした時)。従って、今後の海外からの研究者の参加を含めた多くの機器の搭載を考えるとMRJが必要である。

10年間の計画中に予算が大幅に削減された場合には、観測機を専有することをやめ、レンタルする方式に切り替えることも検討する。専有の場合には、観測フライトをしなくても固定費用が発生するが、レンタルの場合には使用する時間に応じた費用のみが発生する。ただしレンタルの場合には他のユーザーも存在するために、計画どおりの観測や災害時などでの迅速な対応ができない場合が生じる。

大気科学分野以外の地球科学分野では、本研究計画で観測機として専有を予定しているジェット機以外の、プロペラ機や飛行艇の利用を希望している研究者がいる。このため、地球観測専用の航空機の利用以外に、本研究の目的にかなう研究については、一定のルールに基づいて、他の機体をレンタルする研究についても、サポートを行っていく。上記の30億円には、この費用も含まれている。

表 1. MRJ を専有した場合の年度別予算案（単位：億円）。年間 200 時間の観測フライトを実施することを想定して算出した。10 年間の合計は 180 億円。

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	項目別 合計
機体専有費(機体リース・ 初期改造・整備人件費)	20.8	14.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	106
運用経費(燃料・機体改 修・人件費)	0	0	5.0	5.0	7.0	5.0	5.0	7.0	5.0	5.0	44
観測機器整備	4.0	4.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	20
教員・事務員人件費	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	6
会議・データベース・雑費	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	4
年度別合計	25.8	19.8	17.8	15.8	18.8	15.8	15.8	18.8	15.8	15.8	180

表 2. GII クラスの機体を専有した場合の年度別予算案（単位：億円）。年間 200 時間の観測フライトを実施することを想定して算出した。10 年間の合計は 110 億円。

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	項目別 合計
機体専有費(初期改 造・機体拘束費)	4.0	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	29.2
運用経費(飛行料・機 体改修・機器使用料)	0.2	5.0	5.5	5.5	6.3	5.5	5.5	6.3	5.5	5.5	50.8
観測機器整備	4.0	4.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	20
教員・事務員人件費	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	6
会議・データベース・ 雑費	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	4
年度別合計	9.2	12.8	12.3	10.3	12.1	10.3	10.3	12.1	10.3	10.3	110

表 3. 機体運航に直接関わる経費の項目 (MRJ を専有する場合)

No.	項目	内訳
1	機体専有費(機体リース・初期改造・整備人件費)	
1.1	リース料等	
	1.1.1 MRJリース料	
	1.1.2 機体予備品リース料	
1.2	格納庫及び整備機材	①格納庫／整備機材一式 ②格納庫土地賃借料及び維持費
1.3	人件費 パイロット/整備士/運航管理者費用	①パイロット/整備士ライセンス取得 ②パイロット/運航管理/整備士/整備管理人件費 ③パイロット/整備員訓練費
1.4	航空保険料	
1.5	機体改修／オリジナル改修費	①電源部 ②飛行データ装置(ADC,TAT,湿度,GPS等) ③ペリホット(リモセン,可視,赤外センサー用) ④空気インレット部 ⑤ガスインレット部 ⑥機外排気部 ⑦左右翼端PMSパイロン ⑧インマルサット通信装置 ⑨イリジウム通信装置 ⑩Kuバンド通信装置 } ※ ⑪機内機器搭載共通ラック ⑫技術資料／図面購入 ⑬三菱航空機依頼作業 ⑭観測計画の立案、調整、立会い ⑮機体の近代化 ※通信装置は上記の内いずれか選択
1.6	MRJ新規登録費用	①新規登録,耐空検査,無線検査,飛行規程,整備規定 ②修理改造検査 ③テストフライト(10フライト) ④航空保険
2	運用経費(燃料・機体改修・人件費)	
	年間運航流動費	①燃料(600Gal/h×250h=150,000Gal(567,750L)) ②部品 ③エンジン, APU ④整備点検(外注を含む) ⑤着陸料(80回) ⑥航行援助料(80回) ⑦衛星通信費 ⑧観測機器搭載替え修理改造等 ⑨大規模機体改修費(2回を想定) ⑩観測計画の立案、調整、立会い

8. 資料

8. 1. 日本の航空機観測の実績

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 Merlin-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(東シナ海)	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
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
東京大学・茨城大学・韓国 GIST A-FORCE-2009 2009年4月 東シナ海・黄海	King Air エアロゾル、雲物理、微量気 体	春季のアジア大陸からの人為 起源エアロゾルの輸送・除去 過程とその雲物理影響評価
東京大学・茨城大学・気象研 研究所 A-FORCE-2013W 2013年2-3月 東シナ海・黄 海	King Air エアロゾル、雲物理、微量気 体	冬季・早春季のアジア大陸か らの人為起源エアロゾルの輸 送・除去過程とその雲物理影 響評価
東京大学・茨城大学・気象研 研究所 A-FORCE-2013S 2013年7月 仙台沖・北海道 東方沖	King Air エアロゾル、雲物理、微量気 体	夏季の黒潮続流域および北西 太平洋の下層雲とエアロゾル の影響評価

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—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 INSTAC-2 1990年2-3月 北緯 65° -南緯 65	Gulfstream-II エアロゾル、オゾン	海塩粒子の上部対流圏への輸送を発見
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 TRACE-P 2001年2-4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

8. 2. ダイヤモンド・エア・サービス社所有の航空機による地球観測実績

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	高性能合成開ロレーダ(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			
	200T	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				
環境研	H20.3.3~H20.4.4	32 日間	東アジア大気観測		
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		

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 高性能SAR横須賀周辺データ取得飛行 高性能SAR機上処理システム性能確認飛行
			H21.12.19~H21.12.23	5	
			H22.1.28~H22.2.5	9	
		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 高分解能ホリトリックSARを用いた水害状況把握技術の開発 高高度ライターのジェット機による飛行評価実験に関する作業
	H22.2.12~H22.2.28		17		
	H21.12.24~H22.1.26		20		
	計	42 日間			
	JAROS	H21.12.1~H21.12.3	3 日間	潮流観測 潮流観測	
		H22.3.29~H22.3.31	3		
	計	6 日間			
200T	気象研	H21.5.18~H21.6.23	34 日間	人工降雨実験 人工降雪実験(修理改造作業) 人工降雪実験 人工降雪実験	
		H21.11.9~H21.11.20	12		
		H21.12.1~H21.12.23	23		
		H22.2.25~H22.3.13	17		
	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	高分解能ホリトリックSARを用いた水害状況把握技術の開発 L-SAR POS-610修改、船舶識別実験 高高度ライターのジェット機による飛行評価実験に関する作業
			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 災害観測実験 ETS-VII航空機実験	
		H23.3.9、3.12、3.18	3		
		H23.3.25~H23.3.31	7		
		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ゾン観測(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 L-SARタイ水田観測、新燃岳観測 L-SARタイ洪水災害緊急観測 高高度ライターのジェット機による飛行評価実験に関する作業
			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	X-SAR移動体観測実験 X-SAR災害状況把握観測実験飛行 X-SAR災害被害想定観測実験飛行	
		H23.10.3~H23.10.14	12		
		H24.1.5~H24.1.13	9		
		計	30 日間		
		JAXA	H24.1.5~H24.1.16		12 日間
200T	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				

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 L-SAR2校正検証及び撮像実証(その2) 九州北部豪雨災害緊急観測 インドネシア森林、火山、海外監視等観測 農水作付け撮像実証実験 対空標識撮像及び農水作付け撮像 火山地帯撮像実証実験 L-SAR2校正検証3及び撮像実証実験飛行 高高度ラダーのジェット機による飛行評価実験に関する作業 L-SAR2GC検証及び撮像実証
			H24.6.15~H24.6.21	7	
			H24.7.12~H24.7.13	2	
			H24.7.30~H24.8.9	11	
			H24.8.10	1	
			H24.8.31~H24.9.10	2	
	H24.10.5	1			
	H24.11.8~H24.11.14	7			
	H25.1.21~H25.2.15	26			
	H25.3.9~H25.3.12	4			
	計	82日間			
	NICT	H24.10.29~H24.11.2	5	高性能SAR画像評価観測、機材追加確認観測	
H24.11.15~H24.11.23		9	"		
H25.1.7~H25.1.15		9	"		
計	23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ゾン観測(茨城大) 二酸化炭素・メタン濃度連続測定装置実地試験(環境研)	
		計	25日間		
	JAXA	H24.11.26~H24.12.16	21日間	干渉型SARによる海面高度観測実験	
		H25.1.22~H25.1.25	4	"	
	計	25日間			
	環境研	H24.12.17~H25.1.18	24日間	GOSATデータ検証と地上FTS検定航空機観測	
	東京大学	H25.2.1~H25.3.11	39日間	アジアのエアロゾル・雲・降水システム航空機観測支援業務 航空機による大気エアロゾル観測 航空機による大気観測支援業務	
極地研究所			航空機による大気観測支援業務		
筑波大学	H25.3.13~H25.3.15	3日間	人工降雨実験支援		
MU-300	JAXA	H25.1.10~H25.1.21	24日間	航空機による電場観測	
		H25.2.4~H25.2.15			

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間		観測内容
平成25年度	G-II	JAXA	H25.5.7~H25.5.10	6日間	L-SAR2GC検証、CP機能検証並びに災害検出撮像実証実験 農水作付け監視、高精度干渉観測及び災害検出撮像実証実験 山口・島根豪雨災害に関する緊急観測飛行 農水作付け監視及び災害検出撮像実証実験 CR検証、ハイマス検証データ取得及びUAVSRとの同期観測実証 台風26号伊豆大島豪雨災害に関する緊急観測飛行 L-SAR2改修に伴う航空局検査対応 L-SAR2による小笠原諸島・西之島沖火山噴火状況の観測飛行
			H25.6.6~H25.6.11	6	
			H25.7.31~H25.8.2	3	
			H25.9.9~H25.9.14	6	
			H25.10.7~H25.10.12	6	
			H25.10.21~H25.10.24	4	
			H26.1.6~H26.1.14	9	
			H26.1.15~H26.1.16	2	
	計	42日間			
	NICT	H25.8.19~H25.8.27	9日間	高性能SARによる公募研究官側並びにNICTで必要とする観測	
		H25.10.14~H25.10.19	6	"	
		計	15日間		
	200T	国際水産資源研究所	H25.5.13~H25.5.16	3日間	ミンククジラ航空目視調査
			H25.5.28	1日間	人工降雨実験支援
		筑波大学	H25.6.18~H25.7.22	35日間	航空機による大気エアロゾル観測支援業務 航空機による大気観測の支援業務
		極地研究所			航空機による小河内ダム近郊の観測調査支援
		いであ様	H25.8.8~H25.9.16	40日間	人工降雨実験支援
国際農林水産業研究センター		H25.12.15~H25.12.16	2日間	人工降雨実験支援	
環境研		H25.12.24~H26.1.24	23日間	GOSATデータ検証と地上FTS検定航空機観測	
JAXA	H26.1.29~H26.2.18	20日間	干渉型SARによる海面高度観測実験		
	H26.3.13~H26.3.21	9	"		
	計	29日間			
MU-300	JAXA	H25.12.24~H26.1.28	27日間	航空機による電場観測	

年度	使用航空機	観測機関	航空機拘束期間		観測内容
平成26年度	G-II	JAXA	H26.4.11~H26.4.21	11日間	L-SAR2改修に伴う航空局検査対応 L-SAR2校正及び農水作付け監視のための飛行 L-SAR2農水作付け監視及び災害撮像実証のための飛行 (高知県豪雨水害、鹿児島県口永良部島火山噴火観測を含む) L-SAR2水稲作付け等調査のための飛行 L-SAR2校正実験のための飛行 L-SAR2による被災地モニタリング観測のための飛行 L-SAR2による研究公募PI要求画像取得等のための飛行
			H26.6.10~H26.6.14	5	
			H26.8.4~H26.8.11	8	
			H26.9.9~H26.9.12	4	
			H26.9.26~H26.9.30	5	
			H26.11.8~H26.11.12	5	
			H27.2.19~H27.2.25	7	
			計	45日間	
			NICT	H27.3.2~H27.3.6	
	200T	国際水産資源研究所	H26.9.22~H26.9.26	5日間	釧路沖ミンククジラ航空目視調査

8. 3. JAXA の航空機搭載 合成開口レーダー (Pi-SAR-L2) のデータ利用例

JAXA の航空機搭載 合成開口レーダー (Pi-SAR-L2) のデータ利用例 (第5回公募)
(JAXA/EORC の HP http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/ra/jra5_mem_pisar12.htm より転載)

No.	PI名	所属機関	研究分野	研究テーマ
2006	山口 芳雄	新潟大学	SAR理論 (PolSAR散乱モデル、PolSARデータの利活用一般)	地球観測におけるPi-SAR-L2偏波データの有効利用法開発
2007	武若 聡	筑波大学	海洋 (波浪、海岸線抽出)	沿岸波浪と地形情報抽出に関する検討
2018	若林 裕之	日本大学	雪氷 (海氷分類・氷厚)	マルチパラメータSARによるオホーツク海における海氷観測の精度向上に関する研究
2019	佐藤 源之	東北大学	災害 (被災状況把握、PolSARデータの利活用一般)	自然災害の状況把握のためのレーダポーラリメトリ応用研究
2020	小荒井 衛	国土交通省 国土地理院	災害 (被災状況把握)	散乱強度及び偏波情報を活用した早期災害状況把握及び土地の脆弱性評価に関する研究
2021	島田 政信	宇宙航空研究開発機構	SAR理論 (PolSARデータの利用、InSARアルゴリズム)	Polarimetric Calibration and the polarimetric sensitivity analysis for the disaster mitigation
2022	臼杵 伸浩	アジア航測株式会社	災害 (土砂災害、PolSAR散乱モデル)	偏波・入射角特性を活用したSAR画像からの天然ダム・深層崩壊の抽出に関する検討
2023	佐藤 亮一	新潟大学	SAR理論 (PolSAR散乱モデル、PolSARデータの利活用一般)	Pi-SAR-L2偏波データの被災住宅識別観測および大規模農地観測への有効利用法の開発
2024	進藤 嘉邦	三菱スペース・ソフトウェア株式会社	災害 (PolSAR散乱モデル、水害)	1時期の多偏波SAR画像上の橋梁を用いた水位計測手法の確立
2027	小澤 拓	防災科学技術研究所	災害 (火山性地殻変動、InSARアルゴリズム)	火山活動把握のための航空機搭載型SARの利用に関する研究
2028	有井 基文	三菱スペース・ソフトウェア株式会社	SAR理論 (PolSAR散乱モデル、PolSARデータの利活用一般)	多入射角/多偏波SAR画像による土地被覆状況の入射角に対する感度分析
2029	石塚 直樹	独立行政法人農業環境技術研究所	農業 (水稲)	ALOS-2による水稲作付面積把握にむけて
2031	山田 寛喜	新潟大学	SAR理論 (PolSAR散乱モデル、PolInSAR解析)	多次元Pi-SAR-L2ポーラリメトリデータによる陸域観測手法に関する研究
2033	大倉 博	広島工業大学	土地利用・土地被覆 (PolSAR画像分類)	Lバンド全偏波SAR 画像を用いた自動被覆分類
2037	木村 宏	岐阜大学	SAR理論 (PolInSAR解析)	トモグラフィックPOLARSAR(TOMO-POLARSAR)による散乱体分類・散乱機構分解
2038	廣瀬 明	東京大学	SAR理論 (PolSAR散乱モデル、InSARアルゴリズム)	高次複素ニューラルネットワークを用いたALOS-2データとの統合的利用による高分解能PolInSARデータの解析手法の構築
2041	古屋 正人	北海道大学大学院	雪氷 (氷河流動、InSARアルゴリズム)	立山・劔岳域に現存する氷河の流動と構造検出
2045	中川 雅史	芝浦工業大学	災害 (都市構造の変化抽出、光学・DSMデータ等との融合)	時系列SARと点群データを用いた都市状況変化の把握
2046	小松 輝久	東京大学	海洋 (漁業・沿岸生態系、PolSARデータの利用)	Pi-SAR-L2を用いた沿岸域管理のためのマッピング法の開発
2047	中山 裕則	日本大学	土地利用・土地被覆 (PolSAR画像分類、PolSARデータの利活用一般)	Pi-SAR-L2データによる自然災害調査のための土地被覆および地形分布解析

2048	米澤 千夏	東北大学	農業（水稲、農業被害推定）	東日本大震災津波被災農地における水稲生育段階抽出手法の開発と復旧状況のモニタリング
2049	園田 潤	仙台高等専門学校	災害（地中探査、被災状況把握）	大規模自然災害におけるPi-SAR-L2と地中レーダを用いた高効率な搜索支援手法の開発
2050	草野 駿一	株式会社パスコ	SAR理論（PoISAR散乱モデル、海岸線抽出）	高分解能L帯SAR画像を用いた海岸線抽出に関する研究
2051	石塚 師也	京都大学	SAR理論（InSARアルゴリズム）	多偏波SARデータを用いた高精度地表変動推定手法の開発
2052	大串 文蒼	Exelis VIS 株式会社	SAR理論（InSARアルゴリズム）	Pi-SAR-2データを用いた、DEMデータや地殻変動を抽出するための解析手法の検証
2053	渡邊 学	宇宙航空研究開発機構	農業（PoISAR散乱モデル、農業被害推定）	津波による塩害農地検出手法の検討
2054	富山 信弘	一般財団法人 リモート・センシング技術センター	農業（畑作、PoISAR画像分類）	Pi-SAR-L2による畑作物作付地の分類および作付状況把握に関する研究
2055	山崎 文雄	千葉大学	災害（都市構造の変化抽出、光学・DSMデータ等との融合）	Pi-SAR-L2データを用いた市街地のモデル化と自然災害の把握
2056	木村 恒一	日本電気株式会社	SAR理論（InSARアルゴリズム）	Pi-SAR-L2リピートパス干渉による地殻変動量の検出能力の評価
2058	田殿 武雄	宇宙航空研究開発機構	土地利用・土地被覆（PoISAR画像分類、光学・DSMデータ等との融合）	高分解能SARと光学センサデータを用いた土地被覆分類等に関する研究

8. 4. FAQ（よくある質問とその回答）

Q1. 気象庁や気象研究所が観測機を所有・運用することはできないでしょうか？

A1. 気象庁・気象研究所は、基本的に気象に関わる業務のみを行う機関であるため、幅広い地球観測を実施する観測機を所有・運用することはできません。また同じ理由により、研究者が主体となって自由に運用する形での利用は困難です。

ただし気象研究において航空機観測は必要不可欠であるために、本計画が実現した場合には、気象研究所はユーザとして観測機を活用する予定です。またそのような航空機観測研究の実績に基づき、将来的に気象観測専用の航空機の導入も考えられるかもしれません。

Q2. 宇宙航空研究開発機構（JAXA）が所有する航空機である飛翔（セスナ式ジェット機）や MuPAL（ドルニエ式ターボプロップ）などを利用できないでしょうか？また今後に占有する機体を所有・運用することはできないでしょうか？

A2. JAXA では飛翔や MuPAL などの機体を使って、衛星搭載観測機器に係る飛行実証や、旅客機高性能化技術に係る飛行実証などの業務を行っており、現時点では地球観測のために用いることは困難です。また MuPAL は航続距離が 1000km 以下と短いために観測エリアが狭く、地球観測には不向きです。

今後の地球観測専用の機体については、JAXA では検討されたことがないために、近未来での実現は困難と考えられます。また人工衛星観測プロジェクトと同様な推進体制の場合には、研究者が主体となって自由に運用する形での利用は困難と考えられます。

一方において、JAXA の地球観測研究センター（EORC）はダイヤモンド・エア・サービスなどの民間の運航会社の観測機を利用して、合成開口レーダーなどにより多くの地球観測を実施しています。本計画が実現した場合には、JAXA はユーザとして観測機を活用する予定です。

Q3. 航空機観測ではさまざまな観測目的に応じて異なる種類の航空機が必要であるため、1機の航空機では不十分であり、2機以上の機体が必要ではないでしょうか。

A3. ご指摘のとおり欧米では、高高度観測や低速度観測に適した機体をそれぞれ使用したり、1機で高い高度からレーダー観測しながらもう1機で低高度の直接観測をしたりするなど、複数の機体を使い分けながら観測研究が実施されています。しかしながら日本は現状では観測機がゼロであるために、まずは最初の1機を導入することが重要と考えます。

そして実績を積んだ上で、将来的には複数の機体を専有・運用していきたいと思います。本研究では、いろいろな観測目的に対応可能な汎用性の高い航空機である MRJ あるいは G-II クラスの機体を導入する予定です。この機体ではどうしても不可能な観測などについては、他の機体をレンタル使用することについても、一定のルールに基づいて経費をサポートすることも検討しています。また本研究で導入する機体とともに別の機体をレンタルし、2機の同時観測などにも挑戦していければと思います。

Q4. 欧米ではグローバルホークなどの無人航空機による地球観測が実施され始めています。日本でもその可能性を追求すべきではないでしょうか。

A4. 日本でも小型の無人航空機やヘリコプターなどは、陸上生態系観測などの地球観測で実用されています。一方において、グローバルホークのような大型の無人航空機に搭載されている機器は、基本的に長年にわたる有人航空機の観測実績に基づいて開発されています。日本においても、このようなステップを踏んでいくことが必要です。

一方、旅客機との衝突などの事故を防ぐ目的から、無人機に関する法的な整備が現在進められています。このような法的整備が整えば、今後、無人航空機の地球観測への活用は積極的に検討すべきことです。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では気象観測や災害監視を視野に入れた、高高度 (16.5 km 以上) を長時間 (72 時間程度) 飛行可能な無人機を開発しています。将来的には、そのような無人航空機も活用できればと思います。

Q5. 海洋観測では飛行艇が便利と思いますが、飛行艇を利用することはできないでしょうか？

A5. 飛行艇は現在、海上自衛隊のみが所有・運用しています。現時点では、この機体は民間で購入することができません。また海上自衛隊の航空機は民間人が搭乗するなどの利用はほぼ不可能と考えられます。これらの理由から地球観測専用の航空機として飛行艇を選択することはできません。

ただし海洋観測などにおいて飛行艇をレンタル利用する希望があれば、本研究の目的にかなう研究については、一定のルールに基づいて経費をサポートすることも検討しています。(海上自衛隊との交渉や機器搭載については、ユーザーの責任で行っていただく必要があります。)

Q6. 近年、人工衛星観測技術が発達し、数メートルの分解能での画像などが得られていますが、航空機観測は必要なのでしょうか？

A6. 人工衛星からの撮像（イメージャー）観測はとても強力な観測手段ですが、得られる情報が極めて限られています。地球観測では大気中の特定の高度の温室効果気体の濃度など、航空機からの直接観測でしか得られない物理量の観測が必要とされています。気候や地球システムの重要なプロセスがそれらのマイクロ量に大きく依存しているからです。また撮像にしても、より高い時空間分解能が必要な観測もあり、また雲が存在し衛星観測データが得られない条件での観測が必要な場合もあります。このように航空機観測と人工衛星観測は相補的な観測手段といえます。

8. 5. 執筆者一覧

概要	小池、新野、坪木
1. 航空機観測の位置づけ（内外の状況）	近藤、小池
2. これまでの研究成果	
2. 1. 研究成果概要	小池
2. 2. 温室効果気体	町田、青木
2. 3. 反応性気体	金谷、北
2. 4. エアロゾル	茂木、足立、持田、宮崎
2. 5. エアロゾル・雲相互作用	小池、村上
2. 6. 集中豪雨・台風	篠田、山田、山口、伊藤、城岡、坪木
3. 研究計画	
3. 1. 研究計画概要	小池
3. 2. 温室効果気体	町田、青木
3. 3. 反応性気体	金谷、北
3. 4. エアロゾル	茂木、足立、持田、宮崎
3. 5. エアロゾル・雲相互作用	小池、村上
3. 6. 集中豪雨・台風	篠田、山田、山口、伊藤、城岡、坪木
4. 地球科学諸分野との連携	
4. 1. 概要	小池、鈴木
4. 2. 海洋・海氷	豊田
4. 3. 海洋・沿岸	石坂
4. 4. 陸上生態系	鈴木、三枝、本多、永井
5. 人工衛星観測との連携	久世、岩崎（晃）
6. 数値モデル研究との連携	佐藤（正樹）
7. 運用計画	
7. 1. 機体（MRJ、G-II）	高橋（保旨）
7. 2. 運用組織	小池、坪木、高橋（暢宏）、篠田
7. 3. 年度計画と予算	小池、坪木、高橋（暢宏）、篠田

**Promotion of Research on Climate and Earth System Science
by Advanced Aircraft Observations:
Plans for the New Aircraft Program of Japan**

**Summary of the report of the Aircraft Observation Planning
Committee of the Meteorological Society of Japan (MSJ)**

**Hiroshi Niino (President of MSJ) and
Makoto Koike (Chair of the Committee)**

October 1, 2015

1. Background

The Earth's environment has been changing rapidly, particularly as manifested by global warming, and the changes are imposing large impacts on the fundamental structures of our lives, including socio-economic activities and supplies of water and food. It is critically important to fully understand the current status of the changes and to investigate the controlling processes, in order to predict future changes and protect human society and ecosystems from serious damage. At present, direct atmospheric observations by aircraft are lacking in important geographical regions; they are needed for understanding greenhouse gases, aerosol-cloud interactions, and the hydrologic cycle, including predictions of typhoons and torrential downpours. Japan lacks an aircraft dedicated to scientific measurements, so Japanese scientists have been obliged to charter commercial aircraft for their experiments. Therefore it has been difficult to plan and conduct systematic aircraft experiments, which are indispensable for studies of climate and Earth system science.

2. Aims of the Program

The purpose of this program is promoting atmospheric and climate research as well as Earth system science as a whole by introducing aircraft platforms for Earth observations. We plan to acquire a dedicated aircraft and outfit it with an observation system that will be designed and utilized by scientists from a variety of fields and institutions on a long-term basis. Our aim is to enable the systematic planning of next-generation Earth observations and research activities by operating instrumented aircraft platforms on a long-term basis and attaining the highest levels of scientific outcome and impacts. We plan to provide today's scientists and the next generation of scientists with exciting opportunities to use aircraft platforms to pursue new scientific ideas and to develop and use new technologies and methodologies. It is also planned to extend these new research opportunities to foreign scientists so that this Japanese system serves as a center of research and promotes Earth

observations throughout Asia. The basic scientific knowledge obtained by this program will be made public in order to contribute to the welfare of world societies. All the processes involved in this research plan, including organizing scientists and activities, selection and scheduling of instruments, soliciting proposals, making field measurements, data archiving, and using the data, will be transparent to all scientific communities.

3. Needs for Aircraft Observations

Japanese scientific communities are successfully conducting Earth observations using satellite platforms (e.g., GCOM, GOSAT, GPM, and EarthCARE) and successfully developing and using large complex numerical models of the atmosphere and ocean supported by large-scale computing systems. However, Japanese aircraft observation systems are far behind the international standard set by the USA and Europe due to the lack of dedicated aircraft and the number of suitable payload instruments. Direct atmospheric observations of gases and aerosols from aircraft using in-situ and remote sensing instruments are essential to complement those made on larger scales from satellites. For example, microphysical properties of aerosols, clouds, and precipitation, which can be measured adequately only by direct aircraft observations, are critical parameters for studies of the global environment and climate change. Processes critical for reliable predictions of climate change strongly depend on these parameters. At the initial stage of this proposed program, we will stress the need for accurate and systematic observations of microphysical quantities, including the chemical and physical properties of aerosols, the size distributions of cloud and precipitating particles, and the distribution of greenhouse gases on small to large spatial scales, in order to yield insights into key processes and ultimately to achieve scientific breakthroughs. Having more precise, accurate and abundant atmospheric observations from aircraft will facilitate improvements in satellite remote sensing methods and contribute to advances in model predictions of global change through improved understanding of basic processes and more comprehensive comparisons with observations.

Important research areas for climate

- A. We consider three areas as priorities for climate science research with instrumented aircraft platforms:
- a) Greenhouse gases, which drive global warming;
 - b) Aerosol, clouds, and precipitation, which are some of the most uncertain factors for estimating global radiative forcing and the climate response;
 - c) Typhoons and torrential downpours, which may have strong impacts on societies as climate changes proceed further;

These areas have been studied for a long time by Japanese scientists, making strong links with satellite observations and modeling studies.

B. Earth system science and disaster prevention

Earth observations by instrumented aircraft will promote the wider study of climate and Earth system science, including the biosphere (terrestrial and marine ecosystems) and the physics and chemistry of the ocean and sea ice, for which the lack of sufficient observations by aircraft is limiting scientific advances. Direct observations of microscale properties, such as vegetation types and the extent and distribution of sea ice, will enable insightful interpretations of macroscopic properties observed by satellites and will contribute to improved understanding of basic processes needed for model development.

Aircraft observation systems (e.g., synthetic aperture radar and gas and aerosol detectors) will be used to make observations that will help minimize damage from natural disasters such as earthquakes, volcanic eruptions, tsunamis, floods, fires, and severe storms, and prevent serious accidents such as pollution of marine ecosystems and accidents in nuclear power plants.

4. Organizations and operations

The Institute for Space-Earth Environmental Research of Nagoya University has established the “Center for Orbital and Suborbital Observations” in order to play a central role in aircraft observations. This center will organize and manage activities related to aircraft observations in close cooperation with scientists from several institutions in Japan, such as the University of Tokyo, Tohoku University, the Meteorological Research Institute, the National Institute for Environmental Studies, and JAMSTEC.

Operations related to aircraft observations will be supported by companies and foundations, such as Diamond Air Service Inc. and Japan Space Forum, which are fully experienced with the operations and management and support necessary to conduct successful aircraft observation studies.

5. Planned Aircraft

We plan to use the Mitsubishi Regional Jet (MRJ), newly developed and manufactured by Mitsubishi Aircraft Corporation, to conduct two major missions per year requiring about 200 total flight hours. An alternative plan is to use the Gulfstream II class aircraft. The MRJ carries 8 tons of payload with a range of about 4200 km. The length of the cabin is about 22 m, enabling installation of a variety of instruments for integrated studies conducted by scientists from Japan and abroad.

Promotion of Climate and Earth System Sciences by Aircraft Observations

