

衛星搭載ライダーの現状と将来に関する調査報告書

レーザセンシング学会

衛星搭載ライダーに関するプロジェクト調査委員会

2024年10月

レーザセンシング学会

衛星搭載ライダーに関するプロジェクト調査委員会

委員長 内野修

副委員長 石井昌憲, 阿保真, 西澤智明

委員 岡本幸三, 岡本創, 勝俣昌己, 勝山 杜都, 亀山俊平, 久世宏明,
酒井哲, 境澤大亮, 柴田隆, 柴田泰邦, 神慶孝, 津田卓雄, 中里真久,
長澤親生

目次

	ページ
1. はじめに	4
2. 衛星搭載ライダーの現状	
2.1 CALIPSO	6
2.2 AEOLUS	22
2.3 EarthCARE	27
2.4 各衛星搭載ライダーの装置構成	38
3. 日本の将来衛星搭載ライダー案	
3.1 コヒーレントドップラー風ライダー	57
3.2 雲・エアロゾル/インコヒーレント風ライダー	68
3.3 水蒸気DIAL	79
4. まとめ	89

1. はじめに

衛星搭載ライダーは、パッシブセンサーでは達成できない高い高度分解能で森林の樹高、雲・エアロゾル特性、風向・風速、水蒸気などが地球規模で観測できることから、天気予報や気候モデルなどの改良、気候変動の理解と予測、炭素循環の監視等に多大な貢献が可能である。さらにそれらの結果を基に適切な対応策をとることにより、減災や経済的で安全・安心な社会につながっていくことから、衛星搭載ライダーに関するプロジェクト調査委員会を企画し、2019年4月にレーザセンシング学会(以下、本学会と略す)の理事会でその設置が認められた。これまでに各ミッション提案に関する科学的目的や技術的課題などについて多くの議論を委員会の中で重ねてきた。その成果の一つとして、本学会誌1巻2号(2020年10月30日発行)に衛星搭載ライダーに関する特集号が組まれた。ここではその後の3年間の議論に基づいて衛星搭載ライダーの海外及び日本の現状と将来に関する調査報告書を作成することとした。

1.1 海外の現状と将来

NASAとCNESが共同開発したCALIPSO衛星(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)に搭載されたCALIOP(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)¹⁾は、2006年から波長1064 nmと532 nmにより全球のエアロゾル・雲の高度分布の観測を3年間の設計寿命をはるかに超える17年間にわたって行ってきたがきたが、2023年8月に燃料の枯渇によりCALIPSOミッションは終了した。CALIPSO /CALIOPについてのこれまでの全球のエアロゾルや雲の高度分布の観測とその科学的成果などについては2.1.1で詳しく述べられる。

ESAによって開発された世界初のインコヒーレントドップラー風ライダーAEOLUS²⁾は2018年10月に打ち上げられ、対流圏と下部成層圏の風を測定してきたが、予定寿命を超えた2023年7月にミッションを終了した。AEOLUSによって測定された風データはECMWFの現業の数値予報などに利用されその有用性が確認された。これについては2.2.2で詳しく報告される。AEOLUSの後継機AEOLUS-2については、ESAの次期閣僚級理事会の地球観測提案に含まれており、開発は欧州気象衛星開発機構(Eumetsat)と協力して実施する予定とのことである。³⁾

氷床高度などを測定する極軌道衛星ICESAT-2(Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2)⁴⁾や森林の樹高を測定する国際宇宙ステーション搭載のGEDI(Global Ecosystem Dynamics Investigation)⁵⁾はそれぞれ2018年9月と12月に打ち上げられ観測を行ってきたが、GEDIは2023年3月に一旦観測を中止して2024年秋から観測を再開し、可能性としては2030年までデータを収集することとしている。氷床高度などは1年で大きな変化はないと思われるので長期の観測が望まれる。一方、中国では2022年4月に波長1572 nmによるIPDA(Integrated Path Differential Absorption)でCO₂カラム量を、ヨウ素ガスセルを用いたHSRL(High Spectral Resolution Lidar)でエアロゾルを測定するACDL(Aerosol and Carbon dioxide Detection Lidar)が打ち上げられた。⁶⁾

欧州と日本が協力して開発した波長355 nmのHSRLと雲レーダを用いてエアロゾルや雲の高度分布を観測するEARTHCARE(Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer)が2024年5月に打ち上げられる予定である。⁷⁾そして5月29日に打ち上げに成功したEARTHCAREについては2.1.3で詳述される。また、CNESとDLRの協力によりメタンのカラム量を測定するMERLIN(MEthane Remote Sensing Lidar Mission)⁸⁾は2028年に打ち上げ予定となっている。これらの衛星搭載ライダーのハードウェアについては2.2でまとめて記述される。

1.2 日本の現状と将来

すでに本学会の衛星搭載ライダーに関する特集号で報告されたように、日本では森林の樹高を測定しバイオマス量を推定するためのMOLIの研究開発がJAXAで進められている。MOLIによる地表面高度の測定は民間などからも期待されている。また、コヒーレントドップラーライダーによる風観測、HSRLによるエアロゾル・雲・鉛直風の測定、DIALによる水蒸気の観測がそれぞれのミッション提案者や委員会で議論されてきたが、それについては第3章で詳しく述べられる。

なお、各衛星搭載ライダーミッション提案に関する技術的観点からの検討小委員会からの報告は別途なされる。

引用文献

- 1) NASA, <https://www-calipso.larc.nasa.gov/>
- 2) ESA, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Aeolus
- 3) ESA, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/10/Aeolus-2_Value_of_Information
- 4) NASA, <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/>
- 5) University of Maryland, <https://gedi.umd.edu/>
- 6) SIOM, http://siom.cas.cn/acdl_eng/
- 7) JAXA, <https://www.jaxa.jp/projects/sat/earthcare/>
- 8) ESA, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/EarthCARE
- 9) DLR, https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-31672/

(執筆者 内野 修)

2. 衛星搭載ライダーの現状

2.1 CALIPSO

2.1.1 はじめに

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 衛星は、米国のNASAとフランスのCNESの両宇宙機関によって2006年4月28日に打ち上げられ、衛星コンステレーションA-Trainに加わった¹⁾。そのミッションの科学的ゴールは、雲とエアロゾルの鉛直分布を全球レベルで観測し、それを通じて雲とエアロゾルが地球の放射収支と気候変動に与える影響を明らかにすることであった。軌道は高度705 kmの太陽同期極軌道で、観測周期は16日、赤道通過時間は現地時間13:30、軌道傾斜角は98.28°であり、その観測範囲は北緯82°度から南緯82°まで、ほぼ全球をカバーできる。設計寿命は3年であったが、それをはるかに超える長期間にわたって観測を継続した。2018年9月には軌道高度を688 kmまで降下させ、CloudSatと同一の軌道からの観測に切り替えられた。CloudSatはCALIPSOと同じロケットで打ち上げられたレーダー衛星で、ミリ波(94 GHz)雲レーダーCPR (Cloud Profiling Radar)を搭載し、雲の構造や雲粒量などが推定できる。2023年8月、燃料の消尽により、NASAとCNESは17年余にわたるCALIPSOのミッションを終了させることを決定した。

本報告では、CALIPSO衛星に搭載された2波長偏波観測ライダーCALIOPについて、その概要と、そのデータを活用した大気リモートセンシング分野における科学的成果について概要を述べる。

2.1.2 CALIPSO搭載のCALIOPライダー装置

CALIPSOに搭載された観測機器は、2波長ライダーCALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、広視野カメラWFC (Wide Field Camera)、および赤外イメージング放射計IIR (Imaging Infrared Radiometer)であった²⁾。広視野カメラWFCは電荷結合素子(CCD)を検出器とする可視センサで、観測波長帯は620~670 nm (MODISのバンド1と同じ波長帯)、衛星直下点から2.5 km以内の地上解像度が125 m、両側30 kmまでの範囲内の解像度が1 kmである。イメージング放射計IIRは、空間分解能1 km、走査範囲61 kmの3バンドの赤外放射計で、観測波長帯は8.7 μm (バンド幅0.9 μm)、10.5 μm (0.6 μm)、12.05 μm (1.0 μm)である。どちらの観測範囲もライダーフットプリントを中心として配置され、衛星軌道に沿ってCALIOPのライダービームが作る「カーテン領域」を囲む大気の様子が表示される。

CALIOPはCALIPSO衛星搭載の主センサで、質量は156 kg、消費電力は124 Wである。この衛星搭載ライダーは、ダイオードレーザー励起Nd:YAGレーザーによる基本波1064 nmと、2倍波532 nmの2波長を地心方向に照射し、大気および地表面からの後方散乱光を偏光情報を含めて観測する³⁾ (Fig. 1参照)。各波長の出射エネルギーは約110 mJで、パルス繰り返しは20.16 Hz、パルス幅は公称値で20 nsである。532 nmの出射光パルスは、純度99%以上で直線偏光されている。その偏光面に対し、平行および垂直に偏光した532 nm後方散乱信号の成分を偏光ビームスプリッターにより分離し、2台の光電子増倍管によって検出する。これら2つの532 nmチャンネルは、偏光解消板をビームスプリッターの前に挿入して相対的な感度校正を行える。後方散乱信号は直径1 mの望遠鏡で受信する。観測視野角は130 μrad であり、これは地上フットプリントで直径90 mに相当する。検出器出力のサンプリング周波数は10 MHzで、観測の水平分解能は330 m、鉛直分解能は30 mである。太陽光の背景光を低減するため、532 nmではエタロンと干渉フィルターにより透過波長幅を35 pmに制限しているが、アバランシェフォトダイオードを検出器として使用する1064 nmでは干渉フィルターのみを用いている。

CALIOPでは、532 nm、1064 nmの両チャンネルともダイナミックレンジが5桁にわたる検出が可能な仕様になっている。このため、雲からの強い散乱光から、高度30~35 kmのエアロゾルフリーの領域からの弱い後方散乱信号まで、強度が広い範囲で変化する信号を正確に測定可能である。各チャンネルは、デュアル14ビットデ

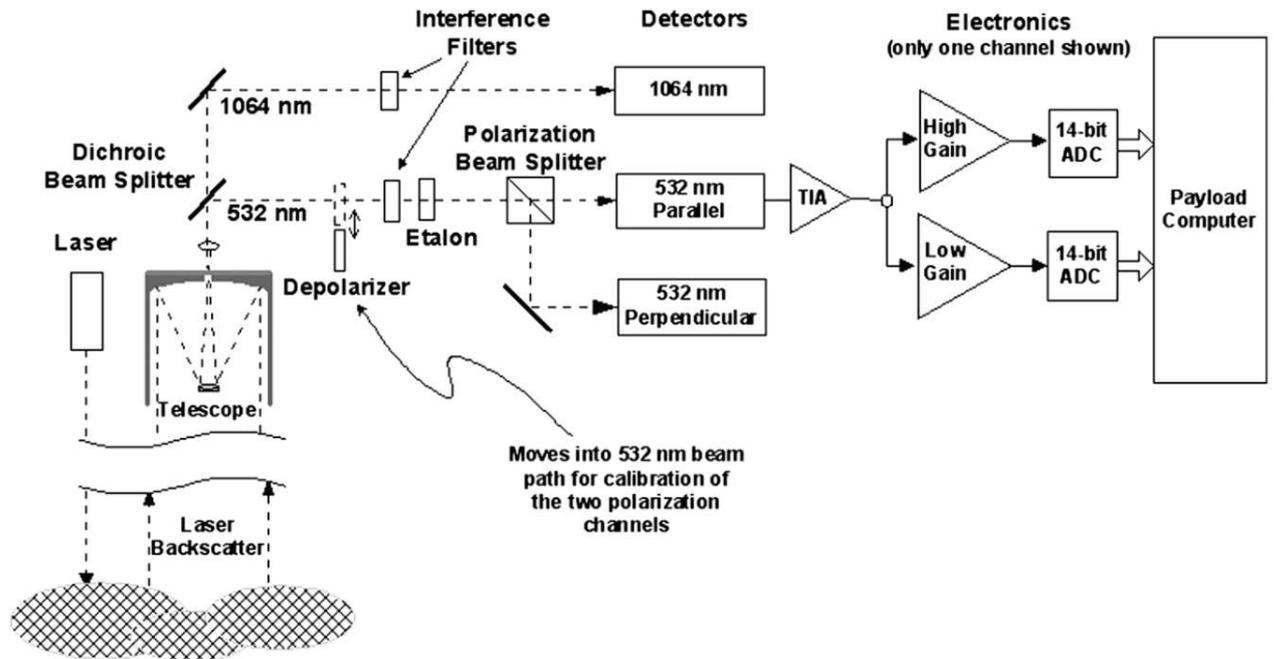


Fig. 1 Block diagram of the CALIOP instrument. Cited from: D. M. Winker, M. A. Vaughan, A. Omar, Y. Hu, K. A. Powell, Z. Liu, W. H. Hunt, and S. A. Young, "Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 2310-2323 (2009). <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1281.1> © American Meteorological Society. Used with permission.

ジタイザによって、必要な22ビットのダイナミックレンジを得ている。532 nmチャンネルは高感度なので単一光子イベントを測定可能であるが、実際の信号取得はアナログモードで行っている。後方散乱光プロファイルの背景光強度としては、大気からの散乱信号が無視できる高度112-97 kmの範囲の光強度の平均値を用い、これを各プロファイルから差し引いている。データとしてダウンリンクされるのは、532 nmチャンネルの場合は高度40 km以下、1064 nmチャンネルの場合は高度30 km以下で取得された信号のみである。大気変動の空間スケールは高度とともに大きくなるので、高度8.2 kmを超えるデータはダウンリンク前に衛星上で垂直方向と水平方向に平均化を行っている。

2.13 雲とエアロゾルの分離

CALIPSOデータプロダクトについては、ユーザ用解説やデータ品質情報を含め、NASAのリンク⁴⁾がその詳細を伝えている。標準データ処理においては、エアロゾル層の計測結果に雲の影響が入らないようにするため、ライダープロファイルを平均化する前に1064 nmのライダー信号を利用して雲信号を抽出し、取り除いている。低層大気のエアロゾル存在域には積雲など小規模の孤立雲がしばしば見られるので、層検出アルゴリズムの一部として、低高度の単一ショットプロファイルに雲除去ルーブを適用する(SIBYL, selective iterative boundary locatorアルゴリズム)。大気境界層内の雲からの後方散乱信号は、付近のエアロゾルからの信号よりはるかに大きく、後方散乱強度のみに基づいて分離できる。

SIBYLで取り除ける雲以外の層の分類は、雲エアロゾル識別(CAD, cloud-aerosol discrimination)アルゴリズムによって行っている⁵⁾。CADの分類では、層平均特性の確率分布関数(probability density function, PDF)に基づいた信頼関数により、エアロゾルと雲の2つのクラスを区別する⁶⁾。しかし、散乱が強いエアロゾル層と薄い雲は同程度の後方散乱強度を示す可能性があり、単純に後方散乱強度に基づいて分類すると誤判別が起こる可能性がある。これを軽減するため、信頼度評価関数は3次元PDFによっている。そのパラメ

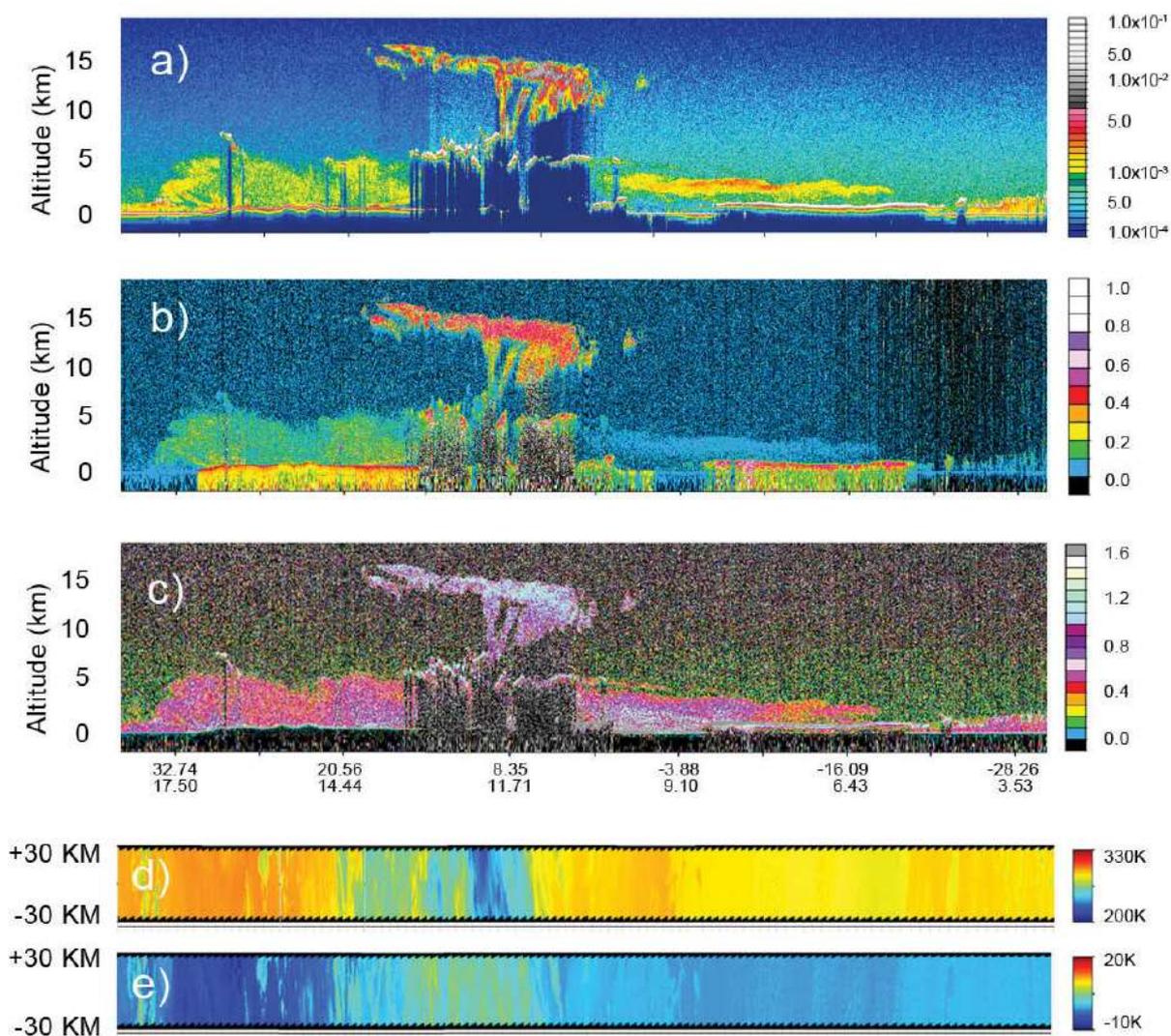


Fig. 2 (a)–(c) CALIOP time–height images and (d),(e) IIR swaths showing dust over (left) the Sahara Desert, (center) tropical cirrus and opaque convective cloud, and (right center) a layer of smoke above a stratus deck. (a) 532-nm backscatter signals; (b) 532-nm depolarization profiles; (c) profiles of attenuated color ratio (the ratio of 1064- and 532-nm backscatter signals); (d) IIR swath, brightness temperatures (BTs) at 12 μm ; and (e) IIR swath, 8–12 μm BT differences. Cited from: D. M. Winker, J. Pelon, J. A. Coakley Jr., S. A. Ackerman, R. J. Charlson, P. R. Colarco, P. Flamant, Q. Fu, R. M. Hoff, C. Kittaka, T. L. Kubar, H. Le Treut, M. P. McCormick, G. Mégie, L. Poole, K. Powell, C. Trepte, M. A. Vaughan, and B. A. Wielicki, “The CALIPSO mission: A global 3D view of aerosols and clouds,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **91** (9), 1211-1230. (2010), doi:10.1175/2010BAMS3009.1, © American Meteorological Society. Used with permission.

ータは、層平均した β'_{532} 、減衰カラー比 ($\chi' = \beta'_{1064}/\beta'_{532}$)、および中間層の高度 z である。この3次元の手法は、 β' と z のみに基づく2次元アルゴリズムよりも、対流圏上部のエアロゾルと薄い雲をより効果的に識別できることが示されている⁹⁾。

Fig. 2に、CALIPSO取得データのRHI (range-height indicator) 表示の例⁹⁾を示す。隣接するエアロゾル層と雲層は後方散乱強度が大きく異なるため、SIBYL中でそれぞれ別個の均質な層として検出される。ただし、場合によっては、検出された層に雲とエアロゾルがともに含まれる場合がある。その例として、高密度のダスト層の上部を雲が覆っている場合や、ダスト層中に孤立した雲が存在する場合が挙げられる。これらの場合、局所

的な後方散乱強度は、層検出のしきい値をはるかに上回ることになる。CADアルゴリズムは、雲によるエアロゾルデータセットへの影響を避けるため、こうした混合層は雲として分類するように調整されている。バージョン1プロダクトの分類は、LITE (Lidar In-space Technology Experiment) および航空機ライダーからの限られた観測値を使用して構築された統計モデルに基づくものであった。バージョン2では、CALIOPの観測データ自体を使用してモデルを改善し、分類性能が向上した。

2.1.4 エアロゾルタイプの分類とライダー比

CALIPSOの標準アルゴリズムでは、上述のように雲をエアロゾル層から分離した後、SCA (scene classification algorithm) によって層内のエアロゾル種別の識別を行う。分類されるエアロゾルの「タイプ」とは、その地域またはその気団に特徴的なエアロゾル成分の混合状態を意味する。混合状態は一般に、局所的なエアロゾル源、遠隔地のエアロゾル源と風向、内部混合 (1粒子内での混合) または外部混合 (異なる粒子の共存) の状態、輸送中に大気内で発生し得る化学変換の過程、および水蒸気の作用の程度 (吸湿性エアロゾルの水和状態) に依存する。エアロゾルのライダー比 $S_a = \sigma_a \beta_a$ (σ_a はエアロゾル減衰係数) は各エアロゾルタイプで決まった値をとり、したがって、エアロゾルタイプの識別から S_a の値が得られ、これがライダープロファイル (減衰後方散乱係数 β_a の高度依存性) からの消散係数の導出に使われる。エアロゾルタイプの識別はまた、エアロゾル発生源の特定や、エアロゾル放射強制力が自然由来か、あるいは人為的排出によるものかを決定する上でも役立つ。

標準解析アルゴリズムでは、代表的なエアロゾルのタイプを定義するために、混合型アプローチではなく、観測ベースのアプローチを採用している⁸⁾。混合型アプローチでは、硫酸塩や海塩などの個々のエアロゾル種に対してモデルを定義し、観察されたエアロゾルのタイプをこれら成分の混合として表す。この場合、使用されるエアロゾルモデルには組成と混合状態に関する仮定が含まれることになるが、こうした仮定の一般性には疑問の余地がある。とくに問題になるのは、 180° 方向の後方散乱は多くの場合に、吸収、形状、内部混合状態などの特性や粒径分布の詳細に敏感に依存すること、およびこれら吸収などのパラメータの詳細が明らかになるケースは少ないことである。

標準解析アルゴリズムでは、さまざまな排出源と大気中の過程の作用によって、典型的なエアロゾル特性をもった気団が生成されることを前提としている。これら典型的な気団は、リモートセンシング観測に基づくもので、各エアロゾルタイプはそれぞれ、数種のエアロゾル種の混合であると想定されている。エアロゾルの組成と特性は一つの気団内で完全に均一ではないが、このような理想化を行うことによってエアロゾルの分類や、地理的分布の特徴が明らかになり、また、ライダー比 S_a の値に適切な制約を与えることができる。

CALIOPデータの解析に用いるエアロゾルのタイプは、太陽放射計ネットワークAERONET (Aerosol Robotic Network) から取得されたエアロゾルパラメータをクラスター分析することによって定義されている⁹⁾。この分析から、砂漠ダスト、煙 (スモーク)、清浄な大陸性エアロゾル、汚染された大陸性エアロゾル、清浄な海洋性エアロゾル、および汚染されたダストとラベル付けされた6種類のクラスターが得られた¹⁰⁾。これらのクラスターそれぞれの平均パラメータ値から、 532 nm および 1064 nm での S_a 値が計算できる。 1064 nm の S_a 値の直接測定値はあまり存在しないため、このプロセスから導出される 1064 nm でのライダー比は 532 nm の値よりも不確実である。エアロゾルタイプが煙 (スモーク) と、汚染された大陸性の場合のクラスター平均からは、 532 nm で測定値と一致する S_a 値が得られた。 180° 後方散乱は粒子形状に敏感であるため、ダストタイプの 532 nm における S_a 値は測定値に基づいて選択され、対応するエアロゾルモデルは粒子の形状と組成に関する現実的な仮定を使用した離散双極子近似 (DDA, discrete dipole approximation) 計算により選択した¹¹⁾。バージョン2データ処理で使用される最終的なエアロゾルライダー比の値をTable 1²⁾に示す。

標準エアロゾル解析アルゴリズムの目標は、可能な限りライダー観測値 (偏光解消と2波長の後方散乱信号) に基づいてエアロゾルタイプを決定し、それ以外の仮定は最小限に抑えることである。これは一種の決定木 (decision tree) アルゴリズムであって、層平均の偏光解消と 532 nm 減衰後方散乱を使用して多くのテスト

Table 1. CALIPSO aerosol types and associated lidar ratios S_a ²⁾.

Lidar ratio	Dust	Smoke	Clean continental	Polluted continental	Clean marine	Polluted dust
532 nm (sr)	40	70	35	70	20	65
1064 nm (sr)	30	40	30	30	45	30

を実行し、エアロゾルを6タイプの一つとして識別する¹²⁾。偏光解消度を使用し、ダストを含むエアロゾルと、おもに水和した液滴で構成されるエアロゾルを区別する。このアルゴリズムでは、さらにエアロゾル層の高度と観測の地理的位置、および背景となる地表面被覆に関する情報も利用する。

CALIOPの2波長ライダー信号を比較すれば、原理的には小粒子と大粒子を区別可能である。エアロゾルタイプが決まれば、ルックアップテーブルからライダー比が求められる。ライダー比の観測値は10~110 srの範囲であり¹³⁾、モデル研究では値の範囲が若干狭い(15~80 sr)¹⁴⁾。識別アルゴリズムでは、分類の結果において、ライダー比 S_a の不確かさを30%以下に抑えることを目標としている。

2.1.5 偏光解消度の活用

CALIOPのレーザーは、ほぼ100%直線偏光のパルスを送信する。垂直と平行の後方散乱反射強度の比が体積偏光解消率

$$\delta_V = \frac{\beta'_{\text{perp}}}{\beta'_{\text{par}}}$$

になる。これにより、レーザーパルスが雲を構成する球状の液滴によって散乱されたのか、あるいは非球形の氷結晶によって散乱されたのかを決定できる (Sassen 1991)。球状粒子からの180°後方散乱は入射光の偏光を保持するのに対し、氷粒を含んだ巻雲からの偏光解消は通常20%以上である¹⁵⁾。これがCALIOPによる水滴と氷粒の相識別アルゴリズムの基礎となっており、また、ダストエアロゾルの識別を可能としている。

実際には、高密度の水雲における多重散乱による偏光解消と、より弱い層での信号ノイズにより、複雑な問題が発生する。水雲の多重散乱による偏光解消は、層について積分した後方散乱信号に関連する可能性が指摘され¹⁶⁾、ふつう、氷雲による偏光解消よりも限定的である。雲が水または氷である確率は、層で平均した体積偏光解消と層について積分した後方散乱信号に基づいて計算され、偏光解消の信号対雑音比 (SNR) も考慮される。この方法により、ほとんどの場合、信頼性の高い分類が得られる。結果が不確かな場合には、偏光解消と雲頂温度の同時確率関数に基づくテストも適用して識別する。

CALIPSOによる現在の雲の熱力学的位相識別は、そのライダー、すなわち直交偏光を備えたCALIOPで測定された後方散乱光の偏光解消に基づいている¹⁷⁾。氷晶からの後方散乱光は偏光解消され、一方、水雲は球形であって偏光解消は最小限であると仮定している。ただし、CALIOPの視野 (FOV) と衛星・雲間の長い距離との関係性、および配向した氷晶が多くの場合に存在することにより、測定された偏光解消と相の間には弱い相関がよく見られ、それによって、現在のCALIOPによる相決定アルゴリズムにはかなりの不確かさがある。水雲の場合、CALIOPで測定される偏光解消は多重散乱により大きくなる可能性がある。一方、水平方向に配向した氷粒子は偏光解消が弱く、水雲と同様にふるまう。

偏光解消度と雲の相の関係は一意的ではないため、相を一意に決定するにはさらに多くの制約が必要になる。理論とモデル研究に基づいて、改良された雲相決定アルゴリズムが開発された。このアルゴリズムは、層で積分された偏光解消度に依るのではなく、層で積分された減衰後方散乱と、同じく積分された粒子偏光解消度の空間的な相関を使用して雲の相を識別する。このアプローチには、次の2段階のプロセスが含まれる。第一に、単純な2次元しきい値手法を使用して、ランダムに配向した粒子を含む氷雲、水平方向に配向した粒子を含む氷雲、および水雲と考えられる雲を予備的に識別する。第二に、空間コヒーレンス解析手法を適用し、水平方向に配向した氷粒子を含む氷雲から水雲を分離する。また、気温、カラー(波長)強度比、偏光解消度の鉛直変化などの情報も考慮される。このアルゴリズムは、ライダーのオフナディア角が0.3°と3°のいずれの場合でも適切に機能する。鉛直から0.3°離れた方向にライダービームが向けられた場合、不透明な氷雲の半分、および全氷雲の約3分の1では、水平配向した粒子の鏡面反射による後方散乱の寄与

が大きくなる。一方、3°離れた位置では、不透明な氷雲の約30%、および観測された全氷雲の20%の後方散乱信号が水平配向した氷晶の影響を受ける。

もう一つの問題は、上述のように、水平方向に配向した平面状の氷の結晶が存在する可能性である¹⁸⁾。鉛直方向付近に向けたレーザー光パルスは、ほとんど偏光解消することなく、これら配向した平面結晶から鏡面反射する可能性がある。配向結晶がわずかしか含まれていない雲でも、偏光解消が減少し、異常に高い後方散乱が見られることがある¹⁹⁾。バージョン2アルゴリズムには、明らかに配向結晶の特徴をもった雲を識別するための簡単な経験的テストが含まれている。2007年11月に、CALIOPの鉛直下方照射角が0.3°から3.0°に変更され、配向結晶による影響が大幅に減少した。配向結晶を明示的に識別する改良された氷水相アルゴリズムが開発されており¹⁷⁾、将来のデータプロダクトに実装される予定である。

CALIPSOの衛星ライダー測定を使用して、雲中の水平な氷板の研究が行われた¹⁹⁾。2006年から2014年のライダーの長期測定に基づき、氷板の気候学に関する影響を評価するため、水平氷板の全球的な微物理的および地理的特性を調べ、さらに、2007年のライダー視野角の0.3°から3.0°への変更が粒子の相・形状分類に及ぼす影響をまとめた。以前の研究で開発された分類アルゴリズムを使用すると、この変更により氷板の検出頻度が81.7%減少することが示された。分類アルゴリズムを更新すれば、そのうちの30.8%が回復されるが、50.8%は未検出のままとどまる。それにもかかわらず、氷板量の地理的な違いがオフナディア期間(残りの50%以内)でもまだ観測され、2007年以降の観測で氷板について未発見の気候学的情報がある可能性が示唆される。視野角の増大はおもに水平な氷板の検出に影響を及ぼすが、水やランダムな向きの氷の検出への影響は限定的である。氷板の温度は-25.5°Cから-7.5°Cの範囲であり、モード温度は-13.5°Cである。それでも、-20°Cから40°Cの間の氷板は中緯度から高緯度にかけて広く発生する。これは、以前の直下視観測で見いだされた温度よりもはるかに低温である。以上のような水平氷板の基本的な特性に関する詳細な議論は、EarthCAREなど将来の衛星ライダー観測に向けてのアルゴリズム開発に有用な情報を提供し得るものとなっている。

2.1.6 CALIPSOデータを活用した雲研究の進展例

Massie et al.²⁰⁾は、高分解能赤外線リムサウンダー—HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb Sounder, Aura衛星に搭載)とCALIPSOを用い、熱帯の上部対流圏における巻雲の発生頻度について定量化を行った。2006年9月から2007年8月のデータの解析結果では、気圧90 hPa~177 hPa間の雲の発生頻度の月別の空間平均結果は両者で類似しており、氷のRHI (Relative Humidity with respect to Ice) データに関してはMLS (Microwave Limb Sounder, Aura搭載)の相対湿度ともよい相関を示す。ただし、雲はRHI値が100%未満でも存在しており、これはMLS、HIRDLS、およびCALIPSOの垂直解像度が異なる(それぞれ5 km, 1 km, 1 km未満)ことに起因すると考えられる。雲の発生頻度の季節変動も類似性を示し、冬季(12月から2月)が最も多い。観測方向はCALIPSOでは直下、HIRDLSでは周縁であるが、CALIPSOの巻雲の水平スケールはしばしば100 kmを超えるため、雲域の空間分布には類似性が認められた。孤立した層状の巻雲は、赤道から離れた場所で最も高頻度で現れた。HIRDLSおよびCALIPSOデータに基づいた雲発生の月別パターンのデータセットは、気候モデルとの比較に有用性が高い。

Chepfer et al.²¹⁾では、大循環モデルGCMでモデル化された雲被覆を評価するために構築されたCALIPSOの雲プロダクト(GOCCP)について報告している。この目的のため、雲エアロゾルライダーの偏光LIデータを処理するが、その手順は、CALIPSOが宇宙から観測するモデル雲量を診断するために使用されるライダーシミュレータと同様である。まず、データの最良の水平解像度(ただし現在のGCMに準拠した垂直解像度)でライダー散乱比(SR, scattering ratio = $ATB_{\text{vert}}/ATB_{\text{vert, mol}}$, ATB = Attenuated Backscatter, vert_{mol} = vertical molecular profile)の瞬時プロファイルを計算し、次にこれらのプロファイルから雲診断を行う。その際に導出するパラメータとしては、雲存在率の垂直分布、雲の水平分布、低/中/高高度雲量および総雲量の割合、各瞬間でのSRプロファイル、高度の関数としてのSRヒストグラムがある。さまざまな季節(2007年から2008年1月から3月、および2006年から2008年6月から8月)について、ライダーシミュレータのパラメータに対する感度を調べた結果、垂直解像度と雲検出のSR閾値の選択により、とくに浅い積雲領域で雲の存在割合が最大で0.20変わり得る

ことが明らかになった。熱帯海洋上では、低層雲の割合は、夜間の方が昼間よりも大きくなる(最大 0.15)。SR のヒストグラムから、さまざまな地域で発生する雲の種類が推定できる。GOCCPの高層域の雲量は、TIROS垂直サウンダ(TOVS)および大気赤外線サウンダ(AIRS)による結果と同様である。下層および中層の雲の割合は、受動的リモートセンシング(国際衛星雲気候学プロジェクトISCCCP, MODIS – Cloud and Earth Radiant Energy System Polarization and Directionality of Earth Reflectance, TOVS/パスB, AIRS)から得られたものよりも大きい。これは、これらの衛星観測が最も上空に位置する雲層に関する情報のみを提供するためであると考えられる。

Várnai and A. Marshak²²⁾は、雲周辺においてMODIS画像とCALIPSOデータを比較し、雲検出について報告した。エアロゾルと雲の相互作用、およびエアロゾル放射効果についての研究では、さまざまな衛星からのデータを組み合わせることにより、相乗的な効果が期待できる。この研究では、雲近くで見られる系統的なエアロゾル変化をCALIPSOライダーから抽出し、MODISイメージャーからの雲情報と比較した。Aqua衛星搭載MODISとCALIPSOからの、同一場所での全球海洋観測の1年間にわたるデータセットを統計分析した結果、AquaとCALIPSOのイメージャは類似度の高い画像を生成し、風の影響や視野角の違い等による差異が雲付近のエアロゾル観測の大きな妨げにならないことが示された。MODISは、CALIPSO観測トラックの外側の雲を検出することにより、ライダーデータが単独で示唆するよりも雲が晴天域に近いことを明らかにした。夜間や海氷上など、MODISが低層雲を確実に検出できない場合でも、CALIPSOトラックのすぐ外側にある雲の影響を統計的に説明するための再スケーリング手法を提案した。結果として、雲までの典型的な距離は雲被覆範囲と雲の種類の間方に依存し、したがって場所や季節によって異なることが示された。雲なしと認識される海域では、高度3 kmより低高度の雲までの水平距離は、全球の中央値で4~5 kmの範囲にある。

Oreopoulos et al.²³⁾は、A-Trainを構成するCloudSatとCALIPSOの能動観測からの水蒸気や雲の鉛直構造の研究の進展について報告した。全球のCloudSat-CALIPSOプロダクトを使用し、標準的な大気層での雲の重なり度合いに応じ、データを主要な雲垂直構造 (cloud vertical structure, CVS) クラスにグループ化した。最も頻繁に見られる2つのCVSクラスは、曇天の約53%を占める単層(ここでの定義による)の低層雲と高層雲であり、続いて低層雲の上にある高層雲と、ほぼ連続して対流圏の大きな部分を占める垂直に広がる雲である。これらの各クラスの相対的優位性は、季節的および地理的に、また昼と夜、大陸と海洋間で変化する。CVSクラスの放射効果は、地球全体、地表、大気それぞれの視点から、放射への主要な温熱源と冷熱源を明らかにする。単層の低層雲は、地表と大気の放熱および地表の熱赤外温暖化に支配的に作用する。また、雲の受動的な観測と能動的な観測の結果の間の一貫性を調べるため、時空間的に一致するMODIS-Aqua(これもA-Train)とCloudSat-CALIPSOの昼間観測データに対して、MODIS雲プロダクトにおけるCVSの内訳を調べた。不均一性の高いMODIS雲レジームをより詳細に調べると、最終的には、従前からの(同期した能動的観測の利点が得られなかった状況での)雲構成の解釈との関連性が裏付けられる。

Cesana et al.²⁴⁾は、熱帯域の低層雲が海面温度(sea surface temperature, SST)に及ぼす影響について調べた。最近の研究から、地表の温暖化に応じて、衛星受動センサによって観測される熱帯海域の低層雲量(low cloud cover, LCC)が大幅に減少し、そのため大気上端(TOA)での雲放射効果(cloud radiative effect, CRE)の負の値の絶対値が小さくなることが示されている。本研究では、LCCとCREの経年変化を、GISS-E2気候モデルでのSST強制力への応答として調べた。このE2気候モデルは、GISSモデルE3気候モデルの開発版である。同様に、10年間のCALIPSO観測に基づき、他の12種の気候モデルにおいても、SST変動への雲応答の鉛直構造を表す能力の関数としてLCCとCREの経年変化を調べた。より現実的なモデル、すなわち観測上の制約を満たすモデルでは、観測されたLCCの年次変化を非常に良好に捉えられる($\Delta LCC/\Delta SST = -3.49 \pm 1.01\% K^{-1}$ vs. $\Delta LCC/\Delta SST_{obs} = -3.59 \pm 0.28\% K^{-1}$)。一方、他のモデルでは大幅な過小評価が起こる($\Delta LCC/\Delta SST = -1.32 \pm 1.28\% K^{-1}$)。したがって、より現実的なモデルはより大きな短波放射(SW)フィードバック($\Delta CRE/\Delta SST = 2.60 \pm 1.13 W m^{-2} K^{-1}$)を与え、それ以外のモデルではこれよりも小さくなる($\Delta CRE/\Delta SST = 0.87 \pm 2.63 W m^{-2} K^{-1}$)。CALIPSO観測値は $\Delta CRE/\Delta SST_{obs} = 3.00 \pm 0.26 W m^{-2} K^{-1}$ であり、これは上記の現実的なモデルよりわずかに大きな値になっている。モデルが惑星境界層(PBL, planetary boundary layer)内の湿潤過程を適切に表現し、出現時間が長い層積雲(Sc)デッキを生成可能であることは、観測された雲、放射、表面

温度の間の関係を正しく再現するために重要と考えられる。この関係は、観測された下層雲の種類によって異なる。層積雲領域では、雲頂高は海面水温とともにわずかに増加し、それに伴って雲被覆率が大幅に減少するが、貿易風積雲(trade Cu)領域では、雲被覆率はどの領域でも、程度は小さいが減少する。

Purbantoro et al.²⁵⁾は、split windowアルゴリズム (SWA) を用いてひまわり8号搭載のAHIセンサとAqua/Terra衛星搭載のMODISイメージャからの雲種別分類結果について比較を行い、その中でCALIPSOライダーデータを雲頂高度の検証に利用した。雲分類は天気予報はもちろん、地球放射収支の研究にも重要性が高い。気象衛星ひまわり8号のAHI (Advanced Himawari Imager) では、雲マスクと分類手順が提案されているが、その適用範囲は昼間の画像に限定されている。SWAは、主として気象衛星画像の雲解析で長年活用されてきたアルゴリズムであり、輝度温度(BT)と複数バンドのBT差(BTD) 間の散布図に基づいている。この研究では、AHIの昼夜双方の画像の雲分類におけるSWAの有用性を調べ、同時にAquaおよび Terra衛星に搭載されたMODISからの画像データにもSWAを適用して、AHIの結果と比較した。MODISのバンド3 (0.469 μm) とAHIのバンド1 (0.47 μm) を用いて日本付近の雲を解析し、昼間の雲域を抽出した。夜間の場合は、MODIS、ひまわり8号ともに3.9, 11, 12, 13 μm を中心とするバンドを使用したが、陸域と海域では組み合わせを少し変更した。また、夏と冬の画像では雲検出に異なる閾値を用いた。MODIS (SWA31-32) のバンド31 (11.03 μm) と32 (12.02 μm)、およびバンド13 (10.4 μm) と15 (12.4 μm) のバンドペアに対して、BTおよびBTD閾値の最適値を決定した。AHI (SWA13-15) から得られた雲マスクと分類を、MODISの雲プロダクト(MYD35)と、CALIPSOのライダーデータを使用して検証した。ここで用いたSWAは、4つの閾値に基づく比較的単純なスキームであるが、MODISとAHIの結果はどちらも雲の本質的な特性をかなりよく捉えていることが明らかになった。ただし、AHI (SWA13-15) からのBTDはMODISのSWA31-32よりも幅広くなっており、雲分類においてより一貫性の高い結果が得られる可能性がある。

2.1.7 CALIPSOデータを活用した全球エアロゾル研究の進展例

Yu et al.²⁶⁾は、2006年6月から2007年11月までのCALIPSOライダーデータを用いて全球エアロゾルの鉛直分布を調べ、その季節変動を含めてGOCART (Goddard Chemistry Aerosol Radiation Transport) モデルと比較した。高品質のデータ取得を目指し、偏光測定も活用したデータ選別スキームを開発した。CALIPSOが観測したエアロゾル光学的厚さ (aerosol optical depth, AOD) の地理的パターンと季節変動は、とくに発生源地域付近でGOCARTシミュレーションおよびMODISからのAODの測定結果とよい一致を示す。しかし、AODの大きさ自体には、ほとんどの地域で大きな差異がある。エアロゾル消散係数のスケール高度は、CALIPSO観測とGOCARTモデルのどちらも、主要なダストおよび煙(スモーク)の発生源地域での高度は、産業汚染源地域の高度よりも高いことを示している。CALIPSOエアロゾルのライダー比は、地域スケールにおいて30%以内でGOCARTモデルと一致する。この研究を通じ、衛星観測とGOCARTモデルの主な違いが、次のように明らかになった:(1) インド亜大陸上で、GOCARTはエアロゾル消散係数を過小評価している、(2)ダスト発源地域のエアロゾル消散係数について、GOCARTによる計算値がCALIPSOによる観測値よりはるかに大きい、(3) CALIPSO観測では、GOCARTモデルよりも中緯度の輸送地域における下層大気中のエアロゾル濃度が低く、空間的により集中している、(4) CALIPSO観測によるエアロゾルのスケール高度は、GOCARTモデルよりも一貫して低い。論文では、これらの違いに寄与すると考えられる諸要因について議論を行っている。

Varnai and Marshak²⁷⁾は、雲近くのエアロゾルのCALIPSOによる全球観測について報告した。最近のいくつかの研究から、雲の周囲には、エアロゾルの光学特性と粒子サイズが急速に変化する遷移領域が存在することが判明している。この遷移領域の特徴を明らかにすることは、エアロゾルと雲の相互作用およびエアロゾル放射効果をより深く理解するために、また衛星によるエアロゾル特性の観測手法を改善するためにも役立つ。この論文では、海洋上のCALIPSOライダー観測の1か月にわたる地球規模のデータセットの統計分析を行った。その結果、遷移領域がすべての海洋域に存在しており、雲から水平に最大15 km離れたところまで広がっていることが示された。また、雲付近のエアロゾル後方散乱と粒径は、近接した雲の雲頂よりわずかに低い高度で最も増大すること、また、この増大効果は、雲の太陽側と影の側で同じように起こることが明らかになった。これは、MODISイメージャによる既往研究で見出された反射率の非対称性が、エアロゾル特性の違いか

らではなく、3D放射伝達過程から生じていることを裏付けている。本研究結果は、遷移領域を正しく考慮し、衛星エアロゾルプロダクト、エアロゾルと雲の相互作用、エアロゾルの直接放射効果等の研究における潜在的なバイアスを回避・低減することの重要性を示している。

Vernier et al.²⁸⁾は、アジアの対流圏界面エアロゾル層について報告した。4年間のCALIPSOライダー測定により、6月~8月のアジアのモンスーン期において対流圏界面レベルでのエアロゾル層 (Asian tropospheric aerosol layer; ATAL) の存在が明らかになった。このATAL層は、地理的には地中海東部 (北アフリカまで) から中国西部 (タイまで) まで、高度は13~18kmの範囲で広がっている。CALIPSOから推定された散乱比 (the ratio of aerosol plus molecular backscatter to molecular alone) の平均値は1.10~1.15であり、偏光解消度は5%未満である。測定値のガウス分布の平均値は、火山の噴火や雲の汚染などの一時的な現象ではなく、バックグラウンドのエアロゾルレベルの増加によって統計的に決まることを示している。この層の特徴を明らかにするには、エアロゾルとそれに関連する気体成分のさらなる衛星観測とフィールド観測が必要である。ATAL層は、地球の対流圏上部の非火山性エアロゾルの重要な供給源である可能性が高く、その放射バランスと化学バランスに潜在的に影響を与える可能性がある。

Hong and Girolamo²⁹⁾の報告は、晴天域と曇天域でのエアロゾル特性に関する総説である。エアロゾルの気候学的特性を十分に理解することは、エアロゾルの気候影響を明確化するための重要なステップである。CALIPSO観測データを利用して、エアロゾルと雲層の相対的な鉛直高度に注目し、晴天時と曇天時エアロゾルの特性を研究する。全球規模で見ると、晴天域エアロゾルは、平均の光学的厚さ ($\bar{\tau}_a$) とその不確かさが 0.135 ± 0.047 となり、これは検出された全エアロゾルの約56%を占める。曇天域エアロゾルは44%を占め、晴天域と比較して $\bar{\tau}_a$ と不確かさがともに大きくなり、 0.143 ± 0.074 となった。雲頂上のエアロゾル (約4%) は、おもに上昇した煙、ダストや火山灰、汚染されたダストで構成されており、 $\bar{\tau}_a$ は 0.056 ± 0.038 とはるかに小さくなる。雲底下のエアロゾル (約21%) の $\bar{\tau}_a$ はおよそ 0.165 ± 0.087 である。雲底下と晴天域エアロゾルは、 $\bar{\tau}_a$ 確率密度分布が近く、またエアロゾルタイプも類似性を示しており、受動センサからの晴天域エアロゾル特性がこれら全ての状態を代表している可能性が高いことを示す。さらに、検出されたエアロゾル鉛直プロファイルの約27%には、エアロゾル層に接続された雲層があることがわかる。これらのエアロゾルのライダー後方散乱プロファイルは、晴天域エアロゾル、雲頂上および雲底下のエアロゾルよりも大きな中央値を示す。晴天域と曇天域エアロゾルの季節変動は地域によって大きく異なる。本論文の結果から、地球と気候システムにおけるエアロゾルの役割を評価するには、直接放射効果に対する雲の影響、とくにエアロゾルとの重なりが広範囲に及ぶ巻雲の影響の定量化が重要であることが示唆される。

2.1.8 国内でのCALIOPデータを用いた雲・エアロゾル研究

前節までは海外を中心とする研究成果について述べたが、国内の関係コミュニティにおいてもCALIOPデータを用いた雲・エアロゾル研究は数多く実施されてきている。以下にその例と成果の概要を示す。

2.1.8.1 アルゴリズム開発

Hagihara et al.³⁰⁾は、船舶搭載のミー散乱ライダーを用いて九州大学で開発・検証された雲マスクアルゴリズム^{31,32)}を改良し、CALIOP用雲マスクアルゴリズムの開発を行った。本手法では雲・エアロゾル・大気分子を分けるために波長532 nmでの減衰付後方散乱係数が用いられるが、これに対する閾値が高度に依存したパラメタリゼーションで求められている点が従来の手法とは一線を画している。ここでは、雲が存在しない場合、下層ではエアロゾルと大気分子散乱の寄与が大きく、上層ではエアロゾルの影響が小さく大気分子が支配的になることが利用されている。また、独自開発したspatial continuity test (上記手法によって識別された雲層が高度・水平方向に連続的に存在しているかの試験) も上記アルゴリズムに組み込まれ、信号ノイズ等による誤判定を抑制している。NASA CALIPSOチームによる標準プロダクト、フランスのCALIPSO-General Circulation Models-Oriented Cloud Product (GOCCP) と上記の九大雲マスクプロダクトの航空機観測データを用いた比較検証では、九大プロダクトが航空機観測と最も良い一致を示した³³⁾。

Yoshida et al.³⁴⁾では、波長532 nmでの偏光解消度だけではなく、減衰付後方散乱係数の鉛直に連続する2

層の比も用い、2つのパラメータを同時活用した新たな雲タイプ識別手法を開発した。衛星ライダーでは、地上ライダーに比して多重散乱による影響が大きく、その結果、光学的に厚い水雲等の偏光解消度は大きくなる。よって、偏光解消度のみによる雲タイプ識別(例えば、水雲と氷雲など)は誤判定を生むことから、消散係数の指標となる減衰付後方散乱係数の鉛直連続2層の比が導入されている。結果として、減衰の大きな「水雲」、減衰が小さく偏光解消度の高い氷雲(ランダムに配向している氷粒子)、減衰が小さく偏光解消度の低い氷雲(2次元に偏って配向している板状氷粒子)が識別される。本手法はMODISや航空機と比較検証され、その妥当性が実証されている^{33,34)}。CALIOPのレーザー光の鉛直下からの傾斜角は打ち上げ直後の1年間は0.3度とされ、その後3.0度に変更された。Kikuchi et al.³⁵⁾は、Yoshida et al.³⁴⁾の手法を用いて2006年から2014年にわたる長期データを解析し、傾斜角が3.0度に変更された後も、水平方向に配向した板状氷粒子が検出されることを示した。ここでは、板状氷粒子は南緯25.5度から南緯7.5度の範囲に多く存在し南緯13.5度でもっとも多く検出されること、そして南緯40度まで存在することが示された。

雲氷粒子の微物理特性を推定するアルゴリズム開発も行われ、ここではCALIOPに加えてCloudSat衛星搭載の94 GHz雲レーダーデータも同時利用されている。ライダー・レーダーを同時活用したアルゴリズムはOkamoto et al.^{36,37)}によって地上観測データを用いて世界で初めて開発された。その後、本手法は雲氷粒子の非球形散乱特性を考慮することで偏光解消度の情報も入力値として活用できるアルゴリズムに昇華され、CALIPSO-CloudSatデータに適用され、雲氷粒子の微物理特性の全球特性を初めて明らかにした^{38,39)}。また、本アルゴリズムの発展として、Sato et al.^{40,41)}では雲レーダーのドップラー計測も含めた同時解析手法の開発が行われた。CloudSat衛星搭載の雲レーダーにはドップラー計測機能は付与されておらず、EarthCARE等の次世代衛星への適用を見据えたアルゴリズム開発となる。

CALIOPそしてEarthCAREライダー(ATLID)を見据え、物理光学理論を発展させ、ライダー観測量と氷粒子の物理特性に関する理論的解析が進化した^{42,43)}。これらの結果をCALIOPに適用し、偏光解消度を用いた世界初の氷粒子形状と配向(Ice Particle Category: ICP)の全球3次元分布の解析が実施された。砲弾集合粒子がもっとも多いが、熱帯の高高度ではVoronoi形状の粒子が卓越すること等が示された⁴⁴⁾。

CALIOPデータを用いたエアロゾル解析では、大気中の主要なエアロゾル種の高度分布の全球推定が行われている。Nishizawa et al.^{45,47)}は、2波長偏光ミラーライダーから鉱物ダスト、海塩粒子、水溶性粒子(硫酸塩や硝酸塩等の光吸収性の弱い粒子の混合物)の消散係数の高度分布を推定する手法を船舶搭載ライダーデータを用いて世界で初めて開発した。ここでは、回転楕円体モデルを導入することで鉱物ダストの非球形散乱を表現し、2波長での後方散乱係数とともに偏光解消度も入力データとして整合的に活用できる点も新規性となっている。また、その発展として、ラマンライダーや高スペクトル分解ライダーを用いて、上記3種のエアロゾルに加えて炭素質粒子の高度分布を推定する解析手法も開発されている^{48,49)}。これらアルゴリズムを応用し、CALIOPデータへの適用が進められ、エアロゾル種毎の全球分布が明らかにされた⁵⁰⁾。Kudo et al.⁵¹⁾では、上記の手法をさらに発展させ、CALIOPとMODISの両データを用いることで上述した4種のエアロゾルの高度分布とともに、fineモードとcoarseモード粒子のモード半径の気柱平均量を推定する手法を開発し、観測データに適用した。さらに、推定に使用するエアロゾルモデルも改良された。より現実的なモデルとしてダストの非球形モデルにVoronoiモデルが用いられ、炭素質粒子の内部混合モデルとしてcore-grey shellモデルが用いられている。

2.1.8.2 応用研究

国内で独自開発された解析手法によって推定された全球プロダクトやNASAから公開されている標準プロダクトを用いた雲・エアロゾル応用研究も進められた。

ダスト粒子と氷粒子の相互作用研究として、Kawamoto et al.⁵²⁾等がある。Kawamoto et al.⁵²⁾では、CALIOPデータから上記のNishizawa et al.^{45,47)}の手法によって得られた鉱物ダストの消散係数とYoshida et al.³⁴⁾の手法で得られた氷粒子の出現頻度を比較した。氷粒子と水粒子の存在比率の温度依存性が鉱物ダストによって変化し、同じ温度では、ダストの消散係数が増加すると氷粒子の比率も大きくなることが示された。また、これらの雲とエアロゾルプロダクトは、JAXAを通じてJAXA EarthCARE A-train productとして配布されており⁵³⁾、それらを

利用した全球雲解像モデルの検証手法の開発と実際の検証研究も進んでいる^{54,56)}。

Oikawa et al.^{57,58)}はCALIPSO標準プロダクトとMODIS標準プロダクトを用いて大気上端および地表での直接エアロゾル放射強制力 (direct aerosol radiative forcing: DARF) を算出し、60S-60Nの帯状領域での全球規模分布を明らかにした。ここでは、晴天、曇天、全天(=晴天+曇天)でのDARFが算出されるだけでなく、CALIOPの利点を活かし、曇天に対しては雲層より上空にエアロゾルが存在する場合 (above-cloud) と下層にエアロゾルが存在する場合 (below-cloud) に分けて算出されている。例えば、アフリカ南部沖では、曇天に対する年平均のTOAでの直接エアロゾル放射強制力は+3 Wm²と強い大気加熱が推定されており、この要因として低層雲上への光吸収性の強いスモークの飛来が指摘された。Kudo et al.⁵⁹⁾では、DARFとともに大気加熱率も推定された。ここではCALIOP-MODIS標準プロダクトではなく、上記のCALIOP-MODISデータを用いて独自開発アルゴリズムにより推定されたエアロゾル種プロダクトが用いられている。その結果、全エアロゾルに対する放射強制力と大気加熱率の全球分布が示されただけでなく、世界に先駆けてそれらに対する個々のエアロゾル種の寄与も明らかにされた。

モデルを用いたエアロゾル研究にも活用された。領域化学輸送モデルによる黄砂シミュレーションの比較・検証に数多く利用され^{59,62)}、この研究の発展として、Uno et al.⁶³⁾では黄砂が地球を周回することが発見されている。Hara et al.⁶⁴⁾では、東アジアでのエアロゾルの季節変動と長期変動を明らかにするために、領域化学輸送モデルとCALIPSOデータ、そして地上ライダーネットワークデータを組み合わせた詳細な解析が行われた。Yumimoto et al.^{65,66)}による、世界初となるライダーデータを用いた領域化学輸送モデルによる黄砂同化を皮切りに、Sekiyama et al.⁶⁷⁾において、CALIOPデータに対する全球エアロゾル輸送モデルを用いたエアロゾル同化が行われた。2007年5月に西日本に大規模な黄砂が飛来した事例において、気象庁による黄砂目視観測やMODISによる水平分布、そして地上ライダーの高度分布との比較から、CALIOPデータの同化による水平・高度分布の顕著な改善が示されている。

2.1.9 CALIPSOの成果と今後の進展について

Winker et al.⁷⁾は、2010年の時点まで4年間の全球のエアロゾルと雲の3D観測についての総説を報告している。主として衛星観測から得られたエアロゾル放射強制力推定値(-0.9~-0.1 W m⁻²; Solomon et al. 2007)は、モデルに基づく推定値に比べて負のバイアスを示す。受動センサによるエアロゾル観測は晴天域に限定される。コラム値であるエアロゾル光学的厚さ (AOD) は、しばしば雲に影響するエアロゾル濃度の代替値として用いられるが、雲の高度でAODが意味をもつとは考えにくい。さらに、雲付近ではエアロゾル粒子は熱力学的な環境変数に影響を受けるが、その解析に当たっては雲付近の晴天域におけるエアロゾル特性が、雲による太陽光反射の影響を強く受けていることを考慮する必要がある。上記の諸論文でも述べてきたように、CALIOPによってエアロゾルと光学的に薄い大気境界層の雲とを区別する新たな手段が提供された。さらに、CALIPSO(ライダー)とCloudSat(レーダー)という二つの能動センサの組み合わせにより、これまで不明であった雲の鉛直構造についての確度の高い情報が得られるようになった。とりわけ、薄い巻雲の検出は、雲の放射過程の理解に大きく影響する。上空の雲は低層の雲に比べて薄く、衛星搭載ライダーは地上観測ライダーよりも大気よりも広い領域を観測可能である。これまでの観測から、スモークエアロゾルの場合には532 nmでの吸収が1064 nmよりも強いことが分かる。気候モデル、天気予報、大気汚染モデル、雲分解モデルに対し、A-Trainは様々な能動・受動センサの組み合わせで貢献できている。なお、CALIPSOデータのダウンリンクはアラスカとハワイの地上局に対して行われ、科学的データの処理とアーカイブはNASA LaRC Atmospheric Sciences Data CenterおよびそのミラーサイトとしてのフランスのLilleで行われている。

Stephens et al.¹⁾の報告は、A-Train中のCloudSatとCALIPSOによる地球システムの能動的観測の10年間の成果についての総説である。A-Train衛星群は、複数の視点から地球を観測する統合的なアプローチの最も成功した実証例の一つである。2006年4月28日に打ち上げられたアメリカ航空宇宙局 (NASA) のCloudSatと、NASA・国立空間評価センター (CNES) のCALIPSOに搭載された2つの能動センサが加わり、より充実した科学的成果が得られるようになった。これら2つのセンサは、地球表面環境に関する統合プロダクトの開発を可能にし、主要な大気プロセスについての新たな知見を提供して現在に至っている。本論文にまとめられた10

年間の観測の進歩は、エアロゾル、水循環、雲スケールの物理、そして地球上の大規模なストームシステムの形成に対する大規模な大気循環の影響を理解する上で、雲とエアロゾルの鉛直構造が根本的に重要であることを明確に示している。これらの研究はまた、従来の放射データが雲の特性を記述するには不十分であることを明らかにし、新たな能動的なセンサシステムが従来の受動センサでの観測結果を大幅に強化し得ることを示した。今日では雲とエアロゾルの鉛直構造を常時モニターすることが不可欠であることが認識され、そのための気候データ記録が構築されつつある。これらの先駆的な取り組みは、最近(2024年5月)打ち上げられたEarth Clouds, Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE)ミッションでも継続される予定である。

以上、本稿ではCALIPSO衛星搭載ライダーの概要と、そのデータを活用した雲・エアロゾル関連の科学的成果について、代表的と思われる文献を参照してとりまとめた。最後に、レーザセンシング学会誌の第4巻1号「特集:ライダーデータ利用I(エアロゾル・雲)」に、工藤氏らによる解説「衛星搭載ライダー・イメージャの複合解析によるエアロゾル組成の全球三次元分布」⁶⁾、河本氏による解説「能動型センサを用いたエアロゾル—雲相互作用研究の紹介」⁶⁾、関山氏による解説「衛星搭載ライダーエアロゾル観測のデータ同化」⁷⁾、および弓本氏らによる解説「領域化学輸送モデルとライダー観測」⁷⁾が掲載されており、本稿と合わせてそれぞれのトピックにおけるCALIPSOデータの有用性について参照していただければ幸いである。

引用文献

- 1) G. Stephens, D. Winker, J. Pelon, C. Trepte, D. Vane, C. Yuhas, T. L'Ecuyer, and M. Lebsock, "CloudSat and CALIPSO within the A-Train: Ten years of actively observing the Earth system," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **99**, 569-581 (2018), <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0324.1>
- 2) D. M. Winker, M. A. Vaughan, A. Omar, Y. Hu, K. A. Powell, Z. Liu, W. H. Hunt, and S. A. Young, "Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms.," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 2310-2323 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1281.1>
- 3) W. H. Hunt, D. M. Winker, M. A. Vaughan, K. A. Powell, P. L. Lucker, and C. Weimer, "CALIPSO lidar description and performance assessment," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1214-1228 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1223.1>
- 4) <https://asdc.larc.nasa.gov/project/CALIPSO> (2023.11.7)
- 5) Z. Liu, M. Vaughan, D. Winker, C. Kittaka, B. Getzewich, R. Kuehn, A. Omar, K. Powell, C. Trepte, and C. Hostetler, "The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: Version 2 algorithm and initial assessment of performance," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1198-1213 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1229.1>
- 6) Z. Liu, M. A. Vaughan, D. M. Winker, C. A. Hostetler, L. R. Poole, D. Hlavka, W. Hart, and M. McGill, "Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data," *J. Geophys. Res.*, **109**, D15202 (2004), doi:10.1029/2004JD004732
- 7) D. M. Winker, J. Pelon, J. A. Coakley Jr., S. A. Ackerman, R. J. Charlson, P. R. Colarco, P. Flamant, Q. Fu, R. M. Hoff, C. Kittaka, T. L. Kubar, H. Le Treut, M. P. McCormick, G. Mégie, L. Poole, K. Powell, C. Trepte, M. A. Vaughan, and B. A. Wielicki, "The CALIPSO mission: A global 3D view of aerosols and clouds," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **91** (9), 1211-1230. (2010), doi:10.1175/2010BAMS3009.1
- 8) R. Kahn, P. Banerjee, and D. McDonald, "Sensitivity of multiangle imaging to natural mixtures of aerosols over ocean," *J. Geophys. Res.*, **106**, 18 219-18 238 (2001), <https://doi.org/10.1029/2000JD900497>
- 9) O. Dubovik and M. D. King, "A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements," *J. Geophys. Res.*, **105**, 20 673-20 696 (2000), <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- 10) A. H. Omar, J.-G. Won, D. M. Winker, S.-C. Yoon, O. Dubovik, and M. P. McCormick, "Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements," *J. Geophys. Res.*, **110**, D10S14 (2005), doi:10.1029/2004JD004874

- 11) O. V. Kalashnikova and I. N. Sokolik, "Importance of shapes and compositions of wind-blown dust particles for remote sensing at solar wavelengths," *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1398 (2002), doi:10.1029/2002GL014947
- 12) A. H. Omar, D. M. Winker, M. A. Vaughan, Y. Hu, C. R. Trepte, R. A. Ferrare, K.-P. Lee, C. A. Hostetler, C. Kittaka, R. R. Rogers, R. E. Kuehn, and Z. Liu, "The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1994–2014 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>
- 13) T. L. Anderson, S. J. Masonis, D. S. Covert, and R. J. Charlson, "In situ measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio at a polluted continental site," *J. Geophys. Res.*, **105**, 26 907–26 915 (2000), <https://doi.org/10.1029/2000JD900400>
- 14) J. Ackermann, "The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: A numerical study," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1043–1050 (1998), [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<1043:TETBRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<1043:TETBRO>2.0.CO;2)
- 15) K. Sassen and S. Benson, "A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing. Part II: Microphysical properties derived from lidar depolarization," *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2103–2112 (2001), [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<2103:AMCCCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<2103:AMCCCF>2.0.CO;2)
- 16) Y. Hu, "Depolarization ratio–effective lidar ratio relation: Theoretical basis for space lidar cloud phase discrimination." *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11812 (2007), doi:10.1029/2007GL029584
- 17) Y. Hu, D. Winker, M. Vaughan, B. Lin, A. Omar, C. Trepte, D. Flittner, P. Yang, S.L. Nasiri, B. Baum, R. Holz, W. Sun, Z. Liu, Z. Wang, S. Young, K. Stamnes, J. Huang, and R. Kuehn, "CALIPSO/CALIOP cloud phase discrimination algorithm," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26** (11), 2293–2309 (2009), <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1280.1>
- 18) F.-M. Breon and B. Dubrulle, "Horizontally oriented plates in clouds," *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2888–2898 (2004), <https://doi.org/10.1175/JAS-3309.1>
- 19) M. Kikuchi, H. Okamoto, and K. Sato, "A climatological view of horizontal ice plates in clouds: Findings from nadir and off-nadir CALIPSO observations," *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **126** (9), e2020JD033562. (2021), <https://doi.org/10.1029/2020JD033562>
- 20) S.T. Massie, J. Gille, C. Craig, R. Khosravi, J. Barnett, W. Read, and D. Winker, "HIRDLS and CALIPSO observations of tropical cirrus," *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **115** (D4). (2010), <https://doi.org/10.1029/2009JD012100>
- 21) H. Chepfer, S. Bony, D. Winker, G. Cesana, J. L. Dufresne, P. Minnis, C. J. Stubenrauch, S. Zeng, "The GCM-oriented calipso cloud product (CALIPSO-GOCCP)," *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **115** (D4) (2010), <https://doi.org/10.1029/2009JD012251>
- 22) T. Várnai and A. Marshak, "Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds," *Atmos. Meas. Tech.*, **5** (2), 389–396 (2012), <https://doi.org/10.5194/amt-5-389-2012>
- 23) L. Oreopoulos, N. Cho and D. Lee, "New insights about cloud vertical structure from CloudSat and CALIPSO observations," *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **122** (17), 9280–9300. (2017), <https://doi.org/10.1002/2017JD026629>
- 24) G. Cesana, A.D. Del Genio, A.S. Ackerman, M. Kelley, G. Elsaesser, A.M. Fridlind, Y. Cheng, and M.-S. Yao, "Evaluating models' response of tropical low clouds to SST forcings using CALIPSO observations," *Atmos. Chem. Phys.*, **19** (5), 2813–2832. (2019), <https://doi.org/10.5194/acp-19-2813-2019>
- 25) B. Purbantoro, J. Aminuddin, N. Manago, K. Toyoshima, N. Lagrosas, J. T. Sri Sumantyo, and H. Kuze, "Comparison of Aqua/Terra MODIS and Himawari-8 satellite data on cloud mask and cloud type classification using split window algorithm," *Rem. Sens.*, **11**, 2944, pp.1–19 (2019), doi:10.3390/rs11242944 www.mdpi
- 26) H. Yu, M. Chin, D.M. Winker, A.H. Omar, Z. Liu, C. Kittaka, and T. Diehl, "Global view of aerosol vertical distributions

- from CALIPSO lidar measurements and GOCART simulations: Regional and seasonal variations,” *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **115** (D4). (2010), <https://doi.org/10.1029/2009JD013364>
- 27) T. Vamai and A. Marshak, “Global CALIPSO observations of aerosol changes near clouds,” *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett.*, **8** (1), 19-23 (2010), <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2049982>
 - 28) J.-P. Vernier, L. W. Thomason, and J. Kar, “CALIPSO detection of an Asian tropopause aerosol layer,” *Geophys. Res. Lett.*, **38** (7) (2011), <https://doi.org/10.1029/2010GL046614>
 - 29) Y. Hong and L. Di Girolamo, “An overview of aerosol properties in clear and cloudy sky based on CALIPSO observations,” *Earth and Space Science*, **9** (4), e2022EA002287 (2022), <https://doi.org/10.1029/2022EA002287>
 - 30) Y. Hagihara, H. Okamoto, and R. Yoshida, “Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution,” *J. Geophys. Res.*, **115**, D99H33 (2010).
 - 31) H. Okamoto, T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kumagai, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, S. Emori, A. Kamei, et al., “Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: Midlatitude case study during the MR01/K02 cruise of the research vessel Mirai,” *J. Geophys. Res.* **112**, D08216 (2007).
 - 32) H. Okamoto, T. Nishizawa, T. Takemura, K. Sato, H. Kumagai, Y. Ohno, N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, and T. Nakajima, “Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar,” *J. Geophys. Res.*, **113**, D24213 (2008).
 - 33) G. Cesana, H. Chepfer, D. Winker, B. Getzewich, X. Cai, O. Jourdan, G. Mioche, H. Okamoto, Y. Hagihara, V. Noel, and M. Reverdy, “Using in situ airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO,” *J. Geophys. Res.* **121**, 5788-5808 (2016).
 - 34) R. Yoshida, H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto, “Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio,” *J. Geophys. Res.*, **115**, <https://doi.org/10.1029/2009jd012334> (2010).
 - 35) M. Kikuchi, H. Okamoto, and K. Sato, “A climatological view of horizontal ice plates in clouds: findings from nadir and off-nadir CALIPSO observations,” *J. Geophys. Res.*, **126** (9), e2020JD033562 (2021).
 - 36) H. Okamoto, S. Iwasaki, M. Yasui, H. Horie, H. Kuroiwa, and H. Kumagai, “95-GHz cloud radar and lidar systems: preliminary results of cloud microphysics,” *Proc. SPIE*, **4152**, 355-363 (2000).
 - 37) H. Okamoto, S. Iwasaki, M. Yasui, H. Horie, H. Kuroiwa, and H. Kumagai, “An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95-GHz cloud radar and lidar,” *J. Geophys. Res.*, **108** (D7): 4226, AAC9-1-AAC9-21 (2003).
 - 38) H. Okamoto, K. Sato, and Y. Hagihara, “Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals,” *J. Geophys. Res.*, **115**, D22209 (2010).
 - 39) K. Sato, and H. Okamoto, “Refinement of global ice microphysics using spaceborne active sensors,” *J. Geophys. Res.*, **116**, D20202 (2011).
 - 40) K. Sato, H. Okamoto, M. K. Yamamoto, S. Fukao, H. Kumagai, Y. Ohno, H. Horie, and M. Abo, “95-GHz Doppler radar and lidar synergy for simultaneous ice microphysics and in-cloud vertical air motion retrieval,” *J. Geophys. Res.*, **114**, D03203, 1-17 (2009).
 - 41) K. Sato, H. Okamoto, T. Takemura, H. Kumagai, N. Sugimoto, “Characterization of ice cloud properties obtained by shipborne radar/lidar over the tropical western Pacific Ocean for evaluation of an atmospheric general circulation model,” *J. Geophys. Res.*, **115**, D15203 (2010).
 - 42) H. Okamoto, K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova, “Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar,” *Optics Express*, **27**, 36,587-36,600 (2019).
 - 43) H. Okamoto, K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova, “Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications,” *Optics Express*, **28**, 29,178-29,191

- (2020).
- 44) K. Sato and H. Okamoto, “Global analysis of height-resolved ice particle categories from spaceborne lidar,” *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2023GL105522, 1-10 (2023).
 - 45) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo, S.-W. Kim, “Ground-based network observation using Mie–Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components,” *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **188**, 79-93 (2017).
 - 46) T. Nishizawa, H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, “Aerosol retrieval from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurement taken during the MR01K02 cruise of the R/V Mirai and evaluation of a global aerosol transport model,” *J. Geophys. Res.*, **113**, D21201 (2008).
 - 47) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and H. Okamoto, “Algorithms to retrieve optical properties of three component aerosols from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurements considering nonsphericity of dust,” *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **112**, 254–267 (2011).
 - 48) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov, and H. Okamoto, “Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral-resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar measurements,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**, 4094–4103 (2008).
 - 49) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo, S.-W. Kim, “Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components,” *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **188**, 79-93 (2017).
 - 50) M. Fujikawa, R. Kudo, T. Nishizawa, E. Oikawa, A. Higurashi, and H. Okamoto, “Long-term analyses of aerosol optical thickness using CALIOP,” *EPJ Web Conf.*, **237**, 02023 (2020).
 - 51) R. Kudo, A. Higurashi, E. Oikawa, M. Fujikawa, H. Ishimoto, and T. Nishizawa, “Global 3-D distribution of aerosol composition by synergistic use of CALIOP and MODIS observations,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3835–3863 (2023).
 - 52) K. Kawamoto, A. Yamauchi, K. Suzuki, H. Okamoto and J. Li, “Effect of Dust Load on the Cloud Top Ice-Water Partitioning Over Northern Middle to High Latitudes With CALIPSO Products,” *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088030 (2020).
 - 53) https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html
 - 54) T. Hashino, M. Satoh, Y. Hagihara, S. Kato, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, H. Okamoto, and M. Sekiguchi, “Evaluating Arctic cloud radiative effects simulated by NICAM with A-train,” *J. Geophys. Res.*, **121** (12), 7041-7063 (2016)
 - 55) T. Seiki, C. Kodama, M. Satoh, Y. Hagihara, and H. Okamoto, “Characteristics of ice clouds over mountain regions detected by CALIPSO and CloudSat satellite observations,” *J. Geophys. Res.*, **124**, 1-20 (2019).
 - 56) W. Roh, M. Satoh, T. Hashino, H. Okamoto, and T. Seiki, “Evaluations of the thermodynamic phases of clouds in a cloud-system-resolving model using calipso and a satellite simulator over the southern ocean,” *J. Atmos. Sci.*, **77**, 3781-3801 (2020).
 - 57) E. Oikawa, T. Nakajima, T. Inoue, and D. Winker, “A study of the shortwave direct aerosol forcing using ESSP/CALIPSO observation and GCM simulation,” *J. Geophys. Res.*, **118**, 3687–3708 (2013).
 - 58) E. Oikawa, T. Nakajima, and D. Winker, “An evaluation of the shortwave direct aerosol radiative forcing using CALIOP and MODIS observations,” *J. Geophys. Res.*, **123**, 1211–1233 (2018).
 - 59) I. Uno, K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu, and D. M. Winker, “3D structure of Asian dust transport revealed by CALIPSO lidar and a 4DVAR dust model,” *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06803 (2008).
 - 60) K. Yumimoto, K. Eguchi, I. Uno, T. Takemura, Z. Liu, A. Shimizu, and N. Sugimoto, “An elevated large-scale dust veil from the Taklimakan Desert: Intercontinental transport and three-dimensional structure as captured by CALIPSO and regional and global models,” *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8545–8558 (2009).
 - 61) Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu, and D. M. Winker, “Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model,” *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1227–1239 (2009).

- 62) S. Itahashi, K. Yumimoto, I. Uno, K. Eguchi, T. Takemura, Y. Hara, A. Shimizu, N. Sugimoto, and Z. Liu, “Structure of dust and air pollutant outflow over East Asia in the spring,” *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20806 (2010).
- 63) I. Uno, K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara, and N. Sugimoto, “Asian dust transported one full circuit around the globe,” *Nature Geosci.*, **2**, 557–560 (2009).
- 64) Y. Hara, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Yumimoto, J. Kurokawa, T. Ohara, and Z. Liu, “Seasonal characteristics of spherical aerosol distribution in eastern Asia: Integrated analysis using ground/space-based lidars and a chemical transport model,” *Sci. Online Lett. Atmos.*, **7**, 121–124 (2011).
- 65) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, and S. Satake, “Adjoint inverse modeling of dust emission and transport over East Asia,” *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08806 (2007).
- 66) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu, and D. M. Winker, “Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations,” *Atmos. Chem. Phys.*, **8** (11), 2869–2884 (2008).
- 67) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi, “Data assimilation of CALIPSO aerosol observations,” *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 39–49 (2010).
- 68) 工藤玲, 日暮明子, 及川栄治, 藤川雅大, 石元裕史, 西澤智明(解説)「衛星搭載ライダー・イメージャの複合解析によるエアロゾル組成の全球三次元分布」, レーザセンシング学会誌, **4**(1), 5–11 (2023).
- 69) 河本和明(解説)「能動型センサを用いたエアロゾル-雲相互作用研究の紹介」, レーザセンシング学会誌, **4**(1), 12–20 (2023).
- 70) 関山剛(解説)「衛星搭載ライダーエアロゾル観測のデータ同化」, レーザセンシング学会誌, **4**(1), 21–32 (2023).
- 71) 弓本桂也, 原由香里(解説)「領域化学輸送モデルとライダー観測」, レーザセンシング学会誌, **4**(1), 33–39 (2023).

(久世宏明, 西澤智明, 岡本創)

2.2 Aeolus

2.2.1 Aeolusとは

世界初の全球域風プロファイル観測ミッションとして、Aeolusは2018年8月、欧州宇宙機関(Europe Space Agency; ESA)により打ち上げられた。飛行高度約320km、太陽回帰軌道の極軌道衛星で、搭載されたドップラー風ライダー(the Atmospheric Laser Doppler Instrument; ALADIN)は、近紫外線域の中心波長355 nmのレーザーを発射する。これによる大気分子やエアロゾル、雲粒などからの後方散乱光を直接検波方式で受信し、ドップラーシフト効果を利用し散乱媒体の衛星視線方向の動きを検出する。レイリー散乱(波長が散乱媒体より十分長い場合)とミー散乱(波長と散乱媒体の長さがほぼ同じオーダーの場合)の2種類の散乱光が解析され、これらによる水平視線風速が2次プロダクトとして配信されている。ドップラー風ライダーの最大の特徴の一つとして、鉛直分解能の高さがあり、Aeolusは、地上最高30kmまでを最大24層、鉛直分解能0.25~2.0kmで観測する。2023年7月、設計寿命の3年を大幅に延長した約5年間の観測を終了し、大気再突入が行われた。

2.2.2 気象予測ユーザーからの風観測の重要性

ここからは、気象現象の理解研究や気象予測の観点から風観測の重要性を述べる。近年、多くの気象現象や予測研究では、数値予報モデルが用いられている。数値予報とは、コンピュータで全球あるいはその一部の領域における大気や海洋・陸地の気温、湿度、風などの気象要素の値を再現し、その初期状態から物理学や化学の方程式に従って時間積分することで、将来の状態を予測するものである。風は、この数値予報モデルの方程式で陽に扱われる重要な要素の一つとなっている。風観測情報を、データ同化技術を用いてモデル初期状態に反映させることは、様々な気象現象を精緻に解析するために重要であり、更に、そこから時間積分される予測値の精度にも大きく影響する。また、風観測情報は、既存の数値予報モデルについて、調査対象の風現象、例えば大気大循環などの再現性を検証する参照値としての意義もある。世界気象機関(World Weather Organization; WMO)が2020年に発表した2040年に向けた観測網の展望(<https://library.wmo.int/idurl/4/57028>)に、風ライダーがユーザー要求の一つとして記載されており、風観測の重要性やニーズの高さを反映している。

2.2.3 AeolusやDWL利用に関する先行研究

Aeolusの打ち上げに先駆け、欧州ではObserving System Simulation Experiment (OSSE)や航空機に搭載したドップラー風ライダー観測を用いたObserving System Experiment (OSE)による数値予報へのインパクト評価が行われてきた。例えば、Marseille et al. (2008b)¹⁾では、OSSEの1手法としてSensitivity Observing System Experiment (SOSE, Marseille et al. 2008a²⁾)を用いてDWLの複数シナリオを比較しており、観測データが比較的少なく解析精度が高くない太平洋上や、DWLのカバレッジが多くなる極域で正のインパクトが他の領域よりも大きい事を示した。Svelta et al. (2021)³⁾は、2017年に航空機搭載の2 μ mドップラーエアロゾル風ライダーによる風観測を行い、そのデータ同化による対流性降水の予測精度へのインパクト評価を行った。その結果、対流雲の3次元構造の発達タイミングや風の場の解析精度への改善が見られた。風データ同化により、地表面付近の収束・気温・水蒸気量が増加したことで、より対流が発達しやすい環境場になり、対流雲発達タイミングの遅延が改善したと結論づけている。

2020年4月以降、Aeolusによる風観測の水平視線風速プロダクトが公開されたことに伴い、実際の観測データを用いたOSEが欧米を中心に実施されている。欧州中期予報センターでは、2020年1月より

Aeolus データを現業利用しており、その同化インパクトについては、Rennie et al. (2021)⁴⁾に詳細にまとめられている。ここでは、晴天域でのレイリー散乱から算出されるレイリー風と、エアロゾルや雲の散乱から算出された「雲域」のミー風を同化しており、多くの研究がこの方法を踏襲している。その中で、予測精度は主に熱帯と極域で下層成層圏に達する高度まで、2、3日予報で最大 2%改善したことが示されている。George et al. (2021)⁵⁾は、インド中期予報センターの現業全球解析予報システムを用いたインパクト評価を行っており、特に熱帯や亜熱帯南半球で、予測精度への正のインパクトが大きいと述べている。Aeolus データ同化は、熱帯低気圧の進路・強度予測の改善にも期待されており、インド洋サイクロンや大西洋ハリケーンの事例において、そのインパクト評価が行われている。Marinescu et al. (2022)⁶⁾は、大西洋や東太平洋の併せて 7 つのハリケーン事例を解析し、東太平洋の事例で強度や大きさの予測精度に正のインパクトがあることを示した。また、George et al. (2021) は、東アラビア海のサイクロン事例で、進路予測が改善したことを紹介している。Rani et al. (2022)⁷⁾は、インド洋における 2 つのサイクロン事例で、同化によるインパクトが正負混在であったと述べた。Hagelin et al. (2021)⁸⁾はスカンジナビア半島を対象とした領域モデルで Aeolus データを同化し、風の短時間予測が若干改善することを示した。特に、全球同化システムを用いた他の研究ではレイリー風のインパクトが大きいことを示したものが多く、本研究ではミー風がレイリー風よりも精度が高くインパクトが大きいことを示しているのが興味深い。以上の研究は、レイリー風は晴天域だけで同化しているが、「雲域」での利用可能性も調査されている。Marseille et al. (2023)⁹⁾では、ミー散乱の影響を受けたレイリー風を、散乱比を用いて修正する手法を考案し、Aeolus データの更なる活用に向けた可能性を示した。なおこのような Aeolus 観測データの誤差特性の調査や補正方法の開発においては、数値予報の短期予測結果が使われており、同様の事例は望遠鏡の温度変化に起因する晴天域でのレイリー風バイアスの対応でも見られた(Weiler et al. 2021)¹⁰⁾。OSSEのみならず、実観測データの評価や処理改良においても、数値予報システムが極めて有効であることを示している。

その他にも、Aeolus データは、総観規模の風の場合、大気大循環や成層圏準 2 年周期振動を捉えると期待され解析が行われている。例えば、Zager et al. (2021)¹¹⁾は、Aeolus データ同化あり・なしの実験を比較し、同化による全球モデルのケルビン波再現性の改善により、熱帯域の数値予測精度が改善したことを示した。Banyard et al. (2021)¹²⁾は、Aeolus による大気重力波の観測可能性を、他の衛星観測データや再解析データを用いた検証結果から示している。また、DWL ではエアロゾルからの後方散乱波を捉えることから、エアロゾル分布の観測も期待されており、Baars et al. (2020)¹³⁾は、2020 年 9 月にアメリカ合衆国西部で発生した大規模な山火事の事例に着目した解析を行っている。この山火事の下流となった欧州では、広くバイオマス・エアロゾルが観測されており、彼らの研究ではドイツにおける地上ラマン・ライダーによる観測結果と Aeolus 観測の結果が整合的であると述べられている。

2.2.4 気象庁における Aeolus 同化インパクト検証結果

気象庁の全球解析予報システムにおける Aeolus データ同化インパクトを評価するため、以下の調査・実験を行った¹⁴⁾。Aeolus データの品質管理手法としては、Rennie and Isaksen (2020)¹⁵⁾をベースとして、推定誤差が閾値(レイリー散乱風は気圧 90hPa 以下で 11.0m/s, 90~200hPa で 7.7m/s, 200hPa 以上で 6.6m/s, ミー風は一律で 4.5m/s) 以下であること、積分距離が閾値(レイリー散乱風は 60km, ミー散乱風は 5km) 以上であることを利用条件とした。更に、Okamoto et al. (2018)に基づき、観測の最下層・最上層と、観測高度がモデル最下層以下または最上層以上である場合は、その観測データを不使用とした。これらの条件をパスした Aeolus データの品質を 2019 年 12 月末時点の気象庁全球解析予報システムの第一推定値を用

いて調査した。2020年8月の観測値－第一推定値(O-B)の統計調査からは、各高度のレイリー散乱風、および、ミー散乱風のヒストグラムが概ねガウス分布を示しており、200hPa以上のレイリー散乱風とミー散乱風ではバイアスは殆ど見られない事が分かった。200hPa以下のレイリー散乱風では若干の正バイアスが見られるが、このバイアスはラジオゾンデなど直接観測のO-B平均値でも見られることから、第一推定値に起因する可能性がある。調査の結果からQCの有効性やバイアス補正を行う必要がないことが確認できた。

次にこの調査結果を反映させた、3つのデータ同化実験を実施した。コントロール実験は、品質調査にも用いた気象庁全球解析予報システム相当の設定とし、これに加えてAeolusデータを同化した実験を2種類行った。一つは、一般的にサイクル実験と呼ばれる設定で、解析に用いる第一推定値に前時刻の(Aeolusデータを同化した)解析値を初期値とした予報値を用いる。この実験では、データ同化サイクルを通して実験結果を繋いでいくことにより、Aeolusデータを同化し続けることによって得られる積算的なインパクトを評価出来る。これをテスト1実験とする。もう一つは、コントロール実験の第一推定値を毎解析で用いてAeolusデータを同化する。この実験では、Aeolusデータを同化した解析インクリメントのみによる(すなわちサイクルを介さない直接的な)インパクトを評価することが出来る。これをテスト2実験とする。検証期間は2020年夏季とした。短期予報精度の検証結果として、他の観測データと第一推定値の差分標準偏差の変化率を調査した。この値が減少することは、短期予報値(3~9時間予報)である第一推定値がAeolusデータとは独立の観測データに近づいた事を意味し、短期予報精度の改善が示唆される。コントロール実験と比較してテスト1実験では、航空機やラジオゾンデ観測の対流圏中層から成層圏下部までの風ベクトル観測と第一推定値との整合性が向上した。また、ラジオゾンデの気温・水蒸気観測や、衛星搭載サウンダ(ATMSやCrIS)の対流圏中上層の気温に感度のあるチャンネルや、静止気象衛星の対流圏中上層の水蒸気の感度のあるバンドの輝度温度との整合性が向上し、気温・水蒸気場の短期予報精度改善が示唆された。サイクルを通してAeolusデータ同化による解析精度改善の効果が全球的に広がった結果と考えられる。

中期予報精度の検証では、Aeolusデータを同化していない独立した参照値としてECMWF第5世代再解析(ERA-5)を用いることとした。図1に予報時間および気圧別予報精度改善率を示す。風だけでなく、主要な各気象要素の予報精度は、対流圏下層のジオポテンシャル高度を除いて予報初期から5日先予報まで大きく改善した。特に熱帯域の対流圏中上層で改善率が大きく見られた。これらの高度・要素の改善はテスト2実験でも見られたが、テスト1と比べると改善率の値は小さく、Aeolusの風観測を同化した効果がサイクルを通してより大きく得られることを示している。一方、台風進路予報誤差を示した図2からは、テスト1とテスト2実験結果の違いが小さい事が分かる。これは、Aeolusデータを同化した解析インクリメントにより、直接的に進路予報を改善させる効果が(サイクルを通した全球平均的なモデル精度改善より)大きい事を意味している。特にAeolus軌道が台風中心の近くを通過した場合に、進路予報改善の効果が大きい事が分かっている。ライダーの特性として光学的に厚い対流雲の中が観測出来ないという制限があるが、これらの台風進路予報の検証結果は、Aeolusにより得られた台風に伴う対流雲の雲頂上空の風観測が、進路予報改善に有効であることを示している。

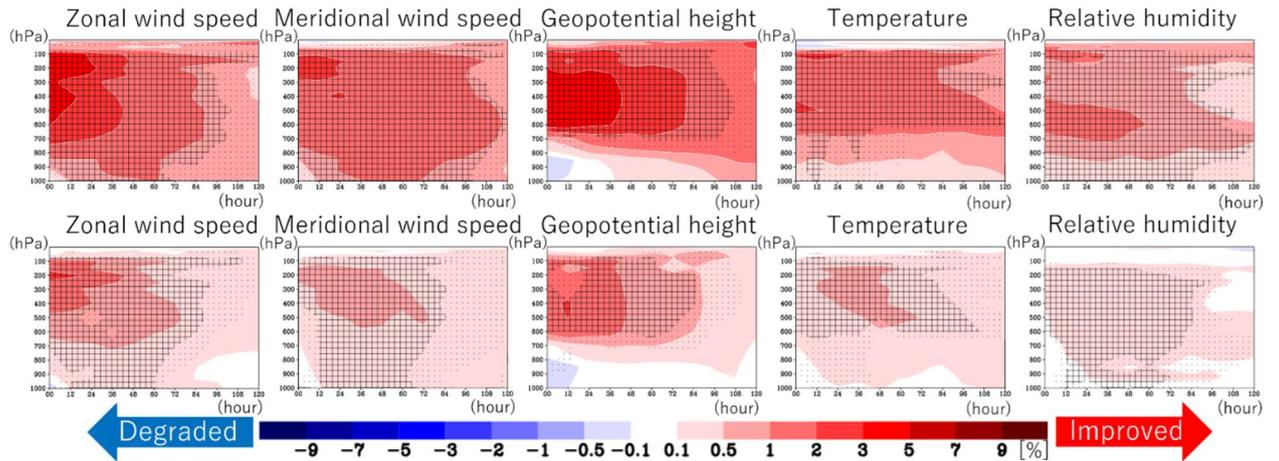


Fig 1 The forecast improvement rate (%) calculated over the globe based on the reference of ERA5. The horizontal axis is forecast hours up to 120 h and vertical axis is pressure level (hPa). The reddish color represent improvement of TEST1 experiment (upper panels) and TEST2 experiment (lower panels) over Control experiment. Cross hatches indicate statistical significance at 95 % confidence levels.

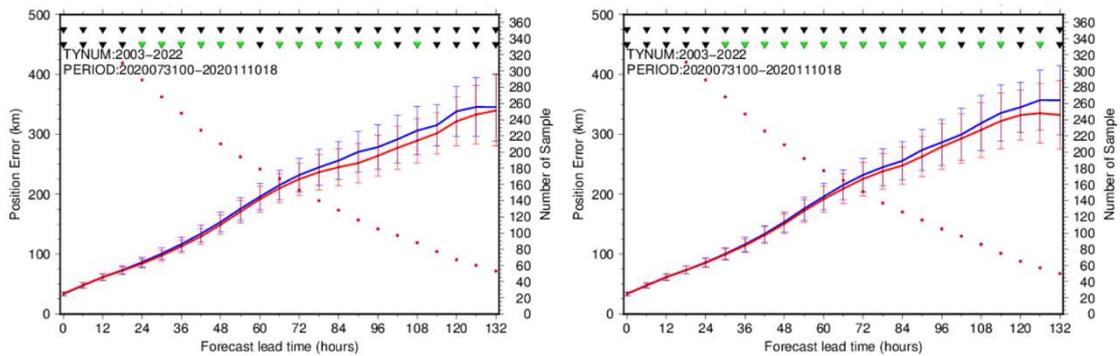


Fig. 2 The Typhoon center position error (km) as a function of forecast hours. The red line is Test 1 experiment (left panel) and Test 2 experiment (right panel) while blue lines are Control experiment. The number of Typhoon cases is plotted with red dots on the right axis. The error bars indicate 95 % confidence levels and green triangles at the top of the panels represent statistical significance with (upper row) and without (lower row) accounting for temporal correlation.

引用文献

- 1) G.-J. Marseille, A. Stoffelen, and J. Barkmeijer, "Impact assessment of prospective space-borne Doppler wind lidar observation scenarios," *Tellus A*, **60**, 234–248 (2008b).
- 2) G.-J. Marseille, A. Stoffelen, and J. Barkmeijer, "Sensitivity Observing System Experiment (SOSE): A new effective NWP-based tool in designing the global observing system," *Tellus A*, **60**, 216–233 (2008a).
- 3) H.-V. Svetla, S. Zhang, J. Turk, Z. Haddad, and R. Sawaya, "Assimilation of DAWN Doppler wind lidar data during the 2017 Convective Processes Experiment (CPEX): Impact on precipitation and flow structure," *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 3333–3350 (2021), <https://doi.org/10.5194/amt-14-3333-2021>.
- 4) M. P. Rennie, L. Isaksen, F. Weiler, J. de Kloe, T. Kanitz, and O. Reitebuch, "The impact of Aeolus wind retrievals on

- ECMWF global weather forecasts,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **147**, 1–32 (2021), <https://doi.org/10.1002/qj.4142> (2021).
- 5) G. George, G. Halloran, S. Kumar, S. I. Rani, M. T. Bushair, B. P. Jangid, J. P. George, and A. Maycock, “Impact of Aeolus horizontal line of sight wind observations in a global NWP system,” *Atmos. Res.*, **261**, 105742 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105742>.
 - 6) P. J. Marinescu, L. Cucurull, K. Apodaca, L. Bucci, and I. Genkova, “The characterization and impact of Aeolus wind profile observations in NOAA’s regional tropical cyclone model (HWRF).” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **148**, 1–18 (2022), <https://doi.org/10.1002/qj.4370>.
 - 7) S. I. Rani, B. P. Jangid, S. Kumar, M. T. Bushair, P. Sharma, J. P. George, G. George, and M. Das Gupta, “Assessing the quality of novel Aeolus winds for NWP applications at NCMRWF,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **148**, 1344–1367 (2022), <https://doi.org/10.1002/qj.4264>.
 - 8) S. Hagelin, R. Azad, M. Lindskog, H. Schyberg, and H. Kömich, “Evaluating the use of Aeolus satellite observations in the regional numerical weather prediction (NWP) model Harmonie–Arome,” *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 5925–5938 (2021), <https://doi.org/10.5194/amt-14-5925-2021>.
 - 9) G.-J. Marseille, J. de Kloe, A. Dabas, T. Flament, and M. Rennie, “Aeolus Rayleigh-channel winds in cloudy conditions,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–20 (2023), <https://doi.org/10.1002/qj.4555>.
 - 10) F. Weiler, M. Rennie, T. Kanitz, L. Isaksen, E. Checa, J. de Kloe, N. Okunde, and O. Reitebuch, “Correction of wind bias for the lidar on board Aeolus using telescope temperatures,” *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 7167–7185 (2021), <https://doi.org/10.5194/amt-14-7167-2021>.
 - 11) N. Žagar, M. Rennie, and L. Isaksen, “Uncertainties in Kelvin waves in ECMWF analyses and forecasts: Insights from Aeolus observing system experiments,” *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL094716 (2021), <https://doi.org/10.1029/2021GL094716>.
 - 12) T. P. Banyard, C. J. Wright, N. P. Hindley, G. Halloran, I. Krisch, B. Kaifler, and L. Hoffmann, “Atmospheric gravity waves in Aeolus wind lidar observations,” *Geophysical Research Letters*, **48**, e2021GL092756 (2021), <https://doi.org/10.1029/2021GL092756>.
 - 13) H. Baars, M. Radenz, A. A. Floutsi, R. Engelmann, D. Althausen, B. Heese, A. Ansmann, T. Flamant, A. Dabas, D. Traçon, O. Reitebuch, S. Bley, and U. Wandinger, “Californian wildfire smoke over Europe: A first example of the aerosol observing capabilities of Aeolus compared to ground-based lidar,” *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL092194 (2021), <https://doi.org/10.1029/2020GL092194>.
 - 14) I. Okabe and K. Okamoto, “Impact of Aeolus horizontal line-of-sight wind observations on tropical cyclone forecasting in a global numerical weather prediction system,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–26 (2024), <https://doi.org/10.1002/qj.4653>.
 - 15) M. P. Rennie and L. Isaksen, “The NWP impact of Aeolus level-2B winds at ECMWF,” *ECMWF Technical Memorandum 864* (2020), <https://doi.org/10.21957/alif7mhr>.

(岡部いづみ, 岡本幸三)

2.3 EarthCARE

2.3.1 はじめに

EarthCARE (Earth Clouds, Aerosol and Radiation Explorer)は日欧共同の地球観測ミッションであり、2024年5月28日(協定世界時)にヴァンデンバーグ宇宙軍基地(米国カリフォルニア州)よりスペース X 社ファルコン9ロケットにより打ち上げられた。EarthCARE の設計寿命は3年である。EarthCARE に先立ち長きにわたり運用された CALIPSO 衛星搭載ライダー(CALIOP)や CloudSat 衛星搭載雲レーダー等の A-train 衛星群による雲・エアロゾル・放射等に関する研究成果やそこから浮き彫りになった課題の解決が EarthCARE 衛星ミッションに引き継がれている(2.1.1 節参照)。これらを踏まえ、EarthCARE ミッションでは、雲・エアロゾル・放射の相互作用の理解の深化、気候影響評価の不確実性の低減、気候・気象予測モデルにおける雲・エアロゾル・放射に関する再現性の評価の高度化、モデルで用いられる物理パラメタリゼーションの改善などへの貢献を目指し、極軌道衛星による全球観測が行なわれる。EarthCARE 衛星には、4つのセンサーが搭載される。(1)波長355nmでの高スペクトル分解ライダーATLID (Atmospheric lidar), (2)ドップラー測定機能を搭載した94GHz雲レーダーCPR (Cloud profiling radar), (3)可視～赤外波長にチャンネルを持つ多波長イメージャーMSI (Multispectral imager), (4)広帯域放射計BBR (Broadband radiometer)。これらのセンサーにより、雲、エアロゾル、降水に関する物理特性の鉛直分布と放射フラックスの測定が行なわれる。本節では、EarthCARE ミッションにおける科学的な背景、課題、目標と共に、観測仕様(使用される衛星、センサーの概要)、測定値から推定される雲・エアロゾル等プロダクト、期待される成果、について記述する。

2.3.2 背景・課題

EarthCARE ミッションにおける科学的な背景と課題は、EarthCARE ミッション要求書¹⁾に「エアロゾル、雲、対流・降水」をキーワードとしてまとめられた。その後、関連論文において、その内容が更新・補足されている。以下にそれらの要点を記述する。

エアロゾル

- ・太陽放射を宇宙空間に反射することで、直接的に放射収支に作用し、地球の加熱や冷却に影響する(直接効果)。また、エアロゾルは雲の放射特性やその降水生成にも寄与する(雲・エアロゾル相互作用)。エアロゾルは氷晶形成にも影響するが、氷雲の特性に及ぼすエアロゾルの影響は本質的には未解明である。全球的に観測されているエアロゾルの物理特性として光学的厚さと粒径が挙げられる。一方で、その化学組成や散乱・吸収特性、それらの鉛直分布や地理的分布に関しては不十分である。
- ・雲とエアロゾルは、大気放射を介して地球のエネルギーバランスに影響を与える。その影響は、それらの物性だけではなく、存在する高度や双方の位置関係にも依存する²⁾。
- ・全球エアロゾルモデルにより再現されたエアロゾル消散係数は高高度域(高度 6km 以上)で過大評価となっている³⁾。

雲

- ・地球の放射収支に大きな影響力をもつ。雲量は世界的に推定されているが、雲水・雲氷量の高度分布に関する情報は不足している。低高度の雲は短波の太陽放射を宇宙空間に反射して冷却し、高高度の雲は低温で宇宙空間への赤外線放射が少ないため温暖化する。よって、温暖化による雲の鉛直分布やその特性の変化が、温室効果ガスによる直接的な温暖化の影響を減衰させるのか増幅させるのか(雲のフィードバック効果)の評価については、気候モデル間で大きく異なり不確実性が高い。気候モデルは大気上端での放射場の再現性は良いが、雲や水分の鉛直分布は観測と大きく異なる。
- ・地球温暖化の評価において、雲のフィードバック効果は他のフィードバック効果(水蒸気、雪など)に比べその不確実性は今なお大きい⁴⁾。気候モデル間で雲の物理特性が大きく異なることが主な要因の一つとなっている。
- ・雲のフィードバック効果の評価において、雲の高さや鉛直方向の広がりに関する観測情報が不可欠となる。

また、雲のフィードバック効果の検出では、雲の変化を検出するための長期観測データが必要となる。これらのことから、ライダーや雲レーダーによる宇宙からの長期観測は必要である⁵⁻⁶⁾。

対流・降水

・プロセス理解は未だ不十分である。特に、雲の凝結、雲から降水への変換効率、そしてグリッドスケールでの対流運動の表現(対流パラメタリゼーション)が気候モデルにおける重要な課題となっている。また、熱帯対流による成層圏への水蒸気輸送や対流の日周変動の再現性、そして組織化された熱帯対流(例えばMJO)の再現にも課題があることが知られている。

・エアロゾル-雲相互作用や熱帯海洋における降水パターンに関する、気候モデルの信頼性は今なお低い³⁾。例えば、気候モデルによって再現された熱帯境界層雲は「少なく、かつ、明るすぎる」

⁷⁾、雲(雲水)から雨(雨滴)への変換が速すぎる⁸⁾といった報告がある。

2.3.3 目標

EarthCARE ミッションにおける科学的な目標として以下の4点が掲げられている¹⁾

1. 全球での自然・人為起源エアロゾルの鉛直分布, 放射特性, 雲との相互作用の観測
2. 全球での大気中の水と氷の鉛直分布, 雲によるそれらの輸送, 放射影響の観測
3. 雲の分布(雲層の重なり), 雲・降水の相互作用, 雲内での鉛直運動の特性の観測
4. 大気の放射加熱・冷却の鉛直分布の推定

そして、これらを実現するために必要な測定項目として以下が挙げられている。

- ・エアロゾル層の検出, エアロゾルの消衰係数および境界層高度
- ・人為起源または自然起源の光吸収・非光吸収エアロゾルの検出
- ・多層雲を含む雲層の上端と下端の高度
- ・雲量と雲の重なり度合いの高度分布
- ・水雲・氷雲・過冷却雲の検出
- ・雲氷量と氷雲の有効半径と形状の高度分布
- ・雲水量と水雲の有効半径の高度分布
- ・雲特性の小規模(1km 以下)での変動
- ・雲の対流運動と氷の沈降を特徴づけるための鉛直速度
- ・霧雨と大雨の降水量
- ・大気上端における狭帯域および広帯域の短波・長波放射

2.3.4 観測仕様

衛星

重量の最小化と高い安定性を実現するために、特注による3軸安定の炭素繊維強化ポリマーによるプラットフォームが採用されている⁹⁾。ライダーとレーダーの2つの能動型センサーの性能を最適化するために393km(平均球面高度)での低高度飛行が採用された。残留大気による抵抗を低減するために、太陽電池パネルを配した流線型の形状が採られている。太陽同期軌道で、降交点通過時刻は14時(MLST)、軌道傾斜角は97度、回帰時間は25日(389軌道)となる。運用に必要な1670Wの電力は太陽電池により賄われる。衛星の総質量は2350kg(内、推進剤313kg)であり、3年間+1年間の運用が可能となっている。測定データ通信は、Kiruna(スウェーデン)とInuvik(カナダ)の両地上局が使用される。本衛星はESAにより開発された。

センサー

衛星には、ATLID, CPR, MSI, BBRの4つのセンサーが搭載される。CPRはJAXAとNICTによって開発され、他のセンサーはESAによって開発された^{2,9-12)}。各センサーに関する諸元や特徴をTable 1にまとめる。各センサーによる地表での測定点(エリア)の位置関係はFig.1となる。CPRは衛星直下を測定する。ATLIDは氷

晶粒子からの鏡面反射を抑制するために、衛星直下から後方に3度傾けられる。MSIは150kmの観測幅をもつが、サンダを回避するために、進行方向に対して衛星直下から左側に35km、もう片側に115kmとなるように傾けられている。BBRは、3つの固定望遠鏡により前方(直下から50度)、直下、後方(直下から50度)の3点を測定する。

Table 1 Specification of ATLID, CPR, MSI, and BBR

Parameter	Content
ATLID	
Wavelength	355nm
System	HSRL with polarization measurement function
Laser	Power: 31 mJ/pulse, Repetition: 51 Hz, linear polarization Beam divergence: 36 μ rad (after 6.7 \times expansion)
Receiver	Telescope diameter: 62 cm, Fabry-Perot interferometer
Data resolution	Horizontal: 285 m (2-shot integration, footprint diameter: 30 m)
Observation width	Vertical: 103 m (500 m) at altitudes of 20 km or less (above 20 km) Horizontal: Above satellite orbit (footprint = 30 m)
Accuracy	Vertical: altitude from -1 km to 40 km $8 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ or 50% in backscatter coefficient for altitude 100 m and a horizontal 10 km integration
Others	Weight: 555 kg, Power consumption: 538 W
CPR	
Frequency	94.05GHz
System	Cloud profiling radar with doppler measurement function (pulse-pair method)
Transmitter	Power: more than 1.5 kW, Repetition: 6100-7500 Hz
Receiver	Reflector diameter 2.5 m
Data resolution	Horizontal: 500 m (footprint diameter: 700 m) Vertical: 500 m (100 m over-sampling)
Observation width	Horizontal: Above satellite orbit (footprint = 700 m)
Accuracy	Vertical: altitude from -0.5 km to 16/18/20 km (switch by latitude zone) Minimum detection: -35 dBZ in radar reflectivity factor Doppler velocity: less than 1.3 ms^{-1} for clouds with radar reflectivity factor greater than -19dBZ
Others	Weight: 270 kg, Power consumption: 316 W
MSI	
Center wavelength	0.67, 0.865, 1.65, 2.21, 8.80, 10.80, 12.0 μ m
System	Push-bloom type imager
Data resolution	Horizontal: 500 m \times 500 m
Observation width	Horizontal: 150 km
Accuracy	0.67 μ m: SN ~ 203 for dark scene and 2500 for bright scene 1.65 μ m: SN ~ 26 for dark scene and 1082 for bright scene 8.80 μ m: Equivalent temperature difference for noise ~ 0.45 K at 220 K, 0.13 K at 293 K
Others	Weight: 50 kg, Power consumption: 60 W
BBR	
Spectral band	Shortwave: 0.25-4.0 μ m, Total: 0.25-50 μ m (i.e., Longwave: 4.0-50 μ m)
System	Three-directional measurements with three telescopes
Data resolution	Horizontal: 10km \times 10km
Observation direction	Horizontal: Nadir, forward (50 degree), Backward (50 degree)
Accuracy	Shortwave: less than 3.28 $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$, Longwave: less than 0.67 $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$

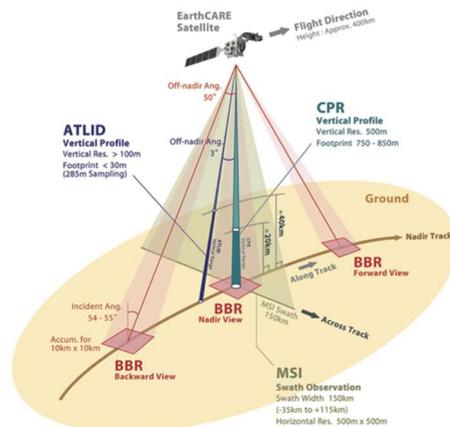


Fig. 1 Viewing geometry of the instruments (Fig. 2 in Kikuchi et al.²⁾)

2.3.5 プロダクト

EarthCARE ミッションで生成されるプロダクトは、以下のカテゴリー(レベル)で分類される⁹⁾。

Level 0 (L0): 測定信号データ

Level 1 (L1): 校正された測定信号データ(物理的な値に変換)

Level 2 (L2): 地球物理学的パラメータ

雲・エアロゾル・放射・降水に関する様々なL2プロダクトが、各センサーのL1データを用いて生成される(L2aプロダクト)。また、複数センサーを複合利用したプロダクトも生成される(L2bプロダクト)。L1プロダクトは、CPRに対してはJAXAで生成され、その他のセンサーに対してはESAで生成される。L2プロダクトに関しては、ESA(ESAプロダクト)とJAXA(JAXAプロダクト)の各々で生成される。

各センサーに対する主要なLevel 1データは以下となる。暗電流補正、背景光補正、スペクトル補正、クロストーク補正等、関連する種々補正が実施され、最終的に物理量に変換される¹³⁾。

ATLID: 減衰後方散乱係数(Mie copolar, Rayleigh copolar, Mie+Rayleigh copolar)

CPR: レーダ反射因子, 地表面レーダ断面積, ドップラー速度, パルスペア共分散, スペクトル幅

MSI: 放射輝度 (0.67, 0.865, 1.65, 2.21, 8.80, 10.80, 12.0 μ m)

BBR: 短波・長波放射輝度(前方, 直下, 後方)

Level 2プロダクトは多岐にわたる。JAXAプロダクト(Table 2)およびESAプロダクト(Table 3)を表にまとめた。JAXAプロダクトは、さらに2つのカテゴリー(標準, 研究)で分類されている。標準プロダクトは、開発が必須であり精度保証されたプロダクトである。研究プロダクトは、EarthCARE ミッションの科学的価値の向上を目指し、開発の難易度は高いが開発を推奨されたプロダクトである。これらプロダクトを推定するアルゴリズムの多くは、CALIPSO/CloudSatといった衛星観測や地上、船舶、航空機等の観測データを利用して開発・検証されたアルゴリズムが基盤となっている(2.1.1節参照)。推定方法に関する記述はここでは行わず、参考文献をリスト化した。

上述した科学的目標の達成のために、雲・エアロゾル・降水・放射に関する主要なパラメータが高度分布と共に推定される。例えば、雲に関しては、雲水・雲氷量・有効粒径といった微物理特性と共に雲相や粒子タイプも推定される。また、CPRのドップラー測定も利用して、雲内の大気鉛直速度や粒子の沈降速度、降水・雪強度の推定も行われる。エアロゾルに対しては、エアロゾル全量に対する消散係数・ライダー比・偏光解消度と共に、粒子タイプや粒子種毎(鉱物ダスト, ブラックカーボンなど)の高度分布も推定される。また、雲層, エアロゾル層, 大気分子層といった大気の特徴的な層の識別フラグ(フィーチャーマスク, 雲マスク)や大気境界層高度といった巨視的な物理パラメータも推定される。大気放射プロダクト(放射フラックス, 加熱率, 放射強制力)の推定では、CPR, MSI, ATLIDから推定された雲・エアロゾル等の3次元(高度・水平)分布データが用いられる。複数センサーのデータを用いたアルゴリズムでは、センサー単体では推定が困難なパラメ

タの推定が行われると共に、センサー単体を用いたアルゴリズムよりも不確実性を低減(推定精度の向上)させることもターゲットになっている。

Table 2 JAXAL2 product

Product	Sensor used in estimation	Main parameters	Reference (Algorithm)
CPR one-sensor echo product	CPR	<ul style="list-style-type: none"> •Radar reflectivity factor •Doppler velocity •Gas correction factor 	14)
CPR one-sensor Doppler product* ¹	CPR	<ul style="list-style-type: none"> •Doppler velocity correction value •Doppler velocity unfolding value 	14, 15)
CPR one-sensor cloud product	CPR	<ul style="list-style-type: none"> •Cloud mask •Cloud particle type 	16, 17, 18, 19, 20, 21)
CPR-ATLID synergy cloud product	CPR ATLID	<ul style="list-style-type: none"> •Liquid/Ice water content •Effective radius of liquid/ice water cloud 	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23)
CPR-ATLID-MSI synergy Cloud product	CPR ATLID MSI	<ul style="list-style-type: none"> •Cloud optical thickness 	20, 21)
CPR-ATLID-MSI synergy cloud doppler product* ¹	CPR ATLID MSI		
CPR one-sensor rain and snow product* ¹	CPR	<ul style="list-style-type: none"> •Attenuation corrected radar reflectivity factor •Rain/snow water content 	24, 25)
CPR-ATLID synergy rain and snow product* ¹	CPR ATLID	<ul style="list-style-type: none"> •Rain/snow rate 	25)
CPR-ATLID-MSI synergy rain and snow product* ¹	CPR ATLID MSI		20, 21)
CPR one-sensor vertical velocity product* ¹	CPR	<ul style="list-style-type: none"> •Vertical air motion •Sedimentation velocity 	24, 25)
CPR-ATLID synergy vertical velocity product* ¹	CPR ATLID		
CPR-ATLID-MSI synergy vertical velocity product* ¹	CPR ATLID MSI		20, 21)
CPR-ATLID synergy Particle mass ratio product* ¹	CPR ATLID	<ul style="list-style-type: none"> •Mass ratio (2D_Ice/IWC) 	24, 25)
ATLID one-sensor cloud and aerosol product	ATLID	<ul style="list-style-type: none"> •Feature mask*² •Aerosol/Cloud particle type •Extinction coefficient, backscatter coefficient, depolarization ratio and lidar ratio of aerosols and clouds •Planetary boundary layer height 	16, 18, 20, 21, 22, 23, 26, 27)
ATLID one-sensor aerosol extinction product* ¹	ATLID	<ul style="list-style-type: none"> •Extinction coefficients of water-soluble, dust, sea-salt, and black carbon 	28, 29, 30)
ATLID-MSI synergy aerosol extinction product* ¹	ATLID MSI	<ul style="list-style-type: none"> •Extinction coefficients of water-soluble, dust, sea-salt, and black carbon •Fine and coarse mode radii 	31)
MSI one-sensor cloud product	MSI	<ul style="list-style-type: none"> •Cloud flag/phase •Optical thickness and effective radius of liquid water cloud 	32, 33)

		•Cloud top temperature/pressure/height	
MSI one-sensor Ice cloud product* ¹	MSI	•Optical thickness and effective radius of ice cloud •Ice cloud top temperature/pressure/height	34, 35)
MSI one-sensor aerosol product* ¹	MSI	•Aerosol optical thickness (ocean/land) •Angstrom exponent (ocean)	36)
Four sensors synergy radiation budget product	CPR ATLID MSI BBR	•Shortwave/longwave radiative flux •Shortwave/longwave radiative heating rate	37, 38, 39, 40)
ATLID-MSI synergy Aerosol direct radiative forcing product* ¹	ATLID MSI	•Aerosol direct radiative forcing at the top/bottom of the atmosphere	37, 38)

*¹Research product

*²Detectin flag for measured characteristic layers (aerosols, clouds, surface, etc.)

Table 3 ESA L2 products

Product	Sensor used in estimation	Main parameters	Reference (Algorithm)	
C-FMR	CPR	Feature mask* ¹ , Corrected reflectivity factor	41)	
C-CD		Corrected doppler velocity		
C-TC		Cloud type classification	42)	
C-CLD		Cloud profiles	43)	
A-FM	ATLID	Feature mask* ¹	44)	
A-AER		Aerosol profiles	45)	
A-ICE		Ice water content and effective radius	45)	
A-TC		Aerosol type classification	42, 46)	
A-EBD		Extinction coefficient, Backscatter coefficient, Depolarization ratio	45)	
A-CTH		Cloud top height	47)	
A-ALD		Aerosol layer descriptor	47)	
M-CM		MSI	Cloud mask and phase	48)
M-COP			Cloud optical and physical properties	49)
M-AOT			Aerosol optical thickness	50)
AC-TC	CPR ATLID	Synergistic particle type classification	42)	
AM-CTH	ATLID MSI	Cloud top height	51)	
AM-ACD		Aerosol column descriptor	51)	
AM-MO		ATLID and MSI L1b merged data		
BM-RAD	MSI BBR	Broad-band radiances	52)	
ACM-CAP	CPR	Cloud, aerosol, precipitation best estimates	53)	
ACM-COM	ATLID	Composite cloud and aerosol profiles	54)	
ACM-RT	MSI	Radiative fluxes, radiances, heating rates from 1D and 3D radiative transfer models	54)	
BMA-FLX	ATLID MSI BBR	Broad-band fluxes	52)	
ACMB-3D	CPR	Constructed three-dimensional scene	54)	
ACMB-DF	ATLID MSI BBR	Differences between radiances and fluxes calculated (ACM-RT) and measured (BM-RAD, BMA-FLX)	55)	

*Detectin flag for measured characteristic layers (aerosols, clouds, surface, etc.)

23.6 期待される成果

EarthCARE ミッションによって期待される成果として以下が挙げられる⁵⁶⁾

・HSRL 測定からは、消衰係数と後方散乱係数をライダー比を仮定することなく独立に抽出することができる。これによる消散係数の高度分布の確実性の向上は、雲・エアロゾルの推定と広帯域放射測定の整合性の向上につながる。ATLID 観測は CALIOP に始まったライダーによる貴重な全球エアロゾルデータの長期測定を延伸する。

・ATLID から得られるライダー比と偏光解消度、そして MSI から得られる粒径情報を用いることで、吸収・非吸収、自然、人為起源の粒子タイプを定量化できる高度なエアロゾル分類が可能になる。全球および領域規模での人為起源エアロゾルによる放射影響と自然起源によるものの正確な推定が可能になる。

・EarthCARE 搭載の CPR は CloudSat のそれよりも 7dB 感度が高く、(これまでに見逃してしまっていた)薄い巻雲や層積雲の検出が期待できる。

・CPR, ATLID, MSI の複合利用は、雲氷量、降雨率、粒径、消散係数の正確なプロファイルを定量化された推定精度と共に与える。また、それらの最適化により、より改善された雲・エアロゾル・放射等の 3 次元場が推定される。これらは、気候モデルの問題点(熱帯境界層雲に関する課題など)の解決に有用な情報となる。

・高感度なレーダーとドップラー機能を組み合わせることで、より正確な降雪・降雨に関する季節・領域的な気候値が得られると共に、温かい雲による霧雨の生成、過冷却雲からの氷晶フラックス、氷雲におけるライミングの度合いも特徴付けることができる。また、氷晶粒子、霧雨、雨、雪の終端速度に関する情報、霧雨の生成とライミングに関する洞察も得られる。放射収支が氷晶の落下速度に非常に敏感であることが判明している気候モデルにとって、有用な強制となる⁵⁷⁾。

・CPR のドップラー観測は、CloudSat で得られた対流運動や雲のエントレインメント過程に関する知見も改善する⁵⁸⁾。

引用文献

- 1) T. Wehr (Ed.), "EarthCARE Mission Requirements Document, Earth and Mission Science Division," European Space Agency (2006), <https://doi.org/10.5270/esa.earthcare-mrd.2006>.
- 2) M. Kikuchi, and Coauthors, "Overview of Earth, Clouds, Aerosols, and Radiation Explorer (EarthCARE) -Integrative Observation of Cloud and Aerosol and Their Radiative Effects on the Climate System -," J. Rem. Sens. Soc. Jpn., **39**, 181-196 (2019) (in Japanese).
- 3) B. Koffi, and Coauthors, "Application of the CALIOP layer product to evaluate the vertical distribution of aerosols estimated by global models: AeroCom phase I results," J. Geophys. Res., **117**, D10201 (2012), <https://doi.org/10.1029/2011JD016858>.
- 4) IPCC 2021, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," edited by: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B.: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>, in press, (2021).
- 5) H. Chepfer, V. Noel, D. Winker, and M. Chiriaco, "Where and when will we observe cloud changes due to climate warming?" Geophys. Res. Lett., **41**, 8387–8395 (2014), <https://doi.org/10.1002/2014GL061792>.
- 6) H. Takahashi, M. D. Lebsock, M. Richardson, R. Marchand, and J. E. Kay, "When Will Spaceborne Cloud Radar Detect Upward Shifts in Cloud Heights?" J. Geophys. Res.-Atmos., **124**, 7270–7285 (2019), <https://doi.org/10.1029/2018JD030242>.
- 7) C. Nam, S. Bony, J.-L. Dufresne, and H. Chepfer, "The 'too few, too bright' tropical low-cloud problem in CMIP5 models," Geophys. Res. Lett., **39**, L21801 (2012), doi:10.1029/2012GL053421.

- 8) K. Suzuki, T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, "Particle growth and drop collection efficiency of warm clouds as inferred from joint CloudSat and MODIS observations," *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3019–3032 (2010), doi:10.1175/2010JAS3463.1.
- 9) T. Wehr, T. Kubota, G. Tzeremes, K. Wallace, H. Nakatsuka, Y. Ohno, R. Koopman, S. Rusli, M. Kikuchi, M. Eisinger, T. Tanaka, M. Taga, P. Deghaye, E. Tomita, and D. Bernaerts, "The EarthCARE mission—science and system overview," *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3581–3608 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-3581-2023>.
- 10) A. Heliere, K. Wallace, J. P. do Corno, M. Eisinger, and A. Lefebvre, "EarthCARE instruments description," European Space Agency, <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/EarthCARE-instrument-descriptions.pdf> (last access: 3 July 2023) (2017).
- 11) K. Wallace, A. Hélière, A. Lefebvre, M. Eisinger, and T. Wehr, "Status of ESA's EarthCARE mission, passive instruments payload, in: Earth Observing Systems XXI," edited by: Butler, J. J., Xiong, X. J., and Gu, X., vol. 9972, p. 997214, International Society for Optics and Photonics, SPIE, (2016), <https://doi.org/10.1117/12.2236498>.
- 12) H. Nakatsuka, T. Kimura, Y. Seki, G. Kadosaki, Y. Iide, K. Okada, J. Yamaguchi, N. Takahashi, Y. Ohno, H. Horie, and K. Sato, "Design and development status of the EarthCARE Cloud Profiling Radar, 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2415–2418 (2012), <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351004>.
- 13) M. Eisinger, F. Mamas, K. Wallace, T. Kubota, N. Tomiyama, Y. Ohno, T. Tanaka, E. Tomita, T. Wehr, and D. Bernaerts, "The EarthCARE Mission: Science Data Processing Chain Overview," *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 17,839–17,862 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-17-839-2024>.
- 14) Y. Hagihara, Y. Ohno, H. Horie, W. Roh, M. Satoh, T. Kubota, and R. Oki, "Assessments of Doppler Velocity Errors of EarthCARE Cloud Profiling Radar Using Global Cloud System Resolving Simulations: Effects of Doppler Broadening and Folding," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **60**, 1–9 (2021).
- 15) Y. Hagihara, Y. Ohno, H. Horie, W. Roh, M. Satoh, and T. Kubota, "Global evaluation of Doppler velocity errors of EarthCARE cloud-profiling radar using a global storm-resolving simulation," *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3211–3219 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-3211-2023>.
- 16) Y. Hagihara, H. Okamoto, and R. Yoshida, "Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution," *J. Geophys. Res.*, **115**, D99H33 (2010).
- 17) M. Kikuchi, H. Okamoto, K. Sato, K. Suzuki, G. Cesana, Y. Hagihara, N. Takahashi, T. Hayasaka, and R. Oki, "Development of algorithm for discriminating hydrometeor particle types with a synergistic use of CloudSat and CALIPSO," *J. Geophys. Res.*, **122**, 11,022–11,044 (2017).
- 18) H. Okamoto, K. Sato, and Y. Hagihara, "Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals," *J. Geophys. Res.*, **115**, D22209 (2010).
- 19) K. Sato, and H. Okamoto, "Refinement of global ice microphysics using spaceborne active sensors," *J. Geophys. Res.*, **116**, D20202 (2011).
- 20) H. Okamoto, K. Sato, T. Nishizawa, Y. Jin, T. Nakajima, M. Wang, M. Satoh, K. Suzuki, W. Roh, A. Yamauchi, H. Horie, Y. Ohno, Y. Hagihara, H. Ishimoto, R. Kudo, T. Kubota, and T. Tanaka, "JAXA Level2 algorithms for EarthCARE mission from single to four sensors: new perspective of cloud, aerosol, radiation and dynamics," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/amt-2024-101> (2024).
- 21) H. Okamoto, K. Sato, T. Nishizawa, Y. Jin, S. Ogawa, H. Ishimoto, Y. Hagihara, E. Oikawa, M. Kikuchi, M. Satoh, and W. Roh, "Cloud mask and cloud type classification using EarthCARE CPR and ATLID" *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, (2024), <https://doi.org/10.5194/amt-2024-103>.
- 22) H. Okamoto, T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kumagai, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, S. Emori, A. Kamei, et al. "Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: Midlatitude case study during the MR01/K02 cruise of the research vessel Mirai," *J. Geophys. Res.* **112**, D08216 (2007).
- 23) H. Okamoto, T. Nishizawa, T. Takemura, K. Sato, H. Kumagai, Y. Ohno, N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, and T. Nakajima, "Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar," *J. Geophys. Res.*, **113**, D24213 (2008).

- 24) K. Sato, H. Okamoto, M. K. Yamamoto, S. Fukao, H. Kumagai, Y. Ohno, H. Horie, and M. Abo, “95-GHz Doppler radar and lidar synergy for simultaneous ice microphysics and in-cloud vertical air motion retrieval,” *J. Geophys. Res.*, **114**, D03203 (2009).
- 25) K. Sato, H. Okamoto, T. Nishizawa, Y. Jin, T. Nakajima, M. Wang, M. Satoh, W. Roh, H. Ishimoto, and R. Kudo, “JAXA Level 2 cloud and precipitation microphysics retrievals based on EarthCARE CPR, ATLID and MSP”, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* (2024), <https://doi.org/10.5194/amt-2024-99>.
- 26) T. Nishizawa, R. Kudo, E. Oikawa, A. Higurashi, Y. Jin, N. Sugimoto, K. Sato, H. Okamoto, “Algorithm to retrieve aerosol optical properties using lidar measurements on board the EarthCARE satellite,” *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* (2024), *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/amt-2024-100>.
- 27) T. Nishizawa, R. Kudo, A. Higurashi, E. Oikawa, and H. Okamoto, “Aerosol and Cloud Retrieval Algorithms Using EarthCARE Satellite-borne Lidar Data,” *J. Rem. Sens. Soc. Jpn.*, **39**, 215–224 (2019), <https://doi.org/https://doi.org/10.11440/rssj.39.215> (in Japanese).
- 28) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo, S.-W. Kim, “Ground-based network observation using Mie–Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components,” *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **188**, 79–93 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.06.031>.
- 29) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, and H. Okamoto, “Algorithms to retrieve optical properties of three component aerosols from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurements considering nonsphericity of dust,” *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.*, **112**, 254–267 (2011).
- 30) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov, and H. Okamoto, “Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral-resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar measurements,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**, 4094–4103 (2008).
- 31) R. Kudo, A. Higurashi, E. Oikawa, M. Fujikawa, H. Ishimoto, and T. Nishizawa, “Global 3-D distribution of aerosol composition by synergistic use of CALIOP and MODIS observations,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3835–3863 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-3835-2023>.
- 32) T. Y. Nakajima, H. Ishida, T. M. Nagao, M. Hori, H. Letu, R. Higuchi, N. Tamaru, N. Imoto, and A. Yamazaki, “Theoretical basis of the algorithms and early phase results of the GCOM-C (Shikisai) SGLI cloud products,” *Progress in Earth and Planetary Science*, **6**, 1–25 (2019).
- 33) M. Wang, T. Y. Nakajima, W. Roh, M. Satoh, K. Suzuki, T. Kubota, and M. Yoshida, “Evaluation of the spectral misalignment on the Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer/multi-spectral imager cloud product,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 603–623 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-603-2023>.
- 34) H. Letu, H. Ishimoto, J. Riedi, T. Y. Nakajima, L. C-Labonnote, A. J. Baran, T. M. Nagao, and M. Sekiguchi, “Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission,” *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 12,287–12,303 (2016).
- 35) H. Letu, T. M. Nagao, T. Y. Nakajima, J. Riedi, H. Ishimoto, A. J. Baran, H. Shang, M. Sekiguchi, and M. Kikuchi, “Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: Capability of the AHI to monitor the DC cloud generation process,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **57**, 3229–3239 (2018).
- 36) M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami, T. Nomaki, and A. Higurashi, “Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors,” *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **96B**, 193–209 (2018), <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-039>.
- 37) E. Oikawa, T. Nakajima, T. Inoue, and D. Winker, “A study of the shortwave direct aerosol forcing using ESSP/CALIPSO observation and GCM simulation,” *J. Geophys. Res.*, **118**, 3687–3708 (2013).
- 38) E. Oikawa, T. Nakajima, and D. Winker, “An evaluation of the shortwave direct aerosol radiative forcing using CALIOP and MODIS observations,” *J. Geophys. Res.*, **123**, 1211–1233 (2018).
- 39) M. Okata, T. Nakajima, K. Suzuki, T. Inoue, T. Y. Nakajima, and H. Okamoto, “A study on radiative transfer effects in 3-D cloudy atmosphere using satellite data,” *J. Geophys. Res.*, **122**, 443–468 (2017).

- 40) A. Yamauchi, K. Suzuki, E. Oikawa, M. Sekiguchi, T. Nagao, and H. Ishida, “Description and validation of the Japanese algorithm for radiative flux and heating rate products with all four EarthCARE instruments: Pre-launch test with A-Train,” *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* (2024), <https://doi.org/10.5194/amt-2024-78>.
- 41) P. Kollias, B. P. Treserras, A. Battaglia, P. C. Borque, and A. Tatarevic, “Processing reflectivity and Doppler velocity from EarthCARE’s cloud-profiling radar: the C-FMR, C-CD and C-APC products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 1901–1914 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-1901-2023>.
- 42) A. Irbah, J. Delanoë, G.-J. van Zadelhoff, D. P. Donovan, P. Kollias, B. P. Treserras, S. Mason, R. J. Hogan, and A. Tatarevic, “The classification of atmospheric hydrometeors and aerosols from the EarthCARE radar and lidar: the A-TC, C-TC and AC-TC products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 2795–2820 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-2795-2023>.
- 43) K. Mroz, B. P. Treserras, A. Battaglia, P. Kollias, A. Tatarevic, and F. Tridon, “Cloud and precipitation microphysical retrievals from the EarthCARE Cloud Profiling Radar: the C-CLD product,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 2865–2888 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-2865-2023>.
- 44) G.-J. van Zadelhoff, D. P. Donovan, and P. Wang, “Detection of aerosol and cloud features for the EarthCARE atmospheric lidar (ATLID): the ATLID Feature Mask (A-FM) product,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3631–3651 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-3631-2023>.
- 45) D. P. Donovan, G.-J. van Zadelhoff, and P. Wang, “The EarthCARE lidar cloud and aerosol profile processor (A-PRO): the A-AER, A-EBD, A-TC and A-ICE products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 5301–5340 (2024), <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-218>.
- 46) D. P. Donovan, P. Kollias, B. A. Velázquez, and G.-J. van Zadelhoff, “The generation of EarthCARE L1 test data sets using atmospheric model data sets,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 5327–5336 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-5327-2023>.
- 47) Wandinger, U., Haarig, M., Baars, H., Donovan, D., and van Zadelhoff, G.-J., “Cloud top heights and aerosol layer properties from EarthCARE lidar observations: the A-CTH and A-ALD products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 4031–4052 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-4031-2023>.
- 48) A. Hünerbein, S. Bley, S. Horn, H. Deneke, and A. Walther, “Cloud mask algorithm from the EarthCARE multi-spectral imager: the M-CM products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 2821–2836 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-2821-2023>.
- 49) A. Hünerbein, S. Bley, H. Deneke, J. F. Meirink, G.-J. van Zadelhoff, and A. Walther, “Cloud optical and physical properties retrieval from EarthCARE multi-spectral imager: the M-COP products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 17261–276 (2024), <https://doi.org/10.5194/amt-17-261-2024>.
- 50) N. Docter, R. Preusker, F. Filipitsch, L. Kritten, F. Schmidt, and J. Fischer, “Aerosol optical depth retrieval from the EarthCARE multi-spectral imager: the M-AOT product,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3437–3457 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-3437-2023>.
- 51) M. Haarig, A. Hünerbein, U. Wandinger, N. Docter, S. Bley, D. P. Donovan, and G.-J. van Zadelhoff, “Cloud top heights and aerosol columnar properties from combined EarthCARE lidar and imager observations: the AM-CTH and AM-ACD products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 5953–5975 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-5953-2023>.
- 52) B. A. Velázquez, E. Baudrez, N. Clerbaux, and C. Domenech, “Unfiltering of the EarthCARE Broadband Radiometer (BBR) observations: the BM-RAD product,” *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 1–16 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-2023-170>.
- 53) S. L. Mason, R. J. Hogan, A. Bozzo, and N. L. Pounder, “A unified synergistic retrieval of clouds, aerosols, and precipitation from EarthCARE: the ACM-CAP product,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 3459–3486 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-3459-2023>.
- 54) J. N. S. Cole, H. W. Barker, Z. Qu, N. Villefranque, and M. W. Shephard, “Broadband radiative quantities for the EarthCARE mission: the ACM-COM and ACM-RT products,” *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 4271–4288 (2023), <https://doi.org/10.5194/amt-16-4271-2023>.
- 55) H. W. Barker, J. N. S. Cole, Z. Qu, N. Villefranque, and M. Shephard, “Radiative closure assessment of retrieved cloud

and aerosol properties for the EarthCARE mission: the ACMB-DF product,” EGU sphere [preprint], (2024), <https://doi.org/egusphere-2024-1651>.

- 56) A. J. Illingworth, and Coauthors, “The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation,” *B. Am. Meteorol. Soc.*, **96**, 1311–1332 (2015), <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1>.
- 57) C. Jakob, “Ice clouds in numerical weather prediction models: Progress, problems, and prospects,” *Cirrus*, D. K. Lynch et al. Eds., Oxford University Press, 327–345 (2002).
- 58) Z. J. Luo, G. Y. Liu, and G. L. Stephens, “Use of A-Train data to estimate convective buoyancy and entrainment rate,” *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L09804 (2010), doi:10.1029/2010GL042904.

(西澤智明)

2.4 各衛星搭載ライダーの装置構成

2.4.1 はじめに

本項目では、これまで実現された衛星搭載ライダーの装置構成を紹介する。2023年現在軌道上での実証及び計画されている衛星搭載ライダーのプロジェクトをTable 1に示す。太陽光を用いた光学衛星や、電波を用いた散乱系、レーダー衛星の実績30～40年の開発・運用経験が国内外で続けられているが、ライダー搭載衛星の実績はそれらと比較しても数が少ない。

Table 1 Summary of Earth observation mission from space

衛星ミッション	ICESat	CALIPSO	GEDI	ICESat-2	EarthCARE	Aeolus	Aeolus-2	GF-7	MOLI	MERLIN
軌道高度 [km]	600	685	400	496	393	320	320	500	400	500
レーザー エネルギー [mJ]	75/35	110/110	10	1	35	80	150	180	30	9
繰返し [Hz]	40	20	242	10k	51	50	100	3	150	20
観測波長 [nm]	1064/532	1064/532	1064	532	355	355	355	1064	1064	1645
観測対象	氷床 森林	エアロゾル	森林、 地盤高	氷床 森林	エアロゾル	ドップラー	ドップラー	森林、 地盤高	森林 地盤高	メタン
打上げ予定/ 運用期間	2003-2010	2006-2023	2019-2023 /2024-	2018～	2024～-	2019-2023	2035(TBD)	2019-?	2027(TBD)	2028(TBD)

ここでは、これまで衛星に搭載された地球観測用ライダーの装置構成や開発過程について述べる。

2.4.2 衛星搭載ライダーの装置構成

2.4.2.1 ICESat

ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) ミッションで搭載するレーザーとして開発された Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) は、極域の氷床、森林や地盤高、全球エアロゾルおよび巻雲の高さをモニタリングするためのレーザー高度計および大気計測用ライダーである¹⁾。ミッションのイメージ図を Fig.1 に示す。この衛星は2003年1月に打ち上げられ、2010年8月まで、15回のキャンペーン観測が行われた。GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) は、レーザーダイオード(LD)励起固体レーザーを搭載し、利得媒質として Nd:YAG を採用している。このレーザーは、ミッションが目的としている極域の氷床高度を精密に測定するために設計され、その垂直構造データの精度は5 cm、精密度は2.4 cm を実証した。加えて大気中のエアロゾルや巻雲の高度もプロダクトとして取得した。



Figure 1 Mission image of ICESat

ICESat の衛星に搭載された装置構成を Fig.2 に示す。直径 1 m のベリリウム製望遠鏡、1 GHz のデジタル、アナログおよびフォトンカウントシリコン APD、オンボードのレーザービーム指向測定システム、および輸送熱量を可変できるループヒートパイプ (Loop Heat Pipe: LHP) の構成である。

衛星搭載レーザー送信機の設計として、光学設計、動作環境、構造設計として下記のような特徴がある。ミッション機器として重要なレーザー送信機 GLAS は低出力 Q_{sw} レーザー発振器と光増幅器からなる MOPA 構成を採用している²⁾。7 ns 以下の高輝度短パルスのレーザーを 40 Hz 75 mJ (1064 nm)、35 mJ (532 nm) で出力する。ビーム品質 (M^2) は 2 以下であり、熱インターフェースが $10^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ の範囲でも動作する。保管温度は $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ の範囲で、ミッション寿命は 3 年を想定しており、5 年の目標が設定されていた。レーザーを配置する筐体は光学ベンチとして設計されており、レーザーを構成する素子は真空中にさらされている。

LITE以降初めて衛星軌道に投入されたライダー衛星であり、高輝度レーザーを宇宙で長期間駆動させる初めてのミッションであった。このため通常の衛星搭載コンポーネントよりもレーザーの冗長性対策は厚く、同機能を持ったレーザーを正、副、予備の3台搭載している(一般的な衛星コンポーネントの冗長性確保は正副の2系統で確保する)。事前の設計における対策や宇宙機で用いられる清浄度管理を行っているにもかかわらず、すべてのレーザーで設計時では想定されていないエネルギー低下が発生し、連続運転による運用から上記に記載したキャンペーン観測による運用に切り替えられた。軌道上におけるレーザー出力の変動をFig.3に示す。

ICESat では高精度なレーザー高度計測を行うために、レーザービームのポインティング角度の正確な決定が必要となる。GLAS のポインティング評価システムでは、このシステムを用いて地表面の高度を高精度に測定し、ICESat のデータ処理に使用される。ポインティング評価システムは、ステラリファレンスシステム(SRS)と呼ばれる高精度の姿勢決定システムと、レーザーリファレンスカメラを組み合わせたものであり、その構成要素を以下に示す：

- 高精度姿勢決定システム(ADS) : スター・トラッカーと四つの半球共振ジャイロから成る。スター・トラッカーは最大6つの星を同時に観測し、8度の視野を有している。ジャイロから得られる角速度データと組み合わせて、10HzのレートでADSの姿勢を決定する。
- レーザリファレンスセンサー(LRS) : 狭い視野のカメラで、10Hzのフレームレートで動作する。LRSは、レーザービームのサンプルを取得し、レーザービームの位置をADSのコンポーネントに対して測定する。LRSには、ニュートン式望遠鏡とスター・トラッカーが含まれており、レーザービームや星の位置を画像化し、その中心を計算する。

ICESatの熱制御デバイスとして、LHP技術が採用され、このミッションにより実証された。この機材は、受動的なヒートパイプと異なり、広範な環境変動にも対応可能な安定した温度制御を行う熱制御デバイスとして知られている。その特徴として、微少な制御電力のみでラジエータと発熱機器の熱結合を遮断することができ、レーザーの非稼働時やスタンバイ状態で不必要な放熱を防ぐことが可能である。温度の急激な変化を可能

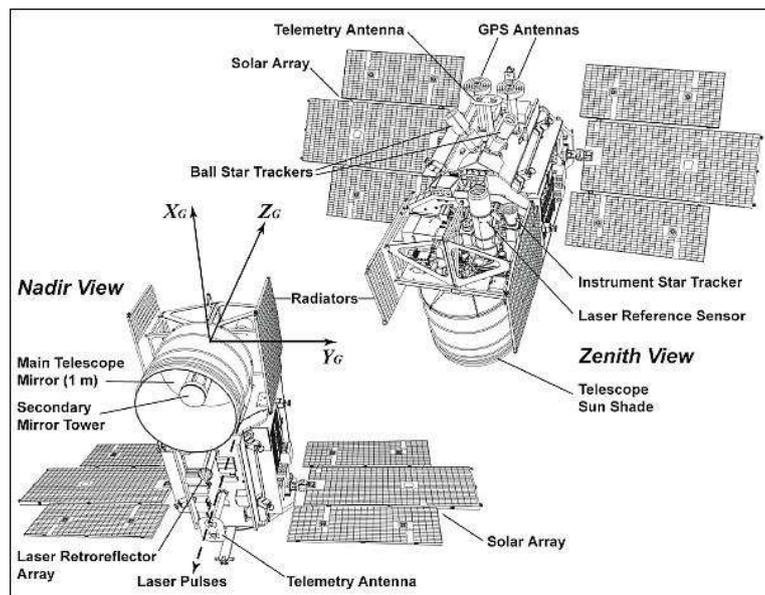


Figure 2 Sensors and another component of ICESat

な限り避けたい精密光学機器からすると、極めて重要な熱制御デバイスである。ICESat には2つの LHP が使用されており、ひとつは3つのレーザー(稼働させる場合は1つだけ)に、もうひとつはジャイロ스코プ、スターセンサ、検出器、電源供給/配電システムおよび主要電子機器ボックスなどの他の電子機器に対応する。流体として機器に封入された機体はプロピレン(C₃H₆)で、その低い凍結温度から選択された。電子制御ヒータは地上からのコマンドで設定ポイントを調整可能で、変化する太陽角度や熱光学特性の劣化を補うための熱流用を可変する機能を持つ。

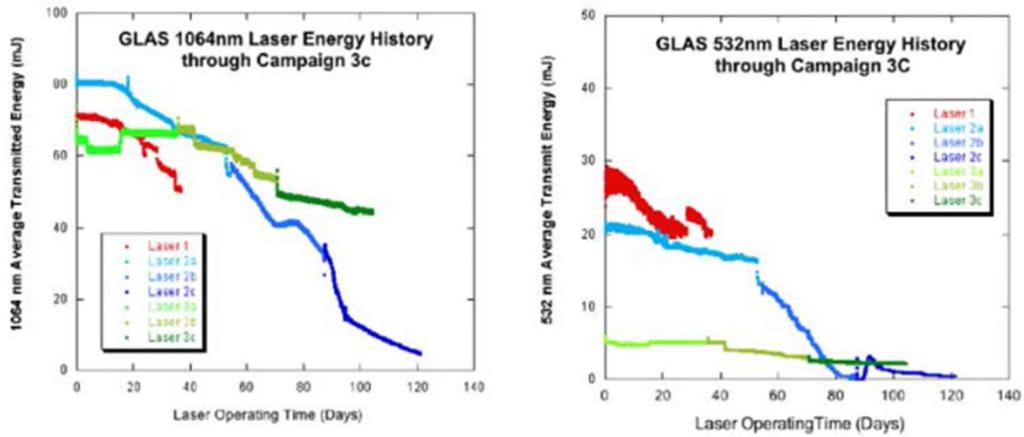


Figure 3 GLAS laser pulse energy history¹⁾

2.4.2.2 CAIPSO

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)は、大気中の雲やエアロゾルの高度プロファイル、光学的深さ、エアロゾル種別を測定するために設計された衛星搭載ライダーシステムである。システム外観を Fig4 に示す。CALIPSO は1064 nmの近赤外波長と532 nmの第二高調波の偏光観測が行われ、2008年から2023年の長期間にわたって地球上のエアロゾル等の観測を実施し、ICCP にもデータが利用された。CALIPSO レーザー送信機(LTS)の開発は、ICESatのレーザーが通常運用できなかつた事態に対して、光学素子配置のリスク削減レーザー(RRL)の寿命試験から始まり、プロトタイプフライトハードウェアの設計検証フェーズを経て、最終的な品質評価まで至るプロジェクトが展開された。



Figure 4 Outline of CALIPSO

リスク削減レーザー(RRL)のテスト

RRL は1998年に完成し、Ball Aerospace で寿命試験が開始された³⁾。この試験の主な目的は、ICESat/CALIPSO に搭載される性能のレーザーに対して軌道上動作に伴うリスクを削減することにある。試験では、以下に示す設計とプロセスが検証された:

1. コンタミネーションコントロール:
レーザーキャニスター内の全ての金属およびポリマー部品を精密洗浄し、真空ベーキングする。その後レーザーは与圧筐体に配置し、組立てはクラス10000のクリーンルームで実施する。
2. 機械環境性能のロバスト性:
RRLの光学ベンチと共振器の設計は、最小限の変更でフライト用レーザーに使用できるように選択された。共振器には交差ポロプリズムを使用し、温度安定性と機械的ロバスト性を確保している。
3. 励起用レーザーダイオードの適切なディレーティング:
Nd:YAG 媒質に励起に使用するレーザーダイオードは、定格出力に対しての30% 以上出力を落として動作させる。
4. 第二高調波用素子KTP:
長期間の高出力第二高調波の発生に耐えるために、グレートラック耐性のある KTP が使用された。

これらのRRLを用いたレーザー送信機のテストでは、CALIPSO ミッションの3年間の連続運転に必要な20億ショットの寿命を達成できることを示した。

2.4.2.3 Aeolus

Aeolus (Fig.5)はESAが地球観測に関するセレクションにより採択されたライダーミッションであり、20年間にわたる開発の末、2018年に打上げられ軌道上実証を行った⁴⁾。開発過程において光学素子や薄膜に損傷が頻繁に発生する事象に直面した。開発過程におけるレーザー稼働日数をFig.6に示す。この原因不明の光学素子、特に薄膜に対する損傷の原因究明が行われ、従来の対策として行われてきた真空ベーキングのみでは不十分であることが明らかになった。要因として、真空ベーキングでは素子温度と真空に晒す時間で制御されるが、真空中に晒されている高分子素材や固化済の接着剤表面は、このベーキングにより溶剤を含む分子放出量を抑えることができるものの、衛星軌道上では年単位で徐々に真空側に染み出し、天体ミッションや画像観測を行う衛星において、望遠鏡面に付着し、透過率や分光特性に影響することが知られていた。この状況に対して紫外波長のレーザーは、散乱光とはいえ固化済接着剤や高分子素材に照射される場合、確率的に分子をたたき出すことがあり、レーザー軸上のコンタミネーション濃度を急激に増加させ、薄膜へ堆積し、一定量を超えると薄膜を焼損させるプロセスが明らかになった。

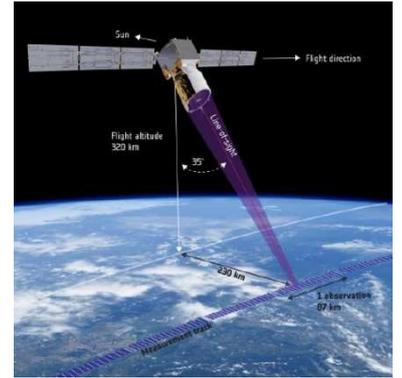


Figure 5 Aeolus mission image

Aeolusでは上記の現象を明らかにすることができた一方、レーザーの設計・製造状況が進んでおり、根本的な設計変更ができず、光学部分にO₂を供給し続ける装置を追加する形でレーザー誘起コンタミネーションの抑制や除去を行う試作を実装した上で、軌道上実証が達成された。またこれらの原因究明と対策

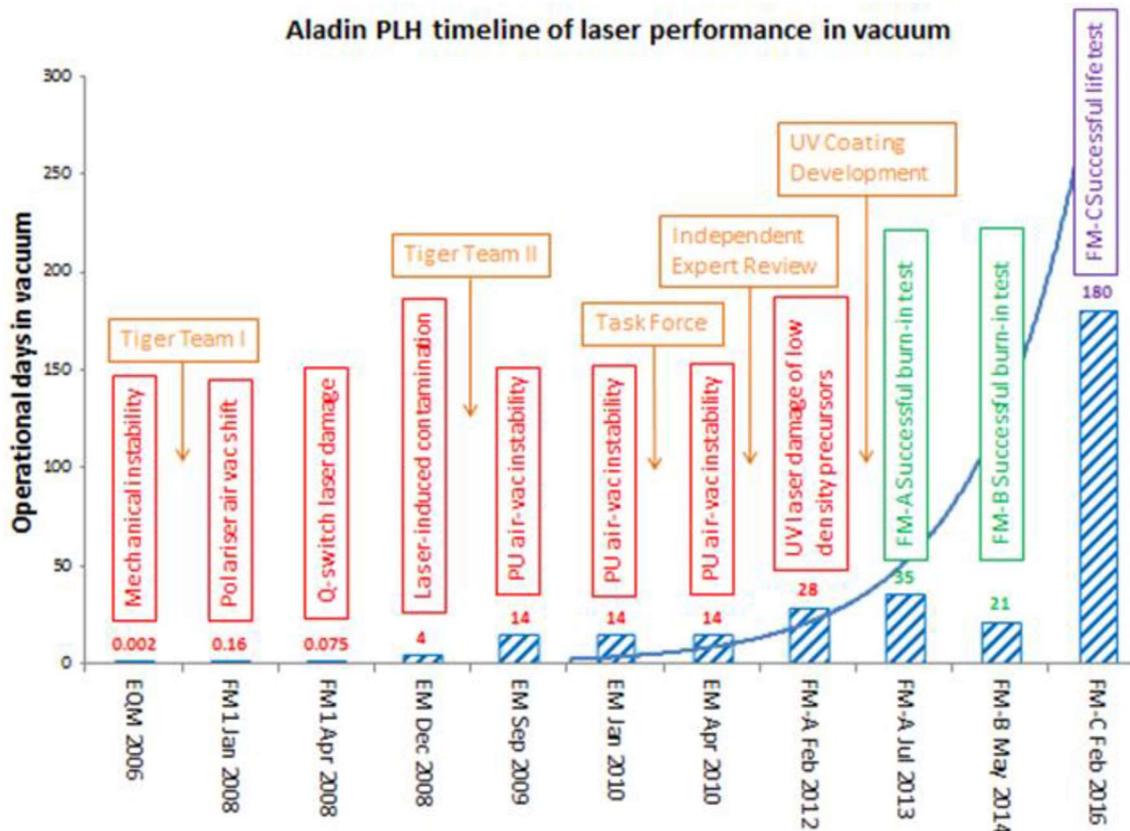


Figure 6 Graph showing the evolution of the “lifetime” of the Aladin laser transmitter in vacuum from 2006 to 2016. It has been very painful!!!

の実装に至る研究・開発から低軌道上環境で紫外域レーザーを駆動させる困難さを示した。

また Aeolus は、各宇宙機関を通じて初めて大気風の観測を実現させたミッションであり、EUMETSAT や NOAA など数値気象予報を現業とする機関で幅広くデータが活用され、数値気象予報への貢献も併せて社会に示したミッションである。運用終了後、欧州の首脳会合により、後継機及び静止気象衛星等と組み合わせた数値気象予報の現業利用のための予算措置がなされ、2030 年以降のできるだけ早い期間に打ち上げ、合計 2 基、1 基あたり 5.5 年で 10 年間の運用が計画されている。後継機は初号機の初期仕様を踏襲して開発される方針が示されている。

Aeolus に搭載されたレーザーは発振器と増幅器構成からなる MOPA を採用し、高調波発生用素子として LBO が選択され第三高調波を生成する。Fig.7 に示すような構成で 355 nm の出力として 80 mJ/50 Hz で運用されている。THz 領域の光をプローブ光として大気風で動く散乱対象のドップラーシフト(数 MHz)を検出するため、レーザーの周波数安定性はドップラーシフト以下である必要がある。このため、インジェクションシーディングによるレーザー制御が実装された衛星搭載用レーザーである。その周波数安定性を示す指標としてパルス間の変動量は RMS 値で約 10 MHz であり、これが軌道上 2 年以上の宇宙運用期間で維持されていた。一方、短期間での大きな周波数ノイズ (>30 MHz) が特定の条件下で観測され、その主な要因として衛星の姿勢制御等に用いられるリアクションホイールに起因する微小振動と結論されている。衛星構体に設置されたリアクションホイールとレーザー送信機を設置しているシステム光学ベンチは、同じ基板には配置されていないものの、衛星構体はフレームや衛星本体などの構造体と結合しており、リアクションホイールから生じた微小振動が構体を通じて光発振器の共振器長による共振周波数と同調するなどして共振器長制御に作用し、風速データの品質に影響したと考えられている⁹⁾。

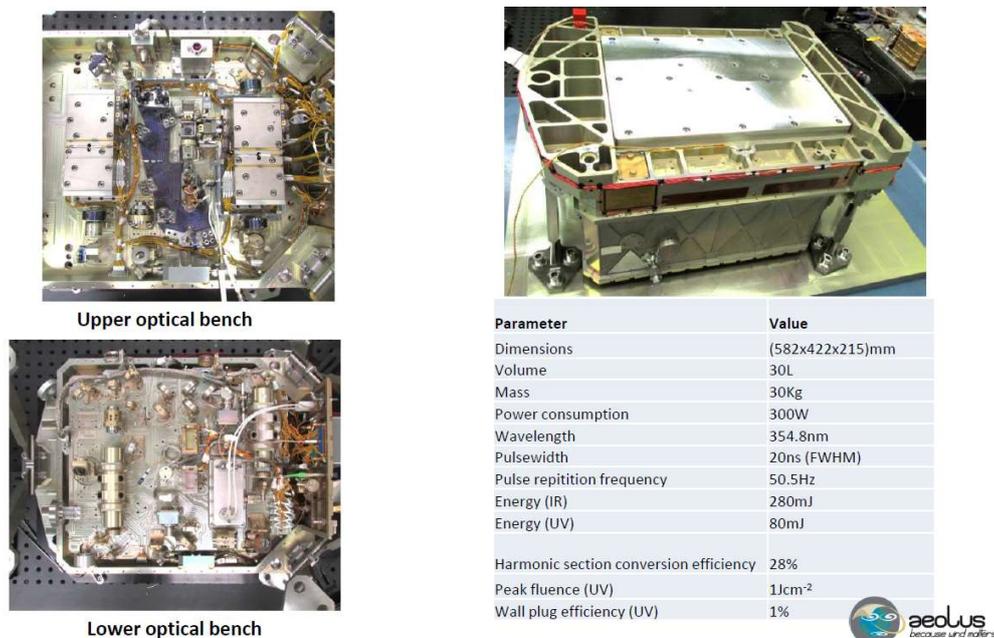


Figure 7 The Aladin laser transmitter

ALADIN は、光検出器に蓄積型電荷結合素子 (ACCD) を用いている。ACCD (Teledyne e2V社製) は特別に設計されたもので、2つの検出チャンネル (大気分子の散乱観測用の Rayleigh チャンネルとエアロゾル散乱観測用の Mie チャンネル) で利用される。各 ACCD は、薄型の裏面照射型シリコン CCD で、熱制御されたハウジング内に取り付けられている。検出器は、355 nm の波長で約 85 % の高い量子効率を提供し、電荷転送効率 (CTE) は非常に高い性能を有している。ACCD の外観を Fig.8 に示す。

検出器は Fig.9 に示すように 1.5 m 望遠鏡と送受共用の構成となり、ファブリペローフィルタを介して Rayleigh および Mie 散乱信号を受信する。ACCD の構成は照射イメージング領域と非照射メモリ領域の2つの部分から構成されている。イメージング領域は 0.43 mm×0.43 mm のエリアを持ち、16×16 の正方形のピクセルで構成され、メモリ領域は 0.43 mm×0.75 mm のサイズ、32×25 のピクセルで構成されている。メモリ領域のうち 16 列はイメージング領域に対応しており、残りの 16 列は信号の蓄積に使用される。50 Hz で駆動する 1 ショットごとのレーザーと受信信号をチップ状のメモリゾーンに蓄積することで、読出しノイズの影響を低減するように設計されている。レンジゲートの時間制御感度として 2.1 μs から 16.8 μs の範囲で調整可能のように設計されており、高度分解能では 0.25 km から 2 km 相当で運用できる。蓄積された信号は検出器の後段に送付され、16 bit 分解能で AD 変換される。変換効率は Mie 信号で 0.68 LSB/e⁻、Rayleigh で 0.44 LSB/e⁻ と報告されている⁶⁸⁾。

ACCD は紫外波長域の観測において非常に高い量子効率とノイズ耐性を示しているが、軌道上の運用で暗電流の異常が発生することがあり、これも風速測定の精度に影響を及ぼす。暗電流異常による影響は専用の校正モードと地上設備で補正方法が検討され、ある程度の除去を可能としている。一方、後継機検討ではこの影響を根本から除去しようと、暗電流が抑制できる 30°C 以下で運用することなどが検討されている。



Figure 8 The detector with the ACCD chip housed in a thermo-controlled hermetically sealed package

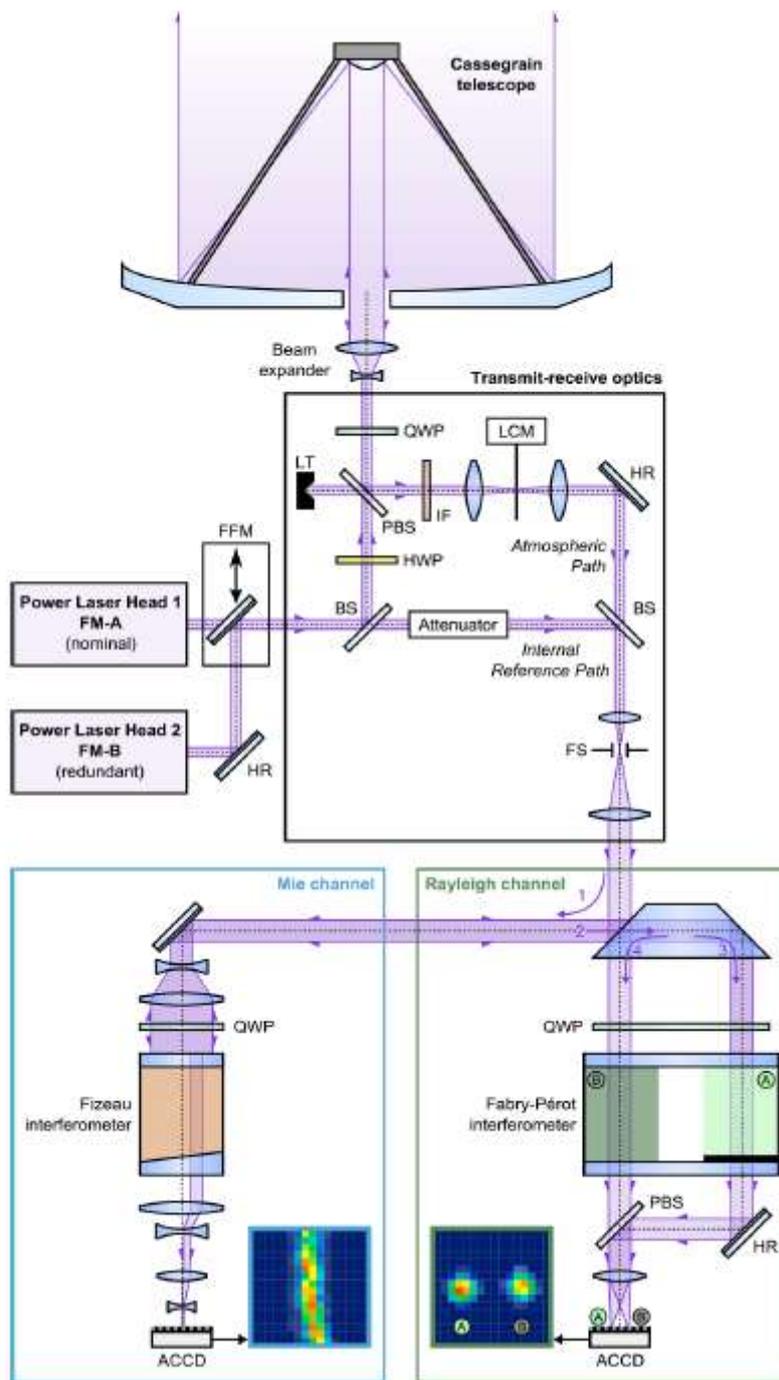


Figure 9 Schematic of the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on board Aeolus⁹

2.4.2.4 EarthCARE

EarthCARE^{9,10)}(Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer)は、ESAとJAXAの国際共同ミッションで開発された地球観測衛星で、2024年5月に打上げられた。CALIPSOの後継としてエアロゾル観測を担い、かつ雲とエアロゾルの微物理から地球の放射プロファイルをグローバルに測定し、気候モデルや数値天気予報の精度を向上させることを目的としている。このミッションには、ライダーを含めて4つの科学観測用センサが搭載されている。以下にその概要を示す。

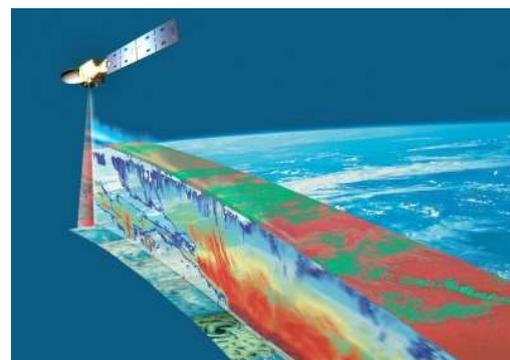


Figure 10. Observation image of EarthCARE from ESA web site.

ATLID(ATMospheric LIDar)

ATLIDは、高スペクトル解像度ライダー(HSRライダー)で、355nmの紫外線レーザーを用いて観測を行う。このセンサは、主としてエアロゾルの鉛直プロファイルを測定し、CALIPSOでは困難であった分子散乱(Rayleigh散乱)と粒子散乱(Mie散乱)の成分を分離する機能を有している。

CPR(Cloud Profiling Radar)

CPRは、94GHz(Wバンド)のドップラー雲レーダーで、雲のプロファイルと降水量を測定し、縦方向の雲粒子の動きを測定する初の衛星搭載レーダーであり、高い感度を持つ。

MSI(Multi-Spectral Imager)

MSIは、雲とエアロゾルの観測を行うための多スペクトルイメージャーで、4つの可視および近赤外線チャンネルと、3つの熱赤外線チャンネルを備えている。MSIは、ATLIDやCPRが取得した垂直プロファイルを補完するため、150km幅の広範囲観測を行う。

BBR(Broad-Band Radiometer)

BBRは、地球放射収支の測定に使用され、地球(地表もしくは上層大気)で反射された太陽光と地球から放射された熱放射を測定する。BBRは、3つの固定視野方向(前方、ナディア、後方で、10kmx10kmの範囲)で測定を行い、上部大気での放射フラックスを高精度に推定する。

次に、EarthCAREに搭載されているライダー概要を記載する。

ATLIDは、Nd:YAGの1064nmからLBOを用いて生成した355nmの紫外線波長で観測するライダーであり、光の散乱特性を利用して、大気中の雲やエアロゾルの鉛直プロファイルを高精度に測定する。上記に記載した通り、このシステムは高いスペクトル分解能を持ち、分子散乱(Rayleigh散乱)と粒子散乱(Mie散乱)を分離する。これにより、異なる大気成分の識別が可能となり、エアロゾルと雲の相互作用による放射収支の理解に役立つことが期待されている。

ATLIDのレーザーシステムは、Aeolusと同様Nd:YAGレーザーを使用しており、355nmの紫外線パル

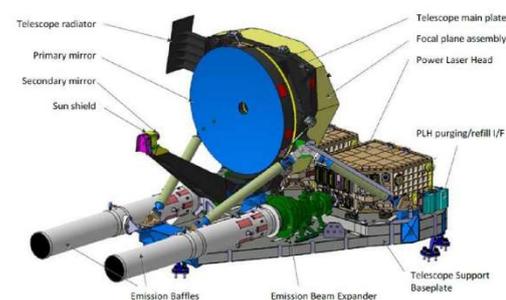


Figure 11. Illustration of The Atmospheric Lidar (ATLID) from ESA website

スを照射する。このレーザーシステムは、高安定のシードレーザーによるパルスレーザー制御を行うインジェクションシーディングを行い、非常に高い周波数安定性を維持する。狭帯域化されたレーザーパルスのエネルギーは約35 mJで、パルス幅は35 ns、パルス繰り返しは51 Hzである。

また、レーザーシステムは、Aeolusで明らかになったLICを最小限に抑える設計がされている。レーザー光学部品はAeolus初号機では採用できなかった与圧筐体内に配置し、筐体内部は乾燥空気ですべて密封されている。この設計と筐体—送信望遠鏡間をバップルで覆い、筐体照射部分から見た有視界距離を限定することで出射窓の保護を行い、宇宙環境での長期運用においても性能を安定的に維持できるよう工夫されている。

ATLIDの望遠鏡は、62 cmの口径を持つカセグレン式望遠鏡で、受信光を効率的に収集する。この望遠鏡は、収集した光を偏光ビームスプリッターに送り、その後、分子散乱(Rayleighチャンネル)と粒子散乱(Mieチャンネル)に信号を分離する分光システムに送られる。分光側のシステムは、Thales Alenia Space(フランス)が開発した高スペクトル解像度エタロン(HSRE)が使用されている。HSREは、特に分子散乱と粒子散乱を精密に分離するために設計されており、これにより、雲やエアロゾルの特性を詳細に解析する。

検出器には、高感度CCD(MCCD)が使用されている。このCCDは、Aeolus同様非常に低ノイズでの測定を可能としている。各MCCDは、異なるチャンネル(Rayleighチャンネル、Mieチャンネル、クロスポラチャンネル)に対応しており、それぞれのチャンネルからの信号処理を行う。この検出器は、地上でのデータ処理によって、高精度な鉛直プロファイルを実現する。信号の高度範囲は、地球表面から約20 kmの高度までの範囲で、およそ100 mの鉛直分解能で提供される。

EarthCAREではAeolusと異なった開発過程での対応があった。コンタミネーション管理要求である。Earth-CAREミッションでは一つの衛星に複数の観測センサが搭載される構成となっており、LICのみならず、他の観測センサから飛来するコンタミネーションからレーザーやライダー用光学素子を保護するため、各ミッション機器に対して通常用いられるものよりも一段階厳しいコンタミネーション管理要求が課されることになった。この追加対策やAeolusで明らかになったLIC対策を取込んだシステムの完成までに、おおよそ20%の追加コストが必要とされた。ESAはこれらの開発コストを負担することにより、Aeolus、EarthCAREを通じて紫外戦波長を用いたライダー開発に対して大きな技術アドバンテージを持つに至っている。

2.4.2.5 ISS-GEDI

GEDI(Global Ecosystem Dynamics Investigation)¹¹⁾は、国際宇宙ステーション(ISS)に搭載されているレーザー高度計ミッションであり、地球の森林の垂直構造を測定することを目的として、2018年12月に打ち上げられ、ISSの日本実験棟「きぼう」に設置された。概要図をFig.12に示す。

主な科学的目標は、熱帯および温帯森林における地上バイオマスの正確な推定、森林構造の変化が大気中のCO₂濃度に及ぼす影響の理解促進、さらには生態系構造が生物多様性に与える影響を評価することである。これらの目標達成のため、GEDIは3つのレーザーを搭載し、これらを同時稼働させて森林の3次元構造データを収集している。単位体積当たり得られるフットプリントの数等で評価することが想定されており、考え方として測量用に用いられているライダーと近いデータ処理が行われる。

GEDIに搭載されているレーザーシステムは、NASAゴダード宇宙飛行センターが開発したHOMER(High Output Maximum Efficiency Resonator)レーザーである^{12,13)}。レーザーの概要図をFig.13に示す。このHOMERレーザーは、波長1064nmのNd:YAGレーザーを使用し、242Hzの繰り返し周波数で動作する。パルスエネルギーは最大17mJ、パルス幅は11~13ナノ秒で、TEM₀₀モードのビーム品質を持つ。レーザーシステムは、レーザー発振器のみで設計されており、他の衛星搭載型で用いられているMOPA構成ではない。発振器のみの設計により、システム全体の効率が向上し、光学部品数を減らすことができ。送信用レーザーは、合計3台のレーザーで構成され、それぞれが地表に直径約20mのフットプリントを形成する。そのうち1つのレーザーは回折光学素子(DOE)を使用してビーム分割され、複数のビームで同時に地表をスキャンする。これにより、常時複数のレーザービームが地表に照射され、各ビームのフットプリントは直径約20m程である。ビームは、レーザーパルスの間隔ごとに横方向に600mずつずらされる。このデータ取得方式により、約4.2kmの幅を持つトラックを生成し、約60m間隔でフットプリントの中心を配置

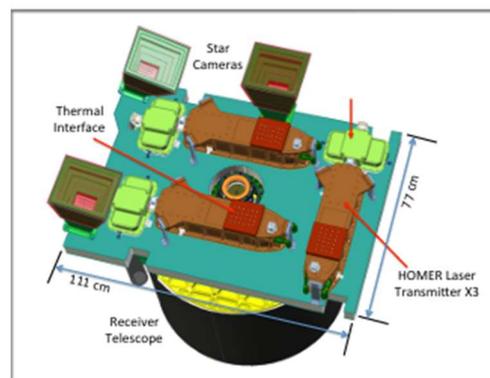


Figure 12. Outline of the GEDI

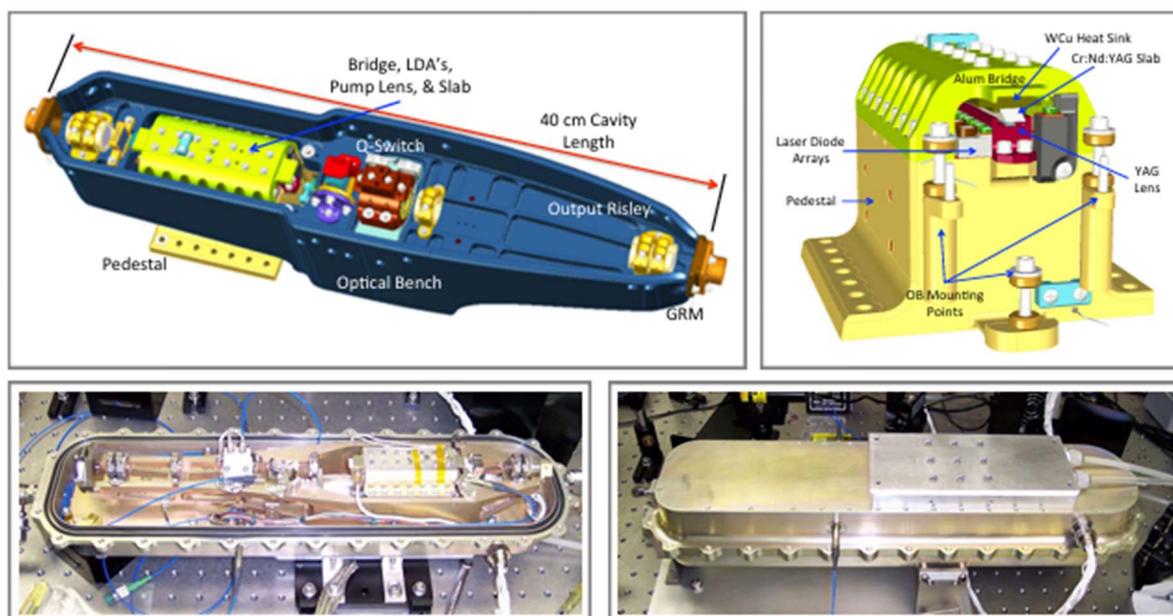


Figure 13. The HOMER laser design and TRL 6 demonstration laser

することで、単位面積当たりのレーザーフットプリント数を増やす運用が予定されている。2つのレーザーは、これにより、GEDIは広範なデータを効率的に収集する。

レーザーは、高信頼性の光学・機械設計を行い、耐振動や衝撃に備えている。特に、レーザーキャビティ内の光学部品は、アライメントに対しては熱や振動の影響を最小限に抑えるよう設計された。例えば、レーザー共振器は、40 cm の長さで構成され、熱レンズ効果を補正するために負のシリンダカルレンズを使用している。また、光学部品の取付けには、チタン製の可動マウントを用いて、光軸調整が容易に行えるようになっている。長寿命を保証するために地上実験が行われ、少なくとも 160 億ショットの評価が行われた。

提供データは、森林の炭素フラックスモデルや生物多様性の評価、さらには他のリモートセンシングデータ(例えば Landsat や MODIS)とのデータ融合に利用される。特に、Tandem-X や NISAR (NASA-ISRO 共同ミッション)、BIOMASS ミッションとの連携により、より詳細な高さとバイオマスのマッピングが目指しており、地球規模での環境モニタリング精度の向上へ寄与しようとしている。

2.4.2.6 ICESat-2

ICESat-2¹⁴⁾¹⁶⁾は2018年9月に打上げられ、2024年5月に太陽フレア対策でセーフモードに移行しているが、現在も運用中である。このミッションは、NASAが開発した地球観測衛星で、ICESatの後継として主に極域の氷床、海氷、および陸地の高度を高精度に測定する。このミッションの中核をなすのが、Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS)である。以下では、ATLASに搭載されている主要な機器、特にライダーとしてのレーザー、望遠鏡、光検出器、そして回折光学素子(Diffractive Optical Element, DOE)について記載する。

ATLASで使用されているレーザーは、Nd:YVO₄を用いた高繰返し型のQ_{sw}レーザーで、その第二高調波を観測に使用している。レーザー構成は過去の衛星搭載型と同様、発振器と増幅器の組合せによるMOPA構成である。大気観測で用いられたインジェクションによる波長狭帯域化は行わず、発振器出力鏡にVBG (Volume Bragg Grating)を用いて出力波長の制御を行っている。繰返しは10 kHzで、パルス幅は約1.3 nsである。レーザーは、回折光学素子(DOE)を使用して6つのビームに分割され、地球表面上に6つのスポットを形成する。回折するレーザーエネルギーのうち、強いビームでは48~172 μJ、弱いビームでは12~43 μJのエネルギーとなる。地上におけるレーザービームのフットプリントは、直径40cm程度になるよう24 μradのビーム拡がりを持つ。DOEを用いたビームの分割により、ATLASは3組の近接したフットプリントペアを同時に照射し、氷床や地盤面の勾配を正確に測定する。

受信システムには、口径0.8 mのカセグレン式望遠鏡が使用され、視野は83.5 μradである。この望遠鏡は、ベリリウム製主鏡と副鏡、そして屈折式のリレーレンズ後方光学系で構成され、受診した光市焦点面の光ファイバーへ集光する。望遠鏡の焦点面には、地表面に照射された6つのレーザーフットプリントからの信号が映し出され、それぞれのスポットは光ファイバーを通じて光検出器(光電子増倍管: photomultiplier tube PMT)に送られる。

光検出器として使用されているPMTは、戻り光を光子単位で検出し、200ピコ秒の精度でタイミングを記録する¹⁷⁾。(浜松ホトニクス社製PMT type R7600-300-M16)。PMTの効率は15%であり、受信フォトン検出時に立ち上がる光電子パルスの立上りエッジ検出を高精度に行い、地球表面の高度を高精度に測定する。この技術は近年自動車搭載ライダーで使用されている直接ToF計測用ライダーにおける高精度時間計測(Time to Digital converter: TDC)方式と近い原理で実施されており、検出信号強度ではなく検出タイムゲータのみを取込むことによってデータ容量の圧縮や信号処理系のリソース削減を行っている。

DOEは、レーザービームを特定のパターンに分割したり、ビームの進行方向を制御する光学素子である。レーザービームを分割するだけでなく、必要に応じてビームの強度を調整したり、光の進行方向を細かく制御することも可能である。使用されているDOEは表面に設けられた微細なパターンによって光を回折させ、光の進行方向を変えるように設計されており、1つのレーザービームに対して6分割のビームが生成される。回折により入射エネルギーのすべてを変換することは不可能であり、レーザービームの約80%が6ビームに分割されることで、20%の損失が生じる。

2023年にはICESat-2のレーザー出力のトレンドが報告された¹⁸⁾。出力波長制御用のVBGと第二高調波生成用LBOの温度制御により出力波長を制御する温度サイクルの影響で短期間の出力サイクル変化が起きているが、図に記載されている通り、年間1%~2%の減少量で運用されている¹⁸⁾。

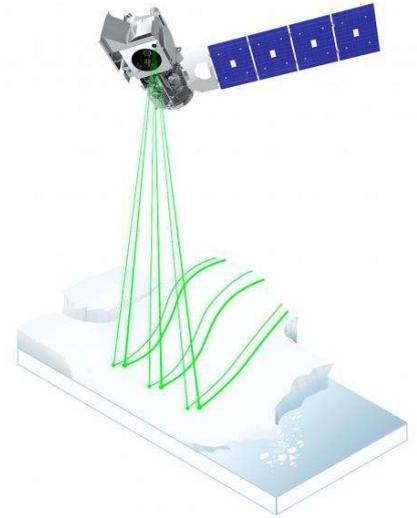


Figure 14 Mission image of ICESat-2

2.4.2.7 Gaofen-7

Gaofen-7(GF-7)は、中国が開発した初の立体視光学観測衛星であり、2019年11月に打上げられた¹⁹⁾。GF-7は、地球観測のために設計された中国初のレーザー高度計を搭載しており、主に地形測量と高精度な標高データの取得を目的としている。この衛星は、1:10,000のステレオマッピングと大規模な地理情報データの更新に使用が予定されている。

GF-7の構成をFig.15に示す。GF-7の主な搭載センサは、レーザー高度計と2つの立体視(ステレオ)カメラである。ステレオカメラは、解像度0.7 mのパンクロマチック画像を提供し、レーザー高度計システムは高精度の測距データと2 GHzのサンプリングレートのプロファイル、および解像度3.2 mのレーザーフットプリント画像を提供する。この組合せにより、地形の立体的な地図作成と光学画像の標高精度の向上が実現する。

レーザー高度計システムは、2つのマスターレーザー(ML-1 および ML-2)と2つのスレーブレーザー(SL-1および SL-2)、および2つのレーザーフットプリントカメラ(LFC)と1つのレーザー光軸監視カメラ(LOASC)で構成されている。レーザーはメインとスレーブが双方交互に照射され、いずれも3 Hzで100~180 mJでの運用が記載されている。各ビームはナディア方向から0.7°の角度で地表を照射する。地表に形成されるレーザースポットの直径は17.5 m(高度500 kmを想定)であり、隣接するスポット間隔は2.4 km、CT方向で約12.25 km離れている。受信信号が十分に強い場合、Avalanche Photodiode(APD)を使用してプロファイル波形をAD変換し、得られるデータを1パルス辺りの波形データとして処理する。LFCとLOASCのセンサは、レーザー光軸の安定性を監視し、地表におけるレーザーフットプリントの正確な位置決めを行う。

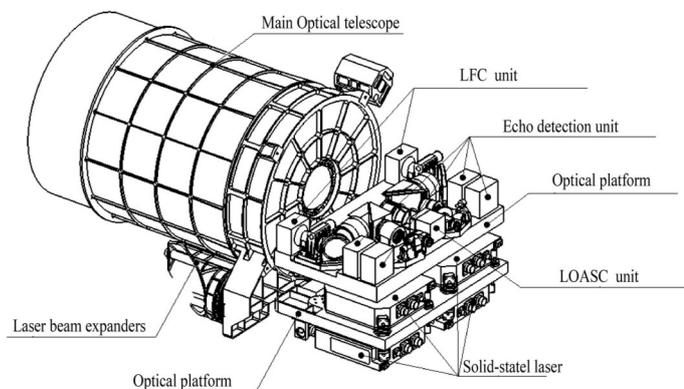


Figure 15. Outline of the GF-7 laser altimeter system¹⁹⁾.

2.4.2.8 MERLIN

MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) は、DLR (ドイツ航空宇宙センター) と CNES (フランス国立宇宙研究センター) の共同ミッションであり、大気中の地表から大気上端までのメタン気柱量測定を目的としている²⁰⁾。このミッションに搭載される IPDA (Integrated Path Differential Absorption) ライダーは、メタン吸収量が多いオン波長 (1645.5 nm ~ 1645.9 nm) と吸収量の弱いオフ長で発生するレーザーを交互に照射し、その差分で得られる光学的厚さから気柱量を計算する。衛星のデザイン図を Fig.16 に示す。

MERLIN に搭載されるレーザーは、FULAS (Future Lidar Atmospheric Sensing) プロジェクトで実証された技術を基に設計された^{21,22)}。MERLIN のレーザー送信器の基本設計案を Fig.17 に

示す。FULAS は、欧州における将来ライダーミッションのために開発された高出力レーザー技術の実証プロジェクトである。このプロジェクトは、宇宙環境でのレーザーの信頼性と性能を検証することを目的としており、特に長寿命と高精度の熱機械的安定性を実現するための技術が開発された。FULAS で培われた技術は、MERLIN や他の将来の LIDAR ミッションにおけるレーザーシステムの設計に活用されている。

MERLIN では光学素子とマウントの固定方法に対して研究が行われ、接着剤を排した光学素子のマウントへの固定方法を採用している。これにより高い安定性と精度を要求されるレーザーのインジェクションに対して実装を容易にしている。レーザー構成は他の欧州で展開したライダーと同様に、MOPA 構成を採用している。1064 nm の Nd:YAG レーザーを励起源とした、光パラメトリック発振器 (Optical Parametric Oscillator: OPO) によって 1645 nm を発生させる。この OPO は、2つの KTP 結晶を用いたリング共振器で構成され、温度制御とピエゾアクチュエータを用いて発振波長の絶対値安定化とレーザーの狭帯域化が行われる。メタン観測用レーザーのエネルギーは 9 mJ 以上で、パルス幅は 10 ns 以上、繰返しは 20 Hz である。また、スペクトル純度は 99.95% を超え、短期的な指向安定性は 100 μ rad 以下を目標としている。

MERLIN のレーザーシステムは、熱制御のために Acolus, ATLID 同様 Loop Heat Pipe (LHP) を使用し、光学ベンチ全体を均一な温度に保つよう設計されている。この設計により、衛星システムへの熱入力が増加し、温度変動が広範囲にわたってもレーザー性能と安定性を維持するような意図となっている。また、レーザーの光学マウントは、熱膨張係数が一致する材料で構成され、微小な揺動を最小限に抑えるために有機材料をほとんど使用していない。このアプローチは、特に Acolus 後継機で用いられる UV レーザーシステムにおいて大きな課題であるアウトガスを防ぐための重要な技術である。

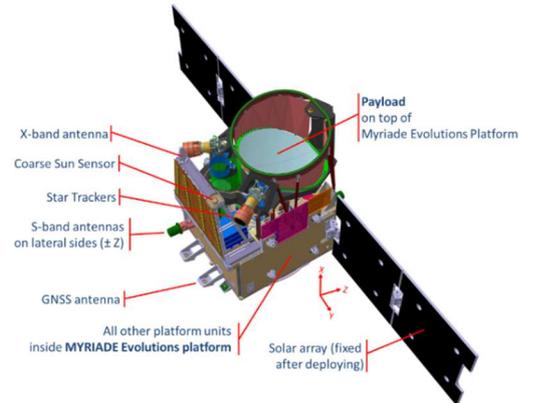


Figure 16. The MERLIN satellite²⁰⁾



Figure 17. Preliminary design of the MERLIN laser source

2.4.2.9 MOLI

MOLI (Multi-sensing Observation Lidar and Imager) は、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載されることが予定されている JAXA が開発するリモートセンシングミッションである。2011年からの初期検討を通じて2024年にプロジェクト化され、2027年度内での打上げが予定されている^{23,25)}。MOLI は、主に森林の樹冠高度および地表の標高を測定するライダーシステムと、補完的な観測を行うイメージャーを GEDI よりもコンパクトな構体に搭載している (Fig.18)。このミッションは、気候変動や森林資源の監視用途、デジタル地図の精度向上、地球観測衛星に向けたライダー要素技術の実証を果たすことを目的としている。

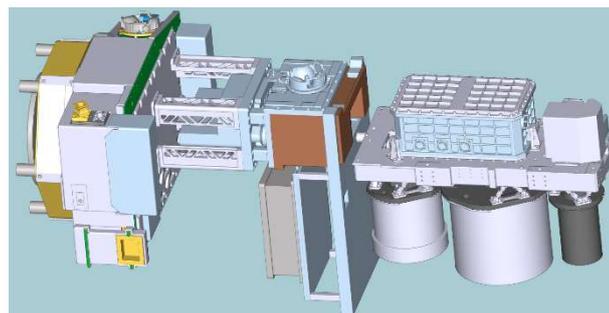


Figure 18. The mission design of MOLI

MOLI のライダーは、1064 nm の波長を持つ Qスイッチ Nd:YAG レーザーに、レーザーでも利用可能な Nd:YAG セラミックスを使用し、30 mJ のパルスエネルギーを 150 Hz の繰返し周波数で運用する。レーザービームの発散角は $62.5 \mu\text{rad}$ であり、地表に直径 25 m のフットプリントを形成する。MOPA 構成のレーザーは、励起用 LD を光ファイバーに結合し、11 cm の光発振器を端面励起して低出力 Q スイッチレーザーを生成する。発振器出力は 2 段階の増幅器によって最大 40 mJ にまで増幅可能である。Figure 19 に示す光学ベンチに構成した MOLI のレーザーシステムは、乾燥空気で密閉された与圧筐体内に配置されており、宇宙環境での長期間の運用に対応できるよう設計されている。2024年8月までに、想定される軌道環境における温度変化、振動環境、放射線環境での体制を評価し、軌道上での1年以上のレーザーショット数を室内試験で評価した。

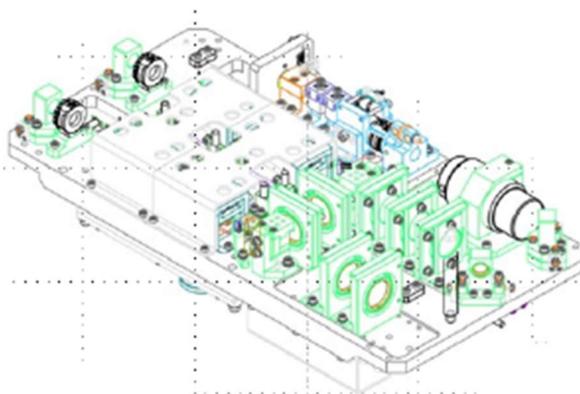


Figure 19. Preliminary design of MOLI laser source in the pressurized canister.

参考文献

- 1) J. B. Abshire, X. Sun, H. Riris, J. M. Sirota, J. F. McGarry, S. Palm, D. Yi, and P. Liiva, "Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance," *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, **32**, L21S02 (2005).
- 2) R. S. Afzal, A. W. Yu, J. L. Dallas, A. Melak, A. T. Lukemire, L. R. IZqueirido, and W. Mamakos, "The Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) Laser Transmitter," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, **13**, 511-536 (2007).
- 3) H.E.Floyd, "Qualification of the laser transmitter for the CALIPSO Aerosol lidar mission," *Proc. SPIE*, 61001,(2006).
- 4) T. Kanitz, J. Lochard, J. Marshall, P. McGoldrick, O. Lecrenier, P. Bravetti, O. Reitebuch, M. Rennie, D. Wemham, and A. Elfving, "Aeolus first light: first glimpse," *Proc. SPIE*, 11180 (2018).
- 5) O.Lux, C.Lemmerz, F.Weiler, T.Kanitz, D. Wemham, G. Rodrigues, A. Hyslop, O. Lecrenier, P.McGoldrick, F. Fabre, P. Bravetti, T. Paminello, and O. Reitebuch, "ALADIN laser frequency stability and its impact on the Aeolus wind error," *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 6305-6333 (2021).
- 6) T.WeilerKanitz,D.Wemham, M.Rennie, D. Huber, M. Schillinger, O. Saint-Pe, R. Bell, T. Paminello, and O.F.Reitebuch, "Characterization of dark current signal measurements of the ACCDs used on board the Aeolus satellite," *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 5153-5177 (2021).
- 7) U. Marksteiner, "Airborne wind lidar observations for the validation of the ADM-Aeolus instrument," TUM München, PhD thesis, 180 (2013).
- 8) ESA, ADM-Aeolus Science Report. 2008.
- 9) T. Wehr, T. Kubota, G. Tzeremes, K. Wallace, H. Nakatsuka, Y. Ohno, R. Koopman, S. Rusli, M. Kikuchi, M. Eisinger, T. Tanaka, M. Taga, P. Deghaye, E. Tomita, and D. Bemaerts, "The EarthCARE mission – science and system overview," 2023, *Atmospheric Measurement Techniques*, **16**, 3581-3608 (2023).
- 10) J.P. do Carmo, G. de Villele, K. Wallace, K. A. Lefebvre, K. Ghose, T. Kanitz, F. Chassat, B. Corselle, T. Belhadj, and P. Bravetti, "ATmospheric LIDar (ATLID): Pre-Launch Testing and Calibration of the European Space Agency Instrument That Will Measure Aerosols and Thin Clouds in the Atmosphere," *Atmosphere*, **12**, 76, (2021).
- 11) R. Dubayah, J. B. Blair, S. Goetz, L. Fatoyinbo, M. Hansen, S. Healey, M. Hoffon, G. Hurtt, J. Kellner, S. Luthcke, J. Armston, et al., "The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography," *Science of Remote Sensing*, **1**, 100002, (2020).
- 12) D.B. Coyle, D. Poullos, G.B. Clarke, R.B.Key, and P.R.Stysley, "Laser transmitter development for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar," *Proceedings of SPIE*, **9612**, 961208, (2015).
- 13) P. R. Stysley, D. B. Coyle, R. B. Kay, R. Frederickson, D. Poullos, and G. Clarke, "Long term performance of the High Output Maximum Efficiency Resonator (HOMER) laser for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar," *Optics & Laser Technology*, **68**, 67-72, (2015).
- 14) T. Markus, T. Neumann, A. Martino, W. Abdalati, K. Brunt, B. Csatho, S. Farrell, H. Fricker, A. Gardner, D. Harding, M. Jasinski, et al., "The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation," *Remote Sensing of Environment*, **190**, 260-273, (2017).
- 15) N.Sawruk, P. Bums, R. Edwards, V. Litvinovitch, and F. Hovis, "Flight Lasers Transmitter Development for Nasa Ice Topography Icesat-2 Space Mission," *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain, 2018, pp. 1837-1840
- 16) A. J. Martino, T. A. Neumann, N. T. Kurtz and D. McLennan. "ICESat-2 mission overview and early performance." *Proceedings of SPIE*, **11151**, 111510C, (2019).
- 17) G. Yang, A. J. Martino, W. Lu, J. Cavanaugh, M. Bock and M. A. Krainak, "IceSat-2 ATLAS photon-counting receiver: initial on-orbit performance," *Proceedings of SPIE* **10978**, 109780B, (2019).
- 18) A. J. Martino, J. Cavanaugh, A. Gibbons, J. E. Golder, A. Ivanoff, P. Jester, N. Kurtz, T. Neumann, A. Pingel, and C. SwensonJohn, "ICESat-2/ATLAS at 4 Years: Instrument Performance and Projected Life," *Proceedings of SPIE*, **12512**, 125120A, (2023).
- 19) J. XieHuang, R. Liu, C. Zhao, J. Dai, T. Jin, F. Mo, Y. Zhen, S. Xi, H. Tang, X. Dou and C. YangGenhua, "Design and Data Processing of China's First Spaceborne Laser Altimeter System for Earth Observation: GaoFen-7," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **13**, 1034-1044, (2020).

- 20) M.Alpers, P.Bousquet, G.Ehret, A.Friker, P.Landiech, G.Rougier, I.Usandizaga and P.Barsch, “MERLIN: The Franco-German mission to perform innovative spaceborne LIDAR measurements of atmospheric methane,” Proceedings of International Laser Radar Conference, Landshut, Germany (2024).
- 21) J.Ammersbach, T.Heider, H. Huber, J. Luttmann, M. Reiter, R. Versteeg, H. D. Hoffmann and B. Gronloh, “MERLIN laser transmitter for space borne methane sensing,”. Proceedings of International Laser Radar Conference, Landshut, Germany (2024).
- 22) S. Hahn, J. Luttmann, D.Hoffmann, and M. Bode, “FULAS: high energy laser source for future LIDAR applications,” Proceedings of SPIE, **11180**, 111805F (2018).
- 23) 浅井和弘、境澤大亮、水谷耕平、西澤智明, “宇宙から植生を観測するライダーミッションMOLI,” レーザセンシング学会誌, 1(2), 45-54, (2020).
- 24) T.Imai, D. Sakaizawa, N. T. Trung, R. Mitsuhashi, Y. Sawada, M. Hayashi, T. Kimura, K. Asai, and Y. Hirata, “Multi-footprint Observation Lidar and Imager (MOLI) to measure canopy heights from International space station,” Journal of The remote sensing society of Japan, **40**(1), 20-25 (2020).
- 25) D. Sakaizawa, Y. Okawa, R. Mitsuhashi, Y. Sawada, T. Imai, T. Sumita, “Research and development for the ISS-based lidar mission MOLI,” IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, **1**.

(境澤大亮)

3. 日本の将来衛星搭載ライダー案

3.1 コヒーレントドップラー風ライダー

3.1.1 はじめに

風は、圧力、気温、湿度等のように大気状態を表す基本的かつ重要な気象変数の1つである。地衡風平衡が成り立つ領域では、風から他の気象変数に関する情報が得られることから、風は、雲対流、降水現象、大気物理現象、大気循環の総合作用等を理解するために必要不可欠である¹⁾。全球・領域モデルによる数値予報(Numerical Weather Prediction, 以下NWP)、環境監視や気候変動予測の精度向上のためには、データ品質の高い風データが必要である。様々な風観測が利用されているが、ゾンデやウインドプロファイラーなどは高精度で鉛直分布を観測できるが、陸域に局所的に存在している。現在の衛星観測システムは、風観測に比べて、温度や水蒸気に関連した観測に偏重している。全球風観測の難しさは、3次元構造の取得と風観測精度にある。本章では、日本独自の衛星搭載ドップラー風ライダーのミッションの概要、目的、衛星搭載ドップラー風ライダーの仕様、観測要求を述べる。続いて、衛星搭載ドップラー風ライダーの実現によって数値予報へ期待される効果、アウトカム、実利用の可能性について述べる。

3.1.2 衛星による風観測

1980年代に導入されたデータ同化技術、1990年代の変分法の導入による衛星観測データの高度利用により、この20年で数値予報は大きな発展を遂げた。地球規模で様々なデータが取得できる地球観測衛星システムの重要性は増している。現在の衛星観測システムは、風観測に比べて温度および水蒸気関連等の測定に偏っている²⁾。世界気象機関(World Meteorological Organization: WMO)は、全球風観測で求められる観測要求精度を、世界中の数値予報専門家からの観測要求として『WMO Observing Systems Capability Analysis and Review (OSCAR) / Requirements database』(以下WMO-OSCARの観測要求)を、WMOのホームページ上に公開している³⁾。Table 1 に風の観測要求を示す。現在の全球風観測システムはこれらの要件を必ずしも満たしていない。

Table 1 WMO observing systems capability analysis and review requirements.

	精度[m/s]			水平分解能[km]			鉛直分解能[km]			観測頻度[h]		
	G	B	T	G	B	T	G	B	T	G	B	T
成層圏(下層)	1	3	5	15	100	500	0.5	1	3	1	6	12
対流圏(上層)	1	3	8	15	100	500	0.5	1	3	1	6	12
対流圏(下層)	1	3	5	15	100	500	0.5	1	3	1	6	12

Goal (G): 理想値, Breakthrough (B): 顕著な改善が期待, Threshold (T): 改善が期待

近年の衛星風観測は、複数の観測チャンネルを用いて大気を追跡することで実現している(衛星大気追跡風AMV)。AMVは、広域・高頻度で観測できるが高度推定が悪い、高度分解能が十分ではない、観測精度が十分ではない、晴天・乾燥域や中層は算出しにくい、といった課題がある。静止気象衛星に搭載したハイパースペクトル赤外サウンダからAMVを算出することにより、これらの課題がある程度改善することが期待されている。ただし、パッシングセンサによる限界があり、さらに高精度・高鉛直解像の観測も必要である。レーザを用いるドップラー風ライダー(Doppler Wind Lidar, 以下DWL)は、衛星軌道に沿った狭い範囲の観測で

はあるものの、高精度かつ高い分解能で風の高度分布が得られる能動型光センサーである。DWLは、現在の衛星観測システムの問題点を解決する有望な手法の一つである。

欧州宇宙機関(以下ESA)は、2018年8月にDWLを搭載した風観測衛星Aeolus(以下Aeolus)を打ち上げた³⁴⁾。Aeolusは、下部対流圏はエアロゾルを、中部対流圏中部から下部成層圏下部までは大気分子を、それぞれ観測対象として、全球の水平視線方向風速の高度分布の取得に成功した。Aeolusによって観測された水平視線方向風速の高度分布の数値予報への利用は、運用中の受動型センサーによる風観測複数機に匹敵するほどの改善度をもたらすことを明らかにし、風速の高度分布の全球観測の重要性を示した。

日本では、1990年代後半からこれまで宇宙ステーションや単独衛星に搭載し、対流圏の風の高度分布を観測するコヒーレントドップラー風ライダー(Coherent Doppler Wind Lidar, CDWL)が、技術的な観点と数値予報や科学的な観点から、ライダー研究者、気象業務機関関係者、そして科学ユーザによって議論と検討が行われてきている⁹⁾。

3.1.3 ミッションの目的

日本独自の衛星搭載CDWLの主な目的は、宇宙から風の高度分布を取得するためのドップラー風ライダー技術を実証することと、4次元ベクトル風(高度、東西風(u-成分)、南北風(v-成分)、時間)の予測精度を向上することである。このミッションは、最低3年の耐用年数にわたって、衛星の進行方向に対し直角方向に赤外線レーザー光を射出し、その視線方向に沿った全球の風の高度分布を提供する。宇宙から観測された風のデータはNWPシステムでデータ同化することにより、4次元ベクトル風の分析と予測を改善することを1つめ目のミッション目的としている。

2つめ目のミッション目的は、気候モデルの評価に適したデータセットを提供することである。大気物理とエネルギー、降水過程等の水循環、黄砂や火山灰等のエアロゾルや化学物質等の大気微量成分の全球輸送と循環の理解を深化させるためには、信頼性の高い風のデータセットが必要である。本ミッションは、気候変動の定量化、気候モデルの評価と改善、気候変動に関連するプロセス研究を推進するために必要なデータを提供する。

本ミッションは、

- NWP解析と3Dベクトル風場の予測の向上
- 台風の進路や線状降水帯等の予測の向上
- 鉛直ウィンドシアーのような甚大な災害をもちく風現象予測の向上
- 風の高度分布の提供による熱帯域の大気物理現象や降水過程のモデリングと予測の向上
- 気候モデルや大気輸送モデルに適した風のデータセットの提供
- 雲・エアロゾルの4次元高度分布の提供による大気追跡風の風観測精度の検証と推定高度の向上
- 雲・エアロゾルの光学的特性の空間データと光学的厚さの提供による大気放射収支の理解の深化
- 宇宙ステーション搭載植生ライダーの宇宙用ライダーの研究開発知見の継承と高度化

を目的とする。

3.1.4 衛星搭載ドップラー風ライダーの仕様

日本では、前述の通り、1990年代後半から衛星搭載CDWLが、技術的な観点と数値予報や科学的な観

点から、ライダー研究者、気象業務機関関係者、そして科学ユーザによって議論と検討が行われ、その仕様が報告書としてまとめられてきた。2020年度には、JAXAが設置した「地球観測に関する科学アドバイザリ委員会・衛星搭載風ライダー分科会」のもとで議論と検討が行われ、その仕様がまとめられている。以下に、衛星とセンサーであるCDWLについて述べる。

衛星は、日本独自の超低高度運用技術を有する超低高度衛星とし、十分な打上げ機会を得ることを目的としてイプシロンロケットによる打上げとする。衛星搭載DWLの衛星軌道に対するユーザーの要件は、衛星が太陽同期で、ほぼ全球をカバーする領域で風観測を実現出来ることである。これは、約90分で地球を周回し、1日あたり16周回行うことで全球の風観測を実現することを意味する。衛星搭載ドップラー風ライダーの風速測定の正確な周回タイミングに対して、特別な要件はないが、風プロダクトの測定精度と衛星軌道の安定性に対するユーザー要求は高いため、衛星軌道の選択に反映される。衛星の発電量から、衛星軌道は、太陽同期Dawn-Duskの極軌道、回帰日数7日、高度200–300 km とする。Table 2に衛星の仕様を示す。搭載するセンサーのDWLは、1990年代後半から国際宇宙ステーション(ISS)搭載DWLの実現検討からこれまで、着実に積み上げられてきた技術と、日本初となる宇宙用ライダーISS搭載植生ライダー(Multi-sensing Observation Lidar and Imager, 以下MOLI)の研究開発の技術を継承する日本独自のCDWLである。搭載するセンサーの技術的な特徴は、

- 宇宙用ライダーの光源として、単一周波数での発振し、高いパルスエネルギーを射出可能な近赤外パルスレーザ光源技術の高度化
- 宇宙用レーザ技術において近赤外から中赤外波長帯の開拓
- 衛星搭載向け高出力パルスレーザの排熱技術の確立と高度化
- 光アクティブセンサーに対する熱歪み/機械的歪み抑止技術の確立と高度化
- 超低高度衛星技術の採用により、アクティブセンサーの要求仕様を緩和する野心的なライダー
- Aeolusは、背景光雑音に弱いものに対し、日照領域においても風観測が可能のため、観測域の自由度を飛躍的な向上
- Aeolusは口径の大きな望遠鏡が使用しているのに対し、口径の小さな望遠鏡が使用できるため、衛星への搭載性、複数方向観測の実現性において優位性をもつ
- Aeolusは、バイアス(約1m/s)・測定精度(レイリーチャンネル:6-7 m/s; ミーチャンネル3-4 m/s)と大きいものに対し、本提案のCDWLの観測精度はエアロゾル濃度に依存するけれども、バイアス(約<0.2m/s)、測定精度(1-2m/s)と高い測定精度で風観測を実現
- 赤外サウンダをはじめAMVでは高度推定において課題があるため、高い精度で高度を決定可能

である。

使用する光源は、近赤外(波長1.5~2 μ m)レーザを用いる。WMO-OSCARの観測要求、これまでの行われた検討から、水平分解能は100 km以下、高度0 - 2 kmに対して高度分解能0.5 km以下、高度2 - 12 kmに対して高度分解能1km以下とする。Tables 3と4に衛星搭載CDWLの仕様と生成するプロダクトをそれぞれ示す。

Table 2 Specifications of satellite

衛星軌道	太陽同期 Dawn-Dusk 軌道
衛星高度	300-400 km (平均)
周期	約90分
衛星軌道傾斜角	97.8 度 (極軌道平均)
赤道通過地方太陽時	18:00(赤道を南から北へ通過)
回帰	7日
搭載機器	コヒーレントドップラー風ライダー

Table 3 Specifications of future space-based coherent Doppler wind lidar

プロダクト	視線方向風速	
観測範囲	全球	
観測頻度	衛星軌道に沿って連続観測	
水平解像度(1観測)	100 km以下	
水平解像度(1測定)	3 km以下	
垂直観測範囲	大気境界層: 0-2 km 対流圏: 2-12 km	
レーザー発振波長 ^{注意1}	1.55 μm	2.05 μm
レーザー出力 ^{注意1}	7.5 W (50 mJ/pulse x 150 Hz)	5.4 W (90 mJ/pulse x 2 x 30 Hz)
受光望遠鏡口径 ^{注意1}	0.7 m	0.6 m
総合受信効率 ^{注意1,2}	0.06	0.04
レーザー射出方位角	進行方向に対し90°	
レーザー射出オフナディア角	35°	
垂直解像度	大気境界層: 0.5 km以下	対流圏: 1.0 km以下
水平視線風速観測精度	大気境界層: 1.0 m/s以下	対流圏: 2.0 m/s以下
重量	< 400 kg (TBD)	
消費電力	< 800 W (TBD)	
運用期間	3年(TBD)	

注意1 1.5-と2- μm DWLでシステム検討

注意2 光ヘテロダイン検波効率, リレー光学系光学効率, 光検出器量子効率を含む.

Table 4 Summary of future space-based coherent Doppler wind lidar data products.

標準プロダクト	水平視線方向風速
研究プロダクト	雲・エアロゾル識別
	減衰付後方散乱係数
	エアロゾルの光学特性
	雲の光学特性
高次研究プロダクト	乱気流情報
	光学的厚さ
	静止気象衛星との複合エアロゾルプロダクト 赤外サウンダー他大気追跡風との複合風プロダクト

3.1.5 衛星搭載ドップラー風ライダーの疑似風データ利用による数値予報へのインパクト評価

将来の衛星搭載コヒーレントDWLが実運用された際のNWPへのインパクトを評価するために、情報通信研究機構で開発された衛星搭載ライダーシミュレータ(以下、ライダーシミュレータ)のシミュレーション結果を用いてデータ同化実験を実施する⁶⁸⁾。ライダーシミュレータは、衛星やDWLシステムパラメータを設定するシステムモジュール、気象場やエアロゾル場を入力として与える疑似真値場モジュール、受信電力、信号対雑音比、視線方向風速、風速誤差を出力としてシミュレートするシミュレーションモジュールから構成される。ライダーシミュレータの出力結果は、気象研究所(以下、気象研)において開発された観測システムシミュレーション実験(OSSE: Observing System Simulation Experiment)に疑似衛星風データとして入力され、インパクト評価が行われる。インパクト評価は、気象場とエアロゾル場を統合的に取り扱うために、気象研において開発されたSensitivity Observing System Experiment(SOSE)^{9,10)}によって計算された気象場とModel of Aerosol Species IN the Global Atmosphere(MASINGAR)¹¹⁾によって計算されたエアロゾルデータをデータ同化実験によって評価が行われた。データ同化実験のために作成された期間は、2018年1月1日から1月31日までの1ヶ月と2018年8月1日から8月31日までの1ヶ月である。本報告書では、2018年8月について述べる。

ライダーシミュレータによるシミュレーション実験は、表2(a)と(b)に示されたパラメータを用いて実行された。シミュレーション実験では、疑似衛星風データの鉛直解像度は、下層3 kmまでは0.5 km、8 kmまでは1 km、12 kmまでは2 kmである。水平解像度は、いずれの疑似衛星風データも約50 kmである。Figure 1に、2018年8月の1.5- μm DWLと2- μm DWLによる疑似衛星風データの緯度・高度別利用数を示す。いずれの実験において、対流圏下層から上層まで、各緯度帯とも全球域的にデータが利用されている。熱帯付近に利用データ高度のピークのひとつが見られるが、全体としては夏半球側寄りにピークがシフトしている。最後に、レーザ光の波長の違いについて述べる。疑似衛星風データの利用数は大きな差は見られないものの、やや対流圏下層において2- μm DWLよりも1.5- μm DWLの利用数のほうが多い。この違いは、レーザの積算ショット数の違いに起因していると考えられる。

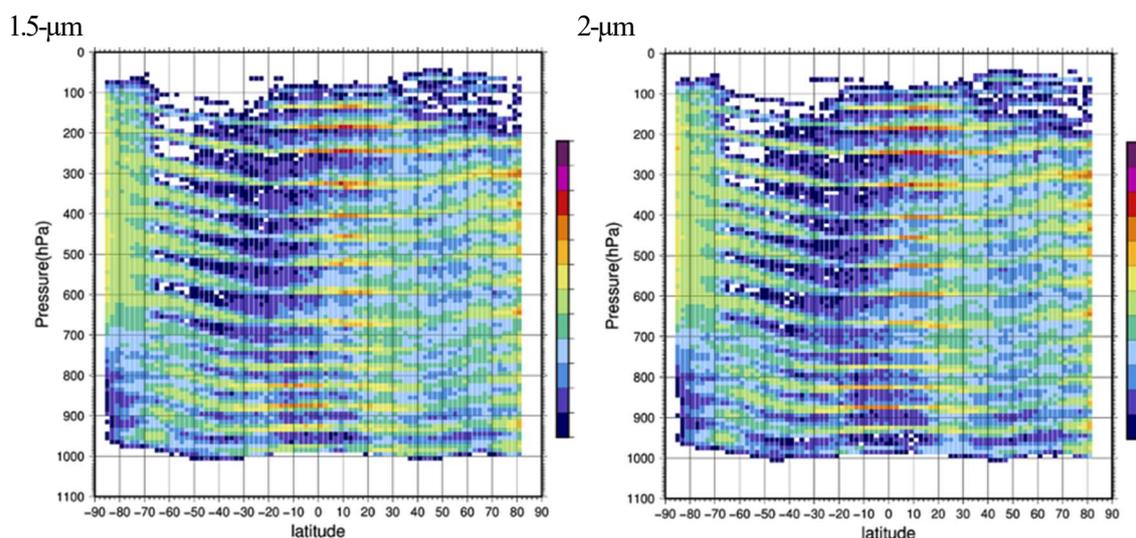


Figure 1 Accumulated number of DWL in 10 hPa pressure bins and 2° latitude bins over one month: (left panel) 1.5- and (right panel) DWLs used in assimilation after QC for the August experiments.

NWPの予測精度について述べる。NWPの予測精度の改善度を評価するために、疑似真値場を参照値とした二乗平均平方根誤差(Root mean Squared Error; RMSE)の減少率を調査した。Figure 2に、検証期間2018年

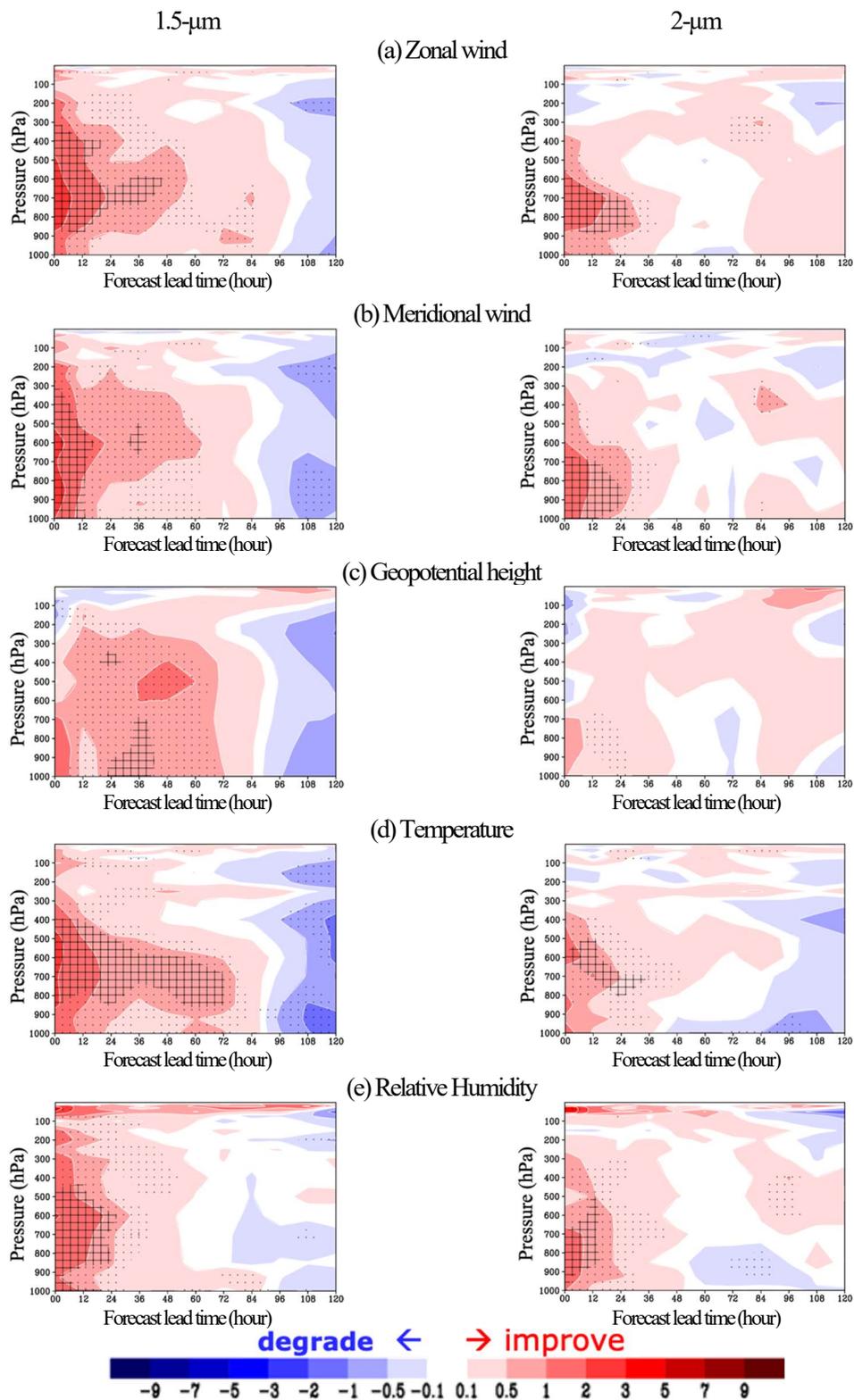


Figure 2 Relative forecast error reduction (%) of five meteorological elements as a function of forecasts up to 120 h for (left column) 1.5- and (right column) 2- μ m DWLs for the August experiments: (a) Zonal wind, (b) Meridional wind, (c) Geopotential height, (d) Temperature, and (e) Relative Humidity. X- and Y-axes are forecast lead time range (hour) and pressure (hPa). Red and blue colors show “improve” and “degrade”. Root-Mean-Square (RMS) forecast error reduction (%) is defined by $100 \times \frac{RMS_{ctrl} - RMS_{test}}{RMS_{ctrl}}$, where “test” and “ctrl” show the data assimilation with DWL and without DWL.

8月の東西風速に対する全球平均値の減少率を示す。暖色系が改善, 寒色系が改悪である。要素は全て東西風速, 検証期間は2018年8月である。対流圏中下層では, 予報初期段階で最大1~3%予測精度が向上している。この実験では, 1.5- μm DWLの改善率は, 2- μm DWLよりも高い傾向にある。対流圏上層では, 予報初期においてやや改悪と改善が見られる。他の気象要素も概ね同様の傾向を示している。

Figure 3に予測時間に対する台風の進路予測誤差を示す。検証期間は2018年8月である。いずれの実験結果(赤線)もコントロール実験(青線)よりも進路予測誤差が小さくなっている。1.5- μm DWLでは予測時間2日以降で有意な改善がみられないものの改善がみられる, 2- μm DWLでは予測時間2~3日以降で有意な改善がみられる。これらの結果から, 両DWLの疑似衛星風データともに台風の進路予測精度改善に効果があること示されている。DWLの疑似衛星風データを用いた台風の進路予測の実験において, 台風の進路予測の改善幅と, 全球平均または熱帯・北半球平均の各気象要素予測精度の改善幅の間に, 相関が見られなかったことから, DWLの疑似衛星風データが, 台風が存在する環境場の予測精度が平均的に改善するだけでなく, 台風近傍でデータ同化されることで, 台風の予測位置を修正する狭域的効果をもたらす可能性がある。

最後に, 気象庁全球解析システム相当の実験システムを用いて, 日本で打ち上げが検討されているDWL衛星による疑似衛星風データのNWPへのインパクト評価が行われた。評価実験の結果, 予報の初期段階の対流圏上層においてやや改悪~改善となったものの, 対流圏中下層では予報初期を中心に東西風速などの予測精度が改善し, NWPの予測精度向上に効果があることが確認された。台風の進路予測の実験では, いずれの改善が認められ, 予測時間2~3日以降で有意な改善となった。

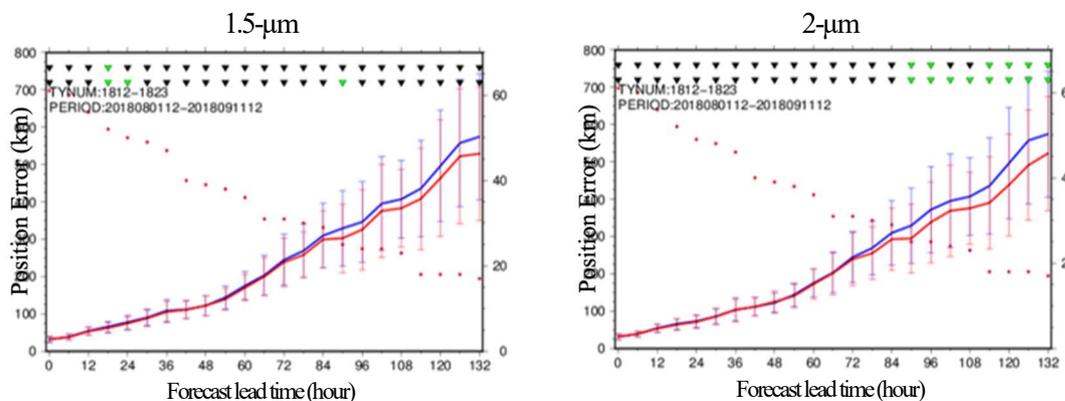


Figure 3 Position error (km) of the center of tropical cyclones over the Pacific Ocean in August 2018 as a function of forecast lead time up to 120 h for (left panel) 1.5- and (right panel) 2- μm DWLs. Red and blue lines show the position error for with and without DWLs, respectively. Closed circle are the sample number shown at the right axis.

3.1.6 エアロゾル・雲プロダクト

本ミッションの2 つめ目のミッション目的は, 気候モデルの評価に適したデータセットを提供することである。DWLにより測定された近赤外波長域での減衰付き後方散乱係数(β_{obs})を用いた, エアロゾル・雲プロダクトを推定する。単波長測定(偏光測定無し)が想定されていることから, この想定の下で解析手法の検討を進め

ており、推定プロダクトは、

- エアロゾル・雲識別子の高度分布
- エアロゾル・雲の後方散乱係数と消散係数の高度値の分布
- エアロゾル光学的厚さ

である。

エアロゾル・雲識別子の高度分布は、 β_{obs} に対するエアロゾル・雲の関係(値の大小など)を利用して雲層とエアロゾル層を分ける手法がこれまでに開発されてきており、地上・衛星などの様々なライダーデータに活用されている¹²⁻¹⁴⁾。よって、これら技術を応用することでエアロゾル・雲層識別が可能である。また、地面や海面からの強い後方散乱信号を利用した地表面検出、エアロゾルをトレーサーとした境界層高度の推定も検討されている。エアロゾル・雲の後方散乱係数と消散係数の高度値の分布は、Fernald法¹⁵⁾の適用を検討している。ここでは、エアロゾルおよび雲の消散係数・後方散乱係数比(ライダー比)をどのように設定するが重要な課題である。エアロゾル光学的厚さは、太陽光を光源としたイメージャー等のパッシブセンサーとは異なり、夜間も推定できる点がライダー観測の利点となる。推定された消散係数の高度積分により算出することは可能だが、別のアプローチとして地表面や海面からの減衰付き後方散乱係数を用いた手法が検討されている。ここでは、地表面や海面の反射率をどのように設定するかが課題である。この手法の導入の利点として、エアロゾル・雲の消散係数から推定された光学的厚さも用いることで、消散係数の高度分布と気柱平均でのライダー比も推定することができるため、より不確実性の低いプロダクト推定が可能となる。上記プロダクトを推定するアルゴリズムの開発が、全球エアロゾル輸送モデルを用いた近赤外波長での減衰付き後方散乱係数のシミュレーションデータを用いて進められている。また、本解析の拡張として、偏光測定チャンネルが付加された場合の推定プロダクトに関する検討も進められている。粒子の球形・非球形性に鋭敏な偏光解消度データを利用した鉱物ダスト粒子の抽出^{16,17)}や雲粒子タイプ識別^{18,19)}が先行研究で行われている。偏光解消度の付加はエアロゾル・雲の光学・微物理特性に関する情報の大幅な増大が見込めることから、その測定機能の付加が期待される。

3.1.7アウトカム

本ミッションの目的は、宇宙から視線方向に沿った全球の風の高度分布を提供し、観測された風のデータをNWPにデータ同化することにより、3次元ベクトル風の分析と予測を改善すること、気候モデルの評価に適した風のデータセットを提供することである。本ミッションでは、予報時間120時間先までの3次元ベクトル風の予測を改善するだけでなく、その他の気象要素も全球で予測改善されることで、以下のアウトカムが期待される:

- 観測精度が担保された全球4次元風マップ(例えばGSMaPのような)が作成され、風データを必要とするステークホルダーが、リアルタイムに風データを利用できるようになる
- 地上や気象衛星から得られる気象データとの融合により線降水帯等に伴う集中豪雨の予測精度が向上し、避難の判断がしやすくなるようになる。
- 台風の進路の予測誤差を向上させることで、避難判断、風雨災害がしやすくなる。
- 黄砂、温暖化物質、越境汚染物質等の輸送予測精度の向上により、アレルギーや感染症等、様々な疾患に対するリスク低減が期待され、健康被害を受ける機会が減る
- 極域における気候変動研究、大気-海洋結合研究への寄与が期待され、極域における新たな産業の創

出につながる

- 短期・長期の気象変化に対する農作物の生育・出荷量, 再生可能エネルギーの効率的な運用の分析が可能となる(SDGs 1.2: 食料需給予測と貧困, SDGs 3.6: 健康と平和, SDGs 7:エネルギー).
- 衛星データを解析する人材の育成が促進され, デジタル人材数やデータサイエンティスト数が増加する.

3.1.8 実利用への展開

2020年6月30日に閣議設定された『宇宙基本計画』では, 日本の宇宙産業を持続的に発展させていくために, 宇宙を推進力とする経済的発展が述べられている. Beyond 5Gや6G, AI, IoT, 量子暗号等の革新的な技術の導入や“ニュースペース”と呼ばれるベンチャー企業の新規参入を背景に, これまでのように単に衛星データを提供するだけではなく, 地上データ等の組合せによって, 様々な分野における社会課題を解決するためのソリューションの提供など, これまでに無かったサービスや新しい価値の創造が求められている.

これから迎えるBeyond 5G・6G時代は, 信頼性のある情報通信ネットワークの構築・普及とともに, Cyber Physical Systemエミュレータと機器有機的に接続され, 様々なシステムがセキュアに制御することが可能となる時代とされている. 宇宙から全球の風の高度分布が提供されることで実現するアウトカムは, さらに, デジタルツインによる衛星風データをリアルタイムに提供することを強く促進し, 我が国のデジタルトランスフォーメーションによる国民生活および経済活動の活性化へ波及すると期待される. また, 衛星風データをデータベースすることにより, その統計量をエビデンスとして利用できるようになる. リアルタイム風データとレコード風データにより, 以下の実利用への展開が期待される:

- 航空路や航路の安全, 最適な航路選定による燃料の削減が期待される等, 航空ビジネス, 海運ビジネス, 農業ビジネスにおいて衛星データの利活用が促進され, 再生可能なエネルギー産業や宇宙ビジネス産業の創出
- 黄砂予報や航空路火山灰情報や他の衛星データとの複合利用により, 黄砂や降灰の予測精度を向上させることで, 健康被害の低減やヘルスケア産業の創出
- 雲対流と大規模大気力学場の相互作用についてその理解が深化, 熱帯気象の予測が向上し, 気候変動の影響把握に基づく農業, 林業, 水産業の計画的な生産活動
- 全球の雲・エアロゾルの分布観測により気候変動予測の予測精度が向上され, 気候変動の影響把握に基づく行動が促進される, ESG投資 (Environmental, Social and Governance 投資)の促進

3.1.9 まとめ

本節では, 衛星による風観測, ミッション目的, 期待される科学的成果, 衛星搭載DWLの仕様, 数値予報へのインパクト評価, アウトカム, 実利用の展開の観点から衛星搭載DWLについて報告を行った. ESAによって2018年8月に打ち上げられた衛星搭載DWLAcolus は, 2023年4月に風観測の定常運用を終え, 7月に地球へ再突入し全ての運用を終えた. Acolus は, 全球の風観測が数値予報に非常に大きな効果があることや大気力学分野を理解する上で重要であることを示した. 現在, 日本では, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心として, 気象庁気象研究所, 大学, 国立研究機関の学術研究機関によって, 技術的および科学的観点から日本独自の衛星搭載DWLの検討が進められている. また, 衛星データの利用を促進するために, 実利用の観点から民間企業との協働による宇宙ビジネスの検討も行われている. 日本独自の衛星搭載CDWLの実現は, 全球風データ提供による数値予報精度の向上, 雲・エアロゾルの全球分布の提供による気候モデルや大気輸送モデル等の予測精度向上が期待されるだけでなく, 将来の衛星観測システムと

の融合によるデータ品質が担保される全球4次元衛星風データの提供が期待される。これにより、さまざまな職種の民間企業によるデータ利用が進み、新たな価値が創出や、我が国の宇宙ビジネスの創出と発展へ貢献出来ると期待される。

全球の風観測は、気象庁、欧州中期予報センター(ECMWF)、アメリカ海洋大気庁(NOAA)をはじめ、各気象機関において、その重要を増している。ESAは、現在風観測を継続するAeolus 後継機の検討を進めている。JAXAは、将来の衛星風観測のあり方についてNASA、ESAと協議を行っている。日本独自の衛星搭載ドップラー風ライダーを2030年代に実現するために、Aeolus 後継機との衛星コンステレーションやNASAとの共同開発等の国際協力を念頭に置きながら、精力的に研究開発を進めていく。

引用文献

- 1) W. E. Baker, R. Atlas, C. Cardinali, A. Clement, G. D. Emmitt, B. M. Gentry, R. M. Hardesty, E. Källén, M. J. Kavaya, R. Langland, Z. Ma, M. Masutani, W. McCarty, R. Bradley Pierce, Z. Pu, L. P. Riishøjgaard, J. Ryan, S. Tucker, M. Weissmann, and J. G. Yoe, "Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system," *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **95**(4), 543-564 (2014).
- 2) WMO: "Observing Systems Capability Analysis and Review", Available online at <https://space.oscar.wmo.int/observingrequirements> (Accessed 30 October 2020).
- 3) ESA, "Atmospheric dynamics mission", Mission Selection Rep. ESA SP-1233(4) (1999).
- 4) A. Stoffelen, J. Pailleux, E. Källén, M. J. Vaughan, L. Isaksen, P. Flamant, W. Wergen, E. Andersson, H. Schyberg, A. Culoma, R. Meynart, M. Endemann, and P. Ingmann, "The Atmospheric Dynamics Mission for global wind field measurement," *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **86**(1), 73-87 (2005).
- 5) T. Iwasaki T., "Science plan for ISS-borne coherent Doppler wind lidar measurement," Advanced Earth Science and Technology Organization (in Japanese) (1999).
- 6) S. Ishii, P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y. Satoh, T. Kubota, D. Sakaizawa, R. Oki, K. Okamoto, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, T. Maki, K. Yamashita, T. Nishizawa, M. Satoh, and T. Iwasaki, "Feasibility Study for Future Space-Borne Coherent Doppler Wind Lidar, Part 1: Instrumental Overview for Global Wind Profile Observation," *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 301-317 (2017).
- 7) P. Baron, S. Ishii, K. Okamoto, K. Gamo, K. Mizutani, C. Takahashi, T. Itabe, T. Iwasaki, T. Maki, R. Oki, S. Ochiai, D. Sakaizawa, M. Satoh, Y. Satoh, T. Tanaka, and M. Yasui, "Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler Wind Lidar, Part 2: Measurement simulation algorithms and retrieval error characterization," *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 319-342 (2017).
- 8) K. Okamoto, T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, K. Gamo, T. Y. Tanaka, K. Yamashita, T. Kubota, "Feasibility Study for Future Space-Borne Coherent Doppler Wind Lidar, Part 3: Impact Assessment Using Sensitivity Observing System Simulation Experiments," *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 179-199 (2018).
- 9) G.-J. Marseille, A. Stoffelen, and J. Barkmeijter, "Sensitivity observing system experiment (SOSE) - a new effective NWP-based tool in designing the global observing system," *Tellus*, **60A**, 216-233 (2008).
- 10) T. Ishibashi, "Observing system simulation experiments with multiple methods," *Proceedings of SPIE*, 9265, 926508 (2014).
- 11) T. Y. Tanaka, and M. Chiba, "Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR," *J. Meteor. Soc. Jap.*, **83A**, 255-278 (2005).
- 12) H. Okamoto, T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, S. Emori, A. Kamei, and T. Nakajima, "Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar Midlatitude case study during the MR01/K02 cruise of the research vessel Mirai," *J. Geophys. Res.*, **112**, D08216, doi:10.1029/2006JD007628, 2007.
- 13) Y. Hagihara, H. Okamoto, and R. Yoshida, "Development of combined CloudSat/CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution," *J. Geophys. Res.*, **115**, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344, 2010.
- 14) Z. Liu, J. Kar, S. Zeng, J. Tackett, and M. Vaughan, M. Avery, J. Pelon, B. Getzewich, K.-P. Lee, B. Magill, P. Lucker, C. Trepte, and D. Winker, "Discriminating between clouds and aerosols in the CALIOP version 4.1 data products," *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 703-734, 2019.
- 15) F. G. Fernald, "Analysis of atmospheric lidar observations: some comments," *Appl. Opt.*, **23**, 652-653, 1984.

- 16) A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Jin, S.-W. Kim, Z. Wang, D. Batdorj, and N. Sugimoto, "Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia," *Opt. Eng.*, **56**, 031219, doi: 10.1117/1.OE.56.3.031219, 2016.
- 17) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo, S.-W. Kim, "Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans.*, **188**, 79-93, 2017.
- 18) R. Yoshida, H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto, "Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio," *J. Geophys. Res.*, **115**, D00H32, doi:10.1029/2009JD012334, 2010.
- 19) H. Okamoto, K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova, "Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications," *Opt. Express*, **28**, 29178-29191, 2020.

(石井昌憲)

3.2 雲・エアロゾル/インコヒーレント風ライダー

3.2.1 はじめに

本節では、雲・エアロゾル・放射・対流・降水の包括的な観測を主眼とし、A-Train, EarthCARE, AOS(Atmosphere Observing System)ミッションに連なる、能動型センサーを主体とした次世代の全球衛星観測ミッションについて記述する。本衛星観測計画は、九州大学、東京大学、東京都立大学、宇宙航空研究開発機構、国立環境研究所を中心として現在検討が進められており、衛星地球観測ミッション公募(主催:今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合 リモートセンシング分科会)への応募を果たしている。本衛星観測計画に関する概要は西澤他⁹⁾にて記述されている。そこで本節では、その内容の詳細化と情報の付加・更新が行われる。以下では、本衛星計画における「科学的背景」、「目標」、「期待される科学成果」、「アウトカム」、「要素技術」、「衛星搭載ライダーシステム」、「解析手法」について記述する。

3.2.2 背景

NASA 主導による A-train 衛星群の CALIPSO 衛星搭載ライダーおよび CloudSat 衛星搭載の雲レーダーによる全球観測は、大気粒子(雲・エアロゾル)の3次元分布を詳らかにし、放射収支と共に降水の評価に関しても顕著な改善を果たした²⁾。一方、これらの観測研究を経ても、雲・エアロゾル・放射・対流・降水に関わる克服すべき課題や残されている課題は今なお多数存在する(2.1.3 節参照)。以下に例を挙げる(1)これら衛星観測データを用いた雲量の推定結果には解析手法の違いによる顕著なばらつきが見られ、雲層検出・雲相識別・多重散乱の取り扱いの違いが指摘された³⁾。雲量に限らず、大気粒子の微物理量の推定にも不確かさが潜在する。(2)衛星観測データの解析結果と気候変動予測モデルの結果との間にも整合が見られず、気候モデルの雲再現性や雲・降水の変換プロセスの改善が必要であることが指摘された⁴⁾。(3)雲周辺の水平風の鉛直シアは、雲形成に対して大きな影響を与えることが知られているが、気候モデルでは考慮されておらず、適切な衛星観測データは現存しない⁵⁾。(4)雲・降水粒子のフラックスと雲内鉛直流の把握とそれらの相互作用の更なる理解が必要である⁶⁾。

これらの解決や理解のためには、雲・エアロゾル・対流・放射・降水プロセスを包括的に評価する観測システムが必要となる。EarthCARE ミッションでは、偏光測定機能が付与された波長 355nm での高スペクトル分解ライダー(HSRL)である ATLID(Atmospheric Lidar)と共に、ドップラー測定機能が付与された 94GHz 雲レーダー、多波長イメージャー、広帯域放射計が搭載され、CALIPSO・CloudSat ミッションの後継となる包括的な全球観測ミッションとなっている。雲レーダーのドップラー計測機能の付加により、雲・降水微物理特性と対流性雲の内部の鉛直速度の推定が可能となり、降水フラックス推定の改善も見込まれている⁷⁾。また、HSRL 技術の導入により、大気粒子の消散係数・後方散乱係数の推定精度が向上することによる知見の創出や改善も期待されている⁷⁾。Decadal Survey 2017⁸⁾に基づき計画が進められている米 AOS ミッションは 2020 年代末～2030 年代初頭での打ち上げを目指している。極軌道衛星と傾斜軌道衛星の2台の衛星に雲レーダー、降雨レーダー、ライダー、そして各種受動型センサー(偏光計、イメージャーなど)を搭載した包括的な全球観測ミッションとなっている。当初想定されていた HSRL 観測は予算の観点から断念され、偏光測定機能を有した Mie 散乱ライダーによる観測が検討されている。AOS ミッション以降の能動型センサーを用いた大気粒子計測を主体とした衛星観測ミッションは現在のところ未確定である。

HSRL 技術を用いた大気粒子の計測を主体としたスペースライダー観測は、2015 年に国際宇宙ステーションに搭載された CATS(Cloud-Aerosol Transport System)⁹⁾から始まる。ここではヨウ素吸収フィルターを用いた波長 532nm での HSRL 技術が導入された。その後、2022 年に中国から打ち上げられた DQ-1 衛星に搭載された波長 532nm の HSRL である ACDL(Aerosol and Cloud Detection Lidar)¹⁰⁾でもヨウ素吸収フィルターが用いられた。2024 年打ち上げ予定の EarthCARE/ATLID ではフェブリ・ペロー干渉計が用いられ波長 355nm での計測が行われる¹¹⁾。HSRL 技術を用いた大気粒子の消散係数・後方散乱係数の独立測定は、大気粒子計測用スペースライダーのスタンダードとなりつつある。

3.2.3 観測目標

上記背景を踏まえ、本衛星観測計画では雲・エアロゾル・放射・対流・降水の包括的な観測を主眼とし、以下の観測目標を設定した。

- ・雲・エアロゾル・降雨・降雪の微物理・放射特性。
- ・雲・降水粒子の落下速度。
- ・雲内での鉛直流。
- ・晴天域での鉛直流(雲頂より上方の場合も含める)。

この観測目標の実現を実現するために、以下の特性を持ったライダーと雲レーダーによる同時測定を行う。

ライダー

2波長(532,1064nm)で鉛直下方を計測するライダーとする。波長 532 nm では HSRL 計測を行い、2波長での偏光測定も行う。また、直接検波方式のドップラー計測機能を加え、風速の同時計測を実現する。新たな試みとして、狭視野角と広視野角の多視野角計測を実現し、多重散乱信号を活用した光学的に厚い雲の内部の計測を行う。本ライダーの拡張として、波長 355 nm での HSRL 機能の追加やドップラー計測の3方向化が想定される。

雲レーダー

ドップラー計測機能を有した 94 GHz 雲レーダーとする。レーダー反射因子、ドップラー速度、ドップラー速度幅を計測する。鉛直下での計測を最小構成とする。本レーダーの拡張として、3方向計測による水平風抽出が想定される。

3.2.4 期待される科学成果

- ・雲レーダーとライダーの両センサを用いた雲域、晴天域、雲頂上での鉛直方向のドップラー観測を行うことで、雲・エアロゾル・降水(雪)の微物理特性と対流のシームレスな同時観測が実現される。
- ・多視野角・多重散乱ライダーにより、従来のライダーよりも光学的に厚い雲の情報取得が可能になる。雲レーダーとライダーの同時観測が光学的に厚い雲でも行えること、そして HSRL による消散係数観測とドップラー速度の情報から、雲微物理特性と雲落下速度、対流特性としての鉛直流を格段に精度良く求めることが可能になる。これによって、雲の微物理特性と対流に関する全球データセットを初めて構築することが可能となる。
- ・これらの観測情報は、気候モデルにおける最大の不確実要因であるエアロゾルと雲の相互作用、および対流との相互作用を素過程レベルで明らかにすることができる。よって、モデルにおける当該プロセスの表現の高度化、そして、エアロゾル・雲・降水に関わる現象のモデル予測精度の質的向上が期待できる。
- ・HSRL からは多種多様にわたるエアロゾルの光学・微物理特性の情報も得られる。特に Decadal Survey 2017⁹⁾においても重要な観測項目として選定されている消散係数、粒子種や有効半径の高度分布の抽出も包括しており、世界に類をみない確かなエアロゾル情報の獲得を実現できる。

3.2.5 アウトカム

- ・雲・エアロゾルの微物理特性、晴天域と雲域両方の風速 3 次元分布、雲微物理および対流の素過程レベルでの検証と改善により、気候変動予測や極端現象予測の精度向上や大気環境影響評価(健康、植生等)の質的向上が見込まれる。これらの科学的知見の向上は、地球温暖化問題の解決に向けた国際的な合意形成や国内外での環境施策の高度化を促進する。
- ・数値予報モデルへの同化による予測スコアの改善や極端現象の再現性の向上が期待できる。また、エアロゾル化学輸送モデルとの同化により、大気環境質を悪化させる粒子(大気汚染粒子、火山噴火に伴う噴煙、黄砂、バイオマス燃焼粒子など)の拡散・輸送に関する予測・監視や防災への応用も期待できる。
- ・本衛星計画は、アクティブセンサを導入した A-Train, EarthCARE, AOS ミッションによる国際的な全球大気粒子観測ミッションの後継としての性質を有しており、将来の衛星搭載アクティブセンサによる全球大気粒子

の国際観測ミッションを牽引するものとなる。

3.2.6 要素技術

科研費助成のもと、EarthCARE 衛星(および ADM-Aeolus 衛星)の観測条件を模擬する能動型センサーによる地上複合観測システムの開発が、情報通信研究機構(東京都小金井市)の構内にて進められている¹²⁾。また、この地上観測システムの観測データを利用して、EarthCARE 衛星データから大気粒子の微物理特性や雲内鉛直流を導出するための推定手法の開発も進められてきた。この地上複合観測システムでは、独自開発された波長 355 nm での偏光 HSRL¹³⁾と多視野角・多重散乱偏光ライダー¹⁴⁾が実装・運用されている。また、波長 355nm での直接検波方式ドップラーライダーの開発も進められている¹⁵⁾。同研究所では、ドップラー測定機能を有した雲レーダーの観測も行われており、ライダー・雲レーダーによる地上複合観測システムが実現されている。これらの観測システムの開発やそのデータを用いたアルゴリズム開発は、EarthCARE ミッションを主要なターゲットとして進められているが、本衛星計画にも密接に関連しており、要素技術開発の場として活用されている。以下では、上記システムに関する情報を交えながら、本衛星計画において用いられる、ライダーに関する検討結果を記述する。

大気粒子計測用 HSRL

走査型マイケルソン干渉計を用いた波長 355nm での HSRL システムが開発され、情報通信研究機構構内にて連続観測が実施されている。本システムは波長 532nm での HSRL への転用が可能であり、2波長(355nm, 532nm)同時計測での HSRL 技術も開発された¹⁶⁾。Fig.1 に情報通信研究機構構内にて 2020 年 5 月に測定された後方散乱係数、消散係数、ライダー比、偏光解消度の時間高度断面図を示す。時間/高度分解能はそれぞれ 5 分/30m である。同時計測したラマンライダーともよく整合し、本システムの妥当性は実証されている。本ライダーでは、干渉計を 1 フリンジ分だけ周期的に掃引し、スキャン毎に干渉縞の位相をモニターするため、従来の HSRL 手法でネックとなる波長制御が不要となることが特徴である。一方で常時スキャンするために測定効率は悪くなる。衛星観測では衛星の高速移動により、計測地点の大気状態が 1 フリンジのスキャン計測時に大きく異なってしまうことが想定されるため、本システムのそのままの適用は好ましくない。よって、スキャン方式の改良、レーザー・干渉計の波長制御による固定、ないしはショット毎にフリンジの位相を検出するシステム¹⁷⁾等の検討が進められている。

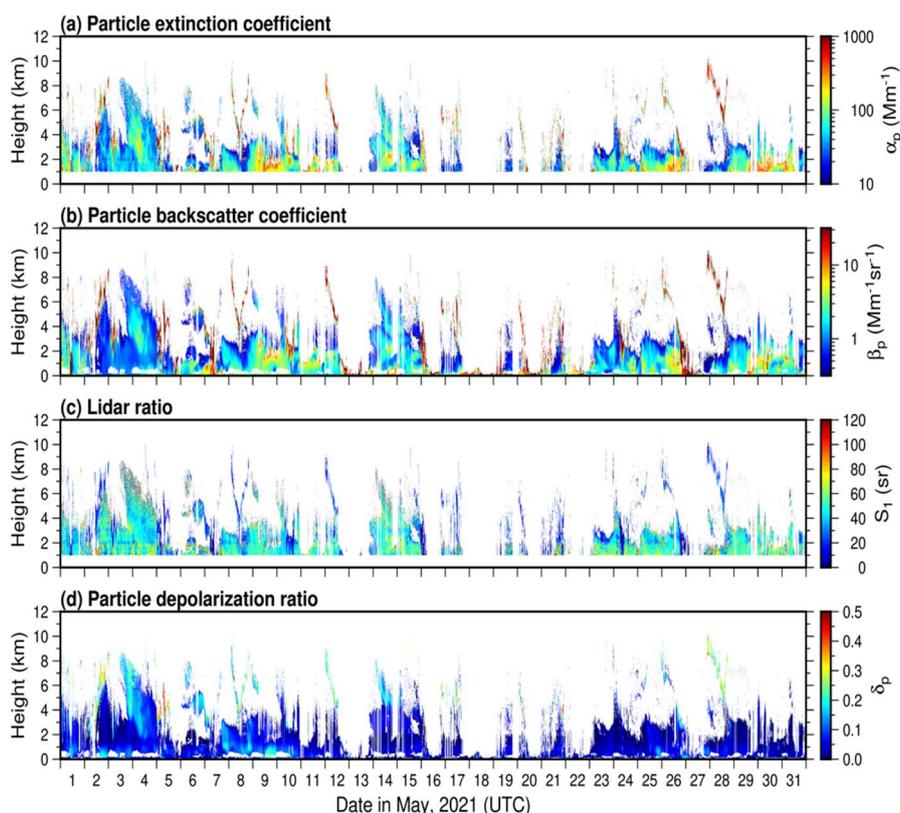


Fig.1 Time-height cross section of aerosols and clouds measured by 355nm polarized HSRL (Koganei, Tokyo, May 2021).

多視野角・多重散乱ライダー

偏光 Mie 散乱ライダー技術を利用した5本の受信鏡筒からなるシステムが情報通信研究機構に設置され、連続測定が実施されている。5本の受信鏡筒、一本は真上に向けられ(傾斜角 $\theta = 0\text{mrad}$)、残りの4本は 10mrad ずつ傾けられている(Fig.2)。各鏡筒の視野角は 10mrad で設定され、真上向きの鏡筒には一回散乱成分+多重散乱成分が入り(on-beam)、その他の鏡筒には多重散乱成分のみが入る(off-beam)。各鏡筒では偏光も測定している(送信レーザーの直線偏光に対して平行/垂直成分)。多重散乱信号の取得により、従来のライダーでは困難であった雲内部の情報を得ることができる。多重散乱計算によりシミュレーションされた雲層に対する受信強度や偏光解消度の特性(高度変化や角度による違い)は、測定値と定性的な一致が見られている¹⁴。多重散乱計算の高速・高精度化と雲微物理量推定への拡張が今後の課題となっている。

衛星観測へ複数鏡筒を用いる本システムをそのまま導入することはコストやサイズの観点から困難である。そこで、集光望遠鏡は一つとし集光されたイメージの分割測定(狭視野と広視野の2分割や CCD 等のイメージング測定による複数分割など)が検討されている。偏光測定も成立させると共に、HSRL や風測定とも共存させるシステム設計も課題となっている。

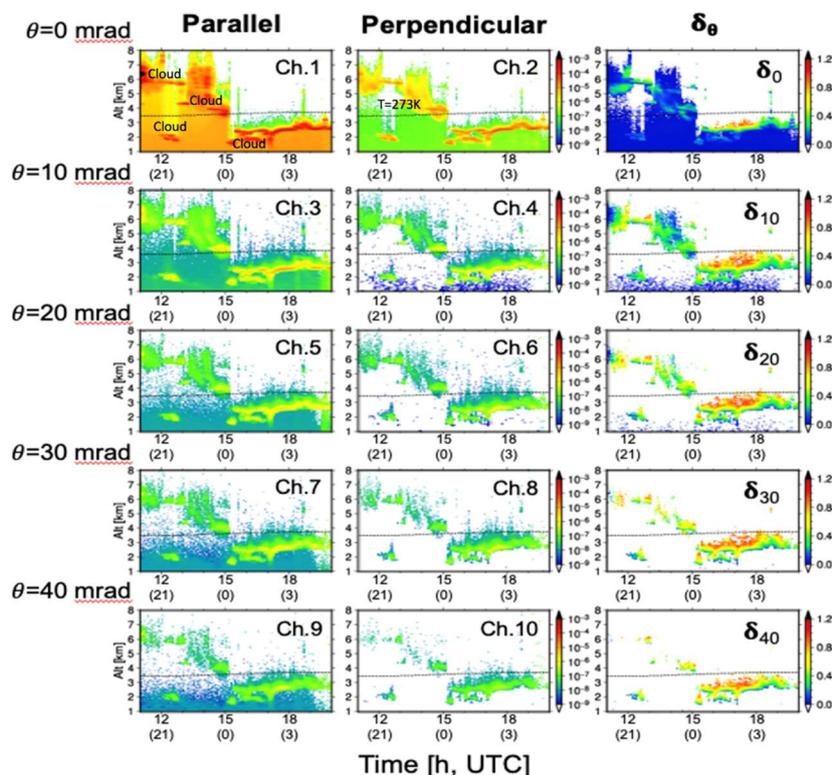
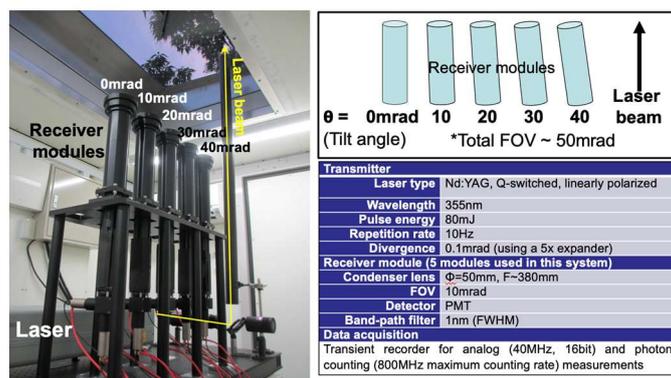


Fig.2 Configuration of the 355-nm multiple field-of-view multiple-scattering polarization lidar (MFMSPL) (upper figure) and examples of measurements (Koganei, Tokyo, June 2, 2019) (lower figure).

直接検波式風ライダー

情報通信研究機構構内にて開発が進められている直接検波式ドップラー風ライダーでは、ADM-Aeolus衛星搭載ライダー(ALADIN)で採用されたファブリ・ペロー干渉計を用いたダブルエッジ法¹⁵⁾が用いられている。本衛星計画で検討されているライダーでは、複数測定機能による同時測定が求められている。そして、衛星搭載を考慮し、コスト・サイズ・重量等の制約も重要な要素となる。よって、上記の風測定と大気粒子測定(多重散乱測定)を可能な限り効率的に共存・一体化させる必要があり、大きな課題となっている。

上記方式の検討を進めると共に、マイクロン干渉計を用いたHSRL技術開発で培われた経験を活かしたイメージングマイクロン干渉計を用いた自己共分散法¹⁷⁻¹⁹⁾による風測定ライダーの検討も進めている。ここでは、大気鉛直流と共に大気粒子の鉛直プロファイルも同時計測することを念頭に置いた一体化システムが

検討されている。Fig.3に考案された波長532nmでのライダーシステムを示す。受信光の一部をビームスプリッターで分離し、全散乱(ミー散乱+レイリー散乱)の信号を測定する。その後、ヨウ素吸収フィルターを用いてミー散乱成分を除去し、レイリー散乱成分のみを透過する。マイケルソン干渉計を用いてレイリー散乱成分を分光し、干渉縞のイメージをPMT arrayで測定する。この時、レーザー光の一部を積分球に取り込み、リファレンス光として受信部に送る。レーザー波長はヨウ素の吸収線に固定される。

大気粒子の消散係数は、レイリー散乱信号(PMT arrayで測定された信号の総和)から抽出される。大気粒子の後方散乱係数は、全散乱信号とレイリー散乱信号の比から抽出される。大気鉛直流については、PMT arrayによって測定された散乱光とリファレンス光の干渉縞の位相シフト量から視線方向の風速が決定される。本システムの特徴として、干渉系とヨウ素吸収フィルターが併用されている。これにより、大気鉛直流および大気粒子の抽出で大きな誤差となるレイリー散乱信号に対するMie散乱信号のクロストークの低減が図られている。ミー散乱信号の強い雲層や高濃度エアロゾル層(の内部まで)の測定を企図している。

上記システムを用いたシステム検討解析の例として、マイケルソン干渉計の設定(光路差)に関する検討結果をFig.4に示す。干渉縞の位相は、PMT arrayの測定信号を正弦関数でフィッティングすることによって得られる。フィッティング解析を行うためには、干渉コントラストの振幅を出来るだけ大きくする必要がある。干渉コントラストの振幅は干渉計の光路差に依存し、ヨウ素フィルターの有無によっても異なる。振幅の符号が変わる箇所では(振幅が0)、干渉縞の位相が反転するために関数フィッティングが困難になる。ヨウ素吸収フィルターを用いない場合、光路差が100 mm以上では干渉コントラストはほぼ無く、大気鉛直流の抽出は不可となる。一方、ヨウ素フィルターを用いた場合は干渉コントラストが顕著に現れ、大気鉛直流の抽出が容易になる(ただし、光路差が50mmおよび160mm付近は適さない)。大気鉛直流の測定誤差は、ヨウ素吸収フィルターの導入により総じて低減され、光路差が約40 mmで最小と見積られた。

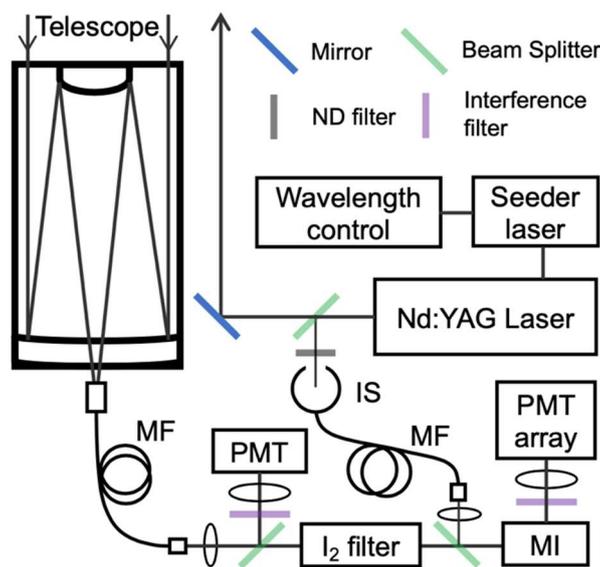


Fig.3 532nm HSRL for simultaneous measurement of wind speed and optical properties of aerosols and cloud.

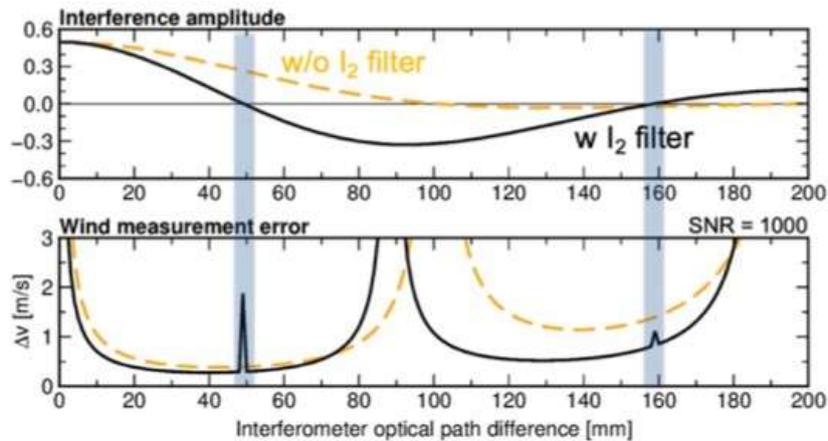


Fig.4 Simulated interference amplitude (upper figure) and wind speed error (lower figure) as a function of interferometer optical path difference.

3.2.7 衛星搭載ライダーシステム

要素技術の検討結果や EarthCARE 等のこれまでの衛星搭載ライダーの諸元を元に、衛星搭載ライダーシステムの構成を Fig.5 に示す。送信系には狭い線幅を持つシーダーレーザーとレーザー増幅器で構成される単一縦モード Nd:YAG レーザーを使用し、基本波(波長 1064 nm)および第二高調波(波長 532nm)を直線偏光状態で出力する。レーザーの線幅は半値幅 50MHz、繰り返し率を 50Hz、2波長の出力をそれぞれ 50mJ 以上とする。レーザーのビーム拡がりにはビームエキスパンダを通した後で 45 μ rad とする(衛星高度を 400km とした時に地上でのビーム径は約 20m に相当)。受信系には視野角 65 μ rad を持つ直径 60cm の反射望遠鏡を使用する(地上におけるフットプリントサイズは約 30m に相当)。望遠鏡で集光した光をコリメートレンズで平行光とし、ダイクロイックビームスプリッターを用いて波長 1064nm と 532nm の光に分ける。さらに偏光ビームスプリッターを用いてレーザーの偏光面に対して水平と垂直な成分に分ける。波長 532nm については、水平成分のビームを干渉計に通して大気分子からのレイリー散乱と雲・エアロゾルからのミー散乱に分ける。各ビームは狭帯域の干渉フィルターを通して背景光をブロックし、集光レンズを用いて検出器に入射する。検出器については、波長 532nm では ATLID や ALADIN でも使われている高感度 CCD や PMT が、波長 1064nm では CALIOP でも使われている APD が候補となる。サンプリング周波数は ATLID と同様に 1.5 MHz とする(高度分解能で 100m に相当)。高スペクトル分解のための干渉計にはマイケルソン干渉計ないしはファブリ・ペロー干渉計が候補となる。送信レーザーおよび干渉計は波長制御機能を持ち、レーザーの中心波長と干渉計のスペクトルのピークが一致するようにチューニングされる。多重散乱ライダーシステムおよび直接検波式風ライダーシステムの効率的な組み込みは今後の課題となる。

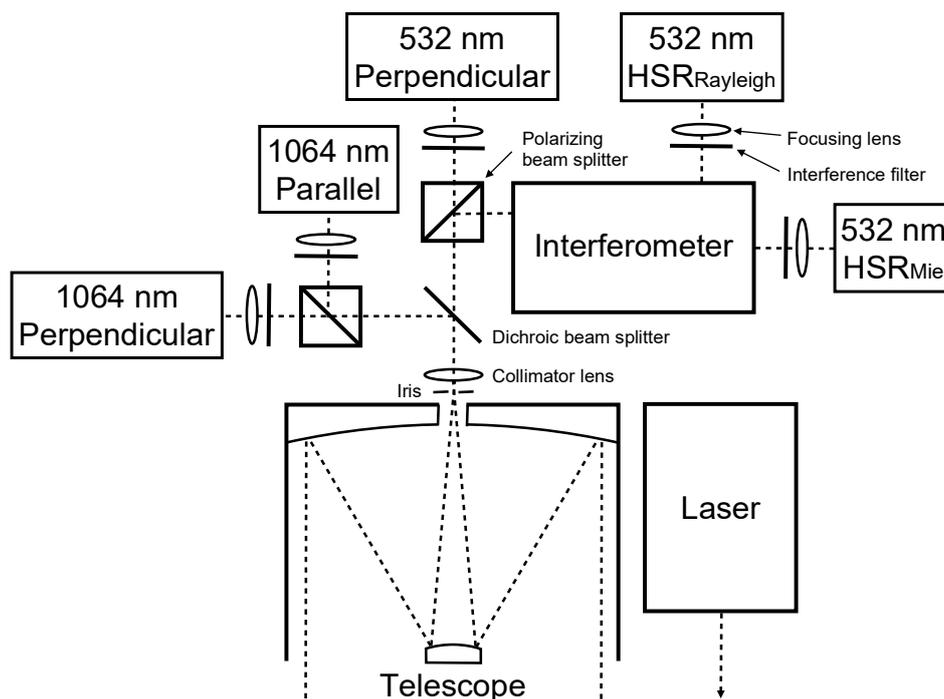


Fig.5 Configuration of space-borne lidar system.

上記システムの諸元を元にした、波長 532 nm での HSRL 測定信号(レイリー散乱信号とミー散乱信号)と推定される消散係数および後方散乱係数の推定誤差のシミュレーションが進められている。シミュレーションで用いられたシステム諸元(Table 1)とシミュレーション結果の例を示す(Fig.6 および Fig.7)。ここでは、全球エアロゾル輸送モデル SPRINTARS により再現された、洋上に流入したエアロゾルと対流圏上部に氷晶雲が出現した雲・エアロゾル場が用いられている。雲の無い晴天の場合、夜間ではミー・レイリーの両散乱信号に対して全高度に対して $SN > 10$ の信号品質が確保されている。消散係数に対しては夜間で $0.05\text{--}0.1\text{km}^{-1}$ 程度、後方散乱係数については最大で $0.002\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 程度の誤差が見込まれ、相対誤差ではエアロゾルの濃い低層域では、後方散乱係数で 10%程度、消散係数で数 10%程度となる。日中では SN は半分以下となり、消散係数・後方散乱係数の誤差がそれに応じて増大する。雲層に対しても、夜間では後方散乱係数で 10%程度、雲内部の濃度の濃い領域で数 10%程度の誤差が見込まれる。日中は消散係数に関しては誤差が増大するが、後方散乱係数に対する誤差は殆ど増大しない。シミュレーションを利用したハードウェアの検討は今後も進められていく。それと共にシミュレーション自体の性能向上(雲等の多重散乱効果の導入など)も今後の課題となる。

Table 1 Parameters used in the signal simulation of the space-borne HSRL at 532nm.

Parameters	Values
Satellite altitude	400 km
Laser power	50 mJ/pulse
Laser repetition	50 Hz
Telescope diameter	0.6 m
Field of view	65 μrad
Height resolution	300 m
Horizontal resolution	10 km (70 shots)
Quantum efficiency	0.5
Band-path filter	0.2 nm (FWHM)

Michelson interferometer	Mie scattering transmittance of 0.05 and Rayleigh scattering transmittance of 0.5 for Rayleigh channel
Background light	$74 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$

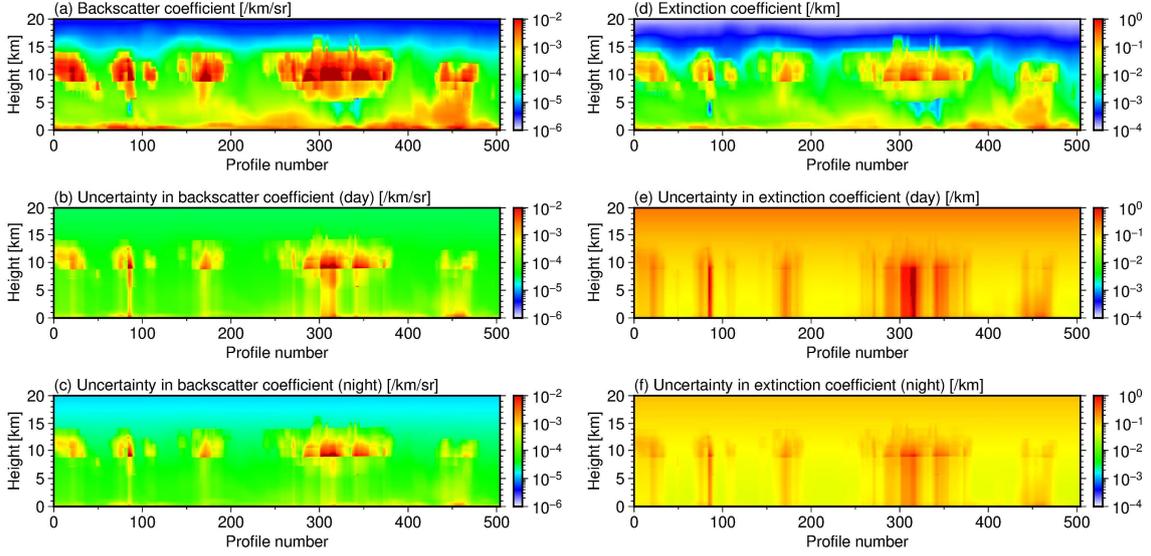


Fig.6 Error analysis for the space-borne 532nm HSRL using aerosol and cloud fields simulated by aerosol transport model: (a) true values of particle backscatter coefficient, (b) error in particle backscatter coefficient during daytime, (c) error of particle backscatter coefficient at night, (d) true value of particle extinction coefficient, (e) error in particle extinction coefficient during daytime, and (f) error of particle extinction coefficient at night.

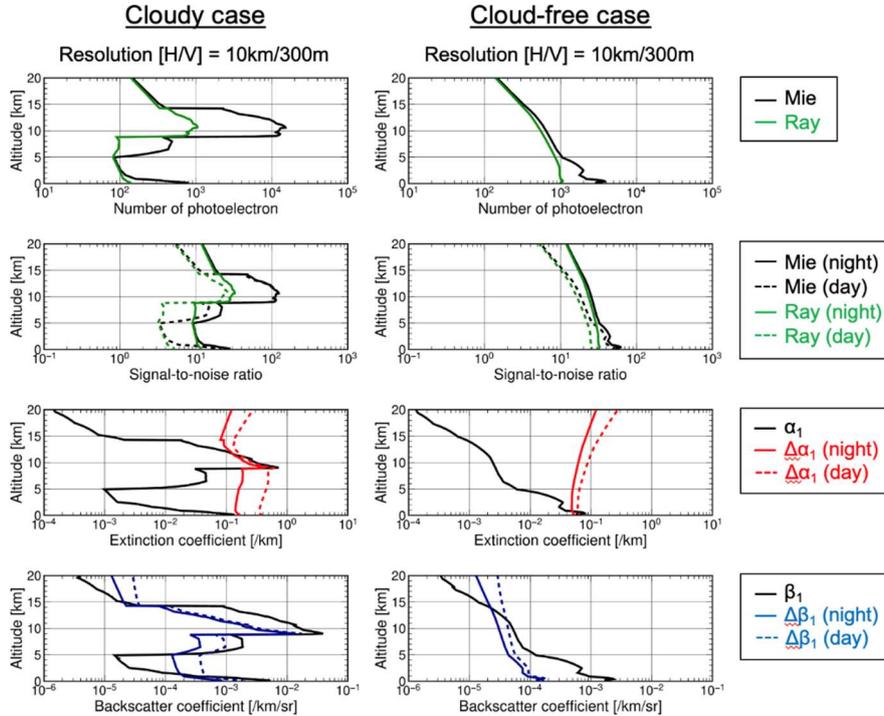


Fig. 7 Height distribution of the error for the case with clouds (left: profile number = 320) and the case without clouds (right: profile number = 210) in Fig. 6. The first line from the top shows the simulated photoelectron number, the second line shows the signal-to-noise ratio, the third line shows the error of particle extinction coefficient, and the fourth line shows the error of

particle backscatter coefficient. α_1 and β_1 are true values of extinction coefficient and backscatter coefficient, respectively. $\Delta\alpha_1$ and $\Delta\beta_1$ are absolute errors. Values for day and night are shown.

3.2.8 解析手法

ハードウェアの開発検討と共に測定データを用いた大気粒子等の巨視的特性および微物理特性の推定も等しく重要であり、データ解析手法についての開発・検討も同時に進められている。地上、船舶、そして衛星搭載ライダー-CALIOPやCloudSat 雲レーダーを用いた、雲やエアロゾルの層検出、タイプ識別、種別毎の微物理特性の推定手法やそれに関わる数値解析手法やシミュレーション技術の開発などが進められ、EarthCARE ミッションへの応用が進められている(2.1.3節参照)。また、EarthCARE での更なる熟成の後、これらの解析手法は AOS ミッションへの応用が検討されている。本衛星計画では、これらの解析手法の応用を予定している。

引用文献

- 1) 西澤智明, 神慶孝, 石井昌憲, 岡本創, “衛星搭載高スペクトル分解ライダーによるエアロゾル・雲の全球観測,” レーザセンシング学会誌, **1**, 55-60 (2020).
- 2) G. Stephens, D. Winker, J. Pelon, C. Trepte, D. Vane, C. Yuhas, T. L’Ecuyer, and M. Lebsock, “CloudSat and CALIPSO within the A-Train: Ten Years of Actively Observing the Earth System,” *B. Am. Meteorol. Soc.*, **99**, 569–581 (2018), <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0324.1>.
- 3) G. Cesana, H. Chepfer, D. Winker, B. Getzewich, X. Cai, O. Jourdan, G. Mioche, H. Okamoto, Y. Hagihara, V. Noel, and M. Reverdy, “Using in situ airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO,” *J. Geophys. Res.*, **121**, 5788-5808 (2016).
- 4) X. Jing, K. Suzuki, and T. Michibata, “The key role of warm rain parameterization in determining the aerosol indirect effect in a global climate model,” *J. Climate*, **32**, 4409-4430 (2019).
- 5) J.-L. Lin, and B. Mapes, “Wind shear effects on cloud-radiation feedback in the western Pacific warm pool,” *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16118 (2004), doi:10.1029/2004GL020199.
- 6) A. D. Del Genio, J. Wu, A.B. Wolf, Y. Chen, M.-S. Yao, and D. Kim, “Constraints on cumulus parameterization from simulations of observed MJO events,” *J. Climate*, **28**, 6419-6442 (2015), doi:10.1175/JCLI-D-14-00832.1.
- 7) A. J. Illingworth, H. W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Cler-baux, et al., “The EarthCARE satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation,” *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **96**, 1311–32 (2015).
- 8) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Thriving on Our Changing Planet: A Decadal Strategy for Earth Observation from Space,” Washington, DC, The National Academies Press., (2018), <https://doi.org/10.17226/24938>.
- 9) <https://cats.gsfc.nasa.gov/>
- 10) J. Ke, Y. Sun, C. Dong, X. Zhang, Z. Wang, L. Lyu, W. Zhu, A. Ansmann, L. Su, L. Bu, D. Xiao, S. Wang, S. Chen, J. Liu, W. Chen, D. Liu, “Development of China’s first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration,” *Photonix*, **3**, 17 (2022), <https://doi.org/10.1186/s43074-022-00063-3>.
- 11) A. Heliere, K. Wallace, J. P. do Cormo, M. Eisinger, and A. Lefebvre, “EarthCARE instruments description,” European Space Agency, (2017) <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/EarthCARE-instrument-descriptions.pdf> (last access: 3 July 2023).
- 12) H. Okamoto, K. Sato, M. Fujikawa, E. Oikawa, T. Nishizawa, S. Ishii, Y. Jin, M. Aoki, and N. Sugimoto, “Development of synergetic active sensor system for evaluation of observations by EARTH-CARE,” *EPJ Web Conferences*, **237**, 07011 (2020).
- 13) Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato, and H. Okamoto, “Development of a 355nm high-spectral resolution lidar using a scanning Michelson interferometer for aerosol profile measurement,” *Opt. Express*, **28**, 23,209-222 (2020).

- 14) T. Nishizawa, Y. Jin, N. Sugimoto, K. Sato, M. Fujikawa, S. Ishii, M. Aoki, K. Nakagawa, and H. Okamoto, "Observation of clouds, aerosols, and precipitation by multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar at 355 nm," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **271**, 107710 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107710>.
- 15) S. Ishii, K. Kishibuchi, H. Takenaka, Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, H. Iwai, M. Aoki, S. Kawamura, and H. Okamoto, "355-nm direct-detection Doppler wind lidar for vertical atmospheric motion measurement," *Applied Optics*, **61**, 7925-7936 (2022).
- 16) Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Takakura, M. Aoki, S. Ishii, A. Yamazaki, R. Kudo, K. Yumimoto, K. Sato, and H. Okamoto, "Demonstration of aerosol profile measurement with a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar using a scanning interferometer," *Applied Optics*, **61**, 3523-3532 (2022).
- 17) S. C. Tucker, and C. S. Weimer, "The optical autocovariance wind lidar. Part I: OAWL instrument development and demonstration," *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **35**, 2079-2097 (2018).
- 18) D. Bruneau, and J. Pelon, "A new lidar design for operational atmospheric wind and cloud/aerosol survey from space," *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 4375-4402 (2021), <https://doi.org/10.5194/amt-14-4375-2021>.
- 19) Z. Liu, and T. Kobayashi, "Differential discrimination technique for incoherent doppler lidar to measure atmospheric wind and backscatter ratio," *Opt. Review*, **3**, 47-52 (1996).

(西澤智明、神慶孝)

3.3 水蒸気差分吸収ライダー

3.3.1 ミッションの概要

気候システムにおいて水蒸気は中心的な役割を担っているが、そのプロセスが十分解明されていないことが気候変動予測のばらつきに現れている。気候モデルの課題の1つは、水蒸気プロセスを正確に説明し、計算グリッド内の現実的な三次元放射、雲、降水現象をパラメータ化(数式化)することである。これは、個々の対流スケール現象を予測する数値予報モデルにおいても同様である¹⁾。

また、近年気候変動の影響により日本では線状降水帯による豪雨の発生や台風の大型化による自然災害の頻発化や激甚化が防災面から大きな社会問題となっている。これらの災害は豪雨や台風の予測精度を上げることにより減災が可能であるが、これらの現象予測には、特に海上の下部対流圏の水蒸気分布情報が重要であることが指摘されており²⁾、水蒸気ラマンライダー観測のデータ同化により降水量予測が改善されることも示されている³⁾。衛星搭載水蒸気ライダーでは地上からのラジオゾンデやGNSS (Global Navigation Satellite System)などの観測では不可能な日本周辺の海上での水蒸気観測が可能であり、観測データを数値予報モデルに同化することにより予測精度の向上が期待できる。

本章では、すでに提案している衛星搭載水蒸気観測ライダーミッション⁴⁾の概要と、その仕様をベースに追加提案している、海面のレーザ後方散乱光と大気散乱光を併用して、海面直上から上空までの水蒸気鉛直分布を観測するDIAL (Differential-Absorption Lidar) 並びに海上風速を同時測定するIPDA (Integrated Path Differential-Absorption Lidar) -DIAL手法の検討結果を示す。

3.3.2 衛星・センサ仕様

提案している衛星搭載水蒸気DIALの主な仕様は以下の通りである。後述する海面のレーザ後方散乱光の測定は受信系の検出器を増やすことにより対応できるため、送信系の変更は必要ない。

衛星軌道: 太陽非同期準回帰軌道

軌道高度: 250~400km

搭載センサ: 水蒸気差分吸収ライダー (DIAL)

- ・ 波長: 1335~1336nm
- ・ レーザ出力: 10~20mJ
- ・ パルス繰返し周波数: 500Hz (on/offペア)
- ・ 消費電力: 120~240W (レーザのみ)
- ・ 望遠鏡口径: 0.5~0.8m
- ・ 水平(鉛直)分解能: 20km(水平), 300~1000m(鉛直)

測定誤差は、夏季日本の水蒸気高度分布モデルを用いた誤差シミュレーションより、高度分解能300mで高度2.1kmまで10%以下、600mで3.2kmまで10%以下、1000mで5.6kmまで20%以下と見積もられる。またWMOの水蒸気観測要求分解能⁵⁾で熱帯水蒸気高度分布モデルを用いると、3つの吸収線を用いて高度20kmの下部成層圏まで誤差20%以下で計測可能となる⁶⁾。一方、ダウングレードした海面散乱光を利用したIPDA-DIAL方式の場合、海面から高度300mまでの水蒸気積算量を誤差10%、海面から高度600mまでの水蒸気積算量なら誤差5%で計測可能である。IPDA-DIALの詳細は3.3.5)に示す。

3.3.3 技術の特色

現在の水蒸気観測は、地上湿度計、ラジオゾンデ、地上リモートセンシング、衛星赤外線/マイクロ波センサ

により行われているが、空間及び時間分解能が十分とは言えない。さらに上部対流圏・下部成層圏の境界領域に空白域がある。また、受動的衛星観測は水平方向のカバー領域は広いが、鉛直分解能が不十分である。グローバルな水蒸気循環を定量的に評価するためには、精度、鉛直分解能及びカバーレンジが不足している。衛星搭載ライダーは、全球域の高分解能・高品質水蒸気データを提供するとともに、バイアス誤差が無いためパッシブリモートセンシング機器の校正にも利用できるとともに、衛星搭載センサによる面的な観測とのシナジー効果が期待できる。

衛星搭載水蒸気ライダー実現に向けた国内外の取組としては、これまで波長730nm, 820nm及び930nm付近の吸収線を利用した航空機搭載水蒸気DIALの開発が行われてきた。米国のNASAではLASE (Lidar Atmospheric Sensing Experiment)として航空機搭載水蒸気DIALの実用化が行われ、多くの成果を得ている⁶⁾。また、欧州のESAでは波長935nm帯のOPO (Optical Parametric Oscillator)レーザを搭載した航空機搭載水蒸気DIALが開発され、日本周辺で観測された水蒸気プロファイルをECMWF全球モデルにデータ同化することにより降雨強度の予報値が改善したとの結果が報告されている⁷⁾。日本では、衛星搭載を目指した航空機搭載DIALの開発が気象研究所、東京都立大学、NASDA (現JAXA)を中心に行なわれ、試験観測に成功した実績がある^{8,12)}。

しかし航空機搭載DIALから衛星搭載DIALへのステップアップの具体的な計画は現時点ではない。衛星搭載DIALが実現しない要因の一つとして波長可変レーザの安定性への疑念が考えられる。衛星搭載と対流圏界面高度の水蒸気観測を考慮した場合、DIALでは広いレンジの吸収断面積の吸収線が選べる1350nm付近の吸収線の利用が有効であるが、この波長帯はCO₂ライダー開発により実績があるQPM (Quasi-Phase-Matching)-OPG (Optical Parametric Generator)方式^{13,14)}で得ることが可能である。Fig. 1にQPM結晶を用いたワンパスのOPGの概略図を示すが、QPM-OPGは周期分極構造を設計することにより、任意の波長変換を高効率で実現でき、シーダ光を注入することにより波長制御が容易に実現できる。また後段にQPM-OPA (Optical Parametric Amplifier)を置くことにより、高出力可も可能である。共振器構造が必要なOPO (Optical Parametric Oscillator)と比べて振動に対する安定性が高く、衛星搭載に適したレーザと言える。

Fig. 2に提案しているOPG+OPAをベースにした衛星搭載DIAL送信部のブロック図を示す。DIALに必要な測定波長切替は波長ロックされたシーダ光を切り換えることにより容易に実現でき、励起光であるNd:YAGレーザの基本波(1064nm)や2倍波(532nm)を同時に取り出すことも容易である。1064nmと532nmの波長はCALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)衛星搭載ライダーCALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)に用いられていた波長であり、光検出部を増設するだけで、エアロゾルの多波長観測や偏光観測が容易に実現できる。

Fig. 3に水蒸気DIAL測定に想定しているレーザ波長を地上高度における水蒸気吸収スペクトルとともに示す。対流圏下層から下部成層圏までの水蒸気量の高度分布を測定するためには2桁以上異なる吸収断面積を選ぶ必要があるが、1350nm帯の水蒸気吸収帯にはこのような波長の組合せを1nmの波長範囲内で選ぶことが可能である。

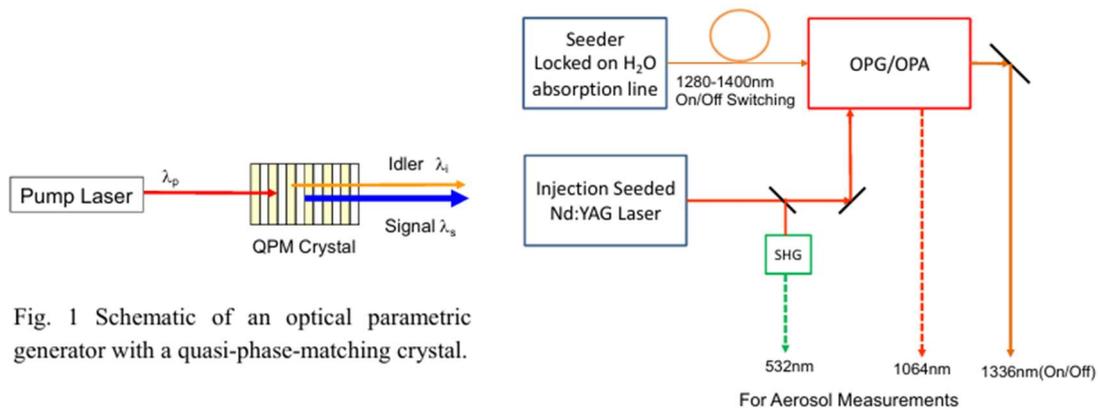


Fig. 1 Schematic of an optical parametric generator with a quasi-phase-matching crystal.

Fig. 2 Block diagram of the proposed spaceborne water vapor DIAL transmitter.

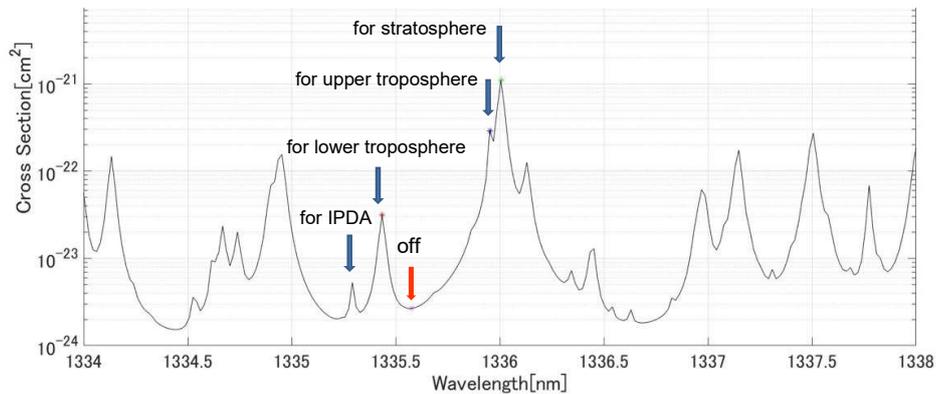


Fig. 3 Absorption cross section of water vapor indicating wavelengths used in the spaceborne DIAL and IPDA.

3.3.4 期待される成果

気温上昇により飽和水蒸気量が増加することによって、大気中の水蒸気量が増加し温室効果が加速される水蒸気フィードバックが起こり、温暖化が顕著になる可能性がある。一方、水蒸気の増加が雲の発生量をも高める日傘効果による温暖化の抑制(雲フィードバック)は主に下層雲に対して不確実性が指摘されている¹⁵⁾。しかし、現状では温暖化の議論に耐える地球全域に亘る水蒸気分布の観測データが不足しており、精度の高い議論はできていない。さらに水蒸気は、OHラジカルの生成を通して、メタンの酸化など対流圏・成層圏の重要な化学プロセスにも関与している¹⁶⁾。これら水蒸気的重要性から、世界的な水蒸気分布データの質の向上が必要である。これは、長期の気候変動解析と短期の数値予報どちらにも有用である。衛星搭載ライダーで全球的な水蒸気観測を行い、水蒸気フィードバックプロセスの理解を進めることにより、地球温暖化シナリオで現実的な水蒸気増加レベルをシミュレーションすることが可能となる。

一方、近年日本では線状降水帯による豪雨の発生や台風の大規模化が防災面から大きな社会問題となっている。これらの災害は豪雨や台風の予測精度を上げることにより減災が可能であるが、予測には特に海上の下部対流圏の水蒸気分布情報が重要であることが指摘されている。衛星搭載ライダーは日本周辺海上

の水蒸気観測が可能であり、数値予報モデルへのデータ同化により予測精度の向上が期待できる。

3.3.5 IPDA-DIAL

水蒸気の鉛直分布と同様に、海面付近の水蒸気量の測定は、豪雨の予測や海洋と大気間のフラックスの推定に重要である。そこで、提案されているDIALミッションの仕様を大きく変えることなく、IPDA技術¹⁷⁾を用いて、大気後方散乱と海面後方散乱の両方の信号を用いた海面付近の水蒸気のDIAL観測の可能性を検討した。これはFig. 4に示すように、大気後方散乱信号よりも強い海面後方散乱信号の差分吸収を利用するものである。すでに提案している衛星搭載DIAL¹⁸⁾からの変更点は、Table 1の仕様¹⁸⁾に示すように、2ビーム方式を1ビーム方式にしてレーザの平均出力を半分、衛星軌道高度を400km、望遠鏡の口径を50cmとしてプラットフォームに柔軟性を持たせている点である。この仕様で計算したIPDA-DIALの水蒸気密度のランダム誤差をFig. 5に示す。ここで縦線は積算した範囲を示している。水平分解能は50kmで、水蒸気モデルは日本上空の夏平均のプロファイルを使用し、昼間の観測を想定している。誤差シミュレーションの結果、海面から高度300mまでの水蒸気積算量を誤差15%、海面から高度600mまでの水蒸気積算量なら誤差7%で観測することができる¹⁸⁾。

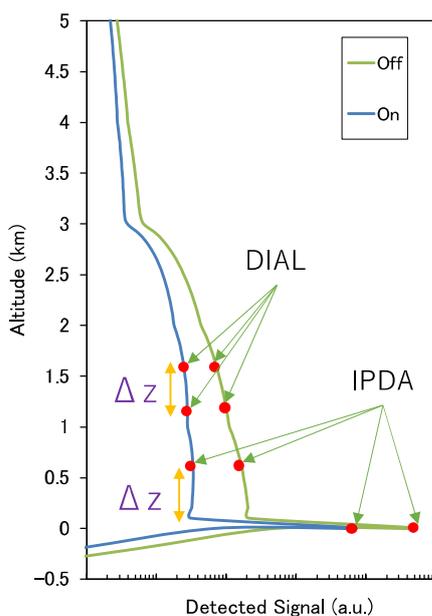


Fig. 4 Schematics of proposed IPDA-DIAL. IPDA method uses the backscatter signals from the sea surface and the atmosphere to take differential attenuation at the on/off wavelengths.

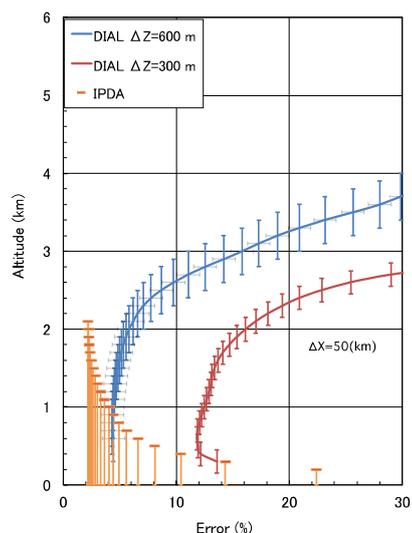


Fig. 5 Random error of water vapor density for the space borne DIAL with vertical resolutions of 300m/600m and IPDA DIAL. Horizontal resolution is 50km and water vapor model is a mean summer profile over Japan. The vertical bar in IPDA means that the statistical error is that of the column density in the range from surface to the marked altitude

Table 1 Parameters of the space-borne water vapor IPDA-DIAL and DIAL

Parameter	IPDA-DIAL (Current Proposal)	DIAL (Original proposal)
Pulse Energy	10mJ (One-beam)	10mJx2 (Two-beam)
Repetition Rate	500Hz (on/off pair)	500Hz (on/off pair)
Wavelength	1336nm	1336nm
Telescope Aperture	0.5m	0.8m
Quantum Efficiency	50%(APD)	50%(APD)
Platform Altitude	400km	250km
Ground Track Speed	7.7km/s	7.8km/s

3.3.6 海上風速の観測可能性の検討

水蒸気の鉛直分布と同様に、海面付近の水蒸気量の測定は、豪雨の予測や海洋と大気間の熱フラックスの推定に特に重要である。海洋から大気への潜熱フラックスは放射フラックスに比べて絶対量こそ小さいものの、大気への水蒸気供給量と同義であり、特に熱帯～亜熱帯において、雲・雨の形成や大気放射などに重要なパラメータである。しかし、全球分布を推定したプロダクトにおいて、プロダクト間の差異が大きく、海上のブイの計測値(真値)との誤差も大きいことが指摘されている¹⁹⁾。潜熱フラックス Q_{lat} は広く用いられる以下のバルク式から求められる。

$$Q_{lat} = \rho L_v \langle wq \rangle \approx \rho L_v C_E S \Delta Q \quad (1)$$

ここで、 ρ は大気密度、 L_v は蒸発潜熱である。 $\langle wq \rangle$ は鉛直風と比湿の変動であるが、近似的に潜熱伝達係数 C_E 、海面上の水平風速 S 、大気海洋間の比湿差 ΔQ の積で求められる。 ΔQ はIPDA-DIALにより求められる海面付近の水蒸気量と衛星データから得られる海水面温度から求められる飽和水蒸気密度から計算できる。さらに、衛星搭載ライダーCALIPSOで測定される海面後方散乱係数から海上の風速を推定する方法²⁰⁾をIPDA-DIALのoff信号に適用することにより、海面付近の風速 $U(\sim S)$ を求め、客観解析データなどの気温、気圧情報と合わせると、潜熱・顕熱フラックスのスナップショット毎の計算が可能になる。

衛星ライダーで測定される海面後方散乱係数から海上風速を求める原理は、風が強くなると波高が高くなり、波の勾配分散 (wave-slope variance: σ^2) が大きくなることを利用する。レーザ光の海面への入射角 θ に対する後方散乱係数 γ は $\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ の分散を持つ2次元ガウス分布

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma^2 \cos^4 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

で表せる。ここで ρ はフレネル反射率で海水の屈折率 n より $\rho = [(n-1)/(n+1)]^2$ となる。Fig. 6に各風速に対する後方散乱係数の入射角 θ 依存性を示す。

衛星ライダーの場合、入射角はほぼ 0° となるので (CALIPSOの場合 0.3°), ライダーの海面後方散乱係数は

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma} \quad (3)$$

となる。一方風速と σ^2 の関係として式(4)が提案されている²⁰⁾。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= 0.0146\sqrt{U} && (U < 7\text{m/s}) \\ \sigma^2 &= 0.003 + 0.00512U && (13.3\text{m/s} > U \geq 7\text{m/s}) \\ \sigma^2 &= 0.138 \log_{10} U - 0.084 && (U \geq 13.3\text{m/s}) \end{aligned} \quad (4)$$

風速7m/sから13.3m/sではCox-Munkモデル(線形関係)、風速13.3m/s以上ではWuモデル²¹⁾(対数線形関係)、風速7m/s以下では波の勾配分布を一次元ガウス分布とみなしたモデルとなっている。これらの関係式は、1ヶ月の全球データを用いて、CALIPSOの後方散乱係数を10km平均してから導出した風速と、衛星搭載マイクロ波放射計AMSR-Eの風速(20km分解能)と比較した結果、二乗平均平方根(rms)差は1.2m/sであると報告されている。式(3)(4)を用いて求めた海面後散乱係数と風速の関係をFig. 7に示す。

この関係式が台風の発生する夏季の日本南方における海上風速測定において有用であるかを確認するため、実際のCALIPSOの海面散乱係数データを用いて検証を行った。データはCALIPSO衛星の1064nmの減衰後散乱係数を用いて、消散係数・後方散乱係数比を30と仮定し海面直上までの光学的厚さを求め、減衰補正した海面後散乱係数を求めた。雲や濃いエアロゾル等による減衰の大きいデータは除外している。補正した海面後散乱係数より海上軌跡に沿った風速を求めた。手順は文献[17]にしたがい、大気中の減衰係数補正した海上後方散乱係数から式(3)(4)を用いて海上風速を求めた。検証のために、AMSR-2のマイクロ波放射計によるL3-海上風速データ²²⁾と気象観測船啓風丸²³⁾ならびに研究船みらい²⁴⁾による気象観測データとの比較を行った。

Fig. 8に気象観測船啓風丸との風速比較結果を、Fig. 9に比較日(2018/7/30)のCALIPSOのパスを観測時直近の天気図に示す。衛星の軌跡は台風12号の東側を横切っている。北緯20~24°では、両衛星観測データと観測船の測定値はよく一致している。Fig. 10に研究船みらいとの風速比較結果を、Fig. 11に比較日(2020/9/10)のCALIPSOのパスを観測時直近の天気図に示す。衛星の軌跡は熱帯低気圧を横切る軌跡である。両衛星観測データと観測船の測定値はよく一致している。北緯25°以北では、AMSR-2のデータは得られていないが、CALIPSOの風速データは得られており、風速が上昇しているのが分かる。衛星ライダーの海面後散乱係数からの海上風速推定が台風周辺などでも有効であることが確認できた。

マイクロ波を用いたAMSR-2とライダーとの風速結果に違いが生じる要因としては、測定視野の違いによる風速分布の不均一の影響が考えられる。CALIPSOのフットプリントは70mと狭いのに対し、AMSR-2のマイクロ波放射計のFOVが15km程度と大きく異なっている。また海上にうねりがある場合には、海上風速と勾配分散の関係が成り立たなくため、風速が正しく得られない可能性がある。

別の視点から、風速が大きい場合には海面後散乱光強度が減少するため、海面後散乱光を利用するIPDA観測では、海上の水蒸気観測誤差に影響が出る可能性がある。しかしFig. 7から、例えば風速2m/sに比べて風速10m/sの海面散乱信号強度は1/4に減少するが、提案しているIPDA-DIAL方式による水蒸気測定誤差は海面後散乱光強度に比べて弱い大気散乱光強度に依存するため、この程度の海面散乱光強度の減少の誤差への影響は無視できる。

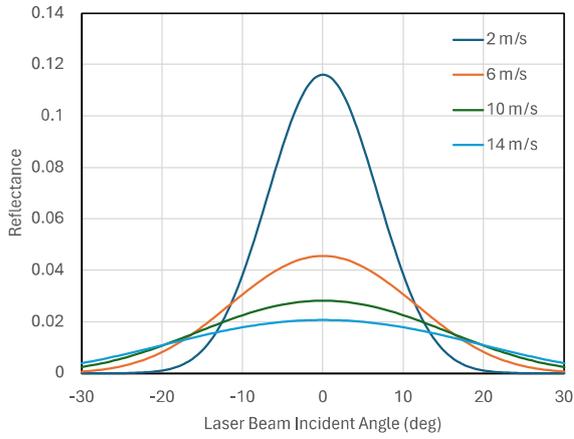


Fig. 6 Reflectance distribution for different wind speed.

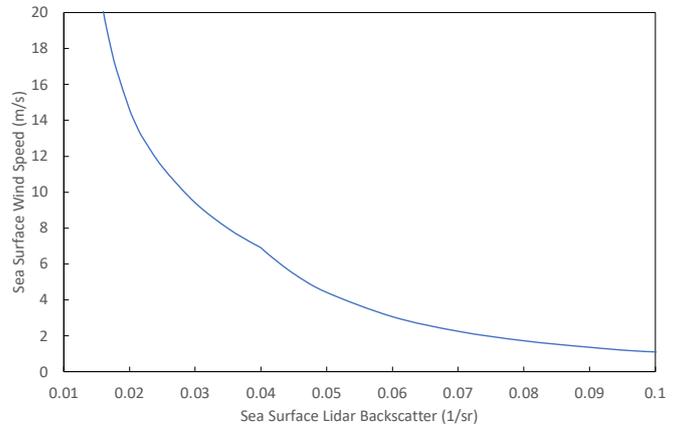


Fig. 7 Relation between sea surface wind speed and sea surface backscatter using relation between wave slope variance and wind speed.

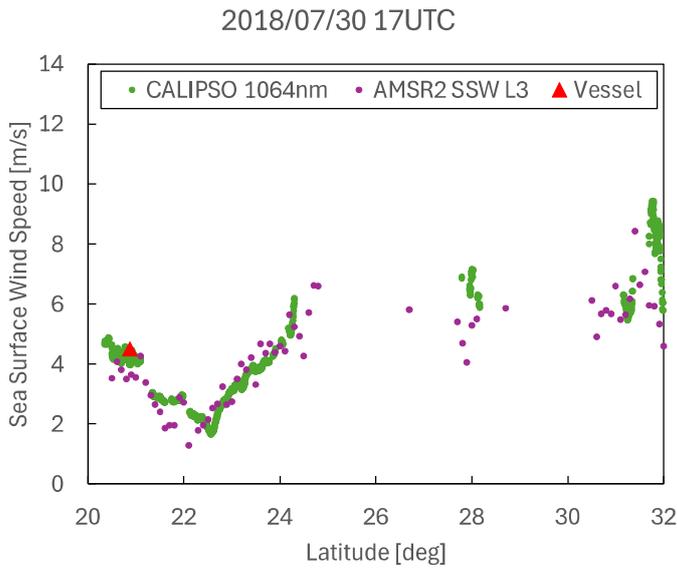


Fig. 8 Sea surface wind speeds derived from CALIPSO 1064nm (green dot), collocated AMSR2 wind speed (purple dot) and meteorological observations by research vessel Keifu Maru (red triangle) (2018/7/30 17UTC).

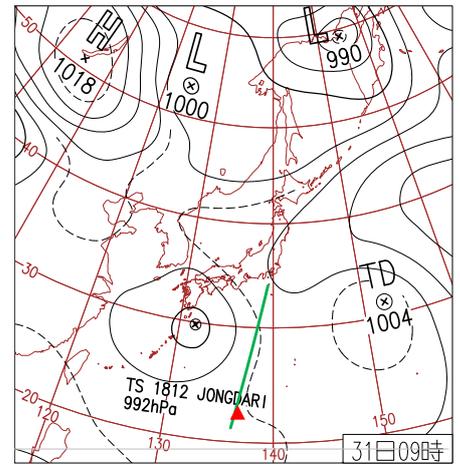


Fig. 9 Vessel position (red triangle) and orbit track locations (green line) of CALIPSO and AMSR-2 plotted on weather map (2018/7/31 0UTC).

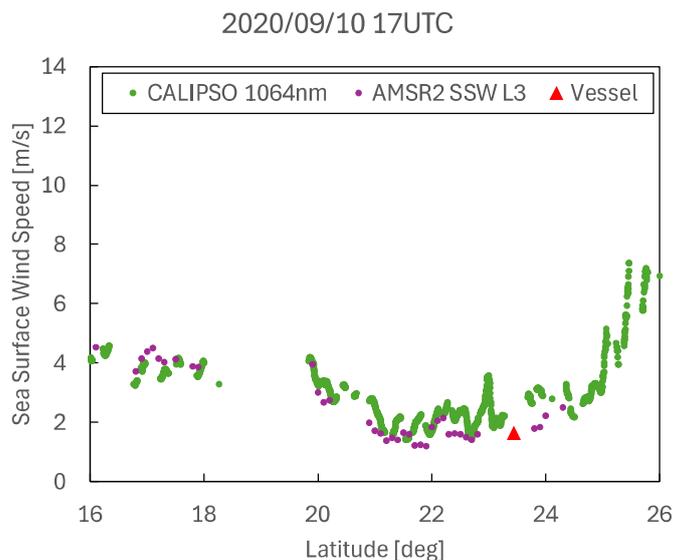


Fig. 10 Sea surface wind speeds derived from CALIPSO 1064nm (green dot), collocated AMSR2 wind speed (purple dot) and meteorological observations by research vessel MIRAI (red triangle) (2020/9/10 17UTC).

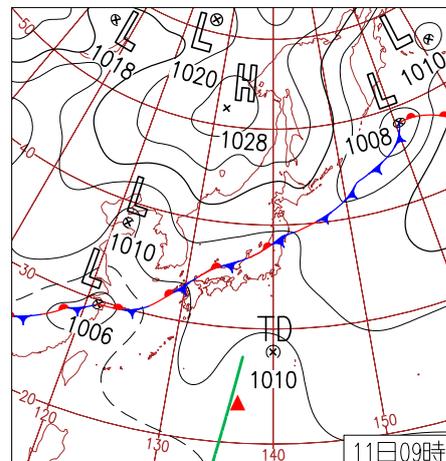


Fig. 11 Vessel position (red triangle) and orbit track locations (green line) of CALIPSO and AMSR-2 plotted on weather map (2020/9/11 0UTC).

3.3.7 まとめ

すでに提案している衛星搭載水蒸気観測ライダーミッションの概要と技術的特色、並びに追加提案しているIPDA-DIAL方式による海面と大気のレーザ後方散乱光を併用して海面直上水蒸気の水蒸気DIAL観測並びに海上風速を同時測定する手法の検討結果を示した。CALIPSO1064nmデータによる海上風速とマイクロ波放射計並びに観測船による海上風速の比較を行ったが、三者は概ね一致した。またIPDA-DIALにおいて、風速が大きい場合に海面後方散乱係数が減少することによって生じる水蒸気測定誤差は無視できる程度に小さいことも確認した。衛星搭載水蒸気IPDA-DIALにより海上の水蒸気と風速を同時観測することで、潜熱フラックス測定は十分可能であると考えられる。

今後の取組としては、航空機搭載のIPDAプロトタイプを開発し、航空機搭載IPDAによる海上水蒸気と海上風速の同時観測実験を行う必要がある。また、衛星搭載DIALの実現に向けて、励起レーザの高調波を利用したHSRL (High Spectral Resolution Lidar) との融合の検討なども今後必要になると考えられる。

引用文献

- 1) European Space Agency, WALES -Water Vapour Lidar Experiment in Space, ESA SP-1279(3) (2004).
- 2) 坪木 和久, 激甚気象はなぜ起こる, 新潮社(2020).
- 3) S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Ikuta, Y. Shoji, H. Seko, and K. Shiraishi, "Lidar observations and data assimilation of low-level moist inflows causing severe local rainfall associated with a mesoscale convective system," *Mon. Wea. Rev.*, 150, 7, 1781-1798(2022).
- 4) 阿保 真, 長澤親生, 柴田泰邦, 内野 修, 酒井 哲, 柴田 隆, 勝俣昌己, "衛星搭載差分吸収ライダーによるグローバルな水蒸気分布観測の提案," *レーザセンシング学会誌*, 1(2), 72-78 (2020).
- 5) V. Wulfmeyer, H. Bauer, P. D. Girolamo, and C. Serio: "Comparison of active and passive water vapor remote

- sensing from space: An analysis based on the simulated performance of IASI and space borne differential absorption lidar,” *Remote Sens. Environ.* 95(2), 211-230 (2005).
- 6) E. Browell, S. Ismail, and W. Grant, “Differential absorption lidar (DIAL) measurements from air and space,” *Appl. Phys. B*, 67, 399-410 (1998).
 - 7) F. Harnisch, M. Weissmann, C. Cardinali, and M. Wirth, “Experimental assimilation of DIAL water vapour observations in the ECMWF global model,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 1532-1546 (2011).
 - 8) O. Uchino, T. Nagai, T. Fujimoto, C. Nagasawa, M. Abo, T. Moriyama, T. Nakajima, N. Murate, K. Tatsumi, and Y. Hirano, "Diode-pumped solid state laser for spaceborne water vapor DIAL," *Proc. SPIE*, 2581, 154-160 (1995).
 - 9) C. Nagasawa, M. Abo, T. Sugisaki, and O. Uchino, "Simulation for atmospheric water vapor measurements from spaceborne DIAL," *Proc. SPIE*, 2581, 161-167 (1995).
 - 10) Y. Hirano, T. Yanagisawa, S. Ueno, T. Tajime, O. Uchino, T. Nagai and C. Nagasawa, “All-solid state high-power conduction-cooled Nd:YLF rod laser,” *Opt. Lett.*, 25, 1168-1170 (2000).
 - 11) T. Yanagisawa, M. Imaki, Y. Hirano, O. Uchino, T. Nagai and C. Nagasawa, “Development of a three-wavelengths switchable Ti:sapphire laser,” *Proc. Int. Laser Sens. Symp. '99*, 20th Japan. Laser Sens. Symp., 191-194, Fukui, Japan (1999).
 - 12) C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, O. Uchino, "Development of airborne DIAL for water vapor measurement," *Proc. SPIE* 4153, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, Sendai, Japan (2001), <https://doi.org/10.1117/12.417098>.
 - 13) Y. Shibata, C. Nagasawa, and M. Abo, “Development of 1.6 μm DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO₂ concentration profiles”, *Appl. Opt.* 56, 1194-1201(2017).
 - 14) 阿保 真, ”大気中の微量気体を測るライダー”, *計測と制御*, 56, 342-347 (2017).
 - 15) O. Boucher, D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann et al., Clouds and Aerosols. In: *Climate Change, in The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2013).
 - 16) P. Wameck, *Chemistry of the Natural Atmosphere*, International Geophysics Series, 14, pp.757 Academic Press, 1988.
 - 17) J. B. Abshire, A. Ramanathan, H. Riris, J. Mao, G. R. Allan, W. E. Hasselbrack, C. J. Weaver, E. V. Browell, “Airborne measurements of CO₂ column concentration and range using a pulsed direct-detection IPDA lidar,” *Remote Sens.* 443-469 (2014).
 - 18) M. Abo, C. Nagasawa, Y. Shibata, O. Uchino, T. Sakai, T. Shibata, M. Katsumata, “Proposal for the space-borne Integrated Path Differential Absorption (IPDA) lidar for lower tropospheric water vapor observations,” In: Sullivan, J.T., et al. *Proceedings of the 30th International Laser Radar Conference. ILRC 2022*, 639-643(2023). Springer Atmospheric Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37818-8_82
 - 19) M. F. Cronin, C. L. Gentemann, J. Edson, I. Ueki, M. Bourassa, S. Brown, C. A. Clayson, C. W. Fairall, J. T. Farrar, S. T. Gille, et al., “Air-sea fluxes with a focus on heat and momentum,” *Front. Mar. Sci.* 6, 430 (2019).
 - 20) Y. Hu, K. Stamnes, M. Vaughan, J. Pelon, C. Weimer, D. Wu, M. Cisewski, W. Sun, P. Yang, B. Lin, A. Omar, D. Flittner, C. Hostetler, C. Trepte, D. Winker, G. Gibson, and M. Santa-Maria, “Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements,” *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3593–3601(2018), <https://doi.org/10.5194/acp-8-3593-2008>.
 - 21) J. Wu, “Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition,” *Radio Sci.*, 25, 37–48(1990).
 - 22) A. Shibata, “Ocean wind speed retrieval algorithm using the frequency 36 GHz vertical/horizontal and 6 GHz horizontal data of the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR),” *European Journal of Remote Sensing* 45(1), 133-140 (2012).
 - 23) JMA, “Data of Oceanographic and Marine Meteorological Observation,”

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/cruisedata_e.php?id=KS1806
(Accessed 2024.06.23)

- 24) 勝俣昌己, 谷口京子, 西澤智明, “研究船「みらい」における洋上水蒸気のライダー観測,” レーザセンシング学会誌, 3(1), 13-26 (2022).

(阿保 真)

4. まとめ

MOLIは既にJAXAで研究開発が行われているのでこの調査報告書では特に取り上げなかった。コヒーレントドップラーライダーによる風観測、HSRLによるエアロゾル・雲・鉛直風の測定、DIALによる水蒸気の観測の各ミッション提案は海外には見られない特徴を有している。直接検波による衛星からの全球風観測はすでにAEOLUSで行われ、そのデータの数値予報への有用性が示された。コヒーレント検波による風観測の提案は現在日本独自のものである。NASAのAOS計画ではHSRLはコスト増の関係で見送られたが、日本で提案されているエアロゾル・雲観測ではHSRLを用いて、さらに可能ならば鉛直流と広い受信視野角での多重散乱の観測を行うことを目的として研究開発を進めている。水蒸気DIALでは海面などからの反射を利用したIPDAの技術を用いて線状降水帯の予測に重要な高度2km以下の水蒸気観測を目指して検討が進められている。

これらのミッションを実現するための今後開発すべき技術や課題については小委員会の報告の中で取りまとめていくこととなっているが、ミッションを実現するための方策として国内の衛星観測に関する活動の現状を見てみる。国内における衛星観測に関する活動として、日本学術会議地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会が2023年9月26日に、「見解 我が国の地球衛星観測に関する統合的戦略立案について」をとりまとめている。その中では、

- (1) 気候変動対策の科学的基盤と国際協力の要としての地球衛星観測の必要性
- (2) 我が国の地球衛星観測の統合的戦略立案の必要性
- (3) オープンサイエンスの推進
- (4) 統合的戦略の実現のための様々な視点での人材育成の推進

が強調されている。

本学会を含めて24学会2団体から成る地球衛星観測タスクフォース(TF)では、衛星観測・利用者による将来ミッションの提案や優先度の議論がなされている。また、JAXA将来ミッション検討委員会では専門家によるJAXA地球観測衛星の将来ミッションについての意義と展望が議論されている。

産学官が集い衛星地球観測に関する政策提言や共創活動を行う「衛星地球観測コンソーシアム(CONSEO)」は令和5年(2023年)3月23日に我が国の衛星地球観測の全体戦略等にかかわる政府に向けた「提言 衛星地球観測全体計画に関する考え方」を发出している。

これらの活動の成果として、内閣府の令和5年(2023年)6月13日の宇宙開発戦略本部決定による宇宙基本計画工程表の中の「(2) 国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現 5. リモートセンシング 今後の主な取組(2)」では、「森林バイオマスによる吸排出量の推定精度向上等に資する新たなセンサ技術であるライダー観測技術について、基盤技術に向けた研究開発(MOLI)や都市デジタルツインの構築に不可欠な高度計ライダーや大気の3次元観測に不可欠なドップラーライダーなどの実現に向けた研究を進める。」と記述されている。

宇宙基本計画工程表において示される地球衛星観測の中に、MOLI、ドップラー風ライダーに続くエアロゾル・雲・鉛直風測定用ライダー、水蒸気観測用DIALも記述されるように、日本学術会議、TF、CONSEOなどを通じて活動していくことが重要と考える。また、MOLIの実現と、その後に続くドップラー風ライダー、エアロゾル・雲・鉛直流測定用ライダー、水蒸気観測用DIALなどの研究促進と実現に向けた活動を本調査委員会で継続して推進していくことが重要である。

なお、令和6年3月28日宇宙政策委員会による宇宙技術戦略の25ページに、「加えて、ドップラー、偏光、差分吸収等多様なライダー技術の発展により、従来の計測手法では困難であった大気粒子や風況、水蒸気等の3次元プロファイルの解明により気象や台風の予測精度向上、黄砂・火山灰等の分布の把握に加え、4Dの地球デジタルツインの実現にも貢献することが期待される。」と記述されていることは本プロジェクト調査委員会としても大きな前進である。

令和6年4月26日内閣府、総務省、文部科学省、経済産業省によって発表された宇宙戦略基金基本方針の中で、「輸送」「衛星等」「探査等」の3つの分野において「市場の拡大」、「社会課題解決」、「フロンティア開拓」の3つの出口に向け、宇宙技術戦略で抽出された技術項目を参照しつつ、技術開発テーマを設定し、スタートアップをはじめとする民間企業や大学等が複数年度(最大10年)にわたって大胆に技術開発に取り組めるよう、宇宙分野の資金配分機関としてJAXAに新たに基金を設置し、支援するものであると述べられている。

このうち、宇宙戦略基金実施方針(文部科学省計上分)の中に、「高出力レーザーの宇宙適用による革新的衛星ライダー技術 最先端の観測技術である衛星ライダーの革新(長寿命化、広範囲化等)に向けて、コア技術となる高出力レーザーの小型化や宇宙適用に係る技術開発を進める」ことが含まれていることは、日本における衛星搭載ライダー実現への大きな一歩と言える。

(内野 修)