

# 特集 衛星搭載ライダー

# 衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測

石井 昌憲<sup>1</sup>, 岡本 幸三<sup>2</sup>, 久保田 拓志<sup>3</sup>, 藤平 耕一<sup>3</sup>, 松本 紋子<sup>4</sup>, 今井 正<sup>3</sup>, 境澤 大亮<sup>3</sup>, 今村 俊介<sup>3</sup>, 石橋 俊之<sup>2</sup>, 田中 泰宙<sup>2</sup>, 佐藤 篤<sup>5</sup>, 西澤 智明<sup>6</sup>, 村田 健史<sup>7</sup>, 岡本 創<sup>8</sup>, 沖 理子<sup>3</sup>, 佐藤 正樹<sup>9</sup>, 岩崎 俊樹<sup>10</sup>

<sup>1</sup>東京都立大学(〒195-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)
 <sup>2</sup>気象庁気象研究所(〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)
 <sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構(〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)
 <sup>4</sup>ANAホールディングス株式会社(〒105-0021 東京都港区東新橋 1-5-2 汐留シティセンター)
 <sup>5</sup>東北工業大学(〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)
 <sup>6</sup>国立環境研究所(〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)
 <sup>7</sup>情報通信研究機構(〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)
 <sup>8</sup>九州大学応用力学研究所(〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)
 <sup>9</sup>東京大学大気海洋研究所(〒277-8564 千葉県柏市柏野の葉 5-1-5)
 <sup>10</sup>東北大学(〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3)

#### Global wind profiling with future space-based Doppler wind lidar

Shoken ISHII<sup>1</sup>, Kozo OKAMOTO<sup>2</sup>, Takuji KUBOTA<sup>3</sup>, Koichi FUJIHIRA<sup>3</sup>, Ayako MATSUMOTO<sup>4</sup>, Tadashi IMAI<sup>3</sup>, Daisuke SAKAIZAWA<sup>3</sup>, Shunsuke IMAMURA<sup>3</sup>, Toshiyuki ISHIBASHI<sup>2</sup>, Taichu Y TANAKA<sup>2</sup>, Atsushi SATO<sup>5</sup>, Tomoaki NISHIZAWA<sup>6</sup>, Takeshi MURATA<sup>7</sup>, Hajime OKAMOTO<sup>8</sup>, Riko OKI<sup>3</sup>, Masaki SATOH<sup>9</sup>, and Toshiki IWASAKI<sup>10</sup>

<sup>1</sup>Tokyo Metropolitan University, 6–6 Asahigaoka Hino, Tokyo, 191–0065

<sup>2</sup>Meteorological Research Institute, 1–1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki 305–0052

<sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, 2–1–1 Sengen Tsukuba, Ibaraki 305–8505

<sup>4</sup>ANA HOLDINGS INC., 1–5–2 Higashi-Shimbashi Minato-ku, Tokyo 105–7140

<sup>5</sup>Tohoku Institute of Technology, 35–1 Yagiyama Kasumi-cho Taihaku-ku, Sendai, Miyagi 982–8577

<sup>6</sup>National Institute for Environmental Studies, 16–2 Onogawa Tsukuba, Ibaraki 305–8506

<sup>7</sup>National Institute of Information and Communications Technology, 4–2–1 Nukuikitamachi Koganei, Tokyo 184–8795

<sup>8</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6–1 Kasuga Park Kasuga, Fukuoka 816–8580

<sup>9</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5–1–5 Kashiwanoha Kashiwa, Chiba 277–8564 <sup>10</sup>Tohoku University, 6–3 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980–8578

(Received August 1, 2020)

Wind profile is very important especially for numerical weather prediction and investigation of spatial atmospheric structure. Current global observation is significantly biased to water- and heat-related measurements with relatively low vertical resolution. Global wind profiling with high vertical resolution would improve the numerical weather prediction skills. Space-based Doppler Wind Lidar (DWL) is one of useful approaches for global wind profiling with the high vertical resolution. In the paper, we describe a space-based DWL.

キーワード:レーザー, ライダー, ドップラー風ライダー, 衛星観測, 全球風高度分布 **Key Words**: Lidar, Doppler Wind Lidar, Space-based, Global wind profiling 衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測(石井 昌憲)

# 1. はじめに

近年,地球規模で起こっている気候変動は,豪 雨,暴風,台風の大型化や強い熱帯低気圧の活動度 の増加<sup>1)</sup>,洪水,干ばつ等の気象災害を世界各地に もたらし,その深刻さは増している.深刻な気象災 害によって,人々はこれまで以上に危険にさらされ ている.気象災害から命や財産を守るために,予測 に基づいた準備や行動が必要であり,そのために, 数値予報 (Numerical Weather Prediction: NWP)精度 の向上は,防災や災害リスク軽減のため非常に重要 な課題である.

風は, 圧力, 気温, 湿度等のように大気の状態を 表す基本的かつ重要な気象変数の1つであり, 風観 測は総観規模から局所的なスケールの大気物理, 雲 対流・大気循環の総合作用等の理解に必要不可欠で ある.風の高度分布観測は,全球・領域モデルによ る数値予報,大気質予測に必要な初期値の改善や, 気候変動や様々な気象現象の研究において非常に重 要である.

世界気象機関(World Meteorological Organization: WMO)は、様々な気象現象にわたって解析を行え るように、様々な気象観測ネットワークと気象観測 システムを構築している。地球規模で気象データを 取得できる衛星観測システムの重要性は増している が、現在の衛星観測システムは、風観測に比べて温 度および水蒸気に関連する観測に偏っている<sup>2)</sup>. WMOは全球風観測で求められる観測要求精度を "Observing Systems Capability Analysis and Review" として WMO のホームページ上に公開している<sup>3)</sup>. 現在の全球風観測システムがこれらの要件を必ずし も満たすわけではない.

直接観測である海洋ブイや船舶、自動気象観測ス テーションは地表面付近の気象情報を広範囲に与え るが、風の高度分布は与えない、地上設置型ウィン ドプロファイラーは風の高度分布を与えてくれるも のの. 日本. 西欧州及び北米等限られた地域にしか 設置されていない.風の高度分布は、ラジオゾンデ や航空機観測によって与えられる. ラジオゾンデと 航空機による観測は、北半球の人口の多い地域で行 われており、南半球ではほとんど行われていない. さらに、上層大気を観測する気象観測局数は減少し ている, 航空機観測は航空航路上に限定される等の 課題がある.大陸内陸部や海洋域は非常に大きな観 測の空白域となっている.海,南半球及びその他の 疎な地域での風観測の欠如は,数値予報や数値予報 を用いる解析において、不均一誤差といった問題を 起こしている.



衛星搭載のマイクロ波散乱計は、地表面付近のみ であるもののベクトル風観測ができる. 衛星搭載イ メージャーは、 雲や水蒸気の動きから大気追跡風 (Atmospheric Motion Vector: AMV) により、 $1 \sim 2$ 層 のベクトル風観測を与えることができる. AMV は 広い観測範囲,高い観測時間分解能及び水平解像度 (2.5 及び10分, 0.5°×0.5°)を実現しているが、鉛 直分解能は低い(1-2 km).ベクトル風におけるラ ジオゾンデに対する AMV のバイアスと二乗平均差 (Root Mean Square) は大きい (バイアスは2m/s 程 度, RMS ベクトル誤差は4 m/s)<sup>4,5)</sup>. さらに AMV は、厚い雲の下、乾燥した地域、晴天域、雲の少な い地域、内陸地域の地表近くの大気、低風速地域等 では、ベクトル風の算出が困難である. AMV の高 さ推定は非常に難しく、他の観測機器との比較で数 百m(30-60 hPa)の違いが生じる<sup>6,7)</sup>.

ドップラー風ライダー (DWL) は, 高い観測分 解能、低いバイアス、高い観測精度による風の高度 分布を与えることができるので、これまでの衛星観 測のギャップを埋める事ができる.欧州宇宙機関 (European Space Agency: ESA) は、全球で風の高度 分布を得るために,世界で初めてとなる衛星搭載 ドップラー風ライダー Aeolus<sup>8,9)</sup>を 2018 年 8 月に 打ち上げ,大気風の観測を開始した. Aeolus は, 衛星の進行方向に対して 90 度真横に紫外域のレー ザ光を射出し、1 視線方向(Line Of Sight: LOS) 風 速の高度分布を与える.米国では, NOAA と NASA がスペースシャトル, 宇宙ステーション, あるい は、単独衛星に搭載する DWL を検討してきている が. ミッション化までには至っていない<sup>2),10-13)</sup>. 日本では、JEM-CDWLと呼ばれる国際宇宙ステー ション (ISS) 搭載の Coherent DWL (CDWL) の実 現可能性に関する研究が 1990 年代後半に行われた が. ミッション化までに至らなかった<sup>14)</sup>.

本記事では、2章では観測が継続中の衛星搭載 ドップラー風ライダー Aeolus について ESA の Aeolus ポータルサイトの内容を参照しつつ紹介す る.3章と4章で現在提案中の日本の衛星搭載ドッ プラー風ライダーと衛星搭載ドップラー風ライダー の風データを用いた宇宙ビジネスについて述べ、5 章でまとめる.

#### 2. 衛星搭載ドップラー風ライダー Aeolus

Aeolus (Fig. 1) は ESA の Earth Explorer Core Mission-Living Planet Program の一つである. 主な目的 は、WMOの要求する鉛直分解能と風観測精度で風 の高度分布を提供し、1) 現在の全球観測システム が抱える風観測における課題の解決、2) 全球エネ







Fig. 1 Measurement geometry and coverage of Aeolus for (a) design in early 2000 and (b) launch in 2018. (https:// earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/a/adm-aeolus) ©ESA

ルギー収支に関する研究への貢献,3)全球大気循 環,降水システム,エルニーニョ現象,南方振動現 象,成層圏/対流圏交換等の大気大循環に関連する 研究へのデータ提供,を一次の衛星観測ミッション 目的としている.また,二次の衛星観測ミッション 目的として、4)高品質な全球の風高度分布の利用 による気候モデルの検証,5)大気力学,エネル ギー,水,エアロゾル,化学物質等の地球規模の大 気輸送及び循環に関する理解の向上,6)雲頂高度, エーロゾルの分布や光学的特性等の Spin-off プロダ クトのデータセットの提供をあげている.

#### Table 1 Specifications of Aeolus.

Attribution	Design	Launch		
Altitude (km)	400	320		
Off-nadir angle (deg)	35	35		
Laser transmitter	Nd:YAG, frequency-tripled, diode-pumped			
Wavelength (nm)	354.9			
Operation mode	Burst mode	Continuous mode		
Pulse repetition rate (Hz)	100	50		
Energy per pulse (mJ)	130	65		
Telescope diameter (m)	1.1	1.5		
Telescope type	Cassegrain			
Mie spectrometer	Fringe-imaging Fizeau interferometer 16 spectral channels			
Rayleigh spectrometer	Double-edge Fabry–Perot interferometer, 2 filters, sequential			
Detector	ACCD (Accumulation CCD) quantum efficiency 0.85			

 
 Table 2
 Observation Requirements. PBL: Planetary Boundary Layer

		PBL	Troposphere	Stratosphere
Vertical domain	(km)	0-2	2-16	16-20 (30)*
Vertical resolution <sup>1</sup>	(km)	0.5	1.0	2.0
Horizontal domain			Global	
Number of profiles	(1/hour)		>100	
Horizontal track data availability			> 90%	
Temporal sampling	(hour)		12	
Horizontal resolution / integration length	(km)	15 (target) - 100 (threshold) / 50		
Horizontal sub-sample length	(km)		3 km scale	
Random error (HLOS Component)	(m/s)	1	2.5	3*
Systematic error (HLOS component)	(m/s)	0.7	0.7	0.7
Dynamic Range, HLOS	(m/s)		±150	
Error Correlation per 100 km			< 0.1	
Probability of Gross Error	(%)		5	
Timeliness	(hour)		3	
Length of Observation Dataset	(year)		3	

Tables 1,2 に Aeolus のシステム諸元と風観測要求 を示す. Aeolus は、送信機として繰り返し周波数 100 Hz・パルスエネルギー 130 mJ(目標値 150 mJ) で動作するダイオード励起・伝導冷却の Nd:YAG レーザの第三高調波である波長 355 nm のレーザ光 (バーストモード動作),受信機として直接検波方式 を採用し、口径1.1mのカセグレン望遠鏡、レイ リーチャンネル用としてエタロンフィルターを用い るダブルエッジ方式の分光計、ミーチャンネル用と してフィゾー干渉計を用いるリング方式の分光計, 検出器として積分型 CCD を用いるライダーとして 設計された.その後,2003年までに望遠鏡の口径 を1.1 mから口径1.5 mへ、2010年にレーザに関す る詳細レビューにおいて、3年間の軌道上運用を可 能とし、故障リスクへ十分なマージンを確保するた めに、レーザ動作を「バーストモード」から「連続 モード」へ,繰り返し周波数を100 Hz から50 Hz へ,パルスエネルギーを130 mJから80 mJへ(目 標値 120 mJ) へ, と大きな仕様変更が行われた.

Aeolus は,当初は2007年に打上げられることが 計画されていたが、レーザ開発の遅れ等により打上 げが遅れ、2018年8月22日21時20分(GMT)に フランス領ギアナのクーローからヴェガロケットで 打ち上げられた. Aeolusのレーザは、レーザ誘起 によるコンタミネーションが発生しないように酸素 供給が行われた後、レーザ用電源が投入され、パル 衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測(石井 昌憲)

スエネルギー 65 mJ の出力でフライトモデルレーザ A (FM-A) の運用が開始された. レーザ FM-A の 出力は、運用2週間で約60mJまで低下したため (0.4 mJ/日の低下), 増幅器の温度調整が行われた. レーザ用光学ベンチの温度分布がより適正化された 結果,パルスエネルギー低下は1日あたり0.14 mJ まで抑えられた. その後, 2018 年 12 月中旬まで同 じ傾向が続いた.この傾向は、増幅器が動作してい ない時でも発生したことから,出力低下の原因は, O-sw レーザ発振器の進行性ミスアライメントと推 測されている. レーザ FM-A の出力は, 2019 年 6 月にはパルスエネルギー 40 mJ まで低下したため, 風観測誤差を小さくすることを目的として十分な SNR を得るために、レーザ FM-A から FM-B への切 り替えが6月末に行われ、パルスエネルギーは67 mJまで回復した. その後, パルスエネルギーは少 しずつ低下し、2019年11月末の時点で60mJと なったが、12月上旬にレーザ用コールドプレート の温度調整により 63 mJ に上昇した. パルスエネル ギーは 2020 年 6 月末時点で 62 mJ と設計値よりも 低いが、非常に安定した出力で運用を続けてい  $Z^{15)}$ .

受光部では、光検出器 (CCD 素子)と望遠鏡の 主鏡に問題が発生した. CCD 等のようなイメージ 検出器では画素に欠陥がある場合があり, 種類に よって、ホットピクセル(常に点灯状態,信号レベ ルの上昇), デッドピクセル (常に消灯状態), ス タックピクセル(常に点灯か常に消灯)等の種類が ある. Aeolus では、レイリー用とミー用の両方の 分光チャンネルに組み込まれている CCD にホット ピクセルが存在することが、打ち上げ直後の初期段 階から判明し,時間とともに発生箇所の数が増加 し、風プロダクトにバイアスを生じ、データ品質に 影響を与える要因となった. この問題を解決するた めに、Aeolus は定期的に地表面信号後の信号から 疑似暗電流を求め、2019年6月中旬以降、ホット ピクセルによるバイアスを取り除いている。この ホットピクセルの発生原因については、調査研究が 進められている.

次に,望遠鏡の主鏡に発生した課題について述べ る. 欧州中期気象予報センター(ECMWF)は, 2020年1月上旬から全球数値予報モデルで, Aeolusのレベル2B風プロダクトを用いてデータ同 化を開始した. ECMWFは,全球数値予報モデルと レイリー用分光チャンネルのレベル2B風プロダク トの差を統計的に評価したところ,大きな系統誤差 があることが判明し,望遠鏡の主鏡の温度と非常に 相関が強いことがわかった.主鏡の温度は,太陽と



の位置関係等により複雑に影響を受け、主鏡の形状 が変形したためバイアスが生じたとしている. Aeolus では 2020 年 4 月下旬に補正を行い、このバ イアスを取り除いている.

ECMWFでは、2番目のレーザFM-Bによって観 測された風プロダクトを用いて,全球数値予報へ与 えるインパクトについて評価を進めている. Aeolus の風観測は, IR 放射輝度, GNNS 電波掩蔽, 大気 追跡風のように、これまで十分に確立された観測シ ステムと同じ様に『中から大』の統計的に有意な正 の影響を与えることを示している.また、観測シス テム 実験 (Observing System Experiment: OSE) で は、データ同化のために提供された Aeolus の風観 測データは観測総数の1%未満にも関わらず、短期 予報および中期予報(最大10日)において、ジオ ポテンシャル高度とベクトル風の予測誤差が、熱帯 地域で約2%。南半球で2-3%減少したと報告され ている<sup>16)</sup>. 2020年は、新型コロナウィルス COVID-19 が発生し、我々の日常生活や様々な産業 に大きな影響を及ぼしている. 旅行業界では国を超 えた移動が制限され、商用航空機からの気象データ が減少した. そのため, 数値予報精度の低下が懸念 されたが、Aeolus の風プロダクトは、商用航空機 からの気象データ減少を補完するのに非常に役立っ ている. Aeolus による全球風観測は、数値予報へ の有用性と衛星観測の価値を示している.

#### 3. 日本の衛星搭載ドップラー風ライダー

日本では、JEM-CDWLと呼ばれる国際宇宙ス テーション (ISS) 搭載の Coherent Doppler Wind Lidar (CDWL) の実現可能性に関する研究が 1990 年代後半に行われた(Iwasaki 1999). その後, 技術 的および科学的観点から衛星搭載 CDWL の実現可 能性を検討するために、2011年にワーキンググ ループが組織され、衛星搭載 CDWL 用シミュレー タによるシミュレーションや観測システムシミュ レーション実験(Observing System Simulation Experiment: OSSE) が実施され、検討が進められてい る<sup>17-19)</sup>. 日本の衛星搭載 DWL においても, 十分な 鉛直分解能を有する風の高度分布観測を全球規模で 実現し、1)数値予報精度の向上、2)台風の進路や 強度等の予測の向上,3)気候モデル,大気輸送モ デル精度の向上,4)大気追跡風の風観測検証,観 測精度, 高度推定精度の向上等に貢献することを目 的としている. また, 社会貢献として 5) 高い観測 精度を持つ風の全球3次元分布を全てのステークホ ルダーに提供し、6) 衛星データの利活用の促進を 通して航空や海運ビジネスにおける新たな宇宙ビジ





Fig. 2 Image of future Japanese space-based DWL. ©TMU

# ネス産業の創出に役立てる.

Table 3 に検討が進められる日本の衛星搭載 CDWLの諸元を示す.検討されている CDWL シス テムでは,送信機として目に安全な波長帯である 1.5-µm もしくは 2-µm のパルスレーザ,光ヘテロダ イン検波方式の受信機から構成される.受信望遠鏡 の口径は 60 cm,観測視線方向数は 1 ないし 2 であ る.打上げロケットとしてイプシロンロケット,衛 星バスとして超低高度衛星が想定されている.これ までの検討では,水平分解能 50 km・高度範囲 0-3, 3-8, 8-20 km に対し,鉛直分解能と観測要求精度 は,それぞれ,0.5 km・1 m/s,1 km・2 m/s,2 km・4 m/s である.

### 4. 宇宙ビジネスへの展開

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 等、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。そのような中、2017年に開 催された宇宙ビジネスコンテスト S-Booster 2017に おいて、著者の1人である松本が提案した『超低高 度衛星搭載ドップラー風ライダーによる飛行経路・ 高度最適化システムの構築』が大賞に輝いた、衛星 Table 3 Specifications of future Japanese space-based CDWL and observation requirements.

Attribution	Concept	
Altitude (km)	<300	
Off-nadir angle (deg)	35	
Laser transmitter	Optical fber	Solid-state
Wavelength (µm)	1.5	2
Number of looks	1 or 2	
Pulse repetition rate (Hz)	150	30 x 2
Energy per pulse (mJ)	50	90
Telescope diameter (m)		0.6
Telescope type	Off-axis	
Detector	InGaAs PD	
Target horizontal resolution (km)	50	
Target vertical resolution (km)		(Vector wind error (m/s))
Altitude 0-3 (km)	0.5	1
Altitude 3-8 (km)	1	2
Altitude 8-20 (km)	2	4

搭載 DWL の風観測は数値予報精度向上による科学 的な貢献だけでなく,宇宙ビジネス産業発展へも貢 献出来ることを示し,社会的価値のある衛星ミッ ションとして期待されている.

#### 5. まとめ

現在. 超低高度衛星搭載 DWL の実現を目指し. JAXA, 気象研究所, ANA ホールディングス, 大 学,国立研究機関が参加し,技術的および科学的観 点からの検討だけでなく, 宇宙ビジネスという新し い観点からの検討も行われている. 超低高度衛星搭 載CDWLの実現は、数値予報精度の向上、気候モ デルや大気輸送モデル等の予測精度向上,現行の衛 星観測システムとのシナジー観測による観測精度向 上等の科学的な貢献だけでなく、観測データが新た な価値を創出することにより、新たな宇宙ビジネス 創出への期待も大きい. ESA は、衛星搭載 DWL に よる全球風観測を継続するために Aeolus のフォ ローオンミッションの検討を開始した. 観測要求仕 様等詳細内容は、今後、明らかになる予定である. 超低高度衛星搭載 CDWL の観測要求仕様は、 Aeolus のフォローオンミッションの検討を踏まえ ながら進めて行く予定である.

#### 謝 辞

衛星搭載ドップラー風ライダーの検討に関する研究(の一部)では, JSPS 科研費 17H06139, 19K04849, 19H01973 の助成を受けたものである.

#### 参考文献

 T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.) : "IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, United



衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測(石井 昌憲)

Kingdom and New York, NY, USA, (2013) 3–20, Available online at https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\_SPM\_FINAL.pdf [Accessed 20 September 2020].

- 2) 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, (2014) 543.
- WMO: "Observing Systems Capability Analysis and Review", Available online at https://www.wmo-sat.info/oscar/variables/ view/179 [Accessed 1 July 2020].
- M. Hayashi and K. Shimoji: "Atmospheric motion vectors derivation algorithm", Meteorological satellite center technical note. 58. 2013 (in Japanese).
- 5) M. Otsuka, M. Kunii, H. Seko, K. Shimoji, M. Hayashi, and K. Yamashita: "Assimilation experiments of MTSAT rapid scan atmospheric motion vectors on a heavy rainfall event", J. Meteoro. Soc. Japan, 93, (2015) 459.
- C. S. Velden and K. M. Bedka: "Identifying the uncertainty in determining satellite-derived atmospheric motion vector height attribution", J. Appl. Meteor. Climatol., 48, (2009) 450.
- K. Folger and M. Weissmann: "Height correction of atmospheric motion vectors using satellite lidar observations from CALIPSO", J. Appl. Meteor. Climatol., 53, (2014) 1809.
- ESA: "Atmospheric dynamics mission", Mission Selection Rep. ESA SP-1233 (4) (1999).
- 9) 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, (2005) 73.
- 10) R. M. Huffaker, T. R. Lawrence, M. J. Post, J. T. Priestley, F. F. Hall, R. A. Richter, and R. J. Keeler: "Feasibility studies for a global wind measuring satellite system (Windsat) : analysis of simulated performance", Appl. Opt. 23, (1984) 2523.
- R. T. Menzies: "Doppler lidar atmospheric wind sensors: a comparative performance evaluation for global measurement applications from earth orbit", Appl. Opt. 25, (1986) 2546.
- J. C. Petheram, G. Frohbeiter, and A. Rosenberg: "Carbon dioxide Doppler lidar wind sensor on a space station polar platform", Appl. Opt. 28, (1989) 834.
- M. J. Kavaya and G. D. Emmitt: "Space Readiness Coherent Lidar Experiment (SPARCLE) Space Shuttle Mission", Proc. SPIE, 3380, (1998) 2.
- 14) T. Iwasaki: "Science plan for ISS-borne coherent Doppler wind lidar measurement", Advanced Earth Science and Technology Organization (1999). (in Japanese)
- L. Oliver Lux, D. Wernham, P. Bravetti, P. McGoldrick, O. Lecrenier, W. Riede, A. D'Ottavi, V. De Sanctis, M. Schillinger,

J. Lochard, J. Marshall, C. Lemmerz, F. Weiler, L. Mondin, A. Ciapponi, T. Kanitz, A. Elfving, T. Parrinello, and O. Reitebuch: "High-power and frequency-stable ultraviolet laser performance in space for the wind lidar on Aeolus", Opt. Lett., 45, (2020) 1443.

- 16) M. P. Rennie and L. Isaksen: "An Assessment of the Impact of Aeolus Doppler Wind Lidar Observations for Use in Numerical Weather Prediction at ECMWF", Proc. EGU, (2020), Available online at https://doi.org/10.5194/egusphere-egu 2020-5340 [Accessed 7 May 2020].
- 17) S. Ishii, P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y. Satoh, T. Kubota, Daisuke Sakaizawa, Riko Oki, K. Okamoto, Toshiyuki 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, (2017) 301.
- 18) 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, (2017) 319.
- 19) 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, (2018) 179.



2000年名古屋大学大学院(理学専 攻)を満了退学,2001年に名古屋大 学大学院より博士(理学)の学位を 取得.2000年 郵政省通信総合研究 所専攻研究員,2002年 独立行政法 人通信総合研究所任期付研究員, 2005年 独立行政法人情報通信研究 機構研究員,2006年 同機構主任研

究員,2014年 NASA ラングレー研究センター客員研 究員,2017-2020年 首都大学東京連携大学院教授, 2018年 同機構プラニングマネージャー,2020年4月 より東京都立大学システムデザイン学部教授.光ヘテ ロダイン方式や直接検波方式を用いる光能動遠隔計測 のための基盤技術に関する研究開発や観測的研究に従 事.所属学協会は、レーザセンシング学会、日本リ モートセンシング学会、日本気象学会.専門分野は光 リモートセンシング,光工学,衛星リモートセンシン グ. CLRC Advisory member.