ISSN 2435-6239

### JOURNAL OF LASER RADAR SOCIETY OF JAPAN

**ザセンシング学会誌** 

**2020** Vol.1 No.2



# 衛星搭載ライダー



45 ページの記事参照





レーザセンシング学会誌

Journal of Laser Radar Society of Japan

Volume 1, Number 2 (October 2020)

### 特集:衛星搭載ライダー

Special Issue on Spaceborne Lidar

### 卷頭言

Prefatory note

### 日本における衛星搭載ライダーの実現に向けて

### 解説

Technical Review

### 宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager)

Lidar Mission of Vegetation Observation from Space Multiple-footprint Observation Lidar and Imager (MOLI)

浅井和弘, 境澤大亮, 水谷耕平, 西澤智明

### 解説

Technical Review

### 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

Global observation of aerosols and clouds by space-borne high spectral resolution lidar

### 解説

Technical Review

### 衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測

Global wind profiling with future space-based Doppler wind lidar

 解説

Technical Review

### イメージング FTS とドップラーライダによる全球風観測

Global Measurement of Wind Using Imaging FTS and Doppler Lidar

岡本 創,	木村俊義,	境澤大亮,	石井昌憲,	西澤智明,	石元裕史,	佐藤可織,	及川栄治
Hajime Oka	amoto, Toshiyo	oshi Kimura, D	aisuke Sakaiz	awa, Shoken Is	shii, Tomoaki N	Nishizawa, Hiro	oshi Ishimoto,
Kaori Sato,	Eiji Oikawa ··		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •				

### 解説

Technical Review

### 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

Proposal on the Spaceborne Differential Absorption Lidar for Global Water Vapor Profiling

阿保 真, 長澤親生, 柴田泰邦, 内野 修, 酒井 哲, 柴田 隆, 勝俣昌己 Makoto Abo, Chikao Nagasawa, Yasukuni Shibata, Osamu Uchino, Tetsu Sakai, Takashi Shibata, Masaki Katsumata

■ 編集兼発行人:レーザセンシング学会(http://laser-sensing.jp/)

企画:レーザセンシング学会編集委員会
 委員長:藤井隆,副委員長:境澤大亮
 委員:柴田泰邦,染川智弘,津田卓雄,朝日一平



### 内野 修

国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

### Toward the Realization of Spaceborne Lidar in Japan

### Osamu UCHINO

National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

### (Received September 8, 2020)

The project research committee on spaceborne lidar was established in the Laser Radar Society of Japan in April 2019. The meeting was held 4 times in 2019. Scientific objectives and large contributions to society were discussed on the proposed spaceborne lidar systems by the members of the committee and experts. Five spaceborne lidar proposals are published in this special issue. The committee will endorse the realization of the proposed spaceborne lidar with many persons concerned.

キーワード: ライダー, 衛星搭載, 全球観測 **Key Words**: Lidar, Spaceborne, Global observation

本特集号の発行の経緯について述べる. レーザセ ンシング学会(以下,本学会と略す)の前身である レーザーレーダー研究会の調査委員会による 2016 年12月19日の第一次報告によると、今後、取り組 むべき大規模プロジェクト研究課題の一つとして衛 星搭載ライダーが挙げられている. また, 2019年3 月1日に開催された本学会の第23回大気ライダー 研究会では、衛星搭載大気ライダーミッションの将 来計画に関するパネルディスカッションが行われ. 25の学会・関連団体からなる「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(TF)」が2018年11月に行った 衛星地球観測ミッション公募の一次審査を通過した 「衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観 測」、「衛星搭載水蒸気測定用差分吸収ライダー (DIAL)の技術実証」、「多波長偏光・高スペクトル 分解ライダー」の発表が行われ、出席者による活発 な議論が行われた.一方, JAXA は森林の樹高など を計測する ISS 搭載植生観測用ライダー (MOLI) の研究・開発を行い,搭載準備を進めている.

このような背景を基に、本学会として、将来の衛 星搭載ライダーの実現を目指して、科学的にも技術 的にも支援していくことは大変重要であると考えら れることから、衛星搭載ライダーに関するプロジェ クト調査委員会の設置を 2019 年 4 月 10 日の本学会 理事会に提案し、設置が認められた.

委員会のタスク(果たすべき作業)として,上記 各提案などについての社会的・科学的な必要性と現 在の技術的達成度,今後解決すべき課題や米国, EUおよび中国などを中心とした世界的な動向など について調査を行い,その結果はレーザセンシング 学会の論文や解説としてまとめることとした.委員 会のメンバーは,

委員長	内野修
副委員長	石井昌憲
委員	阿保真, 五十嵐保, 岡本創, 久世宏明,
	酒井哲,境澤大亮,柴田隆,津田卓雄,
	長澤親生,西澤智明

の 12 名である.

委員会は、これまで4回(2019年5月8日、7月 1日、9月25日、12月16日)開催され、2020年2 月21日に予定されていた第5回目は新型コロナウ イルス感染拡大により開催を中止した。第1回目か ら第3回までは首都大学秋葉原サテライトキャンパ 日本における衛星搭載ライダーの実現に向けて(内野 修)

スにおいて, 第4回目は JAXA つくば宇宙センター で行われた. 会議では, 委員以外の専門の方を招待 し講演をお願いした. 第3回委員会では,

勝俣昌己(JAMSTEC)「衛星搭載水蒸気 DIALの 海面フラックス推定への応用」

松本紋子(ANA ホールディングス)「衛星搭載風 ライダーの飛行機の経済的運航へのメリット」

岡本幸三(気象研究所)「衛星搭載風ライダーの OSSE(観測システムシミュレーション実験)」

第4回委員会では木村俊義(JAXA)「JAXA 地球 観測の現状と将来」の各発表を基に活発な質疑・応 答がなされた.

これら専門家の意見や委員会での各提案に対する 質問・議論等を基にこの特集号では5つの衛星搭載 ライダーの提案が詳しく記述されている. 各提案に 関する科学的目的や社会への貢献については議論を 行ったが, 第5回目の委員会で行う予定であった技 術的検討などについては今後の課題である.

ところで、海外における衛星搭載ライダーとして は、NASA と CNES が 2006 年 に 打 ち 上 げ た CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) が 14 年経った現在も観測を継 続中で、これまで数多くの科学的成果が得られてい る. 2018 年 8 月には全球の風観測を行うための衛星 Aeolus が ESA によって打ち上げられ、観測された データは ECMWF の数値予報に利用されている. 最近では新型コロナウイルス感染拡大により世界の 民間航空機による観測数の減少を補完する気象デー タとしてその期待は大きい. NASA は 2018 年 9 月に は ICESat-2 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-2)



を,同年12月にはGEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)を打ち上げ,観測を行っている. 今後, ESA, JAXA, NICT による EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)の打ち上げが予定 されている. ESA がライダーを,日本側から雲 レーダーを搭載する. また,DLR と CNES による MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission)の 打ち上げも予定されている.

一方,日本では、1991年から2000年の早い時期 に ELISE (Experimental Lidar in Space Equipment) が計画され、一部開発が行われたが、残念ながら途 中で中止された。ELISE の経緯については本学会の ニュースレター第4号に笹野泰弘による「ELISE (衛星搭載ライダー)―備忘録」で詳しく述べられて いる。また、ELISE の関係資料は本学会ホームペー ジの文書アーカイブに掲載されているので参照され たい。

衛星搭載ライダーでは、パッシブセンサーでは達 成できない高い高度分解能で全球の森林の樹高, 雲・エアロゾル特性,風向・風速,水蒸気などが観 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大 きく貢献すること,そしてそれらを基に適切な対応 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,本委員会をはじめ 本学会員の多くの叡智と関係機関との協力を得て, この特集号に掲載されている衛星搭載ライダーを実 現して行きたい.もちろん,面的に広く観測できる パッシブセンサーとライダーの組み合わせによる相 乗効果も検討して行く必要がある.



特集 衛星搭載ライダー

### 宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager)

浅井 和弘<sup>1</sup>, 境澤 大亮<sup>2</sup>, 水谷 耕平<sup>3</sup>, 西澤 智明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東北工業大学(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1) <sup>2</sup>字宙航空研究開発機構(〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1) <sup>3</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>4</sup>国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Lidar Mission of Vegetation Observation from Space Multiple-footprint Observation Lidar and Imager (MOLI)

Kazuhiro ASAI<sup>1</sup>, Daisuke SAKAIZAWA<sup>2</sup>, Kohei MIZUTANI<sup>3</sup>, and Tomoaki NISHIZAWA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tohoku Institute of Technology, Sendai, 982–8577 <sup>2</sup>The Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen 2–1–1, Tsukuba, 305–8505 <sup>3</sup>National Institute of Information and Communications Technology, Koganei 184–8795 <sup>4</sup>National Institute of Environmental Studies, Tsukuba 305–8506

(Received August 27, 2020)

The purpose of the MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) mission is to demonstrate Japan's first space lidar and to obtain canopy height / three-dimensional forest structure information required for the evaluation of Above Ground Biomass (AGB), which plays an important role in the carbon cycle and climate change mechanisms. The lidar also makes a possibility for observing clouds and aerosols. The results obtained by MOLI will bring a guideline for the future global vegetation observation satellite. In addition, MOLI mission will provide a foothold for application development to Doppler lidar aiming at global three-dimensional observation of wind vectors, the scanning lidar realizing precision DEM, and  $H_2O$  DIAL for water vapor profiling.

キーワード: ライダー,樹高,森林バイオマス,数値表層モデル,イメージャー **Key Words**: Lidar, Canopy heigh, Forest biomass, Imager, DSM

### 1. はじめに

本文は、現在 JAXA で検討中の日本初の地球観測 用宇宙ライダーの技術実証と、科学的には炭素循環 や気候変動メカニズムにとって重要な役割を演じる 地球規模での森林バイオマス(主に地上部バイオマ ス <u>A</u>bove <u>G</u>round <u>B</u>iomass: AGB,以下本文では AGB と略す)の評価に必要な林冠高/樹冠高、三次元森 林構造情報の高精度取得、雲エアロゾル・大気パラ メータ観測を目的とした「衛星搭載・植生観測ライ ダーおよびイメージャー(MOLI: Multi-footprint Observation Lidar and Imager, 以下 MOLIと称す) ミッション」について研究開発の現状<sup>1-5)</sup>も含め紹 介する.

### 2. MOLI ミッションの背景

森林は私たちの生存に強く影響を及ぼしている. 例えば,森林は人間の生活や動物の生息地を供給 し,土壌侵食を防ぎ,流域保護に寄与している.ま た,大雨や洪水などの自然災害の緩衝として生態系 サービスに多大に関与している.一方,近年の地球 温暖化に伴う気候変動,異常気象と大いに関連付け



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) (浅井 和弘)

られるのが、海洋に次ぐ炭素貯蔵庫としての森林で ある.現在,世界の森林面積は約41億haで陸地面 積の3割を占めている. 化石燃料消費/セメント工 業生産から大気に排出される二酸化炭素(以下, CO<sub>2</sub>) は年間約 8.3 Gt であり, その中の約半分が大 気中に留まり、残りが海洋と陸地(土壌、森林、食 料畑,草地,湖沼など)に取り込まれる<sup>6)</sup>.ご承知 のように、森林を含む植生は光合成を通して吸収し たCO2を有機物であるバイオマスに変換して固定 する.世界全体の森林バイオマス蓄積量は、地上部 (AGB)+地下部(根)の生体バイオマスで約606 Gt (炭素重量換算で約 303 GtC), 枯死木や落葉落 枝の堆積物で 59 Gt(同,約 29.5 GtC)と見積もら れている. さらに森林の重要なことは、森林内には 生体バイオマスの炭素蓄積量と同程度の炭素が土壌 有機物として存在しており,森林の総炭素蓄積量は 662 GtC (2020 年) となる<sup>7,8)</sup>.

20世紀に入って爆発的に人口が増加し、急増し た人口を養うために食料の増産、薪燃料、家屋敷地 などが必要となり,森林の開墾,伐採など土地利用 変化が引き起こされ、これらによる森林破壊・劣化 が森林減少の最大の原因と言われている. また近年 では大規模森林火災が頻繁に北米大陸、アマゾン流 域,豪州で発生し大規模な森林破壊を引き起こし, 環境の面からも生物多様性の観点からも大きな問題 を提起している. 2019年9月から 2020年3月に懸 けて発生した豪州での大規模な森林火災は、死んだ り住む場所を失ったりした動物の数が約30億匹で あったことは悲惨な記憶として残っている. これら の森林破壊・劣化により 1990 年から 2020 年の 30 年間だけでも, 推定4億2000万ha(世界の全森林 面積の約1割),炭素蓄積量で約6GtC減少した. CO2 収支の観点からは、この農業、林業、その他 (違法伐採を含む)の土地利用や大規模森林火災な どに伴う土地被覆の変化は、本来なら森林によって 吸収蓄積されるべき CO2 が森林の消失により吸収 (sink) が行われなくなるので排出 (source) として 見なされる、そして、この排出として見なされる換 算 CO<sub>2</sub> 量は,実に人間起源による CO<sub>2</sub> 排出の 13%



Fig. 1 Proportion and distribution of global forest area by cli-matic domain, 2020<sup>8)</sup>.

を占めてしまう<sup>6)</sup>.

地球規模で森林に蓄えられている総炭素蓄積量 662 GtC は、東南アジア(ボルネオ島など)、中部 アフリカ(コンゴなど)、中米・南米(アマゾン流 域など)にある熱帯林がその内の約 50%、日本な どが属している温帯の森林が同 20% とそれぞれ貯 蔵している。したがって、これ以上、森林破壊・劣 化による土地被覆変化を引き起こして CO<sub>2</sub> 吸収容 量を減らし更なる排出源とならないよう、地球上の あらゆる生物の持続的生存を脅かさないために、大 切な森林の評価・管理・保護の行動が求められる。

衛星リモートセンシング技術の発達により、森林 の評価・保護のための地球環境観測とくに熱帯林域 での森林バイオマス観測には合成開口レーダ (SAR) は欠かすことのできないアクティブセン サーである<sup>9,10)</sup>. 中でも, JAXA が打ち上げ, 運用 を行っている陸域観測技術衛星シリーズ, ALOS (2006年), ALOS-2 (2014年) にはフェーズドアレ イレーダー (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar: PALSAR, PALSAR-2) が搭載されており 国内外での自然災害状況の解析やグローバル森林観 測に活躍している<sup>10)</sup>. PALSAR, PALSAR-2 は全天 候観測が可能でありリアルタイムでの変化の抽出に も優れ、とくに近年、斜め観測によるデータの歪み の補正方法が改善されて以来、山岳地での森林解析 精度も上がり大いに期待されている<sup>11)</sup>. Fig. 2 は, 送信偏波:水平(H).受信偏波:垂直(V)のクロ ス偏波による受信後方散乱信号(dB)強度とAGB (Mg/ha) との相関を示している. 受信信号とバイ



Fig. 2 Relationship between backscatter power (in dB) at HV (horizontal transmit, vertical receive) polarization versus aboveground dry biomass (tons/ha)<sup>13)</sup>.

# 解\*説

オマスとの関係はバイオマス 150 Mg/ha までは良い相関にあるが、150 Mg/ha を超える様な高密度な 熱帯林では飽和現象が顕著に表れ正確な AGB 観測 が難しい<sup>12-14)</sup>.また国内の閉鎖した成熟林や、湿 地林やマングローブ林では水面による 2 回反射のた めにバイオマス推定値が過大に評価されるなどの問 題点がある.

一方, NASA は 2003 年に世界初の宇宙ライダー Geoscience Laser Altimeter System: GLAS を打ち上 げ,2004年-2009年の運用を通して,森林上部から の散乱信号と地表面からの散乱信号との時間差から 林冠高/樹冠高が直接計測できる事を明らかにし, 且つ熱帯林での森林観測(高さとバイオマス)の可 能性を示した5-19). これらを踏まえ、雲天には弱い が森林高を精度よく測定できる(最終的には高密度 バイオマス推定も可能) 光波領域の植生ライダー と、全天候型ではあるが高密度バイオマス観測では 信号が飽和してしまう電波領域の L-band SAR が有 する各々の長所を有効に利用してそれぞれのセン サーの短所を補完することにより, 高密度な熱帯林 域での AGB 観測精度を高めることが可能となる. 以上の背景に基づき研究開発が進められているの が,筆者らも参加している MOLI ミッションであ る.

### 3. MOLI 開発の現状

### 3.1 林冠高/樹冠高計測の原理とAGB 推定法

衛星搭載・植生ライダーの受信強度方程式は,森 林内大気も考慮すると以下の(1)式で記述できる<sup>20)</sup>.

$$P_{r_{\lambda}}(H) = \frac{P_{t_{\lambda}} \cdot K_{t_{\lambda}} \cdot K_{r_{\lambda}} \cdot A_{r} \cdot T_{atm_{\lambda}}^{2}}{H^{2}}$$

$$\times \left[ \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot \beta_{atm_{\lambda}}(H) \cdot \{(1 - C_{vc}(H))\} + \frac{\rho_{vc_{\lambda}}(H)}{\pi} \cdot \Delta C_{vc}(H) \cdot \{(1 - C_{vc}(H))\} \right]$$

$$(1)$$

ここで、 $P_{t\lambda}$ :送信レーザーエネルギー、 $K_{t\lambda}$ ,  $K_{r\lambda}$ : 波長 $\lambda$ での送信系、受信系の総合的な光学効率、 Ar:受信望遠鏡の有効面積、 $T_{atm\lambda}$ :衛星から距離 Hまでの大気透過、c:光速、 $\tau$ :レーザパルス幅、 c・ $\tau/2 = \Delta H$ :高さ分解能、 $\beta_{atm\lambda}$ :大気後方散乱係 数、 $C_{vc}$ :フットプリント面積に対する森林被覆率、  $\rho_{vc\lambda}$ :送信ビーム径 x $\Delta H$ の円筒内にある葉、幹、 枝、梢、下草の合計反射率、または地表面アルベ ド、 $\Delta C_{vc} = C_{vc}(H + \Delta H) - C_{vc}(H)$ である.

大かっこ内第1項は衛星--森林--地表面間の大気 情報を表し,i)衛星から林冠までの光路ではCvc (H)=0であり,通常の大気ライダー受信光強度,



Fig. 3 Waveform of return signal from earth surface through atmosphere.

ii)森林内では Cvc≠0, この項は林冠到達後の森林 内への透過光を表し林冠一地表間での森林内大気情 報に対応している.一方,第2項は送信ビーム径 x△Hの円筒内にある葉,幹,枝,梢,草本などに 関する植生情報を与え,送信パルス光は最終的に地 表面に到達し後,地表面アルベドで反射され衛星上 のライダー受光系に戻る.Fig.3に,例として航空 機ライダー(詳細は次節4.)で取得したリターン 信号(青線)を示す.

横軸は受信光強度,縦軸はデジタイザーの Bin# に各々対応している. リターン信号は,森林上部 (林冠) に到達した送信光による反射光から始まり (Signal start),送信パルス光は時々刻々森林内部の 高木層,亜高木層,低木層を進み,草本層を経て最 後に地表面(Ground surface)に到達する. リター ン信号は林冠高、各層での葉、幹、枝、梢の密度、 地表面などの情報を持っている. このデジタル化さ れた信号は"waveform"と呼ばれ、林冠高/樹冠高 は Signal start-Ground surface 間の bin# x ΔH から算 出される. すなわち森林上部からのリターン信号 Signal start は必ず出現するので、地表面からのリ ターン信号 Ground surface が得られるならば,正確 にかつ確実に林冠高/樹冠高が計測可能である. AGB の推定・算出は、上述の方法で得られた林冠 高/樹冠高をパラメータとしたアロメトリー法によ り求める方法とノイズレベルから或る閾値以上の信 号を Signal stop 側から Siganl start まで積分し、その 面積との割合に達する相対高(Relative Height: RH) など waveform が持つ統計量を使った多重回帰解析 法がある.

Waveform はフットプリント内の地盤が傾斜して



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) (浅井 和弘)

いると、平地での waveform に対し波形が伸長して しまう. その結果、林冠/樹冠の推定高や、アロメ トリー法による AGB 値、多重回帰法による AGB 値ともに誤差を含むようになる. この様に、AGB 値の推定精度は観測域の地形、気候区分、植生分 布、森林構造、うっぺい度などに大きく影響を受け るので正確な校正/検証が重要となる. MOLI ライ ダーはフットプリント内の地盤情報取得のために、 2本の送信ビームを同時に地表に向け照射して地上 に一対のフットプリントを出現させ、レーザーの高 繰り返しを利用して多数のフットプリント対からの 受信信号を解析して地盤傾斜を推定する新方式を取 り入れた<sup>21)</sup>.

### 3.2 Nd:YAG レーザー

MOLIのレーザー送信器は, 波長 1064 nm で 40 mJ の Qsw レーザーパルスを 7 ns 以下のパルス幅で 生成する.運用する環境は ISS が周回する宇宙空間 であり,一般的な計測や加工に利用されるレーザー の運用環境と異なり, MOLIで使用するレーザーは 製作終了後, ISS へ取付けられ運用が終了するまで の間,一切の調整は行うことができない.このた め,輸送や取付,宇宙飛行士による取扱いで想定さ れる振動や衝撃に耐える必要がある.また真空環境 かつ放射線に晒されるため,使用する電子部品,光 学部品の放射線耐性やその防護措置が必要となる.

ミッション機器を含めて,使用されている接着剤 や部材から排出される分子状の物質(溶剤など多岐 にわたり、コンタミネーションと呼ぶ) がレーザー と相互作用することによって光学部品のレーザー照 射面に蓄積し, 焼損させるレーザーの機能喪失を引 き起こす。このコンタミネーションにより引き起こ されるレーザーの機能喪失をどのように防ぐのか, その条件を明らかにすることは、軌道上での長期間 のレーザー動作を実現する上で必須であり、MOLI 以降の地球環境計測用レーザー装置開発にも有用と なる、コンタミネーションの発生源は製作工程で用 いられる固化済接着剤が主である. コンタミネー ション防護の方法として、レーザーの製作工程に接 着剤不使用を徹底することが挙げられる. ただし レーザー製作工程で使用を禁止しても、それ以外の 電源,望遠鏡,光検出器,信号処理部の製作工程に も接着剤が利用されるため、レーザー以外からのコ ンタミネーションの飛来は阻止できない. そのため 各製作工程において溶剤の使用禁止も手段として考 えられるが、それまで蓄積された製作工程の見直し により、新規手順の作成・検証の作業が生まれ、 レーザー制作以外にも開発リスクが発生する. これ



Fig. 4 MOPA layout on the optical bench.

と比較すると、レーザー単体で防護策を講じ、他の 工程は確立された方式を用いるほうが合理的であ る. MOLIのレーザー送信器は光学ベンチに組んだ レーザー光学系を与圧筐体に封入し、レーザー自身 で発生するコンタミネーションを抑制、他の機器か ら飛来するコンタミネーションの影響を最小化する 形態とした.

構成は主発振器と光増幅器からなる MOPA であ る. 試験モデルを Fig. 4 に示す. 軌道上の運用開始 後アライメント調整を行うことは難しく,ある程度 の温度範囲に晒されることになる発振器は,可能な 限り低出力化し,発熱に伴う共振器のアライメント 変動や出力低下に対して,堅牢となるよう,励起光 はファイバーカップリングレーザー(Fiber Coupled Laser Diode: FCLD)による端面励起 Qsw パルス レーザーとした. FCLD は発振器より離れた場所に 配置することで,励起光源の発熱による Qsw 発振 器のアライメント変動も抑制する.

発振器出力は光アイソレータを介して前段,後段 の2段増幅器により40mJに増幅する.発振器およ び光増幅器に使用するレーザー媒質として, Nd:YAGセラミックスを採用している. MOPA全体 は、レーザー構成部材に使用される接着剤や洗剤, 部材そのものから発生するアウトガスやレーザー機 器以外から飛来するアウトガスを除外するため、与 圧筐体に封入して使用する.筐体に封入する気体は 乾燥空気を1気圧とし、内部で使用する接着剤の重 量は別途試験を実施した条件を適用し、筐体を密閉 した.筐体内部には MOPA を配置した光学ベンチ に加え、ポッケルスセル駆動用の高電圧電源、LD 波形モニタ、気圧センサー、温度センサー、冷却用 コールドプレートが内蔵されている.

### 3.3 ライダーとイメージャー

MOLI ミッションは, 高度 330 km-435 km, 軌道 傾斜角 51.6°で現在飛行中の国際宇宙ステーション



(International Space Station: ISS)-日本実験棟(Japanese Experimental Module: JEM)-暴 露 部(Exposed Facility: EF) に搭載を予定している.したがって MOLIの観測緯度範囲はこの傾斜角に挟まれた熱帯 林,温帯林,および北方林の一部となる(Fig. 1を 参照). ライダーシステムは基本的には,次の三つの観測モードを有している.Fig.5に, ISS-JEM-EF に搭載された MOLIの概念図を示す.なお,ライ ダーから射出された2本の送信ビーム(赤色)は,後述する地盤面傾斜角度および方位角の自己決定用 である.

①レーザー高度計モード:

森林、人工物など標高より高い地表面の高さを測 る「数値表層モデル(Digital Surface Model: DSM)」 用データ、海面、植生や人口建造物のない土地や森 林内の林床に到達したレーザー送信光からの反射光 を使って標高を測る「数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)」用データ、得られた DSM データから DEM データを差し引いて「林冠/樹冠 高(Digital Canopy Height Model: DCHM)」データも 同時に正確に取得する.

②waveform モード:

森林内の葉,枝は分布型散乱体として光学的には 機能するために森林の内部構造が推察可能となり, また樹高,バイオマス,森林の立体構造(攪乱有 無,単層/複層等)は生物多様性の保存にとっても



Fig. 5 Conceptual diagram of MOLI onboard ISS-JEM-EF.

重要な指標であるから、本ミッションで取得される waveform は全球規模での生物多様性の理解や保全 計画策定等に対し有用な情報提供源として期待され る.

③大気観測モード:5節にて詳しく述べる

先に述べたように、森林は光合成を通してバイオ マスを生成し生態系や生物圏の炭素循環メカニズ ム、CO<sub>2</sub> 収支に寄与している.しかし森林を含む 陸域植生は、「人為的土地利用の変化」の影響によ りその CO<sub>2</sub> 収支推定値が 1.4±0.8 PgC/年間と大き な誤差を有している.本提案ミッションは未だ解決 されていないバイオマス推定時の誤差の低減化を図 り、森林が関わる CO<sub>2</sub> 収支の高精度な推定を目的 とする.そのために、ライダー/イメージャーの設 計/開発には ISS 飛行高度からレーザーを地表に照 射してフットプリント内の林冠/樹冠の高さを観測 し、最終的には地球規模で森林バイオマスを精度良 く算出できる様に以下の項目がミッション要求とし て求められている

- ・宇宙環境下で24時間,1年間の稼働
- ・地上の人間に対するアイセーフ基準の順守
- ・フットプリント内の測定精度
  - +/-3m(林冠高/樹冠高<15m), +/-25% (林冠高/樹冠高>15m)
  - +/-25 t/ha (バイオマス密度<100 t/ha), +/ -25% (同>100 t/ha)

Table 1 に, MOLI ミッション機器であるライダー とイメージャーの諸特性を示す.

過去に運用された GLAS, また 2018 年 12 月に打 ち上 げられて現在運用中の Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar: GEDI/NASA (2019 年-2021 年予定)は、ライダーと画像センサーであ

フイター仕様	
出力 @波長	40mJ @1064nm
パルス幅	<7nsec
受信口径	60cm φ
送信ビーム拡がり	$63\mu\mathrm{rad}$
検出器	2x2 アレイ Si-APD
	2x1 検出用
	2x1 予備用
高さ分解能	0.75m
観測高度の範囲	-50m-150m
フットプリント径	25 m <i>φ</i>
S/N比	>10
イメージャー仕様	
	0. 55–0. 63 μ m
観測バンド	0. 64–0. 72 μ m
	0.74-0.88 µ m

5m

1000m

 
 Table 1
 Characteristics of MOLI mission instruments (lidar and imager).



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI(Multi-footprint Observation Lidar and Imager)(浅井 和弘)

るイメージャーとの同時観測システムを採用してい ない. 我々は、上述したミッション要求を満たすた めにはフットプリント内の画像情報による樹冠のサ イズ、高さ、および圃場データが非常に重要である との認識の元に, 高解像度イメージャーをライダー に隣接させた同時観測方式を採用した.また 3.1 で 指摘をしたように、林冠高/樹冠高の算出に際して は地盤情報が重要である. MOLI ライダーはこの地 盤傾斜に起因する誤差低減を目的に、二分割した送 信レーザー光を地表面に照射してフットプリント対 を作り、ショット毎に along-track 方向に連続的に出 現する多数のフットプリント対の中から近接した3 フットプリントを選び出して、それぞれの衛星-地 上間の往復時間の差より地盤面傾斜角度および方位 角を自己決定する機能を持たせている<sup>21)</sup>. Fig. 5 に は、ライダーから射出された2本のビームを赤色で 模写してある.

### 4. 航空機搭載植生ライダーと搭載実験

MOLIの植生観測における実証と解析アルゴリズ ムの開発, さらに MOLI が衛星搭載されたときの 検証実験に使うため航空機搭載植生ライダーを開発 し,2016年11月に航空機搭載実験を行った. MOLI はイメージャーとの組合せで観測位置確認, 森林状況確認,さらには観測幅を拡張することを考 えており,航空機実験でも可視光用のカメラをライ ダー装置に同架して MOLIの運用状況を模擬でき るようにした.

航空機搭載植生ライダー装置(Fig. 6)では 20 Hz の Nd: YAG パルスレーザー(Quantel 社: Ultra50 GRM のアッテネータ付き)の基本波と 2 倍波を受 信望遠鏡の中心位置前方から約 0.6°の広角で送信 する.受信望遠鏡は広視野を確保するため口径 10 cm Ø の屈折望遠鏡にした.波長 1064 nm の受信は, 試作した MOLI ライダー用検出器である 2x2 アレ イ Si-APD の全 4 素子を使い, 4Channel 分のリター ン信号出力を得る. 532 nm の P, S 偏光受信用には 単素子の APD を 2 個使い, スタートパルス用にも



Fig. 6 Optical and data flow configurations of the lidar.

APDを1個使っている.Nd:YAGパルスレーザーからの送信光は約0.6°に拡げられており、これを検出器の各素子が円形のパターンで切り取った形となる.したがって、波長1064 nm での視野は2×2に配置された直径0.21°の各円形で、隣り合った視野の中心は0.22°離れている.532 nm での視野は直径約0.5°の円形である.このライダー装置は532 nmの(偏光)チャンネルを持つことにより、地表面の波長反射特性を得られる可能性がある.また、海面上で測定を行えば532 nm での海洋植物プランクトン観測の可能性があるが、航空機実験ではそれに適したパラメータでの観測は行っていない.

レーザー光は航空機の窓から下方に打ち出され、 反射光が望遠鏡で集光され各々のAPDにより検出 される.スタートパルス,Qsw信号も6Chの受信 信号と共に500 MHzの高速ADポストエレクトロ ニクスでデジタル信号に変えられて信号取得開始時 刻と共にコントロール用のPCに記録される.PC はGPSタイムサーバーからNTP(Network Time Protocol)で時刻補正されるようになっている.一 方,航空機の位置・姿勢は航空機に搭載されている POSシステム(INS+GPS)により0.5 msec毎に記 録されており、この時刻と信号の記録時刻を突き合 わせることによりレーザー発振時刻における航空機 の位置・姿勢が分かるようになっている.

航空機搭載実験は 2016 年 11 月 16, 17, 18 日に 行われたが,その前の試験飛行において,窓からの レーザー光の反射が強す ぎて 1064 nm 用の4 個 (Ch1-4)の検出器の内 Ch4 が壊れた.そこで,反 射光の方向をより望遠鏡から遠ざけ影響を小さくし たうえで,Ch1-3 で観測を行うことにした.3素子 あれば1ショットのデータから地盤の傾きは推定で きる.また,航空機の速度が 100 m/s 前後なので, ショットごとの進行方向の距離は約5 m となり, 連続するデータからも地盤傾斜の推定が行える.

観測方向の初期同定では海岸線の地形を使うこと が有効であった.カメラ画像とライダーのリターン 信号を比較することにより,大体の位置を推定し, その後 Fig. 7 (縦軸は信号強度,横軸は bin#.右側 が低高度側.陸地構造物からのリターン信号,海面 からのリターン信号が見られる.)のように信号の 形と地形写真を比べることにより航空機に対する視 野の方向を視野の 1/10 程度で決めることができた. Fig. 8 には 5600 m の高度(視野は直径約 20 m)か らの森林観測の一例を示す.室戸のある谷筋に Ch1,2 がかかっており山側は Ch1, Ch3 の方角であ る.これらの信号から地盤傾斜の導出が可能にな る.実際,いくつかの現地検証地点において地盤面





Fig. 7 Return signals of Ch1 and Ch2 at 1064 nm, and measured positions indicated on a coastline picture.



Fig. 8 Return signals at 1064 nm and on-board-camera picture.

の傾斜補正をしたほうが平均的な樹冠高が精度よく 導出され, MOLIの要求精度を満たすとの結果も出 ている<sup>4)</sup>. 航空機搭載実験では各種の樹林を観測し ており, データは樹冠高や炭素蓄積量を精度よく見 積もるためのアルゴリズム開発に使われている.

### 5. 観測可能な大気パラメータ

MOLI ライダーの測定データを用いることで, 雲の検出と共に雲・エアロゾル(以下, 大気粒子)の 波長 1064 nm での消散係数,後方散乱係数,光学 的深さといった光学特性の推定が可能と考えられ る.2006 年に NASA によって打ち上げられた CALIPSO 衛星に搭載された 2 波長(532, 1064 nm) 偏光 Mie 散乱ライダーである CALIOP の解析では, 測定データから大気粒子の検出,大気粒子のタイプ 識別,そして消散係数等の光学特性の全球推定が行 われてきた<sup>22)</sup>. CALIOP 解析の多くでは測定された 波長 532 nm での減衰付き後方散乱係数と偏光解消 度が用いられているが, MOLIでは波長 1064 nm の 減衰付き後方散乱係数を用いた大気粒子推定を行 う.

従来のライダー解析における雲検出の多くでは, 信号校正されたライダー測定値である減衰付き後方 散乱係数を用いた閾値法が利用されている<sup>22)</sup>. 減 衰付き後方散乱係数は大気粒子等の消散によるライ ダー信号の減衰補正がなされていない.よって、ス ペースライダーからの雲検出では、検出対象高度よ り上空に光学的に厚い大気粒子層が存在した場合. 誤判定を引き起こす可能性がある(検出対象高度に 本来は雲が有るはずなのに雲無しと判定される). そこで、雲検出をより高確度に実施するために、大 気粒子の光学特性を推定して信号減衰を補正した後 に雲検出を行い、更に雲検出の判定結果を大気粒子 の光学特性推定に反映するとした、雲検出と大気粒 子の光学特性推定を同時に行う解析手法の開発を進 めている. 大気粒子の光学特性推定では Fernald の 手法<sup>23)</sup>や Platt の手法<sup>24)</sup>の応用を検討している.そ の際にライダー比をどのように設定するかは重要な 検討事項となる. また, MOLI ライダーは植生計測 を主目的として設計されているため、従来の大気粒 子計測用のスペースライダーに比べると光学的に薄 い大気粒子(バックグラウンドエアロゾル等)に対 する感度は低いという欠点がある一方で、その高 度・水平分解能は 10 倍以上と格段に高いといった 特徴も備えている、解析の工夫により、これまで把 握出来なかった細かな大気現象を広範囲・同時に捉 えることのできる可能性を秘めている.加えて. MOLI ミッションではライダーと共にイメージャー による計測も行われる. ライダーの高度分布計測と イメージャーの水平分布計測の複合解析から、 雲層 検出や大気粒子の光学特性の推定精度の向上が期待 できる.

上記解析から, 雲検出による上空の雲の有無, 大 気粒子の光学特性推定からライダー信号の減衰に関 する情報が得られ, これらの情報は本ミッションの 核となる森林パラメータの高精度推定の実現に活用 される. 例えば, 地表面近傍でのライダー測定デー タの品質検査・保持(森林パラメータ推定で用いる 測定データの取捨選択など)に利用される. また, MOLI ミッションからの大気粒子プロダクトの発信 は, 科学コミュニティー並びに国内外社会に貢献す



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI(Multi-footprint Observation Lidar and Imager)(浅井 和弘)

るものであり重要な価値をもつ. CALIOP による連 続観測は,大気粒子の巨視的・微視的特性に関する 10年以上にわたる全球データを創生し,大気粒子 に関わる気候・大気環境の諸分野での科学的知見の 創出に多大な貢献を果たした. この CALIOP 観測 の功績に基づき,宇宙からのライダーによる大気粒 子の高度分布計測の継続が期待されると共に,大気 粒子プロダクトの長期・継続的な取得も切望されて おり, MOLI ミッションはこれに貢献するものとも なる.

### 6. 我が国の宇宙ライダーにとっての MOLI 開発の重要性

現在の所, MOLIのフライトモデル開発および打 ち上げ時期については未だ確定していないが, 目下 の目標は2023年としている.本ミッションの将来 展望として, MOLIの実用性が確認されたなら国内 行政機関, 研究機関などとの連携を通して, MOLI 後継機として本格的且つ継続的な植生観測ミッショ ンへ展開して国際貢献に役立てたい.

次に、レーザー高度計モードでの MOLI は宇宙 から地盤面までの精度良い測距が可能なため、 DEM 情報, DSM 情報さらに陰になってフォトグラ メトリーでは得られない地盤高 (Digital Terrain Model: DTM) 情報が精度よく得られる. これらは、 ALOS-PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) で取得された全球数値地 表モデル (ALOS World 3D: AW3D)<sup>25)</sup>の較正/比較 用にも応用可能であり、世界に誇る AW3D の更な る高精度化に役立つ可能性を秘めている.

また将来の地球観測を考える上で、ライダーは絶 対に欠かすことの出来ない衛星搭載アクティブセン サーとなるであろう.現在、以下の様な高機能ライ ダーミッションが提案されている.

- ・H<sub>2</sub>O 濃度, CO<sub>2</sub> 濃度などの大気組成分子の3 次元マッピング可能な DIAL など<sup>26)</sup>
- ・全球3次元観測をめざすドップラーライ ダー<sup>27,28)</sup>
- ・観測幅を有す DEM 情報取得用スキャンニング ライダー
- ・大気粒子を計測するドップラー計測機能を備えた に偏光高スペクトル分解ライダー<sup>29)</sup>

我が国初のライダーミッション・MOLIの成功が もたらす基盤技術は、これら次世代ライダーの開発 に必ず繋がる重要な技術でもあると信じている.

### 謝 辞

MOLI ミッションの検討が始まってから約 10 年

が経った.本ミッション検討の立ち上げ時から強力 な推進者であった故下田陽久先生(元東海大学教 授)に心より謝辞を述べる.

### 参考文献

- K. Asai, H. Sawada, N. Sugimoto, K. Mizutani, S. Ishii, T. Nisizawa, H. Shimoda, Y. Honda, K. Kajiwara, G. Takao, Y. Hirata, N. Saigusa, M. Hayashi, Y. Sawada, Y. Awaya, T. Endo, T. Kimura, T. Imai, D. Sakaizawa, J. Murooka, T. Kobayashi, K. Suzuki, "MOLI: Multi-footprint Observation Lidar and Imager onboard International Space Station (ISS)- Japanese Experimental Module (JEM)/Exposed Facility (EF) ", First International Workshop on Space-based Lidar Remote Sensing Techniques and Emerging Technologies, (2014).
- 2) 今井 正,境澤大亮,グェン タット トルン,三橋 怜, 澤田義人,林 真智,木村俊義,浅井和弘,平田泰雅, 宇宙からの森林観測\_ISS 搭載植生ライダー MOLI 計 画,日本リモートセンシング学会誌 40 (2020) 20.
- K. Asai, Mission Requirements of MOLI Proc. International Workshop on Vegetation Lidar and Application from Space (2016) 13.
- R. Mitsuhashi, J. Murooka, D. Sakaizawa, T. Imai, Y. Kimura, K. Asai and H. Shimoda, Overview of vegetation Lidar "MOLI", *Proc. SPIE Remote Sensing* (2018) 107850Q.
- 5) 浅井和弘,平田泰雅,鷹尾 元,本多嘉明,梶原康司, 栗屋善雄,須崎純一,遠藤貴宏,松永恒雄,澤田義人, 杉本伸夫,西澤智明,水谷耕平,石井昌憲,木村俊義, 今井 正,林 真智,境澤大亮,室岡純平,三橋 怜, グ エン タット トルン,植生ライダー (MOLI), JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-10.
- 6) P. R. Shukla et al. Technical Summary, 2019. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- 7) FAO/ITTO, The State of Forests in the Amazon Basin, Congo Basin and Southeast Asia, A report prepared for the Summit of the Three Rainforest Basins Brazzaville, Republic of Congo, May-3 June, 2011
- 8) Global Forest Resources Assessment 2020 (Key findings, FRA2020, FAO. 2020, 林野庁 計画課 海外林業協力室 (仮訳)
- M. Santo and O. Cartus:Research Pathways of Forest Above-Ground Biomass Estimation Based on SARBackscatter and Interferometric SAR observations, Remote Sens. 10 (2018) 608.
- 10)林 真智,森林バイオマス推定のリモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌 40 (2020) 2.
- 11) 島田政信, ALOS PALSAR による熱帯雨林森林状況監視, 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・宇宙・航行エレクトロニクス 109 (2009) 139.
- R. Dubayah, (2010), The Destiny of DESDynI Science and Applications fusing L-band SAR and Lidar in the Next Decade, 2010 IGARSS (2010) WE1.L09.2.
- H. H. Shugart, S. Saatchi and F. G. Hall :Importance of structure and its measurement in quantifying function of forest ecosystems, J. Geophys. Res., 115, G00E13, 2010
- 14) Y. Yu and S. Saatchi, Sensitivity of L-band SAR backscatter to



aboveground biomass of global forests. Remote Sens. 8 (2016) 522.

- R. A. Houghton, F. Hall, and S. J. Goetz, Importance of biomass in the global carbon cycle, J. Geophys. Res. 114 (2009).
- 16) A. Baccini1, S. J. Goetz, W. S. Walker1, N. T. Laporte1, M. Sun1, D. Sulla-Menashe2, J. Hackler1, P. S. A., Beck1, R. Dubayah3, M. A. Friedl2, S. Samanta1 and R. A. Houghton (2012), Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps, SUPPLE-MENTARY INFORMATION, NATURE CLIMATE CHANGE 2 (2012).
- 17) SS. Saatchi, NL. Harris, S. Brown, M. Lefsky, E. T. A. Mitchard, W. Salas et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc Natl Acad Sci.* (2011) p. 9899.
- 18) Yoshito Sawada et al., A new 500-m resolution map of canopy height for Amazon forest using spaceborne LiDAR and cloudfree MODIS imagery, Int'l J. of Applied Earth Observation and Geoinformation 43 (2015) 92.
- Masatomo Hayashi et al, Regional forest biomass estimation using ICESat/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo, Carbon Management, 6 (1-2), 19–33 (2015).
- 20) 大日方範昂, 佐藤龍太郎, 浅井和弘, A-4 植生ライ ダー方程式を用いた数値シミュレーション結果と ICESat/GLAS データとの比較, 予稿集 第 29 回レーザ センシングシンポジウム (2011) p. 10.
- 21)澤田義人、遠藤貴宏、三橋 怜、林 真智、室岡純平、今 井 正、水谷耕平、宇宙機用ライダー観測は径シミュ レータと真相学習器を用いたラージフットプリントライ ダー波形データからの地盤面1の自動推定、日本写真測 量学会令和元年度次学術講演会(2019) p. 111.
- 22) M.-H. Kim, A. H. Omar, J. L. Tacjett, M. A. Vaughan, D. M. Winker, C. R. Trepte, Y. Hu, Z. Liu, L. R. Poole, M. C. Pitts, J. Kar, and B. E. Magill: The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm, Atmos. Meas. Tech. 11 (2018) 6107.
- F. G. Fernald: Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments, Appl. Opt. 23 (1984) 652.
- 24) C. M. R. Platt: Lidar and radiometric observations of cirrus clouds, J. Atmos. Sci. 30 (1973) 1191.
- 25) 大竹篤史,世界100カ国以上で採用!全世界デジタル 3D 地図 AW3D-ビッグデータ・AIから生まれるバー チャル空間が社会を変える一,デジタルプラクティス, 10 (2019).
- 26)阿保 真,長澤親生,柴田泰邦,内野 修,柴田 隆,酒 井 哲「衛星搭載水蒸気観測用差分吸収ライダー (DIAL) の技術実証」JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-07.
- 27)石井昌憲,岡本幸三,久保田拓志,松本紋子,佐藤 篤, 境澤大亮,西澤智明,津上哲也,石橋俊之,田中宙中, 沖 理子,佐藤正樹,岩崎俊樹,数値予報精度向上のための衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測 JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-08.
- 28) 岡本 創,木村俊義,境澤大亮,石井昌憲,西澤智明, 衛星搭載イメージング FTS とドップラー風ライダによる全球風速複合観測 JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-07.
- 29) 岡本 創,鈴木健太郎,西澤智明,石井昌憲,富田英一, ドップラー雲レーダと多視野角・高スペクトル分解・偏 光ドップラーライダによる雲・エアロゾル・鉛直流観測

z = 2 z = 2 JpGU-AGU Joint Meeting (2020) MSD47-09.



東北工業大学名誉教授. 1968年,東 京電機大学工学部電気通信工学科卒. 東北大学電気通信研究所研究生・助 手,郵政省電波研究所(現・情報通 信研究機構)主任研究官,ジョージ ア工科大学ポストDr.,東北工業大学 助教授・教授,同大学新技術創造研 究センター長を経て退職(2013年).

研究分野:飛翔体搭載ライダー,新波長固体レーザ. NASDA 招へい開発部員(ライダー実証衛星(MDS・2 ELISE ミッション1995-2000), JAXA 招 へ い/客員 (MOLI ミッション計画, 2008-2016年,航空機搭載大 気擾乱検出 CDL 開発, 2010-2017年).受賞:研究奨励 賞(トーキン科学技術振興財団, 1990年), Order of Merit 賞(ICLAS, 2019年),功労賞(レーザセンシン グ学会, 2019年),所属学会:日本リモートセンシング 学会,レーザセンシング学会,日本地球惑星科学連合 (JPGU) 会員.





宇宙航空研究開発機構研究開発部門 センサ研究グループ主任研究開発員. 2008年,東京都立大学大学院工学研 究科電気工学専攻修了博士(工学), 2008年,宇宙航空研究開発機構地球 観測研究センター招聘研究員,2013 年から同研究員を経て現職.地球観 測用ライダーの研究・開発に従事.



国立研究開発法人情報通信研究機 構 戦略的プログラムオフィス マ ネージャー. 1980年,京都大学理学 部卒. 1985年,京都大学理学博士. 1991年より郵政省通信総合研究所 (現・情報通信研究機構).研究分 野:リモートセンシング,ライダー. 首都大学東京客員教授 (2001-2017).

JAXA 客員 (2017-).



2004年に東北大学大学院理学研究科 博士課程を修了し,理学博士の学位 を取得.その後,日本学術振興会 PD (気象庁気象研究所)を経て,2007 年より NIES 特別研究員として国立 環境研究所に勤務し,2011年に同研 究所の主任研究員となる.現在は, 国立環境研究所環境計測研究セン

ター室長および九州大学客員教授.地上ネットワーク ライダーや衛星・船舶搭載ライダーの観測データを用 いたエアロゾル・雲の光学・微物理特性の解析研究や, 高スペクトル分解ライダー等のライダーシステムの開



宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) (浅井 和弘)

発に従事している.現在は、日欧共同地球観測衛星 ミッション EarthCARE のサインエンスチームにも参加 し、同衛星搭載ライダー等を用いたエアロゾル・雲推 定アルゴリズムの開発チームの PI を務めている.日本 気象学会会員、日本地球惑星科学連合(JPGU)会員.



### 特集 衛星搭載ライダー

### 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

西澤 智明<sup>1</sup>, 神 慶孝<sup>1</sup>, 石井 昌憲<sup>2</sup>, 岡本 創<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国立環境研究所(〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2) <sup>2</sup>東京都立大学(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) <sup>3</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)

Global observation of aerosols and clouds by space-borne high spectral resolution lidar

Tomoaki NISHIZAWA<sup>1</sup>, Yoshitaka JIN<sup>1</sup>, Shoken ISHII<sup>2</sup>, Hajime OKAMOTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Environmental Studies, 16–2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki-ken, 305–0053 <sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University, 1–1 Minamioosawa, Hachioji, Tokyo, 192–0397 <sup>3</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6–1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka-ken, 816–8580

(Received August 23, 2020)

We have proposed a synergy space-borne observation mission using lidar and 94 GHz Doppler cloud radar. The main purposes of this earth observation mission are to understand the interaction processes on aerosols, clouds, convection, radiation, and precipitation comprehensively; to improve cloud reproducibility and cloud-precipitation processes in climate change prediction model; and to contribute to reducing uncertainty in climate change prediction. Expexted products include: (1) microphysics of clouds, aerosols and precipitations, (2) fall velocity of clouds, rain and snow particles, and (3) air motion in cloud, above clouds and in clear sky condition. To achive the purposes, development of a high spectral resolution lidar (HSRL) with doppler, multi-filed-of-view, and depolarization measurement functions is underway. In this article, we report the outline of this proposed mission and the current status of development studies on the space-borne HSRL. In addition, space lidar missions related to aerosol and cloud measurements studied at home and abroad are reported.

キーワード:高スペクトル分解ライダー,エアロゾル,雲,偏光,ドップラー計測 **Key Words**: High spectral resolution lidar, Aerosol, Cloud, Depolarization, Doppler measurement

### 1. はじめに

大気粒子の気候影響指標である放射強制力の見積 もりには今なお100%程度の不確実性があり、気候 モデルの高度化に資する全球規模での観測情報の強 化・拡充が必要とされている<sup>1)</sup>.2018年1月に全米 アカデミーズより発行されたDecadal Survey 2017 (DS2017)<sup>2)</sup>において最重要観測対象として「エア ロゾル・雲放射特性」、「エアロゾル鉛直分布」「雲、 対流、降水」が挙げられ、これらを一纏めにし、そ れらを包括的に観測する衛星ミッション ACCP (Aerosol, Cloud, Convection, and Precipitation) が立ち 上げられた. ACCP ミッションの検討において, 放 射強制力の不確実性の低減や気候モデルの雲・エア ロゾル・放射・対流・降水プロセスの改善等に重要 となる具体的なパラメータがまとめられ, 例えば, エアロゾルに関しては消散係数と共に有効半径や化 学種の高度分布, 雲に関しては雲水量, 有効半径, 雲相の高度分布といった詳細な微物理特性が列挙さ れている<sup>†1</sup>. これらのパラメタを包括的に計測・抽 出可能な衛星観測ミッションの策定の中で, ライ ダーは重要なセンサーの一つとして挙げられてい



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(西澤 智明)

る.また,エアロゾルの大気環境への影響評価やプロセス理解そして環境予測の向上のための「エアロ ゾル鉛直分布」計測もDS2017では掲げられ,その 観点からもライダーは有力なセンサーとして位置付けられている.

エアロゾル・雲(大気粒子)の計測を主目的とし たスペースライダーは、1994年に打ち上げられた スペースシャトル搭載の3波長ミー散乱ライダー LITE に始まり,現在も運用中の 2006 年に打ち上げ られた CALIPSO 衛星搭載の2波長偏光ライダー CALIOP, 2015年に打ち上げられた国際宇宙ステー ション搭載の波長 532 nm の高スペクトル分解ライ ダー(HSRL) 計測機能を有した CATS, そして 2022 年打ち上げ予定の EarthCARE 衛星搭載の波長 355 nmの HSRL である ATLID へと脈々と続いてい る.一方、ATLID 以降における大気粒子の計測を 主目的としたスペースライダーミッションとして 「確定されたもの」は国内・国外ともになく、大気 粒子計測スペースライダーの将来計画の立案が世界 的にも喫緊の課題となっている. そこで、我々は ATLID 以降の次世代スペースライダーによる大気 粒子の全球観測計画について検討を進めている.

本稿では、我々が検討を進めている大気粒子計測 のための衛星搭載高スペクトル分解ライダーについ て報告すると共に、国内外で検討が進められている 大気粒子計測に関連するスペースライダーミッショ ンについて紹介する.

### 2. 大気粒子計測に関わるスペースライダー ミッションの動向

米国では Decadal Survey において定められた ACCP ミッションの策定が精力的に進められてい る. ACCP ミッションでは,センサーだけではな く,搭載する衛星やその軌道等も含めたアーキテク チャを多数挙げ,それらを精査・検討し選考すると いったユニークな決定行程を取っている.2022年 にアーキテクチャを決定し,2020年代末に打ち上 げることが予定されている.大気粒子計測ライダー として,偏光測定機能を有した Mie 散乱ライダー や高スペクトル分解ライダーを,波長としては 1064,532,355 nm での複数波長の利用が検討されて いる. CALIOP や CATS の実績と共に,前回の Decadal Survey (DS2007)において計画された ACE (Aerosols, Clouds, Ecosystems) ミッションで検討さ れた Mie 散乱ライダーや高スペクトル分解ライ ダー技術も ACCP における技術検討の基盤となっ ている. CALIOP の実績を基に,水平分解能 100 m,高度分解能 30 m (高度 8 km 以下),60 m (高 度 8 km 以上)が計測分解能の指標として挙げられ ている.

欧州では、日欧共同地球衛星観測ミッション EarthCAREで用いられるファブリ・ペロー干渉計 を用いた波長 355 nm での HSRL である ATLID の開 発が進められており、打ち上げ後の ATLID の運用 も欧州が担う<sup>3)</sup>. 先んじて 2018 年に ESA より打ち 上げられた全球風観測衛星 ADM-Aeolus に搭載され た波長 355 nm での HSRL である ALADIN では、風 および大気粒子計測のためにファブリ・ペロー干渉 計とフィゾー干渉計が用いられている. 大気粒子プ ロダクトはスピンオフプロダクトの扱いであり、波 長 355 nm での消散係数や後方散乱係数等が公開さ れている<sup>4)</sup>.

中国においても、ヨウ素吸収セルを用いた波長 532 nm での HSRL による全球衛星観測ミッション ACDL (spaceborne Aerosol and Carbon dioxide Detection Lidar) が検討されている<sup>5)</sup>. ここでは、532 nm での HSRL 計測に、波長 532 nm での 偏光および 1064 nm での Mie 散乱ライダー計測による大気粒子 計測が加えられている.更に、1572 nm でのレー ザー送信も合わせて行い、長光路差分吸収法による  $CO_2$ の気柱濃度計測も行われる.

国内においても、HSRL 技術を用いた衛星搭載ラ イダーミッションの検討を我々は進めており、内容 については3章にて述べる.「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」による地球観測グランドデザイン の構築の一環として衛星地球観測ミッション公募が 2018年より毎年実施されるようになり、次世代地 球観測ミッションの集約・精錬が進められている. 我々も上記公募への応募を行なってきた<sup>6)</sup>.また. 国際宇宙ステーションを用いた植生・バイオマス観 測ミッション MOLI<sup>7)</sup>が進行している. MOLI ミッ ションでは波長 1064 nm での Mie 散乱ライダーが 主力センサーとして用いられ、国内初となるスペー スライダーミッションとなる. 1980年代後半から 1990 年代にかけて検討された Mie 散乱ライダーに よる大気粒子衛星観測ミッション ELISE/MDS-2<sup>8)</sup> は実現には至らなかったが、ここでのレーザー等の スペースライダーの技術検討が MOLI ミッション へと繋がっている. MOLI ミッションでは森林の樹 冠高等の植生・バイオマスプロダクトと共に、スピ ンオフプロダクトとして、 雲検出やエアロゾル消散 係数の抽出等による大気粒子プロダクトの発信が計

<sup>&</sup>lt;sup>†1</sup>https://science.nasa.gov/earth-science/decadal-surveys/ materials

## 解\*説

画されている.

### 3. 雲・エアロゾル・対流・放射・降水観測 ミッション

### 3.1 背景·意義

NASA 主導による CALIOP および CloudSat 衛星 搭載の雲レーダーによる全球観測は、大気粒子の3 次元分布を詳らかにし,降水量や放射収支の評価の 顕著な改善を果たした.一方で、これらの観測・解 析研究から、克服すべき課題も提示された、例え ば,これら衛星観測データを用いた雲量の推定結果 には手法の違いによる顕著なばらつきが見られた. その主な要因として、雲・エアロゾル層の識別手法 の違い、ライダー信号に含まれる多重散乱成分の取 り扱いの違い、雲の相識別手法の違いが挙げられ た<sup>9)</sup>.また、雲量だけではなく、大気粒子の微物理 量の推定にも不確さが潜在する。更に、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、(解析手法の改善だけでは なく)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ている<sup>10)</sup>.

これらの改善のためには、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、 ATLIDと共に、94 GHzのドップラー雲レーダー、 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、フラックス抽出の改善が見込まれている、更 に、HSRL 技術を導入して、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.一方、EarthCARE ミッション以降の能動型センサーを用いた大気粒子 衛星観測ミッションは現在のところ白紙(未確定) となっている.

大気粒子計測スペースライダーの勃興期にはミー 散乱ライダー技術が用いられ、LITE および CALIOP により成功が修められた.その後、消散係 数および後方散乱係数の独立測定による測定値の不 確実性の低減と情報量の増加等を狙い、HSRL 技術 が導入された. CATS ではヨウ素吸収セルを用いた 波長 532 nm での HSRL 技術が用いられ、次期衛星 ライダー ATLID ではファブリ・ペロー干渉計を用 いた波長 355 nm での HSRL 技術が用いられるに至 り、HSRL 技術の利用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. そこで我々は、EarthCARE ミッションの次を見 据え、高スペクトル分解ライダーを含めた能動型セ ンサーを主体とした雲・エアロゾル・対流・放射・ 降水の包括的な全球衛星観測ミッションの検討を進 めている.

### 3.2 観測パラメータと能動型センサー

上記目的を果たすために、本ミッションでは以下 パラメータの全球抽出を目標としている.

・ 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(雲頂より上方の場も含める)

これらパラメータを抽出するために,以下の特性 を持った雲レーダーとライダーを想定し,実現に向 けた技術開発を進めている.

### <u>雲レーダー</u>

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 とするが、3 方向計測による水平風抽出も視野にい れた検討を行う.

ライダー

2波長(532,1064 nm)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 高機能化としては、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、その 技術検討も進める.

### 3.3 ライダー要素技術の開発

科研費助成のもと、EarthCARE そして ADM-Aeolus 衛星の観測条件を模擬する最先端の能動型セン サーによる地上複合観測システムの構築を進めてい る<sup>11)</sup>.また、この地上観測システムの観測データ を用いて、EarthCARE、ADM-Aeolus 衛星データか ら大気粒子の微物理特性と雲内鉛直流を導出するた めの推定手法の開発を行なっている.この開発した 推定手法を用いて上記衛星による全球データを解析 し、雲対流および雲・降水粒子落下速度のパラメタ リゼーションの検証・改良等を行い、雲の気候変動 研究へ貢献することを、我々は目指している.

上記課題では波長 355 nm での偏光 HSRL (Fig. 1) と共に,多視野角・多重散乱偏光ライダー<sup>12)</sup>



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(西澤 智明)



Fig. 1 Polarization HSRL at 355 nm (left) and Multiple-field-ofview multiple-scattering polarization lidar at 355 nm (Right) constructed at National Institute of Comunication and Technology in Koganei, Tokyo.

(Fig. 1) そして直接検波方式ドップラーライダー<sup>(3)</sup> の開発も行い,情報通信研究機構(東京都小金井 市)構内にてこれらを設置・運用する.そして,同 研究所のドップラー雲レーダーを組み合わせ,ライ ダー・雲レーダーによる地上複合観測システムを実 現する.そこで我々は,上記課題で開発したライ ダー技術を基に大気粒子計測スペースライダーの検 討を進めている.

以下,この検討でキーとなる HSRL に焦点を 絞って述べる.走査型マイケルソン干渉計を用いた 波長 355 nm での HSRL システムを開発し,連続観 測を実施している<sup>14)</sup>.本システムは波長 532 nm で の HSRL への転用も可能である.更に,2 波長 (355,532 nm)での同時計測の実現可能性も有して おり,2 波長同時計測 HSRL の開発も進めている. Figure 2 に情報通信研究機構構内にて 2019 年 10 月 2 日に 355 nm 偏光 HSRL で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



Fig. 2 Observation results by 355 nm polarization HSRL on 2 October, 2019.

断面図を示す.時間と高度の分解能はそれぞれ5分 と30mである.ATLIDやALADINに相当するパラ メータを測定しており,地上検証用ライダーとして も有用である.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が実証されている.

本ライダーでは、干渉計は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の一つとなっている. 一方で常時スキャンするために測定効率は悪くなる が、エアロゾル消散係数の連続測定は十分に可能で ある.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、レーザーや干渉計の波長制御、 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<sup>15)</sup>等の検討を今後進めていく.

上記システムを応用した衛星搭載 HSRL の検討 として,上記システムの受信系の諸元を元に,現行 の衛星搭載ライダーで用いられているレーザー出力 や望遠鏡の諸元を用いて (Table 1),期待される波 長 532 nm での測定信号とそこから推定される消散 係数および後方散乱係数の推定誤差のシミュレー ションを行った.シミュレーションで用いた大気粒 子の光学特性や高度分布を Table 2 にまとめる.

Figure 3 にシミュレーション結果を示す. 大気分 子からの後方散乱を主に計測する Rayleigh チャン ネルによる測定信号では,昼夜共に高度 15 km 程 度まで SN で 10 を超える測定精度が期待できるこ とが判明した.また,大気粒子からの後方散乱を主 に計測する Mie チャンネルによる測定信号も,エ アロゾル層 (0-2 km, 3-5 km) や雲層で昼夜共に SN で 20 を超える測定精度となっている(但し,雲 層以下では雲による大きな減衰により SN は悪くな る). これらの信号から抽出される大気粒子の消散

Table 1 Calculation condition used in the simulation analysis for the space-borne HSRL at 532 nm.

Item	Conditions
Satellite altitude	400 km
Laser energy	50 mJ
Repetition rate	50 Hz
Telescope diameter	0.6 m
Field-of-view	65 μrad
Vertical resolution	300 m
Horizontal resolution	10 km (70 shots)
Quantum efficiency	0.5
Band pass filter	0.2 nm (FWHM)
Background noise	$74 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$



Particle	β	S	Range	δ
type	[m <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup> ]	sr	[km]	
Aerosol				
Back-	$2.5 \times 10^{-6} \times \exp(-z/2)$	50	2-35	0.0
ground				
Dust	$2.6 \times 10^{-6} \times$	50	3-5	0.3
	$\exp(-(z-4)^2/1.5^2)$			
Urban	$4.0 \times 10^{-6} \times \exp(-z/8)$	50	0-2	0.0
Cloud				
Cirrus	$3.0 \times 10^{-5} \times$	20	9-11	0.4
	$\exp(-(z-10)^2/1.5^2)$			

 
 Table 2
 Optical properties of aerosols and clouds at 532 nm used in the simulation analysis<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>z is altitude.  $\beta$  is backscatter coefficient. S is lidar ratio.  $\delta$  is depolarization ratio.



Fig. 3 Simulation of the space-borne 532 nm HSRL measurements. Signals detected by Mie channle (Black) or Rayleigh channel (Green) during day (dotted line) or night (solid line) and their uncertainties are plotted. The extinction and backscatter coefficients derived from the signals and their retrieval uncertaines are also plotted.

係数の推定誤差は,晴天下でのエアロゾル層に対し ては 30-50% 程度,雲層に対しても減衰の低い上層 部に対しては 30% 以下と算出された.後方散乱係 数に対してはエアロゾル・雲そして昼夜共に 10% 以下となっている.上記シミュレーション結果は, 装置設定が未確定な部分も多く,雲等の多重散乱効 果を含んでいないなど簡易なものではあるが,装置 および解析手法の改良による測定・推定精度の向上 を含め,現在開発を進めている HSRL 技術の大気 粒子計測スペースライダーへの応用に十分に期待の もてる結果と考えられる.

### 3.4 解析手法の開発

衛星ミッションにおいては、計測と共に計測デー

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・検討も同時に進めている. CALIOP お よび CloudSat レーダーを用いた雲の検出・タイプ 識別・微物理特性<sup>16)</sup>や, HSRL やラマンライダーを 用いたエアロゾル微物理特性17)の推定手法の開発 を行ってきた. これらの解析手法を応用し、Earth-CARE ミッションにおけるライダー・雲レーダーを 用いた雲・エアロゾル解析手法の開発を JAXA 助成 の下で進めている<sup>18,19)</sup>. また. 解析手法の高度化 として, ライダーの多重散乱信号を含めた高速フォ ワード計算手法の開発も進めている<sup>20)</sup>.これらの 手法を応用・発展することで本ミッションで用いる 解析手法へと昇華する.また.これにより CALIPSO/CloudSat, EarthCARE, そして本研究で提 案する次世代衛星ミッション間のセンサの違いを包 含したシームレスな3次元雲・エアロゾル・降水の 長期プロダクトの創生を果たすことも本研究の大き な目標の一つである.

### 4. おわりに

本稿では、本研究で検討を進めているライダー・ 雲レーダーを主力とした雲・エアロゾル・放射・対 流・降水の包括的な衛星観測ミッションの概要と、 その衛星ミッションで用いられる HSRL の開発・ 検討状況について報告すると共に、大気粒子計測に 関わるスペースライダーミッションの国内外での動 向についても合わせて紹介した.各国で近年実施そ して検討されている大気粒子計測スペースライダー は、CALIOPの成功に伴い、Mie 散乱ライダーから HSRL へとその軸足が移り、高度化されてきてい る.日本国ではスペースライダーの技術的知見・経 験を有するものの限定的であり、スペースライダー の実績はまだ無い、ライダー技術の成熟度を高める と共に、スペースライダーミッションの具体化へ向 けたより一層の尽力が必要とされている.

#### 謝 辞

本研究は, 科研費基盤研究 S (JP17H06139) およ び JAXA 受託研究 (EarthCARE RA) の支援を受け て進められている.

### 参考文献

- 1) IPCC fifth assessment report, 1535pp, 2013.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2018. Thriving on Our Changing Planet: A Decadal Strategy for Earth Observation from Space. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/24938.
- 3) Illingworth A. J., Barker H. W., Beljaars A., Ceccaldi M.,



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(西澤 智明)

Chepfer H., Cler-baux N., 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.

- 4) Atmospheric Dynamics Mission, ESA publication SP-1233 (4), 1999.
- 5) Chen W., Liu J., Hou X., Zang H., Ma X., Wan Y., Li R., and Zhu X., Developing status of spaceborne lidar for aerosol and CO<sub>2</sub> measurement in SIOM, Proceeding of ILRC29, S1-23, 2019.
- 6) 岡本 創, 鈴木健太郎, 西澤智明, 石井昌憲, 富田英一, ドップラー雲レーダと多視野角、高スペクトル分解、偏 光ドップラーライダによる雲、エアロゾル、鉛直流観測 ミッション, MSD47-09, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020.
- 浅井和弘,平田泰雅, 鷹尾 元,本多嘉明,梶原康司, 栗屋善雄,他,植生ライダー (MOLI), MSD47-10, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020.
- 8) 今井 正,辰巳賢二,川村恭明,実証衛星搭載用ライ ダーの開発,第19回レーザセンシングシンポジウム, 55-56,1998.
- 9) Cesana G., Chepfer H., Winker D., Getzewich B., Cai X., Jourdan O., Mioche G., Okamoto H., Hagihara Y., Noel V., and Reverdy M., Using in situ airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO, J. Geophys. Res., 121, 5788–5808, 2016.
- Jing X., Suzuki K., and Michibata T., The key role of warm rain parameterization in determining the aerosol indirect effect in a global climate model, J. Climate, 32, 4409–4430, 2019.
- 11) Okamoto H., Sato K., Fujikawa M., Oikawa E., Nishizawa T., Ishii S., Jin Y., Aoki M., and Sugimoto N., Development of synergetic active sensor system for evaluation of observations by EARTHCARE, EPJ Web Conferences 237, 07011, 2020.
- 12) Nishizawa T., Jin Y., Sugimoto N., Okamoto H., Fujikawa M., and Ishii S., Development of a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar system at 355 nm for cloud measurements, EPJ Web Conferences 237, 07009, 2020.
- 13) 富永寛菜,石井昌憲,青木 誠,柴田泰邦,西澤智明, 神 慶孝,岡本 創,鉛直風計測のためのインコヒーレン トドップラー用エタロンの特性評価,第37回レーザー センシングシンポジウム,65-66,2019.
- 14) Jin Y., Nishizawa T., Sugimoto N., Ishii S., Aoki M., Sato K., and Okamoto H., Development of a 355 nm high-spectral resolution lidar using a scanning Michelson interferometer for aerosol profile measurement, Opt. Express, 28, 23209–23222,

2020.

- 15) Tucker S. C., and Weimer C. S., The optical autocovariance wind lidar. Part I: OAWL instrument development and demonstration, J. Atmos. Ocenan. Tech., 35, 2079–2097, 2018.
- 16) Okamoto H., Sato K., and Hagihara Y., Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals, J. Geophys. Res., 115, D22209, 2010.
- 17) Nishizawa T., 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, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017; 188, 79–93.
- 岡本 創, 佐藤可織, CloudSat/CALIPSO/EarthCARE 衛 星による雲物理特性解析, 日本リモートセンシング学会 誌, 39, 197-206, 2019.
- 19) 西澤智明, 工藤 玲, 日暮明子, 及川栄治, 岡本 創, EarthCARE 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲推定アルゴリズム, 日本リモートセンシング学会誌, 39,215-224,2019.
- Sato K., Okamoto H., and Ishimoto H., Modeling the depolarization of space-borne lidar signals, Opt. Express, 27, A117-A132, 2019.



明 2004年に東北大学大学院理学研究科 博士課程を修了し,理学博士の学位 を取得.その後,日本学術振興会 PD (気象庁気象研究所)を経て,2007 年より NIES 特別研究員として国立 環境研究所に勤務し,2011年に同研 究所の主任研究員となる.現在は, 国立環境研究所環境計測研究セン

ター室長および九州大学客員教授.地上ネットワーク ライダーや衛星・船舶搭載ライダーの観測データを用 いたエアロゾル・雲の光学・微物理特性の解析研究や, 高スペクトル分解ライダー等のライダーシステムの開 発に従事している.現在は、日欧共同地球観測衛星 ミッション EarthCARE のサインエンスチームにも参加 し、同衛星搭載ライダー等を用いたエアロゾル・雲推 定アルゴリズムの開発チームの PI を務めている.日本 気象学会会員、日本地球惑星科学連合(JPGU)会員.



### 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)	35	4.9		
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 (ta)	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.



### 特集 衛星搭載ライダー

### イメージング FTS とドップラーライダによる 全球風観測

岡本 創<sup>1</sup>, 木村 俊義<sup>2</sup>, 境澤 大亮<sup>2</sup>, 石井 昌憲<sup>3</sup>, 西澤 智明<sup>4</sup>, 石元 裕史<sup>5</sup>, 佐藤 可織<sup>1</sup>, 及川 栄治<sup>1</sup>

<sup>1</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>2</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>3</sup>東京都立大学(〒195-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)
 <sup>4</sup>国立環境研究所(〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)
 <sup>5</sup>気象庁気象研究所(〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

### Global Measurement of Wind Using Imaging FTS and Doppler Lidar

### Hajime OKAMOTO<sup>1</sup>, Toshiyoshi KIMURA<sup>2</sup>, Daisuke SAKAIZAWA<sup>2</sup>, Shoken ISHII<sup>3</sup>, Tomoaki NISHIZAWA<sup>4</sup>, Hiroshi ISHIMOTO<sup>5</sup>, Kaori SATO<sup>1</sup> and Eiji OIKAWA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6–1 Kasuga Park, Kasuga Fukuoka, 816–8580
 <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, 2–1–1 Sengen Tsukuba-shi, Ibaraki 305–8505
 <sup>3</sup>Tokyo Metropolitan University, 6–6 Asahigaoka Hino, Tokyo, Japan 191–0065
 <sup>4</sup>National Institute for Environmental Studies, 16–2 Onogawa Tsukuba, Ibaraki 305–8506
 <sup>5</sup>Meteorological Research Institute, 1–1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki 305–0052

(Received September 2, 2020)

We propose the concept of space-borne synergetic system to measure wind velocity by using the next generation imaging Fourier Transform Spectrometer (imaging FTS) and Doppler lidar. The system consists of imaging FTS technique on Geostationary satellites and Doppler lidar and Doppler cloud profiling radar in polar orbit. Main objectives of the space-borne system are to provide (1) four-dimensional wind with high vertical resolution, (2) four-dimensional water vapor and temperature fields and (3) four-dimensional clouds and aerosols. Simultaneous retrievals of temperature and water vapor will be carried out by the imaging FTS as done by AIRS on Aqua satellite. Atmospheric motion can then be estimated by applying similar technique as AMVs. Observing system that consists of the imaging FTS and Doppler lidar (and/or Doppler cloud radar) will open the new era for improving the numerical weather prediction models and interaction among atmospheric dynamics, water vapor and cloud systems.

キーワード:ライダ, ドップラー, FTS, 静止衛星, 極軌道衛星 Key Words: Lidar, Doppler, FTS, Geostationary Satellite, Polar orbit satellite

### 1. はじめに

従来、風速観測は、地上設置型のウインドプロファイラ、ラジオゾンデ、航空機による直接観測が知られている。また、全球観測では静止衛星に搭載されたイメージャーによって得られた雲や水蒸気を追跡し、それらの位置の変化から、水平風速が求められてきた。この Atmospheric Motion Vector (AMVs)

法には、上層では抽出される風速の値に誤差が大き く、また中層では、解析可能な風速の観測数が少な くなる問題や、高度推定に課題があることが知られ ている<sup>1)</sup>. 結果として European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)の予報精度向 上に対する貢献度は、30% 以上であるマイクロ波 サウンダー、ハイパースペクトル赤外サウンダーと 比較すると、6.5% 程度にとどまる結果となってい



イメージング FTS とドップラーライダによる全球風観測(岡本 創)

る. また ECMWF と National Centers for Environmental Prediction (NCEP)の再解析データにおける風速 の比較から、プロダクト間に大きな開きが存在して いる事が指摘されている<sup>2)</sup>.

これらの背景から 2018 年 8 月に European Space Agency (ESA) によって衛星ライダを搭載した Aeolus 衛星が打ち上げられ,初めて水平風速が得 られるようになった. Aeolus 衛星には波長 355 nm の直接検波方式でドップラー速度を求めるライダが 搭載され,エアロゾル濃度が薄く,大気分子からの 後方散乱が支配的な高高度から地表面までの幅広い 高度で視線方向のドップラー速度の鉛直分布が得ら れるようになった<sup>3)</sup>.

水蒸気と気温観測に関しては受動型観測でも大き な進展があった. ハイパースペクトル赤外サウン ダー Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) センサー が National Aeronautics and Space Administration (NASA)の Aqua 衛星に搭載され, 2002 年に打ち 上げられ観測を開始している. 赤外領域に 2378 チャンネルを持ち,気温,水蒸気,オゾン,二酸化 炭素等の温室効果ガスの観測に用いられている. さ らに 2011 年には,その後継として,The Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP)衛星 に搭載された Cross-track Infrared Sounder (CrIS)が 観測を開始している. これらハイパースペクトルセ ンサーを用いることで,晴天域や雲域の上部で気温 と水蒸気量を高度 1 km,水平解像度 10 km で解析 することが可能となる<sup>4)</sup>.

本研究では、静止衛星にイメージングフーリエ変 換赤外分光計(イメージングFTS)を搭載し、これ と極軌道衛星に搭載されるドップラーライダやドッ プラー雲レーダで構成される衛星複合観測システム を構築し、高解像度全球4次元風速と水蒸気抽出を 行うシステムの構築の提案を行う.

### 2. 要素技術

静止衛星ひまわり 8,9号衛星では、水蒸気の高 度分布抽出に上層、下層、中層用の赤外 3 チャンネ ルを利用している.これらの限られたチャンネル数 から、鉛直方向に、これ以上高分解能な風速を求め る事ができないという問題があった.Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)ではハイパースペ クトルセンサーとして、次世代型イメージング FTS の開発が検討されている (Fig. 1).

イメージング FTS の諸元を表1に記述する.

波長 4.45 μm~6.25 μm, 8.3 μm~14 μm を, 波数 分解能 0.6 cm<sup>-1</sup>で観測を行う (Table 1).

チャンネル数は 1083 と 833 で合計 1916 チャンネ



Fig. 1 Imaging FTS instrument developed in JAXA.

Table 1 Specifications of imaging FTS.

Spectral range	700-1200, 1600-2250
	cm <sup>-1</sup>
Spectral resolution	0.6 cm <sup>-1</sup>
Noise Equivalent	0.23 K(@1030 cm <sup>-1</sup> ,260
Temperature Difference	K), 0.85 K(@2160 cm <sup>-1</sup> ,
	280 K)
Accuracy	1 K (TBD)
IFOV	<10 km
Observation areas	Full Disk (TBD)
Sampling frequency	<30 min1hour

ルもしくは, 15.4 μm まで測定できるものだと, 合 計 2020 チャンネルとなる.

このイメージング FTS を静止衛星に搭載するこ とを考える. Field of View (FOV) は 512 km×512 km で, それを4 km×4 km の解像度で観測する. 512 km ずつ動かし, 各点で10秒間測定する. こう して1時間以内(もしくは30分以内)ごとにフル ディスクでの風速観測を実現する.

静止軌道上からの半球観測による観測結果から, 雲や水蒸気の3次元分布を求め、そこにAMV法を 適用し、高空間分解能で風速抽出を実現する事を考 える. 視野角は10km以下が計画されている. ヨー ロッパや米国でもハイパースペクトルセンサーを静 止衛星に搭載する計画が立案されている. これらを 組み合わせることで、全球の高時間分解能観測が実 現する.

検証と校正には、ドップラーライダを搭載する極 軌道衛星との同時解析を行うことを計画している.

ドップラーライダには、直接検波方式とコヒーレ

# 解\*説

ント方式が存在する.ドップラーは視線方向に周波 数シフトが起きることを利用するもので,周波数シ フトを測定できれば,そこから風速を求めることが できる.前者では,地上で可視波長 532 nm で直接 検波方式で高度 60 km 以下の風速を抽出可能とし た研究等がある<sup>5)</sup>.これと同様の原理だが波長 355 nmを用いたものが Aeolus 衛星搭載のドップラーラ イダである.Aeolus 衛星では斜め 35 度下向きの観 測を行い,大気分子の周波数シフトがエアロゾルや 雲粒子と比較して大きい事を利用する.Aeolus 衛 星の観測から,高度 25 km 以下で水平風速の鉛直 分布の抽出が可能である事が実際に示されている. さらに今後 3 km と 90 km の水平解像度の風速,粒 子後方散乱係数,粒子消散係数解析からより多くの 情報が抽出可能であると期待される.

National Institute of Information and Communications Technology (NICT), JAXA や NASA ではこれまで 波長 2 µm や 1.5 µm のコヒーレントドップラーライ ダが検討されてきた<sup>6)</sup>. この手法では高精度でより ローバストな風速の抽出が期待できる. 大気分子の 信号はこの波長では使うことができないため, エア ロゾルの多い下層か, ライダ信号が完全には減衰し ない巻雲等の光学的に薄い雲の存在する領域で視線 方向の風速を得る事になる.

### 3. 解析手法

雲検出と水蒸気量や気温の抽出には、赤外サウン ダー AIRS センサ解析用に開発した高分解能解析手 法を用いることを考える. AIRS センサを搭載する Aqua 衛星は, 雲レーダを搭載した CloudSat 衛星や ライダを搭載した CALIPSO 衛星と同じ極軌道であ る A-Train 軌道上をわずかな時間差で周回する. 3.7 µmから15.4µmの間を波長方向に2378チャンネル でサンプルする. AIRS の標準プロダクトは. 水平 解像度 45 km, 鉛直解像度 2-3 km で気温と水蒸気 を提供している.この45 km という水平解像度は, AIRS のもとの FOV の3倍に相当する.これは雲の スクリーニングに水平解像度が45kmのマイクロ 波放射計 AMSU を利用しているためである. この 問題は, Channel ranking 法を用いることで AMSU を利用することなく雲検出することが可能であるこ とから克服できる.いったん雲域検出ができれば, 雲のない領域で気温と水蒸気抽出用に, それぞれ 110と46チャンネルを用いる事で、水平解像度 13.5 km・鉛直解像度1 km で,気温と水蒸気の鉛直 分布抽出が実現できることになる<sup>6)</sup>. ラジオゾンデ による検証や、AIRS から求められた水蒸気と気温 から氷過飽和度を計算し CloudSat と Cloud-Aero-



Fig. 2 (Upper) Time-height plot of super saturation respect to ice from AIRS, (Middle) Backscattering coefficient of clouds detected by CALIPSO, (Lower) Radar reflectivity factor by CloudSat on 6 February 2009 in Arctic region (modified from Ref. 4).

sol-Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) に雲識別手法である KU-mask<sup>7)</sup>よって 求めた雲域と比較検証を実施した所,事例解析と全 球解析の両方で非常に良い対応関係を示しており, ハイパースペクトルサウンダーの高分解解析手法の 有効性が確認されている(Fig. 2). このように抽出 された高時空間分解能の水蒸気や雲域の時間変化を 追う AMV 法を適用することで,鉛直流を含む 3 次 元風速とその時間変化が得られると期待できる.

これら静止衛星搭載イメージング FTS を中心と して、JAXA/NICT で開発中のドップラーライダ や、ESA の Aeolus 衛星、NASA で開発中のコヒー レントドップラーライダ、2022 年度打ち上げ予定 の日欧共同衛星計画 EarthCARE で搭載予定のドッ プラー雲レーダ CPR と波長 355 nm の高スペクトル 分解ライダ ATLID、2028 年度内打ち上げを目指す NASA decadal survey の A-CCP(Aerosol Cloud Convection Precipitation)計画で搭載が検討されている ドップラー雲レーダやドップラー降雨レーダを組み 合わせた観測システムが考えられる (Fig. 3).

4次元風速のデータは、第一義的には数値予測モ デルに同化することで、予報性能の向上に貢献する と考えられる.予報向上の他には、気候変動研究へ の貢献が期待できる.2006年の打ち上げ以来14年



### イメージング FTS とドップラーライダによる全球風観測(岡本 創)



Fig. 3 Global wind observing system by using imaging-FTS, Doppler wind lidars and Doppler cloud radar.

のデータ蓄積のある CALIPSO 衛星では波長 532 nm と1064 nm の2波長で後方散乱係数を観測し、波 長 532 nm では偏光解消度の情報が得られる.これ まで波長 1064 nm の情報はあまり利用されてこな かった.近年氷粒子に関して、ライダの波長に適用 可能な非球形散乱理論に進展があり、Physical Optics (PO)/ Geometrical Integral Equation Methods (GOIE)を様々なサイズ,形状や配向状態の氷粒子 を考慮した後方散乱特性の理論的解析が可能になっ てきた. これらを適用した結果, CALIPSO で得ら れる2波長の後方散乱係数の比で定義される,カ ラー比 (color ratio)  $\chi = \beta(1064) / \beta(532)$  と偏光解 消度の二次元ダイアグラムから、氷粒子タイプの識 別に有効であることがわかってきた<sup>8)</sup>.氷粒子の形 状や配向を特定できれば、雲レーダとライダの同時 解析から氷粒子微物理特性抽出する場合の解析精度 を大幅に向上させることができる<sup>9)</sup>. またそれらか ら見積もられる放射効果の不確定性を軽減できるこ とにつながる.

EarthCARE 搭載予定の ATLID では、ライダー比 と偏光解消度の関係から、エアロゾルタイプの同定 が可能になると期待されている. 氷粒子に対する PO 法や GOIE 法を用いた同様な理論的解析から、 ライダー比と偏光解消度の2次元ダイアグラムに よって氷粒子タイプ識別が可能になる事がわかっ た<sup>10)</sup>. ライダー比とカラー比の情報は相補的に利 用可能である<sup>8)</sup>.

衛星ライダ観測においては、光学的に厚い領域で は、多重散乱の影響が地上と比較してより顕著にな る.このような計算には従来モンテカルロ法が適用 されてきたが、時間がかかりすぎ衛星解析には適用 できないという問題があった.これに対しては、モ ンテカルロ法より6桁以上高速に同等の精度で後方

散乱強度の解析可能な手法 Physical Model法 (PM)<sup>11)</sup>, 偏光解消度等の偏光情報の解析が高速に 計算可能な初めての手法 Vectorized Physical Model 法 (VPM)<sup>12)</sup>の開発にそれぞれ成功し、この課題を 克服できたと考えている. 衛星搭載ライダ観測では このような多重散乱過程が、地上ライダ観測と比較 して大きくなるが、これら衛星の観測状況を地上で オンビーム方向とオフビーム方向を分離した観測が 可能で衛星観測の詳細な再現可能が多視野角・多重 散乱偏光ライダ<sup>13)</sup>,多視野角高スペクトル分解ラ イダの開発にも成功し<sup>14)</sup>,連続観測を開始してい る. これらの新たなライダと同時観測可能なものと して、直接検波ドップラーライダも開発中である. これらの次世代型複合地上観測システムを利用する ことで、衛星解析アルゴリズムの開発と検証を進め ている. これら進展しつつある解析手法を衛星観測 に適用することで、雲やエアロゾルの情報と、水蒸 気,気温,鉛直流を含む4次元風速の情報を合わせ て解析することが可能になる.気候変動における最 大の不確定性要素である雲の理解を大幅に進展させ る事につながり、不確定性の低減に貢献できると考 えられる.

#### 謝 辞

本研究は科研費基盤研究(S) (JSPS Kakenhi JP17H06139), 基盤研究(C) (JSPS Kakenhi JP18K03745), Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project (Program Grant Number JPMXD1300000000), JAXA EarthCARE RA, Collaborative Research Program of the Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University の支援を受けました.

### 参考文献

- A. J. Illingworth, H. A. Battaglia, J. Bradford, M. Forsythe, P. Joe, P. Kollias, K. Lean, M. Lori, J. F-Mahfouf, S. Melo, R. Midthassel, Y. Munro, J. Nicol, R. Potthast, M. Rennie, T. H. M. Stein, S. Tanelli, F. Tridon, C. J. Walden, M. Wolde, "WIVERN A New Satellite Concept to Provide Global In-Cloud Winds, Precipitation, and Cloud Properties," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, (2018) 8.
- 2) W. E. Baker, R. Atlas, C. Cardniali, A. Clement, G. D. Emmitt, B. M. Gentry, R. M. Hardesty, E. Kaellen, M. J. Kavaya, R. Langland, et al., "Lidar-Measured Wind Profiles: The Missing Link in the Global Observing System," Bull. Amer. Meteor. Soc., 95, (2014) 543–564, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00164.1.
- A. Stoffelen and Coauthors, "The Atmospheric Dynamics Mission for Global Wind Field Measurement," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, (2005) 4.
- H. Ishimoto, K. Okamoto, H. Okamoto and K. Sato, "One-dimensional variational (1D-Var) retrieval of middle to upper



tropospheric humidity using AIRS radiance data", J. Geophys. Res., 119, (2014) 7633–7654.

- M. L. Chanin, A. Garnier, A. Hauchecorne, J. Porteneuve, "A Doppler LIDAR for measuring winds in the middle atmosphere," *Geophys. Res. Lett.*, 16, (1989) 11, 1273–1276.
- 6) S. Ishii, A. Sato, M. Aoki, K. Akahane, S. Nagano, K. Nakagawa, K. Sato and H. Okamoto, "Development of Tm, Ho: YLF laser for future space-based Doppler wind lidar," *Proc. SPIE*, **10779**, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XVI, 1077903, (2018).
- Y. Hagihara, H. Okamoto, and R. Yoshida, "Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution", *J. Geophys. Res.*, 115, (2010) D00H33.
- 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", DOI 10.1364/OE. 400510, *Opt. Express*, 28 (2020) 20.
- 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, (2010) D22209.
- 10) 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," *Opt. Express*, 27 (2019) 25.
- 11) K. Sato, H. Okamoto, and H. Ishimoto, "Physical model for

multiple scattered spaceborne lidar returns from clouds," *Opt. Express* **26**, (2018) 6.

- 12) K. Sato, H. Okamoto, and H. Ishimoto, "Modeling the depolarization of space-borne lidar signals," *Opt. Express* 27 (2019)
  4.
- 13) H. Okamoto, K. Sato, T. Nishizawa, N. Sugimoto, T. Makino, Y. Jin, A. Shimizu, T. Takano, and M. Fujikawa, "Development of a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar: Comparison with cloud radar," *Opt. Express* 24 (2016) 26.
- 14) Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato and H. Okamoto, "Development of a 355-nm high-spectral-resolution lidar using a scanning Michelson interferometer for aerosol profile measurement," *Opt. Express* 28 (2020) 16.



九州大学応用力学研究所 教授.博 士(理学).1996年東京大学気候シ ステム研究センター 日本学術振興 会特別研究員(PD),1998年郵政省 通信総合研究所(現情報通信研究機 構)研究官,2001年東北大学大学院 理学研究科 助教授,2007年同大学 准教授,2010年より現職,2017年

同大学主幹教授. 2018年10月より同大学先導的研究学 術拠点 大気物理統合解析センター センター長. 2020年4月より 同大学応用力学研究所 所長.



### 特集 衛星搭載ライダー

### 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

 阿保 真<sup>1</sup>,長澤 親生<sup>1</sup>,柴田 泰邦<sup>1</sup>,内野 修<sup>2</sup>, 酒井 哲<sup>2</sup>,柴田 隆<sup>3</sup>,勝俣 昌己<sup>4</sup>
 <sup>1</sup>東京都立大学(〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)
 <sup>2</sup>気象研究所(〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)
 <sup>3</sup>名古屋大学(〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)
 <sup>4</sup>海洋研究開発機構(〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15)

Proposal on the Spaceborne Differential Absorption Lidar for Global Water Vapor Profiling

Makoto ABO<sup>1</sup>, Chikao NAGASAWA<sup>1</sup>, Yasukuni SHIBATA<sup>1</sup>, Osamu UCHINO<sup>2</sup>, Tetsu SAKAI<sup>2</sup>, Takashi SHIBATA<sup>3</sup>, and Masaki KATSUMATA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tokyo Metropolitan Univ., 6–6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191–0065 <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, 1–1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305–0052 <sup>3</sup>Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464–8601 <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2–15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237–0061

(Received August 19, 2020)

Abstract: Measurements of water vapor profiles are very important in the studies of atmospheric dynamics, clouds, aerosols and radiation. Water vapor is the predominant greenhouse gas and its vertical distributions are especially important in the global climate system. Water vapor data would lead to benefits in numerical weather prediction such as localized heavy rainfall events and typhoon forecasting. We propose two-beam spaceborne water vapor DIAL with the OPG/OPA transmitter using the absorption line of the 1300 nm band. An error simulation is performed assuming that the platform altitude is 250 km, the receiver diameter is 0.8 m, the laser energy is 20 mJ, and the repetition rate of the laser shot pair (on-off) is 500 Hz. It is shown that water vapor profile measurement relative error of less than 10% is possible between 0–2 km altitudes with spatial resolutions of 300 m vertically and 20 km horizontally in East Asia in summer.

キーワード:衛星搭載ライダー, 差分吸収ライダー, 水蒸気, 気候モデル, 数値予報 **Key Words**: spaceborne lidar, DIAL, water vapor, climate model, numerical weather prediction

### 1. はじめに

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 数値予報においても同様である<sup>1)</sup>.

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.これらの災害は事前の予測精度を上げ 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



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(阿保 真)

重要であることが指摘されている<sup>2)</sup>. 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.

衛星搭載水蒸気ライダーは単独でも高品質データ による数値予報の精度向上並びにそれに伴う天気予 報精度(特に降雨予測)の飛躍的向上が期待できる とともに,他の赤外線やマイクロ波のパッシブリ モートセンシング機器の校正,モデルのバイアス誤 差の検出にも有効であり,衛星搭載のパッシブセン サーによる面的な観測とのシナジー効果が期待でき る.

本稿ではサイエンスと防災の両面から衛星搭載水 蒸気ライダーの必要性,衛星搭載ライダーと他の パッシブセンサーとの違い,国内外の動向を説明し た後,提案する衛星搭載ライダー技術と,誤差シ ミュレーション結果について述べ,最後に今後の展 望を示す.

### 2. 宇宙からの水蒸気分布計測の必要性

### 2.1 科学的側面

地球大気中の水蒸気の温室効果に対する寄与は 48%と、二酸化炭素の21%やオゾンの6%を大き く凌いでいる.人為起源のCO<sub>2</sub>の増加により気温 が上昇すると、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」によって、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<sup>3)</sup>.

成層圏の水蒸気量は、衛星観測データから 2001 年以降減少傾向を示したことが報告され、これが 21世紀の温暖化の鈍化の原因と主張された<sup>4)</sup>.しか しながら、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.

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<sup>5)</sup>.これら水蒸気の重要性から、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.

衛星搭載水蒸気ライダーで全地球的な水蒸気計測 を行うことにより, Fig.1に示す各構成要素を結ん でいるフィードバックプロセスの理解を進めること



Fig. 1 Main links of water vapor in the earth's atmosphere.

が科学的意義のポイントであり、これにより、地球 温暖化シナリオで現実的な水蒸気の増加レベルをシ ミュレーションすることが可能となる.

### 2.2 防災的側面

地球の気温上昇が続いた場合,大型熱帯低気圧 (カテゴリー4,5)の発生頻度が日本南方海洋で上 昇するというシミュレーション結果が示されてい る<sup>6)</sup>.さらに熱帯低気圧の移動速度がこの60年間 で遅くなっているという解析結果も報告されてい る<sup>7)</sup>.このため日本では台風による被害の増大が想 定される.また,IPCC第5次報告ではリスクの増 大に備えて早期警戒システムの整備が勧告されてい る.台風は主に下層水蒸気の流入によって発達する ため,高度分解能を持った衛星搭載ライダーによる 海上の水蒸気観測は,台風の発達予測に有用であ る.

また近年日本では線状降水帯による大雨の発生と それによる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.線状降水帯は組織化した 積乱雲群が長時間にわたってほぼ同じ場所に降水を もたらすシステムであるが,現状の気象予報システ ムでは発生場所や雨量を事前に予測することは困難 である.線状降水帯の維持形成にも下層の水蒸気が 大きな役割を果たしていることが指摘されてい る<sup>8)</sup>.2014年8月の広島県で発生した線状降水帯事 例において水蒸気ラマンライダーの観測システムシ ミュレーション実験(OSSE)の結果によると,線 状降水帯の風上側に下層水蒸気ライダー観測のデー 夕同化を行うことにより,予報降水量が28% 増加 し実測値に近づくことが示されている<sup>9)</sup>.

日本の場合,線状降水帯の風上は東シナ海や太平 洋の海上となることが多いため,衛星搭載水蒸気ラ イダーで地上からの観測が不可能な日本周辺の海上 での水蒸気観測を行い,衛星観測データを数値予報 モデルにデータ同化することにより線状降水帯の大 雨予測精度の向上が期待でき,事前の予測精度を上 げることにより減災が可能となる.

### 3. 衛星搭載水蒸気ライダーの特徴

現在の水蒸気計測は、地表面や船での直接測定、 ラジオゾンデ、地上リモートセンシングシステム (ライダー、分光計、GNSSによるトータル量測 定)、衛星による受動的な赤外線とマイクロ波セン サーによる測定が行われている.地表面観測は鉛直 方向の測定範囲が、ラジオゾンデと地上リモートセ ンシングでは水平方向の測定範囲が、受動センサー では鉛直分解能に問題がある.さらにこれらを組み 合わせたとしても、上部対流圏・下部成層圏の境界 領域のグローバル観測には空白域が生じている.し たがって、現状ではグローバルな水蒸気循環を精度 よく定量的に評価するには、精度、鉛直分解能及び 測定範囲とも不足している.

衛星搭載水蒸気差分吸収ライダー (DIAL: Differential absorption lidar) は以下のような特徴がある. ①高精度,低バイアス,高鉛直分解能で水蒸気の高 度プロファイルが地上から上部対流圏,下部成層圏 まで得られる. ②水蒸気の各高度プロファイル毎に エラープロファイルが得られる. ③低温領域で測定 が困難なラジオゾンデと異なり、どんな温度領域で も水蒸気濃度が得られる. ④光学的厚さの小さい雲 では、雲底から雲頂までの水蒸気プロファイルが得 られる。⑤水蒸気、雲頂高度、エアロゾルの光学的 厚さ、境界層高度などの情報が同時に得られる. ⑥ 他のリモートセンシング測定法では水蒸気以外のパ ラメータ(例えば表面の放射率,温度プロファイ ル,他のガスの濃度、エアロゾル)の影響を受ける が、2波長測定の DIAL ではこれらの影響がキャン セルされ鈍感であるため、赤外線やマイクロ波の パッシブリモートセンシング機器の校正に利用でき る、これは、特にモデルのバイアス誤差の検出に有 効となる.一方,⑦厚い雲の雲頂より低高度は測定 できない. ⑧高い水平分解能・時間分解能データは 軌道直下のみという制約がある. このように制約は あるが他の測定法にない特徴が多くあるため、相補 的な利用が有効である。特に、下部対流圏の高分解 能水蒸気観測は、豪雨や台風予測精度向上による防 災面への貢献が期待できる.

地球の3分の2が海であることから,宇宙からの リモートセンシングが水平,垂直及び時間分解能を 確保する唯一の方法である.しかし,従来は大気の 循環を決める風と温度の計測が優先され、水蒸気の 高い鉛直分解能と精度を持った観測は不十分であ る. 現在の数値モデルでは、対流圏の1kmの厚さ の層を気温を1.5Kの精度で再現できるが、対照的 に比湿の6時間予報値の相対誤差は20-40%にな る<sup>10)</sup>. 全地球大気モデルの鉛直分解能は境界層付 近の100mから成層圏の1kmの間にある.しか し、現在の水蒸気観測データはこれより粗く、逆に 水蒸気や雲はしばしばこれより狭い層構造を形成す る. これらを. 衛星搭載水蒸気ライダーで全地球的 に計測することにより、以下のような優位性があ る. ①全球域の高品質データによる数値予報の精度 向上. それに伴う天気予報精度(特に降雨予測)の 飛躍的向上. ②他の赤外線やマイクロ波のパッシブ リモートセンシング機器の校正に利用するととも に、衛星搭載のパッシブセンサーによる面的な観測 とのシナジー効果が期待できる.

### 4. 国内外の開発動向

衛星搭載水蒸気ライダーに向けた国内外の取組と しては、これまで波長 730 nm、820 nm 及び 930 nm 付近の吸収線を利用した水蒸気 DIAL の開発が行な われてきた.米国のNASAではLASE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<sup>11)</sup>. "A Decadal Strategy for Earth Observation from Space"において PBL 内の水蒸気プロ ファイリングが記載されているが、具体的な衛星 ミッションの計画は現時点では無い. また、欧州の ESA では WALES (Water Vapour Lidar Experiment in Space) と呼ばれる衛星搭載水蒸気 DIAL が 2004 年 にミッション提案されたが不採択になった<sup>1)</sup>. その 後波長 935 nm 帯の OPO 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が<sup>12)</sup>,現時点で具 体的な衛星搭載計画はない。これら衛星搭載 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.

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、NASADA (現 JAXA)を中心に行なわれたが<sup>13,14)</sup>,現時点で 後継の計画はない。今回「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」による衛星地球観測ミッション公募に応 募する形で、本稿の提案を行っている。



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(阿保 真)





5. システムの提案

地上からの水蒸気測定ライダーとしてはラマンラ イダーと差分吸収ライダー方式がある.ラマンライ ダーは散乱強度が弱いことから高出力のライダーを 用いる必要があるため,安全性及び電力の制限から 衛星搭載には適さない.差分吸収ライダーは<sup>15)</sup>水 蒸気の吸収を利用して水蒸気濃度を測定するが,地 上付近の水蒸気の近赤外域吸収線はFig.2に示すよ うに波長の短い方から,820 nm,930 nm,1130 nm,1360 nm,1850 nm 付近を中心とした吸収帯が 存在する.

従来の航空機搭載水蒸気 DIAL では 730 nm, 820 nm, 930 nm 帯が利用されているが, 我々は衛星搭載と下部対流圏から対流圏界面高度までの水蒸気量の観測を考慮し, レーザの効率が良く, かつ吸収断面積の大きい 1.3 µm 付近の吸収線を利用した衛星搭載水蒸気 DIAL を提案する.

### 5.1 送信レーザ

衛星搭載ライダーで技術的に最も困難なレーザ光 源については、1.57 µmCO<sub>2</sub>-DIALの技術<sup>16)</sup>で開発 した QPM (Quasi Phase Matching)結晶を用いた OPG/OPA (Optical Parametric Generator/Amplifier) システムの採用を提案する. OPG/OPA は, one path amplifier であり、通常の共振器構成の位相整合 OPO (Optical Parametric Oscillator)より、制約条件 が緩和されるため宇宙利用には有利である.

Fig. 3 に提案する OPG/OPA 光源をベースにした 衛星搭載水蒸気 DIAL のブロック図を示す.励起光 源は半導体レーザ励起 Nd:YAG レーザを想定してい るが,これは日本の衛星搭載植生ライダー (MOLI: Multi-footprint Observation lidar and Imager)<sup>17)</sup>の開発 で得られるノウハウを継承発展することにより開発 の効率化が期待出来る.また,Nd:YAG レーザを ベースとしているため,衛星搭載ライダー

Fig. 3 Block diagram of the proposed spaceborne water vapor DIAL system.



Fig. 4 Schematics of the scan-less two-beam water vapor DIAL.

CALIPSO などでも実績のある 1064 nm や 532 nm の 2 波長を取り出すことが出来るため,水蒸気とエア ロゾルの同時観測も容易に実現可能である.

### 5.2 2ビーム観測

衛星搭載ライダーは高度分布情報が得られるのが 他のパッシブ観測と比べた大きな利点であるが,一 方レーザビーム方向の情報しか得られないため,周 回軌道の場合でも線状のフットプリントとなる.水 蒸気は空間的・時間的に変動が大きいため,空間分 解能の向上と測定頻度の向上が求められる.

そこで Fig. 4 に示すような斜め 2 方向の測定を同時に行うスキャンレス 2 ビーム方式を提案する. 一般のスキャン観測に用いられる可動ミラーなどを用いずに、シンプルに送信レーザビームを 2 方向に分岐している. また受信望遠鏡も 1 台を広角で利用





Fig. 5 One-day orbit (yellow line) and footprints (red) of twobeam space borne water vapor DIAL. (Orbit altitude is 250 km, orbit inclination is 35° and nadir angle is 22°)

し、2方向を2つの検出器で同時に測定することに より1ビーム装置に比べて簡略化・軽量化が可能で ある.

Fig. 5 に衛星軌道高度 250 km, 軌道傾斜角 35°, ビームの天底角 22°とした時の日本付近の 2 ビーム 観測の 1 日のフットプリントの軌跡の例を示す.こ のフットプリントは太陽非同期準回帰軌道の熱帯降 雨観測衛星(TRMM)と同等である.図で黄色い 線が衛星直下の軌跡で赤い点線が実際のフットプリ ントとなる.このように,1台の衛星搭載ライダー でも日本周辺の海洋上空の水蒸気が高頻度で観測出 来ることがわかる.

### 6. 測定誤差シミュレーション

Table 1 に示すパラメータを用い,高度 250 km から 2 ビームで測定を行う衛星搭載水蒸気 DIAL により,水平分解能を 20 km とした場合の測定誤差シミュレーションを,文献 18,19 の式を用いて行った.水蒸気の高度分布モデルは夏季日本の水蒸気モデルを用いた.高度分解能を 300 m,600 m,1000 m とした時の統計誤差を Fig.6 に示す.高度分解能 300 m で高度 2.1 km まで誤差 10% 以下,高度分解 能 600 m で高度 3.2 km まで誤差 10% 以下,高度分解 能 1000 m で高度 5.6 km まで誤差 20% 以下で水蒸気の測定が可能である.

次に,吸収断面積の異なる3つの吸収線を用い, あわせて4波長を用い,Table2に示すWMOの水 蒸気の衛星観測に対する要求分解能<sup>20)</sup>で熱帯モデ ル水蒸気分布を用いて行った誤差シミュレーション 結果をFig.7に示す.熱帯領域の地表付近から高度 20kmの下部成層圏までの水蒸気が,誤差20%以 下で計測可能であることがわかる.

 Table 1
 Parameters of the two-beam spaceborne water vapor DIAL.

Parameter	Value
Pulse energy	20mJ
	(10mJ for each beam)
Repetition rate	500Hz (on/off pair)
Wavelength	1300nm
Telescope aperture	0.8m
Quantum efficiency	50%(APD)
Platform altitude	250km
Ground track speed	7.8km/s



Fig. 6 Random error of water vapor density for the two-beam space borne DIAL with spatial resolutions of 300 m/600 m/1000 m vertically and 20 km horizontally with a summer water vapor profile model over Japan.

Table 2Remote sensing of environment threshold<br/>requirements for spaceborne DIAL.

Parameter	Requirement		
Altitude range (km)	0-5	5-10	10-16
Vertical resolution (km)	1.0	1.0	2.0
Horizontal integration (km)	100	150	200
Random error (%)		20	

### 7. さらなる発展の可能性

### 7.1 海洋-大気間のフラックス観測への貢献

海洋-大気間の熱交換量(フラックス)は、気候 システムにとっても、より短期の気象現象にとって も、重要なパラメータである.そのうち「潜熱」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



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(阿保 真)



Fig. 7 Random error of water vapor density for the four wavelengths space borne DIAL using the parameters summarized in Table 2 with a tropical water vapor profile model.

く,海上のブイの計測値(真値)との誤差もまだ大 きいことが指摘されている<sup>21)</sup>.潜熱フラックスの 測定に広く用いられている「バルク式」には,主 に,海面付近の水蒸気量,海面付近の風速,海面水 温が必要とされ,このうち風速と水温については, 衛星搭載型の各種センサーにて全球分布の計測が続 けられている.しかし海面付近の水蒸気量は,現状 全球分布を精度良く計測する手段がなく,限られた 点のブイ等での現場直接計測か,衛星搭載サウン ダーによる大気混合層よりも上空の情報も含んだ計 測結果からの推定などに頼っている.

衛星搭載ライダーで大気混合層(熱帯では海面から高度 500 m 前後)の水蒸気量が測定できれば,潜 熱フラックス計測精度向上が期待できる.また,も し水蒸気量と同時に,海面付近の風速や気温が計測 できれば,潜熱・顕熱のスナップショット毎の計算 が可能になる.

### 7.2 気温の同時観測

気温情報は飽和水蒸気量を知る上で重要なパラ メータであり、水蒸気との同時観測ができれば、数 値予報へのデータ同化によるインパクトは大きい. DIALでは吸収スペクトル拡がりの温度依存性を利 用して気温の測定が可能である.すでに CO<sub>2</sub> 測定 用 DIALでは、on/off の 2 波長に加えて吸収スペク トルの裾野の第 3 波長を用いることにより CO<sub>2</sub> 密 度と気温の同時観測に成功している<sup>22)</sup>.原理的に は水蒸気でも同様の測定法により水蒸気密度と気温 の同時観測が可能である.しかし水蒸気濃度の測定 誤差は 5% でも十分であるが,気温誤差は 1% の測 定誤差でも 3K に相当するため,実際に水蒸気の吸 収線を用いた場合の気温測定誤差がどの程度になる かは,詳細な検討が必要である.

### 8. おわりに

提案した衛星搭載水蒸気 DIAL では①全地球域の 高品質水蒸気データによる数値予報の精度向上,② 集中豪雨,竜巻,台風などの予報精度向上,③測定 手段がきわめて限られている上部対流圏・下部成層 圏領域における水蒸気の高精度,高鉛直分解能観測 による気候フィードバックの理解とモデル化の進展 などの成果が期待できる.

今後の課題としては,技術的には①衛星搭載用 QPM 素子の開発(対宇宙線等の検討),②高増倍率 の APD の開発がある.開発体制としては①他の水 蒸気パッシブセンサーとの融合の検討,②データ同 化によるインパクトの検討(OSSEの実施),③サ イエンスコミュニティの立ち上げ,④具体的なミッ ション計画の策定などを進めていく必要がある.現 在は衛星搭載システム開発の前に,実証用 DIAL 装 置を開発し,航空機搭載検証実験を計画している.

#### 謝 辞

本提案に際して、気象庁気象研究所気象観測研究 部の皆さま、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の皆さま から貴重なご意見をいただきましたことを感謝いた します.

#### 参考文献

- 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) 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).
- S. Solomon, K. H. Rosenlof, R. W. Portmann, J. S. Daniel, S. M. Davis, T. J. Sanford, and G.-K. Plattner: "Decadal Changes in the Rate of Global Warming", Science 327 (2010) 1219.
- P. Warneck: Chemistry of the Natural Atmosphere (International Geophysics Series, Vol. 14) (Academic Press, 1988) 757.
- K. Yoshida, M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, and M. Ishii: "Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations", Geophys. Res. Lett. 44 (2017) 9910.
- J. P. Kossin, "A global slowdown of tropical-cyclone translation speed", Nature 558 (2018) 104.



- 8) 瀬古 弘:"中緯度のメソβスケール線状降水系の形態と 維持機構に関する研究",気象庁研究時報 62 (2010) 1.
- S. Yoshida, S. Yokota, H. Seko, T. Sakai, and T. Nagai: "Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar Using LETKF System", SOLA 16 (2020) 43.
- S. J. English, "Estimation of Temperature and Humidity Profile Information from Microwave Radiances over Different Surface Types", J. Appl. Meteor. 38 (1999) 1526.
- E. Browell, S. Ismail, and W. Grant: "Differential absorption lidar (DIAL) measurements from air and space", Appl Phys B 67 (1998) 399.
- 12) 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 (2011) 1532.
- 13) 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 (1995) 154.
- C. Nagasawa, M. Abo, T. Sugisaki, O. Uchino: "Simulation for atmospheric water vapor measurements from spaceborne DIAL", Proc. SPIE 2581 (1995) 161.
- 15)阿保 真:"大気中の微量気体を測るライダー",計測と 制御 56 (2017) 342.
- 16) 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 (2017) 1194.
- 17) J. Murooka, R. Mitsuhashi, D. Sakaizawa, T. Imai, T. Kimura, K. Asai, and K. Mizutani: "Development status of MOLI (Multi-footprint Observation lidar and Imager)", Proc. SPIE 11151 (2019) 1115106.
- S. Ismail and E. V. Browell: "Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitivity analysis",

Appl. Opt. 28 (1989) 3603.

- 19) V. Wulfmeyer and C. Walther: "Future performance of groundbased and airborne water-vapor differential absorption lidar. II. Simulations of the precision of a near-infrared, high-power system", Appl. Opt. 40 (2001) 5321.
- 20) 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 (2005) 211.
- 21) 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 (2019) 430.
- 22) Y. Shibata, C. Nagasawa, and M. Abo: "Observations of The Lower-Tropospheric Temperature Profiles Using Three Wavelength CO2-DIAL", EPJ Web Conf. 237 (2020) 03021.



1984年東京都立大学大学院工学研究 科電気工学専攻修士課程修了.1986 年東京都立大学工学部電気工学科助 手,助教授を経て現在,東京都立大 学システムデザイン研究科教授.博 士(工学).国立極地研究所客員教 授.半導体レーザ,固体レーザなど を用いた大気環境・気象計測技術に

関する研究に従事.

所属学会:レーザセンシング学会.計測自動制御学会, 応用物理学会,日本リモートセンシング学会,日本気 象学会,日本エアロゾル学会,地球電磁気・惑星圏学 会,日本光学会,電子情報通信学会,日本火山学会, 大気環境学会,レーザー学会,IEEE, SPIE, OSA, AGU.