

## 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.

- 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.