

衛星搭載 IPDA-DIAL による海上風速と水蒸気同時観測の検討

阿保 真¹, 長澤 親生¹, 柴田 泰邦¹, 内野 修², 酒井 哲², 柴田 隆³, 勝俣 昌己⁴

¹ 東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

² 気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

³ 名古屋大学 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

⁴ 海洋研究開発機構 (〒237-0061 横須賀市夏島町 2-15)

Proposal for Simultaneous Sea Surface Wind Speed and Water Vapor Observations by Spaceborne IPDA-DIAL

Makoto ABO¹, Chikao NAGASAWA¹, Yasukuni SHIBATA¹, Osamu UCHINO², Tetsu SAKAI²,
Takashi SHIBATA³, and Masaki KATSUMATA⁴

¹ Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

² Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

³ Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601

⁴ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima, Yokosuka, Kanagawa 237-0061

Abstract: We have proposed the spaceborne water vapor DIAL by the OPG/OPA transmitter using water vapor absorption lines in the 1350nm band and the IPDA-DIAL method to measure water vapor just above the sea surface. In this paper, we proposed a method to simultaneously measure water vapor and wind speed over the sea surface by measuring the backscatter coefficient at the sea surface using the IPDA-DIAL. To confirm the usefulness of this method, wind speeds calculated from CALIPSO 1064nm sea surface backscatter coefficient data were validated for the ocean near a typhoon. This result showed that IPDA-DIAL could observe the latent and sensible heat fluxes over the ocean.

Key Words: IPDA, DIAL, water vapor, ocean heat flux

1. はじめに

近年、線状降水帯による大雨の発生や強い台風の増加が、防災上大きな社会問題となっており、防災・減災、国土強靱化のための対策が急務となっている。飛翔体からのライダー観測により日本周辺の水蒸気を観測し、数値気象予測モデルに同化させることで予測精度の向上が期待される。我々は、波長 1350nm の吸収帯を利用した OPA (Optical Parametric Amplifier) 送信機を用いた衛星搭載水蒸気 DIAL を提案している²⁾。一方水蒸気の鉛直分布と同様に、海面付近の水蒸気量の測定は、特に豪雨の予測や海洋と大気間の熱フラックスの推定に重要である。そこで、提案している DIAL ミッションのハードウェア仕様を大きく変えることなく、IPDA (Integrated Path Differential Absorption) 技術²⁾を用いて、大気後方散乱と海面反射の両方の信号を用いた海面付近の水蒸気の DIAL 観測の可能性を提案した³⁾。これは大気後方散乱信号よりも強い海面反射信号を利用して海面直上の差分吸収を測定するものである。本発表では海上水蒸気に加えて海面反射光を利用した海上風速を同時に測定する手法を提案し、その原理と有効性について CALIPSO データを用いた検証した結果について報告する。

2. 海面反射光を利用した海上風速と水蒸気の同時観測原理

2.1 潜熱フラックスの導出法

海洋から大気への潜熱フラックスは放射フラックスに比べて絶対量こそ小さいものの、大気への水蒸気供給量と同義であり、特に熱帯～亜熱帯において、雲・雨の形成や大気放射などに重要なパラメータである。しかし、全球分布を推定したプロダクトにおいて、プロダクト間の差異が大きく、海上のブイの計測値(真値)との誤差も大きいことが指摘されている⁴⁾。潜熱フラックス Q_{lat} は広く用いられる以下のバルク式から求められる。

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

ここで、 ρ は大気密度、 L_v は蒸発潜熱である。 $\langle wq \rangle$ は鉛直風と比湿の変動であるが、近似的に潜熱伝達係数 C_E 、海面上の水平風速 S 、大気海洋間の比湿差 ΔQ の積で求められる。 ΔQ はIPDA-DIALにより求められる海面付近の水蒸気量と衛星データから得られる海水面温度から求められる飽和水蒸気密度から計算できる。さらに、衛星搭載ライダーCALIPSOで測定される海面後方散乱係数から海上の風速を推定する方法⁵⁾をIPDA-DIALのoff信号に適用することにより、海面付近の風速 U ($\sim S$)を求め、客観解析データなどの気温、気圧情報と合わせると、潜熱・顕熱フラックスのスナップショット毎の計算が可能になる。

2.2 海面後方散乱係数から海上風速を求める原理

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

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

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

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

$$\gamma = \frac{\rho}{4\pi\sigma^2} \quad (3)$$

となる。一方風速と σ^2 の関係として式(4)が提案されている⁵⁾。

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

風速7m/sから13.3m/sではCox-Munkモデル (線形関係)、風速13.3m/s以上ではWuモデル⁶⁾ (対数線形関係)、風速7m/s以下では波の勾配分布を一次元ガウス分布とみなしたモデルとなっている。これらの関係式は、1ヶ月の全球データを用いて、CALIPSOの後方散乱係数を10km平均してから導出した風速と、衛星搭載マイクロ波放射計AMSR-Eの風速 (20km分解能) と比較した結果、二乗平均平方根 (rms) 差は1.2m/sであると報告されている。式(3)(4)を用いて求めた海面後方散乱係数と風速の関係をFig. 2に示す。

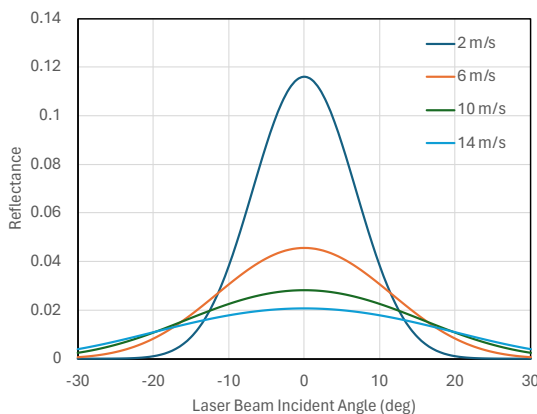


Fig. 1 Reflectance distribution for different wind speed.

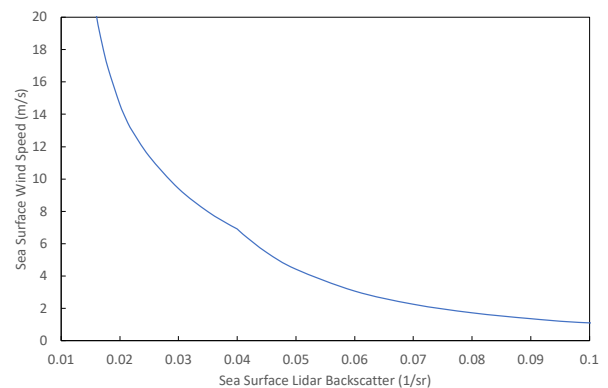


Fig. 2 Relation between sea surface wind speed and sea surface backscatter using relation between wave slope variance and wind speed.

3. CALIPSO の海面散乱係数データを用いた海上風速計測の検証

前章で示した関係式が台風の発生する夏季の日本南方における海上風速測定において有用であることを確認するため、実際の CALIPSO の海面散乱係数データを用いて検証を行った。データは CALIPSO 衛星 1064nm の減衰後散乱係数を用いて、消散係数・後方散乱係数比を 30 と仮定し海面直上までの光学的厚さを求め、減衰補正した海面後方散乱係数を求めた。雲や濃いエアロゾル等による減衰の大きいデータは除外している。補正した海面後方散乱係数より海上軌跡に沿った風速を求めた。手順は文献[5]にしたがい、大気の大減衰係数補正した海上後方散乱係数から式(3)(4)を用いて海上風速を求めた。検証のために、AMSR-2 のマイクロ波放射計による L3-海上風速データ⁷⁾と気象観測船啓風丸⁸⁾ならびに研究船みらい⁹⁾による気象観測データとの比較を行った。

Fig. 3 に気象観測船啓風丸との風速比較結果を、Fig. 4 に比較日 (2018/7/30) の CALIPSO のパスと観測時直近の天気図を示す。衛星の軌跡は台風 12 号の東側を横切っている。北緯 20~24° では、両衛星観測データと観測船の測定値はよく一致している。Fig. 5 に研究船みらいとの風速比較結果を、Fig. 6 に比較日 (2020/9/10) の CALIPSO のパスと観測時直近の天気図を示す。衛星の軌跡は熱帯低気圧を横切る軌跡である。両衛星観測データと観測船の測定値はよく一致している。北緯 25° 以北では、AMSR-2 のデータは得られていないが、CALIPSO の風速データは得られており、風速が上昇しているのが分かる。衛星ライダーの海面後方散乱係数からの海上風速推定が台風周辺などでも有効であることが確認できた。

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

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

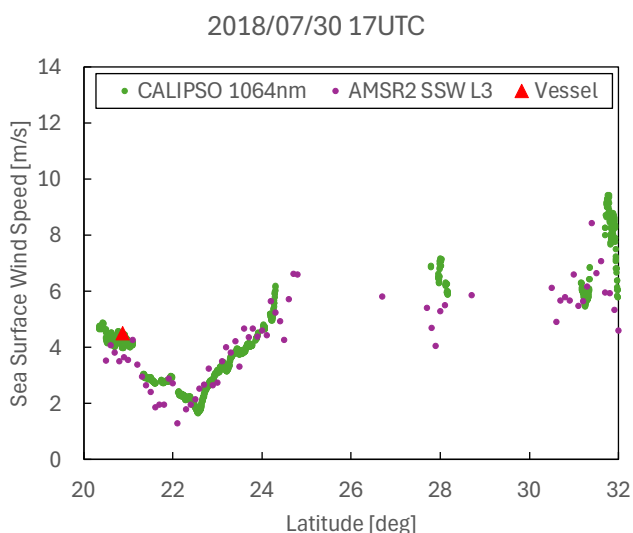


Fig. 3 Sea surface wind speeds derived from CALIPSO 1064nm (green dot), collocated AMSR2 wind speed (purple dot) and meteorological observations by research vessel Keifu Maru (red triangle) (2018/7/30 17UTC).

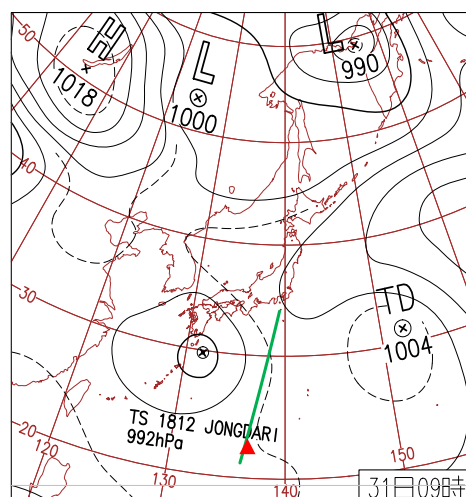


Fig. 4 Vessel position (red triangle) and orbit track locations (green line) of CALIPSO and AMSR-2 plotted on weather map (2018/7/31 09UTC).

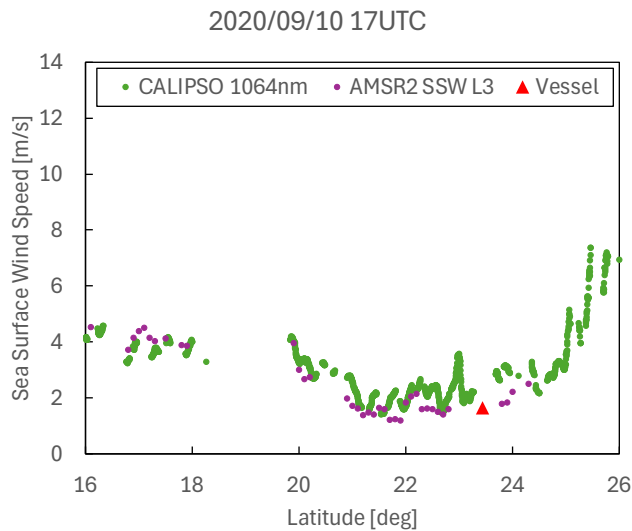


Fig. 5 Sea surface wind speeds derived from CALIPSO 1064nm (green dot), collocated AMSR2 wind speed (purple dot) and meteorological observations by research vessel MIRAI (red triangle) (2020/9/10 17UTC).

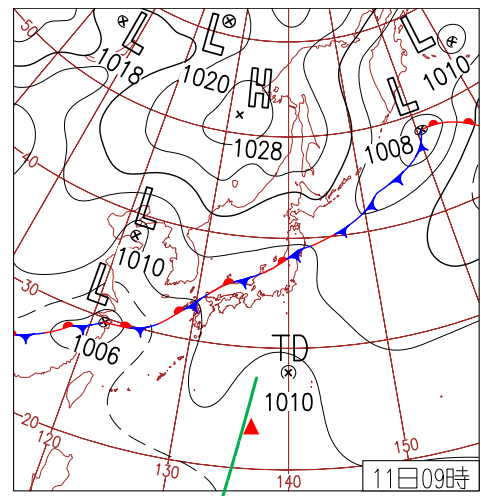


Fig. 6 Vessel position (red triangle) and orbit track locations (green line) of CALIPSO and AMSR-2 plotted on weather map (2020/9/11 00UTC).

4. まとめ

衛星搭載水蒸気観測ライダーミッションに追加提案している IPDA-DIAL 方式による海面直上水蒸気観測の海面反射光強度データを利用した、海上風速の同時測定手法の提案と検討結果を示した。CALIPSO1064nm データによる海上風速とマイクロ波放射計並びに観測船による海上風速の比較を行ったが、三者は概ね一致した。また IPDA-DIAL において、風速が大きい場合に海面後方散乱係数が減少することによって生じる水蒸気測定誤差は無視できる程度に小さいことも確認した。衛星搭載水蒸気 IPDA-DIAL により海上の水蒸気と風速を同時観測することで、潜熱フラックス測定は十分可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 阿保真他: レーザセンシング学会誌, **1** (2020) 72.
- 2) J. B. Abshire et al.: Remote Sens., **6** (2014) 443.
- 3) M. Abo et al.: Proceedings of the 30th International Laser Radar Conference. ILRC 2022 (2023) 639.
- 4) M. F. Cronin et al.: Front. Mar. Sci., **6** (2019) 430.
- 5) Y. Hu et al.: Atmos. Chem. Phys., **8** (2018) 3593.
- 6) J. Wu, Radio Sci.: **25** (1990) 37.
- 7) A. Shibata: European Journal of Remote Sensing **45** (2012) 133.
- 8) JMA: https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/cruisedata_e.php?id=KS1806
- 9) 勝俣昌己他: レーザセンシング学会誌, **3** (2022) 13.