

イメージング FTS とドップラーライダーによる 全球風観測

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

¹九州大学応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

²宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

³東京都立大学 (〒195-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

⁴国立環境研究所 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

⁵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 OKAMOTO¹, Toshiyoshi KIMURA², Daisuke SAKAIZAWA², Shoken ISHII³,
Tomoaki NISHIZAWA⁴, Hiroshi ISHIMOTO⁵, Kaori SATO¹ and Eiji OIKAWA¹

¹Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga Park, Kasuga Fukuoka, 816-8580

²Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505

³Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka Hino, Tokyo, Japan 191-0065

⁴National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa Tsukuba, Ibaraki 305-8506

⁵Meteorological 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：ライダー，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¹⁾。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²⁾。

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³⁾。

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 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⁴⁾。

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^{-1} 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

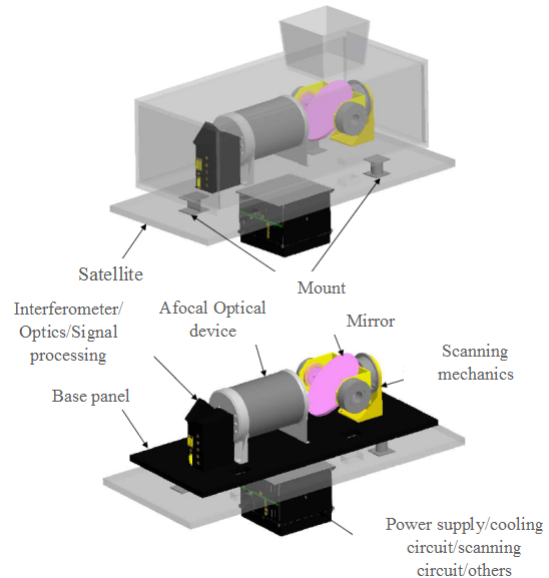


Fig. 1 Imaging FTS instrument developed in JAXA.

Table 1 Specifications of imaging FTS.

Spectral range	700-1200, 1600-2250 cm^{-1}
Spectral resolution	0.6 cm^{-1}
Noise Equivalent Temperature Difference	0.23 K (@1030 cm^{-1} , 260 K), 0.85 K (@2160 cm^{-1} , 280 K)
Accuracy	1 K (TBD)
IFOV	<10 km
Observation areas	Full Disk (TBD)
Sampling frequency	<30 min.-1hour

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 \times 512 km で、それを 4 km \times 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 10 km 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

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⁵⁾。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ーである。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ーが検討されてきた⁶⁾。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、ライダー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 衛星やライダーを搭載した 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 15.4 μm 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 45 km 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⁶⁾。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-

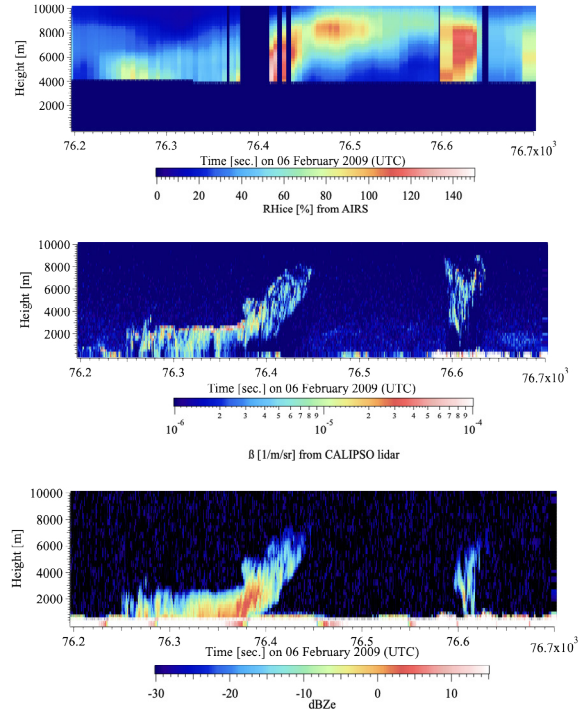


Fig. 2 (Upper) Time-height plot of super saturation respect to ice from AIRS, (Middle) Backscattering coefficient of clouds detected by CALIPSO, (Lower) Radar reflectivity factor by CloudSat on 6 February 2009 in Arctic region (modified from Ref. 4).

sol-Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) に雲識別手法である KU-mask⁷⁾に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能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ーや、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ー、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ー 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

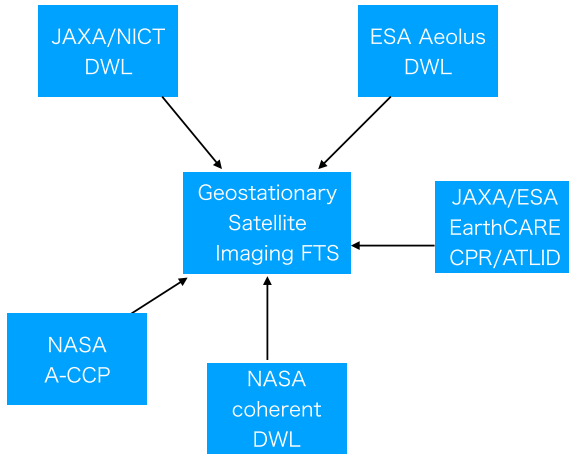


Fig. 3 Global wind observing system by using imaging-FTS, Doppler wind lidars and Doppler cloud radar.

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、ライダー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⁸⁾。氷粒子の形状や配向を特定できれば、雲レーダとライダー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⁹⁾。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¹⁰⁾。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⁸⁾。

衛星ライダー観測においては、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)¹¹⁾、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)¹²⁾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。衛星搭載ライダー観測ではこのような多重散乱過程が、地上ライダー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ー¹³⁾、多視野角高スペクトル分解ライダーの開発にも成功し¹⁴⁾、連続観測を開始している。これらの新たなライダー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ーも開発中である。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

- 1) 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. Cardinali, 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>.
- 3) A. Stoffelen and Coauthors, "The Atmospheric Dynamics Mission for Global Wind Field Measurement," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, (2005) 4.
- 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.
- 5) 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).
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.

岡本 創 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。

