

令和元年6月28日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05293

研究課題名(和文) 数値予報精度改善に向けた、衛星搭載風ライダーのシミュレーションと同化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the simulation and assimilation of space-based wind lidars to improve the numerical weather prediction

研究代表者

岡本 幸三 (Okamoto, Kozo)

気象庁気象研究所・台風研究部・室長

研究者番号：40584660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：将来の衛星に搭載を検討しているドップラー風ライダー(DWL)が、数値予報精度の改善にどれくらい貢献できるか調査した。そのために、仮想的なDWL観測データの作成、DWLデータを数値予報システムに取り込む(同化する)ための処理の開発や、数値予報精度の評価手法の改良を行った。同化システムを用いた実験から、DWL観測データを新たに利用することにより数値予報精度が改善し、特に熱帯域で数値予報精度の改善が大きい(最大2%)こと、DWLを同化するための品質管理処理が重要であることなどが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、衛星搭載DWLが数値予報精度の改善に有用であることを示した。これは先行研究でも示されてきたが、本研究では新たに、単純にDWLを同化するだけでは却って悪化する場合もあり、季節等に依存した品質特性の違いを反映させるなどして、精緻な品質管理処理や観測誤差設定を開発する必要があることを示した。また本研究で構築した疑似観測データの作成・評価手法は、DWLに限らず他の大規模観測システムにも応用が可能であり、今後の様々な観測システムの検討に有用な手段となりうる。

研究成果の概要(英文)：We investigated how much future satellite-based Doppler Wind Lidar (DWL) improve the accuracy numerical weather prediction (NWP). We simulated synthetic DWL observations, developed assimilation procedure to include DWL, and revised evaluation systems. Assimilation experiments demonstrated that including the synthetic DWL observations improved NWP accuracy especially for Tropics with the improvement rate up to 2%, and that quality control procedures for DWL were essential.

研究分野：衛星データ同化, 数値予報

キーワード：ドップラー風ライダー(DWL) 衛星観測 データ同化 観測システムシミュレーション実験(OSSE) エアロゾル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

風の全球3次元的情報は、数値予報の改善や、大気循環・台風発生発達・エアロゾル等の物質循環・熱帯気象等のプロセス解明に重要であるにもかかわらず、現在の観測システムでは十分に観測されていない。衛星搭載のドップラー風ライダー（DWL）は、全球的な風の水平・鉛直3次元観測を取得できる有望な手段の一つである。しかしDWLの開発・利用には技術的課題や多大の予算・時間が必要となるため、その効果を事前に評価し、最適な衛星・測器構成を検討することが望ましい。観測データと数値モデルを融合させるデータ同化という技術を発展させることにより、このような事前評価が可能となってきた。

2. 研究の目的

数値予報の精度改善、新しい衛星観測システムの客観的な評価システムの確立を目的として、将来衛星に搭載することを検討中のDWLデータを疑似的に作成（シミュレート）し、データ同化を行う。このように擬似的な観測データを作成しデータ同化し評価することを観測システムシミュレーション実験（OSSE）と呼ぶ。DWLのOSSEを実行することにより、最適なライダー・衛星仕様の決定に資する客観的情報の作成と、データ同化処理手法の高度化を行う。

3. 研究の方法

DWLのOSSEを実行するために、次のような開発を行い、評価を実施した。

- ① 同化システムの改良
- ② DWLシミュレーションデータ（以下、DWLデータ）の作成
- ③ 同化実験の実施、解析・予報へのインパクトの評価

①としては、気象庁で開発・運用されている現業全球データ同化システムをベースに、DWLを適切に処理できるように改良した。現業同化システムを用いることにより、気象庁で開発されている様々な知見・検証ツールが利用できることに加え、本研究開発の成果を速やかに現業システムに導入できるという大きな利点がある。DWLデータの導入にあたっては、DWLが観測するレーザ視線方向の風速成分を計算するための観測演算子の開発、品質の高いデータのみを選択する品質管理手法の開発、観測データの特性を反映して重みを決定する観測誤差の設定などを行った。

②については、大気の「疑似真値場」を作成し、ライダーシミュレータを用いてDWL風データを作成した。「疑似真値場」は、SOSE（Sensitivity Observing System Experiment; Marseille et al. 2008, Tellus）という手法を元に作成した。このSOSE疑似真値場は、予報誤差に対する感度場を用いて修正した第一推定値に、実観測データを同化することによって作成する。これにより、実観測データと整合し、予報誤差を減少させる場として、「疑似真値場」を作成することができる。ライダーシミュレーションにおいてはエアロゾルや雲の分布・量・特性を必要とするが、SOSE疑似真値場は風、気温、地上気圧、比湿といった基本的な気象要素しか持たない。そこでエアロゾルについては、気象研究所で開発された全球エアロゾルモデルMASINGAR（Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere; Tanaka and Chiba 2005, JMSJ）を用いることとした。SOSE疑似真値場の風場で拘束しながらMASINGARモデルを実行することにより、SOSE疑似真値場と整合的なエアロゾル場を作成した。雲は、SOSE疑似真値場を作成する際に実行したデータ同化サイクルで生成した、第一推定値の雲量・雲水水量を用いた。ライダーシミュレータは、分担者である石井等が開発しているISOSIM-L（Integrated Satellite Observation SIMulator for a spaceborne coherent Doppler Lidar; Baron et al. 2017 JMSJ）を用いた。ISOSIM-Lは、設定したライダーパラメータや衛星軌道に応じて、コヒーレント受信方式のDWLの受信電力や信号対雑音比を計算し、視線方向風速や誤差の計算を行う。

③の同化実験は、現業で用いられている全データと、②で作成されたDWLデータを、①の同化システムを用いて実施する。そしてDWLデータを同化して得られた解析場を初期値とし、数値予報モデルを用いて予測を行う。その予測精度を検証することにより、DWLのインパクトを評価することができる。この際、DWLの有無や、観測条件（搭載衛星軌道など）の違いによる予測精度の違いを比較することにより、DWLのインパクトの詳細な調査や、最適な観測設定・利用方法を調査した。②のDWLシミュレーションと③の同化のフローチャートを図1に示す。

4. 研究成果

本研究では、2 μ m帯のコヒーレント受信方式で、パルスエネルギーは125mJ、繰り返し周波数は30Hz、天底角35度で、方位角45度と135度の2方向にレーザ光を射出するDWLを想定し、ライダーシグナルのシミュレーション計算を行った。そして、水平100km、鉛直は0.5km（高度3km以下）、1km（3～9km）、2km（9～27km）の分解能を実現できるようにショット積算を行い、視線方向の風データを算出した（Ishii et al. 2017, JMSJ）。搭載衛星は、超高度衛星技術試験機（SLATS）を想定する。これらの設定は、情報通信研究機構や宇宙航空研究開発機構で、実際に開発・試験されているものに基づいている。

このDWLデータをシミュレートする際に、高精度なライダーシミュレータISOSIM-Lを開発したこと、入力として現実的な1時間ごとの全球3次元のエアロゾル分布を利用しているこ

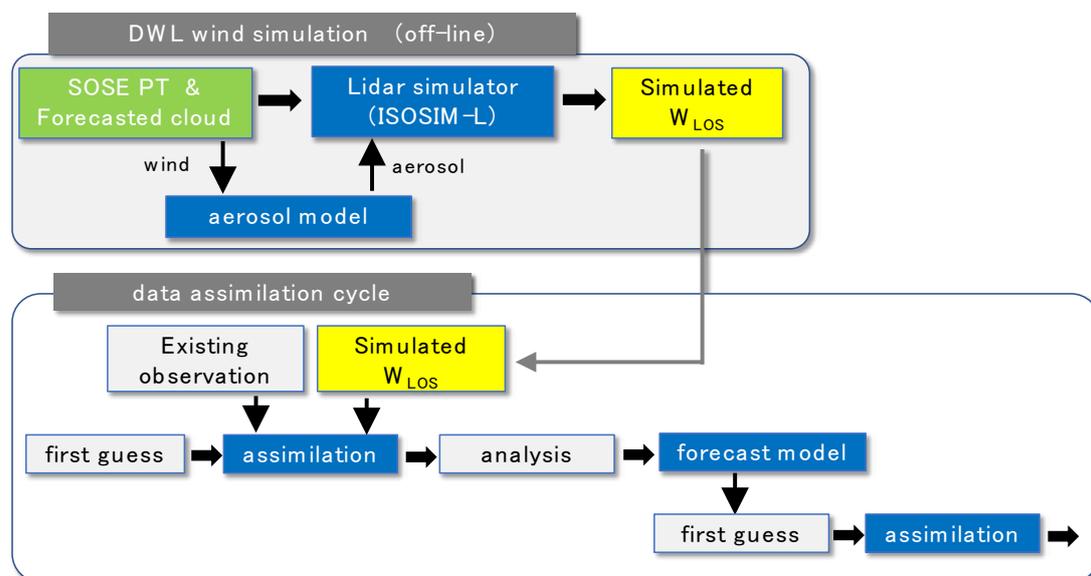


図 1 : DWL の OSSE 処理の流れ。上側のブロックは、DWL データを作成する処理で、SOSE 疑似真値場 (PT)、エアロゾルモデル MASINGAR、ライダーシミュレータ ISOSIM-L を用いて、DWL の視線方向の風速 W_{Los} を算出する。ここで算出された DWL データを、データ同化システムを用いて同化する処理を、下側のブロックで示す。現業システムで用いられている既存の観測データに DWL データを加え、第一推定値(first-guess)を用いて同化し、解析場を作成する。この解析場を初期値として予報を行い、3~6 時間予報は次の解析の第一推定値に、9 日先までの予報は予測精度の評価に用いる。

とが、本研究の大きな特徴の一つである。これにより、エアロゾルや雲場に応じた現実的な風分布や信号雑音強度 (SNR) を算出できるため、従来研究より現実的な (例えば季節や場所依存性を反映した) 誤差設定や品質管理処理の効果を評価できるようになった。

DWL データを同化した数値予報への効果 (インパクト) を調査するため、極軌道衛星に搭載した場合と、熱帯軌道衛星に搭載した場合、そして DWL を同化しない場合の 3 通りについてそれぞれ同化実験を行った。実験期間は、2010 年 1 月と 8 月のそれぞれ一ヶ月である。

主要な実験結果は、

- ・ 極軌道衛星搭載 DWL、熱帯軌道衛星搭載 DWL のいずれも、予測を改善した。特に熱帯での改善が大きく、最大 2% の改善率が得られた。これら 2 種類の DWL の観測分布例と、熱帯期の予測改善率を図 2 に示す。
- ・ 1 月実験、8 月実験とも、DWL 同化により予測は概ね改善した。特に 1 月実験の改善が大きい。ただし 8 月実験では、南半球で予測の改悪も見られ、これは同化処理における品質管理や観測誤差設定に、さらに改良の余地があることを示唆する。
- ・ 同様に、先行研究で用いられてきた単純な品質管理処理や観測誤差設定は、却って予報精度を悪化させる可能性があることが明らかになった。エアロゾル分布や雲の分布によって DWL データの品質が変わることを考慮した同化処理の重要性を示している。
- ・ 熱帯軌道衛星搭載 DWL は、熱帯域での 2 日予報までは改善が大きい。極軌道衛星搭載 DWL は熱帯域で 2 日目以降の予報の改善が大きい。熱帯以外の領域では、両衛星を同化することによる明瞭な違いは見られない。このためどちらの軌道の改善効果が大きいかは、本研究では結論付けることができなかった。
- ・ 衛星を用いた風観測としては、大気追跡風 (AMV) データが今日の数値予報で広く用いられている。しかし AMV は、鉛直プロファイルが得られない、算出高度の精度が悪いなどの問題がある。実際に品質管理済みのデータ分布を DWL と AMV で比較すると、AMV は品質が悪い対流圏中層でほとんど利用されていない。一方で、DWL は対流圏全域で利用されている (図 3)。ただし AMV は DWL よりも広域/高頻度で観測できること、測器やアルゴリズムの改良が多く機関で取り組まれていること、衛星搭載サウンダ (鉛直探査計) から算出できれば鉛直分布情報が得られる可能性があることから、DWL と AMV の相補的な利用法を今後も探る必要がある。

衛星搭載 DWL の OSSE 自体は、欧米において先行研究がいくつか存在する。しかし、本研究のように、全球エアロゾルモデルを用いてエアロゾル分布を精緻に表現したこと、品質管理や観測誤差設定等の同化処理を詳細・評価してこれらの重要性を確認したこと、異なる季節・搭載衛星の比較を詳細に行ったことなどは、先行研究にはなく、上述したような世界初の知見を得た。また、本研究のように、疑似データの作成・同化実験をここまで精緻・大規模に行い、詳

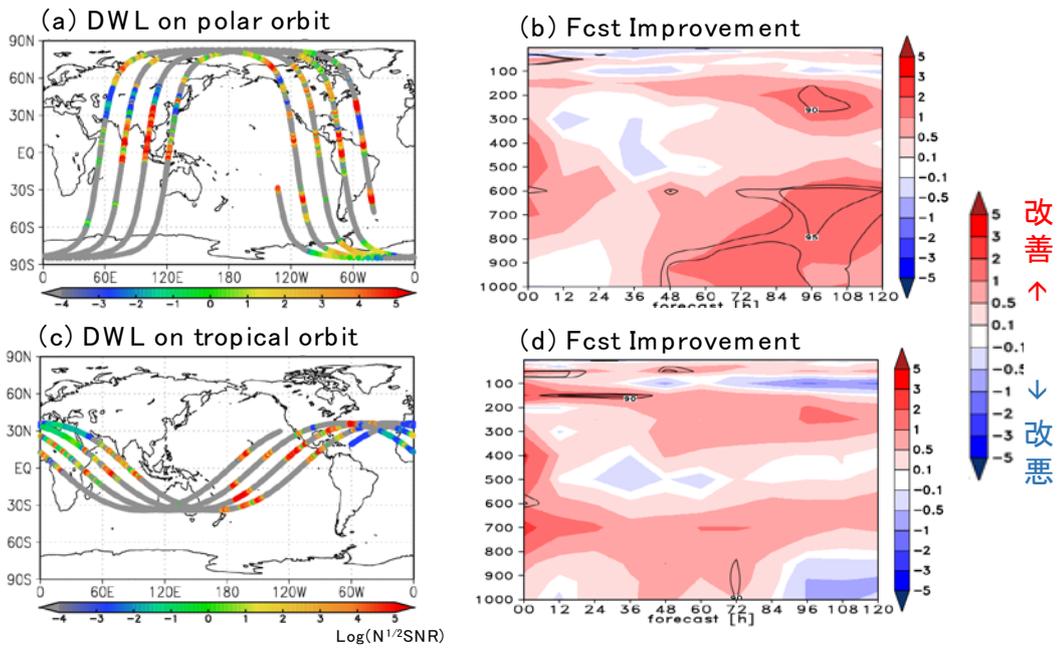


図 2 : (a, c) シミュレートした DWL データの分布例。(a)極軌道衛星搭載、及び(c)熱帯軌道搭載の DWL を想定したときの、2010 年 8 月 1 日 09~15UTC におけるデータ分布。色は信号対雑音比に比例した量を表し、値が大きいくほど品質が高いことを示す。
 (b) 極軌道衛星搭載 DWL、及び(d)熱帯軌道衛星搭載 DWL を同化した時の、熱帯東西風速の月平均予報改善率(%)。縦軸が気圧、横軸が予報時間を表す。2010 年 1 月 1 日~31 日において DWL を同化し、12UTC 解析値を初期値とした 31 日分の 5 日予報から計算。改善率は、SOSE 疑似真値場と予報値の差から予報値の自乗平均誤差 (RMSE) を計算し、DWL 同化の有無による予報 RMSE の差を規格化したもので、正値が予報 RMSE の減少、すなわち予報の改善を表す。コンターは、90%及び 95%信頼度に基づく統計的有意性を示す。Okamoto et al. (2018; JMSJ)を改訂。

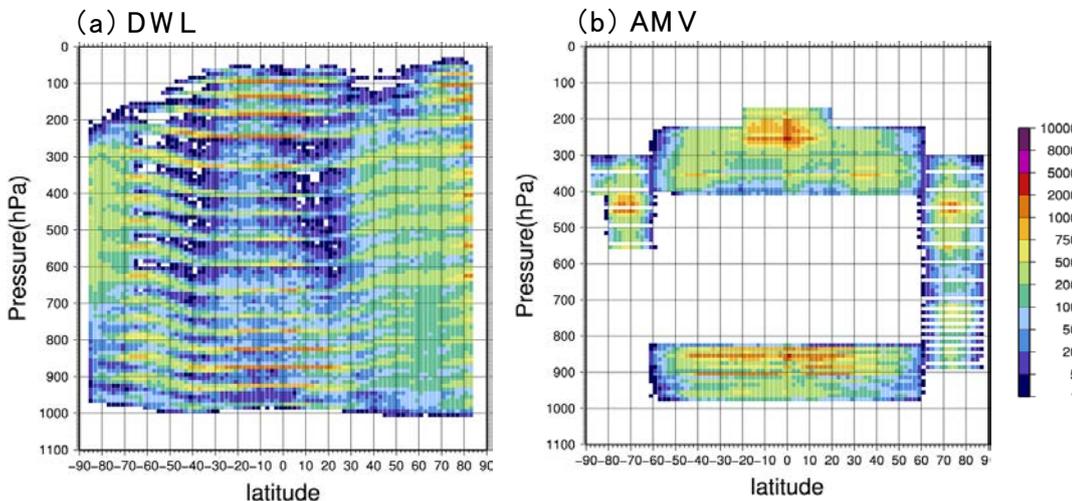


図 3 : 1 月の同化実験で同化された(a) DWL データと(b)AMV データの月積算数。気圧 10hPa 毎、緯度 2 度毎の領域内で積算。Okamoto et al. (2018; JMSJ)を改訂。

細な結果を示した研究は日本では初めてであり、衛星観測等の大規模観測システムの将来設計に対して一つの道筋を示したと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, K. Gamo, T. Y. Tanaka, K. Yamashita, and T. Kubota, 2018: 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**, 179-199, doi.org/10.2151/jmsj.2018-024. 査読有

- ② Baron, P., S. Ishii, K. Okamoto, K. Gamo, K. Mizutani, C. Takahashi, T. Itabe, T. Iwasaki, T. Kubota, T. Maki, R. Oki, S. Ochiai, D. Sakaizawa, M. Satoh, Y. Satoh, T. Y. Tanaka, and M. Yasui, 2017: Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler Wind Lidar. Part 2: Measurement simulation algorithms and retrieval error characterization. *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 319-342. doi:10.2151/jmsj.2017-018. 査読有
- ③ Ishii, S., P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y. Satoh, T. Kubota, D. Sakaizawa, R. Oki, K. Okamoto, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, T. Maki, K. Yamashita, T. Nishizawa, M. Satoh, and T. Iwasaki, 2017: Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar. Part 1: Instrumental overview for global wind profile observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 301-317. doi:10.2151/jmsj.2017-017 査読有
- ④ Ishii, S., K. Okamoto, P. Baron, T. Kubota, Y. Satoh, D. Sakaizawa, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, K. Yamashita, S. Ochiai, K. Gamo, M. Yasui, R. Oki, M. Satoh, and T. Iwasaki, 2016: Measurement performance assessment of future space-borne Doppler wind lidar for numerical weather prediction., *SOLA*, **12**, 55-59, doi:10.2151/sola.2016-012, 査読有

[学会発表] (計 18 件)

- ① 岡本幸三, 2018: 衛星データ同化/再解析, 日本気象学会 2018 年秋季大会シンポジウム「未来を拓く気象観測のあり方」, 気象学会秋季大会, 仙台国際センター, 仙台, 2018 年 10 月 30 日, 招待講演
- ② Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, T., K. Gamo, Y. Tanaka, T. Kubota, 2018: Observing system simulation experiment (OSSE) for future space-based Doppler wind lidar of Japan, EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2018, Tallinn, Estonia, 21 September 2018
- ③ Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, T., K. Gamo, Y. Tanaka, T. Kubota, 2018: Evaluation of potential impacts of future Japan's space-based Doppler Wind Lidar (DWL) on polar- and tropical-orbiting satellite in Japan, 19th Coherent Laser Radar Conference, Okinawa, Japan, 18 June 2018, Okinawa
- ④ 岡本幸三, 石井昌憲, Philippe Baron, 石橋俊之, 田中泰宙, 蒲生 京佳, 山下浩史, 久保田 拓志, 2017: 観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を用いた, 衛星搭載風ライダー (DWL) のインパクト評価. 気象学会秋季大会, 札幌, 2017 年 10 月 31 日
- ⑤ 山下浩史, 岡本幸三, 2017: 気象衛星 Meteosat7 号から Meteosat8 号への大気追跡風の現業全球数値予報システムにおける切り替え利用について. 気象学会秋季大会, 札幌, 2017 年 10 月 31 日
- ⑥ 岡本幸三, 石井昌憲, Philippe Baron, 石橋俊之, 田中泰宙, 蒲生 京佳, 山下浩史, 久保田 拓志, 2017: 観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を用いた, 衛星搭載風ライダー (DWL) のインパクト評価, 第 35 回レーザセンシングシンポジウム, 野沢, 2017 年 8 月 31 日
- ⑦ Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, K. Gamo, Y. Tanaka, T. Kubota, 2017: Observing system simulation experiment (OSSE) for future space-based Doppler wind lidar in Japan. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉市, 2017 年 5 月 22 日
- ⑧ Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, T., K. Gamo, Y. Tanaka, T. Kubota, 2017: Preliminary results of observing system simulation experiment (OSSE) for future space-based Doppler wind lidar. 14th annual meeting of 2017 Asia Oceania Geoscience Society, Singapore, 8 August 2017.
- ⑨ Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, T., K. Gamo, Y. Tanaka, T. Kubota, 2017: Observing system simulation experiment (OSSE) for future space-based Doppler wind lidar in Japan. Working Group Meeting on Space-based Lidar Winds, Newport News Marriott at City Center, Newport News, USA, 22 March 2017
- ⑩ 岡本 幸三, 石橋 俊之, 石井 昌憲, Philippe Baron, 田中 泰宙, 蒲生 京佳, 山下浩史, 久保田 拓志, 境澤大亮, 佐藤洋平, 2016: 観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を用いた未来の衛星データの数値予報への影響評価. 気象庁施設等機関研究報告会, 気象庁, 2017 年 1 月 18 日
- ⑪ 岡本 幸三, 石井 昌憲, Philippe Baron, 石橋 俊之, 田中 泰宙, 蒲生 京佳, 久保田 拓志, 2016: 将来衛星搭載風ライダーのための観測システムシミュレーション実験, 第 34 回レーザセンシングシンポジウム, 野沢, 2016 年 9 月 9 日
- ⑫ 石井昌憲, 佐藤篤, 青木誠, 西澤智明, 水谷耕平, 落合啓, 久保田実, 2016: 宇宙からの地球環境光計測技術, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 札幌, 2016 年 9 月 21 日
- ⑬ Okamoto, K., S. Ishii, P. Baron, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, T. Kubota, R. Oki, K.

Gamo, 2016: Recent results from feasibility study of space-based Doppler Wind Lidar in Japan. 18th Coherent Laser Radar Conference, University of Colorado Boulder, Boulder, USA, 1 July, 2016

- ⑭ 山下浩史, 岡本幸三, 2016: ひまわり 8 号衛星から算出される大気追跡風の現業数値予報システムにおける利用開始と衛星搭載ドップラー風ライダーから算出される風データの利用の検討. 気象学会秋季大会, 名古屋, 2016 年 10 月 26 日
- ⑮ Okamoto, K., S. Ishii, P. Baron, T. Kubota, Y. Satoh, D. Sakaizawa, T. Ishibashi, T. Tanaka, K. Yamashita, S. Ochiai, K. Gamo, M. Yasui, R. Oki, M. Satoh, T. Iwasaki, 2015: Simulation and impact study of future spaceborne Doppler wind lidar in Japan, *DWL-OSSE meeting*, College Park, USA, 4 December 2015 招待講演
- ⑯ 岡本幸三, 石井昌憲, 石橋俊之, 田中泰宙, Philippe Baron, 久保田拓志, 境澤大亮, 佐藤洋平, 蒲生京佳, 2015: 衛星搭載風ライダーを用いた気象予測の改善, 次世代安心・安全 ICT フォーラム 災害対策技術講演会 2015, 東京, 2015 年 6 月 17 日 (招待講演)
- ⑰ 山下浩史, 岡本幸三, 2015: 衛星搭載ドップラー風ライダーから算出される風データの現業数値予報における利用の検討. 気象学会秋季大会, 京都, 2015 年 10 月 28 日
- ⑱ 岡本幸三, 石井昌憲, Philippe Baron, 落合啓, 石橋俊之, 田中泰宙, 蒲生京佳, 高橋千賀子, 2014: 衛星搭載風ライダーの同化に向けて: 観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を用いた数値予報インパクト調査, 第 32 回レーザセンシングシンポジウム, 高山, 2014 年 9 月 4 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 石井昌憲

ローマ字氏名: Shoken ISHII

所属研究機関名: 情報通信研究機構

部局名: 電波計測研究所

職名: 主任研究員

研究者番号 (8 桁): 70359107

研究分担者氏名: 石橋俊之

ローマ字氏名: Toshiyuki ISHIBASHI

所属研究機関名: 気象庁気象研究所

部局名: 台風研究部

職名: 主任研究官

研究者番号 (8 桁): 30585857

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: Philippe BARON

ローマ字氏名: Philippe BARON

研究協力者氏名: 山下浩史

ローマ字氏名: Koji YAMASHITA

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。