

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06129

研究課題名(和文) 光ヘテロダイン検出方式ドップラー風ライダーの信号処理技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on signal processing for Heterodyne Doppler Wind Lidar

研究代表者

石井 昌憲 (Ishii, Shoken)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・主任研究員

研究者番号：70359107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光ヘテロダイン検波方式による衛星搭載ドップラー風ライダーによる風観測の最適化を目的として、気象データを基に作られた空間的非一様性を含む大気モデルとエアロゾルモデルを衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーターに導入し、風データを抽出するためのアルゴリズムを高度化した。同アルゴリズムを用いて風速測定誤差について調べ、信号対雑音比との関係性を明らかにした。また、シミュレーション結果、期待できる風速測定誤差について明らかにした。衛星光学センサーシステムとして要求される姿勢制御精度について疑似地表面観測結果を用いて検討した。

研究成果の概要(英文)：In order to optimize measurement performance of a future space-based Doppler Wind Lidar with the heterodyne detection system, a pseudo-truth atmospheric field with inhomogeneous atmosphere and aerosol data set calculated using a global aerosol model were installed in a full-fledged space-based Doppler Wind Lidar simulator. Retrieval algorithms for assuming wind data were highly advanced using the pseudo-truth atmospheric field and the aerosol model. The measurement performances of the future space-based Doppler Wind Lidar with the full-fledged coherent Doppler Wind Lidar simulator have been studied on the relation between the signal to noise ratio and wind measurement error, and statistically-expected wind measurement errors. Feasibility study has been made on attitude control accuracy required for the satellite optical sensor system on the basis of zero-Doppler wind speed of the pseudo-ground surface simulated by the full-fledged coherent Doppler Wind Lidar simulator.

研究分野：光計測工学

キーワード：光計測 ライダー 風計測 ドップラー 光ヘテロダイン検波 信号処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の風観測

風観測は、アメダス、気球及び海上ブイ等によって行われているが、陸域は人口の多い地域に集中、海洋域は非常に大きな空白域、となっている。衛星から風観測は行えるが、ある特定層の観測であり、高度推定精度が悪く十分な観測精度(高度分解能 1km 以下: $<1\text{m/s}$ 、高度 1-12km : 1-4 m/s)とは言い難い

(2) 風高度分布の要請

気象予報や気候モデル精度の向上のために、地球規模で風の 3 次元情報が必要とされており、衛星搭載ドップラー風ライダーは全球で風の高度分布を観測できる非常に有望な手段でとされている。

(3) シミュレーターによる擬似衛星観測

衛星による観測性能を評価するために、シミュレーターが必要である。シミュレーターの多くは 100km メッシュ間隔の様な大気モデルを用いている。衛星搭載ドップラー風ライダーは複数のパルスレーザーを平均して風を観測する。しかし、実際の大気は様ではなく変化する。衛星搭載ドップラー風ライダーの風観測性能を正確に評価するためには、大気の空間的非一様性を考慮してシミュレーションする必要があった。また、空間的非一様な大気を用いてシミュレーション実験を行い、高精度で風データを抽出する手法の確立と観測性能の最適化が必要であった。

2. 研究の目的

光ヘテロダイン検波方式による衛星搭載ドップラー風ライダーによる風観測の最適化を目的として、空間的な非一様性を含む大気場と同大気場と整合するエアロゾル場をシミュレーターに導入し、風データ抽出アルゴリズムの高度化とその測定精度を明らかにするとともに、衛星光学センサーシステムとして要求される精度を明らかにする。

3. 研究の方法

情報通信研究機構で開発された衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーター(以下、風ライダーシミュレーター)内に空間的な非一様性を含む大気場を導入し、空間的非一様性の効果とランダム雑音信号を付加した疑似受光信号を発生させ、信号解析と統計的処理を行った。

風ライダーシミュレーターでは、搭載衛星として高度 220km を飛行する超低高度衛星を選択し、風ライダーとして平均出力 3.75W (パルスエネルギー 125mJ、繰返し周波数 30Hz) で動作する波長 2 μm のパルスレーザー、口径 40cm 受光望遠鏡 (2 台)、システム効率 0.07 を仮定、また、空間分解能は水平分解能は 100 km、高度分解能は高度 3 km まで 0.5 km、高度 3-8 km は 1 km、高度 8-20 km は 2 km とした (表 1)。

表 1 風ライダーシミュレーターに用いたパラメータ

Wavelength (μm)	2.05
Pulse energy (J)	0.125
Pulse duration (ns _{FWHM})	200
PRF (Hz)	30
Telescope diameter (m)	0.4
Number of laser directions	2
Detector quantum efficiency	0.8
Heterodyne efficiency	0.4
Optical efficiency	0.44
Unknown system efficiency	0.5
Sampling frequency (MHz)	400
Sampling points	256
Azimuth angle of observation direction ($^{\circ}$)	45, 135
Nadir angle of observation direction ($^{\circ}$)	35
Target horizontal resolution (km)	<100
	Altitude 0-3 km: <0.5
Target vertical resolution (km)	Altitude 3-8 km: <1
	Altitude 8-20 km: <2

4. 研究成果

(1) 衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーターの構築と高度化

風ライダーシミュレーターによる擬似衛星観測を行うために、大気の空間的非一様性も考慮した風ライダーシミュレーターを構築した。風ライダーシミュレーターの高度化では、(ア) 風速推定の精度を向上するために、最尤法による風データ抽出アルゴリズムの開発を行った、(イ) 実大気に近い大気モデルを実現するために、解析値を用いた大気モデル、大気モデルと整合のとれたエアロゾルモデル(気象研究所、Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere (MASINGAR) により生成)を導入した、地表面計測からゼロドップラー速度を抽出するためのアルゴリズム開発を行った。

風ライダーシミュレーターを様々な気象場に適用し、研究分担者・気象研究所研究官とともに、風ライダーシミュレーター、大気モデル、エアロゾルモデルの妥当性と問題点を幅広く議論した。

(2) 風ライダーシミュレーターを用いた風速測定誤差

風速測定誤差を検証するために、対象期間として 2010 年 1 月と 8 月の大気モデルとエアロゾルモデルを用いて各 1 か月分の全球疑似衛星風観測シミュレーション実験を行った。

シミュレーション実験では、ミー散乱理論に基づいて波長 2 μm に対する後方散乱係数の計算を行った。また、統計的にエアロゾル、水雲、氷雲の分布を調べ、エアロゾルは南緯 60 $^{\circ}$ から北緯 50 $^{\circ}$ の高度 4km ぐらいまで分布し(図 1)、一方、雲は、高度約 2km までは水雲、高度 5-18km は氷雲が多いことが解った(図 2)。

風速測定誤差は、信号対雑音比(以下、SN 比)に依存しており、SN 比 0.01-0.001 の範囲に存在していることが解った。クラメル・ラオの不等式による風速測定誤差下限と信号対雑音比の定式化した。(図 3)

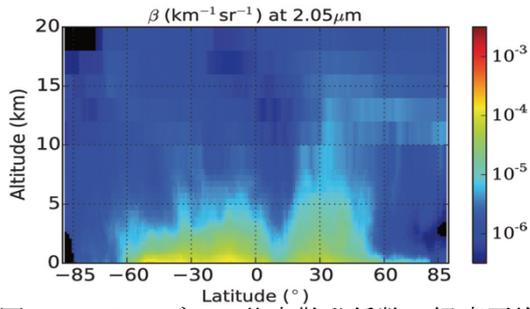


図1 エアロゾルの後方散乱係数の経度平均値

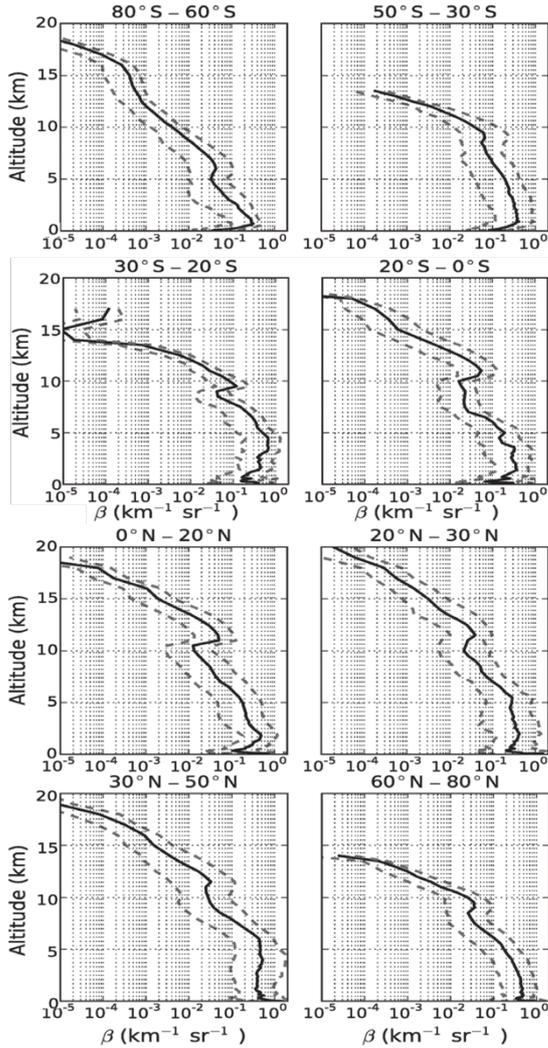


図2 各緯度帯に対する雲の後方散乱係数の経度平均値

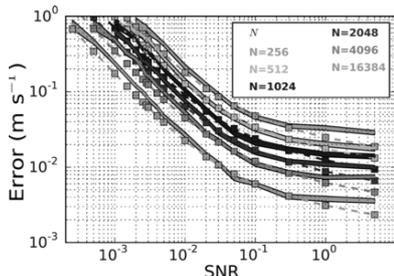


図3 SN比と風速誤差の関係

緯度方向における風速測定誤差は高度 8km 以下では0.5m/s、高度8-20kmにおいては1m/s

の風速誤差で測定できる可能性があることが明らかになった(図4)。

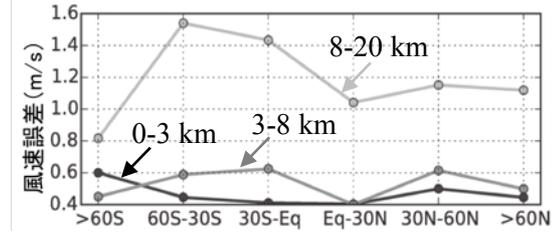


図4 各緯度帯に対する風速誤差の経度平均値：(黒色) 高度0-3 km、(濃い灰色) 高度3-8 km、(薄い灰色) 高度8-20 km

(3) 衛星光学センサーシステムとして要求される姿勢制御精度実験

衛星光学センサーシステムとして要求される姿勢制御精度を調べるために、地表面と衛星間の距離変化にともなう地表面検出方法化、衛星の速度ベクトルと地球の自転ベクトルの関係等の見直しを行い、地表面計測からゼロドップラー周波数を抽出アルゴリズムの開発を行った。サハラ砂漠とオーストラリア砂漠に対する地表面擬似衛星ゼロドップラー観測を行い、衛星の姿勢変化による風速測定精度について統計的に評価した。

実験結果(図5)から、ゼロドップラー速度の測定誤差はピッチ角とヨー角による寄与が大きく、ロール角の寄与が小さい事が解った。測定誤差は誤差角に対して線形に大きくなる事が解った。また、ピッチ角、ロール角、ヨー角に対し角度誤差0.001°(約4秒)を与え、地表面散乱によるゼロドップラー速度の誤差は0.2m/s未満であった。得られた結果から、衛星姿勢角度の変化による誤差を0.1m/s未満に抑えるためには、角度誤差を0.0075°(約3秒)程度に抑える必要があることが明らかになった。

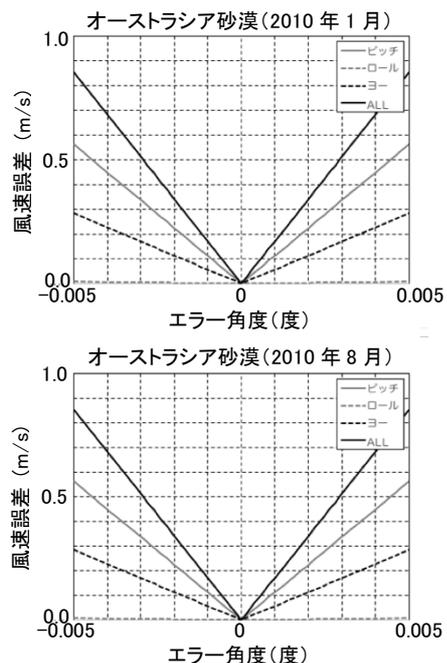


図5 姿勢要素に対する誤差の総和

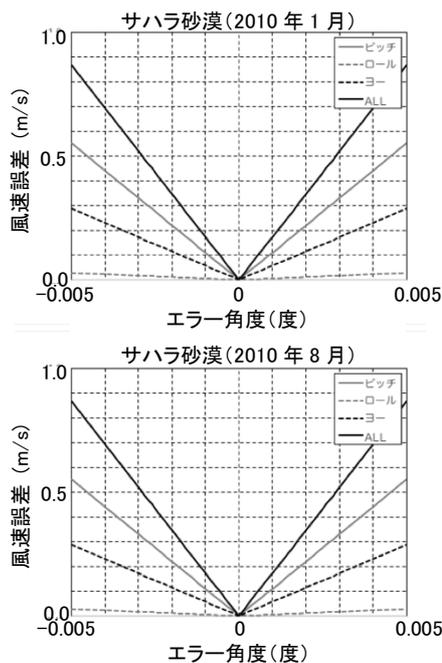


図5 (続き) 姿勢要素に対する誤差の総和

○位置づけとインパクト

衛星搭載ライダーのシミュレーターは世界の研究機関で開発が進められているが、実際の気象データ、空間的非一様性、エアロゾルの分布を矛盾なく生成させること、また、観測で得られる信号を如何に発生させるかが課題である。本研究で高度化された衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーターは世界のライダーシミュレーター構築技術向上に寄与し、大気モデルとエアロゾルモデルの空間分布から空間的非一様性で重要である。また、将来の衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーターをより詳細に検討する上で重要な役割を担う。

○今後の展望

本研究では将来の衛星搭載ドップラー風ライダーによる全球風観測を念頭に、大気の空間非一様性について着目し、全球モデルによる数値天気予報を想定した風速推定アルゴリズム開発の高度化を実施した。今後は、局所的な気象現象も想定し、解像度の高い大気モデルも対応出来るように気象場とエアロゾル場を拡張する必要がある。また、解像度に応じた風データ抽出法の開発がさらに必要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. 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. Meteorol. Soc. Jpn., 査読有、96、2018、179-199

2. K. T. Murata, K. Yamamoto, P. Pavarangkoon, K. Suzuki, T. Asai, T. Kan, K. Muranaga, T. Mizuhara, Y. Kagebayashi, Y. Kakizawa, M. Yahata, “A Network Quality Check Tool via HpFP Protocol on WINDS Satellite Link”, J. Nat. Inst. Inf. Commun. Technol., 査読無、64、2018、167-176

3. 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. Meteorol. Soc. Jpn., 査読有、95、2017、319-342

4. S. Ishii, P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y. Satoh, T. Kubota, Daisuke Sakaizawa, R. 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. Meteorol. Soc. Jpn., 査読有、95、2017、301-317.

5. K. T. Murata, P. Pavarangkoon, A. Higuchi, K. Toyoshima, K. Yamamoto, K. Muranaga, Y. Nagaya, Y. Izumikawa, E. Kimura, T. Mizuhara, “A web-based real-time and full-resolution data visualization for Himawari-8 satellite sensed images”, Earth Sci. Inform., 査読有、4、2017、<https://doi.org/10.1007/s12145-017-0316-4>

6. S. Ishii, 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, Measurement “Performance Assessment of Future Space-Borne Doppler Wind Lidar for Numerical Weather Prediction”, SOLA, 査読有、12、2016、55-59.

[学会発表] (計 22 件)

1. 石井昌憲, Baron Philippe, 村田健史, 岡本幸三, 蒲生京佳, 高橋千佳子, 石橋俊之, 田中泰宙, 関山剛, 眞木貴史, 地表面散乱を用いた衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーターによる校正検討, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017/11/1、北海道大学

2. P. Baron, S. Ishii, K. Okamoto Kozo, Observing System Simulation Experiment (OSSE) for a future Doppler Wind Lidar

satellite in Japan, EGU general assembly, 2017, 2017/4/25, Vienna, Austria

3. P. Baron, S. Ishii, K. Okamoto, T. Kubota, Y. Satoh, D. Sakaizawa, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, K. Yamashita, S. Ochiai, K. Gamo, M. Yasui, R. Oki, M. Satoh, T. Iwasaki, Measurement Performance Assessment of Future Space-Borne Doppler Wind Lidar for Numerical Weather Prediction, 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 2016/10/28, 名古屋大学

4. 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, 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, 2016/9/21, 北海道大学

5. 岡本幸三, 石井昌憲, Baron Philippe, 石橋俊之, 田中泰宙, 蒲生京佳, 久保田拓志, 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, 2016/9/9, 長野県下高井郡・野沢温泉スパアリーナコンベンションホール

6. 石井昌憲, Baron Philippe, 岡本幸三, 石橋俊之, 田中泰宙, 関山剛, 眞木貴史, 久保田拓志, 佐藤洋平, 境澤大亮, 落合啓, 安井元昭, 沖理子, 蒲生京佳, 高橋千佳子, 佐藤正樹, 岩崎俊樹, Measurement performance of future, space-based Doppler lidar, 10th SPIE Asia-Pacific Remote Sensing Symposium, 2016/4/5, New Delhi, India

7. 石井昌憲, 岡本幸三, 久保田拓志, 佐藤洋平, 境澤大亮, 石橋俊之, 田中泰宙, 関山剛, 眞木貴史, 山下浩史, 西澤智明, 佐藤篤, Baron Philippe, 水谷耕平, 落合啓, 安井元昭, 沖理子, 佐藤正樹, 岩崎俊樹, ドップラー風ライダーによる大気風観測, 超低高度衛星の利用に向けたワークショップ (第 3 回), 2016/2/29, 宇宙航空研究開発機構東京事務所

8. 石井昌憲, Baron Philippe, 岡本幸三, 村田健史, 蒲生京佳, 高橋千佳子, 田中泰宙, 関山剛, 眞木貴史, 衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレーターの開発, 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 2015/10/28, 京都テルサ

9. 石井昌憲, 岡本幸三, 落合啓, 水谷耕平, 境澤大亮, 久保田拓司, 沖理子, 佐藤篤, 石橋俊之, 田中泰宙, 関山剛, 眞木貴史, 山下浩史, 西澤智明, 佐藤正樹, 岩崎俊樹, 超低高度衛星搭載ドップラー風ライダーの実現性検討, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2015/10/9, かごしま県民交流センター

[その他]

1. 研究報告

村田健史, 山本和憲, Pavarangkoon Praphan, 鈴木健治, 浅井敏男, 菅智茂, 村永和哉, 水原隆道, 影林佑哉, 柿澤康範, 矢羽田将, HpFP プロトコルによる WINDS 衛星の回線品質検査, NICT 季報/研究報告, 63, 2018, 153-162

2. ホームページ:

<http://spacebornedopplerlidar.nict.go.jp>

3. 衛星搭載ドップラー風ライダー 有識者会議, 2018/1/29, 情報通信研究機構大手町会議室

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 昌憲 (Ishii Shoken)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・主任研究員

研究者番号: 70359107

(2) 研究分担者

バロン フィリップ (Baron Philippe)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・主任研究員

研究者番号: 00747561

村田 健史 (Murata Takeshi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・総合テストベッド研究開発推進センター・研究統括

研究者番号: 20274342