

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04849

研究課題名（和文）衛星搭載風ライダーによる風高度分布観測の空間分解能最適化に関する研究

研究課題名（英文）Feasibility study on spatial resolution optimization for global wind profiling with spaceborne Doppler Wind lidar

研究代表者

石井 昌憲 (Shoken, Ishii)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：70359107

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）： 研究期間全体を通じ、将来の風ライダー衛星の観測シナリオとして3シナリオを明らかにした。ライダー衛星による風観測の有用性を高めるために、最適な空間分解能の選択とデータ品質管理手法が重要であること、観測システムシミュレーションの実験結果から風ライダー衛星による風観測は、数値予報による環境場の予測精度を平均的に2-3%まで改善が見込めるだけでなく、狭域的な気象現象に対しても改善する可能性があることが分かった。大気乱流予測の観点から航空機運航業務に必要な空間分解能、シミュレータの高度割当課題を通じたシミュレータの高度化について、研究計画立案時に想定されていなかった成果も得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙産業市場が急速に拡大する中、宇宙システム開発に求められる時間は急速に短くなり、システム開発と試行を短期間に行うことが求められている。そのような社会背景において、シミュレータを用いる衛星システムの実現性検討、データ同化技術による科学的・定量的な調査は、風ライダー衛星が軌道上に投入された際の効果について、客観的に評価を行えることから極めて重要である。本研究の成果は、将来の風ライダー衛星が抱える問題を早期に予測し、改善・解決に繋がられ、その実現性・信頼性を高めることに寄与するだけでなく、数値予報や気候変動予測に貢献できるため、社会的意義は極めて高い。

研究成果の概要（英文）： In the study, wind data simulated by a space-based Doppler wind lidar that is technically feasible and has higher spatial resolution than the space-based Doppler wind lidar Aeolus. The purpose of this study is to clarify the optimal spatial resolution and observation scenarios for future space-based Doppler wind lidar and to evaluate their impact on numerical weather prediction.

Considering wind data errors in different spatial resolution scenarios, we found that there are three possible observation scenarios. In order to enhance the usefulness of space-based Doppler wind lidar for wind profiling, we found that the selection of optimal spatial resolution and data quality control procedures are important. The observation system simulation experiments showed that wind profiling observed by the space-based Doppler wind lidar improve the accuracy of the numerical weather prediction and prediction of environmental fields based on the numerical weather prediction.

研究分野：光計測工学

キーワード：ドップラー風ライダー 衛星観測 数値予報 データ同化技術 シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

地球観測では衛星観測が必須であり、近年、全球規模で気象データを取得できる衛星観測の重要性は、非常に増している。現在の衛星観測システムは、水蒸気や放射等に偏重している。全球の風観測データは数値予報において極めて重要にも関わらず、一部しか実現されていない。欧州宇宙機関 (ESA) は、風観測データを目的として衛星搭載ドップラー風ライダー (Doppler Wind Lidar、以下 DWL) Aeolus を打上げた。近年の局所気象災害増加に伴い、数値予報精度向上のために衛星観測もより高い空間分解能が求められている。本研究では、Aeolus より高い空間分解能をもち、かつ、技術的に開発可能な DWL による複数シナリオの風データを疑似的に作成 (シミュレート) し、データ同化実験を行うことによって数値予報へのインパクトについて調べ、数値予報に最適な衛星搭載 DWL の空間分解能について明らかにする。そのために、高い空間分解能を有する気象場 (疑似真値場やエアロゾル場の構築と DWL 衛星シミュレータとデータ同化システムの高度化を図る。今日の数値予報システムは、様々なデータが同化され、数値予報や防災情報の作成、気候解析、地球システム研究に用いられている。全球を対象とするデータ同化システムは、世界中から収集される観測データを用いる。気温・気圧・湿度・風は最も基本的かつ重要な気象要素として全球規模で観測されている。風観測は、気球観測、航空機、衛星搭載の可視・赤外センサーなどによって広く観測されているが、海上では広域・高頻度な鉛直分布情報を取得することは難しい。3次元の全球風観測データは数値予報データ同化にとって極めて重要なデータにも関わらず、今日の全球観測システムでは一部しか実現していない。世界気象機関 (WMO) は風の高度分布を全球観測出来るシステムの実現を要望している。衛星搭載 DWL は全球的な風の水平・鉛直 3次元観測を得るための有望な能動型遠隔計測手段の一つである。衛星搭載ドップラー風ライダーは、得られる 3次元の風速データから飛行機の最適な飛行経路・高度を算出し、燃費向上・燃料削減による温室効果ガス削減の観点から宇宙データ利用分野からも要望されている (ビジネスアイデアコンテスト S-Booster 2017)。ESA は、DWL 衛星 Aeolus を 2018 年 8 月に打ち上げた (ミッション期間は 3 年を想定)。また、日本や米国でも衛星搭載 DWL の実現性検討が行われている (Baker et al. 2014, Ishii et al. 2017; Baron et al. 2017, Okamoto et al., 2018)。その実現性検討では衛星搭載 DWL による全球疑似風観測データをもちいた観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment: 以下 OSSE) が行われている。OSSE を用いる利点は、観測センサー仕様や観測条件 (衛星軌道など) を変えることで、個々のデータや観測システムが数値予報精度向上に「どのくらい寄与・貢献 (インパクト) があるか?」を定量的・客観的に仮想空間場において評価出来ることである。提案者らは、DWL シミュレータによる衛星搭載 DWL 擬似風観測と OSSE を実行するシステムを構築し、DWL 衛星 1 機の OSSE を実施し、数値予報等へのインパクトが有る地域や予測時間帯を明らかにした。一方で、OSSE で予測された結果は疑似真値場と比較されるが、実際に測定された気象データと比較検証は行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、DWL 衛星 Aeolus より高い空間分解能をもち、かつ、技術的に開発可能な DWL を設定し、潜在的にどこまでの風観測性能を有するかを評価すること、また、この DWL に対して空間分解能が異なるシナリオの風データを疑似的に作成し、OSSE による数値予報へのインパクト評価から数値予報に最適な衛星搭載 DWL の空間分解能と観測シナリオについて明らかにすることを目的とする。これを実現するため、具体的に以下の 2 つの研究を行う。

3. 研究の方法

数値予報に最適な衛星搭載 DWL の空間分解能について明らかにするために、情報通信研究機構で開発された衛星搭載 DWL シミュレーターを用いて、研究 (1) と (2) を実施した。

研究 (1)

空間分解能を 120km に設定し、2018 年 8 月の気象場・エアロゾル場を構築し、2018 年 8 月の 1 ヶ月間の衛星搭載 DWL 擬似風観測シミュレーションと OSSE を実行し、その結果と航空機による実測データが存在する、北米・欧州・東南アジアの三つの航路に分けて比較を行った。シミュレーション条件として、衛星軌道は極軌道、軌道高度は 300 km とし、衛星搭載 DWL は波長 2- μm のシステムを設定した。衛星搭載 DWL シミュレーターによる擬似風観測の概要と 2 つシステムの設定仕様パラメータを図 1 と表 1 に示す。

研究 (2)

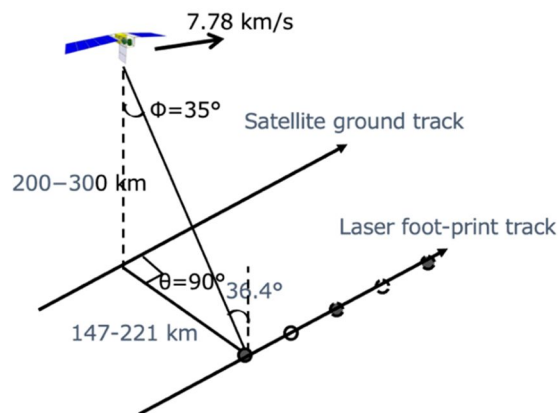


図1 衛星搭載 DWL シミュレーターによる擬似風観測

表1 衛星搭載 DWL システムの設定仕様

| 設定パラメータ | 案1 | 案2 |
|------------------------|-------|-------|
| 波長[μm] | 2.00 | 1.55 |
| 送信電力値[J] | 0.09 | 0.05 |
| レーザーパルス送信間隔[Hz] | 60 | 150 |
| パルス幅 [ns] | 200 | 2,000 |
| 視線方向風速の天底からの角度(仰角) [°] | -35.0 | -35.0 |
| 衛星進行方向に対する方位角[°] | 90 | 90 |
| 平均時間[s] (水平方向のグリッド間隔) | 6.4 | 6.4 |
| 主ヘテロダイン効率 | 0.4 | 1 |

空間分解能の違いによる観測性能の比較検討を行うために、空間分解能を 50km に設定し、その他のシミュレーション条件は研究(1)と同じ条件で衛星搭載 DWL 擬似風観測シミュレーション実験を行った。

次に、冬季の気象場・エアロゾル場として 2018 年 1 月を構築し、2018 年 1 月と 8 月の衛星搭載 DWL 擬似風観測シミュレーション実験と OSSE の実行を行い、数値予報へのインパクト、数値予報に最適な衛星搭載 DWL の空間分解能について検討を行った。シミュレーション条件は、前述の設定と同じとし、衛星搭載 DWL システムは波長 1.5- μm と 2- μm の 2 つのシステムを設定した。

4. 研究成果

研究(1)

航空機の実測データは、北半球が夏季の 8 月の 5 日おきとし、便ごとに航路は異なる。北米・欧州便は北半球の中緯度を長距離飛行する。欧州便は、比較的似た気象条件であるが、北米便よりも極側を通る。一方で東南アジア便は、便ごとの航路のばらつきは少なく、特に低緯度帯では熱帯性の気候になるため、風が駆動されるメカニズムも他の 2 路線と大きく異なる。OSSE の結果と航空機の実測データの比較は、測定された風向・風速値から東西・南北成分を計算し、次に、格子点ごとに出力された計算結果の東西・南北風速を、航路上の風が測定された地点に線形内挿することで実施した。図 2 に 2018 年 8 月の OSSE の値と実測値の差を示す。どの領域においてもドップラー風ライダーによる観測値のデータ同化の有無に関わらず、実測値の風速は、予測値より平均的に速いことが示唆された。北米・欧州路線では、風速平均値で 1 から 2 m/s 程度、また、東南アジア便では 3 から 4 m/s の風速差となった。今回の解析では風速の変動幅が大きく、両者の差に統計的に優位な差は見られなかった。また、航空機による実測データの数が限られているため、より厳密な議論を行うためには、さらなる多くのデータを用いて比較を行う必要がある。

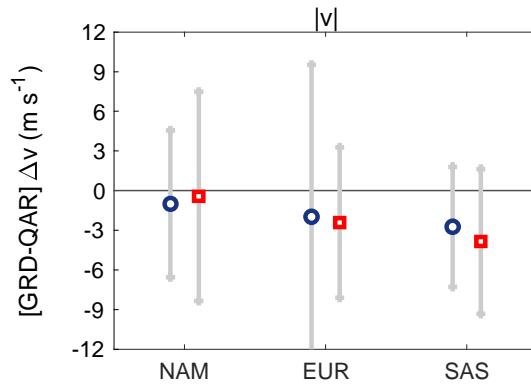


図 2 3 航路における OSSE の格子点値 (GRD) と航空機による実測値 (QAR) の風速絶対値の差: NAM、EUR、SAS は、それぞれ北米航路・欧州航路・東南アジア航路を表す。○と □ は、平均値を、バーは平均値を基準にした標準偏差を示す。青色と赤色は、それぞれライダーデータを同化しない実験・同化した実験の結果をそれぞれ示す。

研究 (2)

高度分解能の異なる衛星搭載 DWL シミュレーションの実験では、高度分解能を高度 0 - 3 km 対し 0.5 km, 高度 3 - 8 km に対し 1.0 km, 高度 8 - 20 km に対し 2 km する 19 階層の Case1、高度 0 - 12 km に対し 0.5 km, 高度 12 - 20 km に対し 1 km とする 34 階層の Case2、の 2 つのケースに対してランダム誤差の観点から潜在的な風観測性能の評価を行った。ランダム誤差は、Case1、2 とともに、対流圏下層から上層 12 km へと高度が高くなるにつれて 2 m/s から 7 m/s へと劣化するが、Case 1、2 とともに、対流圏中層域 (高度 7 km) まで WMO のユーザ要求精度の要求範囲内 (2 - 5 m/s) となることが分かった。

本研究で設定した水平分解能 50 km は、DWL 衛星 Aeolus の水平分解能よりも高い分解能でシミュレーション実験が行われた。Aeolus のランダム誤差は、観測条件にもよるが、水平分解能 100 km で Rayleigh チャンネルのランダム誤差は 6 - 8 m/s、Mie チャンネルのランダム誤差は 3 m/s 程度と報告されている。本研究で検討した衛星搭載 DWL の観測性能は、対流圏下層域では Aeolus よりも高く、対流圏上層域でも同等、もしくは、潜在的により高い観測性能を有することが示唆される。

以上のランダム誤差の比較評価の考察から、水平分解能 50 km の場合、1) 対流圏下層から上層域を観測対象として、対流圏下層域では高度分解能 0.5 km、対流圏上層域では高度分解能 1 km とする観測シナリオ 1 (Aeolus と同様のシナリオ) 2) 対流圏下層域では高度分解能 0.5 km、対流圏下層から中層域までを高度分解能 1 km、対流圏中層から上層域を高度分解能 2 km とする観測シナリオ 2 (Case 1 と同様のシナリオ) 3) 対流圏下層から中層域までを観測対象として、高度分解能 0.5 km とする観測シナリオ 3 (最も高度分解能が高いシナリオ) の 3 つのシナリオが考えられることが明らかになった。シナリオ 3) は、水平分解能 50 km から 100 km へと変更、あるいは、大気追跡風との同期観測を実現することで、より高い高度の風の高度分布を得られることが期待できることから、今後取り組むべき研究課題である。

次に、OSSE の実行による、数値予報に最適な衛星搭載 DWL の空間分解能、数値予報へのインパクトについて述べる。

本研究で行われた OSSE の結果は、実験でも、対流圏下層から上層まで、各緯度帯とも全球的に DWL データが利用されることを示した。図 3 に 2018 年 8 月を実験対象として、OSSE で利用された DWL 疑似データの高度・緯度別利用数分布図例を示す (左図は 2- μ m DWL 衛星、右図は 1.5- μ m DWL 衛星)。熱帯付近に利用データ数のピークが見られるが、そのピークはやや北半球寄りになっていることがわかる。一方、2018 年 1 月は、8 月の結果とは逆に、そのピークが南半球となっていた (図略)。いずれの月も夏半球側に、利用データ数は夏半球側にシフトすることが分かった。

鉛直層数 19 と 34 の違いから、鉛直層数を増強した対流圏中上層でより高鉛直分解能に利用できるデータ数が増加する事が明らかになった。また、観測波長による違いは、大きな差は明らかではなかったものの、若干、対流圏下層で 1.5- μ m DWL 衛星のデータ利用数が多いことが明らかになった。予測精度の改善幅を確認するため、疑似真値場を参照値として、二乗平均平方根誤差 (Root mean Squared Error; RMSE) の全球平均値の減少率を調べた。要素は全て東西風速、検証期間は 2018 年 8 月である。1.5- μ m と 2- μ m の両 DWL 衛星ともに、対流圏中下層の予報初期を中心に最大 1 - 2 % の東西風の予測精度が向上することが分かった。旧データ品質管理手法に対して、新しい手法を適用する事で、予報初期に見られた対流圏上層の気象要素の予報悪化は、両月ともに軽減または改善することが出来た、特に予報初期の改善率が高かった (図略) 対流圏中下層での改善幅拡大は、グロスエラーチェック閾値緩和、観測誤差拡大の効果と考えられる。

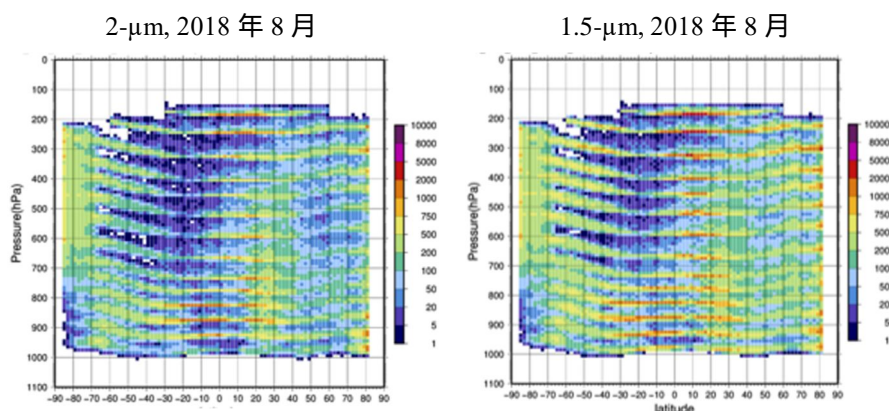


図3 2018年8月を実験対象として、OSSEで利用されたDWL疑似データの高度・緯度別利用数分布図例：(左図)2- μm DWL衛星、(右図)1.5- μm DWL衛星。

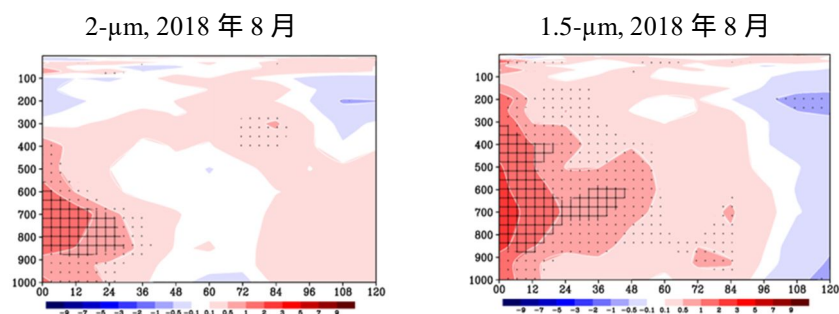


図3 2018年8月を実験対象として、東西風速の高度・予測時間別二乗平均平方根誤差(RMSE)の全球平均値の減少率(%)。横軸は予測時間(120時間まで、単位は時間)縦軸は気圧(単位はhPa)。参照値は疑似真値場。(左図)2- μm DWL衛星、(右図)1.5- μm DWL衛星。

鉛直層数19と34の違いによる東西風の予報精度を調査したところ、熱帯の中上層部の予測精度改善率が高く、この領域では、鉛直層増加による予測精度向上の効果が期待できることが明らかになった。2- μm DWL衛星の鉛直層数34の結果は、鉛直層数19の結果と比較して、冬半球極域での品質の悪いデータがより対流圏上層での精度がより悪化した。1.5- μm DWL衛星では、東西風の予測精度に大きな差はないものの、南半球での対流圏上層の予測精度が悪化することが明らかになった。

最後に、検証期間を2018年8月として、衛星搭載DWLの疑似風データをデータ同化し、予測時間別の台風進路予測誤差の調査結果について述べる。調査の結果、1.5- μm と2- μm の両DWL衛星ともに、気象庁ベストトラックを参照値に対する台風進路予測誤差は小さくなり、予測時間2-3日以降で有意な改善となることが分かり、DWLデータの同化により台風進路予測への精度改善効果が示された。

○今後の展望

以上の結果は、将来のDWL衛星の潜在的な全球風性能を高めるためには、最適な空間分解能の選択とデータ品質管理手法の重要性を意味する。このことは、実現可能なDWLシステムと空間分解能の最適化の組合せにより、DWL衛星の潜在的風観測能をさらに高められることを示唆する。DWL衛星の風データが、環境場の予測精度が平均的に改善するだけでなく、台風近傍等のように、狭域的な現象に対しても改善の効果がある可能性がある。DWL衛星以外の風観測衛星と組合せることで、全球の4次元風診断システムを構築や数値予報や気候変動予測に貢献度の高い、新しい研究の展望が拓かれる、と期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Iwai Hironori, Aoki Makoto, Oshiro Mitsuru, Ishii Shoken | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Validation of Aeolus Level 2B wind products using wind profilers, ground-based Doppler wind lidars, and radiosondes in Japan | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Atmospheric Measurement Techniques | 6. 最初と最後の頁 7255 ~ 7275 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/amt-14-7255-2021 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計43件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件）

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 岡本 幸三 (Okamoto Kozo) (40584660) | 気象庁気象研究所・気象観測研究部・室長 (82109) | |
| 研究分担者 | 久保田 拓志 (Kubota Takuji) (90378927) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・第一宇宙技術部門・研究領域主幹 (82645) | |
| 研究分担者 | 宮本 佳明 (Miyamoto Yoshiaki) (90612185) | 慶應義塾大学・環境情報学部（藤沢）・准教授 (32612) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|