

超低高度衛星を用いた風向風速観測の実現性検討

Feasibility study for vertical profile of wind vector measurements using super low altitude satellite

佐藤 洋平¹⁾、○境澤 大亮¹⁾、平形 麻紀¹⁾、久保田 拓志¹⁾、沖 理子¹⁾、石井 昌憲²⁾、フィリップ・バロン²⁾、水谷 耕平²⁾、安井 元昭²⁾、落合 啓²⁾、石橋 俊之³⁾、岡本 幸三³⁾、佐藤 正樹⁴⁾、岩崎 俊樹⁵⁾、Y.Satoh¹⁾、D. Sakaizawa¹⁾、M.Hirakata¹⁾、T.Kubota¹⁾、R.Oki¹⁾、S.Ishii²⁾、P.Baron²⁾、K. Mizutani²⁾、M.Yasui²⁾、T.Ochiai²⁾、T.Ishibashi³⁾、K.Okamoto³⁾、M.Satoh⁴⁾、and T. Iwasakai⁵⁾

¹⁾ 宇宙航空研究開発機構、²⁾情報通信研究機構、³⁾ 気象研究所
東京大学大気海洋研究所、東北大学

¹⁾ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA),

²⁾ National Institute of Information and Communications Technology (NICT),

³⁾ Meteorological Research Institute (MRI),

⁴⁾ Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), the University of Tokyo,

⁵⁾ Tohoku University

Abstract

A significant factor of forecast error of numerical weather prediction (NWP) models arises from uncertainty in the initial conditions assimilated from many observation data sets. Atmospheric wind is one of the fundamental factors, and its profile over oceans is still poorly observed, although surface wind measurements are supported by in situ measurements or satellite borne sensors. MRI, NICT and JAXA started joint research study to evaluate impacts of Doppler lidar measurement from space on the forecast error of the NWP. This paper introduce a brief introduction of the joint research study.

1. はじめに

気象観測は人工衛星による観測網の発達により、気温、湿度、降水について多くの情報が得られるようになってきている。特にハイパースペクトル赤外サウンダーでは多チャンネルの情報から気温・水蒸気の鉛直分布推定値がほぼ地球全体で得られるようになってきた。一方で風情報は数値気象予報で使用される基本的な気象要素にもかかわらず測定値の情報取得が限られている。現地観測としての風データは測候所、ラジオゾンデによる高層観測、航空機、海洋上のブイのみであり、マイクロ波散乱計からの推定値として海上風、静止気象衛星からは雲の追尾による大気追跡風 (AMV) が利用される。次世代の気象観測衛星では AMV の改善により、水蒸気分布を推定し、その追跡による高頻度高分解能推定が計画されている¹⁾。3次元の風データの計測は得られておらず、一般的に利用される高度毎の風データは客観解析値のみとなる。客観解析値も直接的な風の観測値が利用できないため、精度検証も難しい。

これに対して大気分子や大気を浮遊するエアロゾルのドップラーシフトから風プロファイルを測定できるドップラーライダーは直接風データを取得できる観測器であり、高さ方向の分解能も現在の AMV (~6 km) と比較して 1-3 km と高い。数値気象

予報については単独での利用に加え、複合的に利用することで数値予報精度の向上が期待できる。またライダーによる観測値をもとにして、数値予報結果の検証ツールとしても重要な要素と考えられる。

現在打ち上げに向けて開発が行われている海外のドップラーライダー計画は 2014 年の打ち上げに向けて視線方向成分風速のみ測定可能な ADM-Aeolus (ESA) が進められている²⁾。ADM は軌道高度 400km において Nd:YAG レーザーの第三高調波と Fabry Perot 分光フィルターとマッハツェンダー干渉計を駆使して地表から成層圏下部までの観測が予定されている。使用されるレーザーは 100mJ/50Hz@355nm とこれまで軌道上で運用された GLAS, CALIOP をしのぐ大出力である。

一方 JAXA ではより低軌道での衛星運用に着目し、超低高度衛星の研究を行っている。低い軌道高度の特性を生かす有望な観測センサとして宇宙用ライダー、特にドップラーライダーに着目している。特に日本では民間航空機の安全運航に必要な乱流検知、航空気象の乱気流観測、都市キャノピー内の気象観測用に商用のドップラーライダーが開発され、システムとして運用される技術レベルにある³⁻⁵⁾。

日本においては ISS 搭載ドップラーライダーについて⁶⁾、PostGPM/DPR 検討会報告書⁷⁾による実現

性検討提案され、2013 年はじめに衛星搭載ドップラーライダーによる風観測実施計画書も発行された⁸⁾。気象研究所、NICT、JAXA は一般への寄与度が大きいと考えられる数値気象予報に対する超低高度衛星搭載ドップラーライダーシステムの影響を定量評価し、利用の点から実現性を内外に示すための共同研究を開始した。本シンポジウムでは研究の概要と今後の計画について述べる。

2. 数値気象予報に対する影響評価

数値気象予報に対して AMV やマイクロ波散乱計など現実に存在する観測データの影響は観測シミュレーション実験 (Observing System Experiment: OSE) と呼ばれる手法で評価することができる。OSE は対象とする観測データに対してデータ同化を行い、観測データのあるなしで比較し評価される。しかし、ドップラーライダーのように実際には観測データが存在しない場合、何らかの方法で疑似的に観測データをシミュレートし、影響を評価する必要がある。この手法は観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment: OSSE⁹⁾) と呼ばれ、地球観測衛星のように開発期間やコストが必要となる観測手段に対して、実際にデータを利用する側の観点からコスト・ベネフィットを評価する手法として利用できる。OSE を実施できない衛星搭載ドップラーライダーに対して航空機搭載のライダーを用いた OSE が DLR により実施され、日本周辺域で実施された世界気象機関 (WMO) に準拠した観測プロジェクトにおいて、ECMWF の数値予報システムと台風進路予想においていずれも予報誤差の減少が報告されている^{10,11)}。

OSSE の利点として、利用者は新規データの評価やアルゴリズムの構築を事前に実施でき観測データ取得から利用までの期間短縮ができること。センサ・衛星の開発側として事前にシステムに必要な性能を利用ユーザの客観視点から得られること。科学的に意義ある成果が期待できる境界の精度 (Threshold)、理想的な観測目標精度 (Goal)、その中間の精度 (Breakthrough) に対して Fig.1 のようにコストや目的に応じて対応することが可能となる。また専門外

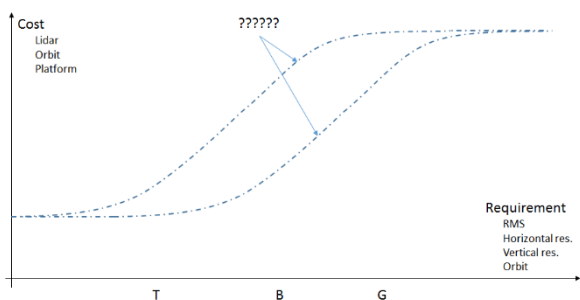


Fig. 1. Relationships among threshold, breakthrough, goal, and cost for space borne sensors (positions of T, B, G are arbitrary as an example).

の一般に対する説明やアウトリーチに生かすことができる点にある。ただし、OSSE の実施はある前提条件の下で観測システムの一面を取り出すため、得られた結果と前提条件を組合せた判断が重要視される。

我々は OSSE による影響評価のため、シミュレーションするデータが新規のドップラーライダーだけに限定される SOSE (Sensitivity Observing System Experiment) を用いて評価する。この中で SOSE による影響評価は気象研究所が担当し、SOSE に提供するドップラーライダーの疑似データ作成は NICT が行う。ドップラーライダーのパラメータ設定や衛星の軌道情報設定は JAXA/NICT において実施した。影響評価の結果については石井氏らによる発表を参照されたい¹⁰⁾。

3. 風観測に対する期待と要求される風速測定精度

風計測データの利用から客観解析値の検証、台風の予想進路を含む災害に関係する気象イベントの予想、メソ気象の予報精度、熱帯気象における雲対流と大規模大気力学の相互作用を通じた ENSO の予測精度、下部対流圏における微量気体の輸送過程、エアロゾル輸送モデルへの寄与が期待される⁸⁾。

数値気象予報に対する風の重要性は上記で記載した通り、解析・予報精度向上には高頻度、広範囲、高分解能、高精度と高い品質のデータが求められ、世界気象機関 (WMO) が取りまとめた数値予報からの要求は Table 1 のようにまとめられている¹¹⁾。表中の Global は全球が対象、High resolution は中規模気象現象となるメソ気象が対象であることを意味し、LT は下部対流圏 (Lower troposphere)、HT は上部対流圏 (Higher troposphere)、LS は下部成層圏 (Lower Stratosphere) を表している。

NWP への寄与度はライダーの性能、投入軌道高度、軌道傾斜角度、消費電力等についていくつかのシナリオを持って評価する予定である。

まずは衛星からの風分布計測による SOSE は初めての試みのため、ADM-Aeolus の Dawn-Dust 軌

Table 1. Requirement of space borne horizontal wind measurement from NWP users.

		Global			High resolution		
		LT	HT	LS	LT	HT	LS
RMS [m/s]	G	1	1	1	1	1	1
	B	3	3	3	1.7	2	1.7
	T	5	8	5	5	8	5
Horizontal [km]	G	15	15	15	10	2	0.5
	B	100	100	100	25	10	2
	T	500	500	500	100	20	10
Vertical [km]	G	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.2
	B	1	1	1	1.71	0.63	0.27
	T	3	3	3	5	1	0.5
Frequency [hour]	G	1	1	1	0.5	0.25	0.25
	B	6	6	6	1	1	1
	T	12	12	12	12	12	12

道を参考にしている。ADM-Aeolus によるインパクト評価では北半球のみならず、南半球や熱帯域でも顕著な誤差の改善が示されたが、赤外サウンダーの影響が除外されてしまっており、南半球や熱帯域では過大評価となっていると指摘している。

ドップラーライダーによるインパクト評価で検討を予定している項目は、可能な限り上記のように実際の同化システムで用いられているデータが OSSE で考慮されず過大評価になることや、対象とする風のデータを有効に使用する同化システムを用いて影響を過小評価しないように注意を払い、

- 現業で利用されているデータセットを用いた背景場を比較対象とし、ドップラーライダーを考慮した場合の結果から予報誤差の評価を行う。
- 少なくとも 2 方向のレーザー照射による観測で風の水平成分を用いたデータに対して評価を行う。
- 対流圏のみの計測データによる影響評価についての評価を行う予定である。

4. バス・ミッション部

4.1 搭載衛星

近年の低コスト化の要求にこたえる形で、打ち上げ費用やバスの共通化を行い、かつ高度 250km 以下の超低高度での衛星運用に着目し、JAXA では超低高度衛星技術試験機(SLATS)の開発を進めている。この高度では空気抵抗による宇宙機への影響が起きるがイオンエンジンによる空気抵抗の補償により 250km 以下の軌道高度で継続的な運用を可能にする小型の人工衛星である。現在は イプシロンロケ

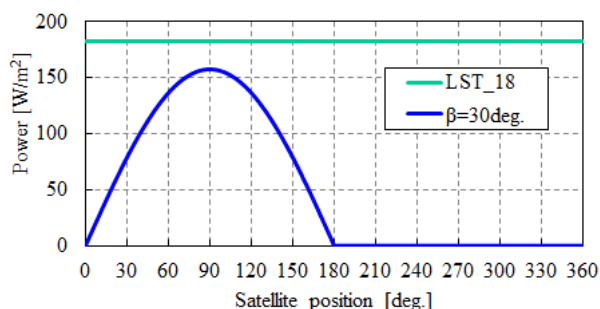


Fig. 2. Power generation per unit solar panel for LST 18 and orbit inclination of 30 deg (Top), required solar panel depend on the orbit, (bottom, left=LST18, right=30deg).

ットなど中型以下のロケットによる打ち上げを想定しており、ミッション部に割り当てできるサイズ、重量は 950mm x 950mm x 1500 mm、ミッション重量 100kg と想定している。

ADM-Aeolus のように LST-18(地方標準時 18時)の軌道に投入する場合、Fig.2 に示すように太陽電池からの供給電力が安定して得られ、かつ必要な太陽電池パドルを最小にできる。軌道傾斜角 30 度の軌道投入になる場合、発生電力の変動が起きる。必要なパドルの増加などによって実現性はある程度担保できるものの、大型化するためイプシロンロケットの利用が困難となる。投入軌道に関する情報も OSSE やライダー部のパラメータとともに観測計画へ向けたパラメータとして用いる。

4.2 ライダー部

低軌道による利点としては、ライダーの送信レーザー出力、受信望遠鏡開口径への要求が緩和される効果大きい。ドップラーライダーのシステムとして想定される候補は ADM と同系統の 355nm (もしくは 532nm)を用いたインコヒーレント方式、NICT や JAXA 航空本部が開発されているコヒーレント方式の 2 種類である。ADM 搭載システムを念頭にする場合、250km 程度の超低軌道を利用する場合でも 1m 程度の口径に ADM とほぼ同程度のレーザーが必要となる。このサイズでは現状想定している 2 方向観測の実現は難しく、現時点では観測システムとしてコヒーレントドップラーライダー(CDL)システムを念頭に置く。CDL ではヘテロダイン検波により受信信号の帯域を狭帯域化して S/N の向上が行われ、ADM ほど大きな開口が必要ない。

2 方向観測による風ベクトル検出のため、レーザーの照射角度は直下視から傾ける必要がある。直下に近い場合は風速の視線方向成分が小さくなり観測誤差は上昇し、水平方向に傾けすぎると伝播距離が

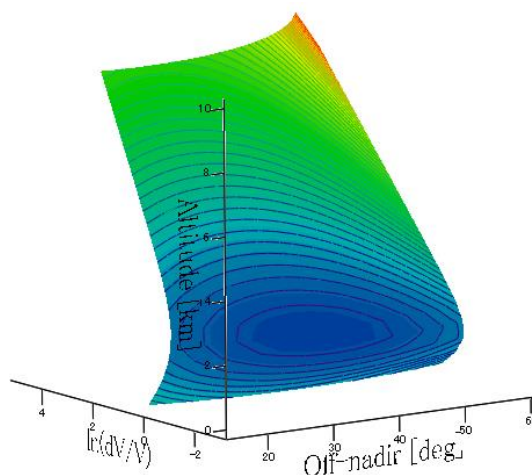


Fig. 3 Error of wind measurement depend on off-nadir angle

長くなり S/N の減少により誤差が悪化する。Fig.3 に示すようにオフナディア角を変えて観測誤差の影響を評価したところおおよそ 35 度あたりが観測に適しているとの解を得た。

CDL で利用するシステムとして、全固体レーザーに Qsw 出力が得られる 2 μ m 帯のシステムと光通信波長帯の半導体レーザーや光ファイバー、固体増幅器が利用可能な 1.5 μ m 帯のシステム双方について検討を行う。双方の波長ともに衛星軌道上から地上へ向けて照射する場合に考慮する人の網膜に対する安全性が極めて高いレーザーであり、これまでに多くの研究実績が得られている。

2 μ m 帯のシステムでは結晶温度をマイナス 80 度まで冷却する必要があるものの 20Hz の繰返しで 100mJ を超える Qsw 出力が得られる。1.5 μ m 帯ではファイバーレーザーとしては比較的低い繰返しレート (0.6–1 kHz) での運用で mJ クラスの出力が必要となるが、ファイバー増幅器等による高い変換効率や豊富な光通信分野のデバイスが利用できる。2 μ m 帯で Table 1. Global LT/Breakthrough に対する回線計算を実施したところ 125mJ/20Hz、望遠鏡開口径 40cm、オフナディア角度 35 度大気透過率 0.86、ヘテロダイン効率 4.5%@地表、18%@5km、エアロゾル後方散乱係数 1.8×10^{-8} /m/sr @ 地表の条件で回線が成立することを確認している。各条件に応じた回線設計の成立条件を調査する。

5. まとめ

3 次元の風計測 (水平風の鉛直プロファイル) 用ドップラーライダーについて衛星風観測のインパクト評価について気象研究所、NICT、JAXA の共同研究を開始した。

衛星の観測によって得られる風データは得られたデータ点の風上側、風下側の情報を内包するため、データ同化することにより面的な影響が期待できる。その定量評価のため実施する OSSE は、利用の観点から衛星風観測に対する実現性を示す客観的なデータ提供が期待でき、宇宙機およびライダーシステムの設計に有益な情報が期待できる。今後これらの活動をまとめ、将来の衛星搭載風観測ミッションの実現に向けたミッション要求書の策定へつなげる予定である。

6. 参考文献

1) M.Hayashi; “Recent status and development of atmospheric motion vectors at JMA”, 11th International Winds Workshop, Auckland, New

- Zealand, 20 – 24 February, 2012.
- 2) ADM-Aeolus
 - 3) C.Fujiwara, K.Yamashita, M.Nakanishi, Y.Fujiyoshi; “Dust Devil–Like Vortices in an Urban Area Detected by a 3D Scanning Doppler Lidar”, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 534, (2011)
 - 4) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka; “Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing”, *Appl. Opt.* 46, 1953, (2007)
 - 5) H.Inokuchi, H.Tanaka, and T.Ando; “Development of an onboard Doppler lidar for flight safety”, *Proc. 26th International Congress of the aeronautical sciences*, Anchorage, Alaska, USA, 14 - 19 September 2008.
 - 6) 地球観測委員会; “宇宙ステーション搭載コヒーレントドップラーライダーの風観測に関する科学計画”, ESTO:98P0A1-D016, pp. 103, (1998)
 - 7) GPM 利用検討委員会 Post-GPM/DPR 検討会報告書
 - 8) ドップラーライダーによる宇宙からの風観測を考える検討会; “衛星搭載ドップラーライダーによる風観測実施計画書”, (2011)
 - 9) M.Masutani, J.S. Woollen, S. J. Lord, G.D. Emmitt, T.J. Kleespies, S.A.Wood, S.Greco, H.Sun, J.Terry, V.Kapoor, R.Treadon, and K.A.Campana; “Observing system simulation experiments at the National Centers for Environmental Prediction”, *J. Geophys. Res.* 115, D012528, (2010).
 - 10) M.Weimann and C. Cardinali; “Impact of airborne Doppler lidar observations on ECMWF forecasts”, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 133, 107, (2007).
 - 11) M.Weissmann, R.H.Langland, C/Cardinali, P.M.Pauley, and S.Rahm; “Influence of airborne Doppler wind lidar profiles near Typhoon Sinlaku on ECMWF and NOGAPS forecasts”, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 138, 118, (2011).
 - 12) 石井他 31 回レーザーセンシングシンポジウム予稿
 - 13) The space-based global observing system in 2012. Final report is available on http://www.wmo.int/pages/prog/sat/gos-dossier_en.php