

# 直接検波式ドップラー風ライダーのシミュレータ開発

石井 昌憲<sup>1\*</sup>, 田之上 菜美<sup>1</sup>, 竹中 秀樹<sup>1</sup>, 神 慶孝<sup>2</sup>, 西澤 智明<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

<sup>2</sup> 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

## Development of simulator for space-based direct-detection Doppler wind lidar

Shoken ISHII<sup>1\*</sup>, Nami TANOUE<sup>1</sup>, Hideki TAKENAKA<sup>1</sup>, Yoshitaka JIN<sup>2</sup>, and Tomoaki NISHIZAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

<sup>2</sup> National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053

**Abstract:** Wind is an important meteorological element as a comprehensive indicator of atmospheric motion. Current wind observations vary widely in the number of observation points from region to region. This causes errors in numerical weather prediction due to spatial inhomogeneity. Global 3D wind observation is important for weather prediction (NWP) and various meteorological studies. ESA launched the first space-based DWL, Aeolus, for global wind profile observations in August 2018. The Aeolus mission showed surpassing impacts on NWP and atmospheric science, and it demonstrated importance of global wind profiling. The Aeolus mission ended operations on 30 April 2023 and reentered on 28 July 2023. ESA discuss the Aeolus follow-on mission (hereafter, Aeolus-2) for launching it in the mid- 2030s. Japanese working group is continue to study feasibility of the space-based coherent Doppler Wind Lidar. It is important to assess measurement performance of each sensor onboard a satellite before the launch. In the paper, we describe the direct-detection Doppler wind lidar simulator developed at TMU and NIES.

**Key Words:** Lidar, Doppler Wind Lidar, Direct-detection, simulator, Earth observation satellite

### 1. はじめに

風は、大気の動きを総合的に表す重要な気象要素である。現在の風観測は、地域によって観測点の数が大きく異なる。このため、空間的な不均一性により数値天気予報に誤差が生じている。全球の4次元風(3次元+時間)は、数値予報や、さまざまな大気物理学現象を解明する研究にとって重要である。ESAは、2018年8月に、全球の風高度分布を観測することを目的として世界で初の衛星搭載ドップラー風ライダーAeolusを打上げた。Aeolusミッションは、NWPと大気科学に多大な影響を及ぼし、全球の風高度分布の重要性を示した。Aeolusミッションは2023年4月30日に運用を終了し、2023年7月28日に再突入した。ESAは、2030年代半ばの打ち上げに向けて、Aeolus後継ミッション(以下、Aeolus-2)の検討を進めている。日本のワーキンググループは、技術的および科学的観点から、衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーの実現可能性を継続的に検討している。東京都立大学(以下都立大(TMU))は、宇宙からドップラー風ライダーによって風観測を実現した場合にそなえ、その風観測性能を評価するために、国立環境研究所(以下環境研(NIES))とともに、End-to-End型の直接検出ドップラー風ライダーシミュレータの開発をすすめている。本発表では開発を進める直接検出ドップラー風ライダーシミュレータについて報告を行う。

### 2. ドップラー風ライダーシミュレータ

ドップラー風ライダー(以下DWL)は、視線方向(以下LOS)風速を測定するため有用なライダー技術であり、高い距離分解能と時間分解能の風分布を与え、DWLから射出レーザー光は大気風で運ばれる大気分子(レイリー・ブリルアン散乱、以下RBS)やエアロゾル・雲(ミー散乱)にあたると、後方散乱光は、ドップラー効果により射出時の元の周波数からわずかにシフトする(図1)。視線方向風速 $v_{LOS}$ は、ドップラー周波数シフト $f_D$ によって式で与えられる:

$$f_D = 2 \cdot f_L \frac{v_{LOS}}{c} = 2 \cdot \frac{v_{LOS}}{\lambda_L}, \quad (1)$$

---

\*: Corresponding author

ここで、 $f_L$  と  $\lambda_L$  は送信されたレーザの周波数と波長、 $c$  は光の速度。レーザ波長  $\lambda_L$  が 354.8 nm ( $f_L=84$  THz) と 2051.3 ( $f_L=146$  THz)、LOS 風速 1 m/s とすると、それぞれの  $f_D$  は 5.64 MHz と 0.98 MHz に相当する。

都立大は、第 41 回レーザセンシングシンポジウムで報告したように、ファブリ・ペローエタロン干渉計だけで構成するダブルエッジ方式と、ファブリ・ペローエタロン干渉計とマイケルソン干渉計を組み合わせた新たな分光法によるダブルエッジ方式の二つ方式をシミュレーション可能なシミュレータを開発すめしている。マイケルソン干渉計は、ファブリ・ペローエタロン干渉計だけ用いるダブルエッジ方式で課題となるミー散乱信号の影響を減らすことを目的とするために用いられる。

ダブルエッジ方式によって、距離  $r$  に対して検出される光電子数  $N_i(r, f_D)$  は、

$$N_i(r, f_D) = K_i \frac{E_T A_R}{h f_L r^2} \Delta r T_{\text{Atmos}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \{ \beta_{RBS}(r) T_i(f) \cdot G_L(f) * G_{RBS}(r, f, f_D) + \beta_{Mie}(r) \cdot T_i(f) \cdot G_L(f) * L_{Mie}(r, f, f_D) \} df, \quad (2)$$

と与えられる。ここで、 $K_i$  はチャンネル 1 と 2 のシステム定数、 $E_T$  はレーザ出力エネルギー、 $A_R$  は望遠鏡の面積、 $\Delta r$  はレンジゲート、 $T_{\text{Atmos}}$  は大気透過率、 $T_i(f)$  は周波数  $f_L$  を中心とする光学フィルタの透過率、 $\beta_{RBS}(r)$  と  $\beta_{Mie}(r)$  は後方散乱係数、 $G_L(f)$  と  $G_{RBS}(r, f, f_D, P, T)$  はレーザスペクトル幅と RBS スペクトル幅 ( $P$ : 気圧、 $T$ : 気温)、 $L_{Mie}(r, f, f_D)$  は Mie スペクトルのローレンツ関数、アスタリスク(\*)は畳み込み演算、 $h$  はプランク定数である。

各チャンネルの風速に対する測定感度  $\theta_i$  と信号対雑音比  $SNR_i(r)$  を用いて、LOS 風速誤差  $\sigma_{LOS}$  は、

$$\sigma_{LOS}(r, f_D) = \frac{1}{\frac{5.639 \times 10^6 \text{ Hz}}{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} (\theta_1(r) + \theta_2(r))} \cdot \sqrt{\frac{1}{SNR_1(r)^2} + \frac{1}{SNR_2(r)^2}}, \quad (3)$$

$$SNR_i(r) = \frac{N_i(r, v, \Delta v)}{\sqrt{N_i(r, v, \Delta v)}} = \sqrt{N_i(r, v, \Delta v)}, \quad (4)$$

と与えられる。

### 3. シミュレーション実験

開発したシミュレータを用いて、その動作を確認するための予備シミュレーションを行った。Aeolus-2 を想定した DWL の概念パラメータを表 1 に示す。図(a)は、シミュレーション実験に与えた風の高度分布で、高度 10 km に強い風を推定している。図(b)、表 1 に記載されているパラメータ、エアロゾルモデル、および米国標準大気 1976 を参照し、ファブリ・ペローエタロン干渉計のみダブルエッジ方式に対してシミュレートした風測と観測誤差の結果である。バーは風速誤差を与える。初期結果は、シミュレータは与えた風の高度分布を正常に取得できることを示し、適切なシミュレーションを実行していることが確認された。シミュレータの初期結果は下層対流圏で 2-3 m/s、上層対流圏で 3-4 m/s の風速誤差が得られた。

Table 1. Summary of direct-detection DWL

Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	0.355
Pulse energy (J)	80
PRF (Hz)	50.5
Telescope diameter (m)	1.5
Total system efficiency	0.05
Satellite orbit (km)	400
Azimuth angle ( $^\circ$ )	90
Nadir angle ( $^\circ$ )	35
Horizontal resolution (km)	<100
Vertical resolution (km)	FT, LST: 1

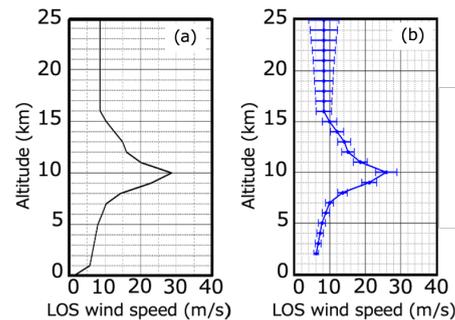


Figure 1. Wind profiles estimated using (a) target wind profile, and (b) simulator with the double-edge technique.

### 4. まとめ

都立大は、環境研のご協力を頂きながら、ファブリ・ペローエタロン干渉計だけ用いる分光法と、ファブリ・ペローエタロン干渉計とマイケルソン干渉計を組み合わせる新たな分光法によるダブルエッジ方式の両方のシミュレーション実験が可能な直接検波式ドップラー風ライダーのためのシミュレータ開発を進めている。発表当日は、開発を進めている直接検波式のシミュレータとシミュレーション結果について報告する。

### 参考文献

- 1) 田之上他：第 41 回レーザセンシング学会予稿集。