108

コヒーレント・ドップラー・ライダーによる風観測の可視化データ解析

浅井和弘^{+○}、星 貴久⁺、十束 款⁺ (⁺東北工大)水谷耕平^{*}、板部敏和^{*} (^{*}郵政省・通信総合研究所)

Visualized data analysis for atmospheric wind measured by coherent doppler lidar

Kazuhiro Asai, Takahisa Hoshi, Makoto Totuka, Kouhei Mizutani, and Toshikazu Itabe

ABSTRACT

Coherent Doppler lidar provide important data for investigating turbulent transport and exchange processes in the lower troposphere with high vertical and time resolution. TIT (Tohoku Institute of Technology) and CRL(Communication Research Laboratories) have been developing the 2- μ m coherent lidar system. In this paper, we discuss the conceptual design of lidar system and also the algorithm for data analysis in order to visualize wind data. current status of our coherent Doppler lidar.

Keywords: Earth environment, Remote sensing, Laser radar, Doppler lidar, Wind measurement

1. はじめに

地球規模での大気風分布観測は、気象予測の精度向上や気象現象、気候変動機構の解明に大きく貢献することが期待される。Coherent Doppler Lidar(以下 CDL とする)は、風向・風速といった風に関する情報を遠隔測定できるリモートセンシング技術であり、航空機や衛星からの地球大気観測手段として注目されている。1,2,3,7,8) CDL による地球大気観測が実用化されれば、観測データの解析結果を利用しやすい形で表示する必要がある。しかし CDL は、送受信光学軸(Line Of Sight : 以下 LOS とする)に対する風の情報しか得ることができないため、RHI (Range Height Indicator), PPI (Plane Position Indicator) 等で 2 次元表示された解析結果から風の様子を理解することは困難である。

本文では、CDL によって得られた大気風の測定データのビジュアル化を目的に、RHI, PPI のそれぞれの場合に対して風の様子を与えた時の表示結果のモデリング方法について述べ、さらに風の 3 次元ベクトル表示結果についても述べる。

2. コヒーレント・ドップラー・ライダーの原理

一般にどんなにきれいな大気中においてもエアロゾルは存在するため、大気中に照射されたレーザー光はエアロゾルによってミー散乱効果が生じる。この時エアロゾルが風に乗って移動しているならば、散乱光の周波数はドップラー効果によって送信周波数からシフトされる。このドップラー効果によってシフトされた周波数成分をドップラー周波数と呼び、ドップラーシフト周波数を解析することにより遠隔地における風の情報を得ることができる。この CDL システムの概念

図を Fig. 1 に示す。

送信レーザー光の Oscillator は、周波数安定化された CW マスターレーザと距離分解能を持つ高出力のパルスレーザで構成されている。発振周波数 F_0 のマスターレーザ光はビームスプリッターによって二方向に分けられ、一方をヘテロダイン検波のためのロー

Fig.1 Concept of Coherent Doppler Lidar (CDL)

カル光とし、残りを送信周波数安定化のためパルスレーザにシーディングされる。ここで負の周波数成分(遠ざかる成分)を観測するため Δf [Hz] のオフセットをかけられたパルスレーザ光は、望遠鏡を通し大気中に照射され、エアロゾルによってミー散乱効果を受ける。この時、ドップラー効果によってシフトされた周波数成分 f_d [Hz] と風速 v [m/s] の関係は以下のように示すことができる。

$$v = f_d \lambda / 2$$

ここで λ [m] はレーザ光の波長であり、 λ が $2\mu\text{m}$ ならば $v=1$ [m/s] あたり $f_d=1$ [MHz] となることが分かる。

望遠鏡によって集光された散乱光は、光ミキサー上でマスターレーザ光と重ね合わされ、 $\Delta f + f_d$ の周波数成分を持つ電気信号に変換される。一方、オフセット周波数は、パルスレーザ光とマスターレーザ光を Monitor Photodetector 上で重ね合わせ Δf の周波数成分を持つ電気信号に変換される。さらに IF Electronics を通し Signal Processor で周波数解析を行い Display に結果を表示させる。

3. ドップラー周波数解析アルゴリズム

得られた散乱受信信号からドップラーシフト周波数を算出する周波数解析アルゴリズムとしては、FFT (Fast Fourier Transform) やマイクロ波レーダのエコー解析にも用いられているパルス対解析法などがよく使われている⁴⁻⁶⁾。我々は、開発ツールとして Borland C++、および Lab VIEW を用い、FFT 周波数解析法 (以下、FE: Frequency Estimator と呼ぶ) について検討を行った。

実験には、米国コヒーレントテクノロジー社製の $2\mu\text{m}$ CDL システム (出力 50mJ、繰り返し 5.5Hz、送受信光学系 $8\text{cm}\phi$ 、最大測定可能距離 6km、距離分解能 90m) を用いて行った。CDL によって得られたデータは、Raw data file としてデジタルテープに一旦記録

され、実験終了後オフラインでドップラー周波数解析が行われる。FFT を用いた Raw data file の解析アルゴリズムを Fig. 2 に示す。

1Shot の Raw data は Monitor Signal (Binary, 8bit $\times$ 256) と Return Signal (Binary, 8bit $\times$ 16384) に分離され、Monitor Signal は、ハニング窓関数がかけられ 256 のサイズで FFT を行いオフセット周波数 (f_{offset}) を算出する。観測では、1Shot ごとに送信レーザ光の

周波数に揺らぎが生じるため毎ショットごとに Monitor Signal の解析を行っている。一方、Return Signal は、16384 サンプルを 64 サンプルずつ 256 のレンジに分割しハニング窓関数をかけ、64 のサイズで FFT をかける。その結果、各高度に対する受信信号周波数 ($f_d + f_{\text{offset}}$) が求まる。このオフセット周波数 (f_{offset}) と受信信号周波数 ($f_d + f_{\text{offset}}$) の差をとることで、Doppler shift frequency (f_d) を算出し各高度に対する風速を求める。更に、ショット平均を行うことで風速測定精度を向上させている。

この FE では、Raw Data File から 1Shot ごとにデータを読み込み、Monitor Data, Raw Data, Wind Velocity (1shot), Wind Velocity (Averaging shot) の波形を一画面で表示させる。この時の平均ショット数はフロントパネルで選択でき、この解析では 10Shot 平均を選択した結果を示している。この FE により LOS 方向成分における風速を算出することが可能となる。

Fig.2 Algorithm for frequency estimator using FFT

4. 観測データの可視化による大気風の場の推測 送受信光学軸に対する風の成分 V_{LOS} と風の空間三成分の関係式は

$$V_{LOS} = u \sin \theta \cos \phi + v \cos \theta \cos \phi + w \sin \phi$$

と表される。ここで、 u [m/s]は東西成分、 v [m/s]は南北成分、 w [m/s]は風の鉛直情報成分であり、 θ [deg]は北から時計方向にスキャンさせた時の方位角、 ϕ [deg]は送信レーザ光の仰角である。(Fig. 3, 参照)

Fig. 3 Relation between optical axis and wind vector

データの可視化には、仰角 ϕ を一定に保った状態で方位角 θ を変化させ、変化に伴って得られる LOS 成分を表示する PPI 法、方位角 θ を一定にして仰角を回転させて得られる LOS 成分を表示する RHI 法があり、以下それぞれの可視化アルゴリズムについて明らかにする。

1) PPI 法

一般的な PPI 表示法を Fig. 4 に、また Fig. 5 に実験データをもとに我々が作成した PPI アルゴリズムを使って可視化した結果を示す。PPI は、各 LOS レンジごとの平均風速をコンピュータのディスプレイ上で 2-D 表示する方法である。そのため、表示結果から視覚的に風の場を推定することができない。

Fig. 4 Concept of PPI

Fig. 5 Analyzed data using with algorithm for PPI

この観測では、Elevation を 8[deg] と一定にし、Azimuth を 5°315[deg] スキャンさせデータを取得している。Fig. 5 は LOS に対する風速を表示した結果であるため、この PPI 表示結果から視覚的に風の場を推定することは困難である。そこで各種表示法 (RHI, PPI) に対し各レンジごとに風の場 (u : 西から東へ吹く風の成分、 v : 南から北に吹く風の成分、 w : 鉛直方向の風の成分) を与え、表示結果のモデリングを行い各 LOS レンジに対する風の場を推定した。PPI におけるモデリング結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 Result obtained with modeling technique

PPI 観測データの解析結果 Fig. 2 とモデリング結果 Fig. 3 を比較すると、表示結果がほぼ一致していることから、PPI 観測時における風の場は、LOS レンジが約 1.5[km] (高度 0.2[km]) では $u=1.0$ [m/s], $v=5.5$ [m/s], $w=2.7$ [m/s] であり水平成分がほぼ北向きで鉛直成分が上向きの風の場が推定できる。また、LOS レンジが約 3.0[km] (高度約 0.4[km]) では $u=1.7$ [m/s], $v=5.3$ [m/s], $w=0.2$ [m/s] であることから水平成分が北北西向き、鉛直成分が上向きの風の場、約 4.5[km] (高度約 0.6[km]) では $u=0.5$ [m/s], $v=3.3$ [m/s], $w=4.9$ [m/s] であることから水平成分が北向き、鉛直成分が上向きの風の場が存在していることが推測される。

2) RHI 法

Fig. 7 は RHI 法に対する概念を表している。RHI 法は、方位角 θ を一定に保ちながら仰角 ϕ を変化させて得られる LOS 値を可視化したものである。RHI アルゴリズムを用いてデータ解析した結果を Fig. 8 に示しておく。

Fig. 7 Concept of RHI

Fig. 8 Analyzed data using with algorithm for RHI

PPI 法の時と同様に、RHI 解析結果からは容易に風の場を推測することは出来ないで、モデリングによる実験データとの比較を行った結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 Result obtained with modeling technique for RHI

モデリングでは、まず最大解析レンジを指定し、ある高度での u , v , w コンポーネントを前述式に代入し、

風の光軸方向成分 V_{LOS} を算出する。ここで、観測時における各高度に対する風速測定誤差を算出し、各高度ごとの V_{LOS} に風速測定誤差をかける。ここで得られたモデリング結果を Raw data より算出した風の二次元解析結果と比較し、視覚的に合致していれば次の高度でのモデリングを行い、合致していなければ再び各コンポーネントを入力する。以上を最大レンジまで繰り返し観測時における RHI のモデリングを行った。

4. おわり

以上、コヒーレントドップラー・ライダーに大気風測定原理と得られた実験データの可視化について論じてきた。

風ベクトルの正確な高度プロファイルは、気象予測の精度向上や気象現象、気候変動機構の解明に大きく貢献することが期待され、将来 CDL を搭載した衛星によって地球規模での大気風プロファイルを観測することは大変有望視される。現在、筆者らは宇宙ステーション JEM (Japanese Experiment Module) 暴露部に CDL を搭載し、グローバルな 3-D 風観測の可能性についての feasibility study (日本宇宙フォーラム・地上公募研究フェーズ II) を進めているところであり、本研究はその一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 浅井和弘, "大気循環, 大気風の観測予測", 日本赤外線学会誌, 第 3 巻, P.1-10(1993)
- 2) ドップラーライダーによる宇宙からの風観測とデータ利用に関する国内ワークショップ報告書
- 3) Thomas J.Kane, Bingkun Zhou, and Robert L. Byer, "Potential for coherent Doppler wind velocity lidar using neodymium lasers", APPL Opt. 23, 2477-2481(1984)
- 4) 越川常治, "信号解析入門", 近代科学社(1992)
- 5) 日野幹雄, "スペクトル解析", 朝倉書店(1997)
- 6) 青柳二郎, 気象研究所技術報告書 第 19 号, P.7-33(1986)
- 7) J.Streicher, "Overview on signal processing for Doppler wind lidar", 9th Conference on Coherent Laser Radar, 118-121(1997)
- 8) S.M.Hannon, S.W.Henderson, "Wind measurement applications of coherent lidar", The Review of Laser Engineering, 23, 124-130(1995)