

3次元走査型コヒーレントドップラーライダーで観測された 福岡平野におけるストリーク構造

Streaky Structures over Fukuoka Plain
Observed by a 3D-scanning Coherent Doppler Lidar

今原隆晶¹⁾ 高島久洋^{1), 2)}
白石浩一^{1), 2)} 原 圭一郎^{1), 2)}
林 政彦^{1), 2)}

Takaaki IMAHARA¹⁾,
Hisahiro TAKASHIMA^{1), 2)},
Koichi SHIRAIISHI^{1), 2)},
Keiichiro HARA^{1), 2)}, and
Masahiko HAYASHI^{1), 2)}

令和元年5月31日受理

Received May 31, 2019

1) 福岡大学理学部地球圏科学科
Department of Earth System Science, Faculty of
Science, Fukuoka University, Fukuoka 814-0180,
Japan

2) 福岡大学産学官連携研究機関
「福岡から診る大気環境研究所」
Fukuoka Institute for Atmospheric Environment and
Health, Fukuoka University, Fukuoka 814-0180, Japan

Corresponding author: H. Takashima,
hisahiro@fukuoka-u.ac.jp

Abstract

Streaky structures over the Fukuoka plain were investigated using three dimensional (3D) wind observed by a 3D-scanning coherent Doppler lidar during October 2017. The streaky structures were visually classified from the Plan Position Indicator (PPI) scans at elevation angles of 0°. We derived horizontal wind direction/speed near the ground by using the PPI scans at an elevation angle of 0° under partly obstructed line-of-sight conditions, and investigated the relationship between the occurrence frequency of streaky structure and the wind speed. A higher frequency was observed at higher wind speeds, in which a strong wind speed was observed at both synoptic and local scales (such as sea breeze). We also investigated the boundary layer height and the spacing of the streaky structures and found a linear relationship between the two over the Fukuoka plane.

Keywords: Doppler lidar, Streaky structures, local circulations

1. はじめに

ストリーク構造とは、大気の主流方向に沿って流れの低速部と高速部が筋状に伸びる縞状パターンを有するものであり、対流ロール構造とは物理過程が区別される（八木ほか, 2013; 日比野, 2013）。対流ロール構造は、混合層内での地表面からの加熱により発生した鉛直循環流が、水平風によってらせん状に引き伸ばされて形成されるが、ストリーク構造は、浮力の少ない中立境界層内で発生する乱流構造である（日比野, 2013）。強風時は風の鉛直シアが生じ、流れの層流から乱流への遷移が起り、ストリーク構造が発生すると考えられる（Asai *et al.*, 2007; 日比野, 2013）。

これらは鉛直スケールに違いがあり対流ロール構造は境界層全体で発生するのに対し、ストリーク構造は地表から約1 km 程度までの間に発生する（八木ほか, 2013）。また、対流ロール構造は筋状の雲が形成されることがあり、可視化が容易であるため実観測による

研究例は多いが、ストリーク構造では雲ができないために可視化が難しく、実観測による研究例は少ない。

近年ドップラーライダーによる風の精密な3次元観測が可能になり、東京都市部でのストリーク構造が可視化され（八木ほか, 2013; Yagi *et al.*, 2017）、風速が大きいほどストリーク構造が高頻度で発生し、ストリーク構造の間隔は大気境界層高度が高いほど大きくなることが示されている。

福岡平野でも2016年11月末より、福岡大学A棟屋上に3次元走査型コヒーレントドップラーライダーを設置し、境界層内の3次元風観測を開始した。本研究ではドップラーライダーにより観測されたデータについて、先行研究の解析方法に従って解析を行うことにより、福岡平野のストリーク構造の発生と背景風（風向・風速）との関係、ストリーク構造の間隔と風速や大気境界層高度との関係を明らかにすることを研究目的とする。

2. 観測手法 / 解析手法

2.1. 観測手法

本研究では福岡大学 A 棟屋上 (33.549°N, 130.366°E, 海拔高度約 56 m) に設置した 3 次元走査型コヒーレントドップラーライダー (三菱電機製) により S/N 比およびドップラー速度の観測を行った。ドップラーライダーの仕様を Table 1 にまとめた。ドップラーライダーは、大気中にパルスレーザー光を照射し、エアロゾル粒子からの散乱光を受信して信号周波数成分を解析する。測定対象となるエアロゾル粒子が移動している場合は、受信信号がその移動速度に応じたドップラー速度成分を持つため、大気の流れによって運ばれるエアロゾル粒子の移動速度を計測し、それを風速として導出する。また、受信信号の強度は大気塵の S/N 比で表される。光源として波長 1.54 μm の近赤外線レーザー光を用いる。視線方向の BIN 数は 200 である。本研究では距離分解能 60 m, 最大探知距離 12 km に設定して観測を行った。観測モードは、仰角固定で方位スキャンを行う PPI (Plane Position Indicator) と、方位角固定で鉛直断面のスキャンを行う RHI (Range Height Indicator) の 2 種類があり、仰角 0°, 2°, 10° の PPI 観測と方位角 0°, 112° の RHI 観測を行った (PPI 0°, 0°, 2°, 10°, 0°, RHI 観測 112°, 112°, 112°, 112°, 0°, 0°, 0°, 0°)。スキャナの回転速度は 3 分 / 回転に設定し、1 回の観測に要する時間は、PPI 観測が約 3 分、RHI 観測が約 1.5 分で、観測 1 サイクルの観測時間は合計で約 30 分である。

Table 1. Technical specifications of 3-D coherent Doppler lidar system

Laser	DFB-Er doped fiber laser
Wavelength	1.54 μm (Er. Glass)
Pulse energy	1.0 mJ/pulse
Pulse repetition rate	4000 Hz (average power: 4W)
Pulse width	200 ns
Telescope diameter (effective)	120 mm
Range resolution	60 m
Measurable distance	up to 12 km (200 range bins)

2.2 解析手法

本研究では、八木ほか (2013) に従って、視線速度分布のパターンを視覚的に分類し、水平風速・風向、ストリーク間隔、大気境界層高度の 3 つの物理量を導出して解析を行った。ドップラーライダーが 1 ヶ月間で得られるデータ数は PPI 観測が約 7500, RHI 観測が約 1 万 2000 になるため、Yagi *et al.* (2017) が解析を行っている秋季に合わせて解析期間を 2017 年 10 月

の 1 か月間とした。以下、分類方法と物理量の導出方法について記述する。

2.2.1 視線速度分布パターンの視覚的分類

本研究では、八木ほか (2013) と同様の方法により視覚的にストリーク構造を分類した。約 4500 個ある仰角 0° の PPI 観測データの視線速度分布図を作成し、目視で「ストリーク」、「その他」、「信号無し」に分類した。ストリークの観測例を Fig. 1 に示す。ストリーク以外の視線速度分布のパターンは「その他」として分類した。なおエアロゾル粒子の量が少なく十分な S/N 比が得られなかったデータは「信号無し」に分類した。

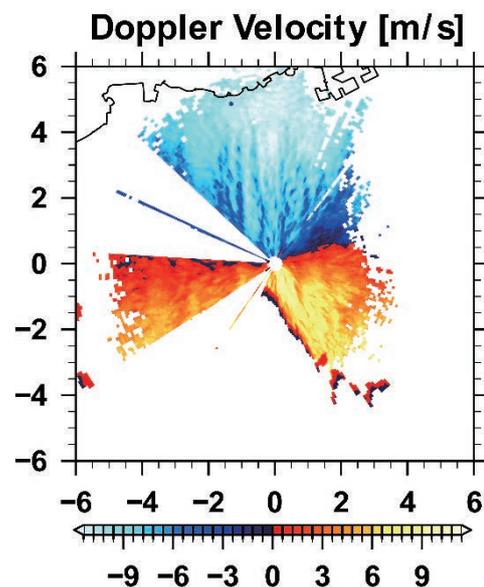


Fig. 1. An example of streaky structure observed by 3D coherent Doppler lidar at Fukuoka Plane (on 3 Oct 2017, 13:47) in a horizontal section. Colors indicate Doppler velocity (m/s), where warm colors indicate flow away from the lidar and cold colors toward.

2.2.2 水平風速、風向の導出

本研究では仰角 0° で観測された PPI データを使い福岡平野内の地表付近での平均的な水平風速・風向を導出した。水平風の導出には VAD (Velocity Azimuth Display) 法 (Browning and Wexler, 1968) が用いられることが多い。しかし福岡大学 A 棟屋上での仰角 0 度の観測では、油山や福岡大学 2 号館、図書館、文系センター棟が障害となってデータが欠損する方位が多い。本研究では方位によるデータ欠損を考慮し、福岡平野の平均的な水平風向・風速の導出には、まず方位 10°, 視線方向 600 ~ 3000 m で平均し、ドップラー速度が正と負の面積が大きい方で、ドップラー速度の絶対値が最大となる方位を風向、その最大値を風速と

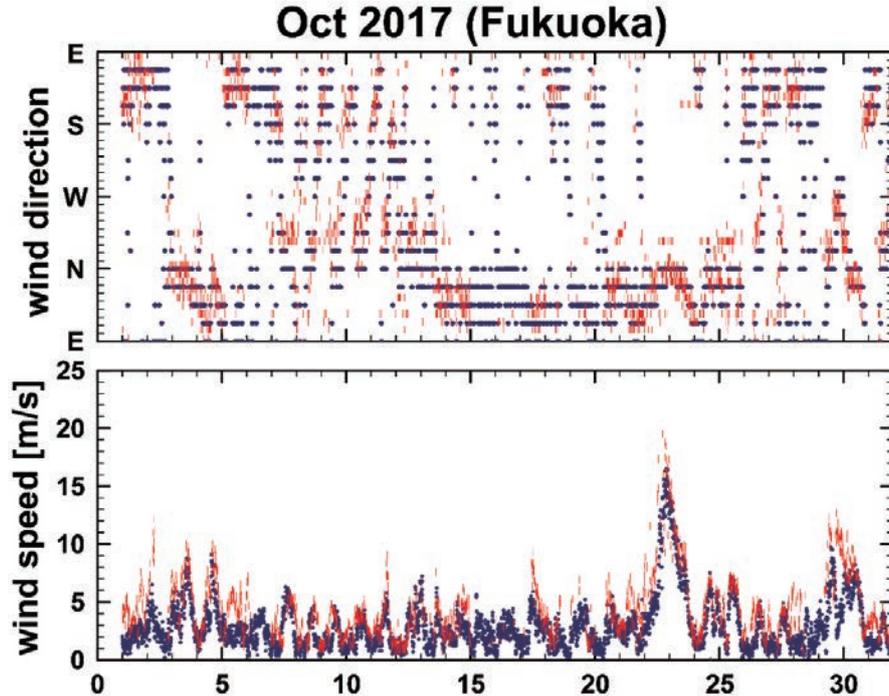


Fig. 2. Time series of wind direction (counterclockwise from east) /speed derived from Doppler lidar wind observations at Fukuoka University (33.55 °N, 130.37 °E) (red bar) and observed by anemometer at Roppon-matsu (130.38 °E, 33.58 °N; ~ 3.8 km away from the lidar) (blue circle) for Oct 2017.

した。ドップラーライダーで得られたデータを福岡管区気象台(130.38 °E, 33.58 °N, 34.6 m)と比較したところ、ドップラーライダーで得られた風速の方がやや大きいものの、おおむね一致していることがわかる(Figs. 2, 3)。

2.2.3 ストリーク間隔の導出

八木ほか(2013)と同様に風向に直交する向きに沿ってパワースペクトル密度を計算し、ストリーク間隔をパワースペクトル密度の極大値からストリーク間隔を求めた。具体的には、極座標系から風向と直行する向きで直交座標系に変換し、100 m四方の格子データを作成し、3000 m × 500 mの領域でパワースペクトル密度を求めストリーク間隔とした。なおパワースペクトル密度を計算する際、計算範囲内に欠損値があると正確な値を算出できないため、油山、福岡大学2号館、中央図書館、文系センター棟によるデータの欠損を考慮して分析領域を選定し、その領域内で計算を行った。

2.2.4 大気境界層高度の導出

大気境界層高度の導出には、方位角0°, 112°で観測されたRHI観測データについて、高度3 km以下、S/N比10 dB以上を使用した。また、低仰角ではS/N比の勾配を検出に適していないため、仰角30°以上のデータのみを使用した。境界層上端でエアロゾルの量

が減少すると考え、S/N比の鉛直勾配の大きさが最も大きくなる高度を大気境界層高度とした。ただしS/N比の鉛直勾配が小さい観測データは解析に使用しなかった。具体的には各視線方向でS/N比の鉛直微分の絶対値が最大となる高度を求め、その中央値を大気境界層高度とした。なお、この条件下で2017年10月について全データ(12162個)のうち約6割のデータで大気境界層高度を導出することができた。

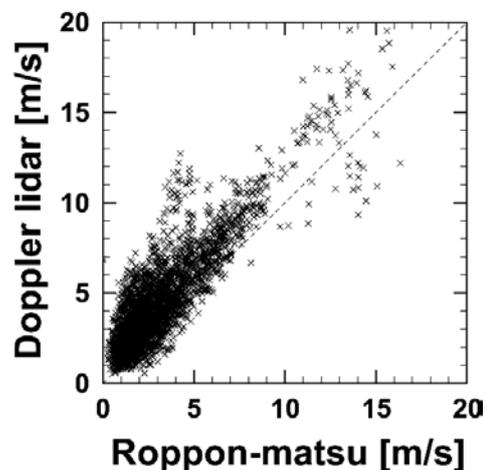


Fig. 3. Scatter plot of surface wind speed observed at Roppon-matsu (130.38 °E, 33.58 °N) and wind speed derived from 3D coherent Doppler lidar observation at Fukuoka University (33.55 °N, 130.37 °E).

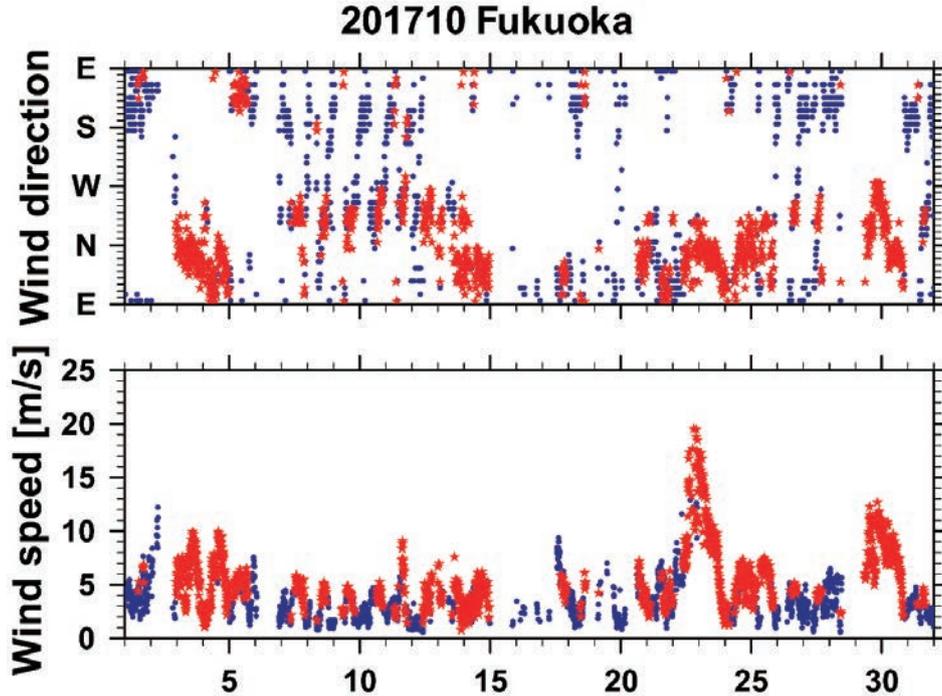


Fig. 4. Time series of wind direction/speed observed by 3D coherent Doppler lidar at Fukuoka. Streaky structure is shown in red stars.

3. 結果・考察

Fig. 4 に 2017 年 10 月の風向・風速，ストリーク発生の時系列を示す．この期間は北風と南東風が卓越していた (Fig. 7 右の頻度分布からも確認できる)．22～24 日や 29～30 日のように，10 m/s 以上の強風 (北風) が総観規模場として卓越する時があり，その期間はストリーク構造が継続してみられる．1 日スケールの変動に着目し時間帯ごとの発生頻度を見ると (Fig. 5)，すべての時間帯でストリーク構造が発生しているが，15 時から 18 時に極大，5 時から 7 時に極小がみられる．例えば 10 月 7～9 日の時系列をみると (Fig. 6)，夜～午前に極小，午後極大の 1 日周期の変動が卓越している．この 1 日周期の変動は海陸風循環に対応しており，午後の極大は海風と考えられ，この海風卓越時にストリーク構造がみられる．ただし，この時の風速の最大値は 6 m/s 程度であり総観規模擾乱と比べて小さい．Fig. 7 にストリーク発生時の風速の頻度分布を示す．風速が大きい時ほどストリークの発生頻度が高く，また 1 m/s 以下ではストリークが発生していない．これらの風速とストリーク構造の対応は八木ほか (2013) の東京都市圏内での観測の結果と一致する．

Fig. 7 にストリーク発生時の風向の頻度分布を示す．主に北風 (海風) と南東風 (陸風) が多く発生しており，ストリーク構造が高頻度で発生しているのは北風時である．Fig. 8 にストリーク間隔と大気境界層高度

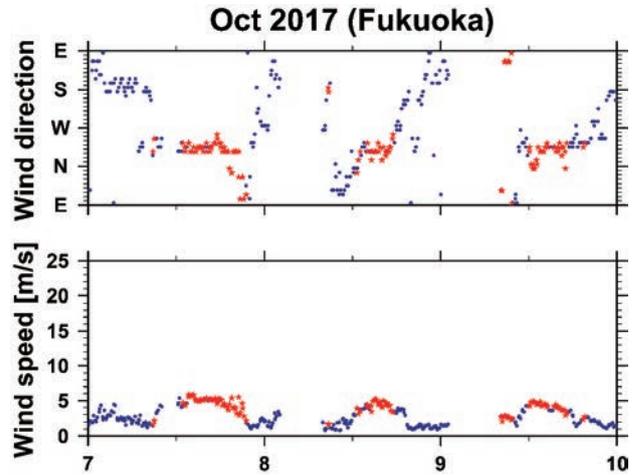


Fig. 6. Same as Figure 4, but during 7 - 9 October 2017.

の散布図を示す．ここでは S/N 比が高くストリーク構造が観測され，またストリーク間隔と境界層高度が導出できた約 40 個のデータを用いた．東京都市圏での観測で見られるように (八木ほか，2013)，境界層高度が低いほどストリーク間隔が小さい線形関係が福岡平野の観測でも見られる．八木ほか (2013) は，風の速度勾配や大気の安定性もストリーク間隔のスケリングパラメーターとなると考えられ，今後は速度鉛直勾配や大気安定度についての解析が必要である．

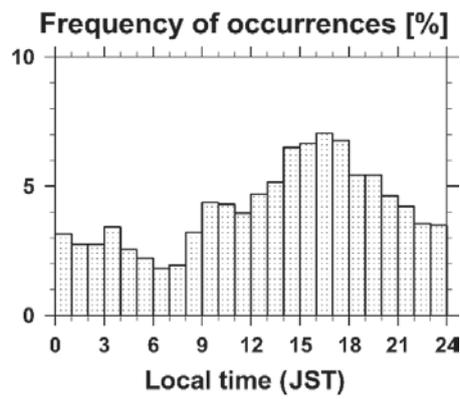


Fig. 5. Frequency of occurrences of streaky structure in local time during October 2017.

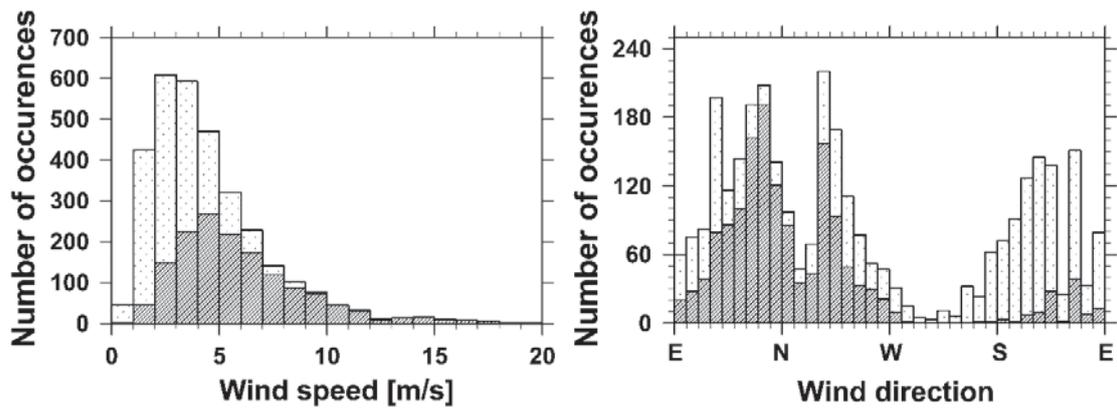


Fig. 7. Number of occurrences of wind speed (left) and direction (right) for all observations (dotted bar) and for streaky structure (gray bar).

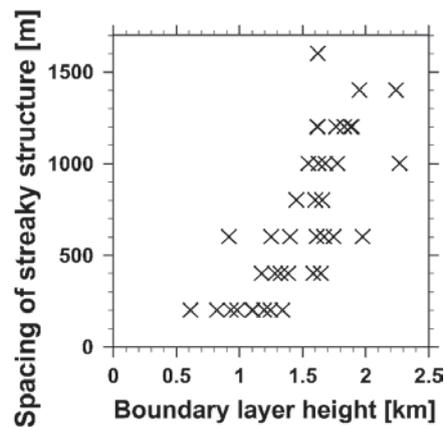


Fig. 8. Scatter plot of boundary layer height (km) and spacing of streaky structures (m).

4. まとめ

福岡大学 A 棟屋上に設置した 3 次元走査型コヒーレントドップラーライダーを用いて、福岡平野における 2017 年 10 月のストリーク構造について調べた。方位角が一部遮られた状態において仰角 0 度の PPI 観測から水平風向・風速を導出し、ストリーク構造の発生と風速の関係について調べた。福岡平野において総観規模擾乱や海風にともなう風速が早い状態の時にストリーク構造の発生頻度が高く、またストリーク構造の間隔と境界層高度に線形関係があることを示した。

謝辞

本研究は福岡大学産学官連携研究機関「福岡から診る大気環境研究所」の枠組みで実施した。また小林国際奨学財団の助成を受けた。西田千春博士から有益なコメントをいただいた。図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

- Asai M, Konishi Y, Oizumi Y, Nishioka M (2007) Growth and breakdown of low-speed streaks leading to wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, **586**, 371-396.
- Browning, K. A, and R. Wexler (1968) The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar. *Journal of Applied meteorology and meteorology*, **7**, 105-113.
- Yagi, A., Inagaki, A., Kanda, M., Fujiwara C., Fujiyoshi, Y (2017) Nature of Streaky Structures Observed with a Doppler Lidar. *Boundary-Layer Meteorology*, **163**, 19-40.
- 日比野研志 (2013) 大気境界層におけるストリーク構造の生成・発達・崩壊過程に関する数値的研究. 京都大学博士論文.
<https://doi.org/10.14989/doctor.k17363>
- 藤吉康志 (2013) ドップラーライダーによる流れの観測と物質輸送. *ながれ*, **32**, 301-306.
- 八木綾子・有馬次郎・稲垣厚至・神田学・藤原忠誠・藤吉康志 (2013) ドップラーライダーによる都市上空の流れ分析. *土木学会論文集 B1(水工学)*, **69**(4), 1753-1758.