

# ドップラーライダーで検出した海風前線上の鉛直渦 Dust devil-like vortices along sea-breeze fronts detected by a 3-D scanning Doppler lidar

\*藤原忠誠<sup>1</sup>、山下和也<sup>1</sup>、藤吉康志<sup>2</sup>

\*Chusei Fujiwara<sup>1</sup>, Kazuya Yamashita<sup>1</sup>, Yasushi Fujiyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学・大学院環境科学、<sup>2</sup>北海道大学・低温科学研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## Abstract

We conducted atmospheric boundary layer (ABL) observations in an urban area (Sapporo, Japan) from April 2005 to July 2007 using a three-dimensional scanning coherent Doppler lidar (3D-CDL). During this period, 90 dust devil-like vortices (DDV) along local fronts (e.g. sea-breeze, land-breeze and foehn) were detected in the area. The diameters of the vortex cores ranged from 40 to 220 m, and maximum vorticity was  $0.43 \text{ s}^{-1}$ . More than 90 % of the vortices were cyclonic, the rest were anticyclonic. A comparison between a case of presence and absence of DDV was examined to identify optimal conditions for development of DDV associated with sea-breeze front. This optimal state was found to include 1) substantial across-front horizontal shear, 2) high boundary layer height, and 3) balance between vertical wind shear in the ambient environment ahead of the sea-breeze front and sea-breeze circulation.

## 1. はじめに

前線上に発生する鉛直渦として、数100m~1kmスケールの misocyclone (例えば Wakimoto and Wilson 1989)がある。一方、1 オーダー小さい鉛直渦である Dust devil の形成過程としても、レーダ観測 (Wurman et al. 1997) によって、水平シア不安定 (Barcilon and Drazin 1972) が示唆されている。しかし、局地前線に伴う Dust devil を詳細に観測した研究は存在しない。

我々は、3次元走査型コヒーレントドップラーライダー (以下3D-CDL) を用いて、札幌において大気境界層の気流構造の観測を2005年4月から2007年7月に行った。その結果、都市上空において、Dust devil-like vortices (以下、DDV) が網目状構造中に発生することを明らかにした (Fujiwara et al. 2010)。さらに札幌では、網

目状構造とは異なった原因、すなわち、局地前線 (海風前線、フェーンなど) によっても DDV が発生しうることが明らかになった。今回は、局地前線上に発生した DDV の特性とその発生条件を明らかにすることを目的に報告を行う。

## 2. 観測概要と鉛直渦検出方法

3D-CDL は、波長  $1.54 \mu\text{m}$  のレーザー光を用い、繰り返し周波数 4kHz、探知距離 0.4~4.4km、視線方向分解能 50m、方位角分解能  $1.2^\circ$  (9~92m) である。地上高度 28m の屋上に設置し、主に仰角  $2.2^\circ$  の PPI 走査 (周囲の建物にほとんど阻害されない最低仰角、高度範囲地上高 43~197m)、及び北北西-南南東断面 (主風向) の RHI 走査を行った。

ドップラーライダー用に開発されたメソサイクロン検出方法 (鈴木ら 2006) を 3D-CDL 用に適

用し、以下の手順でDDVを検出した。1. PPI仰角 $2.2^\circ$ のデータに対し、方位微分が閾値以上の領域を抽出。2. 近傍における極大値及び極小値の抽出。3. Rankine 複合渦を仮定し、フィッティング。4. 時間連続性を考慮し、ノイズを除去。5. 生データを用いて、極大値、極小値から直径(D)、速度差( $\Delta V$ )、鉛直渦度 ( $2\Delta V/D$ ) を求めた。

### 3. 海風前線上に検出された鉛直渦の特性

観測領域の北西側には石狩湾が存在するため、一般風が弱い晴れた日の午後には、3D-CDL上空を北西から南東方向へ通過する海風前線が頻りに観測された。Fig. 1は、2007年6月9日18時12分に観測された、海風前線周辺のSNRとドップラー速度の水平分布、及び検出されたDDVである。興味深い特徴として、海風前線の先端は滑らかでなく、細かい凹凸が見られ、複数のDDVが形成されていた。また、海風内部や一般風にもストリーク構造が見られた。

海風前線以外にも、フェーンと考えられる山側からの気流(南西風)と一般風(北西風)との間で形成された局地前線の事例や、夜間の陸風前線と考えられる事例が観測され、前線上にDDVが検出された(図省略)。つまり、DDVは、海風前線上だけでなく、局地前線や夜間の陸風前線においても、発生しうることを示している。

局地前線起源のDDV(鉛直渦度 $>|0.1| \text{ s}^{-1}$ )は、観測期間中に21ケース(90個)検出され、直径は40~220 m、最大鉛直渦度は $0.43 \text{ s}^{-1}$ であり、網目状構造に伴った事例(Fujiwara et al. 2010)と比較して、直径、鉛直渦度ともに大きい傾向にあった。局地前線起源の鉛直渦の回転方向は、90%以上反時計回りであり、局地風と一般風の間で作られる鉛直渦度と一致した。

### 4. 海風前線に伴ったDDVの発生条件

海風前線に伴ったDDVの発生条件と海風前線の水平・鉛直構造を明らかにするため、発生環境場が大きく異なる2事例について詳細な解析を行った。Table. 1に解析に用いた2事例に関し、鉛直渦の特性とその発生環境場をまとめた。鉛直渦が形成された事例に関しては、検出されなかった事例よりも、前線先端部における水平シアが大きく、境界層高度が高いことが分かった。

Fig. 2に2事例の前線付近の詳細な水平構造を示す。鉛直渦が検出された事例については、前線の先端部の形状が「Kelvin-Helmholtz波状」である(Fig. 2c)のに対し、鉛直渦が検出されなかった事例に関してはその形状が平坦だった(Fig. 2d)。

Fig. 3に2事例の海風前線先端部の鉛直構造及び、海風前線前方、後方それぞれの断面内の水平風の鉛直分布を示す。鉛直渦検出された事例は、前線の先端部の形状が直立に近いのに対し(Fig. 3a,b)、検出されなかった事例に関しては、比較的緩やかであった(Fig. 3d,f)。また鉛直プロファイルを見ると、鉛直渦が検出された事例に関しては、海風前線の前方下層の鉛直シアが、海風先端部の温度傾度により作られる水平渦度にバランスするような向きをもっていた(Fig. 3c)。

### 5. 議論とまとめ

3D-CDLを用いて、海風前線及び局地前線(陸風前線、フェーン)上に発生するDDVを多数検出し、それらの特性について明らかにした。

また、海風前線に伴ったDDVの発生条件を明らかにするため、発生環境場の大きく異なる海風前線に着目して詳細な解析を行った。その結果、(1)前線の先端での水平シアが比較的大きいこと、(2)境界層高度が高いこと、(3)海風前線の前方下層の鉛直シアが、海風先端部の温度傾度により作られ

る水平渦度にバランスするような向きを持つこと、の3つの条件が海風先端部でのDDVの発生に重要であることが分かった。(1)の条件は、海風先端部での水平シア不安定による初期渦の発生において重要であり、(2)、(3)の条件は海風前線先端部における上昇流を強め、ストレッチングによる渦の強化を起す上で重要であると考えられる。これらの条件が満たされた場合、前線の先端部はほぼ直立して厚くなり、上昇流も強くなり、数100mスケールの「Kelvin-Helmholtz波」の水平構造が現れ、DDVが検出された。

今後は、ストリーク構造などの組織的気流構造が海風先端部の鉛直渦の形成に対し、どのような影響があるかを明らかにする必要がある。

#### 謝辞

気象研究所の鈴木修室長には、メソサイクロン検出プログラムを使わせて頂きました。記して感謝致します。

#### 参考文献

- Barcilon A. I., and P. G. Drazin, 1972: Dust devil formation. *Geophys. Fluid Dyn.*, 4, 147-158.
- Fujiwara C., K. Yamashita, and Y. Fujiyoshi: Evolution of dust devil-like vortices in urban area detected by a 3-D scanning Doppler lidar, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (under revision).
- Wakimoto, R. M. and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
- Wurman J., M. Randall, and A. Zahrai, 1997: Design and deployment of a portable, pencil-beam, pulsed, 3-cm Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14, 1502-1512

Table 1. Characteristics of dust devil-like vortices and parameters of environmental condition.

	Time	Rotation direction (+/-)	Maximum vorticity ( $s^{-1}$ )	Horizontal shear ( $m s^{-1}$ )	Convergence ( $m s^{-1}$ )	ABL height (m)	T difference (K)
9 June 2007	1748-1833	4/0	0.17	7.4	4.1	900	1.2
10 June 2005	1611-1652	-	-	2.0	4.6	500	1.2

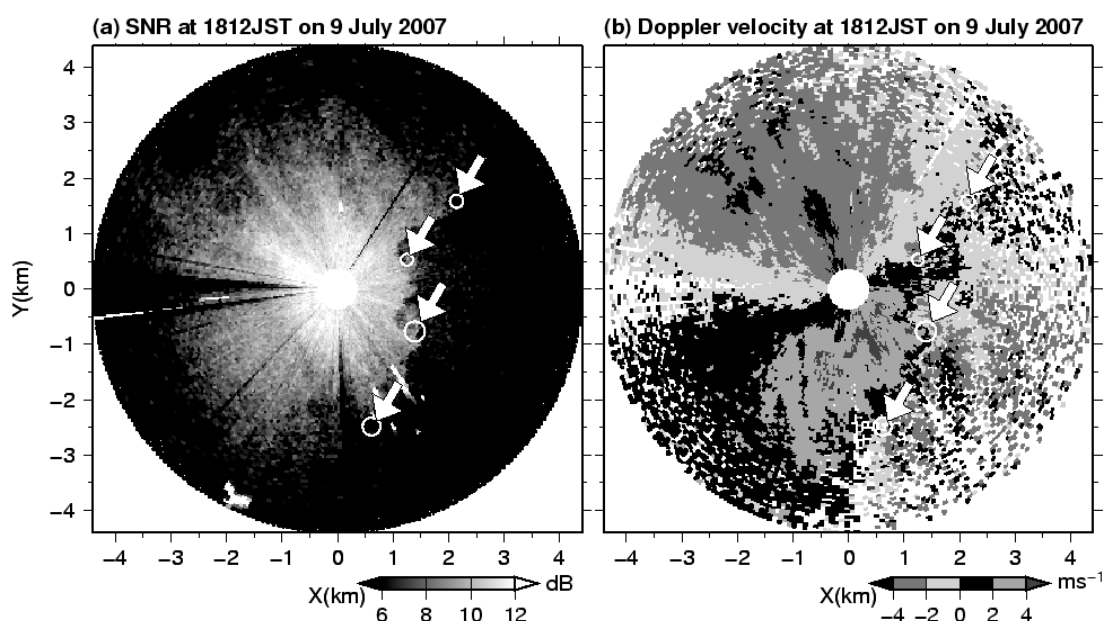


FIG. 1. (a) SNR and (b) Doppler velocity at an elevation angle of  $2.2^\circ$  in a PPI scan at 1812 JST on 9 June 2007. White arrows and circles indicate detected dust devil-like vortices.

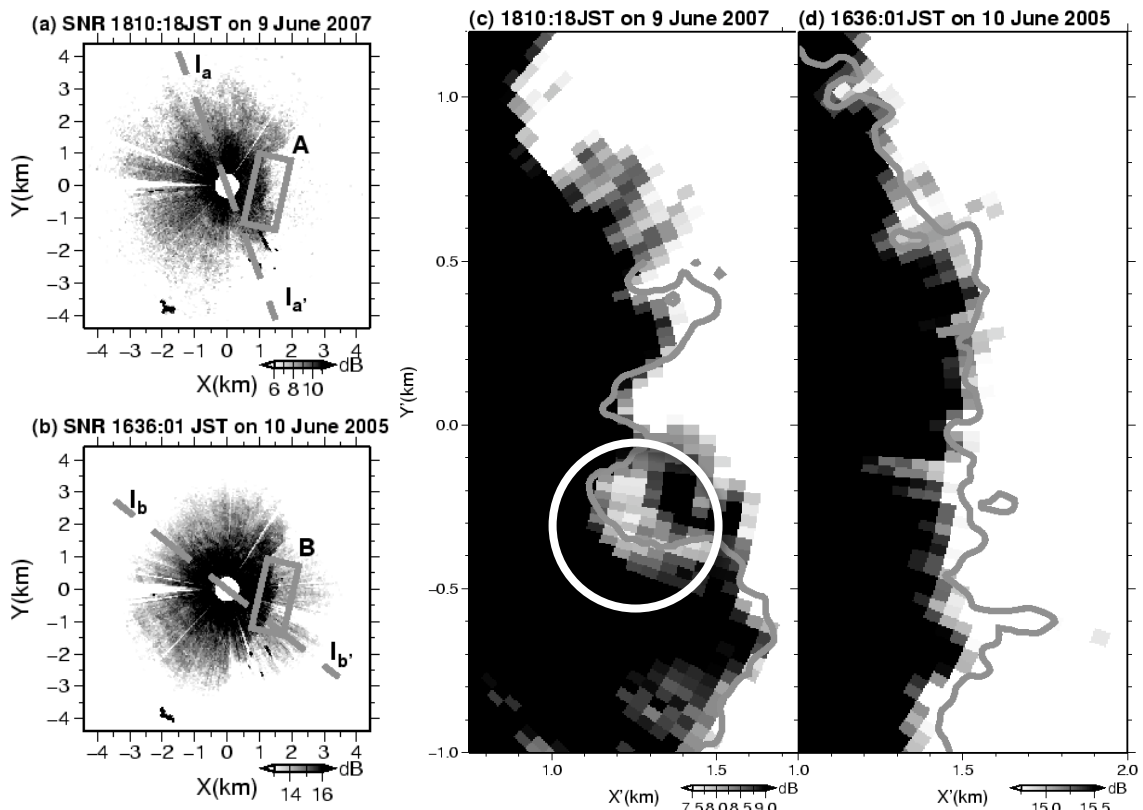


FIG. 2. SNR at an elevation angle of  $2.2^\circ$  in a PPI scan at (a) 1810:18 JST on 9 June 2007 and (b) 1636:01 on 10 June 2005. The square boxes A and B in (a) and (b) are expanded in (c) and (d), respectively. White circle indicate a detected DDV. Detailed SNR (shaded) and  $0 \text{ m s}^{-1}$  lines of Doppler velocity (gray lines) at (c) 1810:18 JST on 9 June 2007 and (d) 1636:01 on 10 June 2005.

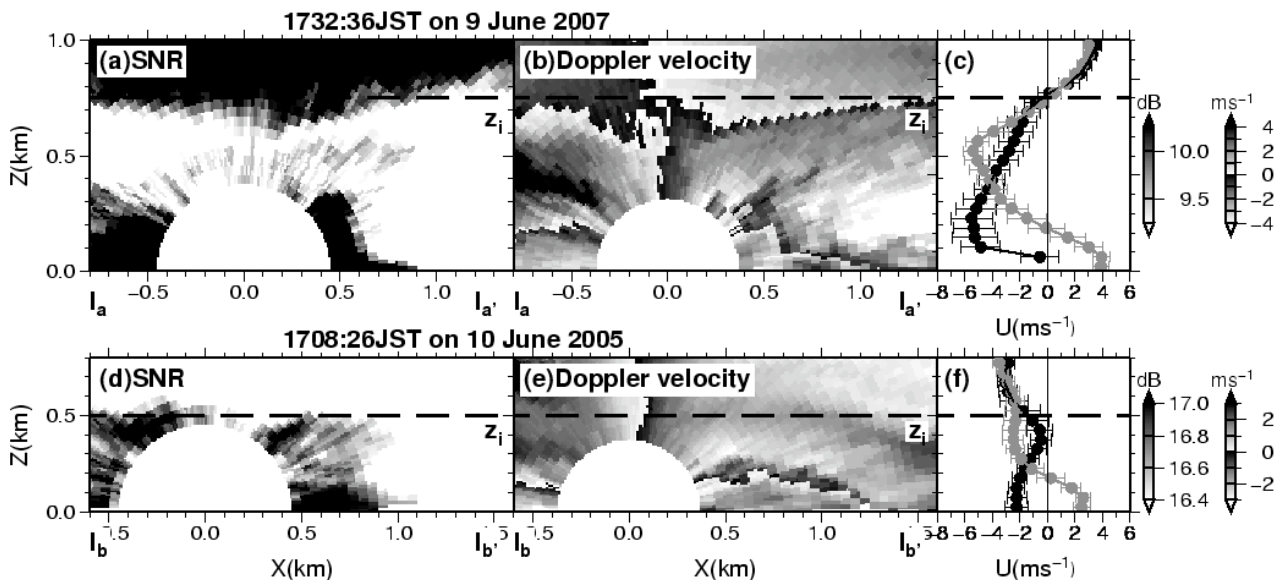


FIG. 3. Vertical cross section of (a) SNR and (b) Doppler velocity along  $I_a-I_a'$  in Fig. 2a at 1732:36 JST on 9 June 2007. (c) Vertical profile of the horizontal wind component along  $I_a-I_a'$  in Fig. 2a at prefrontal region (black) and post-frontal region (gray) derived from a RHI data from 1712:57 to 1734:41 JST. (d) and (e) are same as (a) and (b), respectively, but for the line  $I_b-I_b'$  in Fig. 2b at 1708:26 JST on 10 June 2005. (f) is same as (c) but for the time from 1706:19 to 1726:39 JST on 10 June 2005.