

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	ドップラーライダーによる都市上空の流れ分類
Title	
著者	八木綾子, 稲垣厚至, 有場次郎, 神田 学, 藤原忠誠, 藤吉康志
Author	unknown unknown, ATSUSHI INAGAKI, Jiro Ariba, MANABU KANDA
出典 / Citation	土木学会論文集B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_1753-I_1758
Citation(English)	, Vol. 69, No. 4, pp. I_1753-I_1758
発行日 / Issue date	2013, 3
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2013 Japan Society of Civil Engineers.

ドップラーライダーによる都市上空の流れ分類

CLASSIFICATION OF HORIZONTAL FLOW FIELD ABOVE AN URBAN AREA USING DOPPLER LIDAR

八木綾子¹・有場次郎²・稲垣厚至³・神田学⁴・藤原忠誠⁵・藤吉康志⁶
Ayako YAGI, Jiro ARIBA, Atsushi INAGAKI, Manabu KANDA,
Chusei FUJIWARA, Yasushi FUJIYOSHI

¹学生会員 東京工業大学理工学研究科 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

²非会員 東京工業大学理工学研究科 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 博(工) 東京工業大学理工学研究科 助教 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 工博 東京工業大学理工学研究科 教授 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

⁵非会員 博(環境科学) 気象研究所気象衛星・観測システム研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

⁶非会員 理博 北海道大学低温科学研究所 教授 (〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目)

The classification of horizontal flow field above an urban area were conducted using doppler velocity distribution observed by Doppler lidar. The Doppler lidar measurement used for the current analysis, was conducted in Tokyo, from 20 August to 24 November, 2011. The measured velocity fields were classified visually into 4 groups; streak, fish net, front, and the others. And the each groupe has the different range in magnitude of Velocity Azimuth Display (VAD) components; horizontal mean velocity, divergence and deformation. The atmospheric stability also affected to the existence of fish net pattern and to the spatial scale of streaky pattern. The effects of surface roughness and topography on the flow fields, such as the wakes of tall buildings triggering streaky patters and deformation of micro-front due to the small hills, were clearly illustrated.

Key Words : Doppler lidar, Atmospheric boundary layer, Velocity Azimuth Display

1. はじめに

都市において近年頻発している局所的豪雨や大気汚染などは、私たちの生活に大きく影響を与える大気環境問題である。これら諸問題を解決するためには、都市大気境界層における流れ場の把握が不可欠である。都市大気境界層における研究は急速に進んでおり¹⁾、建物群を解像した数値シミュレーションや(例えば宮本ら²⁾タワー観測(例えば森脇ら³⁾)が流れ場の理解に貢献しているが、都市境界層における流れの空間構造を実際にモニタリングした事例は極めて少ない。これには、ドップラーライダーが極めて有望である。ドップラーライダーは、大気中のエアロゾルのエコー情報から高時空間解像度で視線方向風速分布及び信号対雑音比(以下SNR)の測定が可能である。Chalhoun⁴⁾らは2台のドップラーライダーの観測値からオクラホマのピ

ジネス街南西領域の風速プロファイルを算出し、都市域の風下側における風速の減衰及び風向の変化を示した。小田ら⁵⁾は、ドップラーライダーを鉛直方向に固定することで風速の鉛直プロファイルを取得し、都市域の夜間における大気擾乱の特性を示した。藤吉ら⁶⁾によって行われた札幌におけるドップラーライダー観測では、水平ロール渦やプリューム構造が大気境界層内において度々出現することが示された。また、Fujiwara⁷⁾らは、札幌の都市域においてドップラーライダーで検出したダストデビル渦の回転方向がメソスケール循環に影響されることを示した。これらは、大気境界層の流れ場の瞬間像を捉えた画期的な研究であると言える。しかし、観測期間が限定的である、もしくは特徴的な流れの構造に着目しているため、都市域の大気境界層における流れの全体像の把握はこれからの課題といえる。

そこで、本研究は2011年7月に東京都目黒区に設置さ

れ、ルーチン観測を実施しているドップラーライダーの観測データを用い、都市境界層における流れの2次元水平風速場の分類を行う。解析は、夏季から秋季にかけてのおよそ2か月間のデータを対象として行った。Velocity Azimuth Display (VAD) 法⁸⁾により算出した水平発散・水平風速・水平変形を説明変数とし、別途、超音波風速計で観測した大気安定度も勘案して、目視で分類を行った流れ場との相関を考察する。さらに、微地形や地表面人工構造物といった地表面性状の影響が大気境界層の流れ場に顕著に見出されるケースを取り上げて議論する。尚、VAD法は、観測円内の平均風速及び平均風向などを算出する際に有効であり、風速の鉛直プロファイル算出時など、レーダー観測において広く活用されている手法である。本研究では、VAD法で算出される水平風速、水平発散、及び水平変形を指標として都市上空の流れ場の大局的な分類に利用した点が新しい。

2. 観測・解析概要

(1) 観測概要

観測には、三菱電機LR-02A、3次元走査型コヒーレントドップラーライダーを用いた。設置場所は東京都目黒区大岡山東京工業大学西八号館屋上 (35.60°N, 139.68°E, 海拔高度76.2m) である。観測領域は南西―北東方向に小高く微細な起伏を有し、(図-1) 周辺には住宅地が広がっている。ドップラーライダーの諸元は表-1に記した。本研究では、観測半径4275m (視線方向分解能50m, スキャン速度3degree/s), 俯角0.5°で全周に渡ってデータ取得するPlan Position Indicator (PPI) スキャンのデータを利用した。尚、連続した20回のPPIスキャン (1スキャンあたり2分) を1日当たり12セット実施した。

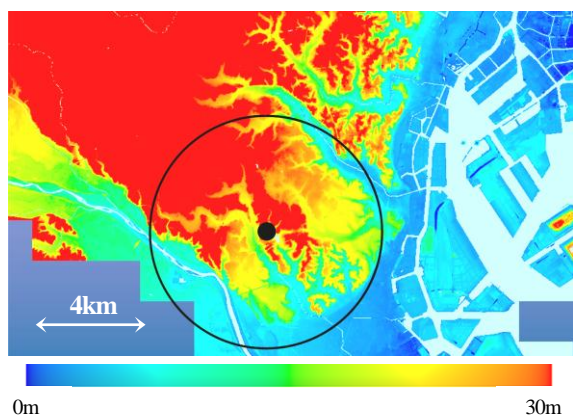


図-1 ドップラーライダーの観測領域の地形図 (国土地理院数値地図5mメッシュ標高)。円でドップラーライダーの観測領域 (半径4275m) を示す。

表-1 ドップラーライダーの諸元

Wavelength	1.54 μ m
Pulse length	213 \pm 10ns
Pulse repetition frequency	4kHz
Beam width	10cm

(2) VAD法による分類解析の流れ

a) 目視によるパターン分類

2011年8月20日から2011年10月23日のデータを目視によって「分類1: ストリーク構造」, 「分類2: 網目状構造」, 「分類3: 前線侵入」, 「分類4: その他」の計4つに分類した。各分類のドップラー速度分布の例を図-2に示す。赤は正の視線方向速度 (観測地点から遠ざかる方向), 青は負の視線方向速度 (観測地点に近づく方向) を意味する。「分類1: ストリーク構造」には、筋状の構造が確認できるものがほとんどであるが、筋状構造が見受けられない様風速場も一部含まれている。また、ストリーク構造と網目状構造の中間的なドップラー速度分布を示すもの、及び分類1, 分類2, 分類3に含まれないものを「分類4: その他」とした。

b) VAD法による水平風速・水平発散・水平変形の算定

VAD法において、観測円周上 (本研究では半径2025mとした) のドップラー速度はフーリエ級数の2次調波以下の成分で近似される ((1)式)。

$$V_r(\theta) = A_1 + A_2 \sin(\theta) + A_3 \cos(\theta) + A_4 \sin(2\theta) + A_5 \cos(2\theta) \quad (1)$$

$$A_{div} = A_1, A_{hv} = \sqrt{A_2^2 + A_3^2}, A_{def} = \sqrt{A_4^2 + A_5^2} \quad (2)$$

ここで、 θ : 方位角, $V_r(\theta)$: ドップラー速度 (観測値) を表す。本研究では、最小二乗法⁹⁾で係数 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 を算出し、(2)式で表される水平発散 (A_{div}), 水平風速 (A_{hv}), 水平変形 (A_{def}) を求めた。

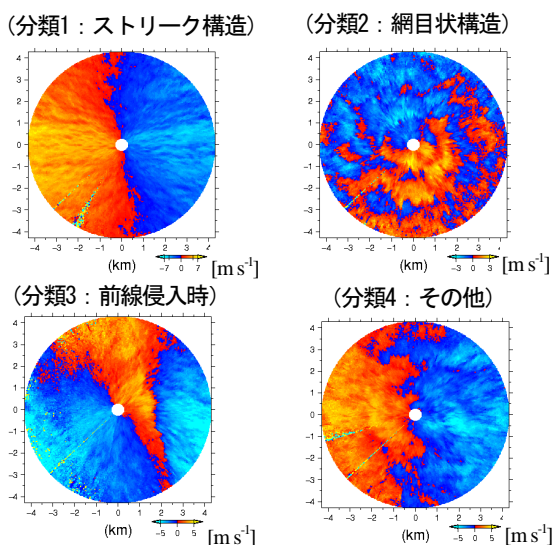


図-2 目視によるドップラー速度の分類例。赤は正、青は負の視線方向速度を示す。

尚、データの品質を維持するため、観測領域内で $SNR > 6$ の観測値が90%以上のデータのみ解析を行った。解析対象は、目視分類したデータ期間同様、2011年8月20日から2011年10月23日であり、解析データ数は11,491であった。

c) 大気安定度指標の算定

超音波風速計をドップラーライダー設置地点から約600m北西に位置する東京工業大学緑ヶ丘キャンパス1号館（地上高24.9m）屋上に設置し約10Hzで観測を実施し、2012年8月24日から2012年9月20日の風速及び気温データから大気安定度 (z/L) を算出した。ここで、 z は観測高度を、 L はモニンオブコフ長さを示す。ドップラーライダーのデータと超音波風速計のデータは同期していないため、ドップラー速度分布が示す流れ場と大気安定度に関する定量的な議論はできないが、計測時期（夏季終盤から秋）は同じであるため、大気安定度指標の日変化アンサンブル平均を参考して、時刻別の分類に間接的に使用した。

3. 結果と考察

(1) VAD法を利用した流れの大局的分類

a) VAD法により算出した各係数と各流れ場の相関

図-3に水平風速（以下 A_{uv} ）及び水平風速で無次元化した水平発散（以下 A_{div}/A_{uv} ）の散布図を示す。対数表示しているため、水平発散 ($A_{div} > 0$) を図-3(a)、水平収束 ($A_{div} < 0$) を図-3(b)に分けて示した。目視で行った分類間でプロットが重なる領域はあるものの、分類ごとにプロットは纏まって分布している。「分類1：ストリーク構造」は、 A_{hv} が大きく、 A_{div}/A_{hv} が小さい値を取り、「分類2：網目状構造」は、 A_{hv} が小さく、 A_{div}/A_{hv} が大きい値を取る傾向にある。これら「分類1：ストリーク構造」と「分類2：網目状構造」のプロット領域を繋ぐ様に、「分類4：その他」のプロットが分布する。また、「分類3：前線侵入時」は A_{div}/A_{hv} が大きい傾向にある。これは、前線侵入時、観測領域内で生じる強い収束場を反映していると考えられる。紙面の関係上、 A_{div}/A_{uv} についてのグラフのみを掲載し、 A_{def}/A_{uv} のグラフは割愛するが、 A_{def}/A_{uv} は A_{div}/A_{uv} と同様の傾向を有していた。以上のことから、VAD法によって算出した各係数の値は、各分類の特色を十分反映しており、流れの分類において有用な指標であると言える。

b) 4つの流れパターンの時間出現率

「分類1：ストリーク構造」は他の分類と比較的分離しており、条件 $A_{hv} > 7.9 \text{ m s}^{-1}$ によってストリーク構造の事例のみを抽出可能である（図-3）。一方、網目状構造については、プロットが他の分類と大きく重なっている。そこで、大気安定度の時間変化と風速パ

ターンの時間出現率を比較した。

図-4に超音波風速計の観測値から算出した大気安定度指標 (z/L) の日変化（33日平均）と各分類の時刻別出現頻度を示す。夜間の安定時には「分類1：ストリーク構造」が卓越しているが、大気安定度が小さくなると共に、「分類2：網目状構造」及び「分類4：その他」の出現が増加している。「分類2：網目状構造」の出現は、8時から12時までに限られている。しかも、 z/L のアンサンブル平均値が-10以下の不安定時である。また、6時の大気安定度は12時よりも小さいが、網目状構造が見出されていない。6時と12時では大気境界層高度に大きな違いがあると推測される。大気境界層の長さスケールは大気境界層高度によって規定されるが、本研究で用いた指標にその要素が含まれていない。大気境界層高度が高いほど大きなサーマルセルが発達しうることが知られているが、早朝の境界層高度が低い時間帯では大きな対流が発達することができず、地表摩擦で駆動される渦に飲み込まれてしまった可能性が考えられる。大気安定度 (z/L) の算出において、 z を大気境界層高度として算出した大気安定度¹⁰⁾による網目状構造の発生要件の考察は今後の課題である。

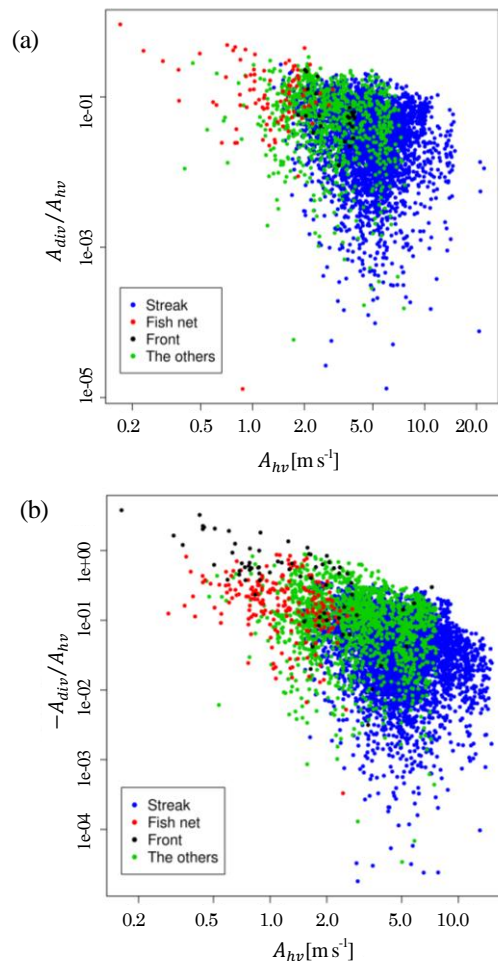


図-3 水平風速と水平風速で無次元化した発散。(a) 水平発散 ($A_{div} > 0$)、(b) 水平収束 ($A_{div} < 0$)

c) 時間帯（大気安定度）による流れ分類

大気が不安定で網目が出現している8時から12時を不安定時、大気が非常に安定な22時から2時を安定時とし、それぞれの時間帯で A_{hv} と A_{div}/A_{hv} の散布図を対数表示で図-5、図-6に示す。網目状構造とストリーク構造の中間的な構造を含む「分類4：その他」の分布域は、不安定時、 $0.79 < A_{hv} < 7.9 \text{ m s}^{-1}$ （分散 $\sigma_{A_{hv}} = 2.4$ ）であるが、安定時、 $0.40 < A_{hv} < 4.5 \text{ m s}^{-1}$ （分散 $\sigma_{A_{hv}} = 0.70$ ）であり、安定時において、不安定時よりも限定的な風速条件で発生しているのが分かる。

次にストリーク構造の空間的分布と大気安定度について、2つの事例を取り上げ考察する。表-2に、12時49分（以下日中ケース）と20時47分（以下夜間ケース）に観測されたドップラー速度分布にVAD法を適応して得られた各係数を示す。VAD法で算出した各係数は、日中ケースと夜間ケースでほとんど差異はない。しかしながら、夜間ケースの時刻（21時頃）は中立立場であるのに対し、日中ケースの時刻（13時頃）は不安定場となっており、鉛直対流によって地表面から大気境界層内に顕熱が盛んに供給されていると考えられる（図-4）。図-7に日中ケースと夜間ケースのドップラー速度分布、及びドップラー速度の変動成分（ドップラー速度とVAD法で算出した水平風速の差分の絶対値）を示す。夜間ケース（図-7 (b)）では、高速域と低速域から構成される筋状構造はきめ細かく並んでいる。一方、日中ケース（図-7 (a)）では、筋状構造は不規則に分布し、筋の間隔が夜間ケースに比べて広い。これは、LESを利用した再現実験において、地表面から顕熱フラックスを与えた場合、ストリーク構造の間隔が広くなるという山下ら¹¹⁾の結果と矛盾しない。

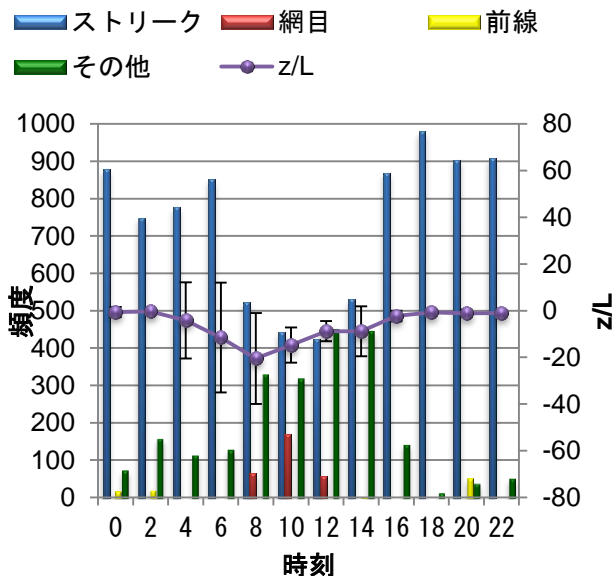


図-4 大気安定度の日変化の平均（2012年8月24日から9月20日）、及び流れパターンの時刻別出現頻度。安定度プロットのバーは誤差範囲を示す。

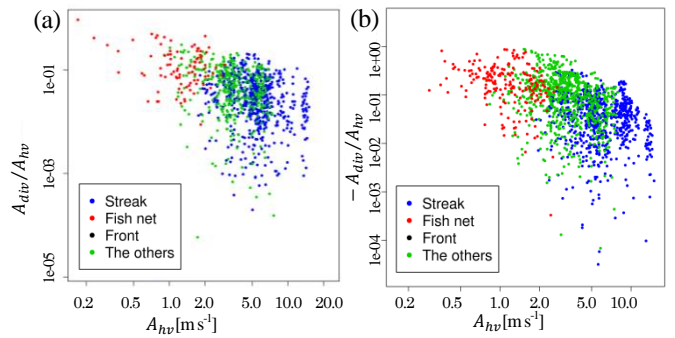


図-5 不安定時（8-12時）の A_{hv} と A_{div}/A_{hv} の散布図。(a) 水平発散 ($A_{div} > 0$)、(b) 水平収束 ($A_{div} < 0$)。

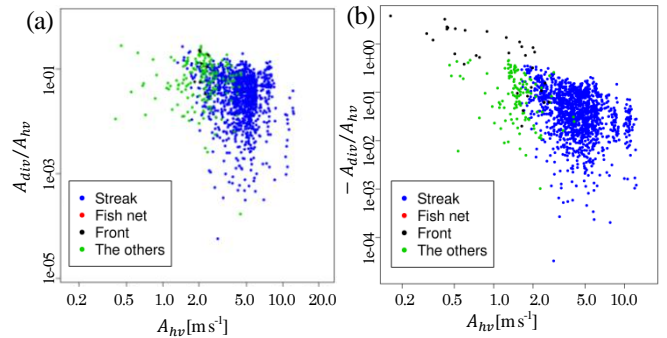
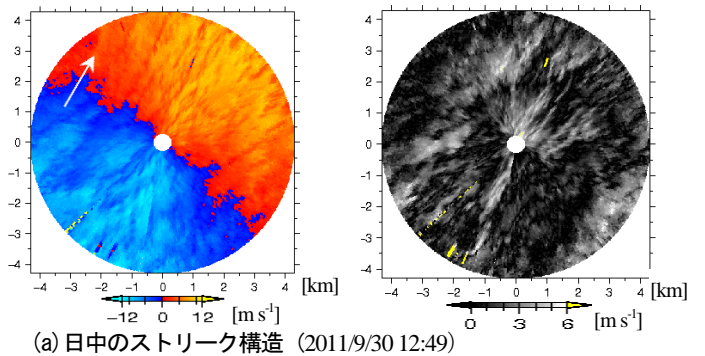
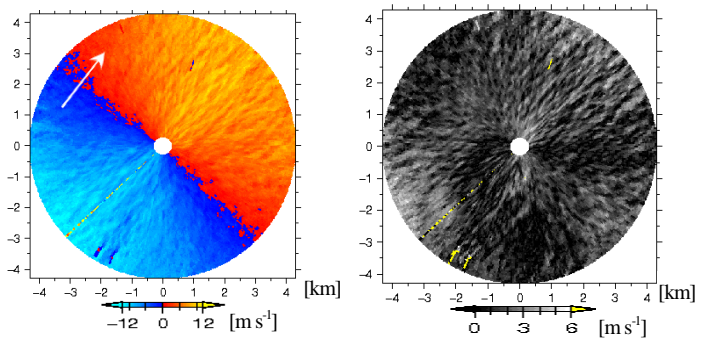


図-6 安定時（22-2時）の A_{hv} と A_{div}/A_{hv} の散布図。(a) 水平発散 ($A_{div} > 0$)、(b) 水平収束 ($A_{div} < 0$)



(a) 日中のストリーク構造（2011/9/30 12:49）



(b) 夜間のストリーク構造（2011/10/16 20:47）

図-7 ストリーク構造のドップラー速度（左）、ドップラー速度変動成分の絶対値（右）。白矢印で主流風向を示す。

表-2 ストリーク構造卓越事例の VAD 法で算出した各係数値。

観測日時	A_{div}	A_{hv}	A_{def}
(a) 2011/9/30 12:49	1.0 m s^{-1}	8.2 m s^{-1}	0.54 m s^{-1}
(b) 2011/10/16 20:47	0.70 m s^{-1}	8.4 m s^{-1}	0.58 m s^{-1}

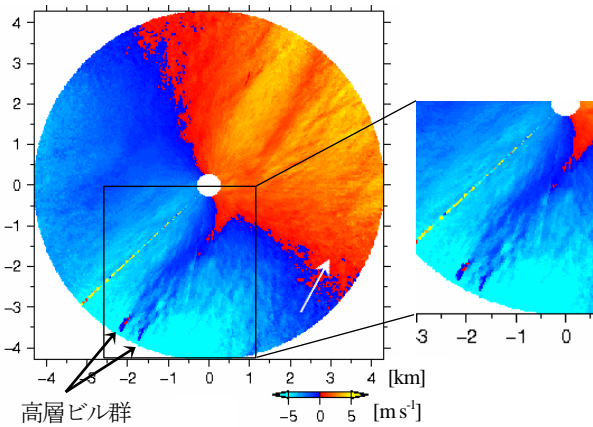


図-8 高層ビルの後流 (2011/9/30 02:29) . 白矢印で主流風向を示す.

(2) 流れ場の特徴と微地形の関係性

a) 高層ビルの後流

ドップラーライダー観測により、藤吉ら¹²⁾は、ストリーク構造が卓越する風速場において、高層ビルの後流域でストリークの微細構造が変化していることを報告している。本研究の解析データにおいても、明瞭なビルの後流が確認された。図-8に2011/9/30 02:29のドップラー速度分布を示す。高さ130mを超える高層ビル群の後流は主流風向に沿って観測領域内8km全域に渡って伸びている。また、2つの高層ビル群の後流は風下で合流し、幅約700mに渡る弱風域を形成している。次に、ストリーク構造卓越時における弱風域の定常性と高層ビルの関係について考察する。図-9にドップラー速度分布の瞬間値、及びドップラー速度の絶対値の30分間アンサンブル平均を示す。瞬間値(図-9(a))において、主流方向に沿ったストリーク構造に伴う弱風域が9本存在しているが、アンサンブル平均値(図-9(b))において、明瞭な弱風域は2本であり、その他のストリーク構造はドップラー速度の時間変動により相殺されている。これは、30分程度の時間スケールにおいて、空間的分

布が保持される弱風域と、空間分布の時間変動が大きい弱風域が共存することを示唆する。弱風域A(図-9(b))は観測円内の高層ビルの後流域に相当している。一方、弱風域B(図-9(b))は要因となり得る高層ビルが観測円内に見受けられない。そこで、弱風域Bの風上の延長線上において高層ビルを探索したところ、観測地点からおよそ8km南南東に位置する川崎駅周辺に高さ100mを超える高層ビル群が存在していた。観測領域内の武蔵小杉のビルが8km以上に渡って後流を形成していることを加味すると、川崎駅周辺の高層ビルが弱風域Bの形成要因となっている可能性がある。

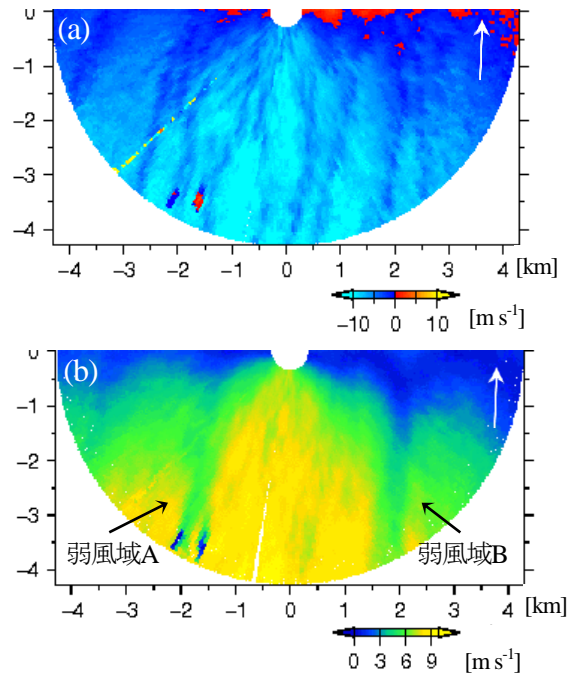


図-9 ストリーク構造卓越時のドップラー速度分布。(a) 瞬間値 (2011/8/23 16:33), (b) 平均値 (2011/8/23 16:13から16:43に観測された20スキャン分) . 白矢印で主流風向を示す.

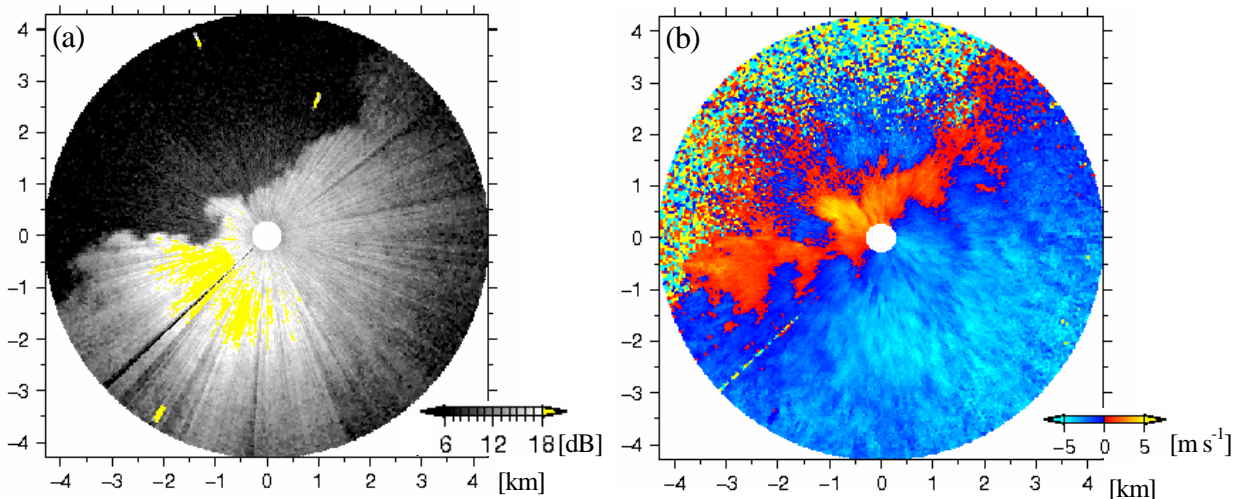


図-10 前線侵入時 (2011年10月6日14:25) の(a) SNR分布, 及び(b) ドップラー速度分布.

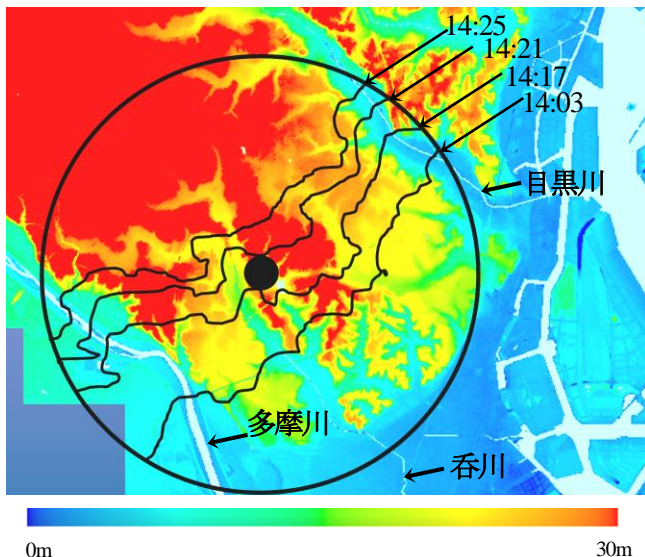


図-11 ドップラーライダーの観測領域の地形図、及び前線先端の空間分布。(地形図は国土地理院数値地図5mメッシュ標高を利用し、前線の先端はSNR分布の不連続線から抽出した。)

b) 微地形に沿った前線の侵入

図-10に2011年10月6日14:25のドップラー速度分布、及びSNR分布を示す。該時刻において、高いSNRを伴った前線が南東から南西に通過している。図-11に国土地理院が提供する5mメッシュ標高、及び4時刻(14:03, 14:17, 14:21, 14:25)におけるSNRの不連続線を示した。観測領域内には、多摩川、呑川、目黒川が南東-北西方向に流れ、それぞれの河川に沿って谷が形成されている。これらの谷領域に沿って、前線が先進しているのが分かる。定点観測では前線の進行を面的に捉えることはできないが、ドップラーライダーによって前線の進行を面的に把握できる。今後、地表面性状(地表面粗度、地表面の熱的要因など)が前線の侵入挙動に与える影響を検証する予定である。

4. 結論

東京都目黒区東京工業大学(海拔高度76.2m)に設置したドップラーライダーにより観測された、約2か月間のドップラー速度分布を目視で4つに分類し、半径2025mの円周上におけるVAD解析によって、水平発散、水平風速、水平変形を算出した。算出された各係数の値は、目視で行った分類ごとに纏まって分布しており、VAD解析で得られる各係数は、流れ場の分類に有効な指標であることが示唆された。「分類1:ストリーク構造」は、 A_{hv} が大きく、 A_{div}/A_{hv} が小さい値を、「分類2:網目状構造」は、 A_{hv} が小さく、 A_{div}/A_{hv} が大きく、大気安定度が小さい環境場で出現することが分かった。年間を通じたデータ解析及び、大気安定度指

標や大気境界層高度などの指標も勘案した流れ場の分類は今後の課題である。また、地面の微細な起伏、人工建造物などの地表面性状の影響が大気境界層流れに顕著に表れた事例を取り上げ、議論した。微地形が流れ場に与える効果を定量的に評価することは今後の課題である。

謝辞:本研究は文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム」、科学技術戦略推進費「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」、及び科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号:21360233)による支援を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 神田 学編: 気象研究ノート第224号「都市の気象と気候」, 日本気象学会, 2012.
- 2) 宮本崇史, 稲垣厚至, 神田 学: 3次元建物GISを用いたLESによる東京街区の流体力学的パラメタリゼーション, 水工学論文集, 56, 1801-1807.
- 3) 森脇亮, 神田学, 木本由花, 2004: 都市境界層における風速・温度のシア関数, 水工学論文集, 48, 139-144.
- 4) Calhoun, R., Heap, R., Prinvevac, M., Newsom, R., Fernando, H., Ligon, D., 2006: Virtual Towers Using Coherent Doppler Lidar during the Joint Urban 2003 Dispersion Experiment, *Journal of Applied meteorology and climatology*, 45, pp.1116-1126.
- 5) 小田僚子, 岩井宏徳, 稲垣厚至, 石井昌憲, 佐藤晋介, 関澤信也, 水谷耕平, 村山泰啓, 2012: ドップラーライダー観測に基づいた都市域の夜間安定境界層内乱流現象, 水工学論文集, 56, 1777-1782.
- 6) 藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠, 2005: 3次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる大気境界層の流れの可視化, 天気, 52, 665-666.
- 7) Fujiwara et al., 2012: Rotation Sense of Dust Devil-Like Vortices, *Large Eddy Simulatio, SOLA*, 8,025-028.
- 8) Browning, K. A. and Wexler, R., 1968: The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar, *Journal of Applied meteorology and climatology*, 7, pp.105-108.
- 9) 坪木和久, 若浜五郎, 1988: 1台のドップラーレーダーを用いた風速場の測定法: 最小二乗法を用いたVAD解析, 低温科学 物理篇, Vol47, pp.73-88.
- 10) Grosman, R. L., 1982: An analysis of vertical velocity spectra obtained in the BOMEX fair-weather, tradewind boundary layer, *Bound. Layer Meteor.*, 23, 323-357.
- 11) 山下和也, 藤原忠誠, 中西幹朗, 藤吉康志, 2008: 大気境界層に普遍的に存在するストリーク構造の特性, 社団法人日本気象学会 大会講演予稿集, 93, 288
- 12) 藤吉康志, 藤原忠誠, 2012: 「高層気象観測篇」, 気象研究ノート224号, 第2章. (印刷準備中)

(2012. 9. 30受付)