

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ドップラーライダー視線方向速度のパターン追跡による2次元風速場の推定
Title(English)	
著者(和文)	八木綾子, 瀧本浩史, 藤原忠誠, 稲垣厚至, 藤吉康志, 神田 学
Authors(English)	unknown unknown, Hiroshi Takimoto, ATSUSHI INAGAKI, MANABU KANDA
出典(和文)	土木学会水工学論文集 B1(水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I_1783-I_1788
Citation(English)	, Vol. 68, No. 4, pp. I_1783-I_1788
発行日 / Pub. date	2012, 3

ドップラーライダー視線方向速度のパターン追跡 による2次元風速場の推定

ESTIMATION OF CIRCUMFERENTIAL VELOCITY FROM OBSERVED RADIAL VELOCITY --- Velocity Image Velocimetry (VIV) ---

八木綾子¹・瀧本浩史¹・藤原忠誠²・稲垣厚至³・藤吉康志⁴・神田 学⁵

Ayako YAGI, Hiroshi TAKIMOTO, Chusei FUJIWARA,
Atsushi INAGAKI, Yasushi FUJIYOSHI, and Manabu KANDA

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 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)

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)

⁵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)

We propose a new measurement technique, Velocity Image Velocimetry (VIV), to obtain two-dimensional velocity fields in the atmosphere. Observational data was obtained by one Doppler lidar, and a pattern tracking method was applied to the radial velocity fields. The lidar observation was conducted at an urbanized area in Tokyo. We analysed three cases which have different mean wind speeds and flow structures. The nondimensional radial velocity error is 20 to 40 percent. It is suggested that there are a proper time interval of the lidar scanning depending on the mean wind speed, and the interval should be constant. We also applied a simple velocity correction method using observed radial velocity, and compute two-dimensional divergence fields. By comparing with the distributions of radial divergence, analyzed 2D divergence fields reproduce more realistic values, indicating the validity of VIV.

Key Words : Doppler lidar, Particle image velocimetry, Velocity Image Velocimetry

1. はじめに

都市型集中豪雨の監視と予測に気象レーダーは不可欠であり、最近では、マルチパラメーターレーダー¹⁾やKuレーダーなど、その精度向上には著しいものがあり、また、短時間降雨の予測技術も進展している²⁾。その一方で、気象レーダーでは降水粒子形成前(晴天時など)の大気状態を観測することはできないため、集中豪雨の前兆現象を検出することは難しい。神田ら³⁾は、集中豪雨発生の前兆現象として、GPS可降水量と地上風速収束に着目し、いずれも集中豪雨ピークの1~2時間前に顕著なシグナルを検出できることを指摘した。そこでの地上風速は、環境省の大気環境データネットワークを使用

しており、時空間解像度が不足していた。

ここでは、新たなリモートセンサーとしてのコヒーレントドップラーライダーによる地上2次元風速場および、その収束・発散場の推定可能性について検討する。コヒーレントドップラーライダーは、大気中の微粒子のエコー情報から無降水時のレーザー視線方向速度を高い空間解像度で取得することが可能であり、すでに大気境界層の乱流観測で大きな成果を上げている。藤吉ら⁴⁾は、ドップラーライダーで観測を行い、札幌上空で発生した渦状の水平ロール渦やプリューム構造を報告している。また、藤原ら⁵⁾は、札幌においてダストデビル状の鉛直渦構造の観測に成功し、小田ら⁶⁾は、ドップラーライダーを鉛直方向に固定し、長時間観測することで安定した都市大気混合層の乱流統計量を導出している。

しかしながら、大気の水平収束を得るためには、1次元風速（視線方向成分）では不十分で、2次元の風速成分が必要となる。2次元風速を算出する方法として、1台のドップラーライダーから検査範囲内の風速が一様であることを仮定して、その2次元風速場を計算するVVP法⁷⁾や、2台のドップラーライダーを利用するデュアルドップラー法⁸⁾などがある。VVP法は、基本的には観測される視線方向速度データ情報だけを用いているのであって、point to pointで円周角方向の情報を得ているわけではない。デュアルドップラー法は理想的であり、豊田ら⁸⁾の観測例に示されるように、その有用性は高い。しかしながら、2台の高額なドップラーライダーを併用すること自体が容易でない。

そこで本研究では、パターン追跡により、視線方向速度の分布パターンの移流速度を算出し、1台のドップラーライダーから2次元風速を取得することを試みる。この発想は、Particle Image Velocimetry (PIV) のアナロジーから来ている。PIV法は粒子の移動パターンから流速・風速を同定するのに対して、本研究では、粒子パターンの代わりに、視線方向ドップラー速度を使用する点が新しい。そこで、これをVelocity Image Velocimetry (VIV) と呼ぶことにする。ドップラーライダーからはエコー強度の分布も得られるが、外周部のエコー強度は内円部のエコー強度に依存し、2時刻間でその分布パターンは大きく変化してしまうため、パターン追跡には適さない。本稿では、東京工業大学に設置されたドップラーライダーによって2011年8月に得られた3事例において2次元風速を算出し、その精度検証を行う。

2. 観測・解析概要

(1) ドップラーライダー

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（海拔高度 76.2m）である。ドップラーライダーの諸設定は表-1に記した。

表-1 ドップラーライダーの諸設定

観測パラメータ	信号対雑音比 (SNR), 視線方向速度
観測範囲	350~8250 m
解像度	視線方向 100m, 円周角方向 約 0.8degree,
走査法, 俯角	PPI 走査, 0.5 degree
スキャン速度	3 degree/s

(2) パターン追跡

パターン追跡には、加賀ら⁹⁾の輝度差累積法を用いた。各事例において20スキャン分のデータを使用し、19枚の2次元風速ベクトル図を得た。事例の詳細は表-2に示す。以下に、パターン解析において行った処理や設定などについて述べる。

a) データの前処理

ドップラーライダーによる観測データの視線方向レンジは一定であるが、スキャン速度に僅かな変動

があるため、円周角方向の観測座標は2スキャン間で一致しない。パターン追跡をする際、同じ格子点を有する2スキャン分のデータが必要となるため、円周角方向に1°の解像度で新たな格子点を用意し、線形内挿により格子点上の値を定めた。その後、パターン追跡を行うために、図-1に示すよう線分ABで切り込みを入れて、円周角方向に引き延ばすことで長方形に展開しデカルト座標に変換する。パターン追跡は、この長方形デカルト座標で行い、その結果を逆プロセスで極座標に戻す。この方が、極座標のままパターン追跡するより精度が良い。極座標のままでのパターン追跡は、観測データの解像度が観測点からの距離に依存してしまうなどの問題点が生じ、精度が劣化することがある。これは、Kim et al¹⁰⁾により体内のMRI画像を利用したPIV解析においても指摘されている。このとき、視線方向への移動は速度パターンの拡大縮小を伴うが、そもそも変位量が小さいため影響が限定的であるのに加え、影響を受ける視線方向速度については、観測値による精度検証が可能である。

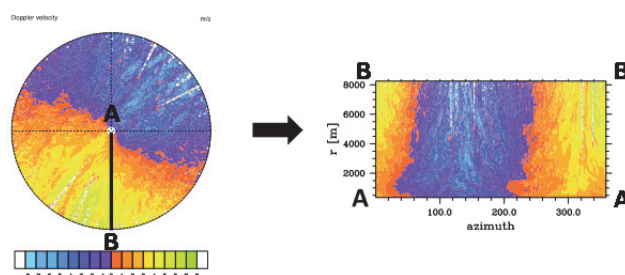


図-1 データの切り出しと座標変換。

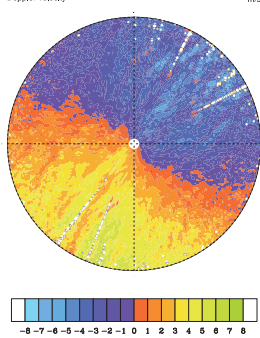
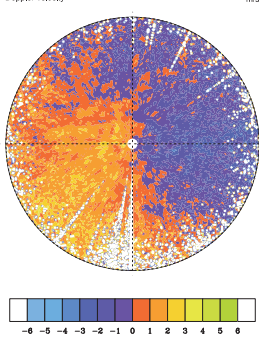
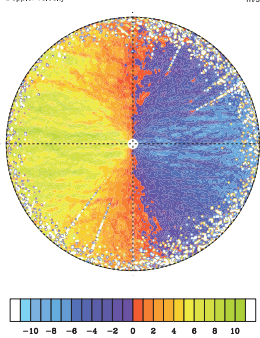
b) 検査領域

輝度差累積法では、1スキャン目のある格子点を中心とした小領域内の速度分布と最も相関が高くなる小領域を2スキャン目のデータから探索し、小領域間の距離をその格子点における変位量とする。この小領域を検査領域と呼び、そのサイズを適切な大きさに設定する必要がある。本稿では、出力ベクトルの精度と局所的な風速場の再現性を考慮し、検査領域を15×15ピクセルの正方形とした。1ピクセルの大きさは、実スケールに換算すると、 $\pi r/180[m] \times 100[m]$ に相当する（ r は視線方向の座標を意味し、範囲は $350 < r < 8250[m]$ ）。

c) 誤ベクトルの除去

視線方向速度の算定値には一般に多くの異常値が存在する。視線方向速度が平均風速からかけ離れた値をとる格子点の信号対雑音比（以下SNR）は全ての計測事例においてほぼ8以下となっていたことから、SNRに閾値を設け、閾値以下のSNRを持つ格子点では速度解析を行わないようにした。当然のことながら、SNRの閾値が大きくなるに従い、真値と明らかに異なる誤ベクトルの数は減少するが、同時

表-2 観測事例の詳細. 空間平均視線方向速度はパターン解析に用いた 20 スキャンのアンサンブル平均.

計測時刻	2011 年 8 月 1 日 00:10:09～00:51:02	2011 年 8 月 2 日 08:09:54～08:50:02	2011 年 8 月 4 日 20:14:12～20:55:06
空間平均視線方向速度	2.51[m/s]	1.90[m/s]	4.60[m/s]
支配的な乱流構造	ストリーク構造	網目構造	ストリーク構造
ドップラー速度分布			

に出力ベクトルの総数も減少する. 本論文では, ドップラー速度の異常値の影響が効果的に除かれ, より多くのベクトルが得られる SNR=6 を閾値とした. また, 周囲のベクトルとの差異による誤ベクトル判定など, PIV 解析において一般的に用いられる誤ベクトル除去¹¹⁾も行った. 次章以降, 特に記述がない限り, 誤ベクトル除去後の結果を用いる.

3. 結果と考察

(1) 解析精度と時間差 dt の関係

ドップラーライダーのスキャンは一定方向に回転し続けるのではなく, 1 スキャンごとに逆回転するため, 解析に用いる 2 スキャン分のデータの時間差 (以下 dt) は円周角によって異なる. 観測された視線方向速度 (V_{rl}) の 2 時刻平均 ($\widehat{V}_{rl}$) とパターン追跡によって算出される視線方向速度 (V_{rp}) との偏差を評価するため, 以下の式により正規化された風速誤差 $dV(\theta, r)$ を求めた (θ は円周角座標, r は視線方向座標を表す). 尚, パターン追跡により算出した風速は 2 時刻間の平均となっているため, 比較指標として, $\widehat{V}_{rl}$ を用いた.

$$dV(\theta, r) = \frac{|\widehat{V}_{rl}(\theta, r) - V_{rp}(\theta, r)|}{\widehat{V}_{rl}} \quad (1)$$

$\widehat{V}_{rl}(\theta, r)$: ドップラーライダーにより観測された
視線方向速度の 2 時刻平均

$V_{rp}(\theta, r)$: パターン追跡により算出された視線方向速度

$\widehat{V}_{rl}$: 空間平均視線方向風速(値は表-2 参照)

2011 年 8 月 1 日のデータのうち, ドップラーライダーのスキャン方向が等しい 9 枚のベクトル分布から算出した $dV(\theta, r)$ を, 各格子点でアンサンブル平均し,

図-2 に, その空間分布を示した. $dV(\theta, r)$ は視線方向に依存していないが, ドップラーライダーが 1 スキャン毎に逆回転するため, 円周角 (つまり dt) に依存している. これは, dt が大きくなるに従い, ドップラー速度分布が大きく変化し, パターン追跡が困難になるためである.

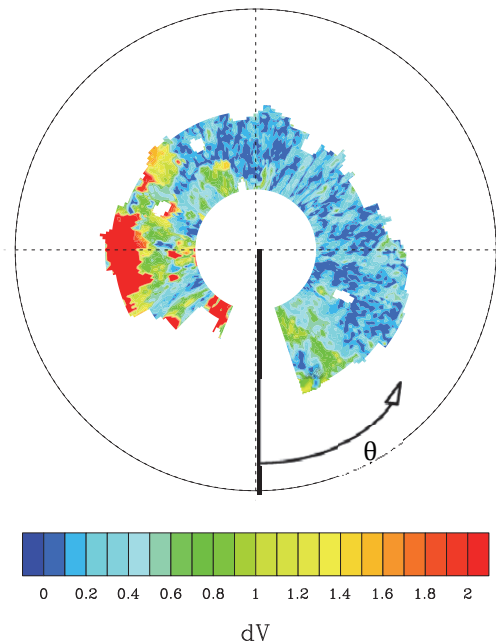


図-2 風速誤差 $dV(\theta, r)$ と時間差 dt の関係. 黒い太線で $\theta = 0[deg]$ を示す.

次に, 3 事例における $\overline{dV(\theta)}$ と円周角 θ に対応する時間差 dt との関係を図-3 に示す. $\overline{dV(\theta)}$ は式 (1) により各点で算出した $dV(\theta, r)$ を視線方向に平均した値で, いずれの事例についても dt が小さい領域では精度が良いが, dt が大きくなるにつれ, $\overline{dV(\theta)}$ が増加していることが分かる. また, $dt < 30s$ の領域においては, dt が小さいにも関わらず精度が悪化して

いる．一般的な PIV の精度は 0.1 ピクセル程度と言われており¹²⁾， dt が小さな領域では，速度パターンの移動量が小さくなるため（1 ピクセル以下），計測のダイナミックレンジを十分確保できず，精度悪化の要因となっている．また，空間平均視線方向速度が速い程，小さな dt で $\overline{dV(\theta)}$ が増加し始めている．そこで， dt に $\overline{V_{rl}}$ （空間平均視線方向速度，値は表-2 参照）を乗じた値， $D[m]$ を新たに横軸にすると（図-4），いずれの事例においても， $\overline{dV(\theta)}$ が増加し始める点は，およそ $D = 300[m]$ （6 ピクセル相当）である． D は， dt 間の大気平均移動距離を示している．3 事例共に， $100 < D < 300[m]$ において，風速誤差は 20~40%であり，豊田ら⁸⁾が報告したデュアルドップラー法による二次元風速の風速誤差 20%と同等に近い精度を持っている．ただし，ドップラーライダー自身の観測誤差を考慮していない点，出力ベクトルは検査領域内での空間平均になっている点も精度検証の結果に寄与していると考えられる．

(2) 視線方向速度推定値と観測値の比較

$\widehat{V_{rl}}$ と V_{rp} （3. (1)参照）の相関プロットを図-5 に示す．ただし，高精度域（カラー）とその他の領域（灰色）を色別にプロットした（ $100 < D < 300[m]$ を高精度領域とした．図-4 参照．）．観測値とのばらつきが大きい領域もあるが，高精度域ではほぼ 1 対 1 の線に沿って帯状に分布しており，十分な精度を有している．

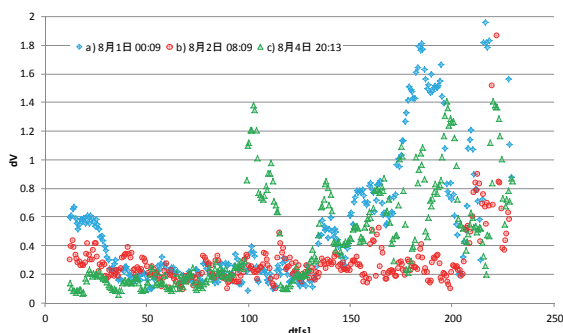


図-3 3事例における風速誤差 $\overline{dV(\theta)}$ と時間差 dt ．

次に，視線方向速度の空間分布を比較する．図-6 は，8 月 1 日の事例から得られた観測値と推定値の視線方向速度分布を示している．前述の通り，推定値は検査領域の大きさに依存する空間平均となるため，風速パターンが平滑化され，微細な構造までは再現できていないが，大局的には良く一致していることが分かる．円周角速度の同定については，観測値との比較ができないため精度の検証が難しいが，VIV の性質上，視線方向速度の算出法と根本的な差異はなく，極座標-デカルト座標変換が影響を与えるのは視線方向速度の解析であるため，視線方向速度と同様の精度を有していると考えられる．

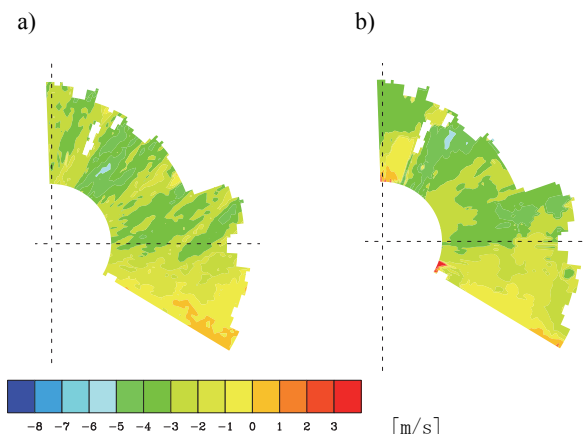


図-6 視線方向速度空間分布． a) 2時刻平均観測値， b) 解析値． 2011年8月1日（ $41s < dt < 124s$ ）．

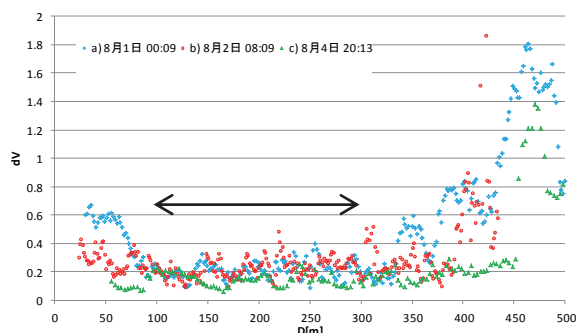


図4 3事例における風速誤差 $\overline{dV(\theta)}$ と $D = dt \times \overline{V_{rl}}[m]$ ．
黒矢印は高精度とみなした領域．

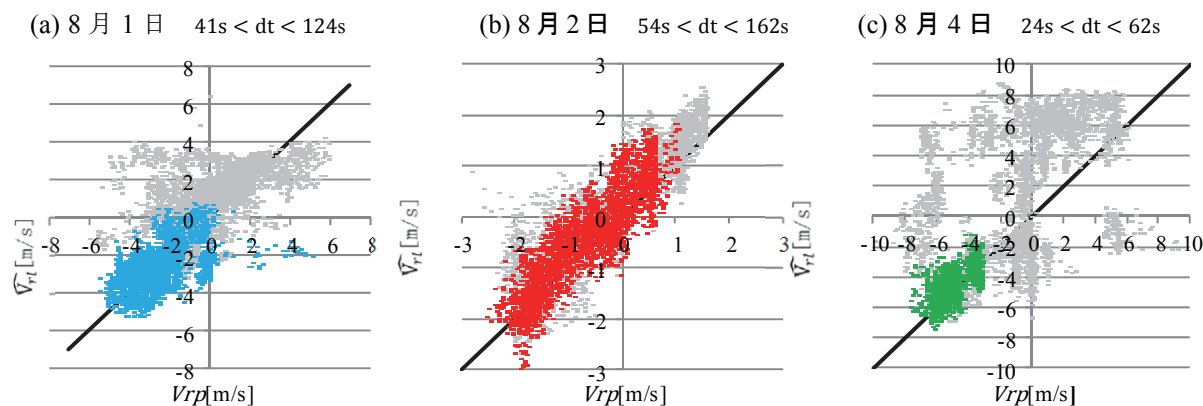
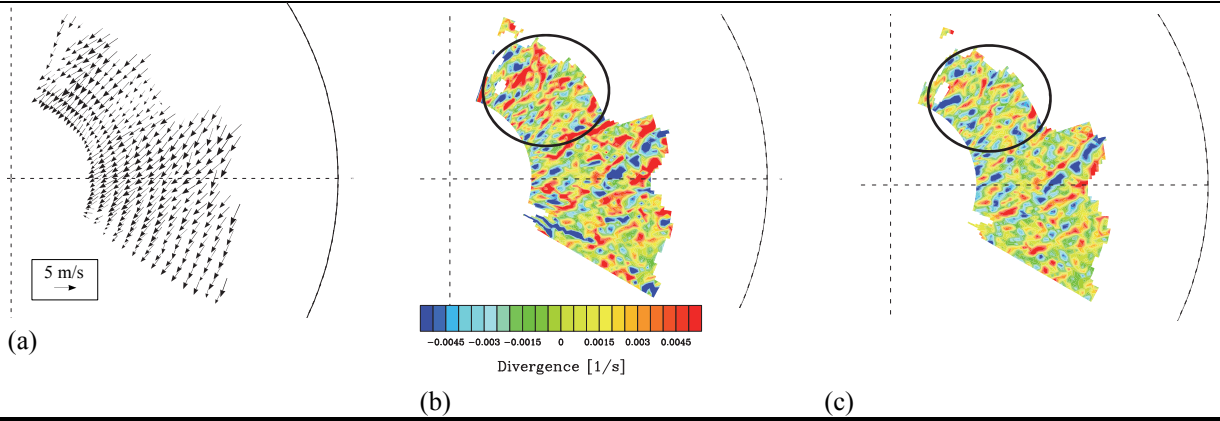
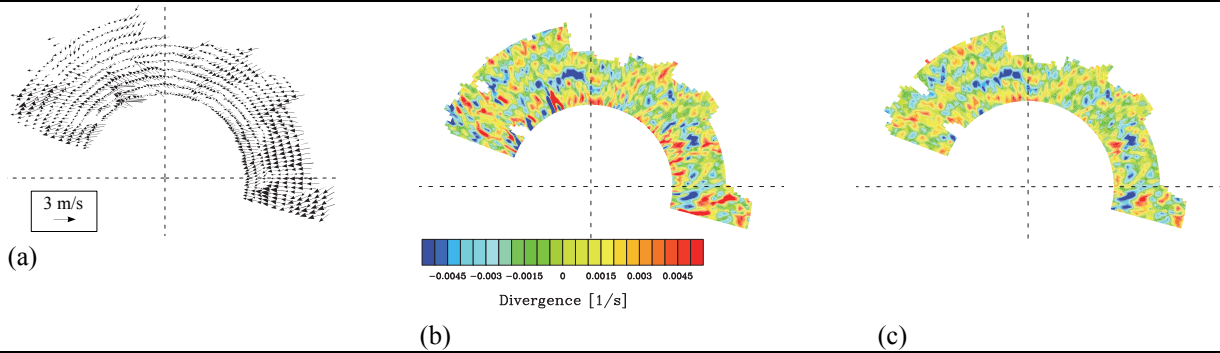


図-5 視線方向速度の観測値（ $\widehat{V_{rl}}$ ）と解析値（ V_{rp} ）の相関図．実線は 1 対 1 を表す．

8月1日 (41s<dt<124sの領域を図示)



8月2日 (54s < dt < 162sの領域を図示)



8月4日 (24s < dt < 64sの領域を図示)

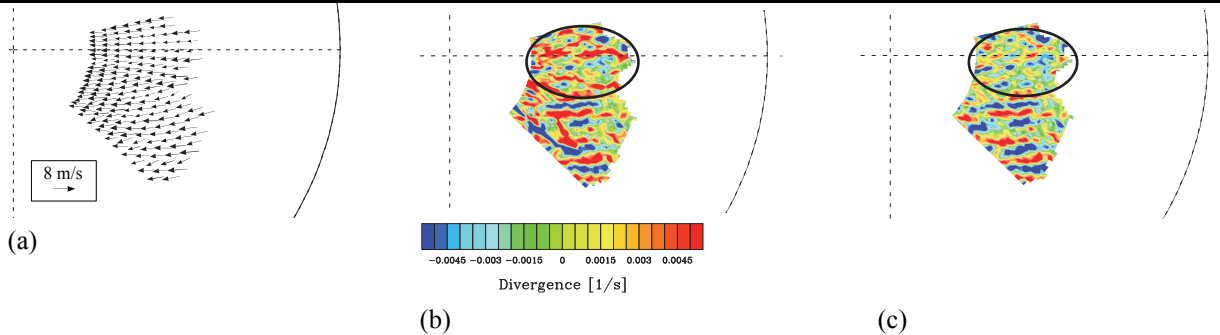


図-7 収束分布と最終2次元風速場.

(a) 2次元ベクトル図, (b) 2次元風速場から算出した収束場, (c) 視線方向速度から算出した収束場.

(3) 視線方向速度推定値と観測値の合成による2次元風速場の同定と収束・発散量の算定

PIV法にはないVIV法の利点は、すでに視線方向速度の情報が観測値として得られていることである。例えば、この情報を用いて、ベクトル推定の精度を上げるなどの方法が考えられるが、ここでは、式(2)、

(3) に示す簡易な変換により、観測値を用いて推定値を補正する手法を提案する。

$$V_{ro} = (V_{rl}/V_{rp}) \times V_{rp} = V_{rl} \quad (2)$$

$$V_{\theta o} = (V_{rl}/V_{rp}) \times V_{\theta p} \quad (3)$$

$V_{rp}, V_{\theta p}$: 第一推定値, $V_{ro}, V_{\theta o}$: 最終推定値, V_{rl} : 観測値

(ただし、項の発散を防ぐため、 $-0.5 < V_{rp} < 0.5$ の点では補正を行わず、第一推定値をそのまま円周角方向速度の最終推定値とした。)

まず、視線方向速度について、観測値と第一推定値の比 (V_{rl}/V_{rp}) を補正係数として算出し、第一推定値である視線方向速度と円周角速度に補正係数を乗じることによって最終推定値を得る。視線方向速度の補正(式(2)) はつまり、観測値を最終推定値とすることを意味しており、円周角速度に対しては(式(3))、空間的にならされた第一推定値に対し、観測値を使って微細な変動を再現していることに対応する。3章で行った精度検証においては、2時刻平均した観測値を用いたが、本節では、乱流構造の再現に着目しているため、1時刻目の観測値をベクトル換算に用いた。この補正は、第一推定値と観測した現実場の風速ベクトルの方向が同じであると仮定し、ベクトルをスカラー量として補正していることになる。これによって得られた3事例における2次元風速ベクトル図とその発散・収束分布を図-7に示す。併せて、観測され

た一次元風速（視線方向速度）のみから求めた収束・発散分布も示す（式(4), (5)参照）。

$$\begin{aligned} \text{Div}_{1D} &= (\partial V_{rl}/\partial r + V_{rl}/r) & (4) \\ \text{Div}_{2D} &= (\partial V_{rl}/\partial r + V_{rl}/r) + \partial V_{\theta p}/r\partial\theta & (5) \end{aligned}$$

Div_{1D} : 1次元発散, Div_{2D} : 2次元発散

8月1日, 8月4日の事例では主流風向に沿ったストリーク構造が見られるが, ストリーク構造の低速域は収束場, 高速域は発散場となることが知られている。図-7中の黒楕円で示す領域は, ストリーク構造が視線方向に沿って存在する領域であるが, 視線方向速度から算出した収束分布では, ストリークに対応する収束が捉えきれないのに対し, 2次元風速場から算出された収束分布では, 明確な発散・収束が見られる。これは, ストリーク構造に直交する向きに発散・収束が卓越しているためで, 円周角速度成分の寄与が適切に計算されていることを示している。網目構造が支配的な8月2日のケースについても, 1次元風速場に比べて2次元風速場から求まる収束分布が, より明瞭な収束場を示している。網目構造の場合, 下降域・上昇域ともに, 四方から発散・収束が起こっていると考えられ, 2次元風速場から求まるより明瞭な収束は, これに即した結果となっている。これらのことから, VIVにより同定された円周角速度は, 現実的な2次元収束場の計算に大きく役立つと言える。

4. 結言

1 台のドップラーライダーによって観測された視線方向速度の分布についてパターン追跡を行い, 2次元風速分布を算出した。ドップラーライダーの特性により, 連続する2回のスキャンの時間間隔は円周角によって異なるが, 風速の算出には適切な時間間隔が存在し, その最適値は場の平均風速に依存する。このとき, 時間間隔に空間平均視線方向速度を乗じた速度パターンの平均移動距離 $D[m]$ を算出すると, 高精度となる領域は, およそ $100 < D < 300[m]$ と一定となることがわかった。この領域における, 視線方向速度の算出値と観測値との差は, 空間平均視線方向速度の 20~40% であった。これらのことから, 本手法を効果的に適用するには, 2 スキャンの時間差を一定とすることが望ましいといえる。例えば, 1 スキャン目と 3 スキャン目のスキャン方向は同じであるので, 円周角を絞り, その時間間隔を適切に設定することで, より高精度の 2 次元風速分布の算出が期待できる。さらに, 観測で得られた

視線方向速度を用いて, 算出値を補正する手法を提案した。補正された 2 次元風速場から算出された収束場は, 1 次元風速場から算出した収束場では見られない収束・発散が捉えられており, 本手法の有効性を示している。今後, 本手法自体の精度向上に向けて, 検査領域の大きさを場所によって可変にさせるなどの改良を行う予定である。

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」において実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 加藤敦, 真木雅之, 岩波越, 三隅良平, 前坂剛: 2009, 'X バンドマルチパラメータレーダー情報と気象庁レーダー情報を用いた降水ナウキャスト', 水文・水資源学会誌, **22(5)**, 372-385
- 2) Eiichi Nakakita, Shuichi Ikebuchi, Tetsuya Nakamura, Masayuki Kanmuri, Masahiro Okuda, Akihiko Yamaji, Takuma Takasao, 'Short-term rainfall prediction method using a volume scanning radar and grid point value data from numerical weather prediction', JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, **101**, 181-197
- 3) 神田学, 石田知礼, 鹿島正彦, 大石哲: 2000, '首都圏における局地的対流性豪雨と GPS 可降水量の時空間変動 - 1997 年 8 月 23 日の集中豪雨の事例解析 - ', 天気, **47**, 7-16
- 4) Fujiyoshi, Y., K. Yamashita, and C. Fujiwara, 2006: Visualization of streaks, thermals and waves in the atmospheric boundary layer, *J. Visualization*, 9(4), 359
- 5) Chusei Fujiwara, Kazuya Yamashita, Mikio Nakanishi, Yasushi Fujiyoshi: 2010, 'Dust Devil-Like Vortices in an Urban Area Detected by a 3D Scanning Doppler Lidar', *J. Appl. Meteor.*, **50**, 534-547
- 6) 小田僚子, 岩井宏徳, 石井昌憲, 関澤信也, 水谷耕平, 村山泰啓: 2011, 'ドップラーライダーの鉛直風速観測に基づく都市大気境界層内乱流スケールの推定', 水工学論文集, 55, 313-318
- 7) 立平良三, 鈴木修: 1994, '単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度', 天気, **141**, 761-764
- 8) 豊田康嗣, 中屋耕, 橋本篤, 松宮央登, 田中伸和: 2008, 'ドップラーライダーを用いた風速観測手法についての検討', 電力中央研究所報告書, N08032
- 9) 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人: 1994, '気流分布の画像計算のためのパターン追跡アルゴリズム' 可視化情報, **14**, no53
- 10) H.B.Kim, Hertzberg, R.Shandas, : 2004, 'Development and validation of echo PIV', *Exp. Fluids*, **36**, 455-462
- 11) J.Westerweel, 'Efficient detection of squirious in particle image velocimetry data', *Exp. Fluids*, **16**, 236-247
- 12) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版社, 2002.

(2011. 9. 30 受付)