T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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 nondimentional 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縞状の水平ロー 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 抜高度 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.

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,			
走查法, 俯角	PPI 走查, 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⁹⁰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、 $\pi r/180[m] ×$ 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	2011年8月2日	2011 年 8 月 4 日
	00:10:09~00:51:02	08:09:54~08:50:02	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	Dopeler vobcity mis	Depler velocity ms	Dopler velocity ms

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($\hat{V_{rl}}$)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、 $\hat{V_{rl}}$ を用いた。

$$dV(\theta, r) = \frac{|\overline{v_{rl}}(\theta, r) - v_{rp}(\theta, r)|}{\overline{v_{rl}}}$$
(1)

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





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、 $dt in \overline{V_{rl}}$ (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間の大気の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、出力べ 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

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時刻平均観測值, b) 解析值. 2011年8月1日(41s < dt < 124s).



黒矢印は高精度とみなした領域.

(c) 8 月 4 日 24s < dt < 62s



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.

$$V_{ro} = (V_{rl}/V_{rp}) \times V_{rp} = V_{rl}$$
(2)
$$V_{\theta o} = (V_{rl}/V_{rp}) \times V_{\theta p}$$
(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 (Vrl/Vrn)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 ることで最終推定値を得る.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べ 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).

$$Div_{1D} = (\partial V_{rl}/\partial r + V_{rl}/r)$$
(4)

$$Div_{2D} = (\partial V_{rl}/\partial r + V_{rl}/r) + \partial V_{\theta p}/r\partial \theta$$
(5)

$$Div_{1D} : 1次元発散, Div_{2D} : 2次元発散$$

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 る収束が捉えきれていないのに対し,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

- 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 scaning radar and grid point value data from numerical weather prediction', JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 101, 181-197
- 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
- Fujiyoshi, Y., K. Yamashita, and C. Fujiwara, 2006: Visualization of streaks, thermals and waves in the atmospheric boundary layer, *J. Visualization*, 9(4), 359
- 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
- H.B.Kim, Hertzberg, R.Shandas, 2004, 'Development and validation of echo PIV', *Exp. Fluids*, 36,455-462
- 11) J.Westerweel, 'Efficient detection of squrious 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)