

2015年関東・東北豪雨における三次元風速場の特徴

北海道大学 学生会員 ○大屋 祐太
北海道大学 正会員 山田 朋人

1. はじめに

2015年9月に台風17、18号に伴って西日本から北日本の範囲で大雨となり、栃木・茨城を流れる鬼怒川流域などで洪水氾濫（以下、関東・東北豪雨）が発生¹⁾した。関東・東北豪雨は、線状に連なった積乱雲の集合体が数時間留まり局所的な集中豪雨を引き起こす線状降水帯が鬼怒川上流域に発生し甚大な被害をもたらした。線状降水帯のメカニズムの解明は、豪雨災害を防ぐために重要であり、限られた地上観測で線状に伸びる豪雨域の理解は困難であるため、本研究では降水粒子に反射する電波から降水域の局所的な議論を可能にするドップラーレーダを用いた。ドップラーレーダの観測結果に変分原理を適用することで三次元風速場の推定し、時々刻々と生成される対流雲の特徴を示した。

2. 解析手法

本研究では、鬼怒川流域の観測が可能な八田島レーダ、氏家レーダの二基のXバンドMPレーダ（以下、XRAIN）を使用した。XRAINは国土交通省によって設置・管理される。観測により得られたドップラー速度[m/s]と反射強度[dBZ]はDIASより取得した。三次元風速場は、以下の(1)から(6)の式系で示すMUSAT^{2,3)}法(the MULTiple-doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique)を用いて推定した。観測されたドップラー速度に対して、極座標系の小領域内で、周りの風速と比べ不自然な値を対象に連続性を考慮した品質管理を行う。

$$F(u, v, w)$$

$$= \int_S [A(u, v, w) + B(u, v, w) + C(u, v, w)] dx dy \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial w} = 0 \quad (2)$$

$$A(u, v, w)$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{np} \frac{\sum_{q=1}^{nqp} \omega_q [\alpha_q u + \beta_q v + \gamma_q (w + v_t) - V_q]}{\sum_{q=1}^{nqp} w_q} \quad (3)$$

$$B(u, v, w) = \mu_1 (F_X + F_Y + F_Z) \quad (4)$$

$$C(u, v, w) = \mu_2 [J_2(u) + J_2(v) + J_2(w)] \quad (5)$$

$$J_2(u) = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)^2 \quad (6)$$

またレーダが観測する仰角を変えて行うドップラーレーダでは、仰角によって最大2~3分の差が生じるが、Yamada (2013) の移動補正法を用い時間的引き戻しを行うことで鉛直構造のズレを防いでいる。底面から順に高度14km高さまで0.7km間隔、水平解像度250mで5分毎の三次元風速を求めた。同手法は、(1)(2)で示す汎関数Fを満たすような風速三成分u, v, wを計算する。(3)は最小二乗法を用い影響体積内に極座標系で観測されたドップラー速度と直交座標系の三次元風速の差を最小にするフィット項である。(4)はフラックスを用いた質量保存項を示し、(5)(6)で示すフィルター項は二階微分を用い電波の送受信のノイズを除去している。

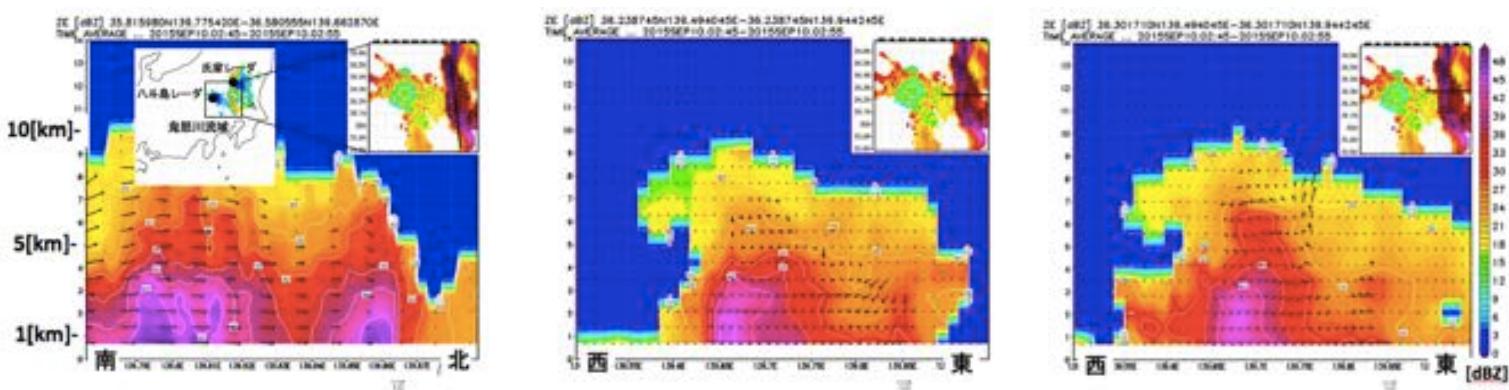


図-1 平成27年9月関東東北豪雨における反射強度[dBZ]と風速[m/s]の鉛直断面図（大屋ら, 2018を一部改変）
(a) 線状降水帯に沿った鉛直断面 (b) 線状降水帯に直交する鉛直断面 (c) 線状降水帯に直交する鉛直断面

キーワード：集中豪雨、線状降水帯、三次元風速場、ドップラーレーダ、MUSCAT法

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北十三条西八丁目 北海道大学 河川・流域工学研究室 TEL:011-706-6189

3. 解析結果

鬼怒川流域で強降水を示す2015年9月10日2時45分から55分を平均した解析結果に対し、線状降水帯の鉛直断面⁴⁾を図-1に示す。矢印は風速ベクトルを、色は反射強度を示す。南北方向に伸びる線状降水帯に沿った鉛直断面を図-1(a)に示し、線状降水帯のセルが等間隔で存在していることが読み取れる。線状降水帯の北部・南部にそれぞれ直交する東西方向の鉛直断面を図-1(b)(c)に示し、東からの流入風の存在に伴い、ある時刻・場所において約6km高さにおいて鉛直循環が発生する場合があることが読み取れる。

図-1(a)に示すよう南北に連なった線状降水帯の内部で隣り合う対流雲の距離と時刻の関係を図-2に示す。反射強度が30dBZを超えており4km高さまで同様の強度が存在するものを一つの対流セルとし、セル同士の間隔をプロットした。図から主に10km程度の間隔でセルが発生していることが読み取れ、一定の傾きで間隔が広がる別のモードの存在も示唆される。

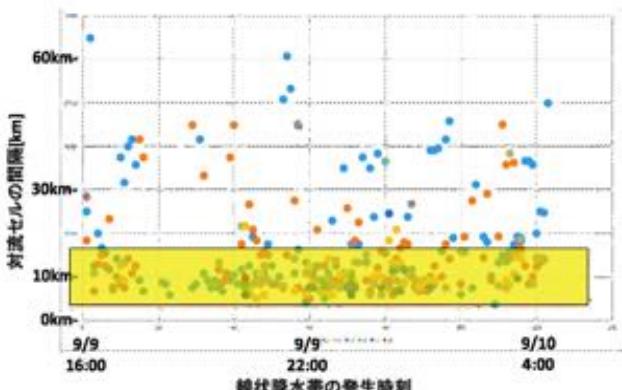


図-2 隣り合う対流セル同士の間隔と時間の関係

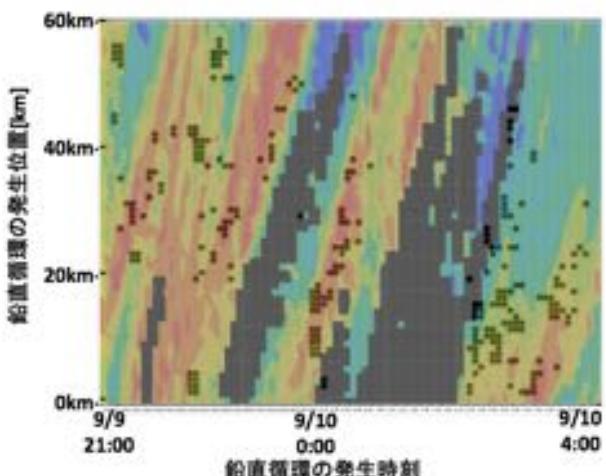


図-3 鉛直循環が発生した時刻と位置(線状降水帯の南端を原点、北向を正)の関係

図-1(b)に示す鉛直循環の発生を位置と発生時刻の関係を図-3に示す。縦軸は線状降水帯の南端を原点とし北方向への距離を、横軸は時刻を示しており、色は2.1km高さにおける反射強度を表している。鉛直循環は反射強度の強い部分で発生しており、循環の継続時間は最大15分程度、長さは5km程度にまで連なっていることが読み取れる。また対流雲の移動速度は15.5m/sであり、これはレーダーから推定した同時刻の2.1km高さにおける風速と一致する。

4. まとめ

2015年9月に鬼怒川流域で発生した関東・東北豪雨を対象にドップラーレーダーを用いた三次元風速場の推定を行った。得られた結果から複数の対流雲が線状に連なる線状降水帯の特徴を示しており、セルの間隔は10km程度の傾向に集中していた。また降水域の中で特に降雨強度が強い箇所および時間の上空約6km高さでは東からの流入風に伴った鉛直循環の発生が確認され、5kmほどに連なり継続時間は15分程度である。また鉛直循環は線状降水帯の進行方向に移動しており、移動速度は2.1km高さの風速と一致した。

本研究で得られた線状降水帯の特徴は、2014北海道や同年広島、2017年九州北部豪雨を含む同様のイベントにおいても検証し、スペクトル解析などを用いて定量的に示すことが必要である。

謝辞：本研究は、科研費(15H0226706, 17K1896317)及びMEXT/SI-CATの成果の一部である。またXRAINで取得したデータは出力可能なデータ形式に変更する際に、気象庁よりご提供いただいたdraftを使用した。

参考文献

- 1) 2015年関東東北豪雨災害 土木学会・地盤工学会合同調査団関東グループ調査報告書(2018年4月2日現在) <http://committees.jsce.or.jp/report/node/118>
- 2) Bousquet, O., Chong M.: A multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique (MUSCAT) to recover wind components from Doppler radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15.2 (1998): 343-359.
- 3) Yamada, Y.: Characteristics of wind fields derived from the multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique (MUSCAT). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* 91.5 (2013): 559-583.
- 4) 大屋祐太, 北野慈和, グエンレズン, 山田朋人: 線状降水帯における三次元風速場の特徴. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, I_43-I_48, 2018.