MUSCAT 法を用いた線状降水帯の3次元風速場の推定

Estimation of three -dimensional wind fields of line-shaped rainbands from the Multiple-Doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique (MUSCAT)

> 北海道大学工学部 環境社会工学科 北海道大学大学院工学院 北海道大学大学院工学院 北海道大学大学院工学研究院

○学生員	長尾賢汰	(Kenta Nagao)
学生員	鈴木章弘	(Akihiro Suzuki)
学生員	北野慈和	(Yoshikazu Kitano)
正員	山田朋人	(Tomohito J. Yamada)

1. はじめに

1.1 線状降水帯

近年,北海道では線状降水帯による集中豪雨の発生が 増加傾向にある¹⁾.線状降水帯とは複数の積乱雲により 組織化された線状に伸びる降水帯のことであり,その規 模は長さ 100[km]以上に及ぶ.数時間に渡り同じ場所に 留まるその定在性は局所的な集中豪雨をもたらし大規模 な災害に繋がる.また,その形成機構はバックビルディ ング現象によるものである.バックビルディング現象に ついて説明する.雨を降らす積乱雲下の地表面には降雨 による冷気外出流が流れその周囲が冷たくなる.そこへ 暖湿塊が流入するとその空気は冷たい空気にぶつかり, 上空へ持ち上げられ新たな積乱雲が形成される.成長し た積乱雲は風下へ移動するが,暖湿流の供給が継続する ことで新たな積乱雲が連続的に形成され続け,複数の積 乱雲が線状をなすことで線状降水帯が形成される².

線状降水帯は前線や温帯低気圧等の大規模な気象擾乱 に伴い発生する場合もあるが、それらから離れた地域で も発生することがあるため、その発生位置の予測は困難 である³.

1.2 代表事例

北海道における線状降水帯の代表事例として 2014 年 9月11日に発生した北海道道央圏の大雨がある.この 事例は11日午後19時頃に室蘭市あたりから雨雲が発生 し始め,11日午前0時頃から同日の朝にかけて道央お よびその周辺に強い雨が降り,総雨量は300[mm]を超え る豪雨であった.この事例によって北海道には初の大雨 特別警報が発表され,札幌市は道路冠水98件,土砂崩 れ9件,避難者数479名という被害を受けたと報告して いる⁴⁾.

9月11日午前0時の北海道の大気場を見てみる.対 流圏中層における気温と風速ベクトルを図1,対流圏下 層における気温と水蒸気フラックスを図2に示す.対流 圏中層では-16[℃]以下の寒気が流れ込んでおり,対流圏 下層では南東から9[℃]以上の暖かい湿った空気が流入 していたことが確認できる.したがって,大気は不安定 な状態であったことがわかる.また,北海道道央におい て降雨が強かった9月11日午前0時から6時の積算降 雨量を図3に示す.積算雨量は多い場所で200[mm]を超 え雨域が線状に伸びていることがわかる.



図1:2014年9月11日午前0時(JST)の対流圏中層 における気温[℃]および風速ベクトル[m/s]

MSM-P_850hPa_temperature_watervaporflux_SEP10_15:00(UTC)



図 2:2014 年 9 月 11 日午前 0 時 (JST) の対流圏下層 における気温[℃]および水蒸気フラックス[kg/kg m/s]



1.3 研究目的

本研究の目的は,北海道において 2014 年 9 月 11 日に 発生した線状降水帯の 3 次元的な雨域や風の場の構造を 明らかにしようとするものである.

対象とする線状降水帯に対しドップラーレーダーによ る観測値を用いた解析をすることによって、より実際に 近い気象場を詳細に調べること、そしてその定在性に関 わる継続要因や特徴を調べることが必要であると考える. 本論文では解析結果の一部を掲載する.

2. 解析手法

2.1 ドップラーレーダー

本研究では気象庁の札幌レーダーと新千歳空港レーダ ーの2つのドップラーレーダーによる観測値を用いて、 線状降水帯の雨域や風の場の解析を行った.2つのレー ダーの位置を図4に示す.ドップラーレーダーはレーダ ーの送信周波数と受信周波数の差である周波数偏移を検 出することで、受信信号の位相の変化を検出することが でき、ドップラー効果を利用して測定対象の動きを推定 するものである⁵.

取得した観測データは反射強度とドップラー速度であ る.反射強度とは雲の中に含まれる降水粒子から反射し て戻ってくる電波の強さのことであり、降水粒子の数が 多いほど、また粒子が大きいほど強くなる(単位は [dBZ]).また、反射強度は降水強度として捉えること ができ、経験式を用いることで降水強度を推定すること ができる。ドップラー速度とは降水粒子のレーダービー ム方向の速度であり、レーダービームの送信周波数と降 水粒子から反射された受信周波数の違いから算出される (単位は[m/s])⁶.

また,レーダーは PPI モードで観測を行っている. PPI モードとはアンテナの仰角を一定にし,方位各方向 に 360°回転させ,その全周を観測する方法である.仰 角を変化させながら観測を繰り返すことで3次元的なデ ータを取得している.



図 4:解析に使用したレーダーの位置図 (Google Earth より)

2.2 MUSCAT法

2台のドップラーレーダーで別々に同一の3次元空間を 観測し,風速3成分(*u*, *v*, *w*)を得る方式をデュアルドッ プラー法という⁵⁾.本研究ではその中でも変分法を用い た3次元風速場を推定する手法であるMUSCAT法を用い

る. (Bousquet and Chong, 1998)

変分法とは汎関数(関数を含む関数)が最小となるよう な最適な関数の形を求める方法である.最も簡単な例と して2点間の最短経路を考える問題がある.何も制約条 件を与えなければ,単純に直線が解を与えるが,制約条 件を与えれば解は単純ではない上に複数存在し得る.こ ういった制約条件下における関数形の最適化問題を変分 法という.

MUSCAT法は(1)式の汎関数Fが最小となるような風速 3成分(*u*, *v*, *w*)を各高度平面において求める方法である. *u*, *v*, *w*は最終的に疎行列方程式となりを共役勾配法によ って解くことで定められる.最小化にあたっては,(2) 式を満たす必要がある.(3)式,(4)式,(5)式はそれぞれ 汎関数Fにおける,関数A, *B*, *C*である.Aはデータ フィット項といい,解析された風速3成分(*u*, *v*, *w*)から 計算されるドップラー速度と観測されたドップラー速度 の差を表す.Bは連続式による束縛条件を意味する.*C* はフィルター項といい,解析される風速3成分(*u*, *v*, *w*)の2次微分とその微分の二乗和を表しており,微小な 風の変動を抑える平滑化項である^{7),8).}

 $F(u, v, w) = \int [A(u, v, w) + B(u, v, w) + C(u, v, w)] dxdy \quad (1)$

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

$$A(u, v, w) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q(p)} \omega_q [\alpha_q u + \beta_q v + \gamma_q (w + v_T) - V_q]^2$$
(3)

$$B(u,v,w) = \mu_1 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho w}{\partial z}\right)^2 \tag{4}$$

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

$$+ J_{2}(w) + J_{2}(w)$$

各パラメータを以下に示す.

u, v, w: x, y, z方向の風速成分[m/s], $p: \nu - \checkmark -$ 番号, q: p番のレーダーにおける観測番号, N: 全領域におけ るqの総和, $\omega_q:$ cressmanの重み係数, α_q , β_q , $\gamma_q:$ 方向 余弦, $v_T:$ 雨粒の終端落下速度[m/s], $V_q:$ 観測された動 径方向成分[m/s], μ_1 , μ_2 : 正規化重み付きパラメータ, $\rho:$ 大気の密度[kg/m³], $J_2:$ 微分演算子

MUSCAT法において、ある高度面で求まった風速3成 分は1つ上の高度の下面境界条件として使用される.初 めの下面境界条件としてw=0[m/s]を与え、風速分布を最 低高度から順々に各高度で求める.MUSCAT法では各 高度で水平風速u,vの誤差を可能な限り小さくすること で高高度における鉛直風wの誤差が大きくなることを防 いでいる⁹.この手法では互いのレーダーのビームが重 なる範囲でのみ風の場が算出される.

3. 解析結果

3.1 結果について

札幌レーダーと新千歳空港レーダーの観測値を組 み合わせ,MUSCAT法により解析した結果について述 べていく.結果としては高度ごとの水平断面,そして任 意位置における鉛直断面を得ることができ,ともに反射 強度の分布と風速ベクトルが描画されている.これらの 図は,今回の事例において降雨が強くなり始める時間帯 に着目しており,左からそれぞれ日本時間で2014年9月 11日の午前2時52分,午前3時2分,午前3時12分と10分間 隔で推移していく. 図5と図6はそれぞれ標高1.4[km], 3.5[km]の位置にお ける水平断面である.白丸が札幌レーダー,黒丸が新千 歳空港レーダーの位置である.新千歳レーダーを原点と し,X軸が東西距離,Y軸が南北距離である.

図7は図5,6に現れている線状降水帯に沿った直線で 高さ方向に切った鉛直断面である.縦軸が標高,横軸が 水平距離である.切断位置を図5,6に示すが切断位置は 時間によらず同位置である.

また,それぞれの図には反射強度の分布を示すカラー バーと風向風速の基準となるベクトルの大きさと基準値 が示されている.



図 5:標高 1.4[km]における反射強度[dBZ]と風速ベクトル[m/s] ○:札幌レーダー,●:新千歳空港レーダー 左から 2014 年 9 月 11 日午前 2 時 52 分,3 時 2 分,3 時 12 分(JST)





図 6:標高 3.5[km]における反射強度[dBZ]と風速ベクトル[m/s] ○:札幌レーダー,●:新千歳空港レーダー 左から 2014 年 9 月 11 日午前 2 時 52 分,3 時 2 分,3 時 12 分(JST)



図 7:鉛直断面における反射強度[dBZ]と風速ベクトル[m/s] 左から 2014 年 9 月 11 日午前 2 時 52 分,3 時 2 分,3 時 12 分(JST)

3.2 水平断面

図 5, 図 6 に示される水平断面について考察する. 標高 1.4[km]を雲の高さに対して下層, 3.5[km]を中層とする. 図 5, 6 の反射強度を見ると雨域が南西から北東へ伸びていることがわかり,線状降水帯として現れている. 左から右へ時間を追っていくと反射強度の強い領域が北東へ移動していることが見て取れる. また,反射強度は降水強度として捉えるができるため,31[dBZ]以上の反射強度が強い部分(図では黄色)では積乱雲が発達していると解釈できる.

風の場を見てみると、下層ではどの時間でも全体として 10~18[m/s]程の南東風が吹いているが、特に反射強度 が強い部分では線状降水帯の進行方向に対して側方から 強い風が収束している.2014年9月11日の道央には南 東から暖かく湿った空気が流入していたことを考えると、 この南東風は降水帯に対し水蒸気を供給し続け積乱雲の 発達、線状降水帯の維持に寄与していると考えられる. 中層では約15[m/s]の南よりの風が吹いている.線状降 水帯の進行方向に沿うような風であるため、降水帯の駆 動力である考える.また、中層の風は図5のそれぞれの 断面の中央付近における降水帯の終端において蛇行して おり南西風に遷移している.

下層と中層を比較するとこの時間帯においては、風向, 風速ともにシアがみられ,風速は下層において大きい傾向にある.

3.3 鉛直断面

図7に示す鉛直断面について考察する. それぞれの断面は右端が降水帯の進行方向であり方角は北東となっている. 反射強度の分布を見ると, 雲の高さは約7~8[km]である. 34[dBZ]以上の反射強度の強い部分に着目すると積乱雲の位置がよくわかり,時間を追うと積乱雲は線状降水帯の進行方向へ移動していることが確認できる.

鉛直方向の風の場を見てみると,上昇流と一部において下降流が確認できる.鉛直風は線状降水帯の進行方向へ約 17[km]の波長で伝播しており反射強度が強い箇所ほど,また高度が高いほど大きい傾向にある.

4. まとめ

線状降水帯を伴った 2014 年 9 月 11 日の北海道道央圏 の大雨に対して,札幌レーダーと新千歳空港レーダーの 2 台のドップラーレーダーによる観測値(反射強度とド ップラー速度)を用いて,MUSCAT 法による 3 次元風 速場の解析を行った.

その結果,本事例における線状降水帯の水平方向および鉛直方向の降雨域と風速場の3次元構造を得ることができた.降雨が強くなる2014年9月11日午前3時では下層では南東風,中層では南よりの風が吹いていた.そして,線状降水帯に沿った鉛直断面においては反射強度が強い領域において上昇流が波打つように伝播していた.

ただし,地形の影響によりレーダービームがうまく届 いていない領域では風が算出されていなかったため別の レーダーの観測値を用いる必要がある.

5. 今後の予定

今後は北海道に設置されている Xband MP レーダーで ある石狩レーダーまたは北広島レーダーと今回使用した 札幌レーダー,新千歳空港レーダーとを組み合わせて解 析することにより,現段階ではカバーできていない部分 の3次元風速場を算出する.そして,日本全国に設置さ れている Xband MP レーダーを用いて,線状降水帯を伴 った他の事例についての解析を行う.

また,数値予報モデルである WRF によって今回の事 例を解析した結果と本研究の解析結果との比較および検 証を予定している.

 謝辞:気象庁気象研究所第一研究室の山田芳則室長様に は本研究の遂行にあたり MUSCAT 法による解析 並びにデータの処理に関するご助言をいただいた.
X-MP レーダーデータを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.本研究は MEXT/SICAT, MEXT/SOUSEI (theme C-i-C), JSPS 科研費 (26242036,15K18118)の成果の一部である.

参考文献

- Yamada, Tomohito J.; Sasaki, Jun; Matsuoka, Naoki : Climatology of line - shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010. Atmospheric Science Letters, 13.2,pp.133-138,2012
- 小倉義光:一般気象学,第2版,東京大学出版 会,231,1999
- 吉崎正憲;加藤輝之:豪雨・豪雪の気象学.朝倉書店, pp.8-9,2007
- 4) 札幌市:平成26年9月11日豪雨に伴う対応状況等 について(最終報), https://www.city.sapporo.jp/kikikanri/26911_suigai.html, 2015/11/17
- 5) 深尾昌一郎;浜津享助:気象と大気のレーダーリモー トセンシング,改訂第2版,京都大学学術出版 会,pp.81,2004
- 気象庁:ドップラーレーダーによる解析について、 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/d r_notes.pdf,2015/06/19
- Yoshinori, Yamada:Characteristics of Wind Fields Derived from the Multiple-Doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique (MUSCAT),気象集誌, 第 2 輯, 91.5, pp.559-583,2013
- Bousquet, Olivier; Chong, Michel: 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, pp. 343-359, 1998
- 9) 清水慎吾:前坂剛,三次元風速場の推定のための変分 法を用いた複数台ドップラーレーダデータの解析手 法,防災科学技術研究所研究報告,70,pp.1-8,2007