

ドップラーレーダを用いた降雪の水平移流に関する検討

Consideration about horizontal advection of snowfall using Doppler radar

北海道大学工学部

○学生員 大屋祐太 (Yuta Ohya)

北海道大学大学院工学院

学生員 北野慈和 (Yoshikazu Kitano)

北海道大学准教授 工学研究院

正会員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

近年、札幌近郊における暴風雪による雪氷災害の発生が散見される。雪は落下とともに水平方向に移流されるため、レーダや気象モデルによって推定された降雪が地上に到達する場所や時間の特定は困難である。それゆえ、降雪の水平移流を明らかにすることは、札幌市だけで年間200億円を超える税金を使用している現在の除雪システムの効率化や、吹雪によって起こる事故の軽減につながるものと考えられる。

本研究の目的は、札幌近郊において発生した複数の降雪事例について、時々刻々の3次元風速場の構造を明らかにするものである。風速場の推定には、国土交通省により設置・管理されているXバンドMPレーダ（以降、X-MP）が観測する仰角ごとのレーダ反射強度およびドップラー風速に変分法を適用する。

第2章では近年札幌近郊で発生した代表的な豪雪パターンとその説明を、第3章では前述のドップラーレーダによる観測データについて記載する。第4章では3次元風速場の推定手法であるMUSCAT (The multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique)法について説明を行う。第5章では解析結果に関する分析結果を示す。さらに、レーダ観測を行う上で避けることができないノイズ除去の検討や、ラジオゾンデや地上観測の結果を用いた比較によってMUSCAT法による3次元風速場の特徴を明らかにする。その後、垂直断面と鉛直断面から降雪の移流に関する検討を行い三次元的な風速場を推定する。

2. 近年札幌近郊で発生した豪雪イベント

近年、札幌近郊で大雪となった3パターンについて簡単に説明する。また本研究で解析の対象日とする日を示す。

(1) 冬型（2015年12月27日, 2016年1月7日）

いわゆる冬型の気圧配置では、シベリア高気圧に伴う大陸側から冷たく乾いた空気塊と日本海からの水蒸気供給による筋状の雲が北海道の日本海側に降雪をもたらす。

(2) 低気圧の移動時（2016年2月20日, 翌21日）

発達した低気圧が、山岳にぶつかることにより豪雪をもたらす事例。低気圧の位置によって大雪となる地域が変わり、等圧線の間隔が短い地域では暴風を伴う。

(3) 石狩湾小低気圧（2015年1月20日, 同年12月30日）

冬型の気圧配置が緩むことによって、北海道の内陸を中心に晴れることで気温が下がり、内陸から周辺域に吹き出す冷たい風が発生。この風と大陸からの季節風が西岸に集まり、上空に強い寒気を伴う気圧の谷が近づくことで、小規模な低気圧が発生。上空に強い寒気を伴う気圧の谷が近づくと、北海道の西海上に小さな低気圧が発

生し、局所的な豪雪をもたらす。低気圧の規模は10～100kmと小さく、数時間から半日の継続時間である。

3. ドップラーレーダを用いた解析手法

本研究ではX-MPによる観測値を用いる。X-MPは、1kmメッシュのCバンドレーダに比べ250mメッシュと解像度が高い特徴を有する。札幌近郊の気象庁Cバンドレーダは標高749mの毛無山にある札幌レーダ、新千歳空港レーダの2基であり、特に広域観測に有効な観測手段となる。一方、X方な観測は低地に位置する石狩レーダと北広島レーダであり、札幌近郊を挟み込むような形で観測できるため、札幌近郊かつ雲高高度の低い降雪雲に対して有効な情報が得られると考えることができる。図-1にそれぞれのレーダの位置情報をプロットした上空写真を示す。

取得したX-MP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、レーダの電波が雲の中に含まれる降雪粒子に反射し戻ってくる電波の強さのことである。単位は[dBZ]で与えられ、降雪粒子の粒が大きく、数が多いほど値は大きくなる。ドップラー速度とは、降雪粒子のレーダービーム方向の速度である。単位は[m/s]で与えられ、レーダービームの送信周波数と降雪粒子から反射された受信周波数の違いから算出される。

またレーダの観測はアンテナ仰角を一定にしたまま360°回転させ全周を測定し、複数仰角に変えて行うことで三次元データを取得している。この仰角固定の観測をPPI(Plan Position Indication)観測、等高度面でのデータはCAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator)という。

4. MUSCAT法

複数のドップラーレーダを用いた三次元風速場の推定



図1:札幌近郊のレーダの位置図

白丸は札幌市, 赤丸が X-MP, 黄丸が C バンドを示す

する方法のうち、鉛直積分する前に水平二次元面内の水平風の誤差を小さくするMUSCAT法を用いる。MUSCAT法は、観測高度ごとに二次元変分法によって風速場を求める。なお、変分法とは、汎関数（関数を含む関数）がなるような最適解を求める方法である。以下にMUSCAT法の一般式を示す。

$$F(u, v, w) \quad (1)$$

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

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

MUSCAT法では、汎関数Fを最小とするような風速三成分 u, v, w を各高度平面において求める。このときに(2)式を満たす必要がある。このA, B, C項の和を最小とするような風速三成分を高さに求め、またMUSCAT法ではある高度面で求めた風速三成分は、一つ上の階層での二次元風速場の推定に役に立つ。MUSCAT法では、下面境界条件で $w=0[\text{m/s}]$ とし、各高度での水平風速 u, v の誤差を最小とすように徐々に上の高度での風速場成分を推定する。

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

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

(3)式は、フィット項と呼ばれる関数Aを表す。フィット項は、解析された風速三成分 u, v, w から求められるドップラー速度と、実際に観測されたドップラー速度の差を意味する。

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

(4)式で表される関数Bは、質量保存の項であり、連続式による条件を表す。

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

(5)式で表される関数Cは、フィルター項と呼ばれている。この項では、微分演算子であるJを風速三成分 u, v, w に施すことによって、ノイズを抑える平滑化項である。

各パラメータを以下に示す。

u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の風速三成分を表す。(単位は $[\text{m/s}]$) p はレーダ番号を表し p 番目のレーダにおける観測番号を q とする。 N は全領域の q の総和である。 ω はクレスマンによる重みづけ係数であり、データ同化を行う。 α, β, γ は方向余弦であり、観測地をレーダ方向へ変換する。 V_T は雪粒の終端雨滴速度(単位は $[\text{m/s}]$)であり、経験的な観測値から導く。 V_q は観測されたドップラー速度(単位は $[\text{m/s}]$)である。 μ は正規化重みづけパラメータであり、各項の重みづけを行う。 ρ は大気密度 $[\text{kg/m}^3]$ であり高度によって変化する。 J_2 は微分演算子である。

5. 解析結果

国土交通省の石狩レーダと北広島レーダの観測地を組み合わせ、MUSCAT法を用いての解析を行った。第2章で述べた札幌近郊で大雪となった代表事例について解析結果を示す。はじめに、事例に対して質の悪い速度データやノイズを取り除き正規の風速場を得るために、品質管理を行った。品質管理を施したデータとそうでないデータの比較を述べる。次にレーダでの観測結果による解析と他の観測機による観測結果を比較しレーダのデータの妥当性について検討する。

5.1 品質管理

レーダ反射強度やドップラー風速に欠陥が生じたり非現実的な値となる場合、得られる3次元風速場もまた現実的に存在しないものとなり得る。その場合を考慮したデータの品質管理を施した結果を図2に示す。拡大している部分の風速データに注目すると、品質管理前では風速ベクトルがあらゆる角度の風速を示しておりノイズだと思われるものが存在する。一方、品質管理後の同部分の拡大図を見ると、ノイズだと思われる速度ベクトルは取り除かれ一様な風速として解析されている。

5.2 MUSCAT法による3次元風速場の検証

MUSCAT法を用いて求めた3次元風速場を他の観測手法による結果と比較する。図3は、2015年12月30日09時におけるMUSCAT法による水平風風速場と同時刻における気象庁のラジオゾンデによる風向・風速分布をそれぞれ示す。ラジオゾンデは、日本国内外の日々の気象予報を行う上で必要となる気象要素を観測するために存在するものである。ラジオゾンデはゴム気球によって飛揚させ、高度30kmまでの大気状態を測定する。この観測は世界各地で同時刻に実施されている。また図-3(上図)に記された数字は札幌マルチセンサで観測された積雪深の10分間増加量である。札幌マルチセンサは札幌市

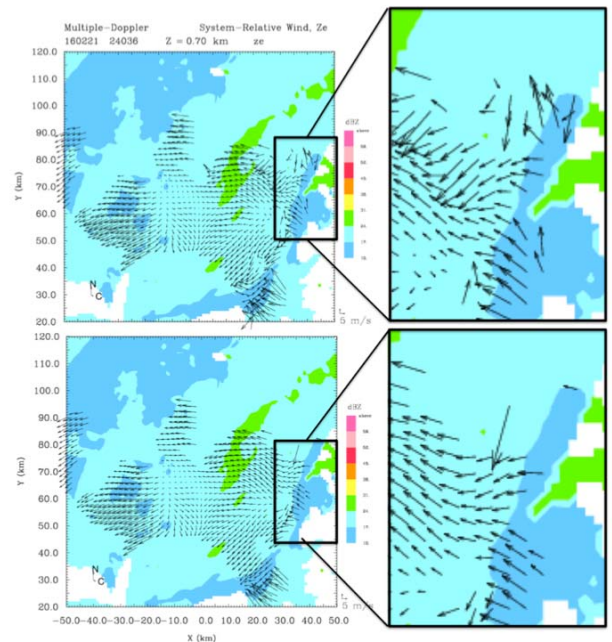


図2: 品質管理を行う前後の比較
(上図がデータに品質管理を施さない場合; 下図は品質管理後)

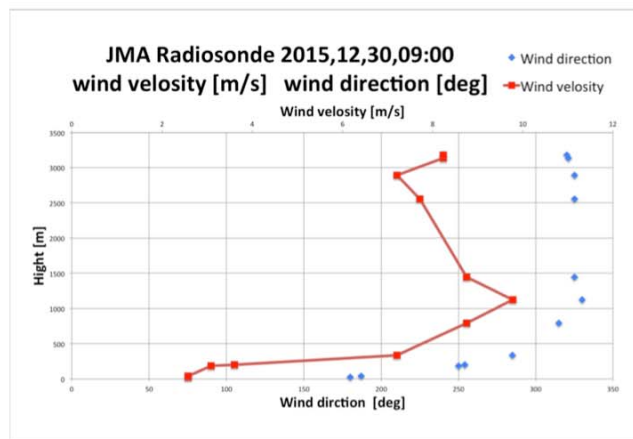
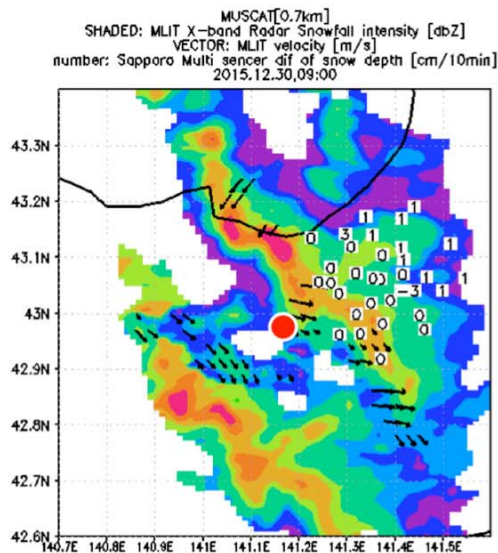


図 3: MUSCAT 法による 700m 高さにおける水平風速場 (上図)と、気象庁ラジオゾンデによる高さごとの風向および風速(下図)

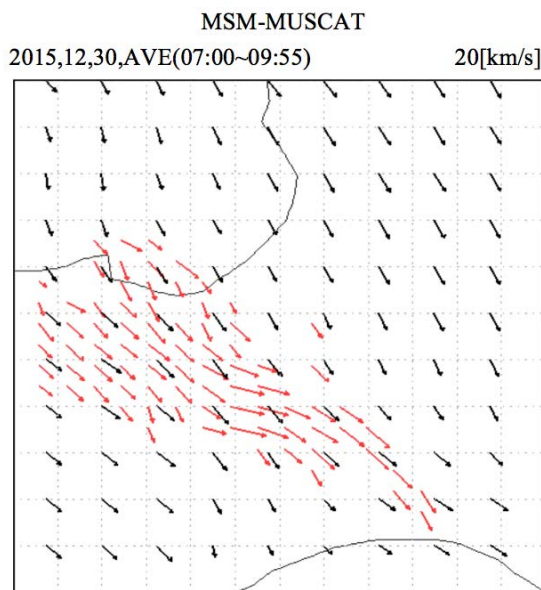


図 4: ドップラーレーダと MSM の比較の図

が地上での観測に用いている観測機であり、札幌市よりデータをご提供して頂いた。

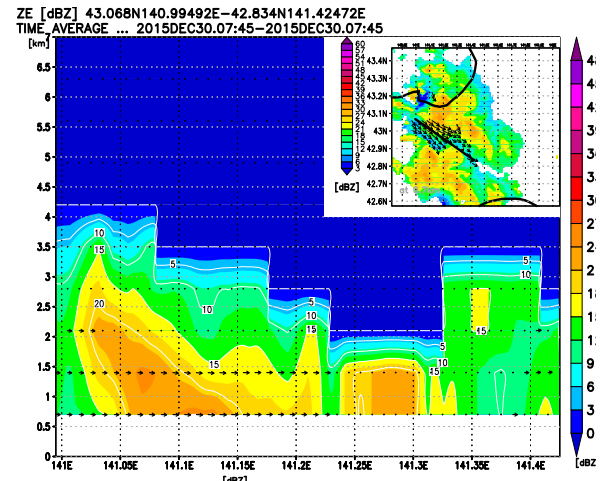


図 5: MUSCAT 法による 2015 年 12 月 30 日の鉛直断面

図 4 は、MUSCAT 法と気象庁の MSM(Meso-Scale Model)による水平風速場の比較結果である。この図から、MUSCAT 法による風速ベクトルと MSM による風速ベクトルの方角と大きさは概ね一致しており、また MUSCAT 法ではより詳細な速度ベクトルが得られていることがわかる。このことから、レーダ観測と MUSCAT 法による時々刻々の 3 次元風速データを気象モデルに同化させることによって、豪雪予測の精度向上が期待される。

5.3 鉛直断面

札幌近郊で大雪となった代表事例の解析結果を水平断面で観察する。図 5 は石狩湾小低気圧によって短時間で局所的な大雪が降った 2015 年 12 月 30 日 7 時 45 の解析結果を、風速方向に鉛直断面で切り取ったものを表す。切り取った鉛直断面は、赤線で示す。反射強度は、高度が下がるほど風速方向に広がっていることがわかる。これは高度 1km 付近で 10m/s の風によって降雪粒子が水平移流している可能性が示唆される。

6. まとめ

本研究では X-MP による観測値を MUSCAT 法によって解析した。得られた解析結果を、MSM やラジオゾンデなどの他の観測機器と風速情報を比較し、妥当性を確かめ、鉛直断面に対する考察を行った。

参考文献

- 1) 大宮哲;國分徹哉;松澤勝;山田朋人: X バンド MP レーダデータを用いた吹雪検知の可能性について (1) レーダおよび地上における冬期降水量の比較観測一、雪氷研究大会 (2016・名古屋)
- 2) 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
- 3) 気象庁: 札幌管区気象台
http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/kikou/tokucho/column_snow.html (2016 年 12 月 8 日閲覧)