

# 札幌圏における複数のドップラーレーダを 組み合わせた線状降水帯の風速場

The wind field of Line-Shaped Rain Band around Sapporo using multiple doppler-radar

北海道大学大学院工学院

○学生員 大屋祐太 (Yuta Ohya)

北海道大学大学院工学研究院

正 員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

## 1. はじめに

航空機搭載レーダから発展した変分原理（以下、MUSCAT<sup>1)</sup>:the Multiple-doppler Synthesis and Continuity Adjustment Method）をドップラーレーダで観測される値に適用することで、三次元的な風速場を時々刻々と求めることができる。ドップラーレーダを用いた研究は、軍事利用から気象観測に至るまで幅広く扱われ発展を遂げ、特に二基のドップラーレーダを用いたデュアルドップラー解析によって風速場の推定が可能になった。同手法は従来のデュアルドップラー解析に比べ2つのレーダを結ぶ基線上の風速成分や鉛直風速を精度よく求めることができる。鉛直風の正確な推定は深い対流雲に適応し、変分式を構成する項の一部はさらに効果的に改善<sup>2)</sup>されている。こうした特徴から、同手法は山間部が多い日本の豪雨豪雪時の対流雲における気象場の解析に有効である。本研究では、積乱雲が線状に連なる線状降水帯に対し二基から三基に拡張した同手法を適用し、風速場の関係から以下の式で表すRKW理論<sup>3)</sup>の再現の可能性を示した。

$$C^2 = 2 \int_0^H (-B) dz \quad (1)$$

$$B \equiv g \left[ \frac{\theta - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} + 0.61(q_v - \bar{q}_v) - q_c - q_r \right] \quad (2)$$

$C$ は冷氣外流出、 $H$ は冷氣プール、 $B$ は浮力、 $\theta$ は温位を表し、 $q_v$ 、 $q_c$ 、 $q_r$ はそれぞれ水蒸気、雲水、雨水の混合比を表している。RKW理論はスコールラインにおける降雨セルの発達過程において、 $C$ で表す冷氣プールと $\Delta U$ で表す鉛直シアの関係によって成り立つ理論である。鉛直シアは、鉛直方向への水平風速の違いによるせん断力を表し、本研究は同理論をバックビルディング型の線状降水帯に適用するものである。

線状降水帯は、積乱雲が発達と消滅を繰り返し、降水域が線状に留まり局所的な豪雨をもたらす、大きな洪水災害や浸水被害と結びつく危険性が非常に高い。特にバックビルディング型は積乱雲が発達し風下側に流れた背後に新たな積乱雲が発生する構造のため、総観規模の気象構造を形成する前線や台風よりも予測が困難である。さらに近年、雨が少なくとされていた北海道地区における線状降水帯の発生件数も増加傾向<sup>4)</sup>にあり、全国に目を向けると、近年の線状降水帯の代表事例として

平成27年9月関東・東北豪雨（以下、鬼怒川豪雨）や平成29年7月九州北部豪雨、西日本を中心に全国に影響をもたらした平成30年7月豪雨などがある。毎年のように土地名を冠とするような大きな豪雨災害が発生しているため、線状降水帯を対象とした気象場の解明は非常に重要である。中北ら<sup>5)</sup>は、平成10年8月那須集中豪雨においてレーダ画像、AMeDAS、GVPを用いた生起特性の解析によって、降雨セルの群速度を明らかにし、豪雨特性との関係性を示した。大屋ら<sup>6)</sup>は鬼怒川豪雨を対象として三次元風速を加えたレーダ情報により、ホフメラ図の作成や風速場の導出により降雨セルの移流における風速の依存性を議論した。

本研究では、平成26年9月に北海道の札幌圏に発生した線状降水帯<sup>7)</sup>を対象としてMUSCATを用いて気象場の解析を行う。8、9日から胆振地方で断続的に振り続けた雨の総雨量は400mm近くまで及び、降雨域は札幌圏に移動した。この大雨により石狩・空知地方および胆振地方では、北海道で初となる大雨特別警報が発表され、台風要因以外の大雨が少ない北海道地区の印象的な事例となっている。本論文は、降雨域を囲むように設置されていた3つのドップラーレーダを用い、発達の原因となりうる気象場の特徴を示すものである。第2章では、解析手法である変分原理およびMUSCATの説明を行い、第3章では降雨域を囲むように設置されている3台のドップラーレーダにMUSCATを適用し、2つのレーダの

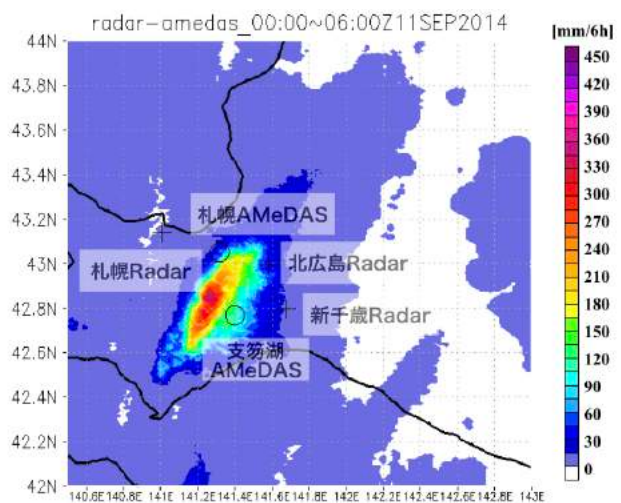


図-1 レーダアメダス解析雨量[mm/6h]とレーダ、AMeDASの位置関係

組み合わせによる風速場およびレーダエコーの特徴を述べた。また第4章では、南西から北東に伸びる降雨域において対流圏中層の一部で発生する南東からの流入風による大気鉛直循環の時空間的な分布および強降雨との関連性を示した。最後にまとめで第5章に記す。

## 2. 解析手法

本研究で使用するデータは、気象庁が設置・管理するC-bandレーダ（以下、Cバンド）および国土交通省が設置・管理するX-band MPレーダ（Xバンド）により観測した反射強度[dBZ]とドップラー速度[m/s]である。レーダから発射した電波が降水粒子で散乱し、減衰した電波を受信する。この時の受信までにかかった時間や減衰量からレーダとの距離とその空間における反射強度を求める。また電波は波の性質を持ち、レーダに対して降水が離れる場合に受信周波数が送信周波数より低くなる。反対に近づく場合には、受信周波数は高くなる。こうした原理から求めたレーダを中心とした極座標系への移動速度をドップラー速度と呼ぶ。Cバンドの波長は4~8cmであり降水による減衰が少ないため広い範囲を観測できる。一方でXバンドの波長は2.5~4cmであり降水による減衰が多い一方で、MP（Multiple Paramater）化されており、水平偏波と垂直偏波を用いる二重偏波レーダで測定できるためより詳細な情報を取得できる。それぞれのレーダは、360度水平に回転し、仰角を変えることで三次元的な観測結果を得る。図-1は札幌を囲むように設置されている2つのCバンド（札幌レーダ、新千歳レーダ）と2つのXバンド（北広島レーダと石狩レーダ）の位置関係を示す。本研究では、観測範囲が被る複数のレーダの組み合わせ、反射強度から距

離により重み付けを行なったレーダエコー分布とドップラー速度から変分法による三次元風速を求めた。

2台のレーダを用いた風速場の算出における従来の方法として、鉛直積算する方法がある。2台のドップラー速度の式と連続式を連立させ、適切な境界条件を与えることで風速場を求める手法である。この手法は、計算過程で誤差が上方向に積み重なることにより非現実的な上昇気流を与えるうえに、レーダ基線状における風速成分が求められない。本研究で用いるのは、Bousquetら（1998）が考案し（以下、MUSCAT-O）山田（2013）が深い対流雲に適応するよう改良したMUSCATであり、その式を以下に示す。

$$F(u, v, w) = A(u, v, w) + B(u, v, w) + C(u, v, w) \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial v} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial w} = 0 \quad (4)$$

本手法は変分原理に基づき、式(3)(4)で表すように汎関数 $F$ の値を最小とするような関数 $A, B, C$ の組み合わせを求め、変数として与えた三次元風速 $u, v, w$ を推定する手法である。 $F$ の最小化は、各水平面積 $S$ 内で行い鉛直風速 $w$ を上的高度面に与えることで三次元的な風速場を推定する。

$$A(u, v, w) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q(p)} \omega_q [\alpha_q u + \beta_q v + \gamma_q (w + v_T) - V_q]^2 \quad (5)$$

式(5)はData Fit項であり、観測した極座標系のドップラー速度 $V_q$ と直交座標系の風速場 $u, v, w$ と比較しその差を最小にする項である。直交座標系における各グリッド点に影響を与える空間を影響体積と呼び、 $p$ はレーダ数、 $q$ は影響体積内で観測されたビーム数を表し、方向

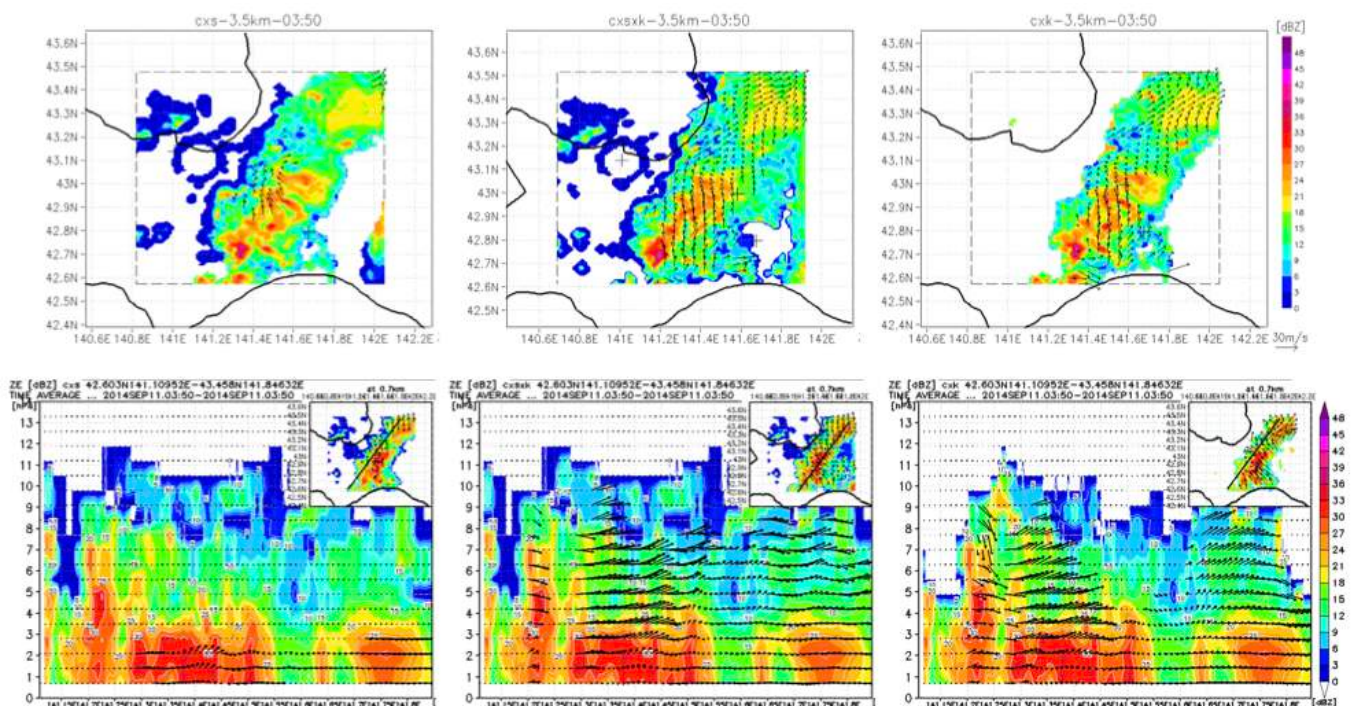


図-2 複数レーダの組み合わせ（左から順にCS, CSK, CK）による水平断面（上段）および鉛直断面（下段）  
コンターが反射強度[dBZ]、ベクトルが風速[m/s]を表す。全て日本時間2014年9月11日午前3時50分。

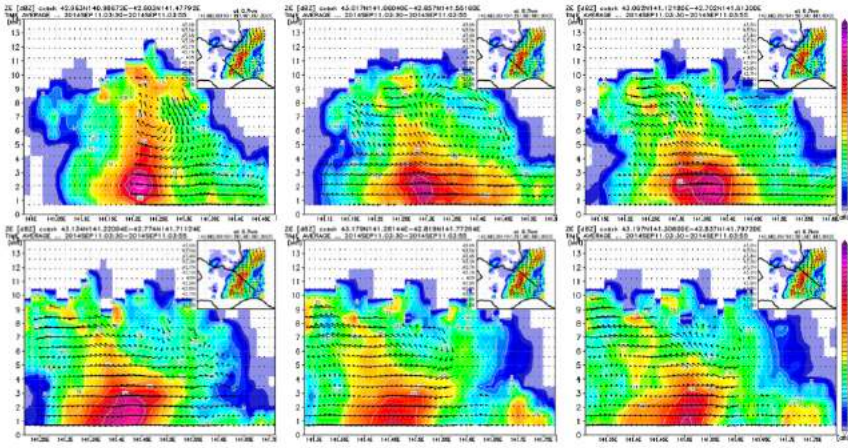


図-3 線状降水帯を輪切りにする30分平均の鉛直断面。右上の黒線が切り取り面を示し、コンターが反射強度[dBZ]、ベクトルが風速[m/s]を表す。

余弦 $\alpha_q$ ,  $\beta_q$ ,  $\gamma_q$ とクレスマン内挿係数 $\omega_q$ を与えている。本式は、MUSCAT-Oと比べ平均二乗誤差とゲイン係数を改良しており、影響体積内で観測が不均一に分布した場合も精度を高く維持できる。

$$B(u, v, w) = F_x + F_y + F_z \quad (6)$$

式(6)はMass Flux Conservation項であり、各グリッドの影響体積内の各面を通過するフラックス $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ の和を最小にする項である。 $\mu_i$ は正規化重みつけパラメータを表し式(3)との重みつけを行う係数である。MUSCAT-Oでは連続式を用いており、複雑な地表面状で精度が上がるよう質量フラックス式を用いている。

$$C(u, v, w) = \mu_2 \left[ \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 \right. \\ \left. + \mu_2 \left[ \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 \right] \right. \\ \left. + \mu_2 \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 \right] \right] \quad (7)$$

式(7)はFilter項であり、水平方向における微小なノイズを除去し滑らかで現実的な風速場を導出する。風速成分 $u$ ,  $v$ ,  $w$ は波動ベクトルから求める伝達係数で表され、式(4)の弱い制約条件化では、二次の導関数を最小化する式を与える。MUSCAT-Oでは、さらなる等方性応答を得るために式を追加している。

観測データは極座標系において、品質管理により不自然な値を修正<sup>9)</sup>し、仰角を変えた際に生じる鉛直方向の時間のズレに補正<sup>9)</sup>を行なっている。補正された観測値を組み合わせ、MUSCAT式系に代入することにより三次元風速を求めた。

### 3. ドップラーレーダの組み合わせ

札幌圏に整備されているドップラーレーダの特徴を述べる。線状降水帯の南東側には、千歳のCバンド（以

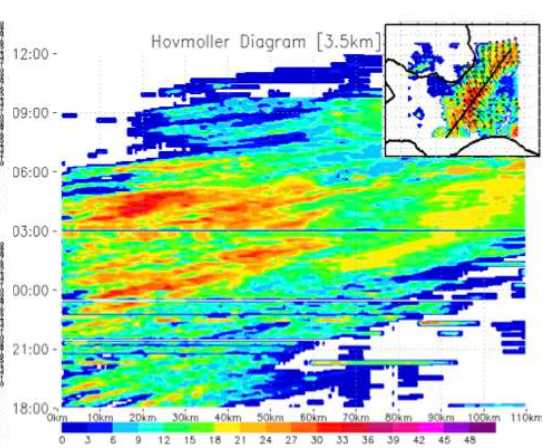


図-4 降雨継続時間におけるホフメラ図。横軸が距離、縦軸が時間、コンターが反射強度[dBZ]を示す。

下、千歳レーダ）と北広島のXバンド（以下、北広島レーダ）があり、北側には石狩のXバンド（石狩レーダ）、西側には札幌のCバンド（札幌レーダ）がある。2014年よりMP化での運用が開始された石狩レーダのデータは少ないため、本研究では残りの3つのレーダを使用した。また札幌レーダは毛無山上にあり、設置高度は749mである。以下に、千歳レーダと札幌レーダの組み合わせ（以下、CS）、千歳レーダと北広島レーダの組み合わせ（以下、CK）、そして3つのレーダを全て組み合わせたもの（以下、CKS）の結果を示す。

AMeDASの札幌地点における降水量は11日3時台が最も強いため、本研究では以降、3時から3時55分まで5分ごとの1時間データを解析対象とした。特に全てのレーダで欠損がなく観測がされている3時50分においてMUSCAT法で算出した風速ベクトル[m/s]と反射強度[dBZ]の空間分布を図-2に示す。使用したレーダの組み合わせは左から順に、CS, CSK, CKである。

CSは、観測範囲が広いCバンド同士の組み合わせであるが、MUSCAT法により求められた風速場は僅かだった。これはMP化が施されていないCバンドによって減衰が大きいこと及び、レーダ設置高度の差が大きいことが原因だと思われる。CKは、MP化されている北広島レーダの特徴が表れている。特に千歳レーダに近い南側と北広島レーダに近い北側において風速場は観測できている。一方で札幌レーダと北広島レーダの組み合わせについては、対流圏中層において風速場を算出できていないため今回は対象としない。これは山地にある札幌レーダが低い位置の風速を精度よく観測できておらず、上の高度へ情報を積み重ねた時に不自然な値を与えるためだと推測できる。こうしたことから2基のレーダを組み合わせる場合は、設置高度差が小さいこと、MP化されたレーダを用いることが有効だと言える。また3基を用いたCSKでは、CKに高い高度の観測に優れている札幌レーダを加えた効果により対流雲の風速場がよく計算されている。図のコンターは反射強度を表しており、暖色

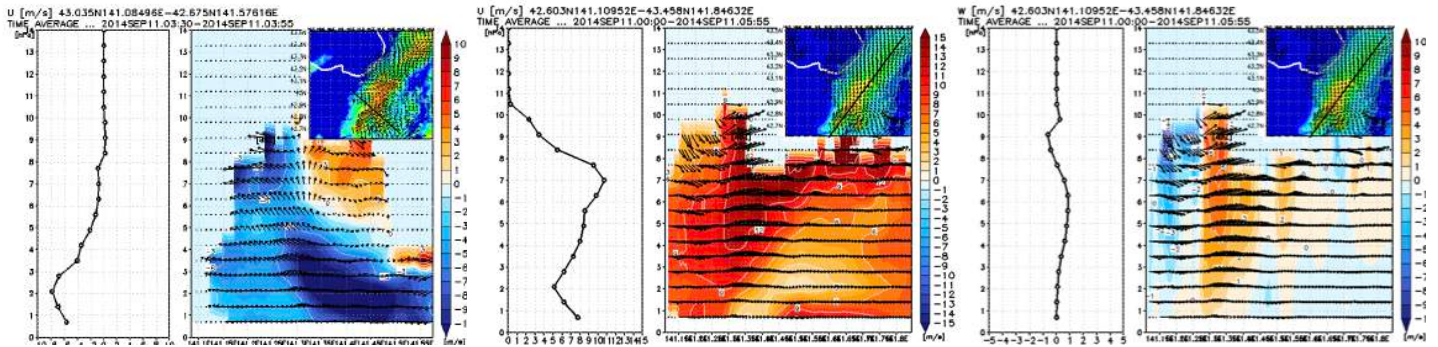


図-5 線状降水帯の輪切り断面において1時間平均した風速成分uの空間分布（左図）及び線方向断面において6時間平均した風速成分u（中図）及びw（右図）の空間分布  
コンター及びベクトルは風速[m/s]を示す。

で強い値を示す。反射強度は、レーダと観測グリッドとの距離に応じて重みづけをしている。三基のレーダを使用することで広い範囲で効果的な風速を算出可能であることが本解析では明らかであるため、第4章では三基のレーダを組み合わせたCKSを用いてより詳しく解析を進めていく。

#### 4. 風速場と反射強度の関係

第3章では、様々なドップラーレーダの組み合わせから最適なものを選択した。CKSの鉛直断面を様々な位置で求めると、図-3に示すように複数位置で大気中の鉛直循環場が散見される。鉛直循環が確認できる場所と時間は図-4のホフメラ図において30dBZ以上を示す強い降雨域に限定されており、この循環が継続している距離は約20～30 kmであり、次の鉛直循環が始まるまでの間隔も約30 km程度である。

図-5に輪切り断面の風速成分uを示す。降雨域の東側の高度5～9kmにおいて鉛直循環が発生しており、その下方において水平風速は鉛直方向1kmに対し2m/sのせん断を持つような関係にある。これは、RKW理論における鉛直シアに当てはまり、スコールラインの発達構造がベックビルディング型に適應できる可能性を示す。さらに線方向における風速は、6時間にわたり類似した構造を示し、5km以上の上空において特に10m/sを超える水平風が継続したことがセルを下方に押し流し、セルの発達起点となる南西側では10m/sの下降流から7m/sの上昇流へ急激に変化する収束域が明らかに確認できた。

#### 5. まとめ

札幌圏に発生した線状降水帯の事例に対して変分原理を用いた三次元風速場推定手法であるMUSCATを適用した。MUSCAT法は、複数のレーダで観測したドップラー速度を初期条件にし三次元の風速場を算出するため、レーダの組み合わせによりその値は変化する。本研究では、札幌圏で整備されている札幌レーダ、千歳レーダ、北広島レーダの三つのデータを用い、その二基ないし三基の組み合わせを比較し、風速場を加味した議論に適切なものとしてCSKを選択した。また、一部で

発生する大気中の鉛直循環場は、RKW理論において示される鉛直シア構造とともに降雨域全体で存在し、強い降雨セルの継続的な発生及び発達、風下側への伝播の原因となりうることを示した。今後はこうした構造の気象モデルにおける再現が期待される。

#### 参考文献

- 1) Bousquet, O., M. Chong : 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 : 343-359,1998.
- 2) 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 : 559-583,2013.
- 3) BRYAN, George H.; KNIEVEL, Jason C.; PARKER, Matthew D. A multimodel assessment of RKW theory's relevance to squall-line characteristics. *Monthly weather review*, 2006, 134.10: 2772-2792.
- 4) Yamada, T. J., J. Sasaki, and N. Matsuoka.: Climatology of line-shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010. *Atmospheric Science Letters* 13.2 : 133-138,2012.
- 5) 中北英一, 矢神卓也, 池淵周一: 1998那須集中豪雨の生起・伝播特性. 水工学論文, 第44巻, pp.109-114, 2000.
- 6) 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.
- 7) 本北海道における 2014 年 8 月、9 月の豪雨の概要について(2019年4月8日現在)  
<http://chishitsu.ceri.go.jp/h26saigai/report1.pdf>
- 8) 山田芳則: C303 dual PRF 速度データの効率よい効果的な品質管理方法 (観測手法 II, 一般口頭発表). 日本気象学会 107 : 297,2015.
- 9) 山田芳則: 多仰角PPI観測に基づくデュアルドラーレーダ解析から計算された鉛を「浮動境界条件」を用いて補正するための、水平発散に含まれる誤差分散の数値実験による見積もり 気象学と地球物理学の論文:49-65,1997.