

令和4年度 予報技術研修テキスト



二重偏波レーダーデータの 活用技術

令和5年3月

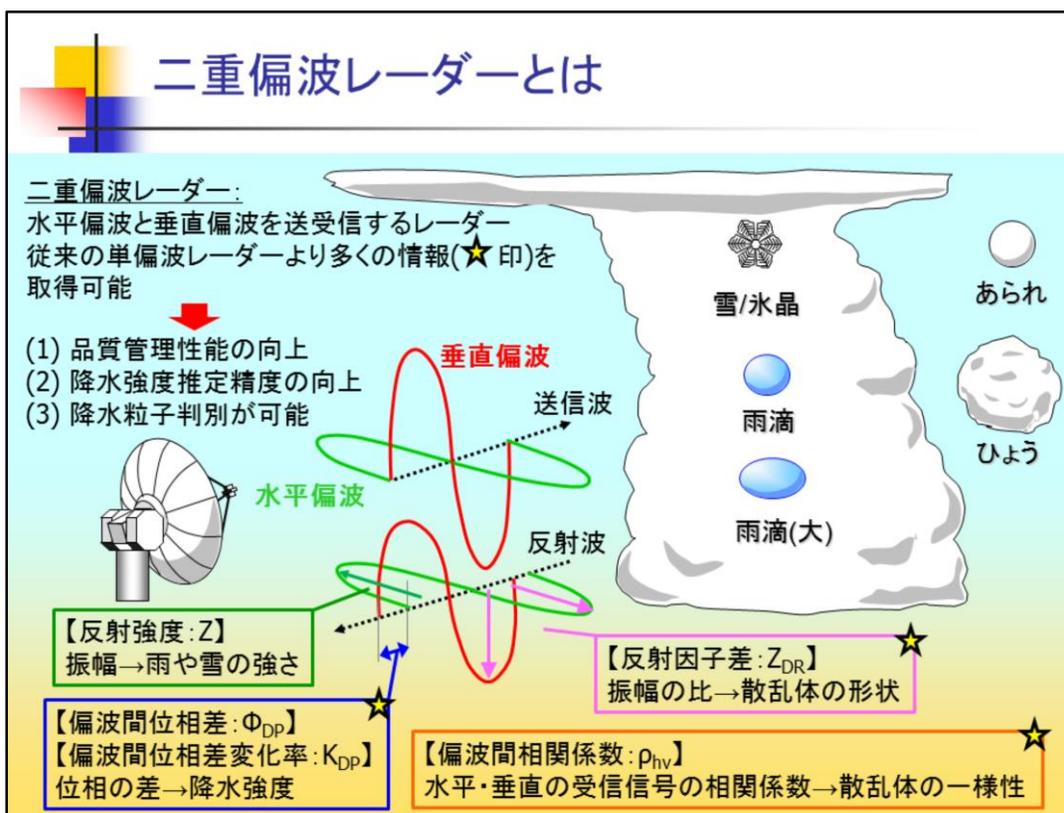
気象庁 大気海洋部 業務課 気象技術開発室



目次

- 二重偏波レーダーとは

- 二重偏波レーダーデータの活用技術
 - 降水強度推定手法について
 - 降水粒子判別手法について(開発中)



二重偏波レーダーとは、水平偏波と垂直偏波を送受信するレーダーで、従来の単偏波レーダーより多くの情報を取得可能なレーダーです。

従来型の単偏波レーダーでは、水平偏波のみを送受信し、反射強度から雨や雪の強さを観測していました。

しかし、特に対流性降水に対して精度が低いという問題がありました。

二重偏波レーダーでは、反射強度に加え新たに以下の情報を取得することができます。

Φ_{DP} 偏波間位相差 (水平と垂直の偏波の位相の差)

K_{DP} 偏波間位相差変化率 (水平と垂直の偏波の位相の差の変化率)

Z_{DR} 反射因子差 (水平と垂直の偏波の強度の比)

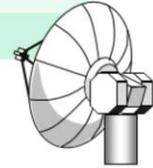
ρ_{hv} 偏波間相関係数 (水平・垂直の受信信号の相関係数)

二重偏波レーダーで観測される複数の情報を利用して、以下が可能となります。

- (1) 品質管理性能の向上
- (2) 降水強度推定精度の向上
- (3) 降水粒子判別が可能

二重偏波レーダーの導入状況

	DRAW	一般レーダー
2015年度	関西、羽田	
2016年度	成田	
2017年度		
2018年度	那覇	
2019年度	中部、福岡	東京
2020年度	新千歳	福井、大阪、福岡、広島、名古屋
2021年度	大阪	仙台、釧路
2022年度	福岡(新)	種子島、室戸岬
2023年度(予定)	鹿児島	沖縄、松江、新潟、名瀬



気象庁では、まず空港気象ドップラーレーダー(DRAW)の関西、羽田の二重偏波レーダーへの更新(2015年度)を皮切りに、二重偏波レーダーの導入が進められてきました。

一般レーダーは、東京レーダーの二重偏波レーダーへの更新(2019年度)を皮切りに、2022年度までに福井・大阪・福岡・広島・名古屋・仙台・釧路・種子島・室戸岬の計10サイトが更新済みです。

2023年度には、沖縄・松江・新潟・名瀬の更新を計画、その後も残りのレーダーが順次更新予定です。



二重偏波レーダーデータの活用技術

- 降水強度推定手法の高度化
 - 降水強度の推定精度向上
 - 非降水エコーの除去

- 降水粒子判別手法の開発(開発中)
 - 雲内の降水粒子の種別を推定する手法を開発中
 - 推定した降水粒子種別から、より詳細な降水現象の把握、各種ナウキャストへの応用を検討中

二重偏波レーダーデータの情報を活用することで、降水強度の推定や、降水粒子判別についての新たな開発が可能になります。

降水強度推定への活用

従来の反射強度のみの手法では減衰の影響を受けて正しく求められなかったものを、補正して推定精度を上げたり、従来では取り除けなかった非降水エコーを除去して降水エコーのみを推定するのに、二重偏波レーダーの情報を活用できます。

現在、降水強度の推定は、段階的に技術向上・現業導入が進められています。

降水粒子判別への活用

観測・モデルの温度情報や機械学習(ベイズ推定)の技術を総動員して、雨・雹・霰、雪の他、昆虫など大気中の降水・非降水粒子を分類するために、二重偏波レーダーの情報を活用します。

従来では、降水粒子の種別はモデルの予測情報のみでしたが、将来的には、実際に観測されている降水粒子で直接細かく判定できるようになります。

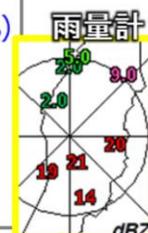
このように推定した降水粒子種別からより詳細に降水現象を把握し、各種ナウキャストへ応用することで精度向上を図ることができないか、開発を進めています。

降水強度推定手法について

概要 単偏波レーダーでは、反射強度Zから推定した降水強度R(以後、R(Z)と表記)が利用されてきました。
二重偏波レーダーでは二重偏波情報による反射強度の補正技術や二重偏波情報を用いることで、より高度に降水強度を推定することが可能になります。

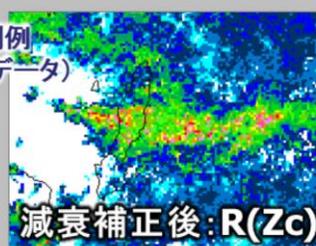
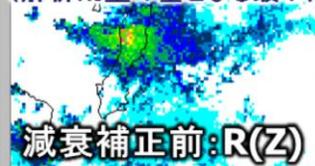
- 【開発項目】① 減衰した反射強度(Z)を補正する技術を導入 ⇒R(Zc)
② 偏波情報の1つ(K_{DP})を利用した強雨推定技術の導入 ⇒R(K_{DP})
③ 新たな品質管理(非降水エコーの除去)の導入

【利用状況】減衰補正(①)・品質管理(③)の技術は既に導入済み、
強雨推定技術(②)も以下プロダクトで導入を開始
・ 高解像度降水ナウキャスト
・ 速報版解析雨量(※東京レーダーのみ)

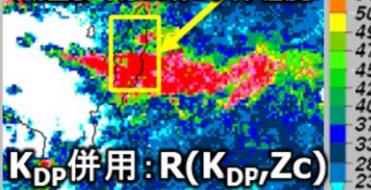


2022年7月8日22:10UTC

種子島レーダーの降雨の観測例
(解析雨量の基となる最下層データ)



120mm/h程度の強雨も再現
(雨量計では10分20ミリ程度)



単偏波レーダーでは、反射強度Zから推定した降水強度Rが利用されてきました。
二重偏波レーダーでは二重偏波情報による反射強度の補正技術や二重偏波情報そのものを用いることで、より高度に降水強度を推定することが可能になります。

はじめに降水強度推定手法での二重偏波情報の具体的な活用の説明に先立ち、開発項目と、現在の利用状況について簡単にまとめます。

開発項目:

- ① 反射強度Zの減衰補正技術を導入
反射強度Zは減衰して、遠方ほど推定雨量が弱まる傾向にあります。それを偏波情報 K_{DP} で補正する技術です。
→層状性降雨の推定精度向上が期待されます。
- ② 偏波情報 K_{DP} を利用した強雨の推定技術の導入および、その技術改良
→対流性などの強雨域の推定精度向上が期待されます。
- ③ 複数の偏波パラメータを利用した非降水エコー域の除去技術の導入
→降雨の誤判別を取り除くことで推定精度向上が期待されます

利用状況:

減衰補正(①)や品質管理(③)は更新時に導入済みで、強雨域への技術導入(②)も一部は現業利用が開始されています。

- ・ 高解像度降水ナウキャスト 令和4年2月から
- ・ 速報版解析雨量(東京レーダーのみ) 令和4年3月から

(補足)

本テキストでは以降、反射強度ZからZ-R関係で求めた降水強度RをR(Z)、減衰補正(correction)したZを意味するZcから求めた降水強度はR(Zc)、更に、新たに登場した二重偏波パラメータ K_{DP} から求めた降水強度はR(K_{DP})と表記します。

Zc, K_{DP} の両方を併用した場合には、その降水強度はR(K_{DP} , Zc)と表記します。

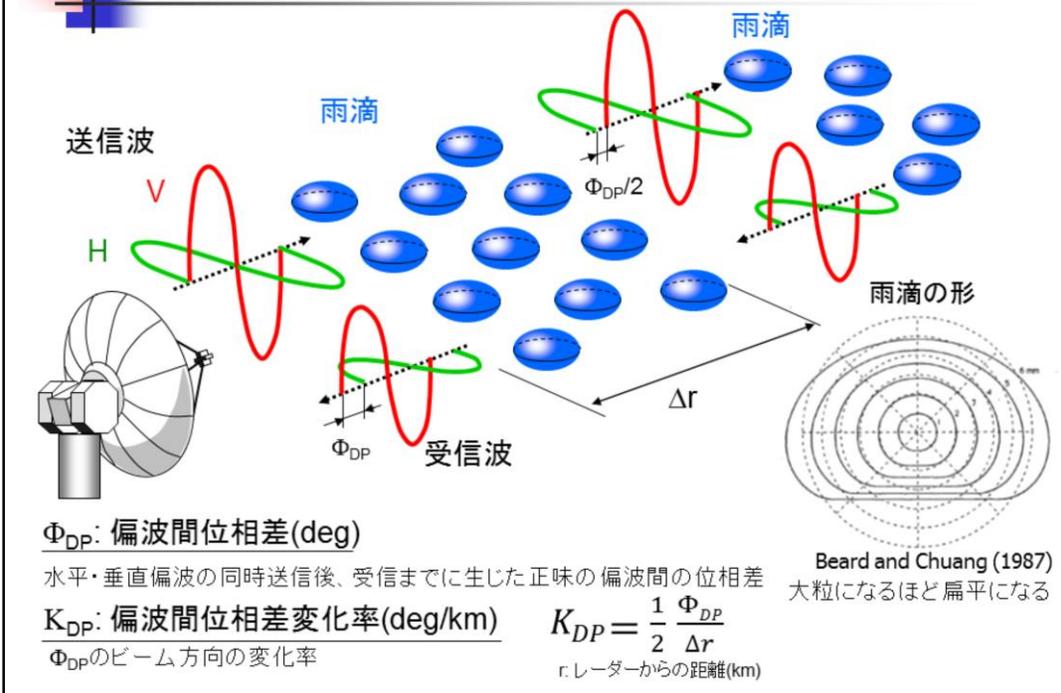


降水強度推定手法について

- 位相差情報についての説明
- 位相差情報利用の背景
- 推定精度の向上①: $Z_{(反射強度)}$ の減衰補正技術導入
- 推定精度の向上②: 新たな強雨の推定技術の導入
: K_{DP} の品質改良
- 推定精度の向上③: 品質管理(非降水エコー除去)
- 降水強度推定の流れ
- 現業導入

降水強度推定手法の説明を、標記の順に行います。

位相差情報についての説明



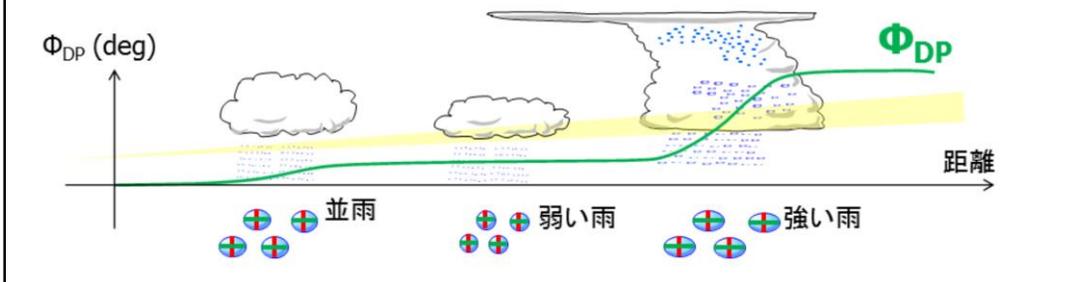
ここでは、降水強度推定の向上のために用いられる位相差情報について説明します。

二重偏波レーダーの水平・垂直偏波が同時発射されて、降雨域を通過して、レーダーに戻ってくると、水平偏波と垂直偏波には位相の差が生じます。
 偏波が液体を通過するとき、気体の通過より伝搬速度が低下します。
 雨滴は大粒になるほど扁平になり、そのような扁平な粒子があると、水平偏波の方が少し遅れて受信されます。
 送信から受信までの間の正味の位相差をΦ_{DP}(偏波間位相差)と呼びます。
 そして、そのビーム方向の変化率(微分量)のことをK_{DP}(偏波間位相差変化率)と呼びます。
 式で2で割っているのは、Φ_{DP}が往復分の値を表しているからで、K_{DP}はその分を考慮した値のためです。

位相差情報についての説明

■ Φ_{DP} : 偏波間位相差

- 水平・垂直偏波の同時送信後、受信までに生じた正味の偏波間の位相差
- 粒径の大きい扁平な雨滴の場合、水平偏波の位相の遅れ > 垂直偏波の位相の遅れとなるため、強雨域を通過するほど位相差が大きくなる。
- 粒子の縦横比、雨水量（経路上の積算値）を表す
- 取り得る値の範囲: $0 \sim 720^\circ$ 、もしくはそれ以上
- 降雨減衰の影響を受けない → 減衰補正に有効



偏波間位相差 Φ_{DP} の物理的意味について説明します。

Φ_{DP} は水平・垂直偏波の同時送信後、受信までに生じた正味の偏波間の位相差を表します。

雨滴の場合、粒子の形状は球状か扁平な粒子しか含まれないため、ビームは進行方向に向けて徐々に位相差が生じることになるので、ビーム方向に向けて Φ_{DP} の値は大きくなるような分布となります。

特に、強雨ほど、扁平につぶれた雨粒の割合が多くなるので、位相差が広がり、 Φ_{DP} は増大します。

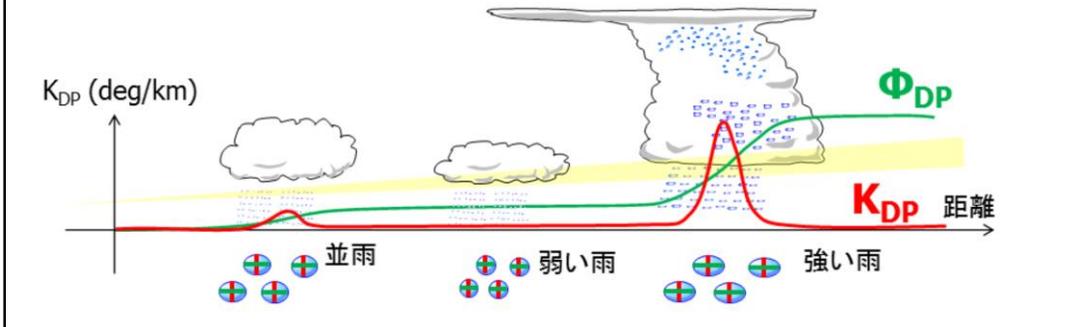
Φ_{DP} を用いることのメリットは、位相情報なので振幅（反射強度など）と違って減衰しないところです。

この減衰しないという情報が、降水強度推定などの高精度化に繋がるポイントになります。

位相差情報についての説明

■ K_{DP} : 偏波間位相差変化率

- Φ_{DP} の距離方向変化率
- 雨滴粒子の縦横比と雨水量を表すパラメータ
- 取り得る値の範囲: -1 to 20 (degrees/km) ※Cバンドのときの範囲
※ K_{DP} 負は例えば、乾いた雪などの時に生じ得る
- 強雨の降水強度推定に有効(粒径分布の変化による影響を受けにくい)
- 注意点: 弱い雨・融解層域に対して精度が悪い(ノイズの影響が大きい)
- 注意点: 固相の粒子に対して感度が悪い(主に雨に対して有効)



次に、偏波間位相差変化率 K_{DP} の物理的意味について説明します。

K_{DP} は Φ_{DP} のレーダーのビーム方向の変化率(傾き・微分量)を表します。

各地点の雨滴粒子の縦横比の特徴や雨水量に関連した値になるので、強雨域では K_{DP} の値が大きくなり、弱雨域では値が小さくなります。

K_{DP} のメリットは、 Φ_{DP} 同様に減衰しないことにあり、更に、従来の降水強度推定手法と違って降雨の層状性・対流性の仮定(粒径分布)に関わらず、雨水量に関する情報を扱うので、 Φ_{DP} から計算して求めた K_{DP} が、特に降水強度推定に有効なパラメータとなります。

注意点:

強雨域に対して対応の良いパラメータですが、

・観測される Φ_{DP} がノイズを含んでおり、その変化率である K_{DP} は計算誤差が多く含まれ、特にノイズの影響を受けやすい弱雨・融解層域では推定精度が期待できない。

・ K_{DP} による降水強度推定は、雨以外の領域を意図していない。

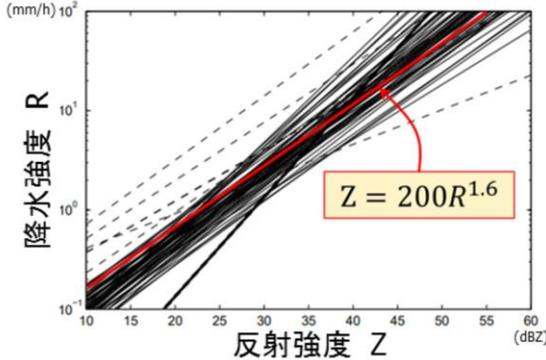
という問題点があります。

位相差情報利用の背景

■ 従来手法:

※Zは反射強度、Rは降水強度を指します

- Z-Rの関係から推定 (Marshall et al. 1955)



問題点

- ① 降雨によるZの減衰
- ② 層状性降雨の仮定

求められる改良

- ① 降雨の減衰を補正
- ② 対流性降雨にも対応した推定

■ 二重偏波情報 K_{DP} 、 Φ_{DP} の導入

期待される効果

- 減衰補正
- K_{DP} -R関係による降水強度推定

- ① 雨量計から離れた地域(海上など)の推定精度向上
- ② 強雨の推定精度向上

(Bringi and Chandrasekar 2001^{ほか})

従来手法の特性や、二重偏波レーダー情報(主に位相差情報)の利用で改善される内容について簡単に説明します。

<従来手法>

反射強度Zから降水強度Rを推定する手法です。

Battan(1973)などがまとめた図の通り、事例・降雨の特性によってたくさんの経験式が存在します。

気象庁ではその中でも、Marshall et al. (1955)の層状性降水の粒径分布を仮定した換算式を利用しています。

問題点①: Zは進行方向の降水によって徐々に減衰し、本来のZと比べて過小となります。

問題点②: 層状性の降水を仮定していることから、対流性の降水(※粒径分布が異なる)の推定に適しているとは言えません。特に、Z-R関係式は指数関数なので、強雨では、Zのわずかな減衰・観測誤差が大きなRの推定誤差に繋がります。

<二重偏波レーダーデータ K_{DP} 、 Φ_{DP} の導入>

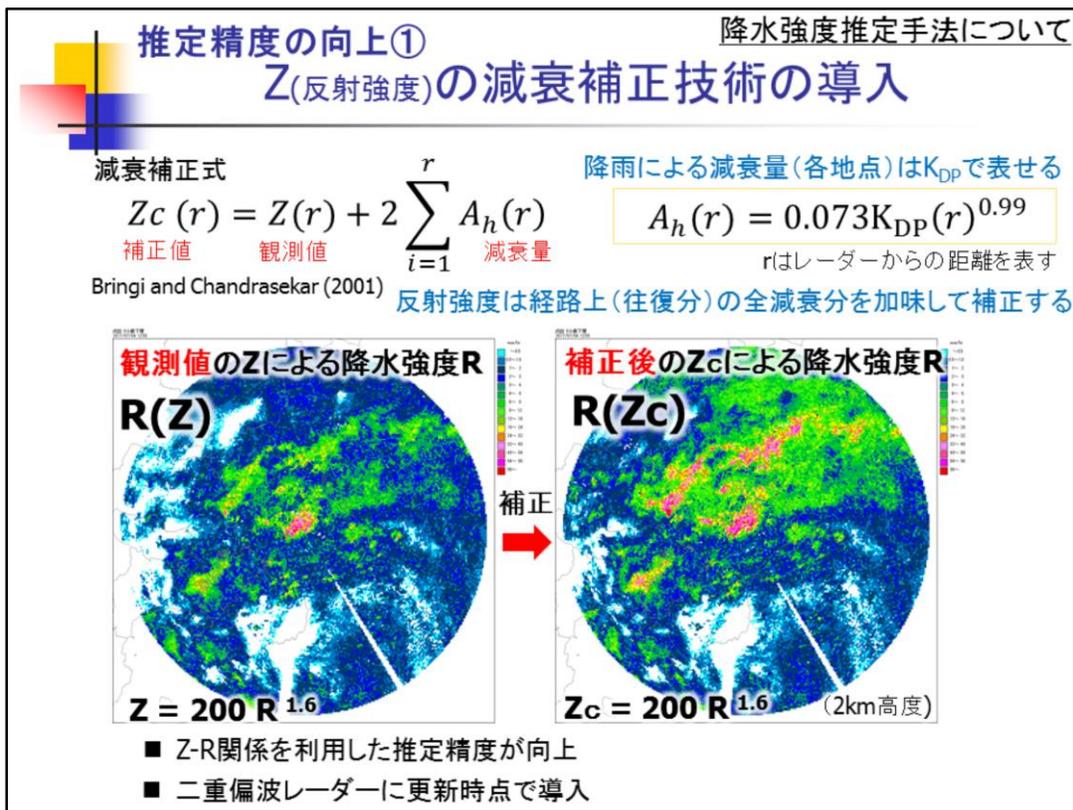
以下の項目で、既に研究がなされており、現業導入に向けて取り組んでいます

① K_{DP} あるいは Φ_{DP} を用いたZの減衰補正: 雨量計のない海上や山間部などで精度向上が期待できます。

※導入が容易なため、レーダー更新とともに導入しています。

② K_{DP} -R関係: 対流性の強雨域で精度向上が期待できます。

※準備が出来次第各サイト・各プロダクトで導入する形をとっています。



反射強度Zの減衰補正手法の技術導入について:

反射強度Zの降雨に伴う個々の地点での減衰量 (A_h : Attenuation(hは水平方向の意))は、 K_{DP} から求められます。

観測された反射強度は、往復分の経路上で受けた減衰の結果なので、減衰補正量は A_h の積算値の2倍($2\sum A_h$)で表されます。

なお、補正式において、それぞれのパラメータに記された(r)は、レーダーからの距離rにおける値であることを意味します。

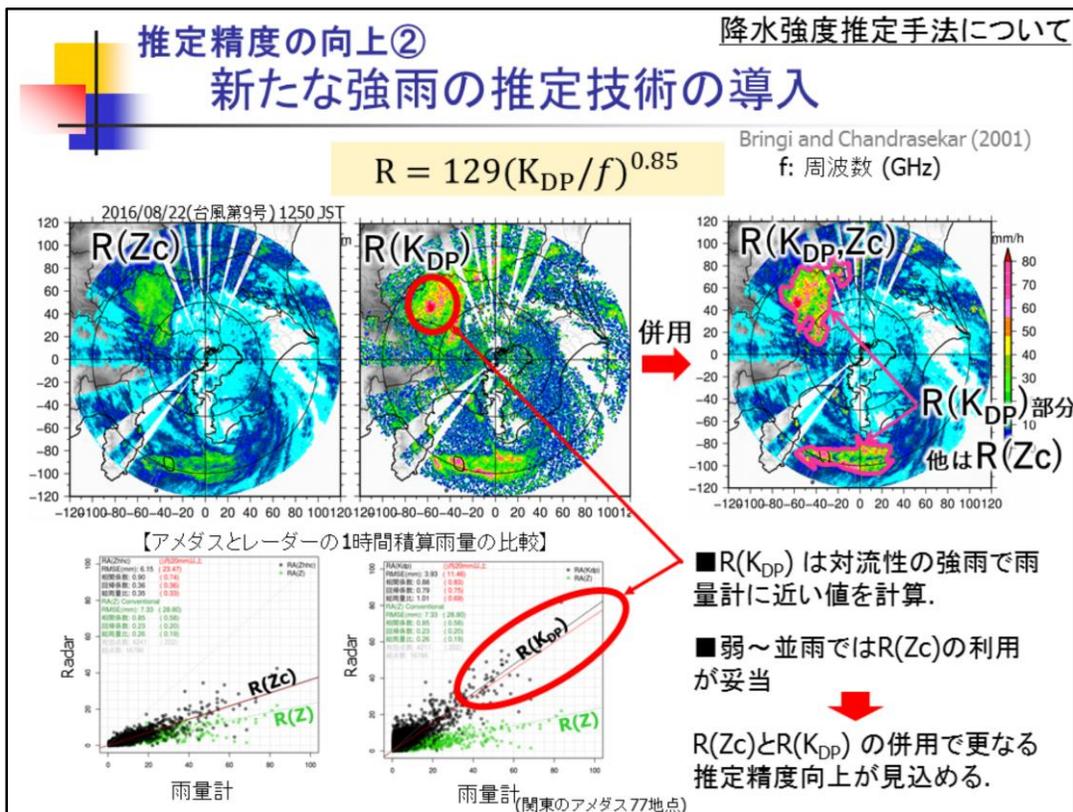
これによりZ-R関係を利用した降雨の推定精度向上が期待されます。

二重偏波レーダーへの更新時に減衰補正は適用されます。

注意点: 雨の減衰補正式のため、あらゆる降水種別の減衰に対応していない点は将来の課題です

補正式はレーダーの周波数にも依存するので、上式はCバンドの式となります。

他の周波数帯はBringi and Chandrasekar (2001)等を参照して下さい。



K_{DP}-R関係を利用した強雨の推定技術導入について:

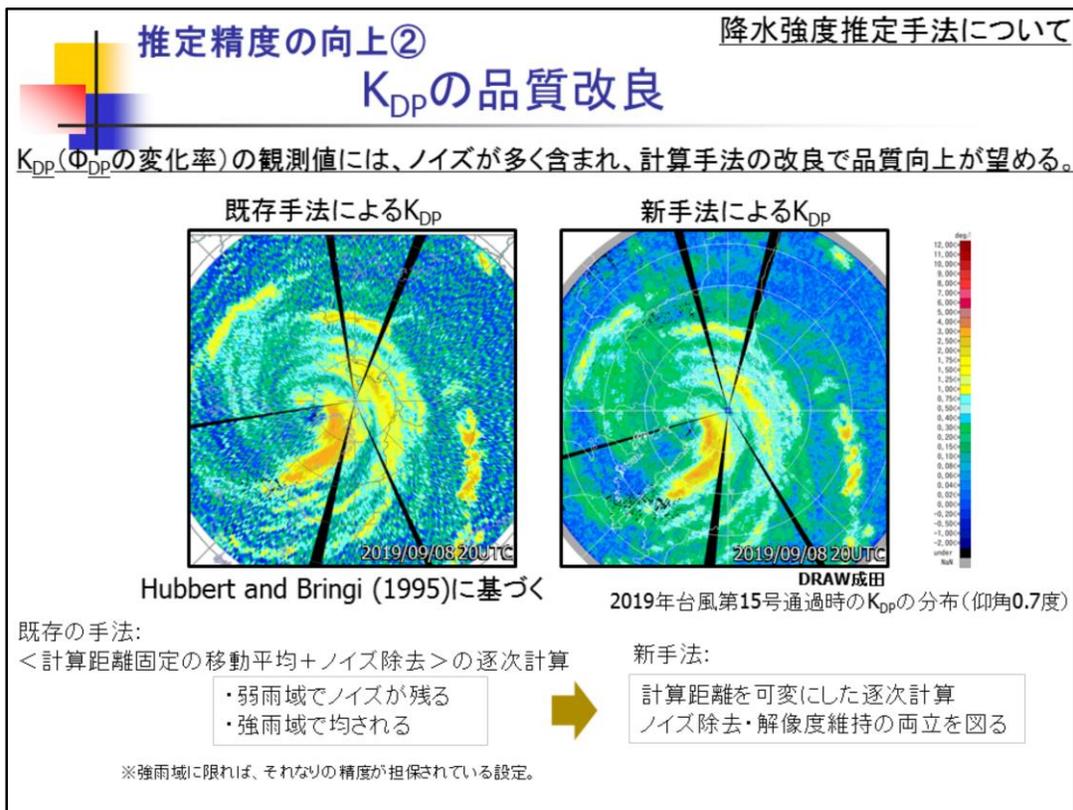
減衰の影響を受けず、雨水量に相関を持つ二重偏波パラメータK_{DP}は強雨の推定に適しています。

そこで強雨の推定には、Bringi and Chandrasekar (2001)の関係式を利用します。

減衰補正したZ-R関係(※R(Z_c)と表記)と雨量計の比較では、並雨より強い雨でR(Z_c)に過小評価の傾向がありました。

K_{DP}を用いた降水強度R(※R(K_{DP})と表記)では、並雨より強い雨で、より雨量計の値に近づいています。

そこで、両者の長所を活かし、新たな降水強度推定ではR(K_{DP})とR(Z_c)の併用利用の開発が進められています。



K_{DP} の計算方法改良による推定精度向上について:

左図が既存の計算手法(Hubbert and Bringi 1995)による K_{DP} の分布です。

右図が新手法による K_{DP} の分布です。

K_{DP} の利用が簡単ではない要因は、基となる Φ_{DP} の観測データにも他の観測データ同様ノイズが含まれていて、そこから差分を取って得られる K_{DP} は更に顕著なノイズの影響がでることになりました。

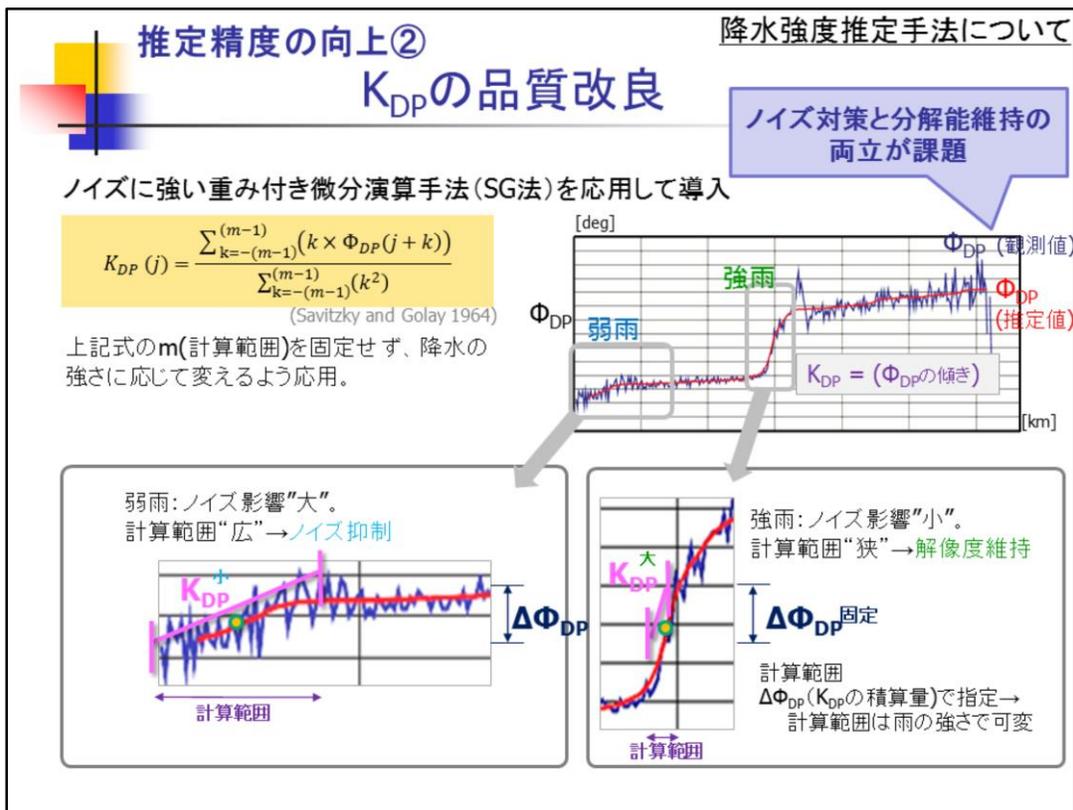
ノイズを消すには計算範囲を広げて均せば良いのですが、そうすると小さな強雨のシグナルを消してしまう恐れがあります。

K_{DP} の算出を困難にさせている要因は計算距離で、分解能を高めることとノイズを消すことの両立が困難なことになりました。

現状では、 K_{DP} の直接利用は強雨域のみなので、既存の手法でもそれなりの精度が得られるように設計はしています。

ただし、更なる推定精度向上には、弱雨域のノイズ除去と、強雨域の更なる高解像度化が必要不可欠です。

以降は新手法の紹介で、弱雨域のノイズ抑制と、強雨域の解像度維持の両立を満たすためのアルゴリズムを説明します。



K_{DP} 計算手法の概要(1):

K_{DP} の基となる Φ_{DP} の観測値(Ψ_{DP} とも呼ばれる)は元々右上図の青線のような、ノイズを含んだものです。

ノイズを含んだままの Φ_{DP} からその変化率 K_{DP} (※右上図では傾きを意味する)を計算すると、極端な正・負の値となってしまいます。

ここで期待される変化率 K_{DP} とは、赤線のように顕著なノイズを取り除いた Φ_{DP} から求めたものになります。

このような K_{DP} の算出には、SG法(Savitzky and Golay 1964)のようなノイズに強い手法が適しています。

現在、開発中の K_{DP} の新手法は、このSG法を応用利用していて、弱雨域は広い範囲で計算することでノイズ除去し、強雨域では狭い範囲で計算することで解像度を保たせることで、これまでの計算手法で抱えていた矛盾を解消しています。

この手法のポイントは、計算範囲(距離)を1つに固定させるのではなく、 K_{DP} の積算量($\Delta\Phi_{DP}$)を固定して計算範囲を個々に決めることにあります。例えばある範囲でSG法で計算した場合に、その範囲の K_{DP} の積算量($\Delta\Phi_{DP}$)が指定値より過大(過小)なら、更に計算範囲を狭め(広げ)、 $\Delta\Phi_{DP}$ を満たすまで逐次的に計算を行うというものです。ただし、可変と言っても $\Delta\Phi_{DP}$ の指定値自体が、雨量に応じた計算幅を与えてしまうので、2段階(以上)の異なる設定のSG法を行い、強雨や弱雨に適した K_{DP} を得ています。

降水強度推定手法について

推定精度の向上② K_{DP} の品質改良

- ノイズ除去機能の追加: 1回目のSG法で得た値でノイズ判定し、2回目のSG法に活かす

2回(以上)SG法実施

1回目のSG法で得られた Φ_{DP} の推定値と観測値が一定以上乖離している場合、その値を置換してから、2回目のSG法を行う。

- K_{DP} の更なる高解像度化: 単純な変化率の値も可能なら活かす

$$K_{DP}(\text{SG法}) \approx \frac{\Phi_{DP}(\text{前}) - \Phi_{DP}(\text{後})}{4\Delta r}$$

SG法と極端な乖離がなければ、単純な変化率の値も利用

- 雹域の考慮: 雹域などで K_{DP} 負値を取り得る。
逐次計算中の K_{DP} の値を保存しておき、一定範囲の負値に限り許容する。

K_{DP} 計算手法の概要(2):

■ ノイズ除去:

2段階(以上)のSG法を有効活用し、SG法間にHubbert and Bringi (1995)で用いているようなノイズ除去手法を取り込みました。

初回の計算結果と観測値が極端に異なれば、観測値の値を計算値に置き換えて、2回目のSG法を行うというものです。

2回目のノイズを省かれたSG法版 K_{DP} は更に精度が向上します。

■ 高解像度の維持:

ノイズがなければ、最も高解像度の K_{DP} というのは、単純に隣り合ったデータの差分から得る変化率(傾き)です。

ノイズの影響がほとんどない強雨域に限っては、この値も利用して解像度を高めています。

■ 雹域の処理の機能追加:

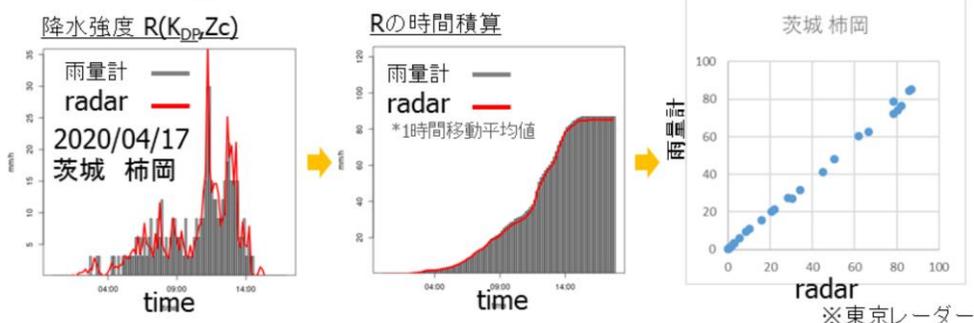
乾いた雹域など一部の粒子は K_{DP} が負になることがあります。

ノイズで生じる負の値とは異なり重要な情報です。

従来の K_{DP} 計算手法の中には、正の値のみを許容する手法もありますし、我々の開発した手法も必ず正の値になるまで計算を繰り返します。

よりもっともらしい K_{DP} 分布を得るため、一定スケールに限り、負の値も許容される仕組みを導入しました。

それぞれの閾値や適用スケールは、パラメータファイルで指定して、異なる周波数や解像度のレーダーでも設定を変えて利用できるようにしています。

K_{DP} の品質改良改良した K_{DP} 及び Z_c を利用した降水強度の雨量計比較

- 観測環境の良い地点の低仰角のデータを用いれば、 $R(Z_c)$ と $R(K_{DP})$ の併用で雨量計補正無しでも高精度の雨量推定が見込める。
※山や高層建造物の影響を受けないレーダー近傍で、融解層や雪の影響を受けない領域。
- 利点： $R(K_{DP})$ の直接利用により、対流性の急発達する強雨の推定精度向上。
- 注意点：遠方はビームが広がり、観測高度も高くなるなど、補正なしの $R(K_{DP})$ を全領域で活用することは困難。

新手法の利用例と品質：

強雨が観測された事例の $R(K_{DP}) \cdot R(Z_c)$ 併用の推定結果は図の通りです。品質改良した K_{DP} を用いた結果となります。

観測環境の良い地点においては、極めて良い結果を示しました。

この図では概ね、降水強度20mm/h以上で $R(K_{DP})$ を、20mm/h以下で $R(Z_c)$ を用いており、ほぼ雨量計に一致しています。

利点：従来の $R(Z_c)$ の利用でも、雨量計補正などをすればある程度妥当な値を計算しますが、急発達する積乱雲などは逆に補正による悪影響も起こり得ます。適切に $R(K_{DP})$ を利用できれば(主に急発達する積乱雲)、従来より推定精度の高い情報の提供が可能となります。

注意点：レーダーの性質上、どうしても遠方ほどビームが広がり、観測高度も高くなり、地形の影響も受けるなどして不正確な値になります。近傍であっても建物の影響で正しい値にならない場合があります。この手法単体で補正なしでの全域利用は困難なため、従来の雨量計補正などの技術も含めた開発が今後も必要となります。

推定精度の向上③

品質管理(非降水エコー除去)

- 非降水エコー: グラウンドクラッタ、シークラッタ、昆虫などの晴天エコー等
従来の単偏波レーダーでは晴天エコーによる降水プロダクトへの悪影響を避けるため、弱エコー($Z < 15.3\text{dBZ}$)は足切りしていた。
- 二重偏波レーダー化により、その非降水エコー除去性能は向上した(2段階)

1段階: 選択的MTI処理(構造物や樹木など)

MTI: moving target indicator

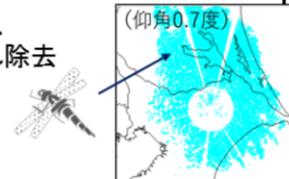
グラウンドクラッタ、シークラッタなどを対象
従来のドップラースペクトル等によるフィルターに、新たに Φ_{DP} の空間変動の条件等も考慮して判定・除去。レーダーサイト側で実施。



2段階: 晴天エコーの除去(昆虫や鳥など)

反射強度の弱い昆虫や、反射強度の強い他の生物(鳥など)を、
二重偏波情報(ρ_{HV} や Z_{DR} 、それらの空間変動)などで降水と区別し除去
本庁システム(ROPS)側で実施
→ 降水強度推定のアルゴリズムの中で除去

晴天エコーの例



※風の情報など利用価値はある

複数の偏波パラメータを利用した品質管理による、降水強度推定精度向上の点についても簡単に説明します。

非降水エコーについて: グラウンドクラッタ(構造物や樹木)、シークラッタ(波や波しぶき)、昆虫などの晴天エコー等がある。

二重偏波レーダーのデータを活用すれば、降水エコーと非降水エコーをある程度区別できるようになります。そのため、強雨に含まれるノイズや今まで再現できなかった弱い降水の表現が変わります。

従来の単偏波レーダーでは、エコーの判別が出来ないため、暖候期にしばしば発生する昆虫などの晴天エコーを避けるべく、 15.3dBZ (0.33mm/h)以下を足切りしていました。二重偏波への更新後は、エコーの識別性能が向上するため、弱い雨も足切りせず表現できるようになります。

※厳密には、「固体素子」二重偏波レーダーの特性もあり、 0.1mm/h 相当以上の降水エコーを利用するように設計しています。

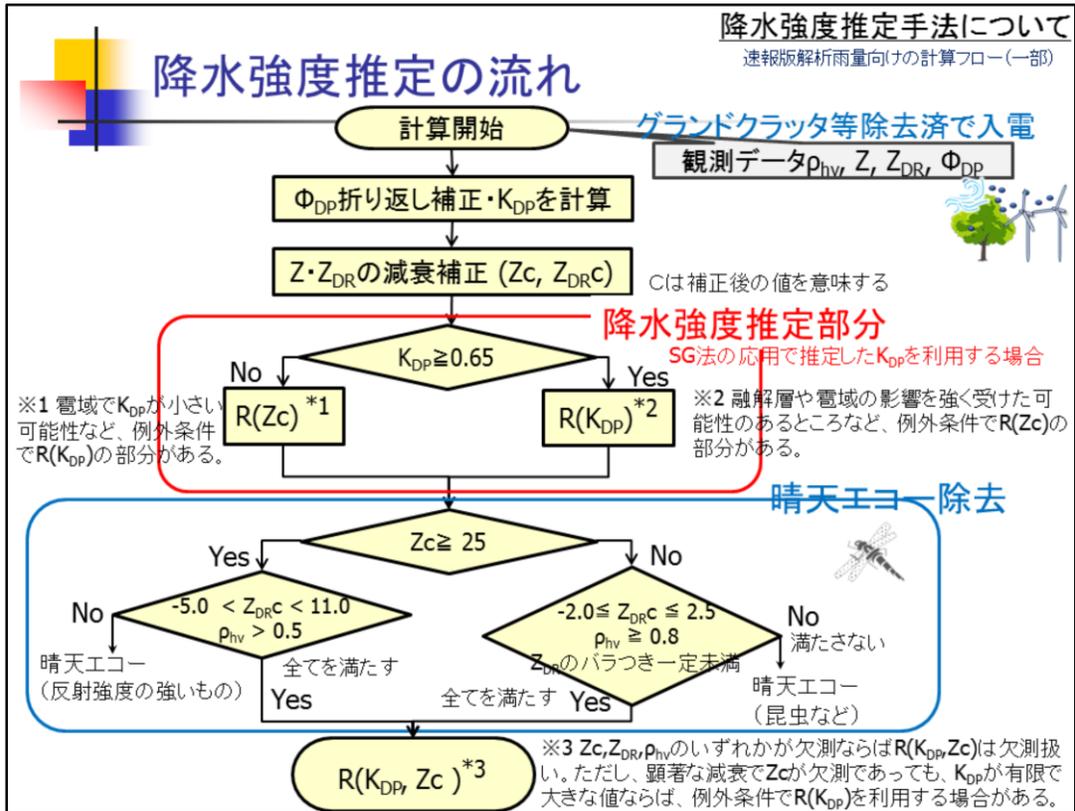
2段階の非降水エコー除去:

①レーダーサイト側での処理

従来からあるMTI処理(ドップラースペクトル等のフィルター処理)に Φ_{DP} の空間変動による降水エコー条件等も考慮し、グラウンドクラッタ、シークラッタ等をより効果的に除去可能。

②本庁システム(ROPS)側での処理

昆虫や鳥などの晴天エコーは空間一様性が極端に低い特徴(ρ_{HV})や降水では考えられない形状(Z_{DR})、さらに、そのエコーの空間特性にもばらつきがあるなど、降雨とは異なる特性から、効果的に除去可能。晴天エコーは、風の情報などは有益なため、サイトで除去せず、降水強度推定のプロダクトの中で除去します。



ここまでにとまとめた降水強度推定手法について、現在の速報版解析雨量向けの降水強度推定用計算フローの主要な部分を示します。

新手法(SG法の応用)で推定した K_{DP} の場合で、あらかじめグランドクラッタ・シークラッタを除去した状態からのフローです。

①SG法による K_{DP} 計算:

折り返し補正をした観測値 Φ_{DP} から、 K_{DP} を計算します。

②減衰補正:

K_{DP} を用いて Z や Z_{DR} を補正します。

③降水強度推定:

概ね $K_{DP}0.65$ 以上で $R(K_{DP})$ を利用します。

明らかな雹や、融解層などの特徴の場合、別途それぞれ、 $R(Z_c)$ を $R(K_{DP})$ で利用するなどの例外条件もあります。

なお従来の K_{DP} (Hubbert and Bringi 1995)の場合は、ノイズを避けるため、 $K_{DP}:0.6$ 以上、 $Z:38$ 以上で $R(K_{DP})$ を利用します。

④晴天エコ除去:

複数の二重偏波パラメータも全て利用したエコ判定をします。

昆虫や鳥などを想定した晴天エコの除去を行い、 $R(Z_c)$ と $R(K_{DP})$ を組み合わせた降水強度を出力します。



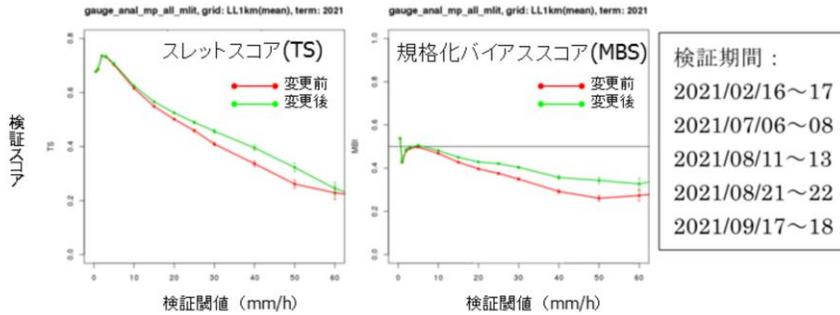
現業導入(1)

配信資料に関する技術情報第580号より抜粋

■ 高解像度降水ナウキャスト

■ 令和4年2月24日から

- R(Zc)と雨量計の降水強度解析を行ったうえで、R(K_{DP})を補正情報として利用
- 検証でもK_{DP}利用でスコア上昇を確認



雨量計の値を真値として高解像度降水ナウキャストデータを評価。

スレットスコア: 1に近いほど適正。

規格化バイアスコア: 0.5に近いほど適正、1(0)に近いほど過大(過小)。

エラーバーはブートストラップ法による検証指標の95%信頼区間。降水強度は1時間積算後1kmメッシュ平均して1時間雨量に換算。

高解像度降水ナウキャストでのR(K_{DP})利用:

一定程度の品質向上が確認され、全ての二重偏波レーダーでR(K_{DP})の利用を開始しました。

検証でもK_{DP}利用でスコアの上昇が確認されました。

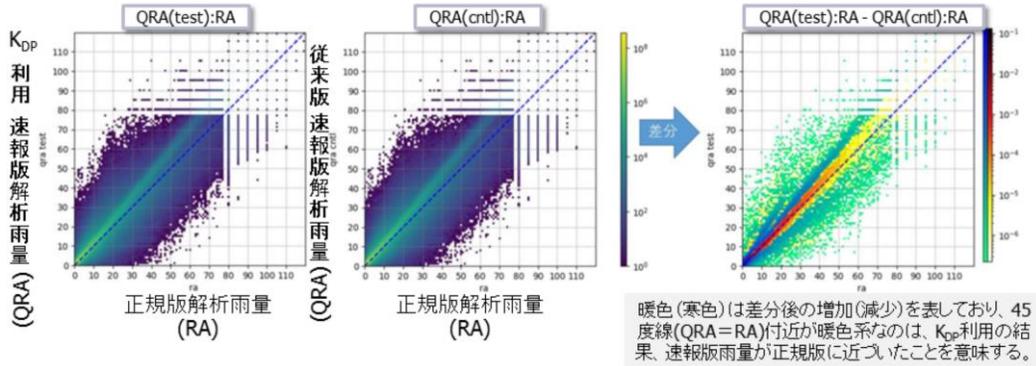
現業導入(2)

配信資料に関する技術情報第586号より抜粋

※最新10分の解析には雨量計が間に合わないため10分前の雨量換算係数を用いる

速報版解析雨量

- 令和4年3月23日から ※東京レーダーのみ
 - 従来版 R(Zc) (50分積算、10分積算、雨量換算係数)の計算に加え、
 - 直近の10分解析にR(K_{DP})を補正せず利用
 - 直近10分で係数補正したR(Zc)の過大・過小傾向を改善できる領域で利用
 - 統計的に、R(K_{DP})利用のほうが、従来版より速報版解析雨量が正規版解析雨量に近い傾向となり、過大・過小傾向が改善されたことを確認
 - 今後、評価が済み次第、他の二重偏波レーダーのデータも利用予定



解析雨量におけるR(K_{DP})利用:

R(K_{DP})とR(Zc)を合成した速報版解析雨量について、東京レーダーで一定程度の品質向上が確認され、利用を開始しました。

他の二重偏波レーダーのR(K_{DP})の利用についても、品質向上の評価が確認出来次第、速報版において利用される予定です。

正規版解析雨量への導入は今後の課題です。

※速報版解析雨量: 算出処理の所要時間を短縮して作成頻度を10分間隔とした1kmメッシュの前1時間降水量分布です。

速報版解析雨量は、算出処理の所要時間を短縮するため、雨量の算出に際し利用できる雨量計の数が制限されます。

図の説明: 正規版解析雨量(RA:横軸)に対する、速報版解析雨量(QRA:縦軸)の値の分布。

左図は二重偏波情報のK_{DP}を利用した速報版解析雨量(QRA(test))、中央図は、従来の速報版解析雨量(QRA(cntl))、右図はその差分を表します。右図の暖色系は、K_{DP}利用と従来版の速報版解析雨量の差分で、K_{DP}利用における増加を表します。

45度線付近でK_{DP}利用版が増加しており、速報版の品質が正規版の解析雨量の結果に近づく品質になったことを意味します。



降水粒子判別手法について(開発中)

- 降水粒子判別手法の概要
- 利用する二重偏波要素とその特性
- 判別結果の例
 - 融解層(ブライトバンド)
 - 突風事例(降ひょう)
- まとめと今後の予定

現在開発中の降水粒子判別手法の説明を、標記の順に行います

降水粒子判別手法の概要

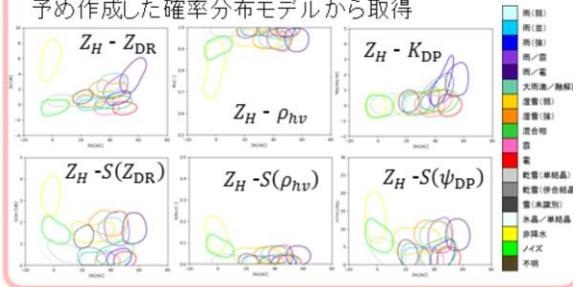
- 観測された二重偏波データを最もよく説明できるような降水種別を求める
- 「二重偏波データ $\mathbf{x} = (Z_H, Z_{DR}, K_{DP}, \rho_{hv}, S^*(Z_{DR}), S(\rho_{hv}), S(\Psi_{DP}))$ を観測したとき、そのターゲットの降水種別が C_i である確率」= $P(C_i|\mathbf{x})$ が最大となる C_i を求める。
- $P(C_i|\mathbf{x})$ はベイズの定理より以下の関係で表される。 $P(C_i|\mathbf{x}) \propto P(\mathbf{x}|C_i)P(C_i)$

※S: 中央絶対偏差

事後確率 \propto 尤度 \times 事前確率

尤度 $P(\mathbf{x}|C_i) = \prod_j P(x_j|C_i)$

降水種別 C_i が二重偏波データ \mathbf{x} に対して取り得る確率
予め作成した確率分布モデルから取得

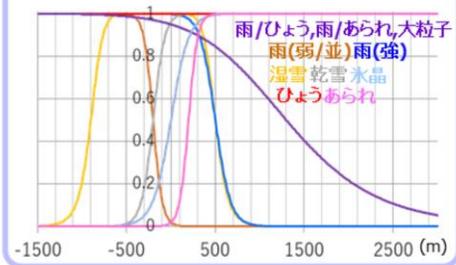


粒子の形状やその分布特性に依存して決まる確率
二重偏波データから計算

(小池2021, 測候時報)

事前確率 $P(C_i)$

降水種別 C_i が0度面高度からの偏差
 ΔZ_0 (m) に対して取り得る確率



環境の気温に依存して決まる確率
0°C高度からの偏差から計算

(Umehara et al. 2019, 39th Radar conf.)

降水粒子判別手法の概要を説明します。

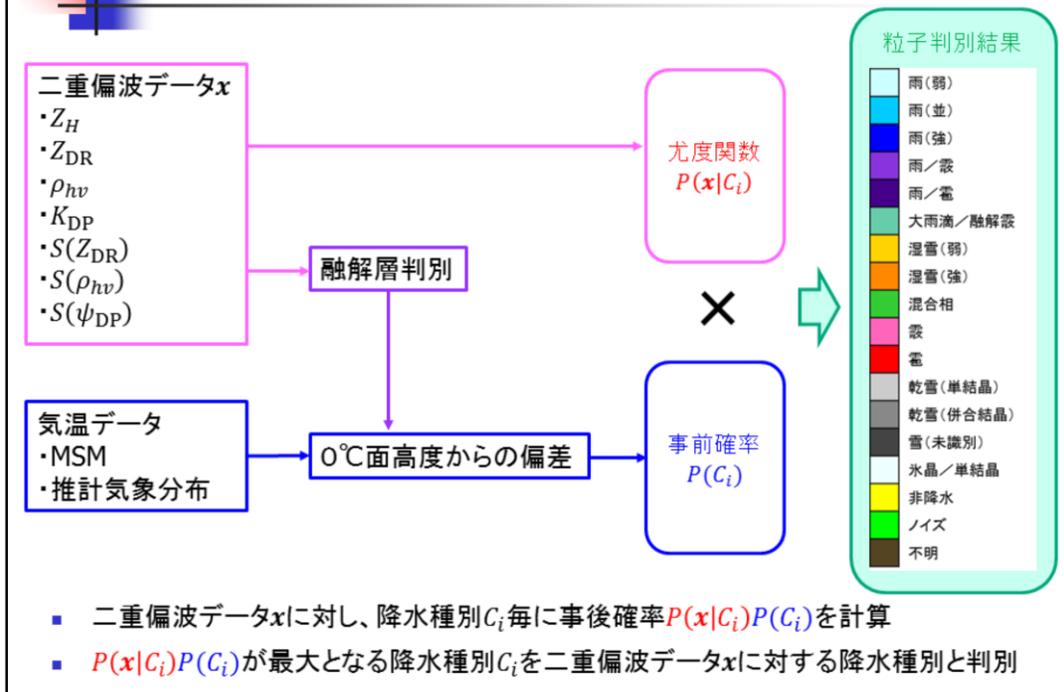
降水粒子判別とは、二重偏波データを観測した時に、その散乱体の降水種別として最も確からしい降水種別を求めるものです。

本手法はベイズ推定に基づいており、尤度(ゆうど)と事前確率の積から事後確率を求めます。

尤度は降水種別が二重偏波データに対して取り得る確率を、実際に観測で得られた二重偏波データから作成したものであり、降水粒子の形状や分布特性に依存して決まります。

事前確率は降水種別が0°C面高度からの偏差に対して取り得る確率で、環境の気温に依存します。例えば雪であれば0°C高度以上の確率が高くなり、雨であれば0°C高度以下の確率が高くなります。

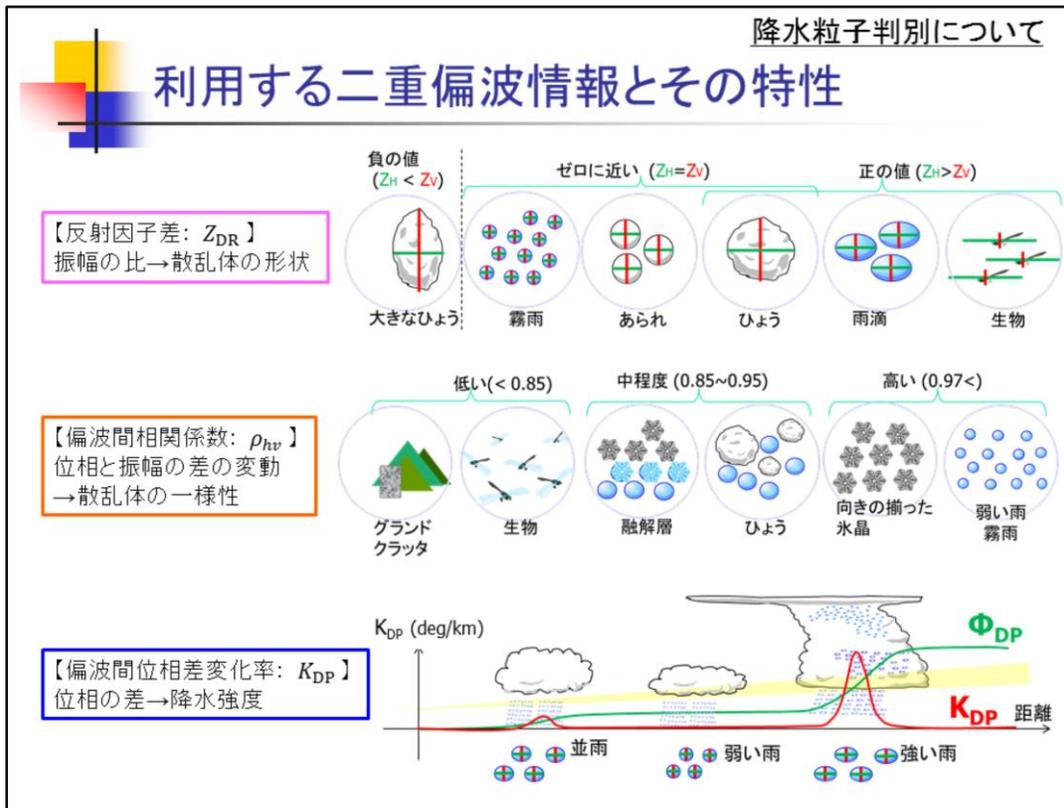
降水粒子判別手法の概要



降水粒子判別の処理においては、レーダーの観測格子毎に二重偏波データから尤度関数を求めるとともに、融解層判別を行います。

気温データと融解層判別結果を基に格子毎に0°C高度からの偏差を計算し、事前確率を求めます。

全ての降水種別について尤度関数と事前確率をかけた事後確率を求め、その中で事後確率が最も高い種別をその格子の降水種別として判別します。



降水粒子判別に利用する主な二重偏波情報とその特性について説明します。
反射因子差は水平偏波と垂直偏波の反射因子の比、つまり強度の差であり、散乱体の縦横比を表すパラメータです。例えば、霧雨やあられ、ひょうなど球形の粒子ではゼロに近く、雨滴や生物など扁平な場合には正の値になるという特徴があります。

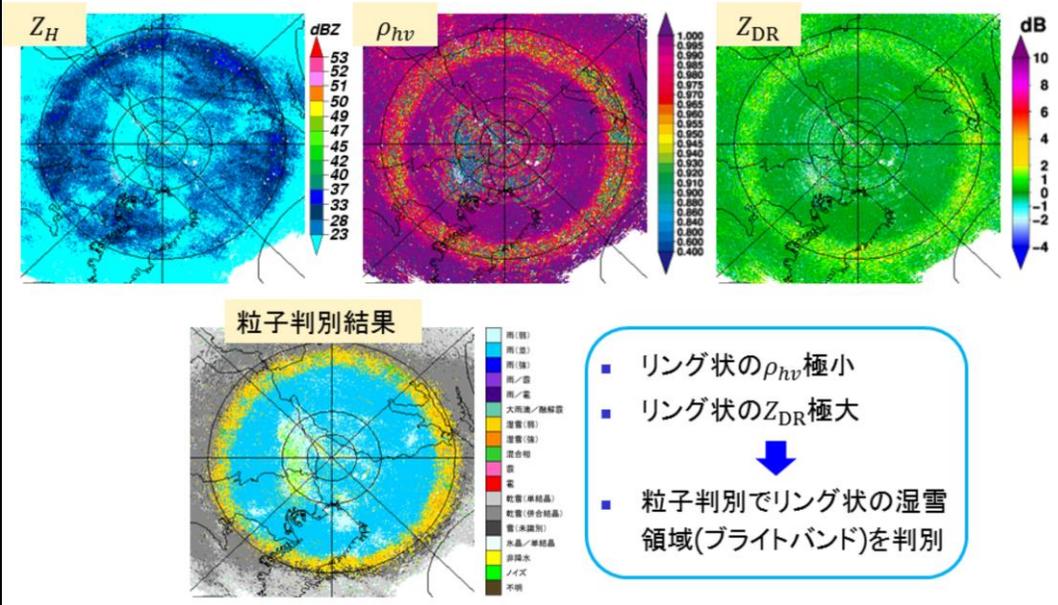
偏波間相関係数は、水平・垂直で受信した信号の相関係数であり、位相と振幅の差の変動に依存します。観測ボリューム内の散乱体の一様性を表すパラメータであり、1に近いほど、一様性が高いことを意味します。例えば、弱い雨や霧雨、向きの揃った氷晶などの場合は1に近く、グランドクラッタや生物などの非降水エコーでは低くなります。また、融解層などの一様でない粒子が分布する場合も、比較的低い値をとります。このことから、品質管理や粒子判別に有用なパラメータの1つです。

最後に、偏波間位相差変化率は位相の差であり、雨滴粒子の縦横比と雨水量の集中度を表すパラメータです。氷相の粒子に対しては感度が小さく、主に雨滴に対して有効で、強い雨ほど大きい値を示します。

上記の二重偏波情報や、その中央絶対偏差を利用して降水粒子判別を行っています。

粒子判別結果の例：融解層(ブライトバンド)

- 層状性降水の融解層の判別結果

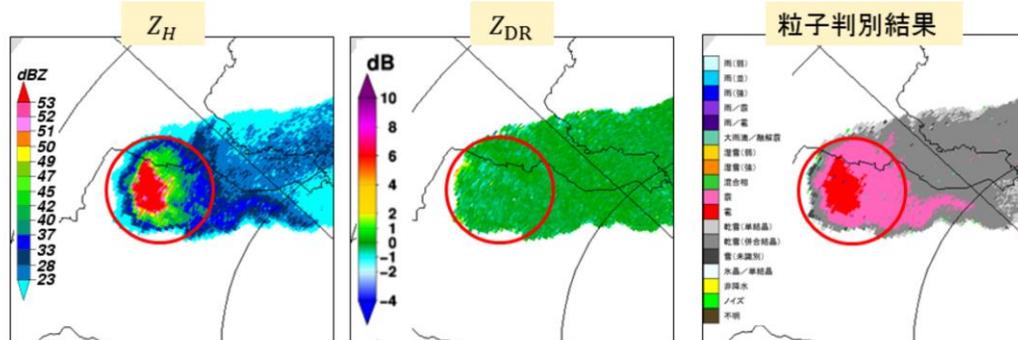


次に、粒子判別結果の例として、このスライドでは融解層(ブライトバンド)を示します。水平偏波反射強度 Z_H ではブライトバンドはそれほど明瞭ではありませんが、二重偏波情報ではリング状の偏波間相関係数 ρ_{hv} の極小域と反射因子差 Z_{DR} の極大域が観測されています。

この領域に対応して粒子判別でも湿雪領域が判別できています。

粒子判別結果の例: 突風事例(降ひょう)

- 2022年6月2日埼玉県でのダウンバースト/ガストフロント事例(降ひょう証言あり)



- 発達した積乱雲に伴い、 Z_H の極大を観測
 - 対応する領域の Z_{DR} は0～負の値を観測
- ↓
- 粒子判別ではひょう域を判別

他の判別結果の例として、降ひょうを伴う突風事例の例を示します。発達した積乱雲に伴い、非常に強い水平偏波反射強度 Z_H を観測しています。一方で対応する反射因子差 Z_{DR} は0～負の値を観測し、球形の氷粒子の存在を示唆しています。このような特徴を反映し、粒子判別ではひょう域を判別しています。

このように、湿雪やひょう・あられなどの代表的な粒子について粒子判別結果の精度評価を行っており、将来のプロダクト利用を目指しています。



降水粒子判別手法:まとめと今後の予定

- ベイズ推定を用いた降水粒子判別手法の開発を進めている
- 代表的な降水種別について、粒子判別結果の精度評価を行っている
- 一定精度での判別を確認後、各プロダクトへの利用可能性を調査し、将来のプロダクト利用を目指している



まとめ

- 二重偏波レーダーデータを活用して下記の技術を導入することで、降水強度をより正確に推定することが可能となった。
 - 1. 反射強度の減衰補正
 - 2. K_{DP} の計算手法の高度化と K_{DP} を利用した強雨の降水強度推定
 - 3. 品質管理(非降水エコー除去)※1、3はレーダー更新とともに各プロダクトへ導入

- 上記2について、以下のプロダクトで利用を開始した。
 - 高解像度降水ナウキャスト: 令和4年2月～
 - 速報版解析雨量: 令和4年3月～ ※東京レーダーのみ

- 二重偏波情報を利用して雲内の降水粒子の種別を判別する手法も開発中であり、将来のプロダクト利用を目指している。



参考文献

- 降水強度推定関連：
 - 高解像度降水ナウキャストにおける気象庁気象ドップラーレーダー二重偏波情報の利用開始について, 2022.2.18, 配信資料に関する技術情報第580号
<https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/580.pdf>
 - 速報版解析雨量における気象庁気象ドップラーレーダー二重偏波情報の利用開始について, 2022.3.18, 配信資料に関する技術情報第586号
<https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/586.pdf>
 - Battan, L. J., 1973: Radar observation of the atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago, 324 pp.
 - Beard, K. V., and Chuang C., 1987: A new model for the equilibrium shape of raindrops. J. Atmos. Sci., **44**, 1509–1524.
 - Bringi, V. N. and V. Chandrasekar, 2001: Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications. Cambridge University Press, 636 pp.
 - Bringi, V. N., M. Thurai, K. Nakagawa, G. J. Huang, T. Kobayashi, A. Adachi, H. Hanado, S. Sekizawa, 2006: Rainfall estimation from C-band polarimetric radar in Okinawa, Japan: comparisons with 2D-video disdrometer and 400 MHz wind profiler. J Meteorol Soc. Jpn., **84**:705–724.



参考文献

- Hubbert, J., and V. N. Bringi, 1995: An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 643–648.
- Marshall, J.S., W. Hirschfeld, and K. L. S. Gunn, 1955: Advances in radar weather. *Adv. Geophys.*, **2**, 1–56.
- Savitzky, A. and M. J. E. Golay, 1964: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Squares Procedures. *Anal. Chem.*, **36**, 1627–1639.

- 降水粒子判別関連:
 - 小池哲司, 2021: ベイズ分類を用いた二重偏波気象レーダーによる降水種別判別—クラスタ分析による教師データの作成—, 測候時報第88巻
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/88/vol88p001.pdf>
 - Umehara, A., Koike, T., Yamamoto, K., Nagumo, N., Yamauchi, H., 2019: Development of a practical hydrometeor classification algorithm via a Bayesian approach using C band dual-polarization radar. 39th International Conference on Radar Meteorology, Nara, Japan.



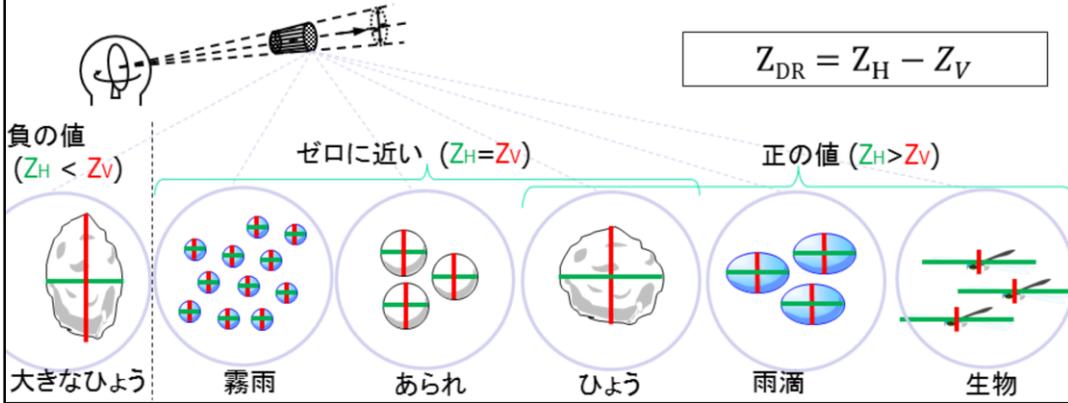
参考資料



二重偏波要素: Z_{DR} 反射因子差

■ Z_{DR} : 反射因子差: 粒子の縦横比

- 水平偏波と垂直偏波の反射因子の比(強度の差)
- 散乱体の縦横比を表すパラメータ。
- 取り得る値の主な範囲: **-4 to 10 (dB)** 球形に近いほど0、扁平だと**正の値**
- 粒子形状や粒径分布の情報が得られ、粒子判別や降水強度推定に有用





二重偏波要素: ρ_{hv} 偏波間相関係数

■ ρ_{hv} : 偏波間相関係数: 粒子形状の一様性

- 水平・垂直で受信した信号の相関係数
- 観測ボリューム内の散乱体の一様性を表すパラメータ。
- 取り得る値の主な範囲: 0 to 1 (単位なし) ※1に近いほど、一様性が高い
- 品質管理や粒子判別に有用

