

# 解析雨量の改善について

## 速報版解析雨量における二重偏波情報の利用

令和6年3月

気象庁 大気海洋部 業務課 気象技術開発室

# 目次

- 概要
- 速報版解析雨量における二重偏波情報利用方法
- 精度評価
- 今後の二重偏波情報利用手法開発

# 概要

# 改善概要

解析雨量では二重偏波情報のKdp※を速報版解析雨量の10分間解析雨量で利用する開発を行った。

- ・令和4年3月 東京レーダーで利用開始
- ・令和5年5月 9サイトの利用拡大

釧路、仙台、名古屋、福井、大阪、広島、福岡、種子島、室戸岬

令和5年度に二重偏波化したレーダーや、今後二重偏波化を予定しているレーダーについても精度の確認が終了次第、二重偏波情報の利用を開始する予定

※Kdp：偏波間位相差変化率

解析雨量では二重偏波情報のKdp※を速報版解析雨量の10分間解析雨量で利用する開発を行いました。

令和4年3月に東京レーダーの利用開始し、令和5年5月には釧路、仙台、名古屋、福井、大阪、広島、福岡、種子島、室戸岬の9サイトの利用を拡大しています。

令和5年度に二重偏波化したレーダーや今後二重偏波化を予定しているレーダーについても精度の確認が終了次第、二重偏波情報の利用を開始する予定です。

本資料では、この改善の概要について解説します。

※Kdp:偏波間位相差変化率

# 検証概要

本資料では令和5年5月に速報版解析雨量で9サイト利用拡大するために行った精度検証を取り上げる

- データ期間
  - 2022年6、7、8月
- 検証に利用した二重偏波化レーダー
  - 釧路、仙台、名古屋、東京、福井、大阪、広島、福岡、種子島、室戸岬
- 速報版解析雨量を1時間毎に実験して評価
  - 雨量計、正規版解析雨量と比較して精度や特性の変化を確認

※ 本資料の解析雨量の用語

正規版解析雨量：30分毎に精度を重視して計算する解析雨量

速報版解析雨量：10分毎に速報性を重視して計算する解析雨量

本資料では令和5年5月に速報版解析雨量で9サイト利用拡大するために行った精度検証を取り上げます。

各検証は2022年6、7、8月のデータを使用して行われています。

検証には既に利用開始している東京レーダーを含めた、釧路、仙台、名古屋、東京、福井、大阪、広島、福岡、種子島、室戸岬レーダーのデータを利用しました。

速報版解析雨量は10分毎に計算しますが、計算負荷の軽減や正規版解析雨量の比較を行うために1時間毎に実験して評価しました。

本資料では解析雨量について以下の用語を用います。

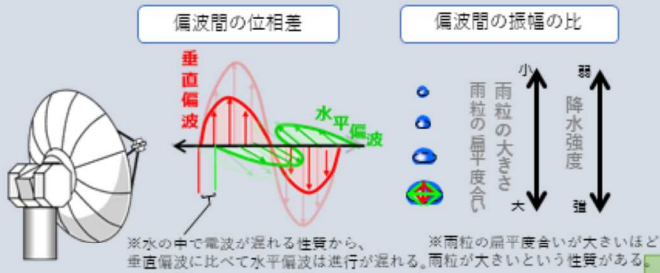
「正規版解析雨量」は30分毎に精度を重視して計算する解析雨量

「速報版解析雨量」は10分毎に速報性を重視して計算する解析雨量

# 速報版解析雨量における 二重偏波情報利用方法

# 解析雨量への二重偏波情報を利用した降水強度推定の導入

## 二重偏波レーダーの仕組み



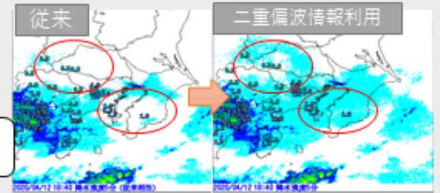
二重偏波レーダーへの更新により、反射強度の情報に加え、以下の新たな観測情報が利用可能となる。

- ✓ 偏波間の振幅の比の情報
  - 振幅の比から雨粒や非降水性粒子の形状がわかることを利用した品質管理
- ✓ 偏波間の位相差情報
  - 電波の経路上で生じる位相差を活用して反射強度の減衰量を推定
  - レーダーからの距離ごとの位相差の変化量から強い降水をより高精度で推定
- ✓ 位相・振幅の比の変動情報
  - ノイズや地形等からの散乱波は位相・振幅が安定せず変動する性質を利用して品質管理

## 降水強度を正確に推定

①品質管理能力が大幅に向上しノイズと区別した弱い雨の情報を抽出

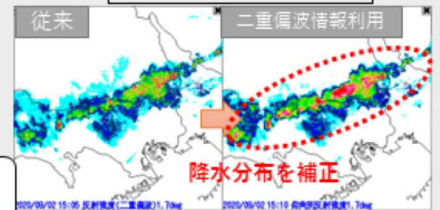
レーダー更新時に適用済み



従来の降水強度R(Zc)の改善

②雨による電波の反射強度の減衰の影響(過少評価)を補正した降水強度分布を作成

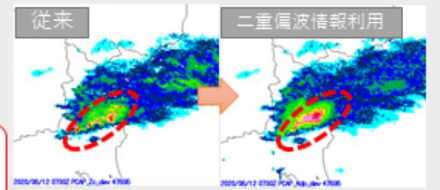
レーダー更新時に適用済み



従来の降水強度R(Zc)の改善

③雨粒の大きさではなく雨の量を測ることで、高い精度で強雨域の降水強度を推定

速報版解析雨量で利用(10 サイト)



二重偏波情報を活用した降水強度推定R(Kdp,Zc)の導入

二重偏波情報を利用した降水強度を推定することによる解析雨量精度向上には大きく3つの効果が期待されています。

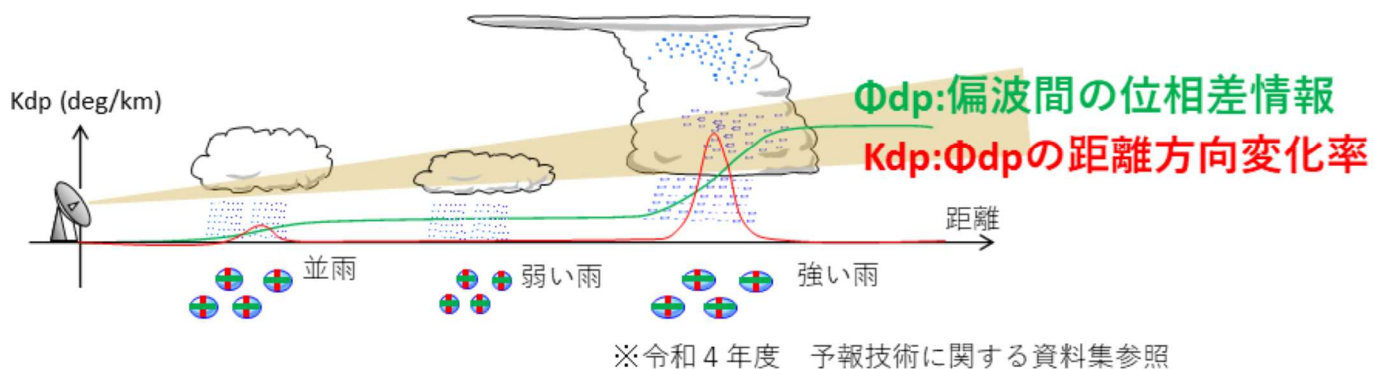
- ①は品質管理をより適切に行えるため、弱い雨をノイズと区別することが可能になりました。これにより弱い雨の広がり具合を従来よりも解析雨量で適切に表現できるようになります。
- ②は雨による電波の反射強度の減衰を二重偏波情報により補正することにより、降水強度の分布がより適切になります。
- ③の効果は雨粒の大きさではなく雨の量を測ることで、高い精度で強雨域の降水強度を推定が可能となります。

①、②の効果は二重偏波レーダーに更新された際に取り込まれますが、③を取り込むには、従来の反射強度による観測情報に加えて、二重偏波情報の一つである偏波間位相差変化率を取り込むための開発が必要です。

# 二重偏波情報による強雨の降水強度推定

## ■ $K_{dp}$ : 偏波間位相差変化率:

- 雨滴粒子の縦横比と雨水量を表すパラメータ
- 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)

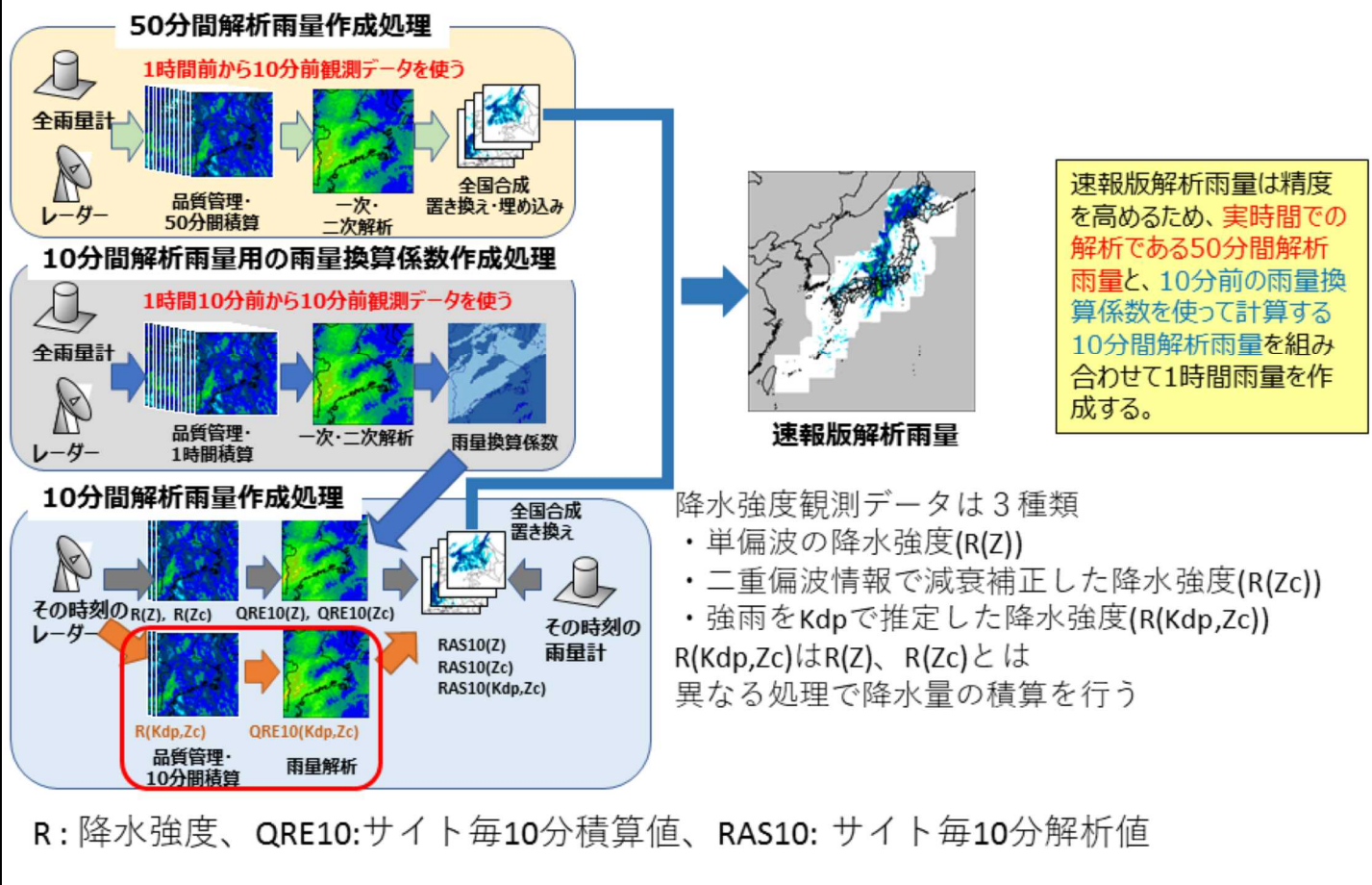


二重偏波情報による強雨の降水強度推定手法について説明します。  
詳しくは予報技術に関する資料集「二重偏波レーダーデータの活用技術」を参照ください。

$K_{dp}$ は偏波間の位相差情報 $\Phi_{dp}$ の距離方向変化率(傾き・微分量)を表します。  
強雨域で位相差 $\Phi_{dp}$ が大きく増加したとき、その傾きである $K_{dp}$ は大きな値を示します。  
この値は、降雨の層状性・対流性の粒径分布に関わらず、ビーム内を通過する雨水量による位相差を表すため、粒径分布の変化に関わらず雨水量と相関のある、降水強度推定に有効なパラメータとなります。



# 速報版解析雨量の作成方法



速報版解析雨量の作成フローです。資料の赤い枠で囲んだ部分が今回の改善で追加した部分です。解析雨量で利用する降水強度観測データには以下の3種類のデータが存在します。

- ・単偏波の降水強度( $R(Z)$ )
- ・二重偏波情報により減衰補正した降水強度( $R(Zc)$ )
- ・強雨をKdpで推定した降水強度( $R(Kdp,Zc)$ )

各データを品質管理や移動積算して後続のデータを作成します。資料中で品質管理等されたサイト毎の10分積算値にはQRE10、雨量補正等を考慮した合成前のサイト毎の解析値をRAS10と表記します。

速報版解析雨量では50分間の降水量と10分間の降水量を足し合わせて1時間降水量の解析を行います。

10分間解析雨量では最新の雨量計が解析に利用できないため10分前の1時間積算値から計算した雨量換算係数を利用します。

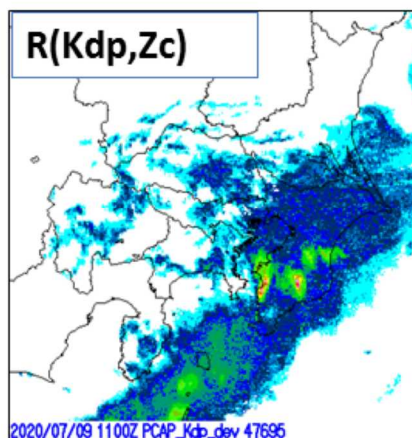
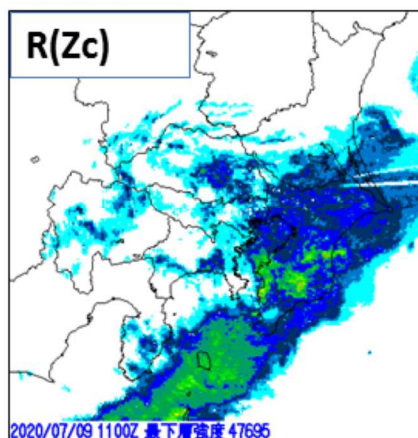
10分前の雨量換算係数を利用する事である程度の精度を担保することは可能ですが時間的なずれにより解析値が過大・過少になる場合があります。

このため、10分解析値でKdp-R法によって推定した降水強度を利用することで特に強い雨の精度を確保することが期待されます。

この本資料では「R」は降水強度、「QRE10」はサイト毎10分積算値、「RAS10」はサイト毎10分解析値を示します。

# R(Kdp,Zc)の特性と利用方法

- R(Kdp,Zc)はR(Zc)と分けて利用する
  - 強い雨( $Kdp \geq 0.65$ ※)をKdp-R法、弱い雨をZ-R法で推定したもの
  - 強雨に対して高精度であり補正せず品質管理・積算して使用
- 弱い雨の強度もR(Zc)と一致しない
  - 採用仰角が異なる等の理由
  - R(Zc)で計算した10分前雨量換算係数は適用不可
- QRE10(Zc)を雨量補正することで保たれる精度を考慮して利用する



※ Kdp=0.65 の時 降水強度 約20mm/h

R(Kdp,Zc)の特性、利用の基本的な考え方について解説します。

Kdpを活用した降水強度であるR(Kdp,Zc)では概ねKdpが0.65(降水強度 約20mm/h)以上の時にKdp-R関係が利用されますが、雹や融解層等を想定した例外条件もあります。Kdp-R関係で推定しない雨はZ-R関係を用いて降水強度を推定しますが、採用仰角が異なる等の理由でZ-R関係で解析する降水強度もR(Zc)との違いがあります。このためR(Kdp,Zc)にR(Zc)から計算した雨量換算係数を適用することはできません。

R(Kdp,Zc)は、従来の単偏波による降水強度より強い雨の降水強度推定精度が高く、10分積算した際に精度向上に期待できる方法で利用します。

また雨量計で補正することのメリットを考慮してR(Kdp,Zc)の10分積算が、R(Zc)を10分前雨量換算係数で補正する従来解析値から大きく外れた解析とならないようにR(Kdp,Zc)を積算して利用します。

# 各サイト 10 分解析値におけるKdpの利用方法

## RAS10(Zc)

- R(Zc)利用によるサイト毎の10分解析値(従来手法)
- $QRE10(Zc) \times 10$ 分前雨量換算係数

## RAS10(Kdp,Zc)

- R(Kdp,Zc)利用によるサイト毎の10分解析値
- 以下の条件を基本に作成する
  - $QRE10(Kdp,Zc) > 1\text{mm}/10\text{分}$  :  $QRE10(Kdp,Zc)$
  - $QRE10(Kdp,Zc) < 1\text{mm}/10\text{分}$  :  $QRE10(Zc) \times 10$ 分前雨量換算係数
- ただし次のように制限
  - $RAS10(Zc) \times 1.5$  を上限値、 $RAS10(Zc) \times 0.7$  を下限値

Z-R法を利用した手法によるサイト毎の10分解析値 RAS10(Zc)は $QRE10(Zc)$ に10分前雨量換算係数を乗じた値としています。

R(Kdp)を利用したサイト毎の10分解析値 RAS10(Kdp,Zc)は以下の条件を基本に作成します。

- $QRE10(Kdp,Zc) > 1\text{mm}/10\text{分}$  :  $QRE(Kdp,Zc)$
- $QRE10(Kdp,Zc) < 1\text{mm}/10\text{分}$  :  $QRE10(Zc) \times 10$ 分前雨量換算係数

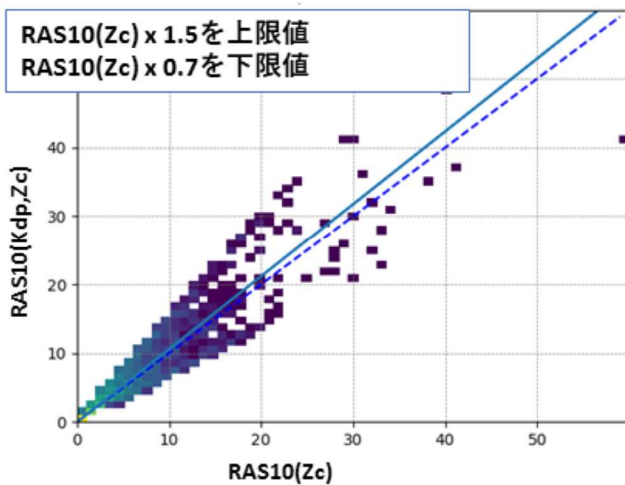
ただし次のように値を制限します。

- $RAS10(Zc) \times 1.5$  を上限値,  $RAS10(Zc) \times 0.7$  を下限値

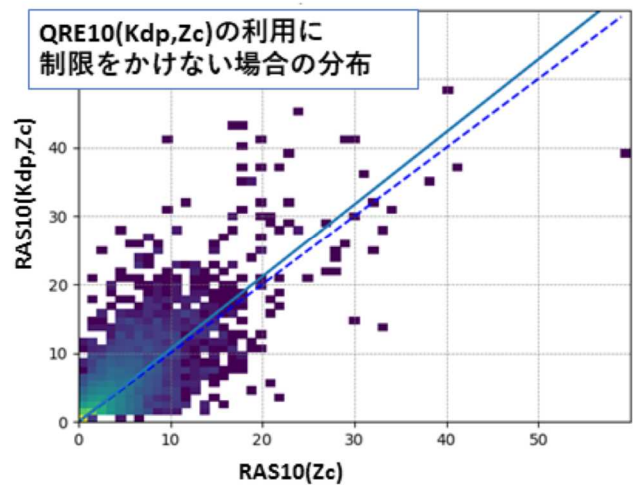
# Kdpを利用したサイト毎の10分解析値

- 右図はRAS10(Kdp,Zc) とRAS10(Zc)の分布
- 左図は右図のRAS10(Kdp,Zc) に上限値と下限値を与えた分布
  - QRE10(Kdp,Zc)採用の際、雨量計補正值を信頼度情報として利用
  - 雨量計の観測を考慮した安定した解析が可能となる

東京レーダー RAS10(Kdp,Zc):RAS10(Zc)制限有



東京レーダー RAS10(Kdp,Zc):RAS10(Zc)制限無



右図は東京レーダーで作成した雨量計格子のRAS10(Kdp,Zc):縦軸とRAS10(Zc):横軸の分布を示したものです。

RAS10(Zc)はQRE10(Zc)x10分前雨量換算係数で計算したものです。

RAS10(Kdp,Zc)は1mm/10分以上の雨をQRE10(Kdp,Zc) 1mm/10分以下の雨を QRE10(Zc)x10分前雨量換算係数で計算しています。

左図はRAS10(Kdp,Zc)は右図の方法にRAS10(Zc) x 1.5を上限値, RAS10(Zc) x 0.7を下限値の制限をかけた図になります。

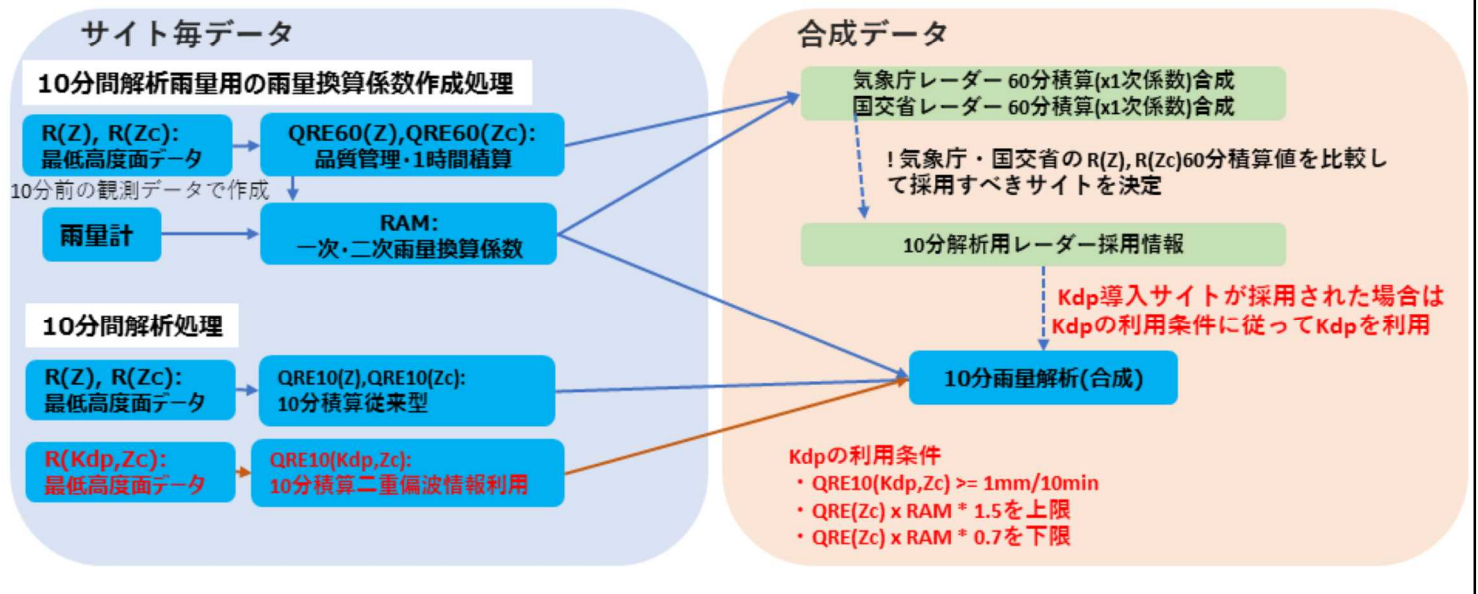
レーダー観測では観測高度が地表面よりも高いことや降水粒子の状態が違うことによる観測誤差が常に存在するため10分前までに入電した雨量計を利用する時間差による若干の過少傾向はあるものの、10分前の雨量換算係数を信頼度情報として利用することで雨量計による補正を考慮した、安定した解析が可能となります。

この時に行った調査の中では右図の手法に比べて左図の手法では相関係数は少し下がるものの二乗平均平方根誤差(RMSE)はより改善する効果を確認しています。



# 速報版解析雨量 10分解析の合成方法

- ① 合成に採用するサイトは10分前のR(Z)、R(Zc)の1時間積算値で決定（従来の方法と同じ）
- ② ①で二重偏波情報導入サイトが採用された場合は利用条件に従ってKdpを利用する



速報版解析雨量 10分間解析雨量におけるKdpの利用について説明します。

10分間解析雨量を作成する際に合成領域で採用するサイトを決定する方法はR(Kdp, Zc)導入時に変更してありませんが、10分前の各サイトR(Z)、R(Zc)の1時間積算値と雨量換算係数を利用して決定します。

まず各領域で気象庁・国交省それぞれ10分前1時間積算で最大値を観測するサイトを決定し合成値を作成します。

気象庁レーダーと国交省レーダーでは観測特性に違いがあるため、この差を考慮した比較をするために雨量換算係数の1次係数を利用して

気象庁・国交省それぞれの合成値を比較し、各領域における最終的な採用サイトを決定します。

合成判定の処理により二重偏波情報導入サイトが採用される場合に、サイト毎の利用条件に従ってKdpを利用します。

# 精度評価

# 二重偏波情報の精度評価①

## ～サイト別の従来手法との比較～

10分間解析雨量と雨量計観測（10分降水量）を比較  
10サイトのRAS10(Zc)とRAS10(Kdp,Zc)をそれぞれ検証

サイト周辺100km

サイト	要素	RMSE	相関	傾き	データ数
釧路	RAS10(Zc)	1.028	0.673	0.372	7209
	RAS10(Kdp,Zc)	0.994	0.710	0.414	7209
仙台	RAS10(Zc)	1.660	0.558	0.391	20567
	RAS10(Kdp,Zc)	1.658	0.566	0.399	20567
名古屋	RAS10(Zc)	2.005	0.621	0.387	47729
	RAS10(Kdp,Zc)	1.988	0.631	0.425	47729
東京	RAS10(Zc)	1.818	0.597	0.498	27164
	RAS10(Kdp,Zc)	1.831	0.630	0.590	27164
福井	RAS10(Zc)	2.176	0.616	0.417	18308
	RAS10(Kdp,Zc)	2.158	0.630	0.478	18308
大阪	RAS10(Zc)	2.127	0.598	0.382	45726
	RAS10(Kdp,Zc)	2.112	0.608	0.412	45726
広島	RAS10(Zc)	1.704	0.626	0.399	30631
	RAS10(Kdp,Zc)	1.668	0.648	0.455	30631
福岡	RAS10(Zc)	2.215	0.636	0.476	29063
	RAS10(Kdp,Zc)	2.180	0.662	0.555	29063
種子島	RAS10(Zc)	1.839	0.683	0.559	8770
	RAS10(Kdp,Zc)	1.786	0.720	0.617	8770
室戸岬	RAS10(Zc)	1.783	0.616	0.519	16387
	RAS10(Kdp,Zc)	1.747	0.640	0.547	16387

- 10サイトすべての指標で概ね改善
  - RMSE、相関係数、回帰直線
- 東京レーダーのRMSEのみ若干改悪
  - 相関係数・回帰係数の傾き改善

各サイトの合成前の10分解析値の精度検証の結果について説明します。

RAS10(Zc)とRAS10(Kdp,Zc)の精度指標であるRMSE、相関係数、回帰直線の傾きを比較して客観的な指標で改善しているのかを確認します。

サイト毎の値では合成処理で行う雨量計値への置き換え処理前の値で検証となります。

この統計検証では10サイトですべての指標で概ね改善される結果となりました。東京レーダーのRMSEが若干悪くなりますが相関係数が大きく向上していることから利用に支障がない事がわかります。

この精度検証により合成前のサイト毎の検証で速報版解析雨量が改善できることが確認できます。

## 二重偏波情報の精度評価②

### ~二重偏波利用拡大した速報版解析雨量の精度~

- 正規版解析雨量を真値として比較することでKdpの利用拡大が速報版解析雨量に与える影響を確認する
  - 従来版は東京レーダー、二重偏波利用拡大版は10サイトを利用する
  - 新たに9サイトを利用する効果を確認する
- 速報版解析雨量(縦軸)と正規版解析雨量(横軸)の出現数の散布図を二重偏波利用拡大版と従来版でそれぞれ作成し出現数の差分を取ることで特性の変化を確認できる
  - 海上を含めた雨量計のない場所を含めて調査できる

速報版解析雨量でKdpを利用する事で特性にどのような変化が起きるかを合成後の1時間積算値で確認します。

基本的には正規版解析雨量は速報版解析雨量よりも精度が高いため、9サイトを利用拡大した速報版解析雨量と東京レーダーのみを利用したの速報版解析雨量を正規版解析雨量と比較する事で特性の変化を確認することができます。

この資料では、従来版は東京レーダー、二重偏波利用拡大版は10サイトを利用したものとして示します。

従来版ではQRE10(Kdp,Zc)の採用条件にも違いがあり、東京レーダーの分だけ採用条件による特性の違いが存在します。

速報版解析雨量と正規版解析雨量の出現数の散布図を二重偏波利用拡大版と従来版でそれぞれ作成し、出現数の差分を取ることで効果を確認できます。

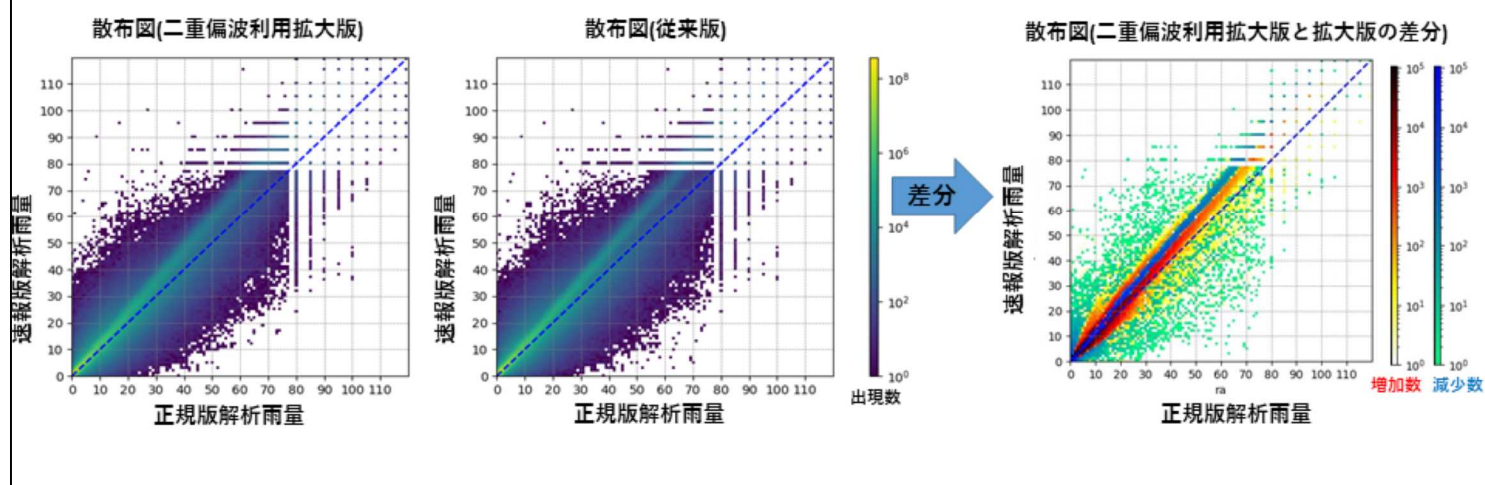
解析雨量の検証では通常、降水量を観測している雨量計のある場所でしか検証ができませんが速報版解析雨量では正規版解析雨量と比較することで海上を含めた雨量計の無い場所を含めた特性変化を調査することができます。



# 二重偏波情報の精度評価②

## ～二重偏波利用拡大した速報版解析雨量の精度～

- 速報版二重偏波利用拡大版と従来版の出現数の差分は、**暖色系が増えた領域、寒色系が減った領域**を示しており、二重偏波利用拡大により直線 ( $y=x$ ) に近い値が増えた(二重偏波利用拡大版 - 従来版)
- 速報版解析雨量で正規版より過大なものが、二重偏波利用拡大版で正規版に近づいたことがわかる



基本的には正規版解析雨量は速報版解析雨量よりも精度が高いため、9サイトを利用拡大した速報版解析雨量と東京レーダーのみを利用した速報版解析雨量（従来版）を正規版解析雨量と比較した解析値の変化から特性への影響を確認します。（二重偏波利用拡大版 - 従来版）

速報版二重偏波利用拡大版と従来版の出現数の差分の図は、暖色系が増えた領域、寒色系が減った領域を示しており直線 ( $y=x$ ) に近い値が増えた場合速報版解析雨量の性質が正規版解析雨量へ近づく変化を意味します。

特に出現数の変化の大きいところでは正規版解析雨量に比べて速報版解析雨量の過大な値が減り、正規版解析雨量に近づく変化をしていることがわかります。

出現数の変化の小さいところにおいても基本的には正規版解析雨量くらべて過大・過少な値が減り正規版解析雨量に近づく変化をしていることがわかります。

ただしR(Kdp,Zc)は強い降水強度に対して高い精度が期待できますが、特に30mm程度までの暖色系の領域をみるとR(Kdp,Zc)の得意ではない強くない雨の事例が多く含まれていると考えられ正規版解析雨量に近づく変化が大きくない領域となっています。

この検証から基本的には二重偏波利用拡大により速報版解析雨量が正規版解析雨量に近づく変化を確認できました。

## 二重偏波情報の精度評価③

### ～解析に使用しなかった雨量計との比較～

- 解析雨量では雨量計は従属資料であり利用可能な雨量計はすべて利用する。このため必要に応じて開発した手法の有効性を評価するために雨量計を使用しない設定にして検証に使用する。
- この実験によりルーチン変更で取り込まれる効果が精度を向上させるものであるかを確認することができる。
- 検証に利用する雨量計を不使用とした速報版解析雨量を作成して統計検証する。

解析雨量では雨量計は従属資料であり利用可能な雨量計はすべて利用しています。  
必要に応じて開発した手法の有効性を評価するために雨量計を使用しない設定にして検証に使用します。  
この実験によりルーチン変更で取り込まれる効果が精度を向上させるものであるかを確認することができます。  
検証に利用する雨量計を不使用とした速報版解析雨量を二重偏波利用拡大版、従来版それぞれ作成して統計検証します。

# 二重偏波情報の精度評価③

## ～解析に使用しなかった雨量計との比較～

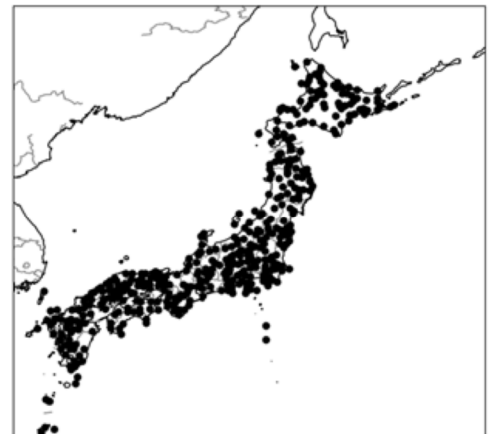
### 雨量計の抽出方法

- 雨量計を800地点をランダムに抽出・不使用として評価に使用
- 北緯28度、東経128度を南西端とした範囲で抽出
  - 利用拡大したサイトで南西端に位置する種子島レーダーの観測範囲を考慮

### 検証方法

- 検証は1格子ずれを許容
- 速報版解析雨量と雨量計を1時間値で比較
- 二重偏波利用拡大版と従来版で実験

検証に利用した雨量計



検証に利用するために抽出する雨量計は気象庁・国土交通省・地方自治体が保有する全国の雨量計からランダムに800地点抽出しました。  
二重偏波化した10サイトの南西端は種子島レーダーですが、この観測範囲を外れる雨量計については検証に利用する必要がないことから、抽出範囲を北緯28度、東経128度を南西端とした範囲に絞って抽出しました。

レーダー観測の誤差を許容するために雨量計格子を含む周辺9格子からレーダーサイトに最も近い格子の解析値を使用する検証方法で行いました。

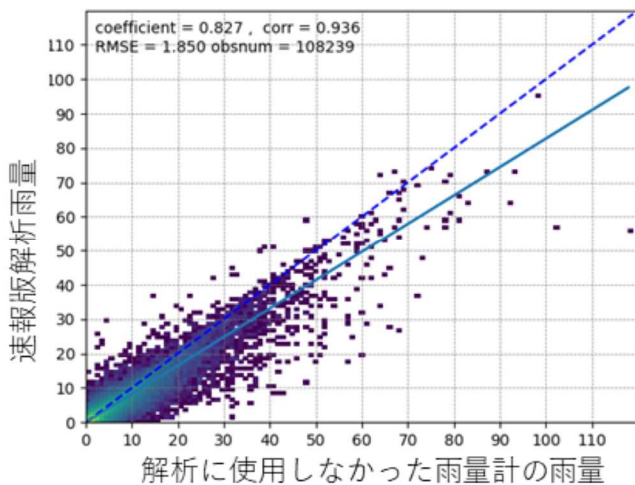
検証は速報版解析雨量と雨量計の1時間値で比較し、二重偏波利用拡大版と従来版でそれぞれ検証用の雨量計を不使用とした実験を行って検証しました。

# 二重偏波情報の精度評価③

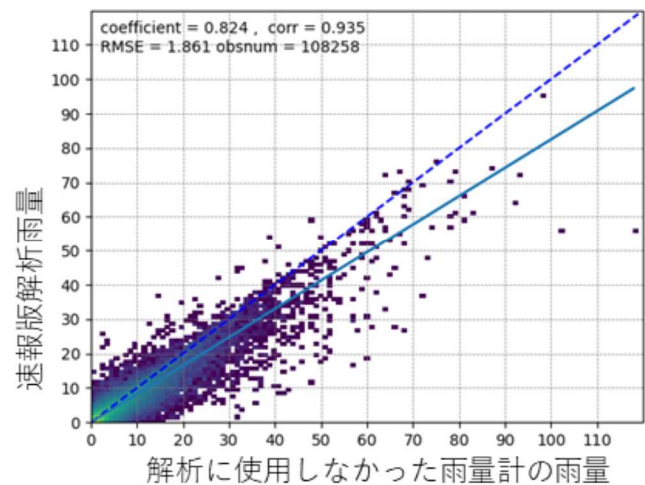
## ～解析に使用しなかった雨量計との比較～

- RMSE、相関、回帰直線の傾き二重偏波利用拡大した解析が従来版の解析を若干上回る結果となった
  - 二重偏波利用拡大 : RMSE 1.850 相関 0.936 回帰直線の傾き 0.827
  - 従来版 : RMSE 1.861 相関 0.935 回帰直線の傾き 0.824

二重偏波利用拡大の検証



従来版の検証



この検証ではRMSE、相関、回帰直線の傾きとも、二重偏波利用拡大した解析が従来版の解析を若干上回る結果となり、Kdpを利用することで速報版解析雨量の精度が改善できることが確認されました。

# 今後の二重偏波情報利用手法開発

今後の解析雨量における二重偏波情報の利用開発は以下の通り

- 正規版解析雨量における利用開発
  - 1時間積算値における利用手法を検討
- 速報版解析雨量50分積算における利用開発
  - 速報版は10分間積算に50分積算を加えて1時間積算値を作成

今後の開発計画について説明します。

速報版解析雨量は10分間積算に50分積算を加えて1時間積算値を作成しますが、今後は50分積算値におけるKdpの利用方法について開発を進めます。  
また正規版解析雨量の1時間積算値におけるKdpの利用手法についても合わせて開発を進めます。