

速報版解析雨量の 過大値対策について

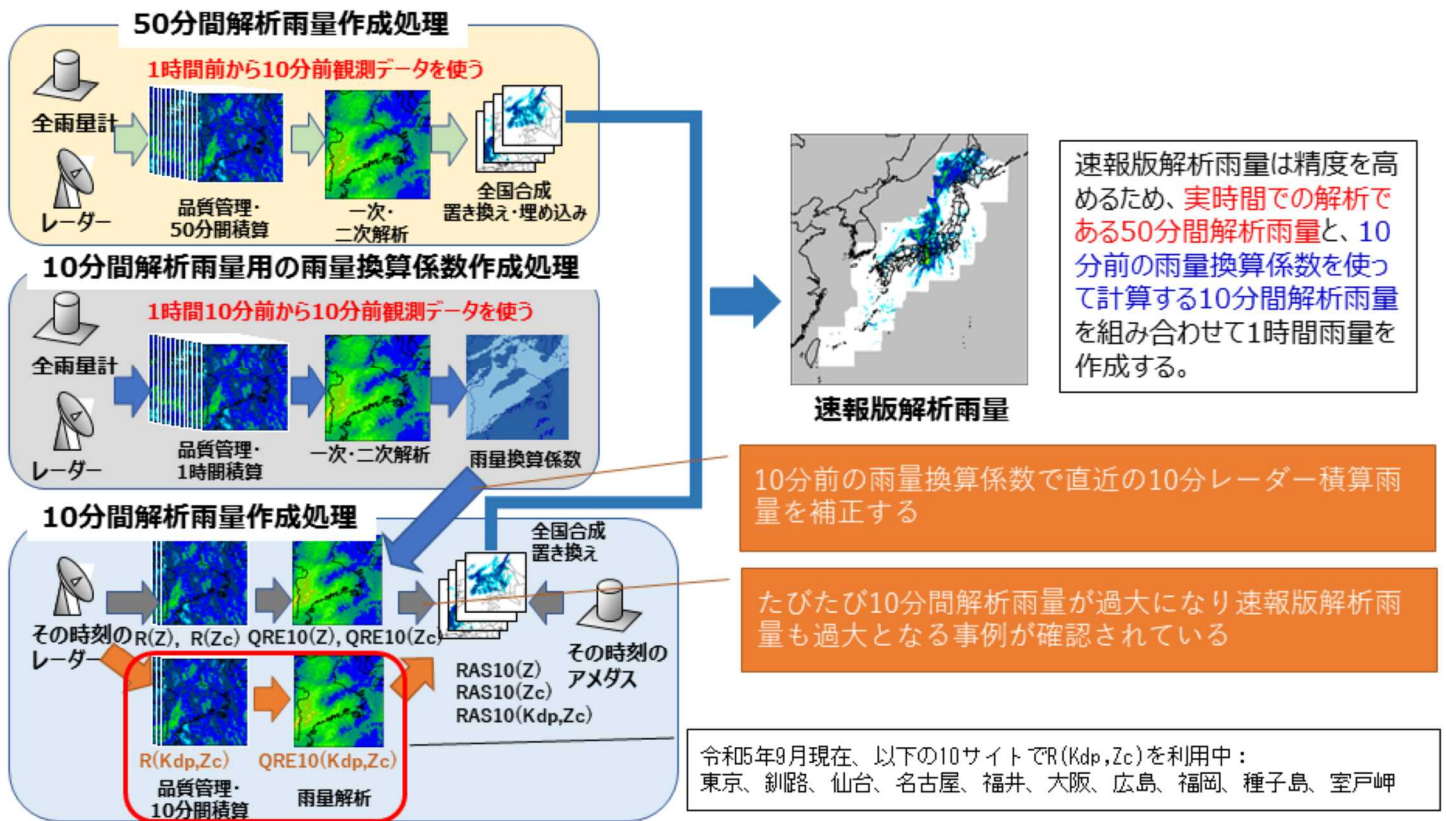
令和6年3月

気象庁 大気海洋部 業務課 気象技術開発室

目次

- 速報版解析雨量の計算方法について
- 速報版解析雨量の過大値事例と原因
- 過大値への対策
- 事例確認
- 統計検証

速報版解析雨量



R: 降水強度、QRE10: サイト毎10分積算、RAS10: サイト毎10分解析

速報版解析雨量は、速報性を重視するため直近の雨量計観測データの受信を待たずに計算・配信されています。この作成フローチャートは3つのステップで構成されています。

- ①50分間解析雨量作成処理：1時間前～10分前の観測データを利用して、50分間降水量の解析を行います。必要な観測データは正規版解析雨量の作成に必要なものと同等のものが得られるため、解析アルゴリズムも正規版と同じです。
- ②10分間解析雨量用の雨量換算係数作成処理：残り10分間降水量は最新のレーダーデータを受信してから計算開始しますが、そこから雨量換算係数（レーダーを雨量計で補正する係数）の計算をしては、プロダクト配信時間が遅くなってしまいます。このため、既に得られている10分前までのレーダーデータと雨量計データを用いて、1時間10分前～10分前の1時間降水量の解析を行い、事前に雨量換算係数を計算しておきます。
- ③10分間解析雨量作成処理：最新のレーダーデータを受信したら、②で事前に計算しておいた雨量換算係数でレーダーを補正して、直近の10分間解析雨量を作成します。

なお、降水強度観測データには大きく分けると以下のような3種類のデータが存在します。

- ・単偏波の反射強度による降水強度(R(Z))。減衰補正（ビーム経路上の降雨がビームを減衰させる影響を補正する処理）は行われていない

- ・二重偏波情報を利用して減衰補正した降水強度(R(Zc))
- ・強い降水強度にKdp(偏波間位相差変化率)を利用した降水強度(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10分積算値にはQRE10、雨量補正をした全国合成前の解析値をRAS10と表記しています。

①と③を足し合わせることで、速報版解析雨量（1時間降水量）となります。

ただし、②の雨量換算係数は10分前の解析結果ですので、③の時点では補正量が適切でない場合があり、たびたび10分間解析雨量が過大な解析となってしまうことがありました。

この改善策として、直近の10分間解析雨量には、二重偏波情報を利用したR-Kdp法による降水量推定（R(Kdp,Zc)）の利用を開始（令和4年3月～：東京レーダー、令和5年5月～：釧路・仙台・名古屋・福井・大阪・広島・福岡・種子島・室戸岬レーダー）していますが、まだR(Kdp,Zc)を利用できていない地域もあります。

（参考）

- ・正規版解析雨量の解析手法について：
予報部予報課（1995）：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度、測候時報 62.6
平成18年度量的予報研修テキスト（量的予報技術資料 第12巻）第2章 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点

- ・速報版解析雨量の作成手法について：
平成30年度予報技術研修テキスト（量的予報技術資料 第24巻）第7章 降水短時間予報等の改善

- ・速報版解析雨量におけるR(Kdp,Zc)の利用手法について：
令和5年度 予報技術研修テキスト：速報版解析雨量における二重偏波情報の利用

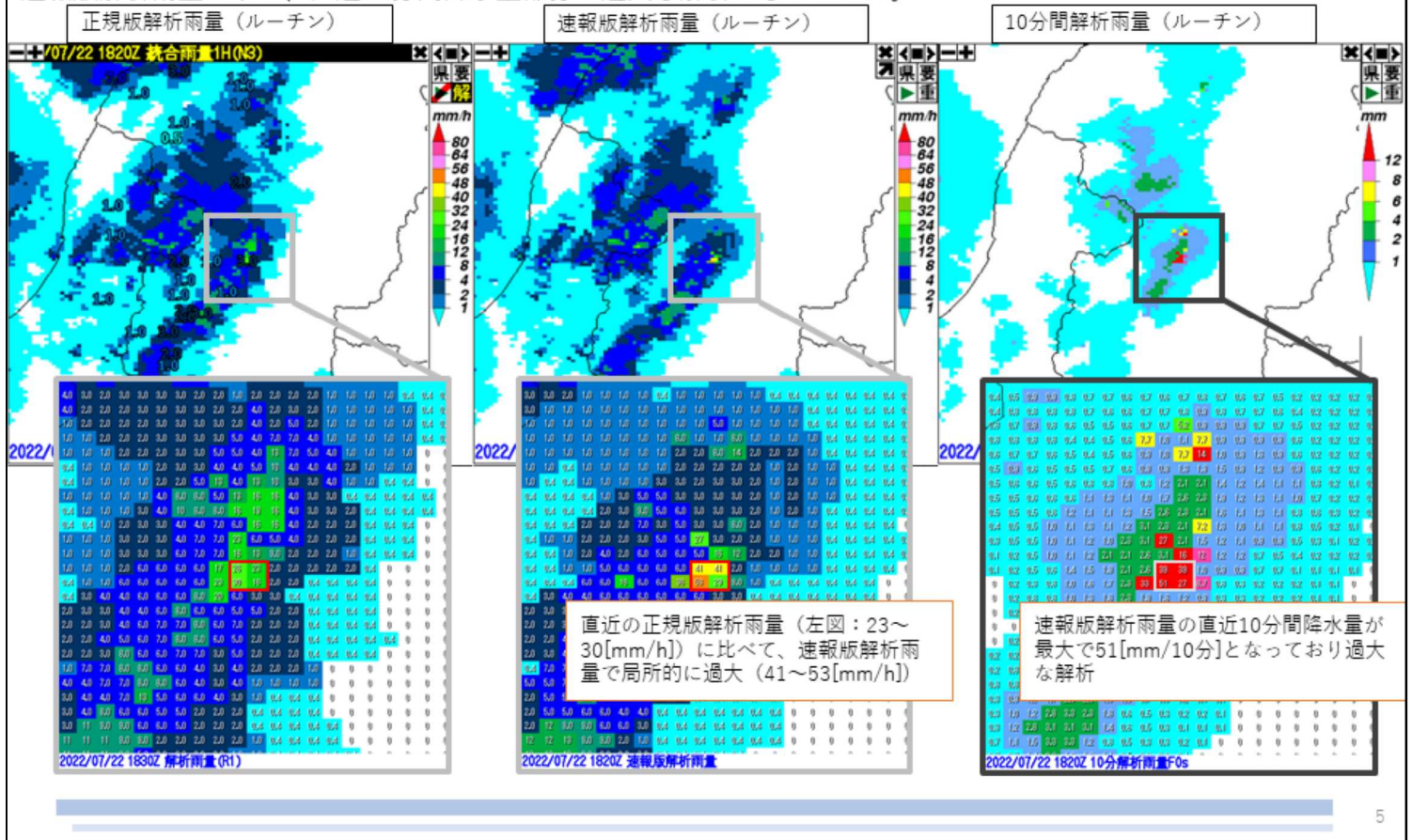
速報版解析雨量の過大値事例と原因

4

実際に、速報版解析雨量が過大となった事例と、その原因について説明します。

速報版解析雨量の過大値事例

2022年7月22日 18:20UTC 山形県の速報版解析雨量で過大な解析となった事例。
速報版解析雨量のうち、直近10分間降水量部分で過大な解析となっていた。



こちらは、2022年7月22日 18:20UTC 山形県の速報版解析雨量で局所的に過大な解析となった事例です。

左図は正規版解析雨量、中図は速報版解析雨量、右図は10分間解析雨量で、下段はそれぞれを拡大した図となっています。

なお、速報版解析雨量と10分間解析雨量は18:20なのに対して、正規版解析雨量 (30分間隔) は18:30であることに留意してください。

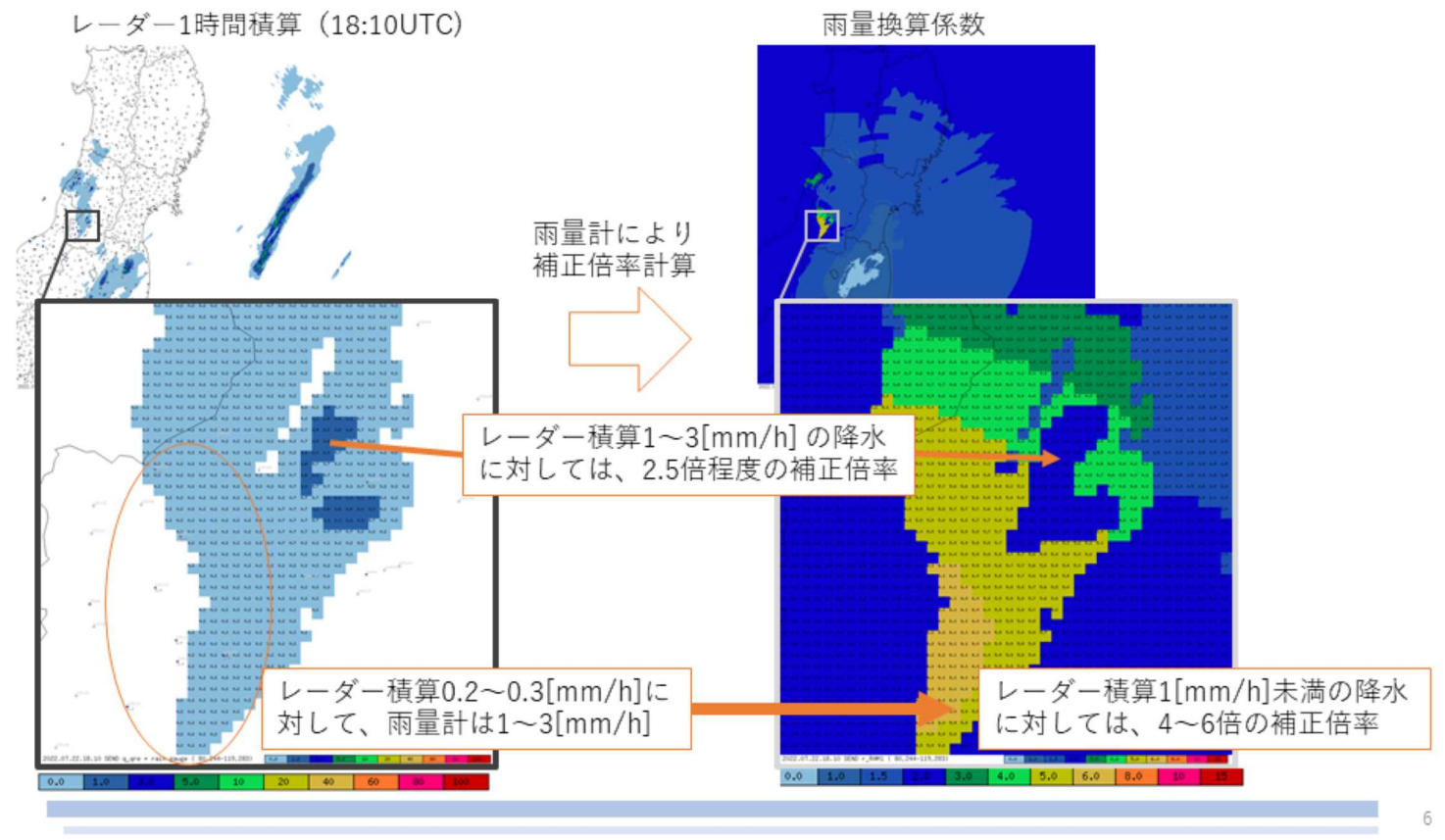
対象時刻は異なっていますが、正規版 (23~30[mm/h]) に比べて速報版が過大(41~53[mm/h])となっていました。

この時の10分間解析雨量は最大で51[mm/10分]となっていて、速報版解析雨量の過大値の原因は、10分間解析雨量にあることがわかります。

アメダス観測による10分間降水量の極値は、55.0mm (北海道木古内:2021年11月2日) ですが、この事例で極値に匹敵するほどの降水があったとは思えず、10分間解析雨量はかなり過大であったことが伺えます。

速報版解析雨量の過大値事例

2022年7月22日 18:10UTC (10分前) 仙台レーダーによる解析 (雨量換算係数) の状況



この時の雨量換算係数がどうなっていたのか確認します。

過大であったのは18:10~18:20の10分間解析雨量ですので、雨量換算係数としては、その10分前の17:10~18:10での解析状況を確認することになります。

左図は17:10~18:10のレーダーを1時間積算したものとその拡大図を、右図はこの時の雨量換算係数の分布とその拡大図を示しています。

左図橙丸領域は、レーダー積算が0.2~0.3[mm/h]であったのに対して、雨量計は1~3[mm/h]となっていました。この領域での単純な補正量としては5~10倍となるため、橙丸領域を中心に大きな雨量換算係数となっていました。

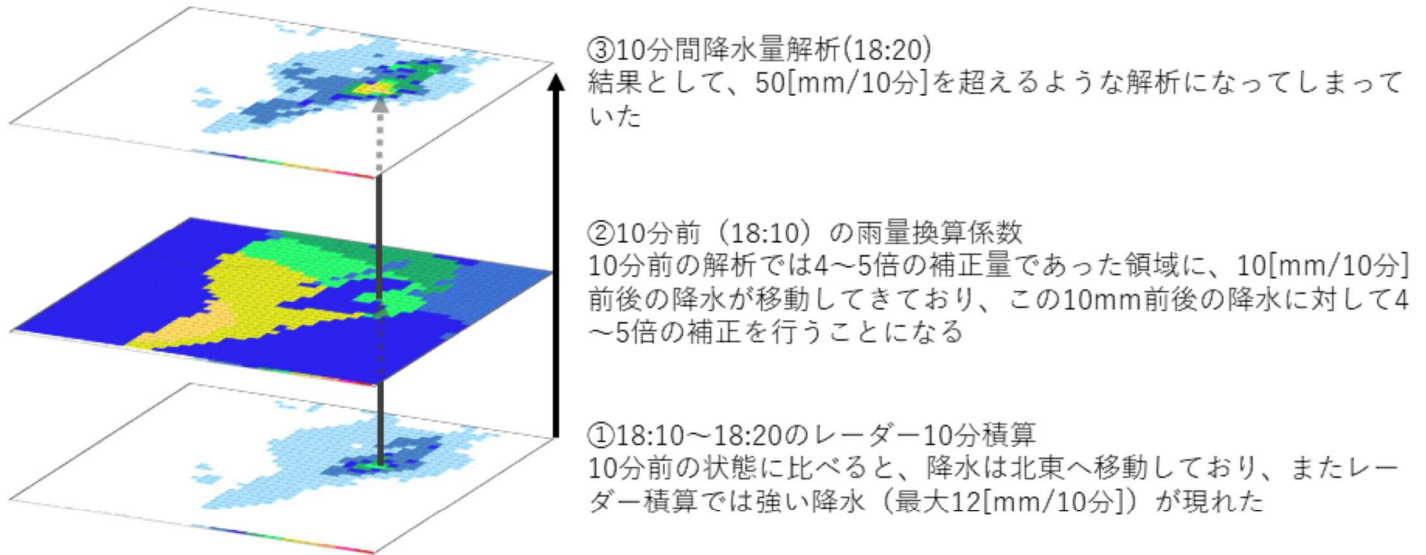
一方で、レーダー積算1~3[mm/h]の領域では、雨量換算係数は2.5倍程度 (右図の青色領域) になっていて、こちらは一般的な補正量となっています。

雨量換算係数としては、1[mm/h]未満の降水に対しては、4~6倍 (右図中の緑~橙領域) の補正量となる (補正後は、数[mm/h]程度の解析となる) ように、また、1~3[mm/h]の降水に対しては、2.5倍程度の補正量となる (補正後は、数[mm/h]程度の解析となる) ように分布しています。

この時刻での解析としてはそこまで異常なものではありません。

速報版解析雨量の過大値事例

2022年7月22日 18:20UTC 仙台レーダーによる10分間降水量解析
なぜ、10分間降水量解析が過大になってしまったのか



7

前スライドでの10分前の雨量換算係数では特に問題はありませんでしたが、これを用いて直近のレーダー積算を補正する際に問題がありました。

①10分前の状態から降水は北東に移動しており、またレーダー積算では強い降水(最大12[mm/10分])が現れました(下図)。

これは降水が急発達したというわけではなく、レーダー観測では降水を捕捉し難いところから、降水を捕捉しやすい領域に移動してきたため、仙台レーダーでは降水が発達したかのように見えています(次スライドでも説明します)。

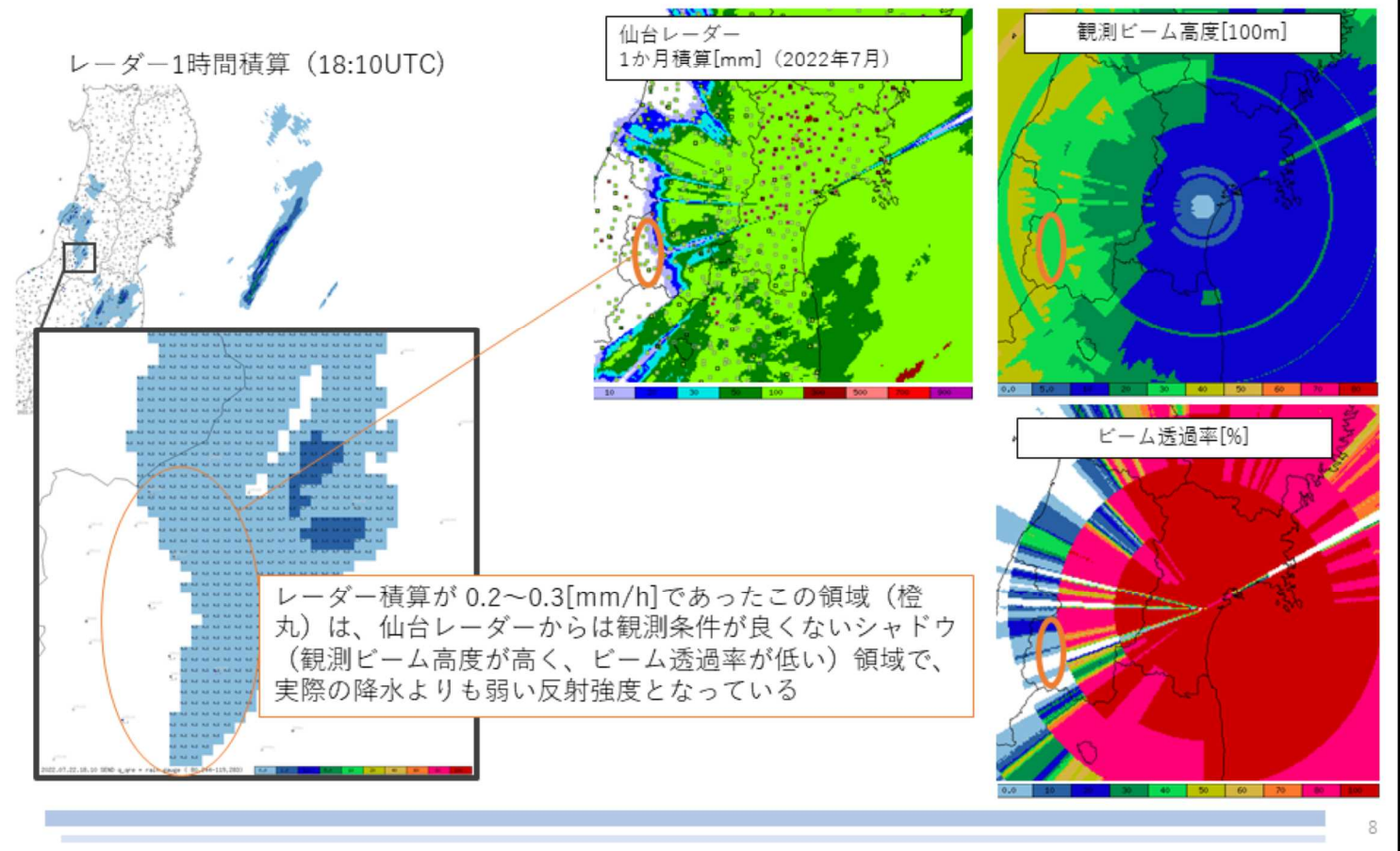
②この10[mm/10分]前後の降水は、10分前の雨量換算係数が4~5倍(緑)の領域に現れました(中図)。雨量換算係数が4~5倍という補正量は、1[mm/h]未満の降水を前提としたものでしたので、10[mm/10分]前後のレーダーを補正するには大き過ぎる倍率です。

③結果として、50[mm/10分]を超えるような解析値が現れることになりました(上図)。

このように、降水が時間移動・強度変化するため、10分前の雨量換算係数を利用する際には不都合な解析結果となる場合があります。

レーダー観測の問題点（シャドウ領域）

仙台レーダーによる観測条件



前スライドで、降水が急発達したというわけではなくレーダー観測では降水を捕捉し難いところから降水を捕捉しやすい領域に移動してきた、と説明しましたが、このスライドはそれを裏付ける説明になります。

レーダー1時間積算が0.2~0.3[mm/h]となっていた左図橙丸領域について、仙台レーダーの1か月積算降水量（2022年7月）（中図）を見てみると、この領域は元々仙台レーダーでは降水を十分に捕捉できない領域であることがわかります。

この原因としては、この領域が仙台市から見ると奥羽山脈の影（シャドウ）になっているため、どうしても観測ビーム高度が高くなり（右上図）、また観測ビームの一部が山岳で遮蔽されている（右下図）ことにより、本来の（地上への）降水の反射強度よりも弱い観測となってしまうためです。

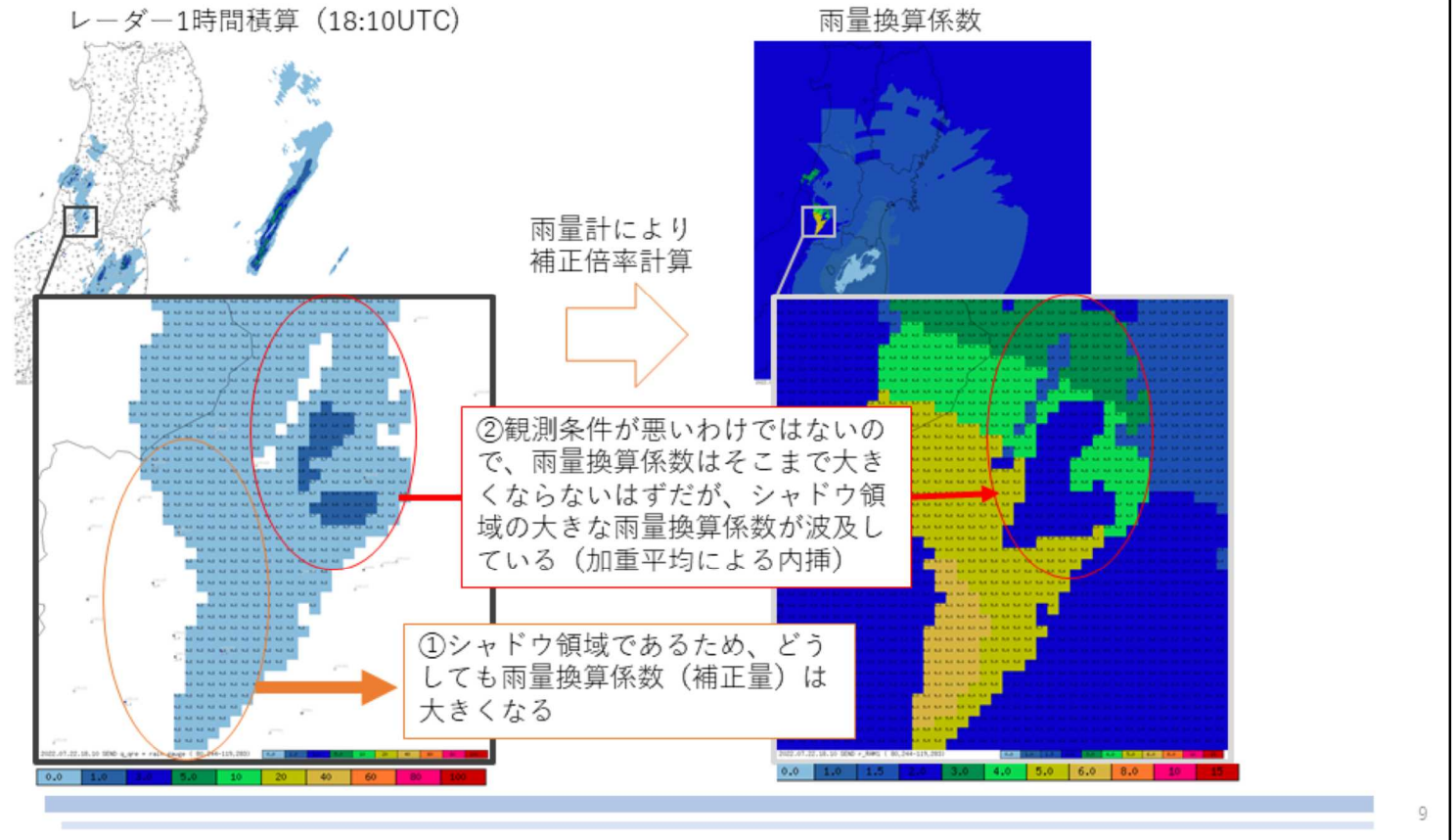
ビーム透過率については、ビームが遮蔽物等により遮られずに伝播する割合（0~100%）で、PAUL L. SMITH(1998)における“Echoing volume”に基づいて計算しています。

参考文献：

PAUL L. SMITH (1998): On the Minimum Useful Elevation Angle for Weather Surveillance Radar Scans.

レーダー観測の問題点（シャドウ領域）

2022年7月22日 18:10UTC（10分前） 仙台レーダーによる解析（雨量換算係数）の状況



①左図のレーダー積算における橙丸領域(0.2~0.3[mm/h])は、シャドウ領域であるためエコー強度が弱くなりますが、これを雨量計に合わせようと補正するため、どうしても雨量換算係数は大きくなります。

②左図の赤丸領域は観測条件は悪くないのですが、①での大きな雨量換算係数がこの領域にまで波及しています（右図の赤丸）。

これは、左図の赤丸領域も橙丸領域も1[mm/h]未満のレーダー積算であれば、同じような補正結果となるように、加重平均による内挿が行われるためです。

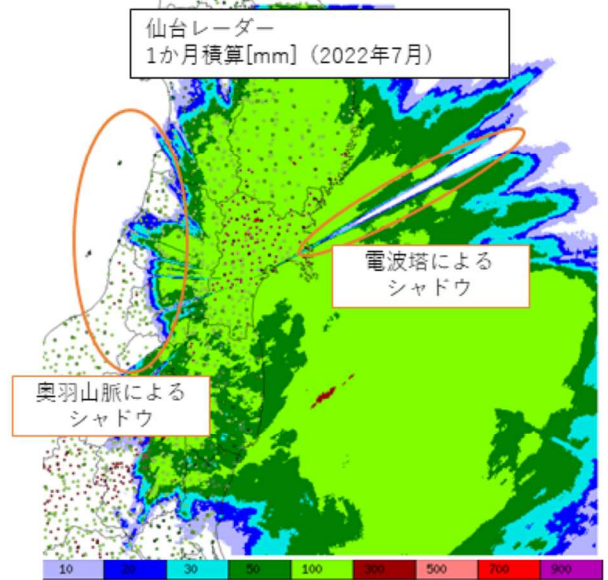
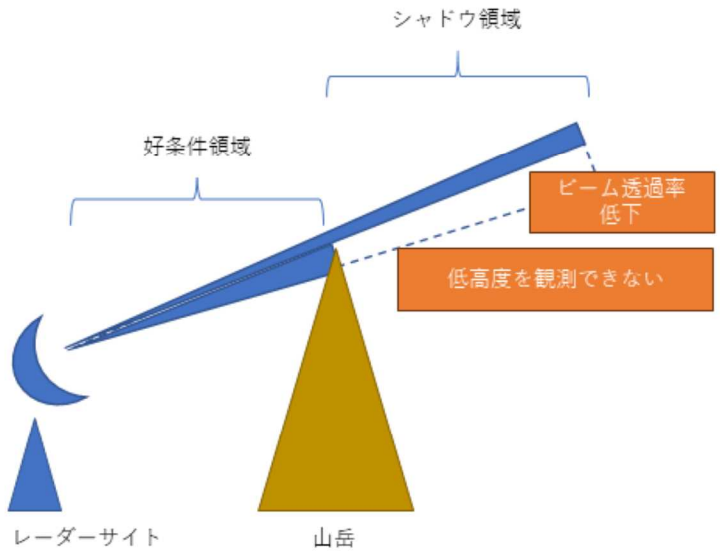
しかし、左図の赤丸領域と橙丸領域は、シャドウ領域によるエコー強度の違いにより、結果として同程度のレーダー積算になったものであり、これを自然由来のものであるかのように、雨量換算係数の分布を空間内挿することに問題がありました。

先の説明では、降水の時間移動が解析に悪影響を与えると説明しましたが、そもそもシャドウではない領域で雨量換算係数が大きな値となっていたことも問題でした。

(参考) シャドウ領域に関する補足

レーダー観測では、ビーム幅の一部が山岳等で遮蔽される（ビーム透過率が低下する）と降水からの反射強度が弱くなる。また、山岳等の背後は低高度をレーダー観測できず、観測ビーム高度が高くなる。このような領域は、シャドウ（ビームカット）領域と呼ばれ、レーダー観測を積算すると周囲より弱い積算結果となって現れる（右図における橙丸）。

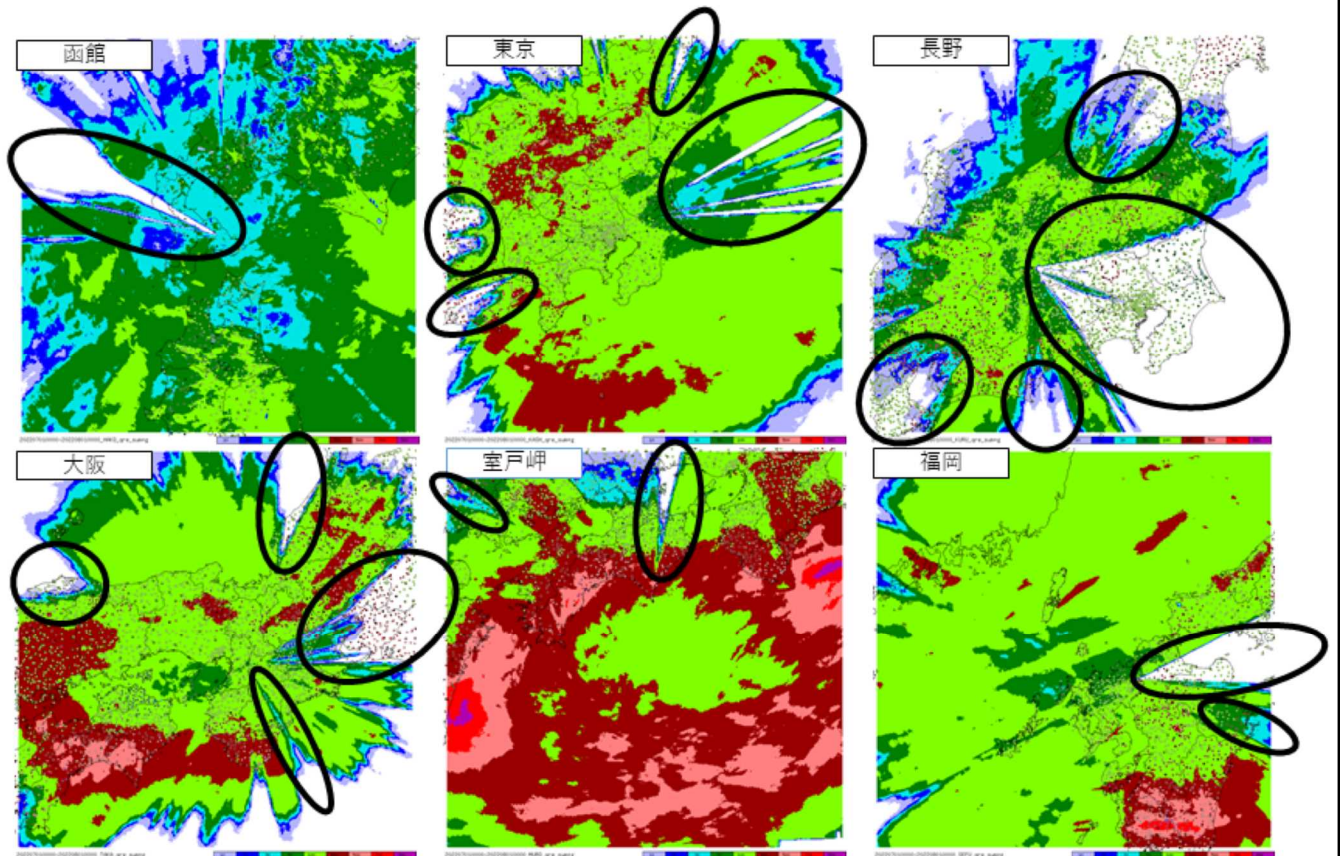
一方で、ビーム幅の遮蔽がなく低高度を観測できる領域を、この資料ではレーダー観測の好条件領域と定義する。



シャドウ領域についての補足説明資料です。

(参考) シャドウ領域に関する補足

2022年7月のサイト毎レーダー月積算の例



11

日本は山地が多いため、ほとんどのレーダーサイトにシャドウ領域が存在しており（図中の黒丸）、建築物（高層ビルや電波塔）によるビーム遮蔽でもシャドウは発生します。このため、速報版解析雨量の過大値は山形県に限らず全国のシャドウ領域付近で起こりえます。

過大値への対策

過大値は、ある地域のみで起こりうるわけでもないので、根本的な対策が必要

過大値への対策

- シャドウ領域への対応
 - レーダー観測のシャドウ領域における大きな雨量換算係数が、好条件領域に波及しないようにする
- 降水が時間移動することへの対応
 - 雨量換算係数（10分前解析）を降水ナウキャストの移動ベクトルで移動させる

過大値の原因としては、

- シャドウではない領域で雨量換算係数が大きな値となっていたこと
- 降水が時間移動したこと

でしたので、それぞれについて対策を行うこととします。

シャドウ領域への対応

レーダー観測のシャドウ領域における大きな雨量換算係数が、好条件領域に波及しないようにする

- 雨量換算係数を空間内挿（加重平均）する際、シャドウ領域の雨量計格子における雨量換算係数の加重を小さくするように改修する
 - シャドウ領域にある雨量計の依存度を小さくすることを意味する
 - ビーム透過率0.0領域の雨量計は、実質、解析に利用しないということになる
 - 雨量計を解析に利用しないと言っても、そのサイトで利用しないということであり、別のサイトからは利用される
 - ビーム透過率0.0領域は、雨量一次解析のみの補正となる
 - 全国合成の際には、別のレーダーによりカバーされるのが理想
- 解析雨量における雨量二次解析（次項で説明）では、内部的に雨量換算係数の信頼度というパラメータを持っており、この信頼度が内挿時の加重になっているため、これを利用する
 - ビーム高度が高い雨量計格子は、現状すでに信頼度が小さくなるようになっているため、今回は、この信頼度にビーム透過率も加味するよう改修になる

改修項目の一点目は、シャドウ領域への対応です。

（参考）

・解析雨量における雨量二次解析について：

予報部予報課（1995）：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度、測候時報 62.6

平成18年度量的予報研修テキスト（量的予報技術資料 第12巻）第2章 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点

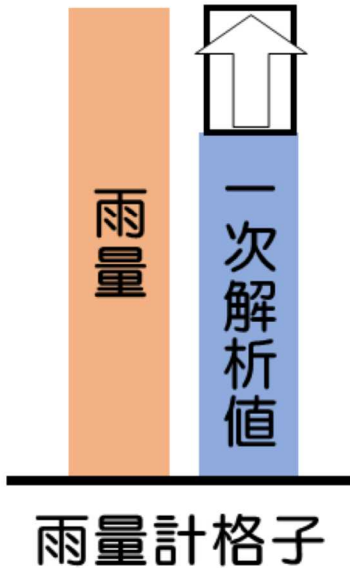
平成24年度予報技術研修テキスト（量的予報技術資料 第18巻）第3章：解析雨量・降水短時間予報・降水ノウキャストの改善

雨量二次解析の改修

①全ての雨量計格子毎に、仮の二次補正係数を計算

$$R(i) = C2(i) \times E1(i)$$

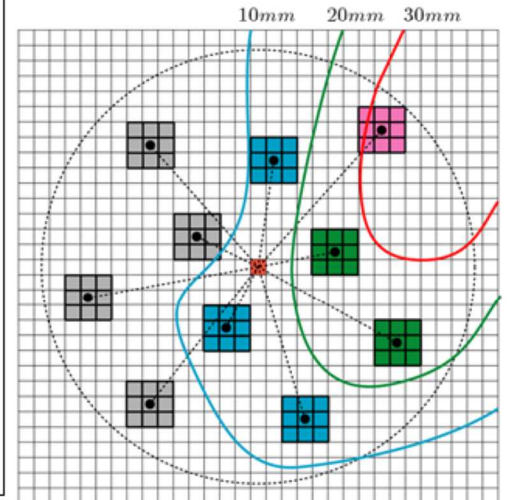
$R(i)$: 雨量
 $E1(i)$: 雨量一次解析値
 $C2(i)$: 仮の二次補正係数



②陸上の全ての格子毎に、二次補正係数を計算

東西南北50km以内に含まれる、
①で計算した仮の二次補正係
数を重み付内挿

- ・距離重み
- ・レーダー雨量比・減衰比重み
- ・雨量計の一様性重み
- ・信頼度による重み
 - ・観測ビーム高度
 - ・ビーム透過率 New



15

このスライドは解析雨量での雨量二次解析を説明したものです。

①まず、雨量計格子での補正係数（仮の二次補正係数）を算出し（左図）、

②次に、陸上のすべての格子毎に二次補正係数を計算します（右下図）。

右下図は、中心の赤格子（雨量計が無い）の補正係数を内挿する際に、周囲の雨量計格子での補正係数を加重平均しながら利用していることを示しています。

従来までは、内挿を行う格子の周囲50kmにある①の補正係数について、以下の加重をかけていました。

- ・距離重み
- ・レーダー雨量比・減衰比重み（同程度のレーダー積算降水量であれば、同等の補正係数となるような重み。詳細は、測候時報 62.6 参照）
- ・雨量計の一様性重み（雨量計密度に地域差があった場合に、雨量計密度の高い領域の補正係数が支配的にならないような重み。詳細は、平成24年度予報技術研修テキスト（量的予報技術資料 第18巻）参照）
- ・信頼度による重み
 - ・観測ビーム高度（観測ビーム高度が高い場合、エコー強度は弱くなる傾向があるので、補正係数が大きくなる。このため、観測ビーム高度が高い格子での補正係数は重みを小さくする）

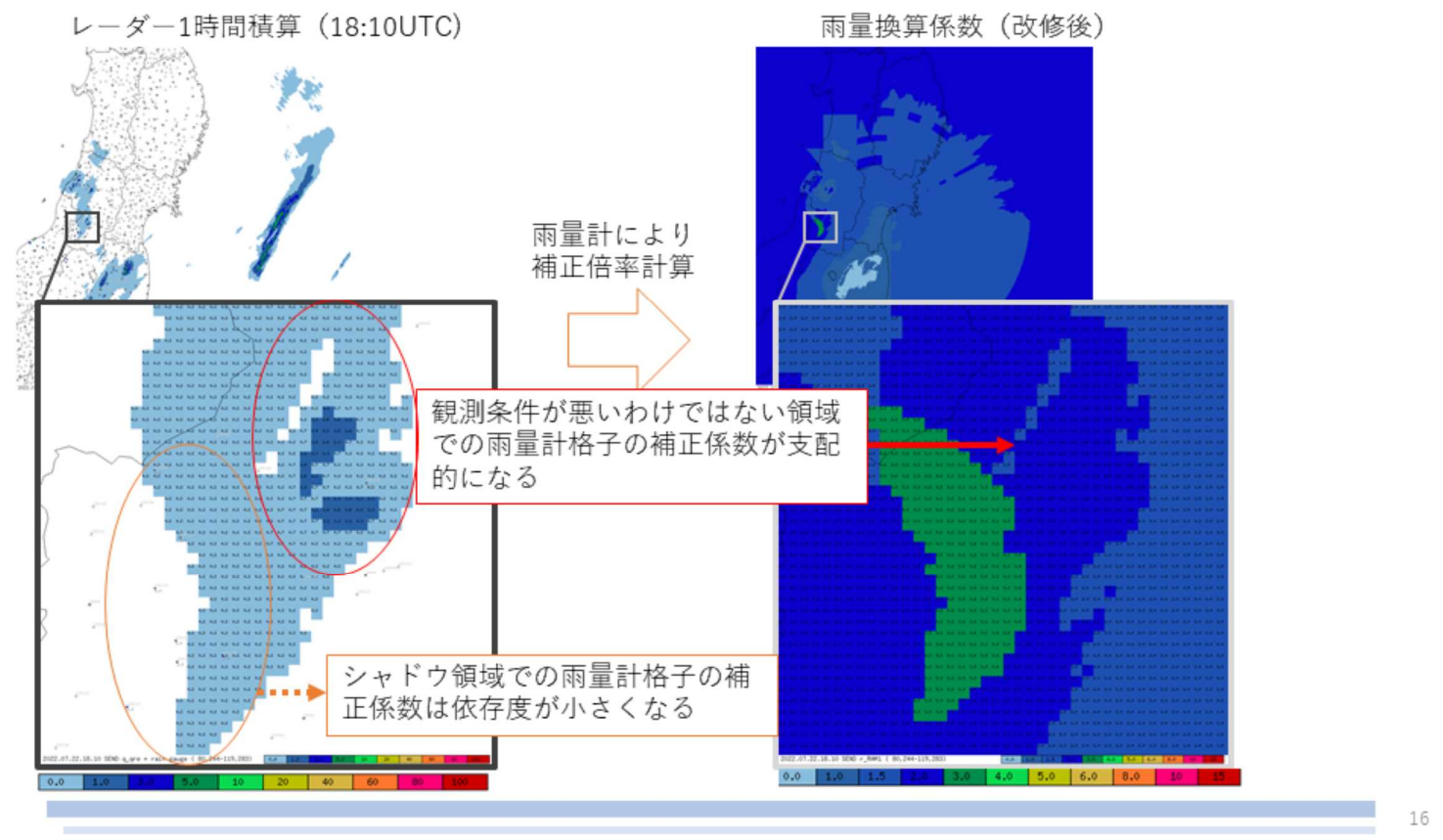
本改修では、信頼度にビーム透過率による加重も掛けることとなります。ビーム透過率が低い（エコーが十分捕捉できない）場合は、信頼度が低くなり、加重平均の重みも小さくなります。

（参考）

- ・雨量二次解析について：
予報部予報課（1995）：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度。測候時報 62.6
平成18年度量的予報研修テキスト（量的予報技術資料 第12巻） 第2章 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点
平成24年度予報技術研修テキスト（量的予報技術資料 第18巻） 第3章：解析雨量・降水短時間予報・降水ノウキャストの改善

シャドウ領域への対応

2022年7月22日 18:10UTC (10分前) 仙台レーダーによる解析 (雨量換算係数) (改修後)



このスライドは、雨量二次解析にビーム透過率を考慮に入れる改修を行った後の雨量換算係数を示しています。

シャドウ領域での係数は3~4倍程度と若干大きいものになっていますが、シャドウ領域ではない領域 (左図赤丸) での係数は、1[mm/h]未満の降水の部分でも2~3倍程度に抑えられています。

これは、シャドウ領域の雨量計格子における補正係数の依存度を小さくするという改修の結果で、改修前 (スライド9) と比べると、空間的に安定した雨量換算係数の分布になっています。

降水が時間移動することへの対応

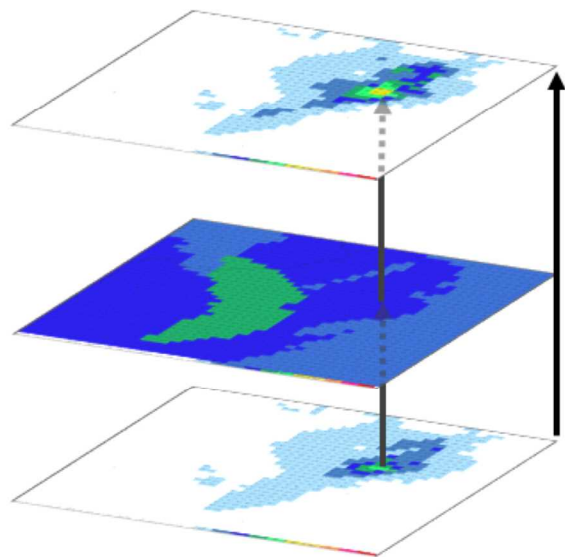
10分間解析雨量の解析に利用する雨量換算係数（10分前解析）を降水ノウキャストの移動ベクトルで移動させる

- 速報版降水短時間予報の初期値ではすでに導入済(2020年3月)。
 - 当時、10分間解析雨量への導入も検討されていたが、統計的にあまり改善効果が見られなかったということで、見送られた
- 雨量換算係数のタイムラグによる位置ズレが原因で10分間解析雨量で過大となる事例を確認したため、速報版降水短時間予報の初期値で導入されている手法を10分間解析雨量（従来の解析部分）でも導入する
 - 雨量換算係数はレーダー積算降水量に対応した補正係数（強雨では補正係数は小さくなる）となるため、降水が移動する場合はその補正係数も対応させるように移動させる方が尤もらしい解析となる
 - ただし、補正に利用する係数はそのレーダーが採用される範囲の値に限定している
 - シャドウ領域はレーダー積算が小さく、ほぼ採用されないため、シャドウ領域の大きな雨量換算係数が利用されることを防ぐ措置
 - 今回、シャドウ領域付近の雨量換算係数の分布も空間的に安定する改修も行ったため、移動ベクトルでの雨量換算係数移動予測における当たり外れの大きな副作用は抑えられる

改修項目の二点目は、降水が時間移動することへの対応です。

過大値への対策（まとめ）

- シャドウ領域への対応
 - ・ レーダー観測のシャドウ領域における大きな雨量換算係数が、好条件領域に波及しないよう改修を行った
- 降水が時間移動することへの対応
 - ・ 雨量換算係数（10分前解析）を降水ノウキャストの移動ベクトルで移動させて補正を行うように改修した



③10分間降水量解析(18:20UTC)
結果として、最大で26[mm/10分]の解析値となった

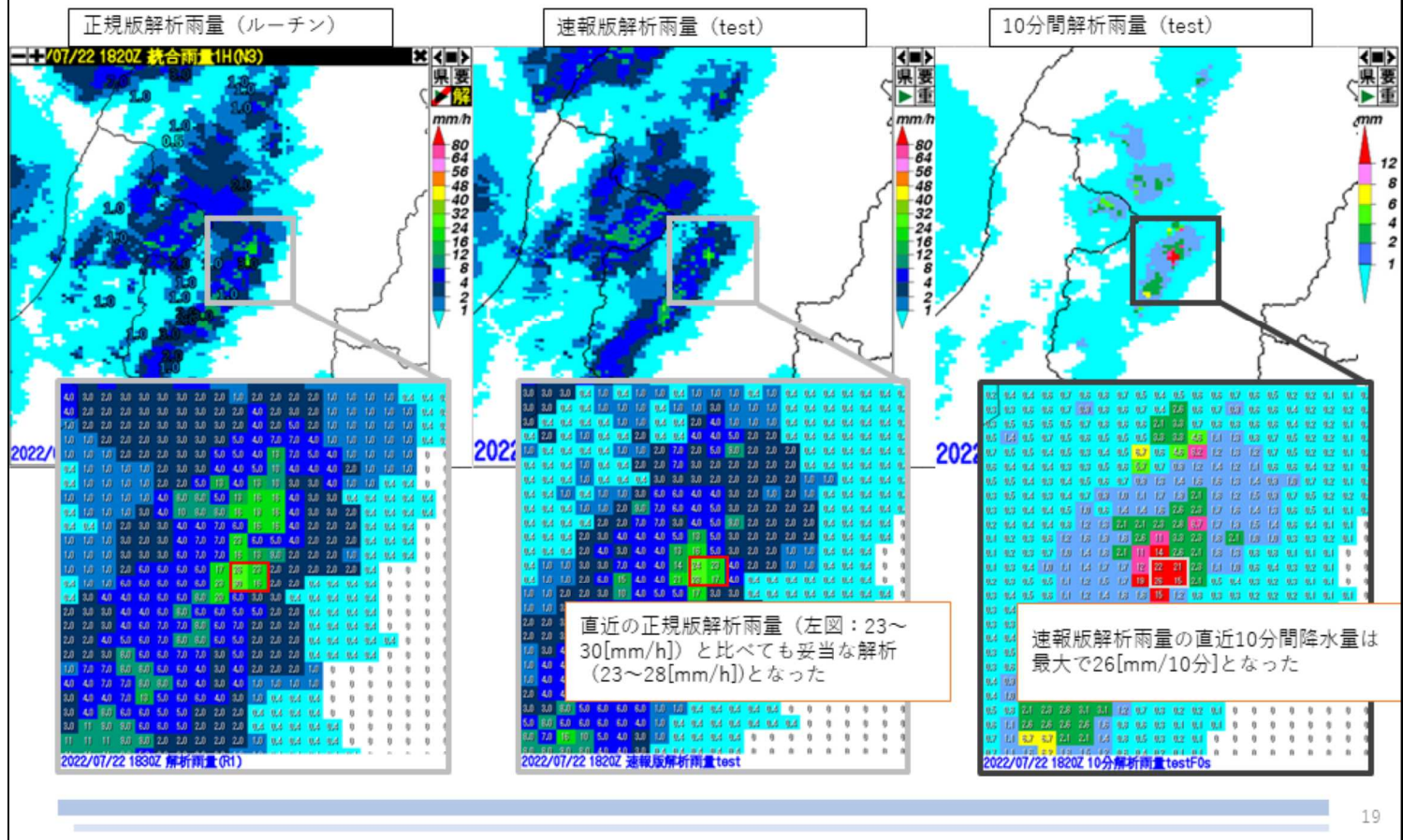
②10分前（18:10UTC）の雨量換算係数
シャドウ領域の雨量計格子における補正係数の依存度を下げること
で、シャドウでない領域でも2～3倍の補正係数に抑えられるよう
になった。また、雨量換算係数を降水ノウキャストの移動ベクトル
で移動させることで、降水パターンにマッチした雨量換算係数分布
となっている

①18:10～18:20UTCのレーダー10分積算
10分前の状態に比べると、降水は北東へ移動しており、またレー
ダー積算では強い降水（最大12[mm/10分]）が現れた

10分間解析雨量の過大値への対策として行った改修のまとめです。

過大値への対策（実験結果）

2022年7月22日 18:20UTC の改修実験結果



こちらは、2022年7月22日 18:20UTC 山形県の速報版解析雨量で局所的に過大な解析となった事例で、改修実験を行ったものです。

左図は正規版解析雨量、中図は速報版解析雨量、右図は10分間解析雨量で、下段はそれぞれを拡大した図となっています。

改修前は、10分間解析雨量は最大で51[mm/10分]、速報版で41～53[mm/h]となっていました。

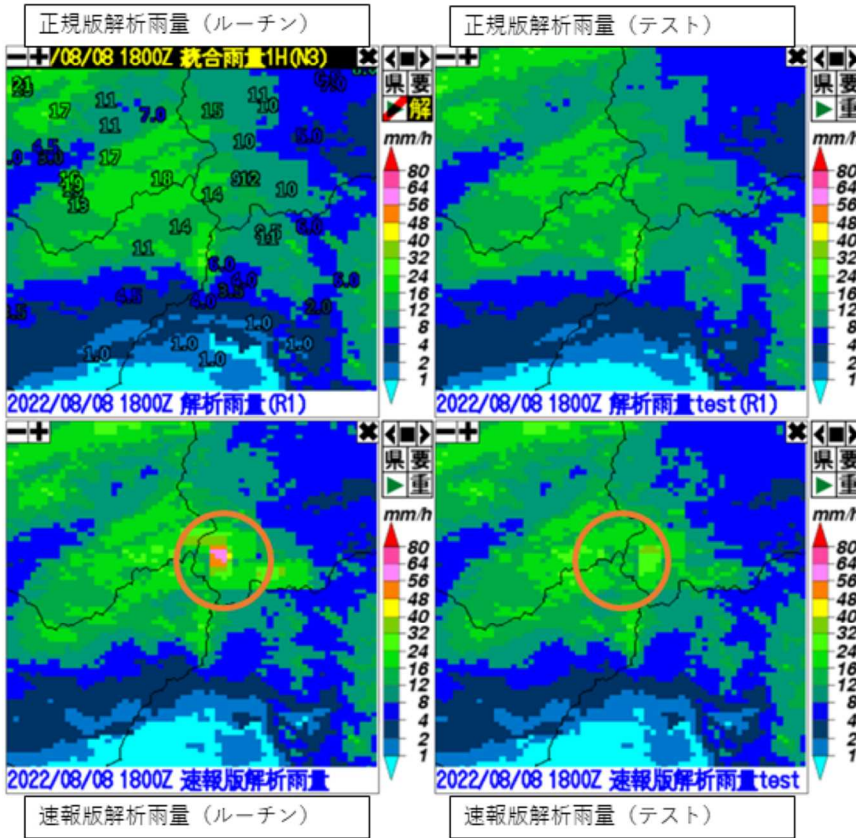
改修後は、10分間解析雨量は最大で26[mm/10分]、速報版で23～28[mm/h]となり、正規版（23～30[mm/h]）と比べると適切な解析値になっています。

改修結果の事例確認

速報版解析雨量が局所的に過大となった事例は、他にも確認しているため、本改修が他の事例でも改善効果となるか確認した

事例確認

2022年8月8日 18:00UTC の改修実験（北海道（上川地方）での事例）



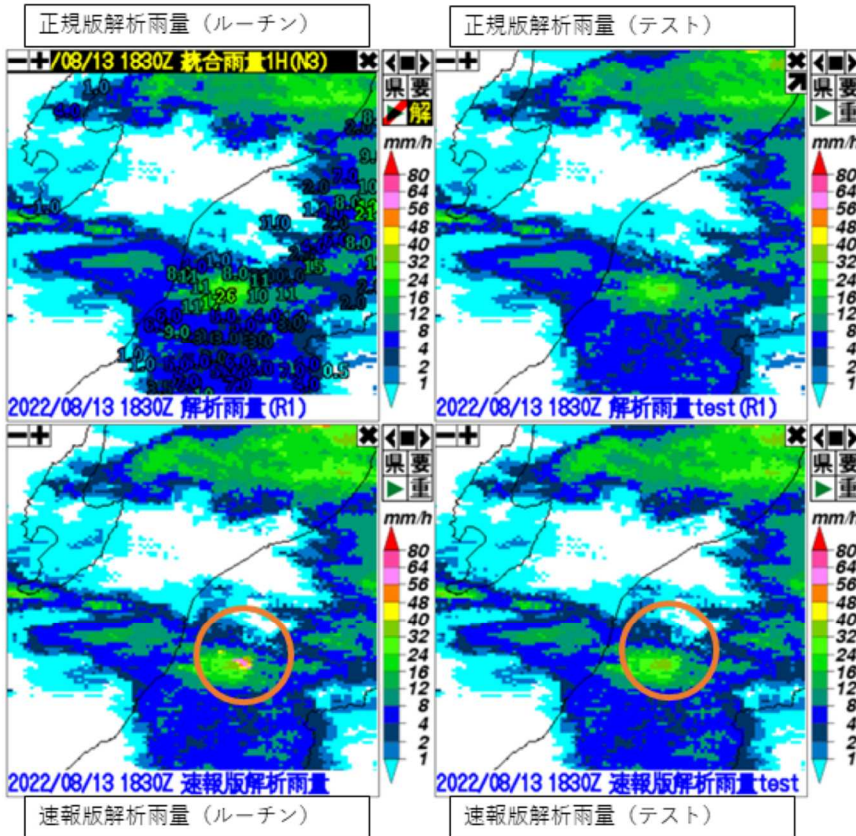
10分前の雨量換算係数では、大きい補正係数となっていたところに降水が強まりながら移動してきたため、正規版解析雨量（ルーチン）（左上図）と比べると速報版解析雨量では不自然に過大となっていた（左下図）。

雨量換算係数を移動させる手法により過大値が改善することを確認している（右下図）。

また、解析アルゴリズムの改修は、正規版解析雨量（テスト）にはほとんど影響を与えていない（右上図）。

事例確認

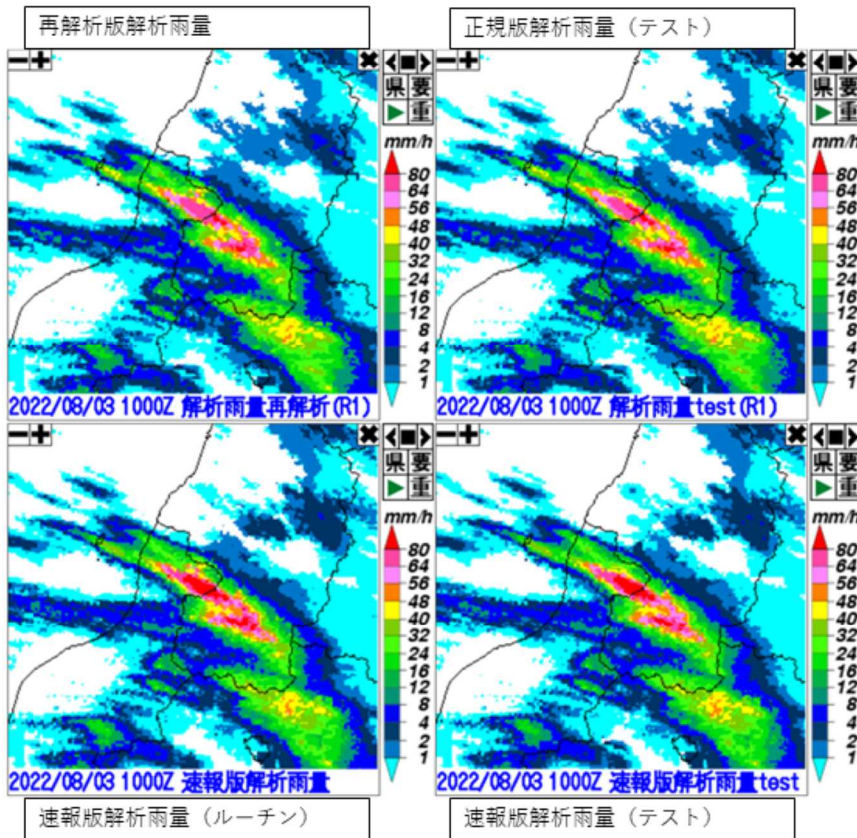
2022年8月13日 18:30UTC の改修実験（新潟県での事例）



長野レーダーにおけるシャドウ領域が原因で、10分前の雨量換算係数では部分的に大きな補正係数となっていたため、正規版解析雨量（左上図）と比べると速報版解析雨量では局所的に過大となっていた（左下図）が、シャドウ領域に対応する本改修により過大値が改善することを確認している（右下図）。なお、解析アルゴリズムの改修を行っても、正規版解析雨量（テスト）にはほとんど影響がないことも確認している（右上図）。

事例確認（豪雨解析に影響がないことを確認）

2022年8月3日 10:00UTC の改修実験（新潟県～山形での豪雨再現事例）



解析アルゴリズムの改修を行ったが、シャドウ領域の問題が現れないような事例では豪雨事例でも従来と同等の解析となることを確認している（正常に解析を行えている時には影響が出ないことを確認する試験）。

統計検証

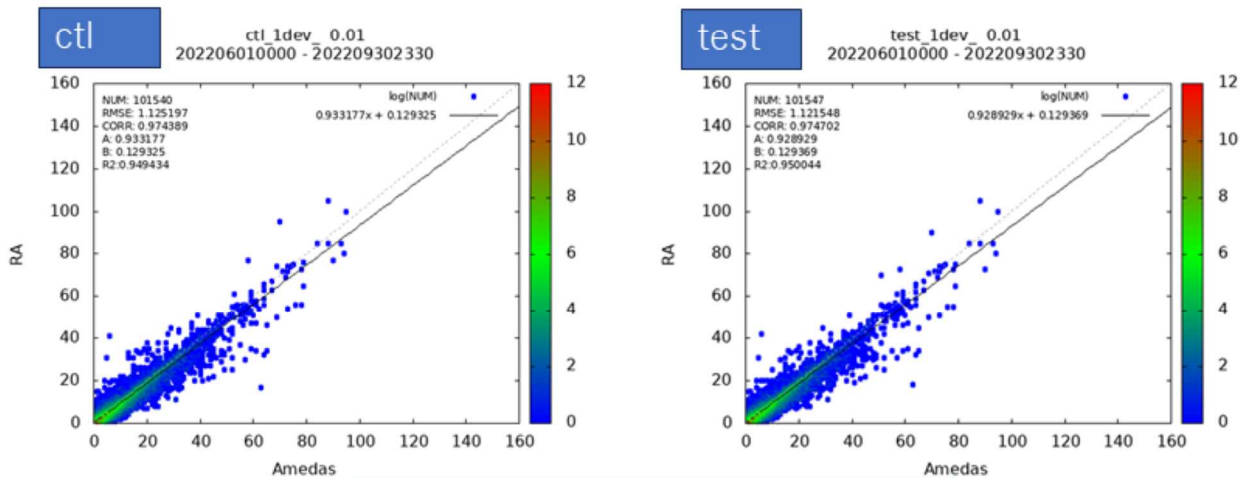
解析（雨量二次解析）アルゴリズムの改修も行ったため、

- ・ 正規版解析雨量で悪影響が出ないこと
- ・ 速報版解析雨量が正規版解析雨量に近づくこと

の統計的な影響確認を行う

統計検証（夏）（正規版解析雨量）

一部アメダスを抜いた正規版解析雨量実験
(2022/06/01 ~ 2022/09/30)



RMSE : 1.125 → 1.121
相関係数 : 0.9744 → 0.9747
回帰直線傾き : 0.9331 → 0.9289

RMSE、相関係数はわずかに改善、回帰直線傾きはわずかに改悪であるが、統計的にはほぼ中立で、本改修が正規版解析雨量に大きな影響を与えないことを確認している。

25

一部のアメダスをあえて利用せずに解析雨量を計算し、利用しなかったアメダスを真値として検証を行いました。

利用しなかったアメダスは、全国の任意の地点（182地点）。

横軸は解析雨量に利用しなかったアメダス、縦軸は正規版解析雨量をとる散布図。なお、1格子のズレは許容する検証としています。

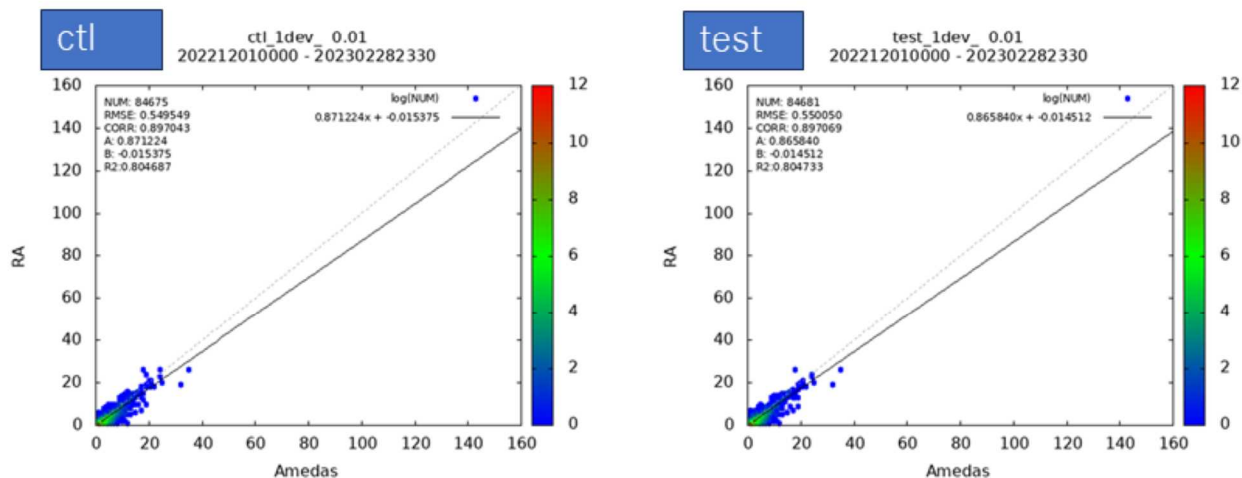
左図はコントロール (ctl)実験、右図はテスト (test)実験を示しています。

RMSE:Root Mean Square Error

バイアス傾向はほぼ変わらず、注警報の基準値運用には影響がないと考えています。

統計検証（冬）（正規版解析雨量）

一部アメダスを抜いた正規版解析雨量実験
(2022/12/01 ~ 2023/02/28)



RMSE : 0.549 → 0.550
相関係数 : 0.8970 → 0.8971
回帰直線傾き : 0.8712 → 0.8658

相関係数はわずかに改善、RMSE、回帰直線傾きはわずかに改悪であるが、冬実験でも統計的にはほぼ中立となることを確認している。

26

一部のアメダスをあえて利用せずに解析雨量を計算し、利用しなかったアメダスを真値として検証を行いました。

利用しなかったアメダスは、全国の任意の地点（182地点）。

横軸は解析雨量に利用しなかったアメダス、縦軸は正規版解析雨量をとる散布図。なお、1格子のズレは許容する検証としています。

左図はコントロール (ctl)実験、右図はテスト (test)実験を示しています。

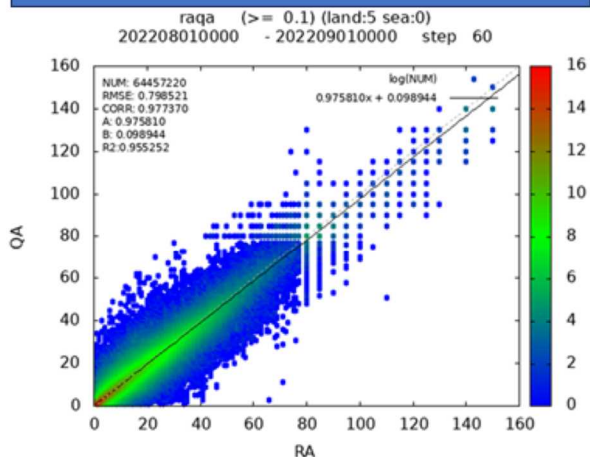
RMSE:Root Mean Square Error

バイアス傾向はほぼ変わらず、注警報の基準値運用には影響がないと考えています。

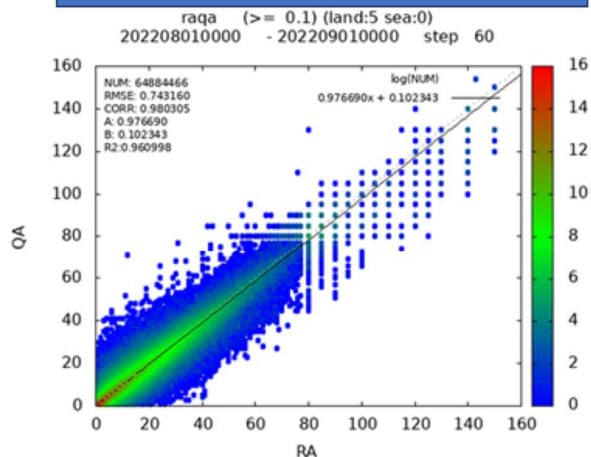
統計検証（夏）（速報版解析雨量）

正規版解析雨量（全雨量計利用）を真値とした速報版解析雨量の検証
(2022/08/01 ~ 2022/08/31)

ルーチン速報版 vs test正規版



test速報版 vs test正規版



RMSE : 0.799 → 0.743
相関係数 : 0.9773 → 0.9803
回帰直線傾き : 0.9758 → 0.9767

RMSE、相関係数、回帰直線傾きともに改善であり、
速報版解析雨量が正規版解析雨量に近づく改修と言える。

27

横軸は正規版解析雨量（テスト実験）、縦軸は速報版解析雨量をとる散布図（陸地付近のみ比較）。

左図はルーチンの速報版、右図はテストの速報版を示しています。

まとめ

まとめ

- レーダー観測におけるシャドウ領域付近で、速報版解析雨量（直近の10分間解析雨量）が過大となる場合があったが、これを緩和する改修を行った
 - シャドウ領域への対応：
 - 雨量二次解析時にビーム透過率を考慮に入れる
 - 降水が時間移動することへの対応：
 - 10分前の雨量換算係数を降水ノウキャストの移動ベクトルで動かして補正を行う
 - この改修により、10分間解析雨量の過大値を緩和できることを確認した
 - 豪雨事例では従来同様の解析結果となることも確認した
 - 統計検証では
 - 正規版の傾向は変わらない
 - 速報版は正規版に近づく
- 2023年6月13日 13時00分(JST)～、本改修をルーチン適用している

参考文献

- 解析雨量の解析手法：

- 予報部予報課（1995）：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度，測候時報 62.6
- 平成18年度量的予報研修テキスト（量的予報技術資料 第12巻） 第2章 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点
- 平成24年度予報技術研修テキスト（量的予報技術資料 第18巻） 第3章 解析雨量・降水短時間予報・降水ノウキャストの改善

- 速報版解析雨量：

- 平成30年度予報技術研修テキスト（量的予報技術資料 第24巻） 第7章 降水短時間予報等の改善

- ビーム透過率：

- PAUL L. SMITH (1998): On the Minimum Useful Elevation Angle for Weather Surveillance Radar Scans