
解 説

レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度*

予報部予報課**

047.131 : 551.508

目 次

1. はじめに
2. レーダー・アメダス解析雨量の特徴と解析手法の概要
 - 2.1 レーダー・アメダス解析雨量の特徴
 - 2.2 解析手法の概要
3. レーダー・アメダス解析雨量の解析手法
 - 3.1 レーダーデータの品質管理
 - 3.1.1 地形エコーの除去
 - 3.1.2 レーダーサイトを囲む格子の1時間積算降水強度の推定
 - 3.1.3 異常データの判定
 - 3.2 雨量の一次解析
 - 3.2.1 Fa と Fx の初期推定
 - 3.2.2 隣接レーダーとの比較による Fx の近似
 - 3.2.3 全レーダーを対象とした誤差調整による Fx の決定
 - 3.2.4 アメダス雨量との比較による Fa の近似
 - 3.2.5 全レーダーを対象とした誤差調整による Fa の決定
 - 3.2.6 雨量一次解析値の算出
 - 3.3 陸上における雨量の二次解析
 - 3.4 合成によるレーダー・アメダス解析雨量の決定
 - 3.4.1 座標変換の特徴
 - 3.4.2 合成の方法
4. レーダー・アメダス解析雨量の精度
 - 4.1 期間平均の精度
 - 4.2 降水タイプ別の精度
5. レーダー・アメダス解析雨量の利用上の注意点

* Analysis Process and Accuracy of the Estimated Amount of Rainfall Based on Radar and AMeDAS Observations

** Forecast Division, Forecast Department, 阿部 世史之

6. あとがき

- 付録1 レーダー観測から地上雨量を推定する際に発生する誤差の要因
- 付録2 レーダーサイトにおける1時間積算降水強度データの処理手順
- 付録3 Fx の近似値を持つ線形関係式と値に付す重み
- 付録4 Fa の決定値を求める方法
- 付録5 雨量較正の繰り返し回数によって変化する処理の仕方
- 付録6 雨量較正にレーダー雨量比重みを考慮する理由とその役割
- 付録7 平均強度の比較による最大値法の特徴
- 参考文献

1. はじめに

降水短時間予報業務は1988(昭和63)年4月1日に開始された。降水短時間予報の演算処理は解析処理部と予報処理部からなっており、解析処理部では、気象レーダーとアメダスから得られる降水量に関する観測データに基づいて「レーダー・アメダス解析雨量(以下、「解析雨量」と略す)」が算出される。また、この処理の過程で、レーダーデータを地上雨量に換算するための「レーダー雨量係数」が解析の格子ごとに求められる。予報処理部では、正時に得られたエコー強度に先に求めたレーダー雨量係数を乗じて初期時刻における降水強度分布を決定し、これから出発して運動学的手法によって3時間先までの降水量が予想される。この降水短時間予報業務の基本的な構造は、現在も変更されていない。

降水短時間予報業務開始当初の解析雨量(当時は「レーダー・アメダス合成値」と呼んでいた)の位置付けは、降水3時間予想を行うための初期値場を求める過程で算出される降水量との色彩が強く、「レーダー・アメダス合成図」の名称で予報警報作業の補助資料として各級官署に配信されてきた。その後、この「合成値」をアメダスや部外機関の雨量観測結果と比較する調査(饒村, 1985; 北島・大林, 1991; 牧原, 1993など)が積み重ねられるとともに、数値予報の初期値解析のなかでメソスケールの上昇流や水蒸気場をより

適切に表現するためにも利用される(予報部数値予報課, 1993)ようになるなど、その量的精度に関する調査や定量的な利用が進んできた。

このような状況のなかで、1994(平成6)年6月1日からは、解析雨量を「解析の結果得られた面的な雨量」と位置付けて、その数値によって記録的短時間大雨情報を発表するとともに、まだ部内運用基準ではあるものの解析雨量を根拠にして警報を行うという新たな予報警報作業での利用が開始された。このような解析雨量の利用形態は、従来のどちらかといえば定性的なものから、定量的な利用にもう一步踏み込むものであった。

降水短時間予報業務の全体にわたる業務処理の詳細は、予報部予報課が「降水短時間予報技術解説書(1990)」や「降水短時間予報プロダクト作成におけるデータ処理について(測候時報, 1991)」で解説してきたが、その後も数度にわたる解析手法等の改訂が行われ、1995(平成7)年5月には局地的な短時間強雨に対する解析手法が大幅に改良された。このような状況を受けて、解析雨量の解析手法全般にわたる最新の解説を行うことを主眼とし、気象庁内関係者各位の協力と助言を得て本稿をまとめた。また、解析雨量の利用が新しい段階を迎えていることも考慮して、解析雨量の精度や予報警報作業での利用上の注意点についても述べた。本稿を予報警報作業で解析雨量をより有効に利用するための参考にしていただきたい。

2. レーダー・アメダス解析雨量の特徴と解析手法の概要

観測データを入力して解析雨量が出力されるまでの一連の業務処理（以下、「雨量解析処理」という）の詳細については第3章で述べることとして、この章では解析雨量の基本的な特徴及び解析手法の概要について述べる。

2.1 レーダー・アメダス解析雨量の特徴

解析雨量の算出に用いる観測データは、アメダスによる正時から次の正時までの1時間雨量（以下、「アメダス雨量」という）と、気象レーダーのデータである。各地の気象レーダーサイトからL-ADESS経由で気象庁本庁まで伝送されるデータには、「エコー強度」と「エコー頂高度」、及び気象レーダーで観測された第一次的な雨量である「1時間積算降水強度」があるが、雨量解析処理では1時間積算降水強度を解析雨量算出のための主データとして利用し、エコー強度とエコー頂高度は1時間積算降水強度データの品質管理に利用している。1時間積算降水強度データの仕様を、第1表に示す。

アメダスの雨量観測点は全国に1300か所余り

設置されており、平均して約17km四方に1か所という世界でも有数の観測密度を持っている。空間的にほぼ均一な降り方をする層状性の降水については、アメダス程度の観測密度があれば降水量分布を十分正確に把握できる。しかし、雷雨などの水平スケールが小さい対流性の降水や局地的な大雨の場合は、時として水平スケールが10kmにも満たない狭い地域だけで激しい降水現象が発生することがあるため、アメダスの観測密度をもってしても降水の全体像を正確に把握できない。

一方、気象レーダーは、時間的にも空間的にもきめ細かく降水粒子の分布に関するデータを取得できるが、付録1にまとめたように、いくつかの仮定に基づいて観測データを処理しているため、地上での降水量に換算する際に誤差が生じることは避けられない。

解析雨量は、気象レーダーで観測された第一次的な雨量を、レーダー観測の特性や地形による影響などを加味して、アメダス雨量で較正することにより得られる。解析雨量の最大の特徴は、上述したアメダスと気象レーダーによる降水量観測の長所を最大限に生かす解析手法を用いて、アメダスによる降水量観測密度より細かな5km四方格

第1表 雨量解析処理で使用するレーダーデータ

種 類	1時間積算降水強度データ
格子単位	5km×5km
領 域	東西100格子×南北100格子(500km×500km) 富士山レーダーは 東西120格子×南北120格子(600km×600km)
時間間隔	1時間
レベル数	64

レベルに対応する降水強度の下限と上限の値、及びその幅(mm/h単位)

レベル	0	1	2	...	6	7	...	13	14	...	40	41	...	62	63
降水強度	0	0 < 0.5 ≤	2.5 ≤	3 ≤	...	9 ≤	10 ≤	...	62 ≤	64 ≤	...	148 ≤	152 ≤		
幅		< 0.5	< 1.0	< 3.0	< 4	< 10	< 12	< 64	< 68	< 152					
		← 0.5		← 1.0		← 2.0		← 4.0							

子ごとに、アメダス雨量と同程度の精度を持った地上雨量を「推定」することにある。

各レーダーサイトで気象レーダーの観測値から5 km 四方格子の第一次的な雨量を求める際に、4つの2.5km 四方格子の値の最大のものを選択する処理を行ったり、各レーダーごとにアメダス雨量で較正して求められた雨量解析値を全国をカバーする領域で合成して解析雨量を決定する段階で、ひとつの格子に複数のレーダーによる雨量解析値がある場合には原則として最大値を与えるレーダーの値を採用する処理を行っていることなどから、解析雨量は、おおまかには5 km 四方の領域の面積平均雨量より大きく、また、その格子を四分割した2.5km 四方の領域の面積平均雨量の最大値より小さな雨量を与えると考えられる。このことも、解析雨量の重要な特徴のひとつとなっている。

2.2 解析手法の概要

雨量解析処理の概略の流れを第1図に示す。

まず「レーダーデータの品質管理」では、伝送された1時間積算降水強度データの品質をチェックする。1時間積算降水強度にはレーダーエコーデジタル化装置で消え残った地形エコーが含まれることがあるので、あらかじめ登録された地形エコーの出やすい格子のリストや、アメダス雨量、エコー強度、エコー頂高度のデータも参照して、地形エコーが含まれる不良データを可能な限り除去することに努める。また、レーダーサイトにごく近い格子については、レーダーデータの品質に問題があるので、周辺の格子の1時間積算降水強度から推定した値を代入する。さらに、レーダー機器の一時的故障などごくまれに伝送されることがある異常データを排除する。

「雨量の一次解析」では、まず、品質チェックを受けた1時間積算降水強度データ（第1表に示

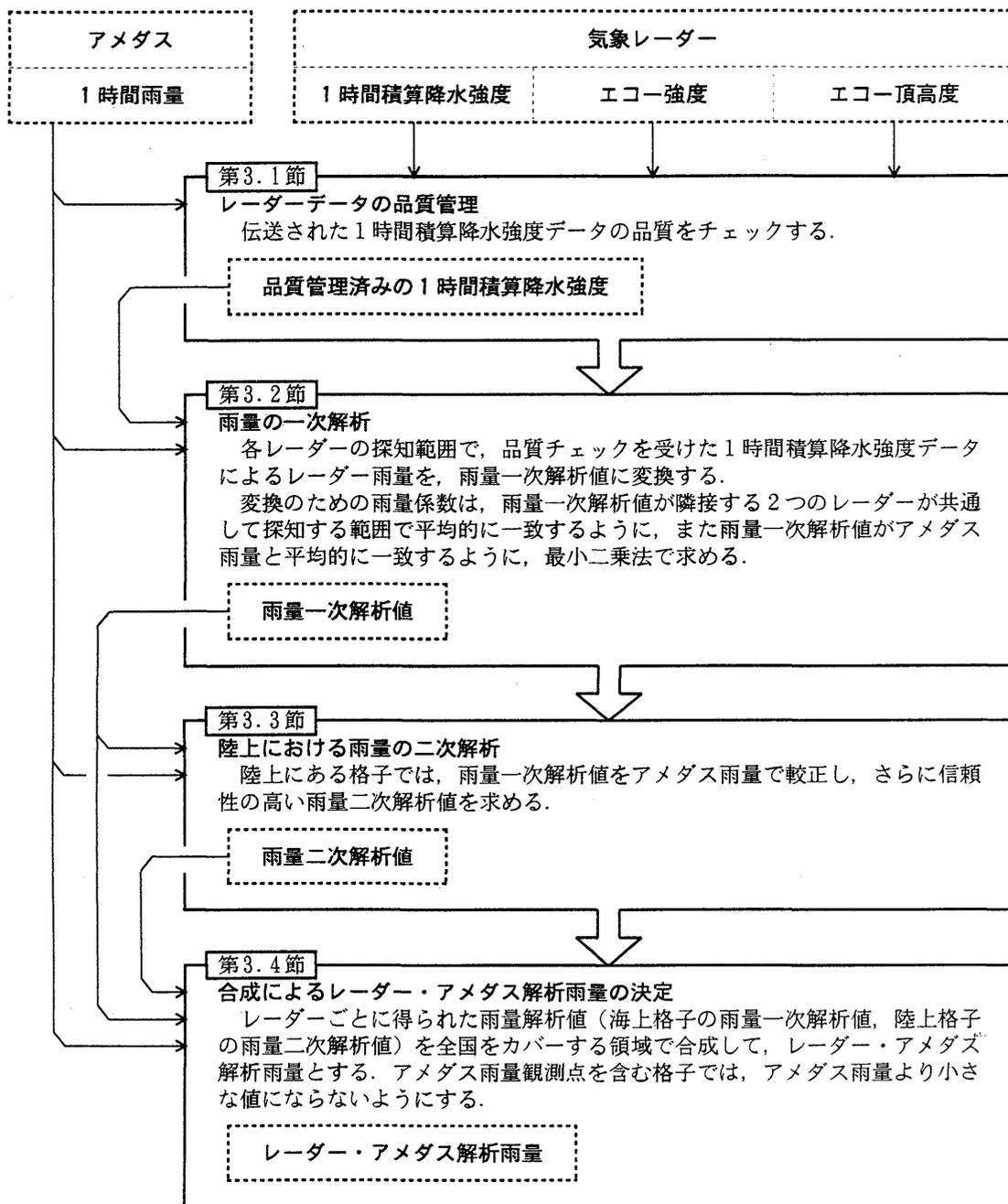
したレベル値で表現）を、1時間雨量（以下、「レーダー雨量」という）に換算する。

気象レーダーによる観測データには誤差が含まれており、それが時々刻々と変化する。そこで、レーダー雨量が含む誤差を補正するための係数である「レーダー雨量係数（以下、「雨量係数」と略す）」を求め、これをレーダー雨量に乗じて雨量一次解析値を算出する。雨量係数はある簡単な関係式で表されると仮定し、この式に含まれる係数の値を最小二乗法を用いてレーダーごと、時刻ごとに決定する。

「陸上における雨量の二次解析」では、陸上にある格子ごとに、各格子から半径70km以内にある複数のアメダス雨量観測点を含む格子（以下、「アメダス格子」という）でアメダス雨量と雨量一次解析値を比較し、当該格子からの距離が近いアメダス格子における両者の比較結果ほど大きな重みを持たせるなどの加重平均処理により、先に求めた雨量一次解析値を補正する。この操作を計3回繰り返して、さらに信頼性の高い雨量二次解析値とする。海上にある格子については、二次解析は行わない。

「合成による解析雨量の決定」では、レーダーごとに得られた雨量解析値（海上格子の雨量一次解析値、陸上格子の雨量二次解析値）を全国をカバーする領域で合成し、解析雨量とする。この際に、ある格子に複数のレーダーによる解析値が存在する場合には、原則としてそのうちで最大の1時間積算降水強度を観測したレーダーによる解析値を採用して解析雨量とするが、そのレーダーの観測精度に疑問がある場合は、最も信頼性が高いと考えられるレーダーによる解析値を解析雨量とする。また、この最終段階で、アメダス格子の解析雨量がアメダス雨量より小さい場合は、アメダス雨量をその格子の解析雨量として採用する。

なお、船舶搭載レーダーのデータはレーダーエ



第1図 雨量解析処理の概略の流れ

太実線の囲みは処理内容（左上枠内は本文で解説する節の番号）、太い矢印は処理の流れを表す。また、太点線の囲みは主なデータ、細い矢印はデータの流れを表す。

コー合成値（各レーダーのエコー強度とエコー頂高度を全国をカバーする領域で合成したプロダクト）に取り込んでいるが、較正に使用すべきアメダス雨量観測点が固定できないので、雨量解析処理には使用していない。

3. レーダー・アメダス解析雨量の解析手法

解析雨量の解析手法について、雨量解析処理のステップごとに詳しく解説する。

3.1 レーダーデータの品質管理

伝送された各気象レーダーの1時間積算降水強度データについて、品質をチェックする。その内容について、以下に述べる。

3.1.1 地形エコーの除去

気象レーダーでは、レーダーエコーデジタル化装置のMTIフィルタ*によって大部分の地形エコーを除去している（詳細については、付録2を参照されたい）。しかし、大気の成層状態によっては地形エコーが非常に強くなることもあり、このような場合は地形エコーが完全に除去されずに1時間積算降水強度として取り込まれることがある。そこで、消え残った地形エコーによる1時間積算降水強度データを、次の手順で除去する。

まず、オンライン処理とは別に、各格子ごとの過去のエコー出現頻度から、エコーの出現回数が周囲に比べて異常に多い格子を地形エコーの消え残りが出やすい格子として抽出し、その位置をあらかじめ登録しておく（以下、「登録格子」という）。地形エコーと見なす1時間積算降水強度などのしきい値（レベル）、その格子の近傍で地形エコーの消え残りが出にくい格子（最大7格子）の位置も、併せて指定する。

オンライン処理では、登録格子と近傍の地形エ

コーの消え残りが出にくい格子の1時間積算降水強度とエコー頂高度、近傍のアメダス雨量観測点（最大10地点）の雨量が次の条件をすべて満たす場合、この登録格子の1時間積算降水強度データは地形エコーによるものと判断して除去する（レベルを0とする）。

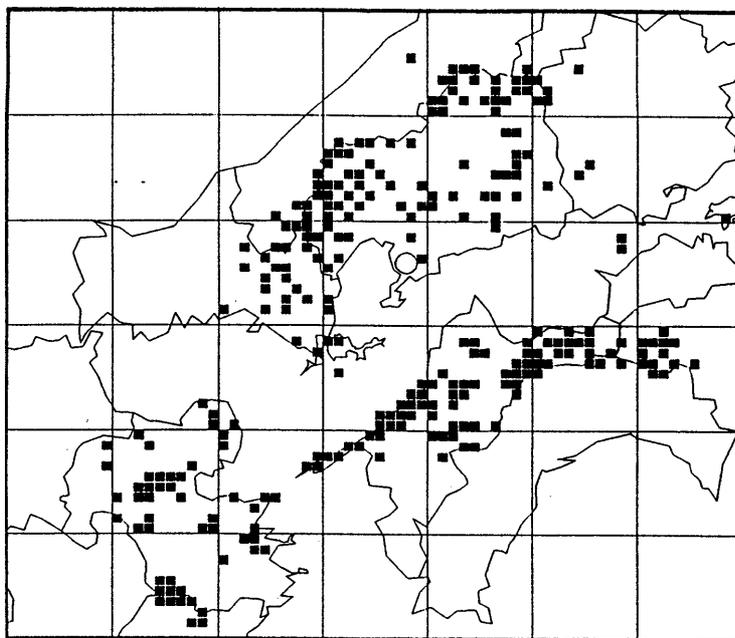
- ① 登録格子の1時間積算降水強度が、あらかじめ指定したレベル以下である。
- ② 登録格子を中心とする3×3格子のエコー頂高度が、すべてあらかじめ指定した高度以下である。
- ③ 近傍の地形エコーが出にくい複数の格子の観測正時におけるエコー強度の和がレベル1以下、または1時間積算降水強度の和がレベル2以下である。
- ④ 近傍の複数のアメダス雨量観測点で、処理時刻または1時間前の時刻に0.5mm以上の前1時間雨量が観測されていない。

①の条件は、地形エコーが消え残ったとしてもMTIフィルタによって相当に減衰されていることによる。②の条件は、地形エコーは地形の高さ以上にならないことによる。これにより、孤立して発生する対流性の降水エコー（通常は背が高く強度も強い）を除去しないようにする。これらの条件に使用するレベルのしきい値は、地形エコーが消え残る頻度によって登録格子ごとに変えている。地形エコーの登録格子と除去の例を、第2図に示す。

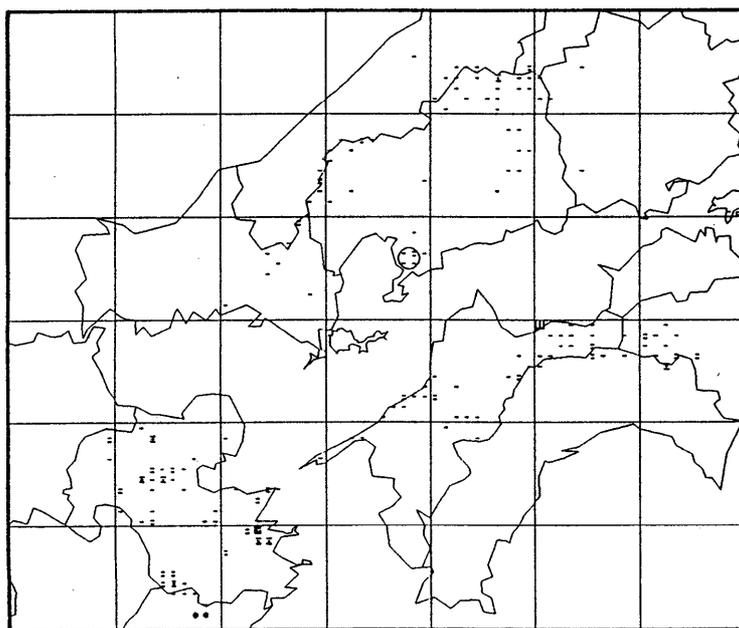
なお、海岸線付近のシークラッター（海面の波やしぶきからのエコー）についても、現れやすい格子が特定できるため、地形エコーと同様の処理をしている。沖合のシークラッターに対しては、別の処理を行う（第3.4.2項で述べる）。

* 降水エコーと地形エコーの性質の違いを利用して地形エコーを除去するフィルタ。

(1)



(2)



1 %	∩	.
5 %	∩	·
10 %	∩	·
15 %	∩	·
20 %	∩	·
25 %	∩	·
30 %	∩	·
40 %	∩	·
50 %	∩	·

第2図 地形エコーの登録格子と除去の例 (広島レーダー)

(1) 地形エコーの登録格子

■印が地形エコーの消え残りが出やすい格子として登録した位置を表す。中央やや上の○印はレーダーサイトを囲む4格子の範囲を示す。

(2) 除去した地形エコー

記号はアルゴリズムで地形エコーを除去した割合を表し、対応する数値(%)を右横に示す。ただし○印内の4つの記号は、レーダーサイトを囲む4格子の1時間積算降水強度を推定した割合(第3.1.2項)を表す。1994年10月の例で、観測時間数は420時間である。

3.1.2 レーダーサイトを囲む格子の1時間積算降水強度の推定

レーダー空中線から送信される電波のエネルギーは、大半が「主ローブ（付録1の第1.1節を参照）」に含まれるが、約30%のエネルギーは主ローブの外側で「サイドローブ」と呼ばれる領域にも含まれる。レーダーサイトにごく近い所では、サイドローブによる地形や建物のエコーの影響で、1時間積算降水強度データの品質が悪い。このため、レーダーサイトを囲む4格子の値は無視し、周囲12格子の値に重みを付けて平均する。この推定に使用する格子と重みの分布を第3図に示す。

5	6	4	1
6		○	1
4			0
1	1	0	0

第3図 レーダーサイトを囲む4格子の1時間積算降水強度の推定に使用する格子と内挿重みの分布

○印はレーダーサイトの位置、斜線部は推定対象の格子、数字は加重平均による内挿のための重みを表す。推定対象の残り3格子に対する内挿重みの分布は、この状態を90度ずつ回転させたものに等しい。

3.1.3 異常データの判定

レーダー機器の一時的故障などで、ごくまれに異常データが伝送されてくることがある。このような異常データは、一定のパターンで現れるわけではないので、そのすべてに対応するのは困難である。

雨量解析処理では、伝送された

- ① エコー強度（東西100格子×南北100格子、富士山レーダーは200格子×200格子）

- ② エコー頂高度（東西100格子×南北100格子、富士山レーダーは120格子×120格子）

- ③ 1時間積算降水強度（②と同じ）

で、東西1列（100格子、富士山レーダーは200格子、または120格子）のレベル値がすべて0以外と同じ値であれば異常データと判断し、このレーダーサイトのデータをすべて排除している。

3.2 雨量の一次解析

第3.1節で品質管理を受けた1時間積算降水強度は、第1表に示したレベル値で表されたデータである。これを降水強度（mm/h）に変換してレーダー雨量とする。各レベル値を降水強度に変換するための代表値は、レベルに対応する降水強度の中央値（第1表に示した上限値と下限値の相加平均）より1～4%程度小さい値として、あらかじめ設定してある（牧原, 1995）。

気象レーダーによる降水量分布の観測で発生する主な誤差は、付録1の記述をもとに、以下のようによまとめられる。

- ① 対象とする降水タイプの違いやレーダー固有の特性などに起因する誤差

受信電力を降水強度に換算する際に用いるZ-R関係*を表す式で、係数であるBとβの値を層状性の降水に適合するものに固定しているため、層状性以外の降水の場合は換算した降水強度におのずと誤差が生じる。このほか、それぞれのレーダーに固有の受信感度特性や、降水時にレドーム**を覆う水膜による送信電波の減衰に起因する誤差がある。

- ② 観測ビーム高度に起因する誤差
気象レーダーは上空の降水粒子の分布を観測す

* レーダーの受信電力に比例するレーダー反射因子（ $Z \text{ mm}^6/\text{m}^3$ ）と降水強度（ $R \text{ mm/h}$ ）の関係で、統計的に「 $Z = B \cdot R^\beta$ 」で表される。

** レーダーの空中線を雨や雪、風などから保護するためのドーム。

ること、すなわち地上での降水量を直接に観測するものではないことに起因する誤差である。レーダーサイトから離れるほどビームが通過する高さ（以下、「観測ビーム高度」という）が高くなり、また山地の後方では観測ビーム高度を高くせざるを得ない。レーダー反射因子は通常は上空ほど弱く観測されるので（付録1の付第4図）、観測ビーム高度が高い所ほど、換算した降水強度は誤差が大きい。

③ レーダーサイトからの距離に起因する誤差

「目標体積（付録1の第1.1節を参照）」はレーダーサイトからの距離の二乗に比例して大きくなるが、その内部には降水粒子が様に充滿していると仮定していることや、地形によって送信電波が遮断されることなどのため、遠距離の場所ほど誤差が大きい。

1時間積算降水強度データを変換したレーダー雨量も同様の誤差を含む。これらの誤差はレーダーや観測時刻（対象とする降水タイプ）によって変化する。

そこで、レーダー雨量を補正して最適な雨量解析値とするために、次の3つの条件を満たす雨量係数を算出する。雨量解析値は、レーダー雨量に雨量係数を乗じて求められる。

条件(1) 雨量係数はレーダーごと、観測時刻ごとに決められ、観測ビーム高度の変数とする。

①と②の誤差を補正するため、雨量係数はレーダーごと、観測時刻ごとの変数とする。

また②の誤差を補正するには、観測ビーム高度が高い所ほど雨量係数を大きくする必要があるのである。このため、雨量係数は格子ごとにあらかじめ設定された観測ビーム高度に依存する変数とする。

条件(2) 雨量解析値は隣接する2つのレーダーが共通して探知する範囲で一致すべきである。

ある領域のエコーを隣接する2つのレーダー

が同時に探知した場合、レーダーサイトからの距離による目標体積の大きさの違いや観測ビーム高度の違いにより、双方のレーダー雨量は通常は一致しない。しかし、これらに雨量係数を乗じて推定される雨量解析値は、共通して探知する範囲で平均的に一致すべきである。条件(3) 雨量解析値はアメダス雨量と一致すべきである。

アメダス格子のレーダー雨量に雨量係数を乗じて推定される雨量解析値とアメダス雨量は、多数のアメダス格子を対象として平均的に一致すべきである。

なお、③の誤差は、第3.4節の処理ステップにおいて、全国をカバーする領域でレーダーごとの雨量解析値を合成することによって軽減される。

この処理ステップでは、レーダー探知範囲全体を対象に、雨量係数の「一次近似値」を算出する（陸上にある格子の雨量係数は、第3.3節の処理ステップで「二次近似値」まで高められる）。

まず条件(1)に従って、雨量係数の一次近似値は次の[1]式で表されると仮定し、これを[2]式に示すようにレーダー雨量に乗じて雨量一次解析値に変換する。

$$F1(x, y) = Fa \cdot \{1 + Fx \cdot H(x, y)^2\} \dots\dots [1]$$

$$E1(x, y) = F1(x, y) \cdot E0(x, y) \\ = Fa \cdot \{1 + Fx \cdot H(x, y)^2\} \cdot E0(x, y) \dots [2]$$

ここで、 (x, y) : レーダー探知範囲内の格子の位置

$F1(x, y)$: (x, y) における雨量係数の一次近似値

Fa : 係数（レーダーごと時刻ごとの変数で正の値）

Fx : 観測ビーム高度が高くなる

につれて雨量係数が大きくなる比率（レーダーごと時刻ごとの変数で正の値または0）

$H(x, y)$: (x, y) における観測ビーム高度 (100m 単位で既知)

$E1(x, y)$: (x, y) における雨量一次解析値

$E0(x, y)$: (x, y) におけるレーダー雨量

[1] 式の観測ビーム高度に付した二乗は、目標体積内のレーダー反射因子が観測ビーム高度によって非線形に変化する（付録1の付第4図）ことから、経験的な降水強度の鉛直プロファイルをもっと良く表現する累乗値として設定した。

Fx と観測ビーム高度及び Fa によってレーダー雨量が順次補正されて雨量一次解析値となる模式を、第4図に示す。以下で、条件(2)に従って Fx と Fa を決定する際に、対象とするレーダーを「対象レーダー」、比較する隣りのレーダーを「隣接レーダー」という。隣接レーダーは第5図に示すようにレーダーごとに最多5か所が指定されている。

Fx は、条件(1)で述べたように、雨量係数が観測ビーム高度によって変化することを考慮したもので、[2] 式の

$$\{1 + Fx \cdot H(x, y)^2\} \cdot E0(x, y)$$

は、「レーダー雨量に含まれる観測ビーム高度に起因する誤差を補正した値」である。 Fx は条件(2)に従って、隣接する2つのレーダーが共通して探知する範囲で、「レーダー雨量に含まれる観測ビーム高度に起因する誤差を補正した値」の比が平均的に一定となるように決定する（第4図(1)）

Fa は、「レーダー雨量に含まれる観測ビーム高度に起因する誤差を補正した値」をさらに補正

して、雨量一次解析値とする役割を持つ。 Fa は条件(2)に従って、隣接する2つのレーダーが共通して探知する範囲で双方の雨量一次解析値が平均的に一致するように、また条件(3)に従って、雨量一次解析値がアメダス雨量と最も良く一致するように決定する（第4図(2)）。

雨量一次解析値を算出する流れを第6図に示し、以下で詳しく述べる。

3.2.1 Fa と Fx の初期推定

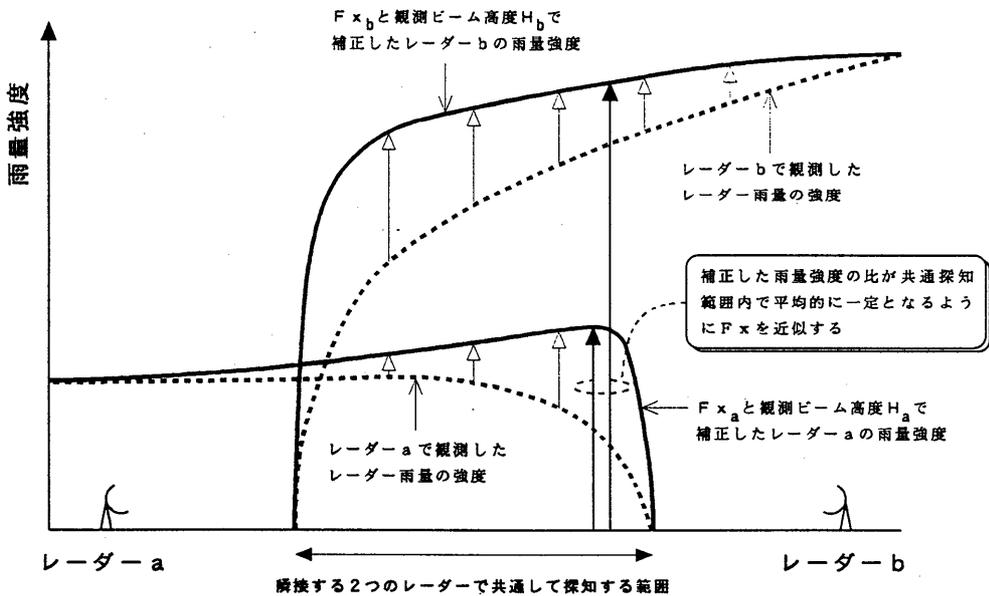
過去の雨量解析処理で算出された Fa と Fx は、前6時間分の値（6個。以下、「短期履歴データ」という）と、降水があったときの240時間分の値（240個。以下、「長期履歴データ」という）として、レーダーごとに保存されている。その種類は次のとおりである。

- ① Fx の短期履歴データ（以下、式による説明では「 Sx 」とする）
- ② Fx の長期履歴データ（同じく「 Lx 」とする）
- ③ Fa の短期履歴データ（同じく「 Sa 」とする）
- ④ Fa の長期履歴データ（同じく「 La 」とする）
- ⑤ 「アメダス雨量との比較による Fa 」の短期履歴データ（同じく「 Aa 」とする）

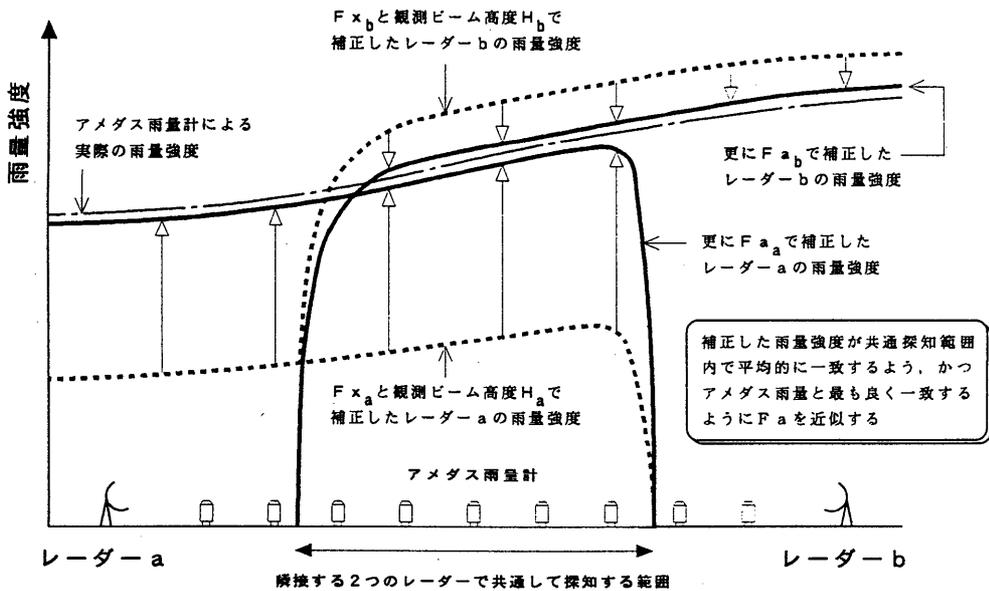
⑤は、アメダス格子の雨量一次解析値とアメダス雨量を比較・平均して得られた Fa の近似値であり、雨量一次解析値を隣接レーダーと比較した結果は入っていない（この算出方法は、第3.2.4項で述べる）。

最初にこれらの履歴データを使用して、 Fa と Fx の初期推定値を求める。 Fa と Fx は処理時刻ごとの変数でもあるため、双方の初期推定値とも短期履歴データを主として算出し、時間的に不安定な値とならないよう長期履歴データで調整する。短期履歴データを主とするのは、短時間のうちに

(1)



(2)



第4図 F_x と観測ビーム高度及び F_a によってレーダー雨量が順次補正される様子を表す概念図

(1) F_x と観測ビーム高度による補正

隣接する2つのレーダーa, bについて、レーダー雨量の強度を F_x と観測ビーム高度で補正した双方の雨量強度の比が、共通して探知する範囲で平均的に一定となるように F_x を近似する。

(2) F_a による補正

さらに F_a で補正した雨量強度が、隣接する2つのレーダーa, bが共通して探知する範囲で平均的に一致するよう、かつアメダス雨量と最も良く一致するよう F_a を近似する。

降水タイプが大きく変化することは少ないと思われるからである。算出方法は次のとおりである。

(1) Fx_e の初期推定値

①の重みを240、②の重みを1とする加重平均で求める。

$$Fx_e = \frac{\sum_{m=1}^6 \{240 \cdot Sx_e(m)\} + \sum_{n=1}^{240} \{1 \cdot Lx_e(n)\}}{240 \cdot 6 + 1 \cdot 240}$$

ここで、 e : あるレーダーを示す符号

①が保存されていないレーダーについては、そのレーダーの②の相加平均に、他の複数のレーダーで算出した「①の相加平均/②の相加平均」を乗

じて求める。

$$Fx_e = \frac{\sum_{n=1}^{240} Lx_e(n)}{240}$$

$$\frac{\sum_{k \neq e} \sum_{m=1}^6 Sx_k(m) / (j1 \cdot 6)}{\sum_{k \neq e} \sum_{n=1}^{240} Lx_k(n) / (j1 \cdot 240)}$$

ここで、 $j1$: ①、②とも保存されているレーダーの個数

①、②とも保存されていないレーダーについては、他の複数のレーダーで算出した②の相加平均を採用する。

隣接	札幌	釧路	函館	仙台	秋田	東京	富士山	新潟	福井	名古屋	大阪	松江	広島	室戸岬	福岡	種子島	名瀬	沖縄	石垣島	
対象	札幌	2	○	○																
	釧路	2	○	○																
	函館	3	○	○		○														
	仙台	4				○	○	○												
	秋田	3			○	○	○	○												
	東京	4				○	○	○		○										
	富士山	4				○	○	○		○				○						
	新潟	4			○	○	○	○		○										
	福井	4						○		○	○	○								
	名古屋	5				○	○	○		○	○			○						
	大阪	4								○	○			○	○					
	松江	3								○				○		○				
	広島	4									○	○		○	○					
	室戸岬	5					○			○	○			○		○				
	福岡	3									○	○				○				
	種子島	3													○	○				
	名瀬	2														○				
	沖縄	2															○			
	石垣島	1																○		
計	62																			

第5図 雨量係数の一次近似値を求めるための対象レーダーと隣接レーダーの対応

左欄の対象レーダーに指定された隣接レーダーを○印で表す。左欄の数字は、隣接レーダーの個数を表す。

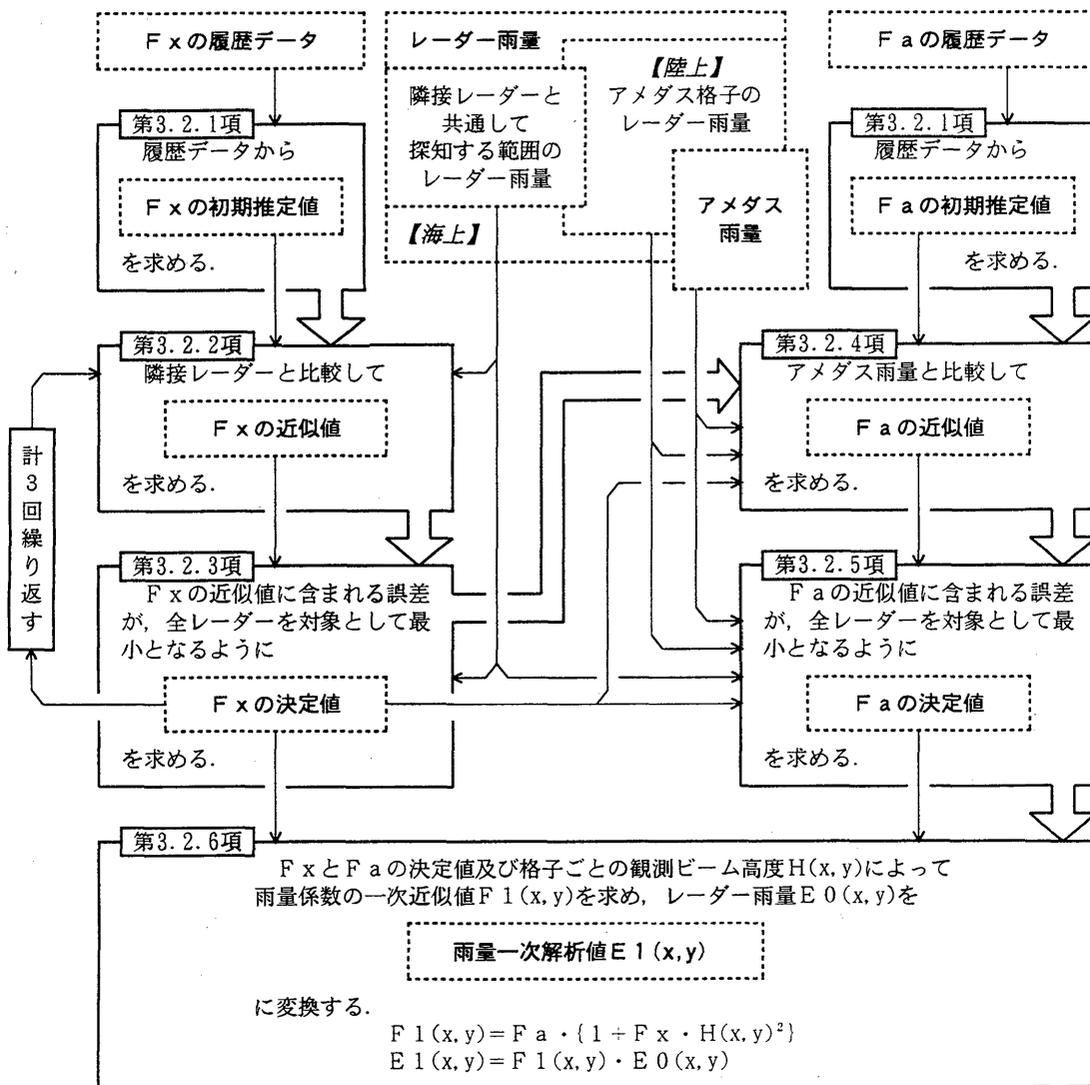
この対応は両方向に付けられている。例えば対象レーダー a の隣接レーダーに b が含まれていれば、 b を対象レーダーとしたときの隣接レーダーには必ず a が含まれる。

$$F x_e = \frac{\sum_{k \neq e} \sum_{n=1}^{240} L x_k(n)}{j2 \cdot 240}$$

ここで、 $j2$: ②が保存されているレーダーの個数

(2) $F a$ の初期推定値

③の重みを240, ④の重みを1とする加重平均に, すべてのレーダーで算出した「⑤の相加平均 / ③の相加平均」を乗じて求める (「⑤の相加平均 / ③の相加平均」を乗じる理由は, 第3.2.4項で述べる).



第6図 雨量一次解析値を算出する流れ

太実線の囲みは処理内容 (左上枠内は本文で解説する項の番号), 太い矢印は処理の流れを表す。また、太点線の囲みは主なデータ, 細い矢印はデータの流れを表す。

$$Fa_e = \frac{\sum_{m=1}^6 \{240 \cdot Sa_e(m)\} + \sum_{n=1}^{240} \{1 \cdot La_e(n)\}}{240 \cdot 6 + 1 \cdot 240}$$

$$\cdot \frac{\sum_{k=1}^{j3} \sum_{m=1}^6 Aa_k(m) / (j3 \cdot 6)}{\sum_{k=1}^{j3} \sum_{m=1}^6 Sa_k(m) / (j3 \cdot 6)}$$

ここで、 $j3$: ③, ⑤とも保存されているレーダーの個数 (レーダー e も含む)

③が保存されていないレーダーについては、そのレーダーの④の相加平均に、他の複数のレーダーで算出した「⑤の相加平均/③の相加平均」を乗じて求める。

$$Fa_e = \frac{\sum_{n=1}^{240} La_e(n)}{240}$$

$$\cdot \frac{\sum_{k \neq e} \sum_{m=1}^6 Aa_k(m) / (j4 \cdot 6)}{\sum_{k \neq e} \sum_{m=1}^6 Sa_k(m) / (j4 \cdot 6)}$$

ここで、 $j4$: ③, ⑤とも保存されているレーダーの個数

③, ④とも保存されていないレーダーについては、他の複数のレーダーで算出した「⑤の相加平均/③の相加平均」を採用する。

$$Fa_e = \frac{\sum_{k \neq e} \sum_{m=1}^6 Aa_k(m) / (j4 \cdot 6)}{\sum_{k \neq e} \sum_{m=1}^6 Sa_k(m) / (j4 \cdot 6)}$$

なお、短期履歴データ①と③の重みを長期履歴データ②と④の240倍としていることから、短期履歴データの1時間分の値には、長期履歴データ240時間分の相加平均と同じ重みを与えていることになる。

3.2.2 隣接レーダーとの比較による Fx の近似

隣接する2つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域において、双方のレーダー雨量と観測ビーム高度の関係を比較して、 Fx の近似値を求める。

条件(2)に従うと、この小領域では双方の雨量一次解析値は平均的に一致すべきことから、[2]式に双方の Fa と Fx の初期推定値、及び小領域内のレーダー雨量と観測ビーム高度 (双方とも面積平均) を代入すると、隣接する2つのレーダーによる雨量一次解析値の関係は、次のように表される。

$$E1(k) = Fa_a \cdot \{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)$$

$$= Fa_b \cdot \{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)$$

ここで、 a, b : 対象レーダー a と隣接レーダー b を示す符号

k : 隣接する2つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域 (10×10格子の領域としている)

$E1(k)$: k における雨量一次解析値の面積平均 (双方のレーダーで一致)

Fa : Fa の初期推定値 (第3.2.1項の処理ステップによる)

Fx : Fx の初期推定値 (同上)

$H(k)$: k における観測ビーム高度の面積平均 (100m単位)

$E0(k)$: k におけるレーダー雨量の面積平均

この式から、小領域における2レーダー間の Fa 比は、次の式で与えられる。

$$\frac{Fa_b}{Fa_a} = \frac{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)}{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)} \quad \dots [3]$$

F_a はレーダーごと、処理時刻ごとの変数であるが、その時刻に限れば [3] 式左辺の F_a 比は場所によらず一定である。したがって、同時にエコーを探知した多数の小領域について [3] 式右辺の分散を求めると、理想的には 0 となるべきである。

そこで、[3] 式右辺の分散が最小となるように最小二乗法で F_x を推定する。ただし、このままでは左辺の値を小さくすることでも分散を小さくすることができるので、相加平均の二乗で正規化する。[3] 式の右辺を $U(k)$ と表すと、最適な F_x (求める近似値) は、次の J_{x1} を最小としないなければならない。

$J_{x1} = U(k)$ の分散 / $U(k)$ の相加平均の二乗

$$= m \cdot \frac{\sum_{k=1}^m U(k)^2}{\{\sum_{k=1}^m U(k)\}^2} - 1 \dots\dots\dots [4]$$

ここで、 m : 隣接する 2 つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域の個数

$$U(k) = \frac{\{1 + F_{x_a} \cdot H_a(k)^2\} \cdot E_{0_a}(k)}{\{1 + F_{x_b} \cdot H_b(k)^2\} \cdot E_{0_b}(k)}$$

[4] 式の $U(k)$ には双方のレーダーの F_x を含んでおり、近似値を同時に求めることはできない。そこで、求める近似値の候補を fx と表すと、隣接レーダーの $fx (fx_b)$ に対して F_x の初期推定値 (F_{x_b}) を微小量 ϵ で加減した 3 つの値、すなわち

- ① $fx_b = F_{x_b} - \epsilon$
- ② $fx_b = F_{x_b}$
- ③ $fx_b = F_{x_b} + \epsilon$

を与え、次の J_{x1}' を最小とする対象レーダーの $fx (fx_a)$ を 3 通り求める。

$$J_{x1}' = m \cdot \frac{\sum_{k=1}^m U'(k)^2}{\{\sum_{k=1}^m U'(k)\}^2} - 1 \dots\dots\dots [4']$$

$$\text{ここで、} U'(k) = \frac{\{1 + fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E_{0_a}(k)}{\{1 + fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E_{0_b}(k)}$$

[4'] 式の J_{x1}' を最小にする fx_a (近似値) を求めるため、 J_{x1}' の fx_a による微分を 0 とおくと、次の式を得る。

$$fx_a = \frac{\sum_{k=1}^m (E^2/B^2) \cdot \sum_{k=1}^m (A/B)}{\sum_{k=1}^m (A^2/B^2) \cdot \sum_{k=1}^m (E/B)} - \frac{\sum_{k=1}^m (E \cdot A/B^2) \cdot \sum_{k=1}^m (E/B)}{\sum_{k=1}^m (E \cdot A/B^2) \cdot \sum_{k=1}^m (A/B)} \dots\dots\dots [5]$$

ここで、 $E = E_{0_a}(k)$

$$A = H_a(k)^2 \cdot E_{0_a}(k)$$

$$B = \{1 + fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E_{0_b}(k)$$

[5] 式に双方の観測ビーム高度とレーダー雨量、及び F_{x_b} の初期推定値を代入して、3 つの fx_a を求める。 fx_a を [4'] 式に代入して 3 つの残差を求め、最も小さい残差を与えた fx_a と fx_b の組の値を、 F_x の近似値とする。

また、3 つの fx_a とこれに対応する fx_b (前記の①~③) の 3 組のうち、最も小さい残差と 2 番目に小さい残差を与えた 2 組を選んで、隣接する 2 つのレーダーの F_x の近似値を持つ線形関係式を求める。

$$fx_a = A_{ab} \cdot fx_b + B_{ab} \dots\dots\dots [6]$$

ここで、 fx_a : F_{x_a} の近似値 (最も小さい残差を与えた fx_a)

fx_b : Fx_a の近似値に対応する fx_b

A_{ab}, B_{ab} : 線形関係式の係数

Fx の近似値と線形関係式を求める概念を、第7図に示す。線形関係式の係数および近似値 fx_a と fx_b は、次の処理ステップで使用される。

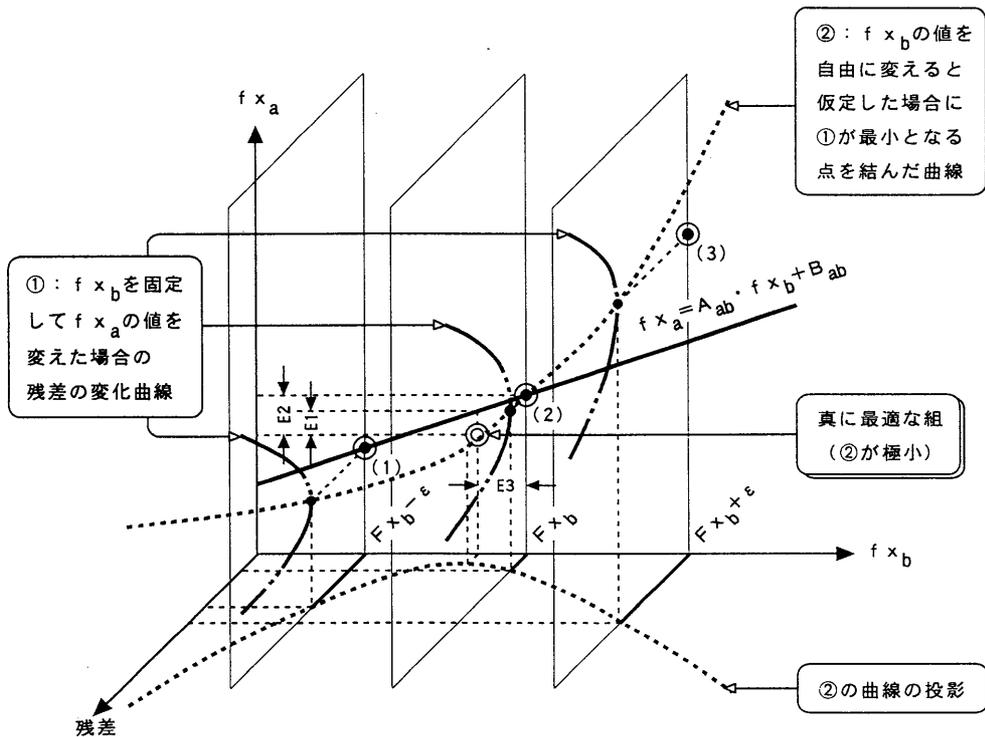
3.2.3 全レーダーを対象とした誤差調整による Fx の決定

前項の処理ステップで求められた Fx の近似値は、隣接レーダーの $Fx (Fx_b)$ に初期推定値そのままの値または微小量 ϵ を加減した値を与えて近似したもので、誤差を含んでいる。したがって、

対象レーダーとしての Fx の近似値 (Fx_a) と、対象・隣接の関係を入れ替えた場合の隣接レーダーとしての Fx の近似値 (Fx_b) は、通常は一致しない。

そこで、レーダーごとの Fx の近似値が持つ誤差を式で表し、稼働しているすべてのレーダーで加算した値が最小となるように最小二乗法で調整して、最も確からしい Fx の値を決定する。

第5図に示したように、隣接レーダーはレーダーごとに最多5か所が指定されている。19か所すべてのレーダーが稼働しているときは、[6] 式の線



第7図 Fx の近似値と線形関係式を求める概念図

3つの (fx_a, fx_b) の組(1)~(3)のうち、最も小さい残差を与えた組の値を Fx の近似値とする。この例では(2)の組になる。また、(1)の組の残差が2番目に小さいとすると、隣接する2つのレーダーの Fx の近似値を持つ線形関係式(本文中[6]式)は、図中の太実線で表される。

真に最適な Fx の組 (fx_b の値を自由に変えると仮定した場合に太実線で表す残差が極小となる組) が◎印で示す位置にあるとすると、2レーダー間の Fx の線形関係式が持つ誤差は「 $E1$ 」、対象レーダー a と隣接レーダー b のそれぞれの Fx の近似値が持つ誤差は「 $E2$ 」と「 $E3$ 」で表される。

形関係式及び Fx_a と Fx_b の近似値が, 対象レーダーと隣接レーダーの関係を入れ替えた場合を含めて最大62組得られる。

最適な Fx (求める決定値) を fx と表す。対象レーダーの fx_a と隣接レーダーの fx_b は, 誤差を表す次の $Jx2$ を最小にする値として求められる。

$$Jx2 = \alpha_{ab} \cdot \{fx_a - (A_{ab} \cdot fx_b + B_{ab})\}^2 + \gamma_{ab} \cdot (fx_a - C_{ab})^2 + \delta_{ab} \cdot (fx_b - D_{ab})^2 \dots\dots\dots [7]$$

ここで, a, b : 対象レーダー a と隣接レーダー b を示す符号

fx : 最適な Fx (求める決定値)

A_{ab}, B_{ab} : 双方の Fx の近似値が持つ線形関係式の係数 (第3.2.2項の処理ステップによる)

C_{ab} : Fx_a の近似値 (同上)

D_{ab} : Fx_a の近似値に対応する Fx_b (同上)

$\alpha_{ab}, \gamma_{ab}, \delta_{ab}$: 各項の重み

[7] 式の第1項は [6] 式で表される2レーダー間の Fx の線形関係式が持つ誤差 (第7図に示した $E1$)、第2項と第3項は対象レーダー a と隣接レーダー b のそれぞれの Fx が持つ誤差 (第7図に示した $E2$ と $E3$) を表す。各項は, 稼働しているすべてのレーダーで加算をとることから, 正の値と負の値で打ち消さないよう, 二乗している。また, 双方の Fx の近似値が持つ線形関係式と値の項にそれぞれの重みを付けている (重みの値については, 付録3を参照されたい)。

[7] 式に, 線形関係式の係数と双方の Fx の近似値及び重みを代入して, 稼働しているすべてのレーダーで加算する。

$$Jx2' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} [\alpha_{ab} \cdot \{fx_a - (A_{ab} \cdot fx_b + B_{ab})\}^2 + \gamma_{ab} \cdot (fx_a - C_{ab})^2 + \delta_{ab} \cdot (fx_b - D_{ab})^2] \dots\dots\dots [7']$$

ここで, n : 稼働しているレーダーの個数
 e 番目のレーダーの最適な Fx (求める決定値) を fx_e とし, [7'] 式の fx_e による微分を0とおくと, 次の式を得る。

$$\sum_{b \neq e} \{(\alpha_{eb} + \gamma_{eb}) \cdot fx_e - \alpha_{eb} \cdot A_{eb} \cdot fx_b\} + \sum_{b \neq e} \{-\alpha_{be} \cdot A_{be} \cdot fx_e + (\alpha_{be} \cdot A_{be}^2 + \delta_{be}) \cdot fx_b\} = \sum_{b \neq e} (\alpha_{eb} \cdot B_{eb} + \gamma_{eb} \cdot C_{eb}) + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{be} \cdot A_{be} \cdot B_{be} + \delta_{be} \cdot D_{be})$$

稼働しているすべてのレーダー (個数 n) について, 左辺の fx_e と fx_b の係数を行列 A , 右辺をベクトル B に取り込み, n 元連立一次方程式 $AX = B$ を解く。得られた解が, レーダーごとの fx , すなわち Fx の決定値である。

ただし, [4'] 式の $Jx1'$ と [7'] 式の $Jx2'$ は, 最初に与えた隣接レーダーの Fx (Fx_b) の値によって変化する。このため, ここで得られた fx を [4'] 式の Fx の新たな入力値として, 第3.2.2項と第3.2.3項の処理ステップを計3回繰り返す。

以上で, レーダーごとの Fx が決定される。

3.2.4 アメダス雨量との比較による Fa の近似条件(3)に従って, アメダス雨量を使用して Fa の近似値を求める。

まず [2] 式に, Fa の初期推定値と Fx の決定値, 及びアメダス格子の観測ビーム高度とレーダー雨量を代入して, アメダス格子における雨量一次解析値 (ただし, 解析途上の仮の値) を算出する。

$$E1(i) = Fa \cdot \{1 + Fx \cdot H(i)^2\} \cdot E0(i)$$

ここで, i : レーダー探知範囲内のアメダス格子

$E1(i)$: i における雨量一次解析値

$E0(i)$: i におけるレーダー雨量

Fa : Fa の初期推定値(第3.2.1項の処理ステップによる)

Fx : Fx の決定値(第3.2.3項の処理ステップによる)

$H(i)$: i における観測ビーム高度

アメダス格子での雨量一次解析値をアメダス雨量と比較して、 Fa の初期推定値を補正するための係数(以下、「一次補正係数」という)を求め

$$C1(i) = R(i) / E1(i)$$

ここで、 $C1(i)$: i における一次補正係数

$R(i)$: i におけるアメダス雨量

レーダー探知範囲内にある多数のアメダス格子の一次補正係数を次の式によって加重平均し、レーダー探知範囲全体の一次補正係数の平均を求め

$$\overline{C1} = \frac{\sum_{i=1}^j \{W_3(i) \cdot C1(i)\}}{\sum_{i=1}^j W_3(i)} \dots\dots\dots [8]$$

ここで、 $\overline{C1}$: 一次補正係数の平均

j : レーダー探知範囲内にあるアメダス格子の個数

$W_3(i)$: i における一次補正係数の重み

[8]式の重み $W_3(i)$ は、アメダス格子の観測ビーム高度によって、次のとおり与える。

- ① 3000m未達は、 $W_3(i)$ を1.0とする
- ② 3000m以上4000m未達は、 $W_3(i)$ を0.25とする
- ③ 4000m以上は、 $W_3(i)$ を0.125とする

この重みは、低い高度で観測した目標体積内の降水粒子の分布(レーダー反射因子に影響する)

ほど地表付近の状態に近く、高度が高くなるにつれて地表付近と大きく異なることを考慮している(付録1の付第4図)。

求める Fa の近似値を fa と表すと、次の式で与えられる。

$$fa = \overline{C1} \cdot Fa$$

なお、この近似値は、「アメダス雨量との比較による Fa 」として短期履歴データに取り込み、次の時刻の雨量解析処理で Fa の初期推定値を算出する際に使用する。その理由は次のとおりである。

Fx の決定値は最小二乗法による値であり、多少の誤差を含んでいる。次の第3.2.5項の処理ステップで得られる Fa の決定値には、アメダス雨量との比較の他に、隣接レーダーとの比較も含めて、その誤差を補正しようとした結果が反映される。 Fa の決定値は、その時刻では最適な値であるが、これを蓄積して次の時刻で Fa の初期推定値の算出に使用すると、過去の Fx に混入していた誤差がそのまま Fa の初期推定値に取り込まれることになる。そこで、第3.2.1項で示したように、 Fa の初期推定値は、「アメダス雨量との比較による Fa 」と Fa の決定値の比によって調整している。

3.2.5 全レーダーを対象とした誤差調整による Fa の決定

Fx の場合と同様に、レーダーごとの Fa の近似値が持つ誤差を式で表し、稼働しているすべてのレーダーで加算した値が最小となるように最小二乗法で調整して、最も確からしい Fa の値を決定する。ここでは、「雨量解析値は隣接する2つのレーダーが共通して探知する範囲で一致すべき」という条件(2)と、「雨量解析値はアメダス雨量と一致すべき」という条件(3)を、同時に満たすよう

にする。

まず条件(2)に従って、同時にエコーを探知した小領域で双方の雨量一次解析値（ただし、解析途上の仮の値）を比較する。

この条件から、小領域における2レーダー間のFa比は、[3]式の分子・分母を入れ替えて自然対数をとると、次の式で表される。対数で表すのは、稼働しているすべてのレーダーの関係から最小二乗法でFaを決定する際に、0が解となるのを避けるためである。

$$\ln \left[\frac{Fa_a}{Fa_b} \right] = \ln \left[\frac{\{1+Fx_b \cdot H_b(k)\} \cdot E_{0_b}(k)}{\{1+Fx_a \cdot H_a(k)\} \cdot E_{0_a}(k)} \right] \dots\dots\dots [3']$$

[3']式を同時にエコーを探知した多数の小領域に適用して平均し、2レーダー間の平均的なFa比（β0_{ab}'とする）を求めておく。

稼働しているすべてのレーダーを対象にすると、最適なFa（求める決定値、faと表す）は、誤差の加算を表す次の2つの式を同時に最小としなければならない（この式を導く詳細については、付録4の第4.1節を参照されたい）。

$$Ja1'' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} \{fa'_a - (fa'_b + \beta 0_{ab}')\}^2 \dots [9]$$

$$Ja1''' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} \{fa'_a - (fa'_b + \beta 1_{ab}')\}^2 \dots [9']$$

ここで、n：稼働しているレーダーの個数

a, b：対象レーダーaと隣接レーダーbを示す符号

fa'：最適なFa（求める決定値、ただし自然対数表示）

β0_{ab}'：処理時刻における2レーダー間の

平均的なFa比（自然対数表示）

β1_{ab}'：1時間前における2レーダー間の

平均的なFa比（自然対数表示）

[9']式は、1時間前における2レーダー間のFa比の関係を表すもので、時間的に安定した結果を得るために使用する。

次に条件(3)に従って、雨量一次解析値（ただし、解析途上の仮の値）とアメダス雨量を比較する。

この条件を稼働しているすべてのレーダーに適用すると、最適なFa（求める決定値、faと表す）は、誤差の加算を表す次の式を最小としなければならない（この式を導く詳細については、付録4の第4.2節を参照されたい）。

$$Ja2'' = \sum_{a=1}^n (fa'_a - Fa_a')^2 \dots\dots\dots [10]$$

ここで、fa_a'：最適なFa（求める決定値、ただし自然対数表示）

Fa_a'：アメダス雨量との比較によるFa（第3.2.4項の処理ステップによる、ただし自然対数表示）

雨量一次解析値を隣接レーダーと比較した[9]式と[9']式、及びアメダス雨量と比較した[10]式を加え、稼働しているすべてのレーダーを対象とした最小二乗法によって、レーダーごとの最適なFa（決定値）を求める。与える式Ja3は次のとおりである。

$$Ja3 = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} [\alpha_{ab} \cdot \{fa'_a - (fa'_b + \beta 0_{ab}')\}^2] + \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} [\alpha_{ab} \cdot \delta_{ab} \cdot \{fa'_a - (fa'_b + \beta 1_{ab}')\}^2] + \sum_{a=1}^n \{\gamma_a \cdot (fa'_a - Fa_a')^2\} \dots\dots [11]$$

ここで、α_{ab}, δ_{ab}, γ_a：各項の重み

[11] 式の各項の重みは、次のとおり与える。

$$\alpha_{ab} = 5.0$$

$$\delta_{ab} = 1.0$$

$$\gamma_a = 2.0 \text{ (第3.2.4項において, アメダス雨量との比較によって } Fa_a \text{ が補正されているとき)}$$

または $= 0.5$ (補正されていないとき)

e 番目のレーダーの最適な Fa (求める決定値) を fa_e とし, [11] 式の fa_e による微分を 0 とおくと, 次の式を得る。

$$\begin{aligned} & \sum_{b \neq e} (\alpha_{eb} \cdot fa_e') + \sum_{b \neq e} (\alpha_{eb} \cdot \delta_{eb} \cdot fa_e') \\ & + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{eb} \cdot fa_b') + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{eb} \cdot \delta_{eb} \cdot fa_b') \\ & + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{be} \cdot fa_b') + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{be} \cdot \delta_{be} \cdot fa_b') \\ & + \sum_{b \neq e} (\alpha_{be} \cdot fa_e') + \sum_{b \neq e} (\alpha_{be} \cdot \delta_{be} \cdot fa_e') \\ & + \gamma_e \cdot fa_e' \\ & = \sum_{b \neq e} (\alpha_{eb} \cdot \beta 0_{eb}') + \sum_{b \neq e} (\alpha_{eb} \cdot \delta_{eb} \cdot \beta 1_{eb}') \\ & + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{be} \cdot \beta 0_{be}') + \sum_{b \neq e} (-\alpha_{be} \cdot \delta_{be} \cdot \beta 1_{be}') \\ & + \gamma_e \cdot Fa_e' \end{aligned}$$

稼働しているすべてのレーダー (個数 n) について, 左辺の fa_e と fa_b の係数を行列 A , 右辺をベクトル B に取り込み, n 元連立一次方程式 $AX = B$ を解く。得られた解が, レーダーごとの fa , すなわち Fa の決定値である。

3.2.6 雨量一次解析値の算出

以上までの処理ステップで, Fa と Fx の決定値が得られる。[2] 式を次のように表す。

$$E1(x, y) = fa \cdot \{1 + fx \cdot H(x, y)^2\} \cdot E0(x, y) \dots\dots\dots [2']$$

ここで, (x, y) : レーダー探知範囲内の格子の位置

$E1(x, y)$: (x, y) における雨量一次解析値

$E0(x, y)$: (x, y) におけるレーダー雨量

fa : Fa の決定値 (第3.2.5項の処理ステップによる)

fx : Fx の決定値 (第3.2.3項の処理ステップによる)

$H(x, y)$: (x, y) における観測ビーム高度 (100m単位)

[2'] 式に, Fa と Fx の決定値, 及び格子ごとの観測ビーム高度とレーダー雨量を代入して, 雨量一次解析値を算出する。

ただし, 特に強い対流性の降水では, 観測ビーム高度がかなり高くても相当に強いエコーを観測することがあるため, [2'] 式の観測ビーム高度にあらかじめ設定した値を適用すると, 雨量一次解析値が過大に算出されてしまう。そこで, この処理ステップに限り, [2'] 式に適用する観測ビーム高度は, 3000 m 未満はあらかじめ設定した値とするが, それ以上では観測ビーム高度を一律に 3000m としている (ただし, 富士山レーダーのしきい値は 4000m)。なお, 第3.2.5項までの処理ステップでは, Fa と Fx の決定に影響を与えるため, 観測ビーム高度にしきい値は設定していない。

[2'] 式で求められた雨量一次解析値は, 海上にある格子では最終的な雨量解析値となる。なお, 格子の海陸判定には, 250m 四方格子の国土数値情報 (建設省国土地理院, 1984) から 5 km 四方格子に編集した地形データを使用している。

3.3 陸上における雨量の二次解析

陸上にある格子について, 雨量一次解析値をアメダス雨量と比較して補正し, さらに信頼性の高

い雨量二次解析値とする。

まず、アメダス格子の雨量一次解析値とアメダス雨量から、雨量一次解析値（及び雨量係数の一次近似値）を補正してアメダス雨量にさらに近づけるための係数（以下、「二次補正係数」という）を求める。

$$C2(i) = R(i) / E1'(i) \dots\dots\dots [12]$$

ここで、 i : レーダー探知範囲内のアメダス格子

$C2(i)$: i における二次補正係数

$R(i)$: i におけるアメダス雨量

$E1'(i)$: i における雨量一次解析値

この項の処理は、後で述べるように計3回繰り返すが、処理の繰り返しの回数によって、[12]式の $E1'(i)$ に対する値の与え方が変わる。基本的にはアメダス格子の値をそのまま使用すが、2回目と3回目の繰り返しで[12]式による二次補正係数が1.0に比べて極端に大きい小さい場合は、アメダス格子に隣接する8つの格子の値も加味して与えている（詳細については、付録5の第5.1節を参照されたい）。

次に、陸上にあるすべての格子について、[12]式で得られた近傍のアメダス格子での二次補正係数を加重平均によって内挿し、格子ごとの二次補正係数を求める。近傍のアメダス格子は、各格子から半径70km以内にある最大10格子が指定されている。

各格子への内挿は、次の式で行う。アメダス格子の二次補正係数を自然対数で表すのは、[12]式でアメダス雨量が0mmであっても、各格子への内挿に関与させるためである。

$$C2(x, y) = \exp \left[\sum_{i=1}^j \{ W_5(i) \cdot \ln(C2(i)) \} \right] / \sum_{i=1}^j W_5(i) \dots\dots\dots [13]$$

ここで、 j : 指定された近傍のアメダス格子の個数（最大10）

(x, y) : レーダー探知範囲内の格子の位置

$C2(x, y)$: (x, y) における二次補正係数

i : レーダー探知範囲内のアメダス格子

$C2(i)$: i における二次補正係数

$W_5(i)$: i における二次補正係数の重み

[13]式の重み $W_5(i)$ は、2つの重みの積で与えられる。

$$W_5(i) = W_6(i) \cdot W_7(i) \dots\dots\dots [14]$$

$$W_6(i) = \exp \left[-\frac{d(i)^2}{D^2} \right]$$

$$W_7(i) = 1 + \frac{P_1 \cdot P_2(i)}{1 + \left[Q \cdot \frac{E0(x, y) - E0(i)}{E0(i)} \right]^2}$$

ここで、 $d(i)$: (x, y) から i までの距離 (km)

D : 距離に関する係数。処理の繰り返しの回数で変わる（40km <1回目>, 30km <2回目>, 20km <3回目>）

P_1 : レーダー雨量の比に関する係数。処理の繰り返しの回数で変わる（40 <1回目>, 30 <2回目>, 10 <3回目>）

$P_2(i)$: (x, y) から i までの距離が0kmで1.0, 70kmで0.0となる関数

Q : レーダー雨量の比に関する係数。処理の繰り返しの回数で変わる（2 <1回目>, 4 <2回目>, 8 <3回目>）

$E0(x, y)$: (x, y) におけるレーダー雨量

$E0(i)$: i におけるレーダー雨量

[14] 式の $W_6(i)$ は、内挿による二次補正係数算出の対象とする格子（以下、「対象格子」という）からアメダス格子までの距離によって変わり、対象格子に近いアメダス格子ほど大きな重みを持たせるようにしてある。この重みを、以下で「距離重み」という。

また、[14] 式の $W_7(i)$ は、対象格子とアメダス格子でのレーダー雨量の比によって変わり、対象格子のレーダー雨量に近い値を観測したアメダス格子ほど大きな重みを持たせるようにしてある。この重みを、以下で「レーダー雨量比重み」という。

近傍のアメダス格子の二次補正係数を2つの重みによって内挿し、対象格子ごとの二次補正係数を算出する概念を、第8図に示す。

2つの重みの大きさは、レーダー雨量比重みの方が大きい。すなわち、対象格子の二次補正係数は、距離が近いアメダス格子の係数より、同程度のレーダー雨量を観測したアメダス格子の係数に近くなる（この重みを付ける理由と役割については、付録6を参照されたい）。

続いて、[13] 式と [14] 式によって算出された各格子の二次補正係数を用いて、雨量係数の二次近似値と雨量二次解析値を算出する。

$$F2(x, y) = C2(x, y) \cdot F1(x, y) \quad \dots\dots [15]$$

$$E2(x, y) = F2(x, y) \cdot E0(x, y) \quad \dots\dots [16]$$

ここで、 $F2(x, y)$: (x, y) における雨量係数の二次近似値

$C2(x, y)$: (x, y) における二次補正係数

$F1(x, y)$: (x, y) における雨量係数の一次近似値

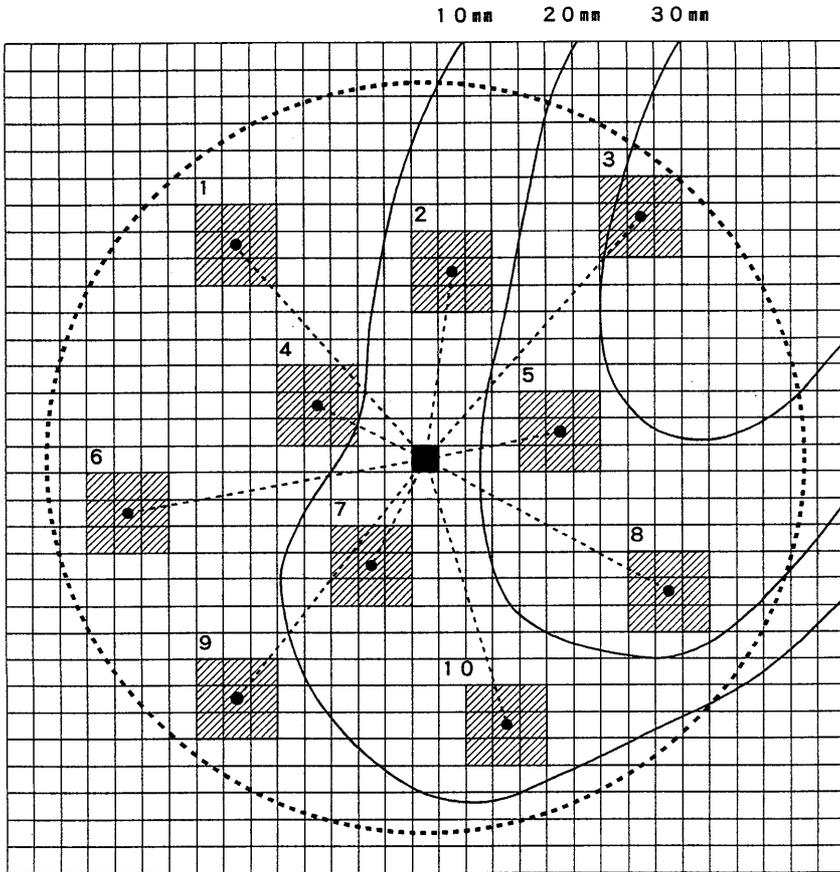
$E2(x, y)$: (x, y) における雨量二次解析値

$E0(x, y)$: (x, y) におけるレーダー雨量

この処理ステップでは、[16] 式で得られた $E2$ を [12] 式の $E1'$ の新たな入力値として、以上までの処理を計3回繰り返す。繰り返しによって、陸上にある格子の雨量係数と雨量解析値は次第に信頼性の高い値となる。繰り返しの回数によって、[12] 式に対する雨量一次解析値の与え方以外にも、処理の仕方が幾つか変わる（詳細については、付録5の第5.2節と第5.3節を参照されたい）。

3回の繰り返しで求められた雨量二次解析値が、陸上にある格子での最終的な雨量解析値となる。

ただし、ひょうを含む激しい対流性の降水では、雨粒のみの場合よりもエコーが強く、しかも観測ビーム高度がかなり高くても相当に強いエコーを観測するため、雨量二次解析値が過大な値になる。そこで、観測ビーム高度が4000mでは雨量二次解析値100mm/h、6000m以上では80mm/h、4000mから6000mの間では高度によって前記の値を比例配分した値をそれぞれ上限として、雨量二次解析値が過大に推定されることを抑止する。第9図に示す等ビーム高度線の合成図で分かるように、全国19か所のすべての気象レーダーが稼働した場合、陸上で観測ビーム高度が4000m以上となる場所は、北海道の宗谷支庁枝幸町付近と、岩手県久慈市付近のみである。その他の場所で上記の抑止条件がはたらくのは、あるレーダーが運用を休止しており、その他のどのレーダーからも観測ビーム高度4000m以上で探知せざるを得ない場合に限られる。



第8図 アメダス格子の二次補正係数を内挿して対象格子の二次補正係数を算出する概念図

多数の格子は5 km 四方のレーダー格子，中央の黒い四角は二次補正係数を算出する対象格子，黒丸は対象格子から半径70 km（点線の円）以内のアメダス格子，斜線部はアメダス雨量と比較する雨量解析値を与える範囲，中央の対象格子から各アメダス格子までを結ぶ点線は2格子間の距離，実線の曲線は10 mm/hから30 mm/hまでのレーダー雨量の等値線を表す。

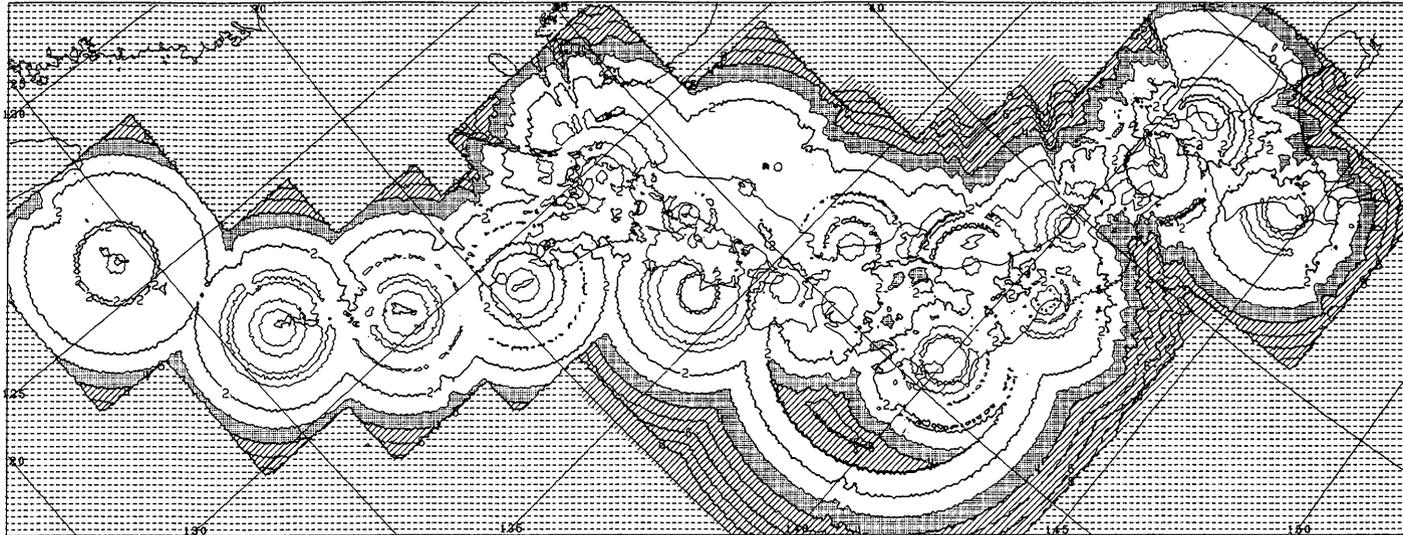
距離重みは対象格子からアメダス格子までの距離に依存するので，対象格子に近い4，5，7のアメダス格子の二次補正係数に付けられる重みが大い。

レーダー雨量比重みは対象格子とアメダス格子のレーダー雨量の比に依存するので，対象格子のレーダー雨量とほぼ同じ2，7，10のアメダス格子の二次補正係数に付けられる重みが大い。

3.4 合成によるレーダー・アメダス解析雨量の決定

これまでの処理ステップで，レーダーごとの最終的な雨量解析値（海上格子の雨量一次解析値，陸上格子の雨量二次解析値）が得られる。

第3.2節にまとめたように，レーダーサイトから遠い所の雨量解析値ほど，送信電波が距離による目標体積の広がりや地形による遮へい，伝搬経路の雨域による減衰などの影響を受けるため，大きな誤差を含んでいる。この誤差を軽減するため，



第9図 すべての気象レーダーが稼働したときの等ビーム高度線の合成図（1995年9月現在）

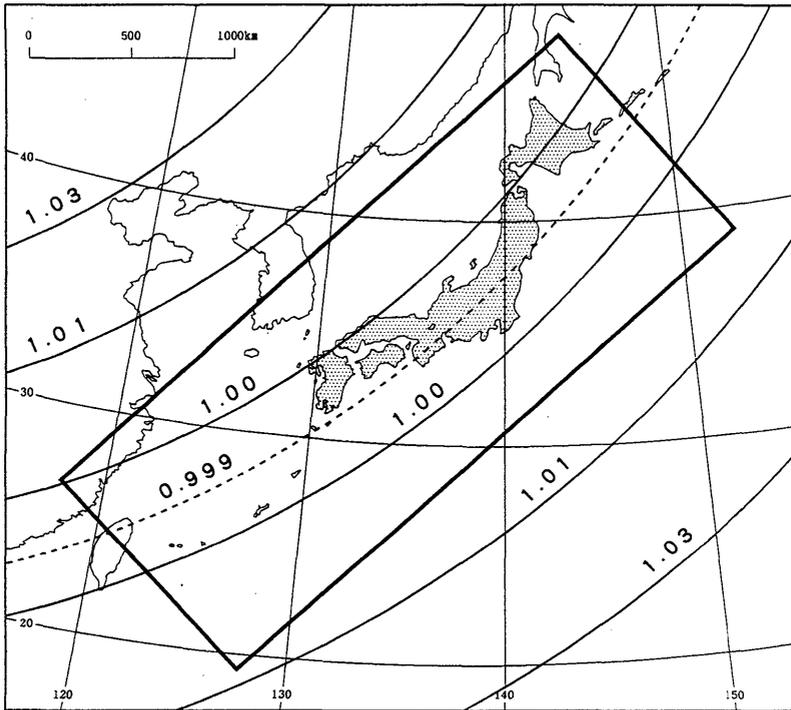
等ビーム高度線は1000m から8000m までを1000m ごとに表す（数字は1000m 単位）。ハッチ域は3000m 以上4000m 未満，斜線域は4000m 以上，横線域はレーダー探知範囲外を示す。

レーダーごとの観測格子で得られた雨量解析値を、全国をカバーする領域（以下、「合成領域」という）の格子に座標変換して合成し、解析雨量として決定する。

3.4.1 座標変換の特徴

解析雨量を含む降水短時間予報業務の基本プログラムを合成する領域の座標系には、日本列島に沿う基準線を持ち、方位と距離のひずみが少ない斜軸ランベルト図法を採用している（牧原, 1990）。合成領域と距離のひずみ率を、第10図に示す。合成領域の陸上での距離ひずみ率は、0.999から1.003程度（宗谷岬付近）に抑えられている。このため、陸上にある格子のサイズは、一辺5kmに対して最大でも15m程度の距離誤差を持つにすぎない。

各レーダー探知範囲の観測格子は、第1表に示したように東西方向と南北方向に並んだ配列である。一方、合成領域は緯経度線に対して45°近く傾いている。このため、あるレーダーの元データを座標変換して一番近い合成領域の格子に割り当てると、複数の値が割り当てられる格子と値が割り当てられない格子が20%ほども生じてしまう。このため、位置の誤差がなるべく小さくなるようにしながら、かつ重なりや抜けがない1対1の対応をするように割り当てる。この方法には、割り当てによって元データの極大値や極小値が消去されることがないこと、ある程度広い範囲で値の頻度分布をとれば元データの分布とほとんど同じになることなどの長所がある。一方で、割り当てられた位置と元の位置が必ずしも重ならず、最大で



第10図 合成する範囲と距離のひずみ率

日本列島に沿う長方形が合成する範囲を表す。1.00等の数値を付した円弧は距離のひずみ率の等値線で、距離のひずみ率は「地図上の距離×縮尺／実際の距離」で表される。

1 格子ほどの位置ずれを生じる場所がある。

なお、各地方（札幌、仙台、東京、大阪、福岡の各管区气象台と沖縄气象台）に向けて配信する解析雨量は、斜軸ランベルト座標による値を利用しやすいように緯経度座標の格子（緯度方向3.00'×経度方向3.75'）に変換している。緯経度座標の格子サイズは、第2表に示すように緯度によって異なるが、斜軸ランベルト座標の格子サイズ（5 km 四方）よりやや大きい。このため、緯経度座標に変換する際に、複数の斜軸ランベルト座標の格子に重なってしまう所では、大きい方の値を緯経度座標の格子に採用する。この座標変換の際にも位置ずれを生じる場所がある。

2度の座標変換によってレーダーごとの観測格子と緯経度座標の格子に生じる位置ずれは、最大でも1格子である。

第2表 緯経度座標の1格子（緯度方向3.00'×経度方向3.75'）の緯度別サイズ

北緯	緯度方向	経度方向
25°	5.56km	6.30km
30°	5.56	6.02
35°	5.56	5.69
40°	5.56	5.32
45°	5.56	4.91

3.4.2 合成の方法

合成の処理では、合成領域の1格子に1レーダーによる雨量解析値のみが対応する場合は、それを合成領域の格子に割り当てて解析雨量とするが、合成領域の1格子に複数レーダーによる雨量解析値が対応する場合は、1時間積算降水強度の最大値を与えたレーダーによる雨量解析値を合成領域の格子に割り当てるという「最大値法」を採用している。

合成領域の格子ごとの解析雨量は、次の処理で決定する。

(1) 合成用テーブルの作成

オンライン処理とは別に、レーダーごとの観

測格子で得られた雨量解析値を合成領域の格子に割り当てて解析雨量とするときに、合成領域の各格子にはどのレーダーのどの観測格子が対応するかを指定した格子対応テーブルを、あらかじめ作成しておく。また、格子対応テーブルによって合成領域の1格子に複数のレーダーによる雨量解析値が割り当てられる場合に、どのレーダーによる雨量解析値を優先して採用の対象とするかを第1位から第3位まで指定した優先度テーブルも作成しておく。優先度は、その格子の観測ビーム高度がより低いレーダーほど高くしている。

(2) 最大値法による合成領域への割り当て

オンライン処理では、合成領域の1格子に1レーダーによる雨量解析値のみが対応する場合は、その値を合成領域の格子に割り当てる。合成領域の1格子に複数のレーダーによる雨量解析値が対応する場合は、まず優先度テーブルで指定された複数のレーダーについて、その格子を含む4×4格子（20km 四方、その格子から-1～+2格子の幅）の小領域で、それぞれが観測した1時間積算降水強度の面積平均を算出する。そして、小領域の平均強度を最も大きく観測したレーダーによる対応格子の雨量解析値を、合成領域の格子に割り当てる（小領域で平均強度を比較する理由については、付録7を参照されたい）。

ただし、以下の(3)～(5)で述べるように、最大値法による合成には例外がある。

(3) 陸上の大きい雨量解析値に対する処置（最大値法の例外その1）

気象レーダーのビーム幅を1.5°とすると、ビームの広がりにはレーダーサイトからの距離250kmで6500mに達する。このため、最大値法でレーダーサイトからかなり遠い格子の値が合成に採用されると、降水パターンがぼやけるため細か

い解析雨量の分布が表せなくなったり、観測ビーム高度が高いため解析雨量の精度が落ちるという欠点がある。こうなると、アメダス雨量との対応が悪くなる。

そこで、陸上にある格子について、その格子を含む 4×4 格子の小領域で算出した1時間積算降水強度の面積平均がレベル10（レーダー雨量の 6 mm/h 強に相当）以上である場合は、できるだけ距離誤差が少なく観測ビーム高度も低い条件で推定された信頼性の高い雨量解析値を合成に採用する。具体的には、レーダーサイトからその格子までの距離が他のレーダーと比較して 50 km 以上近く、しかも小領域の1時間積算降水強度の分散が最も大きい場合は、そのレーダーによる雨量解析値を採用する。分散が大きい方を採用するという条件は、レーダーサイトから遠く、電波の減衰やビームの広がりなどによって観測精度が低下している場合に、通常はエコー強度の分散が小さくなることを考慮したものである。

(4) 地形エコーの除去（最大値法の例外その2）

最大値法では、ある小領域について、合成の優先度が最も高いレーダーではエコーを観測していないが、優先度が低いレーダーでエコーが散在（ 4×4 格子の25%以下）している場合、後者による雨量解析値が合成領域に割り当てられる。しかしこの場合は、後者のエコーが地形エコーである可能性が高いので合成には採用せず、前者の雨量解析値（降水無し）を合成領域に割り当てる。レーダーデータの品質管理の処理ステップ（第3.1.1項）で除去できなかった地形エコーは、この操作で除去される。

(5) シークラッターの除去（最大値法の例外その3）

シークラッター（海面の波やしぶきからのエコー）はMTIフィルタによる除去が難しいた

め、レーダーエコーデジタル化装置でレーダー観測仰角を適切に設定することで、データに取り込まないようにしている。しかし、台風や発達した低気圧などの影響で海の波が高いときは、シークラッターを観測して解析雨量に影響を与えることがある。

このため、オンライン処理とは別に、沖合のシークラッターが現れやすい範囲を抽出し、その範囲を探知するレーダーのうちシークラッターが現れやすいレーダーと現れにくいレーダーを指定して、あらかじめ登録しておく。

オンライン処理では、登録範囲の海岸部にある複数のアメダス雨量観測点で処理時刻または1時間前に雨量が観測されていない場合、この範囲の合成には最大値法を適用せず、シークラッターが現れにくいレーダーによる雨量解析値を合成領域に割り当てる。

ただし、はるか沖合のシークラッターは、海岸部のアメダス雨量と比較することができないため、出現範囲をあらかじめ登録することができない。このために、解析雨量として取り込まれてしまうことがある。解析雨量の分布でレーダーサイトを中心とする円弧状を呈している領域があれば、シークラッターである可能性が大きい。

なお、海岸線付近のシークラッターについては現れやすい格子が特定できるので、地形エコーと同様の処理によって、あらかじめ除去されている（第3.1.1項）。

(6) アメダス雨量の置き換え

アメダス格子の雨量解析値は、二次補正係数の内挿（[13]式と[14]式による）に使用する近傍のアメダス格子の影響で、アメダス雨量より小さな値に算出されることがある。その格子内に少なくともアメダスで観測されただけの雨量が降ったのは事実であるから、この場合はア

メダス雨量をその格子の解析雨量とする。このため、アメダス格子の解析雨量は、アメダス雨量より小さな値になることはない。この処置は、解析雨量で局地的強雨を見逃さないという防災上の観点による。

(7) アメダス雨量の埋め込み

下層雲などによる 4 mm/h 以下のごく弱い雨は、アメダスで観測されるが、気象レーダーではまったく捕捉できないことがある。アメダス雨量が 1 mm/h 以上 4 mm/h 以下で、かつ付近の雨量解析値がすべて 0 である場合は、(6)の処理でアメダス格子の解析雨量をアメダス雨量で置き換えるのみでなく、その周囲の格子にも距離の重みを付けた内挿値を、解析雨量として埋め込む。ただし、レーダー観測が行われていない領域では、アメダス雨量が観測されていてもこの処理は行わない。

この処理の対象範囲は、アメダス格子から半径 3 格子 (15km) 以内とし、距離の重みは次の式で与える。

$$2 / (4 \cdot D^2 + 1)$$

ここで、 D : 格子間距離 (5 km を 1 とする)

4. レーダー・アメダス解析雨量の精度

解析雨量の精度検証については、東京都の雨量データを使用した饒村 (1985) と北島・大林 (1991) 及び予報部予報課 (1993)、東京都と静岡県及びアメダスの雨量データを使用した牧原 (1993)、月積算値をアメダス雨量と比較した山本 (1991) などの報告がある。この他に、幾つかの気象官署でも、部外機関の雨量データを使用して、解析雨量の精度が検証されている。

東京都建設局では、水防行政の一環として都内 116 か所 (ただし、伊豆諸島や小笠原諸島などの島部を除く) にテレメータ雨量観測所を設置して

おり、気象庁にもオンラインで提供されている。観測所は、平均して約 4.3km 四方に 1 か所の割合で、解析雨量の格子サイズとほぼ等しい平均密度で展開されている。この雨量観測所による雨量データ (以下、「東京都雨量」という) を使用して、解析雨量の期間平均の精度と降水タイプ別の精度について調べた。緯経度座標に変換した解析雨量の格子サイズは、東京付近で南北 5.56km × 東西 5.65km である。

4.1 期間平均の精度

1993年 4 月から 1995年 3 月まで 2 年間の解析雨量と東京都雨量を比較して、雨量階級の区分によるスコアと相関関係などを調べた。

解析雨量と東京都雨量は、共に次の 2 通りの値を使用した。

- ① 1 時間雨量
- ② 3 時間積算雨量

また、東京都雨量と比較する解析雨量には、次の 2 通りの値を与えた。

- ① 「対応格子値」 : 東京都雨量観測所を含む格子の解析雨量
- ② 「最近接値」 : 東京都雨量観測所を含む格子を中心とする 3×3 格子内で東京都雨量の値に最も近い解析雨量

最近接値は、気象レーダーで観測した雨粒が地上に落下するまでに途中の風による影響を受けるため、特に水平スケールが小さい対流性の降水のときに解析雨量とその格子内の東京都雨量の間に相違が生じやすいこと (隣りの格子の解析雨量の方が東京都雨量に近いことがある。詳細については、付録 5 の第 5.1 節を参照されたい)、また座標変換の際に最大 1 格子の位置ずれを生じる場所があることを考慮したものである。

1時間雨量と3時間積算雨量について、東京都雨量と解析雨量（対応格子値及び最近接値による）を第11図に示す階級に区分し、各階級に含まれる標本数と全体の標本数から同図の説明に示す「大過多率」、「小過多率」、「一致率」、「小過少率」、「大過少率」の各スコアを算出した。スコアの算出にあたって、解析雨量が0mmの階級は除外している。解析雨量が0mmとはその格子に降水エコーが観測されなかったということで、ノーエコーの格子はアメダス雨量による補正ができないこと（ただし第4.3.1項で述べたように、ノーエコーでアメダス雨量が観測されている場合は周辺にアメダス雨量を埋め込んでいる）、また解析雨量と東京都雨量が共に0mmというデータが標本数の大半を占めており、これを含めると妥当な

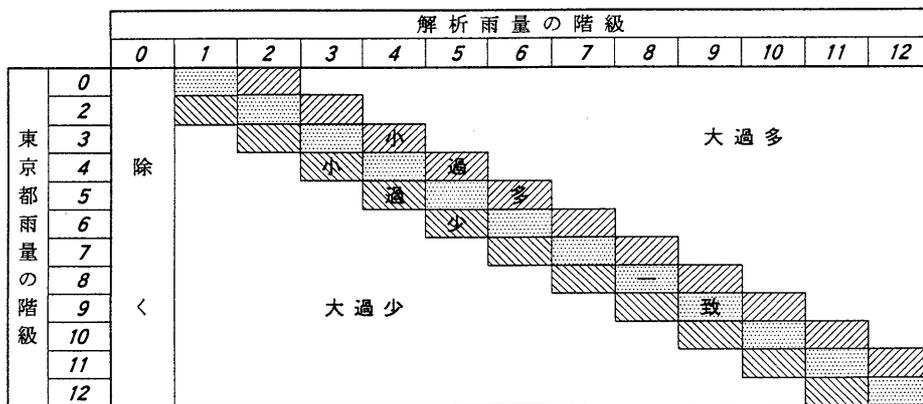
評価ができないことによる。また、東京都雨量には「1mm未満」という観測値はないので「1」の階級はなく、解析雨量が「1」の階級は東京都雨量が「0」の階級と同じとした。なお、複数の東京都雨量と比較している解析雨量の格子がある。

1993年4月から1995年3月まで2年間の解析雨量（対応格子値と最近接値）と東京都雨量による月平均及び年平均のスコアを、1時間雨量について第3表に、3時間積算雨量について第4表に示す。

次に、両者の散布状況から、相関係数や回帰式などの相関関係と、特定の解析雨量幅に含まれる東京都雨量の頻度分布を調べた。相関関係の算出にあたって、解析雨量0mmと東京都雨量0mmは除外している。

階級区分	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1時間雨量	0	<1	<5	<10	<20	<30	<40	<60	<80	80≤	-	-	-
3時間積算雨量	0	<1	<5	<10	<20	<30	<40	<60	<80	<100	<120	<150	150≤

（雨量の単位：mm）



第11図 解析雨量の精度を検証するための階級区分とスコア定義

1時間雨量と3時間積算雨量によって、階級の区分を変える。

スコアの定義は次のとおりで、単位は%である。解析雨量0mmは除く。

大過多率：解析雨量が東京都雨量より2階級以上多い標本数の割合

小過多率：解析雨量が東京都雨量より1階級多い標本数の割合

一致率：解析雨量と東京都雨量の階級が一致する標本数の割合

小過少率：解析雨量が東京都雨量より1階級少ない標本数の割合

大過少率：解析雨量が東京都雨量より2階級以上少ない標本数の割合

1993年4月から1994年3月まで1年間の解析雨量(対応格子値と最近接値)と東京都雨量の相関関係を、1時間雨量について第12図に、3時間積算雨量について第13図に示す(1994年4月から1995年3月までについては省略した)。さらに、特定の解析雨量値に対応する東京都雨量の全標本数のうち、回帰直線から近い順に数えて80%の標本数を包括するまでの雨量幅を、解析雨量の誤差幅を表すものとして第5表に示す。

これらの精度評価の結果を、次にまとめる。

(1) 1時間雨量

① 対応格子値の解析雨量を東京都雨量と比較した場合

第3表(1)によると、一致率は年平均76~78%である。月平均は、おおむね寒候期に高く(1994年1月の一致率はかなり低いが、大雪時に東京都雨量が正常な値でなかった可能性がある)、暖候期に低いという傾向がある。暖候期に一致率が低下するのは、水平スケールが小さい対流性の降水が多く発現し、雨粒落下途中の風による影響で、解析雨量とその格子内の東京雨量の間に相違が生じやすいためと考えられる。特に1994年の7月から10月にかけて、このタイプの降水が顕著であったため、一致率は70%前後にとどまっている。なお、過去に同様の調査で得られた一致率は、1990年8月から11月までの4か月平均で76%(北畠・大林, 1991)、1992年4月から1993年3月までの年平均で83%(予報部予報課, 1993)であった。

小過多率は小過少率のほぼ2倍になっていることから、平均すると解析雨量は東京都雨量よりやや多めに算出される傾向があるといえる。

大過多率と大過少率は合わせても1%前後であるが、どちらも暖候期に大きくなっている。

階級区分によるスコアは、月や年で卓越して現れた降水タイプによって異なるが、一致率

と小過多率を合わせると年平均で90%を超えており、解析雨量の所期の目的を十分に達成しているものと考えられる。

第12図(1)によると、相関係数は0.87である。

回帰直線の傾きは0.76であり、解析雨量は、東京都雨量より平均して1.3倍ほど多めに算出されることを表している。

第5表によると、対応格子値の解析雨量 30 ± 2 mm/hの幅では、東京都雨量は ± 13 mm(1993年4月~1994年3月)または ± 19 mm(1994年4月~1995年3月)以内に80%の標本が入っている。

② 最近接値の解析雨量を東京都雨量と比較した場合

第3表(2)によると、一致率の年平均は87~90%で、対応格子値の場合より10%以上高くなる。月平均を対応格子値の場合と比較すると、暖候期を中心に14~15%高い値となっていることから、水平スケールが小さい対流性の降水のときに現れやすい雨粒落下途中の風による影響を補正した結果と思われる。小過多率と大過多率は対応格子値の場合より大幅に減少しており、小過少率と大過少率は変わらないかやや増加している。

ただし1994年11月は、一致率の月平均が対応格子値の場合より低くなっている(逆に小過少率は高い)が、これはほとんどが10mm/h未満の弱い降水で標本数も少なかったことから、階級区分5mm/hのしきい値を境にして最近接値が1階級小さくなるケースが目立ったためと思われる(例えば、東京都雨量5mm/hと対応格子値7mm/hは同じ階級に区分されるので一致であるが、最近接値として4mm/hが採用された場合は小過少となる)。

第12図(2)によると相関係数は0.98で、両者の対応は非常に良い。

第3表 階級区分によるスコアで評価した解析雨量の平均的な精度(1時間雨量)

階級区分とスコア定義(単位は%)は、第11図に従う。

表中のA, Bは

A: 1993年4月~1994年3月 B: 1994年4月~1995年3月

の期間を表す。

(1) 対応格子値

スコア-	月													年 平均
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月		
大過多率	A	0.4	0.2	0.3	0.7	1.3	0.2	0.1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.1	0.5
	B	0.2	0.2	0.9	1.9	4.1	1.6	2.0	0.6	0.8	0.2	0.4	0.6	1.1
小過多率	A	8.0	6.1	12.4	16.4	15.6	14.3	16.8	16.4	14.3	21.1	11.5	11.3	14.2
	B	13.1	12.7	14.1	17.3	18.2	17.2	18.9	17.9	12.2	8.0	15.4	16.1	15.3
一致率	A	84.3	82.4	79.3	75.9	75.5	76.8	77.1	75.9	78.3	71.6	84.0	81.7	77.9
	B	80.6	78.8	78.5	72.9	66.9	70.6	73.0	75.5	82.8	89.9	79.2	74.5	76.4
小過少率	A	7.3	11.2	7.9	6.9	7.4	8.6	6.0	7.2	7.0	7.0	4.1	6.9	7.3
	B	6.1	8.2	6.3	6.9	8.9	10.0	5.9	5.8	4.0	1.9	5.0	8.7	6.9
大過少率	A	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
	B	0.0	0.1	0.2	1.0	1.9	0.6	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.3

(2) 最近接値

スコア-	月													年 平均
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月		
大過多率	A	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
小過多率	A	1.0	1.1	2.7	2.9	3.4	1.2	1.5	2.0	2.2	11.8	2.4	2.1	2.8
	B	1.1	2.0	1.5	2.1	2.6	2.4	14.6	17.2	0.8	2.2	8.6	5.5	4.6
一致率	A	85.0	87.1	93.9	89.5	87.1	91.4	92.0	89.0	93.3	78.8	92.0	92.6	89.7
	B	95.5	93.5	90.0	86.9	82.6	87.7	76.7	68.9	86.8	94.5	78.8	86.6	86.6
小過少率	A	14.0	11.8	3.4	7.4	9.2	7.4	6.3	8.5	4.5	9.4	5.4	5.3	7.4
	B	3.4	4.5	8.4	10.2	13.5	9.6	7.7	13.4	10.7	3.3	12.6	7.6	8.4
大過少率	A	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1
	B	0.0	0.0	0.1	0.8	1.2	0.3	0.1	0.5	1.7	0.0	0.0	0.2	0.3

第5表によると、最近接値の解析雨量 30 ± 2 mm/hの幅では、東京都雨量は ± 3 mm(1993年4月~1994年3月)または ± 5 mm(1994年4月~1995年3月)以内に80%の標準が入っている。

(2) 3時間積算雨量

① 対応格子値の解析雨量を東京都雨量と比較し

た場合

第4表(1)によると、一致率は年平均68%である。月平均は、1時間雨量と同様に、おおむね寒候期に高く暖候期に低い。小過多率と大過多率は、小過少率と大過少率より3倍ほども大きくなっている。これは、東京都雨量よりやや多めに算出されている解析雨量を3時間分積算し

第4表 階級区分によるスコアで評価した解析雨量の平均的な精度（3時間積算雨量）

階級区分とスコア定義（単位は%）は、第11図に従う。

表中のA、Bは、第3表と同じ。

(1) 対応格子値

スコア-	月												年 平均	
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月		
大過多率	A	1.1	0.8	1.2	1.8	2.3	0.7	0.6	0.8	1.4	2.9	1.0	0.6	1.3
	B	0.9	0.8	2.3	3.0	6.0	3.0	4.8	3.9	2.7	1.2	1.8	2.0	2.7
小過多率	A	19.8	23.8	23.2	24.8	24.4	25.3	25.4	23.9	22.3	25.3	22.1	17.6	23.5
	B	23.5	24.7	22.2	24.9	19.1	21.3	21.8	16.8	19.1	19.3	24.7	21.0	21.6
一致率	A	71.6	67.1	69.9	65.8	65.0	65.9	67.1	65.9	70.8	62.9	71.9	74.8	67.8
	B	69.8	66.6	67.5	64.0	64.4	63.9	67.7	72.7	73.3	78.3	68.7	67.4	68.2
小過少率	A	7.4	7.9	5.5	7.4	8.0	8.0	6.7	8.6	5.5	8.2	4.9	6.9	7.2
	B	5.8	7.5	7.7	6.7	8.4	10.8	5.4	5.6	4.4	1.2	4.6	8.7	6.8
大過少率	A	0.1	0.4	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.8	0.0	0.7	0.1	0.1	0.2
	B	0.0	0.4	0.3	1.4	2.1	1.0	0.3	1.0	0.5	0.0	0.2	0.9	0.7

(2) 最近接値

スコア-	月												年 平均	
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月		
大過多率	A	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
	B	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	4.5	3.8	0.0	0.2	0.0	0.8	0.7
小過多率	A	3.0	6.6	6.1	5.7	5.0	4.4	3.4	5.3	6.0	14.4	3.0	2.8	5.3
	B	5.8	8.2	7.1	7.1	4.0	3.0	11.2	12.7	4.9	9.7	12.3	5.8	6.8
一致率	A	85.7	88.0	88.8	85.1	82.8	88.4	87.4	81.6	86.9	72.4	88.1	89.6	85.6
	B	87.0	85.9	81.2	80.8	79.1	85.5	75.6	65.2	80.2	85.9	75.9	82.7	81.8
小過少率	A	11.3	5.4	5.0	8.8	11.8	7.2	8.8	10.9	7.0	12.2	8.5	7.5	8.7
	B	7.2	5.8	11.2	11.2	15.7	11.1	8.6	16.0	13.2	4.2	11.5	9.8	10.2
大過少率	A	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.4	2.2	0.0	1.0	0.4	0.1	0.3
	B	0.0	0.0	0.4	0.8	1.1	0.3	0.1	2.3	1.7	0.0	0.3	0.9	0.5

たため、両者の差が大きくなったことによる。

なお、スコアは階級区分のしきい値の取り方と雨量を積算する時間の長さに依存するので、3時間積算雨量のスコアを1時間雨量のスコアと単純に比較することはできない。

第13図(1)によると、相関係数は0.92である。回帰直線の傾きは0.82であり、対応格子値の解析雨量を3時間分積算すると、東京都雨量の3時間積算より平均して1.2倍ほど多めになる

ことを表している。

1時間雨量の場合と比較すると、3時間積算雨量では相関係数が大きくなり（0.87から0.92へ）、東京都雨量に対する平均倍率が小さくなる（1.3倍から1.2倍へ）。この理由は、水平スケールが小さい対流性の降水（特に局地的な強雨）は短時間で終息する（または通過する）ことが多く、このような降水タイプのときに現れやすい雨粒落下途中の風による影響が、時間積

1 時間雨量
(対応格子値)

標本数 : 49,726

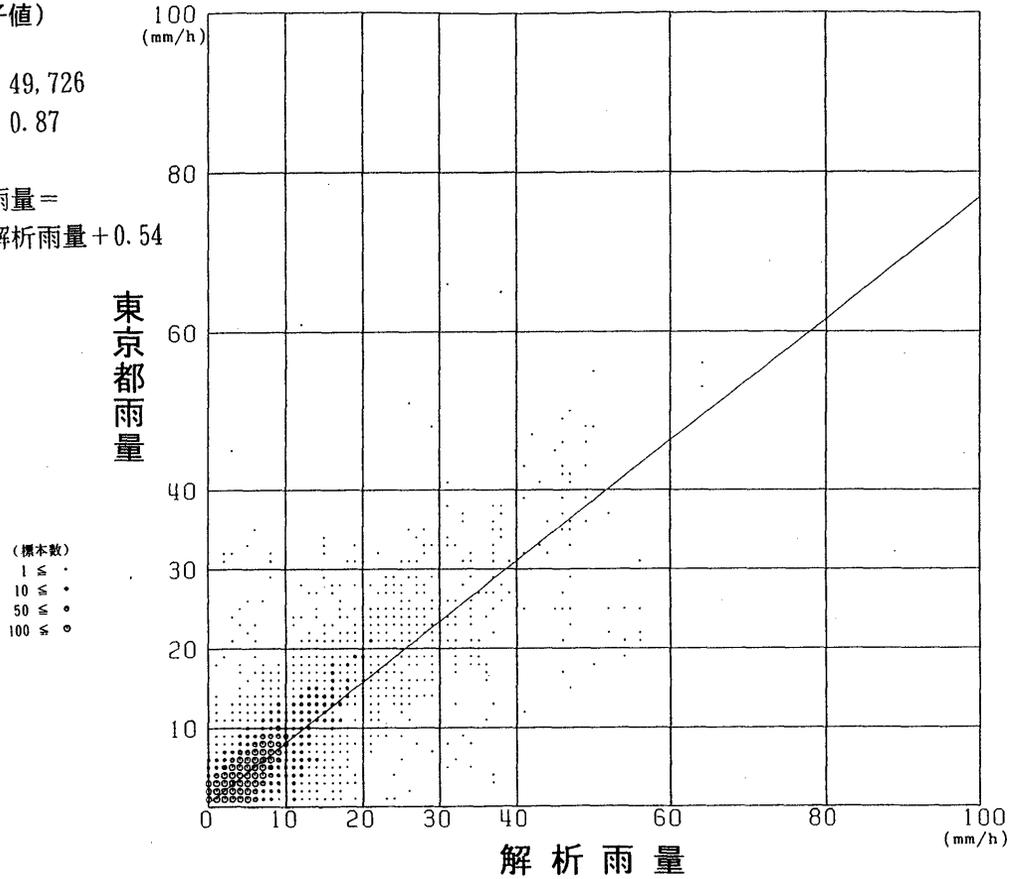
相関係数 : 0.87

回帰直線 :

東京都雨量 =

$$0.76 \times \text{解析雨量} + 0.54$$

1993 4 - 1994 3



第12図(1) 解析雨量 (対応格子値) と東京都雨量の相関関係 (1 時間雨量 : 1993年 4月 から 1994年 3月 まで)

散布している記号は、図上で同じ点にのる標本数を表し、意味を左下に示す。解析雨量 0 mm の軸 (縦軸) に載っている標本数の記号は、0.4 mm/h に対応する。

1993 4 - 1994 3

1時間雨量
(最近接値)

標本数: 53,551

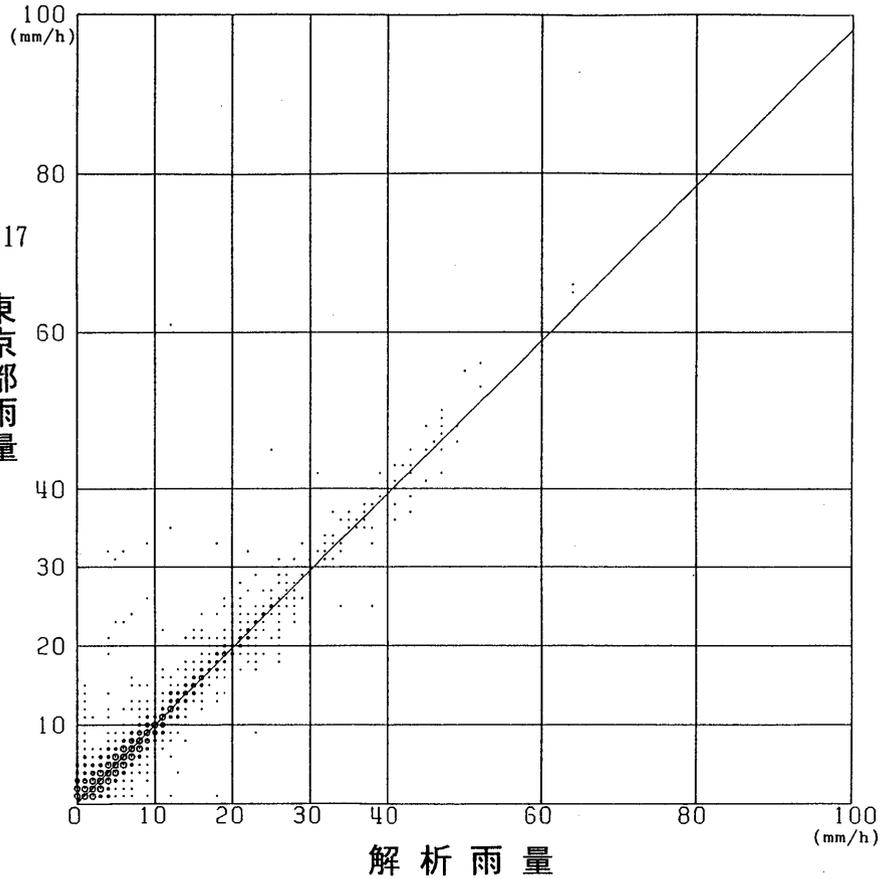
相関係数: 0.98

回帰直線:

$$\text{東京都雨量} = 0.98 \times \text{解析雨量} + 0.17$$

東京都雨量

(標本数)
1 ≤ ·
10 ≤ ·
50 ≤ ·
100 ≤ ○



第12図(2) 解析雨量(最近接値)と東京都雨量の相関関係(1時間雨量:1993年4月から1994年3月まで)
散布記号の意味は、第12図(1)と同じ。

3時間積算雨量
(対応格子値)

標本数: 80,946

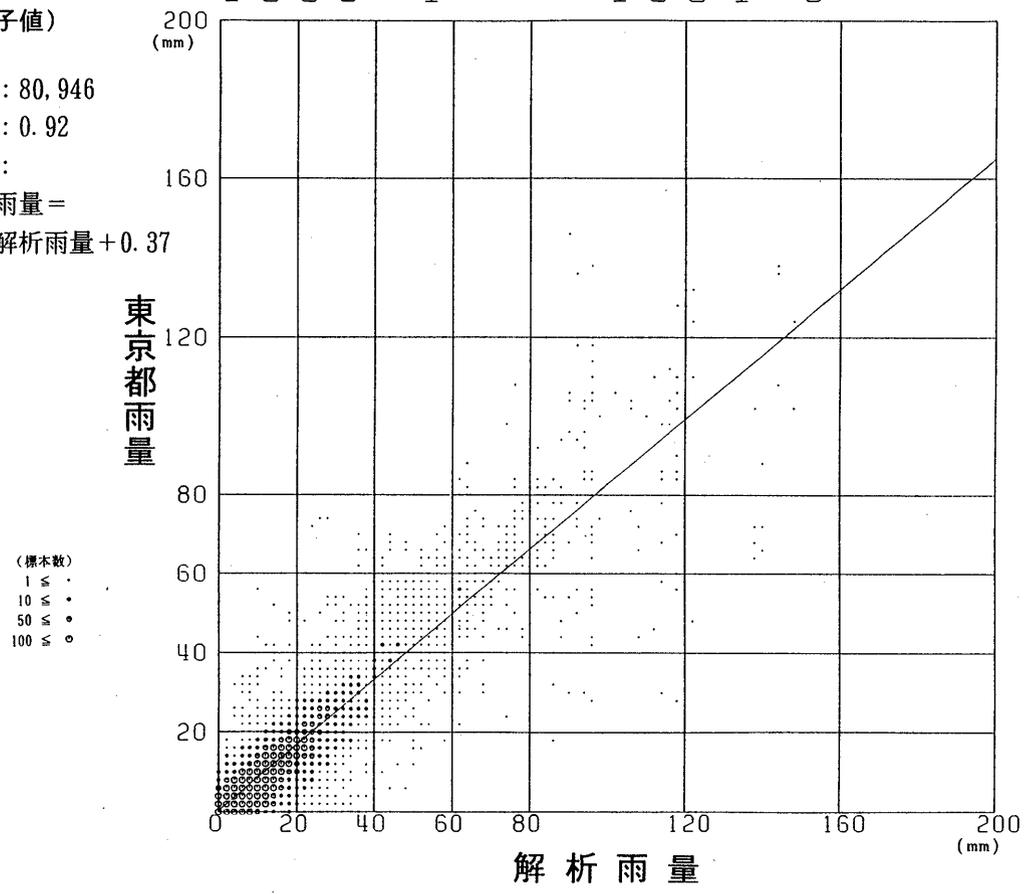
相関係数: 0.92

回帰直線:

東京都雨量 =

$$0.82 \times \text{解析雨量} + 0.37$$

1993 4 - 1994 3



第13図(1) 解析雨量 (対応格子値) と東京都雨量の相関関係 (3時間積算雨量: 1993年4月から1994年3月まで)

標本数の記号は、図が煩雑になるのを防ぐため、3時間積算雨量±1mmの幅に入る数でプロットしている。したがって、解析雨量0mmの軸(縦軸)に載っている標本数の記号は、0.4mmと1mmに対応する。また、東京都雨量0mmの軸(横軸)に載っている標本数の記号は、1mmに対応する。

1993 4 - 1994 3

3時間積算雨量
(最近接値)

標本数 : 85,851

相関係数 : 0.99

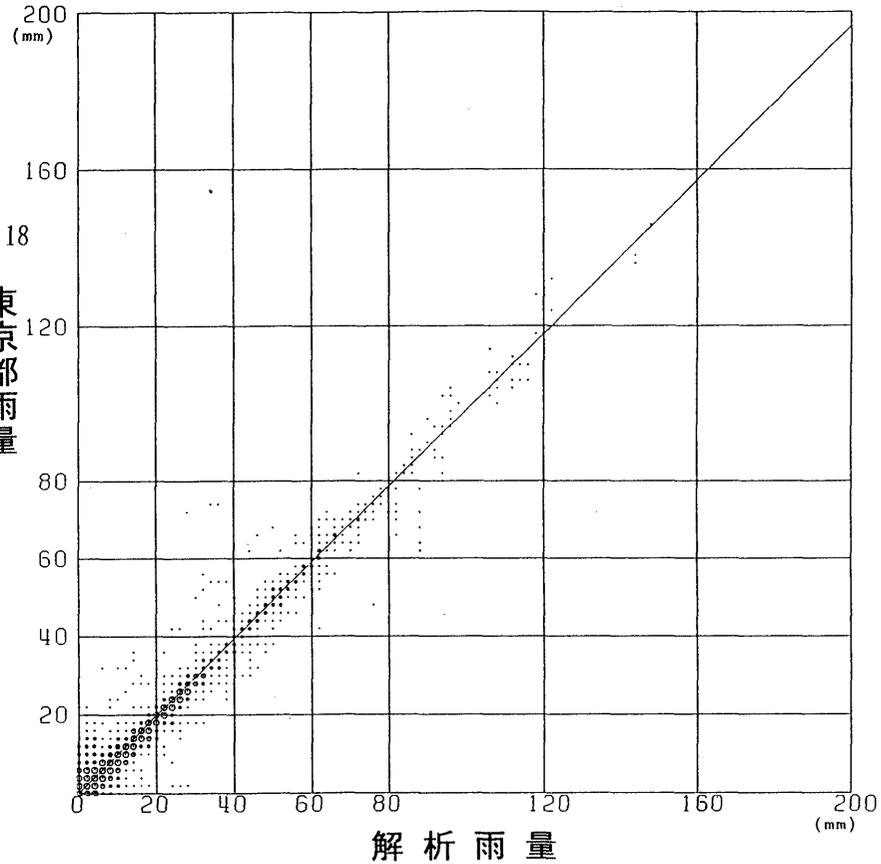
回帰直線 :

東京都雨量 =

$0.98 \times \text{解析雨量} + 0.18$

東京都雨量

(標本数)
1 ≦ ●
10 ≦ ○
50 ≦ ⊖
100 ≦ ⊙



第13図(2) 解析雨量(最近接値)と東京都雨量の相関関係(3時間積算雨量:1993年4月から1994年3月まで)
散布記号の意味は、第13図(1)と同じ。

第5表 解析雨量の誤差幅

1時間及び3時間積算の解析雨量(対応格子値,最近接値)と東京都雨量の1年間の散布状況において,特定の解析雨量の幅に含まれる東京都雨量の全標本数(表中の括弧内に表す)のうち回歸直線から近い順に数えて80%の標本数を包括するまでの幅を,誤差幅として表す。

	解析雨量の幅	対応格子値の誤差幅		最近接値の誤差幅	
		1993.4~1994.3	1994.4~1995.3	1993.4~1994.3	1994.4~1995.3
1時間	10±2mm	4mm (2181)	6mm (1561)	1mm (1771)	2mm (1065)
	30±2	13 (103)	19 (63)	3 (66)	5 (42)
	40±2	13 (24)	19 (21)	3 (16)	10 (13)
	50±2	10 (9)	12 (6)	2 (3)	4 (7)
3時間	20±2mm	6mm (1716)	11mm (1294)	2mm (1369)	3mm (949)
	60±5	15 (218)	31 (70)	4 (191)	9 (36)
	80±5	16 (75)	44 (36)	5 (39)	10 (29)
	100±5	34 (26)	33 (15)	9 (11)	11 (10)

算すると小さくなるためと考えられる。

なお,図には示さないが,同期間の24時間積算雨量の比較では,相関係数は0.94,東京都雨量に対する平均倍率は1.2倍で,3時間積算雨量の場合とほとんど変わらなかった。

第5表によると,格子対応値の解析雨量(3時間積算)60±5mmの幅では,東京都雨量(3時間積算)は±15mm(1993年4月~1994年3月)または±31mm(1994年4月~1995年3月)以内に80%の標本が入っている。

以上の結果を見ると,3時間積算雨量は1時間雨量と比較して,東京都雨量との相関関係は良いが,東京都雨量との差は大きい。

② 最近接値の解析雨量を東京都雨量と比較した場合

第4表(2)によると,一致率の年平均は82~86%で,1時間雨量と同様に,対応格子値の場合より10%以上高くなる。小過多率と大過多率は対応格子値の場合より大幅に減少しており,小過少率と大過少率はやや増加している。

第13図(2)によると相関係数は0.99で,両者の対応は非常に良い。

第5表によると,最近接値の解析雨量(3時

間積算)60±5mmの幅では,東京都雨量(3時間積算)は±4mm(1993年4月~1994年3月)または±9mm(1994年4月~1995年3月)以内に80%の標本が入っている。

4.2 降水タイプ別の精度

解析雨量は,対象とした降水のタイプによって,東京都雨量との一致率などの特徴が異なる。ここでは降水タイプを層状性と対流性に分けて,3つの事例について述べる。

どの事例も,解析雨量と東京都雨量には,1時間雨量を使用する。また,東京都雨量と比較する解析雨量は,東京都雨量観測所を含む格子の解析雨量である(第4.1節でいう「対応格子値」)。

第11図の階級区分とスコア一定義に基づいて比較した結果を,第6表に示す。

(1) 層状性の降水の例(1992年10月5日3時~6日8時)

東北地方南部から東海地方にかけて,広い範囲で雨となった。この期間の降水強度は,ほとんどが5mm/h以下であった。この事例での一致率はほぼ80%で,階級差±1以内(小過多率,一致率,小過少率)は99%以上である。

このように、層状性の降水を対象とした解析雨量は、特に精度が良い。この理由は、次のように考えられる。

- ① 現業的なレーダー観測で用いる Z-R 関係を表す式には、層状性の降水を対象とする係数を設定していること。
- ② 空間的な強度分布が均一なため、雨量計で観測する値は周辺の降水量分布を代表するものになること。また、座標変換による位置ずれや雨粒落下途中の風による影響が目立たなくなること。

(2) 層状性の降水域に強雨を含む例 (1992年10月8日16時～9日9時)

南岸低気圧の影響で関東地方南部は大雨となり、広い範囲で総雨量が100mmを超えた。広い層状性の降水域の所々に対流性の強雨域が重なっており、東京都雨量でも30mm/hを超える値が観測された。この事例での一致率は76%と先の層状性の降水の事例より若干小さい程度で、階級差±1以内には99%以上が入っている。第14図に示す9日7時の解析雨量とアメダス雨量または東京都雨量を格子ごとに比較すると、大部分の格子で両者の差が解析雨量の10%以内に収まっている。

30mm/hを超える強雨があっても、層状性の降水が主体で空間的な強度分布が比較的均一な場合は、解析雨量の精度は良い。

一般に、温帯低気圧や台風など、水平スケールが大きいじょう乱に伴う降水域に対しては、解析雨量と雨量計データの対応が良い。

(3) 対流性の降水の例 (1992年8月1日15時～1日20時)

関東地方で雷雲が発達して、東京では17時過ぎから強雨となり、東京都雨量で40mm/hを超える値が観測された。この事例での一致率は61%と小さく、大過多率と大過少率が合わせて

第6表 解析雨量の降水タイプ別精度の例

解析雨量、東京都雨量とも、1時間雨量を使用した。また、東京都雨量と比較する解析雨量は、「東京都雨量観測所を含む格子の値(対応格子値)」である。

階級区分とスコア定義(単位は%)は、第11図に従う。

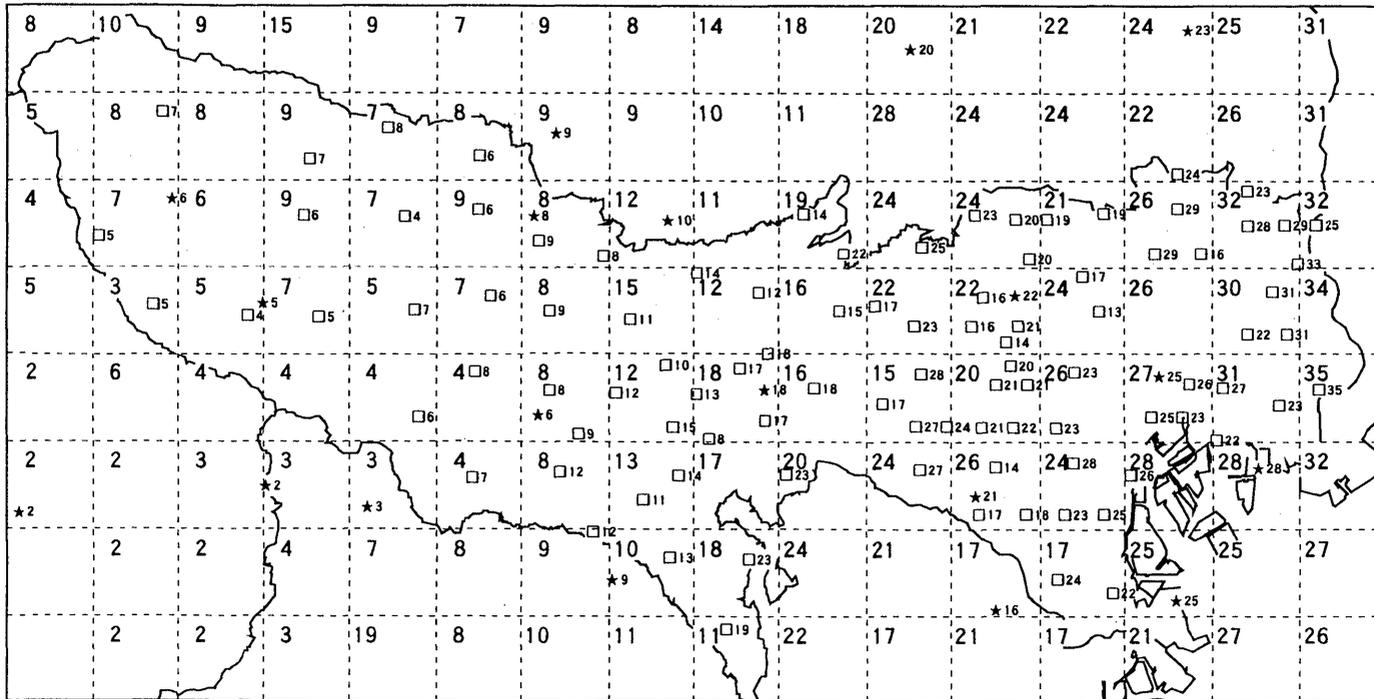
- (1) 1992年10月5日3時～6日8時の事例 (層状性の降水)
- (2) 1992年10月8日16時～9日9時の事例 (層状性の降水域に強雨を含む)
- (3) 1992年8月1日15時～1日20時の事例 (対流性の降水)

事例 スコア	(1)	(2)	(3)
大過多率	0.2	0.3	3.8
標本数	5	5	19
小過多率	12.3	17.4	21.9
標本数	326	278	110
一致率	79.3	75.5	61.2
標本数	2107	1209	308
小過少率	8.1	6.6	10.7
標本数	214	106	54
大過少率	0.1	0.2	2.4
標本数	2	3	12

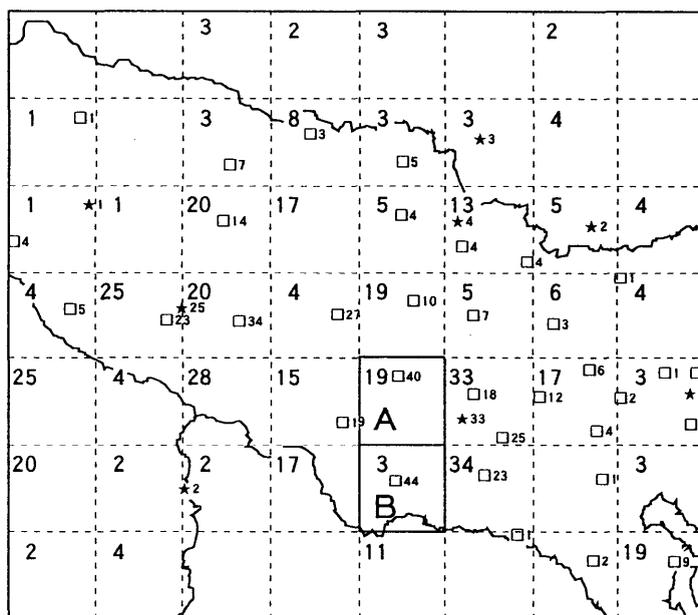
6%以上ある。第15図に示す1日18時の解析雨量とアメダス雨量または東京都雨量を格子ごとに比較すると、図中の格子A(解析雨量=19mm, 東京都雨量=40mm)と格子B(解析雨量=3mm, 東京都雨量=44mm)で両者が大きく異なっている。しかし、一つ東隣りの格子では解析雨量が33mmと34mmとなっており、格子A, B内の東京都雨量に近い。

対流性の局地的な強雨の場合は、層状性の降水の場合と比べて、解析雨量と雨量計データの対応が悪くなる。この理由は、次のように考えられる。

- ① 局地的な強雨では5km四方の範囲でも雨量がかなり異なるため、面の情報である解析雨量と点の情報である雨量計データの特性の違いが



第14図 1992年10月9日7時(中央標準時)の解析雨量と東京都雨量・アメダス雨量の分布(1時間雨量)
各メッシュ左上隅の数字は解析雨量, 小さな四角の脇の数字は東京都雨量, 小さな星印の脇の数字はアメダス雨量を表す。



第15図 1992年8月1日18時（中央標準時）の解析雨量と東京都雨量・アメダス雨量の分布（1時間雨量）
記号と数字の意味は第14図と同じ。

顕著に現れやすいこと。

② 気象レーダーで観測した雨粒が地上に落下するまでに途中の風による影響を受けるため、特に水平スケールが小さい対流性の降水のときに解析雨量とその格子内の雨量計データの間に相違が生じやすいこと。隣りの格子の解析雨量の方が雨量計データに近いことがある。

5. レーダー・アメダス解析雨量の利用上の注意

解析雨量は面的にきめ細かく精度も高い1時間雨量分布を提供し、特にアメダスで捕捉できないような局地的強雨の監視に有効である。

しかし、これまで述べてきたように、解析雨量は幾つかの特性を持っている。利用するには以下の各点に注意する必要がある。

(1) 解析雨量とその格子内の雨量計データはかな

り異なることがある。

解析雨量とはどのような雨量であるかという点について、牧原（1993）は次のように説明している（ただし、字句や表現などは一部変えている）。

【アメダス雨量はポイントにおける値であり、しかも雨量計は5km格子内の特定の位置に設置されているわけではないので、格子内の最大雨量や最小雨量とは無関係である。したがって、場所や時間に対して統計をとると、格子内の平均的な値を示すことになる。このことから、アメダス雨量を基に修正する解析雨量も、基本的にはアメダス雨量と同様な値、すなわち統計をとると格子内の平均的な値となるべきである。ただ、1時間積算降水強度データは1格子を構成する2.5km格子4個の最大値をとっており*、しかもアメダス雨量とアメダス格子の雨量解析

* 付録2を参照されたい。

値とを必ずしも1対1に対応させないため*、格子内の平均よりも大きい値となる。おおざっぱに言えば、解析雨量は、「①5 km四方格子内の平均雨量」と「②その格子を四分分割した領域の平均雨量の最大値」の間となるべき雨量である。」

水平スケールが大きく空間的な強度分布が均一である層状性の降水の場合は、アメダス雨量もある程度広い範囲を代表する値となるので、解析雨量は、空間的にはレーダー観測のきめ細かさ、量的には雨量計の正確さを有する値となる。

しかし、降水域の水平スケールが小さくなるほど、空間的な強度分布が不均一になるほど、アメダス雨量の不確実性が増加し、5 km四方の範囲の最小値と最大値のどちらに近い値の雨量を捕捉したかによって、アメダス雨量が①より小さくなる場合や②より大きくなる場合がある。このような条件下で得られた解析雨量は、基本的には気象レーダーで捕捉した1時間積算降水強度の値に依存するものの、較正に使用したアメダス雨量がどのような値を捕捉したかによっても、①または②に近い値になることがある。アメダス格子の解析雨量はアメダス雨量より小さな値になることはない(第3.4.2項)ため、解析雨量が②より大きい値になることもある。

いずれにせよ、解析雨量は「5 km四方の範囲を代表する値」と言える。一方、雨量計による観測データはその地点に降った雨量の値であることから、双方の雨量値が持つ特性は本質的に異なっている。点の雨量値は5 km四方の範囲のなかでもかなりばらつきがあり、局

地性の強い雨の場合は特に顕著である。まったく様に降る雨でない限り、解析雨量とその格子内の雨量計データはかなり異なることがある。

例えば雷雨などで、局地的な強いエコーが気象レーダーで捕捉されて解析雨量が大きい値になった一方で、その格子内にあるアメダスまたは部外機関の雨量計が小さい雨量値を観測しているときは、その格子内あるいは隣りの格子内のどこかで、雨量計にはかからないが強い雨が降ったと考えられる。

逆に、部外機関の雨量計で大きい雨量値を観測した場合は、解析雨量もそれに見合う大きな値になることが理想ではあるが、非常に局地的な強雨のときは、あまり大きな解析雨量とならない場合もある。このような場合は、隣りの格子の解析雨量が雨量計に近い値を示していることがある。

(2) アメダス雨量より少し多めになる。

解析雨量は、局地的強雨を見逃さないという防災上の観点により、次のような操作をしている。

- ① 2.5 km 四方格子の1時間積算降水強度データを5 km 四方格子の値に変換する際に、2.5 km 四方格子データ4個の最大値を採用する**。
- ② 全国をカバーする領域で合成する際に、合成領域の1格子に複数レーダーのデータが対応するときは、原則として1時間積算降水強度の最大値を観測したレーダーによる雨量解析値を、解析雨量に採用する(第3.4.2項)。
- ③ アメダス格子では、解析雨量がアメダス雨量より小さくならないようにする(第3.4.2項)。

* 第3.3節で解説したように、アメダス格子に隣接する8つの格子の雨量解析値も加味して比較する場合があること。

** 付録2を参照されたい。ただし、これはレーダーサイトでの処理である。

- ④ 解析雨量の配信にあたって緯経度座標に変換する際に、緯経度座標1格子に合成領域の複数の格子が重なるときは、大きい方の値を採用する(第3.4.2項)。

このため、統計的に見ると、解析雨量はアメダス雨量より少し多めになる。山本(1991)はアメダス格子の解析雨量とアメダス雨量の月積算値を比較して、解析雨量の月積算値が個々のアメダス格子で1.0倍から1.4倍、平均して1.2倍であったと報告している。東京都雨量と比較した年平均では、1時間雨量で1.3倍、3時間積算雨量で1.2倍であった(第4.1節)。

- (3) 強い雨に対しては1mm/h単位の精度を持たない。

第1表に示したように、1時間積算降水強度のレベルが大きくなるにつれて対応する降水強度の幅は最大4mm/hに広がる。10mm/hを超えるレーダー雨量から変換された解析雨量は、観測や解析の条件がいくら良くても本来的に1mm/h単位の精度は持たない。

このため、解析雨量の値を部外に発表する際は、10ミリ単位で「およそ何10ミリ」のように表現している。

- (4) 最大で1格子の位置ずれを生じることがある。

解析雨量は、以下の原因で1格子程度の位置ずれを生じることがある。一つ隣の格子の解析雨量が雨量計データと対応が良いことがある。

- ① 全国をカバーする領域で合成する段階でレーダーごとの元データを斜軸ランベルト座標へ、データ配信の段階で斜軸ランベルト座標から緯経度座標へ変換する過程で発生する。
- ② 気象レーダーは高度2000m付近に分布する雨粒を観測しているが、雨粒が落下する途中の風による影響を受け、隣の格子で地上に達することがある。水平スケールが小さい対流性の強雨の場合ほどこの影響が顕著に現

れる。

このため、解析雨量の値とともに地点名を部外に発表する際は、市町村名に「付近」を付けたり、代表する地域名で表すなど、ある程度の広がりを持った表現を用いている。

- (5) 水平スケールが小さく激しい対流性の降水では精度がやや落ちる。

Z-R 関係を表す式の係数を、層状性の降水を対象とすることに相当する標準値に固定している(付録1の第1.1節)。陸上にある格子の雨量解析値については、標準値で変換されたレーダー雨量をアメダス雨量で較正することによって、これに起因する誤差を格子ごとに調整している。主体が層状性の降水であれば、30mm/hを超える強雨でも解析雨量の精度は良い。一方、激しい対流性の降水ではレーダー反射因子が非常に大きく観測され、水平スケールが小さいほどアメダスで降水分布の全体像を正確に捕捉することができないので誤差が十分に調整できず、結果的に解析雨量の精度がやや落ちる(第4.2節)。

ただし、1995(平成7)年5月に、このような降水に対する解析手法を次のように改良したため、信頼性の低い過大・過小な解析雨量が算出されることは相当に抑制された。

「雨量の一次解析」では、

- ① 雨量一次解析値を算出する際に与える観測ビーム高度の制限値を変更する(第3.2.6項)。

「陸上における雨量の二次解析」では、

- ② 補正に関与するアメダス格子数が少ない場合は、補正の程度を押さえるとともに、過去3時間のアメダス雨量とレーダー雨量の対応関係を使用する(付録5の第5.3節)。
- ③ 観測ビーム高度が高い場合は、雨量二次解析値に上限を設定する(第3.3節)。

「合成による解析雨量の決定」では、

④ 陸上にある格子において複数のレーダーで同一の降水系が観測された場合は、できるだけ信頼性の高いレーダーによる雨量解析値を採用する(第3.4.2項)

(6) 平均的に山地で多い傾向がある。

牧原(1993)は、ある特定の日時を対象に、アメダス雨量と対応格子(緯経度座標)の解析雨量を3時間分積算して面積平均して比較した結果、解析雨量はアメダス雨量に対して、関東地方の平野部で1.17倍、同じ降水タイプの中中部地方の山地で1.24倍であったと報告している。標高の高い山地が多い場所は観測ビーム高度を高くせざるを得ないため、雨量係数が大きくなりやすい。このため、山地や山間部で算出される解析雨量のアメダス雨量に対する比は、平野部での比より大きくなる傾向があると思われる。

なお山地では、1格子内でも斜面の向きなどによって実際の雨量分布が極端に異なる場合があるので、解析雨量と雨量計データを比較する際には注意を要する。

(7) 電波の遮へいや減衰などによる誤差の完全なカバーは無理である。

手前の山地や強雨域の影響などにより、電波が遮へいされたり、減衰したりする地域がある。複数のレーダーによる雨量解析値を全国をカバーする領域で合成し、解析雨量とすることによってこの影響による誤差は軽減されるが、各レーダーの運用状況によって、すべてのケースはカバーしきれない。

また、第9図に示したように、北海道の宗谷支庁南部、上川支庁北部と網走支庁紋別地方の一部、岩手県沿岸北部から青森県三八地方にかけての一部、及び飛騨山脈・赤石山脈の一部は、どのレーダーサイトからも遠いことや途中の山

地の影響で、頂高度が3000mより低い降水はレーダーで探知しにくい。この地域の解析雨量は、他の地域と比べて精度がやや落ちると考えられる。

(8) レーダーの異常データが取り込まれることがある。

地形エコーの消え残りや海岸線付近のシークラッターは、レーダーデータの品質管理や合成の処理ステップで大部分が除去されること、かなり沖合のシークラッターは解析雨量として取り込まれる場合があることは、既に述べた。この他に、ごくまれではあるが、他のレーダーとの電波干渉で発生する混信やレーダー機器の不具合で発生するノイズなどの異常データが解析雨量として取り込まれることがある(田畑, 1995)。

混信による異常データは、レーダーサイトのレーダーエコーデジタル化装置で除去処理がなされている(迫田, 1990)が、場合によっては除去しきれずに伝送され、ドット状に分布した数10mm/h(場合によっては200mm/h以上)の大きな解析雨量として出力されることがある。

ノイズによる見かけの降水域は、小さな値として広く分布することがあり、実際の降水域に重なっているときは区別が付けにくい。

6. あとがき

1988(昭和63)年に降水短時間予報業務が開始されて以来、雨量の実況解析と予測の精度向上を目指して、解析・予測手法に幾多の改良が加えられてきた。1995(平成7)年5月には局地的な短時間強雨に対する解析手法を大幅に改良した。

周辺海域を含む国土の全体を5km四方格子でカバーして、毎時刻の降雨状況を監視し、3時間先までの降雨予測を客観的に行う気象庁のシステムは、技術的に世界のトップレベルにあると考え

られる。しかしながら、解析雨量については、局的強雨の精度にまだ不十分な点があること、その精度は予測の精度に影響を及ぼすことなどから、今後も解析手法の改良と精度の検証を続けていかなければならない。

解析手法の改良にあたっては、気象レーダーとアメダスによる雨量観測の特性を良く理解して、レーダー雨量が含む誤差をアメダス雨量によっていかに補正するかという姿勢が基本となるであろう。精度の検証については、本稿で扱った東京都の雨量データの他に、現在は幾つかの気象官署で地方自治体などとの間で雨量データのオンライン交換が開始（または計画）されているので、こうしたデータを利用して気象レーダーの観測条件が異なる地域での解析雨量の精度を明らかにしてい

けば、解析手法を改良するための貴重なヒントを与えるであろう。

解析手法の改良や精度の検証に努力する一方で、解析雨量を気象業務の運用面で利用する方法を工夫していくことも大切である。

謝 辞

本稿をまとめるにあたって雨量解析手法の解説を含めた有益な助言を頂いた気象研究所予報研究部の牧原康隆主任研究官、本稿の校正にあたって数多くの貴重なコメントやご意見を頂いた予報部予報課と観測部測候課の皆様、及び解析雨量の精度検証にあたってオンラインによる雨量データを利用して頂いた東京都に、感謝の意を表します。

付録1 レーダー観測から地上雨量を推定する際に発生する誤差の要因

気象レーダーは、幾つかの仮定に基づいて降水分布を観測しており、観測の結果にも様々な誤差が含まれる。以下で、レーダー観測における主な仮定と、生じる誤差について述べる。

1.1 Z-R 関係の仮定から生じる誤差

気象レーダーの原理は、空中線からある方向に集中して電波（ビーム）をパルス状に送信し、降水域で散乱・反射されて戻ってくる電波を受信して、電波の往復に要する時間と空中線の向きから降水域までの距離と方向を、受信電力の強さから降水強度を推定するものである。レーダーの受信電力は、「目標体積」と呼ばれる体積内にあるすべての降水粒子で散乱されて戻ってくる電波の強さの総和と考えられる。

目標体積は次の式で近似される。なお、ビームのなかで主方向の大半のエネルギーが含まれる部分を「主ローブ」といい、主ローブ内のエネルギーが最大値の半分（最大値より3dB少ない）となる水平（または鉛直）方向の2点が空中線となす角度を、水平（または鉛直）の「ビーム幅」と定義している。

$$V \approx \pi \cdot \frac{r\theta}{2} \cdot \frac{r\phi}{2} \cdot \frac{h}{2}$$

ここで、 V ：目標体積

r ：レーダーサイトからの距離

θ, ϕ ：水平と鉛直のビーム幅（通常の気象レーダーでは1.3~1.6°。上式ではラジアンで表す）

$h/2$ ：パルス幅の空間長の半分（パルス幅を

$2 \mu s$ とすると約300m)

目標体積は、レーダーサイトからの距離の二乗に比例して大きくなる。目標体積とその広がりについて付第1図に示す。

レーダーで検出する受信電力は、「レーダー反射因子」と呼ばれる因子に比例し、次の「レーダー方程式」で表される。

$$\overline{Pr} = C \cdot Z / r^2$$

ここで、 \overline{Pr} ：平均受信電力（dBm。基準値を1 mWとして表した電力の単位）

C ：定数（レーダーの仕様などによって異なる）

Z ：レーダー反射因子（ mm^6/m^3 ）

r ：レーダーサイトから目標体積までの距離（km）

目標体積内の降水粒子を球形と仮定すると、単位体積あたりのレーダー反射因子は次の式で定義される。

$$Z \equiv \Sigma D^6$$

ここで、 D ：目標体積内の降水粒子の直径（mm）

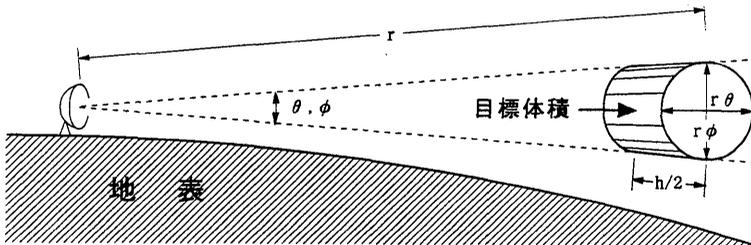
レーダー反射因子と降水強度の間には、統計的に次の式で表される関係があることが分かっており、一般に「Z-R 関係」と呼ばれる。

$$Z = B \cdot R^\beta$$

ここで、 R ：降水強度（mm/h）

B, β ：係数

B と β の値は降水タイプによって決まるが、かなりのばらつきを持つ値であり、雪と雨でも異なる。 B ,



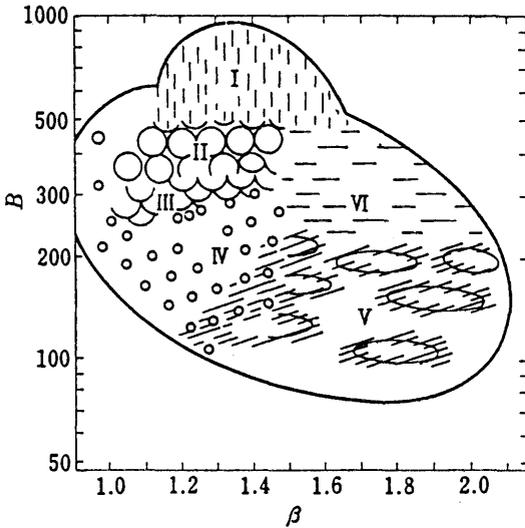
付第1図 目標体積とその広がり

目標体積は、レーダーサイトからの距離の二乗に比例して大きくなる。

β と降水タイプの特徴を付第2図に示す。レーダー反射因子から降水強度を推定するには、それぞれの降水について粒径分布を観測して B と β を求めてから行うと良いが、即時的に求めるのは困難である。このため現業的には、Marshall (1948) が多くの観測結果を平均して示した標準値である

$$B = 200, \beta = 1.6$$

を用いている。付第2図で分かるように、この標準値は水平方向にほぼ一様に広がった層状性の降水に当てはまる。対流性の降水の場合は、Z-R 関係を表す式の係数を固定したことにより、おのずと誤差が生じる。



付第2図 Z-R 関係 ($Z = B \cdot R^\beta$) の B 、 β と降水タイプ (Fujiwara, 1965)

- I : 雷雨エコーの拡散状のやや重厚な部分, または乾燥大気中の高い孤立した対流エコー (雨粒の蒸発が大きい)
- II : 雷雨エコーの強い中心部またはいくらか拡散状を呈している強い団塊状エコー
- III : 対流性セルの発生ないし成長段階
- IV : 小さな固い感じの対流性エコーで散乱状態ないし線状に並んでいるエコー
- V : 一様に広がった層状エコーまたは弱い拡散状エコー
- VI : 雷雨から完全に拡散してしまった終わりの段階または拡散した部分

1.2 目標体積内の降水粒子の分布に関する仮定から生じる誤差

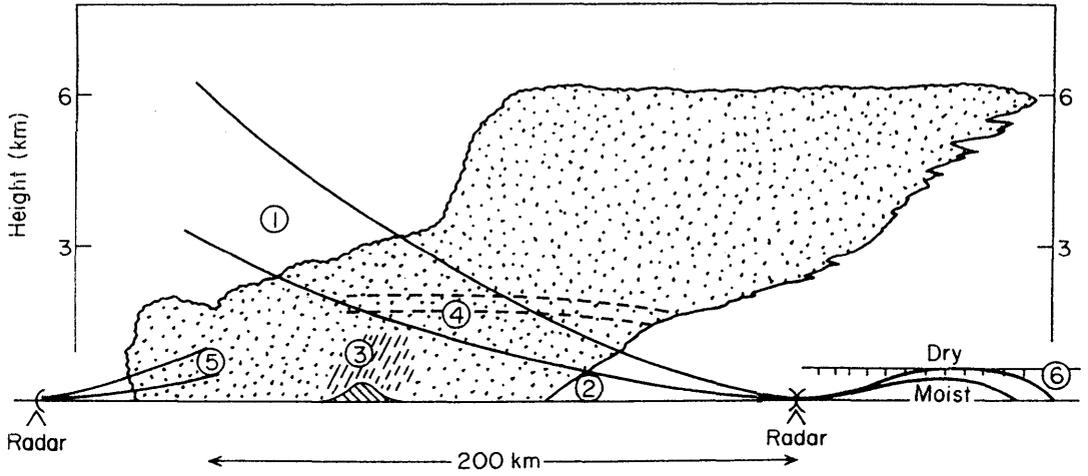
レーダー方程式と Z-R 関係を表す式を用いて受信電力を降水強度に換算する際、目標体積内には降水粒子が一様に充満しているものと仮定している。ビームの広がりにはレーダーサイトからの距離に比例し、水平方向と垂直方向のビーム幅を共に 1.5° とすると、距離 100km で 2600m, 300km では 7900m に達する。水平方向については、層状性の降水では、この程度の広がり内で降水粒子が一様に分布していると仮定しても良い。しかし鉛直方向については、降水粒子が 10000m 以上の高度まで分布することは少ないこと、高さによって降水粒子の大きさが異なる (次節で詳しく述べる) ことから、遠距離の場所ほどこの仮定は成り立たなくなる。

1.3 その他の要因で発生する誤差

上記の2つの仮定に起因する誤差以外の主な要因には、付第3図に示す前線性降水域を例にすると以下のものがある。

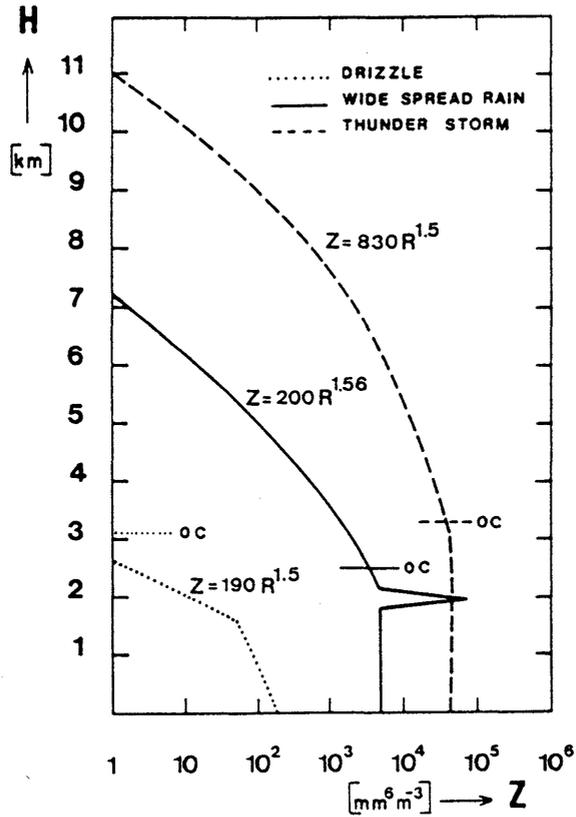
- ① 遠くにある背の低い降水域が探知できない。
- ② ビームが通過する高さの下で降水粒子が蒸発する (上空エコー)。
- ③ ビームが通過する高さの下で地形によって降水が強まる (地形性降水)。
- ④ 降水粒子が雪から雨に変わる 0°C 層直下の高度でエコーが強まる (ブライトバンド)。
- ⑤ 霧雨は比較的大きな降水粒子が地表付近に限られるため過小に推定する。
- ⑥ 大気の成層状態 (大きな鉛直湿度差) によってビームが異常に伝搬する。

①から⑤の誤差は、レーダーサイトから離れるほど地球表面の曲率によって、目標体積 (付第1図) をとらえるビームが通過する高さ (以下、「観測ビーム高度」という) が高くなり、上空での降水強度を観測することに起因する。上空の降水粒子は、10分ほどもすれば地表に落ちてくる (必ずしも直下ではない) ので、落下途中で変化がないとすれば、観測した降水強度を地域的・時間的に積分すれば、地上に降った降水量と考えて良い。しかし実際の降水粒子は、落下途中で成長、蒸発、融解、併合、分裂などの変化をしますので、降水強度は目標体積の高度によって変わる。付第4図は、スイスで実施した1年間のレーダー観測結果から、降水タイプとレーダー反射因子 (目標体積内の降水粒子



付第3図 気象レーダーによる降水強度の観測で発生する誤差の主な要因（前線性降水域の例）
 (Browning *et al.*, 1982)

図中に①～⑥で表す要因については、本文を参照されたい。



付第4図 降水タイプの違いによる平均的なレーダー反射因子Zの鉛直分布 (Joss *et al.*, 1970)
 各鉛直分布について、代表的なZ-R関係と0℃層の高度が付してある。

の大きさに依存し、降水強度との間に Z-R 関係を持つ) の鉛直分布の関係を示したものである。対流性の降水(雷雨)の場合、地表から 3000 m 付近までレーダー反射因子の強さはほぼ一定であり、観測ビーム高度が 3000 m 以下であれば地表の値と同じとして良い。層状性の降水の場合、レーダー反射因子が地表の値と同じと考えて良い高度は低くなり、目標体積がブライトバンドをとらえると地表よりかなり大きい値になる。霧雨の場合、観測ビーム高度は地表のごく近くでなければならない。いずれにせよ、目標体積の高度に起因する誤差を小さくするためには、観測ビーム高度をなるべく地表に近くなるように設定する必要がある。

この他に、レーダー電波の減衰による誤差がある。レドームに雨粒があたると水膜ができ、送信電波を減衰させる。電波が伝搬する経路上に広い範囲にわたって強い降水があると、電波が反射あるいは吸収されるため、その後方にある降水が十分探知できないことがある。

また、レーダー固有の受信感度特性による誤差、デジタル化や地形エコー除去の信号処理時に発生する誤差、地形や波浪など降水以外のエコーを取り込むことによる誤差などがある。

さらに、瞬時のエコー強度を観測回数分加算して 1 時間雨量とする際のサンプリング時間間隔による誤差がある。サンプリング時間間隔と 1 時間雨量測定精度の関係を、付第 1 表に示す。この誤差は、どの程度の面積を区分して雨量を測定するかにも依存する。解析雨量に使用する 1 時間積算降水強度 (7.5 分ごと、5 km × 5 km = 25 km²) は、同じ面積を 1 分ごとにサンプリングして得られる値に対して、平均して 8% ほど

の誤差を持つ可能性があることが分かる。この誤差は、対象とする降水タイプによっても変わる。短時間に強度が大きく変動する対流性の降水では、層状性の降水に比べて誤差が大きいと考えられる。

付録 2 レーダーサイトにおける 1 時間積算降水強度データの処理手順

全国 19 か所の気象レーダーから L-ADESS 経由で気象庁本庁に伝送される 1 時間積算降水強度データは、レーダーサイトのレーダーエコーデジタル化装置によって、おおまかには次の手順で処理されている。より詳しい解説については、迫田 (1990) を参照されたい。

処理手順から分かるように、1 時間積算降水強度は 5 km 四方格子の地理的中央の値ではなく、また格子内の面積平均値でも最大値でもない。いわば、「5 km 四方格子内の降水強度の面積平均よりやや強い(と考えられる)代表値」(北畠・大林, 1991) である。

(1) 地形エコーの除去

気象レーダーが探知する目標体積内の降水粒子の分布は刻々と変化するため、降水エコーによる受信電力の瞬間値は時間的にも空間的にも変動が激しい。一方、地形エコーによる受信電力の変動は小さく、短時間内ではその振幅はほぼ一定とみなすことができる。

この性質の違いを利用して、受信電力を MTI (Moving Target Indication) フィルタを通すことによって、大部分の地形エコーを除去している (Tatehira and Shimizu, 1978; 中井・高橋, 1985)。

付第 1 表 レーダーエコーのサンプリング時間間隔と 1 時間雨量の測定誤差 (Harrold *et al.*, 1974)

1 分ごとのサンプリングによって得られた 1 時間雨量に対して、2 分、4 分、8 分ごとのサンプリングによる 1 時間雨量がどの程度の差 (%) を持つかを、領域面積別に表す。

領域面積 (km ²)	サンプリング時間間隔		
	2 分	4 分	8 分
156	1 %	3 %	7 %
94	1	3	8
48	2	3	8
17	2	4	8
10	3	6	10
0.4	5	9	14

(2) 受信電力の平均

受信電力を平均化する方法を、付第5図に示す。

レーダーサイトからの距離方向について、0.25 km (1.67 μ s) ごとにサンプリング処理した受信電力を1単位 (1レンジビン) とし、「 $T_n - 3$ 」から「 T_n 」までの4レンジビン分 (1 km相当) について相加平均して、「 T_n 」1レンジビンの値とする。

また、レーダーサイトを中心とする方位角方向について、パルス繰り返し周期 (1/260秒. 富士山レーダーは1/160秒) ごとにサンプリング処理した受信電力を1単位 (1スイープ) とし、「 $S_n - 15$ 」から「 S_n 」までの16スイープ分について相加平均して、「 S_n 」1スイープの値とする。

すなわち、1レンジビン1スイープの受信電力は、4レンジビン \times 16スイープの64個の値を相加平均して得られる。

(3) 受信電力データの座標変換

受信電力データはレーダーサイトからの距離と方位角による極座標型式なので、これを2.5km四方格子のデータに変換する。座標を変換する方法を、

付第6図に示す。

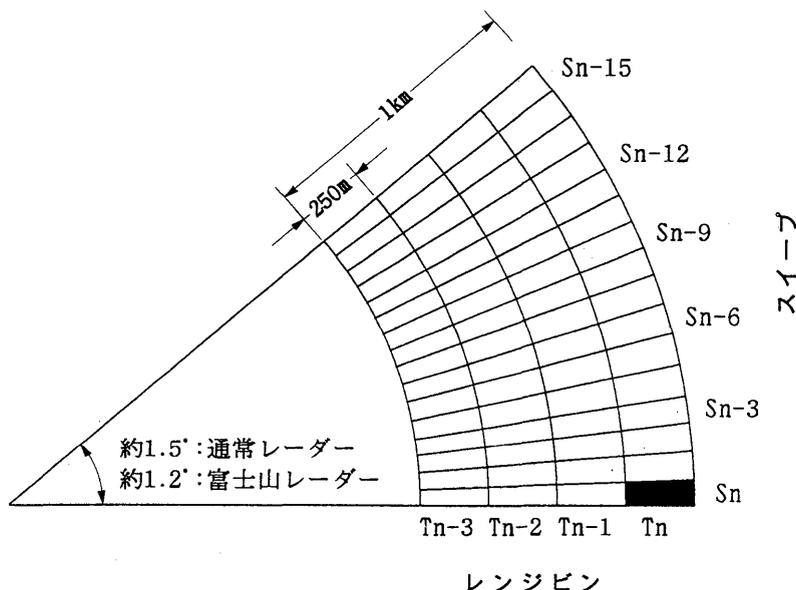
2.5km四方格子のなかには、各1レンジビン1スイープごとに多数の受信電力データが含まれるが、このうち最後のスイープで距離が最大のレンジビンの位置の値を、その格子の受信電力データとする (「LAST IN」データ)。

(4) 受信電力データの合成

気象レーダーによる雨量推定の精度を上げるためには、観測ビーム高度をなるべく地表に近くなるように設定する必要がある (付録1の第1.3節)。ところが、高度をあまり低くすると、地形エコーやシークラッター (海面の波やしぶきからのエコー) が混入する。このため、レーダー空中線の仰角が異なる3面または5面の受信電力データを用いて、レーダー探知範囲全体にわたって約2000 m上空でのデータとなるように、最適な仰角のデータを合成する。仰角合成の範囲と断面の例を、付第7図に示す。

(5) 降水強度への換算

(4)で合成したデータは、2.5km四方格子の受信電力である。これを、レーダー方程式とZ-R関係を表す式 (付録1の第1.1節) によって、降水強度



付第5図 受信電力の平均方法

黒く塗りつぶした (T_n, S_n) の受信電力は、4レンジビン ($T_n - 3 \sim T_n$), 16スイープ ($S_n - 15 \sim S_n$) の64個の値を相加平均して得る。

(mm/h単位)に換算する。

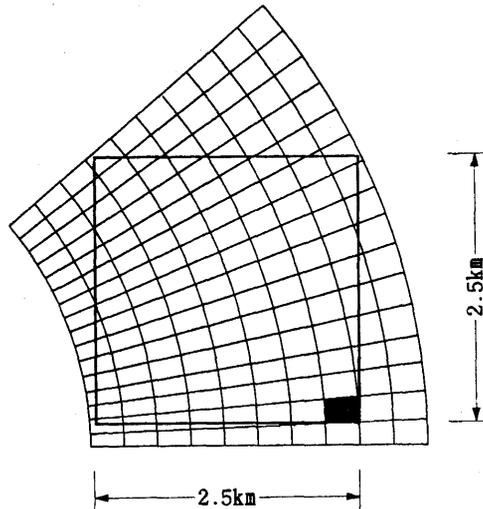
(6) 1時間積算降水強度の算出

2.5km四方格子の降水強度データを積算ファイルに加算する。1時間の観測8回分(富士山レーダーでは6回分)の加算が終了したら、これを観測回数で割ってその格子の1時間積算降水強度とする。

(7) L-ADESS向けデータファイルの作成

5km四方格子を構成する2.5km四方格子4個の1時間積算降水強度データのうち、最大のものを5km四方格子の値とする。

(8) レベル(降水強度の階級)に変換して、L-ADESSに伝送する。



付第6図 受信電力の座標変換方法(LAST IN)

2.5km四方格子の中に含まれる最後のスイープで距離が最大のレンジビンの位置(黒く塗りつぶした部分)の受信電力を、その格子の値とする。

付録3 Fx の近似値を持つ線形関係式と値に付す重み(本文の第3.2.3項に関連)

本文の第3.2.2項の処理ステップで、隣接する2つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域において、双方のレーダー雨量と観測ビーム高度の関係を比較し、 Fx の近似値を求めた。

本文の第3.2.3項の処理ステップでは、この近似値を稼働しているすべてのレーダーを対象として最小二乗法で調整し、さらに信頼性の高い値とする。最小にすべき式は、以下のとおりとする(本文の[7']式)。

$$Jx2' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} [\alpha_{ab} \cdot \{fx_a - (A_{ab} \cdot fx_b + B_{ab})\}^2 + \gamma_{ab} \cdot (fx_a - C_{ab})^2 + \delta_{ab} \cdot (fx_b - D_{ab})^2]$$

ここで、 a, b : 対象レーダー a と隣接レーダー b を示す符号

n : 稼働しているレーダーの個数

fx : 最適な Fx (求める決定値)

A_{ab}, B_{ab} : 双方の Fx の近似値を持つ線形関係式の係数(本文の第3.2.2項の処理ステップによる)

C_{ab} : Fx_a の近似値(同上)

D_{ab} : Fx_a の近似値に対応する Fx_b (同上)

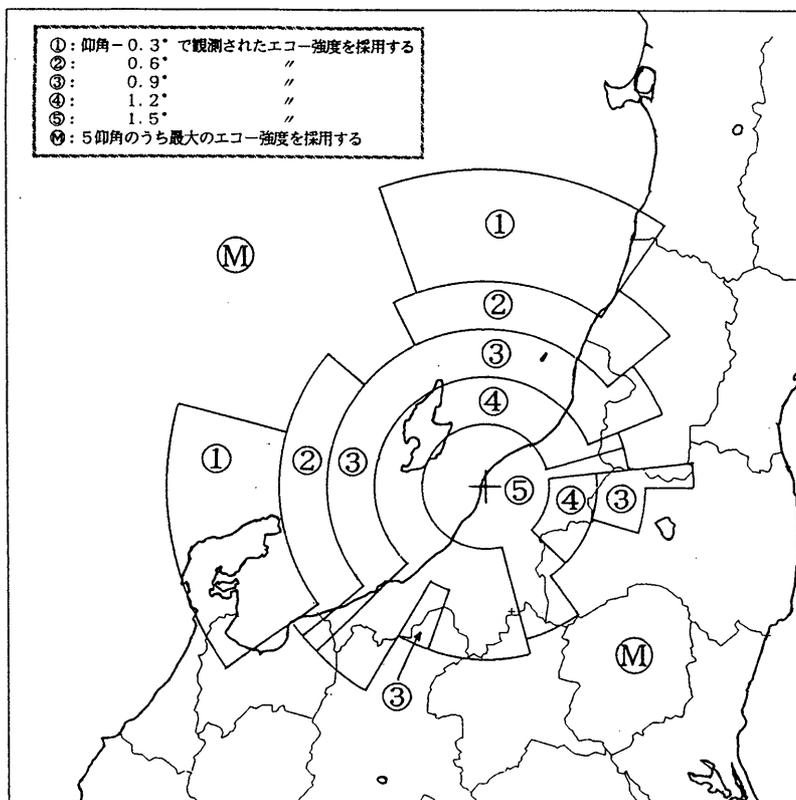
α_{ab} : 線形関係式の重み

γ_{ab} : Fx_a の近似値の重み

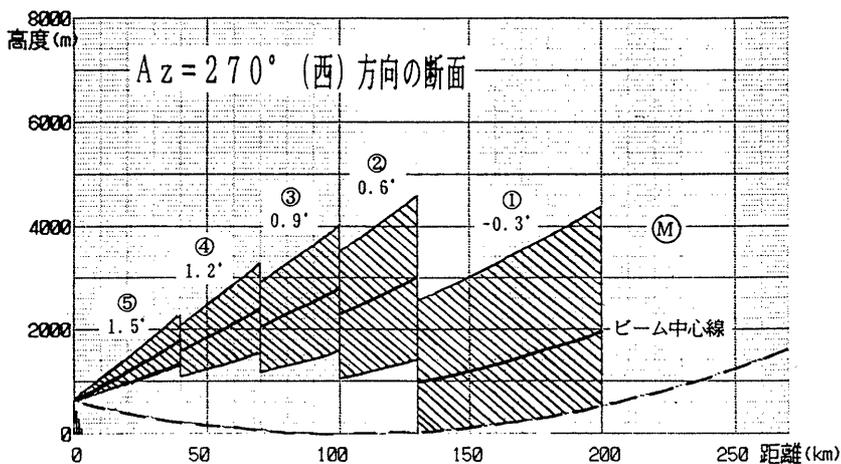
δ_{ab} : Fx_a の近似値に対応する Fx_b の重み

この式では、線形関係式と双方の Fx の近似値に、それぞれの重み $\alpha_{ab}, \gamma_{ab}, \delta_{ab}$ を付けている。これらの重みは、本文の[5]式で得られた3つの値を[4']

(1)



(2)



付第7図 エコー強度観測仰角の合成範囲と断面の例 (新潟レーダー) (横山, 1994)

- (1) デジタル処理・データ作成の範囲および仰角合成の方法。図の範囲は一辺500km (100格子) の正方形。
- (2) レーダーサイトから真西方位の断面。斜線部は鉛直方向のビーム幅、左下隅の縦線部はこの方位の地形断面 (弥彦山) を表す。

式に代入して求めた3つの残差のうち、最も小さい残差を Z_1 （これを与えた組が双方の Fx の近似値）、2番目に小さい残差を Z_2 として、次のように与えている。

一般的には、最小二乗法による残差が小さいほど得られた近似値の信頼性が高いので、 Z_1 の値に応じて3つの重みの大きさを変える。すなわち、 Z_1 が小さいときは重みを大きく、大きいときは重みを小さくする。

また、 Z_1 と Z_2 の差に応じて、 Z_1 を与えた組（すなわち近似値とした組）の重みの大きさを変える。本文の第7図に示したように、残差は隣接レーダー b の Fx （同図では fx_b の軸）の二次の関数である。したがって、 Z_1 に対する Z_2 の比（ Z_2/Z_1 ）が大きいときは、真に最適組（同図では◎印）は Z_1 を与えた組（同図では②の組）のごく近傍にあるはずなので、重みを大きくする。比が小さいときは、真に最適組は Z_1 を与えた組と Z_2 を与えた組の間にあると考えられるので、重みを小さくする。

特別な場合として、多数の小領域のエコーが、隣接レーダー b でほぼ同じビーム高度で観測される場合がある。このときのモードを、付第8図(1)に示す。レーダー b では $H_b(k)$ が一定となるから、本文の[4]式に示した $U(k)$ は次のように表すことができる。

$$U(k) = \frac{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)}{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)} = \frac{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)}{c_b \cdot E0_b(k)}$$

ここで、 c_b ：レーダー b に関する定数

このとき[4]式は Fx_b にほとんど依存しないので、微量 ϵ の加減にかかわらず[5]式で得る3つの値はほぼ同じになり、[6]式の係数 A_{ab} の絶対値は非常に小さくなる。これは、線形関係式と Fx_b の信頼性が非常に低い場合である。したがって、係数 A_{ab} の絶対値が非常に小さい値として算出された場合は、線形関係式と Fx_b の重みを0とする。 Fx_a は、対象レーダー a による観測ビーム高度とレーダー雨量の面積平均、隣接レーダー b によるレーダー雨量の面積平均を変数とする $U(k)$ の分散を最小とする値であり、 Z_1 に応じた重みとする。

上記とは逆に、多数の小領域のエコーが、対象レーダー a でほぼ同じビーム高度で観測される場合がある。このときのモードを、付第8図(2)に示す。レーダー a では $H_a(k)$ が一定となるから、本文の[4]式に示した $U(k)$ は次のように表すことができる。

$$U(k) = \frac{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)}{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)} = \frac{c_a \cdot E0_a(k)}{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)}$$

ここで、 c_a ：レーダー a に関する定数

このとき[4]式は Fx_a にほとんど依存しないので、 Fx_a の近似値を特定することができない。[6]式の係数 A_{ab} の絶対値は非常に大きくなる可能性があり、線形関係式と Fx_a の信頼性は非常に低い。したがって、係数 A_{ab} の絶対値が非常に大きい値として算出された場合は、線形関係式と Fx_a の重みを0とする。 Fx_b は、対象レーダー a によるレーダー雨量の面積平均、隣接レーダー b による観測ビーム高度とレーダー雨量の面積平均を変数とする $U(k)$ の分散を最小とする値であり、 Z_1 に応じた重みとする。

以上の考え方から、

α_{ab} ：線形関係式の重み

γ_{ab} ： Fx_a の近似値の重み

δ_{ab} ： Fx_a の近似値に対応する Fx_b の重み

Z_1 ：最も小さい残差

Z_2 ：2番目に小さい残差

W_1 ： $1/Z_1$ （ただし、 $0.1 \leq W_1 \leq 10.0$ に制限）

W_2 ： $Z_2/Z_1 - 0.75$ (> 0.25)

$|A_{ab}|$ ：線形関係式の係数 A_{ab} の絶対値

として、それぞれの重みを次のとおり与えている。

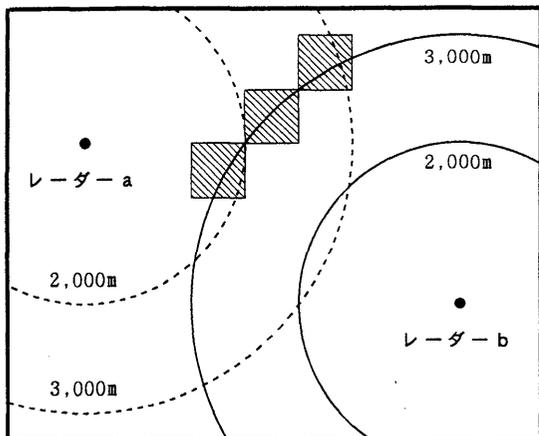
$$\alpha_{ab} = W_1$$

$$\gamma_{ab} = W_1 \cdot W_2$$

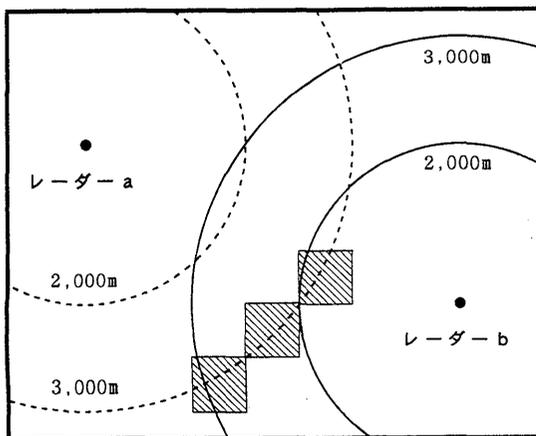
$$\delta_{ab} = 0.5 \cdot W_1 \cdot W_2$$

重み W_2 の値は Z_1 と Z_2 の比に依存する。 $Z_2 \gg Z_1$ である場合は、 $W_2 \gg 1$ すなわち $\alpha_{ab} \ll \gamma_{ab}$ 、 δ_{ab} とな

(1)



(2)



付第8図 隣接する2つのレーダーの Fx が持つ線形関係を決定できない場合を表す模式図

斜線部は双方が同時にエコーを探知した小領域、点線と実線の円は双方の観測ビーム高度を表す。

- (1) 多数の小領域のエコーが隣接レーダー b でほぼ同じビーム高度で観測される場合は、線形関係式の係数 A_{ab} の絶対値が非常に小さくなる。
- (2) 多数の小領域のエコーが対象レーダー a でほぼ同じビーム高度で観測される場合は、線形関係式の係数 A_{ab} の絶対値が非常に大きくなる可能性がある。

る。線形関係式は、それが表す直線の近くに真に最適な Fx の組 (本文の第7図に示した◎印) が存在するであろうとの考えで設定したものである。この場合は、真に最適な組は Z_1 を与えた組 (近似値として選んだ組) のごく近傍にあるはずなので、相対的に大きな Z_2 を与えた組との間で求めた線形関係式よりも双方の Fx の近似値を重視する。逆に Z_1 と Z_2 の差がわずかである場合は、 $W_2 \approx 0.25$ すなわち $\gamma_{ab}, \delta_{ab} < \alpha_{ab}$ となる。この場合は、真に最適な組は Z_1 を与えた組と Z_2 を与えた組の間にあると考えられるので、 Fx の近似値よりも線形関係式を重視する。

なお、特別な場合に与える重みは次のとおりである。16という値は経験的に与えた。

- ① $|A_{ab}| < 1/16$ であった場合 (付第8図(1)),
または残差0の完全な値が得られた場合

$$\alpha_{ab} = 0.0$$

$$\gamma_{ab} = W_1$$

$$\delta_{ab} = 0.0$$

- ② $|A_{ab}| > 16$ であった場合 (付第8図(2))

$$\alpha_{ab} = 0.0$$

$$\gamma_{ab} = 0.0$$

$$\delta_{ab} = 0.5 \cdot W_1$$

付録4 Fa の決定値を求める方法 (本文の第3.2.5項に関連)

本文の第3.2.4項で求めた Fa の近似値を、稼働しているすべてのレーダーを対象とした最小二乗法で調整し、決定値を求める。

その際に、隣接する2つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域で双方の雨量一次解析値を比較するとともに、アメダス格子における雨量一次解析値とアメダス雨量を比較して、 Fa を決定するための式を作成する。ただし、ここでの雨量一次解析値とは解析途上の仮の値である。

4.1 隣接レーダーとの比較

「雨量解析値は隣接する2つのレーダーが共通して

探知する範囲で一致すべき」という条件(2)に従って、同時にエコーを探知した小領域で双方の雨量一次解析値を比較する。

この条件は、本文の [2] 式から次のように表される。

$$E1(k) = Fa_a \cdot \{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k) \\ = Fa_b \cdot \{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)$$

ここで、 a, b : 対象レーダー a と隣接レーダー b を示す符号

k : 隣接する 2 つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域

$E1(k)$: k における雨量一次解析値の面積平均 (双方のレーダーで一致)

Fa : Fa の近似値 (本文の第3.2.4項の処理ステップによる)

Fx : Fx の決定値 (本文の第3.2.3項の処理ステップによる)

$H(k)$: k における観測ビーム高度の面積平均 (100m単位)

$E0(k)$: k におけるレーダー雨量の面積平均
最適な Fa (求める決定値) を fa と表すと、対象レーダーの fa_a と隣接レーダーの fa_b は、次の $Ja1$ を最小にする値として求められる。ただし、以下で加算をとることから、差が正の値と負の値で打ち消さないよう、二乗している。対数で表すのは、稼働しているすべてのレーダーを対象とした最小二乗法で fa を決定する際に、0 が解となるのを避けるためである。

$$Ja1 = [\ln \{fa_a \cdot (1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2) \cdot E0_a(k)\} \\ - \ln \{fa_b \cdot (1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2) \cdot E0_b(k)\}]^2 \\ \dots\dots\dots [A1]$$

[A1] 式を、多数の小領域を対象に、稼働しているすべてのレーダーで加算する。

$$Ja1' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} \sum_{k=1}^m [\ln \{fa_a \cdot (1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2) \cdot E0_a(k)\} \\ - \ln \{fa_b \cdot (1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2) \cdot E0_b(k)\}]^2$$

ここで、 n : 稼働しているレーダーの個数

m : 隣接する 2 つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域の個数

これを変形して次式を得る。

$$Ja1' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} \sum_{k=1}^m [fa_a' - \{fa_b' + \beta_{ab}'(k)\}]^2 \\ \dots\dots\dots [A1']$$

ここで、 $fa_a' = \ln(fa_a)$

$fa_b' = \ln(fa_b)$

$$\beta_{ab}'(k) = \ln \left[\frac{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)}{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)} \right]$$

: 隣接する 2 つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域における Fa 比 (自然対数表示)

[A1'] 式の $Ja1'$ を最小にする fa が、最適な Fa (求める決定値) の候補である。ただし、小領域の個数は共通して探知する範囲全体の面積やその時刻のエコー出現状況によって異なるので、[A1'] 式のままだと、 $Ja1'$ を最小にする fa の算出には、より多くの小領域を持つレーダー間の比較結果が優先されてしまう。そこで、 $\beta_{ab}'(k)$ で表す小領域個々の Fa 比ではなく、レーダー探知範囲内で平均した Fa 比を使用し、各レーダー間の比較結果の重みを等しくする。

隣接する 2 つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域では、 Fa 比は次の式で表される (本文の [3] 式で分子と分母を入れ替えたもの。ただし自然対数表示)。

$$\ln \left[\frac{Fa_a}{Fa_b} \right] = \ln \left[\frac{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)^2\} \cdot E0_b(k)}{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)^2\} \cdot E0_a(k)} \right]$$

この式の右辺 ($V(k)$ と表す) に、 Fx の決定値と、各小領域の観測ビーム高度の面積平均及びレーダー雨量の面積平均を代入する。多数の小領域個々の Fa 比を次の式によって加重平均し、2レーダー間の平均的な Fa 比を求める。

$$\beta_{0ab}' = \frac{\sum_{k=1}^m \{W_4(k) \cdot V(k)\}}{\sum_{k=1}^m W_4(k)} \\ \dots\dots\dots [A2]$$

ここで、 β_{0ab}' : 2レーダー間の平均的な Fa 比 (自然対数表示)

m : 隣接する 2 つのレーダーが同時にエコーを探知した小領域の個数

$W_4(k)$: k における Fa 比の重み

$$V(k) = \ln \left[\frac{\{1 + Fx_b \cdot H_b(k)\} \cdot E0_b(k)}{\{1 + Fx_a \cdot H_a(k)\} \cdot E0_a(k)} \right]$$

[A2] 式の重み $W_4(k)$ は、小領域の観測ビーム高度の面積平均によって、次の順に決定する。

- ① 最初に $W_4(k)$ に 8.0 を与える
- ② 対象レーダーと隣接レーダーが共に 3000m 未満であれば、 $W_4(k)$ はそのまま 8.0 とする
- ③ 対象レーダーが 3000m 以上であれば、 $W_4(k)$ を半分にする
- ④ 隣接レーダーが 3000m 以上であれば、 $W_4(k)$ を半分にする
- ⑤ 対象レーダーが 4000m 以上であれば、 $W_4(k)$ をさらに半分にする
- ⑥ 隣接レーダーが 4000m 以上であれば、 $W_4(k)$ をさらに半分にする

すなわち、小領域の観測ビーム高度の面積平均が対象レーダーと隣接レーダーで共に 4000m 以上であれば、③から⑥までが該当するので $W_4(k)$ は $8.0/2^4 = 0.5$ となる。この重みは、 Fa は観測ビーム高度が非常に低い所の雨量係数であることから、低いビーム高度で探知された小領域の Fa 比を重視したものである。

エコーのある領域やエコーの強度が時間的に大きく変化するとき、2レーダー間の平均的な Fa 比は、時刻によって変動することがある。これを抑えて時間的に安定した結果を得るため、1時間前の Fa 比 β_{1ab}' も考慮する。[A2] 式と同じ手順で算出できるが、雨量解析処理では [A2] 式で表される行列を毎時刻に保存し、次の時刻の処理で β_{1ab}' として使用している。

2レーダー間の平均的な Fa 比を使用して、[A1'] 式を次のように改める。

$$Ja1'' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} \{fa_a' - (fa_b' + \beta_{0ab}')\}^2 \quad \dots [A1'']$$

$$Ja1''' = \sum_{a=1}^n \sum_{b \neq a} \{fa_a' - (fa_b' + \beta_{1ab}')\}^2 \quad \dots [A1''']$$

ここで、 β_{0ab}' : 処理時刻における 2レーダー間の平均的な Fa 比 (自然対数表示)

β_{1ab}' : 1時間前における 2レーダー間の平均的な Fa 比 (自然対数表示)

[A1''] 式の $Ja1''$ と [A1'''] 式の $Ja1'''$ を同時に最小にする fa を、最適な Fa (求める決定値) の候補とする。

4.2 アメダス雨量との比較

次に、「雨量解析値はアメダス雨量と一致すべき」という条件(3)に従って、アメダス格子における雨量一次解析値とアメダス雨量を比較する。この条件は、次の式で表される。

$$Fa_a \cdot \{1 + Fx_a \cdot H_a(i)\}^2 = R_a(i) / E0_a(i)$$

ここで、 a : あるレーダーを示す符号

i : レーダー探知範囲内のアメダス格子

$R_a(i)$: i におけるアメダス雨量

$E0_a(i)$: i におけるレーダー雨量

$H_a(i)$: i における観測ビーム高度 (100m 単位)

最適な Fa (求める決定値) を fa と表すと、対象レーダーの fa_a は、次の $Ja2$ を最小にする値として求められる。ただし、以下で加算をとることから、差が正の値と負の値で打ち消さないよう、二乗している。対数で表すのは、稼働しているすべてのレーダーを対象とした最小二乗法で fa を決定する際に、0 が解となるのを避けるためである。

$$Ja2 = [\ln \{fa_a \cdot (1 + Fx_a \cdot H_a(i))^2\} - \ln \{R_a(i) / E0_a(i)\}]^2 \quad \dots [A3]$$

[A3] 式を、多数のアメダス格子を対象に、稼働しているすべてのレーダーで加算する。

$$Ja2' = \sum_{a=1}^n \sum_{i=1}^j [\ln \{fa_a \cdot (1 + Fx_a \cdot H_a(i))^2\} - \ln \{R_a(i) / E0_a(i)\}]^2$$

ただし、 n : 稼働しているレーダーの個数

j : レーダー探知範囲内にあるアメダス格子の個数

これを变形して次を得る。

$$Ja2' = \sum_{a=1}^n \sum_{i=1}^j \{fa_a' - Fa_a'(i)\}^2 \quad \dots [A3']$$

ここで、 $fa_a' = \ln (fa_a)$

$$Fa'_a(i) = \ln \left[\frac{R_a(i)}{\{1 + Fx_a \cdot H_a(i)^2\} \cdot E0_a(i)} \right]$$

[A3'] 式の $Ja2'$ を最小にする fa が、最適な Fa (求める決定値) の候補である。ただし、レーダー雨量と対応するアメダス格子の個数はレーダー探知範囲内にあるアメダス格子の数とその時刻の降水状況によって異なるので、[A3'] 式のままだと、 $Ja2'$ を最小にする fa の算出には、対応するアメダス格子がより多くあるレーダーでの比較結果が優先されてしまう。そこで、アメダス格子個々の Fa ではなく、レーダー探知範囲内で平均した Fa (本文の第3.2.4項の処理ステップで得られた「アメダス雨量との比較による Fa 」) を使用して、アメダス雨量との比較結果の重みを各レーダーで等しくする。

これにより、[A3'] 式を次のように改める。

$$Ja2'' = \sum_{a=1}^n (fa'_a - Fa'_a)^2 \dots\dots\dots [A3'']$$

ここで、 Fa'_a : アメダス雨量との比較による Fa (自然対数表示)

[A3''] 式の $Ja2''$ を最小にする fa を、最適な Fa (求める決定値) の候補とする。

付録5 雨量較正の繰り返し回数によって変化する処理の仕方(本文の第3.3節に関連)

陸上にある格子について、レーダー探知範囲全体で算出された雨量一次解析値をアメダス雨量と比較して補正し、さらに信頼性の高い雨量二次解析値とする。この処理は計3回繰り返すが、繰り返しの回数によって、処理の仕方が以下のとおり変わる。

5.1 アメダス雨量と比較する雨量解析値の与え方

ある格子のレーダー雨量とその格子内にあるアメダス雨量は、特にスケールが小さい降水の場合は、必ずしも対応が良くない(北畠・大林, 1991)。すなわち、「アメダス雨量と対応すべきレーダー雨量」と「アメダス格子のレーダー雨量」が違うことになる。

この原因は、次のように考えられる。

- ① レーダーサイトにおける処理で、5 km 四方格子のレーダー雨量として、2.5 km 四方の4格子中の最大値を採用していること。
- ② 雨量計は、5 km 四方格子のなかの平均雨量と最大雨量を捕捉しているわけではないこと。

- ③ 気象レーダーは高度2000 m 付近に分布する雨粒を観測しているが、雨粒が落下する途中の風による影響を受け、隣接する格子で地上に達する場合があること。

このような例の模式を、付第9図に示す。

このことから、2回目と3回目の繰り返してアメダス格子の二次補正係数が1.0と比べて極端に大きい小さい場合は、アメダス雨量と対応する雨量解析値はアメダス格子の値ではないと判断し、アメダス雨量と対応させる雨量解析値(本文の[12]式に示した $E1'(i)$)には、アメダス格子の雨量解析値 X と隣接する1格子の雨量解析値 Y を次の式で比例配分した値を使用する。

$$E1'(i) = (1.0 - s) \cdot X + s \cdot Y$$

ここで、 s : 条件によって0.0から1.0まで変化する数

実際には、アメダス雨量と対応する雨量解析値を特定することが困難なため、次のように処理している。

- ① 得られた二次補正係数が1/1.3 (=0.77) より小さいときは、付第9図(1)のような状況であると判断し、上記の Y に周辺3×3格子内の最小値を使用してアメダス雨量と対応させる雨量解析値を求め、二次補正係数を再計算する。
- ② 得られた二次補正係数が1.3より大きいときは、付第9図(2)のような状況であると判断し、上記の Y に周辺3×3格子内の最大値を使用して再計算する。

なお、1.3は経験的に与えた値である。

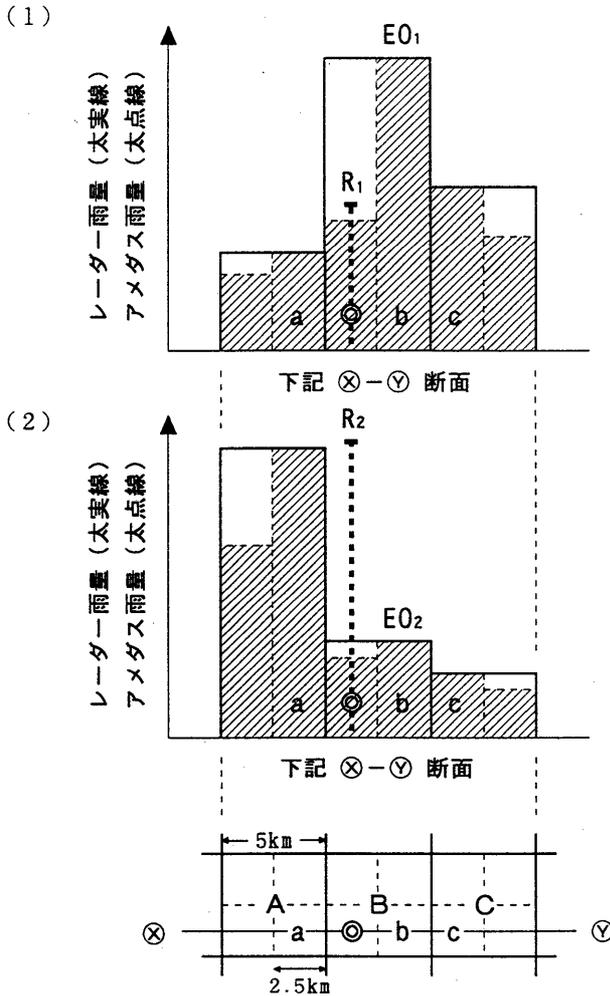
5.2 重みの与え方

本文の[14]式で与えた重みに含まれる係数 D 、 P_1 、 Q の値は、処理の繰り返しの回数で変えている。

距離重みの D は、繰り返しの回数が増えるに従って小さくなるので、あとの繰り返しほど対象格子に距離的に近いアメダス格子の二次補正係数の重みが大きくなる。

レーダー雨量比重みの P_1 と Q は、繰り返しの回数が増えるに従って分子の P_1 は小さく、分母の Q は大きくなるので、あとの繰り返しほど対象格子とレーダー雨量の差が大きいアメダス格子の二次補正係数の重みが小さくなる。

処理の繰り返しの回数で重みを与える式の係数 D 、



付第9図 5km 四方格子のレーダー雨量とその格子内にあるアメダス雨量が対応しない例を表す模式図
 斜線部は2.5km 四方格子で観測されたレーダー雨量，縦の太点線はアメダス雨量を表す．5km 四方のA, B, C格子のレーダー雨量(太実線)には，各々が含む4つの2.5km 四方格子のうち，最大の1時間積算降水強度を観測したa, b, c格子のレーダー雨量が採用されたとする．⊙は，アメダス雨量観測点を含む2.5km 四方格子を表す．

(1)のようなレーダー雨量の分布をしている場合で，⊙格子上空のレーダー雨量として観測された雨粒がそのまままっすぐ地上に降って雨量計で測定されたときは，B格子の雨量係数 ($R_1/E0_1$) はかなり小さくなる．

一方(2)のような場合で，a格子のレーダー雨量として観測された雨粒が落下途中の風による影響を受けて，隣の⊙格子の雨量計で測定されたときは，B格子の雨量係数 ($R_2/E0_2$) はかなり大きくなる．

以上のようなとき，アメダス雨量は，アメダス雨量観測点を含むB格子のレーダー雨量(b格子の値による)よりも隣のA格子のレーダー雨量(a格子の値による)と比較した方がよい．このようなケースは，局地的な対流性降水のときに発生しやすい．

P_1 , Q の値を変える理由は、以下のとおりである。

対象格子がアメダス格子であっても、本文の [13] 式と [14] 式によって二次補正係数が算出される。そのときに周辺のアメダス格子の二次補正係数も内挿されるため、そのアメダス格子で本文の [12] 式によって算出した二次補正係数との間に差が生じてしまう。そこで、重みの値を変えながら平均化の操作を繰り返すことで、この差を少なくする。

5.3 補正に関するアメダス格子の数が少ない場合の操作

水平スケールが小さい対流性の降水のときは、本文の [13] 式と [14] 式による二次補正係数の算出に關与するアメダス格子の数が少ないことが多い。この場合は、数が少ないうえに、雨粒落下途中の風による影響でレーダー雨量と必ずしも対応の良くないアメダス雨量が二次補正係数の算出に使用され、ひいては解析雨量の精度に大きく影響することがある。そこで、加重平均に關与するアメダス格子の数が少ない場合は、信頼性の低い過大・過小な雨量解析値とならないよう、二次補正係数の算出にあたって以下の操作を行う（ただし1回目の処理でのみ）。

- ① 対象格子の二次補正係数に及ぼすアメダス雨量の影響を抑制し、対象格子での雨量係数の二次近似値（本文の [15] 式による）は、雨量係数の一次近似値から大きく変わらないようにする。
- ② ①の操作を行った後、過去3時間までさかのぼってアメダス雨量とアメダス格子を中心とする 3×3 格子のレーダー雨量の対応関係を調べ、アメダス格子の二次補正係数を調整する。

付録6 雨量較正にレーダー雨量比重みを考慮する理由とその役割（本文の第3.3節に關連）

Z-R 関係を表す式（付録1の第1.1節）を降水強度について書き換えると、次のようになる。

$$R = (Z/B)^{1/\beta}$$

ここで、 R : 降水強度 (mm/h)

Z : レーダー反射因子 (mm^6/m^3)

係数の B と β は、現業的には層状性の降水を対象とすることに相当する標準値 ($B = 200$, $\beta = 1.6$) に固定されているが、対象とする降水が強い対流性で

ある場合、付録1の付第2図で分かるように B を大きく（例えば400）、 β を小さく（例えば1.2）する必要がある。指数 β の値の方が降水強度の値を大きく左右するため、標準値の係数で換算される降水強度は、強い対流性の降水に即した係数で換算される値より小さくなる。このことから一般に、「雨量係数は強雨のときに大きい」、または「雨量係数は強雨の場所で大きい」という関係があると考えられる。

簡単のため、付第10図(1)のように南北方向に帯状の強雨域がある場合を考える。このときのアメダス格子の雨量係数は、「雨量係数は強雨の場所で大きい」という関係から、図中の括弧内に示す値になるとする。アメダス格子の雨量係数から距離重みによって雨量係数の分布を算出し雨量解析値を求めると、その分布は付第10図(2)のようになる。アメダス格子の雨量解析値はどれもアメダス雨量と等しくなっているが、その分布は元のレーダー雨量の分布とはかなり異なっている。一方、レーダー雨量比重みを使用すると、雨量係数の分布はレーダー雨量の分布に依存することから、付第10図(3)のようになる。アメダス格子の雨量二次解析値はどれもアメダス雨量と等しくなっており、しかもその分布は元のレーダー雨量の分布を再現している。

2つの重みの大きさは、レーダー雨量比重みの方が大きい。すなわち、対象格子の二次補正係数は、距離が近いアメダス格子の係数より、同程度のレーダー雨量を観測したアメダス格子の係数に近くなる。

レーダー雨量比重みは、Z-R 関係を表す式の固定された係数 B と β 、とりわけ降水強度の値をより大きく左右する β の方を、格子ごとに調整する役割を持つ。

付録7 平均強度の比較による最大値法の特徴（本文の第3.4.2項に關連）

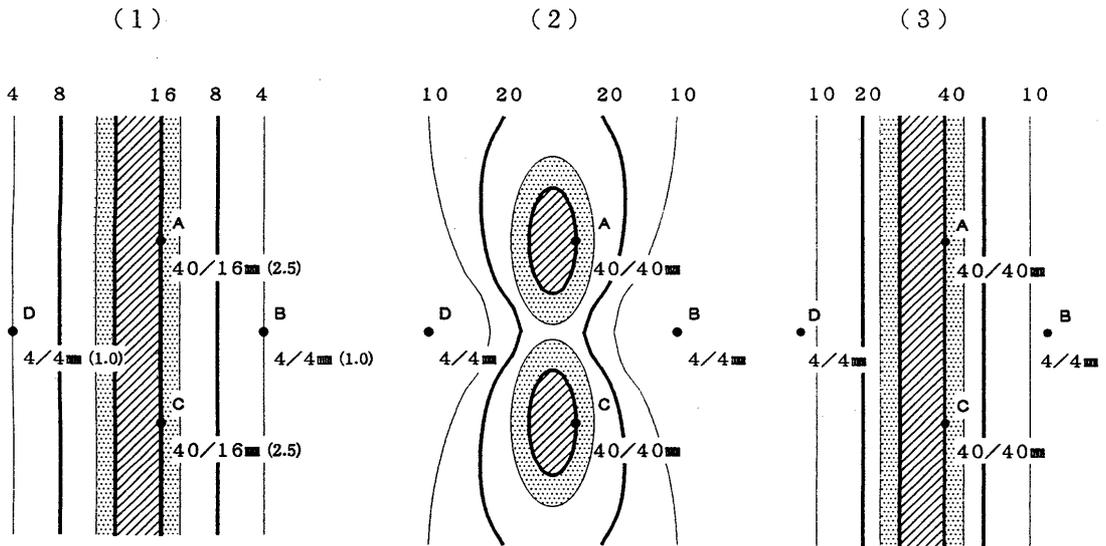
レーダーごとに得られた雨量解析値を全国をカバーする領域で合成して解析雨量を決定する際に、合成領域の1格子に複数のレーダーによる雨量解析値が対応する場合は、その格子を含む周囲 4×4 格子の小領域について各レーダーで観測した1時間積算降水強度の面積平均を比較し、平均強度の最大値を与えたレーダーによる雨量解析値を合成に採用するという最大値法を使用している。この方法には、次のような特徴がある。

レーダーごとの観測格子の位置は、各レーダーサイトの地理的位置を基準に東西方向と南北方向の配列で

設定しているため、隣接するレーダーが共通して探知する範囲でそれぞれの観測格子がぴったりと重なるわけではない。このため、各レーダーでの雨量解析値を1対1の対応をするように合成領域の格子に割り当てるとき、合成の対象とする1格子のみについて複数のレーダーによる値を比較して最大値を採用すると、同じ降水域を対象とした雨量解析値が合成領域の別々の格子に割り当てられることがあり、結果として降水域が拡大してしまう。合成の対象とする1格子を含む周囲4×4格子の小領域で平均強度を比較して、平均強度の最大値を与えたレーダーによる雨量解析値を割り当てることによって、降水域の拡大をある程度避けることができる。

簡単のため各レーダーで観測したエコー強度を合成するとして、小領域での平均強度の比較による最大値法の特徴を表す模式を付第11図に示す。小さな孤立エコーが1個存在しているとして、Aレーダーではひとつの格子で10、Bレーダーでもひとつの格子で8のエ

コー強度を観測し、それぞれの格子が合成領域ではcとdの格子(c≠d)に対応しており、これらの格子以外にエコーはないものとする。すなわち、合成領域のc格子に対応する両レーダーの観測格子では、Aレーダーで強度10、Bレーダーでは0(ノーエコー)、d格子に対応する両レーダーの観測格子では、Aレーダーで強度0(ノーエコー)、Bレーダーでは8であるとする。この場合、合成の対象とする格子のみで両レーダーのエコー強度を比較して最大値を採用すると、c格子にはAレーダーで観測した10、d格子にはBレーダーで観測した8の値が割り当てられてしまう。一方、平均強度による最大値法では合成の対象とする格子を含む周囲4×4格子の小領域でエコー強度の面積平均を比較するため、c格子周辺の平均強度は、Aレーダーによる観測値で10/16、Bレーダーによる観測値で8/16となる。d格子周辺の平均強度もまったく同じである。この結果、c、d格子には共に平均強度の最大を与えたAレーダーによる観測値



付第10図 二次補正係数を各格子に内挿する際に2つの重みが果たす役割を表す模式図

(1) 観測されたレーダー雨量の分布とアメダス雨量

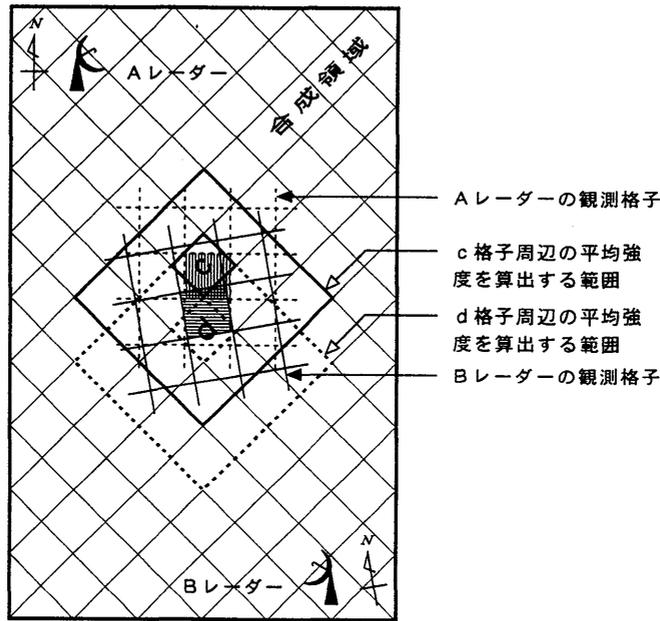
A, B, C, Dの各点はアメダス格子を表す。各点の数字は、左から「アメダス雨量/レーダー雨量(雨量係数)」を表す。

(2) 「距離重み」で推定した雨量解析値の分布

各点の数字は、左から「アメダス雨量/雨量解析値」を表す。

(3) 「レーダー雨量比重み」で推定した雨量解析値の分布

各点の数字は(2)と同じ。



付第11図 小領域での平均強度の比較による最大値法の特徴を表す模式図

Aレーダーでは縦縞のパターンで塗りつぶした格子のみに10の強さのエコー、Bレーダーでは横縞のパターンで塗りつぶした格子のみに8の強さのエコーを観測し、両格子は合成領域のc格子とd格子に対応しているとする。

レーダーごとの観測格子の位置は、各レーダーサイトの地理的位置を基準に東西方向と南北方向の配列で設定しているため、この模式のように隣接するレーダーの観測格子は一般にぴったりと重ならない。

が採用され、c格子には10、d格子には0（ノーエコー）の値が割り当てられる。エコー域が拡大することはない。

なお、小領域の平均強度が同じ場合は、合成の優先度が高いレーダーによる値が採用される。

参 考 文 献

Browning, K. A. and C. G. Collier (1982) : An Integrated Radar-Satellite Nowcasting System in the UK. Nowcasting, 47-61.

Collier, C. G., T. W. Harrold, and C. A. Nicholass (1975) : A Comparison of Areal Rainfall as Measured by a Raingauge-calibrated Radar System and Raingauge Networks of Various Densities. Preprints of 16th Radar Meteor. Conf., 467-472.

Fujiwara, M. (1965) : Raindrop-size Distribution from Individual Storms. J. Atmos. Sci., 22, 585-591.

Harrold, T. W., E. J. English, and C. A. Nicholass (1974) : The Accuracy of Radar-derived Rainfall Measurements in Hilly Terrain. Q. J. R. Meteor. Soc., 100, 331-350.

Joss, J. and A. Waldvogel (1970) : A Method to Improve the Accuracy of Radar Measured Amounts of Precipitation. Preprints of 14th Radar Meteor. Conf., 237-238.

北島尚子・大林正典 (1991) : レーダー・アメダス合成図と東京都の雨量観測網による観測値との比較. 研究時報, 43, 285-310.

建設省国土地理院 (1984) : 国土数値情報. 建設省国土地理院地図管理部, 14pp.

牧原康隆 (1990) : レーダーエコー合成図における合

- 成手法について. レーダー観測技術資料, 第39号, 1-10.
- 牧原康隆 (1993) : レーダー・アメダス合成図の精度. 気象, (434), 4-8.
- 牧原康隆 (1995) : 降水短時間予報に適した標準レーダーの新しいエコー強度レベル代表値. 研究時報, 47, 67-76.
- Marshall, J. S. and W. M. Palmer (1948) : The Distribution of Raindrops with Size. J. Meteor., 5, 165.
- 中井公太・高橋俊二 (1985) : レーダーの受信信号の統計的性質とMTIフィルタによる地形エコー除去の原理. 測候時報, 52, 173-184.
- 饒村 曜 (1985) : 東京都の雨量観測網から見たレーダー・アメダス雨量合成図. 研究時報, 37, 1-13.
- 迫田優一 (1990) : 気象レーダーのデジタル化について. 天気, 37, 659-670.
- 田畑 明 (1995) : レーダー・アメダス解析雨量とレーダーデータの品質について. レーダー観測技術資料, 第44号, 1-20.
- Tatehira, R. and T. Shimizu (1978) : Intensity Measurement of Precipitation Echo Superimposed on Ground Clutter—A New Automatic Technique for Ground Clutter Rejection—. Preprints of 18th Radar Meteor. Conf., 364-369.
- 山本 哲 (1991) : レーダー・アメダス合成値による月降水量推定の検討. 研究時報, 43, 311-322.
- 予報部予報課 (1990) : 降水短時間予報技術解説書. 41pp.
- 予報部予報課 (1991) : 降水短時間予報プロダクト作成におけるデータ処理について. 測候時報, 58, 189-207.
- 予報部予報課 (1993) : レーダー・アメダス合成値と東京都の雨量観測網データの比較結果. 降水短時間予報技術連絡 No. 10, 14pp. (内部資料)
- 予報部数値予報課 (1993) : 平成5年度数値予報研修テキスト. 数値予報解説資料第26号, 70pp.
- 横山辰夫 (1994) : 気象庁におけるレーダー観測について. 気象, (448), 10-14.