

## 降雨の有無の判定アルゴリズムの開発

熊谷 博<sup>\*1</sup> 古津 年章<sup>\*2</sup> 井口 俊夫<sup>\*2</sup>

(1996年5月17日受理)

### DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR RAIN/NO-RAIN DISCRIMINATION

By

Hiroshi KUMAGAI, Toshiaki KOZU, and Toshio IGUCHI

An algorithm for the discrimination of whether rain exists or not in the TRMM PR (Precipitation Radar) data is being developed. The rain/no-rain discrimination will provide useful information for on-line data processing, data storage, and data analysis in the post processing. The rain/no-rain flag representing the possibility of rain at an angle bin is generated in this algorithm. To determine proper threshold values for discrimination, radar signal statistics are considered under the particular parameters of the TRMM PR, such as logarithmic detection, number of pulse integration, and signal to noise ratio. The effect of the surface clutter contamination to the radar signal is evaluated and the range at which the contamination appears is extracted from the data used for discrimination. To meet the requirements for the various applications of the rain/no-rain flag, the status of rain condition is classified into three classes as "rain certain", "rain possible", and "rain little" by using two threshold values. Also discussed is how to derive a flag for the rain/no-rain discrimination for an angle bin from an array of radar range data.

[キーワード] TRMM (熱帯降雨観測衛星), レーダ信号の統計, 降雨の有無の判定.

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), Radar signal statistics, Rain/no-rain discrimination.

#### 1. はじめに

TRMM 降雨レーダのデータ処理アルゴリズムの中に、降雨の有無を判定するアルゴリズムが含まれている。このアルゴリズムは、レーダの瞬時の観測点で降雨が存在するか否かを判定し、降雨の有無を表すフラグを出力するものである。降雨判定の目的は、それ以降に行われる実時間データ処理の中で、降雨データを抽出することを容易にするとともに、降雨判定に基づき無降雨時のデー

タの大部分を消去し、保存するデータ容量を縮小することにも使われる。さらに、降雨判定の結果は、研究目的でレーダデータの解析を行う場合にも利用される。

降雨の有無の判定は、基本的にはレーダエコーの強さが、あるしきい値を越えるか否かで判定する。しかしながら、レーダエコーおよびそれに重畳される雑音は、ともにある確率分布に従う独立なランダム変数と考えられる。このため、降雨の有無の判定は確率的な現象であり、確率的に最適となるしきい値を決定することが必要である。また、地表面の近くでは、アンテナビームが地表面エコーを拾う表面クラッターの影響が無視できないため、表面クラッターにより降雨判定が影響を受けないように

\*1 関東支所 地球観測技術研究室

\*2 地球環境計測部 電波計測研究室



考慮する必要がある。以上の点を考慮して、最適なしきい値の数やその値、さらにしきい値を使ったフラグの決定手法について検討する。さらに、本アルゴリズムでは、降雨層の高さも求める。

本報告では、降雨判定におけるしきい値の決定法等に関する検討と、実際のアルゴリズムの内容について紹介する。

## 2. TRMM 降雨レーダ観測

### 2.1 観測データの構成

TRMM 降雨レーダはアクティブフェーズドアレイ方式のレーダであり、軌道に直交方向に高速なアンテナ走査が行われる。走査角の範囲は±17度であり、これにより1回のパスで約220kmの幅を観測する。地表でのフットプリントの大きさは直下点で4.3kmであり、軌道に対し直角、平行方向とも、フットプリントは観測領域内ではちゅう密に並んでいる。各フットプリントに対応するアンテナ走査角をアングルビンと呼び、1回のアンテナ走査では49個のアングルビンが観測される。各アングルビン内の距離方向の分解能は250mであり、これを1レンジビンと呼ぶ。レーダデータが取得されるレンジの範囲(レンジウインドウ)として、地球表面(海面高度)から高度15kmまでの領域は、衛星高度及び姿勢変動によらずデータが保証されている。これより上の高度では、衛星の高度、姿勢の変動によりデータが得られない場合がある。しかし降雨判定では基本的に高度20kmまでのデータを使用することとし、20km高度までデータが得られない場合は、利用できる上限までのデータを利用する。

本アルゴリズムは、TRMM データ処理アルゴリズムの中で、1B と呼ばれるレベルに属している<sup>(1)</sup>。このレベルではデータ処理は瞬時のアングルビンのデータを対象としている。従って、本アルゴリズムでは各アングルビン毎に受信信号の強度から降雨の有無を判定し、フラグを出力する。この場合、各アングルビンにおける高さ方向の降雨分布の情報を判定に利用する。ところで、TRMM 降雨レーダでは降雨の3次元分布が取得されるため、さらに水平方向での分布を考慮して、降雨の判定を行うことも可能である。しかしながら、このようなアルゴリズムは、より進んだ研究段階のアルゴリズムとして考慮すべきであり、定常運用のアルゴリズムとしては作成しない。

### 2.2 信号対雑音比

TRMM 降雨レーダの1パルス当たりの信号対雑音比(SNR)は、一般的な地上降雨レーダ観測と比べるとかなり低い値となる。通常のレーダ観測では、多数のパル

スにわたり結果を積分し、ばらつきの少ない測定値を求める。このような積分後のSNRは、下式で与えられる等価SNRで評価することができる<sup>(2)(3)</sup>。

$$SNR_{eff} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ \frac{1}{N_r} \left( 1 + \frac{1}{S_n} \right)^2 + \frac{1}{N_n} \left( \frac{1}{S_n} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \dots\dots(1)$$

ここで、 $N_r$ 、 $N_n$ 、 $S_n$ はそれぞれ、受信電力の積分パルス数、システム雑音電力の積分数、および1パルス当たりのSNRである。また $\sqrt{6}/\pi$ は、対数検波の効果を補正する係数である。TRMM 降雨レーダにおいては、 $N_r=64$ 、 $N_n=256$ に設定されている。また、TRMM レーダ受信機は降雨量0.7mm/hに対して、1パルスあたりのSNRが1となる( $S_n=1$ )ように設定されている。ここで、熱帯降雨のZ-R関係として、

$$Z = 372R^{1.54} \dots\dots(2)$$

を使用する。降雨量0.7mm/hに相当する等価SNRを(1)式から計算すると、 $SNR_{eff}=+4.8\text{dB}$ となる。

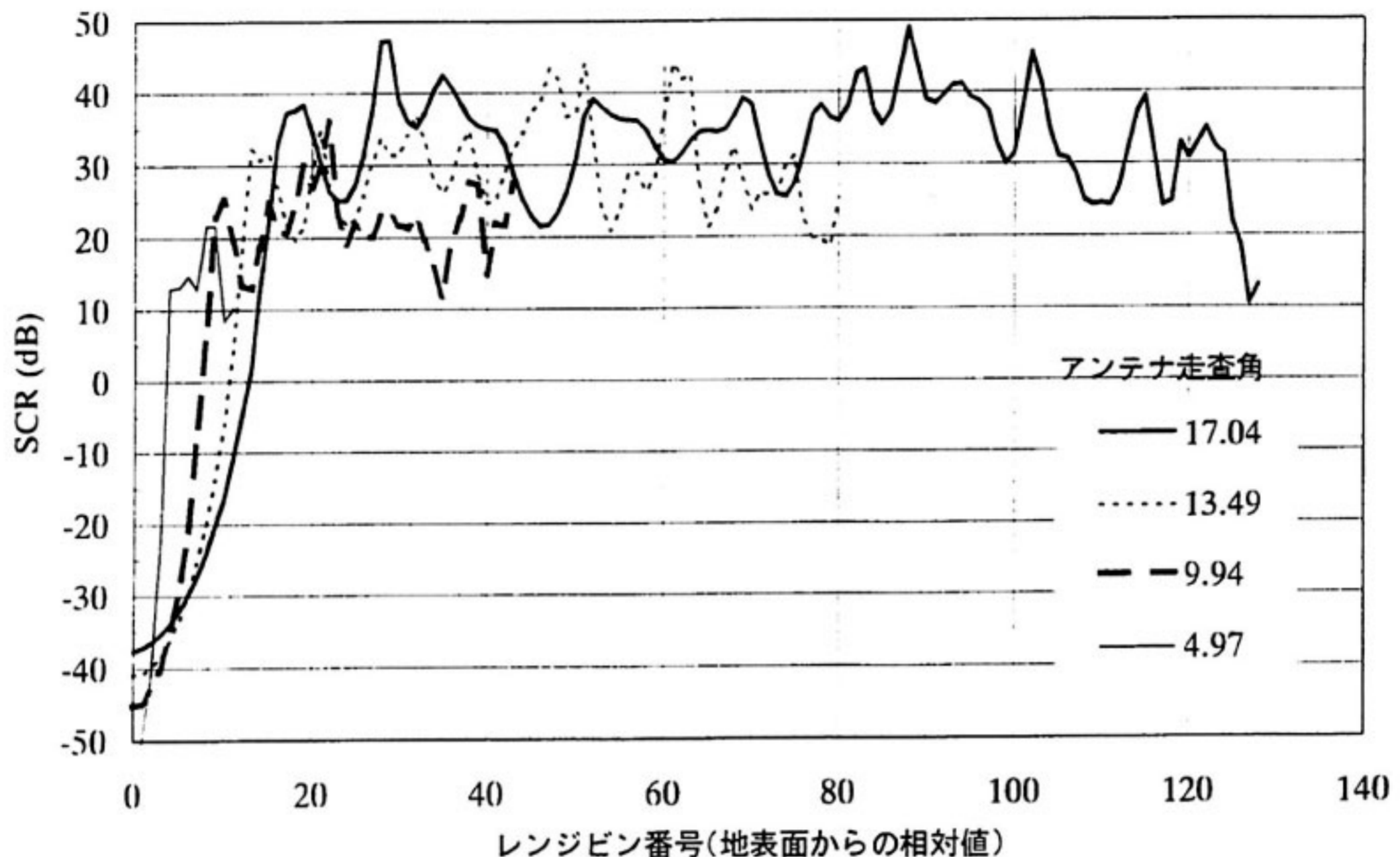
### 2.3 地表面クラッター

上空から降雨を観測する場合、地(海)表面エコーは、降雨エコーに比べて著しく強い。このためTRMM 観測では、鉛直以外の入射角では、アンテナパターンにより発生する表面クラッターが降雨信号に重畳して観測される。表面クラッターの発生原因として2種類考えられる。この内の一つはアンテナメインローブにより発生するクラッターである。TRMM 降雨レーダでは、直下の地上フットプリントの大きさは4.3kmであり、垂直分解能の約17倍である。このため、アンテナ走査角の端(±17度)付近のデータには、アンテナメインローブの一部が表面エコーを拾うことにより発生するクラッターが、地表面から約1.6kmの高さまで現れる。メインローブによる表面クラッターの強度は、通常の降雨エコー強度よりもはるかに強いので、クラッターが現れる領域では降雨観測が不可能となる。

もう一つの原因として、アンテナサイドローブによるクラッターの発生が考えられる。しかし、TRMM 降雨レーダアンテナの性能では、サイドローブによるクラッターは小さく、一般的には降雨観測に支障を与えないと考えられる。この理由として、アンテナサイドローブレベルは概ね-35dB以下に抑えられていることと、TRMM 降雨レーダのようなアクティブアレイ方式では送、受信でサイドローブのパターンが少しずつ異なるため、送受積のサイドローブは小さな値に保たれることがあげられる。

第1図は、TRMM 降雨レーダ開発モデル(EM: Engineering Model)のアンテナパターンの測定値をも





第1図 TRMM 降雨レーダのアンテナパターンをもとにして計算した、降雨信号強度と地表面クラッターレベルの比 (SCR)。降雨信号としては0.5mm/h時の信号強度を仮定した。4.97度から17.04度までの4通りのアンテナ走査角に対して、横軸に地表面からのレンジビン番号の相対値(1レンジビンは250m)をとり、縦軸にSCRをデシベルで示す。図の左端でSCRが負になっている領域はメインローブクラッターによる影響である。それより右側は、サイドローブクラッターの領域である。

とにして計算された、予想される信号対クラッター比 (SCR) の高度分布である。アンテナ走査角が4.97度から17.04度までの4例のアンテナ走査角に対する計算結果を示す。高度分布は、各入射角で電波のパスに沿って表したものであり、横軸は地表面からの距離が相対的なレンジビン(1レンジビン=250m)番号で示されている。地表面として標準的な海面を仮定し、信号強度としては0.5mm/hの降雨エコーを仮定した。高度が低い区間ではSCRが大きな負の値となるが、これはメインローブクラッターの寄与である。メインローブクラッターの影響は、最大走査角(17度)では、高度1.6kmにまで達する。メインローブクラッターの領域よりも高度が高い(相対レンジビン番号が大きい)区間においては、SCRは+10dB以上となっており、サイドローブクラッターの影響は無視できることがわかる。なお、第1図の結果は、海面の標準的なレーダ断面積を仮定した場合のクラッター強度の予測値である。地面では、入射角がTRMMレーダの走査角度程度の小さい値の場合、レーダ断面積は一般に海面に比べ小さい。このため、海上、地上ともにサイドローブクラッターの影響は無視できると考えてよい。以上から、本アルゴリズムでは、アンテナメインローブクラッターの出現する範囲を予測し、この領域で

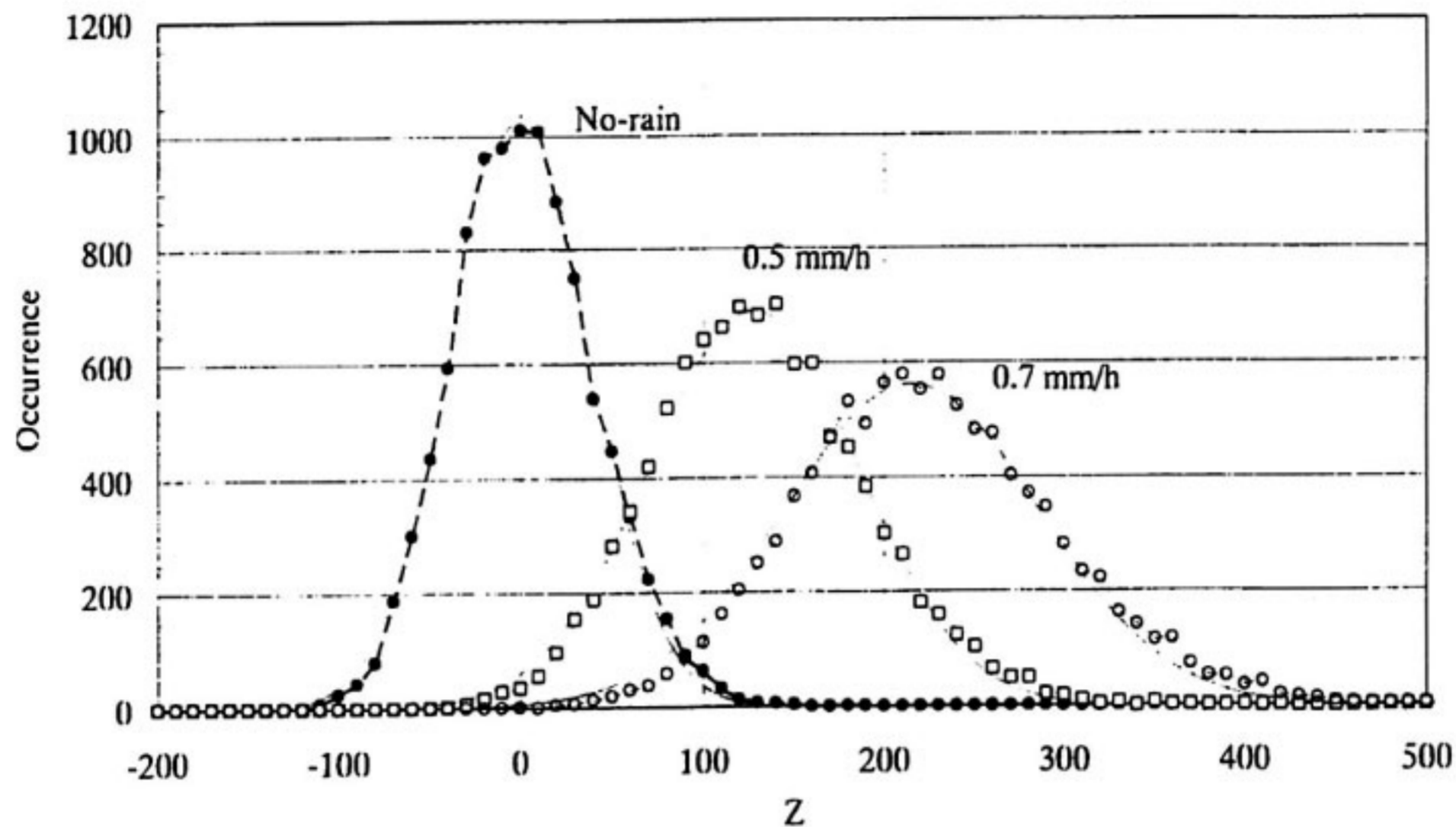
は降雨の有無の判定を行わないようにする。また、アンテナサイドローブの影響については特に考慮しないこととする。しかしながら、都市部における人工構造物では、大きいレーダ断面積と特異な入射角特性を持つ散乱体もあり、このような場合はサイドローブによるクラッターが影響を与えることも考えられる。また、レーダの一部の素子の不具合によりアンテナパターンが変化し、クラッターの影響が変化することも考慮しておく必要がある。

### 3. 降雨信号確率分布と降雨の有無の判定

#### 3.1 降雨信号確率分布

TRMM 降雨レーダ受信機では、ダイナミックレンジを確保するため、通常のレーダ受信機としてよく用いられる対数検波方式を採用している。レーダの受信信号はレーレーフェージングに従うと考えられるので、TRMM レーダ受信機においては、レーレーフェージングに従う受信信号に対数検波を施し、その結果を積分し、平均受信電力を得ている。このような過程を経る受信信号の確率分布は以下のように表される。

レーダの受信電力  $P_r$  の対数検波後の平均値は、積分数が30以上では以下の近似が成り立ち<sup>(2)</sup>、いわゆる-2.5dBのオフセットが存在する。



第2図 レーダで受信される信号電力の確率分布. 降雨がない場合と, 0.5mm/h, 0.7mm/hの3つの場合について, 乱数によるシミュレーション結果と正規分布を当てはめた結果(実線)を示す. 横軸の単位は, レーダ反射因子(Z)である.

$$E(P_{r \log}) \approx e^{-\gamma \bar{P}_r} \approx 0.56 \bar{P}_r \quad \dots\dots(3)$$

ここで,  $\gamma$ はオイラーの定数である. また, オフセットが補正された平均値回りの標準偏差は, 積分数を  $N$  とし, 対数検波の効果を考えて,

$$\sigma_{r \log} \approx \pi \bar{P}_r / \sqrt{6N} \quad \dots\dots(4)$$

となる. これらを考慮して, TRMM 降雨レーダ受信機で積分後に得られる信号成分に対する標準偏差は,

$$\sigma_s = \frac{\pi \bar{P}_s}{\sqrt{6}} \left[ \frac{1}{N_r} \left( 1 + \frac{1}{S_n} \right)^2 + \frac{1}{N_n} \left( \frac{1}{S_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(5)$$

で与えられる<sup>(2)(3)</sup>. ここで,  $N_r$  と  $N_n$  はそれぞれ, 受信電力および雑音電力の積分数である. また,  $\bar{P}_s$  と  $S_n$  はそれぞれ, 信号成分の平均値及び1パルス当たりのSNRであり, システム雑音電力の平均値  $\bar{P}_n$  との間には, 以下の関係がある.

$$\bar{P}_r = \bar{P}_s + \bar{P}_n = \bar{P}_s \left( 1 + \frac{1}{S_n} \right) \quad \dots\dots(6)$$

また, (5)式において,  $\bar{P}_s = 0$  の場合, すなわち雨がないうちの場合の標準偏差は,

$$\sigma_{s0} = \frac{\pi \bar{P}_n}{\sqrt{6}} \sqrt{\frac{1}{N_r} + \frac{1}{N_n}} \quad \dots\dots(7)$$

となる. なお, 以上の議論ではレーダ受信信号の確率分布関数形については特に規定していないが, 途中で多数回積分されるため, 正規分布にかなり近いものになると

考えられる.

次に, TRMM 降雨レーダで受信される信号の確率分布を乱数により発生させ, 上記の計算結果と比較する. TRMM 降雨レーダ受信機のSNRから決まる平均値をもち, かつレーフェージングに従う受信電力と, 雑音電力をそれぞれ作りだし, 対数による積分 ( $N_r = 64$ ,  $N_n = 256$ ) 後, 両者の差を求めその分布を第2図に示す. 図は10000点の乱数から求めた信号強度の頻度分布を表示している. 横軸は信号強度をレーダ反射因子(Z)で目盛り, 降雨がない場合の分布と, 0.5mm/h, 0.7mm/hの雨の場合の分布を示す. 各々のケースで, 点を結んだ破線, 点線, 1点鎖線は, 乱数によるシミュレーション結果である. また, 実線は, 確率分布を正規分布とし, その標準偏差を(5), (7)式により与えたものである. 各ケースとも, ほぼ正規分布で近似できることがわかる. ただし, シミュレーションの分布は, 左右が多少非対称であり, 分布関数の上側の裾は正規分布よりもやや高くなる.

### 3.2 しきい値の設定

第2図の分布から, 降雨の有無を判別するためのしきい値をどこに設けるかを検討する. まず, 降雨があることがほぼ確実であることを示すためには, 降雨なしの場合の分布関数の上側の裾で分布関数が十分小さくなる点にしきい値を設定すればよい. 例えば, 分布の上側の標準偏差の3倍の点 ( $3\sigma$ ) に設定することを考える. この点は, 第2図で  $Z=115$  に相当する. この場合, 誤警報 (雨がないうちに雨と判定する) 確率は, 0.13%とな



る。しかし、この時、0.5mm/hの降雨に対して、検出確率は60%程度になる。つまり40%の雨を見落とすことになる。従って、ある程度の誤警報を許しても、弱い雨に対する検出確率を高くする（つまり、見落としを少なくする）ためには、しきい値を低く設定する必要がある。本アルゴリズムで出力する判定結果の用途としては、まず無降雨データの削除のための基準として使用される。この場合、降雨が確実な場合にのみフラグをたてることにすると、かなりの割合の弱い降雨データを見落とし、有益なデータが保存されない恐れがある。逆に、統計的な処理を行う場合等では、降雨が確実な場合のみを抽出することが必要な場合も考えられる。結局、降雨フラグの利用目的により、しきい値の決め方は大きく変わる。このような互いに矛盾する要求を満たすための1つの解決策として、2段階のしきい値を設け、3段階のフラグを出力すること検討する。このとき、3段階のフラグの意味は、「降雨が確からしい」、「降雨の可能性あり」、「降雨の可能性は低い」ということになる。

次に、2つのしきい値の値について検討する。まず高い方のしきい値は、無降雨時の確率分布の3σの点が適当であろう。この点を超える受信信号強度は、ほぼ降雨によるものと考えてよい。低い方のしきい値としては、どこに設定するべきか特に強い根拠はない。このため、降雨判定とは直接関係しないが、どれだけのデータを保存するかという観点から、しきい値を決めることにする。「降雨の可能性は低い」と判定されたデータは全て削除すると仮定し、降雨は全球で平均すると約5%の領域に存在すると仮定する。このとき、無降雨時の確率分布で、上側の10%の位置にしきい値を設定すると、全観測データの14.5%が保存されることになる。第1表は、このような2通りのしきい値を設定した場合の各しきい値の持つ意味をまとめたものである。ただし、表に示されている確率の値は、信号の分布を正規分布と仮定した場合であり、第2図に示されるように実際の値とはやや異なることに注意する必要がある。今後、TRMM観測のシミュレーションデータを使った検討により、最適なしきい値を設定する必要がある。

第1表 降雨判定のための2つのしきい値と誤警報及び検出確率

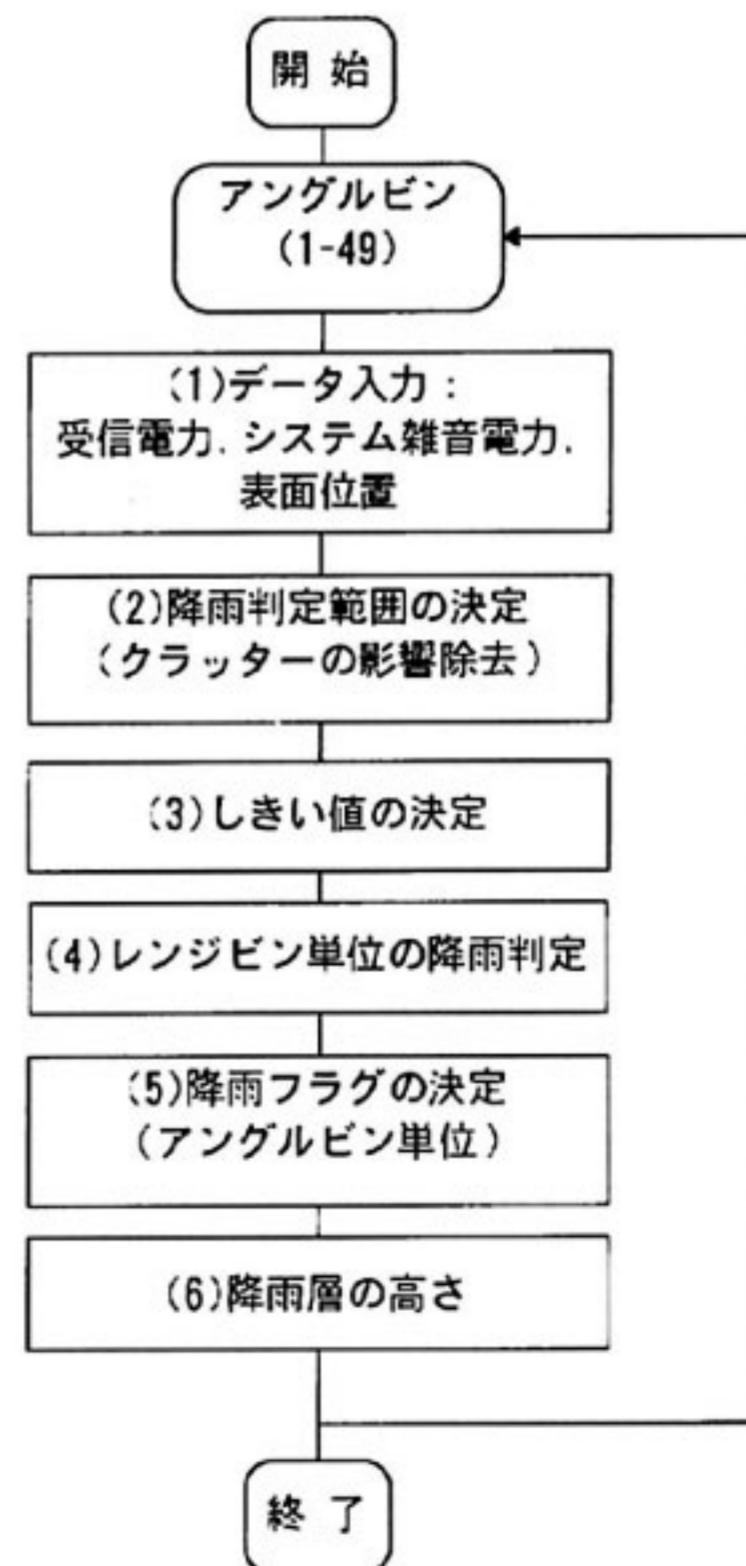
	しきい値1	しきい値2
No-rain 確率分布上の位置	上側 1.28σ (無降雨確率分布の90%値)	上側 3σ
対応するZ値 (mm <sup>4</sup> /m <sup>3</sup> )	49.2	115.4
対応する雨量 (mm/h)	0.27	0.47
誤警報確率	10%	0.13%
検出確率 (0.5mm/hの雨に対して)	91.5%	59%

### 3.3 降雨フラグの決定

これまで述べたしきい値と受信信号強度との比較は、各レンジビン毎に行われる。実際の降雨フラグはアングルビン単位で出力される。このため、各レンジビン毎の判定結果からアングルビン単位のフラグを決定する方法を考える。基本的には、1アングルビン内で降雨判定を行うレンジビンの範囲を定め、この中でしきい値を超える信号強度をもつレンジビンがあれば、そのアングルビンでは降雨ありとするフラグを出力すればよい。しかし、1アングルビン内のレンジビン数は80程度であり、単純に各レンジビンの判定結果の和をとると、地表面クラッターの影響を除いても、ほとんどのアングルビンで降雨ありと判定されることになる。なぜならば、個々のレンジビンの判定の信頼度が90%で80個のレンジビンの判定結果の和をとった場合、実際に降雨はなくても降雨ありと判定される確率  $P_{error}$  は下式のようにほぼ1となる。

$$P_{error} = 1 - (0.9)^{80} \approx 1 \quad \dots\dots(8)$$

これを避ける方法としては、複数のレンジビンで連続して、降雨が観測された場合のみアングルビン単位では降雨があると判定することが考えられる。これは物理的に



第3図 降雨の有無の判定アルゴリズムの流れ図。



は、実際の降雨には高さ方向にある程度の相関距離があるため、この相関の有無を調べることに相当する。降雨層の厚さとしては、1 km 以下の融解層のみが降雨エコーとして検出される場合もあるため、相関距離としては、レンジビン数で2~3とすることが適当であろう。ただし、2段階のしきい値の判定結果と相関距離をどのように結びつけるか等について今後の検討が必要である。

#### 4. アルゴリズムの流れ

以上述べたアングルビン毎の降雨フラグ決定のためのアルゴリズムの流れ図をブロック的に第3図に示す。流れ図はアングルビン単位の処理を示している。(1)入力データとして各レンジビンの受信電力とシステム雑音電力を取り込む。システム雑音電力は1アングルビン内で共通である。また、クラッター出現位置を求めるために必要な各アングルビンにおける地表面位置レンジビンも、他のプログラムで求めたものを取り込む。次に、(2)降雨判定を行うためのレンジビンの範囲を決定する。この時、表面クラッターが降雨判定に影響を与えないように、クラッターの出現するレンジビンを降雨判定範囲から除く必要がある。これを行うために、クラッターの出現が予測されるレンジビンは、地表面からの相対値として予めアングルビン毎にテーブル化して与える。(3)判定のためのしきい値を決定する。しきい値の決定には、予め与えられた判定の信頼度とシステム雑音電力を使用する。ここでは2段階のしきい値を設定する予定である。次に、(4)決められたレンジビンの範囲にわたり、レンジビン毎にしきい値と受信信号強度を比較する。受信信号強度とは、受信電力からシステム雑音電力を差し引いたものである。レンジビン毎の比較により、各レンジビンの降雨の可能性を3段階に評価する。(5)アングルビン毎の降雨判定フラグを出力するために、1アングルビンの中に、「降雨が確からしい」あるいは「降雨の可能性はある」と判定されたレンジビンの有無を調べ、そのうち、降雨の可能性が高い方を出力フラグの値とする。但しこの時、複数のレンジビンにわたり連続して降雨ありと判定された部分のみを考慮する。この場合の連続性の条件等は今後最適値を検討する必要がある。最後に本アルゴリズムでは、(6)降雨層の高さを求める。これは、降雨の可能性ありと判定されたレンジビンの部分の頂上の高度を求めればよい。本アルゴリズムでは、実際の海拔高度ではなく、降雨層の頂上に対応するレンジビン番号を出力する。この時、降雨の可能性があると判定された部分が判定範囲のレンジビンの中に複数箇所ある場合は、それらの中で最高の点を出力する。また、「降雨が確からしい」領域と、「降雨の可能性はある」領域が両方存在する場

合には、別々に高度を求める。

#### 5. ま と め

これまで述べた TRMM 降雨レーダにおける降雨の有無の判定方法についてまとめると：

- (1) 降雨の有無を表すフラグは、降雨レーダのアングルビン単位で出力する。
- (2) アンテナメインローブクラッターの出現する区間は降雨判定から除く。アンテナサイドローブによるクラッターの影響は考慮しない。
- (3) 降雨の有無の判定は、降雨信号の確率分布に基づき、最適なしきい値を設定する。
- (4) 降雨判定は、「降雨が確からしい」、「降雨の可能性はある」、および「降雨の可能性が低い」の3段階の判定を行うこととし、このために2つのしきい値を設ける。
- (5) 各レンジビン単位で、しきい値と受信信号強度を比較した後、アングルビン単位のフラグを求めるために、降雨の鉛直方向における相関距離を考慮する。具体的には、アングルビン単位のフラグを求める場合は、ある程度のレンジビン数にわたり連続して降雨ありと判定された部分のみを考慮の対象とする。

なお、しきい値の設定および降雨の鉛直方向の相関距離の最適値については、TRMM レーダのシミュレーションデータを用いて今後さらに検討する予定である。

#### 謝 辞

本研究は TRMM アルゴリズム開発の一環として、宇宙開発事業団、日本気象学会の支援の下に実施された。また本研究の推進にあたり、東京大学気候システムセンター住教授には多大なご支援、ご指導をいただいた。TRMM アンテナデータは(株)東芝から提供していただいた。あわせて関係機関各位にお礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

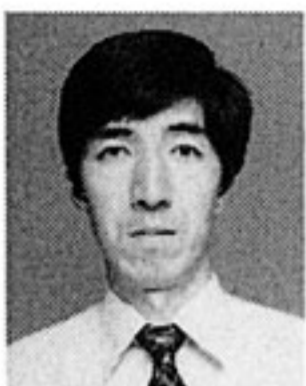
- (1) 岡本謙一, 井口俊夫, 阿波加純, 熊谷博, R. Meneghini, 佐竹誠, 古津年章, “TRMM 降雨レーダデータ解析処理アルゴリズムの概要”, 通信総研季, 42, 3, pp.305-315, Sept. 1996.
- (2) D. S. Zrnice, “Measurements of estimated input power for finite sample averages of radar receiver outputs”, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-11, 109-113, 1975.
- (3) F. T. Ulaby, R. K. Moor, and A. K. Fung, “Microwave remote sensing: active and passive”, vol. 2, Chap. 7, Artech House, 1982.



熊谷 博  
Hiroshi KUMAGAI  
鹿島宇宙通信センター 地球観測技術研究室  
大気のリモートセンシング  
E-Mail: kumagai@crl.go.jp



古津 年章  
Toshiaki KOZU  
地球環境計測部 電波計測研究室  
マイクロ波リモートセンシング  
E-Mail: kozu@crl.go.jp



井口 俊夫  
Toshio IGUCHI  
地球環境計測部 電波計測研究室  
電波による降雨や海面状態のリモート  
センシング  
E-Mail: iguchi@crl.go.jp

