

降雨タイプ分類アルゴリズムの開発

阿波加 純^{*1} 熊谷 博^{*2} 井口 俊夫^{*3} 岡本 謙一^{*4}

(1996年5月17日受理)

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CLASSIFYING RAIN TYPES

By

Jun AWAKA, Hiroshi KUMAGAI, Toshio IGUCHI, and Ken'ichi OKAMOTO

This paper describes a TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) precipitation radar algorithm for detecting bright band and classifying rain types. Detection of the bright band is carried out by a spatial filter method, which is based on a second derivative of the Z factor with respect to range. Rain is classified into three types, that is, (a) stratiform rain, (b) convective rain, and (c) other types of rain. In the case of convective rain, a further sub-classification is made to determine whether it is warm rain or not.

Test of the algorithm has been made by using two different kinds of airborne precipitation radar data and by using synthetic data based on Tao's storm model. This paper exemplifies a typical result which is obtained from the test using 10 GHz airborne radar data.

[キーワード] TRMM, 降雨レーダ, ブライトバンド, 降雨タイプ分類.

TRMM, Rain radar, Bright band, Rain type classification.

1. はじめに

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載される降雨レーダは、熱帯を中心とした緯度範囲±35度の低緯度における降雨を観測する。TRMM計画の主目的は、我々をとりまく地球環境のより良い理解のために、大気大循環の原動力である熱帯域の降雨強度を定量的に測定し解析することである。このとき、降雨タイプの分類が以下に述べる2つの点で重要になる。

一番目の点は、対流性または層状性という降雨タイプの違いによって潜熱放出の高度分布が大きく異なり、降雨タイプの相違が大規模な大気循環に大きな影響を与えることである。このため、降雨タイプの分類は TRMM

計画の主要な科学的目的の一つに挙げられている⁽¹⁾。

もう一つの理由は、次の通りである。降雨レーダによる測定で実際に求められるのは降雨強度そのものではなくレーダ反射因子 (Z因子) である⁽²⁾⁽³⁾。一方 Z因子と降雨強度 Rの間には Z-R関係と呼ばれるものが存在する⁽²⁾⁽³⁾。この Z-R関係を用いることで、降雨レーダで測定された Z因子から降雨強度 Rが計算されるが、Z-R関係は降雨タイプによって異なることが知られている。従って、降雨レーダの観測データから降雨強度を定量的に求める際には、まず最初に降雨タイプを分類しておく必要がある。

本論文では、この降雨タイプの分類に関するアルゴリズムと、2周波航空機搭載降雨レーダのデータ⁽⁴⁾などをもとに作成した疑似データを用いてアルゴリズムをテストした結果について述べる。なお、降雨タイプの分類においてはブライトバンドの有無が重要な役割をはたす。

ここでブライトバンドとは、上空の雪片や氷晶が融解

*1 北海道東海大学 電子情報工学科

*2 関東支所 地球観測技術研究室

*3 地球環境計測部 電波計測研究室

*4 地球環境計測部

して雨に変化する0℃高度付近に出現する層のことで、その上下方向の幅は約500mである。ブライトバンドは水平方向の広い範囲にわたって存在し、これを降雨レーダで観測すると、レーダ受像機の画面上では明るく帯状のものとして表示されることから、この領域をブライトバンドと呼んでいる⁽²⁾⁽³⁾。このブライトバンドは、比較的弱い降雨が広い範囲にわたって存在する層状性降雨に伴って現れることが多い。

本論文で述べるアルゴリズム、すなわちブライトバンドの検出を行い、降雨タイプを分類するアルゴリズムには2 A-23という番号がついているので⁽⁵⁾、以下ではこのアルゴリズムを2 A-23という番号で呼ぶ。

2. 処理項目

降雨レーダアルゴリズム2 A-23は、第1表に示す項目について判定等の処理を行い、その結果を出力する。この処理は、各アンテナスキャン方向のデータに対して行う。ただし、アルゴリズム2 A-23に入力される降雨レーダのデータは、別のアルゴリズムによって既に圧縮されたものであり、降雨が存在すると判定されたアンテナスキャン角方向のデータだけが処理に利用できる。これに伴い、2 A-23では降雨が存在するアンテナスキャン角方向のデータを処理した結果だけが出力される。

なお、第1表に示した項目の内、(2)のブライトバンド

第1表 アルゴリズム2 A-23の処理項目

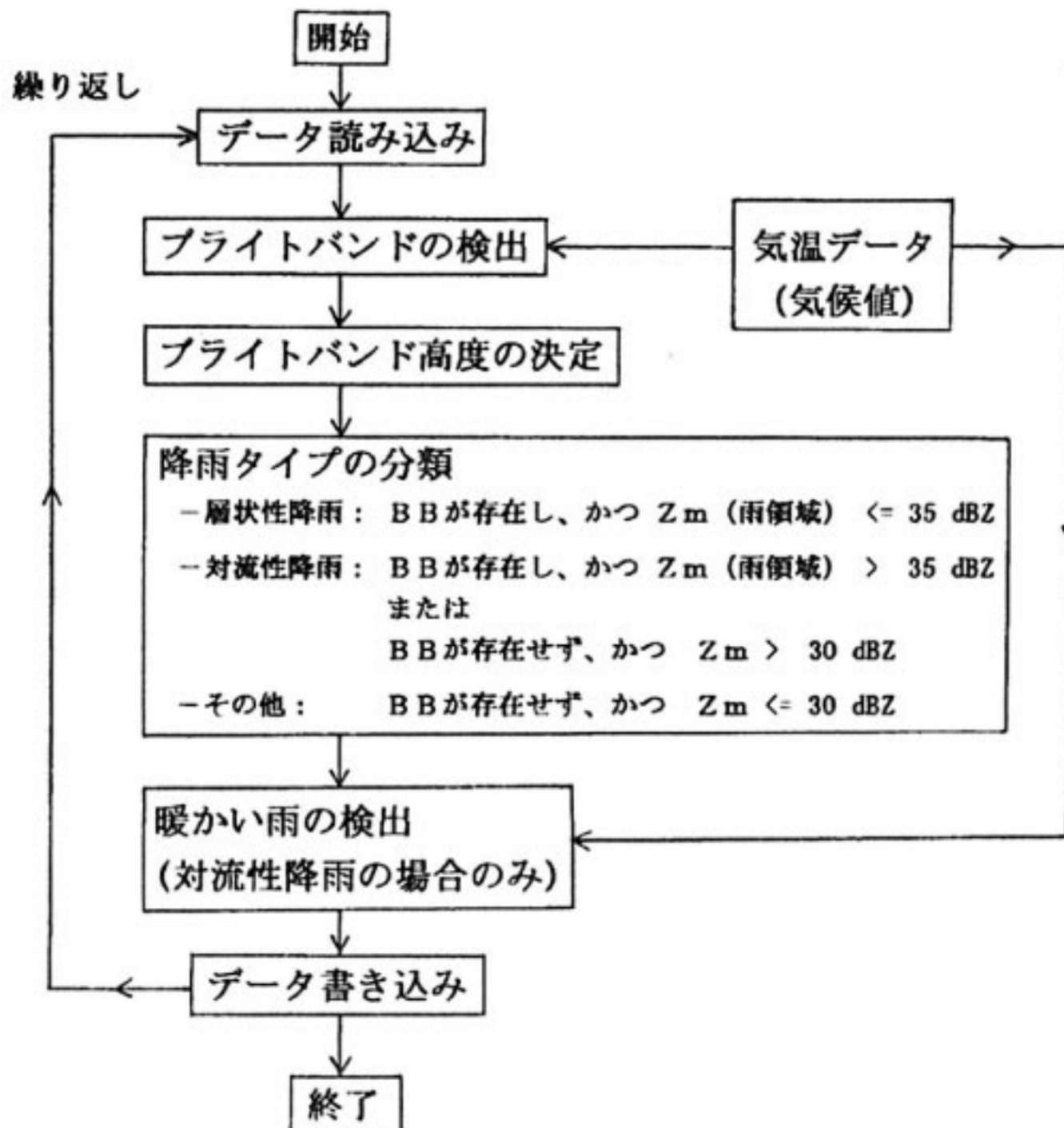
- | | |
|-----|------------------------------------|
| (1) | ブライトバンドの有無の判定 |
| (2) | ブライトバンド高度(海拔高度)の決定と結果の出力 |
| (3) | 降雨タイプの分類(層状性, 対流性, その他)と結果の出力 |
| (4) | 「暖かい雨」(warm rain)の検出と結果の出力 |
| (5) | 0℃高度(海拔高度)の推定と結果の出力 |
| (6) | ストームの高さ(海拔高度)の計算と結果の出力 |
| (7) | 降雨の有無を示すフラグの出力 |
| (8) | その他(処理結果の信頼性を示すフラグや日時, 観測点の位置等)の出力 |

高度の決定はブライトバンドが存在する場合についてのみ行い、また(4)の「暖かい雨」の検出は降雨タイプが対流性降雨と分類されたデータについてのみ行う。

本論文では、特に第1表に示した項目のうち、(1)および(2)のブライトバンドの検出に関連する部分と(3)および(4)の降雨タイプの分類に関連する部分を中心に述べる。

3. フローチャート

ブライトバンドの検出を行い、それをもとに降雨タイプの分類を行うアルゴリズム2 A-23のフローチャートを第1図に示す。



第1図 アルゴリズム2 A-23のフローチャート

第1図からわかるように、空間フィルタ法(後述)を用いてブライツバンドの検出を行ったあと、ブライツバンドの有無を基準にして降雨タイプを層状性降雨、対流性降雨、およびその他の3種類に分類する。ここで、それぞれの降雨タイプについて箇条書きにまとめると次のようになる。

- (ア) 層状性降雨: ブライツバンドを伴い、かつ降雨域でのZ因子(次節参照)が比較的小さい降雨を層状性降雨と分類する。この後半の条件は、層状性降雨は比較的弱い降雨(従ってZ因子が小さい降雨)が広い範囲に存在するという特徴を考慮した結果である。
- (イ) 対流性降雨: ブライツバンドが存在せず、かつZ因子が大きい場合は対流性降雨と分類する。また、ブライツバンドが存在する場合でも、ブライツバンド高度より下の雨領域におけるZ因子が大きい場合には対流性降雨と判定する。対流性降雨では降雨域が狭い範囲に局在しており、かつそこでの降雨強度が強い(従ってZ因子が大きい)ことが特徴である。
- (ウ) その他の降雨: ブライツバンドが存在せず、かつZ因子が小さい降雨をその他の降雨として分類する。

なお、対流性降雨と判定された降雨については、さらにそれが氷晶過程を経ずに0℃高度よりも低いところ(そこでの温度は摂氏でプラスである)から突然降雨が始まる熱帯地域特有の「暖かい雨」か否かの判定を行う。この「暖かい雨」の判定には0℃高度の情報が必要であるが、これにはNASA/GSFCから入手した、長期間の標準海面における平均気温の気候値(各緯度、経度で求めた各月の平均値)を用いることとした。

以上の説明からわかるように、ブライツバンドが存在すれば層状性降雨か対流性降雨と分類し、ブライツバンドが存在しなければ対流性降雨かその他の降雨に分類しようというのがアルゴリズム2 A-23の基本である。すなわち、ブライツバンドの検出が本アルゴリズムの中心課題となっている。

4. レーダ反射因子(Z因子)

前節の降雨タイプの分類で述べたように、降雨レーダで観測されるレーダ反射因子(Z因子)が、あらかじめ設定したしきい値より大きいか否かで降雨の強弱を判定している。ここでZ因子は、次に示すレーダ方程式に現れる物理量で、受信電力 P_r の平均値に比例している。

$$\langle P_r \rangle = (C/r^2)Z \cdot A \quad \dots\dots(1)$$

ただし、かぎ括弧は平均値を意味し、またCは送信電力やアンテナ利得などのレーダシステムの諸元によって決まる定数、rは観測領域とレーダ間の距離、Aは降雨減

衰である。Z因子は、周波数が低くレーレー散乱近似が成立する場合には、個々の降水粒子(今考えている雨の場合は雨滴)の直径を6乗したものに単位体積当たりの粒径分布を掛けてそれを粒径について積分したもので与えられる⁽²⁾⁽³⁾。Z因子は降雨強度Rと近似的にべき乗の関係があることが知られており、大ざっぱな見積りには

$$Z = 200R^{1.6} \quad \dots\dots(2)$$

という関係が用いられることが多い⁽²⁾⁽³⁾。なお、(2)式においてZの単位は $[\text{mm}^6/\text{m}^3]$ 、Rの単位は $[\text{mm}/\text{h}]$ である。

定性的に言うと、(2)式は降雨が強いほどZ因子が大きいことを意味している。また、レーダ方程式(1)からZ因子は降雨レーダの受信電力に比例することがわかるので、降雨レーダで観測している領域の降雨が強いほど降雨レーダの受信電力は大きくなることを意味している。

なお、Z因子と降雨量Rの関係は、雨滴粒径分布や周波数によって(2)式とは係数が異なる。ただし、近似的にべき乗の関係があることに変わりがない。また周波数が10 GHz以上になると降雨減衰の影響で実際のZ因子よりも小さな値がレーダ観測で得られる。すなわち、(1)式を書き直すと

$$\langle P_r \rangle = (C/r^2)Z_m \quad \dots\dots(3)$$

ただし

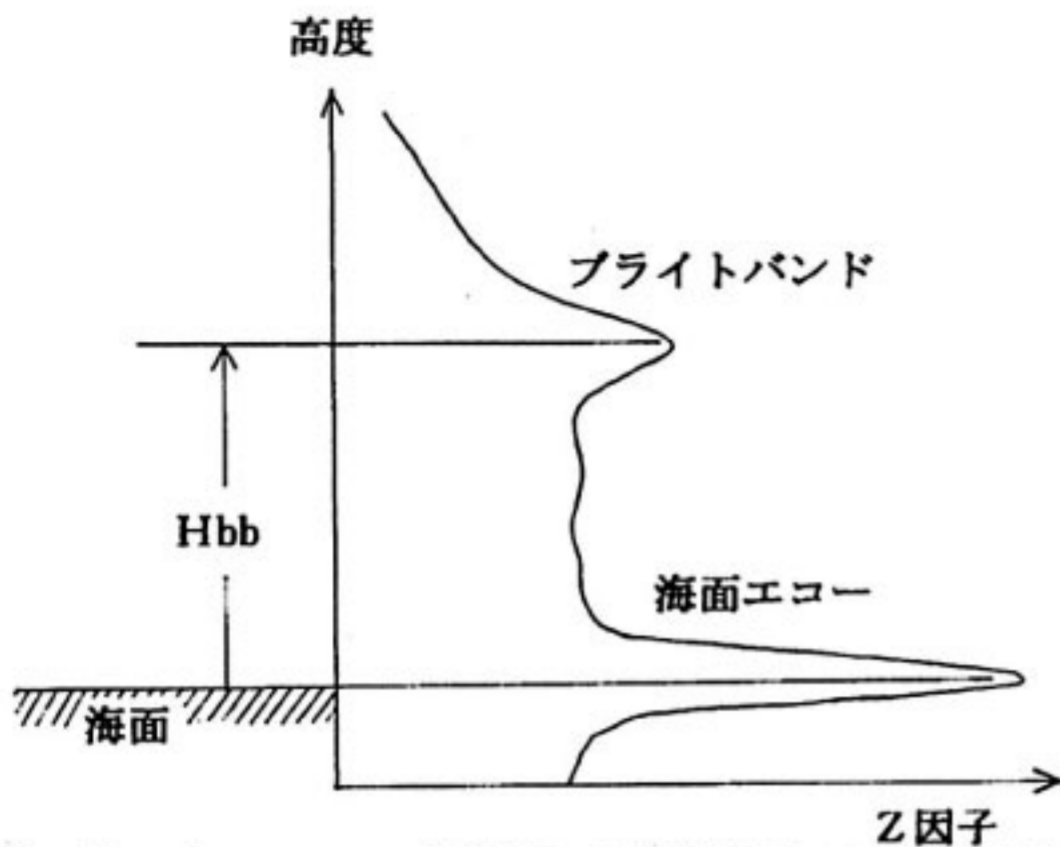
$$Z_m = Z \cdot A \quad \dots\dots(4)$$

となるが、一つの観測量 $\langle P_r \rangle$ から、(1)式のZとAの2つの物理量を別々に求めることは出来ず、(4)式で表される降雨減衰の影響を含むZ因子、すなわち Z_m が(3)式を通して求められる。このことは、TRMMの14 GHz帯の降雨レーダの受信電力から降雨量を求め、その降雨量をもとにデータ解析を行なおうとすると、正確なZ-R関係と降雨減衰の影響の補正を考慮する必要があり、処理が複雑になることを意味する。

アルゴリズム2 A-23では、降雨レーダの受信電力と降雨量の定量的関係を求めることが目的ではなく、むしろ定性的に降雨タイプの分類を行うことが目的なので、降雨の強さの基準として降雨量そのものではなく、降雨減衰の影響を含むZ因子をデータ解析に使用する。これ以降、本論文でZ因子と言うときには、降雨減衰の影響を含めたZ因子、すなわち(4)式で定義された Z_m を意味するものとする。

5. Z因子の高度分布

第2図は、ブライツバンドが存在する層状性降雨を



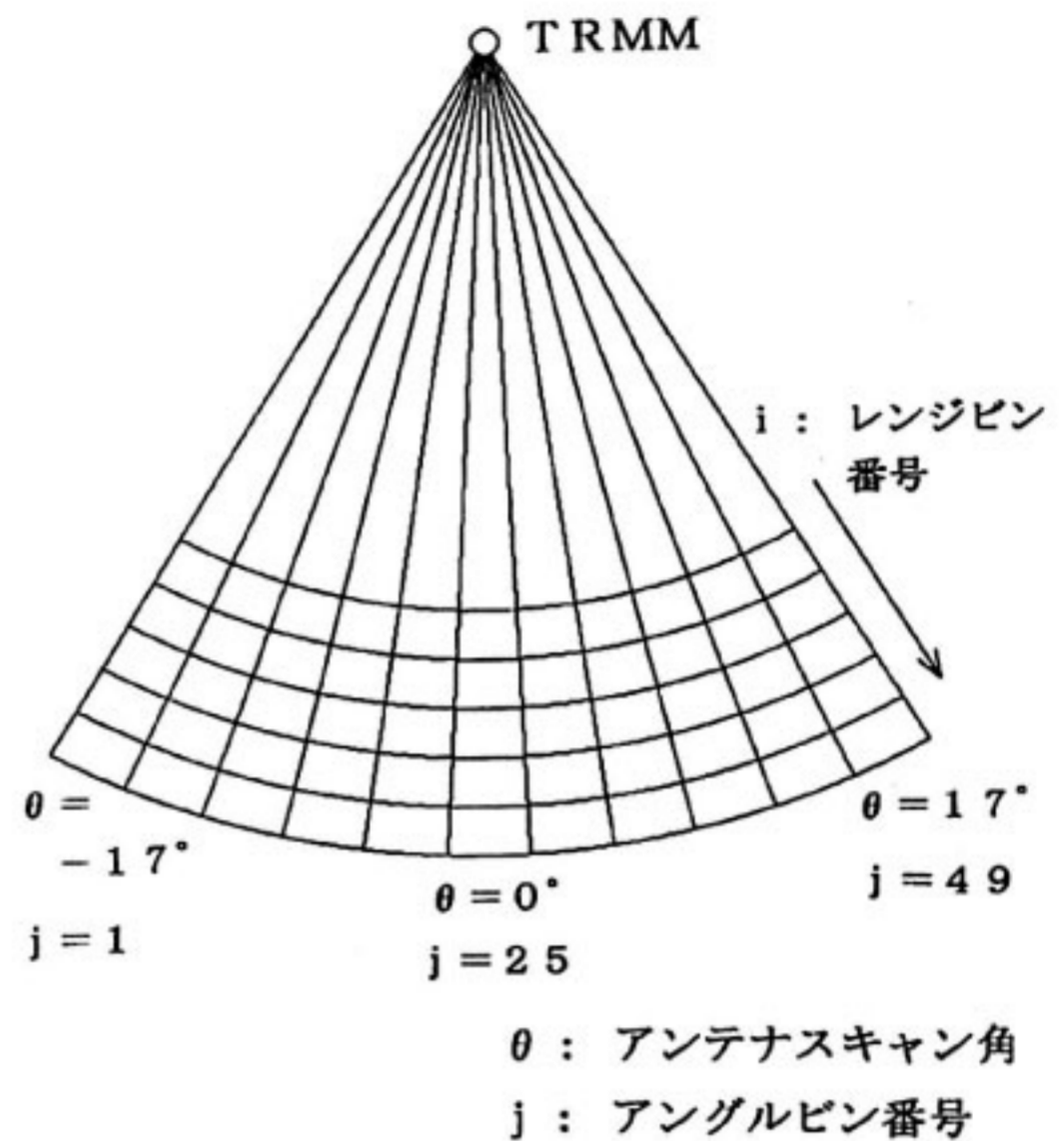
第2図 ブライトバンドが存在する層状性降雨のZ因子高度分布の模式図(海上の場合)

TRMM 衛星搭載降雨レーダで観測した場合のZ因子の高度分布を模式的に示したものである。簡単のため、アンテナビームが衛星直下点方向を向き、かつ海上の降雨を観測した場合を示している。図の縦軸は海拔高度、横軸はZ因子で、前節で説明したようにZ因子が大きいほど反射エコーが強いことを意味している。図の下側の非常に大きなZ因子のピークは、海面からの反射によるもので、それより上空に降雨による反射がみられ、熱帯地域では海拔高度が約5kmの付近にブライトバンドによるピークがみられる。

ブライトバンドは水平方向にほぼ同一の高度に出現するので⁽²⁾、このことを利用して第7節に示す空間フィルタ法でブライトバンドピークの検出を行っている。なお、第3図に示すように、TRMM 衛星搭載降雨レーダではアンテナビームを衛星直下方向を中心に約±17度の範囲でスキャンする⁽⁶⁾⁽⁷⁾。このため、アンテナビームが衛星直下点から離れた方向を向くに従ってブライトバンドのピークはぼやけたものになるが、ピークが出現する高度はほぼ一定なので、空間フィルタ法を用いることでピークがぼやけた場合にもブライトバンドの検出が可能となっている。

6. 空間フィルタ

本題に入る前に、空間フィルタの動作を理解するために必要な、アンテナビームのスキャンに関する説明を行う⁽⁶⁾⁽⁷⁾。第3図に示したように、衛星の進行方向に垂直な平面内において約0.7度の電力半値幅のアンテナビームが、-17度から+17度(鉛直方向から測った角度)にかけて、49方向の範囲をステップ状にスキャンする。ここでステップ状のスキャンとは、ある方向にアンテナビームを向けて、そこでアンテナビームを止め、必要なデー



第3図 アンテナスキャンの概要

この図から明らかなように、実際に観測される領域は扇形の一部を切り出したような形であるが、データ処理は、この領域を長方形の領域に写像した形で行う(後述の第6図、第7図参照)。

タを取得した後、次の方向にアンテナビームを移動し、そこでまたアンテナビームを止め、データを取得するという動作を繰り返すということの意味する。それぞれのアンテナビーム方向に1から49までの番号を割り振り、n番目のアンテナビームに沿って得られたデータをn番目のアングルビンデータと呼ぶ。

1 アンテナスキャンのデータとは、この49個のアングルビンデータをひとまとめにしたものを言う。すなわち、アンテナビーム方向をステップ状に変化させ、1番目から49番目まで順次アングルビンデータを取得し終えることで1つのアンテナスキャンが終了する。その後直ちに、アンテナビームを最初の1番目のアングルビン方向に向け直し、次のアンテナスキャンに移る、ということを経り繰り返す形でTRMM 衛星搭載降雨レーダによる降雨等の測定が行われる。

また、各アングルビンにおいて、アンテナビームに沿った降雨レーダからの距離(レンジ)方向のデータが250mの距離分解能で測定される。この距離方向のデータはレンジビン番号で区別される。

すなわち、TRMM 衛星搭載降雨レーダの1アンテナスキャンにおけるデータは、アンテナスキャン角方向に対してはアングルビン番号、距離方向に対してはレンジビン番号で指定された、2次元配列データとして記録される。

第4図は空間フィルタの動作を概念的に示したもので

ある。すなわち、アンテナビームをスキャンしたときの連続する3アングルビンデータに対してと、降雨レーダからの距離（レンジ）に対しても連続する3レンジビンデータ毎のZ因子の真値に次の空間フィルタを作用させて、その出力を調べている。

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \dots\dots(5)$$

ただし(5)式において、縦方向はレンジ、横方向は（アングルビン番号で指定される）アンテナスキャン角を示すものとする。ここで連続した3アングルビンデータを使用した理由の一つは雑音等によるZ因子の変動の影響を軽減するため、もう一つの理由は水平方向にほぼ一定の高度に出現するブライトバンドからのフィルタ出力を大きくし、ブライトバンドの検出を容易にするためである。なお、空間フィルタはZ因子のdB値ではなく真値に作用させている。この結果、後で詳しく述べるように層状性降雨に伴うブライトバンドをほぼ確実に検出することが可能となっている。

(5)式に示した空間フィルタは、基本的にZ因子を2次微分することを意味している。すなわち、レンジ方向の距離をrとして、ある一つのアンテナスキャン角（アングルビン）のデータに対し

$$\frac{d^2Z}{dr^2} \approx -\{-Z(r-\Delta r)+2Z(r)-Z(r+\Delta r)\}/(\Delta r)^2 \dots(6)$$

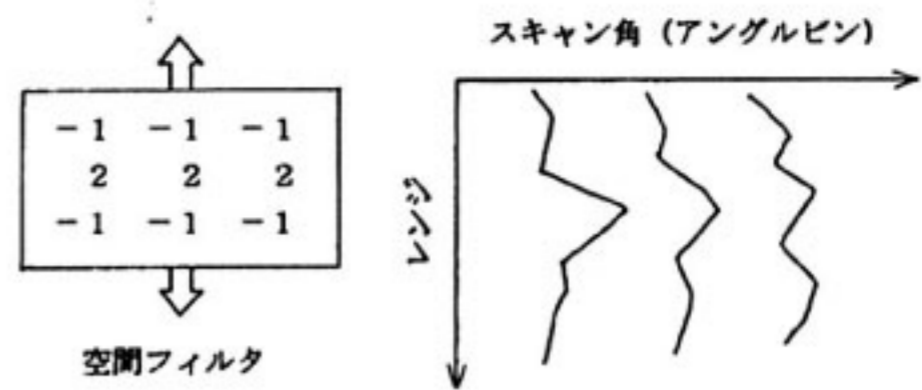
という2次微分を差分で近似したときの係数（-1, 2, -1）を縦に並べ、それをアンテナスキャン角方向に3列並べたものが(5)式の空間フィルタである。

第4図(b), (c)は、空間フィルタの動作を説明したもので、簡単のため1アングルビンのデータについて考えている（これはZ因子が水平方向に一定の場合を想定したことに相当する）。第3図(b)のように、Z因子の真値がレンジ方向に対して直線的に増加・減少するとき空間フィルタの出力は0となる。他方、第4図(c)のように、Z因子の真値が右に凸のとき空間フィルタの出力は正となる。ここで注意すべきことは、空間フィルタの出力が正であっても、必ずしもその高度にZ因子のピークが存在するとは限らないことである（第4図(c)の右端の図参照）。

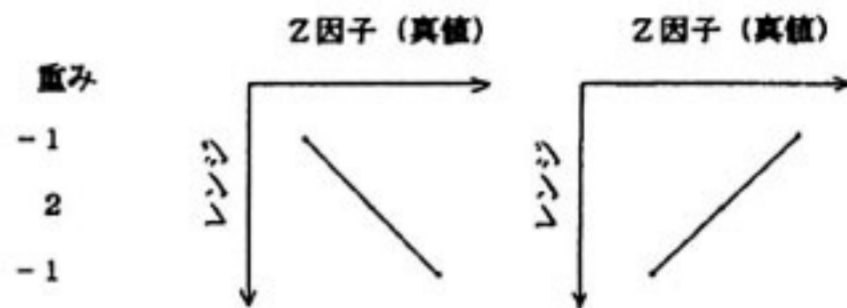
7. ブライトバンドの検出

次の条件を全て満足するとき、ブライトバンドが存在すると判定する。

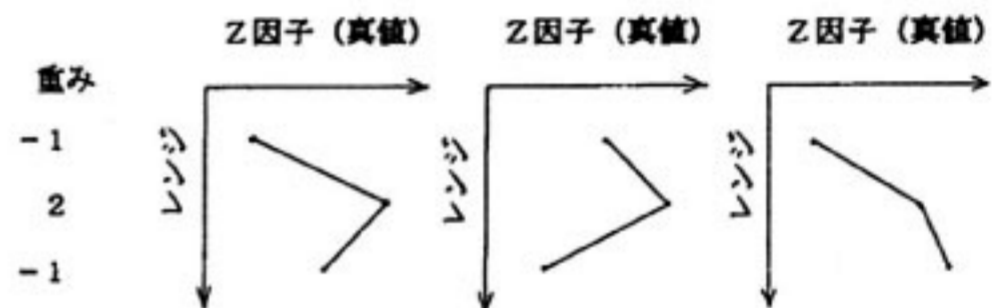
(条件1) 海面や地表面より上空の降雨が存在する領域（降雨域）で、空間フィルタの出力の最大値があらか



(a) 空間フィルタは連続した3レンジビンおよび連続した3アングルビンのデータに作用



(b) Z因子（真値）がレンジ方向に対し直線的に増加・減少するとき空間フィルタの出力は0となる（簡単のため1アングルビンのデータについて説明）



(c) 空間フィルタの出力が正となるZ因子のプロファイル例（簡単のため1アングルビンのデータについて説明）

第4図 空間フィルタの動作説明図

じめ定めた設定値を越える。

ここで、空間フィルタの出力とは、次式で定義されるものを言う。

$$\begin{aligned} \text{空間フィルタの出力}(i, j) = & -Z_m(i-1, j-1)+2 \cdot Z_m(i, j-1)-Z_m(i+1, j-1) \\ & -Z_m(i-1, j)+2 \cdot Z_m(i, j)-Z_m(i+1, j) \\ & -Z_m(i-1, j+1)+2 \cdot Z_m(i, j+1)-Z_m(i+1, j+1) \end{aligned} \dots\dots(7)$$

ただし、
 $Z_m(i, j)$: (i, j) 番目の測定されたZ因子 [mm⁶/m³]
 i: レンジビン番号
 j: アングルビン番号

である。

なお、アングルビンの両端（j = 1 および j = 49）においても(7)式の空間フィルタが適用できるように

$$Z_m(i, 0) = Z_m(i, 1)$$

$$Z_m(i, 50) = Z_m(i, 49)$$

と端点処理して計算を行っている。

具体的な判定条件は、あるアングルビンjでフィルタ出力が最大となるレンジiにおけるフィルタ出力が次の条件を満足することである。

$$\text{空間フィルタの出力 } (i, j) > 600 \quad \dots\dots(8)$$

なお、(8)式における600という値は後述の航空機データをもとにした疑似データに本アルゴリズムを適用しながら経験的に求めた値である。

この空間フィルタの出力が最大となる高度の付近でZ因子がピークをとる高度を H_{bb} [km]とする。(正確に言うと、空間フィルタの出力が最大となるレンジビンを中心に上下2レンジの範囲でZ因子がピークをとる高度を探し、それを H_{bb} としている。これは、空間フィルタの出力が最大となるのは、第4図(c)からもわかるように、必ずしもZ因子がピークをとる高度とは限らないためである。なお、この段階では、 H_{bb} がブライツバンド高度であるとはまだ言えない。)

(条件2) 降雨域において、 H_{bb} より上空には、2000 [mm⁶/m³] = 33 dBZ以上の大きさのZ因子は高々2個しか存在しない。

(条件3) H_{bb} は海面温度の気候値から推定した0°C高度の±1.5 kmの範囲に存在する。

(条件4) 条件1~3を満足する H_{bb} [km]はほぼ同一高度に存在する。

具体的には、アンテナビームの1スキャンにおける49アングルビンで条件1~3を満足する H_{bb} のメディアン(中央値)とメディアンの周りの2次モーメント σ^2 を計算する。 H_{bb} はこのメディアンの付近に存在しなければならない、すなわち次式を満足しなければならないと言うのが条件である。

$$|H_{bb} - \text{median}| < \min(3\sigma, 1 \text{ km}) \quad \dots\dots(9)$$

ただし、minは()内の値の小さい方をとることを意味する。また、 σ が0.1 [km]より小さい場合は $\sigma = 0.1$ [km]として少なくともメディアンの上下0.3 [km]の高度範囲に H_{bb} が存在することを条件としている。

なお、条件4において、 H_{bb} の平均値と分散ではなく、そのメディアンとメディアンの周りの2次モーメントを用いた理由は、次の通りである。ブライツバンドはほぼ一定の高度に出現することが知られているが、条件4は、アルゴリズムが条件1~3を満足するのでブライツバンドが存在すると判定しても、その高度が平均的なブライツバンド高度から極端に外れた場合、その極端に外れた高度のアングルビンデータのピークはブライツバンドによるものではないとするための条件である。もし条件4の判定に H_{bb} の平均値を用いた場合、その平均値は極端に平均値からはずれた高度にピークが出現するデータに引きずられた値を取ること

になり、この除外すべきデータを含めた H_{bb} の平均値と、この特定のデータを除外した後での平均値に差が出てしまい、具合が悪い。ほぼ一定の高度にブライツバンドが存在するとあらかじめ分かっているの、この性質を積極的に利用し、 H_{bb} の平均値ではなくメディアンを用いることで、特異なデータを除外しても、結果に大きな影響を与えることがないようにしている。

なお、ここに説明した方法はメディアンフィルタの手法⁹⁾を適用したものであり、京大MUレーダの信号処理に用いられている方法でもある⁹⁾。

以上の条件を全て満足してブライツバンドが存在すると判定された場合には、ブライツバンドが存在するアングルビンにおける H_{bb} をブライツバンド高度とみなす。また、ブライツバンドが存在するアングルビンにBB_flag = 1 (ブライツバンド有り)というフラグをたて、そうでないアングルビンのフラグの値はBB_flag = 0 (ブライツバンド無し)としている。

なお、ブライツバンドの検出において、Z因子の真値に空間フィルタを作用させる理由は次の通りである。

対流性降雨は大きなZ因子を生じ、その高度に対する変動は真値で表現すれば極めて大きなものとなる。このため、降雨域において空間フィルタの出力が最大となる高度 H_{bb} は、対流性降雨の場合Z因子がピーク値をとる高度と考えてさしつかえない。このZ因子が降雨域でピークをとる高度は、Z因子が大きい対流性降雨の中間から下方にかけて存在し、また対流性降雨のZ因子が極めて大きいため、このピーク値をとる高度より上空でもZ因子が33 dBZ以上となるレンジビンの個数は3個以上となるのが普通である。このため、対流性降雨の場合には、Z因子に大きなピークが生じてても、上に述べた(条件2)を満足しないことになり、ブライツバンドによるピークでは無いと判定できる。このような判定は、Z因子のdB値を用いたのでは不可能である(Z因子のdB値を用いると、Z因子が小さな値をとる高度での変動が強調されるので、降雨の上部、すなわち雲の頂の部分で空間フィルタの出力が最大値をとる確率が非常に大きくなり、空間フィルタの出力の最大値がブライツバンドによるものかそれ以外の原因によるものかの判定が出来なくなるためである)。

8. 降雨タイプの分類

第1図のフローチャートに関する説明で述べたように、アルゴリズム2 A-23では降雨タイプを層状性降雨、対流性降雨およびその他の降雨の3種類に分類している。また、対流性降雨と判定されたものについては、それが暖かい雨かどうかの判定を行っている。降雨タイプ分類

の詳細は次の通りである。

第1図にも示したように、ブライトバンドが存在し、かつブライトバンドよりも低い高度における降雨域のZ因子が35 dBZ以下であれば層状性降雨と分類する。また、ブライトバンドは存在するが、ブライトバンドよりも低い高度における降雨域のZ因子が35 dBZより大きければ対流性降雨と判定する。このように、ブライトバンドが存在すれば、降雨域でのZ因子の大きさに従って層状性降雨か対流性降雨のいずれかであると分類している。

ブライトバンドが存在しない場合には、ストームの頂上から地球表面までのZ因子を調べ、その大きさが30 dBZより大きければ対流性降雨、30 dBZ以下であればその他の降雨と分類している。なお、対流性降雨に隣接するその他の降雨は対流性降雨に伴う弱い降雨であると見なし、その他の降雨ではなく対流性降雨であると分類し直している（対流性降雨の隣接領域への拡張）。

以上が降雨タイプ分類の基本であるが、1つのアンテナスキャン角のデータに対してここに述べたアルゴリズムを適用すると、場合によってはアングルビン毎に頻繁に降雨タイプが異なると分類されることがある。このように、狭い範囲で降雨タイプが頻繁に異なるということは正しいのかも知れないが、人間がデータを見て降雨タイプの分類を行う場合にはある程度まとまった範囲で降雨タイプを分類するのが普通であろう。すなわち、計算機によってではなく、人間が目を見て降雨タイプを分類する場合には、一種の平滑化（スムージング）を無意識のうちに行っていると考えられる。そこで、アルゴリズム2 A-23では第5図に示すスムージングを採用することにした。

xxx2x22x2xxxx → xxx22222xxxx

(a) スムージング (その1)

2 : 対流性降雨

x : 層状性降雨またはその他の降雨

1111311111111 → 1111111111111

(b) スムージング (その2)

1 : 層状性降雨

3 : その他の降雨 (ただし、Z因子の値が非常に小さく無降雨に近い場合を除く)

yyyyyyyyyylyyyy → yyyyyyyyyyyyyyy

(c) スムージング (その3)

1 : 層状性降雨

y : 層状性降雨以外 (無降雨を含む)

第5図(a)に示すように、対流性降雨と分類されたアングルビンデータに挟まれた1つのデータが対流性降雨以外に分類された場合は、そのデータを対流性降雨と分類し直している。ただし、対流性降雨と分類されたアングルビンデータに挟まれたデータで対流性以外の降雨データが2つ以上連続している場合には、このような分類の変更は行わない。

次に、第5図(b)に示すように、層状性降雨と分類されたアングルビンデータに挟まれた1つのデータ(1つの場合のみ)がその他の降雨と分類されている場合には、そのデータを層状性降雨と分類し直している。ただし、層状性降雨と分類されたアングルビンデータに挟まれたその他の降雨のZ因子の大きさがある値よりも小さく、ほとんど無降雨に近い場合には、このような分類の変更は行わず、その他の降雨という分類のままにしている。

スムージング処理の最後は、第5図(c)に示すように、孤立した層状性降雨と言うのは、層状性降雨は広い範囲わたってある程度連続的に存在するという層状性降雨の特徴に反するので、その孤立したアングルビンデータをZ因子の大きさに従って対流性降雨かその他の降雨に分類し直している。

なお、第5図において、層状性降雨を1、対流性降雨を2、その他の降雨を3という番号で区別したのは、アルゴリズム2 A-23の出力の一つである降雨タイプを示すフラグの内容と一致させたためである。

以上述べたスムージング処理を行った後、対流性降雨と分類されたものについては、さらにそれが暖かい雨か否かの判定を行っている。すなわち、次の3つの条件を満足する対流性降雨は暖かい雨であると判定する。

(条件1) 0°C 推定高度を H_{ebb} 、対流性降雨のストームの高さを H_{storm} としたとき

$$H_{storm} < H_{ebb} - WR_{hmgm} \quad \dots\dots(10)$$

を満足する。ただし、 WR_{hmgm} はマージンで、具体的には $WR_{hmgm} = 0.5 \text{ km}$ と $WR_{hmgm} = 1.0 \text{ km}$ の2つのマージンを設定し、暖かい雨の検出の信頼性を調べている。すなわち、 $WR_{hmgm} = 1.0 \text{ km}$ のマージンを用いたときに(10)式の条件を満足する場合の方が、暖かい雨の検出の信頼性が高いとしている。

なお、 0°C 推定高度 H_{ebb} は、海面温度(陸上の場合は海拔高度での気温)の気候値を T_s として

$$H_{ebb} = T_s / T_{lapse} \quad \dots\dots(11)$$

から計算している。ここで、 T_{lapse} は気温低減率で、 $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ という値を用いている。(海面温度の気候値 T_s は、観測日時をもとに時間に対して線形補間

を行っている。ただし、観測場所に関する補間を行わず、与えられた緯度・経度各2.5度の格子点に近い海面温度をそのまま用いている。）

(条件2) 暖かい雨の領域にブライトバンドが存在してはいけない。

これは、ブライトバンドが存在するということは上空の雪片や氷晶が融解しているということであり、暖かい雨は氷晶過程を経ない降雨であるという条件に反するためである。なお、この条件は、暖かい雨の判定を行う対流性降雨がブライトバンドを伴い、その高度 H_{bb} が推定 0°C 高度 H_{0bb} よりも低く、(10)式の条件を満足してしまう可能性があるために設けた。

具体的には、ブライトバンドの有無を示すフラグを調べ、ブライトバンド有り判定されたアングルビンデータに対しては無条件に暖かい雨では無いという形で処理を行っている。

(条件3) 暖かい雨の領域は、対流性降雨や層状性降雨から離れて存在していなければならない。

この条件は、あるスキャン角(アングルビン)において 0°C 高度よりも低い高さから雨が降っていたとしても、それが隣接する対流性降雨や層状性降雨が横方向に流されたものとは異なっていなければならないと言うことを意味する。

具体的には、条件1および2を満足するアングルビンデータに印をつけ、そのアングルビンに隣接するアングルビンの降雨タイプを示すフラグを調べて、そこでの降雨タイプが(暖かい雨では無い)対流性降雨でも層状性降雨でも無い場合に、この印を付けたアングルビンの領域の雨が暖かい雨であると判定している。逆に言うと、印を付けた領域に隣接するアングルビンの降雨タイプを示すフラグが、無降雨か(降雨強度が極めて弱い)その他の降雨の場合に、その印を付けた領域の降雨タイプは暖かい雨であるとしている。なお、この作業は、第5図に示したスミージングの方法に類似したものとなっている。

9. テストデータ

降雨レーダアルゴリズム2 A-23のテストは、これまで3種類のデータを用いて行った。テストに用いたデータの1つは、NASAとCRLが共同で航空機搭載2周波降雨レーダを用いて実施した台風時の熱帯地域の降雨観測で得られたデータ⁽⁴⁾、2番目はNASAゴダード宇宙飛行センタのMeneghiniが中心となって作成したTaoのストームモデル⁽¹⁰⁾に基づくシミュレーションデータ⁽¹¹⁾、3番目はNASA/JPLがARMAR(Airborne Rain Mapping Radar)を用いてTOGA-COARE

(Tropical Ocean Global Atmosphere - Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment)で観測した14 GHzのデータ⁽¹²⁾である。以下では、このうちNASAとCRLの共同実験で得られたデータをもとに作成したテストデータについて述べる。

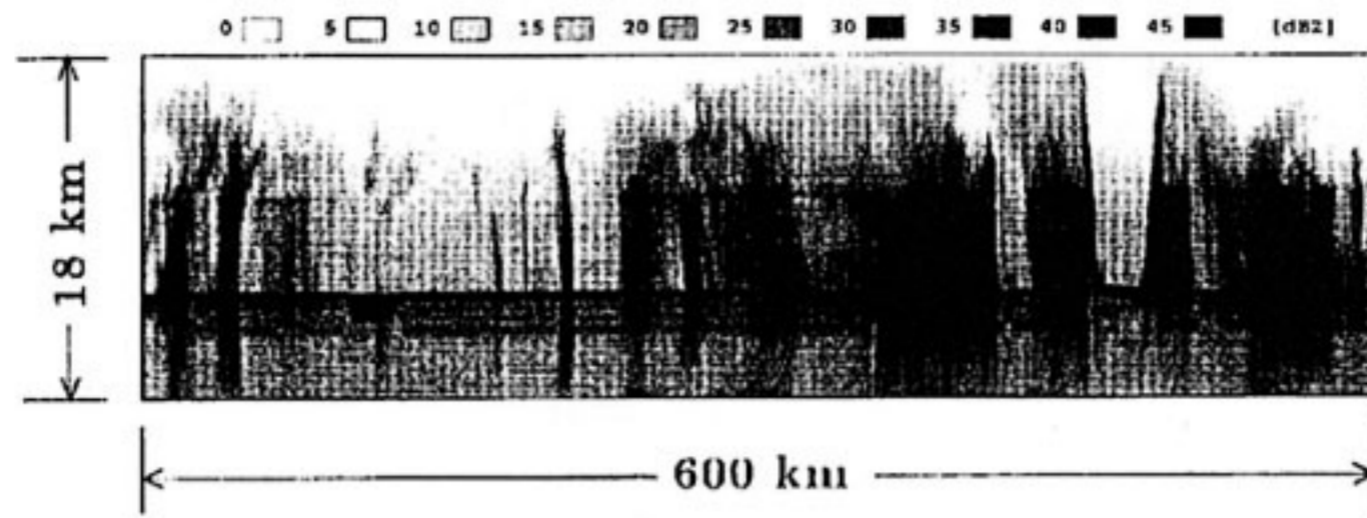
第6図は高分解能で記録されている航空機搭載2周波降雨レーダで得られた10 GHz帯と35 GHz帯データのうち、TRMM衛星搭載降雨レーダの周波数である14 GHz帯に比較的近い10 GHz帯のデータを用いて、TRMM衛星搭載降雨レーダの観測分解能に落としたテストデータを作成する手順の前半部分を示したものである。

航空機搭載降雨レーダの距離分解能は75 mで、それを30 m毎にオーバーサンプリングした形で磁気テープに記録されている。データが取得されたときの航空機の高度は約12 kmである。ビーム幅約5度のアンテナを航空機から真下に向けて海洋上で観測を行っているため、海面上でのアンテナビームサイズは直径約1 kmとなるが、磁気テープには航空機の移動に伴う水平距離約600 m毎のデータとして記録されている。

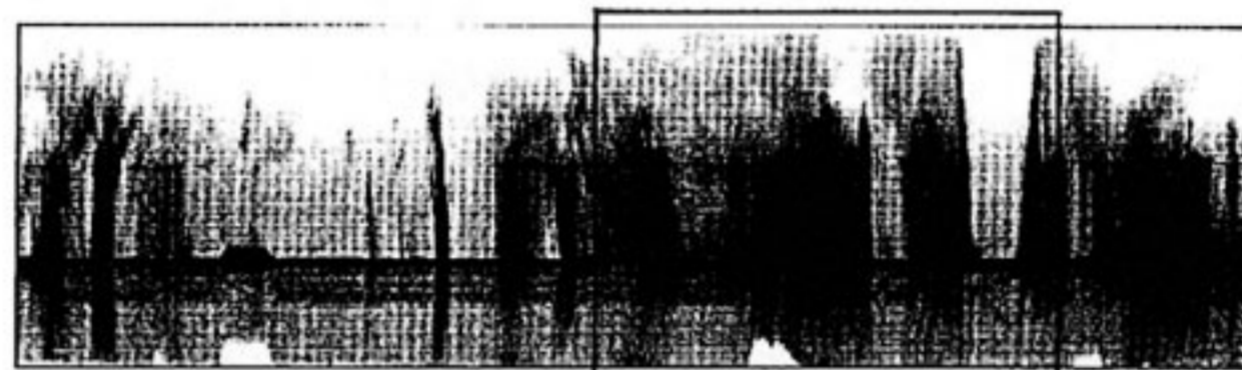
第6図(a)が航空機搭載降雨レーダの10 GHz帯のZ因子をプロットしたもので、縦軸は降雨レーダからの距離(図の上方が降雨レーダで、それから下方向に距離が増えている)、横軸は水平距離である。図に示したデータは図の左から右に向けて航空機が移動したときのもので、縦軸の範囲は18 km、横軸の範囲は約600 kmである。図の下側1/5付近には水平方向に広がるレーダエコーの強い帯が見られるが、これは海面からの反射である。また、縦軸の中央よりやや上側に水平方向に広がるレーダエコーの強い帯状の領域が見られるが、これがブライトバンドからの反射である。図の右端の近くで降雨が存在しない領域は台風の目である。

第6図(a)のところどころで、海面からの反射やブライトバンドからの反射が若干下側にずれているのは、航空機の姿勢変動のためアンテナビームが垂直方向からずれたために生じたものである。また図からはわかりにくいですが、航空機の高度が飛行と共に若干上下に変動している。これらの航空機の姿勢変動と高度変動を補正したのが第6図(b)である。

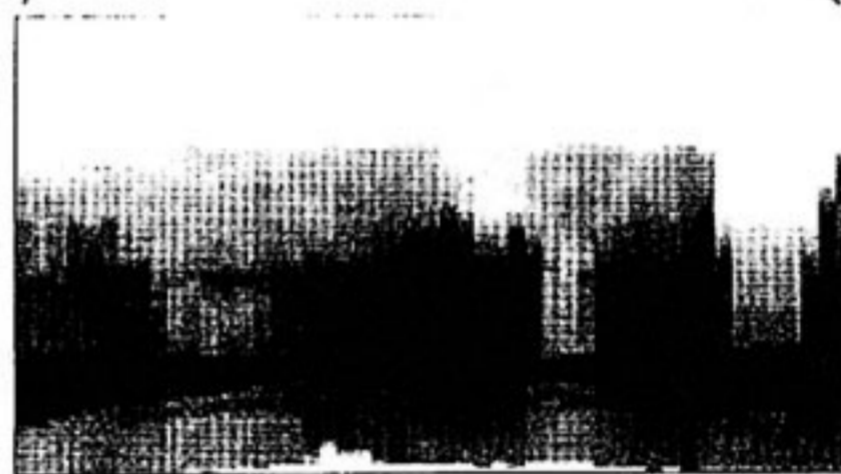
第6図(b)のデータにおいて、TRMM衛星搭載降雨レーダのアンテナビームがこの図に示す平面上をスキャンし、49アングルビンの範囲を観測したと想定したときのデータ範囲を四角で囲った。TRMM衛星の高度は約350 kmであり、約0.7度毎に49アンテナビーム分だけスキャンしたときの水平距離は約200 kmとなる。ところでTRMM衛星搭載降雨レーダは、衛星の進行方向に垂直



(a) 高分解能オリジナルデータ
レンジ方向距離分解能 7.5 m
(オーバーサンプリングした 30 m × 600 m のデータとして格納)



(b) 機体の傾きを補正後のデータ
アンテナパターンで平均化し、
TRMMの分解能 (250 m × 4.1 km)
に対応したデータを作成



(c) 疑似データ (変動成分無し)

第6図 航空機搭載降雨レーダデータ (10 GHz 帯) を用いた疑似データの作成

な平面内でアンテナビームをスキャンする。従って、第6図(b)の四角で囲った部分を左右に動かす形で降雨が観測されるわけではない。しかしながら、TRMM衛星で観測される降雨データがどのように見えるかを調べる意味で、この四角で囲まれる部分を左右に移動させて疑似データをいくつか作成した。

第6図(c)は、このようにして作成した疑似データの一つを示したもので、TRMM衛星搭載降雨レーダのアンテナビームを図の左から右に向けて -17 度から $+17$ 度までスキャンしたときに得られるときに予想されるデータである。図の横軸はスキャン角(アングルピン)、縦軸は衛星からの距離であり(縦軸は、高度ではないことに注意)、TRMM衛星の位置は図の中央の真上である。この疑似データは、第6図(b)の高分解能データをアンテナパターンで重みをつけて積分し、TRMM衛星搭載降

雨レーダの観測分解能(距離方向 250 m, アンテナビームに垂直方向約 4.1 km)に落として作成したものである。なおこのとき、アンテナパターンにはガウス型を仮定し、電力半値幅(片道 3 dB 幅)の3倍の範囲にわたって積分している。図からわかるように、アンテナスキャンの両端(図の左端と右端)で海面からの反射が上下に広がってぼやけたものになっている。これは、アンテナビームが傾いていることによる影響である。

ところで第6図(a)に戻ると、そこに示したZ因子は、変動する降雨からの反射波の受信電力を512サンプル平均した $\langle P_r \rangle$ から、(3)式のレーダ方程式を用いて求めたZ因子である⁽⁴⁾。この受信電力は、航空機から短距離の範囲の降雨を観測したときに得られたもので、S/N(信号対雑音電力比)がもともと高い。Z因子へ変換したのは、この高S/Nの受信電力の512サンプル平均値であ

る $\langle P_r \rangle$ から雑音の除去を行ったデータである。このデータを TRMM 衛星搭載降雨レーダの観測分解能に対応する範囲で積分しているため、さらに平均化を行ったことになり、第6図(c)に例として示した疑似データは、雑音の影響が無く、かつ降雨からの反射波がランダムに変動していることによる受信電力の変動を実質的に受けていないものとみなすことができる。

一方、実際の TRMM 衛星搭載降雨レーダのデータでは、64 という比較的小さなサンプル数のデータを平均して $\langle P_r \rangle$ を求めており、また S/N もさほど高くない⁽⁶⁾⁽⁷⁾。このとき、受信電力 P_r は降雨からの反射波の受信電力 P_R と雑音電力 P_N の和となる。すなわち

$$P_r = P_R + P_N \quad \dots\dots(12)$$

ここで P_R と P_N の両者ともランダムに変動し、またその和である P_r もランダムに変動する。TRMM 衛星搭載降雨レーダでは、各スキャン角でレンジビン毎に、この P_r を64サンプル平均した値から雑音電力 P_N の平均値を差し引いて降雨からの反射波の受信電力 P_R の平均値を求め、その値をデータとして出力している。すなわち

$$\langle P_R \rangle = \langle P_r \rangle - \langle P_N \rangle \quad \dots\dots(13)$$

である。ところで、TRMM 衛星搭載降雨レーダは対数検波方式を採用しているので、雑音を差し引いて求めた降雨からの反射波の受信電力 P_R の標準偏差 $\sigma(P_R)$ は次

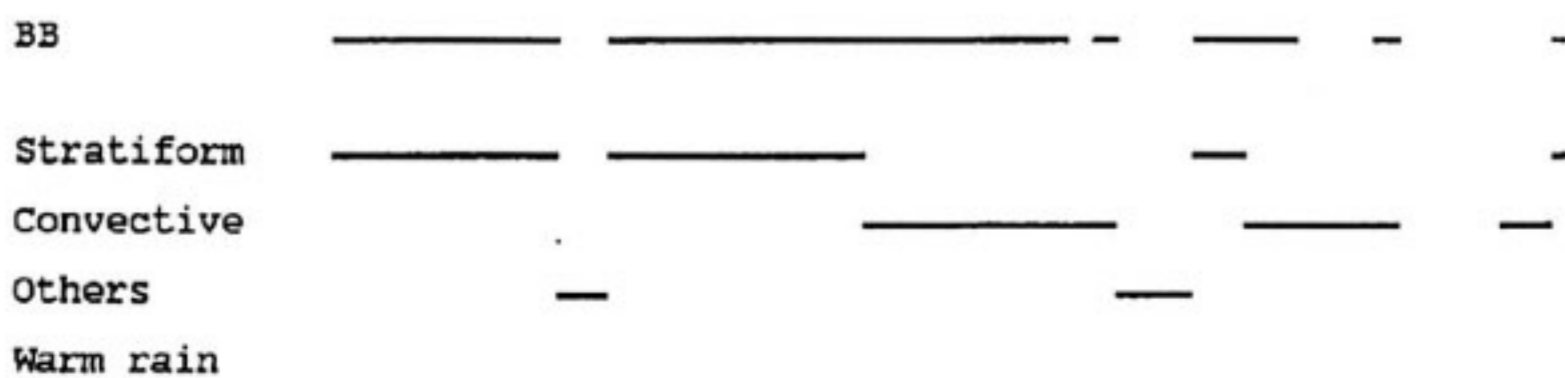
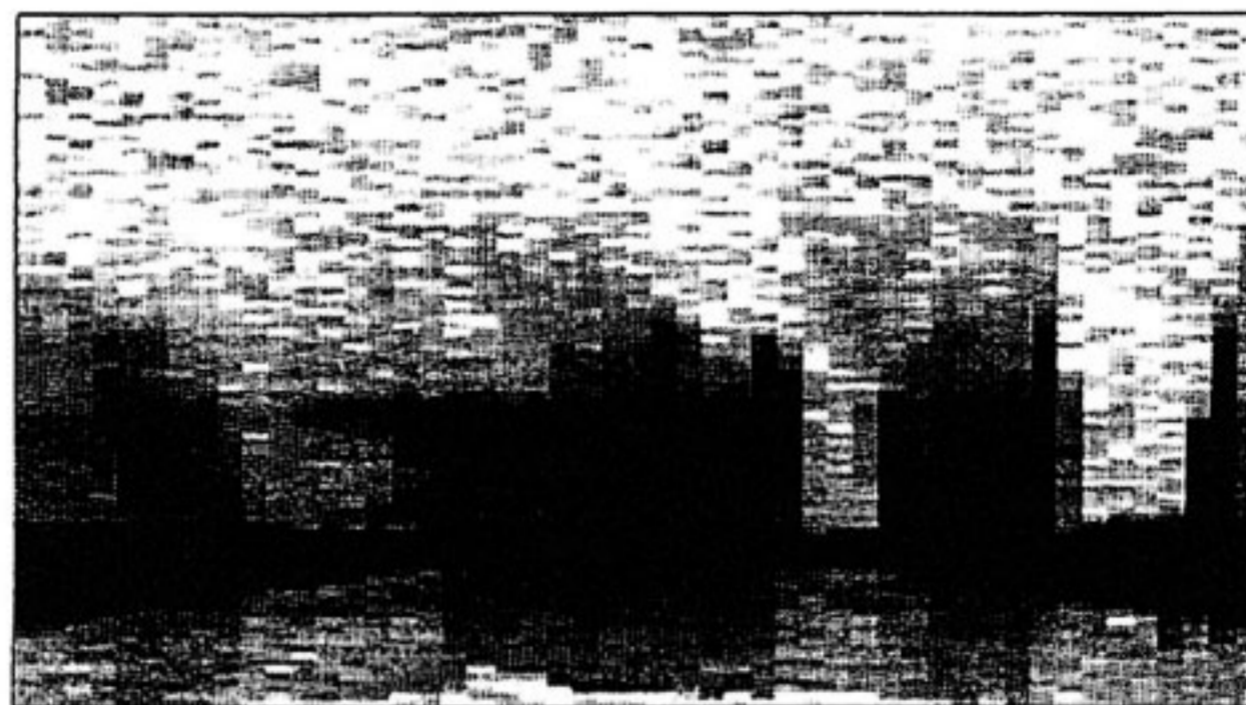
式で与えられることが知られている⁽³⁾。

$$\sigma(P_R) = (\pi/6) [(\langle P_R \rangle + \langle P_N \rangle)^2/n + \langle P_N \rangle^2/m]^{1/2} \quad \dots\dots(14)$$

ここで n および m はそれぞれ受信電力および雑音電力を平均するサンプル数で、TRMM 衛星搭載降雨レーダの場合 $n = 64$, $m = 256 (= 4n)$ である。(14)式からわかるように、 P_R の標準偏差は平均するサンプル数 n のルートに逆比例するので $n = 64$ の場合の標準偏差 $\sigma(P_R)$ は比較的大きい。また、 $S/N = \langle P_R \rangle / \langle P_N \rangle$ の値が大きければ P_R の標準偏差に与える雑音の影響は無視できるが、TRMM 衛星搭載降雨レーダのように降雨からの反射波に対する S/N の値がさほど大きくない場合には、雑音電力を差し引いて求めた P_R の標準偏差が雑音の影響で大きくなり、得られたデータの変動が大きくなる。

疑似データ作成の後半の部分は、上に述べたデータの変動を第6図(c)のデータに付加することである。なお、第6図(c)は Z 因子を示したものであるが、Z 因子は $\langle P_R \rangle$ に比例するので、 $\langle P_R \rangle$ の値をアンテナスキャン角とレンジに対して示したものとみなすこともできる。

第7図は、第6図(c)における Z 因子に対応する受信電力の平均値が $\langle P_R \rangle$ のとき、雑音を差し引いた受信電力は平均値が $\langle P_R \rangle$ で標準偏差が(12)式で与えられるガウス分布に従って変動すると仮定して求めた疑似データである。すなわち、第7図は上に述べた平均値と標準偏差を



第7図 航空機搭載2周波降雨レーダデータのうち10GHz帯のデータを使用して作成した疑似データと降雨タイプの分類結果。疑似データの縦軸はレンジ(25km範囲)、横軸はアンテナスキャン角(水平方向距離に換算して約220km範囲)。

有するガウス分布を仮定して乱数を発生させ、乱数の値が ε のとき、 $\langle P_R \rangle + \varepsilon$ が実際に TRMM 衛星搭載降雨レーダで得られるデータであるとして求めたものを Z 因子に変換して表示したものである。なお第 7 図の下側には、ブライツバンドの検出結果と降雨タイプの分類結果が示されているが、これについては次節で詳しく説明する。なお、TRMM 衛星搭載降雨レーダの諸元の値を用いて、標準偏差の計算に必要な $\langle P_N \rangle$ の値は -111.05 [dBm] であるとした。

10. テスト結果

前節でも述べたように、第 7 図はテスト用の疑似データ、すなわち TRMM 衛星搭載降雨レーダで測定されるものに近いと予想されるデータの一例と、そのデータを用いてアルゴリズム 2 A-23 をテストした結果、すなわちブライツバンドの検出結果および降雨タイプの分類結果を示したものである。第 7 図に示した疑似データの見方について詳しく説明すると、次のようになる。

第 7 図の縦軸は降雨レーダのレンジ方向 25 km の範囲を示しており、図の上端が海拔高度 18 km となるように設定して表示している。図の横軸は左から右に -17° から $+17^\circ$ の範囲でアンテナを走査したときのアンテナスキャン角を示しており、図の中央のスキャン角が 0° の部分が TRMM 衛星搭載降雨レーダのアンテナが鉛直方向真下を向いた場合に対応している。図の水平方向の距離は約 200 km で、1 スキャン角当たりの水平距離は約 4 km である。図の上端から 18 km 程度下方に見られる Z 因子の強い領域が海面からの反射によるもので、スキャン角の絶対値が大きくなるにつれて上下方向にぼやけている。これはアンテナビームが傾くことによって、そのビームに沿った複数個のレンジに海面の領域がかかるために生じたぼやけである。なお、海面エコーの上下の中心が図の左右両端に近づくにつれて下方に曲がっているのは、地球の曲率によるのではなく、図の縦軸が高度ではなくレンジ、すなわちレーダからの斜め方向の距離を示しているため、アンテナビームが傾いたときこの斜め方向の距離が長くなるためである。ただし、直感的な理解のためには、図の縦軸は高度を表していると考えても、さほど大きな誤りとはならない。なお、図の右端に近い部分に現れている Z 因子が非常に小さな値となっている領域が台風目である。

第 7 図において、海面から約 5 km 上空で水平方向に現れている Z 因子の値が大きな帯状の部分がブライツバンドである。第 7 図の下方に BB の記号で示してあるのが、ブライツバンドをアルゴリズム 2 A-23 を用いて自動検出した結果である。目でブライツバンドが存在する

と確認できるアンテナスキャン角において、確かにブライツバンドが自動検出されていることがわかる。

第 7 図の中央から右側にかけて、ブライツバンドが検出されているにもかかわらず、降雨タイプは対流性であると判定されていることがわかる（第 8 節参照）。なお、第 7 図に示した例には暖かい雨は存在していない。

同様のことを、ここに述べた以外のテストデータを用いて行い、アルゴリズム 2 A-23 が期待通り動作し、ブライツバンドの検出と降雨タイプの分類が的確に行われていることを確かめてある。

11. 今後の課題

本論文で述べた降雨タイプの判別等を行う際に用いた具体的な数値、例えば(8)式における 600 という値、は暫定的なものである。暫定的という意味は、アルゴリズム 2 A-23 の最終版では、これらの数値に変更が有り得ると言うことである。ただし、著者としては、あまり大きな変更にはならないものと予想している。

これらのアルゴリズム 2 A-23 に現れる数値を決定するには、理想的には、例えばあらかじめ降雨タイプが決定されている基準データなるものが存在すれば、アルゴリズム 2 A-23 をこの基準データに対して適用し、その結果と基準の結果を比較すれば良いことになる。降雨タイプが決定されている基準データが存在すれば、アルゴリズム 2 A-23 が与える結果と基準データが与える結果の差が小さくなるような形でアルゴリズム 2 A-23 に現れる値を決定すれば良い。この目的で、TRMM 衛星打ち上げ後に、信頼性のある地上降雨レーダと TRMM 衛星搭載降雨レーダのデータを用いた結果を比較することが計画されている⁽¹⁾。

ただし、ここに述べた信頼性のある地上降雨レーダのデータを用いた結果との比較は、TRMM 衛星打ち上げ後のみに実施可能である。衛星打ち上げ前までに、アルゴリズム 2 A-23 に現れる数値を、できる限りの精度で決定しておく必要がある（ストームモデルに基づくテストデータはブライツバンドを基本的含まないなど、上に述べた基準データとして使用することには無理があることがわかっている。）。このためには、衛星打ち上げ前に、できる限り多くの疑似データを作成し、これら全てのデータをうまく説明できるように、アルゴリズム 2 A-23 に現れる値を決定すれば良い。

疑似データを用いたテスト結果の判定は、現在のところ人間の判断にたよっている。いくつかの判定部分は、数値を用いて定量的に結論を下すことが可能である。例えば、同じおもとのデータを用いても、降雨領域が衛星直下方向にある場合と、アンテナスキャンの端にある

場合とでは、データのばやけ具合が異なるので、結果が一般には異なる。この、結果が異なるデータの個数を最小化する形でアルゴリズムに現れる数値の範囲を追い込むということが考えられる。最終的には、このような定量化できる部分はできる限り自動化して、人間の判断を必要とする部分を減らしたいと考えている。

また、アルゴリズム自体の変更も今後の大きな課題である。例えば、本論文ではアンテナ1スキャンのデータに対してのみ空間フィルタを適用し、またそのデータのみに対して第5図に示すスムージングの操作を行っているが、これらの操作を、考えているアンテナスキャンの前後のデータを含めた3アンテナスキャンのデータを用いて行うことなどが考えられる。

12. おわりに

ブライトバンドを検出し、それを基に降雨タイプを分類する TRMM 降雨レーダアルゴリズム 2 A-23 の概要と、航空機搭載降雨レーダの 10 GHz 帯のデータを用いて作成した疑似データでアルゴリズムのテストを行った結果の一例について述べた。本文にも述べたように、テスト用のデータは各種あり、それぞれ異なった Z 因子プロファイルが得られてる。現在までのところ、これらの疑似データを用いたテスト結果は良好である。今後、TRMM 衛星打ち上げの前までに可能な限り多くの疑似データを作成し、アルゴリズムのテストを引き続き行うとともに、これらの疑似データを基に、アルゴリズム自体の改良およびアルゴリズムに含まれるパラメータの最適化を行うことを計画している。また、TRMM 衛星の打ち上げ後は、実際のデータを用いてアルゴリズムの動作確認を行う必要があり、また場合によってはアルゴリズム自体の細かな手直しも必要であると考えている。

謝 辞

著者の一人(阿波加)は、アルゴリズム 2 A-23 の開発にあたり宇宙開発事業団(NASDA)の援助を受けたことを記して、NASDAの関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

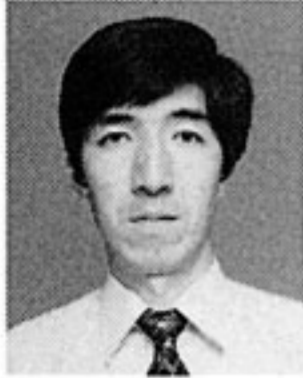
- (1) J. Simpson (Ed.), Report of the Science Steering Group for a Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), NASA/GSFC, 1988.
- (2) L.J. Battan, Radar Observation of the Atmosphere, The University of Chicago Press, Chicago, 1973.
- (3) R. Meneghini and T. Kozu, Spaceborne Weather Radar, Artech House, Norwood, MA, 1990.
- (4) H. Kumagai, R. Meneghini, and T. Kozu, "Preliminary results from multiparameter airborne rain radar measurement in the western Pacific", J. Appl. Meteor., vol.32, pp.431-440, 1993.
- (5) 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.
- (6) K. Nakamura, K. Okamoto, T. Ihara, J. Awaka, and T. Kozu, "Conceptual design of rain radar for the Tropical Rainfall Measuring Mission", Int. J. of Satellite Communications, vol.8, pp.257-268, 1990.
- (7) 岡本謙一, 阿波加純, 古津年章, 井原俊夫, 真鍋武嗣, 中村健治, "熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載降雨レーダのシステム検討", 日本リモートセンシング学会誌, vol.15, No.4, pp.66-80, 1995.
- (8) T.A. Nodes and N.C. Gallagher, Jr., "Median filters: some modifications and their properties", IEEE Trans. Acoust. Speech and Signal Process, vol.ASSP-30, pp.739-746, 1982.
- (9) 佐藤亨, 私信, 1996.
- (10) W.K. Tao and J. Simpson, "A further study of cumulus interaction and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses", J. Atmos. Sci., vol.46, pp.2974-3004, 1989.
- (11) H.Y. Yeh, N. Prasad, R. Meneghini, W.K. Tao, J.A. Jones, and R.F. Adler, "Model-based simulation of TRMM spaceborne observations", J. Appl. Meteor., vol.34, pp.175-197, 1995.
- (12) S. L. Durden, E. Im, F. K. Li, W. Ricketts, A. Tanner, and W. Wilson, "ARMAR: An airborne rain-mapping radar", J. Atmos. Ocean. Tech., vol.11, pp.727-737, 1994.



阿波加 純
Jun AWAKA
北海道東海大学工学部
電子情報工学科
電波伝搬とリモートセンシング
E-Mail: awaka@de.htokai.ac.jp



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



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



岡本 謙一
Ken'ichi OKAMOTO
地球環境計測部
電波リモートセンシング
E-Mail: okamoto@crl.go.jp

