

陸面輝度温度変動を考慮した マイクロ波放射計による陸上降水有無判定

IDENTIFICATION OF PRECIPITATION OVER LAND BY MICROWAVE
RADIOMETER CONSIDERING THE VARIATION OF BRIGHTNESS
TEMPERATURE OF LAND SURFACE

瀬戸心太¹・井口俊夫²
Shinta SETO and Toshio IGUCHI

¹正会員 博士(工学) (独)通信総合研究所 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

²非会員 Ph.D (独)通信総合研究所 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

This study challenges identification of precipitation over land by microwave radiometer. For that purpose, we prepare database of land surface brightness temperature from 1998 to 2000 using TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) /TMI (TRMM Microwave Imager) and PR (Precipitation Radar) data. PR data is used for precise identification of non-rainfall condition. These databases can represent inter-annual variation, seasonal variation, diurnal variation, heterogeneity within 1 degree grid, and variation caused by soil moisture.

Rainfall identification is done by comparing the deviation of observed brightness temperature from average and standard deviation of referred database with a negative threshold k_0 . Only 85GHz observation can give comparable result with existing TMI algorithm (2A12) for all rain rate, but 37GHz observation can give as good performance as 85GHz observation in case of strong rainfall (more than 10mm/hour). When diurnal variation or variation by soil wetness is considered, the performance of lower frequency observation is slightly improved.

Key Words : *Microwave radiometer, precipitation, soil moisture, emission, scattering, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Global Precipitation Measurement (GPM)*

1. 背景と目的

陸上における降水観測の手段として、地上の雨量計や降水レーダの観測網は地域的に限定されており、全球の水資源評価などに必要なグローバルに均質な降水量プロダクトの作成には衛星によるリモートセンシング観測の利用が欠かせない。降水観測に利用可能なリモートセンサには、降水レーダ、マイクロ波放射計、赤外放射計の3種類がある。衛星搭載の降水レーダは降水現象の鉛直分布を直接観測できる長所があるが、観測幅が狭いため、時間的変動の激しい降水現象をとらえるのには不十分な面がある。また、赤外放射計は静止気象衛星や極軌道衛星に搭載されており観測頻度は高いが、観測される雲の情報と地上の降水量は必ずしも直接的に結びつかない。マイクロ波放射計による観測は直接的には鉛直方向の解像度を持たないものの、雲粒ではなく降水粒子を観測できることから、赤外放射計に比べると直接的な推定が可能である。さらに、降水レーダよりも観測頻度が高い。

このため、マイクロ波放射計は衛星による降水観測、とりわけ降水量プロダクトの作成において中心的に利用することが期待されている。2007年から始まる予定の全球降水観測計画(GPM)においては、各国の協力による8機のマイクロ波放射計を利用して、3時間間隔の降水量プロダクトを作成することが計画されている。

マイクロ波放射計による降水量推定方法は、海上と陸上で大きく異なっている。海上では、雨粒から射出されるマイクロ波の放射強度(輝度温度で表現される)と地上の降水量の物理的な関係をもとにして降水量を推定している(吸収アルゴリズム¹⁾)。ところが、陸上の場合には、背景となる陸面自体の輝度温度が高いために、雨粒による輝度温度の増加がほとんど観測できない。そこで、降雨層の上層にある雪・氷粒子によってマイクロ波が散乱され、輝度温度が減少することを利用して、地上の降水量を推定する(散乱アルゴリズム²⁾)。散乱アルゴリズムでは、雪・氷粒子による散乱と地上の降水量には必ずしも直接的な関係がなく(降水の鉛直分布の特性に依存するため)、高精度な推定は難しい。陸上の場合

には、さらに、雪・氷粒子による散乱のシグナルに対してノイズとなる陸面の輝度温度の変動が大きいことが問題となる。陸面の輝度温度は、植生や土壌の状態に影響を受けるため、海面に比べると空間的な変動が大きく、モデル化も困難とされている。これまで、陸面の輝度温度の時空間変動について、砂漠域や積雪面など極端に輝度温度が低い状態については降水観測に与える影響が考慮されている^{3),4)}。そのほかの一般的な変動の影響については、チベット高原を対象に土壌水分量と降水量の同時推定を行った研究⁵⁾があるが、全球的な統計としての結果は出ていない。このため、本研究では、実際の衛星による観測データから、陸面輝度温度についての統計的なデータベースを作成して、これを利用した降水有無判定手法を検討する。本論文では以下、熱帯降雨観測衛星(TRMM)のデータを利用して、陸面輝度温度についてのデータベースを作成する(2節)。次に、このデータベースを利用して陸面輝度温度の変動の特徴について解析する(3節)。つづいて、データベースを参照した降水有無判定試験を行う(4節)。

2. 陸面輝度温度データベースの作成

(1) 無降水時データの抽出

衛星観測データから陸面輝度温度の情報を取り出すためには、少なくとも無降水時に行われた観測を抽出することが必要である。実際には、晴天時であっても大気中の水蒸気量などにより輝度温度が影響を受けるため、陸上で観測された輝度温度と陸面の輝度温度とは一致しないが、本研究の目的を考えた場合に大気の影響は2次的なものとして無視することにする。TRMMに搭載されている降水レーダ(PR)による降水有無判定を利用して無降水時のマイクロ波放射計(TMI)の輝度温度データを取り出すこととした。PRでは、海陸の影響をあまり受けずに観測できるため、陸上においても信頼できる降水有無判定が可能である。TRMMの公式プロダクトから、TMIの観測輝度温度が収められた軌道データ(プロダクト名称1B11)とPRの降水・地表面フラグなどが収められた軌道データ(プロダクト名称2A21)を利用する。TMIは10GHz, 19GHz, 21GHz, 37GHz, 85GHzの5つの周波数、9つのチャンネル(21GHzは垂直偏波のみ)を持つ。空間解像度は周波数ごとに異なり、10GHzの場合に63.2km(スキャン垂直方向)×36.8km(スキャン方向)であるが、周波数が高いほど小さくなり、85GHzの場合には7.2km×4.6kmとなる。一方、PRの空間分解能は4.3kmと小さい。このため、図-1に示すように、TMIの観測域の中に複数のPRの観測が含まれることになる。プロダクト2A21に収められているPRの降水フラグとしては“no rain”, “rain possible”, “rain certain”の3種類がある。“rain possible”はノイズまたは極めて弱い雨であり輝度温度

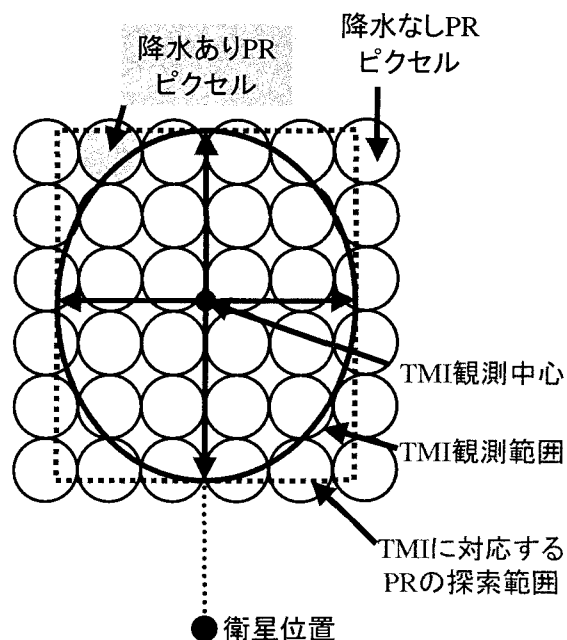


図-1 PRとTMIの観測を組み合わせた降水有無判定についての概念図。(この場合は降水ありと判定される)

に与える影響が小さいために、「降水なし」として扱う。ここでは“rain certain”と判定された場合のみ「降水あり」、そのほか2つの場合を「降水なし」とする。TMIの周波数ごとの観測範囲を図-1の点線の枠に示すような長方形領域で近似する。この長方形内に観測中心を持つPRの観測のうちひとつでも「降水あり」のフラグを示すものがあれば、TMIのその周波数での観測が降水の影響を受けているものとみなす。すべてのPRの観測が「降水なし」の場合のみTMIの観測が無降水条件下で行われたと判定する。同様に、地表面タイプ(陸上、海上、沿岸域)フラグについても、TMIの観測範囲に含まれるPRがすべて陸上のフラグを示す場合のみTMIが陸上を観測しているものとみなす。

(2) データベースの種類

次に陸面輝度温度の時空間変動の解析に利用しやすい形にデータベースを作成する。最初に、基本となるデータベース(「基本変動データベース」と呼ぶ)として、空間解像度が緯度経度1°、時間解像度が1ヶ月のグリッドデータを作成する。チャンネルごとに、各グリッドに該当する無降水時・陸面での観測輝度温度の平均値と標準偏差を計算する。1節で述べたように、陸面輝度温度はさまざまなスケールでの時空間変動を示す。このため、1°グリッド、1ヶ月より小さいスケールでの変動についても考慮する必要がある。陸面の輝度温度を変動させる原因は大きく植生量・土壌水分量・物理温度に分けられるが、このうち土壌水分量については降水イベントに起因する1ヶ月以下のスケールでの変動(季節内変動)が大きく、さらに物理温度については日内変動が

大きい。また、空間的に1°グリッドの中に含まれる不均一性についても考慮する必要がある。

これらのより細かな変動を考慮するために、基本変動データベースの条件に加えて、空間解像度を0.2°グリッドにした「空間変動データベース」、日内変動を考慮して地方時刻（1時間ごと）で分類した「日内変動データベース」をそれぞれ作成することにした。さらに、土壌水分量などに起因する季節内変動を調べるために、以下に説明する「水分変動データベース」を作成した。

マイクロ波放射計で観測した輝度温度から土壌水分量を求めるための指標として、小池ら⁶⁾は、ISWおよびPIの組み合わせを提案している。ISW、PIはそれぞれ次のように表現される。

$$ISW = \frac{T_{B,high} - T_{B,low}}{\frac{1}{2}(T_{B,high} + T_{B,low})}, PI = \frac{T_{B,v} - T_{B,h}}{\frac{1}{2}(T_{B,v} + T_{B,h})} \quad (1)$$

ただし、 T_B は輝度温度を、添え字のhighは高周波数チャンネルを、lowは低周波数チャンネルを、vは垂直偏波を、hは水平偏波を表す。ここでは、ISW、PIを次のように簡略化して利用する。

$$ISW = T_{B,37h} - T_{B,10h}, PI = T_{B,10v} - T_{B,10h} \quad (2)$$

ただし、37, 10は周波数を表す。各回の観測についてのISW、PIから、グリッドのISW、PIの平均値と標準偏差をもとにして、偏差をそれぞれ計算する。偏差が1以上、0.5以上、-0.5以上、-1以上、-1以下で各5分類し、ISW、PIについての分類の組み合わせで25通りの分類を得る。基本変動データベースの条件に、この条件を加えて分類したものが「水分変動データベース」となる。

3. 陸面輝度温度の変動と降水による影響

(1) 各種変動の規模

2節で作成したデータベースをもとに、各1°グリッドについて、季節変動、グリッド内不均一性、日内変動、水分量依存性を計算した。季節変動は、12ヶ月分の基本変動データベースを使い最大値と最小値の差で定義する。グリッド内不均一性は、空間変動データベースの年平均を用いて、25個のサブグリッドごとの最大値と最小値の差で定義する。同様に、年平均した日内変動データベース、水分変動データベースを利用して、日内変動と水分量依存性の大きさを定義する。その結果、低緯度帯では日内変動が強いが、中緯度帯では季節変動が相対的に強い。また、水分量依存性は、偏波間輝度温度差をとった場合に大きく表れる。グリッド内の不均一性は、砂漠域で高く森林域で低い傾向を示すが、他の変動と比べて小さい。

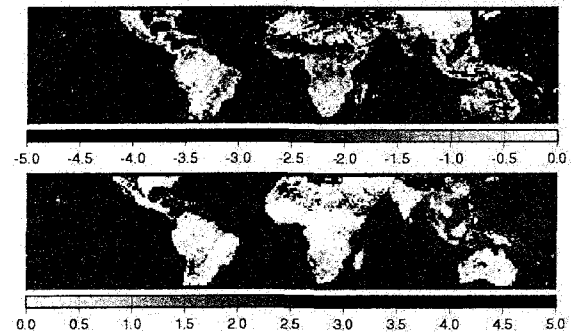


図-2 降水ありの輝度温度から降水なしの輝度温度を引いた値(19GHzの垂直偏波;1998-2000年の3年平均)。上の図に負の場合、下の図に正の場合を示す領域を示す。

(2) 降水の影響

次に、降水なしの場合の輝度温度と、降水ありの場合の輝度温度を比較した。後者は無降水と判定された以外のすべての観測についての統計であり、さまざまな降水量・降水タイプのものが含まれる。ほとんどのチャンネル・地域について、降水ありの場合に輝度温度が低くなり、降水の影響は負のシグナルとして表れている。海上の場合に見られるような降水粒子からの射出による輝度温度の増加は見られない。例外となるのは、チベット・アンデスなどの積雪面である。積雪面は、海上と同様に輝度温度が低いため、降水による輝度温度の増加が見られる。図-2に19GHz垂直偏波についての結果を示す。低周波数では降水の影響は弱いサヘル地帯やインドなどで比較的強い負のシグナルが表れている。このことについては、降水層の影響ではなく、降水により一時的に土壌水分量が増加した影響ではないかと推察できる。

本研究の目的である、降水有無判定に対する陸面輝度温度の変動の影響を調べるには、この節の(1)と(2)の結果を比較することでも定性的に可能であるが、より定量的な議論をおこなうために、次節のような試験を行う。

4. 降水有無判定試験

(1) 方法

観測された輝度温度 $T_{B,obs}$ に対して、対応する陸面輝度温度データベースの平均値 μ と標準偏差 σ を参照し、式(3)から偏差 k を計算する。

$$k = (T_{B,obs} - \mu) / \sigma \quad (3)$$

3(2)で述べたように、陸上ではほとんどの場合に降水のシグナルは輝度温度を減少させる方向に表れることから、 k がある閾値 k_0 ($k_0 < 0$)より小さい場合に「降水あり」、それ以外の場合に「降水なし」と判定する。この結果を、PRの降水フラグによる判定を基準として採点する。TRMMの公式プロダクトに含まれるTMIによる降水有無判定

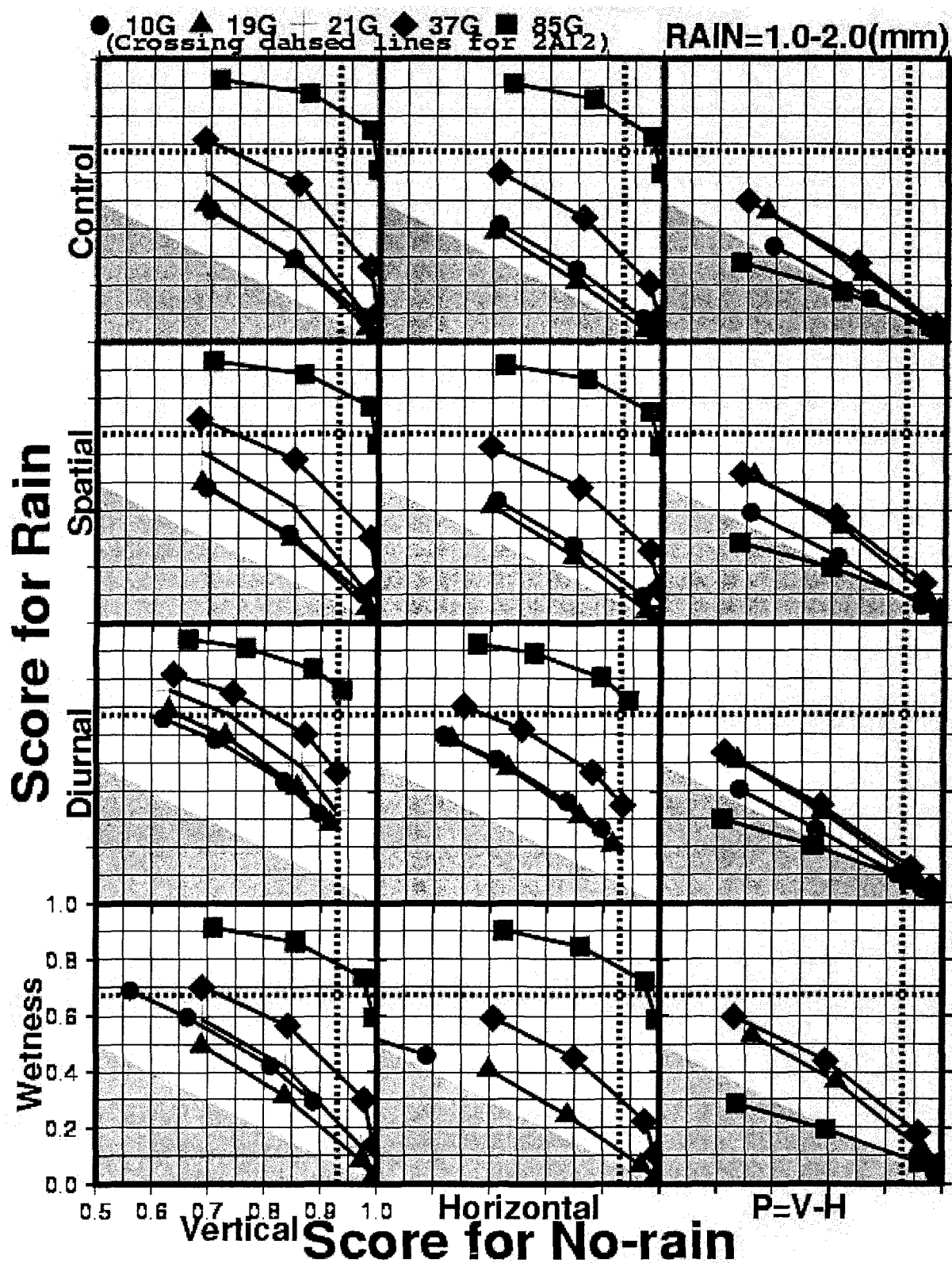


図-3 試験1についての降水あり正解率(横軸)と降水なし正解率(縦軸). 各周波数(各シンボルに対応), 偏波(図の各行に対応, 左から垂直偏波・水平偏波・偏波間輝度温度差), 参照するデータベース(図の各行に対応, 上から基本変動・空間変動・日内変動・水分変動データベース), 閾値 k_0 (各線の左上から-0.5, -1, -2, -3)の値ごとに示す. 比較のため, 公式プロダクトの正解率を示す(点線の交点). 左下の網掛け部は両正解率の合計が1に満たず, 降水判定能力なしと考えられる部分.

(プロダクト2A12) に対しても, 同様にPRを基準として採点を行い, 本研究の結果と比較した. 公式プロダクト

では, 85GHzの偏光度を利用した判定が行われている. 2001年7月分の降水有無判定を, 1998年から2000年まで

の3年間を平均した7月の各種データベースをそれぞれ参照して、行った(試験1)。次に、2000年の1年分について、試験期間と同じ月の過去2年間(1998, 1999年)平均で作成した基本変動データベースを参照して、降水有無判定試験を行った(試験2)。

(2) 結果

a) 周波数・偏波による違い

図-3に、試験1で基本変動データベースを参照した場合の結果について示す。図-3には、参照するデータベース4種類と利用する偏波3種類の違いにより合計12個の小図が示されている。各小図の横軸はPRが降水なしと判定したスナップショットに対して、TMIが降水なしと判定した場合を正解としてその割合(以下、「降水なし正解率」)を、縦軸には同様に定義される「降水あり正解率」を示す。それぞれの線は、利用した周波数に対応する。各線上の点は $k_0 = -0.5, -1, -2, -3$ の場合にそれぞれ相当する。 k_0 を大きくとれば降水あり正解率が上がるが降水なし正解率が下がり、一方 k_0 を小さくとれば降水なし正解率が上がるが降水あり正解率が下がる。このため、両正解率のバランスを保つ妥当な閾値の値 k_0 の選択が必要である。2A12の正解率を上回るのは85GHzの場合だけであり、その場合の k_0 としては-2程度が妥当であった。垂直偏波の場合、水平偏波よりもわずかに正解率がよい。また、偏波間輝度温度差の利用では、十分な正解率を上げることができなかった。

b) 参照するデータベースによる違い

低い周波数側の垂直偏波または水平偏波では、日内変動データベースを利用することで正解率が向上する(図-4)。同じ k_0 の値を利用した場合について、降水なしの正解率はやや落ちるが、降水ありの正解率が高くなり、全体としては改善されている。降水なしの正解率が悪化する理由としては、日内変動データベース自体の経年変化の影響が考えられる。試しに、試験期間と同じ2001年7月のデータベースを使うと、降水なしの正解率がほとんど下がらないまま、降水あり正解率が大きく向上する。また、水分変動データベースを利用すると、低周波数帯では正解率が向上することが確認される。これは、低周波数帯ほど土壌水分の影響を受けやすいためと考えられる。高周波数のチャンネルについては、各種データベースによる違いはほとんどない。空間変動データベースを利用した効果はすべてのチャンネルを通じてほとんどなかった。

c) 降水量別の正解率

試験1について、降水あり正解率をPRによる降水量ごとに区分して集計した(図-5)。ここで降水量はTMIの10GHzの観測範囲内に含まれるPRが観測した地表面付近降水量(プロダクト2A25より)の平均値である。85GHzを利用すると、極めて弱い降水(降水量0.1mm/hour未満)から、TMIは統計的に反応できることが確認される。

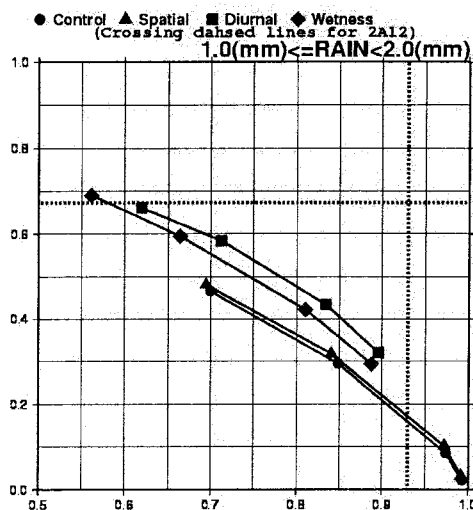


図-4 試験1について、参照するデータベースを変えた場合の正解率の比較(10GHz垂直偏波の場合)。横軸が降水なし、縦軸が降水ありに対する正解率。凡例は左から順に基本変動、空間変動、日内変動、水分変動に対応。

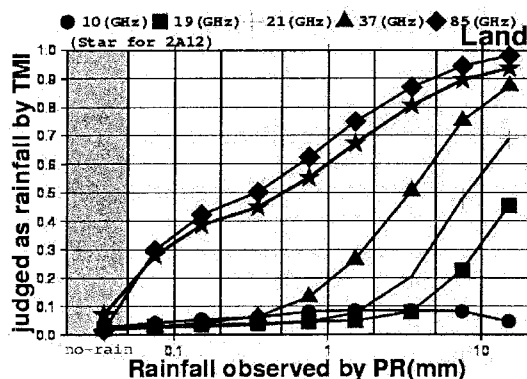


図-5 試験1について、降水あり正解率の降水量による変化(各周波数の垂直偏波について表示)。左端(網掛け部)は降水なしに対する誤答率。

ここで、統計的に反応しているとは、「降水なし」についてTMIが降水ありと判定した割合(誤答率)よりも明らかに高い正解率を示していることである。一方、37GHzを利用した場合には1mm/hour以上、21GHzを利用した場合には2mm/hour以上、19GHzを利用した場合には5mm/hour以上の降水に対して統計的な反応が見られるが、10GHzを利用した場合には10mm/hour以上でも反応が見られなかった。10mm/hour以上の強い降水に対しては、37GHzでも85GHzに近い正解率を得た。

d) 正解率の季節変化・分布

次に試験2について、降水あり正解率の季節変化を示す(図-6)。中緯度帯(緯度30°以上)については、南半球・北半球いずれの場合にも、夏の方が冬よりも正解率が高い。この傾向は、85GHzの場合に顕著に表れる。な

お、降水なしに対する誤答率はほとんど変化していなかった。また、試験2について、2000年1年分を集計した降水ありに対する正解率および降水なしに対する誤答率の地域分布を示す(図-7)。その結果、低緯度帯において正解率が高いことが分かる。これらの理由として、冬には積雪による影響が表れるほか、陸面輝度温度が高い方が散乱のシグナルが得やすいことがあげられる。

5. 結論

陸上では、ほとんどの場合に、降水のある場合の方が同じ地表面条件で降水のない場合に比べて、輝度温度が下がる。このことは、降水粒子からの射出ではなく、降水層の上層の雪・氷層による散乱によっていると考えられる。このシグナルは、高周波数になるほど強くなることと、降水有無判定にノイズとなる陸面の輝度温度の変動は低周波数の方が大きいことから、ほとんどの場合に降水有無判定には85GHzのみが有効である。しかし、10mm/hour以上の強い降水に対しては37GHzでも85GHzと同程度の判定精度を示すなど、強い降水に対しては低周波数側のチャンネルもあわせて利用可能と考えられる。低周波数側での観測については、物理温度の日内変動や土壌水分量の変動の影響を受けることから、これらを考慮した陸面輝度温度データベースを利用することで、降水有無判定精度を改良することが可能である。

謝辞：本研究は、科学技術振興事業団 戦略的創造研究推進事業「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成（代表：岡本謙一）」の成果の一部である。同プロジェクトの参加者の皆様からは有益な指摘を多くいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) Wilheit, T. T., A. T. C. Chang, M. S. V. Rao, E. B. Rodgers, and J. S. Theon.: A Satellite Technique for Quantitatively Mapping Rainfall Rates over the Oceans, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.16, pp551-560, 1977.
- 2) Spencer, R. W., H. M. Goodman, and R. E. Hood.: Precipitation Retrieval over Land and Ocean with the SSM/I: Identification and Characteristics of the Scattering Signal. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.6, pp254-273, 1991.
- 3) Grody, N. C.: Classification of Snow Cover and Precipitation Using the Special Sensor Microwave Imager. *Journal of Geophysical Research*, Vol.96, pp7423-7435, 1991.
- 4) Ferraro, R. R., N. C. Grody, and G. F. Marks.: Effects of Surface Conditions on Rain Identification Using the DMSP-SSM/I. *Remote Sensing Reviews*, vol.11, pp195-209, 1994.
- 5) Fujii, H. and T. Koike.: Development of a TRMM/TMI Algorithm for Precipitation in the Tibetan Plateau by Considering Effects of

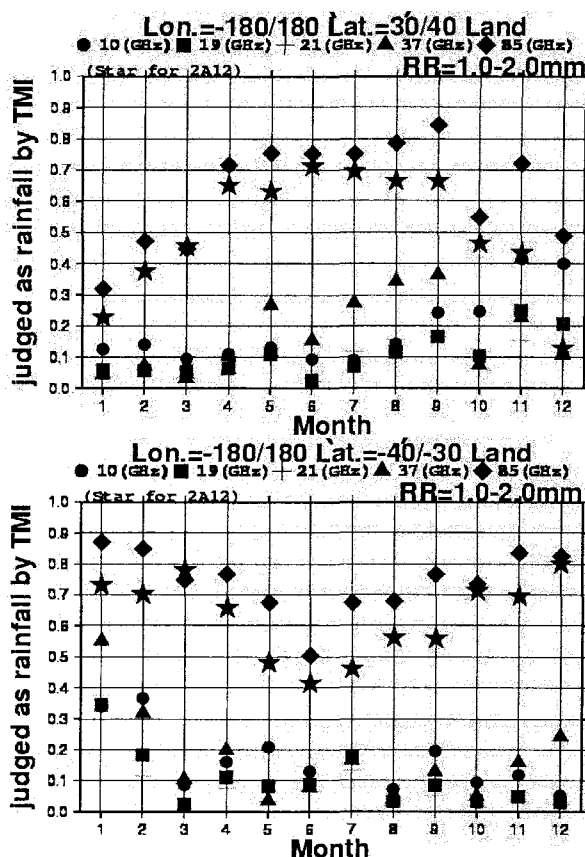


図-6 試験2について、降水あり(降水量1.0-2.0mm/hour)に対する正解率の季節変化(垂直偏波の各周波数について表示)。上の図は北緯30°以北、下の図は南緯30°以南についての集計結果。

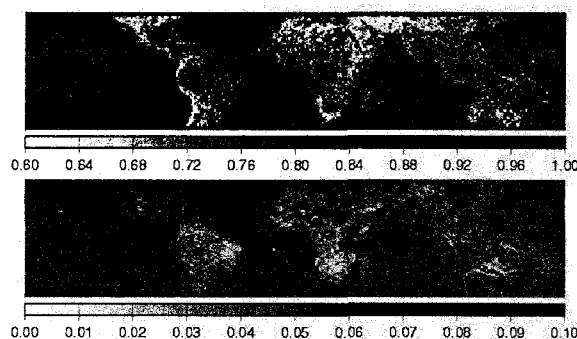


図-7 試験2について、年平均の正解率分布。上の図は降水あり(1.0-2.0mm/hour)に対する正解率。下の図は、降水なしに対する誤答率。

Land Surface Emissivity. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.79, pp475-483, 2001.

- 6) 小池俊雄, 下茂 力, 太田 哲, 藤井秀幸, 柴田 彰.: 陸面水文量分布のグローバル推定のためのマイクロ波放射計アルゴリズムの開発と検証, 水工学論文集, Vol. 44, pp247-252, 2000.

(2003. 9. 30受付)