

TRMM-PR による後方散乱係数を利用した グローバルな土地情報の分析

ANALYSES OF GLOBAL LAND COVER INFORMATION USING BACKSCATTERING COEFFICIENTS BY TRMM-PR

平林 由希子¹・瀬戸 心太²・鼎 信次郎³・沖 大幹⁴・虫明 功臣⁵

Yukiko HIRABAYASHI, Shinta SETO, Shinjiro KANAE, Taikan OKI, and Katumi MUSIAKE

¹学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

³正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助手 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

⁴正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

⁵正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

The backscattering coefficients observed by satellite-based microwave scatterometer are influenced by surface geometric roughness and incident angles. Land surface information can be obtained using these dependences of backscattering coefficients on a different land cover. The Precipitation Rader (PR) on-board the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) offers a global and seasonal data set of backscatter coefficients as a by-product. A set of TRMM-PR2A21 data in whole 1998 is utilized in this present paper to investigate land surface information. The backscattering coefficients at selected regions which belong to different land cover types are analyzed in order to clarify the dependence of backscattering coefficients on incident angle. It is found that the backscattering coefficients significantly depend on land type and incident angle. The seasonal change of backscattering coefficients at each land type is also assessed which should depend on the seasonal change of soil moisture and vegetation. Then, the PR-data are divided into 3 groups based on incident angle, and a global land cover map is produced by classifying land cover into 16 categories using the 3 groups. The global land cover map is presented and the characteristics of it is described in detail. It is expected that the seasonal change of global land surface information can be obtained utilizing this method in the future.

Key Words : global land information, TRMM-PR, backscattering coefficient, angle's dependence

1. はじめに

近年, 人間活動の影響が地球環境に重大な影響を及ぼすことが懸念されている。地球環境の変動による影響の一つとしては, 温暖化やエルニーニョによる気候の変化などが考えられる。森林伐採その他の人間活動による気候変動に関しては様々な分野で研究が進められてきており, それと同時に気候変動に伴う水文量や土地利用の変化など地球上のグローバルな観測データの収集が重要になってきている。

現在リモートセンシングデータを用いた研究は高度化し, 地球の総合観測を行うことで地球環境変動の実態を把握することが盛んに行われている。その中でも土壌水分情報を含む広域の地表面情報は水資源予測や水文環境変化の予測に必要不可欠であり, マイクロ波散乱計を用いた地表面の土壌水分計測に関する研究が進められている。

1997 年 11 月に地球規模の気候変動に大きな影響を及ぼす熱帯及び亜熱帯の降雨分布を観測する目的のもとに, 熱帯降雨観測衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission) が日米共同で打ち上げられた。この TRMM に設置された PR (降雨レーダ) は降雨散乱と同時に, マイクロ波による地表面での後方散乱を計測している。これに着目し, PR を地表面計測センサとして利用するという発想に基づき, 瀬戸ら¹⁾はインドシナ半島における予備的成果を報告した。

本研究では対象領域をグローバルに拡張, 1998 年の 1 年分を処理した結果を示す。TRMM/PR のデータは宇宙開発事業団 (NASDA) から提供して頂いた。また, PR の降雨観測割合のデータ (3A25) に関しては, NASA/DAAC の解析結果を利用した。(<http://daac.gsfc.nasa.gov/data/>)

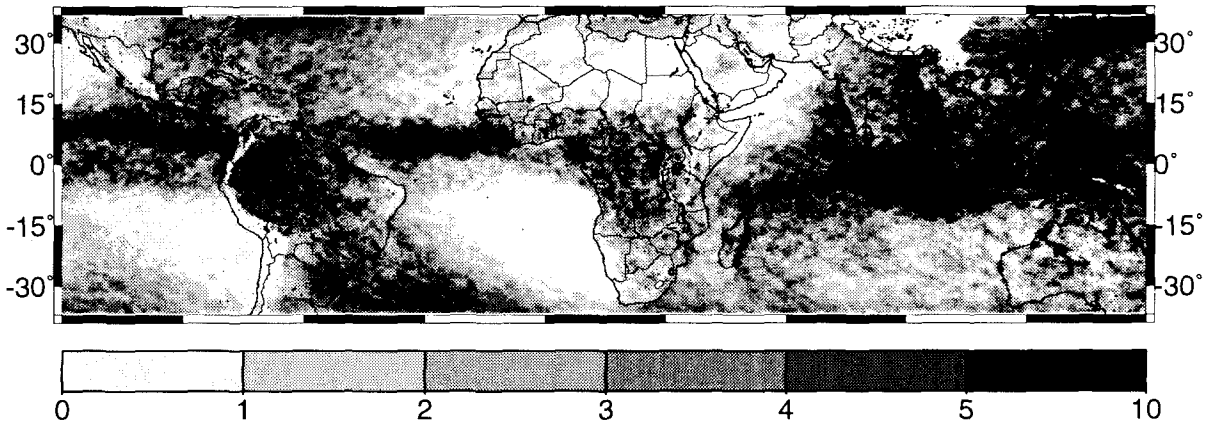


Figure-1 観測された回数に対する降雨の頻度

2. 観測値の特性と解析方法

TRMM/PR は周波数 13.8GHz のマイクロ波を用いた降雨観測センサであり、観測幅は 215km、地上水平分解能は直下で約 4.3km である。TRMM/PR が地表の同一地点を観測するのは緯度によって異なるが約 2 日に 1 度である。マイクロ波センサとしては入射角 θ が 30～50 度の範囲にある SAR のような衛星搭載センサと異なり 0～18 度と小さく、また垂直入射の観測も行っている事が特徴である。

TRMM/PR は本来降雨の 3 次元構造を観測するのが目的である。しかし地球上において降雨の生じている時空間の割合は小さく、実際に PR が降雨を観測することはあまり多くない。図 1 は 3A25 という月平均 0.5 度 $\times$ 0.5 度の観測データに基づき、降雨観測の割合を示した図である。この割合は、全観測ビーム中に降雨観測を行ったと判断された回数 (%) を示している。インド洋の赤道付近から西太平洋まで、赤道から南北 10 度の帯状の範囲の地域とカリブ海の近くでは 5% を越えているところも見られるが、グローバルな視点では雨が観測されるのは概ね 5% 以下であることがわかる。

一方、TRMM/PR は降雨減衰値を推定する為に、地表面の散乱係数 σ^0 を観測している。PR が地表面において観測しているマイクロ波の後方散乱係数は、砂漠などの裸地面や水面などの表面散乱が卓越する面では入射角の依存性が強く、植生層では体積散乱が生じる為、角度依存性は小さくなる。 σ^0 の解析への降雨の減衰による影響は、1) 10mm/hr のような強い雨の場合にも約 2dB 程度であること、2) 前述のように雨を観測する割合はあまり高くはないこと、の二点に基づき、十分小さいと判断可能である。すなわち PR は主に地表面を観測し

ているセンサであるとの立場を取ることが可能であり、本研究では PR を地表面観測センサとして用いた。

以下の解析では観測された全ての地域を対象とした為、各月ごとの 489 軌道分全てにおいて、それぞれ各ビームの先端の σ^0 を 0.1 度 $\times$ 0.1 度に nearest neighbor によりあてはめ、入射角 1 度ごとのビンに集計したものをを用いた。

3. TRMM/PR データを用いた土地被覆ごとの後方散乱係数の解析

TRMM/PR の σ^0 を異なる土地被覆を持つ代表的な 5 領域それぞれにおいて抽出し平均化した。その平均値を σ^0 の θ 依存性に着目して解析した結果を以下に示す。

(1) 土地被覆による後方散乱係数の違い

σ^0 の土地被覆ごとの解析をする前段階として、まず USGS (U.S. Geological Survey) の土地被覆分類 (USGS Land Use and Land Cover Classification) を参考にし σ^0 を抽出する場所を選択した。USGS 土地被覆分類データのオリジナルは 1km グリッドであった為、それを 1 度グリッドに変換し表示したものが図 2 である。この土地被覆図を参考に、表 1 に示すような領域を海、砂漠、耕地、森林、草原として指定し図中の四角で示した。

表 1 に示す領域ごとに、各月ごとの各入射角に対する後方散乱係数の平均値を計算した。その結果の一つである 2 月の後方散乱係数の入射角依存性を図 3 に示す。

この図から、後方散乱係数はそれぞれの土地被覆ごとに異なる入射角依存性を持っていることが明確に認識できる。

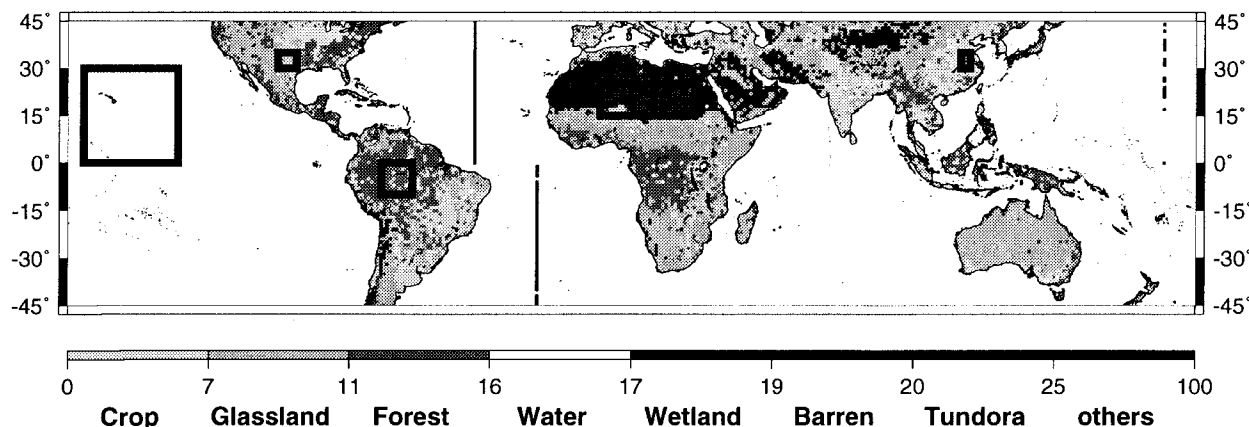


Figure-2 USGS による土地被覆分類と表 1 に対応するその代表地点

Table-1 解析に用いた領域と土地被覆の対応

主な土地被覆	選択場所	経度	緯度
海 (Sea)	太平洋	135W-165W	0-30N
砂漠 (Desert)	サハラ砂漠	15E-25E	0-30N
耕地 (Crop)	中国の稲作地帯	115E-118E	30N-35N
森林 (Forest)	アマゾン	60W-70W	10S-0
草原 (Plain)	プレーリー	97W-103W	30N-35N

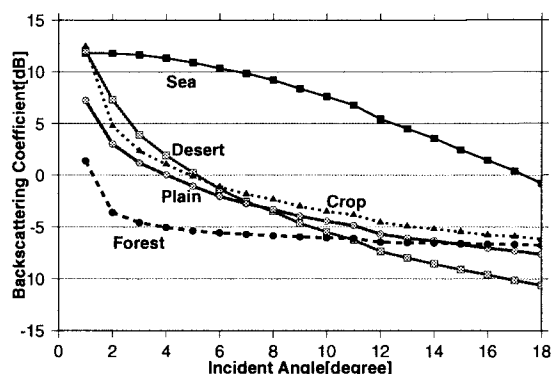


Figure-3 土地被覆ごとの 2 月の後方散乱係数の入射角依存性

まず海面における観測結果に着目すると、他の 4 つの土地被覆とはかなり異なった挙動を示していることがわかる。海は入射角 θ が小さい (0 度付近) 時は最も高い σ^0 の値を示し、 θ が大きくなるに従って緩やかに減衰する。次に陸面での結果に注目すると、0 度付近の小

さい入射角 θ において最も σ^0 が高い値を示しているのが砂漠であり、耕地、草原、森林の順に低い値をとっている。海面以外のこの四地域の σ^0 は θ が小さい場合は θ の変化に伴って急激な変化をしており、またその土地被覆ごとの性質の差も顕著である。

海面などの水面における散乱では、入射角の比較的小さい (0~20 度) 領域では準鏡面散乱モデルを適用でき、砂漠などの裸地面では表面散乱理論が成り立ちやすい。¹⁾ θ が大きくなっても緩やかに減衰するという海面での σ^0 の特質は、風による海面付近の波浪によって生じるブラッグ (Bragg) 散乱と呼ばれる強い後方散乱が原因である。²⁾

植生面での後方散乱波には植生層での体積散乱の他に土壌面における表面散乱が含まれる。植生面での後方散乱係数において植生層での σ^0 と土壌面における σ^0 との占有比は定性的に以下のような特性を持つことが分かりつつある。すなわち、入射角 0 度付近では土壌面での表面散乱が多く占めるが、角度が大きくなるにつれ入射角依存性の強い土壌面散乱が減少し、角度依存性の小さい植生層散乱の割合が大きくなる。図 4 は Ulaby らによる散乱モデル³⁾ によってこの性質を計算した結果である。このモデルは植生に覆われた面からの散乱を次の 3 成分の合計で与える。

- (a) 地表面からの散乱+植生による減衰
- (b) 植生からの散乱
- (c) 植生と地表面での多重散乱

入射角が小さいときには (a) が卓越するが、入射角が大きくなると (b) および (c) が卓越することがこの図からよみとれる。植生のある面での TRMM/PR 解析結果 (図 3) は、図 4 の計算結果と定性的にはほぼ一致している。

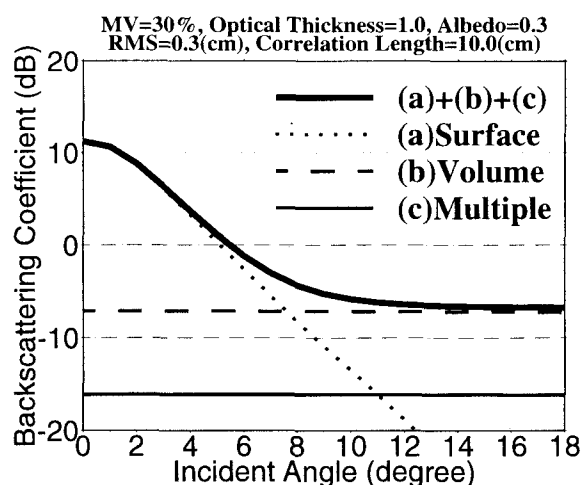


Figure-4 植生のある面からの散乱の計算例

(2) 土地被覆ごとの後方散乱係数の季節変化の特徴

図5は各土地被覆ごとの後方散乱係数の季節変動の大きさを示す。この図から、森林の入射角依存性は、入射角の小さい時はとても高く、それ以上の入射角では明確でないことがわかる。この事は、植生による減衰の影響が大きい時は入射角が小さい時であるという理論に対応している。

また、海面と砂漠は両方とも1年を通して、どの入射角においても季節変動がほとんど無い。これは、海面と砂漠が、後方散乱係数の季節変動の主原因であると考えられる植生の変化と土壤水分の変化による影響をほとんど受けないことによると思われる。

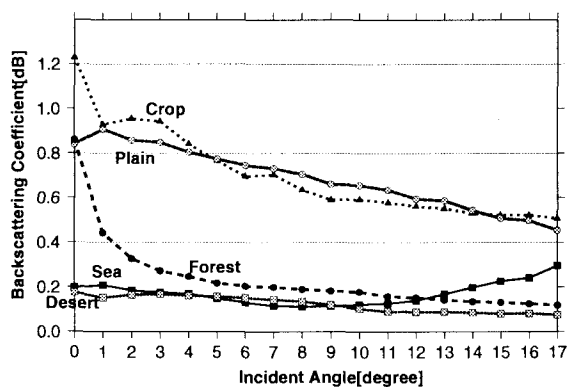


Figure-5 後方散乱係数の季節変化, 横軸が入射角を示し, 縦軸が1年の平均からの偏差を示す。

図3に示したように、 θ の大小によって σ^0 の θ 依存性の傾向が変化することが判明した。そのため、 θ を異なっ

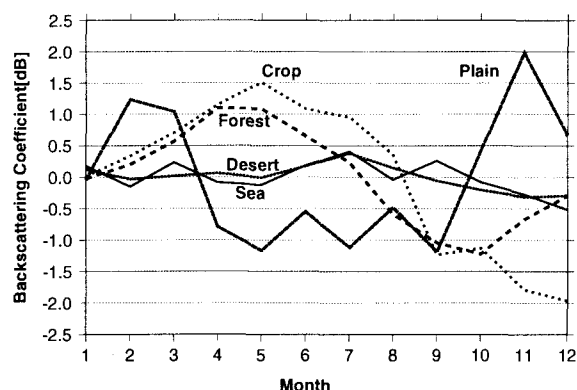


Figure-6 入射角 $0 \sim 2^\circ$ 平均における後方散乱係数の季節変化, 横軸は月を表し, 縦軸が後方散乱係数の年平均からの差を表す

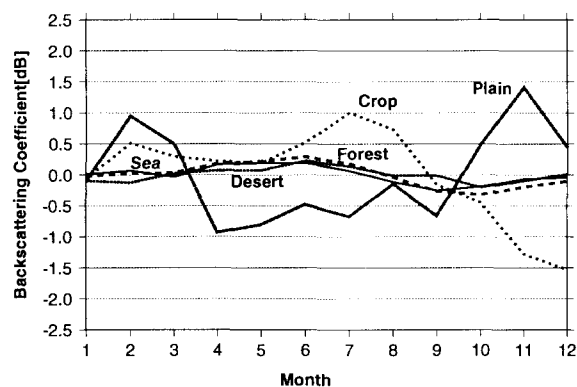


Figure-7 入射角 $5 \sim 18^\circ$ 平均における後方散乱係数の季節変化, x 軸は月を表し, y 軸が後方散乱係数の年平均からの差を表す

た範囲を持ついくつかのバンドとして指定し、それを統合して分析することで、新たな情報を得られる可能性があると考えた。本研究では、土地被覆ごとの σ^0 の変化が大きく異なる位置である θ が $0^\circ \sim 2^\circ$ の σ^0 の平均をバンド1と設定し、次にある程度同じ傾向であると思われる $2^\circ \sim 9^\circ$ 平均をバンド2、そして $5^\circ \sim 18^\circ$ 平均をバンド3と設定した。

図6と図7はそれぞれ θ が $0^\circ \sim 2^\circ$ の平均(バンド1)と、 $5^\circ \sim 18^\circ$ 平均(バンド3)の場合の σ^0 の季節変化である。横軸が月、縦軸が各月ごとの σ^0 の平均値から年平均を引いた値である。 θ が $2^\circ \sim 9^\circ$ 平均(バンド2)による同じ処理の結果は、ほぼ図7(バンド3)と同じような傾向を示したためここでは図示しない。

これらの二つの図を比べてみると、図6(バンド1)の場合は森林が大きい季節変動をしているのに対し、図

Table-2 後方散乱係数の定性的な傾向と観測結果の対比

入射角	小さい	大きい
卓越する成分	地表面から	植生から
土壌水分の増加	↗	→
植生の量の増加	↘	→
土地被覆による違い	砂漠>耕地>草原>森林	明確でない
季節による違い	雨季>乾季	雨季>乾季

7 (バンド 3) の場合は森林の季節変動はほとんど見られない。これは森林が植生の散乱を受けることが原因で、 θ が大きい時は σ^0 の θ 依存性が明確でなくなる為であると思われる。森林と指定した領域は南米のアマゾン川流域であるが、図 6 (バンド 1) の森林の季節変化に着目すると、雨季の始まる 1 月から乾季の終わる 7 月末までは σ^0 の値が大きく、10 月からの乾季には値が小さくなるという明確な雨季・乾季の変化がわかる。 σ^0 が雨季に高く乾季に低くなる原因には次の 2 つが考えられる。まず 1 つ目は、雨季の方が土壌水分が多くなるので、地表面からの散乱成分が高くなる為であるという事が考えられる。これは図 4 の (a) で示された傾向と対応している。次に雨季と乾季における森林の葉の量の季節変化、つまり LAI (Leaf Area Index) の変化が原因として考えられる。この 2 つのどちらか、又は一方がどの程度アマゾン川流域の森林地帯における σ^0 の季節変化に影響を及ぼしているかは現時点では明らかでない。しかし、NDVI と σ^0 の季節変化の関係を考察することによって今後森林における σ^0 の季節変化はどの要因によるものであるかが判明する可能性があると思われる。

以上より、後方散乱係数の定性的な傾向と観測値の解析結果の対比は表 2 のようにまとめられる。表 2 は上の 3 行が σ^0 の定性的な傾向のまとめであり、下の 2 行が観測によって判明した σ^0 の結果である。海を除く 4 つの土地被覆における σ^0 の特性は、 θ が小さい時は地表面からの影響が卓越し、また θ が大きい時は植生からの影響が卓越する。土壌水分が σ^0 の特性に大きく影響を与えるのは θ が小さく、地表面からの影響が卓越する時である。植生の量が增加する事によって σ^0 は下がる。しかしこの現象は入射角依存性が大きい低入射角の場合には顕著であるが、高入射角時にはあまり差異が無いことがわかる。土地被覆による違いとしては、 θ が小さい場合は砂漠>耕地>草原>森林の順位が明確であるが、 θ が大きくなるに従ってその差異が明確でなくなる。同時に、雨季に値が大きくなり、乾季に下がるという明確な季節変化が解析結果から判明した。

4. グローバルな土地被覆情報の推定

(1) 後方散乱係数 σ^0 を用いた土地分類

2 月のグローバルデータを対象として、前節で定義した 3 バンドを用いて 16 種類に教師なし分類を行ない、いくつかのグループにまとめた結果を図 8 に示す。

この図を作成するにあたっては TRMM のグローバルデータを 0.1 度の nearest neighbor によりあてはめたものを利用した為、この図の分解能は 0.1 度である。図中の白色領域は海面であり、陸面において黒色の領域が森林または山岳地帯に相当すると分類された地域である。森林は植生の散乱による減衰が大きいという性質を持つが、表面の粗い山岳地帯も同様な散乱による減衰が生じることが、森林と山岳地帯を区別できなかった原因であると思われる。アフリカ北部やオーストラリアの砂漠地域は白色に近い薄色で図示した。森林または山岳地帯に分類された黒色領域と薄色の砂漠地域との中間色で示された地域は耕地・草地・灌木林等であると推測され、図中は同グループとして同じ色で示したが、実際は 16 分類中の異なった 3 種類として分類された。また、図 8 を拡大すると明瞭に認識されるが、ミシシッピ川や長江中下流域、チグリス・ユーフラテス川などの氾濫原のみ他の耕地・草原・砂漠等とは独立の特徴ある地表面タイプとして分類された。これら氾濫原と推定される領域が他の地域と異なった特別な分類がされている理由については、人口の多い都市があるため、河川流域の大規模耕地があるため、などが考えられる。南米のアマゾン川とアフリカのコンゴ川では河道が明確に認識され、アフリカのビクトリア湖などの大きな水面は、海面と同種の水面に分類されている。オーストラリア北部はデータ欠損領域である。

これら海面、森林、砂漠などが比較的良好に分類されていることは、TRMM/PR の後方散乱係数の特徴を解析することにより土地被覆や地表面特性の情報を取得できる可能性があることを示している。

これら各土地被覆グループに対応すると推定された領域の全領域に対する面積割合を表 3 に示す。

Table-3 再分類した土地被覆の面積割合

対応する土地被覆	面積割合 (%)
海	73.6
森林	7.0
耕地・草地・灌木林等	14.1
砂漠	3.7
氾濫原	1.6

本研究の手法では直下 (0 度付近) ではデータの信号が他に比べて強く、線状のノイズが入ってしまうこと、また森林と山岳地帯が同じ分類をされてしまうことが問題点として残ったため、今後さらに妥当な手法の検討を行なう必要がある。



Figure-8 後方散乱係数の入射角依存性を利用した土地分類図（1998 年 2 月）

5. まとめと今後の課題

TRMM-PR を用いてグローバルな土地情報の解析を行なった。地上の情報を得るだけならば、合成開口レーダなども同じようなマイクロ波を用いて観測を行っておりそれらの観測結果の利用も可能である。しかし今までの合成開口レーダを搭載した衛星は同じ地点を再び観測するのに長期間かかる事などが問題点である。TRMM/PR の利点と特徴をまとめると、以下のようになる。

- (i) 熱帯、亜熱帯域の降雨観測が目的の衛星である事から、得られるデータが北緯 35 度付近から南緯 35 度付近の間の全球範囲である。
- (ii) TRMM の観測頻度は約 2 日に 1 回と短いので、季節変化など 1 年を通しての情報を得ることができる。
- (iii) 各ビーム方向ごとに同じ条件でデータが取れ、同質のデータが得られる。
- (iv) 天候や雲、霧などに左右されることなく観測が行なわれる。
- (v) 全球範囲でのデータが比較的容易に得られる。
- (vi) 入射角が真下の 0 度から 18 度と様々でしかも広い範囲を観測できるので、単バンドにもかかわらず多くの情報を得る事ができる。⁴⁾

このような利点に着目し、本研究ではまず土地被覆ごとに σ^0 の θ 依存性について解析と考察を行なった。そしてその次に理論モデルとの比較を行ない、得られた σ^0 の定性的な結果を考察した。この結果、雨季・乾季の季節変化に伴う土壤水分が σ^0 の変化に影響を与えている事が明確になり、TRMM/PR の σ^0 の値を解析することによって地表面の土壤水分量を逆推定できる可能性が示唆された。また観測された σ^0 の特性から地表面の土地被覆や植生量の情報などが推測される可能性を示すことができた。

最後にそれらの特徴をもとに、グローバルな熱帯・亜熱帯域の土地被覆分類図の作成を行なった。この土地被覆分類図に関しては定性的な考察などの研究が不十分であり、実際の土地被覆情報と対応させた詳細な考察が必要である。さらに今後は、土地被覆分類を行う際に季節変化の影響を考慮したり、軌道のノイズの適切な処理や、森林と山地が同じ分類になる原因の研究などを行いたい。また、地表面の植生指標（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）による、植生ごとの後方散乱係数に関しても土地被覆ごとと同様な研究を行い、データの解析を進めていきたい。

謝辞：本研究は文部省科学研究費『グローバルな陸面水収支算定値の検証とデータベースの構築』（代表：東京大学生産技術研究所、沖 大幹）ならびに日本学術振興会 未来開拓研究推進事業『環境負荷の影響評価と軽減』（代表：東京大学生産技術研究所、虫明 功臣）の成果の一部である。また、本研究は宇宙開発事業団（NASDA）との共同研究の基づいた成果であり、PR-2A21 データは共同研究契約に基づき NASDA から全て提供頂いた。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 瀬戸心太, 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣. TRMM-PR を用いた土地被覆ごとの後方散乱係数 特性. 水工学論文集, Vol. 43, p. submitted, 1999.
- 2) 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信. 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング. 電子通信学会, 1986.
- 3) F.T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung. *Microwave Remote Sensing*, Vol. 3. Artech House INC., 1986.
- 4) 井口俊夫, Robert Meneghini. 降雨レーダによる降雨強度推定. 海洋, Vol. 6, pp. 324-429, 1999.

(1999. 9. 30 受付)