

TRMM-PR を用いた 土地被覆ごとの後方散乱係数特性

CHARACTERISTICS OF BACKSCATTERING COEFFICIENTS AT DIFFERENT LAND COVERS OBSERVED BY TRMM-PR

瀬戸 心太¹・仲江川 敏之²・沖 大幹³・虫明 功臣⁴

Shinta SETO, Tosiya NAKAEGAWA, Taikan OKI, and Katumi Musiaka

¹学生会員 東京大学生産技術研究所 大学院修士課程 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助手 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

³正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

⁴正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所 教授 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

A preliminary analysis of TRMM-PR (Ku band scatterometer) data is conducted in this paper. Research area is mainly Indo-China peninsula including the surround seas. The incident angle's dependences of the backscattering coefficients at different land covers is found among ten land covers respectively. Their characteristics can be explained from the surface scattering theory, and the backscattering coefficients at shallow incident angle are largest from agricultural field. We compare their incident angle's dependences with ones calculated from surface scattering theoretical models for sea surface and bare soil.

Key Words : surface scattering theoretical model, backscattering, land cover, TRMM, soil moisture

1. はじめに

マイクロ波散乱計を用いた地表面の土壤水分計測に関する研究が進められている^{1),2),3)}。マイクロ波散乱計を搭載した人工衛星としては、1990年代に入ってから ERS-1, J ERS-1, RADARSAT などが打ち上げられている。これらはいずれも合成開口技術により高い分解能を実現しており、広域な土壤水分情報の抽出に大きく役立つものと期待される⁴⁾。

昨年, TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) が打ち上げられた。TRMM は熱帯における降雨の状況を測ることを目的としており5つのセンサを搭載している。このうち PR(降雨レーダ) は周波数 13.8GHz のマイクロ波を用いている。PR は降雨からの散乱だけでなく、地表面における後方散乱も計測しており(PR2A21,sigmazero), 他の人工衛星データと同様に、土壤水分計測などのための利用が可能であると思われる。

本論文は、TRMM-PR のデータを用いた土壤水分計測のための基礎研究として、土地被覆ごとにデータを分類し、土地被覆の違いが後方散乱係数にどのような影響をおよぼすのかを調べた。また、水面と植生の影響が少ない裸地について、表面散乱理論と観測値の比較を行った。

今回分析の対象としたのは、主にインドシナ半島を含む北緯 5 度と 25 度、東経 95 度と 110 度の線で囲まれる内側の領域である。

TRMM データについては、1998 年 3 月 8 日から 14 日にかけての 21 軌道分のデータを使用した。なお、このデータは、1998 年 9 月からの正式公開前のものである。また、データ数としても定量的な分析を行うには必ずしも十分なものではない。

土地被覆分類には、USGS(U.S. Geological Survey) のデータを用いた。

2. 地表面での後方散乱係数の特性

表面散乱理論によると物体表面におけるマイクロ波の反射は、鏡面反射成分と拡散成分とに分けられる。鏡面反射成分とは、極めてなめらかな面で起こるように入射角と反射角が等しい散乱で、拡散成分とは地面の凹凸に起因するあらゆる方向への散乱である。滑らかな面では鏡面反射成分が卓越するが、面が粗くなるほど拡散成分が多くなる。後方散乱とは、入射波と同じ方向への反射である。

滑らかな面では、入射角が浅い場合には主に鏡面反射成分により後方散乱係数が高くなるが、大きな入射角で

は低い値を示す。粗い面では、こうした入射角による後方散乱係数の変化は小さい。

また、後方散乱係数は、土壌水分にも影響される^{5),6)}。理論的にいうと土と水の誘電率の違いによるものであり、土壌水分が高くなると、全体的に後方散乱係数は大きくなる傾向がある。

以上をまとめると、一般的に次のことが成り立つ。

- 粗い面と滑かな面では、滑かな面の方が入射角依存性が大きい。
- 土壌が湿っている場合と乾いている場合では、湿った場合の方が全体的に高い後方散乱係数を示す。

ただしこれらはすべて、表面散乱のみの想定した場合である。実際の地表面における後方散乱はより複雑であり、表面散乱以外の植物による体積散乱などの影響も考慮しなければならない。

3. 土地被覆ごとの後方散乱係数の比較

本来ならば、同一の地点についての観測データを集めて分析を行うべきであるが、1章でも述べたように、現時点で1つの地点に対して1個程度のデータしか入手できなかった。このため、同一の土地被覆分類に属するデータをまとめて分析を行った。これは、土地被覆分類ごとに、植生や地表面粗度はある一定の傾向を示し、観測された後方散乱係数と入射角依存性の関係にも土地被覆ごとの特徴が見られると期待されるためである。

USGS では、地表面を植生の違いから 24 種類に分類している。本論文の対象領域について、30 秒グリッドの USGS データを取得した。全グリッド数は、 $1800 \times 2400 = 4320000$ であり、各分類に属するデータの数は、表1の USGS の欄に示す通りである。

一方、本論文の対象領域で得られた TRMM のデータは合計 155437 であり、各土地被覆分類ごとのデータ数を表-1の TRMM の欄に示す。このうち、分析に十分な数のデータが得られているのは、10 種類の土地被覆に対してであった(表-1で*をつけたもの)。

土地被覆ごとに入射角依存性の概略を知るために、土地被覆ごとに平均値をとったのが図-1である。ここで、土壌水分量の違うデータを平均することになるが、2章で述べたように土壌水分量の違いはグラフの形には影響しない。このため、入射角依存性の概略を知るには問題ないと判断した。

また、入射角度 0 度のときの後方散乱係数の平均値とその標準偏差を表-2に示す。この図から、次のことが読み取れる。

- 水面 (region16) における後方散乱係数の入射角依存性は、他の土地被覆と比べて大きく異なる傾向を示す。

表-1 対象領域における土地被覆ごとの TRMM データ数.

region	土地被覆分類名	USGS	TRMM
1	Urban	3196	116
*2	Dryland Cropland	133351	4561
*3	Irrigated Cropland	818920	34256
4	Mixed 3/4	0	0
*5	Cropland/Grassland	115855	7179
*6	Cropland/Woodland	110285	3264
7	Grassland	10117	525
*8	Shrubland	111435	5107
9	Mixed 7/8	0	0
*10	Savanna	119028	6325
*11	Deciduous Broadleaf	271536	13729
12	Deciduous Needleleaf	22	2
*13	Evergreen Broadleaf	546763	23016
14	Evergreen Needleleaf	1859	84
*15	Mixed 11-14	321093	17145
*16	Water Bodies	1754883	40066
17	Herbaceous Wetland	380	26
18	Wooded Wetland	0	0
19	Barren	1222	29
20	Herbaceous Tundra	0	0
21	Wooded Tundra	8	2
22	Mixed Tundra	47	5
23	Bare Ground Tundra	0	0
24	Snow or Ice	0	0

- 他の陸面上の土地被覆について、後方散乱係数の土地被覆ごとの差は入射角が小さいほど明確である。
- 耕地 (region2,3,5,6)、草原 (region8,10)、森林 (region11,13,15) の順に後方散乱係数が高いという傾向がみられる。

4. 水面における理論値との比較

水面 (主に海面上) における散乱は、風速の影響を受ける。入射角が比較的浅い (0 から 20 度) 領域では、いくつかの仮定のもとに、準鏡面散乱モデルを適用できる⁷⁾。後方散乱係数 σ^0 は、表面傾斜の分散 S^2 の関数として次のように求まる。

$$\sigma^0 = \frac{|\Gamma(0)|^2}{S^2} \frac{1}{\cos^4 \theta} \exp \left(-\frac{\tan^2 \theta}{S^2} \right) \tag{1}$$

θ : 入射角 $\Gamma(0)$ は入射角 0 度におけるフレネルの反射係数であり、次式から求まる。

表-2 入射角0度でのときの後方散乱係数の平均値と標準偏差.

region	データ数	平均値 [dB]	標準偏差 [dB]
2	100	14.888	8.360
3	107	17.924	8.368
5	134	12.900	8.895
6	84	7.792	8.367
8	117	12.150	9.241
10	118	10.575	9.322
11	234	7.562	8.859
13	462	4.840	8.154
15	366	5.547	8.554
16	805	15.006	2.509

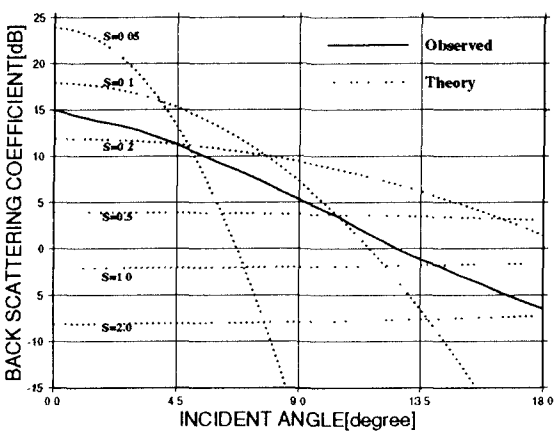


図-2 海上の後方散乱係数の準鏡面散乱理論値と観測値の比較.

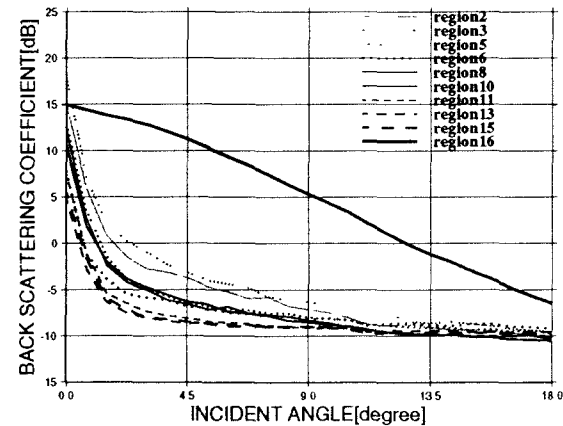


図-1 土地被覆ごとの後方散乱係数の入射角依存性.

$$\Gamma(0) = \frac{\mu_r - \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\mu_r + \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \tag{2}$$

μ_r : 比透磁率, ϵ_r ; 比誘電率

いくつかの S の値での理論値と、観測値の平均値との比較をしたのが、図-2である。後方散乱係数の観測値は、S が 0.1-0.2 付近での理論値に近い。理論値では、後方散乱係数の S 依存性は (S が 0.1-0.2 程度するとき) 入射角 7-8 度付近で弱くなり、この辺りでの、観測値と理論値は一致していない。この比較では、S の値を一意に決めて、観測値と比較している。観測値は異なる S の領域の平均をとっているのだから、S の分布を仮定して理論値の平均をとれば観測値がうまく説明できる可能性はあると考える。

5. 裸地面における理論値との比較

比較的、表面散乱理論が成り立ちやすいと思われる裸地面について、観測値と理論値との比較を試みた。

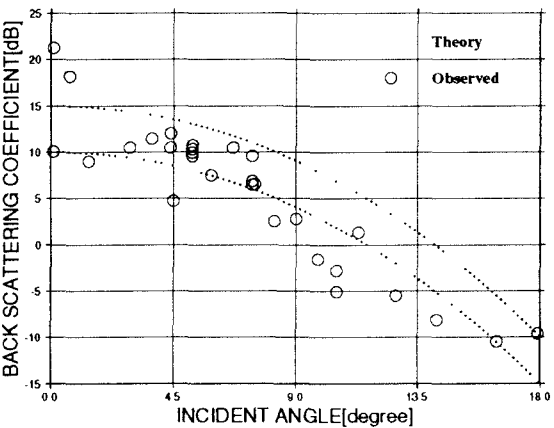


図-3 裸地面における理論値と観測値の比較.

表面散乱理論のモデル式は、粗度の違いから 3 つの式が提案されている。ここでは、比較的粗い面に対しての幾何光学モデルを用いる^{8),9)}。

$$\sigma^0 = \frac{|\Gamma(0)|^2 \exp(-\tan^2 \theta / 2m^2)}{2m^2 \cos^4 \theta} \tag{3}$$

ここに、 m は粗度を表すパラメータであり、 $m = \sqrt{2}\sigma/l$ で計算される。 σ は RMS 高さ、 l は相関距離である。

次に観測値であるが、USGS の分類において裸地面に相当するのは、表 1 の region19 である。裸地面での観測値は 29 個と少なかったため、観測した地点および時間の違いを無視してまとめて分析した。なお、観測は乾季の終りである 3 月に行われている。したがって、土壌は一樣に乾燥し地点ごとの土壌水分の差は大きくないと考えられる。

以下のようにして観測値から粗度を逆推定した。
まず、式 (3) を dB 単位に直すと、(右辺のみ示す)

$$20 \log |\Gamma(0)| - 10(\log e) \frac{\tan^2 \theta}{2m^2} - 10 \log(2m^2 \cos^4 \theta) \tag{4}$$

となる。右辺の第1項は土壌水分によってのみ決まる。右辺の第2項と第3項は粗度と入射角によって決まる。そこで、 $\Delta\sigma^0 = \sigma^0(0^\circ) - \sigma^0(18^\circ)$ として差をとる。第1項は、土壌水分によって異なる。しかし、今回の観測データについては先にのべたように地点ごとの土壌水分の差が大きいと考えられる。そのため、2つのデータについて差をとった場合第1項は消えると見なした。

すると、 m と $\Delta\sigma^0$ の次のような関係式が導かれる。

$$m = \frac{\sqrt{5} \tan 18^\circ}{\sqrt{\ln 10(\Delta\sigma^0 - 40 \log(\cos 18^\circ))}} \quad (5)$$

したがって、 $\Delta\sigma^0$ の値を与えれば、 m が導かれる。

式(4)より、 m と $\sigma^0(0^\circ)$ が分かれば、任意の θ について $\sigma^0(\theta)$ が求まる。こうして書いたのが図-3の鎖線である。この鎖線は $\Delta\sigma^0, \sigma^0(0^\circ)$ の読み取り方によって変わってくる。データ数が少ないので、断定はできないが、理論値よりも低めの観測値が目立つ。なお、こうした理論値の計算は、 $\theta = 0^\circ, 18^\circ$ における $\sigma(\theta)$ の実測値を用いているので、これらの点では実測値と理論値は当然一致する。

6. まとめ

TRMM-PRとUSGSのデータを用いて、地表面での後方散乱係数を土地被覆ごとに整理し、一部の土地被覆に対して表面散乱理論との比較を行った。結果をまとめると、次の2点になる。

- 土地被覆ごとに調べると、浅い入射角における地表面後方散乱係数は、耕地、草原、森林の順に高い。
- 水面と裸地面において、表面散乱モデルとの比較を行った。観測値と比較的一致するパラメータを見つけることはできるが、パラメータの値が実際の値と一致するかどうかは不明であり、入射角によっては観測値との誤差が大きい。また、植覆面については、観測結果を説明するには植生の影響など、表面散乱以外の効果も考える必要があると思われる。

この研究の最終的な目的は土壌水分に関する情報を得ることにあり、現在は、後方散乱係数をそれに関連のあるパラメータごとに分析しているところである。今後の研究の方向性として、次のようなことを挙げられる。

- 土地被覆ごとの後方散乱係数の違いについて、耕地の方が高く森林は低いといった傾向が見られたが、データを増やす、統計的な処理を行うなどして、この点は確認する必要がある。
- NOAAの衛星データから得られる地表面の植生指標であるNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)を土地被覆情報に組みこみ、後方散乱係数の土地被覆および植生ごとの分類を進める。

また、得られた土壌水分情報の利用として、次のようなことが挙げられる。

- 同一の地点が、TRMMによって観測されるのは、1日に1回程度である。TRMMが観測している瞬間以外の降雨については、直接知ることができない。しかし、TRMMによって観測した土壌水分の情報を使うことで、たとえば前回の観測より体積含水率が増加したことが分かれば、その間に降雨があったことを推定できるなど、TRMMによる観測と観測の間におこった降雨についての情報も得ることができると思われる。

謝辞： TRMMのデータを提供してくださった宇宙開発事業団(NASDA)と、TRMMデータ分析のアルゴリズム作成者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 虫明功臣, 小池雅洋, 沖大幹, 仲江川敏之. 能動型マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分計測 I. 室内実験と散乱理論との比較. 水文・水資源学会雑誌, Vol. 10, No. 6, pp. 577-587, 1997.
- 2) 虫明功臣, 仲江川敏之, 小池雅洋, 沖大幹. 能動型マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分計測 II. 屋外実験. 水文・水資源学会雑誌, Vol. 10, No. 6, pp. 588-596, 1997.
- 3) 虫明功臣, 沖大幹, 仲江川敏之, 小池雅洋. 能動型マイクロ波リモートセンシングによる表層土壌水分計測 III. 合成開口レーダ搭載衛星検証実験と土壌水分分布図の作成. 水文・水資源学会雑誌, Vol. 10, No. 6, pp. 597-606, 1997.
- 4) 仲江川敏之, 六田典夫, 沖大幹, 小池雅洋, 虫明功臣. 能動型マイクロ波センサーによる水資源環境のモニタリング. 第5回水資源に関するシンポジウム, 第5巻, pp. 767-772, 1997.
- 5) F. T. Ulaby, P. P. Bradley, and M. C. Dobson. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part i - bare soil. *IEEE Trans. GE*, Vol. 16, pp. 286-295, 1978.
- 6) M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Rayes. Microwave dielectric behavior of wet soil - part ii: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. GE*, Vol. 23, No. 1, pp. 35-46, 1985.
- 7) 古濱洋治, 岡本健一, 増子治信. 人口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.
- 8) F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung. *Microwave Remote Sensing*, Vol. III, chapter Introduction to Random Surface Scattering and Emission, pp. 922-1033. Artech House INC., 1986.
- 9) 三枝修平. 多入射角・多偏波マイクロ波センサーによる表層土壌水分量の抽出に関する研究. Master's thesis, 東京大学, 1997.

(1998. 9.30受付)