

# 散乱モデルに基づいた能動型マイクロ波リモートセンシングによる水田モニタリングに関する基礎的検討

## PRELIMINARY STUDY OF MONITORING PADDY FIELDS BY ACTIVE MICROWAVE REMOTE SENSING BASED A SCATTERING MODEL

仲江川 敏之<sup>1</sup>

Tosiyuki NAKAEGAWA

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 気象研究所 研究官 (〒 305-0088 つくば市長峰 1-1)

This paper investigates the possibility of monitoring of the ground surface condition under the rice crop canopy based on a numerical scattering model preliminarily. The model used here is the Michigan microwave canopy model. In order to apply to the rice paddy field, a developed module for it is added. It is found that the ground surface condition under the canopy can be detected at the incident angle of less than or equal to 25 degree at C-band and at the incident angle between 10 and 50 degree at L-band. It is possible to monitor the ground surface condition under the canopy, if the sensor configuration is designed for its purpose. However most systems mounted on the operational SAR satellites do not suit with the purpose.

**Key Words** : rice paddy field, active microwave remote sensing, numerical scattering model, backscattering coefficient

### 1. はじめに

アジアモンスーン地域での主要農産物である稲の作付け面積や生産量などは各国農業監督省庁によって発表されており, 米生産に必要な水資源を推定することは可能であるが, 各戸農家独自の灌漑等により統計に反映されていない部分も少なからずあると考えられる。実際, タイ国チャオプラヤ川の支流ヨム川における水収支を調べてみると, 統計に現れない灌漑を考えなければ, 水収支が閉じないことが明らかにされている。

タイの主要産業でもある稲作を行う水田は, 土地被覆からみると一年を通して, 裸地, 水面, 稲キャノピー+水面, 稲キャノピー+裸地と変わるため, 水循環と熱循環の両方の立場から興味を引く対象である。こうした各ステージを広域でモニタリングすることは, 衛星によるリモートセンシングが有効と考えられる。可視・近赤外の時系列データを用いれば, 裸地, 水面, 稲キャノピーを判別することは容易であるが, 稲キャノピー下の状態を判別することは極めて困難である。その点, マイクロ波リモートセンシングでは, センサー構成を適切なものにすれば, 稲キャノピー下の状態を判別できる可能性が

ある。能動型マイクロ波リモートセンシングの一種である合成開口レーダ(SAR)による水田地域のモニタリングに関する研究は, 他の植生同様, バイオマス量や稲の高さなど, 植生パラメータに関するもの<sup>1),2)</sup>ばかりであり, Monte Carlo法により散乱問題を解く数値モデルでも同様である<sup>3)</sup>。稲キャノピー下の地表面状態に関する研究は, チャオプラヤ川中流域での JERS-1/SAR を用いた水田のモニタリング<sup>4),5),6)</sup>がみられるだけで, 数値モデルを用いた研究ではキャノピー下の状態に焦点を当てた研究は全く見られない。

そこで, 本研究では, 稲キャノピー下の地表面状態を能動型マイクロ波リモートセンシングでモニタリングするための基礎的検討を, 数値モデルを用いて行う。

### 2. マイクロ波散乱モデル:MIMICS

後方散乱係数の計算に当たっては, Michigan microwave canopy scattering model(MIMICS)<sup>7)</sup>を用いる。このモデルは, 木での散乱を対象とした放射伝達方程式の一次近似に基づくモデルで,  $4 \times 4$  Stokes 様変換行列により線形偏波の後方散乱係数が計算される。こ

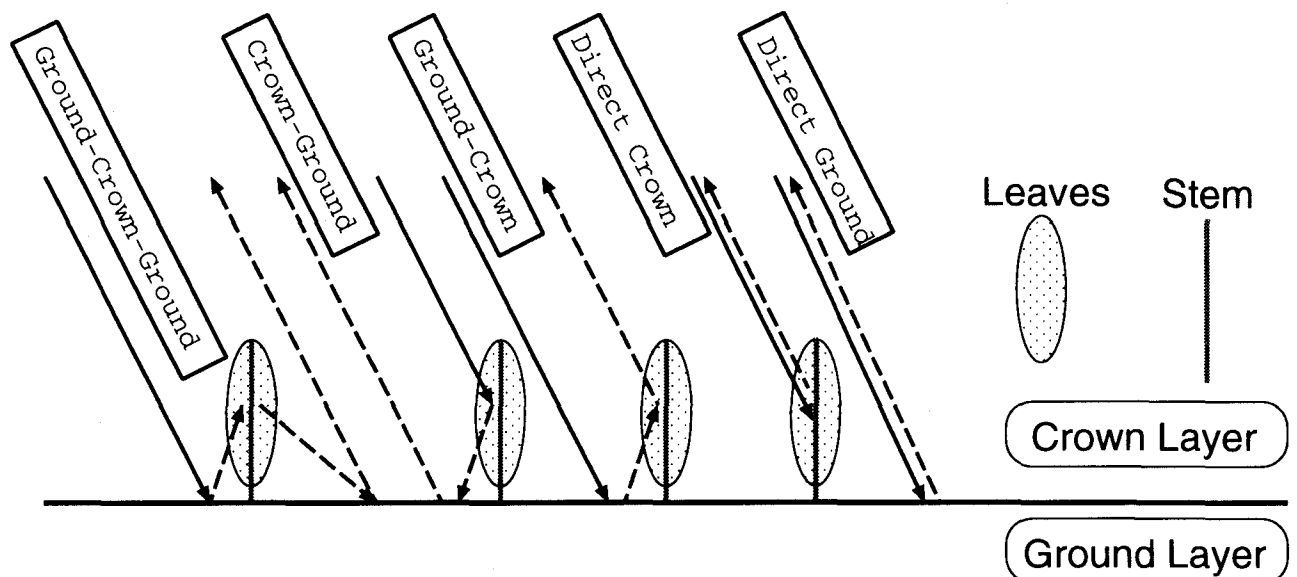


図-1 稲キャノピーにMIMICSを適用した場合の後方散乱成分. 実線が入射波を表し, 破線が散乱波を表している.

のモデルでは, 木を樹冠層, 樹幹層, 地表面層の3層で表し, 樹冠を水平で連続と仮定している. 樹冠層は枝と針状葉を表現する円柱状の誘電体と葉を表現する円盤状の誘電体で, 樹幹層は均一直径の円柱状の誘電体で表されている. 地表面層は半無限媒体として表面散乱だけを考慮している. またこのモデルの適用範囲は周波数0.5GHzから10GHz, 入射角 $10^\circ$ 以上である.

### (1) 全後方散乱の成分

草本類のように樹幹が無い場合, MIMICSでは全散乱強度が五つの後方散乱の和として表されている. 各成分をそれぞれ説明すると, 次のようになる.

**地表面-樹冠-地表面散乱** 入射波が地表面で反射し, 反射波が樹冠で体積散乱し, そのちの下向き成分が再び地表面で反射して, 後方散乱となるもの.

**樹冠-地表面散乱** 入射波が樹冠で体積散乱し, それが地表面で反射され後方散乱となるもの.

**地表面-樹冠散乱** 入射波が地表面で反射し, それが樹冠で体積散乱して後方散乱となるもの.

**直接樹冠散乱** 入射波が樹冠で体積散乱して直接後方散乱となるもの.

**直接地表面散乱** 入射波が地表面で反射して直接後方散乱となるもの.

これを図示したものが, 図-1である. 平行偏波の場合, 樹冠-地表面散乱と地表面-樹冠散乱は同じ値となり, 直交偏波の場合, 異なる偏波同士で一致する.

### (2) 稲の植生構造のモデル化

MIMICSは本来, 木を対象としたモデルであり, 草本類を対象としたものではないので, 草本類をモデル化

したモジュールを組み込まなければならない. MIMICSの枝は主枝から五次の枝まで, モデル化されている. ここでは, 稲の茎を主枝として, 稲の葉を樹冠内の葉としてモデル内で扱うことにした. より厳密には稲穂の部分を別に考えなければならないが, 今回は考えていない. また, 葉の方位角については, 方位方向には均一で, 天頂方向には天頂から最大天頂角までの間で一様に分布していると仮定した. 以上の点をモデル化し, MIMICSに組み込んだ.

### (3) 計算条件

MIMICSで計算するに当たっては, センサパラメータと, 地表面パラメータ, 植生パラメータを与えなければならない. 本研究では, 表-1に示すパラメータの値を用いた. このうち, 変化させたものは, 周波数と入射角, 地表面状態だけである.

地表面粗度は水田で観測された値<sup>8)</sup>の範囲内から選んだもので固定とし, その粗度で適用できる表面散乱モデルを選んだ. 植生パラメータについては, 主に国際米研究所(フィリピン)の年鑑<sup>9)</sup>に基づいて作られた稲のパラメータ<sup>3)</sup>から, 収穫前の時期に相当するものを選んだ.

## 3. 稲作水田での後方散乱計算

ここでは, MIMICSを用いて, CバンドとLバンドの二つの周波数, HHとVVの二つの偏波, 入射角 $10^\circ \sim 50^\circ$ の組合せに対して, キャノピー下を湿潤土壌とした場合の稲作水田で, 後方散乱のセンサパラメータに対する応答を調べ, キャノピー下の地表面状態を観測でき

表-1 稲作水田を対象にした計算条件. (a) センサパラメータ, (b) 地表面パラメータ, (c) 植生パラメータ.

(a) センサパラメータ		(c) 植生パラメータ	
周波数/波長	1.25GHz/24.0cm(Lバンド) 5.20GHz/5.8cm(Cバンド)	構造	茎と葉
偏波	VV, HH	植生温度	20°C
入射角	10°~50°	茎水分量	0.7kg/kg
		茎の長さ	76.70cm
		茎の直径	0.18cm
		茎密度	260.75本/m <sup>3</sup>
		茎天頂角	0°~5° 一様分布
		葉水分量	0.7kg/kg
		葉の長さ	20.08cm
		葉の幅	2.10cm
		葉の厚さ	0.02cm
		葉密度	1825枚/m <sup>3</sup>
		LAI	6.25m/m
		葉天頂角	0°~40° 一様分布

(b) 地表面パラメータ	
地表面状態	土壌または水
土壌水分量	0.0m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> , 0.5m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
地表面温度	20°C
地表面粗度	RMS 高さ 1cm 相関距離 5cm
地表面散乱モデル	Small Perturbation Model <sup>10)</sup>

るセンサ構成を検討する。

### (1) モデル値と観測値の比較

今回 MIMICS に加えた草本類のモジュールで、実際に稲作水田での後方散乱をうまく再現するかについて、ERS-1/AMI の観測値<sup>1)</sup>と比較したところ、本モデルの方が、観測値に比べて、3dB ほど後方散乱係数が低いことが分かった。この傾向は植生が多い程強く、樹冠での直接散乱が小さく算定されてしまっているためである。これは、MIMICS 自体が一次近似なので、二次散乱の樹冠-樹冠散乱が考慮されていないからである。本研究では、定性的にキャノピー下の地表面状態を判断できるかに着目しているので、以下ではこのバイアスを考えずに議論を進める。

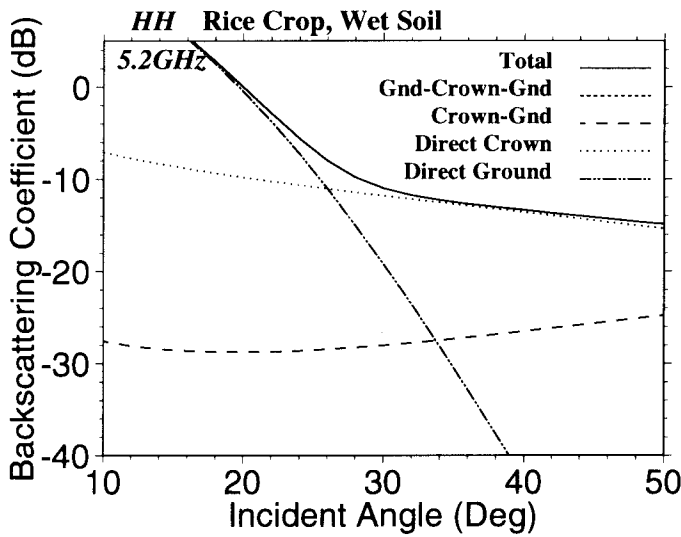
### (2) センサ構成の検討

図-2は C バンドの時の後方散乱係数が描かれている。まず、HH 偏波を見ると、入射角が 25° 以下では、地表面での表面散乱が卓越しているが、30° 以上の入射角では樹冠での直接散乱が全散乱の大部分を占めている。樹冠-地表面での 2 回散乱は入射角依存性は殆んど見られず、-25dB~-28dB 程度で、全散乱に対する寄与は殆んど無い。VV 偏波は HH 偏波と同じく、25°~30° で全散乱を支配する散乱が地表面散乱から樹冠散乱へと遷移する。HH 偏波と異なるのは稲の葉が鉛直方向に立っているという稲の構造から、樹冠散乱の減少が大き

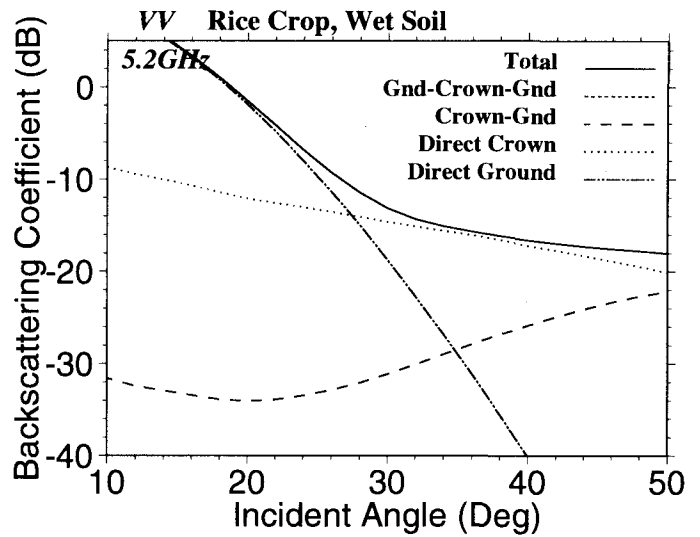
いことと、20° 付近で最小値を取った後の樹冠-地表面散乱の増加が大きいことである。

図-3は L バンドの時の後方散乱係数が描かれている。HH 偏波では全ての入射角にわたって、地表面からの散乱がほぼ全散乱に等しい。樹冠散乱、樹冠-地表面散乱、樹冠-地表面-樹冠散乱はいずれも、入射角依存性が小さく、前二つは -26dB~-29dB 程度でほぼ同じような値を示す。VV 偏波でも地表面散乱が全散乱にほぼ等しいが、HH 偏波と異なる点は 10° と 50° の時で後方散乱係数がわずか 2.5dB しか変わらず、入射角依存性は殆んど無い点と、樹冠散乱と樹冠-地表面-樹冠散乱が単調減少傾向を示す点である。この原因として、前者は地表面散乱モデルを Small Perturbation Model と固定してしまっている計算上の原因と考えられるが、後者は稲が垂直に立った構造のため、入射角が大きくなっても VV 偏波にとっての光学的厚さが厚くならないという散乱特性が起因しているものと言える。

以上のことから、平行偏波 C バンドでは、入射角が浅い(25° 以下)と地表面散乱が卓越し、深いと(30° 以上)と樹冠散乱が卓越することが示された。一方の平行偏波 L バンドでは、キャノピーの影響は殆んど無く、地表面散乱強度がほぼ全散乱強度に等しい。逆に言えば、L バンドでは樹冠の情報は得られない。よって、地表面状態を観測したい時には L バンドか、入射角の浅い C バンドを用いると良く、キャノピーの状態を観測したい場合には入射角 30°~40° の C バンドで観測すると良い。

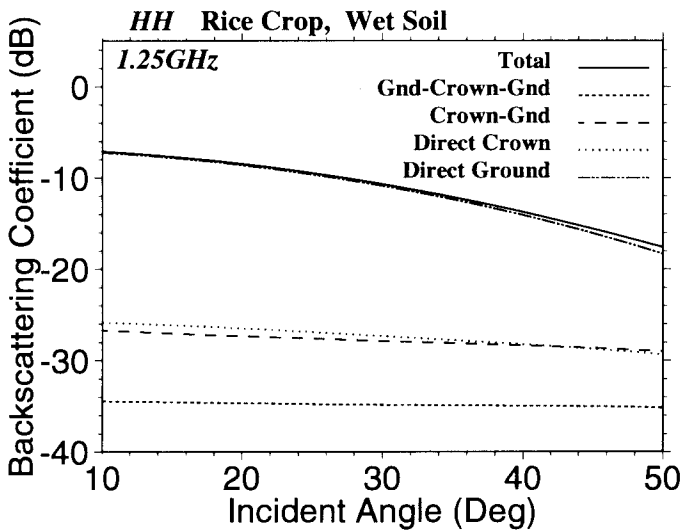


(a) HH 偏波

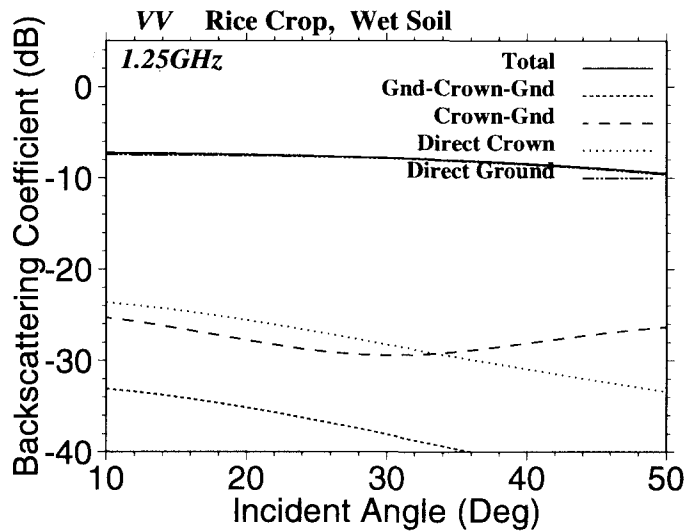


(b) VV 偏波

図-2 水田をCバンドで観測した場合の後方散乱係数。(a)HH偏波、(b)VV偏波。稲は収穫前の状態で、稲キャノピー下が湿潤な土壌の場合。図中のGndはGround。



(a) HH 偏波



(b) VV 偏波

図-3 稲作水田をLバンドで観測した場合の後方散乱係数。(a)HH偏波、(b)VV偏波。稲は収穫前の状態で、稲キャノピー下が湿潤な土壌の場合。図中のGndはGround。

#### 4. 稲作水田地表面状況のモニタリング

以上の議論で、Lバンドのマイクロ波は稲のキャノピーを透過して地表面を見ている可能性が示された。このことから、水田の湛水状況をモニタリングできることが示唆される。本論文では地表面状態の定性的な議論をするので、以下ではHH偏波のみに着目し、水田湛水状況の把握が可能か調べる。

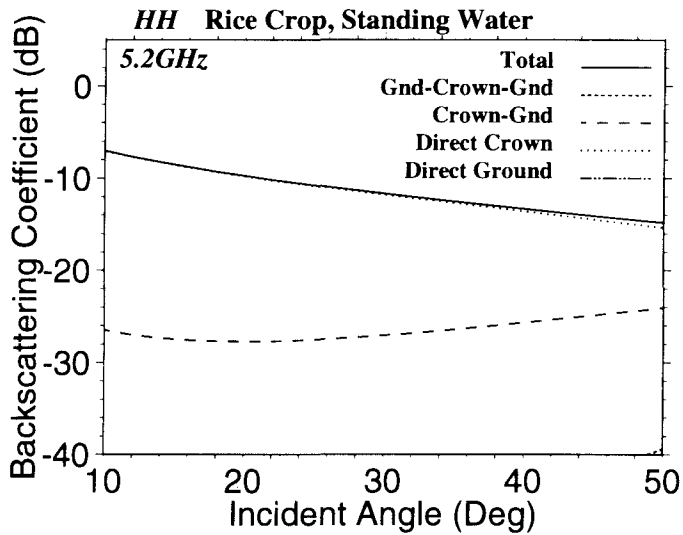
マイクロ波リモートセンシングにおいて土壌面と水面の違いは、誘電率と地表面粗度の二つである。CバンドやLバンドの場合、水の誘電率は $80 \sim 90 + j4 \sim j8$ であるのに対して、土壌は完全に乾燥している状態で $4 \sim 6 + j0$ 、飽和に近い状態で $30 \sim 40 + j4 \sim j6$ 程度となり、Fresnelの電力反射係数は乾燥している時が一番小さく、次に飽和、そして水面が一番大きい。地表面粗度につい

ては、同一サイト内でも非常にばらついているが<sup>11)</sup>、水田での計測によれば、RMS高さが $0.5 \sim 2.5\text{cm}$ 、相関距離が $0.5 \sim 10\text{cm}$ 程度である<sup>8)</sup>。水面の粗度は、風によって左右されるが、今仮定している植生量は、十分に密で、キャノピー内の風速は極めて小さいと考えられる。そこで、水面では鏡面散乱が生じるものとした。

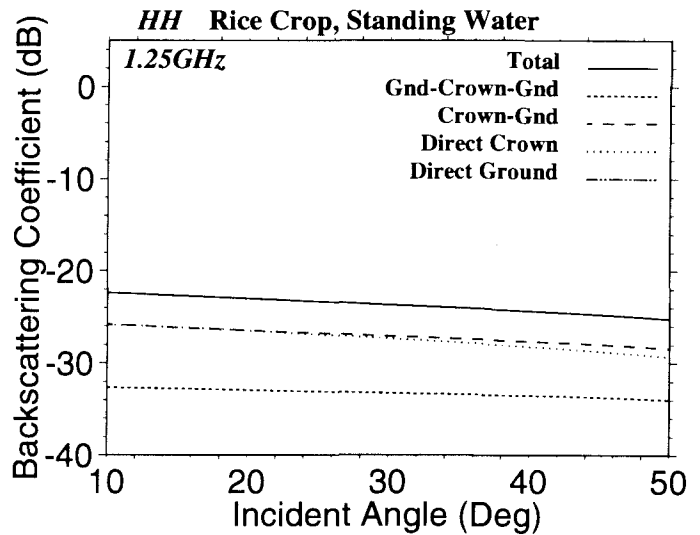
ここでは、稲の樹冠下に水面がある場合と、土壌が完全に乾燥している場合の二つについて、計算を行った。

##### (1) 水面の場合

図-4は地表面状態が水面とした時の後方散乱係数である。Cバンドの全後方散乱強度は、ほぼ全ての入射角で樹冠での直接散乱強度に等しい(図-4(a))。この直接散乱は図-2(a)の樹冠での直接散乱と全く同じであるこ

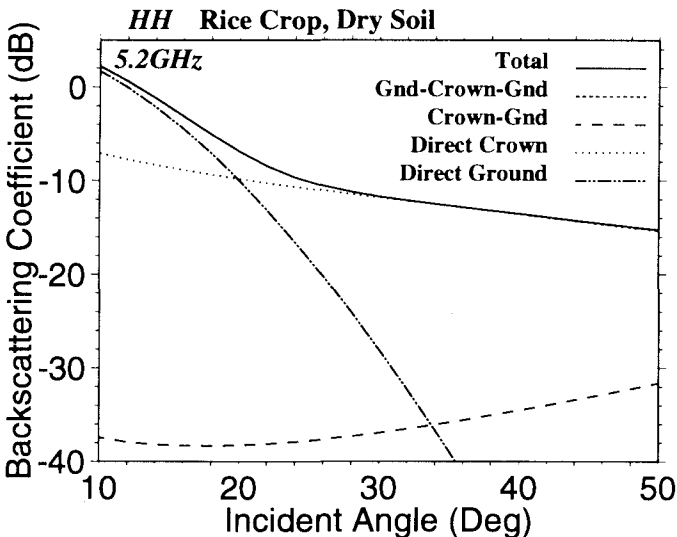


(a) Cバンド

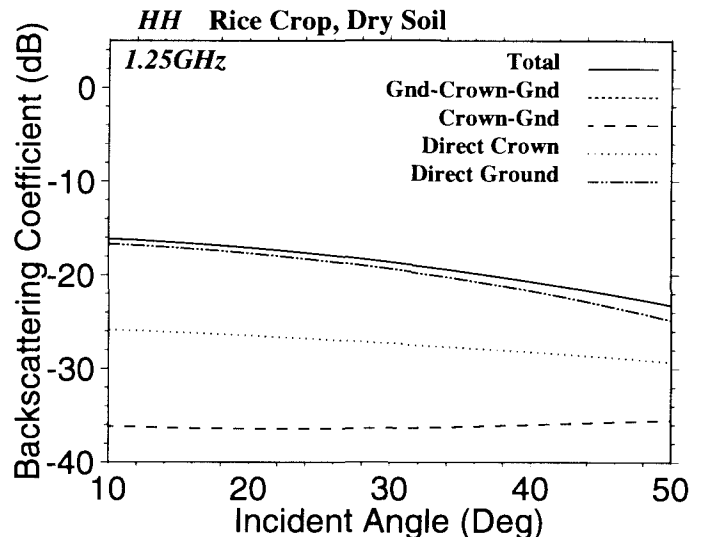


(b) Lバンド

図-4 稲作水田をLバンドで観測した場合の後方散乱係数. (a)Cバンド, (b)Lバンド. 稲は収穫前の状態で, 稲キャノピー下が湛水面の場合. 図中のGndはGround.



(a) HH偏波



(b) VV偏波

図-5 稲作水田をLバンドで観測した場合の後方散乱係数. (a)Cバンド, (b)Lバンド. 稲は収穫前の状態で, 稲キャノピー下が完全に乾燥した土壌の場合. 図中のGndはGround.

とは、その散乱過程から明らかである。両図の違いは、入射角が浅い時に現れる。これは、入射角が浅い時にはCバンドでも地表面は見えるが、水面の場合、鏡面散乱が生じ、後方散乱が無くなるためである。Lバンドでは、樹冠での直接散乱と樹冠-地表面散乱の強度がほぼ等しく、この両者が全後方散乱の主要成分となっている(図-4(b))。飽和に近い土壌面の場合と比較すると、上で述べたように水面では地表面での直接散乱が寄与しないので、水面の場合の全後方散乱係数は殆どの入射角で10dB以上下がっている。

樹冠下に滑らかな水面がある場合、地表面では鏡面散乱が生じるだけで、土壌面の場合と違って後方散乱は生じない。CバンドでもLバンドでも地表面での直接散乱は全後方散乱には影響しない点で、散乱成分から見

ると、水面の場合、両バンド間の違いは無い。しかし、その寄与率は、Cバンドが殆ど樹冠での直接散乱であるのに対して、Lバンドでは、樹冠での直接散乱と地表面-樹冠散乱の両者が同程度である点で、両バンドで観測された後方散乱は違う意味を持つことになる。また、地表面を介した二つの散乱とも、地表面を土壌面としても水面としても、大きな違いは見られない。これは両地表面での鏡面・拡散両散乱成分の割合が異なるものの、全方向の散乱強度の和があまり違わないためと考えられる。

## (2) 完全に乾燥した土壌の場合

図-5は土壌水分量を $0\text{m}^3/\text{m}^3$ とした時の後方散乱係数である。土壌内に水分が無い場合、湿潤土壌の場合に比べてCバンド、Lバンド共に地表面からの直接散乱

が小さくなっている。土壌が湿潤な場合、Cバンドでは25°以下で地表面での直接散乱が主成分となっていたが(図-2)、乾燥している場合、15°以下でのみ地表面での直接散乱が主成分となる。従って、キャノピー下の地表面観測を目的とする場合、入射角への制限が非常に厳しくなる。一方、Lバンドでは、土壌が湿潤な場合(図-3)と同様、全入射角にわたってほぼ地表面での直接散乱が全後方散乱に等しい(図-5(b))。しかし、乾燥土壌ではFresnelの電力反射係数が小さいため、全後方散乱係数はおよそ10dBほど低下している。

## 5. 議論とまとめ

以上の結果を踏まえ、シングルパラメータ観測による稲キャノピー下地表面状態の観測について議論する。まず、Cバンドについては、浅い入射角であれば、地表面状態を水面、乾燥土壌、湿潤土壌の三つに分類することが可能であり、樹冠の影響も少ないことから、乾燥土壌から湿潤土壌間の土壌水分量推定も可能である。Lバンドについては、地表面状態を水面あるいは乾燥土壌と湿潤土壌の二つに分類することは後方散乱係数の値が全入射角で5dB以上異なることより、容易に可能である。水面あるいは乾燥土壌の分類は、入射角が浅いところでは5dBあり、両者の判別は可能であるが、入射角が50°では、2dBしかなく、判別は難しくなる。

現在、運用されている人工衛星プラットフォームの能動型マイクロ波リモートセンシングは、RADARSATのExtended Lowモードを除き、ERS-1,2、RADARSATのCバンドでは稲キャノピー下の地表面状態を観測することはできないと考えられる。1998年に運用を停止してしまっていたが、LバンドのJERS-1は入射角が35°なので、水面あるいは乾燥土壌、湿潤土壌とに分類することは可能であり、本研究の目的にとっては、最適な衛星と言える。しかし、地表面粗度の影響まで考えると、水面と乾燥土壌の分類は難しい可能性がある。

以上、能動型マイクロ波リモートセンシングで、稲のキャノピー下の地表面状態観測可能性について数値散乱モデルを用いて調べた。その結果、稲が成育し終った最終段階でも、Cバンドでは浅い入射角であれば、またLバンドではどの入射角でも、地表面状態を観測することができることが明らかとなった。しかし、現在運用されているいずれのSAR搭載衛星でも、稲キャノピー下の地表面状態を完全に分類することは難しいと言える。

今回用いた散乱モデルは森林を対象として開発されているため、稲作水田に適している訳ではなく、草本類への適用に関しては、改良の余地が多分に残されている。今後は、モデルを改良し、精度向上を目指すと共に、後方散乱特性から定量的な稲の成育段階の推定アルゴリ

ズムの検討等が課題である。

謝辞： 本研究を行うに当たり、Ulaby教授、Sarabandi教授(両教授ともMichigan大学)のご厚意により、MIM-ICSのソースコードを提供頂きました。また、Sarabandi教授には来日中に本研究へのコメントを頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

本研究は文部省科学研究費「マイクロ波散乱理論に基づく多入射角、多偏波計測による土壌水分、粗度の同時推定」(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。ここに記して甚大なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) T. Kurosu, M. Fujita, and K. Chiba. Monitoring of rice growth from space using ERS-1 C-band SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 33, pp. 1092-1096, 1995.
- 2) S. A. Shakil, M. Koike, S. Hironaka, T. Nakaegawa, and K. Musiaka. Monitoring the paddy crop growth with active microwave radar -possibility and difficulties. In *Proc. of the Joint Conference of JSPRS and RSSJ*, pp. 29-32, 1999.
- 3) T. L. Toan, F. Ribbes, L. Wang N. Floury, K. Ding, J. A. Kong, M. Fujita, and T. Kurosu. Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 35, No. 1, pp. 41-56, 1997.
- 4) 六田典夫, 虫明功臣, 仲江川敏之. 多時期 SAR データを用いた熱帯水田地域におけるマイクロ波散乱の季節変動解析. 生研フォーラム「宇宙からの環境モニタリング」第8回 論文集, 第8巻, pp. 122-126, 1997.
- 5) 六田典夫, 仲江川敏之, 虫明功臣. 多時期 SAR データを用いた灌漑・非灌漑水田の状況の比較. 水文・水資源学会 1997年研究発表会要旨集, pp. 109-110, 1997.
- 6) 六田典夫, 虫明功臣, 仲江川敏之. 多時期 SAR データによる地表水の面積変動抽出法に関する基礎的研究. 第52回年次学術講演会講演概要集, 第52 II (A) 巻, pp. 388-389. 土木学会, 1997.
- 7) F. T. Ulaby, K. Sarabandi K. McDonald, M. Whitt., and M. C. Dobson. Michigan microwave canopy scattering model(mimics). *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 11, No. 7, pp. 1223-1253, 1990.
- 8) 田殿武雄, 小池俊雄, 重原俊男, Jiancheng Shi. マイクロ波散乱モデルを用いた土壌水分抽出に関する一考察. 土木学会 第24回関東支部技術研究発表会講演概要集, Vol. 24, pp. 222-223, 1997.
- 9) IRRI. *1993-1995 Rice Almanach*. International Rice Research Institute, 1995.
- 10) F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung. *Microwave Remote Sensing*, Vol. II, chapter Introduction to Random Surface Scattering and Emission, pp. 922-1033. Artech House INC., 1986.
- 11) 仲江川敏之, 三枝修平, 池田聡司, 小池雅洋, 虫明功臣, 沖大幹. マイクロ波散乱計による土壌水分計測のための多入射角観測による地表面粗度逆推定に関する検討. 水工学論文集, Vol. 41, pp. 927-932, 1997.

(1999. 9. 30 受付)