

筑波域におけるマイクロ波散乱計による土壌水分集中観測 Field measurements of soil moisture in Tsukuba using microwave scatterometer

東京大学大学院	○ 瀧上 吾郎**
東京大学生産技術研究所	沖 大幹 *
東京大学生産技術研究所	虫明 功臣 †
筑波大学地球科学系	杉田 倫明 ‡
建設省土木研究所	深見 和彦 §
日本大学理工学部	長谷部 望

Goro FUCHIGAMI, Taikan OKI, Katumi MUSIAKE,
Michiaki SUGITA, Kazuhiko FUKAMI and Nozomi HASEBE

The hydrological information at the large area are important to know the interaction between the land surface and the atmosphere. Now the microwave sensors mounted on satellites such as E ERS-1 and J ERS-1 are expected to collect the new information. This study will focus mainly on the relationship between the soil moisture and the backscattering coefficient measured by the microwave sensors. The backscattering coefficient value is affected not only by the soil moisture but also by other factors such as polarization, incident angle, sensor's frequency, surface roughness, soil composition etc.

This paper examines effects of polarization and incident angles on the backscattering for two different experimental sites, using a C-band scatterometer system. In case of the bare soil, as the incident angle increases, the backscattering coefficient value decreases. As for the relationship between the soil moisture and the backscattering coefficient, as the incident angle increases, the soil moisture sensitivity increases while the correlation coefficient decreases. In the measurement of the soil moisture by the C-band scatterometer at FIELD, the better system combination is found to be the cross-polarization and the incident angles at 20°.

Keywords: Microwave Scatterometer, Soil moisture, Backscattering coefficient, Dependence of incident angle, Tsukuba'92

1 はじめに

広域の土壌水分情報は大気-陸面相互過程のインターフェイスとして水文学的に極めて重要である。マイクロ波センサの使用により従来は点情報でしか取得できなかった土壌水分を広域な情報として得ることが可能となりつつある。また、そのような情報を抽出するためにマイクロ波センサを使った室内実験や野外観測による結果も報告されてきている^{1~3)}。

本研究では土壌水分量と散乱計から得られる後方散乱係数との関係を見いだすことを目的とし、野外集中観測を行なった。

2 観測概要

観測期間は1992年の8月11日から8月19日までの9日間、観測サイトは筑波域の筑波大学水理実験センターと土木研究所野球場の2地点である。水理実験センターではあたり一面草が生い茂っており(FIELD)、野球場は裸地面(GROUND)と芝生面(GRASS)であった。観測はCバンドの車載型散乱計で行なった。表1に車載型散乱計の諸元値を示す。マイクロ波散乱計観測は基本的には午前9~11時の間は水理実験センターで、午後2~4時の間は野球場でデータを採取した。ま

**学生会員 東京大学大学院工学系研究科 土木工学専攻
*正会員 工博 東京大学生産技術研究所助手 (〒106 港区六本木 7-22-1)
†正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授 (〒106 港区六本木 7-22-1)
‡理博 筑波大学地球科学系助手 (〒305 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
§正会員 工修 建設省土木研究所水文研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)
|| 工博 日本大学理工学部電子工学科教授 (〒274 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

た、同時に深さ 2.5cm, 50cc サンプラーで土壌の試料を表層より採集し、土壌水分量を測定した。ここで、点情報であるサンプラーデータと散乱計で得られる面的な情報源と比較するために解析は平均値をとって行なった⁴⁾。

集中観測期間中は 図 1 に見られるように 8 月 12 日未明にわずかの降雨があっただけでその後は全く降雨が観測されなかったが、図 2 に見るように GROUND で 15 %、FIELD では 20 % 程度の変動幅の体積含水率とそれに対する後方散乱係数を得ることができた。平均体積含水率は無降雨日の経過につれて全般的に低くなっていくが、両サイトとも 8 月 14 日および 18、19 日で体積含水率が高くなっている。これは、降雨によるものではなく、ERS—1 衛星および飛行機 SAR の 2 つのマイクロ波センサによる観測と同期させるために地上観測を早朝 6 ～ 9 時に行なったことに起因している。

また、マイクロ波センサによって得られる後方散乱係数は土壌水分量だけの影響因子ではないことが知られている。中心入射角、偏波面、センサの周波数、土壌の表面状態、土壌組成など様々な影響因子が複雑に重なりあった結果が後方散乱係数という値として観測される⁵⁾。そこで、今回の観測では土壌水分量以外の代表的な影響因子、中心入射角、偏波面、土壌組成の影響についても検討を加えた。

表 1: 車載型散乱計の各諸元値

周波数 (波長)	偏波	中心入射角	受信電力	最小受信感度
5.2 GHz (5.7cm)	可変 (HH,HV,VH,VV)	可変 (20°~70°)	10.0 dBm	-110 dBm HH 偏波 -40dBm

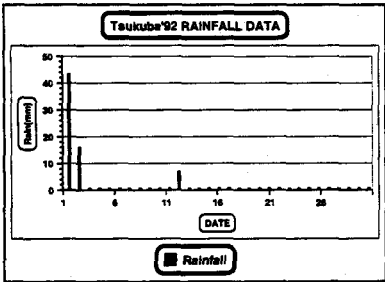


図 1: 観測期間中の日降水量

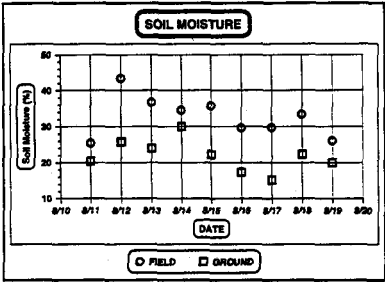


図 2: 体積含水率の日変化 (GROUND, FIELD)

3 解析結果

3.1 HH 偏波面と VV 偏波面の比較

まず最初に偏波面の違いによる影響について検討する。現在打ち上げられているマイクロ波搭載の人工衛星の偏波面は ERS-1 については VV 偏波、J ERS-1 については HH 偏波である。偏波面が異なることによって、これらの衛星から得られる後方散乱係数は異なる可能性があり、利用する方法も異なってくる。一方、車載型散乱計は手動で HH、HV、VH、VV と動かせることができる。ここでは中心入射角を固定して、体積含水率を媒介変数とし、HH 偏波と VV 偏波とで得られる後方散乱係数の対応関係を調べた。その結果を図 3 に示す。土壌組成や表面状態によって値にはバラツキが見えるが、HH、VV の偏波面の違いによって抽出される後方散乱係数に大きな差異はないと考えられる。つまり、両者から算定される後方散乱係数の値は同じと考えて良いことがわかる。また、観測に用いたマイクロ波センサの周波数は異なるが Ulaby らの野外観測においても同様の結果が示されている²⁾。

3.2 中心入射角が後方散乱係数に与える影響

中心入射角度が後方散乱係数に及ぼす影響について検討した。その結果を、水理実験センター草地 (FIELD) については図 4、野球場の裸地面と芝地面 (GROUND) については図 5 に示す。各偏波および観測サイトによって観測日は異なるが、同じ偏波に対しては同じ日に観測を行なった。従って、各偏波毎に体積含水率はほぼ一定であると仮定して検討を進めていく。また、表 2 に偏波ごとの平均体積含水率とその標準偏差を示す。

水理実験センター草地では HH、VV 偏波間での違いは見られず、どの中心入射角度に対しても両者はほぼ同じ値であった。これは前節の結果と一致する。また、全体的に入射角が大きくなるにつれて角度依存性が見られなくなり、特に HV 偏波では中心入射角が小さいところでもあまり角度依存性が見られなかった。

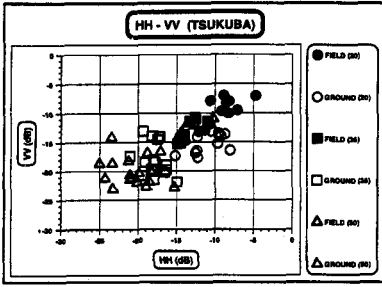


図 3: 偏波 HH と VV との関係

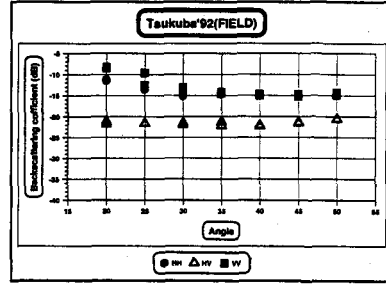


図 4: 角度依存性の検討 (FIELD)

表 2: 角度依存性観測時の平均体積含水率 (%) と標準偏差 (-)

観測サイト	偏波	観測日	平均体積含水率	標準偏差
草地 (FIELD)	HH	8/16	29.64	6.82
	HV	8/15	35.72	5.68
	VV	8/15	35.72	5.68
野球場 (GROUND)	VV	8/15	22.24	2.58
	HV	8/17	15.27	2.64

一方、野球場で裸地面と芝地面における場合では中心入射角による違いが見られた。裸地面においては角度が大きくなるにつれて、HV, VV 偏波ともに後方散乱係数は小さくなる傾向が顕著に見られた。芝地面では特に HV 偏波においては角度依存性があまり見られなかった。

以上の結果をまとめると、裸地面の場合では角度依存性があり、中心入射角度が大きいかほど後方散乱係数が低くなるのに対し、草地の場合には角度が大きくなってもある値より下がらず、特に HV 偏波では角度依存性が見られなくなる、といえる。中心入射角を変えてほぼ同時に観測することができる場合には、この特性を利用して植生の有無を判別できる可能性がある。

また偏波による違いで見ると、クロス偏波 (HV 偏波) の方がライク偏波 (HH, VV 偏波) と比較してみて相対的に $-5 \sim -10$ dB くらい低い値となっていることがわかった。

次に散乱が全て表面散乱であると仮定した理論値⁶⁾と観測値とを比較する。理論式はすこし粗い地表面を想定し、 $k\sigma_1 < 0.3$, $\sqrt{2}\sigma_1/l < 0.3$ を満足する時、適用条件を満たすものである (ここで k : 波数 ($=2\pi/\lambda$, λ : 波長)、 σ_1 : 表面高さの標準偏差、 l : 相関距離を示す)。

求める散乱係数 σ_{pq}^r は

$$\sigma_{pq}^r = 8|k^2\sigma_1 \cos\theta \cos\theta_s \alpha_{pq}|^2 W(k_x + k \sin\theta, k_y) \quad (1)$$

但し、相関係数のフーリエ変換: $W(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(u, v) \exp[-jk_x u - jk_y v]$

$\rho(u, v)$: 表面の相関係数, $u = x - x'$, $v = y - y'$, $k_x = -k \sin\theta_s \cos\phi_s$, $k_y = -k \sin\theta_s \sin\phi_s$

α : 偏波による振幅, θ : 入射角, θ_s : 反射角 (入射方向と平行), ϕ_s : 反射角 (入射方向と垂直)

後方散乱係数について考えると、 $\theta = \theta_s$, $\phi_s = \pi$ であることから、(1) 式は次のように変形される。

$$\sigma_{pq}^r = 8k^4 \sigma_1^2 \cos^4 \theta |\alpha_{pq}|^2 W(2k \sin\theta, 0) \quad (2)$$

この時、偏波による振幅 α_{pq} も次のように変形できる。 $(\mu_r$ は比透磁率 ≈ 1 , ϵ_r は比誘電率)

$$\alpha_{HH} = R_{\perp} = \frac{\mu_r \cos\theta - \sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\mu_r \cos\theta + \sqrt{\mu_r \epsilon_r - \sin^2 \theta}} \quad (R_{\perp} \text{ は Fresnell の反射係数})$$

$$\alpha_{HV} = \alpha_{VH} = 0, \quad \alpha_{VV} = (\epsilon_r - 1) \frac{\sin^2 \theta - \epsilon_r (1 + \sin^2 \theta)}{[\epsilon_r \cos\theta + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}]^2}$$

表 3: 理論式に与えた条件および比誘電率 ϵ_r

条件	$kl, k\sigma_1$	観測サイト	平均比誘電率 ϵ_r
Condition 1	1.0, 0.1	水理実験センター	2.25 + j 0.427
Condition 2	2.0, 0.2	野球場 (裸地面)	2.58 + j 0.630
Condition 3	3.0, 0.3	野球場 (芝地面)	4.39 + j 1.620

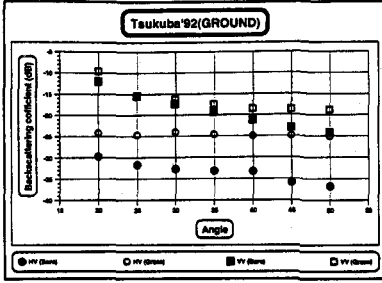


図 5: 角度依存性の検討 (GROUND)

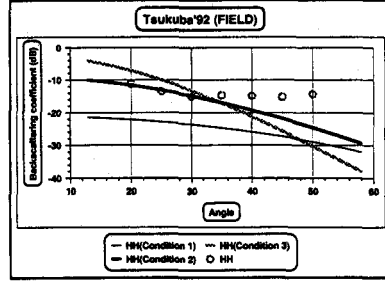


図 6: 理論値と観測値との比較 (FIELD HH 偏波)

また、相関係数 $\rho(u, v)$ は Gaussian 分布と仮定すると、 $W(2k \sin \theta, 0) = l^2 \exp[-(kl \sin \theta)^2/2]$ となる。
一方、クロス偏波については、さらに (1) 式を展開を施すことによって次のように定義される。

$$\sigma_{VH}^2 = \sigma_{HV}^2 = \pi k^4 \sigma_1^4 \cos^2 \theta \frac{[(\epsilon_r - 1)(R_{\parallel} - R_{\perp})]^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u^2 v^2}{|D_0|^2} W(u - k \sin \theta, v) W(u + k \sin \theta, v) du dv \quad (3)$$

但し、 $D_0 = k'_z + \epsilon_r k_z$, $k_z = \sqrt{k^2 - u^2 - v^2}$, $k'_z = \sqrt{k'^2 - u^2 - v^2}$, $k' = k\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$
 $R_{\parallel}$, $R_{\perp}$: Fresnell の反射係数 (水平、垂直) を示す。

今回の観測では表面粗度の測定を行なわなかったため、理論式に 3 つの条件を与えて後方散乱係数を算定した。この条件は他の観測サイトで得られた結果を踏まえて少し滑らかな平面を考慮している。また比誘電率 ϵ_r は C バンド誘電率計で観測したデータを平均して各観測サイト毎に計算式に与えた。これらの条件を表 3 にまとめる。理論値と観測値とを比較した結果を水理実験センター草地 (FIELD) の HH 偏波については図 6 野球場裸地面 (GROUND) の VV 偏波について図 7 に示す。水理実験センター草地では中心入射角が小さい時には理論値に合うが、中心入射角が大きくなるにつれて理論値から外れていく。これは中心入射角が大きくなっていくことで表面散乱以外の効果、特に植生の影響による体積散乱が大きくなると考えることができ、そのため角度依存性が薄れていくと考えられる。一方、野球場裸地面においては理論値と傾向が一致しており、散乱が表面散乱に近いものとみなしてよいことがわかる。こうした角度依存性における理論値と観測値の適合性は全偏波において良好であった。

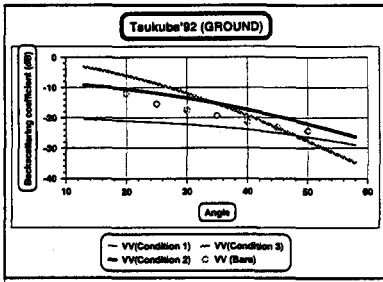


図 7: 理論値と観測値との比較 (GROUND VV 偏波)

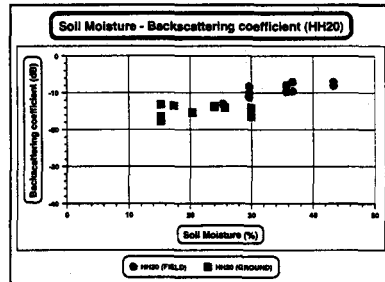


図 8: 後方散乱係数と土壌水分量との関係 (HH20°)

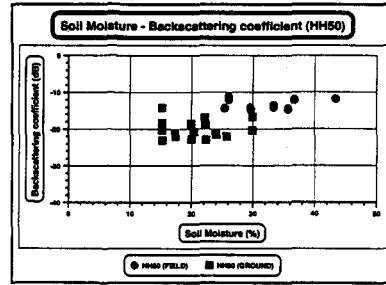
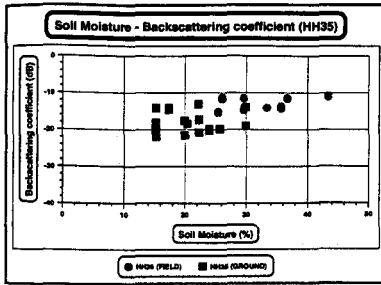


図 9: 後方散乱係数と土壌水分量との関係 (HH35°) 図 10: 後方散乱係数と土壌水分量との関係 (HH50°)

3.3 体積含水率と後方散乱係数との関係

毎日の観測では4偏波(HH,HV,VH,VV)と中心入射角20°、35°、50°の組み合わせで、データを計12セット採取した。その中でHH偏波の結果を図8～図10に示す。草地については体積含水率25～45%までのデータで、比較的行き散りが小さい。このサイトでは土壌水分量が多くなるにつれて求められる後方散乱係数も大きくなる傾向が表れている。草地ということで35°、50°のように中心入射角が大きくなっても値そのものはさほど変化しない。これは前節の結果と一致する。

一方、裸地面では体積含水率15～30%までのデータでかなり行き散りが見られる。特に中心入射角が大きくなるほどこの傾向が見られる。

そこで、水理実験センター草地(FIELD)、野球場裸地面(GROUND)別にそれぞれ偏波面別・角度別に1次の回帰計算を行ない、後方散乱係数に対する土壌水分感度を求める。その結果を表4、表5に示す。

$$\text{後方散乱係数}\sigma^0(\text{dB}) = a \times \text{体積含水率}(\%) + b \quad (4)$$

但し、 a : 土壌水分感度、 b : 切片、 r : 相関係数

これらの結果を見ると、水理実験センター草地(FIELD)の場合、中心入射角が大きくなるにつれて土壌水分感度が鈍くなり、かつ相関係数も小さくなる。しかし、中心入射角が20°の時にはHH、HV、VH偏波で、相関係数が0.8以上と良好でかつ土壌水分感度も高い。ライク偏波(HH,VV)とクロス偏波とを比較するとクロス偏波(HV,VH)の方が高い感度を示し、かつ相関が良いことがわかる。

一方、野球場裸地面(GROUND)の場合、中心入射角によらず、相関係数が非常に悪い。また、土壌水分感度も負の値が出てきて、HH偏波、中心入射角20°以外では使いようがないように思われる。これは今回の観測において土壌水分量の変動幅が小さかったために明解な土壌水分感度や相関係数が表れないと考えられる。房総域における同様の裸地面観測では、土壌水分量の変動幅が30%～70%と大きく、このため5～9%の土壌水分感度が示されている⁷⁾。

表 4: 後方散乱係数-体積含水率 回帰計算結果 (FIELD) 表 5: 後方散乱係数-体積含水率 回帰計算結果 (GROUND)

偏波 \ 角度		20°	35°	50°
HH	a	0.28105	0.13767	0.07887
	b	-19.05675	-17.52993	-15.95005
	r	0.82	0.49	0.35
HV	a	0.26935	0.19421	0.13433
	b	-28.86746	-26.99033	-24.51368
	r	0.86	0.80	0.69
VH	a	0.25679	0.154775	0.09513
	b	-27.49515	-25.51789	-23.96480
	r	0.81	0.81	0.68
VV	a	0.15241	0.13629	-0.00985
	b	-13.82127	-18.14403	-13.23260
	c	0.44	0.59	0.04

偏波 \ 角度		20°	35°	50°
HH	a	0.10114	-2.80742	-0.02214
	b	-17.30555	33.46396	-19.56217
	r	0.36	0.50	0.04
HV	a	-0.14892	-0.22576	-0.10935
	b	-23.87086	-23.37409	-27.53363
	r	0.22	0.28	0.11
VH	a	×	-0.60815	0.18680
	b	×	-12.74949	-38.74814
	r	×	0.35	0.81
VV	a	0.13191	0.08147	0.08223
	b	-13.91535	-19.48065	-22.26191
	r	0.29	0.29	0.16

これまでは種々の偏波面と中心入射角度の組合せに対する観測結果を議論してきた。これらを踏まえて、どのような観測条件が適切であるかと言う観点で次に見ることにする。

マイクロ波センサを利用した土壌水分量を精度良く検出するためには土壌水分感度が高く、かつ相関係数も大きい組合せを選択するのが好ましい。今回の観測における草地の場合、クロス偏波(HV,VH)はライク偏波(HH,VV)と比較して後方散

乱係数の値が小さく、システムの影響を受けやすいという欠点を持つ。しかし、上記の要求を満たすためにはクロス偏波の小さい中心入射角度で観測するのが好ましいと考えられる。この場合、後方散乱係数 1 dB の変化に対して、体積含水率 4 % 程度の検出が可能となる。一方、裸地面の場合、今回使用した C バンドのマイクロ波センサで観測を行なう場合、HH 偏波で中心入射角 20°で行なうのが今のところ妥当だと思われる。この場合、後方散乱係数 1 dB の変化に対して、体積含水率 10 % 程度の検出が可能となる。

4 まとめ

本研究で得られた知見をまとめると次のようになる。

- (i) HH 偏波と VV 偏波で得られる後方散乱係数はほぼ同じ値を示す。
- (ii) ライク偏波 (HH,VV) に比べ、クロス偏波 (HV,VH) は -5~-10 dB 位後方散乱係数が低い。
- (iii) 裸地面の場合、VV、HV 偏波ともに後方散乱係数に対する角度依存性が見られる。
- (iv) 草地の場合、その角度依存性はあまり見られなかった。特に HV 偏波に関してはその傾向が顕著に表れており、この特性を利用して植生の有無を検出する可能性がある。
- (v) 角度依存性に関して表面散乱に基づく理論値と比較すると、中心入射角が大きいほど観測で得た後方散乱係数が理論値から外れていく。これは草の影響を強く受けるためと考えられる。
- (vi) クロス偏波同士 (HV,VH) の土壌水分感度はライク偏波 (HH,VV) と比較してかなり感度が大きい。
- (vii) 全偏波を通じて、中心入射角度が大きくなるほど土壌水分感度および相関係数は減少していく。
- (viii) 今回使用した C バンド散乱計を用いて、このサイトにおける草地を観測する場合、クロス偏波 (HV,VH) で中心入射角 20°で行なうのが土壌水分量を求めるのには適切であると考えられる。この時、後方散乱係数 1 dB の変化に対して、体積含水率 4 % 程度の検出が可能となる。
- (ix) 今回使用した C バンド散乱計を用いて、このサイトにおける裸地面を観測する場合、HH 偏波で中心入射角 20°でデータを取得し続けるのが今のところ妥当であると考えられる。

謝辞：本研究を行なうにあたって、貴重な気象データおよび観測サイトを快く提供して頂いた筑波大学水理実験センター、建設省土木研究所水文研究室の皆様方および C バンド誘電率観測結果を提供して頂いた長岡技術科学大学建設系小池俊雄先生らの観測スタッフに対し感謝の意を表します。

References

- 1) 虫明功臣、沖大幹、小池雅洋、三浦一彦：マイクロ波散乱計による土壌水分計測のための室内実験と野外実験、水文・水資源学会 1992 年研究発表会要旨集、pp.100-103, 1992
- 2) F.T.Ulaby, R.K.Moore and A.K.Fung : *Microwave Remote Sensing. Active and Passive, Volume III : From Theory to Applications.* , Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp.1807-1841, 1982
- 3) 洲上吾郎、仲江川敏之、沖大幹、虫明功臣：マイクロ波散乱計による土壌水分野外観測、第 48 回年次講演会論文集、II pp.314-315, 1993
- 4) 洲上吾郎、仲江川敏之、沖大幹、虫明功臣：土壌水分サンプリングデータの空間代表性、第 37 回水理講演会論文集、pp.849-852, 1993
- 5) 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、社団法人電子情報通信学会、1986
- 6) F.T.Ulaby, R.K.Moore and A.K.Fung : *Microwave Remote Sensing. Active and Passive, Volume II : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory.* , Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp.922-1031, 1982
- 7) 洲上吾郎、小池雅洋、沖大幹、虫明功臣：マイクロ波センサ搭載衛星同期観測による土壌水分情報抽出、水文・水資源学会 1993 年研究発表会要旨集、pp.36-37, 1993