

衛星 SAR データとマイクロ波表面散乱機構の理論モデルを用いた 地表面粗度パラメータの抽出

Extraction of Surface Roughness Parameters by Using SAR Data
and Theoretical Surface-Scattering Models

立川康人*・片岡 武**・椎葉充晴***・高埴琢馬****

By Yasuto TACHIKAWA, Takeshi KATAOKA, Michiharu SHIIBA, and Takuma TAKASAO

Spatial surface roughness information is very important to estimate a spatial distribution of surface fluxes. In this study, by using theoretical surface-scattering models, surface roughness parameters are extracted from the backscattering coefficients observed by JERS-1 and ERS-1 and surface soil moisture volumetric content, and sensitivity analysis of backscattering coefficients and soil moisture content to the extracted surface roughness parameters are performed. In the Biwako Project area, the extracted surface roughness parameters are compared with observed ones. The extracted values and observed ones correspond well at the dry paddy fields.

Key Words : Surface Roughness Parameters, Theoretical Surface-Scattering Models, SAR, Microwave Remote Sensing

1. はじめに

地表面の凹凸と表層の土壌水分量は地表面フラックスの推定に必要な重要な物理量であるが、それらの地上での観測には多大な時間と労力を必要とするため、広域での人力によるそれらの観測は全く不可能である。幸いなことに合成開口レーダ (SAR) によって観測される陸面での後方散乱係数には地表面の凹凸と表層の土壌水分量が大きく影響を及ぼすため、衛星 SAR による観測データを用いてこれらの情報を抽出し得る可能性がある。これらの情報を分離して得ることができれば、広域の水・熱循環の推定に果たす役割は非常に大きい。

衛星観測データのみから土壌水分量と地表面の凹凸の情報をそれぞれ分離して得ることが理想であるが、それが不可能である場合、衛星観測と同期して地上での土壌水分量観測を実施し、それらから地表面の凹凸の面的な情報を得ることも有効である。地表面の凹凸の時間変化は土壌水分の時間変化ほど大きくないと考えられるため、一旦、地表面の凹凸の情報を把握しておけば、それと後方散乱係数の観測値とから土壌水分量を抽出できる可能性があるからである。また地表面での面的な凹凸の情報を抽出することができれば、その結果と地表面の凹凸から空気力学的粗度を推定する研究 (たとえば Kondo and Yamazawa¹⁾) とを結びつけて、将来的に後方散乱係数から空気力学的粗度を半理論的に推定できる可能性もある。

これらの効果を分離して把握する方法の一つとして地表面でのマイクロ波散乱機構の理論モデルを用いる方法が考えられる。沖ら²⁾は、車載型散乱計で観測した後方散乱係数とそれと同期して観測した土壌水分量とを用いて Ulaby らの表面散乱の理論モデル³⁻⁵⁾ に最も適合するように粗度パラメータを逆推定し、さらに粗度と土壌水分量とを同時に推定することの可能性を示唆している。また三枝ら⁶⁾は Radarsat の利用を念頭に置き、異なる入射角によるマイクロ波観測とそれと同期した土壌水分観測を想定して後方散乱係数から粗度パラメータを抽出することを検討している。

*	正会員	博 (工)	京都大学助教授	防災研究所 水災害研究部門	(〒611 宇治市五ヶ庄)
**		工修	JR 西日本金沢支社		(〒920 金沢市木ノ新保 7-5)
***	正会員	工博	京都大学教授	防災研究所 水災害研究部門	(〒611 宇治市五ヶ庄)
****	正会員	工博	京都大学教授	工学研究科 土木システム工学専攻	(〒606 京都市左京区吉田本町)

本研究では、これらと同様の考え方にに基づき土壌水分量と同一時期・同一地点での JERS-1, ERS-1 によって得られた後方散乱係数とを入力値とし, Ulaby らのマイクロ波表面散乱機構の理論モデルを用いて裸地面での凹凸に関する情報を抽出して, 実測値との比較を行った結果を示す. また, 後方散乱係数および土壌水分量が地表面粗度パラメータの抽出結果に及ぼす感度について報告する.

2. マイクロ波表面散乱理論に基づく地表面粗度パラメータの抽出

2.1 理論モデルの概要

マイクロ波が土壌面に入射すると表面散乱と体積散乱が起こるが, 湿った土壌では表面散乱の効果が支配的であり, Ulaby らは, 表面散乱に関して三種類の散乱機構の理論モデル, Physical Optics Model, Small Perturbation Model, Geometrical Optics Model を提案している⁵⁾. これらのモデルを用いると後方散乱係数 σ^0 は, マイクロ波の入射角 θ , 波長 λ , 偏波, 地表面の比誘電率 ε_r , 地表面粗度パラメータ (地表面高さの標準偏差 σ , 相関長さ l) の関数として

$$\sigma^0 = f(\theta, \lambda, \varepsilon_r, \sigma, l) \quad (1)$$

のように表され, 三種類の理論モデルは地表面粗度パラメータの値によって適用範囲が定められる (表-1). 入射角 θ , 波長 λ , 偏波は衛星の観測システムによって定まるため, (1) 式の中で地表面状態によって異なるのは ε_r , σ , l の 3 つのパラメータである. このうち, 比誘電率 ε_r は, Dobson らによる半経験式⁵⁾ を利用して体積含水率 m_v と関係付けられる. 地表面の凹凸を表すパラメータを具体的に記述すると, 地表面高さの標準偏差 σ は, 次式で表される.

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N z_i^2 - N \bar{z}^2 \right) \right]^{1/2}, \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (2)$$

ここで, z_i はある一定間隔 Δx ごとに計測した地表面の基準面からの高さであり, N はサンプル数を表す. 一方, 相関長さ l は地表面の高さの自己相関係数が $1/e$ になる時の距離である. すなわち, j を 1 以上の整数とし $x = (j-1)\Delta x$ として

$$\rho(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (3)$$

に対して $\rho(x)$ の値が $1/e$ となる時の x が相関長さである.

2.2 地表面粗度パラメータ抽出のための具体的な算定手順

ある対象領域に対して上記の理論モデルを適用し, その対象領域に対応する JERS-1 と ERS-1 の後方散乱係数と適当な体積含水率を与えることで σ , l に関する非線形連立方程式

$$\begin{cases} \sigma_j^0 = f_1(\sigma, l) \\ \sigma_e^0 = f_2(\sigma, l) \end{cases} \quad (4)$$

を構成し, これを減速ニュートン法によって解くことで地表面粗度パラメータを抽出する. ここで σ_j^0 , σ_e^0 はそれぞれ JERS-1, ERS-1 によって観測された同一地域, 同一地点の後方散乱係数, f_1 , f_2 は Ulaby らによって示された三種類の理論モデルのいずれかである.

ある領域での地表面粗度パラメータを後方散乱係数から逆推定する場合, これから推定しようとする粗度パラメータの値によって適用可能な理論モデルが決定されるため, 事前にどの理論モデルが適用可能かはわからない. そこで, 考えられる全ての理論モデルの組み合わせに対してそれぞれ地表面粗度パラメータを推定し, 得られた地表面粗度パラメータがそれらのモデルの適用範囲内にあれば抽出できたと考える. JERS-1 と ERS-1 の観測条件を設定した二つの理論モデルを組み合わせした場合, 適用し得る条件の重なる理論モデルの組合せは表-2 に示す 6 通りであり, その粗度パラメータの範囲を図示すると図-1 の斜線部分になる.

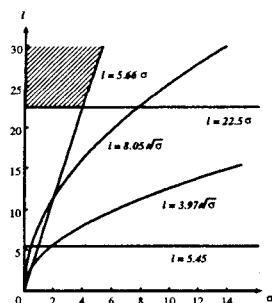
表-1 理論モデルの適用範囲

理論モデル	粗度パラメータの条件
Physical Optics Model	$kl > 6$ $l^2 > 2.76\sigma\lambda$ $m < 0.25$
Small Perturbation Model	$kl < 6$ $k\sigma < 0.3$ $m < 0.3$
Geometrical Optics Model	$kl > 6$ $l^2 > 2.76\sigma\lambda$ $(2k\sigma \cos \theta)^2 > 10$

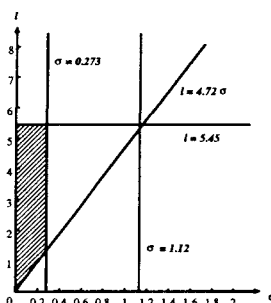
$$k = 2\pi/\lambda, m = \sqrt{2}\sigma/l$$

表-2 理論モデルの組合せ

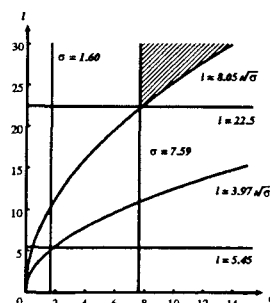
理論モデルの組合せ	JERS-1の観測条件を適用する理論モデル	ERS-1の観測条件を適用する理論モデル
case 1	Physical Optics Model	Physical Optics Model
case 2	Small Perturbation Model	Small Perturbation Model
case 3	Geometrical Optics Model	Geometrical Optics Model
case 4	Physical Optics Model	Geometrical Optics Model
case 5	Small Perturbation Model	Physical Optics Model
case 6	Geometrical Optics Model	Physical Optics Model



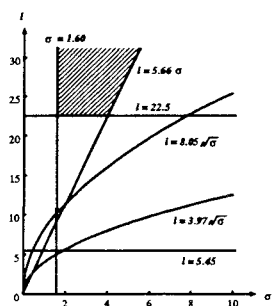
(a) case1での粗度パラメータの範囲



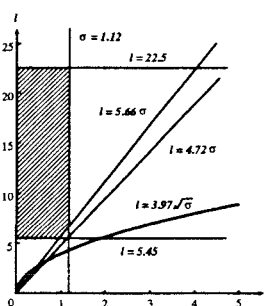
(b) case2での粗度パラメータの範囲



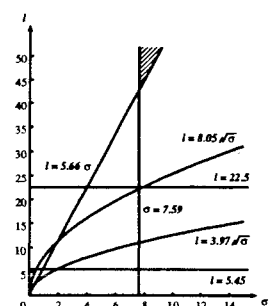
(c) case3での粗度パラメータの範囲



(d) case4での粗度パラメータの範囲



(e) case5での粗度パラメータの範囲



(f) case6での粗度パラメータの範囲

図-1 各理論モデルの組み合わせが満たす粗度パラメータの範囲

3. 地表面粗度パラメータの抽出結果と現地観測値との比較

使用した SAR データは琵琶湖北東部を対象としたものであり、パス-ロウはいずれも 71-241 である。観測日時は JERS-1 が 1992 年 10 月 22 日、ERS-1 が 1992 年 10 月 21 日の 1 日違いで、観測領域近郊のアメダスのデータによれば観測日付近では降水は観測されていなかったの両日の土壌水分の分布状態は同じと考えた。対象領域は琵琶湖北東部木之本町の木之本町営グラウンドと刈り取り後の田圃(琵琶湖プロジェクトの集中田)である。木之本町営グラウンドはしっかりと踏み固められた極めて平坦な裸地である。集中田は一面見渡す限り田圃で約 30×90m ごとに区画整理されており、刈り取り後の切株が残り藁が敷かれているところと耕運機で堀起こされたところが混在していた。

3.1 入力データの設定

地表面粗度パラメータの抽出にあたって、対象領域の JERS-1 および ERS-1 の後方散乱係数と体積含水率を与える必要がある。後方散乱係数には同一の地表面状態であっても観測値に違いを生じさせるスペクルノイズが含まれる。それを減らすために対象地点を中心として同一の土地利用の領域内の CCT 値の平均値を観測値として与えた。また、CCT 値が粗度パラメータの抽出に及ぼす感度を調べるために、領域内での CCT 値の平均値から領域内での CCT 値の標準偏差あるいは標準偏差の半分の値を増減した値を設定し

表-3 木之本町営グラウンドに対応する領域の衛星観測値

衛星観測値	JERS-1	ERS-1
領域平均値 (CCT 値)	457	366
標準偏差 (CCT 値)	140	82
領域平均の後方散乱係数 (dB)	-16.8	-14.0

表-4 集中田に対応する領域の衛星観測値

衛星観測値	JERS-1	ERS-1
領域平均値 (CCT 値)	696	1073
標準偏差 (CCT 値)	242	304
領域平均の後方散乱係数 (db)	-13.1	-4.7

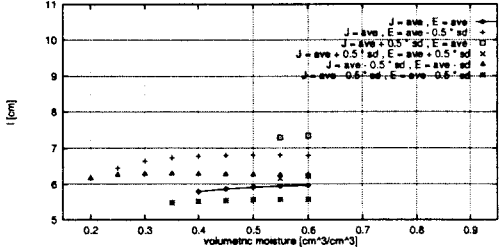
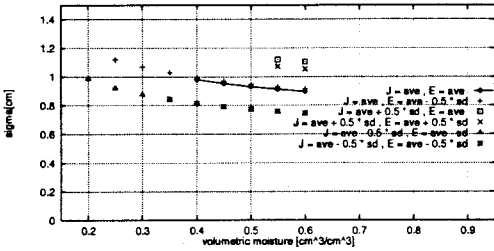


図-2 集中田において抽出された地表面粗度パラメータ (左図は σ , 右図は l)

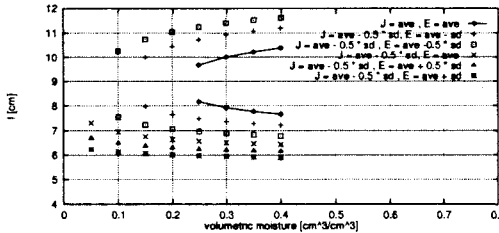
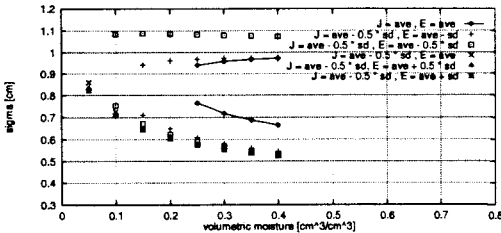


図-3 木之本町営グラウンドにおいて抽出された地表面粗度パラメータ (左図は σ , 右図は l)

地表面粗度パラメータの抽出を行って、設定した CCT 値の違いが抽出結果にどのように影響するかを調査した。対象領域に与えた CCT 値の値を表-3、表-4 に示す。CCT 値から後方散乱係数への変換には宇宙開発事業団によって報告されている変換式^{7,8)}を用いた。また、体積含水率の感度を調べるために、砂田らの土壌水分観測結果⁹⁾を参考にして、集中田、木之本町営グラウンドでの飽和体積含水率をそれぞれ 60%、40% とし、5% きざみで体積含水率を設定して地表面粗度パラメータの抽出を行った。

3.2 地表面粗度パラメータの抽出結果

図-2、図-3 はそれぞれ集中田、グラウンドにおける地表面粗度パラメータの抽出結果であり、いずれも case 5 の理論モデルの組み合わせによって得られたものである。図中の横軸は設定した体積含水率を示しており、左側の図の縦軸はその体積含水率を設定したときに得られた地表面高さの標準偏差 σ を、右側の図は相関長さ l を示している。実線で結んだ部分は観測値として CCT 値の平均値を与えた場合の抽出結果であり、それ以外の点、たとえば“J=ave, E=ave-0.5*sd”と表された点は、JERS-1 の観測値として対象領域の CCT 値の平均値を、ERS-1 の観測値として対象領域の CCT 値の平均値からその標準偏差の半分の値を与えた場合の抽出結果である。

グラウンドでは図-3 に示すように同じ体積含水率のもとで地表面粗度パラメータが二組求まる場合が存在した。これは以下のように説明できる。図-4 は横軸に σ を縦軸に l をとり、体積含水率を 40% とした場合に case 5 のそれぞれのモデルから計算される CCT 値の等高線を表している。本研究で行っている抽出手法は、観測値として与えた CCT 値によって決まる図-4 の JERS-1 の等高線と ERS-1 の等高線との交点を求めているに他ならない。地表面粗度パラメータに対して CCT 値がこれらの図のように分布するため、ある地点での地表面粗度パラメータが二組存在して一意に決定できなかったり、条件を満たす地表面粗度パラメータが存在しないということが起こる。地表面粗度パラメータが唯一決まるのは二つの等高線が接するか、また

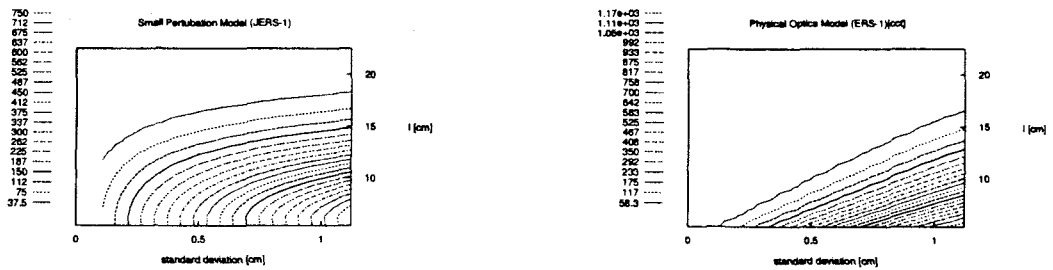


図-4 case 5 の粗度パラメータの範囲内での Small Perturbation Model (JERS-1) による CCT 値の等高線 (左図) と Physical Optics Model (ERS-1) による CCT 値の等高線 (右図), ただし体積含水率は 40% を設定

表-5 地表面高さの標準偏差と相関長さの観測結果

観測場所	σ [cm]	l [cm]
木之本町営グラウンド	0.14	2.1
田圃 (南北方向)	0.38	4.2
田圃 (東西方向)	0.95	8.2

表-6 地表面粗度パラメータの現地観測結果と抽出結果

	木之本町営グラウンド		集中田	
	σ [cm]	l [cm]	σ [cm]	l [cm]
観測結果	0.14	2.1	0.38~0.95	4.2~8.2
抽出結果	0.43~1.1	5.5~11.6	0.74~1.1	5.5~7.3

は理論モデルの適用条件 (図-1 の斜線部分) を満たす地表面粗度パラメータが一組しか存在しない場合である。上述の結果はいずれも case 5 の組み合わせによって得られた結果であり、これ以外のケースでは地表面粗度パラメータの抽出はできなかった。これは、観測値として与えた CCT 値を満たす図-4 と同様の等高線を各理論モデルによって描くと、case 5 以外では 2 つの等高線は交わらなかったからである。

なお、体積含水率に異なる値を設定して粗度パラメータの抽出した結果、特に体積含水率が小さい場合に体積含水率の違いが抽出結果に与える影響が大きいことがわかる。また、CCT 値に異なる値を設定して粗度パラメータの抽出した結果、田圃において JERS-1 の CCT 値の違いは σ の抽出結果に大きく影響するが ERS-1 の CCT 値の違いはほとんど影響しないことがわかった。

3.3 地表面粗度パラメータの現地観測

前節で抽出した地表面粗度パラメータが現実の値を示しているかを検証するために、1995 年 10 月 25 日から 27 日にかけて可視光レーザ式変位センサを用いて地表面の高さ分布を測定した。衛星観測とは同期していないが、衛星観測時と全く同じ土地利用なので問題はないと考える。集中田の地表面高さの分布を観測する際、藁は取り除き切り株を含まないように測定を行った。藁によるマイクロ波の体積散乱や減衰は地表面での散乱に比べて非常に小さく無視できると言われているためである⁵⁾。また、グラウンドでは一方向の観測を、集中田で切株が残っているところは観測方向による粗度パラメータの違いが考えられるため、稲の植え付け方向 (南北方向) とそれに直行する方向 (東西方向) の二方向で観測を行った。サンプリング間隔は、マイクロ波の波長の 1/10 以下という Ulabiy らの経験的な指標⁵⁾ に従い 5mm 間隔とし、0.1mm 単位で地表面高さを観測した。表-5 はその観測値を用いて地表面高さの標準偏差 σ 、相関長さ l を求めた結果である。

3.4 観測結果と理論モデルによる抽出結果との比較

表-6 は地表面粗度パラメータの現地観測結果と理論モデルによる抽出結果をまとめた表である。抽出結果は体積含水率、CCT 値に異なる値を設定して得られた値の範囲を示している。木之本町営グラウンドでの観測結果を抽出結果と比較すると、 σ 、 l ともにオーダーは同じものの観測値とは異なる結果となった。グラウンドでの粗度パラメータの観測値によれば、ここでの後方散乱に適合するモデルは JERS-1、ERS-1 とともに Small Perturbation Model であり、表-2 の組み合わせで言えば case 2 の組み合わせによって推定されるべきものである。ところが、後方散乱係数から逆推定した場合、case 2 では解を得ることができず、解が得られたのは観測値の粗度とは適合しない case 5 の組み合わせであった。case 2 の組み合わせで解が得られるのは JERS-1

の CCT 値が今回観測されている値よりももっと小さい場合であり、このグラウンドの場合だと CCT 値で約 200 以下 (db 単位で -23 以下) の場合である。この値は JERS-1 の雑音等価散乱係数よりも小さな値であるため衛星観測システムの性能上このような小さな後方散乱係数を観測することはできない。これが、抽出した値と観測値とで異なる結果となった原因である。一方、集中田では σ , l とともにほぼ一致した値が得られた。この場合、粗度パラメータは case 5 によって得られており、粗度パラメータの観測結果に適合するモデルの組合わせも case 5 であった。

4. 結論

本研究では、田圃等ある程度凹凸を持つ裸地面という限られた土地被覆においてのみであるが、衛星 SAR による後方散乱係数と土壌水分量とから粗度パラメータを抽出する可能性を示した。本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- 田圃で抽出された地表面粗度パラメータは現地観測値にかなり近い値であり、理論モデルを用いて地表面粗度パラメータ抽出できる可能性を示せた。ただし、締め固められた裸地など極めて後方散乱の小さな領域では、衛星システムの性能の限界により粗度パラメータを適切に抽出できないことも明らかとなった。
- 体積含水率に異なる値を設定して粗度パラメータの抽出を行った結果、特に体積含水率が小さい場合に抽出結果に与える影響が大きいことがわかった。
- CCT 値に異なる値を設定して粗度パラメータの抽出した結果、田圃において JERS-1 の CCT 値の違いは σ の抽出結果に大きく影響するが ERS-1 の CCT 値の違いはほとんど影響しないことがわかった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、基盤研究 (B) (京都大学 高橋代表)、基盤研究 (A) (京都大学 中北代表) および重点領域研究 (長岡技術科学大学 小池代表) の補助を受けた。また、本研究は琵琶湖プロジェクトの一貫として行なわれたものであり、元代表幹事の砂田先生 (山梨大学)、現代表幹事の中北先生 (京都大学) には貴重な研究の場を提供いただいた。なお、本研究で利用した SAR データは通商産業省/宇宙開発事業団の所有するものであり、宇宙開発事業団より提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kondo, J. and Yamazawa, H. : Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface, Boundary-Layer Meteorol., 35, pp. 331-348, 1986.
- 2) 沖 大幹・虫明功臣・輪笠一浩：衛星搭載マイクロ波センサによる表層土壌水分量観測の理論式に基づいた検討, 土木学会年次学術講演会概要集, II-47, pp. 94-95, 1995.
- 3) Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. : Microwave Remote Sensing Active and Passive, volume I, Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- 4) Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. : Microwave Remote Sensing Active and Passive, volume II, Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- 5) Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. : Microwave Remote Sensing Active and Passive, volume III, Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- 6) 三枝修平・仲江川敏之・沖 大幹・虫明功臣：マイクロ波散乱の多入射角計測による地表面粗度推定の可能性, 土木学会年次学術講演会概要集, II-406, pp. 812-813, 1996.
- 7) NASDA EOC : User's Guide to NASDA's SAR products, HE-930014, 1993.
- 8) Shimada, M : Image Quality of the SAR and OPS, Presentation Materials of JERS-1 Information Exchange Meeting held at Kogakuin Univ., Tokyo, Japan, Aug. 16-17 1993, MITI and NASDA, pp. 90-132, 1993.
- 9) 砂田憲吾・伊藤 強・虫明功臣・開発一郎：表層土壌水分の空間分布特性に関する調査と検討, 水工学論文集, 第 38 巻, pp. 173-178, 1994.