

衛星搭載合成開口レーダによる流域地表面特性の把握に関する 基礎的検討

高棹 琢馬・椎葉 充晴・立川 康人・寶 馨

A BASIC STUDY ON EXTRACTION OF CATCHMENT PHYSICAL CHARACTERISTICS BY USE OF SYNTHETIC APERTURE RADAR

By *Takuma* TAKASAO, *Michiharu* SHIIBA, *Yasuto* TACHIKAWA and *Kaoru* TAKARA

Synopsis

This paper reports characteristics of synthetic aperture radar (SAR) imageries obtained by two new satellites : the European Remote Sensing Satellite (ERS-1) and the Japanese Earth Resources Satellite (JERS-1). The authors compare the SAR imageries in terms of distributions of the CCT values and the backscattering coefficients for several kinds of land cover in a watershed near Nagoya, Japan. The results show : (1) Water areas (channel networks) are able to be extracted using the SAR images, and it is better to use the ERS-1 SAR image than to use the JERS-1 SAR image. (2) Except water areas, to identify boundaries clearly between various land cover is difficult by use of the ERS-1 SAR image and the JERS-1 also. (3) The mean values of backscattering coefficients computed from the JERS-1 SAR image show larger values in the order, water areas, paddy fields, forests, urban areas. This order corresponds the order in which the value of the aerodynamic roughness parameter for each land cover becomes larger. (4) The estimation of the aerodynamic roughness parameter by making use of a SAR image would be possible.

1. 序 論

合成開口レーダ(SAR)を搭載した地球観測衛星 ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) が1991年7月に欧州宇宙機構 (ESA : European Space Agency) から打ち上げられ、次いで JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) が1992年2月に宇宙開発事業団 (NASDA : National Space Development Agency of Japan) から打ち上げられた。合成開口レーダとは、マイクロ波を地球上に照射し、地表面で散乱してレーダの方向に戻ってくる電波を受信することにより地表面の特性を観測する能動型センサであり、後方散乱係数 σ^0 (レーダの電波が地表面で入射方向に散乱する度合を表す量) の空間的分布情報 (SAR 画像) を高分解能でかつ天候・昼夜に左右されずに得ることができる。 σ^0 の値は、地表面表層付近の層内の状態 (土壌水分量、積雪水量など) や地表面の幾何学的形状 (地表面の傾き・凹凸など) に大きく影響を受けるため、 σ^0 からこれらの物理量を定量的に推定できる可能性がある。これらの情報は、光学センサでは定量的評価が難しいために、SAR に大きな関心が寄せられている。

地表面表層付近の層内の状態が σ^0 の大きさに影響を及ぼすことに着目した研究として、三浦ら¹⁾、淵上ら²⁾、福本ら³⁾ はマイクロ波センサによって土壌水分量を定量的に評価するための研究を進めており、また小池ら⁴⁾、近藤ら⁵⁾ は積雪水量に着目した研究を行なっている。これらの研究は水の存在・量によって表層

Table 1 Remotely sensed data used in the study.

Satellite (Sensor)	Path/Row	Acquired Date
JERS-1 (SAR)	68/241	19.Oct.1992
JERS-1 (SAR)	69/241	20.Oct.1992
ERS-1 (SAR)	69/242	03.Dec.1992
ERS-1 (SAR)	69/242	18.Mar.1993
SPOT (PA)	326/729	19.Mar.1991
JERS-1 (OPS)	69/241	20.Oct.1992
Aerial Photograph		23.Oct.1992

Table 2 Characteristics of ERS-1 and JERS-1 SAR.

Parameters	ERS-1 (SAR)	JERS-1 (SAR)
Off-nadia Angel	23°	35°
Wave Length	5.7cm (C-band)	23.5cm (L-band)
Resolution	30m (3 Look)	18m (3 Look)

内の誘電率, ひいては後方散乱係数 σ^0 の値が異なることに着目した研究であり, 物理量を定量的に測定するという点で非常に重要であるとともに, SAR画像の解釈にも有用な知見を与えてくれるものと期待できる。

一方, σ^0 は地表面の幾何学的形状(地表面の傾き・凹凸)にも大きく影響を受ける。SAR画像から, これらの情報を得ることができれば, 凹凸(地表面の粗さ)をもとに地被を推定することが可能であり, とくにあらゆる天候においてデータを取得できるという利点を考えると, 洪水等災害の発生を監視する上で極めて有用である。また, 地表面の凹凸から, 空気力学的粗度を推定することができれば, 広域での地表面フラックスを推定するために資するところは大きい。

そこで, 本研究では, SAR画像からどのような地表面情報を得ることができるのかを明らかにするために, 地表面の被覆ごとにERS-1およびJERS-1のSARデータの持つ特性を調査した。また, その結果から, SAR画像を用いて空気力学的粗度を推定することの可能性を検討した。

以下, 2.で, SAR画像の調査手法について述べ, 3.でERS-1とJERS-1のSAR画像の特性, およびそこから得られる地表面情報について検討する。4.でSAR画像による空気力学的粗度推定の可能性について検討し, 5.で得られた成果をまとめる。

2. 使用した衛星データと調査手法

山地域では, マイクロ波の入射角が斜面の傾きによって変わるため, SAR画像に地形による歪みが生じ, 画像と地上対象物とを対応づけることが難しくなる。そこで, 本研究では, 名古屋市周辺の平坦な地域を調査対象とした。使用したSARデータ(JERS-1, ERS-1それぞれ2シーン)および解析の補助として用いた光学センサによる衛星データ(JERS-1 OPS, SPOT2 PAモード画像), カラー空中写真のシーン情報をTable 1に示す。またSARの特性をTable 2に示す。

2.1 調査手法

Fig. 1はJERS-1によるSAR画像の一部で, 愛知県瀬戸市周辺を写したものであり, Fig. 2は同一地域の1/25,000地形図である。画像を見ると, 河川や池, ゴルフ場, 道路などは後方散乱が少ないため, 周

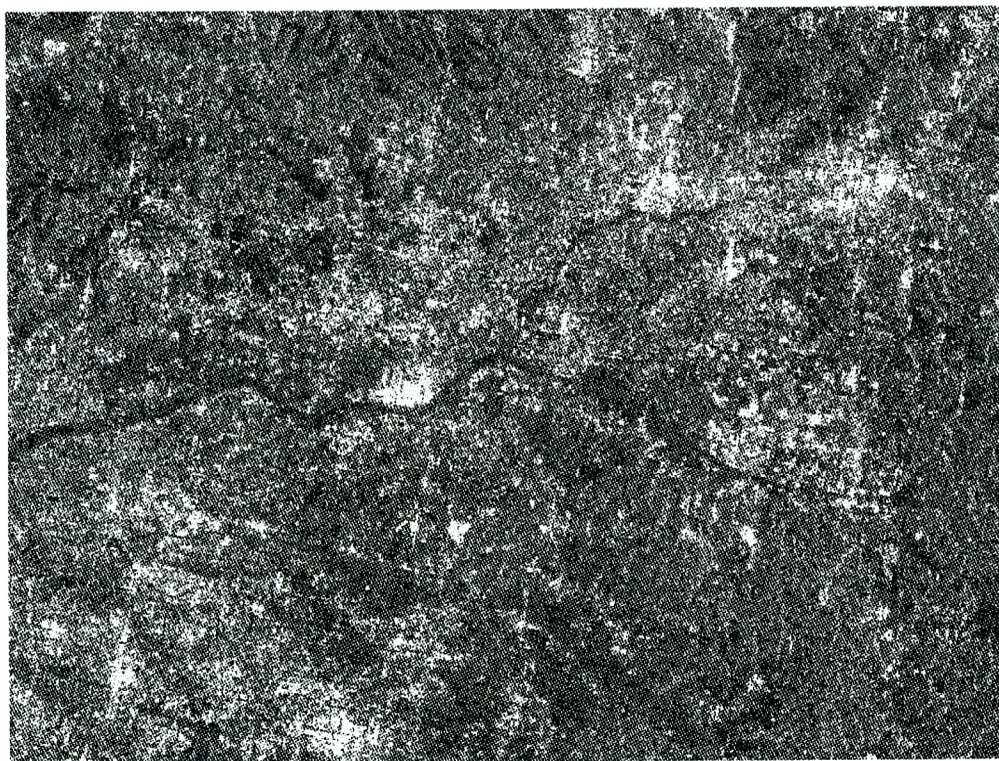


Fig. 1 JERS-1 SAR image around Seto City acquired on 19 Oct. 1992.



Fig. 2 Topographic map around Seto City and patches for various land cover.

りよりも暗く写っており比較的良好に識別できる。しかし、水田、裸地、果樹園、市街地などは、土地被覆ごとにある程度特徴を持っているものの、その境界を明瞭に判断することは難しい。

そこで Fig. 3 に示すように、SPOT 衛星画像とイメージスキャナで読み取った 1/25,000 地形図の画像を SAR 画像に重ね合わせて位置を知る目安とし、カラー空中写真⁶⁾と JERS-1 OPS 画像をランドトゥールズとして、土地被覆ごとに、まとまった面積を持つ領域を抜き出して、そこでの CCT 値と後方散乱係数 σ^0 の分布を調べた。抜き出した領域は、各 SAR 画像とも河川流水部 6ヶ所、河川非流水部の草地 8ヶ所、河川非流水部の砂利域 6ヶ所、水田 19ヶ所、果樹園 1ヶ所、裸地 3ヶ所、森林域 5ヶ所、都市域 9ヶ所であり、3つの SAR 画像とも同じ位置から抜き出した。Fig. 2 の網かけ部分は、Fig. 1 に示す画像内で抜き出した各領域を示す。

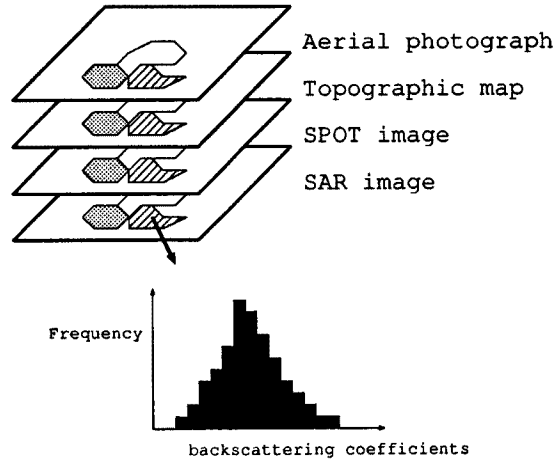


Fig. 3 Schematic representation of the methods for investigations.

2.2 CCT 値と後方散乱係数

散乱面での電磁波の散乱の度合はレーダ断面積で表され、このうちレーダの入射方向に散乱する量を後方散乱断面積と呼ぶ。後方散乱係数とは散乱面の単位面積当たりの後方散乱断面積で定義され、その値は、散乱体の電磁気特性や散乱体表面の形状、散乱体に対する電磁波の入射角によって決まる無次元量である。

SAR 画像は後方散乱係数のマップであり、データは CCT (Computer Compatible Tape) 値で記録され、本研究で使用した SAR 画像に関して σ^0 と CCT 値の間には、

$$\sigma^0 = 20 \log_{10} I + CF \dots\dots\dots (1)$$

の関係がある⁷⁾⁸⁾。ここで、 σ^0 は後方散乱係数 (dB 単位)、 I は CCT 値 (0~32767 の整数値) であり、 CF は Table 3 に示す変換係数である。これによって、 σ^0 の空間的分布を得ることができる。

SAR 画像は単色の濃淡画像であり、画像の濃淡から情報を抽出する場合は、濃淡の差すなわち数値の大小の差が大きい CCT 値を扱う方が有利であるが、物理量の測定という定量的な議論を行なうためには後方散乱係数に変換する必要がある。

3. 流域地表面における SAR データの特性

JERS-1, ERS-1 SAR 画像から抜き出した各領域 (川、池、裸地、水田、草地、河原、森林、市街地) で

Table 3 Conversion factor.

sensor	CF (dB)	Acquired Date	Processed Date
ERS-1 (AMI)	-65.3		
JERS-1 (SAR)	-68.5	Until end of Apr. 92, 1 Sept.92, Since 18 Sept.92	Since 15 Feb.93
JERS-1 (SAR)	-70.0	Until end of Apr. 92, 1 Sept.92, Since 18 Sept.92	Until 14 Feb.93
JERS-1 (SAR)	-66.42	Between 1 May 92 and 17 Sept. 92 except 1 Sept. 92	Since 15 Feb. 93

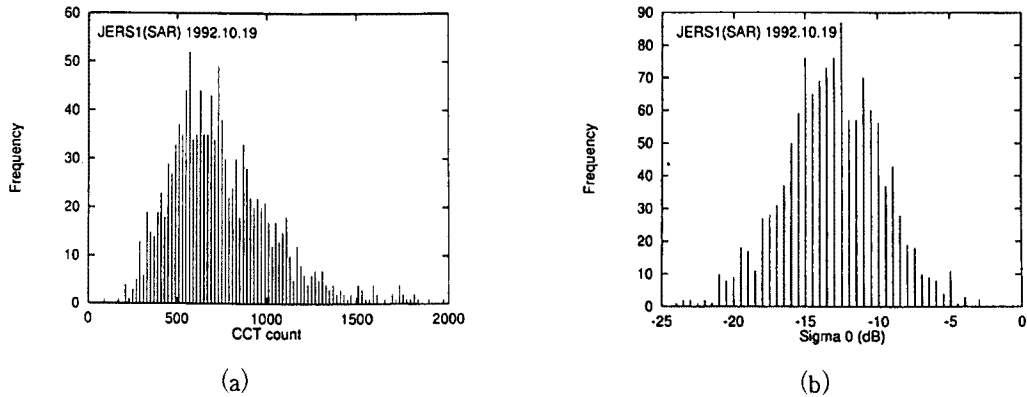


Fig. 4 Histograms of (a) CCT count and (b) backscattering coefficient on a bare ground.

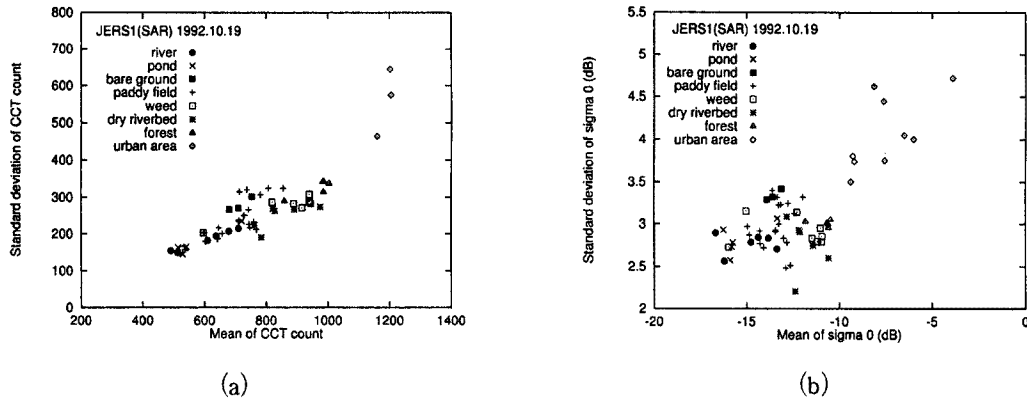


Fig. 5 (a) Mean value and (b) standard deviation for each land cover using the JERS-1 SAR image acquired on 19 Oct. 1992.

の CCT 値と σ^0 の分布を調べた結果、いずれの領域も Fig. 4(a)(b) のような分布を示した。これらはそれぞれ JERS-1 SAR データの裸地域での CCT 値と σ^0 のヒストグラムである。CCT 値は右に尾を引くような分布をしており、 σ^0 はほぼ対称に分布する。以下では、土地被覆ごとの全体的な特性を把握するために、各領域での CCT 値と σ^0 の平均値および標準偏差を比較した結果を述べる。

3.1 JERS-1 による土地被覆別の SAR データの特性

Fig. 5(a)(b) は JERS-1 SAR データから抜き出した各土地被覆について、CCT 値と σ^0 の平均値と標準偏差を示したものである。これらの図から CCT 値に関して

- 平均値は、水域(河道流水部と池)・裸地・水田・草地・森林・市街地の順に大きくなる。
- 標準偏差も平均値と同様の順序で大きくなる。
- 河道流水部の平均値は池と裸地の間に分布し、裸地との区別は難しい。

等がわかる。また、 σ^0 に関しては

- 平均値の大きさの順は CCT 値と変わらない。
- 標準偏差については、市街地を除くと平均値の小さい領域が標準偏差も小さいとは言えなくなる。

等がわかり、土地被覆と σ^0 とは関連を持つことがわかる。

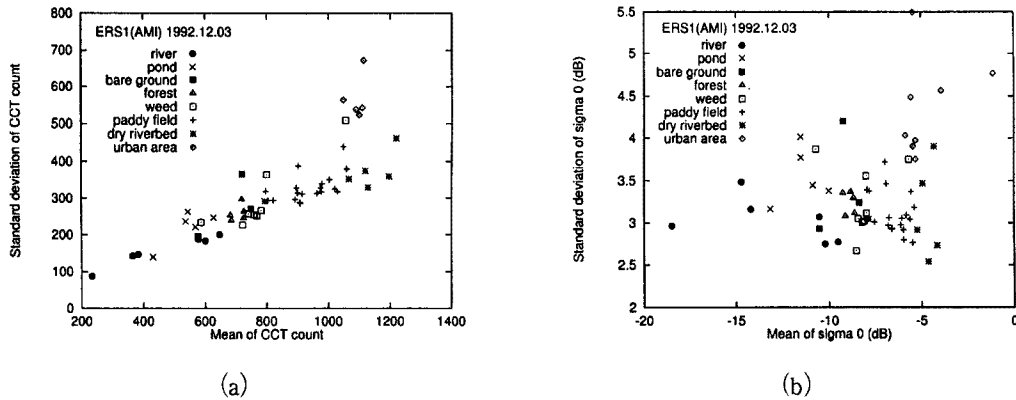


Fig. 6 (a) Mean value and (b) standard deviation for each land cover using the ERS-1 SAR image acquired on 3 Dec. 1992.

後方散乱に影響を及ぼす主要な物理的要因は、地表面の凹凸、地表面の平均的な傾き、表層付近の誘電率、導電率などである。 σ^0 から物理量を定量的に評価するためには、これらの要因がそれぞれどれくらいの割合で寄与しているのかを知っておく必要があるが、あらゆる地表面でのこれらの定量的な観測データはまだ集積されていない。Blanchard ら⁹⁾は、SEASAT による SAR データを用いて、耕作地において、誘電率より土壤水分量を推定する可能性を検討しており、その過程で、土壤水分の違いよりも畑地のラフネスや耕作物のちがいが σ^0 におよぼす影響の方が大きいことを指摘している。また、岩石などでは、誘電率の変化する範囲が小さく、粗さが σ^0 に寄与する割合が圧倒的に大きいことが指摘されている¹⁰⁾。Ulaby ら¹¹⁾は、土壌面において、 σ^0 に及ぼす土壤水分と粗度の影響をマイクロ波散乱計を用いた地上実験で詳細に検討している。その結果によると、入射角 10° 、周波数 4.7GHz のとき σ^0 はほとんど土壤水分の値のみに依存するのに対し、入射角・周波数が大きくなると地表面の粗さにも依存してくることを指摘している。これらのことを考えると、あらゆる地表面を対象とした場合には、JERS-1 の SAR 画像はまず地表面の凹凸(粗さ)をもとに理解することが妥当だろう。

川や池などの水域の表面は滑らかなので、鏡面反射が卓越し後方散乱が小さく、裸地、水田(刈り入れ後)、草地、河原(砂利)、森林、市街地と地表面の粗さが大きくなるにつれて平均値が大きくなり、また表面の粗さが大きくなるにつれて散乱波の方向にばらつきが出るため、平均値とともに標準偏差も大きくなると考えられる。

3.2 ERS-1 による土地被覆別の SAR データの特性

Fig. 6(a)(b), Fig. 7(a)(b) は、ERS-1 SAR の 12 月撮影データと 3 月撮影データについて、上述と同様の作業を行なった結果である。これらの図から CCT 値に関してわかることを列挙すると

- 平均値は、水域(河道流水部と池)・裸地・森林・草地・水田・河原(砂利)・市街地の順に大きくなる。
- 標準偏差も平均値と同様の順序で大きくなる。
- 河道流水部の平均値は、12 月のデータは 3 月のデータよりも大きな値を示す領域もあるが、いずれも他の領域の平均値よりも小さな値を示す。
- 河道流水部以外は 12 月と 3 月のデータに違いはない。

等である。また、 σ^0 に関しては

- 平均値の大きさの順は CCT 値と変わらない。

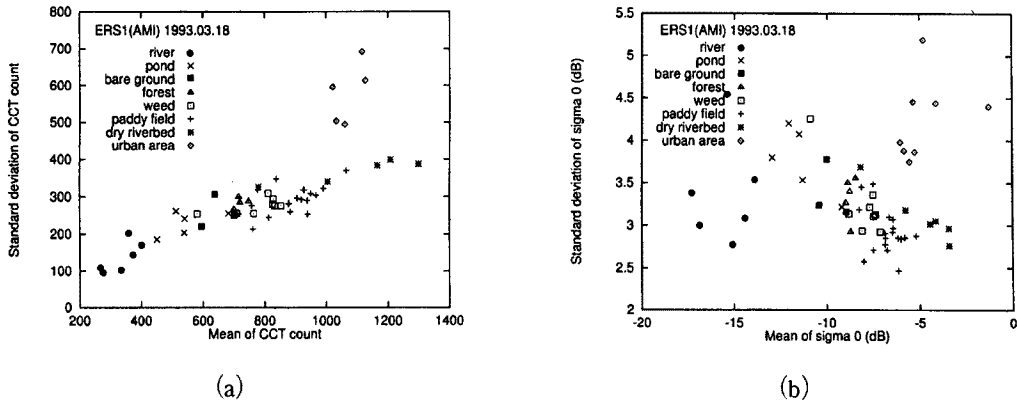


Fig. 7 (a) Mean value and (b) standard deviation for each land cover using the ERS-1 SAR image acquired on 18 Mar. 1993.

• 標準偏差については、平均値の小さい領域が標準偏差も小さいとは言えなくなる。ということがわかり、ERS-1 SAR データも土地被覆と関連を持つことがわかる。あらゆる土地被覆を考えた場合は、やはり地表面の粗さによって SAR 画像を理解することが妥当だろう。

3.3 JERS-1 と ERS-1 のデータの特性の比較

Fig. 5(a), Fig. 6(a) によって JERS-1 と ERS-1 を比べると、水田と森林の分布の違いが顕著であることがわかる。ERS-1 では水田の平均値が森林の平均値よりも大きく、JERS-1 では逆に小さい。これは、従来の研究でも示されているように、森林域において、散乱の仕方が波長によって異なる結果が現れたと考えることができる。すなわち、JERS-1 の SAR は L バンドであり、森林を透過して幹や地面から大きな後方散乱を受けるが、一方、ERS-1 の SAR は C バンドであり森林表面や表面近くで散乱するために後方散乱成分が小さくなったためと説明することができる。植生域では SAR 画像を理解するために、散乱のメカニズムを念頭においておく必要がある。

次に、JERS-1 と ERS-1 の平均値と標準偏差の値を同一のグラフ上で比較した。Fig. 8(a)(b), Fig. 9(a)(b) は、それぞれ CCT 値と σ^0 に関して平均値と標準偏差を比較した図であり、各図とも JERS-1 の値を縦軸に、ERS-1 の値を横軸にとっている。 σ^0 に関して、Fig. 8(b) を見ると、同じ土地被覆であっても、その平均値は ERS-1 の方が JERS-1 よりも、河道流水部をのぞいて大きくかつばらつき、Fig. 9(b) から、同じ被覆でも ERS-1 の標準偏差はさまざまな値をとる傾向にあることがわかる。また、水田を除いて一領域内の分散も ERS-1 の方が大きい。これらから、ERS-1 は同じ被覆であっても、それ以外の何らかの影響を感知しやすいと言える。

Ulaby ら¹²⁾ は、植生面において、地上でマイクロ波散乱計を用いて入射角・波長と後方散乱断面積の関係を調査しており、それによると、入射角が小さいほど、また入射角 10° 以上において波長が短いほど後方散乱断面積が大きくなるという結果を得ている。ERS-1 は JERS-1 よりも入射角が小さく、かつ、波長も短く、Ulaby らが得たのと同じ結果がここでも見られる。

3.4 SAR 画像の判読性

地被を判読する場合は、CCT 値のまま SAR データを利用する方がコントラストが大きく有利である。Fig. 10(a)(b) は、土地被覆ごとの各領域の CCT 値の平均値とその上下に一標準偏差分の幅を示したもので

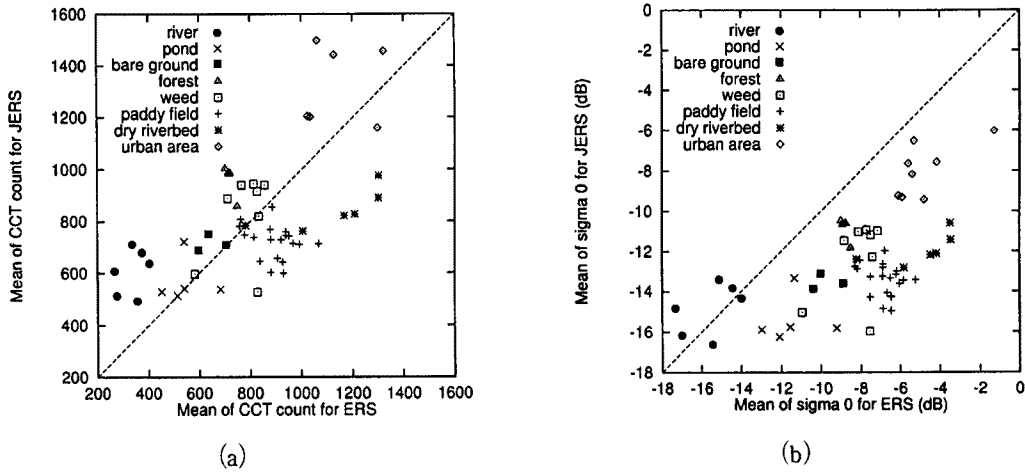


Fig. 8 (a) Comparison of the mean values of CCT values for patches between JERS-1 SAR image acquired on 19 Oct. 1992 and ERS-1 SAR image acquired on 3 Dec. 1992. (b) Comparison of the mean values of σ^0 for patches between JERS-1 SAR image acquired on 19 Oct. 1992 and ERS-1 SAR image acquired on 3 Dec. 1992.

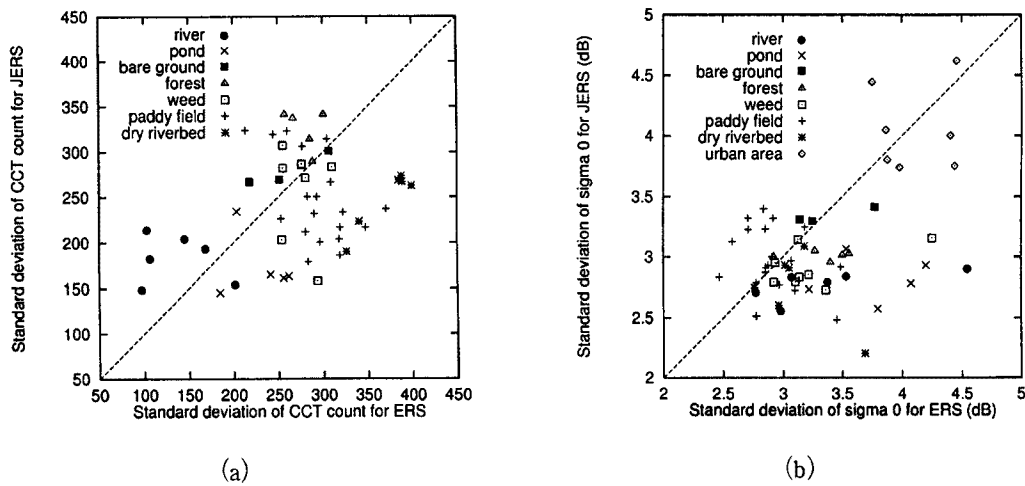


Fig. 9 (a) Comparison of the standard deviations of CCT values for patches between JERS-1 SAR image acquired on 19 Oct. 1992 and ERS-1 SAR image acquired on 3 Dec. 1992. (b) Comparison of the standard deviations of σ^0 for patches between JERS-1 SAR image acquired on 19 Oct. 1992 and ERS-1 SAR image acquired on 3 Dec. 1992.

あり、(a)はJERS-1から、(b)はERS-1から得た図である。図から明かなように、土地被覆が違ってもCCT値の分布にかなり重なる部分が見られ、それぞれを判別することは困難であることがわかる。

しかし、水域だけは鏡面反射が卓越するためその他の土地被覆と比較的区別をつけやすい。特にERS-1の流水部分のCCT値は他の被覆よりもかなり小さい値をとっていることがわかる。しかも流水部と隣接する河原(dry riverbed)のCCT値がかなり大きい値をとるため、水域を抽出しようとする場合にはERS-1の方がJERS-1よりも有利であることがわかる。

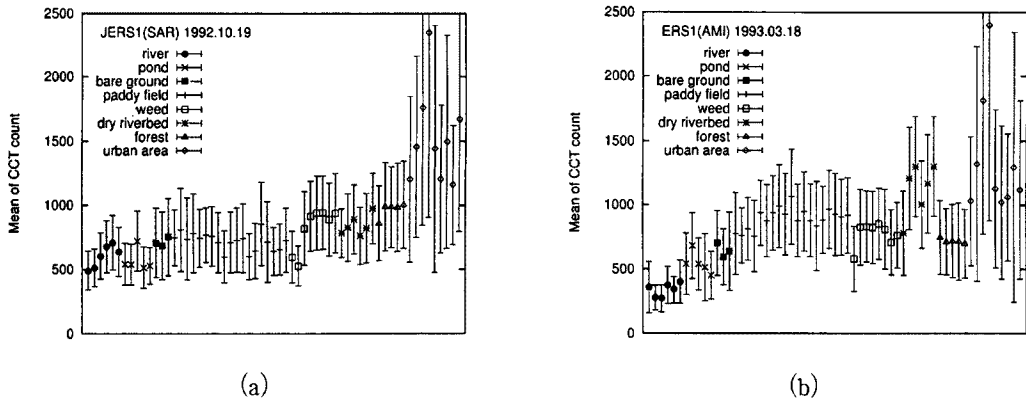


Fig. 10 Mean values and standard deviations of CCT values for patches of various land cover by use of (a) JERS-1 and (b) ERS-1.

3.5 まとめ

本章では、SAR データと地表面被覆の関係を明らかにするために、土地被覆別に JERS-1 と ERS-1 の SAR データの特性を調査した。得られた知見を以下にまとめておく。

- JERS-1 の CCT 値および σ^0 の平均値は、水域・裸地・水田・草地や河原・森林・市街地の順に大きくなる。
- ERS-1 の CCT 値および σ^0 の平均値は、水域・裸地・森林・草地・水田・河原・市街地の順に大きくなる。
- CCT 値においては、JERS-1, ERS-1 ともに平均値とともに標準偏差も大きくなるが、 σ^0 はそうとは限らない。
- JERS-1, ERS-1 ともに、後方散乱係数は表面の粗さに大きく依存すると考えてよさそうである。しかし、植生域では波長によって散乱のメカニズムが異なることを考慮する必要がある。
- 水域では鏡面反射が卓越し、その他の土地被覆と区別が付きやすい。

4. SAR データによる空気力学的粗度推定の試み

後方散乱係数 σ^0 の値は土地被覆ごとに傾向を持つことがわかった。その傾向は、3. での結果から、第一近似的に地表面の粗さで説明できると考えてもよさそうである。一方、空気力学的粗度も地表面の粗さと関係があり、地表面の幾何学的形状から空気力学的粗度を推定する方法がこれまでにいくつか提案されている¹³⁾。

空気力学的粗度は、本来、風速の鉛直プロファイルから決定される、地表面の凹凸を気象学的に表現した高さを表すもので、地表面でのフラックス推定に重要な役割を果たす。しかし、風速鉛直プロファイルの観測はどこでも簡単にできるわけではないため、上述のように地表面の幾何学的形状から空気力学的粗度を推定する方法が提案されてきた。しかし、この方法によっても広域の粗度の空間分布を得るのは容易ではない。

そこで、空気力学的粗度の空間的分布をリモートセンシングデータを用いて推定する方法として、後方散乱係数から空気力学的粗度を推定することを試みる。広域での粗度の空間的分布を得ることができれば、広域での地表面フラックス推定に資することができ、その効果は大きい。

4.1 SAR データを用いた地表面粗度の推定

Table 4 は、竹内・近藤¹⁴⁾、安田¹⁵⁾ を基に作成した、さまざまな地表面における空気力学的粗度 z_0 を示した表である。ここでは、各土地被覆の σ^0 の平均値と Table 4 に示される空気力学的粗度の対応を調べた。Fig. 11 は JERS-1 の σ^0 と z_0 の対応関係、Fig. 12 は ERS-1 の σ^0 と z_0 の対応関係を示した図である。図中の water, bare ground, paddy field, weed, forest, urban area はそれぞれ Table 4 の水面、裸地、草地 (草丈 0.02~0.1m)、草地 (草丈 0.25~1.0m)、森林、大都市に対応させた。水田 (paddy field) は刈り取り後のわらをした状態だったので、草地と考えた。これらの図から、 σ^0 と z_0 の対応関係は JERS-1 の方がよいと言える。ERS-1 では、森林域での σ^0 が小さいために対応関係が悪くなっている。

そこで JERS-1 の SAR データより z_0 を推定するために次の関係式

$$\log_{10} z_0 = c\sqrt{\sigma^0 + d} + e \dots\dots\dots (2)$$

を仮定し、Table 4 の z_0 の値の幅を重みと考えると、重み付き最小二乗法により回帰式を求めた。市街地の粗度については幅がないので便宜的に対数で上下に 0.1 の大きさの幅を持つとした。得られた回帰式は

$$\log_{10} z_0 = 2.105\sqrt{\sigma^0 + 14.94} - 5.063 \quad (\sigma^0 \geq -14.94) \dots\dots\dots (3)$$

であり、Fig. 13 はその回帰式を示したものである。

Table 4 Example of roughness parameter for various land cover.

Surface description	z_0 (m)
大都市 (東京都市域)	2.0
森林	1.0~6.0
果樹園	0.5~1.0
農地	0.04~0.2
草地 (草丈 0.25~1.0m)	0.04~0.1
草地 (草丈 0.02~0.1m)	0.003~0.01
裸地	0.001~0.01
砂, 砂漠	0.0003
雪面	$(0.5\sim 10) \times 10^{-4}$
水面	$(0.1\sim 10) \times 10^{-5}$

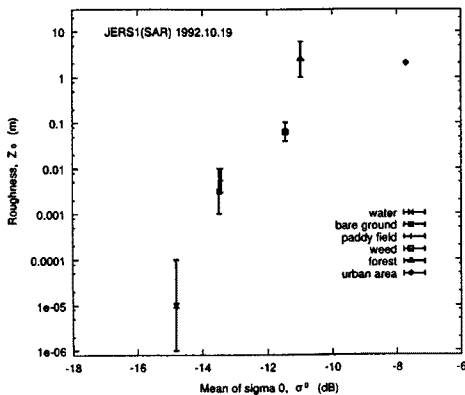


Fig. 11 Relationship between backscattering coefficients obtained from JERS-1 SAR image and aerodynamic roughness parameter.

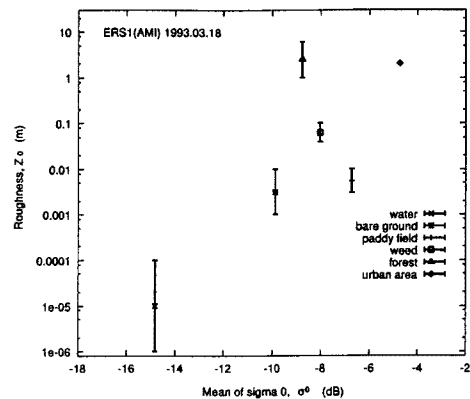


Fig. 12 Relationship between backscattering coefficients obtained from ERS-1 SAR image and aerodynamic roughness parameter.

4.2 推定結果

Fig. 14 は JERS-1 の原画像 (Fig. 1) に 5×5 の平均化フィルターをかけたのち、CCT 値から σ^0 を介して z_0 への変換を行なった結果を表示したものである。Fig. 2 に示した地形図と対比すると、水域、裸地、草面はほぼ妥当な値となっているが、市街地では z_0 が 10m 以上となる箇所が表れ、過大に評価している。

今回、設定した推定式は単に σ^0 と z_0 を回帰式をもとに結びつけただけであるため、推定結果は必ずしも良いとは言えないが、今後、両者の関係を物理的にモデル化することで、さらに良い推定方式を提案できる可能性を示せたと考えている。

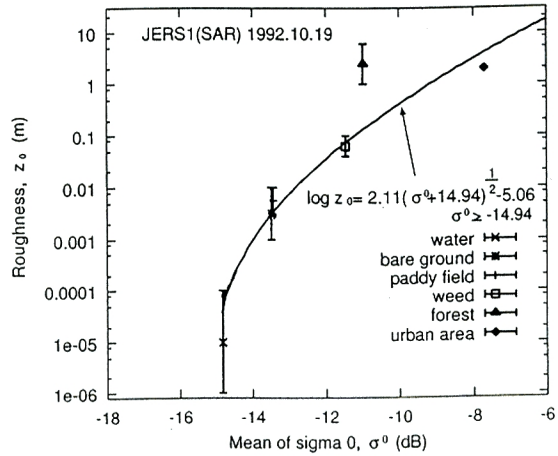


Fig. 13 Regression curve between aerodynamic roughness parameter and backscattering coefficients obtained from JERS-1 SAR image.

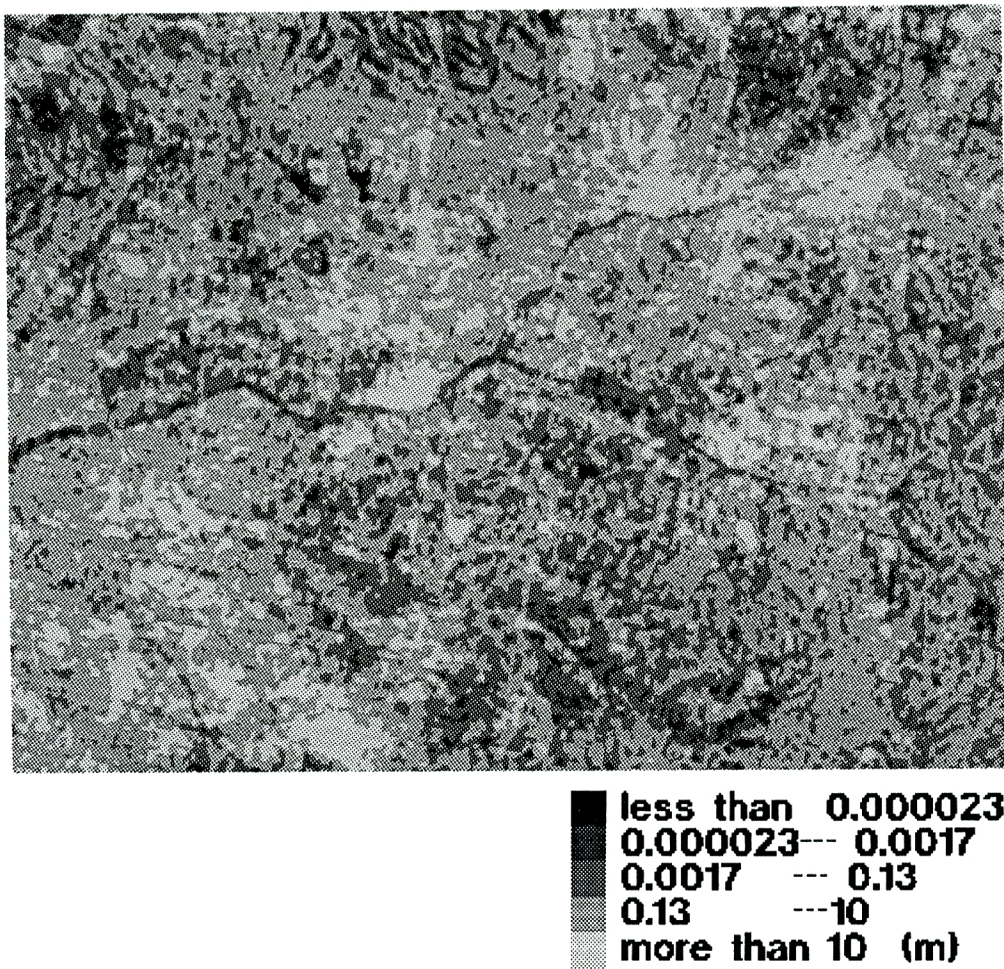


Fig. 14 Estimated spatial distribution of aerodynamic roughness parameter around Seto City.

5. 結 論

流域地表面における地球観測衛星 JERS-1, ERS-1 の SAR データを土地被覆別に解析し、それらのデータを比較することによって、それぞれの特性を明らかにした。その結果をもとに、後方散乱係数から空気力学的粗度を推定することを試みた。その結果、

- SAR データによって、水域(河道網)を抽出することは可能であり、この場合は ERS-1 SAR が JERS-1 SAR よりも望ましいこと。
- SAR 画像は地表面の粗さでだいたい説明がつくこと。
- 後方散乱係数と空気力学的粗度の間には関係があり、後方散乱係数をもとに空気力学的粗度を推定できる可能性があること。

を示した。本研究の結果をもとに、今後、衛星との地上同期観測も含めて、後方散乱係数から空気力学的粗度を推定する方法をさらに検討していく予定である。

なお、本研究は JERS-1, ERS-1 システム検証計画 (J-68・E-41：主任研究者・京都大学・宝 馨) に参加して得られた成果の一部である。衛星データを提供して頂いた宇宙開発事業団、補助を得た河上記念財団に記して謝意を表する。また、画像処理、データ処理等で多大な協力を得た大学院生、栖原聖二君 (現在、日本航空) に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 三浦一彦・沖 大幹・小池雅洋・虫明功臣：マイクロ波散乱計土壤水分計測に影響を及ぼす各因子の検討, 水文・水資源学会 1991 年研究発表会要旨集, pp.288-291, 1991.
- 2) 淵上吾郎・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壤水分情報抽出, 水文・水資源学会 1993 年研究発表会要旨集, pp.36-37, 1993.
- 3) 福本昌人・小川茂男・斉藤元也：表層土壤水分量を対象とした SAR データの検証, 水文・水資源学会 1993 年研究発表会要旨集, pp.30-31, 1993.
- 4) 小池俊雄・後藤巖・長谷川泉・佐藤繁雄：積雪と土壌におけるマイクロ波誘電特性の比較, 水文・水資源学会 1993 年研究発表会要旨集, pp.186-187, 1993.
- 5) 近藤昭彦・上林徳久・岡田敏美・石森繁樹・藤井昭二：ERS1 合成開口レーダーによる積雪状況の把握, 日本リモートセンシング学会第13回学術講演会論文集, pp.21-24, 1992.
- 6) 宝馨・立川康人他：矢田川航空機実験及び同期地上観測実験について, 水文・水資源学会誌, vol. 6, No. 1, pp.71-75, 1993.
- 7) NASDA EOC : User's Guide to NASDA's SAR products, HE-930014, 1993.
- 8) Shimada, M. : 1993, 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.
- 9) Blanchard, B. J. and A. T. C. Chang : Estimation of Soil Moisture from SEASAT SAR Data, Water Resources Bulletin, vol.19, no.5, pp.803-810, 1983.
- 10) 資源観測解析センター：合成開口レーダ(SAR), 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ 5, 1992.
- 11) Ulaby, F. T., P. P. Batlivala : Optimum Radar Parameters for Mapping Soil Moisture, IEEE Trans. on Geosci. Electron., vol. GE-14(2), pp.81-93, 1976.
- 12) Ulaby, F., T., G. A. Bradley, and M.C. Dobson : Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture : Part II - Vegetation-Covered Soil, IEEE Trans. on

Geosci. Electron., vol. GE-17(2), pp.33-40, 1979.

- 13) Brutsuaert, W. : Evaporation into the Atmosphere, Kluwer Academic Publishers, pp.113-116, 1982.
- 14) 竹内清秀・近藤純正：大気科学講座 1，地表に近い大気，東京大学出版会，pp.20-21，1981.
- 15) 武田喬男・上田豊・安田延寿・藤吉康志：気象の教室 3，水の気象学，東京大学出版会，pp.135-145，1992.