

SAR データによる空気力学的粗度分布図 作成手法の改良

Improvement of a Method for Estimation of Aerodynamic Roughness Parameter
Using Synthetic Aperture Radar Data

立川康人¹・村木謙吾²・椎葉充晴³

Yasuto TACHIKAWA, Kengo MURAKI and Michiharu SHIIBA

¹正会員 博士 (工学) 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)

²正会員 工修 東京電力 (株) 神流川水力建設所 (〒 370-16 群馬県多野郡上野村勝山 212-1)

³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)

The backscattering coefficients observed by synthetic aperture radar (SAR) are influenced by surface geometric roughness obstacles. Using this attributes, spatial distributions of aerodynamic roughness parameter are estimated from the SAR images obtained by the Japanese Earth Resources Satellite (JERS-1). By the method, it is possible to make roughness maps which are very similar to roughness maps derived by the method proposed by Kondo & Yamazawa (1986) which uses the National Land Numerical Information.

Key Words : aerodynamic roughness parameter, SAR, remote sensing

1. はじめに

空気力学的粗度は、大気境界層内での地表面フラックスの推定値に影響を及ぼす重要な物理パラメータであり、本来、地上風速の鉛直プロファイルの観測値から定まる量である。したがって面的な粗度の分布を得ようとするとは様々な地点での風速の鉛直プロファイルの観測値を必要とするが、地球上のあらゆる地表面を対象としてこのような観測を展開することは非現実的である。そのため、地表面の凹凸や土地被覆等の特性と空気力学的粗度との間に関係を見い出してそれらの特性から空気力学的粗度を推定する研究が数多くなされてきた。なかでも、近藤ら^{1),2)}は国土数値情報 (1/10 細分区画土地利用データ) を用いて地表面の粗度を面的に求める手法を提案し、桑形・近藤^{3),4)}はそれを用いて全国のアメダス地点での空気力学的粗度を推定した。この手法は広域の粗度分布図を得るという点で非常に魅力的な方法であるが、国土数値情報は日本国内のみを対象としたデータセットであるため、この手法を日本以外の地域に展開することはできない。

そこで筆者らは、土地被覆一般を対象とした場合にレーダによる映像が地表面の粗さによく反応するという性質⁵⁾を利用して、SAR データから空気力学的粗度の空間分布図を作成することを試みた⁶⁾。その結果、JERS-1 による SAR データから得られた粗度分布図と国土数値情報から得られた粗度分布図との空間的な変化パター

ンがよく対応することを示した。ただし、この手法では、市街値や集落など大きな粗度を示す領域では両者の粗度は一致するものの、水面・裸地・草地などの小さな粗度を示す領域および森林域で SAR データから得られる粗度が国土数値情報による粗度よりも小さな値を示すという結果であった。

そこで本論では、国土数値情報から得られる粗度分布図を基本として、その粗度分布により近い分布を示すように SAR データから粗度を推定する手法を改良しその性能を検証した。以下、まず従来提案した手法の概略を述べる。次に改良した手法を示し、検証領域に適用してその有効性を示す。

2. SAR データから得られる空気力学的粗度分布図とその評価

(1) 空気力学的粗度の空間分布図の作成手法

地表付近の風速の鉛直分布は、大気状態が中立のとき

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

という対数分布で表される。ここで $u(z)$ は高さ z における風速、 u_* は摩擦速度、 κ はカルマン定数、 z_0 は空気力学的粗度である。様々な土地被覆が混在する一般の地表面では、対象とする風速の高度によってその風速に影響する領域の範囲は異なり、それによって粗度も異なるものと考えられる。この場合、影響範囲内

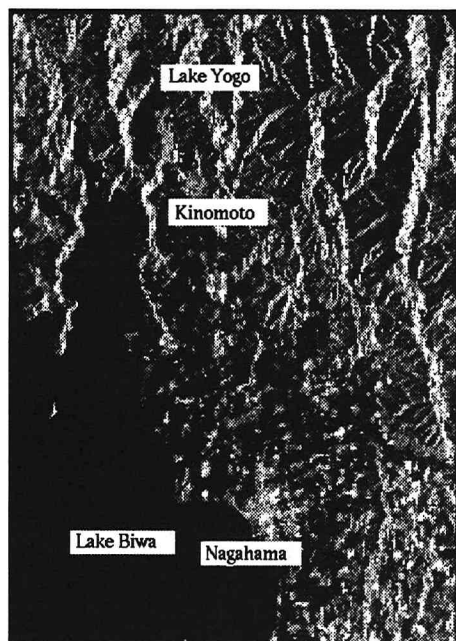


図-1 空気力学的粗度の推定に用いた琵琶湖北東部の JERS-1 SAR 画像

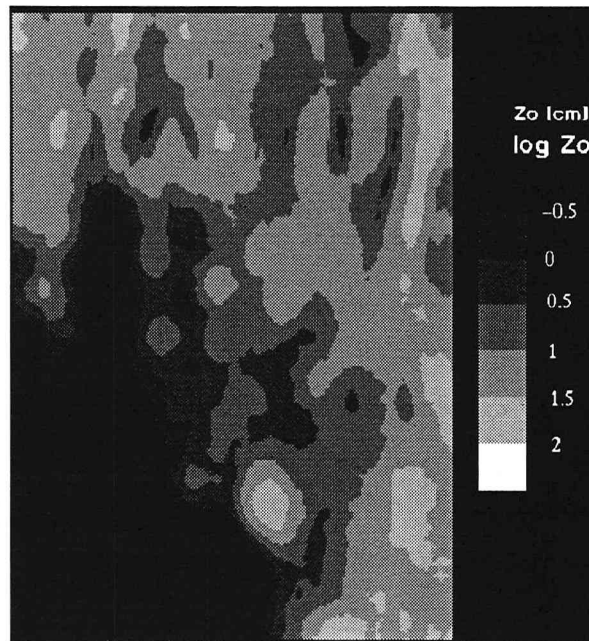


図-2 高さ 10m の風を対象とした場合の JERS-1 SAR データによる粗度分布図 (従来の手法による)

の平均的な粗度を推定することが重要となる。

近藤ら^{1),2)}は、ある地点の高さ z m における風速は、その地点を中心とする半径 $100z$ m の円の内部、風向を考慮する場合は風上に向かって開いた半径 $100z$ m で中心角が 45 度の扇型の内部の土地利用に影響されると考え、影響範囲内にある土地利用状況から粗度を求める以下の実験式を提案した。

$$z_0[\text{cm}] = 40a + 125b + 200c + 110d - 30 \quad (2)$$

ここで a, b, c, d は影響範囲内の土地利用状況によって定まる値であり、国土数値情報 (1/10 細分区分土地利用データ) を用いて定められる。

一方、筆者ら⁶⁾は、近藤らにならい、対象地点の粗度はその地点を中心とする半径 $100z$ m の円の内部の衛星観測値 (デジタルカウント値) の影響を受けるものと考えた。この円の内部にある衛星観測値を平均して、得られた平均値 M を次式を用いて粗度 z_0 に変換した。

$$\log z_0 = C_1 \log(M - C_2) + C_3 \quad (3)$$

ここで $C_1 = 3.8$, $C_2 = 435$, $C_3 = -9.2$ であり、粗度の実測値および文献等に記されている値と適合するように決定した定数である。また z_0 の単位は cm である。なお、 z_0 の値は 0.0001cm から 1000cm の間の値をとるものとし、(3) 式によって得られる z_0 の値がこの範囲を越える場合には 0.0001cm または 1000cm の値をとるものとした。SAR データの画素サイズは 12.5m×12.5m であり、画素ごとにこの作業を行なって粗度分布図を作成することになる。

(2) JERS-1SAR 及び国土数値情報による空気力学的粗度分布図の比較

1995 年 10 月 26 日に滋賀県琵琶湖北東部を対象に取得された JERS-1 SAR 画像を用いて粗度分布図を作成した。図-1 は粗度分布図の作成に用いた SAR 画像であり、東経 136 度 7 分から 136 度 22 分、北緯 35 度 22 分から北緯 35 度 35 分の範囲の約 22km × 26km の領域を対象とした。図-2 はこれまでに著者らが提案した手法によって得た粗度分布図である。後で示す同一地域の国土数値情報による粗度分布図 図-9 と比較すると、分布パターンは一致しているが SAR データによる粗度分布の方が小さな値を示しており、特に粗度の小さな領域でその傾向が顕著である。

同一地点でのそれぞれの手法による粗度の値を 図-3 及び 図-4 に示す。これらはそれぞれ高さ 5m 及び 10m の風を対象とした場合の粗度の値を比較したものであり、横軸に JERS-1 SAR データを用いて推定した粗度の対数値を、縦軸に国土数値情報を用いて推定した粗度の対数値を取っている。ほとんどの点が左上半分に位置しており、全体的に SAR データを用いて得た空気力学的粗度の方が小さな値を示していることがわかる。

両者の違いの度合 D を次式で算定した。

$$D = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\log_{10}(z_{0\text{SAR}}(k)) - \log_{10}(z_{0\text{KS}}(k))| \quad (4)$$

ここで、 n は対象領域内の画素数、 $z_{0\text{SAR}}$ は JERS-1 SAR データを用いて計算した粗度の値、 $z_{0\text{KS}}$ は国土数値情報を用いて計算した粗度の値である。 D は高さ 5m の風を対象とした場合は 0.785、高さ 10m の風を

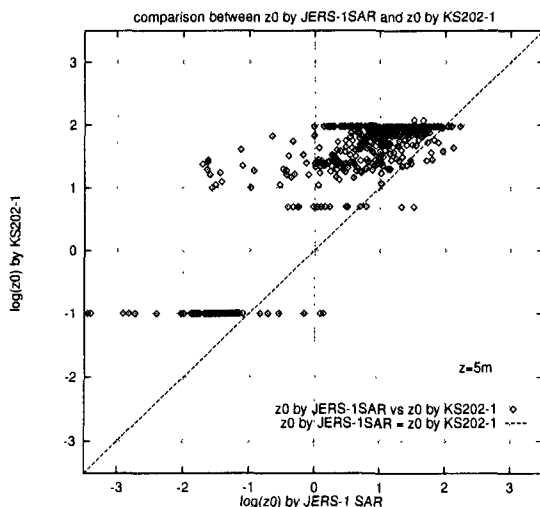


図-3 高さ 5m の風を対象とした場合のそれぞれの方法による粗度の比較

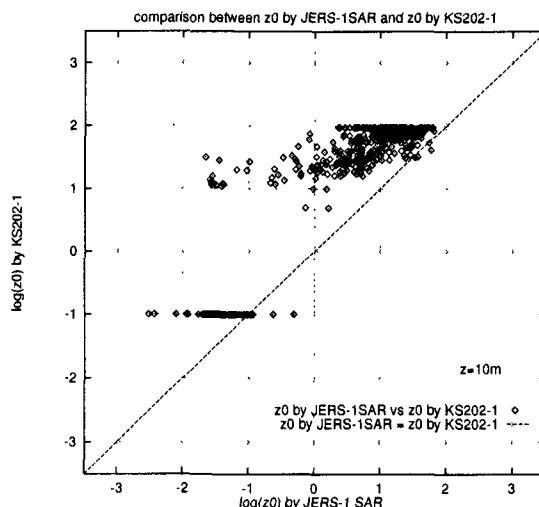


図-4 高さ 10m の風を対象とした場合のそれぞれの方法による粗度の比較

表-1 地表面被覆と空気力学的粗度および衛星観測値の対応

地表面被覆	空気力学的粗度 [cm]	衛星観測値
水面	0.1	400
裸地	0.1 ~ 1.0	450
草地 (低)	0.3 ~ 1.0	600
草地 (高)	4.0 ~ 10.0	800
小都市	60	1100
中都市	100	2700
大都市	200	5000
森林	50 ~ 100	1000

対象とした場合は 0.792 となった。両者の比の対数が平均的に約 0.78, つまり, 6 倍近く SAR から得た粗度は小さな値を示していることがわかる。

3. SAR データによる空気力学的粗度推定手法の改良

(1) SAR データによる粗度推定式の改良

これまでに提案した SAR データによる粗度推定手法は, 水面・裸地・草地域および森林域において国土数値情報による粗度よりも小さな値を示すという結果であった。そこで, 国土数値情報から推定される空気力学的粗度に近い値が得られるように, 衛星観測値から粗度への変換式に改良を加えた。表-1 は変換式を決定するときに用いた粗度と衛星観測値の対応を示したものであり, 水面以外の粗度の値は文献⁷⁾を参考にした。

まず, 森林域の粗度をより大きく出力するように, 影響範囲内の衛星観測値の平均値 M が 1100 未満の範囲では表-1 に示される値のうち, 水面・裸地・草地・森林の値のみを用いて荷重最小自乗法により (2) 式の係数を決定し直した。係数は以下のように求まった。

$$C_1 = 3.57, \quad C_2 = 455, \quad C_3 = -8.05$$

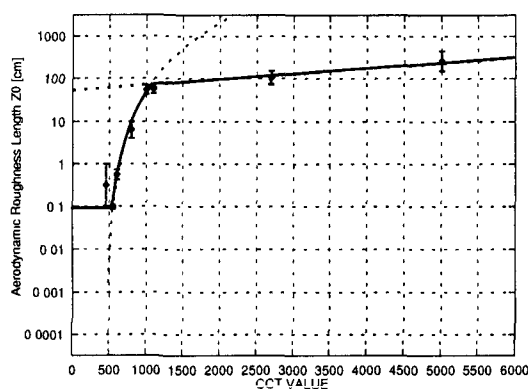


図-5 空気力学的粗度と JERS-1 SAR の衛星観測値との関係

また, M の値が 1100 以上の範囲では次式を当てはめた。

$$\log_{10} z_0 = 1.10 \times 10^{-4} M + 1.85$$

なお, 国土数値情報から粗度を推定する方式は 0.1cm 以下の粗度は出力しない。粗度を 0.1cm とするのは影響範囲内で水域が 9 割以上となる場合である。ここでもそれにならない, 影響範囲内の衛星観測値の平均値が 500 以下の場合はほぼ水域または裸地と考えられるので粗度を 0.1cm とした。以上の変換式をまとめて示すと次のようである。

$$\left. \begin{aligned} &M < 500 \text{ のとき} \\ &z_0 = 0.1 \\ &500 \leq M < 1100 \text{ のとき} \\ &\log_{10} z_0 = 3.57 \log_{10}(M - 455) - 8.05 \\ &M \geq 1100 \text{ のとき} \\ &\log_{10} z_0 = 1.10 \times 10^{-4} M + 1.85 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

z_0 の単位は cm である。これらを図示したものを 図-5 に示す。

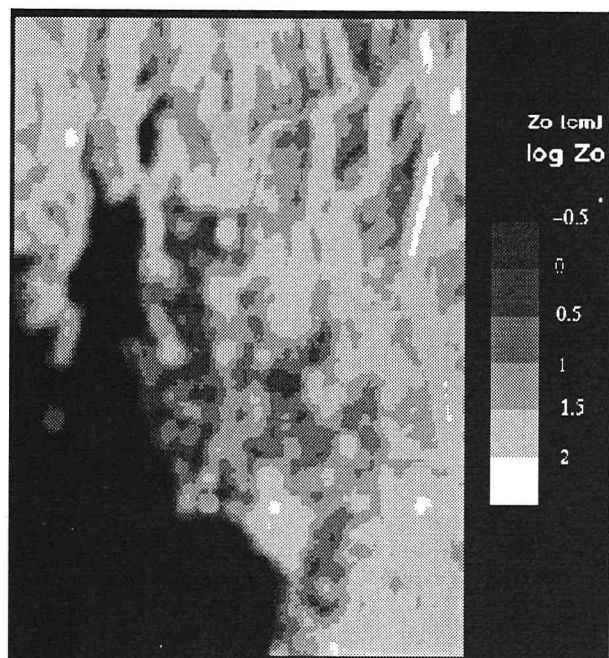


図-6 高さ 5m の風を対象とした場合の JERS-1 SAR データによる粗度分布図

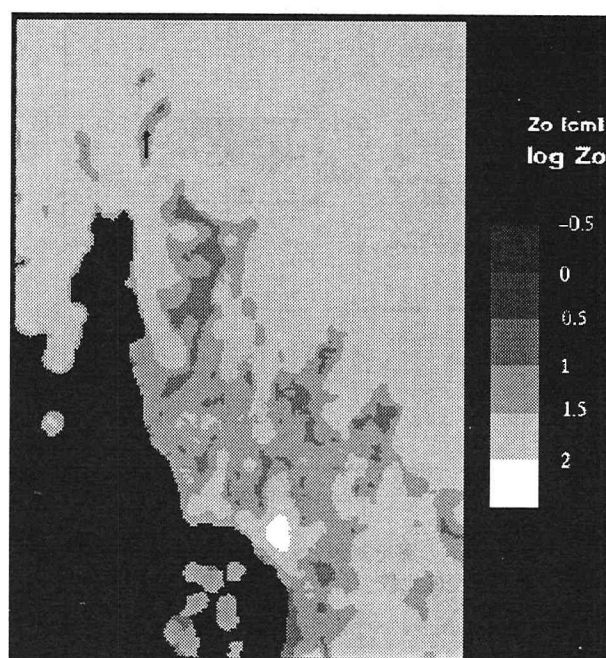


図-7 高さ 5m の風を対象とした場合の国土数値情報による粗度分布図

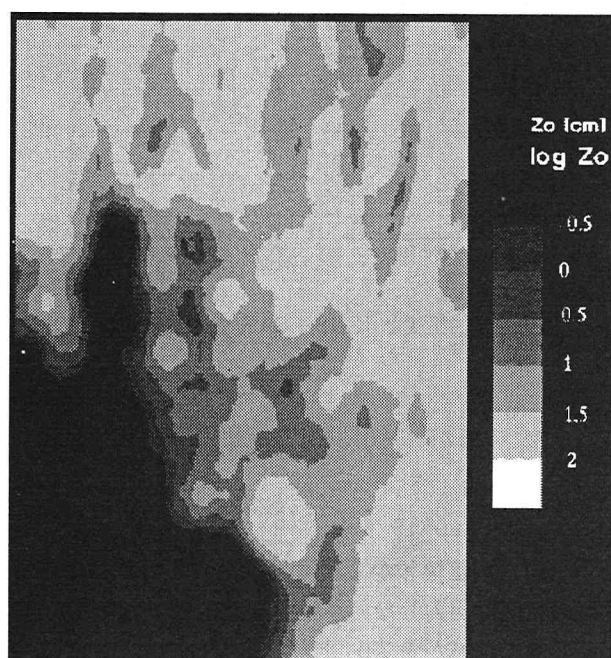


図-8 高さ 10m の風を対象とした場合の JERS-1 SAR データによる粗度分布図

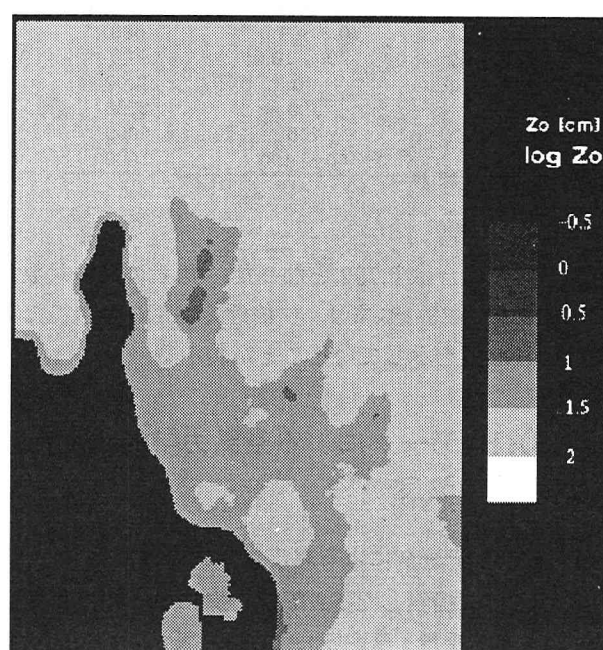


図-9 高さ 10m の風を対象とした場合の国土数値情報による粗度分布図

(2) 改良した方法による粗度の推定結果

改良した実験式を用いて 図-1 の JERS-1 SAR データから算定した粗度分布図を 図-6, 図-8 に示す。これらはそれぞれ高度 5m, 10m の風を対象とした場合の粗度分布図である。高度 10m の風を対象とした粗度分布図をみると、国土数値情報による粗度分布図(図-9)と分布パターンも値自体も近い値を示しており、従来の手法で得た粗度分布図(図-2)よりも良い結果を示していることがわかる。同一地点で粗度の値を比較した

結果を 図-10, 図-11 に示す。両者の粗度の相違を(4)式で計算した結果は、高度 5m, 10m を対象とした場合でそれぞれ 0.367, 0.341 であった。両者の粗度の比は従来の方法で 6 倍程度あったのが 2 倍程度にまで縮まった。

ただし、SAR データから推定した粗度分布図は山地域(多くの場合森林域)において、国土数値情報から推定した粗度分布図よりも大きなばらつきを示すことがわかる。これは SAR データは斜面の傾斜の影響を強

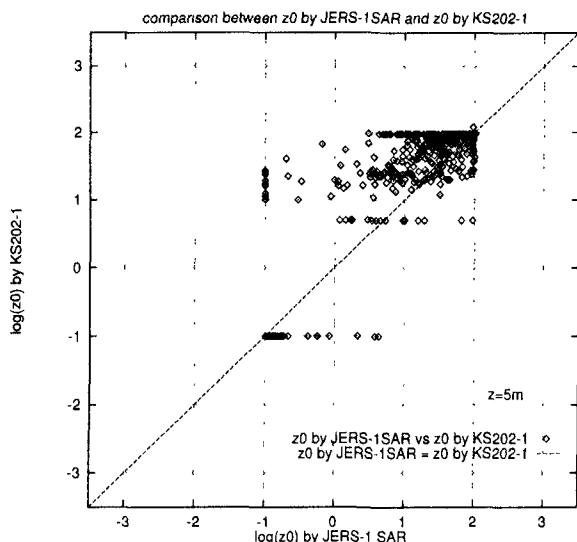


図-10 高さ 5m の風を対象とした場合のそれぞれの方法による粗度の比較

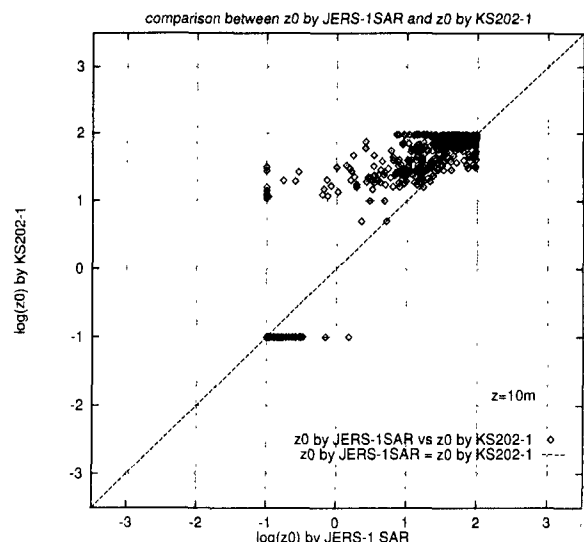


図-11 高さ 10m の風を対象とした場合のそれぞれの方法による粗度の比較

く受けるため、山地域では斜面の傾斜の度合や向きによって局所的に SAR データの値が大きく変化するためである。標高データを利用して斜面の効果を補正することも考えられるが、それには数十メートル程度の分解能を持つ標高データが必要となろう。地球上の様々な領域ではそのような高分解能のデータは存在しないので、そのような領域で SAR データを用いて粗度分布図を作成する場合は、傾斜の少ない領域に適用するか、または対象とする風の高さをある程度高くして衛星観測値を平均化する領域を広げることにより、傾斜の効果を減ずる必要がある。

(3) 改良した方法の他領域への適用

改良した実験式が他の領域にも適用できるかどうかを彦根市周辺を対象領域として調査した。対象とする領域は東経 136 度 7 分から 136 度 20 分、北緯 35 度 12 分から北緯 35 度 22 分の範囲の約 21km × 19km の領域である。衛星データは 1992 年 10 月 21 日取得の JERS-1 SAR データを用いた。

図-12 及び 図-14 は高さ 5m 及び 10m の風を対象とした場合の JERS-1 SAR データによる粗度分布図であり、図-13 及び 図-15 は高さ 5m 及び 10m の風を対象とした場合の国土数値情報による粗度分布図である。図-12 及び 図-14 の作成で利用した SAR データにはノイズが含まれていたために、粗度分布図にも琵琶湖面でおかしな部分が見られる。しかし、それ以外は図-13 及び 図-15 と良く対応した分布図となっている。両者の手法による粗度の相違を (4) 式によって計算した結果は、高さ 5m, 10m の場合でそれぞれ 0.271, 0.263 であり、琵琶湖北東部を対象とした場合よりもよい結果を示した。

我が国では森林が傾斜のある斜面上に存在する場合が大半であり、森林域の SAR の観測値は地形の効果を含んでしまう。彦根付近における抽出結果が琵琶湖北東部における抽出結果よりも国土数値情報による抽出結果に近い値となったのは、対象地域が平坦な領域であったためと考えられる。

4. まとめ

国土数値情報から作成される粗度分布図と近い結果を出力するように、JERS-1 SAR データを用いて粗度分布図を作成するための変換式を改良した。その結果、従来の方法では 6 倍程度、両者の粗度の値に差があったのが 2 倍程度にまで縮めることができた。風速の差となって効いてくるのは両者の粗度の比の対数を取った値であり、この値は 0.8 から 0.3 程度となった。また、特に平坦な領域においてよい結果を示すことがわかった。

ただし、SAR データは斜面の傾斜の影響を強く受けるため、傾斜のある山地領域に広がる森林域での粗度の推定には注意を要する。標高データを利用して斜面の効果を補正することも考えられるが、それには数十メートル程度の分解能を持つ標高データが必要となろう。地球上の様々な領域ではそのような高分解能のデータは存在しないので、そのような領域で SAR データを用いて粗度分布図を作成する場合は、傾斜の少ない領域に適用するか、または対象とする風の高さをある程度高くして衛星観測値を空間平均する領域を広げることにより、局所的な傾斜の効果を減ずる必要があると考える。

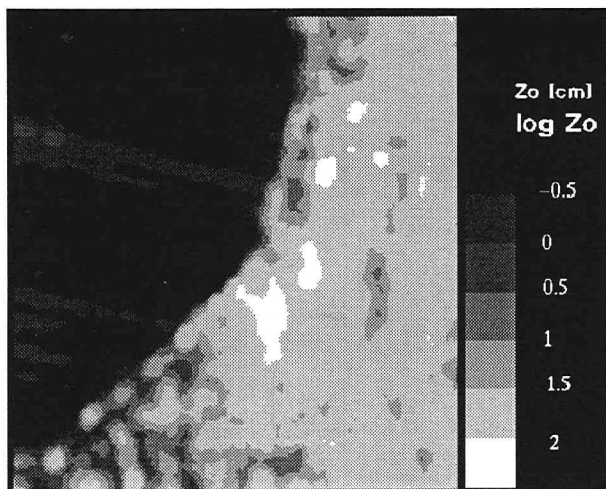


図-12 高さ 5m の風を対象とした場合の JERS-1 SAR データによる粗度分布図

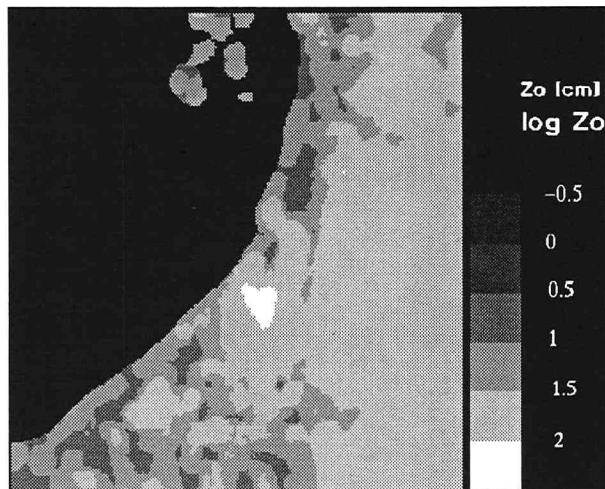


図-13 高さ 5m の風を対象とした場合の国土数値情報による粗度分布図

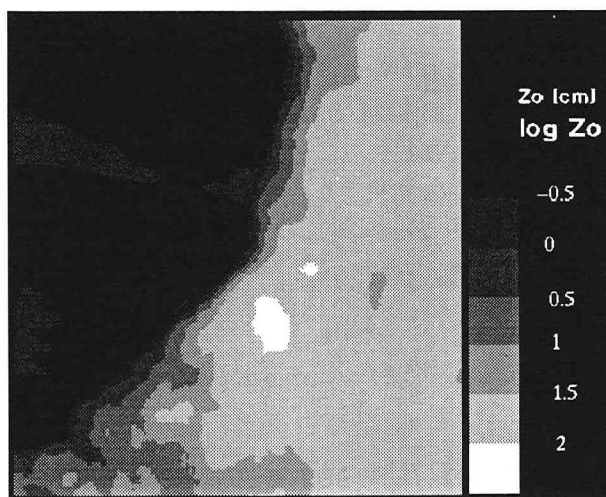


図-14 高さ 10m の風を対象とした場合の JERS-1 SAR データによる粗度分布図

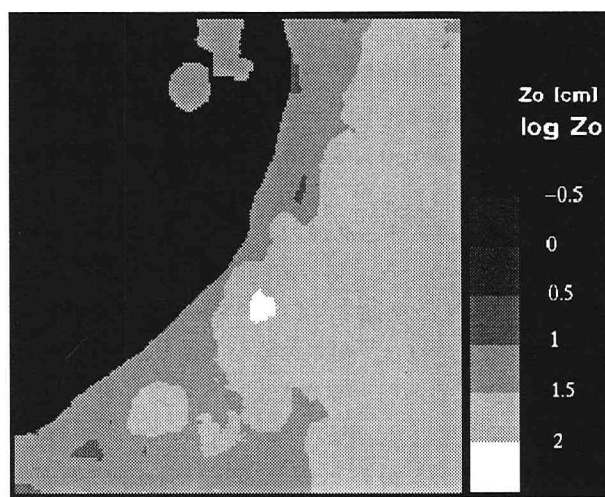


図-15 高さ 10m の風を対象とした場合の国土数値情報による粗度分布図

謝辞：本研究は文部省科学研究費重点領域研究「多様な地表面における水・熱収支の動態の研究（代表：小池俊雄（長岡技科大）」および科学研究費基盤研究（A）「琵琶湖流域の水・熱循環過程解明に向けた総合研究と衛星同期共同観測（代表：中北英一（京大）」による研究成果の一部である。なお、本研究で利用した JERS-1 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 H. Yamazawa : Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface, *Bound. Layer Meteor.*, **35**, pp. 331-348, 1986.

- 2) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，pp. 123-124, 1994.
- 3) 桑形恒男・近藤純正：東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定，*天気*, **37**, pp. 197-201, 1990.
- 4) 桑形恒男・近藤純正：西日本アメダス地点における地表面粗度の推定，*天気*, **38**, pp. 491-494, 1991.
- 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)電子通信学会，pp. 132-136, 1986.
- 6) 立川康人・椎葉充晴・原井真一・高埴琢馬：衛星搭載合成開口レーダデータによる空気力学的粗度推定の試み，*水文・水資源学会誌*, **10**(2), pp. 144-153, 1997.
- 7) 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. 140-141, 1992.

(1997. 9. 30 受付)