

Lバンド合成開口レーダを利用した積雪の深さと密度の推定

阿部 健太* 佐々木 正巳** 鈴木 勝裕**

Estimation of snow depth and density using the L-band SAR

Kenta ABE, Masami SASAKI and Masahiro SUZUKI

Abstract

Only using the data observed by the SAR, a new algorithm to estimate snow depth and density is proposed. Then, using snowpack parameters ordinarily observed in Hokkaido region, the effectiveness of the algorithm is theoretically examined. It used an advanced SAR with variable off-nadir angle for estimation of snow depth and density. The results of investigation showed that snow depth and density have been presumed correctly by changing an off-nadir angle.

1. はじめに

人工衛星から地球を観測するリモートセンシング技術は、短時間で広い領域を観測できることから、その応用が様々な分野において研究されている[1]。光に比べて波長が長いために積雪内部に浸透する性質を持つマイクロ波を利用した積雪観測もその一つである。特に、アクティブリモートセンサの一つである合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)は、マイクロ波を用いながらも光学センサと同等以上の高い地上分解能を得ることができることから、精度の高い積雪観測手段として期待されている。また、SARは同一目標に対して二度の観測を行った場合、二つの観測データの間に現れる位相差を精密に計測できるという特徴をもつ。

SARを利用して積雪を観測した場合、SARから送信されたマイクロ波は積雪中を伝搬することにより振幅と位相が変化する。位相の変化は、主に誘電体である積雪中をマイクロ波が伝搬する際の伝搬速度の変化や、大地が積雪で覆われている場合と積雪が無く大地が露出している場合において伝搬経路が異なることに起因する。

これまで国内外において行われてきた衛星搭載マイクロ波センサを利用した積雪観測に関する研究では、輝度温度や後方散乱係数など、センサで観測されるマイクロ波の量(振幅成分)から積雪のパラメータを推定しているのが大多数である。例えば、筆者らも過去にLバンドの衛星搭載SARで観測された後方散乱係数の変化から積雪のパラメータを推定する研究例を報告している[2]。Lバンドの衛星搭載SARの場合、積雪が濡れていれば積雪のパラメータの変化に伴い後方散乱係数も変化するため、その後方散乱係数から積雪のパラメータが推定可能である。しかし、含水率0%の乾

* 北海道工業大学 応用電子工学専攻

** 北海道工業大学 応用電子工学科

いた雪ではマイクロ波がほとんど減衰しないことから後方散乱係数が変化せず、その後方散乱係数から積雪のパラメータを推定することは困難となる。一方、乾いた雪においてマイクロ波の振幅（後方散乱係数）は変化しなくても、誘電体である積雪中をマイクロ波が伝搬することにより位相が変化する。従って、観測された SAR データに含まれる位相情報を適当なアルゴリズムに基づいて解析すれば、積雪のパラメータを推定することができる。

このように、これまでほとんど取り上げられることの無かった位相情報の利用は、衛星搭載マイクロ波センサによる積雪観測の分野において新たな局面を生み出すものである。

これまで筆者らは、大地が積雪で覆われている時期と積雪が無く大地が露出している時期に同じ目標を同一軌道から二度に渡って観測した場合（以後、単に同一軌道と称する）、積雪の有無によって生じる SAR データの位相の変化量が積雪の深さに比例することを理論的な解析結果から示してきた。また、二つの SAR データの間に現れる位相差を利用する別な方法として、積雪に覆われた地上の同一目標を異なる二つの軌道から観測した場合（以後、単に異なる軌道と称する）、積雪に対する入射角が異なることによって生じる SAR データの位相の変化量が積雪の深さに比例することも示してきた。しかし、これらの観測方法によって得られる位相の変化量から積雪深を推定するためには、積雪の比誘電率あるいは積雪の比誘電率と密接な関わりを持つ積雪の密度の値が既知である必要がある。そこで、同一軌道および異なる軌道で観測して得た SAR データに含まれる位相情報のみから積雪深と密度を推定するアルゴリズムを提案した[3]。このアルゴリズムの最大の利点は、単一の周波数しか持たない一台の衛星搭載 SAR のみを利用するという限られた条件の中でも、積雪の深さと密度の二つのパラメータを同時に確定できることにある。現時点においては簡単な理論的解析までしか行っていないが、このような利点を持つ積雪パラメータの推定アルゴリズムや観測方法の確立が期待される。

文献[3]では、積雪観測に利用する SAR として JERS-1 搭載 SAR を想定してきた。提案したアルゴリズムに従って JERS-1 搭載 SAR のパラメータに基づいた理論的解析を行った結果、まれに複数の解が出てしまい積雪の深さと密度を特定できない場合のあることが示された。これは、JERS-1 搭載 SAR はオフナディア角が固定されているなど、積雪の状態に応じて観測方法を決定するパラメータ（衛星の軌道高度や軌道間隔、SAR のオフナディア角など）を最適化できないことに起因する。平成 16 年度に陸域観測技術衛星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) の打ち上げが予定されており、その ALOS に搭載されるフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) は、オフナディア角を可変 ($10^{\circ} \sim 51^{\circ}$) できるという特徴を持っている。従って、この PALSAR を積雪観測に利用すれば、観測パラメータの一つであるオフナディア角を積雪の状態に応じて最適化することができ、常に積雪の深さと密度の値を特定できる可能性がある。

そこで本論文では、PALSAR のパラメータを参考にして理論的な解析を行い、積雪の深さと密度を推定する上でオフナディア角の可変能力がもたらす効果について検討する。

2. 積雪の深さと密度を推定するアルゴリズム

ここでは、衛星搭載 SAR で観測して得た位相情報のみから、積雪の深さと密度を推定するアルゴリズムについて説明する。なお、含水率は 0%とし、積雪の比誘電率に影響を与えるものは積雪の密度のみとする。

2.1 推定アルゴリズム

SAR を用いたある一つの方法で積雪を観測し、目的とする位相差の情報を得たとする。しかし、マイクロ波の位相は積雪深と比誘電率（本論文では密度）の二つの要素によって変化するため、一つの観測方法による位相差の情報だけでは、積雪深と密度の両方の値を特定することができない。つまり、その位相差の値を取りうる積雪深と密度の組み合わせは無限に存在する。しかし、二つの異なる方法で同じ積雪を観測した場合に、それぞれの観測方法で得られた位相差を取りうる積雪深と密度の関係が異なっていたとすれば、積雪深と密度を特定することができる。図 1 は、二つの観測方法における積雪深と密度の関係が異なる曲線で表された場合を示している。この場合、SAR で観測した積雪の積雪深と密度は、二本の曲線の交点から求めることができる。なお、これら二本の曲線は、ある積雪モデルに基づいた理論的な計算により得るものとする。

本論文で提案する推定アルゴリズムでは、二つの観測方法として、大地が積雪で覆われている時期と積雪が無く大地が露出している時期に同じ目標を同一軌道から観測する方法と、積雪に覆われた地上の同一目標を異なる二つの軌道から同じ時期に観測する方法を用いる。図 2 に同一軌道から観測した場合の伝搬経路の変化、図 3 に異なる軌道から観測した場合の伝搬経路の変化を示す。それぞれの観測方法によって生じる伝搬経路の変化から位相差が生じ、図 1 に示したような積雪深と密度の関係を表す二本の曲線を得ることができる。従って、その交点から積雪深と密度の値を推定することができる。なお、図 3 に示されているように、アンテナのビーム幅の範囲内でとらえることのできる観測点であれば、オフナディア角が固定されている SAR であっても異なる軌道から同一の観測点を観測することができる。

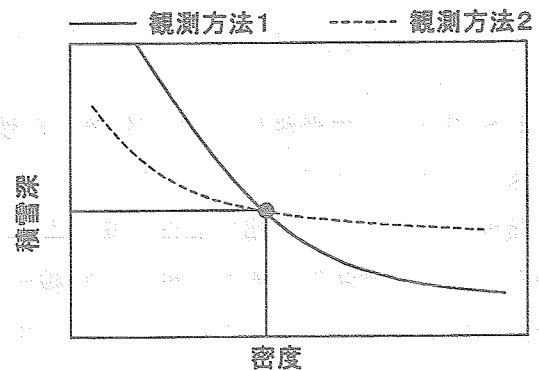


図1. 推定アルゴリズムの概念図

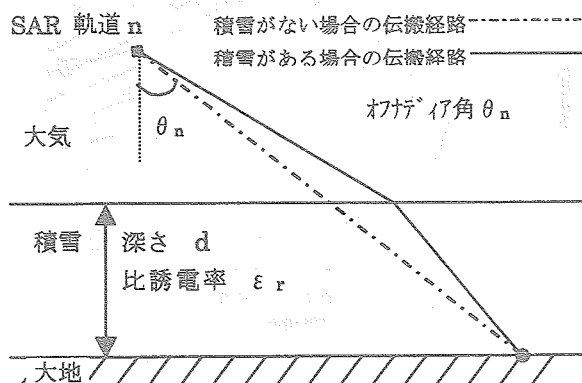


図2. 同一軌道から観測した際の伝搬経路の変化

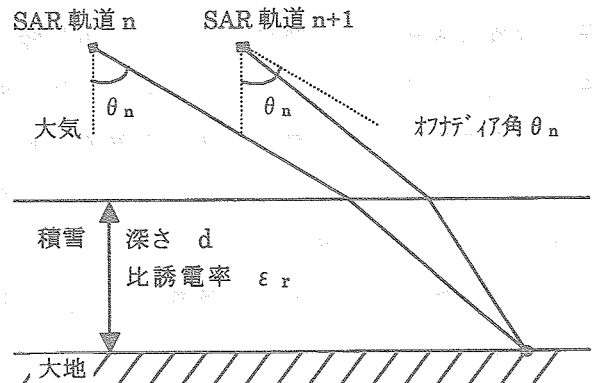


図3. 異なる軌道から観測した際の伝搬経路の変化

2.2 推定アルゴリズムの有効性の確認方法

提案した推定アルゴリズムの有効性を確認するためには、SAR の実測データを用いて導き出された積雪深および密度の推定値と、地上で直接観測により得られた実測値を比較検討しなければならない。しかし、現時点において筆者らは解析可能な SAR の実測データを保有していない。そこで本論文では、ある深さと密度を持った積雪モデルを設定し、その積雪モデルを SAR で観測した場合に得られるであろう位相の値を理論的に計算して求めた値を実測値の代わりとする。そして、その理論計算によって求めた位相の値を推定アルゴリズムに適用した際に、推定された積雪深と密度の値が最初に設定した積雪モデルの値と一致するか否かで、推定アルゴリズムの有効性を確認する。

2.3 積雪の比誘電率と密度の関係

積雪の比誘電率は、積雪の密度と密接な関わりを持っている。また、積雪の比誘電率と密度の関係は、地域によって多少の違いが見られる。例えば、北海道地方の乾雪（含水率 0%）の場合、積雪の比誘電率（実部 ϵ_r' ）と密度 ρ_s の関係を表す式として Kuroiwa の修正式が知られている[4]。また、積雪の比誘電率の虚部 ϵ_r'' は、乾雪の場合にはゼロとみなすことができる。

$$\begin{aligned} \epsilon_r' &= 1.0 + 2.2\rho_s, & \epsilon_r'' &= 0 \\ \therefore \epsilon_r &= \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} = \epsilon_r' \end{aligned} \tag{1}$$

ρ_s : 積雪の密度 (g/cm^3)

そこで、本論文では積雪の比誘電率の大きさ ϵ_r と密度 ρ_s の関係を式(1)に基づいて決定する。

2.4 オフナディア角固定 SAR で観測した場合の問題点

図4は JERS-1 搭載 SAR を参考にしてオフナディア角を 35° とした場合に、深さ 3m、密度 $0.3g/cm^3$ の積雪のパラメータを推定した結果である。同図において、実線が同一軌道において観測される位相差を満たす積雪深と密度の関係、破線が異なる軌道において観測される位相差を満たす積雪深と密度の関係を表す曲線である。SAR データから得られる位相情報は $0 \sim 2\pi$ の範囲内の値である。ところが、同一軌道を利用する観測方法では、積雪量が僅かな場合を除いて、積雪の有無による位相の変化量 θ が 2π 以上となることから、その位相の変化量 θ から積雪深と密度の関係を表す曲線を求める場合、 $\theta + 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) の全てを考慮しなければならない。そのため、図4にも示されているように、同一軌道における曲線は複数となる。なお、異なる軌道を利用する観測方法の場合は、図4に示されている積雪深と密度の範囲内において位相の変化

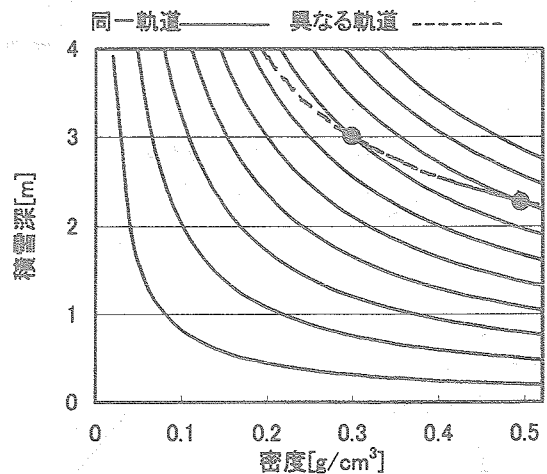


図4. 積雪深と密度を推定できない例 (深さ3m、密度 $0.3g/cm^3$ 、オフナディア角 35°)

量 θ が 2π を越えることはない[3]。

同図の結果を見ると、実線と破線の交点が二つ存在していることが分かる。同図の左側の交点は正しい推定結果を表しているが、右側の交点は間違いである。これは、オフナディア角が固定されている JERS-1 搭載 SAR のように、観測方法を決定するパラメータに自由度が無い場合には、積雪深と密度の値を特定できない場合が有り得ることを示している。

3. オフナディア角可変 SAR を用いた積雪深と密度の推定

ここでは、PALSAR で設定が可能なオフナディア角の範囲で積雪深と密度の推定を行う。また、オフナディア角を変えながら数回の観測を行うことで、より明確に積雪深と密度を推定する手法について述べる。

3.1 衛星搭載 SAR のパラメータおよび積雪モデル

衛星搭載 SAR のパラメータは、オフナディア角を変化させることが可能な ALOS 搭載 PALSAR のパラメータを参考にして、観測周波数 1GHz、衛星軌道の高さ 691.7km、隣接する軌道の間隔 60km とし、オフナディア角を 10° ～ 51° の範囲で検討する。

積雪モデルにおいて、積雪構造は単層で一様な構造とし、含水率は乾雪を想定して 0%とする。その他の積雪のパラメータは北海道地方の積雪を想定して、深さは 0～3.5m、密度は $0.1\sim 0.5\text{g/cm}^3$ の範囲とする。

3.2 オフナディア角と推定結果の関係

推定結果の一例として、オフナディア角 35° では積雪パラメータの値を特定することができなかった深さ 3m、密度 0.3g/cm^3 の積雪を、オフナディア角を変えて観測した場合の推定結果について示す。図 5(a),(b)および(c)は、それぞれオフナディア角を 49° , 35° , 10° としたときの結果である。なお、同図において実線が同一軌道において観測される位相差を満たす積雪深と密度の関係を表す曲線、破線が異なる軌道において観測される位相差を満たす積雪深と密度の関係を表す曲線である。図 5(a)および(b)を見ると、双方とも交点が二つ存在していることが分かる。一方の交点は、正しい推定結果である積雪深 3m、密度 0.3g/cm^3 を示している点であり、二つの図の中に共通して存在している。しかし、もう一方の点は誤った推定結果を示しており、さらに二つの図の中で異なった位置に存在している。図 5(c)のオフナディア角を 10° とした場合には、同図に示した積雪深と密度の値の範囲内において交点は積雪深 3m、密度 0.3g/cm^3 の点のみとなっており、正しく推定できることが分かる。

以上のことから、SAR で観測している地域の特性として、その地域に存在する積雪の深さと密度の値をある範囲内に限定できる場合には、最適なオフナディア角を設定することでそれら二つの値を推定できることが示された。

ただし、積雪の深さと密度の値の取り得る範囲をあらかじめ限定できなかったり、それら二つの値が広範囲に分布する場合には推定結果として複数の交点が出てしまい、正しい値を特定できない。

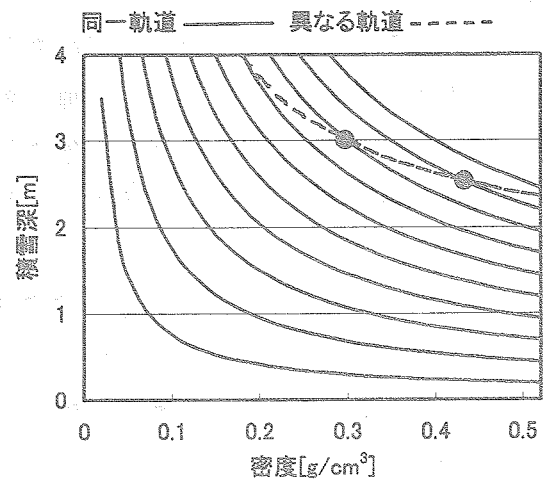
例えば、図 5(c)において北海道地方の積雪を想定して密度の値は 0.5g/cm^3 以下であると限定していることから交点は一つとなっているが、密度が取り得る値の範囲が 0.6g/cm^3 以下と拡大された場合には二つの交点が現れ、正しい積雪の深さと密度の値を特定することができなくなる。そこで、複数の交点が出た場合の解決手段について次節で述べる。

3.3 オフナディア角が異なる複数の観測結果を利用する推定

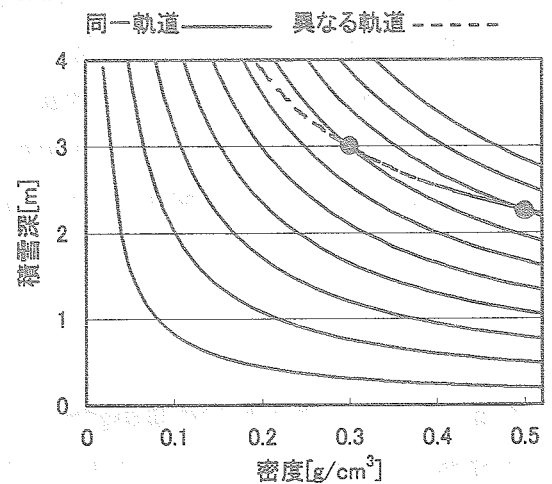
例えば、図 5(a)のようにあるオフナディア角における推定結果が複数の交点を持つてしまうと、その推定結果だけでは正しい積雪の深さと密度の値を特定することができないことは先に述べた通りである。しかし、図 5(a)および(b)のようにオフナディア角が異なる二つの推定結果を組み合わせれば、それら二つの推定結果に共通した交点を選択することで正しい積雪の深さと密度の値を特定できることが分かる。

図 5(a)および(b)とは異なる計算例を図 6(a)および(b)に示す。図 6(a)は、深さ 2m 、密度 0.5g/cm^3 の積雪をオフナディア角 10° で観測した場合に得られる位相差から積雪の深さと密度の値を推定した結果である。同図を見ると、二本の曲線は正しい値である積雪深 2m 、密度 0.5g/cm^3 の点のほかに、深さ 3.5m 、密度 0.22g/cm^3 の点でも交わっている。このように、前節では交点の一つのみであったオフナディア角 10° であっても、積雪の深さと密度の値によっては複数の交点が生じる場合が有り得る。図 6(b)は、図 6(a)と同じく深さ 2m 、密度 0.5g/cm^3 の積雪をオフナディア角 35° で観測した場合に得られる位相差から積雪の深さと密度の値を推定した結果である。同図を見ると、二本の曲線は正しい値である積雪深 2m 、密度 0.5g/cm^3 の点のほかに、深さ 2.7m 、密度 0.29g/cm^3 の点でも交わっている。

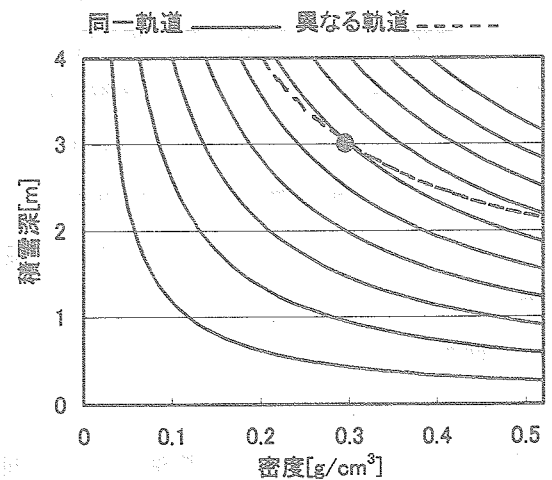
図 6(a)および(b)に共通している交点は深さ 2m 、密度 0.5g/cm^3 の点のみであり、その共通している交点を選択することで、正しい積雪の深さと密度の値を特定



(a) オフナディア角 49°



(b) オフナディア角 35°



(c) オフナディア角 10°

図 5. 各オフナディア角における推定結果
(深さ 3m 、密度 0.3g/cm^3)

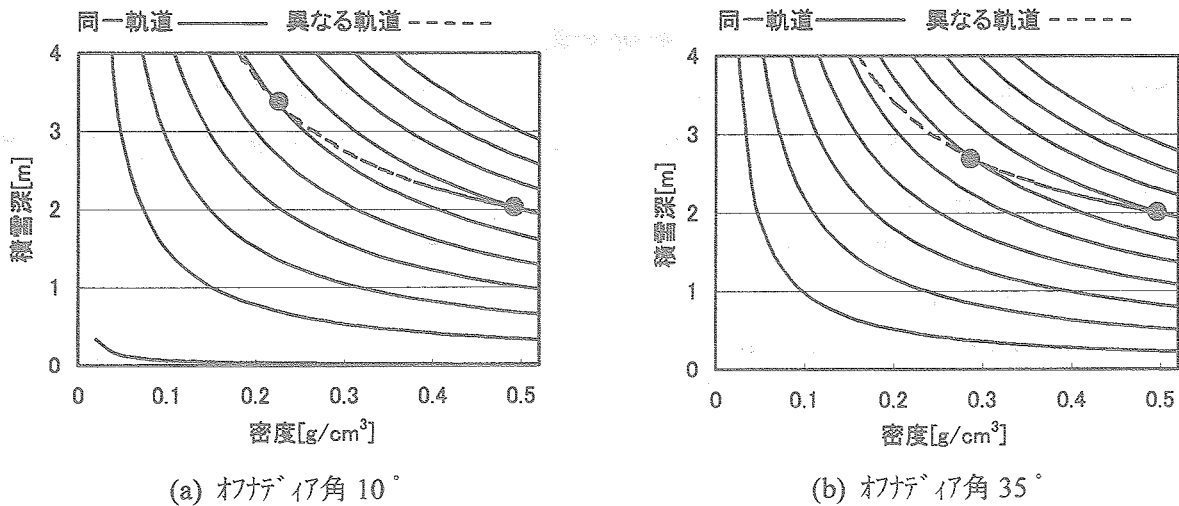


図6 各オフナディア角における推定結果

(深さ 2m、密度 $0.5/\text{cm}^3$)

できることが分かる。以上のことから、オフナディア角を可変できる SAR は、様々な状態にある積雪の深さと密度の値を推定する上で、非常に有効であることが明らかになった。

4. まとめ

Lバンドのマイクロ波は積雪内部に浸透しやすい性質を持つことから、Lバンドのマイクロ波を積雪観測に利用すると、積雪内部の情報を得ることができる。これまで筆者らは、Lバンド衛星搭載 SAR が観測して得たデータを利用して積雪の深さと密度を推定するアルゴリズムを提案してきた。本論文では、その推定アルゴリズムにおけるオフナディア角の可変能力の有効性を ALOS 搭載 PALSAR のパラメータを参考にして理論的に検討した。

これまでの研究で想定してきた JERS-1 搭載 SAR の場合はオフナディア角が固定されていたことから、まれに推定結果として複数の解が存在してしまい、積雪の深さと密度の値を特定できない場合があった。しかし、単一の周波数しか持たない一台の衛星搭載 SAR のみしか利用できない場合であっても、オフナディア角を変化させることができれば観測データのみから積雪の深さと密度の値を特定できることを本論文は明らかにした。

本論文で積雪の深さと密度の推定に用いた観測値は、すべて理論計算によって得られた理論値であるが、実際に観測した場合には観測値に誤差が含まれることが考えられる。また、実際の積雪は層構造を持つことが多く、その層構造が推定結果に影響を与えることが十分に考えられる。従って、それらの問題点を検討し、必要に応じて推定アルゴリズムの改良を行っていくのが今後の課題である。

なお、本研究の一部は北海道工業大学特別奨励研究により行われた。

【参考文献】

- [1] 古濱他, "人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング", 電子情報通信学会(1986).
- [2] 佐々木, 多田, 鈴木, "衛星搭載 SAR により観測される積雪の散乱特性の理論的解析", 北海道工業大学研究紀要, No.25, pp.309-316 (1997).
- [3] 阿部, 佐々木, 鈴木, "衛星搭載 SAR を利用した積雪深と密度の推定", 北海道工業大学研究紀要, No.29, pp.179-185 (2001).
- [4] 秋田谷, 白岩, "札幌の平地積雪断面測定資料-平成3年~4年冬季-", 低温科学物理篇 (1993)