

積雪粒径の効果を考慮した 積雪量推定衛星アルゴリズム開発の基礎研究

A BASIC STUDY ON A NEW SATELLITE ALGORITHM FOR SNOW BY CONSIDERING THE EFFECTS OF SNOW GRAIN SIZE

筒井浩行¹・小池俊雄²・玉川勝徳³・藤井秀幸⁴

Hiroyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE, Katsunori TAMAGAWA and Hideyuki HUIJI

¹正会員 工修 東京大学大学院工学系研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

²正会員 工博 東京大学大学院工学系教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

³非会員 工修 科学技術振興事業団研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

⁴正会員 工修 科学技術振興事業団研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

In this study, a new algorithm for snow depth and snow grain size is developed based on the microwave radiative transfer theory and validated by using the in-situ snow depth data at the 65 ground-based stations in the northern hemisphere and the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System (AMSRE) on Aqua launched by NASA in 2002. In the cases with the snow depth less than 40cm, the results of validation were shown good correspondence of observation value and estimation value. However, in the case with the snow depth more than 40cm, it is argued that the lower frequencies should be used in the algorithm.

Key Words : snow, radiative transfer theory, remote sensing, microwave

1. はじめに

世界各地で様々な姿を見せる気候は、水が大気を介し陸域-大気・海域-大気間を地球規模で相変化しながら循環することにより形成され保持されている。特に陸域-大気間の水循環は、その一端を担う陸面の水文状態の変動が、長期的・短期的に著しいが故に、地球規模の気候を大きく変化させる要因となっている。また陸域は、植生や積雪などにより様々な土地被覆状態が形成され、海洋に比べ、空間的・時間的な不均一性が著しいため、その水文状態を定量的に把握することが困難とされている。しかし逆に言えば、陸域での水文状態を地球規模で観測するシステムを確立し、その状態の定量的な把握が実現すれば、グローバルな水資源の長期的変動予測や短期的な季節・年々の水資源管理を行う上での大きな前進となる。また本研究において対象とする積雪は、その高い反射率や融雪に伴う地表面での熱収支により陸域の水文状態に大きな影響を与え、延いては地球規模の気候変動に多大な影響を与える要因の一つである。

地球全体の積雪状態を定量的に把握するためには、地

球全体にわたり観測機器を均一に配置・展開することが理想ではあるが、観測規模等より非現実的であることから、積雪観測への衛星リモートセンシングの活用の可能性が示唆され、近年、観測頻度や周波数などの多様性に富んだマイクロ波帯計測技術の発達を契機に、マイクロ波放射計を活用した全天候下での積雪観測手法の開発が注目されている。

本研究では、マイクロ波放射伝達の基礎理論に基づき積雪深とその相当水量・積雪密度に加え、雪粒子の大きさを自動的に推定する衛星アルゴリズムを考案し、地上観測による積雪深との比較を通じて、アルゴリズムの妥当性を評価する。

2. 積雪量算定アルゴリズムの考案

本節では、積雪深算定手法とマイクロ波放射伝達モデルの選定、並びにアルゴリズムの構造について記述する。

(1) 積雪深算定手法とマイクロ波放射伝達モデルの選定
これまで、積雪量算定のための手法が数多く開発され

てきたが、その中で Koike & Suhama(1993)は、半無限媒体の上にある平均個数(N)の球形散乱体を含む均質な平均厚さ(D)の散乱媒体からの放射は、直達放射と散乱放射の2つの成分からなるというEngland(1975)によるモデル(以下、Englandモデルと呼ぶ)を積雪層に適用し、図-1に示す積雪層からのマイクロ放射モデルを提案している。そこでは、Englandモデルにおける散乱媒体を均一かつ球形の氷粒子で構成される積雪層に、また半無限媒体を土壤に仮定し、大気-積雪層と積雪層-土壤の2つの境界における放射輝度収支式と積雪内部での放射収支式を解くことにより「直達放射輝度」を求め、氷粒子からの散乱放射が積雪層内伝達過程における消散を表現した放射伝達式により「散乱放射輝度」を求めるものである。また散乱による消散と射出の計算にはレイリー近似を用い、直達放射と散乱放射による散乱成分をレイリー散乱位相関数で表し、これを全入射角で積分することにより「注目する方向への散乱射出」を求めている。更に、直達放射輝度温度と散乱放射輝度温度を直達放射輝度と散乱放射輝度をレイリー-ジーンズの放射則に適用することで求めるものである。

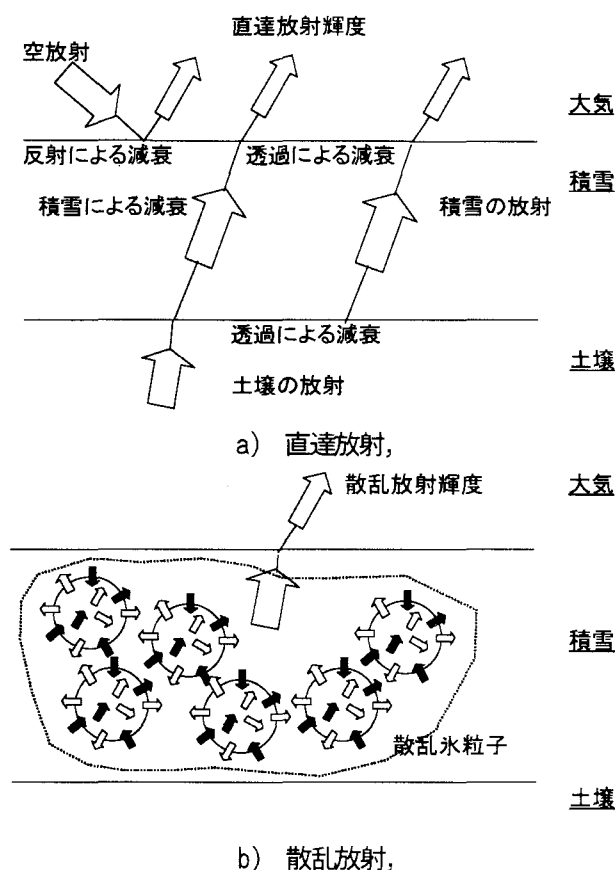


図-1 積雪のマイクロ波放射伝達モデル

また、小池ら(1999)は、このEnglandモデルにおいて「積雪粒径」と「積雪密度」を仮定し、「積雪深」と「雪温」の2つの積雪物理量を変化させ、2つの周波数に対応する「積雪層からの輝度温度」を計算し、「積雪深、

雪温」から「2周波数の輝度温度」へのテーブルを求めている。更にこれを2つの周波数の輝度温度に抜きの無いように補間することによって、逆に「2周波数の輝度温度」から「積雪深、雪温」への変換テーブルを作成し、この変換テーブルに対して「2周波数に対応する衛星輝度温度」を入力することで「積雪深、雪温」を算出する積雪量算定アルゴリズムを開発している。ただし、このアルゴリズムは、散乱による消散と射出が周波数の相違により大きく変化する特性を利用しているため乾雪にしか対応できず、また入力値となる雪温は、土壤温度と同一として計算することが前提となる。

本研究では、まず小池ら(1999)のEnglandモデルを用いた積雪量算定アルゴリズムを適用し、「2周波数の輝度温度」から「積雪深、雪温」への変換テーブルを作成した。積雪密度を 0.3g/cm^3 、積雪粒径を 0.7mm に仮定し、積雪深を $1\sim 200\text{cm}$ まで 1cm ずつ、雪温(土壤温度)を $243\text{K}\sim 273\text{K}$ まで 1K ずつ変化させ、Englandモデルに入力することにより 19GHz (18.7GHz)と 37GHz (37.5GHz)の2つの周波数での輝度温度を算出した。図-2はその算定結果を図化したものである。

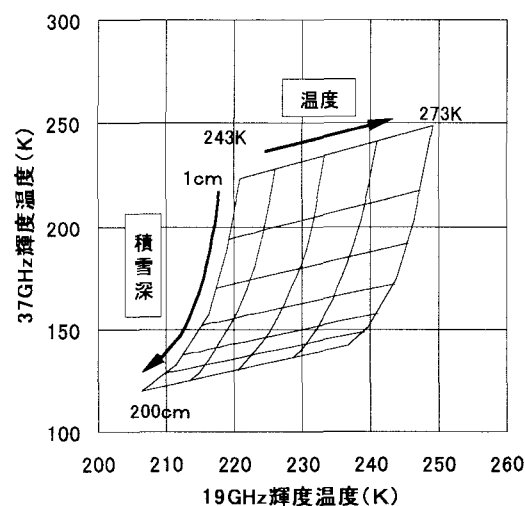


図-2 積雪深、雪温(土壤温度)と 19GHz 、 37GHz 輝度温度算定値との関係

次に、この算定結果の変換テーブルに $19\text{GHz} \cdot 37\text{GHz}$ の衛星輝度温度データをプロットし変換テーブルとの位置関係を確認した。衛星データとしては、2002年10月～2003年3月を対象とした北半球65地点のAMSR-E衛星データ〔 $6.9\text{GHz} \cdot 10.65\text{GHz} \cdot 18.7\text{GHz} \cdot 36.5\text{GHz} \cdot 89.0\text{GHz}$ 〕を使用した。その結果、多くの地点において、輝度温度値の高い衛星データが変換テーブルから外れる分布を確認した。この状況の一例を図-3に示す。これは、積雪が 273K 、即ち 0°C を超える状態では成立できないという考えから 273K を超える温度を設定しないことに原因があるものと考えられる。この対策として、変換テーブルの温度要素を

雪温から土壌温度に変更し、273Kを超える土壌の上に273Kの積雪が被覆された状態を表現する方法が考えられるが、雪温と土壌温度を等しくすることを条件に持つEnglandモデルでは、その状態を表現することができない。従って、Englandモデルの適用は困難と判断した。

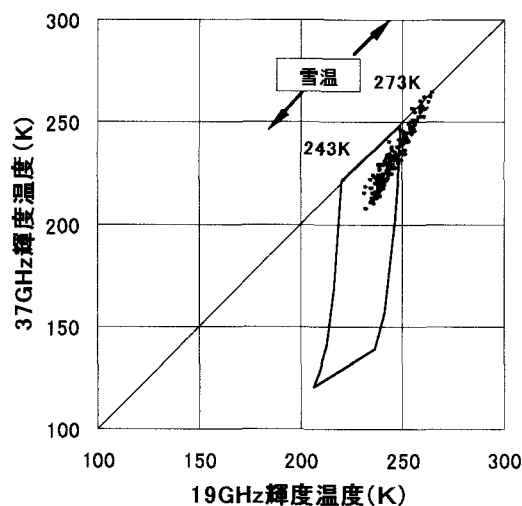


図-3 Englandモデルによる変換テーブルと衛星データとの位置関係

そのためEnglandモデルの代替モデルとして、Liu(1998)により開発された放射伝達モデルである4-Stream Fastモデルを適用した。4-Stream Fastモデルは、元来、地表面から衛星マイクロ波放射計の間の大気層に適用するために開発されたものであるが、本研究では、このモデルにおいて地表面と大気層の間に積雪層が存在する状態を再現した。このモデルでは、散乱位相関数にHenyey Greenstein散乱位相関数を用いている。またEnglandモデルとは大きく異なり、雪温と土壌温度を各々独立させた設定が可能となるため、前述の273Kを超える土壌に273Kの積雪が被覆された状態を表現することができる。そこで、積雪深を1cm~200cmまで1cmずつ変化させた上で、モデル内の土壌温度として243K~303Kまでを1Kずつ変化させ、雪温については、土壌温度が243K~273Kまでは土壌温度等しく変化させ、土壌温度が273Kを超える場合には273Kになるよう入力条件設定を行い、〔積雪深、土壌温度〕から〔19GHz, 37GHzの2周波数の輝度温度〕へのテーブルを算定し、それを補間して〔19GHz, 37GHzの2周波数の輝度温度〕から〔積雪深、土壌温度〕への変換テーブルを作成した。その算定結果を図-4に示すが、変換テーブルの温度要素を土壌温度に変え273Kを超える範囲を計算させることにより、ほぼ全地点の衛星輝度温度データをほぼ変換テーブル内に分布させることができた。

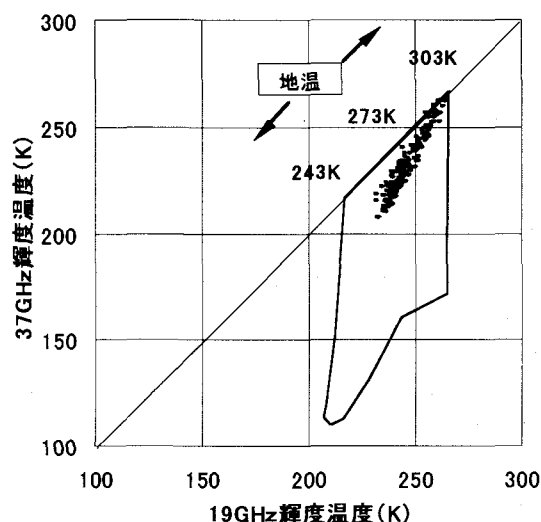


図-4 4-StreamFastモデルによる変換テーブルと衛星データとの位置関係

(2) アルゴリズムの構造

前述の変換テーブルを用いることにより2周波数の衛星データのみからの積雪深、温度(土壌温度、雪温)の算定が可能となった。しかし、これはあくまでも積雪粒径を一定の値に仮定することが条件となる。そのため実際の積雪粒径が仮定粒径と大きく異なる場合、算定される積雪深に大きなずれが生じる可能性が高い。そこで、本研究では、衛星データのみから自動的に積雪粒径を検出した上で、積雪深、雪温(土壌温度)を算定する積雪量推定アルゴリズムを考案した。そのアルゴリズムの流れを図-5に示す。

まず、19GHzと37GHzの2周波数を用い、積雪粒径0.3mm, 0.4mm, 0.5mm, 0.6mm, 0.7mm, 0.8mmの6種類を仮定し、〔19GHz, 37GHzの2周波数の輝度温度〕から〔積雪深、土壌温度〕への変換テーブル(以下、積雪深変換テーブルと呼ぶ)を各々算定する。それと同時に19GHz, 37GHzに最も近い10GHz (10.65GHz)を用い、〔積雪深、土壌温度〕から〔10GHz輝度温度〕への変換テーブル(以下、輝度温度変換テーブルと呼ぶ)を積雪深変換テーブル算定時の6種類の積雪粒径に対応する6種類の「相当粒径」毎に算定しておく。

各積雪深変換テーブルに19GHz, 37GHzの衛星輝度温度を入力して積雪深、土壌温度を算定し、その値を各々に対応する輝度温度変換テーブルに入力することにより、10GHzの輝度温度を算定する。次に、その算定された10GHz輝度温度と同じ10GHzの衛星輝度温度との差の絶対値(以下、輝度温度差と呼ぶ)を計算する。それに引き続き、各積雪粒径に対応する輝度温度差を比較し最小となる輝度温度差を選定し、それに対応する積雪粒径、積雪深、温度(雪温、土壌温度)を積雪量に決定する。以上のプロセスが、本研究において考案した積雪量推定のための衛星アルゴリズムである。このアルゴリズムにより積雪量として、19GHzと37GHzの2周波数の衛星輝度温度より積雪深が

推定され、土壌温度との設定関係より雪温も推定される。また、もう1周波数の10GHz衛星輝度温度より積雪粒径を検知することが可能となった。更に、積雪密度を仮定していることから積雪深と積雪被覆面積より積雪相当水量の推定も可能である。ここで、10GHzの輝度温度変換テーブルを算定する際に用いた「相対粒径」について記述しておく。本来、積雪粒径は幾何学的な値であり、周波数の相違に関わらず一定とすべきである。しかし、本研究に用いたモデルでは、高周波数側に用いた積雪粒径を低周波数側にそのまま用いた場合、前者の条件で算定した輝度温度よりも後者の輝度温度が下回る特性を持つことを確認した。そこで、現実的な積雪粒径を用いて19GHz、37GHzの輝度温度を算定し、10GHzの輝度温度をそれに整合させ得るモデル上の積雪粒径、即ち「相当粒径」を見出した。その積雪粒径と相当粒径との相対関係を図-6に示す。この現実的な積雪粒径と相当粒径との関係がずれることにより、アルゴリズムにおいて最適な積雪粒径を選定できない状況と考えるとこの調節・補正がアルゴリズムの推定結果を左右する大きな鍵になると言える。

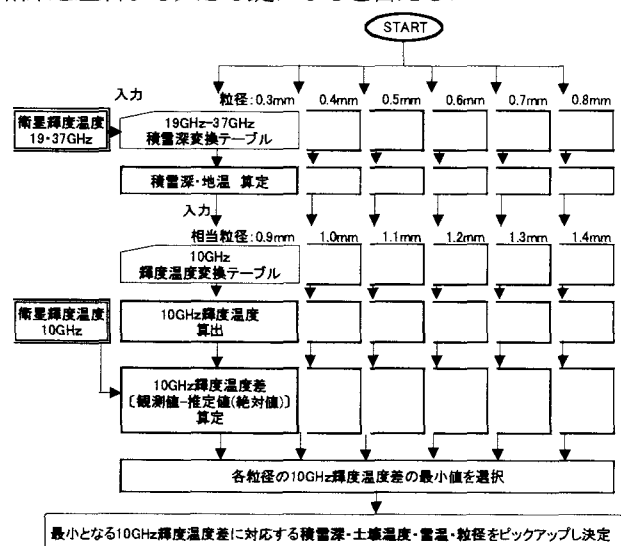


図-5 積雪量算定アルゴリズムのフロー図

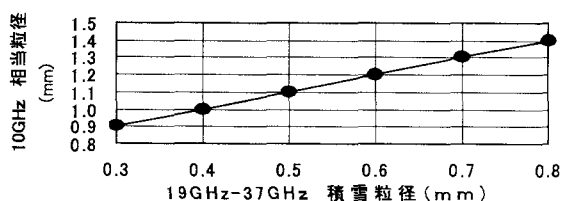


図-6 積雪粒径とその相当粒径の関係

3. 積雪量推定衛星アルゴリズムの評価

本研究では、積雪量推定衛星アルゴリズムにより推定した積雪深をGTS積雪深データと比較検証することによりアルゴリズムの妥当性を評価した。推定値の評価指標としては、実測値と推定値との差の絶対値の平均を用い、この値が20cm以下になる場合を適合性が良い、20cmを超える場合を適合性が悪いと判断したところ、65地点中、適合性が良いと判断されるものが37地点、悪いと判断される箇所が28地点という結果を得た。

更に、65地点全てを見ると40cmを境として適合性に関きが生じており、対象期間を通して実測積雪深が40cm以下のサイト41地点に着目すると適合性が良いと判断されるものが33地点、悪いと判断されるものが8地点であり、図-7に推定値と実測値の分布図を示すが、比較的良好な両者の適合性を確認でき得る結果が得られたと言える。また、図-8はその一例を示したものである。

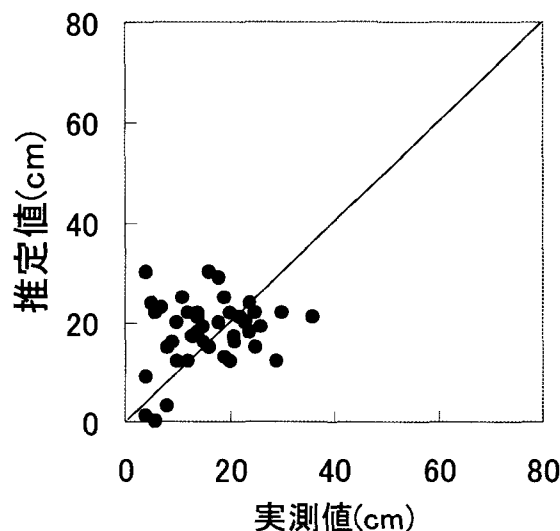


図-7 実測積雪深が40cm以下の地点を対象とした推定値と実測値の分布図

これに対して、対象期間中、実測積雪深が40cmを超えるサイト25地点では、適合性が良いと判断されるものが4地点、悪いと判断されるものが20地点であり、図-9に示す推定値と実測値の分布図に見られるように、推定値が実測値を大きく下回る結果が確認された。また、図-10はその一例を示したものである。

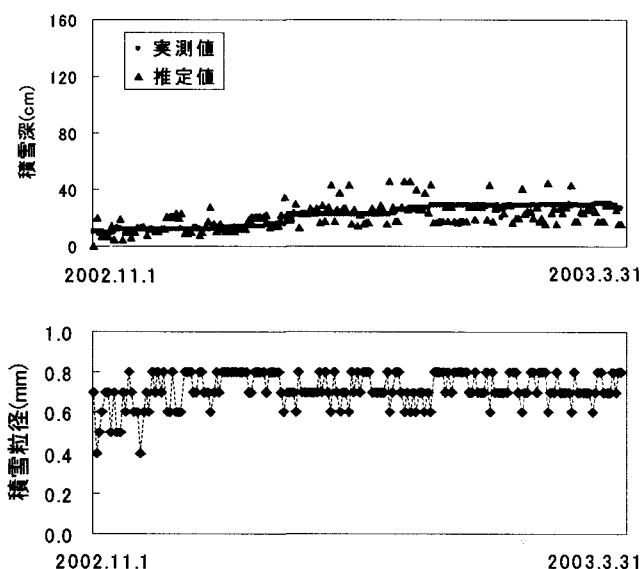


図-8 実測積雪深が40cm以下の地点の一例

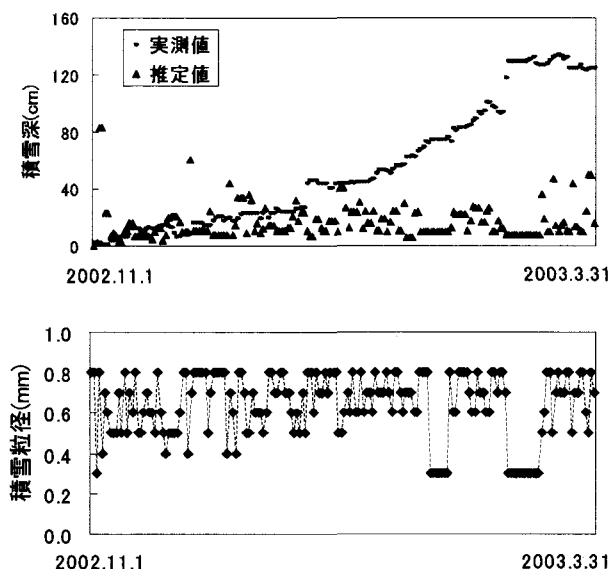


図-10 実測積雪深が40cmを超える地点の一例

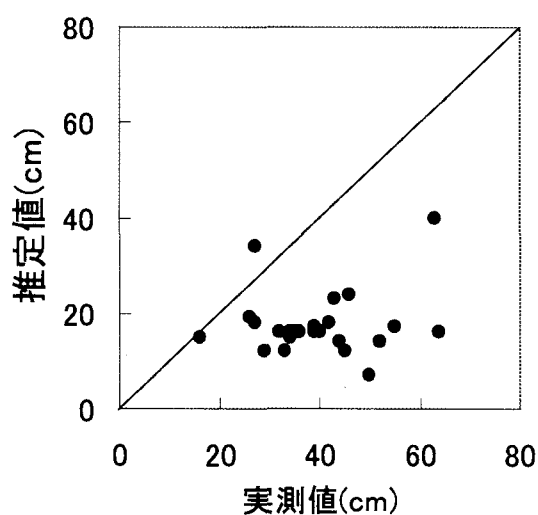


図-9 実測積雪深が40cmを超える地点を対象とした推定値と実測値の分布図

次に、実測積雪深が40cmを超える地点の適合性の悪さについて考える。これらの地点では、図-10に見られるように実測積雪深が40cm以下では、比較的、整合性が良いのに対し、実測値が40cmを超えても推定値は、ほぼ一定の高さまでしか上がらないことが、適合性の悪さに繋がっている。これは、本研究において適用したアルゴリズム条件では、40cmを超える高い積雪を検知できていないことを意味している。よって、図-11の適合性の良い地点と悪い地点の分布図に見られるように積雪深が大きいため、本研究での適合性が悪いロシア連邦北部や北アメリカ東部の積雪深を正確に推定するために、降雪に伴う積雪粒径の変化に敏感な高周波数(89GHz)を用いたアルゴリズム条件の付加や波長が長く深い積雪に対応できる低周波数のアルゴリズムへの適用などを考える必要がある。

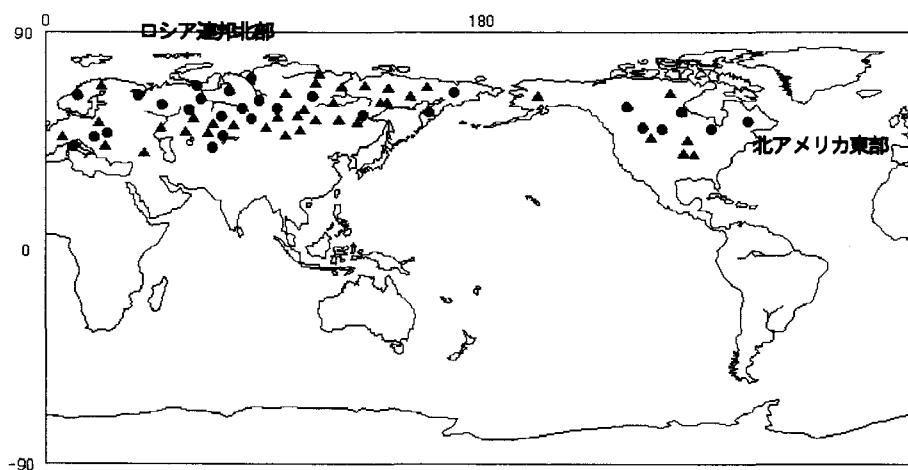


図-11 整合性の良い地点・悪い地点の分布 [▲：適合性の良い地点 ●：適合性の悪い地点]

4. 結論

本研究より以下の事項が明らかにされた。

- 1) 積雪層内のマイクロ波放射伝達モデルによるシミュレーションにより、衛星によって観測される3周波のマイクロ波輝度温度データから積雪深・雪温と積雪粒径を推定する衛星アルゴリズムが提案された。
- 2) 北半球の実測積雪深データを用いたアルゴリズム検証の結果、全体で半数以上、また実測積雪深が40cm以下では、全体の8割以上の地点で精度の良い結果が得られた。
- 3) 実測積雪深が40cmを超える地点での推定精度向上のために、高周波数(89GHz)を用いたアルゴリズム条件の付加や低周波のアルゴリズムへの適用が重要であることが示された。

謝辞：本研究は、統合地球水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)および宇宙開発事業団AMSR/AMSR-E検証実験の一環として、科学技術振興事業団戦略的創造研究(地球変動のメカニズム)および科学技術振興調整費(先導的研究)の支援の下、実施したものである。記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) England, A.W.: *Thermal microwave Emission from a Scattering Layer*, Journal of Geophysical Research, Vol.88, No.32, pp.4484-4496, 1975.
- 2) Koike, T., Suhama, T.: *Passive-microwave remote sensing of snow*, Annals of Glaciology, 18, pp.305-308, 1993.
- 3) 小池俊雄, 吉本淳一, 藤春兼久, 柴田章: グローバル的な積雪量分布推定のための衛星アルゴリズムの開発と検証, 水工学論文集, 第43巻, pp.211-215, 1999.
- 4) Guosheng Liu: *A fast and Accurate Model for Microwave Radiance Calculations*, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 76, No.2, pp.335-343, 1998.

(2003.9.30受付)