

マイクロ波放射伝達理論に基づく積雪量・ 積雪粒径推定衛星アルゴリズム開発の基礎研究

A BASIC STUDY ON A SATELLITE ALGORITHM FOR SNOW QUANTITY AND SNOW GRAIN SIZE BASED ON THE RADIATIVE TRANSFER THEORY

筒井浩行¹・小池俊雄²・玉川勝徳³・藤井秀幸¹・Tobias Graf⁴

Hiroyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE, Katsunori TAMAGAWA, Hideyuki FUJII and Tobias Graf

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 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)

⁴正会員 工博 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)

This study developed a satellite algorithm for snow depth and snow grain size based on the microwave radiative transfer theory used the dense media model and the 4-stream fast model and validated by using the in-situ snow depth data at the 75 ground-based stations in the northern hemisphere and the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System (AMSR-E) on Aqua launched by NASA in 2002. The results of validation were show good correspondence of observation value and estimation value.

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、太陽エネルギーを駆動源とし、水が陸域-大気-海域-大気間を地球規模で相変化しながら移動する水循環により形成されている。特に、陸域-大気間の水循環は、著しい水文状態の変動を持つ陸域の影響により地球規模の気候変動に大きな影響を与えている。しかし、陸域では積雪や植生などの多様な土地被服状態が形成されるため、その水文状態の定量的把握が困難と考えられている。特に、積雪は高い反射率を有すること、更に溶解した雪が地表面の土壤水分を増加させ、春・夏における地表面の加熱を抑制する働きを持つことなどから地球規模の水循環に大きな影響を与えていると言われている。そのため、地球全体の積雪域における積雪量を定量的に把握することが重要な課題になっている。

地球全体の積雪状態を定量的に把握するためには、地球全体にわたる観測機器の均一な配置・展開が理想である。しかし観測規模などを考えるとそれは非現実的であるため、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はじめ、近年では、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が開発され続けてい

る。

本研究では、マイクロ波放射伝達の基礎理論に基づき、積雪深及び積雪粒径を衛星観測データのみから自動的に推定する衛星アルゴリズムを考案し、地上観測積雪深との比較を通し、衛星アルゴリズムの妥当性を評価する。

2. これまでの衛星アルゴリズム

本節では、本研究の積雪量算定衛星アルゴリズムの基礎となったこれまでの衛星アルゴリズム(マイクロ波放射伝達モデルと積雪深算定手法)について記述する。

(1) England放射伝達モデルに基づく積雪量算定手法

Koike & Suhama(1993)は、半無限媒体上にある平均個数(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放射伝達モデル(1975)を適用し、当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壌に仮定し、大気-積雪層と積雪層-土壌の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、そして氷粒子からの散乱射出の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」を求めた。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」を求めた。更に、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して算定している。そして、小池ら(1999)は、このEngland放射伝達モデルにおいて「積雪粒径」と「積雪密度」を仮定し、下記の積雪深の算定手法を開発した。

- ① England放射伝達モデルより「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〕と〔2周波数の輝度温度〕から成るテーブルを求める。
- ② 求めたテーブルにおける2周波数の輝度温度の欠落部分を補間することで、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する。
- ③ 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〕を入力することにより〔積雪深、雪温〕を算出する。

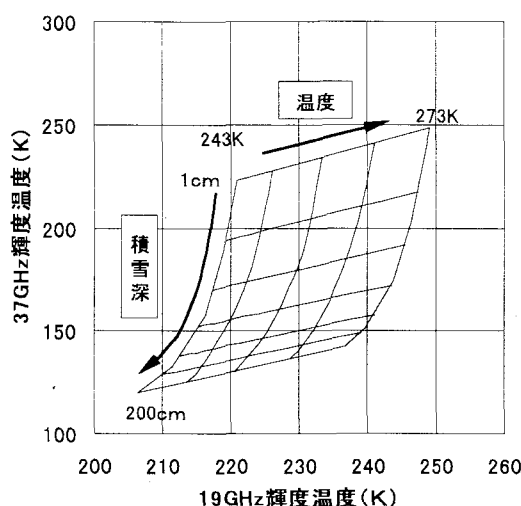


図-1 小池ら(1999)アルゴリズムにおける変換テーブル

しかし、当モデルは、積雪量を推定する上で、重要な物理量となる積雪粒径を0.6mm前後しか適用できないこと、また19GHz・37GHz以外の周波数を適用できないため、積雪深・雪温以外の積雪物理量の変化を検知するための周波数を確保できないことなどの欠点を持つ。そして、これらの欠点により積雪量を適切に推定できない状態にある。

(2) 4-Stream Fast放射伝達モデル

に基づく積雪深算定手法

Liu(1998)は、地表面から衛星マイクロ波放射計間の気層に適用することを目的に4-Stream Fast放射伝達モデルを開発した。当モデルの基本理論はEngland放射伝

達モデルと類似しているが、散乱位相関数にHenye Greenstein 散乱位相関数を用いている点で大きく異なる。また、当モデルは地表面の上向き放射・物理量を基に放射伝達基礎方程式から何層かに分割された地表面と衛星マイクロ波放射計間の層の最下層上面における輝度温度を算出し、それを最下層の上向き放射とし、順次、放射伝達基礎方程式より各上層の上向き放射を求め、最終的に衛星マイクロ波放射計に達する放射輝度を算出するものである。更に、当モデルは、England放射伝達モデルの欠点である広範囲な積雪粒径と周波数を適用することができるという大きな利点を持っている。

筒井・小池ら(2004)は、この4-StreamFast放射伝達モデルを適用し、地表面と大気層の間に積雪層が存在する状態をモデル上で再現した。そして小池ら(1999)と同様、2周波数の輝度温度と積雪深・雪温から成る変換テーブルを積雪粒径0.3から0.8mmまで0.1mm間隔で計算し、衛星輝度温度のみから積雪深・雪温と積雪粒径を算定する手法を提案した。

しかし、浅い積雪における推定値と地上観測値との適合性は良好であるが、深い積雪に対する適合性が悪いという結果が得られ、新たな課題を残した。

3. 本研究における衛星アルゴリズム

(1) マイクロ波放射伝達モデル

本研究では、積雪の放射輝度を算定する上で最も重要となる消散係数とアルベドの計算にTsang(1992)によるDense Media放射伝達理論を適用した。このDense Media放射伝達理論は、ある誘電率を有する球形散乱体が電磁界に存在する状態をDyadic Green関数で表現し、散乱体が個々に独立しているものとして考える従来の放射伝達理論に対し、散乱体同士相互の関連性を考慮した理論である。そのため、Dense Media放射伝達理論により計算される消散係数は、従来の放射伝達理論よりも低い値を示し、また積雪のFractional Volume[密度(乾雪)]の増大に伴い1次元的に変化する従来の放射伝達理論に対し、下図のような挙動を示す。

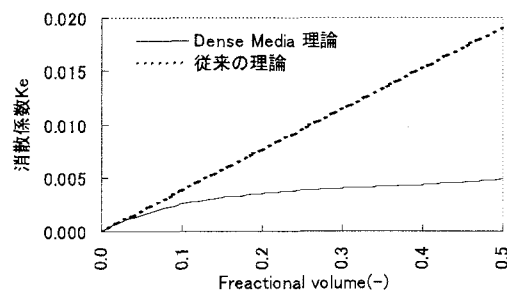


図-2 従来の放射伝達理論とDense Media放射伝達理論による消散係数計算値の相違

同じ19GHz・37GHzの衛星輝度温度を入力値とし、モデルで計算される19GHz・37GHzの輝度温度差を用い積雪深を算定しようとする場合、その輝度温度差が大きい程小さな積雪深が算定され、輝度温度差が小さい程大きな積雪深が算

定される。

4-Stream Fast放射伝達モデルをはじめとする従来のマイクロ波放射伝達モデルでは、消散係数が大きめに算定されるため、土壌の放射が積雪中を伝播される際の減衰が大きく、積雪深が大きくなるに従い体積散乱の効果に伴う輝度温度の増加分により若干緩和されるものの全体的な輝度温度は積雪深の増大に伴い減少する。そして、その減衰の割合、またそれに伴う全体的な輝度温度の減少の割合は、高周波数程顕著に現れるため、19GHz・37GHzの輝度温度差が大きくなり、輝度温度差より積雪深を算定した場合、浅い積雪しか算定できないという事態を招く。しかし、Dense Media放射伝達モデルでは、前述の通り、消散係数が小さめに算定されるため、土壌の放射が積雪中を伝播される際の減衰が小さくなる。よって19GHz・37GHzの輝度温度差も小さくなり、輝度温度差より積雪深を算定した場合、深い積雪を算定できるという利点を持っている。

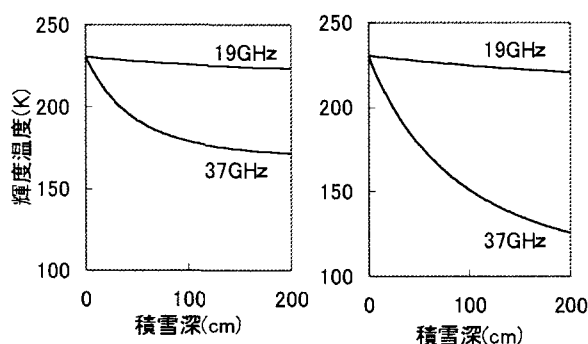


図-3 Dense Media放射伝達理論・従来の放射伝達理論の輝度温度(19・37GHz)算定値の相違

本研究では、このような利点を持つDense Media放射伝達理論により計算された積雪の消散係数とアルベドを4-StreamFast放射伝達モデルに導入し放射輝度の算定を行う手法を適用し、4-StreamFastモデルにおける課題の解決を目指した。

(2)衛星アルゴリズムの構造

1) 積雪深の算定方法

本研究においても、これまでの積雪深算定手法と同様、2周波数(19GHz, 37GHz)の輝度温度と積雪深・雪温から成る積雪深変換テーブルを放射伝達モデルより計算し、その変換テーブルに2周波数の衛星輝度温度を入力することで積雪深・雪温を算定する手法を適用した。

しかし、この手法を用い積雪深を計算するためには、変換テーブルの範囲内に2周波数衛星輝度温度値の分布が収まっていなければならない。

図-4は、北半球GTS積雪深データ(2002.10~2003.3)に対応するサイトの内、19GHz・37GHzの衛星輝度温度値が極端に小さいサイト・極端に大きいサイト・標準的なサイトの計3サイトの分布とEngland放射伝達モデルによる

変換テーブルとの位置関係を確認したものであるが、England放射伝達モデルは、モデルの性質上、雪温に相当する243Kから273Kまでしか設定できないため、限られた範囲の衛星輝度温度しかテーブル内に収めることができない状態が確認できる。

この状態では、積雪深・雪温を算定できないケースが多く発生するため、筒井・小池ら(2004)は、雪温と土壌温度を独立して設定することのできる4-StreamFast放射伝達モデルを適用し、変換テーブルの温度成分を土壌温度とし243Kから303Kの温度を設定することで、極端に高い衛星輝度温度をテーブル内に収めることのできる手法を提案した(図-5)。しかし、この変換テーブルにおいて土壌温度が273Kを越える場合、0°Cの土壌の上に積雪が被覆する非現実的な状態をモデル内で再現することになる。

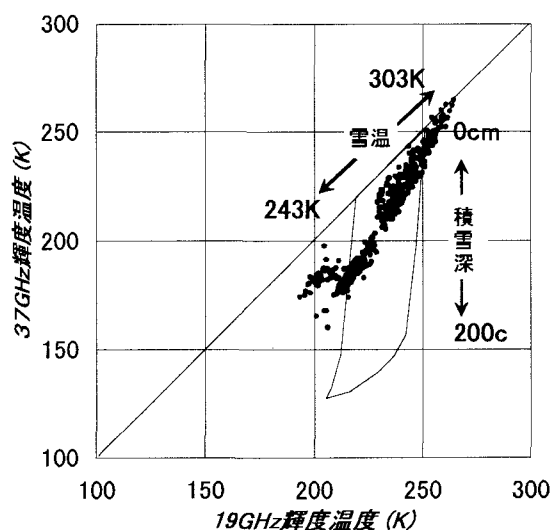


図-4 England放射伝達モデルに基づく変換テーブルと衛星輝度温度との位置関係

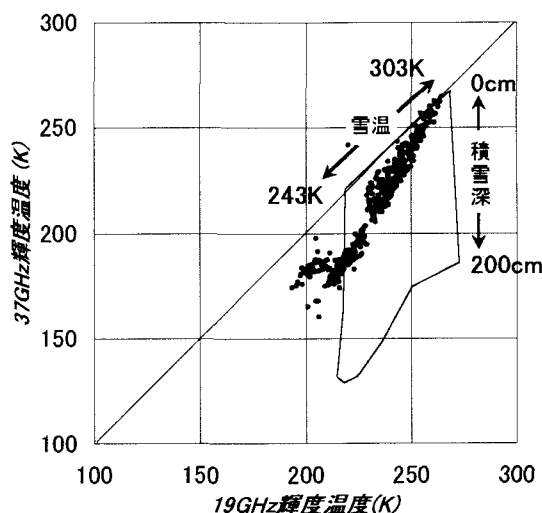


図-5 4-StreamFast放射伝達モデルに基づく変換テーブルと衛星輝度温度との位置関係

そこで、本研究では、衛星データAMSR-Eの適用周波数6GHz・10GHz・19GHz・37GHz・89GHzの内、最も輝度温度の時系列的な変動が小さく、サイト毎の地点特性を表すものと考えられる6GHz輝度温度(TB6)と同周波数の放射率との関係を用いた。マイクロ波放射伝達理論上、物理温度を一定とした場合、放射率の減少に伴い輝度温度は1次元的に大きくなる。そこで、6GHz放射率を0.83から0.98まで、0.03間隔で考え、それに北半球GTS積雪深データサイトに対応するサイト毎の6GHz衛星輝度温度とそれに基づく放射率の分布をプロットした。その結果、モデルで計算した6GHzの輝度温度-放射率の関係に対し図-6に示すようにその関係に対するおおよその適合性が確認された。

そこで、本研究では、この関係による表-1に示す条件をアルゴリズムへ導入することにした。

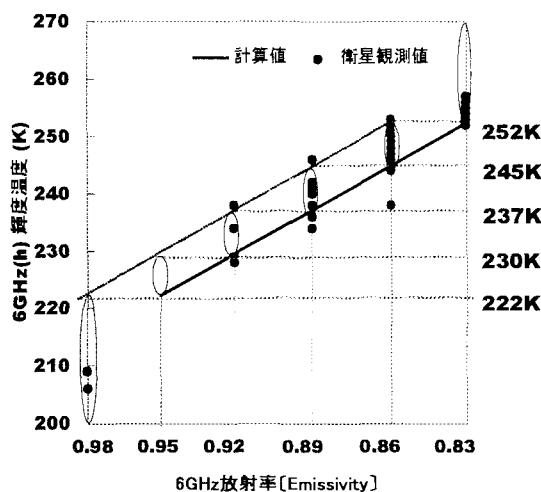


図-6 6GHzの輝度温度(TB6)と放射率との関係

表-1 6GHzの輝度温度(TB6)と放射率

の関係に基づく設定	
6GHz輝度温度(TB6)	6GHz放射率
$TB6 \geq 252K$	0.98
$252K > TB6 \geq 245K$	0.95
$245K > TB6 \geq 237K$	0.92
$237K > TB6 \geq 230K$	0.89
$230K > TB6 \geq 222K$	0.86
$222K > TB6$	0.83

なお、衛星観測輝度に対応する6GHz放射率は、放射率が0.83から0.98まで0.03刻みの値となる条件で積雪深変換テーブル(6種)を作成し、それに衛星輝度温度データの分布を重ね、6種のテーブルの中で各サイトの衛星輝度温度分布が完全に収まるものを選定し、それに対応する放射率を対象とするサイトの放射率として選定したものである。

この条件により計算した変換テーブルと衛星輝度温度分布との位置関係を図-7に示す。この条件を適用することにより広範囲に分布する衛星輝度温度値をテーブル内に収めることができるようになった。

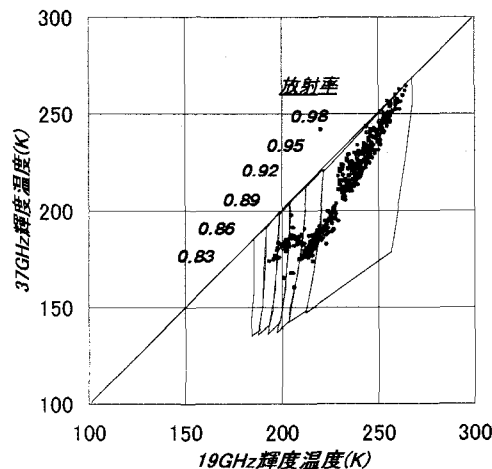


図-7 本アルゴリズム変換テーブルと衛星輝度温度との位置関係

2) 衛星アルゴリズムの構造

本節では、本衛星アルゴリズムの全体構造について記述する。本衛星アルゴリズムでは、雪温と土壌温度を同一とし223K~273Kの温度範囲考え、積雪密度を $0.20g/cm^3$ に仮定し、積雪粒径の選定には、粒径変化に敏感な高周波数89GHzを適用した。以下にアルゴリズムの詳細を示す。

- ① 図-8に示すように、衛星輝度温度データ(6GHz・19GHz・37GHz・89GHz)を読み取る。
- ② 6GHz輝度温度-放射率との関係より、6GHz輝度温度から放射率を選定する。

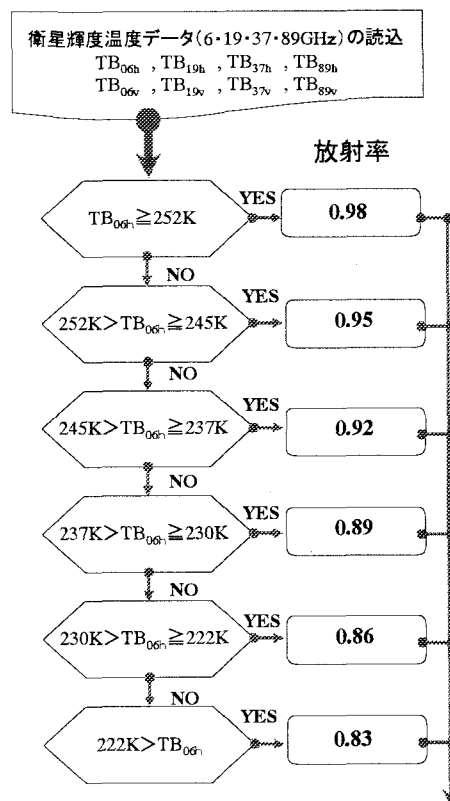


図-8 衛星アルゴリズム第1プロセス

- ③ 図-9に示すように、選定した放射率に対応する6種の積雪粒径(0.2~0.7mm)の各変換テーブルに19GHz・37GHz衛星輝度温度を入力し、粒径毎に積雪深・雪温を算定する。
- ④ 粒径毎に計算した89GHz輝度温度と積雪深・雪温からなる輝度温度変換テーブルへ粒径毎に算定した積雪深・雪温を入力し、89GHz輝度温度を算定する。
- ⑤ 89GHz衛星輝度温度と89GHz輝度温度計算値の差の絶対値($\Delta TB89$)を粒径毎に算定する。
- ⑥ 算定した粒径6種に対応する $\Delta TB89$ の最小値($\Delta TB89min$)を選択する。
- ⑦ 選択した $\Delta TB89min$ に対応する粒径を最適な積雪粒径として決定する。
- ⑧ 最適な積雪粒径に対応する積雪深・雪温を最適な積雪深・雪温に決定する。これにより、積雪深・雪温・積雪粒径が決定する。

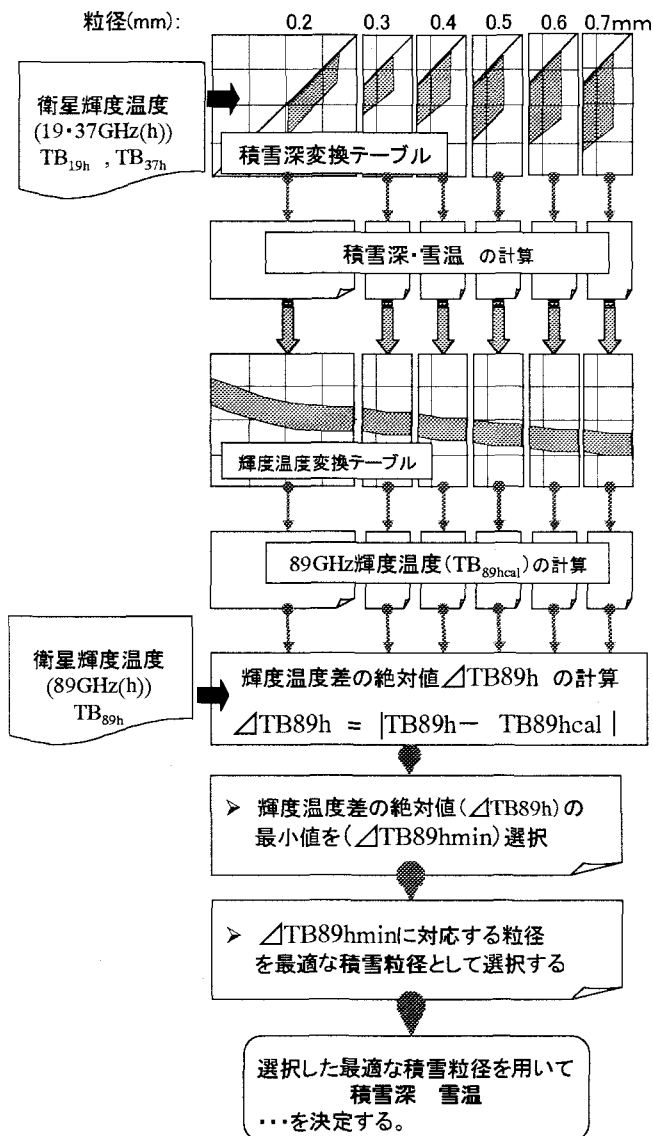


図-9 衛星アルゴリズム第2プロセス

4. 積雪量算定衛星アルゴリズムの評価

アルゴリズムの評価では、2002/10~2003/3の6ヶ月間を対象とし、人工衛星Aquaに搭載されたAMSР-Eの衛星輝度温度データを用い、積雪深の比較検証においては、北半球GTS積雪深データ75サイトの積雪深を用いた。

評価の指標としては、実測値と推定値との差の絶対値のサイト平均を用い、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。

その結果、4-StreamFast放射伝達モデルのみを用いた前アルゴリズムでは、適合性が良い地点が75サイト中50サイト(66%)しか示されなかったのに対し、Dense Media放射伝達モデルを導入した本アルゴリズムでは、75サイト中62サイト(83%)まで整合性の良好な結果が得られ、適合性における向上が示された。図-10・11に、その状況を表す実測値と推定値との相関図を示す。

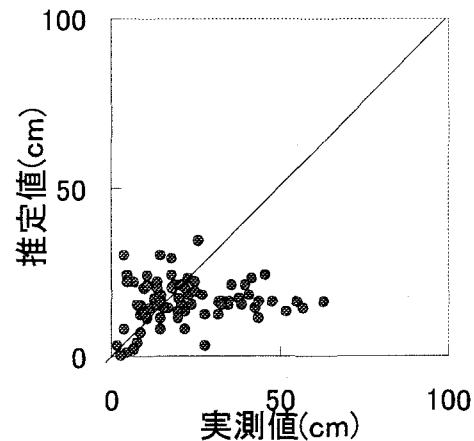


図-10 4-StreamFastモデルのみに基づく
前アルゴリズムにおける相関図

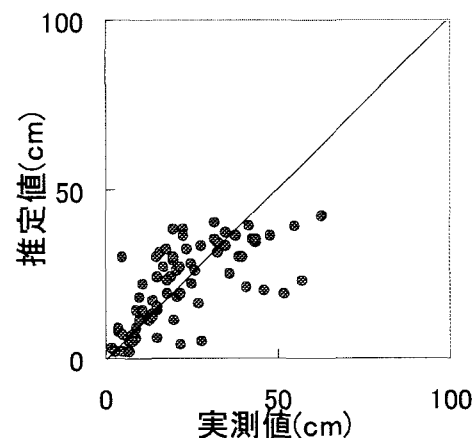


図-11 Dense Mediaモデルを導入した
本アルゴリズムにおける相関図

図-11に示す通り、本アルゴリズムの適用により、積雪が深いサイトの適合性が大きく向上したことが分かる。

また、積雪深の時系列変化を追った一例を図-12に示すが、前アルゴリズムでは、全く適合性が確認できなかった積雪深の深いサイトにおいて、本アルゴリズムを適用することにより、深い積雪であってもそれを追従するように推定がなされている状況が確認できる。

更に、積雪粒径については、積雪が浅い段階では、日中の雪面への日射による溶解や早朝の放射冷却・夜間の急激な冷却により生じる積雪層内の温度勾配によるざらめ化・しもざらめ化が浅い全層にわたり進行し積雪粒径が大きくなるが、積雪が深くなるに従いざらめ化・しもざらめ化が積雪深の急激な増大に追いつかず、上層の粒径は小さな状態のまま維持され、そのため積雪全層にわたる平均粒径が小さくなる状況が示されている。

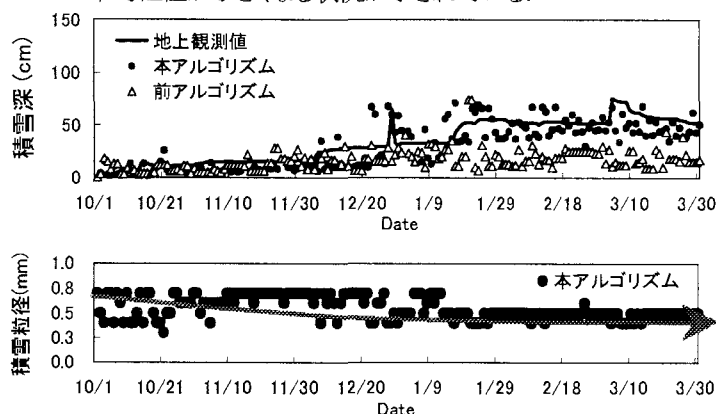


図-12 前アルゴリズム・本アルゴリズム積雪推定値と本アルゴリズムによる推定積雪粒径

また、本研究の最終目標は、地球全体の積雪状態を定量的に把握することにあるため、前述の適合性の評価指標を用い、前アルゴリズムと本アルゴリズムの適合性を北半球全域を対象に比較した。その結果を図-13に示す。前アルゴリズムでは適合性の悪い(●)地点が多く見られる。しかし、本アルゴリズムを適用することにより多くの地点で適合性の良い(▲)に変化し、適合性が向上した状況を確認することができる。

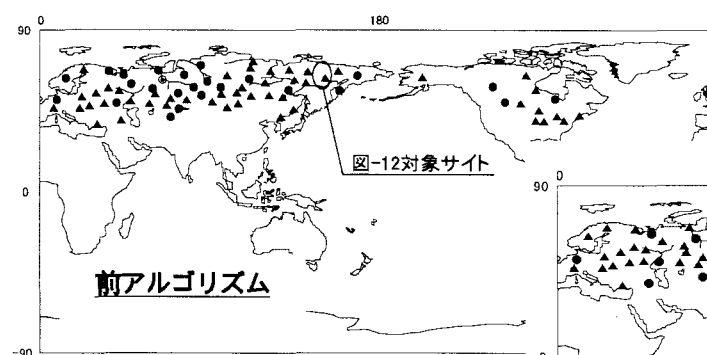
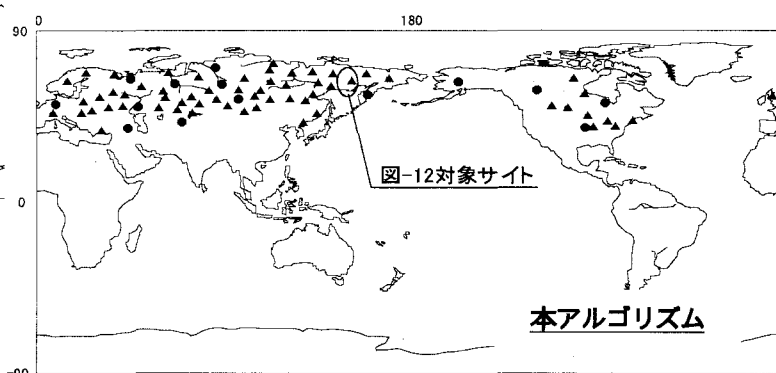


図-13 整合性の判断結果とその分布

- ▲：適合性の良い地点
- ：適合性の悪い地点



5. 結論

- 1) 本研究により、4周波数の衛星観測データのみから積雪深・雪温・積雪粒径を自動的に推定するマイクロ波放射伝達理論に基づく衛星アルゴリズムが提案された。
- 2) 北半球GTS積雪深データとの比較検証により、75サイト中62サイト(83%)において、適合性の良好な推定結果が得られた。

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)および宇宙航空研究開発機構(JAXA) AMSR/AMSR-E検証実験の一環として実施したものである。また科学技術振興事業団戦略的創造研究(水の循環系モデリングと利用システム)および科学技術振興調整費(先導的研究)の支援を受けた。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.
- 5) Leung Tsang: *Dense media radiative transfer theory for dense discrete random media with particles of multiple sizes and permittivities*, In Dielectric Properties of Heterogenous Materials, chapter 5. Elsevier Science, 1992.
- 6) 筒井浩行, 小池俊雄, 玉川勝徳, 藤井秀幸: 積雪粒径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, 水工学論文集, 第48巻, pp. 247-252, 2004.

(2004.9.30 受付)