

## 論文の内容の要旨

### 高周波数マイクロ波衛星データを用いた雪粒子径評価手法 に基づく積雪量推定衛星アルゴリズムの開発

筒井 浩行

積雪の水循環・気候変動に対する影響を理解するためには、全球規模で時空間的、且つ連続的な積雪量を定量的に把握する必要があるが、人工衛星を用いたマイクロ波リモートセンシング技術は、それを実現する上で極めて有用である。故に、多くの研究者により積雪を対象としたマイクロ波リモートセンシングの中核をなす積雪量推定衛星アルゴリズム(以下、アルゴリズム)が開発され続けている。しかし、アルゴリズムの発展過程において問題が発生し、現在でもなお、その解決策が模索されている。本論文では、その問題に対して対策を講じ、完全な乾雪を対象とした新たなアルゴリズムの開発を行った。現在のアルゴリズムにおける問題は大きく次の3点に分けられる。

- 1) 雪粒子の成長に伴う影響に伴う問題。
- 2) 不完全な体積散乱評価手法に伴う問題。
- 3) 森林・湿雪による影響に伴う問題。

第1の問題は、マイクロ波に基づく積雪量の推定に大きな影響を与える雪粒子径の評価に関する課題である。自然界の雪粒子は、焼結作用、日射と夜間の冷え込みによる溶解と再凍結、積雪層における温度勾配、昇華作用などにより時間の経過に伴い成長する。しかし、これまでのアルゴリズムは、雪粒子による体積散乱の影響を小さく抑えるために雪粒子径を小さな一定の粒径に調節し仮定せざるを得ない状況にあった。

これは、多くの密に詰まった雪粒子が互いに干渉し合う実際の積雪に対して、これまでのアルゴリズムが、雪粒子が個々に独立して存在することを前提とした理論の下で、積雪層における散乱による減衰効果を過度に評価してしまうことが原因である。これが第2の問題に相当する。

第3の問題は、森林と湿雪による影響に伴う問題である。アルゴリズムでは積雪量を2周波数の輝度温度差より求める。しかし森林域に積雪が形成される場合、積雪による輝度温度差を得たとしても、輝度温度差の極めて小さな森林からの射出により打ち消され、アルゴリズムによる積雪量推定が阻害される。また水からの輝度温度は周波数が高い程大きくなるため、湿雪では高周波数の輝度温度が高まり低周波数との輝度温度の差が減少する。故に輝度温度差より積雪量を求めるアルゴリズムの効力を無にする。

本論文では、まず第2の問題を解決するために新たなマイクロ波放射伝達モデルを考案した。従来のマイクロ波放射伝達モデルにおいて制限されていた雪粒子径・周波数の適用が可能であり、将来的に大気の放射伝達も考えることのできる4 Stream fast 放射伝達モデルを導入した上で多くの密に詰まった雪粒子が互いに干渉し合う実際の積雪の体積散乱を再現することのできる Dense media 放射伝達モデル(DMRT)を導入し、両モデルを組み合わせた新たなマイクロ波放射伝達モデルを考案した。これにより従来のアルゴリズムのように積雪における体積散乱の影響を小さく抑えるために雪粒

子径を小さい粒径に調節すること無く、実際の積雪における体積散乱を評価できるようになった。また同時に、これまでは適切な雪粒子による体積散乱を評価することができず、適用可能な雪粒子径に制限を受けていたが故に適用することができなかつた高周波数を適用できる環境を整えたことになる。

そこで、本論文では、第 1 の問題の解決のために、雪粒子による体積散乱を評価する上で敏感な高周波数 89GHz を適用し、89GHz 輝度温度の衛星観測値とマイクロ波放射伝達モデルによる輝度温度推定値の差の絶対値を 0.4mm から 0.9mm まで仮定した 6 種類の雪粒子径毎に求め、その値が最小となる雪粒子径を最適な粒径として選定する手法を考案した。当手法の利点は、人工衛星によりリアルタイムに観測されるある瞬間、ある地域(ピクセル)の輝度温度データのみから地域や時間の異なりによる時空間的な変化に影響されること無く雪粒子径を評価できることにあり、本論文におけるアルゴリズムの大きな特色と言える。

また選定された雪粒子径を設定した条件でマイクロ波放射伝達モデルに 1 から 200cm まで積雪深を変化させ、223 から 273K まで変化させた雪温を入力して 19・37GHz の輝度温度を計算し、積雪深・雪温と 19・37GHz の輝度温度から成る変換テーブル(lookup table と称する)を作成した。この lookup table に 19・37GHz の輝度温度衛星データを入力することにより積雪深と雪温を推定するアルゴリズムを構築した。

しかし、2002 年 10 月から 2003 年 3 月までの期間を対象とし、宇宙航空研究開発機構提供の AMSR-E 輝度温度衛星データと北半球 GTS 積雪深データとのマッチアップデータを用い、北半球を対象とした積雪深の推定を試行したが、この段階で新たな問題に直面した。本論文のアルゴリズムは、前述の lookup table の範囲内の 19・37GHz 衛星輝度温度データを lookup table に入力することにより積雪深と雪温を推定するため、両衛星輝度温度データが table 内に収まっていることが大前提となる。しかし、北半球の多種多様な地表面状態からの放射は、19・37GHz 衛星輝度温度データの広範囲な分布を生み、1 つのテーブルで北半球全域の衛星輝度温度分布をカバーできないことが分かった。そこで、積雪層を透過し土壌まで検知可能な長い波長の 6GHz により土壌まで評価された仮想射出を評価し 4 段階にレベル分けした。それらに相当する 4 種の lookup table を用い北半球全域の広範囲な衛星輝度温度分布をカバーすることにより北半球のあらゆる地域の積雪深を推定できる手法を考案しアルゴリズムに導入した。この手法の利点は、人工衛星によりリアルタイムに観測される 1 周波数(6GHz)の衛星輝度温度データのみで積雪下の地表面特性を評価し、北半球のあらゆる 19・37GHz 衛星輝度温度を積雪量へ変換できる lookup table を自動的に選定できることにあり、本論文における積雪量推定衛星アルゴリズムの大きな特色と言える。

更に、本論文では、完全な乾雪に対する積雪量の推定限界を見極めることを目標とし、第 3 課題である森林・湿雪の影響を受ける積雪は時空間的に除外する方針とした。

このように本論文における基本方針とアルゴリズムの開発を行った上で、開発したアルゴリズムの有効性を確認するために、2004 年 12 月から 2005 年 3 月にかけて札幌に位置する裸地の露場にて、地上マイクロ波放射計を用いた地上積雪観測を実施した。湿雪、濡れ雪データを除外した純粋な乾雪を対象にアルゴリズムによる積雪深の推定を行った結果、良好な推定結果を得、アルゴリズムの有効性を確認した。

アルゴリズムの完全な乾雪に対する有効性の確認に引き続き、北半球を対象とした積雪深の再推定、並びに地上観測積雪深データとの比較を通じた検証を行なった。まず、検証に先立ち、ISLSCP の土地被服情報を利用し 81 の北半球 GTS 地上観測ステーションの内、マイクロ波領域において多大な影響を与える広葉樹を含む森林帯の 23 サイトを除外した 58 サイトを対象に本論文による改良を施す前の従来のアルゴリズムと本論文におけるアルゴリズムにより積雪深を

推定し比較を行なった。

対象期間の全日データを対象とした推定積雪深と地上観測積雪深との比較の結果、従来のアルゴリズムでは **30cm** 程度の整合性しか確認できなかったが、本論文のアルゴリズムを適用することによりその倍以上の整合性を確認することができた。

また各サイトにおける対象期間の平均を用いた比較では、推定積雪深と地上観測積雪深との差の絶対値を判断基準に設け、**20cm** を基準に整合性の良否を判断した結果、従来のアルゴリズムでは整合性の悪いサイト数が全体の **33%**であったのに対し、本論文のアルゴリズムを用いることにより、その半数以下の **14%**にまで減少させることができた。

更に、対象期間の全日データと対象期間を各サイトで平均したデータで、推定積雪深と地上観測積雪深との差の絶対値の平均値と **RMSE** により評価した結果、従来アルゴリズムの **RMSE19.4cm** であるのに対し、本論文におけるアルゴリズムでは **13.8cm** となり、本論文のアルゴリズムによる積雪深推定精度の向上を確認することができた。

このように本論文のアルゴリズムにより積雪深の推定精度は向上した。しかし、それでもなお、基準の **20cm** を越える推定精度の悪い地点が存在していたため、それらの地点を対象に湿雪データの除外を考え、**Sun et al(1996)**の湿雪判定手法により湿雪・濡れ雪の影響を受けているデータを除外した結果、全データを対象とした場合に **13.8cm** であった **RMSE** が **11.8cm** まで向上することが分かった。この結果より、本論文における積雪量推定衛星アルゴリズムが、乾雪に対して有効なアルゴリズムであることを確認した。

このように本論文では、人工衛星によりリアルタイムに観測される衛星輝度温度データのみから自動的に乾雪における最適な雪粒子径を選定し積雪量を推定することのできる積雪量推定衛星アルゴリズムを構築し、その有効性と限界を確認した。この確認は、今後、森林や湿雪に対策を講じる上で役立ち、同時にマイクロ波リモートセンシングにおける陸域水分量の推定精度の向上に寄与するものと考えている。