チベット高原におけるAVNIR-2・MODISに基づく 積雪深の評価手法の考案

DEVISING OF THE EVALUATION METHOD FOR SNOW DEPTH OVER THE
TIBETAN PLATEAU BASED ON AVNIR-2 AND MODIS

筒井浩行¹・小池俊雄²

Hiroyuki TSUTSUI and Toshio KOIKE

¹正会員 博(工) 東京大学大学院工学系特任助教 (〒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)

Seasonal frozen ground area on the Tibetan plateau has particular land surface condition with frozen ground and patchy snow distribution. The existing satellite microwave remote sensing was therefore unable to estimate the snow quantity exactly. An evaluation method of snow area proportion based on AVNIR-2 and MODIS over the seasonal frozen ground area on the Tibetan plateau was therefore devised in this study, and it was introduced to estimated snow depth based on Tsutsui and Koike (2012)'s snow estimation method. In the result, we were able to compare the estimated snow depth with the in situ snow depth data, and the relatively good agreement was recognized. Simultaneously the availability of the Tsutsui and Koike (2012)'s snow estimation method and the evaluation method of snow area proportion based on AVNIR-2 and MODIS was recognized.

Key Words : snow, frozen ground, AVNIR-2, MODIS, Tibetan plateau, passive microwave remote sensing

1. はじめに

受動型マイクロ波衛星リモートセンシングは、全球スケールで、時空間的に連続した積雪深を定量観測するために、多くの研究者により研究し続けられている。我々もAMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System)により観測されたマイクロ波輝度温度に基づき積雪深を推定する積雪衛星アルゴリズムを開発しており(Tsutsui et al.¹⁾)、現在も積雪深の推定に大きな影響を及ぼす雪粒子サイズ・バイオマス・雲水・凍結土壌の評価手法の検討を通じ、その高度化を図っている。本研究では、これら4因子の内、凍結土壌の影響評価に着目した。マイクロ波は物質の誘電特性に強く依存し、また氷粒子と土粒子の誘電特性はほぼ等しい。それ故に、凍土地帯であるモンゴル・シベリアにおいてAMSR-E積雪水量標準プロダクトにより推定される積雪水量が過大に評価されることが杉浦ら²⁾により報告されている。更にこの過大推定は、我々の積雪衛星アルゴリズムの積雪深推定結果にも現れている。凍土は、主に北極寒冷圏やチベット高原に分布している。そこで筒井ら³⁾は、北極寒冷圏に位置するヤクーツクを対象に、凍結土壌層を考慮したマイクロ波放射伝達モデルを開発し、積雪衛星ア

ルゴリズムを導入することにより積雪深の推定精度を向上させた。北極寒冷圏やチベット高原の山岳域は、冬期間、凍土が一様な乾雪に覆われる。しかし同じチベット高原でも標高の低い季節凍土域では、まばらに分布する積雪により一部の凍結土壌は覆われるが、その他は露出する複雑な地表特性を持つ。そのため北極寒冷圏やクーツクにおいて凍結土壌層が導入されたマイクロ波放射伝達モデルを用いるだけでは、正確な積雪深を推定することができない。そこでTsutsui and Koike⁴⁾は、チベット高原季節凍土域に位置するBJ地上観測ステーション(31°27' N, 92°02' E, 標高4,490m)を対象に、凍結土壌層が導入されたマイクロ波放射伝達モデルとマイクロ波衛星データに基づく明瞭な凍結土壌シグナル・明瞭な積雪シグナルの検知手法を併用した積雪深推定手法を開発した。そしてBJ地上観測ステーションを対象にポイントスケールで地上観測積雪深データとの検証を行った。しかし地上観測ステーションのフェンスにより雪が吹き溜まり、地上観測積雪深データがステーション周囲の積雪深よりも過大に計測され、ステーション周囲の地表面状態(まばらな積雪分布)とは全く異なっていたために推定値と観測値をそのまま比較することができなかった。そこでBJ地上観測ステーションにおける現地観測を通じて、

降雪により雪が被覆された後、消失するまでの積雪深の減少割合を計測した。そして、この減少割合を過大に計測されたBJ地上観測ステーションの地上観測積雪深に乗ずることで、ステーション周囲の地表面状態(まばらな積雪分布)に対応するよう換算された地上観測積雪深を計算した。更に、それを推定値と比較した結果、両者が比較的良好な一致を見せることを確認した。しかし本手法は、BJ地上観測ステーションのみを対象とし、また現地観測に基づく積雪減少割合により地上観測データを換算することによって、はじめて得られる結果であった。

そこで本研究では、第2章においてBJ地上観測ステーションのみを対象としたTsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法の概要を記述した上、第3章においてポイントスケールでしか適用していなかったTsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法をチベット高原全域に展開して積雪深を推定する。このように推定された積雪深の妥当性は、地上観測積雪深と比較により検証することができる。しかしTsutsui and Koike⁴⁾において確認されたように、地上観測ステーションにおいて計測されている積雪深は、吹き溜まりにより過大に計測されているため、推定積雪深をそのまま地上観測積雪深と比較することはできない。そこで第4章において、地上観測ステーション以外のチベット高原全域に広がるまばらな積雪分布を表す積雪被覆割合をAdvanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2)の高解像度可視近赤外衛星データとMODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)を用いて開発、提案する。第5章では、第4章において提案した積雪面積割合の逆数を第3章において推定した積雪深に乗じて、過大に計測された地上観測ステーションの地上観測積雪深と1対1で比較することのできる推定積雪深にする。そして、それを地上観測ステーションの地上観測積雪深と比較し、本研究において提案するAVNIR-2・MODISに基づく積雪面積割合とTsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法のチベット高原全域展開の有効性を検証する。なおチベット高原季節凍土域における地上観測積雪深データは非常に少ないが、対象とする期間に積雪深が計測されたBJ地上観測ステーション・ANNIサイト・NPAMサイトにおける地上観測積雪深を用いた。なおマイクロ波で直接観測できるのは積雪相当水量であるが、地上観測データとして利用できるのは積雪深が主であるため、密度を仮定して求めた積雪深さを対象としている。

2. Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法の概要

(1) 凍結土壌層が考慮されたマイクロ波放射伝達モデル

Tsutsui et al.¹⁾の積雪衛星アルゴリズムに用いられているマイクロ波放射伝達モデルは、乾雪と通常土壌から成るが、Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法には、それに加えて、乾雪と凍結土壌から成るモデルが併用された。通常土壌は、誘電率 ϵ_{a+w} を持つ水と空気が混在したバックグラウンドの中に誘電率 ϵ_{ss} を持つ土粒子が密に詰まっ

ている。

$$\epsilon_{a+w} = v \cdot [w_c \cdot \epsilon_w + (1-w_c) \cdot \epsilon_a] \quad (1)$$

$$\epsilon_{ss} = 4.7 - 0.0001i \quad (2)$$

ここで v は水と空気の体積、 w_c は土壌水分の占める割合、 ϵ_a は氷・空気の複素比誘電率を示している。それに対して、凍結土壌では液体水が全て凍結し、氷と空気が混在したバックグラウンド(ϵ_{a+ice})の中に土粒子が密に詰まった状態になる。

$$\epsilon_{a+ice} = v \cdot [i_c \cdot \epsilon_{ice} + (1-i_c) \cdot \epsilon_a] \quad (3)$$

ここで i_c は氷の複素比誘電率であり、 i_c は、氷の占める割合であるが、BJ地上観測ステーションにおける微気象観測データとAMSR-Eマイクロ波輝度温度データを入力値として、凍土データ同化システム⁵⁾によりシミュレーションした結果である20%が用いられている。

(2) 明瞭な凍結土壌・積雪シグナルの検知手法

通常の低地では、積雪深を検知する上で衛星マイクロ波輝度温度19GHz・37GHzが有効である。しかしTsutsui and Koike⁴⁾は、チベット高原において19GHz・37GHz のみによる乾雪と凍結土壌の区別が難しく、明瞭な凍結土壌と明瞭な積雪を衛星マイクロ波センサにより検知できないことを確認した。そこで明瞭な凍結土壌のシグナルを6GHzと19GHzとの比(式(4))により検知した。更に明瞭な積雪のシグナルを19GHz・37GHzと雪粒子による体積散乱を検知する上で有効な90GHzを用い、その高周波側と低周波側との比(式(5))により検知した。なおAMSR-Eマイクロ波輝度温度データとしては、全ての周波数の観測データがグリッド化されたAMSR-E L1Bプロダクト(宇宙航空研究開発機構)を用いた。

$$Tb_{6v} \cdot Tb_{19v}^{-1} > 1 \quad (4)$$

$$(Tb_{37v} \cdot Tb_{90v}^{-1}) \cdot (Tb_{19v} \cdot Tb_{37v}^{-1})^{-1} > 1 \quad (5)$$

ここに Tb_f : 周波数 f の輝度温度(垂直偏波) [K]
 f : 周波数 6,19,37,90 [GHz]

(3) チベット高原を対象とした積雪深推定手法

Tsutsui and Koike⁴⁾は、乾雪・通常土壌、乾雪・凍結土壌マイクロ波放射伝達モデルおよび明瞭な凍結土壌・積雪シグナルの検知手法を組み合わせる図-1に示すBJ地上観測ステーションを対象とした積雪深推定手法を開発した。

図-1. Tsutsui and Koike⁴⁾によるBJ地上観測ステーションを対象とした積雪深推定手法

3. Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法のチベット高原全域への展開

Tsutsui and Koike⁴⁾では、BJ地上観測ステーションを対象としたポイントスケールの積雪深は推定したが、チベット高原全域に展開した積雪深分布を推定していなかった。そこでAMSR-Eの18.7GHz・36.5GHz(水平偏波)輝度温度データを入力値とし、Tsutsui et al.¹⁾積雪衛星アルゴリズムをそのまま適用した場合とTsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法を適用した場合の2002年12月1～6日、2003年1月1～6日および2003年2月1～6日の平均積雪深をチベット高原全域にわたり推定した(図-2)。Tsutsui et al.¹⁾積雪衛星アルゴリズムをそのまま適用した場合は、チベット高原のほぼ全域が積雪により覆われているが、Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法を適用した場合、山岳域に深い積雪が分布し、標高の低い季節凍土域に、まばらな浅い積雪が分布されることが分かった。

図-2. Tsutsui et al.¹⁾積雪衛星アルゴリズムによるチベット高原積雪深の推定結果(a-1,b-1,c-1)とTsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法によるチベット高原積雪深の推定結果(a-2,b-

2,c-2) : (a-1,2)2002年12月1～6日の平均, (b-1,2)2003年1月1～6日の平均, (c-1,2)2003年2月1～6日の平均

4. 高解像度可視近赤外衛星データに基づいたチベット高原積雪分布評価手法の考案

(1) 評価手法検討の必要性

前章において、Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法をチベット高原全域に展開して積雪深を推定した。推定された積雪深の妥当性は、地上観測積雪深と比較することで検証することができる。しかしチベット高原の地上観測ステーションでは、ステーションフェンスにより雪が吹き溜まり、地上観測積雪深が過大に観測される(図-3)。一方、その周囲は、一時的に地表面が積雪で覆われても、高原特有の強風により直ぐにまばらな積雪分布が形成される(図-4)。AMSR-Eのフットプリントサイズは、積雪深評価に用いられる19GHzで約30km、37GHzで約15kmであるため、AMSR-Eは、地上観測ステーションの吹き溜まった積雪ではなく、まばらな積雪分布を観測する。故に、推定積雪深をそのまま地上観測ステーションの地上観測積雪深と比較することはできない。

そこで本研究では、地上観測ステーション以外のチベット高原全域に広がるまばらな積雪分布を表す積雪被覆割合をAVNIR-2の高解像度可視近赤外衛星データとMODISを併用して求める手法を検討した。

図-3. チベット高原季節凍土域に位置するBJステーション(31°27'N, 92°02'E, 標高4,490m)における積雪被覆状況[2003年2月撮影]

図-4. チベット高原季節凍土域に位置するBJステーション周囲の積雪分布状況[2003年2月撮影]

(2) チベット高原全域を対象とした積雪被覆割合の検討
 積雪面積割合の衛星プロダクトとして、MODISの16 days averaged snow cover productsが代表的であるが、空間分解能が0.05°(約5.6km)であり、チベット高原に広がるまばらな積雪分布を評価することができない。そこで10mに満たないパッチ状の積雪までは検知できないまでも、MODISよりも高い空間分解能(約10m)を持つAVNIR-2高解像度可視近赤外衛星データ併用を考えた。図-5に示すように、MODISデータ1×1ピクセルは、AVNIR-2データ560×560ピクセルに相当する。そこでAVNIR-2データがDN値で250を越えるピクセルを雪面と考え、ピクセル数をカウントし、560×560ピクセル内に占める積雪の割合(%)を計算した。なおAVNIR-2データのband1,2,4を組み合わせることにより裸地面と雪面を視覚的に確認することができたため明白な裸地面と雪面の境界を示すDN値を調査し、閾値として250を設定した。そして2007年1月4日・26日、2月19日、3月8日のAVNIR-2観測データを用い、150地点を対象にMODISデータとの対応を調査した。なお150地点は、所有するAVNIR-2画像を確認し、雲による地表面の被覆や河川・湖などの氷面が混入することのない地点を可能な限り選定したものである。またサンプル数としての150地点が妥当とは考えておらず、今後もAVNIR-2データを入手し、サンプリングを継続したいと考えている。本研究では、150地点のサンプリングを行なった時点で、ある程度の関連性を確認することができたため、第1歩として、その関連性に基づく調査を行なった。

次に、AVNIR-2の1～4の各bandにより算出した積雪面積割合(%)とMODIS 16 days averaged snow cover productsの積雪面積割合(%)を比較した(図-6)。その結果、MODIS積雪面積割合には、全く関連性が見られないことが分かった。そこでAVNIR-2とMODISの各bandの観測波長を調べ、AVNIR-2のband1とMODISのband3、AVNIR-2のband2とMODISのband4、AVNIR-2のband3とMODISのband1、AVNIR-2のband4とMODISのband2が対応していることを確認した(表-1)。

図-5. AVNIR-2・MODISの対応を考慮した積雪面積割合の算定

図-6. AVNIR-2(band1～4)により算出した積雪面積割合(%)とMODIS 16 days averaged snow cover productsの積雪面積割合(%)との比較

表-1. AVNIR-2とMODISとの観測波長・bandの対応

Wave length[μm]	AVNIR-2	MODIS
0.42		
0.43		
0.44		
0.45		
0.46		
0.47	band1	band3
0.48		
0.49		
0.50		
0.51		
0.52		
0.53		
0.54		
0.55	band2	band4
0.56		
0.57		
0.58		
0.59		
0.60		
0.61		
0.62		
0.63	band3	band1
0.64		
0.65		
0.66		
0.67		
0.68		
0.69		
0.70		
0.71		
0.72		
0.73		
0.74		
0.75		
0.76		
0.77		
0.78		
0.79		
0.80		
0.81		
0.82		
0.83		
0.84		
0.85	band4	band2
0.86		
0.87		
0.88		
0.89		

更に、これらの対応毎にMODIS 地表面反射輝度(空間分解能5.6km)とAVNIR-2の各bandにより算出した積雪面積割合(%)との対応を調べた(図-7)。なお、この時のサンプル数は図-6と同じく150地点である。その結果、AVNIR-2のband4とMODISのband2との間に相関が見られることを確認した。

図-7．AVNIR-2(band1～4)により算出した積雪面積割合(%)とMODIS地表面反射輝度(band1～4)の積雪面積割合(%)との比較

次に、AVNIR-2 band4に基づく積雪面積割合とMODIS band2地表面反射輝度に着目し、両者の近似式(式(6))を求めた。

$$RSP = \alpha \cdot R + \beta \quad (6)$$

適用範囲 $2,095 < R < 8,130$

ここに、 RSP ：積雪面積割合(%)
 R ：MODIS band2地表面反射輝度
 α ：係数 $\alpha = 1.45 \times 10^{-2}$
 $\beta = -29.447$

そして、この近似式にMODIS band2地表面反射輝度データを入力することによりAVNIR-2 band4に基づいた積雪面積割合(%)を算定する手法を考案した。本手法によりチベット高原全域を対象に積雪面積割合(%)を算定した事例(2002年12月2日)を図-8に示す。MODIS地表面反射輝度は、可視・近赤外データであるため雲(灰色)による障害は抑え切れないが、雲に覆われないエリアにおいては積雪面積割合(%)が算定されていることが分かる。

図-8．2002年12月2日のAVNIR-2・MODIS積雪面積割合(%)

5. 推定積雪深の検証

第3章において、Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法によりチベット高原全域の積雪深を推定した。しかし、その有効性を検証するためには、それをそのままステーションフェンスにより過大に計測されている地上観測ステーションの地上観測積雪深と比較することはできない。そこで推定積雪深(SD_{est})にAVNIR-2・MODISに基づく積雪面積割合(RSP %)の逆数を乗じ、地上観測積雪深と1対1で比較することのできる推定積雪深(RSD_{est})を計算した(式(7))。その上で地上観測ステーションにおける地上観測積雪深と比較した。

$$RSD_{est} = SD_{est} \times \frac{100(\%)}{RSP(\%)} \quad (7)$$

ここに、

RSD_{est} ：積雪面積割合が導入された推定積雪深 [cm]

SD_{est} ：Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法により推定された積雪深 [cm]

RSP ：積雪面積割合 [%]

チベット高原において積雪深が観測されている地上観測サイトは非常に少ない。しかし対象とした期間に積雪深が計測されたBJ地上観測ステーション、ANNIサイト(31°25' N, 92°17' E)、NAPMサイト(31°92' N, 92°70' E)を対象に、また2002年12月1～6日、2003年1月1～6日および2003年2月1～6日の各期間の平均を用いて、地上観測積雪深とAVNIR-2・MODIS積雪面積割合が導入された推定積雪深を比較した。その結果を図-9に示す。濃い雲が存在したと考えられるが、BJとANNIの2002年1月におけるAVNIR-2・MODISの積雪面積割合は、MODIS地表面反射輝度(R)が、近似式(式(6))適用範囲の上限を超えたため算定できなかった。しかし、総合的に見ると、積雪の無いケースも適切に推定されており、観測値と推定値が、比較的良好に整合していることが分かる。なおルックアップテーブルが1～200cmの積雪深に基づき作成されているためにマイクロ波データに基づく積雪衛星アルゴリズムは、1cm未満の積雪深を0cmとして推定する。それに対して可視・近赤外データを観測するMODIS・AVNIR-2は、1cm未満の非常に浅い積雪であっても雪に覆われていれば、積雪エリアを検知する。この乖離が、BJ地上観測ステーションの2002年12月と2003年2月において、積雪面積割合が0%にもかかわらず、補正後の積雪深が0cmになった原因と考えられる。故に、マイクロ波・可視近赤外の両方による積雪の評価が重要であると言える。

図-9. BJステーション・ANNIサイト・NPAMサイトにおける地上観測積雪深と推定積雪深との比較：(上段)地上観測積雪深とTsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法による推定積雪深(cm)との比較，(中段)AVNIR-2・MODIS積雪面積割合(%)，(下段)地上観測積雪深とAVNIR-2・MODIS積雪面積割合が導入された推定積雪深との比較

6. 結論

本研究では，Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法によりチベット高原全域の積雪深分布を推定した．更にAVNIR-2高解像度可視近赤外衛星データ・MODISデータに基づき，チベット高原全域を対象とすることのできる積雪面積割合算定手法を開発，提案した．そして過大に計測された地上観測積雪深と1対1で比較することのできる推定積雪深を求めた．その上でBJ地上観測ステーション・ANNIサイト・NPAMサイトを対象にTsutsui and

Koike⁴⁾の積雪深推定手法により推定された積雪深の検証を行った．その結果，観測値と推定値との間に比較的良好な整合を確認し，Tsutsui and Koike⁴⁾の積雪深推定手法の高原全域への展開と本研究において提案したAVNIR-2・MODIS積雪面積割合算定手法の有効性を確認することができた．

謝辞

本研究を実施するにあたり，文部科学省「地球観測データ統融合連携研究機構 地球環境情報統融合プログラム(DIAS)」，宇宙航空研究開発機構(JAXA)「地球環境変動観測ミッション(GCOM)」の支援を受けた．ここに記して深く謝意を表す．

参考文献

- 1) Tsutsui H., Koike T. and Graf T.: *Development of a dry-snow satellite algorithm and validation at the CEOP Reference Site in Yakutsk.*, Journal of the Meteorological Society of Japan, 85A, pp.417-438, 2007.
- 2) 杉浦幸之助，筒井浩行，青木輝夫，大畑哲夫，小池俊雄，兒玉裕二：モンゴル・シベリア・札幌におけるAMSR-E積雪水量プロダクトの地上検証，第32回極域気水圏シンポジウム，講演要旨集，pp.22, 2009.
- 3) 筒井浩行・小池俊雄・Xin LI・Rui JIN・Hui LU: マイクロ波放射伝達モデルへの凍結土壌層の導入と積雪衛星アルゴリズムの改良. 水工学論文集, 第54巻, pp.415-420, 2010.
- 4) Hiroyuki TSUTSUI and Toshio KOIKE: *Development of Snow Retrieval Algorithm Using AMSR-E for the BJ Ground-Based Station on Seasonally Frozen Ground at Low Altitude on the Tibetan Plateau*, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90C, pp.99-112, 2012.
- 5) Jin, R.: Soil Frozen/Thawed Status Detection by Using SSM/I and Active Layer Data Assimilation System, *Doctoral Dissertation (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, China Academy of Sciences)*, 2007.

(2012.9.30受付)