

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

APPLICATION OF THE FROZEN SOIL LAYER INTO THE MICRO WAVE RADIATIVE TRANSFER MODEL AND IMPROVEMENT OF THE SATELLITE RETRIEVAL ALGORITHM FOR DRY SNOW

筒井浩行¹・小池俊雄²・Xin LI³・Rui JIN⁴・Hui LU⁵

Hiroyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE, Xin LI, Rui JIN and Hui LU

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)

³非会員 工博 Professor, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences. (260 Donggang West Road, Lanzhou 730000, Gansu Province, China)

⁴非会員 工博 Researcher, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences. (260 Donggang West Road, Lanzhou 730000, Gansu Province, China)

⁵正会員 博(工) 東京大学大学院工学系特任研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)

A permittivity of an ice particle is nearly identical to a soil particle [a permittivity of ice particle is 3 and a soil particle is 4]. Hence, an artificial-satellite microwave radiometer detects the frozen/dryness soil as dryness snow and the microwave radiative transfer model and satellite retrieval algorithm using the satellite microwave data estimates the snow depth excessively. In this paper, the 3 layer model which introduced the frozen soil layer into the 2 layer microwave radiative transfer model which consists of dryness snow and soil was developed. Furthermore, the satellite retrieval algorithm for dryness snow which combined the 2 layer model and the 3 layer model was developed. As a consequence, we succeeded in estimation of the snow depth which canceled the influence by the frozen/dryness soil in the CEOP reference site - siberia Taiaga.

Key Words : *microwave radiative transfer theory, snow, frozen soil, cryosphere*

1. はじめに

積雪は、気候メモリー（水の貯留効果による時間のずれを伴う関係）やテレコネクション（遠隔結合：大気大循環の偏差場によって遠く離れた場所における大気同期して変動する現象）を介し、全球規模の水循環システムへ影響を及ぼすと言われている。この積雪による水循環システムへの影響を理解するためには、全球規模で時空間的な連続性を保ちながら積雪量を定量的に計測する必要がある。Kelly¹⁾は人工衛星AQUAに搭載された受動型マイクロ波放射計であるAdvanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System(AMSR-E)により観測されるマイクロ波輝度温度データから積雪量を推定する積雪衛星アルゴリズムを開発し、時空間的に連続した全球にわたる積雪量の推定を実現した。更にTsutsui *et. al.*²⁾もまた積雪衛星アルゴリズムの開発研究を進めている。このような積雪衛星アルゴリズムによりマイクロ波衛星

データから積雪量を推定する際、雪粒子の成長・森林・湿雪・積雪内に形成される氷板は、推定精度を低下させる原因となる。故にKelly¹⁾・Tsutsui *et. al.*²⁾の両積雪衛星アルゴリズムには、雪粒子の成長や森林に対する対策が施されている。しかしながら湿雪や氷板の形成の無い高緯度寒冷圏の浅く乾燥した積雪を対象としたとしても解消することのできない推定誤差が生じているのが現状である。杉浦ら³⁾は、モンゴル・シベリア・札幌を対象にKelly¹⁾によるAMSR-E積雪水量プロダクトにより推定された積雪水量と地上観測に基づく積雪水量との比較検証を行い、凍土地帯であるモンゴル・シベリアにおいて本プロダクトにより推定された積雪水量が過大に推定される結果を示している。更に雪粒子と土粒子の誘電特性はほぼ等しく、マイクロ波が、その誘電特性に大きく依存することから衛星マイクロ波放射計が、積雪とほぼ同じ誘電特性を持つ積雪下の凍結土壌を積雪として誤検知してしまっていることが原因ではないかと考察している。

これは誤検知されたマイクロ波輝度温度が凍結土壌を考慮していないマイクロ波放射伝達モデル・積雪衛星アルゴリズムにより評価されるために生じた現象であると考えられる．故にマイクロ波放射伝達モデルに凍結土壌層を導入することにより本現象について検証することができるが、これまでそれが検討された研究例は無い．

そこで本論文では、推定精度に影響を及ぼす雪粒子の成長と森林に対する対策が施されたTsutsui *et. al.*²⁾ (以下、Tsutsuiと略記する)の積雪マイクロ波放射伝達モデルおよび積雪衛星アルゴリズムに基づきモデルシミュレーションを行い、以下の2点について検討する．なお氷板の形成による影響を除外するため高緯度寒冷圏の浅い乾雪を対象とし、更に融雪に伴う湿雪の影響を受けない2003年10月15日から2004年3月31日を選定した．

- (1) 凍結土壌層が考慮されていない積雪マイクロ波放射伝達モデル・積雪衛星アルゴリズムを用い「マイクロ波領域において凍結土壌の影響により積雪量が過大に推定される」という現象が発生するか否かを検証する．
- (2) 地上観測に基づく凍結土壌層をマイクロ波放射伝達モデルに導入することより積雪量の過大推定が解消されるか否かを検証する．それと同時に土壌が凍結しても積雪量を過大に評価することの無い積雪衛星アルゴリズム改良の可能性を検討する．

2. Tsutsuiのマイクロ波放射伝達モデル及び積雪衛星アルゴリズムの概要

(1) マイクロ波放射伝達モデル

乾雪を対象としたTsutsuiのマイクロ波放射伝達モデルは、図-1に示す半無限の土壌と乾雪から成る2層構造を持つ．その下層の半無限土壌より射出したマイクロ波放射は、乾雪（散乱体）を伝播する過程で熱放射や雪粒子の散乱効果による乾雪自体からの射出により増加する．そして乾雪による吸収や雪粒子の散乱に伴う消散により減衰する．またTsutsuiのマイクロ波放射伝達モデルには、マイクロ波放射伝達理論として式(1)の4 stream fast 放射伝達モデル⁴⁾が適用されているが、本式では消散係数 k_e と単一散乱アルベド ω_0 により散乱体の伝播過程における射出と減衰が表現されている．

$$\mu \frac{d}{d\tau} \begin{bmatrix} I_V(\tau, \mu) \\ I_H(\tau, \mu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_V(\tau, \mu) \\ I_H(\tau, \mu) \end{bmatrix} - \frac{\omega_0}{2} \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} P_{VV} & P_{VH} \\ P_{HV} & P_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_V(\tau, \mu') \\ I_H(\tau, \mu') \end{bmatrix} d\mu' - (1 - \omega_0) B(\tau) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

μ : 放射の方向余弦
 τ : 光学的厚さ $\tau \equiv \int k_e dr$
 k_e : 消散係数
 P : 偏波(H,V)
 ω_0 : 単一散乱アルベド
 $B(\tau)$: 光学的厚さ τ におけるプランクの放射輝度
 $I_p(\tau, \mu)$: 光学的厚さ τ における μ 方向の放射輝度

更に、この4 stream fast 放射伝達モデルも消散係数 k_e ・単一散乱アルベド ω_0 を算定することはできるが、散乱体を1つ1つの単体として評価するために消散係数 k_e を過大に評価してしまい、積雪や土壌のような多くの散乱体が密に詰まった稠密媒体を評価することができないという欠点を持っている．そこで稠密媒体の評価に有効なDense media 放射伝達モデル⁵⁾によって消散係数 k_e ・単一散乱アルベド ω_0 を算定している．また、この算定においては、氷粒子が空気(バックグラウンド)の中に密に詰まった状態を考えている．更に密度には寒冷圏の乾雪を含む全球規模の積雪量を推定することができるように比較的小さい 0.2 g/cm^3 が用いられている．

(2) 積雪衛星アルゴリズム

a) 積雪深・雪温の推定

Tsutsuiの積雪衛星アルゴリズムでは、積雪深を1cmから200cmまで、雪温を223Kから273Kまで変化させ、マイクロ波放射伝達モデルより19GHz帯と37GHz帯のマイクロ波輝度温度を計算し、変換テーブル(図-2)を求める．そして本テーブルに19GHz帯と37GHz帯の衛星マイクロ波輝度温度を入力することにより積雪深と雪温を推定する手法を適用している．

b) 雪粒子の成長に対する評価

雪面から放射されるマイクロ波輝度温度は、雪粒子の成長に伴う体積散乱の変化により大きく変化する．そこで本モデルでは雪粒子の成長に伴う体積散乱変化の検知に有効な短波長90GHz帯の衛星マイクロ波輝度温度データを用いて最適な雪粒子サイズを選定する手法を適用している．

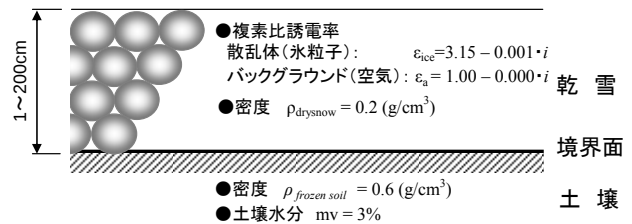


図-1 Tsutsuiのマイクロ波放射伝達モデル図

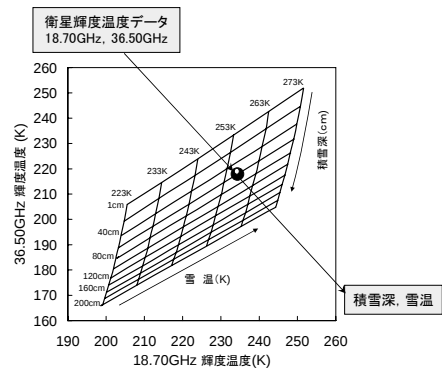


図-2 Tsutsuiの積雪衛星アルゴリズム変換テーブル模式図

c) 森林の影響対策

マイクロ波は水分に反応する．故に雪粒子は氷の結晶であり水分量であるため19GHz帯と37GHz帯のマイクロ波輝度温度の差から積雪量を推定することができる．一方、森林もまた水分を多量に含む媒体であるため周波数が高い程大きくなるマイクロ波を強く射出する．故に雪面において19GHz-37GHzの適切な輝度温度差が生じたとしても森林の影響により輝度温度差は縮められ、積雪量の過大評価をもたらす原因となる．そこでTsutsuiの積雪衛星アルゴリズムでは、NDVI(正規化植生指標)からLAI(葉面積指標)を求め、更にそのLAIから植生水分量(W_c)、その W_c から光学的厚さ(τ_{veg})を求めている．これに基づき森林の光学的厚さが考慮されたマイクロ波輝度温度を算定し、積雪深・雪温を推定するための変換テーブルに反映する手法を適用している．

3. Tsutsuiの積雪衛星アルゴリズムに基づく凍結土壌による影響度の確認

(1)対象サイト及び期間

Tsutsuiの積雪衛星アルゴリズムに基づき凍結土壌による影響度を確認するために凍土が氷板の形成されない浅い乾雪により完全に被覆される状態になる地域を探した．そしてロシアサハ共和国ヤクーツクに位置する統合地球水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)リファレンスサイト「Siberia Taiga (62.15'18", 129.37'08")」を選定した．

また対象期間としては、融雪に伴う湿雪の影響を受けない2003年10月15日から2004年3月31日を選定した．

(2)入力データ

a)衛星マイクロ波輝度温度

積雪衛星アルゴリズムの入力データとなるマイクロ波輝度温度データは、衛星マイクロ波放射計AMSR-Eによる周波数18.7GHz(h)、36.5GHz(h)、89.0GHz(v)観測値を用いた．本放射計の時間分解能は、ほぼ2回/日であるが、本論文では日射やそれによる雪面の融解の影響を含まない夜間(Descending)データを使用した．

b)NDVI(正規化植生指標)

NDVI(正規化植生指標)には、人工衛星AQUAに搭載された Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)に基づく算定値を用いた．ただし積雪が被覆されることにより精度の低下を招く恐れがあるため積雪被覆前の2003年9月後半16日間の平均をとった．その結果、対象サイトにおけるNDVIは0.1であった．

c)土壌物理パラメータ

土壌水分量は、地上観測により2003年11月下旬以降、深さ60cmにおいて約2%、80cmにおいて約4%が計測されたことからその平均をとり3%に設定した．また対象

サイトにおける土壌密度は現地観測に基づき 0.6g/cm^3 とした．

(3)変換テーブル

Tsutsuiの2層(乾雪/土壌)マイクロ波放射伝達モデルにより積雪深・雪温を変化させて計算した変換テーブルを図-3に示す．本図より対象サイト・期間における衛星マイクロ波輝度温度分布(18.7GHz、36.5GHz)が変換テーブルに収まり、積雪量を確実に算定するための条件が整っていることが分かる．

(3)積雪深の推定

2層マイクロ波放射伝達モデルを核とするTsutsuiの積雪衛星アルゴリズムにより積雪深を推定した結果を図-4に示す．11月末から12月上旬にかけては、若干の過大推定が見られるものの積雪が始まる10月中旬から12月末までの期間においては、地上観測値との間に比較的良好な整合が確認できる．しかしながら1月以降の厳冬期に入ると積雪深が過大に評価されている．前述の通り、積雪衛星アルゴリズムによる積雪量の推定誤差の原因には、雪粒子の成長・森林・湿雪・積雪内に形成される氷板が挙げられる．この内、雪粒子の成長・森林による影響については、Tsutsuiの積雪衛星アルゴリズムにその対策が施されている．また湿雪・氷板については、これらが除外される検証サイトと期間で検討しているため影響は無いと判断できる．

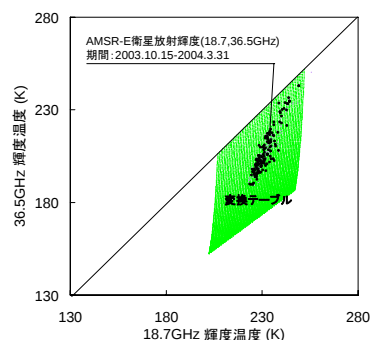


図-3 Tsutsuiの2層マイクロ波放射伝達モデルに基づくCEOPリファレンスサイトSiberia Taigaにおける変換テーブル

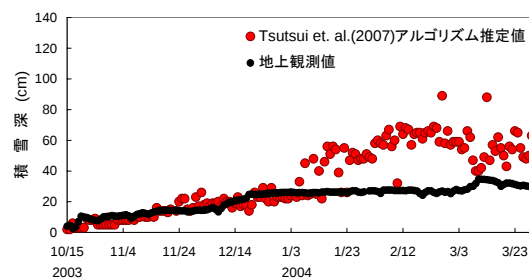


図-4 Tsutsuiの2層放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムによる積雪深推定結果

故に、これは厳冬期に入り、ある程度深い積雪により凍結土壌が完全に被覆されることで日射が遮断され、表層だけでは無く地中深くまで土壌の凍結が広がり、地温もマイクロ波領域において影響を及ぼす低い温度に安定したために前述の凍結土壌の影響が明瞭化したことが原因になっていると考えられる。2章にマイクロ波により積雪量を推定するために用いられるマイクロ波放射伝達モデル基礎式を示したが、本モデルより算定されるマイクロ波輝度温度は、消散係数 k_e ・単一散乱アルベド ω_0 により大きく変化する。また消散係数 k_e ・単一散乱アルベド ω_0 は、積雪や土壌などの散乱媒体の複素比誘電率に支配される。更に氷粒子の複素比誘電率は実部で約3、土粒子は約4とほぼ等しい。そのため人工衛星に搭載されたマイクロ波放射計は、凍結・乾燥した積雪下の土壌を乾雪として誤検知し、積雪衛星アルゴリズムにより衛星マイクロ波輝度温度から求められる積雪量が過大に推定されるものと考えられる。

4. 凍結土壌層を導入した3層（乾雪／凍結土壌／土壌）マイクロ波放射伝達モデルの検討

前章において、マイクロ波領域における凍結土壌の影響により積雪衛星アルゴリズムが、積雪深を過大に評価する可能性が示された。そこで本章では、Tsutsuiの2層（乾雪／土壌）マイクロ波放射伝達モデルに凍結土壌層を導入し改良した3層（乾雪／凍結土壌／土壌）のマイクロ波放射伝達モデルを検討する。

(1) 凍結土壌層厚及び土壌水分

図-5に土壌が凍結する前の2003年9月15日から2004年3月31日までの地上観測に基づく深さ10・60・80cmの地温(上段)・土壌水分(中段)・積雪深(下段)を示す。深さ10cmでは、2003年10月上旬に地温が氷点下に達し、積雪による被覆とほぼ同時に凍結し土壌水分が0%になることが分かる。

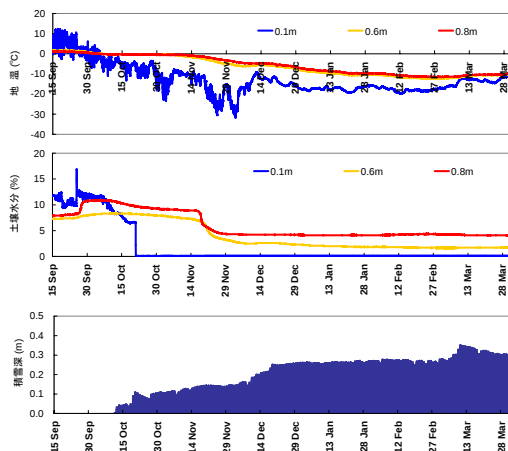


図-5 地上観測に基づく深さ10・60・80cmの地温・土壌水分・積雪深

一方、深さ60cm・80cmでは、2003年11月中旬になってはじめて氷点下に達し、土壌水分が凍結に伴い15%程度減少する。しかし、その後は3月末まで深さ60cmにおいて約2%、80cmにおいて約4%の一定値で推移することが分かる。これより本サイトでは、土壌表面から60cm程度までは、土中に存在する水分が全て凍結するが、60cmよりも深い層では凍結しても若干の水分が残留する傾向があると考えた。そこで3層マイクロ波放射伝達モデルの凍結土壌層の土壌水分は0%とし、凍結土壌層厚を60cm、更にその下の土壌層における土壌水分を3%に設定した。

(2) 凍結土壌層の複素比誘電率

凍結前の土壌は、複素比誘電率： $\epsilon_{a+w} = v \cdot [w_c \cdot \epsilon_w + (1-w_c) \cdot \epsilon_a]$ を持つ水と空気が混在したバックグラウンドの中に複素比誘電率： $\epsilon_{ss} = 4.7 - 0.000 \cdot i$ を持つ土粒子が密に詰まっている状態にある。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、 $\epsilon_{ice} \cdot \epsilon_a$ は氷・空気の複素比誘電率を示している。しかし新たに導入する凍結土壌層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の中に土粒子が密に詰まった状態になる。そこで凍結土壌の複素比誘電率には、以下の仮定を行い、乾雪層と同様に、消散係数 k_e と単一散乱アルベド ω_0 をDense media 放射伝達モデルにより算定する方法を適用した。

凍結土壌層の複素比誘電率

・ 散乱体(土粒子)

$$\epsilon_{ss} = 4.7 - 0.000 \cdot i \quad (2)$$

・ バックグラウンド(空気+氷)

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

ここに 空気+氷の体積： v

氷の占める割合： i_c

空気の複素比誘電率： $\epsilon_a = 1.00 - 0.000 \cdot i$

氷の複素比誘電率： $\epsilon_{ice} = 3.15 - 0.001 \cdot i$

しかし、ここで問題になるのは、バックグラウンドにおける氷の占める割合(i_c)である。地上観測において凍結土壌内の i_c は計測されていない。また凍結前の土壌水分量の割合から凍結後の i_c を仮定することは可能ではあるが、過去に事例が無いため信頼性に欠ける。そこで本論文では、チベット高原那曲流域における凍土の状態を理解する上で、その有効性が示された⁶⁾凍土を対象としたデータ同化システム⁷⁾による凍結後の i_c の算定を試みた。入力データとしてはCEOPリファレンスサイト Siberia Taigaにおいて観測された気象微物理量データ〔気温(, 1.8m), 風速(mile/h, 2.0m), 相対湿度(%), 降水量(inch/hr), 下向き日射量(W/m²)〕, 土壌水分量データ(%), 地温データ(), 並びにAMSR-Eマイクロ波輝度温度データ(18.7GHz(v,h), 36.5GHz(v,h))を用いた。

また同化期間は，土壤が凍結する前の2003年9月15日から土壤水分が凍結し，ある程度一定値に収束すると考えられる2003年10月末までの期間とし，土壤表面から深さ60cmまでの氷の占める割合（ i_c ）を計算した．その結果を図-6に示す．土壤内の凍結は，積雪が被覆されるとほぼ同時に開始し， i_c が20%程度に達するとその後は大きく変動しないことが分かる．この結果に基づき凍結土壤層バックグラウンドにおける氷の占める割合（ i_c ）を20%に設定した．

(3)改良3層マイクロ波放射伝達モデル

凍結土壤層を新たに導入した改良3層マイクロ波放射伝達モデルを図-7に示す．本モデルを用いてDense media 放射伝達モデルより消散係数 k_e と単一散乱アルベド ω_0 を算定し，4 stream fast 放射伝達モデルの放射伝達プロセスに入力することにより変換テーブルを求めた．

(4)変換テーブル

改良3層マイクロ波放射伝達モデルにより積雪深・雪温を変化させて計算した変換テーブルを図-8に示すが，変換テーブルに凍結土壤における減衰が明瞭に現れている状況を確認することができる．

5. 積雪衛星アルゴリズムの改良

図-9上段に図-4に示した地上観測積雪深とTsutsuiの2層マイクロ波放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムによる推定値との誤差を示す（■）．また図-9下段（●）に同アルゴリズムにより推定された雪温を示す．

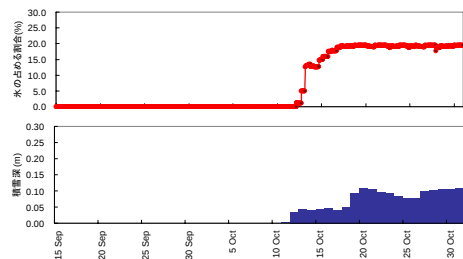


図-6 凍土を対象としたデータ同化システムに基づく土壤内の氷の占める割合(i_c ; %)の推定結果（上図），積雪深(m)地上観測値（下図）

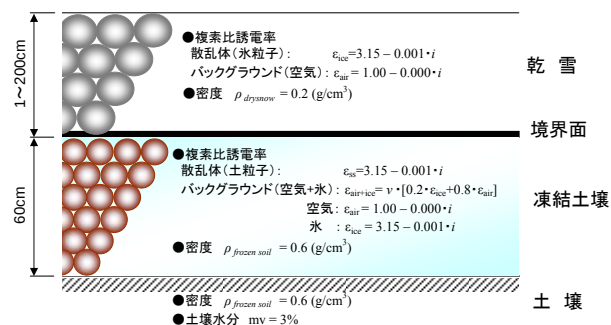


図-7 改良3層マイクロ波放射伝達モデル図

本図より積雪深の誤差は，雪温と逆の相関傾向を持ち，雪温が-20 未満となる2004年1月から急激に増加していることが分かる．そこで「Tsutsuiの2層放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムにより推定された雪温が-20 未満となる時，積雪下の凍結土壤層による影響が明瞭化するため改良3層放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムにより積雪深を推定する」という手法をアルゴリズムに導入することを考えた．しかしTsutsuiの2層放射伝達モデル・積雪衛星アルゴリズムにより推定された雪温の精度に問題がある場合，本手法を適用することはできない．そこで，その推定精度の有効性を確認した．図-9下段に推定された雪温（●），地上観測に基づく地上1.8mにおける気温（-），深さ10cmの地温（-）を示したが，大気と土壤の間に存在する雪温が，気温・地温と同様の挙動を示しながらその中間に存在していることが分かる．この結果よりTsutsuiの2層放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムに基づき推定された雪温は有効な精度を持つと判断した．そこで図-10に示すような推定雪温に基づく判別手法をアルゴリズムに導入した．

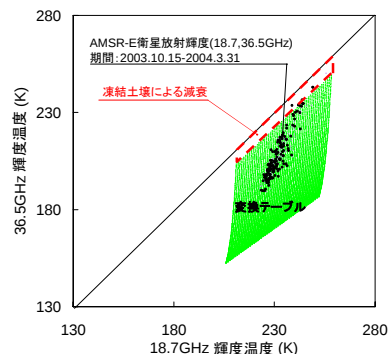


図-8 改良3層マイクロ波放射伝達モデルに基づくCEOPリファレンスサイトSiberia Taiagaにおける変換テーブル

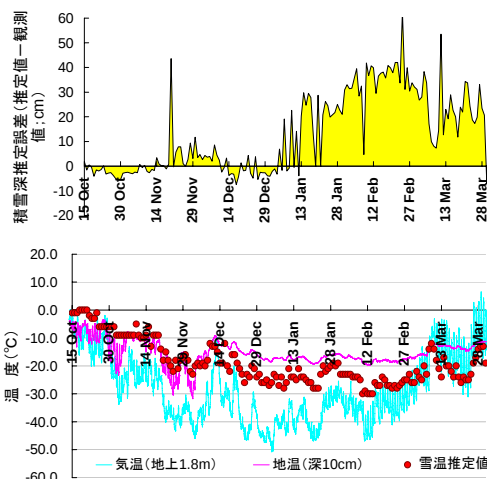


図-9 地上観測積雪深とTsutsuiの2層マイクロ波放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムによる推定値との誤差（上図），同アルゴリズムにより推定された雪温（●）と共に地上観測に基づく地上1.8mにおける気温（-）と深さ10cmの地温（-）（下図）

6. 改良積雪衛星アルゴリズムによる積雪深推定

前章において凍結土壌層を新たに導入した改良3層マイクロ波放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムにより積雪深を推定した。計算条件については、3章で示したTsutsuiの積雪衛星アルゴリズムによる積雪深推定時と同一とした。その結果を図-11に示すが、2004年1月からの厳冬期にTsutsuiの積雪衛星アルゴリズムでは、積雪深を約30cmも過大に推定し、RMSE(Root mean square error, 二乗平均平方根誤差): 20.5cm, RSD(Residual standard deviation, 残差標準偏差): 16.3cm, 差の絶対値の平均: 14.6cmと誤差も非常に大きかった。しかし、それに対して改良3層マイクロ波放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムを用いることによりRMSE: 8.0cm, RSD: 7.9cm, 差の絶対値の平均: 5.9cmと誤差が抑えられ、地上観測値に整合する積雪深が推定されることが分かった。

7. 結論

本論文では、氷板の形成による影響を除外するため高緯度寒冷圏のロシアサハ共和国ヤクーツクに位置するCEOPリファレンスサイトSiberia Taigaを対象とした。また融雪に伴う湿雪の影響を受けることのない2003年10月15日から2004年3月31日を選定した上、推定精度に影響を及ぼす雪粒子の成長と森林に対する対策が施されたTsutsuiの積雪マイクロ波放射伝達モデルおよび積雪衛星アルゴリズムに基づきモデルシミュレーションを行った。

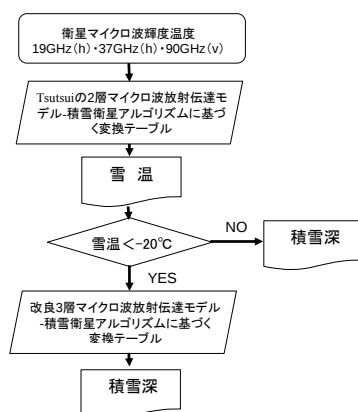


図-10 改良3層マイクロ波放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムの適用手法

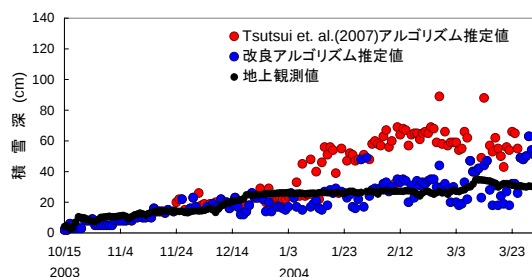


図-11 改良3層マイクロ波放射伝達モデル-積雪衛星アルゴリズムによる積雪深推定結果

その結果、凍結土壌層が考慮されていない積雪マイクロ波放射伝達モデル・積雪衛星アルゴリズムでは、「マイクロ波領域において凍結土壌の影響により積雪量が過大に推定される」という現象が明瞭に現れることを確認した。また地上観測に基づく凍結土壌層をマイクロ波放射伝達モデルに導入することにより積雪量の過大推定が低減されることを確認した。更に土壌が凍結しても積雪量を過大に評価することの無い積雪衛星アルゴリズム開発の可能性を示す結果が得られた。しかしながら現時点のアルゴリズムは、地上観測に基づく仮定の上に成立しているものである。故に本アルゴリズムを全球規模の凍土地帯における積雪量を推定することのできるアルゴリズムに改良するためには、本論文と同様の検討を多くの凍土地帯で実施し、最適なモデルパラメータを検討する必要がある。また衛星マイクロ波輝度温度データのみから積雪下の土壌凍結の有無を判定する手法を見出す必要があると考えている。

謝辞

本研究を実施するにあたり、地球観測データ統融合連携研究機構 データ統合・解析システム(DIAS)、統合地球水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の支援を受けた。記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) Kelly, L.: The AMSR-E snow depth algorithm: Description and Initial Results, *Journal of The Remote Sensing of Japan*, Vol.29, No.1, pp.307-317, 2009.
- 2) 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*, Vol.85A, pp417 - 438, 2007.
- 3) 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.
- 4) Liu, G.: 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) Tsang, L.: Dense media radiative transfer theory for dense discrete random media with particles of multiple sizes and permittivities, *In Dielectric Properties of Heterogenous Materials*, Elsevier Science, chapter 5, 1992.
- 6) 筒井浩行, 小池俊雄, 上野健一, Xu, X., WU, S., Jin, R., Lu, H.: チベット高原凍土地帯における融解層の推定に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第53巻, pp.433-438, 2009.
- 7) 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.

(2009.9.30受付)