

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

BASIC RESEARCH ABOUT THE ESTIMATION OF AN UNFROZEN LAYER IN PERMAFROST REGION OF THE TIBETAN PLATEAU

筒井浩行¹・小池俊雄²・上野健一³・XiangDe XU⁴・Shihong WU⁵
・Li XIN⁶・Jin RUI⁷・Lu HUI¹

Hiroyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE, Kenichi UENO, XiangDe XU, Shihong WU,
Li XIN, Jin RUI, Lu HUI

- ¹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)
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正会員 理博 筑波大学生命環境科学研究科准教授 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台1丁目1-1)
⁴非会員 工博 Professor, CAMS, CMA (Beijing 100081, China)
⁵非会員 Tibet Metrological Bureau (Linkuobeilu No.2, Lhasa, 850001, China)
⁶非会員 工博 Professor, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences. (260 DonggangWest Road, Lanzhou 730000, Gansu Province,
China)
⁷非会員 工博 Researcher, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences. (260 DonggangWest Road, Lanzhou 730000, Gansu Province,
China)

It is important to estimate the thickness of an unfrozen layer on permafrost, in order to estimate an amount of snow cover in high accuracy based on satellite microwave data in permafrost region of the Tibetan Plateau. In this paper, the thickness of an unfrozen layer on permafrost in the Naqu basin, Tibetan Plateau was estimated by using the data assimilation system for the permafrost. In this result, the thickness of an unfrozen layer from December 2003 to March 2004 was about 20cm, and it was evaluated to be relatively suitable based on the result of a field observation in March 2008 and February 2004.

Key Words : permafrost, data assimilation system, Tibetan Plateau

1. はじめに

近年、高緯度帯やチベット高原に分布する永久凍土が融解し、シベリアなどでは、その中に封じ込められたメタンガスが放出されるなど地球温暖化による凍土地帯への影響が示唆されている。これまで凍土に関し多くの研究が報告されているが、その代表的なものとしては、冬季の北半球寒冷圏では、活動層内の土壌水分は凍結するため移動することは無く、秋の土壌における保水状態が春まで保存されることを示した大畑・太田(1992)¹⁾、北半球寒冷圏のように冬季に積雪が地表面を覆う凍土地帯では、地表面の蒸発が雪面からのみ起こり大畑・太田(1992)¹⁾により報告されたような土壌水分の損失が無いのに対し、積雪の少ない冬季チベット高原では、秋の土壌水分状態が春まで保存される効果が小さく、土壌からの

蒸発による損失が大きくなることを報告した矢吹ら(1998)²⁾などの研究が挙げられる。このようにチベット高原における凍土は、高緯度帯に比べ複雑であり、水分の保存・蒸発を支配する活動層の状態を理解することが重要な課題となっている。ここで活動層とは、夏季に融解し冬季に凍結する永久凍土、もしくは季節凍土上に形成される地表面までの層であり、融解層とは、その活動層の表層に形成され、冬季であっても日中の日射などにより融解する層を示す。

また、その一方で凍土地帯における活動層の乾燥・凍結は、大気-陸面の水循環を理解する上で重要となる衛星マイクロ波データを用いた積雪量の推定において過大な評価をもたらす。その詳細については、衛星マイクロ波データに基づく積雪量推定における活動層の乾燥・凍結の影響として2章に記述するが、この問題の解決のた

めには、冬季の凍土地帯における特に活動層の状態を定量的に把握することが重要となる。

2. 衛星マイクロ波データに基づく積雪量推定における活動層の乾燥・凍結の影響

3章にチベット高原那曲流域(31° 27' N, 92° 02' E, 標高4,490m)を対象に実施した地上観測について記述するが、図-1は、筒井ら(2005³⁾,2007⁴⁾)において北半球全域、並びに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であるヤクーツク(ロシア, サハ共和国)において広域的、且つ局地的に積雪深推定の有効性が示されたAMSR-Eデータに基づき積雪アルゴリズムにより本観測期間(2008.3.10-16)を対象に積雪深を計算した結果である。地上観測期間の大半は、窪地に積雪が堆積するチベット高原特有のパッチ状の積雪分布(Ueno *et. al.*; 2007⁵⁾)が広がり、それ以外の裸地では、チベット高原特有の強い日射により活動層表層に乾燥した融解層が形成されていた。In-situデータは、この窪地に堆積した積雪の深さを計測したものであるが、日中の衛星データ(Ascending)に基づく結果では、計算された積雪深が平均で約14cm過大に評価されている。更に、夜間の衛星データ(Descending)に基づく結果では、平均で約49cmも過大に評価されていることが分かる。

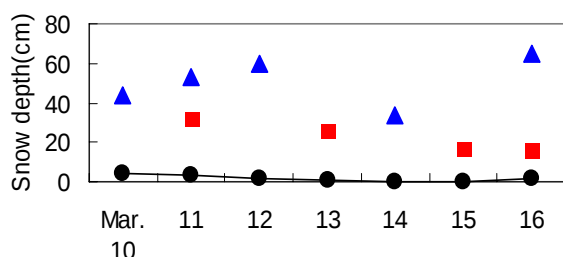


図-1 チベット高原那曲流域対象としたAMSR-E衛星データに基づく積雪アルゴリズムによる積雪深の計算結果〔対象期間：地表面観測期間に同期した2008年3月10日～16日、●：窪地にパッチ状に分布した積雪の地上観測値、■：AMSR-E夜間(Descending)データに基づく積雪深推定値、▲：AMSR-E日中(Ascending)データに基づく積雪深推定値〕

本積雪アルゴリズムにより評価できる積雪は、温度0℃以下の雪粒子が密に詰まり、その周囲は水分の全く無い(含水率0%)状態の乾雪である。一方、モデル上、その下の土壌には、土粒子の周囲に含水率3%の水分を仮定している。またアルゴリズムに導入されているマイクロ波放射伝達モデルは、マイクロ波が伝播される誘電媒体を構成する粒子、それ自体からのマイクロ波放射(射出)と地中からのマイクロ波が誘電媒体を構成する粒子により吸収・散乱される(消散)効果に基づき誘電媒体表面から放出される放射輝度を計算する。乾雪・土壌は共に誘電媒体であるが、雪粒子の誘電率(実部)は約3.15、土粒子の誘電率(実部)は約4.70とほぼ等しいため、凍結含水率がモデルで仮定された3%を下回る

レベルまで乾燥した土壌は、マイクロ波放射伝達理論上、乾雪にほぼ等しい誘電媒体として評価されてしまう。日中の場合、アルゴリズムによりパッチ状に分布した乾雪は積雪量として評価される。更に3章に詳細を記述するが、それに覆われた土壌は、地表面まで凍結し、含水率がモデル上設定された3%を下回るレベルまで乾燥するためマイクロ波放射伝達理論上、乾雪にほぼ等しい誘電媒体となり、積雪量として評価されてしまう。また夜間の場合、日中と同様、パッチ状に分布した乾雪とその下の土壌が積雪量として評価されることに加え、裸地もまた0℃未満となり凍結し、含水率が低下するため日中における積雪下の乾燥土壌と同様に、乾雪にほぼ等しい誘電媒体となり、積雪量として評価されてしまう。故に、積雪アルゴリズムにより推定される日中の積雪量は、地上観測値よりも過大に評価され、夜間になるとその過大評価が、更に大きくなる。

マイクロ波を用い積雪量を推定する時に発生する、この問題を解決するためには、以下の課題を1つずつ段階的に解決し、積雪層と凍結した活動層をマイクロ波を用いて区別する手法を見出す必要がある。

- 1) 積雪のほとんど無い凍土地帯における活動層の状態を衛星マイクロ波データに基づき理解できる手法を選定・適用し、地上観測値との比較を通じて、その有効性を確認する。
- 2) 有効性が確認された1)の手法を元に積雪が被覆された凍土地帯における積雪層・凍土活動層の状態を衛星マイクロ波データに基づき理解できる手法を開発する。

本論文では、1)の積雪のほとんど無い凍土地帯を選定し、活動層の状態を現地観測に基づき把握する。また現地観測において確認された活動層の状態を衛星マイクロ波データより推定し把握することのできる手法を選定・適用する。更に、その手法の有効性を確認し、将来的にマイクロ波により積雪層と乾燥・凍結した活動層を区別する手法を見出すための基礎研究を行う。

3. 地上観測を通じた積雪のほとんど無い凍土地帯の選定と活動層の状態把握

本論文では、積雪のほとんど無い凍土地帯としてチベット高原那曲流域に着目し、2008年3月10日～16日にかけて、チベット高原那曲流域の那曲市外南西郊外(31° 27' N, 92° 02' E, 標高4,490m)において陸面観測を実施した。観測期間中の3月10日から12日にかけては、窪地に浅い積雪が堆積し、それが徐々に消失してゆく過程、3月13日から14日にかけては、全てが裸地の状態での変化過程、3月15日の早朝から11:00頃にかけて降雪イベントが発生し積雪の地表面被覆過程を確認することができた。更に3月16日は、窪地の積雪が消失を開始し、3月10日と

ほぼ等しい状態に戻ったため冬季における地表面変化の1サイクルを観測することができた。観測期間中は、チベット高原特有のパッチ状の積雪(被覆面積割合0~15%)と裸地の2種類の地表面状態が広がっていた。そこで、この2つのタイプの地表面状態を対象に陸面観測を実施した。本観測では、積雪・土壌の基本的なパラメータを一通り観測したが、本論文では、気温、積雪深、土壌水分、地温と融解層厚を考察項目とした。なお、融解層底面の深さは、地温プロファイルを確認し、地温が0℃となる深さとして判断した。図-2は、雪が堆積した窪地における観測結果、図-3は、裸地における観測結果である。

まず、土壌水分は、積雪被覆の有無にかかわらず5%未満の乾燥した状態にある(図-2, 3)。しかし、土壌水分5%以下の狭い範囲で考えると、積雪下では、0~5cmにかけ全体的に土壌水分が大きい(図-2)、裸地では、地表層(0~3cm)の土壌水分が1%未満と非常に小さく、3cm・5cmの土壌水分も地表層よりは大きいものの4%未満と比較的小さいことが分かった。

次に地温であるが、3~4cmという比較的厚い積雪に被覆される場合、地表面から5cmまでの全てが0℃未満となる。しかし積雪が浅くなる、あるいは消失すると地表面温度は0℃を上回るが、積雪消失後、数日程度では、土壌内部(1~5cm)の地温は0℃を上回ることが無い状態を確認することができる(図-2)。一方、裸地では、強い日射を直に受ける日が続くことで、地表面から深さ5cmまでの表層の地温が、全て0℃以上となり、地表面を最大とする地温のプロファイルが形成されることが分かる(図-3)。

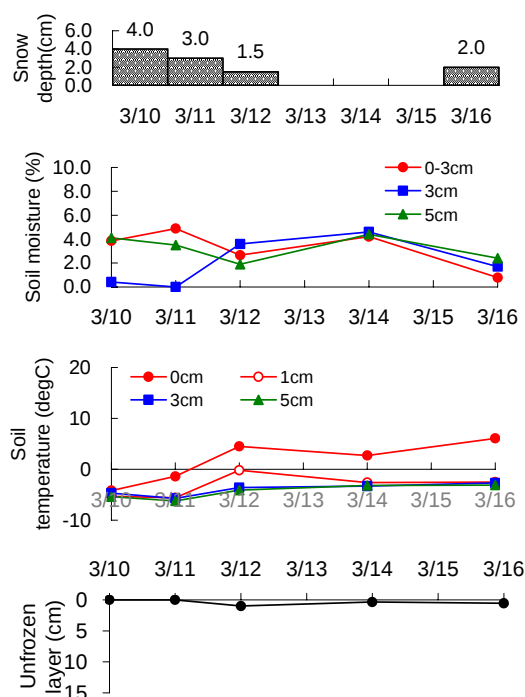


図-2 チベット高原那曲流域 雪が堆積した窪地における地表面観測結果 [上から積雪深、土壌水分、地温、融解層厚。観測期間：2008年3月10日~16日]

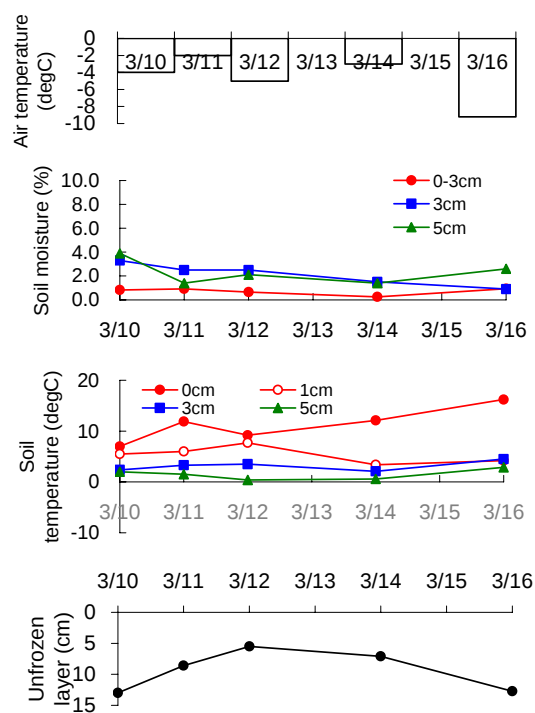


図-3 チベット高原那曲流域 裸地における地表面観測結果 [上から気温、土壌水分、地温、融解層厚。観測期間：2008年3月10日~16日]

次に活動層表層についてであるが、積雪下の土壌は、地表面まで凍結する。しかし積雪が浅くなる、あるいは消失した直後は数mm程度の融解が発生する(図-2)。一方、裸地では、地温の温度勾配に応じ5.5~13.0cm程度の融解した層が形成されることが分かった(図-3)。

それでは、以上の観測結果と観測期間中、現地にて地表面状態を確認した事項とを合わせ、冬季那曲流域における活動層表層の状態変化について整理する。標高4,500m程度のチベット高原那曲流域では、気温が0℃を下回る冬季であってもチベット高原特有の強い日射を直に受ける日が続くと、裸地の活動層表層が温められ、十数cmの融解層が発達する。降雪のイベントが発生すると地表一面が、一時的に浅い積雪で覆われ、外気は0℃未満の温度を示すが、降雪前に十分に温められた融解層の地温は0℃を下回ることが無く、また融解層厚も大きな減少を示さない。

更に、チベット高原では、午後に強風が発生するが、降雪終了後であってもそれは例外なく発生し、一面に被覆された乾いた新雪は強風により窪地に吹き飛ばされ、チベット高原特有のパッチ状の積雪分布が、降雪後の強風の発生から短時間で形成される。また雪が窪地に堆積し、地表面が比較的厚い積雪で覆われ、強い日射が遮られると融解層の地温は次第に減少し0℃を下回り、地表面まで凍結する。その後、積雪が減少し浅くなると地表面温度は0℃を上回るようになるが、融解層内部は、積雪が消失しても数日程度では0℃を上回ることが無い。

また地表面付近には数mm程度の融解が発生するものの、ほぼ地表面まで凍結した状態を保つ。

その後、積雪が消失すると気温が 0°C 未満であってもチベット高原特有の強い日射を直に受ける日が続くことで融解層は温められ、地表面から深さ十数cmまでの地温が 0°C を上回り、地表面を最大とする地温プロファイルが形成される。

4. 衛星マイクロ波に基づく活動層の解析手法とその入力データの概要

3章において記述した通り、冬季のチベット高原那曲流域は、10%未満の面積割合で積雪がパッチ状に分布される程度であり、本論文の目的である積雪のほとんど無い凍土地帯における活動層の状態のマイクロ波による検討に適することが確認された。更に地上陸面観測を通じて、積雪により被覆されていない裸地には、活動層上層に20cm程度の融解層が形成され、その表層の含水率は4%未満まで低下することが分かった。

融解層とその下の凍結層は共に乾き、含水率が低いものと考えられるが、乾燥の原因が、土壌水分の昇華である融解層と凍結にある凍結層では、前者は氷を含まず、後者は氷を含むためマイクロ波が伝播される時の消散効果が異なる。故に、凍土地帯における裸地の活動層の状態をマイクロ波により理解する上で、融解層厚の定量的な推定が重要となる。

そこで本論文では、積雪のほとんど無い裸地における融解層厚の定量的な推定のために凍土を対象としたデータ同化システム(Jin ; 2007⁶⁾)の適用を考えた。本システムは、気象フォーシングデータ、地表面や土壌の初期データをSimultaneous Heat and Water Model(SHAWモデル)に入力し、地温・土壌水分などのモデルパラメータを計算する。そして、これらのモデルパラメータをAdvanced Intergal Equation Model(AIEM)とLand Surface Process/Radiobrightness(LSP/R)を結合したマイクロ波放射伝達モデルに入力することにより19GHz・37GHz帯の輝度温度を求め、Ensemble Kalman Filterにより衛星観測値との間で同化させ、その結果に基づきモデルパラメータを更新し、再度、SHAWモデルに入力する。このルーチンを輝度温度が同化されるまで繰り返すことで最終的に土壌プロファイルを入力されたフォーシングデータと同じタイムインターバルで推定し、同時に融解層厚を日データとして算定するシステムである。また本システムに適用されている陸面モデル(SHAWモデル)には、積雪を厳密に評価するプロセスが備わっていない。しかし本論文において対象とするほとんど積雪の無い(積雪面積割合10%未満)那曲流域における融解層厚の推定に問題は無いと考え本システムを適用し、検討を進めることとした。

次にシステムへの入力データについてであるが、3章に記述した陸面観測期間に対応する気象フォーシング

データが無いため本観測地からはやや離れるが、同じ那曲流域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であるBJサイト($31^{\circ} 22' \text{N}$, $91^{\circ} 53' \text{E}$, 標高4,513m)において観測された2003年12月から2004年3月までの気象フォーシングデータと土壌プロファイル初期データを用いることとした。図-4に当観測期間中の2004年2月8日に本サイトにおいて積雪観測を実施した時の現地写真を示すが、5~10%の面積割合の積雪がパッチ状に分布される地表面状態を確認することができる。即ち、この地表面状態は、2008年3月に陸面観測を行った那曲市外南西郊外($31^{\circ} 27' \text{N}$, $92^{\circ} 02' \text{E}$, 標高4,490m)における地表面状態と同じ状態にあることを理解することができる。



図-4 2004年2月8日那曲流域CEOPリファレンスサイト(BJサイト)における地表面状態 [5~10%の面積割合で積雪がパッチ状に分布]

衛星マイクロ波データとしては、同期間のAMSR-E輝度温度データ(19GHz・37GHz(V,H偏波))を用いた。

また推定値と地上観測値との比較項目を地温と融解層厚に設定し、地上観測値としてCEOPにおいて取得された深さ4, 20, 100, 160cmの地温を用いた。更に融解層厚については、図-5に示すように深さ100cm以下の土壌水分が約5~10%と非常に小さく乾燥していることから地表面より深い活動層の温度が 0°C 未満の場合は地表面まで凍結しており(融解層厚が0cm)、地表面温度が 0°C を上回っている場合は、地温プロファイルから地温が 0°C になる深さと地表面との差を融解層厚とした。

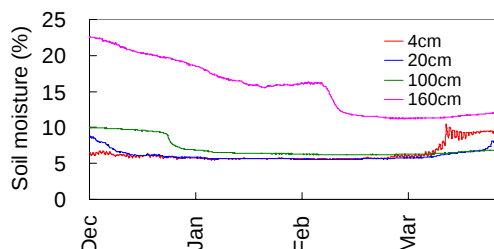


図-5 那曲流域CEOPリファレンスサイト(BJサイト)において取得された土壌水分。 [2003年12月~2004年3月, 深度: 4, 20, 100, 160cm]

5. 凍土データ同化システムによる定量的な活動層の状態の把握とその評価

4章で概要を記述したデータ同化システムにより活動層（深さ4, 20, 100, 160cm）の地温を推定し、地上観測値と比較した結果を図-6に示す。最も浅い4cmでは、日周の振動が地上観測値に比べ、若干大きいものの地上観測値の挙動を追従しており、また深さ20cmより深い位置では、推定値と地上観測値との間に比較的良好な整合性が確認された。

また図-7は、データ同化システムによる融解層厚の推定値と地上観測値を比較した結果である。地上観測値は、12月に17cm程度、1月から2月上旬にかけては地表面まで凍結し、その後、再び14cm程度まで増大した後、3月末には20cm程度の融解層厚を示している。一方、データ同化システムによる推定値は、12月に19cm程度、1月から2月上旬まで18cm程度、2月中旬以降は20cm程度の融解層厚を示した。

このように地上観測値では1月から2月上旬に活動層が地表面まで凍結し、融解層厚が0cmになるのに対し、データ同化システムによる推定結果では、期間を通して融解層厚が18～20cm程度となり、地上観測値で融解層厚が0cmとなった1月から2月上旬にかけて12月に比べ融解層厚が僅か1cm程度しか減少せず、地上観測値との間に大きな乖離が生じた。

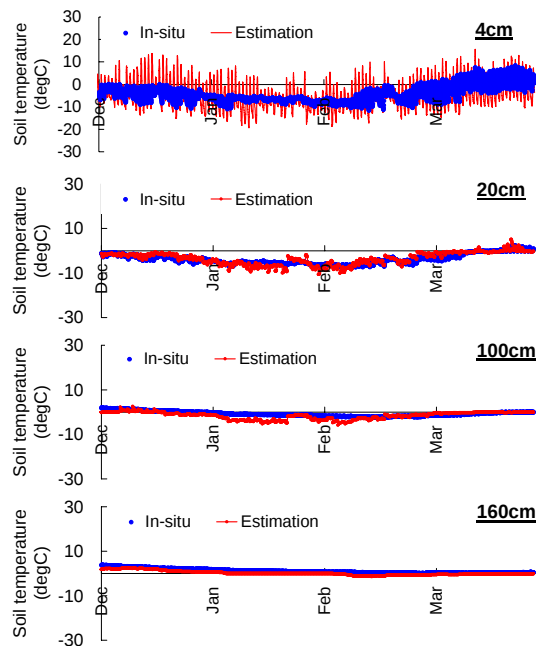


図-6 凍土データ同化システムによる地温の推定結果〔赤：推定値、青：地上観測値〕

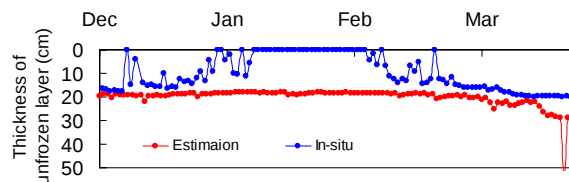


図-7 凍土データ同化システムによる活動層表層の融解層厚の推定結果〔赤：推定値、青：地上観測値〕

そこで、CEOPにおいて観測された凍土データ同化システムにより融解層厚を推定した期間（2003年12月～2004年3月）に対応する積雪深の時系列変化を調べた。その結果を図-8に示すが、積雪が1月上旬から急激に増加し15cm程度まで堆積し、2月上旬から下旬にかけて徐々に消失していることが分かる。この挙動を踏まえて、図-7の融解層厚の時系列変化を改めて確認すると、この期間が、融解層厚が急激に減少し、地表面まで凍結することで融解層厚が0cmとなった後、徐々に20cm程度の融解層厚に戻る期間に対応していることが分かる。これはまさに、3章に記述した積雪が地表面を覆うことで、強い日射が遮断され地温が低下し、活動層が地表面まで凍結する状況を示している。

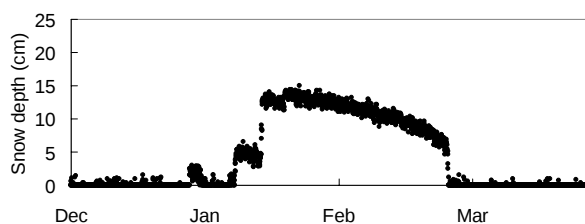


図-8 那曲流域CEOPリファレンスサイト（BJサイト）において取得された積雪深。〔対象期間2003年12月～2004年3月〕

このように図-4に示した地表面状態と積雪深観測値（図-8）との間には食い違いが生じている。そこで2004年2月の現地積雪観測結果を再度確認した。その結果、BJサイト観測ステーションには、図-9に示すように囲いにより雪が吹き溜まり、十数cmの積雪が堆積していたことが分かった。また積雪密度が $0.30 \sim 0.45 \text{ g/cm}^3$ と比較的大きく、上層が雪粒子径 $0.55 \sim 1.75 \text{ mm}$ のしまり雪、下層が雪粒子径 4.00 mm でもざらめ化がかなり進行していることから図-8に示す1月上旬から堆積し始めた積雪であることが分かった。即ち、観測ステーションでは、吹き溜まった積雪により強い日射が遮断されることで土壌の加熱が抑えられ、活動層は地表面まで凍結するが、観測ステーションを除くその周囲は、5～10%のパッチ状の積雪を除く90%以上が裸地であり、3章に記述したようにチベット高原特有の強い日射を直に受け、18cm程度の融解層が発達していることになる。更にAMSR-Eのフ



図-9 2004年2月8日那曲流域CEOPリファレンスサイト(BJサイト)観測ステーション内の積雪被覆状況〔雪がステーションの囲いのために吹き溜まり、十数cmの積雪が堆積〕

ットプリントサイズは、19GHz帯で約30km、37GHz帯で約15kmであるため衛星マイクロ波センサは、まさに18cm程度の融解層厚が形成された90%以上の裸地をみていることになる。つまりAMSR-E衛星輝度温度(19GHz, 37GHz)を同化し融解層厚を求めるデータ同化システムは、観測ステーション積雪下の凍結した活動層のみを評価しているのではなく、それを含む90%以上の裸地における18cm程度の融解層を評価していることになる。

以上より、データ同化システムによる融解層厚推定結果を整理すると、図-7に示した通り、2003年12月、並びに2004年2月中旬以降において、地上観測値との比較的良好な整合が確認され、2003年1月から2004年2月上旬にかけて推定された18cm程度の融解層厚についても実際にAMSR-Eのフットプリントサイズに対応した広範囲な裸地の融解層厚が実測されていないがため推測的な要素も多分に含むが、12月および1月中旬以降における推定結果を合わせて考えると当期間の推定結果もまた実際の状態に即した推定結果であろうと考えられる。また観測ステーションに雪が堆積した1月から2月上旬には、その周囲のパッチ状の積雪面積も若干増大したと予想されるが、それにより積雪下で地表面まで凍結した活動層の面積割合が増加した影響が、12月に19cm程度であった融解層厚が、1月から2月上旬にかけて18cm程度に若干減少したことに現れているものと考えられる。

また本論文では、その一方、1章において大畑・太田(1992)¹⁾の知見に対し、矢吹ら(1998)²⁾はチベット高原特有の特徴を報告した。更に、それに対してUeno *et al.*(2007)⁵⁾から本論文を通して、土壌からの蒸発の大きな要因と考えられるチベット高原特有のパッチ状の積雪分布の存在、更に冬季チベット高原那曲流域において積雪の無い裸地の凍土活動層上部に20cm弱の融解層が発生することを陸面現地観測を通じて確認することができた。

6. 結論

本論文の目的である積雪のほとんど無い凍土地帯における活動層の状態を衛星マイクロ波データに基づき理解するために「活動層の状態を衛星マイクロ波データに基づき理解するための手法」として凍土を対象としたデー

タ同化システムを適用し、融解層とその下の凍結層から成る活動層の状態を理解する上で重要な融解層厚と活動層(4cm～160cm)の地温を推定した。その結果、地上観測値に良く整合した地温を推定することができた。また融解層厚については、2003年12月および2004年2月中旬～3月にかけて地上観測値との間で比較的良好な推定結果が得られ、2004年1月～2月上旬にかけては、地上観測値より広範囲な衛星のフットプリントの裸地における融解層厚を得られなかったが故に推測的な要素も多分に含むが、現地の状態に即した推定結果が得られたと考えている。また、その結果を通じ、融解層厚の推定におけるデータ同化システムの有効性が確認された。これにより本論文の目的である衛星マイクロ波データに基づく積雪のほとんど無い凍土地帯における活動層の状態に対する理解が大きく深まった。更に、次の大きな課題である積雪が被覆された凍土地帯における積雪層・凍土活動層の状態を衛星マイクロ波データに基づき理解するためのデータ同化システムの開発に資する基礎研究としての成果が本論文により得られたと考えている。

謝辞

本研究を実施するにあたり、地球観測データ統合連携研究機構 データ統合・解析システム、中華人民共和国日中気象災害協力研究センタープロジェクト、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) 大畑哲夫, 太田岳史: CREQ(チベット高原雪氷圏研究)計画とその研究内容の概要, 水文・水資源学会誌, Vol.5, pp. 59-64, 1992.
- 2) 矢吹裕伯, 大畑哲夫, 上田豊: チベット高原凍土地帯の地表面過程の季節変化 1. 地表層の水分・熱的状态, 水文・水資源学会誌, Vol.11, No.4, pp. 324-335, 1998.
- 3) 筒井浩行, 小池俊雄, 玉川勝徳, 藤井秀幸: 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, 水工学論文集, 49巻, pp.319～324, 2005.
- 4) 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.
- 5) Ueno, K, Tanaka, K., Tsutsui, H. and Li M.: *Snow Cover Conditions in the Tibetan Plateau Observed during the Winter of 2003/2004.*, Arctic, Antarctic and Alpine Research, Vol. 39, No. 1, pp. 152～164, 2007.
- 6) Jin Rui: *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.

(2008. 9. 30受付)