

グローバル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

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN SATELLITE ALGORITHM FOR GLOBAL SNOW DISTRIBUTION

小池俊雄¹・吉本淳一²・藤春兼久³・柴田彰⁴

Toshio KOIKE, Jun'ichi YOSHIMOTO, Kanehisa FUJIHARU and Akira SHIBATA

¹正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系 (〒940-21新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²正会員 工修 (株)アルゴス (〒944 新潟県新井市学校町2-8)

³非会員 工学 長岡技術科学大学大学院大学院生 (〒940-21新潟県長岡市上富岡町1603-1)

⁴非会員 理博 宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター
(〒106 東京都港区六本木1-9-9 六本木ファーストビル13F)

In this study, a new algorithm for snow is developed based on microwave radiative transfer theory and evaluated using the measured snow at the 100 ground-based stations which locate widely in the northern hemisphere. At about the half of the evaluated stations, the estimation errors are very low. Further, the reasons for over- or under-estimation are discussed in relation to snow particle size and vegetation cover. Using the proposed algorithm, 6 years data sets of snow in the Eurasian continent are generated from SSM/I. The characteristics of seasonal variation of snow in the Eurasian continent and inter-annual variation of maximum snow on the Tibetan Plateau are demonstrated by analyzing the generated data sets.

Key Words : snow, remote sensing, microwave, climate change

1. はじめに

地球の気候は、水が大气、陸域、海域をグローバルに循環しながら相変化することによって形成、維持される。海洋-大気の相互作用とともに、陸域-大気の相互作用が水循環を通して気候変動に与える影響は大きく、気候変化に伴う水資源の長期変動予測や季節～年々の水資源管理のためには、空間的にも時間的にも変動が大きな陸面での水文状態をグローバルに観測するシステムの確立が不可欠である。中でも積雪は、その高い反射率や融雪による土壌水分の涵養を通して、アジアモンスーンの変動や北極海圏の気候形成に果たす役割が大きいことが示唆されている¹⁾。

地球全体の積雪状況を定量的に把握するためには、測器を均一に展開することが理想であるが、現実には積雪観測の密度は極めて低く、しかも積雪深さのみの観測がほとんどであり、積雪密度や相当水量は通常観測されていない。積雪観測への衛星リモートセンシングの利用は、当初可視～赤外領域による積雪面積の抽出に限られ、しかも天候により観測が制

限されていたが、近年のマイクロ波帯の計測技術の発達に伴い、全天候下での積雪深や相当水量の算定の可能性が示唆されるようになってきている。とりわけマイクロ波放射計は、空間分解能については劣るものの、観測頻度および周波数・偏波の多様性の面から、グローバルな積雪観測に適しており、高性能なセンサーの打ち上げが次々と予定されていることから、積雪のグローバル観測システムとしての期待が大きい。

本研究では、マイクロ波放射伝達の基礎理論に基づいた積雪量算定アルゴリズムを開発し、地上観測データとの比較により、アルゴリズムの妥当性を評価する。さらにユーラシア大陸での積雪データセットを作成し、その解析に基づいて、ユーラシア大陸での積雪の変動性を評価する。

2. アルゴリズムの開発

積雪量の定量的な算定のためのアルゴリズムはこれまで数多く出されているが、基本的には地表面からの放射が積雪層中を伝播していくときの雪粒子に

よる散乱によって生じる消散効果のみを評価したものがほとんどである^{2),3)}。すなわち、散乱による消散の強い周波数依存性を利用して、異なる周波数による輝度温度の差を積雪量推定の指標としている。ただしこれらの手法は、積雪の物理温度の効果が含まれておらず、また指標値を用いた積雪量算定の式には、地域的な積雪特性の違いの影響を物理的に含めることができない。

England(1975)は、半無限媒体の上にある平均個数Nの球形の散乱体を含む、平均厚さDの均質な散乱媒体を仮定し、そこからの放射は、直達放射と散乱放射の2つの成分の和からなるというモデル(以下、Englandモデルと呼ぶ)を提示している⁴⁾。ここでは、半無限媒体と散乱媒体の境界面は準鏡面として扱われている。

Koike & Suhama(1993)は、Englandモデルを積雪層に適用し、図-1に示す積雪層からのマイクロ波放射モデルを提案している⁵⁾。そこでは、積雪を均一粒径の球形粒子で構成される散乱媒体とし、それが半無限媒体である土壌の上にあると仮定している。直達放射輝度は、大気と積雪、積雪と土壌の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求められ、散乱放射輝度は散乱による射出が伝達経路中で消散するという放射伝達式によってにより得られる。散乱による消散と射出の計算にはレーリー近似が用いられ、注目している方向への散乱射出は、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得られる。角度の積分にはガウスの求積法が適用されている。この達放射輝度、散乱放射輝度からレイリー-ジーンズの放射則を介して、直達放射輝度温度および散乱放射輝度温度を求められる。このモデルは1988年に北海道旭岳斜面～山麓で実施されたMicrowave Scanning Radiometer(MSR)航空機実験に適用され、モデルによる推定結果と観測値との適合性が良いことが示されている。

この放射伝達モデルを用いて、積雪粒径と積雪密度を仮定し、積雪深と雪温を変化させながら、シミュレーションによって積雪層からの輝度温度を異なる2つの周波数で求めると、[積雪深, 雪温]から[2周波での輝度温度]への変換テーブルが求まる。この算出結果を補間することにより、逆に[2周波での輝度温度]から[積雪深, 雪温]への変換テーブルを作成することができる。後者を使って、衛星データを入力として積雪深と雪温を算出するのが、本研究で開発した積雪量算定アルゴリズムである。この手法は密度を一定と仮定しているので、積雪深だけでなく積雪相当水量も推定され、さらに積雪温度も同時に算定される。またこれまで蓄積された気候学的な知見を組み合わせ、地域によって異なる積雪特性や積雪下層の土壌特性の違いをあらかじめ放射伝達モデルに取り入れることにより、積雪量推定に伴う地域性の効果を定量的に取り入れることもできる。ただし、本手法は散乱による消散と射出が周波数により大きく変化する特性を利用しているため、対象は乾雪のみであり、吸収による消散が卓越する湿雪には適用できない。

本研究では、まず積雪粒径を0.6mm、積雪密度を0.3g/cm³と仮定し、既存の衛星データ利用を考慮して、19GHzと37GHzの2つの周波数での輝度温度を算出した。図-2は雪温273Kの乾雪の場合の、各周波数における輝度温度の積雪深依存性を表している。積雪深の増加と共に散乱による消散の効果で、37GHzの輝度温度が19GHzのそれより非常になくなることが示されている。図-3は、積雪深を1～201cmまで1cmずつ、雪温を243～273Kまで1Kずつ変化させながら

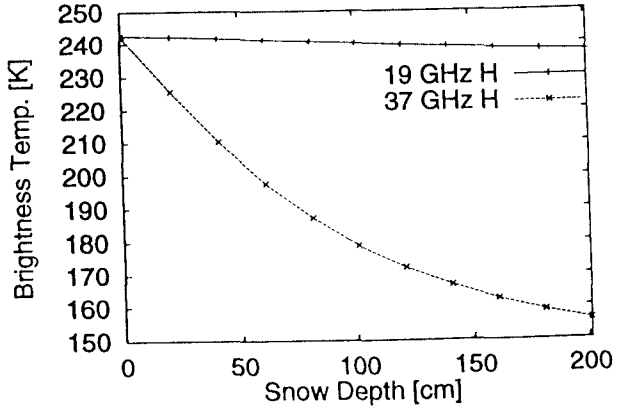


図-2 19GHz, 37GHzでの輝度温度の積雪深依存性 (雪粒径: 0.6mm, 密度: 0.3g/cm³, 雪温: 273K)

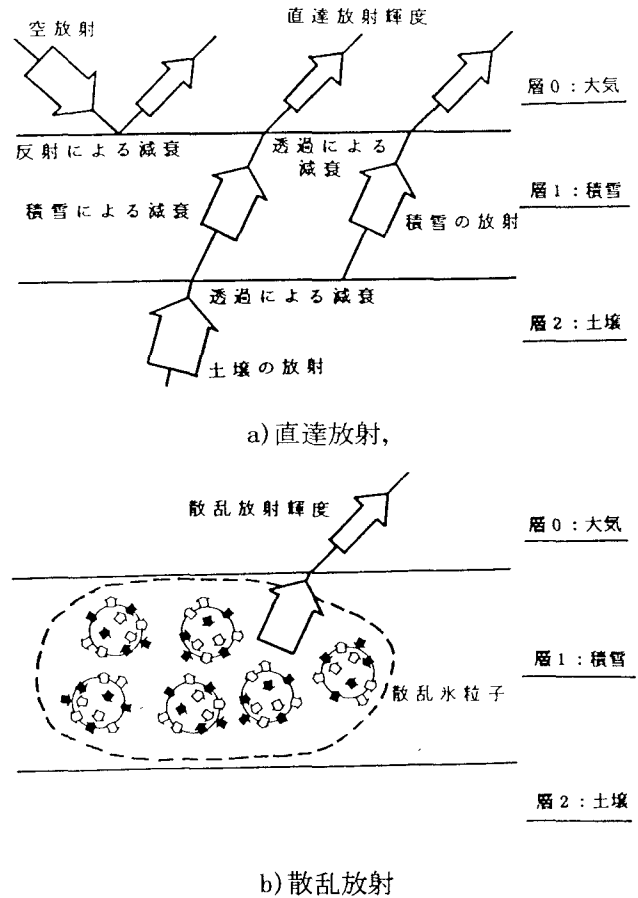


図-1 積雪のマイクロ波放射伝達モデル⁵⁾

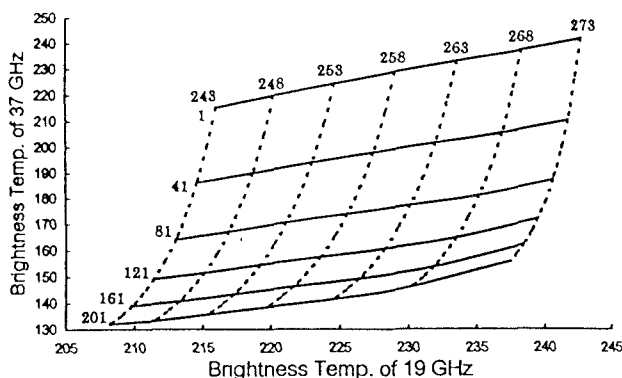


図-3 19GHz, 37GHzでの輝度温度と積雪深・温度の関係(雪粒径: 0.6mm, 密度: 0.3g/cm³)

ら求めた各輝度温度の算定結果をまとめたものである。この結果を用いて、補間によって各周波数での1Kずつの輝度温度の組み合わせの変化に対応する積雪深と雪温の組み合わせを求めることにより、衛星データに対応した変換テーブルを得ることができる。

3. アルゴリズムの妥当性の評価

本研究では、米国衛星Defense Meteorological Satellite Program(DMSP)搭載のSpecial Sensor Microwave/Imager(SSM/I)を用いる。SSM/Iは19.35, 22.235, 37.0, 85.5GHzの4周波数、水平・垂直2偏波(22.235GHzは垂直偏波のみ)の走査型のマイクロ波放射計で、これまでの同型センサーと比較して、偏波混合およびサイドロープの影響がほとんどないことが特徴である。本研究では、大気の影響が少ない19.35, 37.5GHzの2周波を用いて積雪量を推定することとした。

アルゴリズム検証に用いたデータは、宇宙開発事業団が1999年に予定している改良型マイクロ波走査型放射計(AMSR)のアルゴリズム開発用に用意された、北半球100ヶ所の地上観測所での積雪深実測値と、同地点をほぼ中心に含むSSM/Iのデータである。なおSSM/Iのフットプリントが数10kmと非常に大きな事を考慮して、100ヶ所の選定には、地形図を用いて周辺に水域などが無いなど、できるだけ均一な地点が選ばれた。検証対象期間は、1992年1月～1995年12月の期間中の冬季(11月～翌年5月)である。

100地点の観測値の中から、以下のデータは誤差評価から除外した。

- 1) 実測積雪深の日変化が100cm以上のデータ。
- 2) 測輝度温度がシミュレーションによる推定輝度温度領域を超えるデータ。
- 3) 乾雪とは判断されない場合。つまり、37GHzの輝度温度が19GHzの輝度温度よりも大きい場合。
- 4) 積雪以外の地被条件の影響が大きくなることを考慮して、実測積雪深が10cm以下の場合。

上記の場合を除き、かつ実測積雪深が存在した日数が解析対象の4年間に100日以上ある地点(計53ヶ所)を対象とし、積雪深変化のレンジが大きいため、相対誤差ではなく、実測と推定値の差の絶対値の平

均を算出した。この値が20cm以下と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すると、前者に該当するものが25ケース、後者は28ケースであった。図-4は適合性が良いケースの一例で、図-5, 6はいずれも適合性が悪い場合で、それぞれ過大推定の場合、過小推定の場合に相当しており、それぞれ4ケースと24ケースであった。図-7は、適合性が良い場合(●), 過大推定(○), 過小推定(■)の分布図である。

次に適合性が悪くなる理由について考える。

まず、過大評価を与える理由として考えられるのは、仮定した雪粒子の粒径が実際より小さい場合である。寒冷地では放射による積雪表面の冷却により、下層が暖かく上層が冷たいという温度勾配が形成され、積雪内部で下層から上層へ水蒸気が輸送され、粒径が極めて大きなシモザラメ層が形成されることが多い。また、大気中の水蒸気の影響による表面霜が発達することもあり、これら大粒径の粒子が存在する

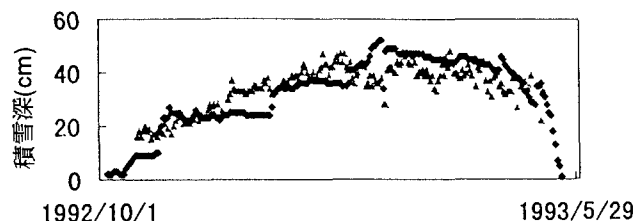


図-4 アルゴリズムの評価結果例(適合性: 良)
(◆: 実測値, ▲: SSM/Iによる推定値)

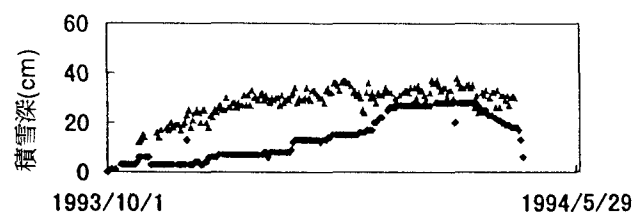


図-5 アルゴリズムの評価結果例(適合性: 過大)
(◆: 実測値, ▲: SSM/Iによる推定値)

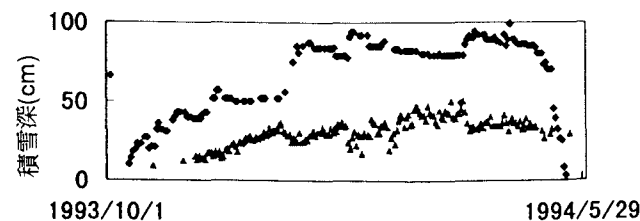


図-6 アルゴリズムの評価結果例(適合性: 過小)
(◆: 実測値, ▲: SSM/Iによる推定値)

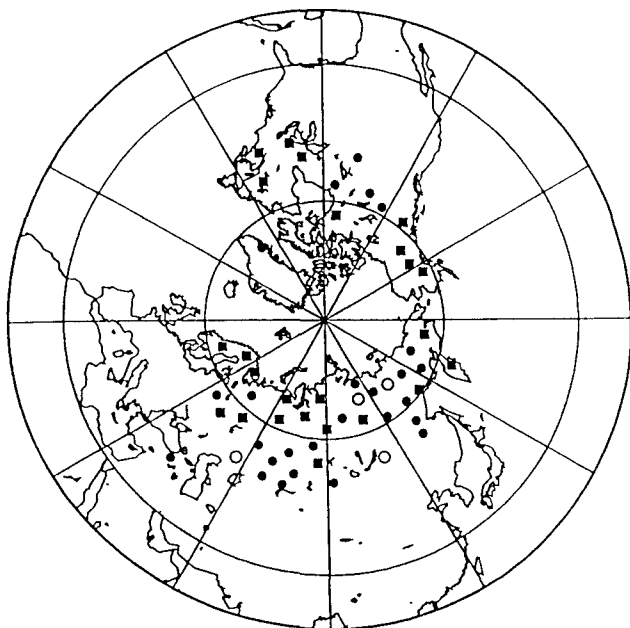
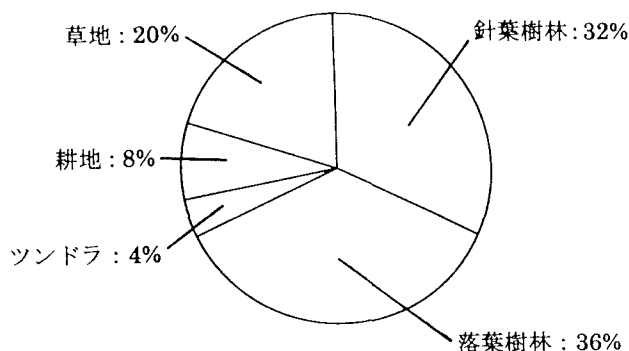


図-7 評価結果の分布
(適合性良：●，過大推定：○，過小推定：■)

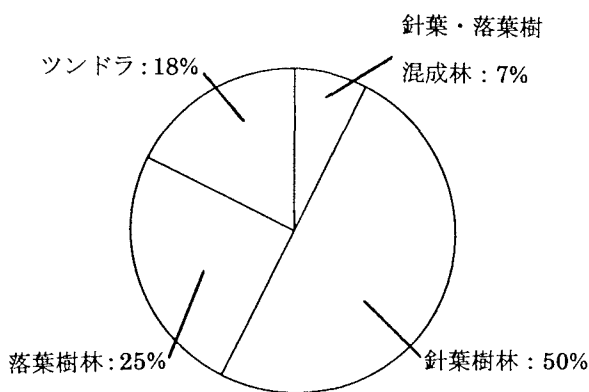
と、散乱による消散効果が促進され、低周波数側の輝度温度と高周波数側の輝度温度との差が大きくなる。したがって積雪は多くなくても輝度温度差が広がり、推定値は過大評価になる。

過小評価の理由としては、以下の2つが考えられる。一つは上記の過大評価の場合と逆で、実際の積雪粒子の粒径が仮定より小さい場合である。二つ目の理由は植生の影響である。針葉樹林など植生キャノピーが多い場合には、植生キャノピーによる吸収の消散効果で、キャノピー下部の積雪からのマイクロ波放射シグナルが伝わらない。一方、植生からの放射による射出の寄与分が増加し、結果として2周波での輝度温度の差が小さくなり、推定値が過小となる。図-8は、International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Initiative I で配布されたCD-ROM中に収められている1度グリッドの植生区分により分類された、適合性が良い場合(図a, 25ケースの分布)と、過小評価のために適合性が悪い場合(図b, 24ケース)の植生分布の割合である。後者の場合、明らかに植生キャノピーの密な針葉樹林および混成林の割合が多くなっており、過小評価の原因として植生の効果が重要であることが示唆されている。

以上指摘されたように、推定精度の向上には、粒径の見積もり(特にシモザラメ雪の効果)と植生の影響について、今後定量的な検討が必要である。ただし、北半球全般を解析対象として、誤差評価地点の約半数の地点で、誤差の絶対値の平均は20cm以下であることが示された。また、図-7に示されるように、妥当な地点は広く分布しており、本研究で提案されているアルゴリズムはグローバルな積雪量推定手法として有用な手法であると考えられる。



a) 適合性良の場合



b) 過小評価のために適合性が悪い場合

図-8 適合性の評価と植生分布

4. ユーラシア域の積雪量分布データセット

SSM/Iグローバルデータから対象とするユーラシア域にかかる軌道データを1987年から1993年まで5日間ずつ重ね合わせ、0.1度グリッドにリサンプリングし、19GHz水平偏波と37GHz水平偏波の輝度温度データセットを作成した。冬期1シーズンを11月から翌年の5月までとして、87年冬期から92年冬期までの6シーズン分のデータセットが作成された。図-9にユーラシア大陸の積雪深分布図の一例を示す。11月から1月にかけて積雪が増加拡大してゆき、2、3月で最大を迎えた後、4月以降急速に減少してゆく大陸スケールでの積雪季節変動特性が確認される。

この積雪深分布データセットから植生の影響を受けないと考えられる領域としてチベット高原域のデータを抽出し、年最大積雪深の年々変動を解析した。データの抽出地点は北緯32°線上の東経75°から105°で、この領域での各冬期における最大積雪深の空間分布が図-10に示されている。横軸は東経(度)、縦軸は最大積雪深(cm)である。このグラフから東経80°付近と95°付近、すなわちチベット地域の東部と西部に明瞭なピークが存在することが分かる。そこで88年冬期と89年冬期に注目して、縦軸に最大積雪深の偏差をとり再度プロットしたものが図-11である。積雪粒径の季節・空間変動は無視できると仮定すると、チベット地域の積雪の地域分

布について、高原の東西でシーズンのような顕著な年々変動が見られることがはじめて明らかにされた。

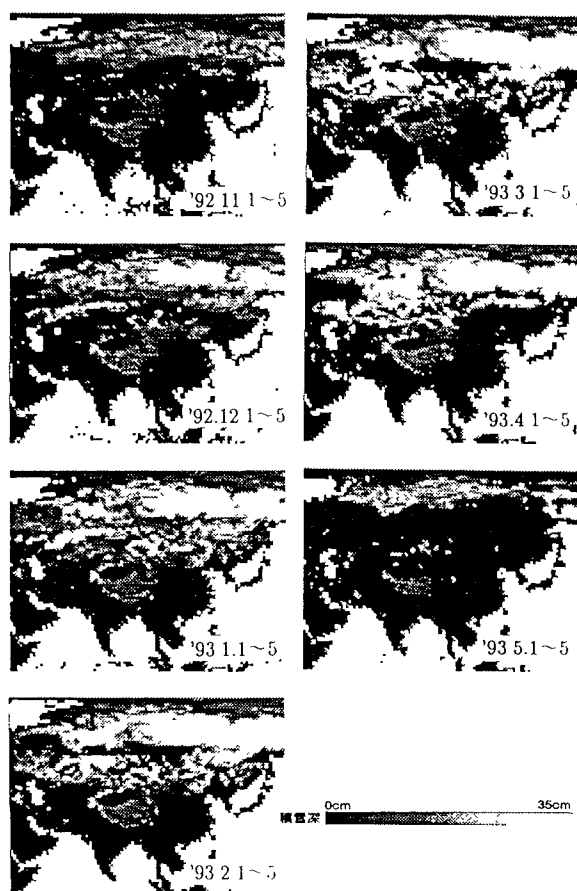


図-9 ユーラシア大陸の積雪分布の季節変化
(1992年11月～1993年5月)

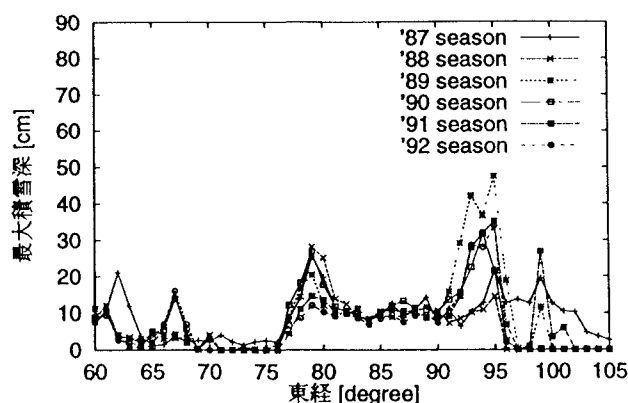


図-10 チベット高原域の年最大積雪深の年々変動
(北緯 32° 線, 東経75° ～105°)

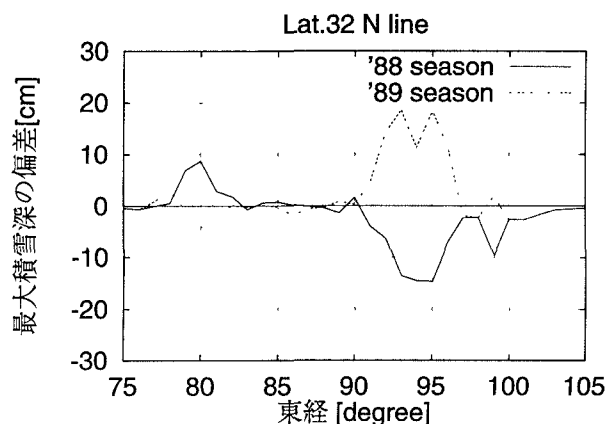


図-11 チベット高原域の年最大積雪深の偏差
(88, 89年冬期, 北緯 32° 線, 東経75° ～105°)

5. 結論

本研究より以下の事項が明らかにされた。

- 1) 積雪層内のマイクロ波放射伝達理論のシミュレーション結果に基づき、衛星によって観測される2周波でのマイクロ波輝度温度データから積雪深を算出するアルゴリズムが提案された。
- 2) 北半球での実測積雪深さデータを用いたアルゴリズムの検証結果、約半数の地点で良い精度で推定されていることが示された。
- 3) 推定精度の向上のために、粒径と植生の影響の評価が重要であることが示された。
- 4) 提案されたアルゴリズムに基づくデータセットを解析した結果、ユーラシア域での積雪の季節変動特性とチベット高原での積雪の空間分布の年々変動特性が示された。

謝辞：本研究は、長岡技術科学大学と宇宙開発事業団によるAMSARアルゴリズム開発共同研究の成果の一部である。また、文部省科学研究費補助金重点領域「衛星計測」の補助を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 安成哲三, 小池俊雄: 地球の気候とアジアモンスーンの水循環, 科学, vol.63, No. 10, pp.626-634, 1993.
- 2) Chang et al.: *Effect of vegetation cover on microwave snow water equivalent estimated*, Inter Symp. Remote Sensing and Water Resources, pp.137-145, 1987
- 3) Goodison, B E, Walker, A.: Canadian development and use of snow cover information from passive microwave satellite data, ESA/NASA Inter. Workshop on Passive Microwave Remote Sensing Related to Land-atmosphere interaction, pp.11-15, 1993.
- 4) England, A.W.: *Thermal Microwave Emission from a Scattering Layer*, Journal of Geophysical Research, Vol.88, No. 32, pp.4484-4496, 1975.
- 5) Koike, T., Suhama, T.: *Passive-microwave remote sensing of snow*, Annals of Glaciology, 18, pp 305-308, 1993.

(1998. 9. 30受付)