

SSM/I衛星データに基づく長期的な 積雪深の推定とその考察

ESTIMATION AND DISCUSSION OF LONG-TERM SNOW DEPTH BASED ON SSM/I SATELLITE DATA

筒井浩行¹・小池俊雄²
Hiroyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE

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)

In the past, the snow algorithm for Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E) was developed by Tsutsui, Koike et al (2005,2007). This algorithm was improved for Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) in this paper. It is for investigating long-term snow depth before Aqua is launched (2002).

Furthermore, snow depth in the Northern Hemisphere of the period from 1988 to 1999 was estimated from SSM/I satellite data by this algorithm, and the estimation result was argued.

Key Words : SSM/I, snow, radiative transfer theory, remote sensing, microwave

1. はじめに

近年、水に関わる災害が世界各地で多発し、地球温暖化による水環境に及ぼす影響が懸念されている。気象庁の予測実験によれば、約100年後(2100年頃)には、我が国の年平均気温は2~3℃、世界の平均気温は2.5℃上昇し、年最大日降水量が太平洋赤道域の中・東部を中心とした地域で増加する一方、その南北に位置する地域では減少するという結果が報告されている(気象庁, 2005¹⁾)。

更に世界の多くの地域で異常多雨の出現数が増加すると共に異常少雨の出現数が減少する長期的な傾向が報告されており、地球温暖化の影響が示唆されている。

地球温暖化が地球上の気候にどのような影響を与えるかを調べるためには、大気大循環モデル(general circulation model; GCM)において大気-陸面間、大気-海洋間の相互作用の実態を再現したシミュレーションを行う必要がある。特に大気-陸面の相互作用における地表面での地球規模の熱・水フラックスが、気候システムに果たす役割を定量的に把握することは、地球規模の気候変動予測精度の向上やその影響の評価において極めて重要となる。陸面の水文量として、植生、土壌水分量、積雪などが挙げられるが、特に積雪は大陸における季節的な加熱状態の「気候の季節変動や年々変動」へ与える影響が積雪の多寡により大きく変動するという観点から重視されている。この積雪の水循環変動・気候変動への

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を定量的に計測する必要がある。しかしながら地形的条件による制限やその観測規模の大きさなどから、全球にわたり多くの計測器を配置展開することが困難であることから、容易に手をつけることができない課題とされてきた。しかし、1970年代からマイクロ波センサーの搭載された人工衛星が打ち上げられはじめ、マイクロ波リモートセンシング技術により全球にわたる時空間的に一様なマイクロ波輝度温度データ計測が可能となり、更にマイクロ波の高い誘電特性を利用したマイクロ波放射伝達理論を組み合わせた多くの積雪衛星アルゴリズムが開発されたことで、それまで困難とされてきた全球にわたる積雪の定量観測が可能となった。またマイクロ波リモートセンシング技術・積雪衛星アルゴリズムによる陸面水文量である積雪量の定量観測とその推定精度の向上は、地表面水フラックスの定量的把握を実現させ、時空間的変動の大きい地球水循環システムの定量的な理解とモデル化、それに基づく気候変動解明の有力な解決策の一つとなる。

これまで多くの積雪衛星アルゴリズムが開発されてきたが、その中で筒井・小池ら(2005, 2007^{2,3)})は、2002年に打ち上げられた人工衛星Aquaに搭載されたAdvanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System(AMSR-E)の多様な周波数の輝度温度データを用いて、積雪深を衛星データのみから自動的に推定する積雪

衛星アルゴリズムを開発した。しかし、近年、示唆されている地球温暖化による影響を調査するためには、2002年からの5年間のみでは無く、それ以前の全球スケールの積雪量を長期的に調査する必要がある。そこで、本論文では、AMSR-E対応に開発された筒井・小池ら(2005, 2007²⁾³⁾)のアルゴリズムを1987年から観測が継続され続けているSpecial Sensor Microwave Imager(SSM/I)衛星データにも適用できるように構築し直し、1988年から1999年までの12年間の積雪深を全球スケールで推定した。またそれに基づき12年間の全球の積雪域(面積)では無く、積雪量の変化について考察した。

2. 積雪衛星アルゴリズムの概要

(1) 筒井・小池ら(2005, 2007²⁾³⁾)のアルゴリズム

本節では、筒井・小池ら(2005, 2007²⁾³⁾)の積雪衛星アルゴリズムの概要について記述する。

本アルゴリズムでは、4 stream fast 放射伝達モデル(Guosheng Liu ; 1998⁴⁾)とDense media 放射伝達モデル(Tsang ; 1992⁵⁾)を組み合わせたマイクロ波放射伝達モデルを用い、0.1mm刻みで0.4mmから0.9mmまでの雪粒子径を設定し、粒子径毎に2種類のテーブルを作成する。1つは90GHz帯マイクロ波輝度温度と積雪深(1cm～200cm)・雪温(223Kから273K)から成る90GHz輝度温度変換テーブル、もう一つは19GHzと37GHz帯のマイクロ波輝度温度と積雪深・雪温の関係から成るLookup Tableである。また、全球を対象とした場合に広範囲な分布となる19GHzと37GHz帯のマイクロ波輝度温度を確実にLookup tableで捉え積雪量を推定するために6.925GHzの衛星輝度温度(T_{b06})で、次の4段階の射出レベルを設定し、そのレベルに応じてLookup tableを温度方向にスライドさせる手法を適用した。

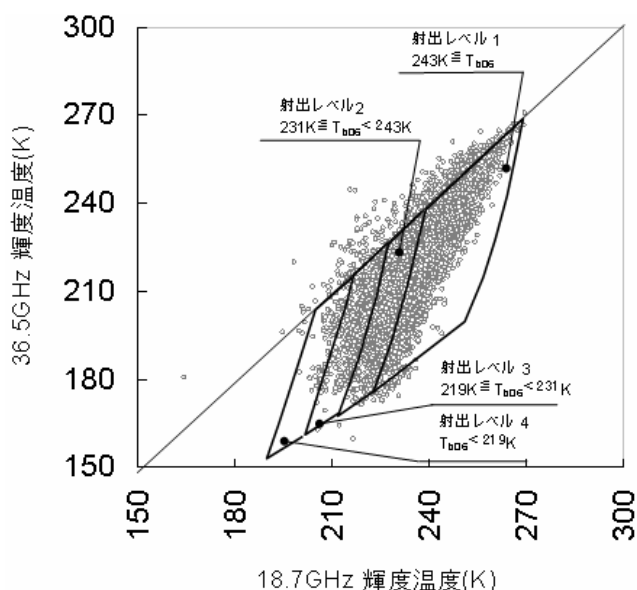


図-1 射出レベルの設定

射出レベル 1	:	$243\text{K} \leq T_{b06}$	
射出レベル 2	:	$231\text{K} \leq T_{b06} < 243\text{K}$	
射出レベル 3	:	$219\text{K} \leq T_{b06} < 231\text{K}$	
射出レベル 4	:	$T_{b06} < 219\text{K}$	

本アルゴリズムでは、AMSR-E衛星データを用い、まず6.925GHz輝度温度より射出レベルを決定し、そのレベルに相当するテーブル群を選定する。次に18.700GHzと36.500GHz輝度温度を各粒子径のLookup tableに入力し、粒径毎の積雪深・雪温を計算する。この積雪深・雪温を各粒子径の90GHz帯輝度温度変換テーブルに入力し、89.000GHz輝度温度を計算する。この粒子径毎に計算した89.000GHz輝度温度と同周波数の衛星輝度温度データとの差の絶対値を計算し、その差の絶対値の最小値を見出すと共にそれに相当する粒子径を最適な雪粒子径として選定する。最後に選定した最適雪粒子径に相当する積雪深と雪温を最適積雪深と雪温として選定する構造となっている。

(2) SSM/Iデータへの応用

前述の通り、筒井・小池ら(2005, 2007²⁾³⁾)の積雪衛星アルゴリズムは、AMSR-Eの6.925GHz (H)、18.700GHz (H)、36.500GHz (H)、89.000GHz (V)を用い積雪深(雪温、雪粒子径)を推定する。一方、SSM/Iの持つ周波数は、19.350GHz (HV)、22.235 (V)、37.000 (HV)、85.000 (HV)であるため、積雪深・雪温に対応する19GHz・37GHz帯、並びに雪粒子径に対応する90GHz帯はそのまま適用できるが、射出レベルとテーブル群の選定を行う6GHz帯の周波数が不足する。

6GHz帯は、積雪を透過し土壌の情報も含めた射出を評価するために最も長い波長を持つ周波数として適用した。そこで、SSM/I周波数の中の最も長い波長を持つ19.350GHzの6GHz帯への代替とする方法を考えた。

図-2は、北半球GTS81ステーションにおける2002年10月から2003年3月までのAMSR-Eの6GHz帯(6.925GHz)輝度温度と19GHz帯(18.7GHz)輝度温度の日データをプロットした分布図であるが、両輝度温度には次の関係式が成立することを確認した。

$$T_{b19} = 0.0109 \times T_{b06}^2 - 4.23 \times T_{b06} + 616 \quad (\text{式-1})$$

そこで、6GHz帯の代わりに19GHz帯を適用し、新たに次の射出レベル判定条件を設定しSSM/Iデータを適用した。

射出レベル 1	:	$231\text{K} \leq T_{b19}$	
射出レベル 2	:	$220\text{K} \leq T_{b19} < 231\text{K}$	
射出レベル 3	:	$212\text{K} \leq T_{b19} < 220\text{K}$	
射出レベル 4	:	$T_{b19} < 212\text{K}$	

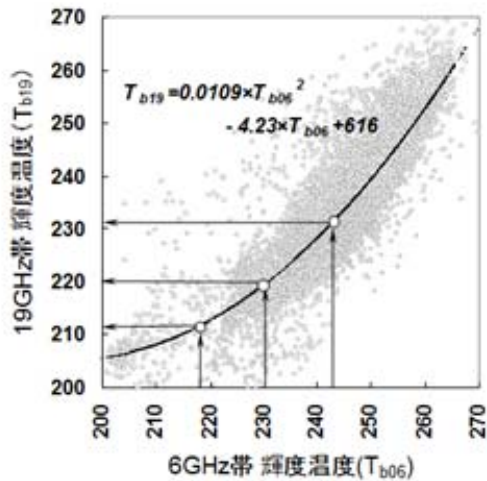


図-2 北半球GTS81ステーションにおける2002年10月から2003年3月までのAMSР-Eの6GHz帯(6.925GHz)輝度温度と19GHz帯(18.7GHz)輝度温度の日データの分布図

3. アルゴリズムによる積雪深の推定

SSM/Iデータに対応させたアルゴリズムによりSSM/I衛星輝度温度データから1988年から1999までの1月・2月・3月それぞれの月平均の積雪深を全球スケールで推定した。その結果を図-3に示す。これを見ると北緯60°以北の中央シベリア、アラスカ、カナダの典型的な多積地帯を評価できていることが確認できる。また1989年、1990年、1991年以外の年は、1月・2月・3月と中央シベリアにおいて増加傾向にあるのに対し、1989年、1990年、1991年は2月の積雪が最大となっていることを確認することができる。

4. 積雪深推定結果に対する考察

Raino *et. al.* (2006)⁶⁾は、北ユーラシアにおける1936年から2000年までの積雪深のトレンドを係数 β で評価し報告している。図-4は、その結果を引用したものである。

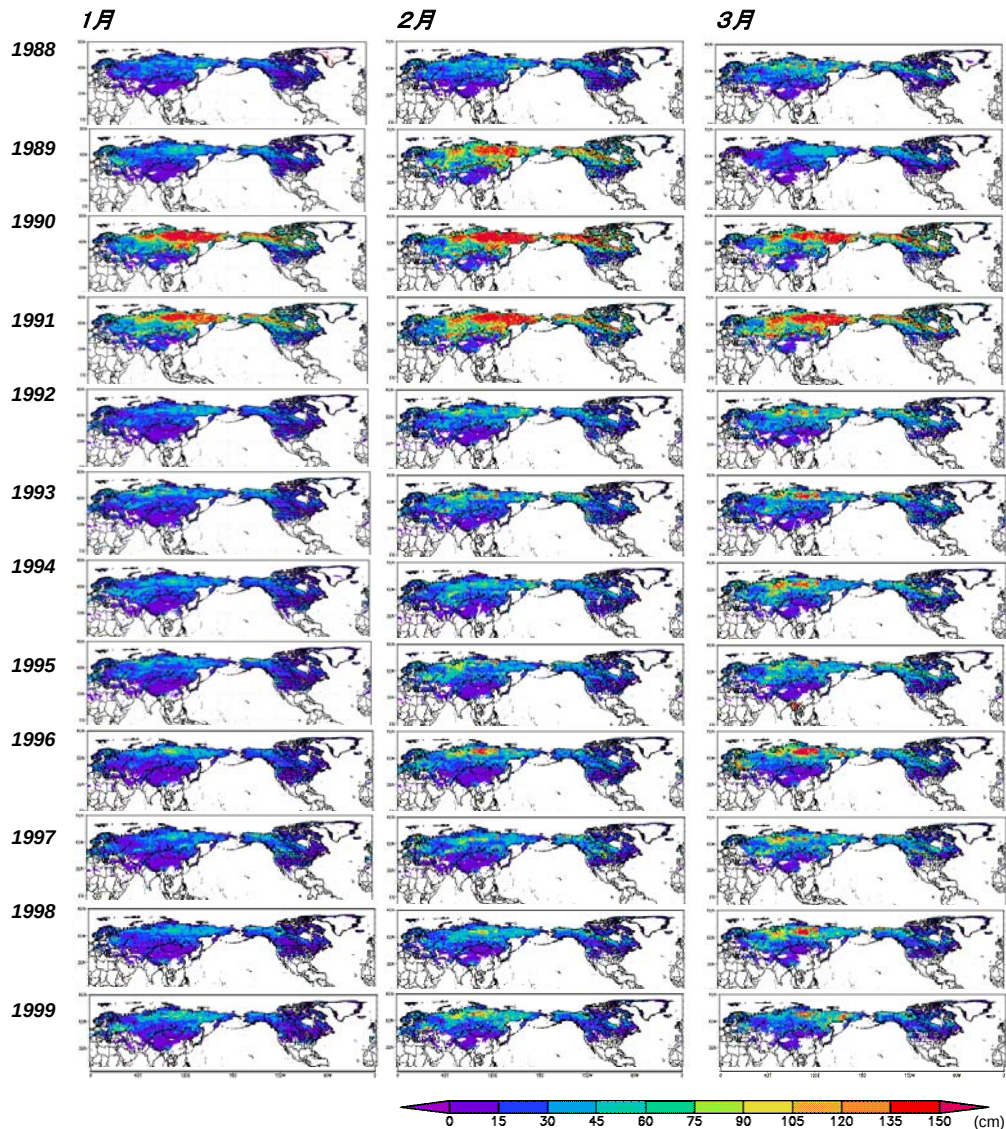


図-3 SSM/I輝度温度データを用いたアルゴリズムによる積雪推定結果
1988年から1999までの1月・2月・3月それぞれの月平均

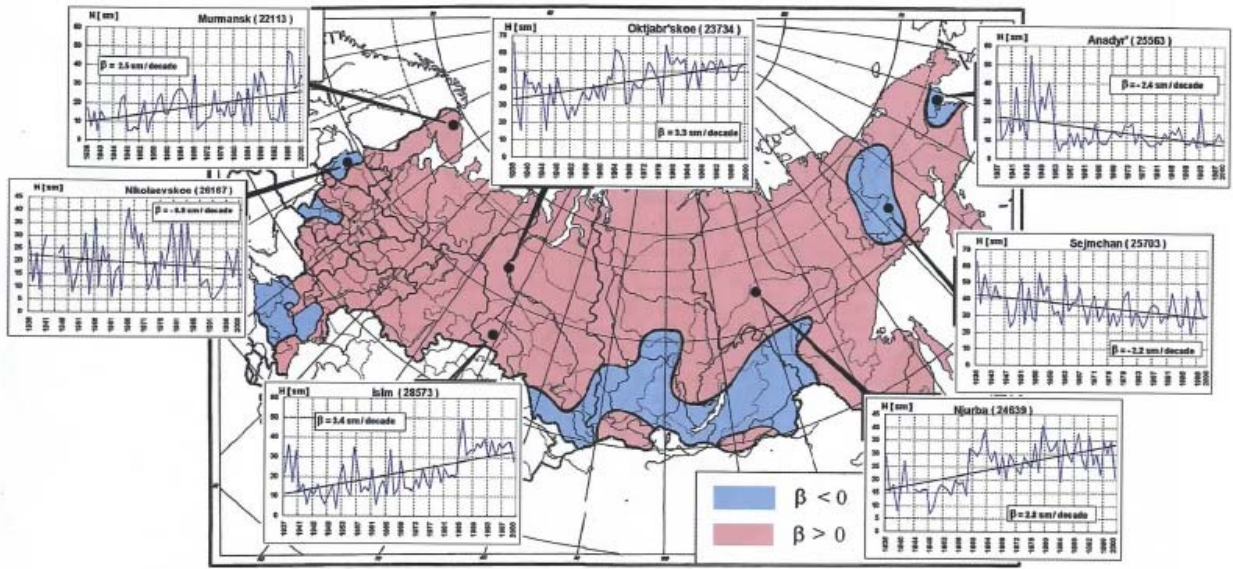


図-4 北ユーラシアにおける1936年から2000年までの期間に対する積雪深の時系列変化に基づくトレンド係数
Raino et. al. (2006)⁶⁾より引用

図-4に示す通り、Raino et. al. (2006)⁶⁾は、1936年から2000年までの北ユーラシア7地点における積雪深の時系列変化を示した。そこで、これら7地点の内の4地点 (Sejmchan, Isim, Njuba, Anadyr') における1988年から1999年までの積雪深を読み取り、アルゴリズムによる推定値との比較を行った。その結果を図-5に示すが、1990年・1991年において極端な過大評価が確認されるもののその他の年は、観測地点と人工衛星のフットプリントとの間に生ずる空間的な不均一性による影響を含む結果としてみれば、比較的良好な推定結果と判断することができる。なお、地上観測値は、各年の値を図-4のグラフより読み取り、また推定値は、各年の1月の平均値を用いている。従って、本結果は、観測値と推定値のサンプリング方法により誤差も含んでいることを記しておく。

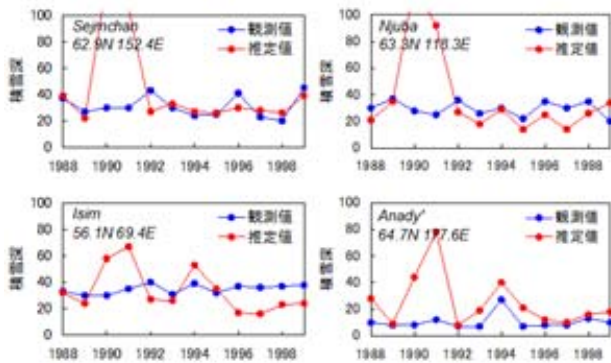


図-5 北ユーラシアSejmchan, Isim, Njuba, Anadyr' における積雪深推定結果の検証 観測値はRaino et. al. (2006)⁶⁾より引用

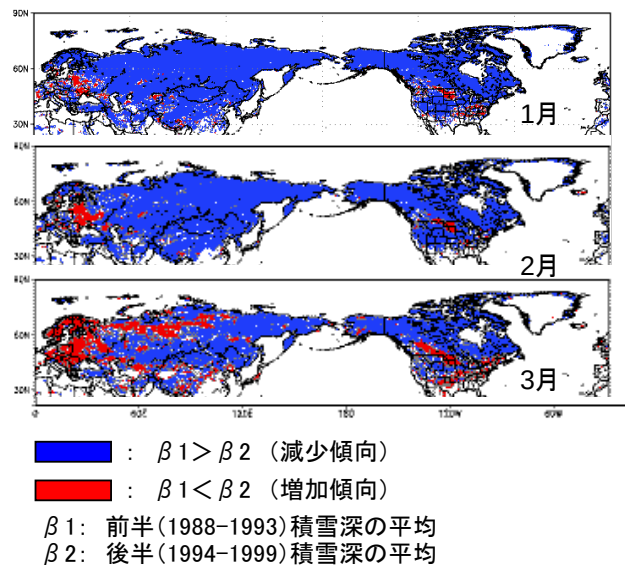


図-6 1988年から1999年までの積雪深のトレンド

また、図-4に示す通り、Raino et. al. (2006)⁶⁾は、1936年から2000年までの積雪深のトレンドの傾きを係数 β で表現した。

そこで、本論文では、1988年から1999年までの12年間を前半6年間と後半6年間に分け、前半6年間の積雪深の平均を β_1 、後半6年間の積雪深の平均を β_2 とした。更に $\beta_1 > \beta_2$ の場合は1988年から1999年までのトレンドが減少傾向にあり、 $\beta_1 < \beta_2$ の場合は増加傾向にあるとして1988年から1999年までのトレンドを簡易的に調べた。その結果を図-6に示す。

図-4において1936年から2000年までのトレンドは、北緯60° 以北のほとんどの増加傾向が示されているのに対し、1990年・1991年の過大評価の影響が含まれている状態にあるものの1月・2月では、アメリカ中央平原・アパラチア山脈沿い、またユーラシアでは、東ヨーロッパ平原・中央ロシア高地を除き減少傾向にあることが分かる。

またユーラシアでは、東ヨーロッパ平原・中央ロシア高地を除き減少傾向にあることが分かる。

しかし3月になるとユーラシアにおいて東ヨーロッパ平原・中央ロシア高地に留まっていた増加傾向の分布がスカンジナビア半島や北緯60° 以北の中央シベリア高原ま

で延び、アメリカでもアメリカ中央平原・アパラチア山脈沿いを中心に増加傾向の分布が拡大していることが分かった。

また本論文では、次に1月・2月・3月それぞれで1988年から1999年までの12年間の積雪深を平均し、その平均値と各年の積雪深との偏差を計算した。その結果を図-8に示す。

当図においても前述の1990年前後の積雪深の過大評価を確認することができる。また、その一方で3月になるとその識別は困難になるが、1992年以降の1月・2月に着目すると北緯60° 以北の中央シベリア高原・北シベリア低地とその南のモンゴル・カザフスタンにおいて1年もしくは2年の振動が発生していることが分かった。

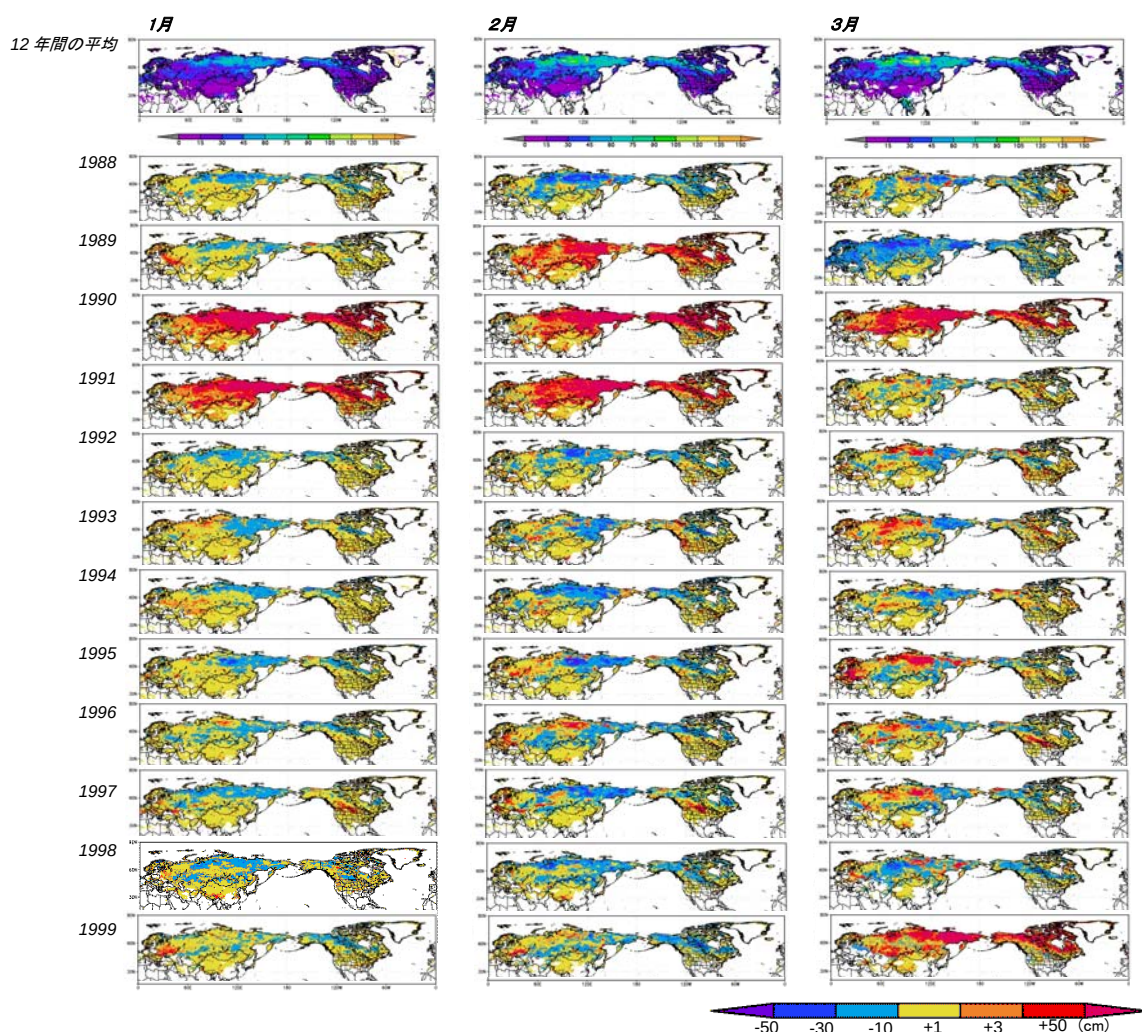


図-8 1月・2月・3月それぞれで1988年から1999年までの12年間の積雪深の平均、並びにその平均値と各年の積雪深との偏差。偏差は、各年の積雪深から12年平均の積雪深を差し引き正負を決定。

5. おわりに

本論文では、AMSR-E衛星データにより開発した積雪衛星アルゴリズム(筒井・小池ら：2005, 2007²³⁾)を人工衛星Aquaが打ち上げられた2002年より前の積雪量を推定するためにSSM/I衛星データに応用できるよう構築し直した。またそのアルゴリズムでSSM/I衛星データより1988年から1999年までの全球スケールの積雪深を推定し、その推定結果について考察を加えた。

その結果として、第1に、1990年前後の北緯60°以北に過大な推定傾向が確認された。そこで、今後の課題として、特に1990年前後に着目しAMSR-EとSSM/Iとのデータ特性の相違を見出し、SSM/I輝度温度データをAMSR-E輝度温度データの特性に整合するようAMSR-E用に構築されたアルゴリズムに更なる改良を施したいと考えている。また、本論文のアルゴリズムでは、6GHz帯輝度温度により積雪下の土壌からの射出率を評価した上でレベル分けし最適なlookup tableを選定する手法を取り入れたAMSR-E用のアルゴリズムをSSM/I用に修正するために6GHz帯の代わりとして波長の短い19GHz帯を用いている。故に土壌の射出率を波長の長い6GHzを用いた場合に比べ適切に評価できていない可能性がある。しかし、6GHz帯の代わりに19GHz帯を用いたことによる土壌の射出率の不確実性を調査することは難しい。そこで、その調査方法を考案しこの不確実性を調査することを今後の課題としたいと考えている。

第2に、本論文では衛星データより推定した全球スケールの推定結果を基に1990年代における積雪量の変化の定性的な傾向について論じたが、今後は、気象条件と合わせて、その原因について考える必要がある。

第3に、本論文では、Raino *et. al.* (2006)⁶⁾による北ユーラシア4地点の地上観測値との比較を通じてSSM/I衛星データに基づくアルゴリズムの積雪深推定精度を評価しているが、人工衛星によるマイクロ波放射計の空間分解能は、積雪を検知する上で有効な19GHz帯・37GHz帯でそれぞれ30km・15kmまでに及ぶ。それに基づく推定積雪深とポイントの地上観測積雪深を比較することは大きな

空間的な不均一性による誤差を招く。そこで今後、衛星の空間分解能の範囲内の可能な限り多くの地点の地上観測値を入手し推定精度の検証、並びにアルゴリズムの改良を行う必要があると考えている。

謝辞：本研究は、統合地球水循環強化観測期間プロジェクト (CEOP) および宇宙航空研究開発機構 (JAXA) AMSR/AMSR-E検証実験の一環として実施したものである。また科学技術振興事業団戦略的創造研究(水の循環系モデリングと利用システム)および科学技術振興調整費(先導的研究)の支援を受けた。記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁 編集, 異常気象レポート2005概要版. 気象業務支援センター, 1-10, 2005.
- 2) 筒井浩行, 小池俊雄, 玉川勝徳, 藤井秀幸, Tobias Graf: 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, 第49巻, pp. 319-324, 2005.
- 3) 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.
- 4) Guosheng Liu: *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) Leung Tsang: *Dense media radiative transfer theory for dense discrete random media with particles of multiple sizes and permittivities*, In *Dielectric Properties of Heterogenous Materials*, chapter 5. Elsevier Science, 1992.
- 6) Raino Heino, Vjacheslav Razuvaev and Lev Kitaev: *Snow-Cover Change over Northern Eurasia during the Last Century* INTAS-SCCONE Project, Ice and Climate News, No.7, pp6-7.

(2007. 9. 30受付)