

地上マイクロ波放射計を用いた地上積雪観測に基づく積雪量推定衛星アルゴリズム検証

SNOW SATELLITE ALGORITHM VERIFICATION BASED ON THE GROUND SNOW OBSERVATION USING A GROUND MICROWAVE RADIOMETER

筒井浩行¹・小池俊雄²・Tobias Graf³・兒玉裕二⁴・青木輝夫⁵

Hiroiyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE, Tobias Graf, Yuji KODAMA and Teruo AOKI

- ¹正会員 工修 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 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)
⁴正会員 工博 北海道大学低温科学研究所 (〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目)
⁵正会員 工博 気象研究所物理気象研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

In the previous research, we developed a snow algorithm for snow depth and snow grain size based on the microwave radiative transfer theory and validated by using the in-situ snow depth data at the ground-based stations in the northern hemisphere and the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System (AMSR-E) on Aqua launched by NASA in 2002.

In this study, we verified the correctness of this snow satellite algorithm by the ground snow observation using the ground microwave radiometer (GBMR (Ground Based Microwave Radiometer)) in Sapporo. In the cases with the wet snow, the results of validation were shown poor correspondence of observation value and estimation value. In contrast, in the cases with the dry snow, the results of validation were shown good correspondence of observation value and estimation value.

Key Words : snow , radiative transfer theory , remote sensing , microwave

1. はじめに

地球全体の積雪量を定量的に把握するためには、地球全体に観測機器を均一に配置・展開する手法が理想である。しかしその手法は、その観測規模などを考えると非現実的である。そのため、衛星リモートセンシング技術を利用したマイクロ波放射計による全天候下での積雪観測手法が開発され続けている。

本研究では、筒井・小池ら(2005)¹⁾が考案した積雪深を衛星観測データのみから自動的に推定する衛星アルゴリズムの妥当性を札幌における地上マイクロ波放射計を用いた地上積雪観測を通じ検証する。

2. 積雪量推定衛星アルゴリズムの概要

本節では、本研究において検証を行った積雪量推定衛星アルゴリズム〔筒井・小池ら(2005)¹⁾〕について記述する。

(1) 積雪深・雪温の推定プロセス

当衛星アルゴリズムは18.70GHz(H偏波)と

36.50GHz(H偏波)の輝度温度と積雪深・雪温の関係から成るLookup Tableに同2周波数の衛星輝度温度データを入力することにより積雪深・雪温を推定する手法が基本になっている。

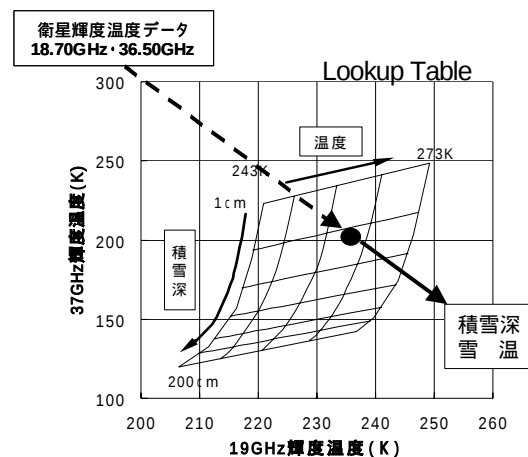


図-1 積雪深・雪温の推定プロセス

(2) 従来の衛星アルゴリズムの問題点に対する

当アルゴリズムの対応

当衛星アルゴリズムは、従来の衛星アルゴリズム^{4),5),6),7)}の問題点に対し下記のような対策を講じている点で特徴的である。

1) モデル設定条件に関する問題とその対策

従来の衛星アルゴリズム^{4),5),6),7)}は、雪粒子径や積雪密度などの積雪物理パラメータの設定に制限を受けるとい問題を抱えていた。そこで当衛星アルゴリズムでは、それらの積雪物理パラメータの設定を制限されることの無い4-Stream fast 放射伝達モデル〔Guosheng Liu(1998)²⁾〕を導入することによりこの問題への対応を図っている。

2) 積雪層伝播中の過度な減衰効果の問題とその対策

従来の衛星アルゴリズム^{4),5),6),7)}は、積雪の消散係数を過大評価し、積雪層を伝達する際の減衰効果を過度に評価する。そのため積雪深(雪温)を算定する際に用いる18.70GHzと36.50GHzの輝度温度差が大きくなり、Lookup Tableを積雪深成分方向に伸ばし、深い積雪を推定することができないという事態に陥っていた。

そこで当衛星アルゴリズムでは、最適な消散係数を計算し減衰効果の過度な評価をすることの無いDense media 放射伝達モデル〔Tsang(1992)³⁾〕を導入することによりこの問題への対応を図っている。

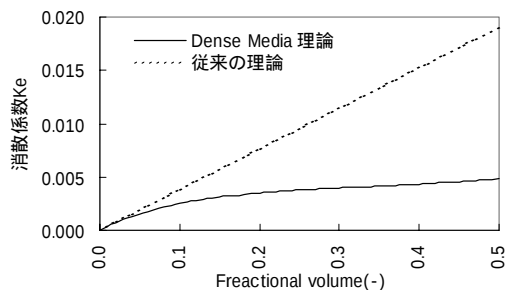


図-2 従来の放射伝達理論とDense Media放射伝達理論による消散係数計算値の相違

3) 低周波数の適用に関する問題とその対策

図-3に示すように人工衛星は積雪・植生・降水(大気)により減衰された土壌からの射出を受け取る。故に積雪を対象とした衛星アルゴリズムであっても積雪下の土壌の情報を正確に検知・判断することが重要となる。

積雪下の土壌の情報を評価するためには、本来、土壌密度・土壌水分・土壌温度などの多くの土壌物理パラメータを考慮する必要があり、そのためには各土壌物理パラメータ一つ一つをそれぞれ異なる周波数に割り当ててアルゴリズムに組み込む必要がある。しかし周波数帯の種類には限りがあり、積雪アルゴリズムに使用した周波数以外の周波数が、必ずしも土壌物理パラメータの検知に有効とは限らない。

そこで当衛星アルゴリズムでは、従来の衛星アルゴリズム^{4),5),6),7)}では適用できなかった低周波数を適用することのできる4-Stream fast 放射伝達モデルとDense media放射伝達モデル^{2),3)}を導入することにより、図-4に示すように積雪を透過し土壌の情報を検知する上で有効な長波長・低周波の6.925GHz(H偏波)1種類の周波数を用い、各土壌物理パラメータの組合せからの1つの出力値である土壌射出を評価する手法を採用した。

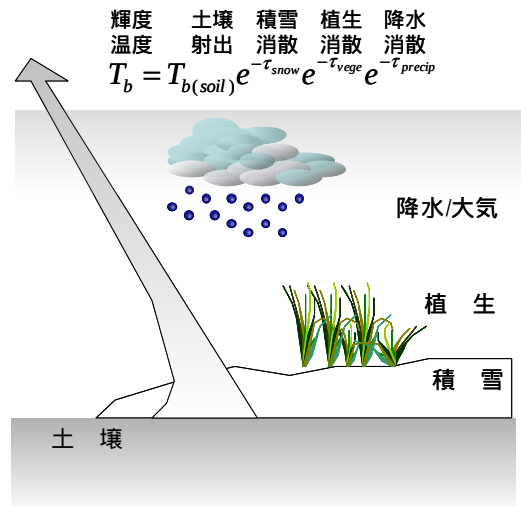


図-3 土壌射出の減衰

この手法の採用により、6.925GHz(H偏波)の衛星輝度温度データ(Tb06)で、積雪下の土壌の情報(4段階の土壌射出レベル)を判断し、多様な衛星輝度温度データを確実にLookup Table内に収めることを可能にした。

土壌射出レベル1	:	243K	Tb06
土壌射出レベル2	:	231K	Tb06 < 243K
土壌射出レベル3	:	219K	Tb06 < 231K
土壌射出レベル4	:		Tb06 < 219K

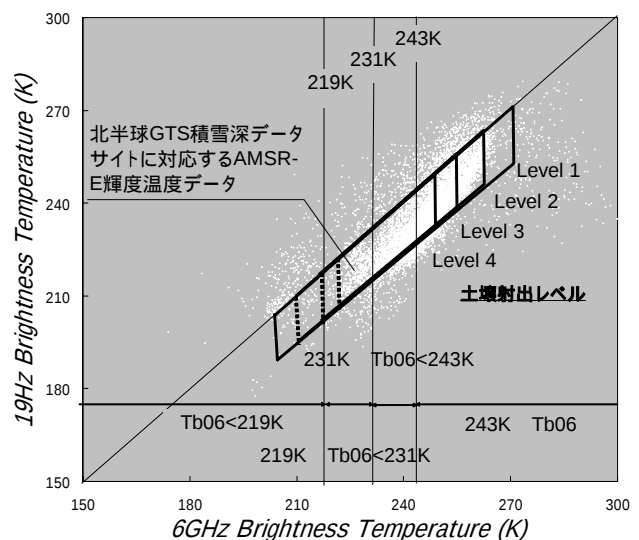


図-4 土壌射出レベルの設定

4) 高周波数の適用に関する問題とその対策

従来の衛星アルゴリズム^{4),5),6),7)}は、高周波数を適用できないが故に本来時間の経過と共に変化する雪粒子径を一定値に仮定しなければならないという問題を抱えていた。そこで当衛星アルゴリズムでは、高周波数の適用が可能な4-Stream fast 放射伝達モデルとDense media放射伝達モデル^{2),3)}を導入することにより、89GHz(V偏波)をアルゴリズムに組み込み、時間の経過と共に変化する雪粒子径を検知し雪粒子の散乱射出効果を評価することのできる手法を採用することでこの問題への対応を図っている。

3. マイクロ波放射計による地上積雪観測の概要

2章において、その概要を記した積雪量推定衛星アルゴリズムの検証の一環として、2004年12月～2005年3月にかけて札幌において、地上マイクロ波放射計〔GBMR (Ground Based Microwave Radiometer)〕を用いた地上積雪観測を実施した。

(1) 観測地及び観測期間

観測地として、北海道大学低温科学研究所園場を借用し、2004年12月～2005年3月にかけて、表-1に示す期間に積雪観測を実施した。

表-1 観測期間

観測回数	観測期間
1	2004年12月8日～9日
2	2005年1月5日～6日
3	2005年1月19日
4	2005年2月1日～2日
5	2005年2月23日
6	2005年3月15日～16日
7	2005年3月28日～29日

(2) 観測項目

1) 輝度温度計測

図-5に示すように地上マイクロ波放射計(GBMR)を設置し、人工衛星Aquaに搭載されたAMSR-E(The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System)と同じ地上入射角55°で、18.70GHz(V偏波・H偏波)・36.50GHz(V偏波・H偏波)・89.00GHz(V偏波)の周波数を対象に積雪の輝度温度を計測した。

また、積雪物理量及び土壌物理量の計測項目を表-2に示す。

表-2 積雪・土壌計測項目

1 積雪深	6 積雪密度
2 積雪層位	7 積雪等価水量(SWE)
3 雪質	8 土壌密度
4 雪温	9 土壌温度
5 積雪粒径	10 土壌水分

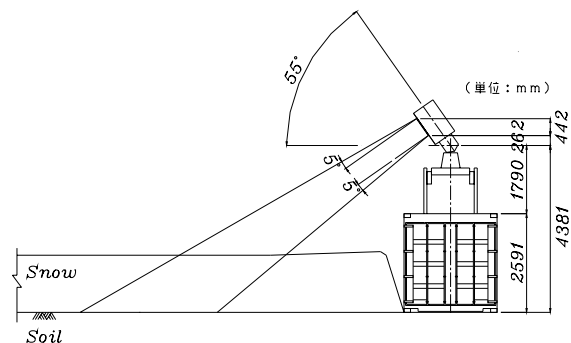
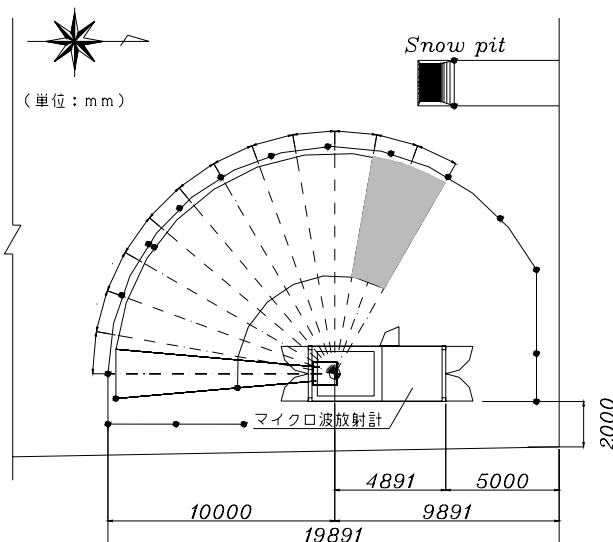


図-5 マイクロ波放射計(GBMR)による地上積雪観測状況

4. 積雪状況と検証データの選定

図-6に積雪断面観測に基づく積雪の雪質変化状況を示す。昨年12月から時間の経過と共に新雪→しまり雪→ざらめ雪へと変化する状況が確認できる。また図-7に示すように、日射により溶けた雪面が夜間の冷却により再凍結し薄い氷板へと変化し、更にその後、その上に積雪があった状態において積雪上層で溶け出した融雪水が下層へ浸透し過去に形成されたその薄い氷板上に留まり、更に夜間の冷却を受けることにより再凍結し厚いものへと成長する。図-6よりこのような厚い氷板が2月末以降に多く形成されている状況を確認することができる。この状態はマイクロ波による積雪観測において大きな問題であり、積雪層内に厚い氷板が形成されている場合、その氷板は境界となり、その下の情報を検知することが困難になってしまう。そこで、本研究では、複数の厚い氷板が形成される前の2004年12月～2005年2月前半までを対象に検証を行うこととした。

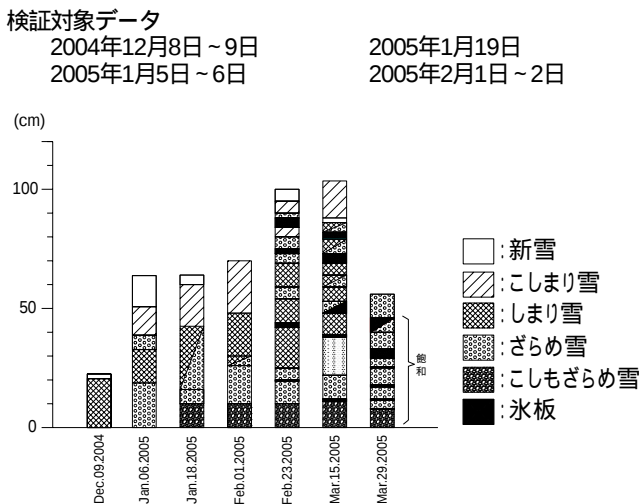


図-6 積雪断面観測に基づく積雪の雪質変化状況

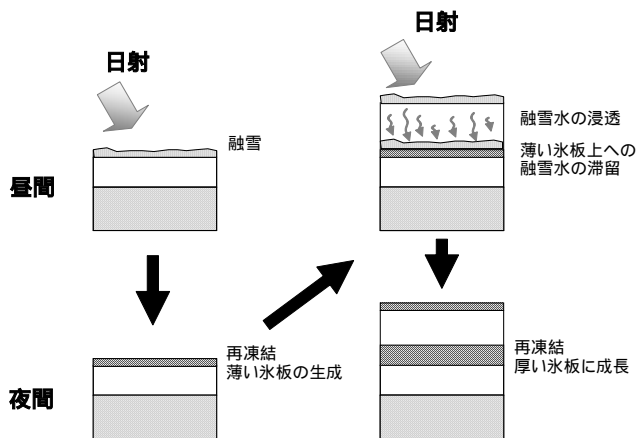


図-7 氷板の形成過程

5. 積雪量推定衛星アルゴリズムの適用

アルゴリズム上、積雪深・雪温の推定に用いる

18.70GHz(H偏波)と36.50GHz(H偏波)の輝度温度と最適な積雪粒径の選定に用いる89.00GHz(V偏波)は、地上マイクロ波放射計(GBMR)により計測可能であるが、6.925GHz輝度温度は計測することができない。しかし、6.925GHz輝度温度による土壌射出レベルは、図-8に示す通り、6.925GHzと18.70GHzとの対応を図った状態で設定している。土壌射出レベルの設定の目的は、18.70GHz・36.50GHz輝度温度をLookup tableで確実に捉えることにあることを考慮し、本観測結果に対しては18.70GHzを代用し土壌射出レベルを設定した。また図-9に観測日毎の土壌射出レベル及びLookup Tableの設定結果を示す。

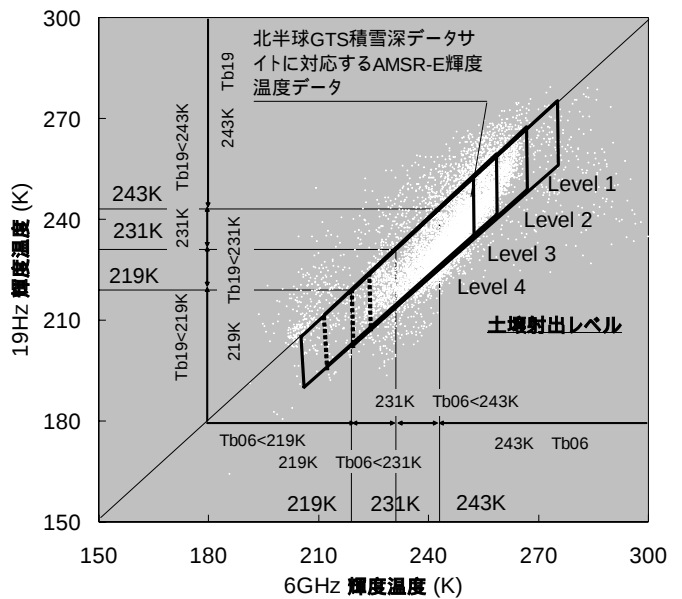
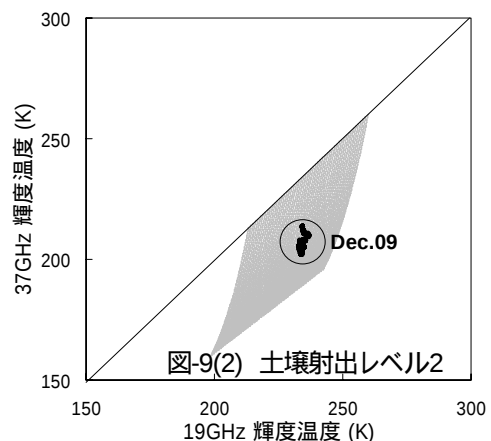
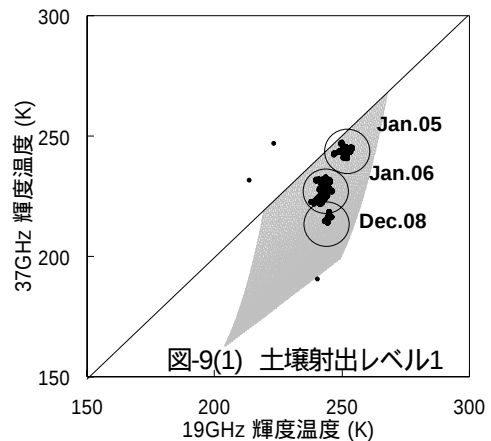


図-8 18.7GHzに基づく土壌射出レベルの設定



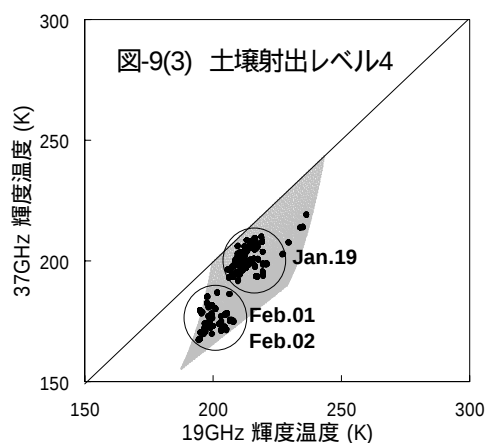


図-9 各観測日の土壌射出レベルとLookup Tableの決定

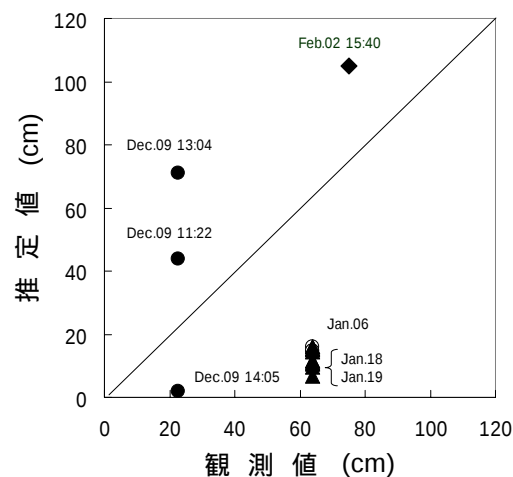


図-11 アルゴリズムによる積雪深推定結果(整合性：悪)

6. 積雪量推定衛星アルゴリズム検証結果

4章において決定した対象データ(2004年12月～2005年2月前半)を用い、また5章において記述した方法で衛星アルゴリズムにより積雪深を推定した。

その結果を図-10に示したが、観測値と推定値の整合性に大きなバラツキが生じていることを確認できる。

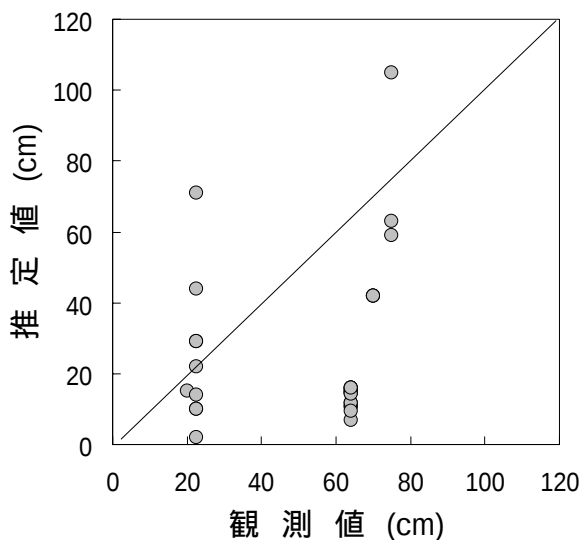


図-10 アルゴリズムによる積雪深推定結果(全体)

この中で特に整合性の悪い結果を抽出したものを図-11に示す。また観測日前日からの気温・雪面温度・天候を図-12(a)～(d)に示す。整合性の悪い観測時間帯の気温・雪面温度・天候に着目すると以下の積雪状態が原因となり、整合性の悪さを引き起こしていることが予想される。

12/9 11:22・13:04・14:05及び1/6 の気温・雪面温度をみると共に0 を越えている。そのため積雪は日射により溶け、濡れ雪もしくは湿雪に移行しているものと考えられる。

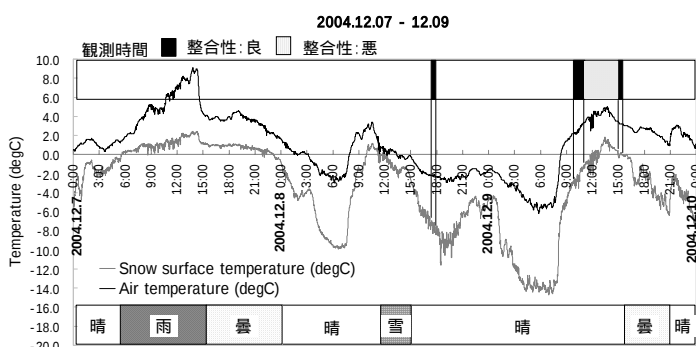


図-12 (a)2004/12/7～12/9の気温・雪面温度・天候

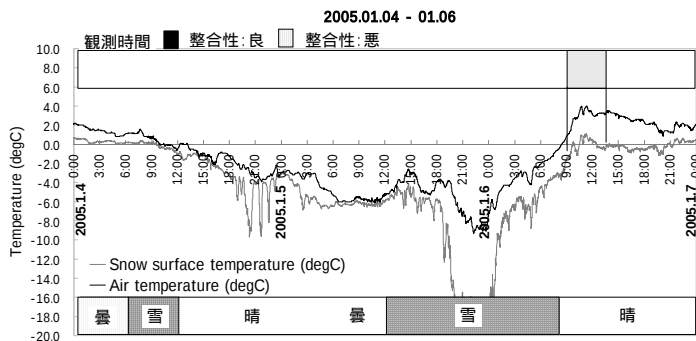


図-12 (b)2005/1/5～1/6の気温・雪面温度・天候

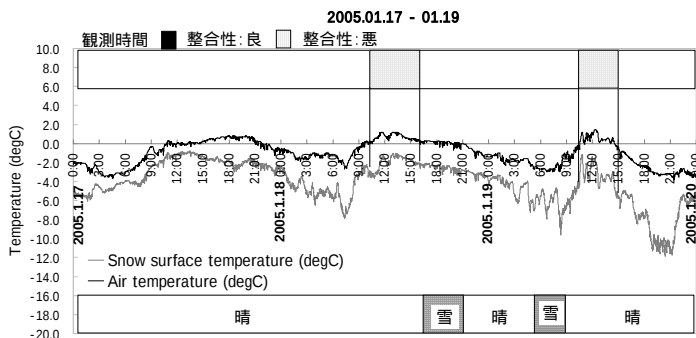


図-12 (c)2005/1/17～1/19の気温・雪面温度・天候

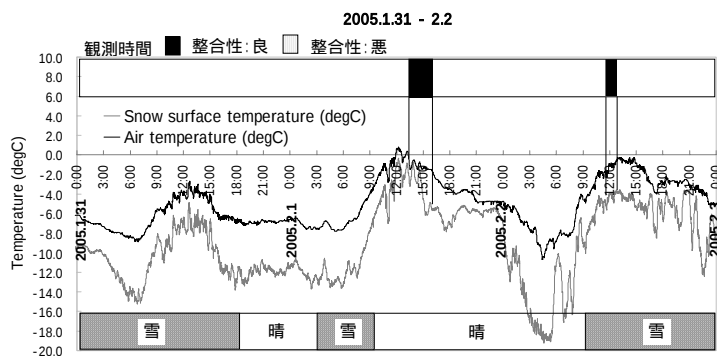


図-12 (d)2005/2/1 ~ 2/2の気温・雪面温度・天候

次に、1/18-19の観測時間帯をみると気温は0 を越えているが、雪面温度は0 以下であることが分かる。しかし観測日前より晴天が続いており、夜間の冷却を受けても積雪内部の温度はそれ程下がらず、乾雪の状態までには達していないものと考えられる。

本研究で適用したアルゴリズムは乾雪を対象としたものであるため、このような濡れ雪・湿雪に対して対応できず、精度の悪い結果がもたらされたものと考えられる。

それに対して、気温・雪面温度共に0 以下の結果(12/8 17:54, 2/1 13:48・14:59・16:29, 2/2 11:51・12:42)や朝・夕の低い気温の影響を受けやすい浅い積雪(12/9 9:50・15:03)では、乾雪の状態が保持されているため、乾雪を対象としたアルゴリズムにおいて比較的整合性の良い結果が得られたと言える(図-13)。

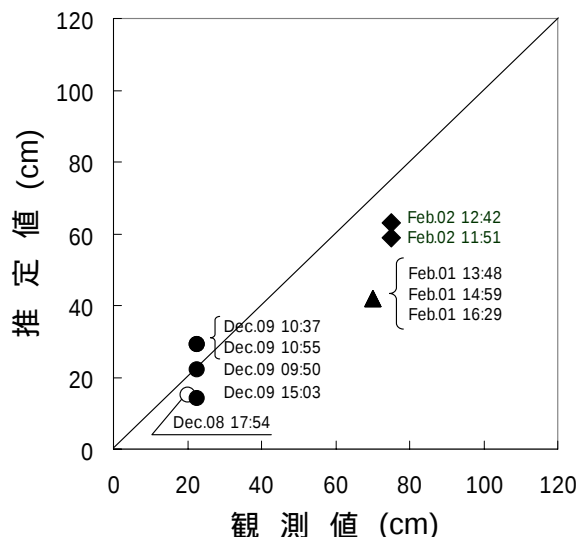


図-13 アルゴリズムによる積雪深推定結果(整合性：良)

7. 結論

積雪量推定衛星アルゴリズム(筒井・小池ら(2005))の検証の一環として、2004年12月～2005年3月にかけて札幌において、地上マイクロ波放射計〔GBMR (Ground Based Microwave Radiometer)〕を用いた地上積雪観測を実施し、アルゴリズムの検証を行った結果、乾雪を

対象としたアルゴリズムであるが故、濡れ雪・湿雪に対する推定精度は低いものの乾雪の状態を保持した積雪に対する積雪深推定において比較的良好な結果を得ることができた。

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)の支援を頂いた。更に、地上積雪観測では、北海道大学低温科学研究所 児玉先生に多大な観測協力を頂き、気象研究所物理気象研究部 青木先生には貴重な気象データのご提供を頂きました。記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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.
- 6) 小池俊雄, 吉本淳一, 藤春兼久, 柴田章: グローバル的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, 水工学論文集, 第43巻, pp.211-215, 1999.
- 7) 筒井浩行, 小池俊雄, 玉川勝徳, 藤井秀幸: 積雪粒径を考慮した積雪量推定衛星アルゴリズム開発の基礎研究, 水工学論文集, 第48巻, pp.247-252, 2004.

(2005.9.30受付)