



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道東部の積雪堆積環境
Author(s)	八久保, 晶弘; HACHIKUBO, Akihiro; 尾関, 俊浩 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 79-92
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.79
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14305
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p79-92.pdf



北海道東部の積雪堆積環境

八久保 晶弘¹

北見工業大学土木開発工学科

尾関 俊浩

北海道教育大学教育学部岩見沢校

山田 高嗣・山田 知充

北海道大学低温科学研究所

(2002年1月21日受理)

Snow-depositional Environments in Eastern Hokkaido

Akihiro HACHIKUBO

Department of Civil Engineering, Kitami Institute of Technology

Toshihiro OZEKI

Iwamizawa Campus, Faculty of Education, Hokkaido University of Education

Takatsugu YAMADA and Tomomi YAMADA

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

(Received January 21, 2002)

To clarify the snow-depositional environments in Eastern Hokkaido snow surveys were carried out on February 2001 with the measurements of snow depth, water equivalent of snow, grain shape and size of each layer, and snow stratigraphy. Depth hoar or faceted crystals were dominant snow types at the 24 observation sites that agree with the observation points of the AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System), and mean snow density was $251 \pm 34 \text{ kg/m}^3$. In the regional scale of Eastern Hokkaido, precipitation at the sites was observed simultaneously in the winter season of 2000 to 2001 and a linear relationship was found between snow depth and water equivalent of snow. From these results it seems reasonable to suppose that the whole Eastern Hokkaido belongs to a unique snow-depositional environment. On the other hand, the relationship between snow depth and water equivalent of snow was simulated by a snow-layer structure model: Crocus. Validity of Crocus was confirmed using meteorological data in Kitami that the time variations of snow albedo and snow-surface temperature were fairly expressed. If we assume that snow

¹ 現在の所属：北見工業大学未利用エネルギー研究センター (New Energy Resources Research Center)

falls simultaneously in Eastern Hokkaido by passing a low-pressure area and the amount of precipitation depends on each points, the above relationship becomes almost linear as observed.

I. はじめに

積雪層構造単位層は一降りごとの降雪におおむね対応し、また堆積後の様々な気象条件によって時々刻々と変化していく。このため、各層の雪粒の形や粒径、即ち雪質や積雪の層構造などは、気象条件が同一と見なせるような近接した場所であればほぼ同じ値をとるが、気象条件、例えば降雪量や平均気温が異なるような地域間では、これらにも違いが見られるようになる。

このような観点から、国内で広域に積雪の調査が始まったのは、いわゆる 38 豪雪(1963 年)を契機とする(吉田ほか, 1964)。以来、北海道においては道内の積雪の地域特性を明らかにすることを目的に、北海道西部の石狩・勇払平野を対象に広域積雪調査が開始され(遠藤ほか, 1976; 秋田谷・遠藤, 1977; 遠藤・秋田谷, 1978), 調査地域は後に北海道の平地全域にまで達し(秋田谷・遠藤, 1979, 1980; 秋田谷ほか, 1990; 1995; 石井ほか, 1991, 1992), 道内の積雪特性の全貌が理解できるようになった。遠藤, 秋田谷, 石井らの一連の研究では、主としてラムゾンデ観測で求まる積雪の硬さと積雪水量などの他の積雪パラメータとの関係が注目された(例えば, 秋田谷・石井, 1992)。秋田谷・石井(1992)は、それまでに行なわれた 15 シーズンにわたる観測成果を地域ごとの積雪特性図に整理し、地域によってあるいは年によって雪質などにばらつきが多いことをあらためて指摘した。従って、ある年の積雪特性の地域比較を行なうためには、できるだけ短期間に多点で観測を行なう必要がある。

一方、河島・山田は 2 冬期にわたって北海道の空知平野から福井県の敦賀に到る日本海沿岸平野部の積雪地帯の積雪を短期間のうちに調査し、広域にわたる積雪の地域特性を明らかにした(河島ほか, 1987; 河島・山田, 1988; Kawashima et al., 1994)。その中で彼らは、積雪深と積雪水量との関係が地域ごとに直線関係にあり、地域が異なると両者の直線関係も異なることを見いだした。同じ直線関係を持つ地域は堆積環境が同じ、すなわち降雪量に違いがあっても降雪がほぼ同時に起こり、かつ気温や日射量などの気象変化が同じような時間経過を有する地域であることを示唆した。筆者らはこの関係に注目し、積雪が融解を始める前の 2001 年 2 月末に、短期間で可能な限り広範囲な積雪調査を北海道内において実施した。本報告では、これまで十分な資料が得られていない、典型的なしもぎらめ雪地帯である北海道東部に的を絞って、積雪深と積雪水量との直線関係が成り立つことを確認し、この関係が河島・山田による上記の示唆通りか否かを検証するため、北見における定点観測資料を入力資料とした積雪層構造モデル Crocus による検討を行なった。

II. 広域積雪調査および北見における定点観測

北海道東部における広域積雪調査は2001年2月23-26日にかけて行なわれた。観測点はアメダス積雪深資料のある24ヶ所（2月23日：北見、2月24日：陸別・本別・上士幌・新得・芽室・上札内・大樹・浦幌、2月25日：白糠・中徹別・釧路・太田・厚床・別海・中標津・標茶、2月26日：川湯・斜里・宇登呂・津別・佐呂間・遠軽・留辺蘂）である（Fig. 1）。観測点として、障害物が少なく見通しのよい平坦な農耕地を選び、積雪断面観測により、積雪深、積雪水量ならびに積雪層構造（雪質・粒径）と雪温分布を得た。また、上記積雪調査とほぼ同時期に、石狩・空知地方（13ヶ所）、勇払平野（12ヶ所）、北海道北部（14ヶ所）のそれぞれの観測点においても、同様の積雪調査が実施された。

一方、Crocus モデルの運用に必要な気象資料、およびモデル検証に必要な積雪断面資料は、北見工業大学寒地気象観測室の露場において取得された（八久保ほか, 2001）。気象観測項目は気温・湿度・風速・全天日射量・反射日射量・赤外放射量（上向き・下向き）・散乱日射量などであり、降水量と積雪深についてのみ、露場から約500 m離れたアメダスの資料を採用した。また、積雪断面観測は週に2回行なわれており、観測項目には広域積雪調査と同じ項目が含まれている。雨雪判別は降雪検知器で判断した。

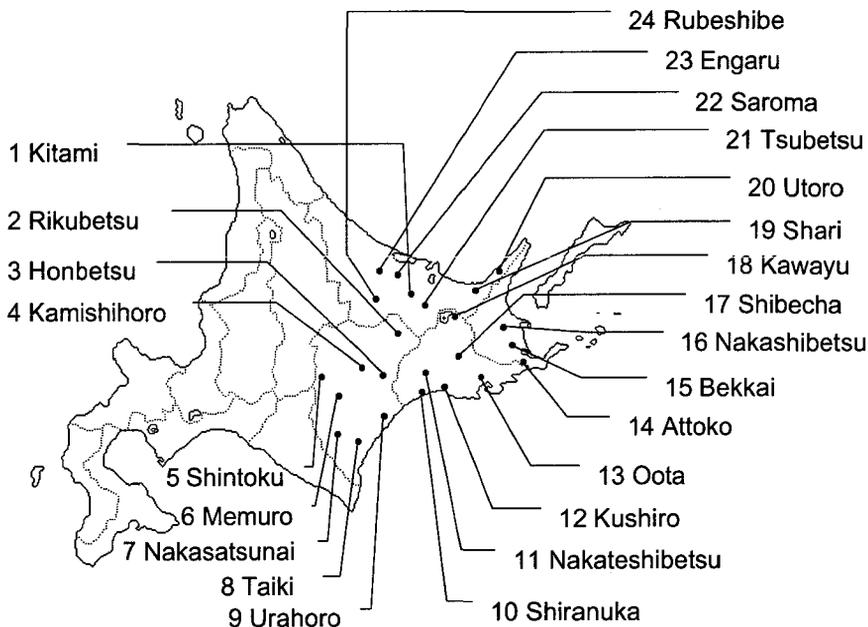


Fig. 1. Location map of the observation sites in the Eastern Hokkaido.

III. 積雪層構造モデルの概要

表層雪崩の予測や GCM 中の積雪過程の改良などを目的とした、気象資料から積雪層構造を推定する多くの積雪層構造モデルが世界各国で開発されている。本論文では、その中で比較的评价の安定している、フランス気象庁が開発した積雪層構造モデル、Crocus (Brun et al., 1989, 1992) を取り上げる。Crocus モデルは積雪層構造を推定する 1 次元数値モデルであり、雪面における熱・水収支過程と、積雪層の粘性圧縮やしもぎらめ化などを含む積雪変態過程との結合モデルを基礎としている。入力パラメータは気温・風速・湿度・降水量・雨雪判別・大気放射量・直達日射量・散乱日射量・雲量の 9 つの気象要素である。計算結果としては、積雪深、積雪水量に加えて、雪質・粒径・雪温・密度・含水率の各鉛直分布や雪面アルベド、雪面温度、雪面における熱収支の時系列資料が出力される。八久保ほか (2001) は、Crocus モデルが北海道の積雪を妥当に表現できるかどうかを検証し、しもぎらめ雪地帯に属する北見の積雪構造変化を妥当に表現できることを確認した。

本研究では、まず 2000-2001 年冬期に得られた積雪深や雪面アルベド、雪面温度の観測値と Crocus モデルによる計算値との比較検証を行なう。次に、北海道東部の各観測地点で、気象の時系列変化は一致しているが、一降りごとの降水量の絶対値が異なり、かつ気温も異なると仮定して積雪水量と積雪深との関係がどのようなようになるかを調べた。

IV. 観 測 結 果

1. 北海道東部における広域積雪分布

2 月 23-26 日に実施した広域積雪調査の期間中、網走支庁管内で 2 月 23 日と 25 日の夜半に若干の降雪があったが、各観測点の天候はおおむね晴天であった。観測期間中のアメダス資料の積算降水量は、川湯と遠軽の 5 mm が最大値であったことから、観測期間中の積雪層構造に降雪による大きな変化はなく、4 日間にわたる積雪断面資料はおおむね同時期に測定されたとみなせる。

各観測点における積雪層構造は Fig. 2 に示したように、全体的にしもぎらめ雪、こしもぎらめ雪が卓越しており、北海道東部が典型的なしもぎらめ雪地帯である (秋田谷・石井, 1992) ことを裏付けている。しもぎらめ雪は積雪層に温度勾配がかかるときにできる霜結晶であり、北海道東部では冬期の季節風による降雪が少ないために晴天が多く放射冷却が起こりやすいこと、また積雪が少ないために積雪下面と積雪表面との温度差が大きくなりやすいことから、発達が顕著なのである。

北海道東部では 2 月中旬に温暖な時期があったため、ぎらめ雪的な特徴を併せ持つしもぎらめ雪・こしもぎらめ雪が雪面に比較的近い層に多かった。この傾向は、大樹、浦幌、白糠、釧路、太田、厚床、別海などの比較的海岸に近い、温暖な地域に見られる。一般にしもぎらめ雪は力学的にもろい層を形成するが、これらの層は融解過程を経験しているために、霜結晶同士が極めて丈夫に結合した硬いクラストとなっていた。これに対し、最下層の 0-10 cm には粒径が 10 mm

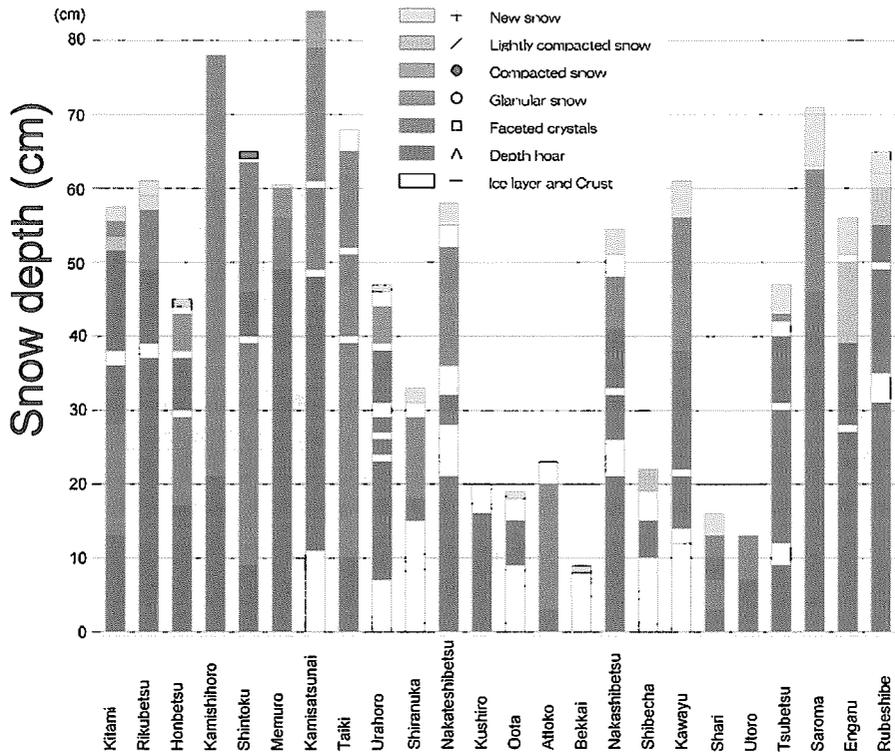


Fig. 2. Snow profiles at the observation sites. Each layers were classified by the majority of grains, which were in the given snow-shape classification (Colbeck et al., 1990).

近くまでよく発達したしもざらめ雪が多くの観測点で観察された。これらの層は力学的にもろく、しもざらめ雪の粒子同士が縦方向に連結した塊を形成していた。

上士幌や上札内、川湯などのように内陸部でも積雪の多いところでは、全層の平均温度勾配が相対的に小さくなるため、しもざらめ雪ができにくくなると思われるが、その一方で内陸部では放射冷却が積雪の平均温度勾配の増加に貢献するためであろうか、しもざらめ雪・こしもざらめ雪が他の観測点と同様によく発達していた。

各観測点における積雪深と積雪水量には、観測点が北海道東部の広範囲に分布しているにも関わらず、明瞭な直線関係が認められる (Fig. 3)。積雪深を H_s (cm)、積雪水量を H_w (mm) とすると、回帰直線は原点を通る(1)式で表わされる。

$$H_w = 2.51 H_s \quad (1)$$

なお、各観測地点の全層平均密度とその標準偏差は $251 \pm 34 \text{ kg/m}^3$ であった。太田、厚床、別海、標茶など積雪深の少ない観測点では融解によるざらめ雪化が進んでいたため、全層積雪密度が大

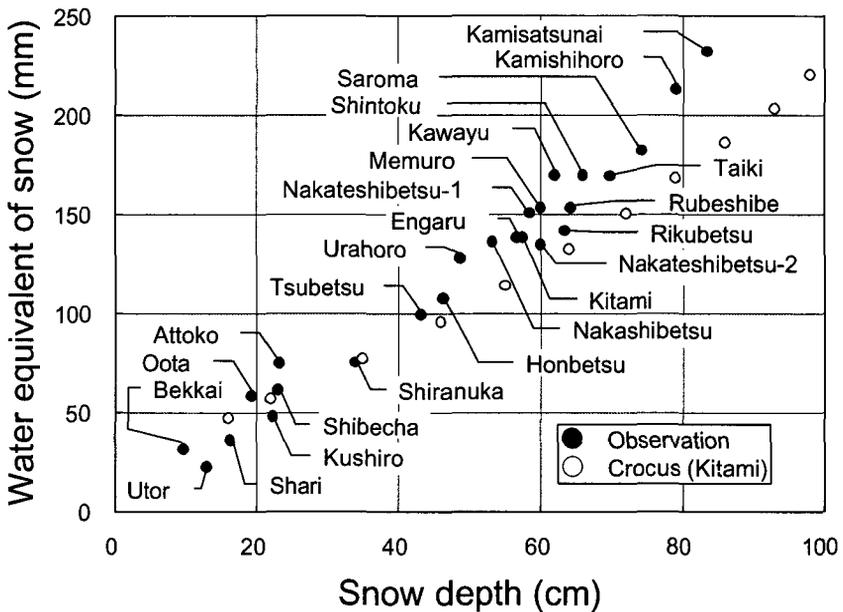


Fig. 3. Relations between snow depth and water equivalent of snow in the Eastern Hokkaido. Solid circles are the observed values and open circles are the calculated results on 23 February 2001 by Crocus.

きくなっていた。

同時期に観測された北海道内の各地域の資料も加えて見てみると、Fig. 4 に示すように、積雪深と積雪水量には地域ごとに同様の直線関係が認められ、石狩・空知平野、勇払原野、北海道北部で、それぞれ異なった直線関係を示している。このことは河島・山田の一連の研究で示唆されているように、北海道東部全域が単一の堆積環境区とみなせることを意味している。

2. 北海道東部の積雪深と積雪水量の特性

前節で示された北海道東部全域の堆積環境の同一性をさらに確認するため、各観測点のアメダス資料から冬期降水量の積算値と積雪深の時系列変化を見てみよう。まず、冬期降水量の時系列変化をみると (Fig. 5)、積算降水量の大きな変化は各地点でほぼ同時に起こっていることがわかる。例えば 11 月 20 日、11 月 26 日、12 月 19 日、12 月 24 日、12 月 31 日、1 月 10 日、2 月 1 日、3 月 4 日にほとんど全ての観測点でまとまった降水量が観測されており、これらは例外なく低気圧の通過に伴う降水であった。このような降水量の変化は積雪深の変化にもおおむね反映されている (Fig. 6)。すなわち、調査を行なった北海道東部においては降雪はほぼ同時に起こっており、降水量の絶対値が異なるだけである、とみてよいだろう。したがって、全層積雪密度を決定する堆積後の経過時間・上載荷重・雪温などのうち、重要なパラメータと思われる降雪後の経過時間がどの地点でもほぼ等しいことになる。

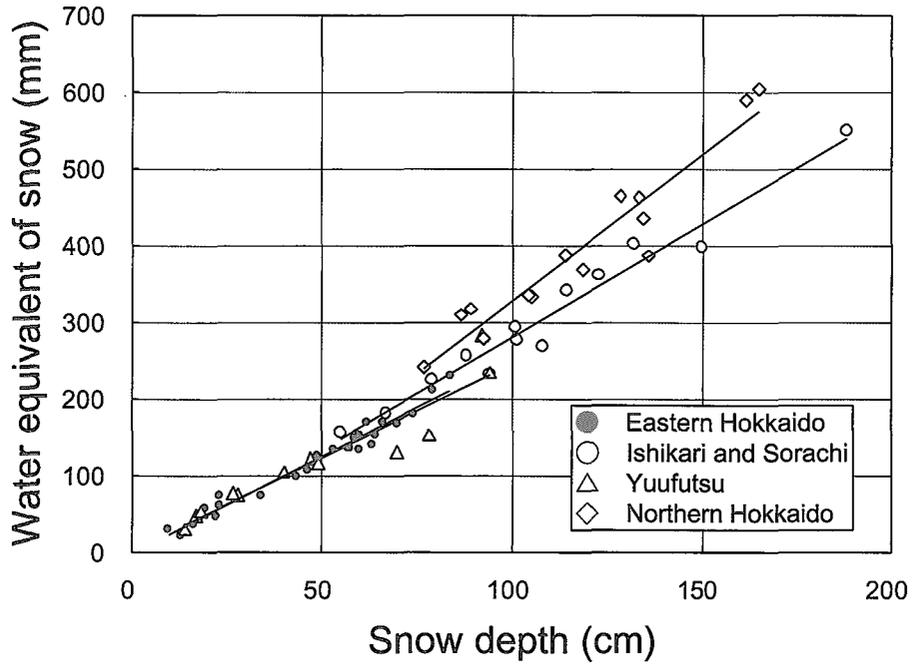


Fig. 4. Regional properties of relations between snow depth and water equivalent of snow.

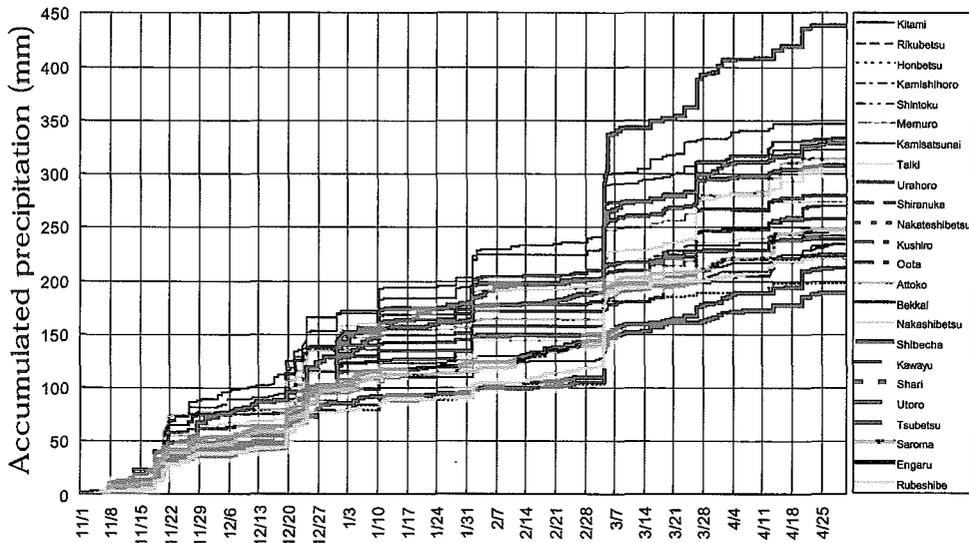


Fig. 5. Time variations of the accumulated precipitation (from 1 November 2000) at the observation sites using AMeDAS data in the winter of 2000 to 2001.

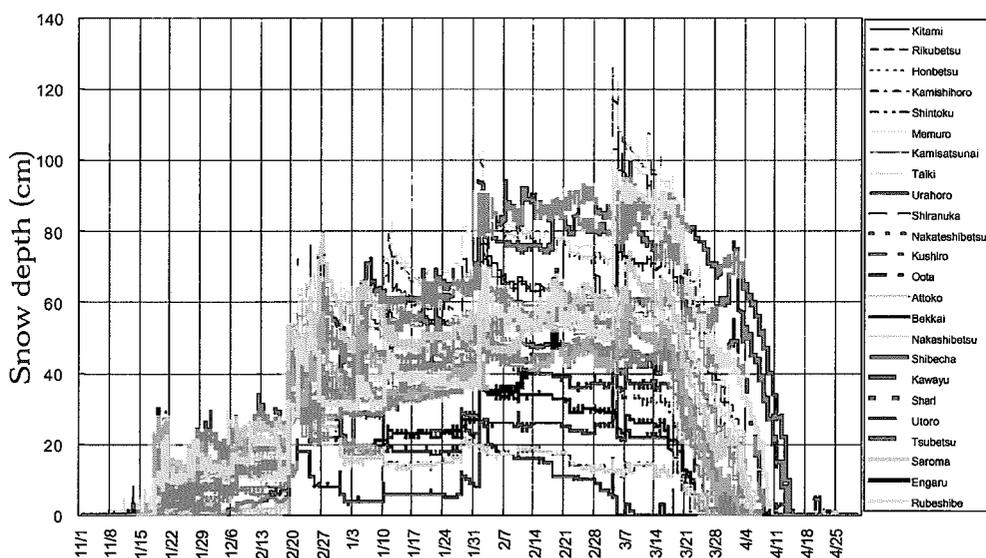


Fig. 6. Time variations of the snow depth at the observation sites using AMeDAS data in the winter of 2000 to 2001.

ただし、低気圧の通過時には暖気が入り込むため、積雪が融解することや降水が雨となることによって必ずしも積雪深の増加には結びつかない地点も見られることは注意を要する。例えば、Fig.2の観測結果を見ると釧路や厚床などの沿岸部では、その影響であろうか、積雪深は他と比べて明らかに少なすぎると思われる。

3. 北見における積雪断面観測結果

2000-2001年冬期の北見における積雪層構造の時系列変化を Fig. 7に示す。12月前半には積雪深が20 cm以下で推移し、この時期に急激に発達したしもぎらめ雪の層は、3月に融雪によってぎらめ雪に変化するまで積雪の最下層に保存されていた。12月下旬から積雪が増加し始め、以後2ヶ月以上もの間、断続的な降雪によって積雪深は50 cmから60 cmの間を保ち続けた。堆積した新雪層はこしまり雪、こしもぎらめ雪を経てしもぎらめ雪へと次第に変化している。特に2月の半ばから3月上旬にかけて、大きな温度勾配がかかりやすい表層付近からしもぎらめ雪が発達していく様子が見て取れる。これらの積雪層は3月上旬に総降水量44 mmの降雨によって全層が濡れ雪となり、その後はぎらめ雪へと変化した。図中の数枚の水板やクラストは、いずれも気温上昇または内部融解による積雪表層から積雪内部にかけての融解・再凍結によって形成されたと考えられる。これに呼応して、広域積雪調査の多くの観測点で、融解・再凍結で形成されたと考えられる水板やクラストが観察されている(Fig. 2)。特に、観測点の近いところではその位置に類似性が見られる。例えば、地表面から高さ30-40 cmの水板またはクラスト層が北見、陸別、津別、遠軽、留辺蕊などに共通して見られる。北見での断面観測結果と気象資料との対比を

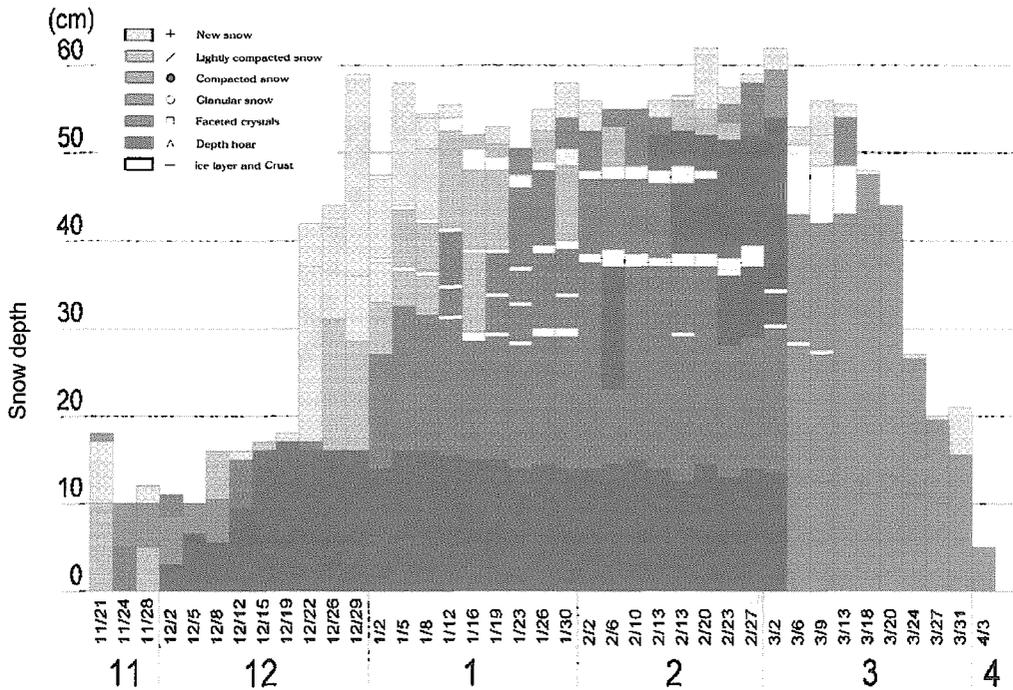


Fig. 7. Time variation of the snow profile in Kitami from 21 November 2000 to 3 April 2001.

行なった結果、これらの層は12月31日から1月1日にかけて北海道を通過した低気圧によって気温が上昇し、雪面が融解したために形成されたものと推定された。

V. Crocus モデルによる積雪深と積雪水量の推定

1. Crocus モデルのパラメータのチューニング

雪面アルベドは雪面熱収支を決定する最も重要な要素であり、Crocus モデルでは波長別日射量と時間との関数で表現されている (Brun et al., 1989)。北見のような市街地の積雪に見られる雪面の汚れを、モデルは考慮していないので、パラメータとしてモデルの default 値をそのまま用いるとアルベドを大幅に過大評価する (八久保ほか, 2001)。そこで、Crocus モデルの雪面アルベドに関するパラメータを実測に合うようにチューニングし、その結果が妥当かどうかをまず検討する。

北見における 2000–2001 年冬期の雪面アルベドと積雪深の時系列変化を Fig. 7 に示す。雪面アルベドの実測値は厳冬期では 0.8 前半台で推移しているが、3 月に入ると雪面の融解によって減少し、3 月 8 日や 3 月 28–30 日の降雪で一時的に回復するものの、融雪期には積雪深とともに急激に減少している。一方、Crocus モデルの default 値を使ってアルベドの時系列変化を求めると、はたして図の白丸で示すように過大評価となった。そこで、雪面アルベドの最大値が観測値

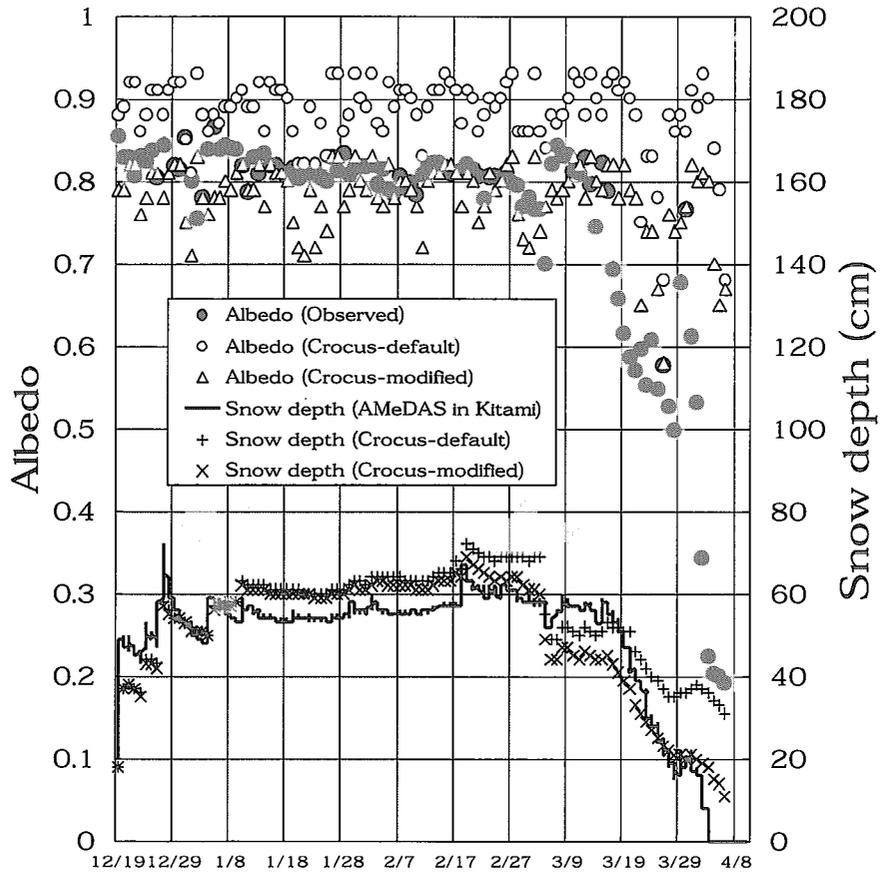


Fig. 8. Comparison between the calculated and observed time variations of the snow albedo and the snow depth in Kitami in the winter of 2000 to 2001.

と計算値とで同じ値となるように、パラメータのチューニングを行なった。その結果、融雪期については検討の余地があるものの、厳冬期の雪面アルベドの時系列変化を Crocus モデルで表現できることが分かった。同時に、積雪深の計算値も Fig. 8 のように実測値により近づいた。なお、Crocus モデルが実際の雪面熱収支をよく再現できているかどうかは、雪面温度の計算値を観測値と比較することによっても判断可能である。雪面温度の観測値と計算値との関係を Fig. 9 に示す。Crocus モデルの雪面アルベドに関するパラメータを default 値に固定したままの場合、平均して 1.5°C ほど雪面温度を過小評価しているが、上記のチューニングを行なった結果、ほぼ一対一の直線に乗るようになった。

以上から、Crocus モデルによる数ヶ月スケールの積雪シミュレーションをおおむね妥当に行えることが確認された。

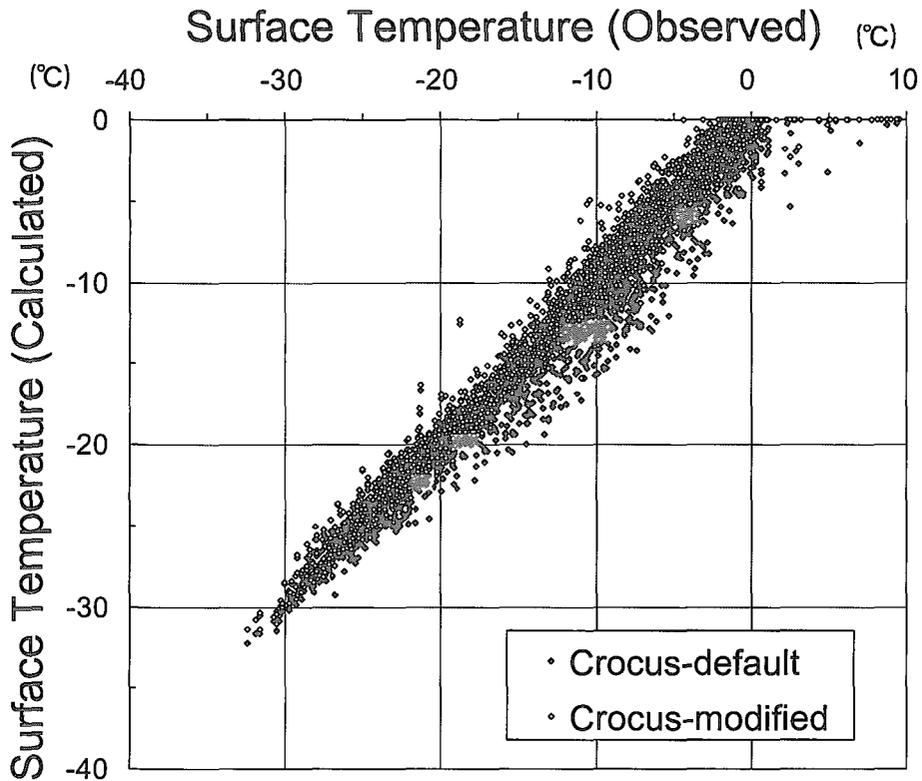


Fig. 9. Comparison between the calculated and observed snow-surface temperatures in Kitami in the winter of 2000 to 2001.

2. 積雪深と積雪水量の関係

Crocus モデルを用いて、積雪深と積雪水量との関係を調べる。北見で観測された気象要素の時系列変化は全域で同じであるが、降水量の絶対値だけが異なると仮定する。2000-2001 冬期の気象資料のうち、降水量資料のみを観測値の 0.1 倍から 2 倍まで段階的に変化させた資料セットを作成し、これを Crocus モデルの入力資料として計算して積雪水量と積雪深との関係を求めた。次いで、気温が $\pm 5^\circ\text{C}$ だけ一律に変化した場合についても計算し、気温の影響を検討した。

計算結果は Fig. 3 中の白丸で示されている。これは 2001 年 2 月 23 日における、Crocus モデルで求められた積雪深と積雪水量との関係である。同じ積雪水量に対する積雪深の計算値と観測値を比較すると、積雪深 40 cm 以下で若干の過小評価、それ以上で過大評価となりわずかに下に凸のカーブを描いているが、両者の関係にはほぼ直線関係が認められると言えよう。次いで降水量の変化に加えて、気温も変化させた場合の計算結果を Fig. 10 に示す。気温を一律に 5°C だけ高めた場合、積雪水量は若干変化し、積雪深は 4-12 cm ほど減少した。一方、 5°C だけ気温を低くした場合、積雪深は 2-5 cm ほど増加したに過ぎず、気温の影響は比較的軽微である。

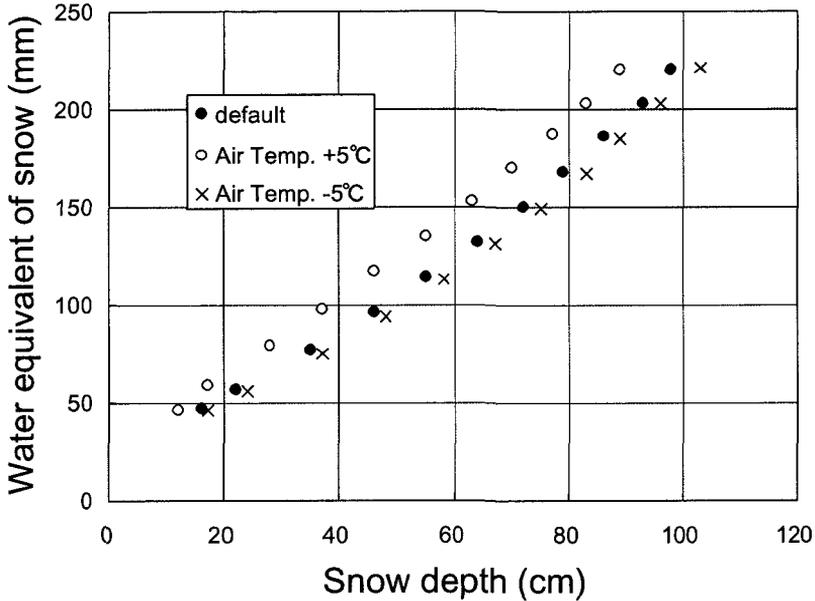


Fig. 10. Relations between snow depth and water equivalent of snow on 23 February 2001. Solid circles are the calculated results of the default data and others are those of modified data. Open circles are in case of +5°C and crosses are in case of -5°C.

VI. 問題点と今後の展望

Crocus モデルでは圧縮粘性係数の雪質依存性に関して考慮されておらず、しもざらめ雪の卓越する積雪層構造を本当に正確に再現できているか、という疑問は残る。しもざらめ雪は同じ密度の他の雪質と比較すると圧縮粘性係数が大きく(山崎, 1998), かつ熱伝導率が小さい傾向があり(Sturm and Johnson, 1992), 特に圧縮粘性係数については具体的な資料に乏しく, 系統的な調査が期待されているという現状である。したがって, 今後もモデルの素過程について検討し, 改良を加えると同時に, 入力資料のゆらぎに対する積雪層構造の応答を系統的に調べる必要があろう。

VII. ま と め

ある地域一帯の積雪と積雪水量との間には直線関係が成り立つという, 河島らの研究結果に着目し, その理由を明らかにするため, 北見工大において2000-2001年全冬期間の気象観測を実施するとともに, 2001年2月23-26日に北海道東部において同時・広域にわたる積雪調査を行なった。各観測点の積雪には, しもざらめ雪・こしもざらめ雪がよく発達しており, 道東は典型的なしもざらめ雪地帯であることがあらためて確認された。

上記観測資料を用いて, 積雪層構造モデルであるCrocusモデルを走らせ, 積雪深と積雪水量との間に直線関係が成り立つ理由を調べた。まず, 北見における気象資料を入力資料として計算

し、計算結果と実測値を比較して、モデルのパラメーターのチューニングを行い、モデルの妥当性を確認した。次いで、気象要素は同じ時系列変化をするが、主に降水量や気温の絶対値のみが場所によって違う堆積環境のもとでは積雪深と積雪水量との間に直線的関係が成り立つと仮定してモデルを走らせ、両者の関係を調べてみた。その結果、積雪深と積雪水量の間にはほぼ直線関係が成り立っていることが分かった。当該地域全域が、気象要素は同じ時系列変化をするが、主に降水量や気温の絶対値のみが場所によって違う、一つの堆積環境区とみなしてよいことがわかった。

Crocus モデルに関しては様々な問題があるが、広域の積雪特性を知る上で、将来的に重要なツールになると考えられる。

謝辞 道北・道央圏の積雪調査に際し、北大低温科学研究所大学院生の伊藤陽一・根本征樹の両氏、並びに北海道教育大岩見沢分校の油川英明教授とその学生諸氏には一方ならぬご協力を頂きました。北見工大寒地気象観測室の露場使用の際には、北見工大土木開発工学科環境水理研究室の佐渡公明教授、中尾隆志助手にお世話になりました。北見工大土木開発工学科雪氷研究室の榎本浩之教授と国土交通省気象庁気象研究所の青木輝夫氏には気象観測機器の借用で、また北大低温科学研究所の西村浩一助手には Crocus モデルの入手・運用に関して多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 秋田谷英次, 遠藤八十一, 1977. 石狩・空知地方の積雪調査, 低温科学, 物理篇, **35**, 105-115.
- 秋田谷英次, 遠藤八十一, 1979. 北海道の平地積雪の特性 (1977-'79年冬期), 低温科学, 物理篇, **38**, 33-40.
- 秋田谷英次, 遠藤八十一, 1980. 北海道内平地における厳冬期の積雪特性, 低温科学, 物理篇, **39**, 55-61.
- 秋田谷英次, 藤野和夫, 河村俊行, 松沢勝, 福沢卓也, 1990. 北海道北部・東部の広域積雪調査報告, 低温科学, 物理篇, 資料集, **49**, 9-13.
- 秋田谷英次, 石井吉之, 1992. 硬さを考慮した北海道の積雪特性, 低温科学, 物理篇, **51**, 31-39.
- 秋田谷英次, 成瀬廉二, 尾関俊浩, 川島由載, 天見正和, 鎌田慈, 1995. 北海道内の広域積雪調査-1995年2月-, 低温科学, 物理篇, 資料集, **54**, 11-18.
- Brun, E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre and C. Coleou, 1989. An Energy and Mass Model of Snow Cover Suitable for Operational Avalanche Forecasting, *J. Glaciol.*, **35** (121), 333-342.
- Brun, E., P. David, M. Sudul and G. Brunot, 1992. A numerical Model to Simulate Snow-Cover Stratigraphy for Operational Avalanche Forecasting, *J. Glaciol.*, **38** (128), 13-22.
- Colbeck, S. C., E. Akitaya, R. Armstrong, H. Gubler, J. Lafeuille, K. Lied, D. McClung and E. Morris, 1990. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*, International Association of Scientific Hydrology, International Commission on Snow and Ice, Wallingford, Oxon, 23pp.
- 遠藤八十一, 秋田谷英次, 高橋徹, 和泉薫, 1976. 石狩・勇払平野における積雪の特性, 低温科学, 物理篇, **34**, 133-145.
- 遠藤八十一, 秋田谷英次, 1978. 北海道西部の積雪調査, 低温科学, 物理篇, 資料集, **36-37**, 7-10.
- 八久保晶弘, 青木輝夫, 榎本浩之, 2001. 積雪層構造モデル: Crocus の検証実験, 北海道の雪氷, **20**, 63-66.
- 石井吉之, 秋田谷英次, 佐藤和秀, 1991. 北海道内の広域積雪調査-1991年2月-, 低温科学, 物理篇, 資料集,

- 50, 9-24.
- 石井吉之, 秋田谷英次, 野村睦, 1992. 北海道内の広域積雪調査-1992年2月-, 低温科学, 物理篇, 資料集, 51, 9-22.
- 河島克久, 山田知充, 若浜五郎, 1987. 日本海沿岸積雪地域の堆積環境区分とその積雪特性, 低温科学, 物理篇, 46, 1-13.
- 河島克久, 山田知充, 1988. 積雪特性からみた日本海沿岸平野部の堆積環境区分, 低温科学, 物理篇, 47, 15-24.
- Kawashima, K., T. Yamada and G. Wakahama, 1994. Regional Division of Snow-Depositional Environments and Metamorphism of Snow Cover in Plain Areas along the Japan Sea Coast, Snow and Ice covers, *Interactions with the Atmosphere and Ecosystems* (Proc. Yokohama Symposia J2 and J5, July 1993), IAHS Publication, 223, 187-196.
- Sturm, M. and J. B. Johnson, 1992. Thermal Conductivity Measurements of Depth Hoar, *J. Geophys Res.* 97, B2, 2129-2139.
- 山崎剛, 1998. 厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル, 雪氷, 60, 131-141.
- 吉田順五, 木下誠一, 若浜五郎, 中村勉, 藤岡敏夫, 清水弘, 秋田谷英次, 清水孝一, 権平長四郎, 佐藤幸三郎, 近江満, 1964. 北陸豪雪の雪質調査, 低温科学, 物理篇, 22, 129-146.