

時間気象データに基づく新積雪深の推定法について I
— 雨雪量計法と重回帰分析法 —

山田 穰*

防災科学技術研究所

**Estimation method of Newly Fallen Snow Depth
Based on Hourly Meteorological Data
— Rain Gauge Method and Multiple Regression Method —**

By

Yutaka Yamada

Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, NIED, STA

Nagaoka, Niigata 940 Japan

Abstract

This paper describes two new methods and their assessment to estimate the depth of daily newly fallen snow from data such as snow depth, precipitation, air temperature, and so on, that are recorded by the Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) established by the Japan Meteorological Agency and/or from the snow information systems being developed by the local governments.

The simulation of the two conventional calculation methods, the daily difference of the snow depth and the summation of the positive hourly difference of the snow depth, and the simulation of these two new methods, the rain gauge method and the multiple regression method, were conducted using the same kind of data as that of AMeDAS.

The result of the rain gauge method assuming constant new snow density was still not satisfactory when compared to that of the conventional positive hourly difference method. Yet, the multiple regression method was able to obtain better results than the previously established statistical method based on a summation of the positive hourly difference.

Key words : newly fallen snow depth, snow depth meter, rain gauge, snow density, estimation method,

キーワード : 新積雪深, 積雪深計, 雨雪量計, 積雪密度, 推定法

*長岡雪氷防災実験研究所第1研究室

1. はじめに

新積雪深は、表層雪崩、着氷雪、地吹雪、そして路面凍結などの降雪に関わる雪氷災害の予測や除雪車出動の適切な判断による、除雪システムの効率的運用に必要な量である。これらの目的のためには、降雪予測システムが有効であることは言うまでもない。しかしながら、除雪計画や表層雪崩の予測・警戒の仕事などに携わる現場の人達にとっては、新積雪深の予測と並んで、そのノウキャストイングによる現況把握もまた同様に重要である。

この研究では、現在入手可能な気象庁のアメダスや地域の雪氷情報システムなどで計測されている気象データを用い、これを加工して新積雪深を推定する方法について述べる。この方法の利点は既に日本全国に構築されている、あるいは構築されつつある広大な気象・観測ネットワークのデータを利用できることである。

この第I報では、前述の2つの従来法、すなわち日積雪深差法と積雪深差日計法ならびにここで新たに提案する2つの方法のシミュレーションを、アメダスから得られる1時間毎の気象データと同種のデータを用いて行い、その結果を観測値と比較、検討した結果について述べる。

この新たな方法のシミュレーションを行ったり、各地で適用するには、新積雪密度データとその地域特性を知ることが必要である。この新積雪密度とその地域特性については、別報(山田, 1993)で日本海沿岸各地の新積雪密度の度数分布や平均密度の特性などについて報告してある。

2. 解析に用いたデータ

長岡雪氷防災実験研究所で、赤外線式自動積雪深計(Kimura, 1975; 木村, 1983)、いっ水式雨雪量計ならびに通風式気温計などによって1時間毎に測定された積雪の深さ、雨雪量、気温などの気象データの出力記録および、1988/89年冬期から1990/91年冬期の3冬期間の気象観測露場において毎朝9時に定時観測された新積雪深データ(清水ほか, 1989; 小林ほか, 1990; 納口, 1992)を主として用いた。

3. 従来の新積雪深代用値の誤差の検討

積雪は、降雪が地上につきつぎに降って新積雪となり、この新積雪が積み重なって堆積することによって形成される。したがって、自動新積雪深計が気象観測に組み込まれていない現在、新積雪深を推定しようとするとき、最初に考えられる最も単純で簡単な計算方法は、積雪深のデータのみを用いて新積雪深を推定する方法である。

ここでは、まず、この考え方に基づく日積雪深差法ならびに積雪深差日計法による計算値を、雪板上で測定された日新積雪深を基準としてこれと比較し、その精度と問題点を議論する。これらの誤差解析ならびに次章で検討する新たな2つの方法のシミュレーションには、上記のデータを用いた。

3.1 日積雪深差法

日積雪深差法は、ある一定期間に測られた積雪の深さの差を、日新積雪深とするものである。ここでは、この一定期間は、新積雪深が目視で観測されていたときの日界の慣例にしたがい、当日の午前9時から翌日の午前9時とした。なお、このようにして観測した日新積雪深は、当日の欄に記載するのが通例である。

このようにして算出した値と雪板上で測定した値の比較が図1に示されている。この図では、雪板上で午前9時に定常的に観測されているデータのうち、日新積雪深が8 cm以上のデータについてのみ比較している。

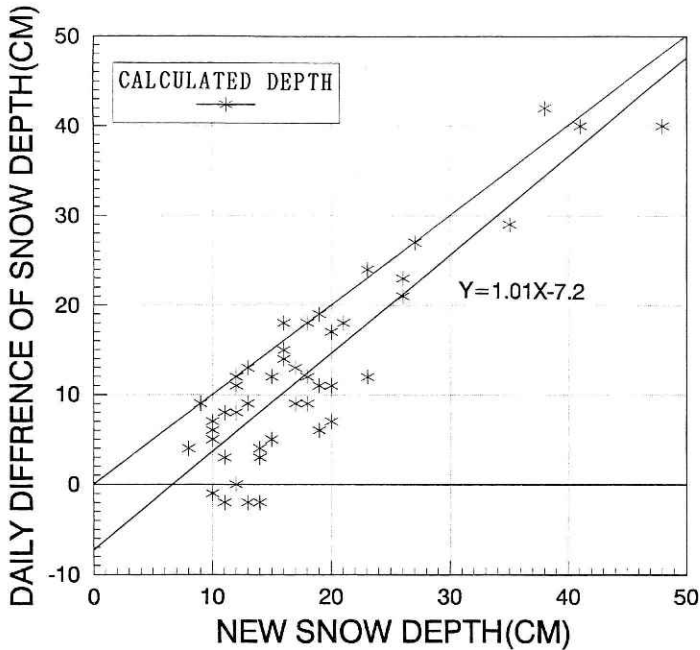


図1 日積雪深差と日新積雪深との比較。2本の直線は、回帰直線ならびに測定値と計算値が一致する線を示している。

Fig. 1 Comparison of daily difference of measured snow depth with measured newly fallen snow depth.

この方法の相関係数は0.79である。日積雪深差法による計算値の正の誤差は5cm以内でその数が極めて少なく、ほとんどの誤差は雪板上で測った値より小さく負の誤差である。特に、新積雪深が約20cm以下の場合には、計算値には雪板上で測った場合よりも小さい点が多数あり、その負の誤差は-20cmほどになっている。極端な場合には、新積雪深の値そのものが負になっている。

この負の誤差と負の新積雪深の現れる主な理由は、堆積後に時間の経過にともない、縮むという積雪の物性によるものである。言い換えると、新積雪の下に横たわっている旧雪層、すなわち最初の測定時刻である当日9時以前に積もった積雪層が圧密することが誤差の主な原因である。

なお、大きな負の誤差は、降雪が数日間連続して降り続いたとき、特に、連続降雪の後期に対応して多く発生している。また、この縮み量は降雪強度の大きなドカ雪の時に積もる、密度が小さく軟らかな粘性係数の小さい雪ほど大きい。

3.2 積雪深差日計法

1時間毎の積雪の深さの正の増分、すなわち正の積雪深差だけを積算したものを日新積雪深とする方法を、新積雪深計算の積雪深差日計法と呼ぶことにする。なお、毎正時の1時間毎の積雪深差のすべてを合計した値は日積雪深差法による計算値に等しい。

気象庁の気象月報に記載されている積雪深差日計は、有線ロボット積雪深計によって測定された正の積雪深差を、0時を日界として合計した値を日新積雪深としている。これは気象庁の観測法が、アメダスによる自動計測記録に変わり、測候所での雪板による新積雪深の測定が行われなくなったときから採用されている。

前項で述べたように、雪は縮まる性質を持っている体積粘性圧縮物質であるので、このメカニズムにより、降雪が続いているときでさえ、旧雪の状態と降り方によっては、積雪深の増加が新積雪深に比例しないばかりでなく、減ることもある。このために、日積雪深差法では負の誤差が生じたのである。積雪深差日計法は、日積雪深差法の負の誤差を粘性圧縮による旧雪の縮みが原因であると見なし、負の積雪の深さの増分をこの縮みの結果であるとして加えず取り除いて補正したものと解釈できる。

図2に、積雪深差日計法による計算値と日新積雪深の雪板上での観測値との比較が示してある。用いたデータとその条件は図1の日積雪深差法と同じである。

この方法の相関係数は0.66であり、推定値は直線に適合している。この補正により、大きな負のほとんど誤差は取り除かれ、誤差の範囲は日積雪深差法の誤差以下の±10cm以内に収まっている。このことは、負の積雪深の差を取り除くことによる雪の圧密の補正がうまく働いていることを意味している。この±10cmという誤差は、実用上まだ無視し得ない誤差である。

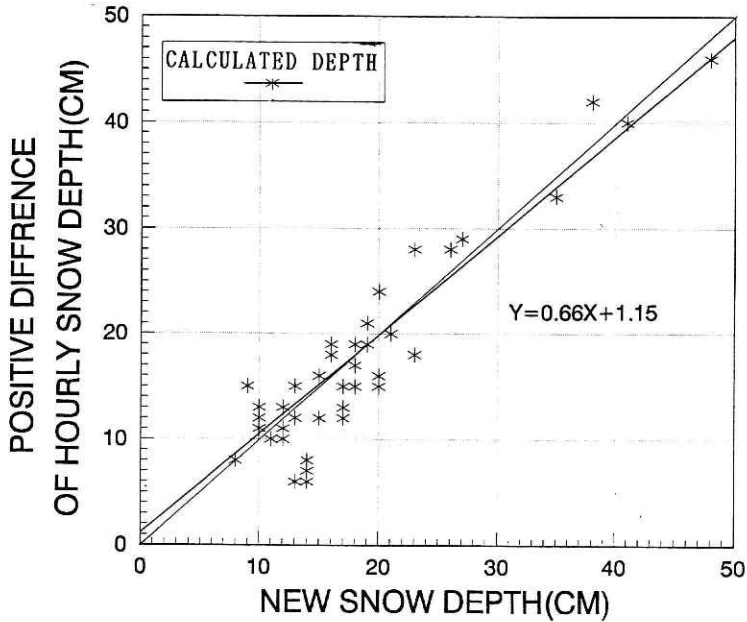


図2 積雪深差日計と日新積雪深との比較。

Fig. 2 Comparison of positive difference of hourly measured snow depth with newly fallen snow depth.

この他、日積雪深差法ではみられなかった正の誤差が現れているが、この正の誤差は、縮みに対する過剰な補正を意味している。また、この方法による補正值そのものは、物理的になら定量的に説明できない。それ故に、この方法はあくまで経験的方法である。

4. 新たな方法による新積雪深推定の試み

前章の3. 1と3. 2では、従来から便宜的に用いられている2つの経験的計算法、すなわち日積雪深差法ならびに積雪深差日計法による計算値の誤差を、雪板上で測定された日新積雪深を基準としてこれと比較し、これらの2つの計算法の精度と問題点を議論した。その結果、新積雪の計算法にはまだ改良する余地があることが判った。

この章では、新しい方法として、雨雪量計による方法と重回帰分析による方法について検討する。

4.1 雨雪量計法

雨雪量計法は、雨雪量計で測定された固形降水の相当水量を新積雪の密度を用い、新積雪

深に変換する方法である。この方法を実行するためには、まず新積雪の密度を推定しなければならない。

このために、新積雪深は雪板上で測られ、新積雪の相当水量は雪板と雨雪量計の両方で同時に測られたデータセットを用いて、雨雪量計を用いて密度を計算する方法の信頼性を、統計学的仮説検定によって確かめた。次に、雨雪量計による新積雪密度計算法を用い、日本海沿岸各地の新積雪密度の度数分布、平均値の地域特性を別報（山田，1993）で報告した。これらの値は各地で、雨雪量計法を適用して降水量から新積雪深を求めるときに用いられる。ここでは、以下で用いる長岡の新積雪密度の統計値の結果だけを表1に示す。表1から、雨雪量計によって求めた新積雪密度の統計量は雪板によって求めたものとほとんど同じ精度を持つことが判る。

表1 雪板と雨雪量計の2つの方法による新積雪密度統計量の比較（ND：データ数，MOD：モード， $\mu 1$ ：単純算術平均，STD：標準偏差， $\mu 2$ ：深さ荷重平均，SK：歪度，KU：尖度）。

Table 1 Comparison of newly fallen snow density statistics measured by snow board with that by rain gauge. ND : Number of data, MOD:Mode, $\mu 1$: Simple arithmetic mean, STD:Standard deviation, $\mu 2$: Depth weighted mean, SK : Skewness, KU : Kurtosis.

Method	ND	MOD g/cm ³	$\mu 1$ g/cm ³	STD g/cm ³	$\mu 2$ g/cm ³	SK	KU × 10 ⁻⁴
Snow board	229	0.09	0.083	0.022	0.082	5.1	2.3
rain gauge	221	0.06	0.079	0.024	0.074	5.4	2.0

この方法による推定例が、図1と図2と同じデータセットを用いて、図3に示されている。ここで新積雪の密度は、雪板上の新積雪密度のモードのクラス上限、すなわち0.090g/cm³で一定と仮定した（表1）。この方法の相関係数は積雪深の積雪深差日計法と全く同一の0.66であった。しかしながら、推定結果は新積雪深の観測値と全体的によく合っているとは言えず、データのばらつきは比較的大きい。

4.2 重回帰分析法

重回帰分析法は、新積雪深と気象要素の統計的關係より新積雪深を推定する。重回帰分析による新積雪深の推定では、説明変数として、直接新積雪深に結びつくと考えられる雨雪量と間接的影響要因と考えられる積雪深差日計、気温、風速、湿度の計5つの変量を採用した。

この方法による推定例が、1983/84年冬期から1987/88年冬期の5冬期間のデータセットを

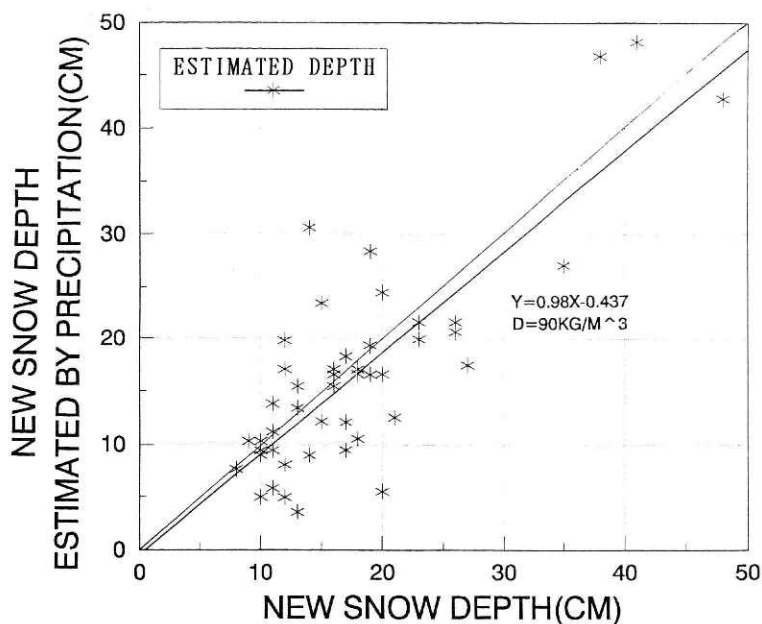


図3 雨雪量計法による日新積雪深の推定値と観測値との比較。

Fig. 3 Comparison of newly fallen snow depth estimated by precipitation assuming a constant new snow density with observed depth.

用いて、図4に示されている。この方法の重相関係数は0.918であり、標準誤差は0.0619であった。この方法による推定結果は、新積雪深の観測値と全体的に合っており、ばらつきも少なくこれまでに検討した方法の中で最良である。

表2 重回帰分析の回帰係数と標準化偏回帰係数。

Table 2 Regression coefficient and standardized partial regression coefficient.

説明変数	定数	雨雪量 X_1	積雪深差日計 X_2	気温 X_3	風速 X_4	湿度 X_5
回帰係数	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
	-0.0694	0.00705	0.34963	-0.0193	-0.0080	0.00100
標準化偏回帰係数		0.60033	0.33039	-0.1971	-0.0713	0.04450

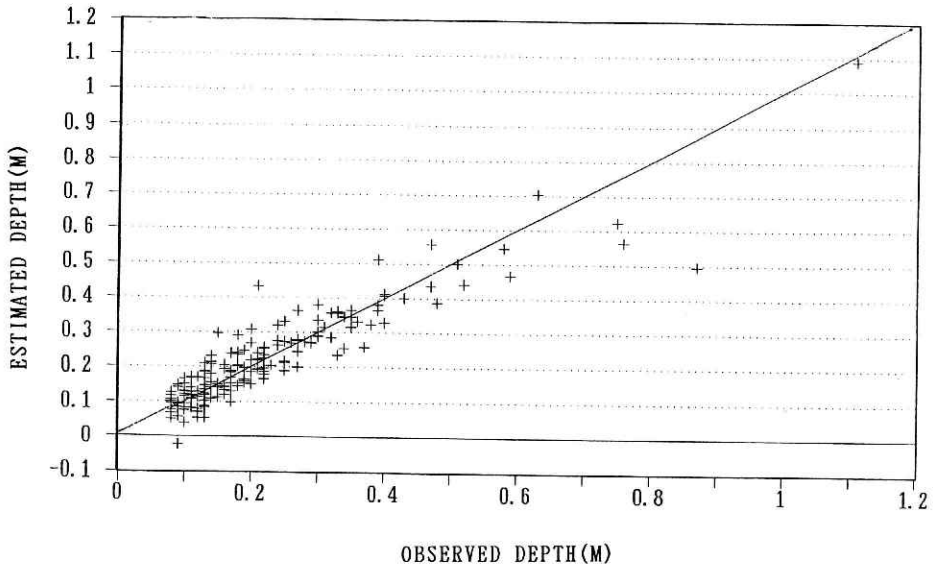


図4 重回帰分析法による日新積雪深の推定値と観測値との比較。

Fig. 4 Comparison of daily depth of newly fallen snow estimated by multiple regression analysis with observed depth.

表2に重回帰分析の説明変数 x_i とこれに対応する回帰係数 a_i ならびに標準化偏回帰係数を示した。なお、重回帰式は、目的変数を y とすると、 $y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\dots$ である。

回帰係数の値が大きいからと言って、その説明変数が目的変数に最も影響を与えるとは限らない。標準化偏回帰係数は、説明変数の影響力の大きさを見るために、変数を平均0、分散1になるように標準化した係数である。表2によると、目的変数、すなわち新積雪の深さの推定値に最も大きな影響を与えるのは雨雪量であり、次いで積雪深差日計、気温、風速、湿度の順で寄与している。

5. 考 察

5.1 雨雪量計法に関する考察

この推定方法の問題点は、雨雪量計の捕捉率と新積雪密度の推定である。

新積雪密度は時間的、空間的に変化する。例えば、新積雪密度は、連続した一昼夜の降雪中でさえも、その一時間毎の観測によると、2倍近く変動する (Yamada and Ikarashi, 1992)。また、新積雪の密度分布には地域的特性があり、地域によって異なる (Yamada, 1990; 山田, 1993)。したがって、雨雪量計法を適用するためには、新雪密度の推定が基本的に重要であ

る。

また、よく知られているように、この測器の捕捉率は、雪結晶の軽さ故に、特に強風期間や強風地域で低くなる (Goodison, Ferguson and McKay, 1985 ; International organizing committee for WMO solid precipitation measurement intercomparison, 1985 ; 山田, 1990)。

捕捉率の補正値は、雨雪量計の測定値 P_m に補正係数 k を乗じた $k \cdot P_m$ で求められる。補正係数 k は、一般に、風速 u 、気温 T の関数として $k(u, T)$ で表されるとされている。雨雪量計法による新積雪の深さは、この補正された雨雪量 $k \cdot P_m$ を密度 ρ で除して得られる。 ρ もまた、風速 u 、気温 T の関数 $\rho(u, T)$ といわれている。

このように、捕捉率の補正係数 k と密度 ρ はともに気温と風速の関数である。したがって、これらの2つのパラメータを結合して、雨雪量から新雪の深さに変換する係数として、変換係数 C を $C(u, T) = \rho / k$ と定義して、 C を統計的手法によって求めておく方法も検討してみる価値がある。なお、この方法では新積雪の深さは P_m / C で求められる。

5.2 重回帰分析法に関する考察

積雪深差日計と新積雪深の統計的な関係より新積雪深を推定する統計的積雪深差日計法とも呼ぶべき推定法が林野庁 (1988) により提案されている。統計的積雪深差日計法は、前日の積雪深差日計で新積雪深のクラスを区分して、それぞれのクラスで求めた新積雪深と積雪深差日計との単回帰式から新積雪深を推定する方法である。

この林野庁の報告によると、森林総合研究所十日町試験地における1983/84年冬期から1987/88年冬期の5冬期の日新積雪深と積雪深のデータを用い、新積雪深を目的変数とし、前日、二日前、三日前の積雪深差日計を説明変数とした重回帰分析を行っている。この結果、重相関係数の値には、主として前日の積雪深差日計の値が影響し、二日前の積雪深差日計がわずかに影響するが、三日前の積雪深差日計はほとんど影響しないことを見出している。

新積雪のクラスが高くなると、すなわち前日の新積雪深が大きくなると、相関係数は低くなり、直線回帰式の勾配は大きくなっている。この方法は、全体で0.955とかなり良い相関係数を持っており、前日の積雪深差日計で回帰式を区分するという点が優れたアイデアであることが判る。しかし、この方法でも、積雪深差日計法の一つであることを反映して、降雪が連続しているときの誤差が大きくなっている。また、相関係数は大きいもののばらつきもかなり大きい。

重回帰分析法の重相関係数の値0.917は、統計的積雪深差日計法の単相関係数0.955より低い。しかし、この方法のばらつきは新積雪の深さ70cm以下に限ると統計的積雪深差日計法より小さい。したがって、統計的積雪深差日計法で採用されているように、前日の新積雪深のクラス別に重回帰式を求めれば、重回帰分析法の総合的精度は更に上がることが期待される。

なお、標準化偏回帰係数が1番大きいのは雨雪量であったが、これは雨雪量計法が基本的
に有効な方法であることを示していると解釈されるので、この方法に改良を加える根拠とな
らう。

6. おわりに

新積雪深を求める方法として、気象月報や地域気象観測月報に記載されている2つの計算
法（日積雪深差法と積雪深差日計法）と、ここで新たに提案した雨雪量計法ならびに重回帰
分析法の誤差解析を、気象庁のアメダスによって得られるデータと同種のデータを用いて試
みた。

この報告で提案した雨雪量計法は、現行の積雪深差日計法と相関係数は同じであったが、
ばらつきはやや大きく、現在のところ満足すべき結果には至っていない。しかしながら、こ
の方法は適切な新積雪密度の決定と捕捉率の補正によって改良し得るであろう。

結論として、新積雪深を推定する方法としての重回帰分析法は、重相関係数とばらつきを
含めた総合的な精度を考えると、これまでの3方法よりも精度の良い方法である。

次報では、この報告やほかの結果をふまえて、新積雪深を粘性圧縮モデルを用いて推定し
た結果について報告する。

謝 辞

この研究の過程の折々に適切な御示唆と激励を頂いた中村勉長岡雪氷防災実験研究所長な
らびに談話会で議論して頂いた同僚諸氏の方々に心から謝意を表します。この研究の費用は、
科学技術庁官民特定共同研究（研究課題「交通路の雪氷情報システムに関する研究」、プロ
ジェクトリーダー、中村勉博士）によるものです。

参考文献

- 1) Goodison, B. E., Ferguson H. L., and McKay G. A. (1981): Measurement and data analysis in Handbook of snow, Principles, processes, management & use. edited by Gray, D. M. and D.H. Male. pp. 191-274, Pergamon Press.
- 2) International organizing committee for WMO solid precipitation measuring method intercomparizon(1985): WMO instrument and observation method, First Session, Norrkping, 31pp.
- 3) Kimura, T. (1975) : An automatic snow depth meter by an infrared technique. J. Glaciology, 15, pp.475
- 4) 木村忠志(1983) : Metal Wafer による積雪相当水量の観測。 国立防災科学技術センター研究報告, no.31, 203-217.
- 5) 小林俊市・熊谷元伸・五十嵐高志・中尾正義・清水増治郎・長田和雄(1990) : 長岡における積雪観測資料(14) (1989.11~1990.3). 防災科学技術研究資料, no.145, 12pp.
- 6) 納口恭明・山田 稔・五十嵐高志・中尾正義・清水増治郎・東久美子・熊谷元伸・小林俊市(1992) :

長岡における積雪観測資料(15)(1990.11~1991.4). 防災科学技術研究所研究資料, no.153, 14pp.

- 7) 林野庁(1988):大規模表層雪崩の総合的対策に関する調査報告書, 256 pp.
- 8) 清水増治郎・中尾正義・熊谷元伸・小林俊市・山田 穰・五十嵐高志・納口恭明(1989):長岡における積雪観測資料(13)(1988.11~1989.3). 防災科学技術研究所研究資料, no.138, 12pp.
- 9) 清水増治郎・山田 穰・納口恭明・中村 勉・中尾正義(1990):交通路における雪氷防災情報システムの開発に関する研究, 第3回雪と道路の研究発表会調査研究資料.5-8.
- 10) Yamada, Y.(1990) : Distribution of new snow density in Japan. 5th International Workshop on Atmospheric Icing on Structures. B5-2, 1-7.
- 11) 山田 穰(1990):降水量計の固形降水補足率について. 平成2年度日本雪氷学会全国大会予稿集, 505.
- 12) 山田 穰(1993):日本海沿岸22都市における新積雪密度の度数分布と平均値についてI. 防災科学技術研究所研究報告, 52, 51-67.
- 13) Yamada, Y. and Ikarashi, T(1992): Simulation of depth of fallen snow based on AMeDAS data, Second International Conference on Snow Engineering. Santa Barbala, California, June 1992, CRREL, Special Report 92-27, 169-178.

(1993年8月9日原稿受理)

付 録 日新積雪の測定法の推移と現況.

Appendix Change and the present condition of the measurement of daily newly fallen snow depth.

新積雪深は、ある一定期間に積もった積雪の深さと定義されている。日新積雪深は、我国の気象観測では多年にわたり、一般に当日9時から翌日9時までに雪板上に積もった積雪の深さの目視測定によって観測されてきた。しかし、気象庁の気象観測システムは、ほとんどの気象観測所で手動観測から地域気象観測システム、いわゆるアメダス(AMeDAS)に変わった。この時に、新積雪深の直接観測は廃止され、積雪の深さだけが超音波方式の無線自動積雪深計を用いて、1時間毎に観測されるようになった。なお、雪板を用いた目視観測は、地方自治体やスキー場などで現在も行われている。

アメダスによる気象観測の開始以来、気象庁では、新積雪深の代わりに1時間毎の積雪の深さの正の差の午前0時を日界とした24時間の和、すなわち積雪深差日計を用いている。この日新積雪深の代用値である積雪深差日計は、気象月報に記載されている。また、そのほかの代用値として、午前9時を基準時刻とした積雪の深さの日差、すなわち日積雪深差が地域気象観測月報に記載されている。

アメダスは、全国的な気象観測ネットワークであり、1300余りの観測所のうち、およそ200には超音波積雪深計が備えられており、その他の観測所では雨雪量計のデータが利用できる。一方、積雪の深さや降水量などの気象要素の観測は、アメダスの他に、一部の道路沿線における建設省の広域観測網で行われている。その他に、地方自治体の参加した第3セクターなどにより現在稼働中のあるいは構築され始めている市街地やスキー場の雪氷情報システムによって行われている。