

## アメダスデータを用いた新雪密度の推定法

A Method of Estimating Fresh Snow Density Using AMeDAS Data

北見工業大学工学部 正員 中尾隆志 (Takashi Nakao)

### 1. はじめに

新積雪の密度は降雪の深さと降水量との相互変換や積雪の圧縮過程の研究に必要な物理量であり、圧縮過程をモデル化することにより、積雪深の変化のみで、積雪水量計算はもとより、積雪層内の雪質変化を再現することが可能となる。近年では、このことを利用した融雪モデルの研究も始まってきている<sup>1),2),3)</sup>。このような理由から、主として雪氷学の分野を中心として数多くの研究者により新雪密度の観測がされてきており、これを気象要素と関連付けすることにより新雪密度の物理特性を明らかにしようとする試みがなされてきた<sup>4),5)</sup>。これらの研究によれば、気温や風速と新雪密度との間に定性的な関係は見出されているが定量的な議論は十分なされていない。梶川ら<sup>6)</sup>は降雪粒子の結晶形を考慮することにより、気温、風速、降水強度の気象要素で新雪密度を推定する式を提案しているが、降雪の結晶形を考慮しなければならず、十分に実用的であるとはいえない。

本研究では2003-04年の一冬間、北見工業大学において新雪密度観測を行い、アメダス気象データを説明変数とし、重回帰分析により新雪密度を推定する式を求めたので報告する。

### 2. 新雪密度観測

2003年12月から一冬間、北見工業大学寒地気象観測室露場において、降雪時に新雪密度観測を行った。観測方法の概要は以下の通りである。

予め、プラスチック板(約20cm×30cm)を外気温と同じになるよう、十分に冷やしておき、その後、積雪表面に設置し、プラスチック板の降雪深がおおよそ1cm以上になったと思われる時に、プラスチック板を積雪面から静かに剥ぎ取り、ノギスでプラスチック板の降雪深を数箇所正確に測った後、雪試料が約10cm×15cm程度になるよう雪ペラで成形し、再度ノギスで成形試料の体積を求め、最後に電子ばかりで試料の重さを測定した。

これとは別に熱電対を積雪表面に設置し、雪温がマイナスの場合、降雪は全て、乾き雪であると判定した。また、雪試料の成形に関して、12月26日の測定以降、観測を容易にするため、予め、プリキ製の板で約10cm×15cmの直方体の型枠を用意しておき、プラスチック板上の降雪深をノギスで測定した後、この型枠をプラスチック板に垂直に押し込み、周りを刷毛で取り去ったものを雪試料とした。表1に観測期間中得られた新雪密度の平均値を示す。12月20日観測時では、観測途中から風

が強くなり、プラスチック板上の試料が一部、吹き飛ばされ、降雪深が大きく変化したため、積雪表面に約30cm程度のくぼ地を作り、そこにプラスチック板を設置した。また、1月8日の観測では常時風が強かったため、最初からくぼ地を作り、そこにプラスチック板を設置した。当然のことながら、雪試料作成時に失敗したものは表1の平均密度の算定から除外したが、その他プラスチック板の冷却が十分でなく試料底部で融解が生じていたと認められた試料についても計算から除外した。観測時の積雪表面温度は全てマイナスであり、降雪は完全乾き雪と判定した。一般に、この種の観測では結晶の種類も測定するのが通例であるが、今回の観測では降雪結晶および粒子径の観測は行っていない。

表1 観測された新雪密度の平均値

No.	観測日時	サンプル数	平均新雪密度 (kg/m <sup>3</sup> )	変動係数
1	03/12/19 17:00-19:00	11	67.13	0.011
2	03/12/20 9:00-10:00	5	73.10	0.004
3	03/12/20 9:00-11:00	5	73.64	0.006
4	03/12/20 10:00-12:00	5	74.69	0.006
5	03/12/26 14:00-16:00	12	76.50	0.007
6	04/ 1/ 8 16:00-17:00	6	76.93	0.005
7	04/ 1/ 8 16:00-18:00	6	77.50	0.002
8	04/ 1/ 8 16:00-19:00	3	77.69	0.002
9	04/ 1/11 16:00-17:00	5	74.01	0.002
10	04/ 1/11 17:00-18:00	5	74.09	0.001
11	04/ 2/22 17:00-18:00	4	68.34	0.004
12	04/ 2/22 17:00-19:00	5	68.35	0.004
13	04/ 2/22 17:00-20:00	5	68.29	0.004

### 3. 新雪密度とアメダスデータとの相関

本研究では、新雪密度を推定するために実用的な気象要素との関連付けに重点を置いている。このため、気象要素として比較的容易にデータが入手可能なアメダス気象データを利用することとした。したがって、本研究では気象要素として、観測時間内の毎正時の平均値を用いて平均気温 $T$ ( )、積雪表面上1mの平均風速 $u_1$ (m/s)および平均降水強度 $p_r$ (mm/hr)とすることにした。このうち、 $T$ はアメダスデータを直接用いたが、 $u_1$

と $p_r$ については、以下の方法により変換または補正を行った。

### 3.1 風速データの高度変換

アメダスの風速計高度と風速をそれぞれ $z(m)$ 、 $u(m/s)$ とすると、大気の安定度が中立に近い場合、 $u_1$ は近似的に次式で推定することができる<sup>6)</sup>。

$$u_1 = u \frac{\ln\left(\frac{1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.1)$$

ここに、 $z_0$ は雪面における空気力学的粗度であり、平らな雪面では $1.4 \times 10^{-4}m$ である<sup>7)</sup>。

本観測では、アメダス風速計の地上高度（北見アメダス地点 14.7m）および積雪深変化を考慮し、1時間毎のアメダス風速データおよび積雪深データから雪面上1mの風速を求め、観測時間内の平均値を $u_1$ として用いた。

### 3.2 降水量の捕捉率の補正

一般に降水観測に用いられる雨雪量計は降水量計受け口付近の気流の乱れにより、一部の降水は測器に捕捉されず、真の降水よりも小さくなる。特に冬期においては、降雪を融かす熱線ヒーターの使用により、気流の乱れが顕著になるほか、計測器内に付着した降水の一部は蒸発損失となり、捕捉率は急激に低下する。したがって、計測された降水量を補正する必要がある。横山ら<sup>8)</sup>は3種類の降水量計に対し、雨、雪による補正量を風速の関数で表しているが、本研究では降水量計の器種に依存しない、WMOの固定降水量測定最終報告<sup>9)</sup>に基づく次式による補正量 $c$  (%)を用いることとした。

$$\text{雪: } c(\%) = 100 + 0.439 \times u_p + 0.246 \times u_p^2 \quad (3.2)$$

雨・雪混じり:

$$c(\%) = 100 + 0.194 \times u_p + 0.222 \times u_p^2 \quad (3.3)$$

ここに、 $u_p$ は降水量計受け口と同じ高さの風速(m/s)である。

したがって、真の降水量は式(3.1)において1mの代わりに降水量計の受け口までの高さを代入し、 $u_p$ を求めた後、観測降水量に式(3.2)または式(3.3)を乗じた値とした。ちなみに、WMOの方法では、降水が雨の場合、 $c=100\%$ となり、補正しなくても良いとされている。平均降水強度は観測時間内の1時間毎の降水量に上記補正量をそれぞれ求め、その補正降水量の平均値を平均降水強度とした。

### 3.3 新雪密度と気象要素の単回帰関係

上記の方法で得られた気象要素と観測期間に得られた

平均新雪密度 $\rho_s$ の関係を図-1～図-3に示す。

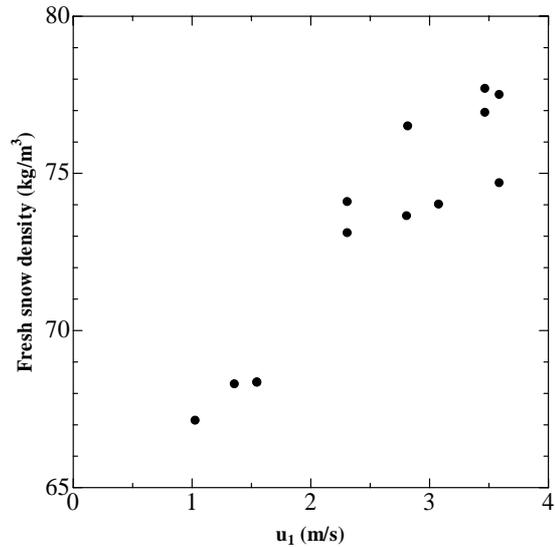


図 - 1 1m高さの風速と新雪密度の関係

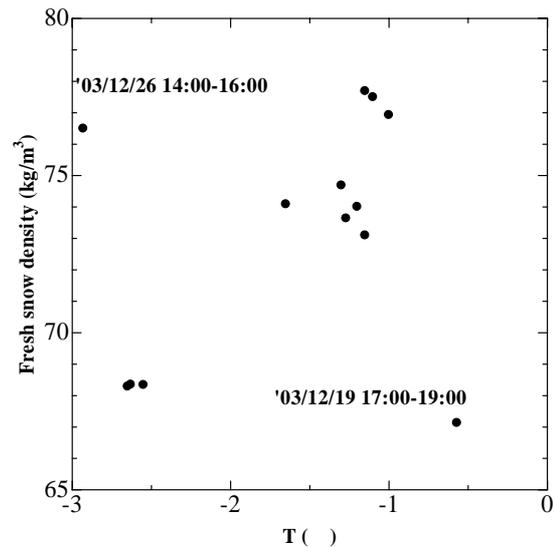


図 - 2 気温と新雪密度の関係

これらの関係式を直線回帰式と指数1次式で求めたところ、それぞれ以下のような関係式が得られた。

#### 1) 1m高さの風速との関係

$$\rho_s = 63.18 + 3.913 \times u_1 \quad r = 0.940$$

$$\rho_s = 63.62 \times \exp(0.05422 \times u_1) \quad r = 0.941$$

#### 2) 気温との関係

$$\rho_s = 75.63 + 1.559 \times T \quad r = 0.317$$

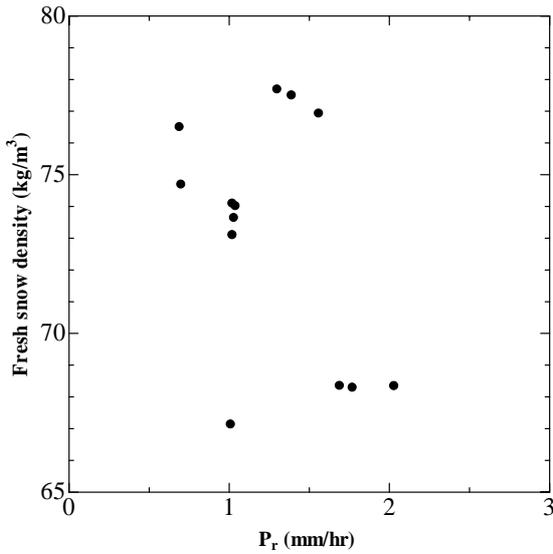


図 - 3 平均降水強度と新雪密度の関係

$$\rho_s = 75.64 \times \exp(0.02153 \times T) \quad r = 0.317$$

3) 平均降雨強度との関係

$$\rho_s = 78.04 - 3.954 \times p_r \quad r = -0.429$$

$$\rho_s = 78.25 \times \exp(0.05555 \times p_r) \quad r = -0.435$$

各気象要素とも直線回帰式と指数1次式では相関係数  $r$  に大きな違いは見られなかった。最も  $r$  が大きいのは新雪密度と  $u_1$  関係の場合であり、最も相関係数が小さかったのは気温との関係であった。両者とも正の相関を示しており、新雪密度は、気温の低下とともに減少傾向を示し、平均風速の増加とともに、増加する傾向を示す。気温との相関係数を悪くしている原因として、2003年12月19日17:00 - 19:00 観測データと12月26日14:00 - 16:00 観測データがある。両データとも全観測期間中、最も平均気温が高かった時と、低かった時であるが、他のデータと比較して、極端な気温の違いではなかった。また、新雪密度観測時間が2時間と長時間を要しているが、他の観測例でも2時間を要している場合があり、新雪による雪試料自身の圧縮変形等の理由とは考えられず、本解析では原因が不明のままである。この2つのデータを除外し、新たに回帰式を求めたところ相関係数が直線回帰式で0.317から0.925、指数1次式で0.317から0.930と大きく増加しているが、本報告ではこのデータもそのまま使用することとした。今後、さらに新雪密度観測データを蓄積し、この原因を明らかにする予定である。

3.4 重回帰分析

独立変数として、平均風速  $u_1$ 、平均気温  $T$  および平均降水強度  $p_r$  を選び、従属変数を新雪密度  $\rho_s$  として重回

帰分析を行った。独立変数に  $u_1, T, p_r$  の全てを用いる場合とそのうちの二つの組み合わせを用いる場合の回帰係数と重相関係数  $R$  を表2に示す。 $R$  が最も大きいのは全ての気象要素を考慮した場合であり、平均気温と平均降水強度のみを説明変数とした場合が最も  $R$  が悪かった。

これらの回帰式について、まず回帰係数全体に対する、零仮説の検定を行ったところ、全ての式で有意水準1%となりこの仮説は棄却され、回帰式は有意となる(表中  $R$  の欄の\*\*)。次に、個々の回帰係数について新雪密度の説明に寄与しているかどうかの検定を行うと、 $u_1$  を考慮した式ではこの項のみが有意水準5%(表中\*)となり、他の説明変数は有意とならない。また、 $T, p_r$  で表わせる回帰式も平均降水量の項のみが有意水準1%となり、平均気温は有意とならない。これらの項を削除すると単回帰の場合と一致するため、新雪密度推定のためには残しておくことにした。

表2 重回帰分析による回帰係数と重相関係数

定数項	$u_1$	T	$p_r$	R
63.72	3.883*	-0.3656	-0.8492	0.945**
62.55	3.997*	-0.2561	-	0.941**
64.34	3.793*	-	-0.6826	0.943**
78.77	-	0.9270	-3.334**	0.464**

最終的に、気象要素の組み合わせから、新雪密度を推定する重回帰式は重相関係数の最も大きな、3気象要素を考慮した次式を用いる。

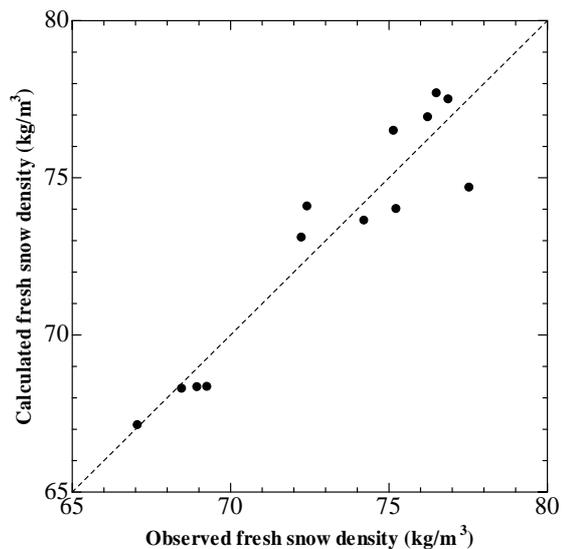


図 - 4 新雪密度の重回帰式による推定値と観測値の比較

$$\rho_s = 63.72 + 3.883u_1 - 0.3656T - 0.8492p_r \quad (3.4)$$

この式で計算された新雪密度と観測された新雪密度の比較を図 4 に示す。新雪密度が大きなところでは計算新雪密度が小さめに計算されている箇所もあるが、おおむね両者はよく一致していることがわかる。

#### 4. 結論

2003-04 年の一冬間、北見工業大学寒地気象観測室露場において、新雪密度観測を行い、アメダス気象データとの関係を検討した。その結果、雪面上 1m の平均風速および平均気温に加え、平均降水強度に相関があることが見出された。単回帰分析の結果から、新雪密度は気温の低下とともに減少傾向を示し、平均風速の増加とともに、増加する傾向がある。

重回帰分析からこれら 3 気象要素を説明変数とする新雪密度推定のための実用的回帰式を求めた。3 気象要素すべてを説明変数とした場合の重相関係数は 0.945 となる。また、任意の 2 気象要素を説明変数とした場合でも、重相関係数は 0.464 から 0.943 の範囲であった。これらの回帰式は全て有意水準 1% である。

本報告では 2003-04 年までの一冬間の観測データを基にして解析がなされている。今後も、観測を継続し、データの蓄積を行うことにより、なおいっそうの予測精度の向上を図るつもりである。

#### 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、(財)北海道河川防災研究センターからの研究助成を受けました。記してここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 遠藤八十一, 小南裕志, 山野井克己, 庭野昭二: 粘性圧縮モデルによる時間降雪深と新雪密度, 日本雪氷学会誌, 第 64 巻 1 号, pp. 3-13, 2002.
- 2) 熊倉俊郎, 山野井克己, 早川典生: 積雪の多層圧縮モデルを用いた北陸地方の降積雪現象の解析, 日本雪氷学会誌, 第 66 巻 1 号, pp. 35-50, 2004.
- 3) 齊藤佳彦, 榎本浩之: 積雪構造予測数値シミュレーションの開発と利用について, 日本雪氷学会北海道支部「北海道の雪氷」, No.22, pp. 33-36, 2003.
- 4) 高橋 博, 中村 勉: 雪氷防災, 白亜書房, 201pp, 1986.
- 5) 梶川正弘: 新積雪の密度と降雪粒子の結晶形との関係, 日本雪氷学会誌, 第 51 巻 3 号, pp. 178-183, 1989.
- 6) 梶川正弘, 後藤 博, 金谷晃誠, 菊池勝弘: 気象要素を考慮した新積雪密度の推定式, 日本雪氷学会誌, 第 66 巻 5 号, pp. 561-565, 2004.
- 7) 近藤純正: 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, 348pp, 1994.
- 8) 横山宏太郎, 大野宏之, 小南靖弘, 井上 聡, 川方俊和: 冬期における降水量計の捕捉特性, 日本雪氷学会誌, 第 65 巻 3 号, pp. 303-316, 2003.
- 9) Goodison B. E., Louie P. Y. T. and Yang D.: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, 299PP, 1998.