

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

山田 穰*

防災科学技術研究所

Frequency Distribution and Mean of Newly Fallen Snow Density at the Twenty-two Cities along the Coast of the Japan Sea

By

Yutaka Yamada

Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, NIED, STA

Nagaoka, Niigata 940 Japan

Abstract

The density of newly fallen snow was calculated from the data of newly fallen snow depth and precipitation amount having been observed for three years at 9:00, 15:00 and 21:00 by the Japan Meteorological Agency at twenty-two cities in Japan. This indirectly calculated density was compared with the density measured directly on the snow board using the 24 hour data observed in Nagaoka.

To examine the equivalence of the above two methods, tests of significance were conducted. The hypothesis that both populations were normally distributed and that the mean density of both groups, ranging from 0.035 to 0.135g/cm³ with a snow depth larger than 5cm, were the same was accepted.

The average density increased as the latitude north decreased. Furthermore, wherever the latitude north exceeded 41°, or wherever the average air temperature was below -2°C, the average density was smaller than 0.06g/cm³ except for inland areas. The regionality of other higher order statistics were also investigated.

Among the three observations per day, the average density observed at 15:00 was the largest and the smallest value appeared at 21:00.

Key words : newly fallen snow, density, rain gauge, statistics, frequency distribution, Japan

キーワード : 新積雪密度, 雨雪量計, 統計学, 度数分布, 日本

*長岡雪氷防災実験研究所第1研究室

1. はじめに

雪の密度は、雪の深さと相当水量との相互変換のパラメータとして重要である。積雪地帯の山岳地の水資源を新雪の深さの積算値から推定したり、屋根雪融雪用ヒータや道路の散水消雪システムのような消融雪設備の熱容量の設計基準を決めるときには、新積雪の相当水量が必要となる。この量を求める方法として、たやすく測定でき、利用し得るデータセットが豊富にある新積雪の深さを相当水量に変換する方法が考えられる。この変換のパラメータとして新積雪の密度が用いられる。また、新積雪の密度自身も着氷雪（中島，1981）や表層雪崩のような雪氷災害の発生機構を解明したり、予測システムを開発するために（遠藤，1990；Endo，1991；山田，1989）必要とされている。

この論文が書かれた直接の動機は、富山県で開発された雪氷防災情報システムに、このシステムで観測されている気象データから新積雪の深さを推定し、付加価値情報として組み込むことであった。気象データから新積雪の深さを推定するには、新積雪の密度が必要だからである。

新積雪の密度は、その深さと相当水量の測定から得られる。深さは一般に雪板（中心にスケールを立てた45cm×45cmの測定板）上で測られるが、相当水量は、雪板上で直接測られる場合と降雪量計で測られる場合とがある。新積雪密度を求めるこの2つの方法を、相当水量の測り方の違いによって、雪板法（Snow board method：和泉，1984；梶川，1989；中村・阿部，1984）、雨雪量計法（Rain gauge method：井上，1990；西岡・浅田，1989）とこの論文ではそれぞれ呼んで区別することにする。新積雪密度を求めるときの観測期間は通常は1日であるが、時には3日またはそれ以上の一降雪期間（井上，1990）あるいは数時間（梶川，1989）であることもある。

この論文では、世界的に豪雪地帯として有名な日本海沿岸地域（Ito，1985）の22都市の、雨雪量計法によって求められた6時間あるいは12時間以内という比較的短時間に積もった、新積雪の密度の度数分布や平均密度、その他の高次統計量と緯度・高度や気温との関係からその地域特性について議論する。対象地域の新積雪密度を計算し、その地域特性を議論する前に、雨雪量計法によって測定された新積雪密度の度数分布と平均値を、基準的方法としての雪板法によって測定された値と比較し、雨雪量計法の妥当性を統計学的仮説検定によって確かめた。

2. データセットと方法

新積雪の深さ・降水量・気温を含む気象データを、気象庁により観測されている地上気象日原簿から収集し、新積雪密度の地域特性の解析に用いた。この日原簿に記載されている新

積雪の深さの観測は、1日に3回、すなわち9時、15時、21時に観測されている。したがって、観測の時間間隔すなわち雪板の曝露時間は観測時刻によって異なり、15時と21時の観測では6時間であり、9時の観測では12時間である。ここで解析した22の気象観測所の位置を図1に、気象観測所名とその経緯度・高度を表2に示した。データの解析対象期間は1983/84から1985/86までの3冬期間である。

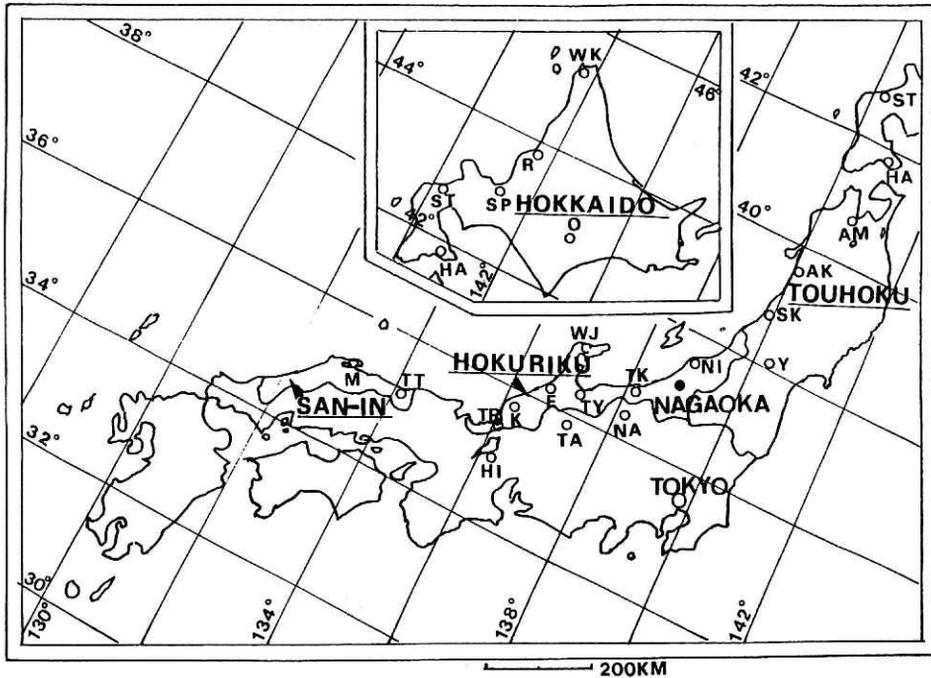


図1 日本海沿いの22の気象観測所の位置。図中の気象観測所(○)を示す1字あるいは2字のアルファベットはその観測所のある都市名の省略記号であり、この記号に対応する都市名は表2中に示されている。また、NAGAOKA(●)は、新積雪密度を求める二つの方法の比較に用いたデータが観測された長岡雪氷防災実験研究所の位置を示す。

Fig. 1 Map of the location of the twenty-two observatories (○) along the Japan Sea. One or two alphabetical letters in this figure shows the cities where the meteorological observatories are located. Full name of these are shown in Table 2. Nagaoka (●) is the observatory where the comparison of the rain gauge method with the snow board method was conducted.

前章で述べた2つの方法により求められる新積雪の統計量の比較検討用データとしては、長岡雪氷防災実験研究所*で観測された1983/84冬期から1987/88冬期の5冬期間の新積雪の深さ(雪害実験研究所編, 1984~五十嵐ほか, 1988)と降水量のデータを用いた。この観測データでは、新積雪の深さが1日に1回9時に観測されている。

雨雪量計で観測された総相当水量 W は、固形降水の相当水量 W_s と雨の相当水量 W_r の両者を含む。したがって、雨雪量データから新積雪の密度を求めるには、 W から W_s を何らかの方法で分離しなければならない。雨雪量計法では、今のところ、これらを分離する有効な手段がないので、極端な場合には、氷の密度 0.912 g/cm^3 あるいは水の密度 1 g/cm^3 を越える非現実的な値が現れることがある。そうでない場合も、雪板上で計られた密度と比較して一般に大きな値が得られる。ここでは、次章で述べるように、対象とする新積雪の深さと密度範囲を限定することにより、みぞれや雨をできるだけ除くことにした。

複数サンプルの平均密度を計算する方法には、単純算術平均(Simple arithmetic mean) μ_1 と深さ荷重算術平均(Depth weighted arithmetic mean) μ_2 とがある(井上, 1990)。深さ荷重算術平均は、定義により、観測期間中の総降水量 W とこの間の積算新積雪深との比に等しい。ここでは、3章で長岡の観測値で両者の平均を比較した結果に基づき、全国の観測点の解析では前者の単純算術平均を用いた。

密度の誤差は相当水量の相対誤差と深さの相対誤差の和である。雨雪量計の捕捉率の影響を考慮しない相当水量の最小読み取り値 0.5mm は、雪板上での対応する水柱値 1 mm よりも小さい。しかしながら、両方法に共通な深さの相対誤差は密度の誤差の大半を占める。この誤差は、新積雪の深さに反比例して大きくなる。更に、もし処理データ中に新積雪の深さの小さいデータが多数含まれていると、望ましくない見掛けの統計学的モードあるいは度数分布の鋭いピークが、例えば 0.05g/cm^3 , 0.10g/cm^3 などに現れる。

この誤差を避け、見掛けのモードを除去し、そして可能な限りデータを有効利用するために、この研究を通して新積雪の深さ 5 cm 以上の密度データを用いた。この場合、密度の深さによる相対誤差は10%以下であり、また、この 5 cm という深さの閾値は W_s を W から結果的に分離するにもある程度有効であった。

3. 雨雪量計法によって測定された新積雪密度の統計量の信頼性

よく知られているように、固形降水の測定に雨雪量計を用いるときには、この計測器の捕捉率が、雪の結晶の軽さのため、場合により特に強風期間や強風地域で低くなることに注意しなければならない(Gray and Male, 1985)。この章では、雨雪量計によって測定された新積雪

*緯度 $37^\circ 25'$, 経度 $138^\circ 53'$, 高度 97m 。

密度の誤差と信頼性を検討し、そして新積雪密度の地域特性を解析するために適切な密度範囲を決定する。解析の対象としたデータは、密度範囲 $0.035\sim 0.135\text{g/cm}^3$ のデータである。密度範囲の下限を 0.035g/cm^3 とした理由は、長岡では、データの解析対象期間中に 0.035g/cm^3 以下の密度が観測されなかったためである。

図2には、前述の2つの方法により観測し、計算した新積雪密度の相対度数分布（左の柱が雪板法で、右の柱が雨雪量計法）を示した。図2中の参考のために示した中央の柱は、雪板上で観測された密度の観測値から、正規分布を仮定して得られた期待される度数分布である。実際、左右の柱の正規確率紙上にプロットされた累積相対度数は直線であり、したがって両者の分布は正規であると言える（図3）。

しかしながら、この2本の直線の子細を観察すると、両者は平行に並んではいるものの、雨雪量計法のプロットはわずかに左へとシフトしている。この平行性は標準偏差STDが等しいことを示し、そして左へのシフトは雨雪量計法による平均密度が雪板上の観測値よりも小さいことを意味している。

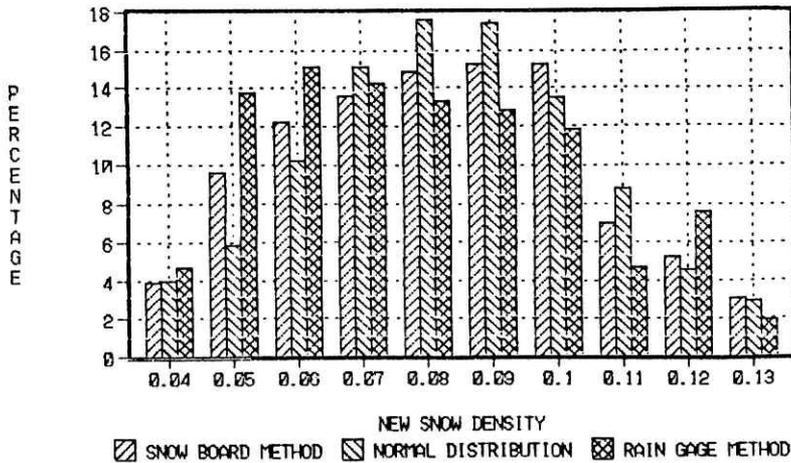


図2 2つの方法により測定された新積雪密度の相対度数分布の比較。中央の柱で示した度数分布は、雪板上で観測された新積雪密度の度数分布から正規分布を仮定して得られたものである

Fig. 2 Relative frequency distribution of new snow density measured by the two observation methods. Middle bar in the figure is the expected frequency that is calculated from the frequency of newly fallen snow density measured on snow board assuming Gaussian distribution.

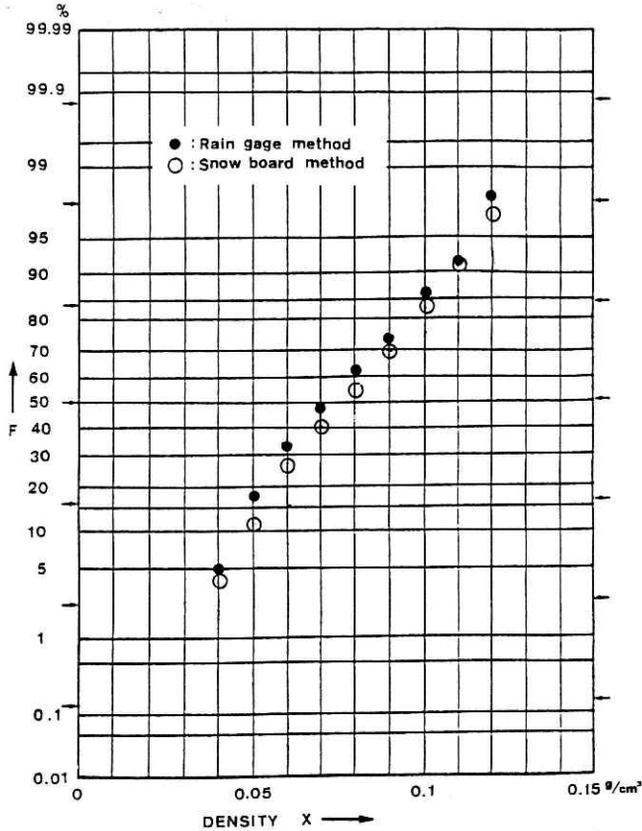


図3 正規確率紙上にプロットした新積雪密度の累積相対度数。○印は雨雪量計法，●印は雪板法のデータを示している。

Fig. 3 Plots of cumulative relative frequency on normal curve graph paper. Mark ○ shows the data of rain gauge and mark ● shows that of snow board.

計算された統計量のすべての結果が表1に示されている。雪板法では、単純算術平均 $\mu 1$ と深さ荷重平均 $\mu 2$ とはほぼ等しい。しかしながら、雨雪量計法によるこれら2つの平均値は僅かに異なり、ともに雪板法の平均値よりも小さい。この違いは雨雪量計の捕捉率が雪板に較べ小さいからにほかならない。この2つの度数分布のもっとも異なった統計学的特徴はモードMODである。雨雪量計データのモードの大きさは $0.06\text{g}/\text{cm}^3$ は、雪板のデータのモード $0.09\text{g}/\text{cm}^3$ (クラス： $0.08 < \text{密度} \leq 0.09$)の3分の2である。この理由もまた雨雪量計の捕捉率の低さによるものである。歪度(skewness)SKはともに正であり、したがって度数分布は非対称で正規分布と比較してピークが左に偏っている。そして、両者の分布が正規分布に較べて鈍いのは尖度(kurtosis)KUが3より小さいからである。

表 1 2つの方法による新積雪密度の統計量の比較。長岡雪氷防災実験研究所での降積雪観測資料による。表中の記号は、ND：データ数、MOD：モード（0.1 g/cm³毎にクラス分けした上限値が表中に示されている）、 $\mu 1$ ：単純平均密度、STD：標準偏差、 $\mu 2$ ：深さ荷重平均密度、SK：歪度、KU：尖度。

Table 1 Comparison of newly fallen snow density statistics by two methods in Nagaoka. 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 x10 ⁻⁴	KU
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

2つの方法の同等性を検定するために、これらの方法により測定された標本の度数分布は、ともに正規で平均値は等しいという仮説を立て、統計的検定を行った。もし選ばれた臨界値 F_c がある値 F よりも小さければ、その値 F は生起確率が低く、仮説は棄却される。正規分布の適合の良さに対する有意性検定は、クラス数10の標本の度数分布（図2）を用い、有意水準0.05で X^2 （カイ二乗）検定によって行った。また、正規分布に属する2つの平均値の比較に対する有意性検定もまた表1中のND、 $\mu 1$ ならびにSTDを用いて有意水準0.01で行った（Kreizig, 1967）。前者の検定の結果は、雪板法については、 $F=4.4$ であり、雨雪量計法については $F=11.71$ であった（どちらの場合も自由度7で $F_c=14.07$ である）。そして後者の結果はそれぞれ $F=2.12$ と $F_c=2.33$ であった。

これらの仮説検定から、すべての比較で $F < F_c$ であることが判り、両者の測定に何等のバイアスが存在しないことが判る。この結果、両者の母集団は正規分布をなし、両者のグループの、新積雪の深さ5 cm以上で密度範囲0.035から0.135g/cm³の平均密度は等しいという仮説を採択した。なお、密度範囲の上限を0.145g/cm³かそれ以上に上げた時には、有意水準0.05では、すべての仮説は棄却された。これらの統計学的検定から、上述の新積雪の深さ・密度範囲と有意水準では、2つの観測値は同等であると判断した。

4. 結 果

前章で得られた結論に従い、日本海沿岸各地の気象観測所のデータから、観測値の相対誤差を考慮して新積雪の深さ5 cm以上、そして統計学的信頼性を保つために密度範囲0.015か

ら0.135 g/cm³までのデータだけを選びだした。また、平均密度は雪板法と雨雪量計法の平均値の差がより小さい単純算術平均で計算した。

4.1 新積雪密度の統計量の地域特性

新積雪密度分布の地域特性をよりよく理解するため、度数分布と平均値に加えて、標準偏差、歪度そして尖度の3つのより高次の基本統計量をモーメント法 (Snedecor, 1956) によって計算した。

22の都市の新積雪密度の度数分布と計算した統計量を、図4-1、図4-2ならびに表2にそれぞれ示した。なお、高田の度数分布を単独の図として示したのは、高田における新積雪密度の統計的諸量が日本海沿岸22都市のほぼ平均値であるからである。これらの図表中では、新積雪の深さ5 cm以上で、0.015から0.135 g/cm³の密度範囲の密度データがプロットされるか計算されている。しかし、表2中の度数分布のクラスならびに最小値MINと最大値MAXは、全ての密度範囲にわたっている。なお、表2のデータ数NDは、3冬期間の1日3回の観測中の降雪回数を示している。

前章の結果では、雨雪量計法の単純算術平均 μ_1 と深さ荷重平均 μ_2 とは僅かに異なっていたが、表2には雪板法との平均値の差が小さい μ_1 だけを表2のAVG欄に示し、また図5以下の図中にプロットしてある。なお、この研究における単純算術平均は、1降雪期間のデータから求めた深さ荷重平均(井上, 1990)と共通の観測所で、解析期間は異なるが、ほぼ等しかった。図4-2では、各観測所の相対度数分布が、北の観測所から南の観測所へ向かって、左から右に上から下にと、並べられている。したがって、一番上の左端の稚内(WK)が最北端に位置し、一番下の右端の彦根(HI)が最南端に位置していることになる。

図5によると、平均密度は緯度が低くなるにつれて増加している。最大平均密度は北陸地方の福井(F)に現れ、最小平均密度は東北地方の青森(AM)に現れている。緯度が41°を越えたところ(青森以北)ではどの地点でも平均密度は比較的小さい、(一般に、0.06 g/cm³以下)。しかしながら、緯度が41°より低い南の地域でも密度が0.06 g/cm³より小さい観測所がいくつかある(山形(Y)、長野(NA)、高山(TA)ならびに彦根(HI))。これらの気象観測所はすべて内陸の高い高度の盆地に位置している(表2)。

平均密度と気温との関係(図6)は、気温が-2℃以下の観測地点では平均密度が0.06 g/cm³以下であることを示している。図5と図6から新積雪密度の地域特性は主に地理学的な要素である緯度や気象学的な要素である気温に依存しているようである。

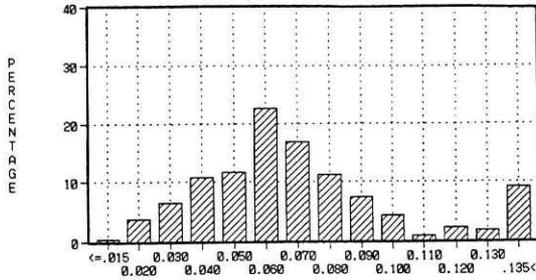


図 4-1 高田における新積雪密度の度数分布. 高田における新積雪密度の統計的諸量は日本海沿岸 22 都市のほぼ平均値である.

Fig. 4-1 Frequency distribution of newly fallen snow density at Takada (TK) near Nagaoka in Hokuriku district.

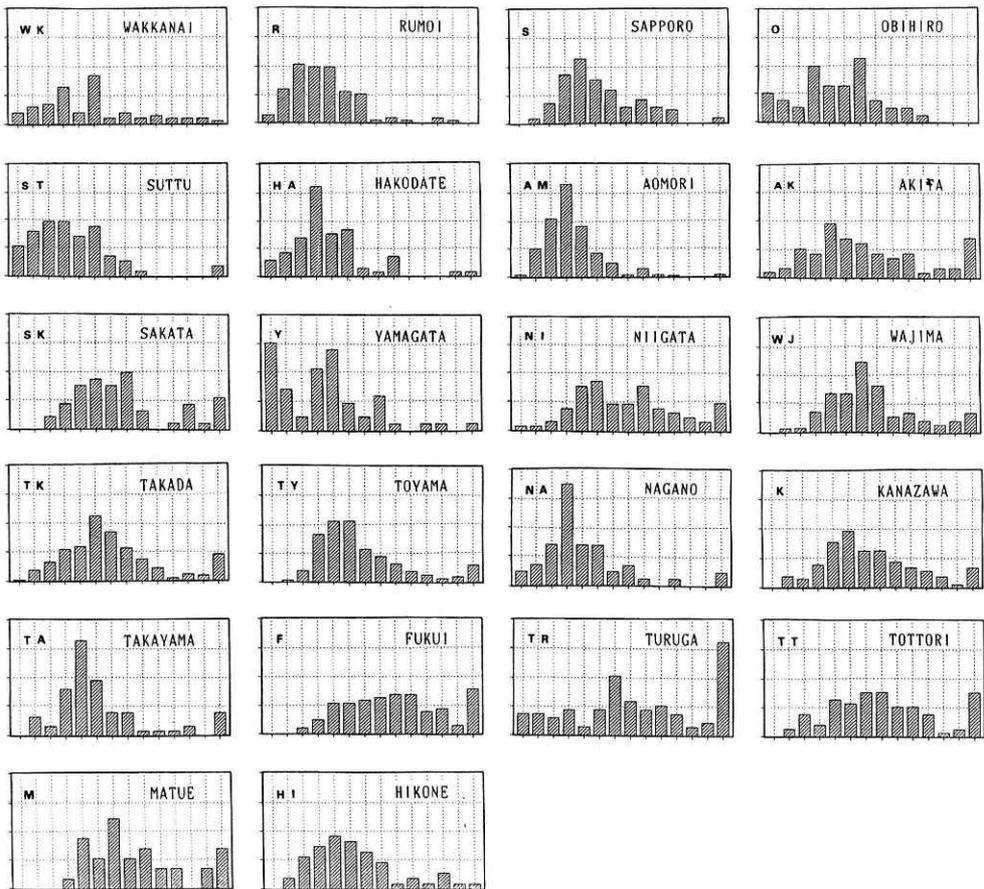


図 4-2 日本海沿岸22都市における新積雪密度の度数分布. この図の単位とスケールは図 4-1 と同様である.

Fig. 4-2 The relative frequency distribution of newly fallen snow density at twenty-two cities. Unit and scale of the abscissa and the ordinate in this figure are the same as Fig.4-1.

表2 観測所名と経緯度・高度ならびに新積雪密度の統計量 (ND: データ数, MIN: 最小密度, MAX: 最大密度, AVG: 平均密度, STD: 標準偏差, SK: 歪度, KU: 尖度, MOD: モード)

Table 2 The name and location of twenty-two cities and the statistics of newly fallen snow density. Analyzed period was three winter seasons from 1983/84 to 1985/86. Station name together with statistics are tabulated in this table (LONG.N: Longitude north, LAT.E: Latitude east, ALT: Altitude, ND: Number of data, MIN: Minimum density, MAX: Maximum density, AVG: Average density, STD: Standard deviation, SK: Skewness, KU: Kurtosis, and MOD: Mode).

	STATION	LONG.	E	LAT.	N	HEIGHT	ND	MIN	MAX	AVG	STD	SK	KU	MOD	
		°	'	°	'	m		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	X10 ⁻⁴		g/cm ³	
WK	WAKKANAI	45	25	141	41	2.8	64	0.006	0.170	0.058	0.028	8.4	3.0	0.058	
R	RUMOI	43	57	141	38	23.6	116	0.010	0.150	0.047	0.021	14.0	5.7	0.031	
S	SAPPORO	43	03	141	20	17.2	110	0.020	0.144	0.061	0.022	5.8	2.5	0.050	
O	OBIHIRO	42	55	143	13	38.4	40	0.008	0.106	0.059	0.022	2.3	2.4	0.069	
ST	SUTTU	42	47	140	14	15.7	57	0.007	0.160	0.045	0.018	4.1	2.3	0.035	
HA	HAKODATE	41	49	140	45	33.2	71	0.010	0.160	0.048	0.020	14.0	5.7	0.040	
AM	AOMORI	40	49	140	47	2.7	253	0.010	0.280	0.043	0.017	12.0	4.9	0.040	
AK	AKITA	39	43	140	46	9.4	58	0.010	1.143	0.066	0.027	5.2	2.6	0.051	
SK	SAKATA	38	54	139	51	3.1	46	0.031	0.190	0.071	0.025	6.8	2.9	0.078	
Y	YAMAGATA	38	15	140	21	152.5	43	0.003	0.190	0.052	0.023	8.6	3.7	0.048	
NI	NIIGATA	37	55	139	03	1.9	65	0.011	0.207	0.074	0.026	2.5	2.2	0.059	
WJ	WAJIMA	37	23	136	54	5.2	74	0.021	0.300	0.073	0.024	5.3	3.1	0.070	
TK	TAKADA	37	06	138	15	12.9	231	0.015	0.350	0.064	0.023	4.6	3.2	0.061	
TY	TOYAMA	36	42	137	12	8.6	156	0.025	0.310	0.063	0.022	9.3	3.6	0.055	
NA	NAGANO	36	40	138	12	418.2	43	0.008	0.317	0.048	0.019	10.0	4.0	0.040	
K	KANAZAWA	36	33	136	39	26.1	104	0.017	0.310	0.069	0.025	2.7	2.5	0.059	
TA	TAKAYAMA	36	09	137	15	560.1	64	0.020	0.330	0.056	0.021	10.0	4.5	0.050	
F	FUKUI	36	03	136	14	8.8	102	0.031	0.330	0.082	0.025	-0.33	2.1	0.095	
TR	TURUGA	35	39	136	04	1.6	68	0.002	0.332	0.073	0.029	-0.70	2.3	0.071	
TT	TOTTORI	35	29	134	14	7.1	79	0.020	0.230	0.073	0.026	0.063	2.4	0.075	
M	MATUE	35	27	133	04	16.9	29	0.042	0.210	0.077	0.023	6.1	2.7	0.070	
HI	HIKONE	35	16	136	15	87.3	55	0.023	0.175	0.061	0.026	8.4	3.2	0.050	
Mean								87.6	0.016	0.277	0.062	0.023	6.3	3.3	0.057

図7には平均密度と尖度との関係が示されている。尖度KUは正規分布と比較した度数分布の鋭さを示している：

- KU > 3 : 度数分布の鋭いモード,
- KU = 3 : 正規分布,
- KU < 3 : 度数分布の鈍いモード.

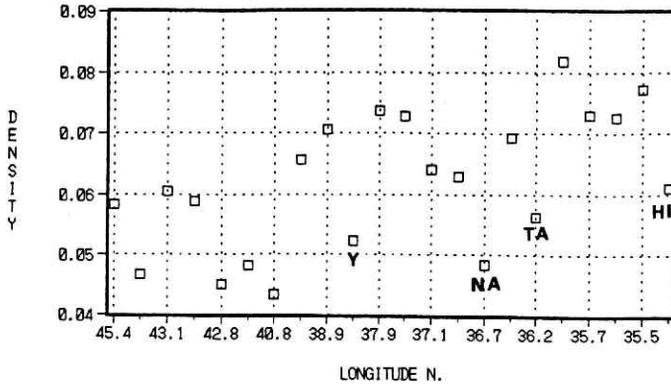


図5 平均密度と緯度との関係。

Fig.5 Relation between average density and latitude north.

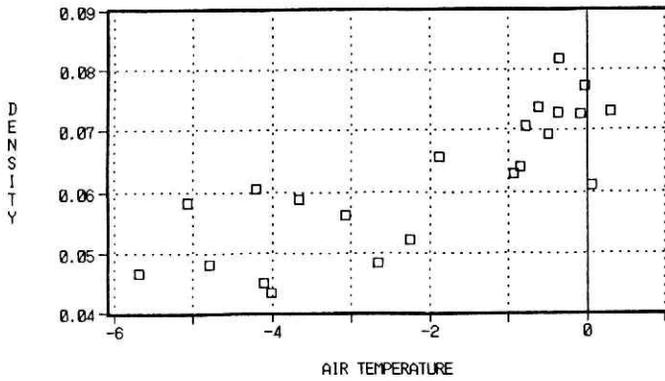


図6 平均密度と平均気温との関係。

Fig.6 Relationship between average density and average air temperature.

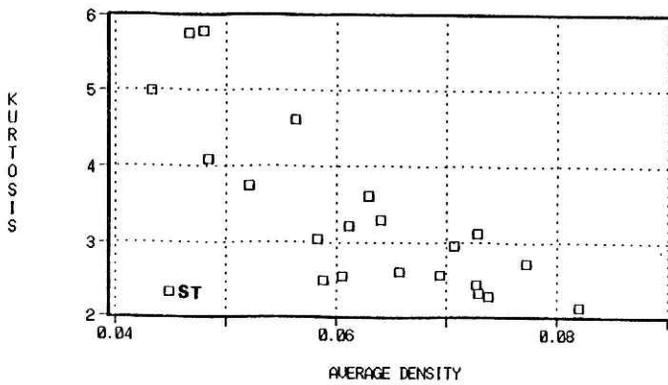


図7 平均密度と尖度との関係。

Fig.7 Relationship between average density and kurtosis KU. The kurtosis shows the degree of sharpness of frequency distribution.

尖度は、ただ1つの例外である寿都(ST)を除いて、平均密度が減少すると増加している(図7)。これは平均密度の小さい地点の新積雪密度の度数分布は、正規分布より鋭く、平均密度のある付近の狭いクラスに集中していることを意味している。この結果を図5の結果と考え合わせると、北方あるいは内陸の寒冷地域では、密度の度数分布は一般に正規分布より鋭いモードとなっている。

最大の尖度、すなわち最も鋭いモードは函館(HA)で現れており、最小値は福井(F)で現れている。一方暖かくより雪の深い北陸地方の分布の型は、ほぼ正規分布であると考えられる(輪島(WJ), 高田(TK), そして富山(TY))。北陸地方の長岡に近い高田(TK)の度数分布が単独に図4-1に示されている。この理由は、前述のように単にスケールを示すためだけでなく、高田のほとんどの新積雪密度の統計量が22の都市の平均値と等しいからである。ただし、高田の例外はデータ数NDあるいは降雪日数が最大級で積雪深と降水量が最大であることである(Ito, 1985)。福井(F)以南では、尖度KUは彦根(HI)を除いて3未満である(図4-2)。

表2は、歪度SKの傾向が尖度KUの傾向と類似していることも示している。歪度SKは分布の非対称性の度合いと方向を表現する統計学的な量である。すなわち、歪度の絶対値は非対称性の度合いを示し、その正負は非対称性の方向を示す：

SK > 0 : 正の非対称 (正規分布から左傾),

SK = 0 : 対称 (正規分布),

SK < 0 : 負の非対称 (正規分布から右傾)。

一般に、どの地点でも尖度の小さいところでは歪度は小さく、その逆も真である。歪度の大きな値は、北海道の留萌(R)と函館(HA)、東北地方の青森(A)にある。豪雪地帯の北陸地方では歪度の値はやや小さい。歪度の負の値が、温暖で豪雪地帯である北陸地方南部(Ito, 1985)の福井(F)と敦賀(TR)で稀な例として認められる。これらの負の値が、平均密度が0.82から0.73g/cm³の間の高い平均密度の海洋性気候の沿岸平野にあるのは注目すべきである。

4.2 観測時刻と観測間隔の効果

1日に3回の新積雪密度の観測のうち、15時に観測された平均密度が最大で、次いで9時、21時の観測値の順となっている(表3)。平均気温は、平均密度とは異っており、高気温の順に並べると、15時(-1.8℃)、21時(-2.1℃)そして9時(-2.3℃)の順になる。

15時と21時の平均密度を比較すると、15時の平均密度が21時の平均密度よりも大きい。15時と21時の観測間隔はともに6時間であるが、15時に観測された新積雪は、夕方に積もった21時の新積雪よりも日射を多く受け、気温も高い状態におかれている。これが15時と21時の密度の差と順序の原因となっているのであろう。しかしながら、内陸部の観測所である北海

表3 9時, 15時, 21時の22地点における新積雪の平均密度 ($\mu 1$) と平均気温 (Air temp.).
Table 3 Average density and air temperature at 9h, 15h and 21h. $\mu 1$: Average density calculated by simple arithmetic mean, Air temp.: Average air temperature.

		9h	15h	21h
$\mu 1$	g/cm ³	0.062	0.064	0.059
Air temp.	°C	-2.3	-1.8	-2.1

道の帯広(O), 本州の長野(NA)と高山(TA)では, 逆に21時の密度が15時の密度よりも大きかった. また, 北方の寒冷地域である北海道の留萌(R), 寿都(ST)と東北地方の青森(A)では9時と15時の密度はほぼ等しい.

9時の平均密度は, 観測間隔を15時のものと同一とすれば, 一般に15時の平均密度よりも小さいはずである. 9時と15時の観測条件を比較すると, 夜間の時間帯が多い9時の平均気温が21時の平均気温よりも小さいからである. しかし, 逆に9時の観測間隔は15時の観測間隔よりも2倍長い. 15時の平均密度が9時のそれより大きい結果となったことは, 気温効果の方が観測間隔に依存する圧縮効果よりも大きいことを示唆している. これとは反対に, 内陸では9時の密度の方がより大きい. このことは, 内陸では, 気温の低さよりも結晶形が新積雪密度の違いに寄与していることを示唆している.

9時の密度は21時の密度よりも大きい. この密度差は9時と15時の密度差よりも小さい. これはより長い観測間隔が気温の差の効果と打ち消しあっているのだと考えられる.

4.3 得られた結果と以前の結果との比較

この研究で雨雪量計法によって計算された平均密度 (AVG1) と, 同一都市あるいは最寄りの都市で雪板法により直接測定された平均密度 (AVG2) とを, 過去に観測例のある3対6地点について比較してみる (表4). この表4では, 雨雪量計法による平均密度AVG1は, 前出の表2の単純平均密度 $\mu 1$ と同じで, この表から抜き書きしたものである.

表中で, 新潟市はこの研究の解析データと同一都市内の観測値であり, 鹿角市は, 表2の秋田市(AK)近くの内陸部に位置し, そして新庄市は山形(Y)近くで高い高度の内陸部に位置している. 鹿角市と新庄市とはともに秋田市, 山形市に較べてそれぞれ寒冷で多雪な地域となっている. 観測条件, すなわち解析に用いられている密度データの新雪の深さの下限や観

測間隔は表中に示されている。

表4 雨雪量計法による新積雪密度の既存の雪板法による観測結果との比較。表中でSTは観測地点，AVGは単純平均密度を示し，数字1はこの研究の，数字2は既存の論文の結果を示している。

Table 4 Comparison of newly fallen snow density by two methods in the same city or the corresponding near cities. ST: Stations, AVG: Simple arithmetic mean. Suffix 1 means stations or averages in this study and suffix 2 means those in the past studies.

ST1	AVG1 g/cm ³	ST2	AVG2 g/cm ³	DEPTH cm	INTERVAL hours
AKITA	0.066	KAZUNO	0.062	0.5	6
YAMAGATA	0.052	SHINJO	0.076	5	24
NIIGATA	0.075	NIIGATA	0.133	1	24

まず，比較対象となっている新庄市（中村・阿部,1978）と新潟市（和泉,1984）のデータは24時間の新積雪密度であり，この値がこの研究での6ないし12時間の新積雪密度よりも大きいのは，観測間隔と気温の効果として説明し得る。観測間隔が6時間の梶川（1989）のデータはこの研究の計算間隔と近く，値もほぼ等しい。したがって，これらの結果は観測地点と観測間隔の違いを考慮すると，雨雪量計法によって計算された平均密度はとても合理的であり，雪板法による平均密度とほぼ一致したものと結論できる。

5. 考 察

ここで，新積雪の地域特性の解析に，統計的検定に用いた長岡の新積雪密度の下限0.035g/cm³を用いずに，新積雪密度の下限値として0.015g/cm³を用いたのは，梶川（1989）によると，雪板法による6時間間隔の観測で最小密度は0.015g/cm³であったという結果によるものである。0.135から0.015g/cm³の低密度でも同様の統計的仮説が採択できるかどうかは直接検証できなかったが，前章で述べた雪板法との比較結果は，低密度でも高密度で得られた統計的仮説が採択し得ることを傍証しているものと考えられる。

この論文中の解析では，対象とする新積雪の深さと密度範囲を限定して，捕捉率や雨・みぞれの影響を避けた。しかし，厳密には風速や気温に基づいて降水量を補正しなければなら

ず、この影響は特に北の寒冷な観測点のデータで大きいと考えられる。したがって、本論ではこれらの影響がまだ含まれていると言う前提に立って新積雪密度の地域特性を明らかにしたものである。

積雪は体積粘性圧縮物質である。したがって、歪み速度はその雪に作用する応力に比例して増加する。小島(1967)は、北海道において乾雪の野外観測を行い、圧縮粘性係数と呼ばれる係数が密度の指数関数として表されることを示した。また、篠島(1967)は、この係数に温度依存性があることを低温室内の実験によって明らかにしている。雪の粘性圧縮方程式の解は、密度は、初期密度、雪温、雪に作用する力に依存して、時間の経過につれて増加することを示している。

この理論によると、この研究で明らかとなった結果のほとんどを定性的に説明しうる。例えば、各都市の新積雪密度の気温依存性は圧縮粘性係数の温度依存性によるものであり、また観測間隔により新積雪の密度が異なることは、雪の粘性圧縮による圧密は、雪に作用する力の大きさでなく作用時間にも依存することによっている。

しかし、梶川(1989)によると、初期密度は上空の気温に依存する雪の結晶形によって異なる。それ故、雪密度への主な気温効果が、雪の圧縮効果から来ているのか、結晶形から来ているのか、あるいは融雪による影響から来ているのかは必ずしも明確ではない。これらすべての効果が、新積雪密度に寄与しているのであろう。

6. おわりに

この論文では、雨雪量計法による新積雪密度の統計的解析に基づいて、捕捉率や降雪の影響をできるだけ除去する方法を考案し、この方法を用いて、新積雪の深さを気象データから推定する手法に必要なパラメータである新積雪密度の全国的スケールの地域特性の相互比較に耐え得る解析結果を得た。

今後、新積雪密度の地域特性を地理的・地形的要素や融雪に寄与する日射などの効果も加えた気象要素から定量的に精度の良い新積雪密度の推定手法を開発することが必要である。なお、新積雪の推定手法に関する研究の第一報は、別報で報告してある(山田, 1993)。

最後に本論文で明らかになった主な結果は以下のことがらである：

- 1) 新積雪の密度は、新積雪の深さと水量の測定から求められるが、密度測定は水量の測定法の違いから雪板法と雨雪量計法に分けられる。

新積雪深の深さ 5 cm以上、密度 $0.035\text{--}0.135\text{g/cm}^3$ の範囲では、正規確率紙への二つの測定方法による累積相対度数分布へのプロットと統計的検定から、ともに正規分布をなしていることが判った(図2, 3)。したがって、雨雪量計法による新積雪の密度の統計的性

- 質は雪板法と同等とみなしてよい。但し、雨雪量計法による平均密度は、僅かに雪板法による密度よりも小さく、標準偏差は大きい(表1)。
- 2) 日本海沿岸22都市の新積雪密度の度数分布を雨雪量計法により求め(図4-2)、その地理的特徴を明らかにした(表2)。
- 3) 平均密度は、緯度が下がると増加するが、同緯度でも内陸では小さい(図5、黒塗りが内陸地点)。また、平均密度は平均気温が -2°C 以下では $0.06\text{g}/\text{cm}^3$ 以下であり、気温がそれ以上では気温に比例して増加する(図6)。

謝 辞

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(課題名「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」, プロジェクトリーダー中村勉博士)の予算によるものです。

参考文献

- 1) 遠藤八十一(1990): 低密度雪の圧縮粘性係数と密度との関係. 雪氷, 52, 267-274.
- 2) Endo, Y.(1991): Time variation of stability index in new snow on slopes. Japan-U.S. Workshop on Snow Avalanche Landslide, Debris flow Prediction and Control. 85-94.Gray, D. M. and D. M. Male(1981): Handbook of snow. Pergaon Press.
- 3) 五十嵐高志ほか(1988): 長岡における降積雪観測資料(12), (1987.11~1988.4). 防災科学技術研究資料, 129, 1-13.
- 4) 井上治郎(1990): 新雪の密度の地域特性について. 京都大学水資源研究センター報告. 10, 3-9.
- 5) Ito, T.(1985): Regional characteristics of the maximum depth of snow cover in Japan. Natural Disaster Sci, 7, 1, 25-39.
- 6) 和泉薫(1984): 新潟における日降雪の雪密度と電気伝導度. 新潟大学積雪地域災害研究センター年報. 6, 103-109.
- 7) 梶川正弘(1989): 新積雪の密度と降雪粒子の結晶形との関係. 雪氷 51, 3, 178-183.
- 8) Kojima, K.(1967): Densification of Seasonal Snow Cover. in Physics of Snow and Ice. Part2 (ed.Oura), 929-952.
- 9) Kreizig, E.(1967): Advanced Engineering mathematics, 2nd Ed. John Willy & Sons, Inc.
- 10) Nakajima, C.(1981): Snow damage in the warmer regions of Japan. Natural Disaster Sci. 3, 1, 1-14.
- 11) 中村秀臣・阿部修(1978): 新庄で観測された日降雪の密度. 防災科学技術研究報告. 19, 243-250.
- 12) 雪害実験研究所編(1984): 長岡における降積雪観測資料(8), (1983.11~1984.4). 防災科学技術研究資料 91, 1-13.
- 13) 西岡哲平(1989): 屋根雪設備に関する基礎的研究, その1 積雪地域各都市の含水率の推定について. 日本建築学会北陸支部研究講演梗概集. 189-190.
- 14) Shinojima, K.(1967): Study on the visco-elastic deformation of deposited snow. in Physics of Snow and Ice, Part2, (ed. Oura). 875-907.
- 15) 須藤伊佐夫ほか(1987): 塩沢における38冬期の降積雪, 1947-1985. 鉄道技術研究所速報. Prereport. A-87-98, 1-47.
- 16) Snedecor, W.(1956): Statistical methods, 5th Ed. The Iowa State University Press, Ames.
- 17) 山田 穰(1987): 豪雪と雪崩災害. 地学雑誌, 98, 639-655.

- 18) 山田 穰(1993)：時間気象データに基づく新積雪深の推定法について — 雨雪量計法と重回帰分析法 —. 防災科学技術研究所研究報告, 52, 69-80.

(1993年8月2日原稿受理)