



Title	融雪水の積雪内浸透に及ぼす雪質の効果
Author(s)	石井, 吉之; ISHII, Yoshiyuki
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 53-68
Issue Date	2002-03-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.65.53">https://doi.org/10.14943/gbhu.65.53</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14303">https://hdl.handle.net/2115/14303</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p53-68.pdf



## 融雪水の積雪内浸透に及ぼす雪質の効果

石井 吉之

北海道大学低温科学研究所

(2001年12月21日受理)

## Effect of Snowpack Properties on Meltwater Infiltration Through Snow

Yoshiyuki ISHII

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

(Received December 21, 2001)

To clarify the effect of snowpack properties on meltwater infiltration through snow, comparative observations using large-sized snow lysimeters were made at two separate sites in Hokkaido, Japan. The snowpack properties are grain shape and size, density, porosity, liquid water content, hardness, homogeneity and stratification. One site is Moshiri, where the maximum snow water equivalent (max SWE) is 700 to 800mm and the dominant snow type is compacted snow. The other site is Furano, where max SWE is 300 to 400mm and depth hoar is predominant in the snowpack. The observed average infiltration rates were 42cm/h in Moshiri and 22cm/h in Furano. During the whole springmelt period, total amounts of outflow from the snowpack were almost equal to those of surface snowmelt in both sites, although Moshiri's amount is nearly two times larger than Furano. The characteristics of infiltration through the Furano type snowpack are summarized; 1) outflow rate are greater than or less than surface melt on a diurnal cycle, 2) snowpack porosity is slightly larger (<10% larger) and remarkably soft. However, the slow infiltration rate at Furano cannot be explained sufficiently by these characteristics. Preferential pathways in the Moshiri type snowpack are discussed as a possible explanation for the difference infiltration rates.

### I. はじめに

春先の融雪期において、積雪表面の融雪水が河川へ流出するまでにはかなりの時間を要する。積雪内での浸透や地中での浸透及び流動という過程を経るためである。一般に1 km<sup>2</sup>程度の小流域では、積雪表層での融雪のピークは12時頃であるが、河川流出のピークは17時から20時頃になる。Kobayashi and Motoyama (1985) は、1 mの積雪があれば降雨出水時と比べ2.5～4時

間も河川のピーク流出が遅れることを示し、融雪流出過程における積雪内浸透の重要性を指摘した。融雪水の積雪内浸透の特性を調べる上では、積雪ライシメータを用いた積雪底面流出の直接測定が最も効果的である。北海道北部の多雪寒冷地にある母子里試験地では、積雪内浸透の非一様性の影響を除くために3.6 m×3.6 mの大型積雪ライシメータを設置し、表面融雪と積雪底面流出の応答や見かけ浸透速度(積雪深を流出遅れ時間で除した値)などが調べられてきた。ここでは1 m程度の積雪深があると底面からの流出のピークは14時~15時に現れることが明らかにされている(浜田ほか, 1988; 野村ほか, 1992; Nomura, 1994など)。ところが、1991年の融雪期にカナダ東部の北方針葉樹林地内の開地において同様の観測を行なったところ、母子里と同程度の積雪深であるにもかかわらず底面流出のピークは16時頃に現れ、著しく小さな浸透速度が観測された(石井ほか, 1992)。この時の積雪は「しもざらめ雪」が濡れ変態した「ざらめ雪」で、母子里のような「しまり雪」から変態した「ざらめ雪」に比べ空隙率や粒径・硬さなどの雪質が著しく異なり、そのために浸透速度が小さくなると考えられた。融雪水の積雪内浸透についてはこれまでも多くの研究があり、浸透速度の測定(若浜, 1968; 藤野, 1968)、水みちや氷板の存在が与える影響(Wakahama, 1968)、毛管力の寄与(Wankiewicz, 1978)、重力流理論の適用(Colbeck, 1978)、非一様性の実態(Marsh and Woo, 1985; Nomura, 1994)などが報告されている。しかし、雪質によってどの程度の浸透速度の違いが生じるかを評価した研究は少ない。カナダ東部での観測は1年に限られていたが、北海道の中央~東部にはカナダ東部と同様なしもざらめ雪が分布する(秋田谷・石井, 1992)。そこで、雪質に起因する融雪水の積雪内浸透の違いを明らかにする目的で、しもざらめ雪地帯としまり雪地帯の2ヶ所で大型積雪ライシメータを用いた積雪底面流出の比較観測を行なった。

## II. 観 測 方 法

観測を行なった場所は、しもざらめ雪地帯が東京大学北海道演習林富良野試験地内(東郷ダム地点)、しまり雪地帯が北海道大学雨龍演習林母子里試験地内のいずれも開地である。これ以降は前者を富良野、後者を母子里と呼ぶ。両地域の位置を北海道内の雪質分布(秋田谷・石井, 1992を一部改変)とあわせてFig. 1に、また、気候及び積雪状態の特徴をTable 1に示す。参考のために、Table 1にはカナダ東部の試験地(ケベック州ラバル大学モンモレンシー演習林)における値も併記した。

両地点では積雪ライシメータによる積雪底面流出量の観測のほか、熱収支観測および雪尺法(雪面低下法)による表面融雪量の測定および積雪断面観測を行なった。積雪ライシメータは富良野では1.8×1.8 m<sup>2</sup>、母子里では3.6×3.6 m<sup>2</sup>の大型ライシメータを積雪期前の1993年10月に地表面に設置しておき、この上に自然積雪を堆積させた。大型ライシメータ上の積雪からの底面流出水は1カウント500 mLの転倒桁型流量計に導いて計測した。分解能は母子里で0.04 mm、富良野で0.15 mmである。富良野における大型ライシメータの面積は母子里の1/4とやや小型であるが、この程度の大きさがあればライシメータ上の積雪水量と全融雪期間を通じての底面流出

量がほぼつり合い、積雪内浸透の非一様性の影響が避けられることをあらかじめ確認している。

積雪表面での融雪量を熱収支法によって時間単位で算定するために、富良野では高さ5 mの風向・風速、高さ1.5~2 mの気温・湿度・全天日射量・降水量、および積雪深を全て自記計によって連続観測した。一方、母子里では高さ1.5~2 mにおける風向・風速・気温・湿度・上下向き短波長放射量・上下向き長波長放射量・放射収支量・降水量、および積雪深の自記連続観測を行なった。放射収支量を計算するにあたり、母子里では放射収支計の測定値をそ

のまま用いた。富良野では、観測された全天日射量に現地観測のつど計測した正午頃のアルベード値の平均値(0.57)を乗じて短波長放射収支量を求め、長波長放射収支量は雪面を0℃と仮定し気温・湿度・晴天指数を用いて計算し、これらの和から放射収支量を求めた。また、顕熱及び潜熱輸送量はIshikawa and Kodama (1994)と同様に無次元バルク係数 $2.3 \times 10^{-3}$ を顕熱と潜熱

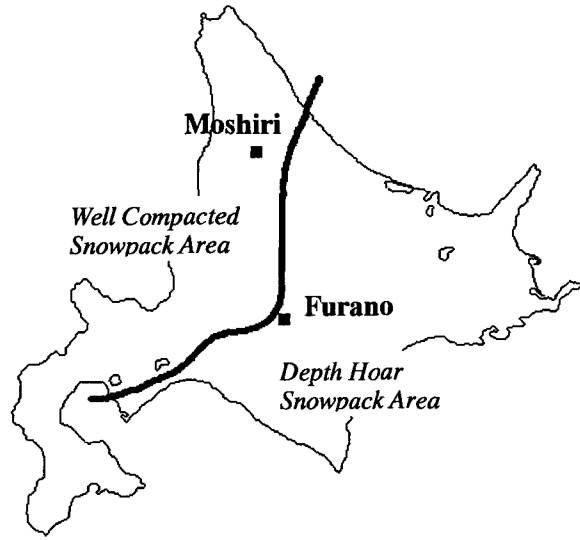


Fig. 1. Location map of the Furano and the Moshiri study sites. Thick solid line shows the boundary between each snowpack area.

Table 1. Characteristics of study sites.

Site name	Furano <sup>1)</sup>	Moshiri <sup>2)</sup>	Québec <sup>3)</sup>
Elevation (m)	400	290	800
Air temperature (deg-C)			
Annual	5.2	4.1	0.2
July	18.6	17.7	18.2
January	-12.5	-10.3	-12.5
Annual precipitation (mm)	885	1542	1300
Snow depth (cm)	96	166	99
Snow water equivalent (mm)	343	751	404
Predominant snow property	depth hoar	compacted snow	depth hoar

data source: In 1) and 2), air temperature and precipitation are the mean value from 1979 to 1990 at the nearest AMeDAS station. These values in 3) are reported by Papineau (1987). Snow depth and its water equivalent are measured values just prior to snowmelt period in each site and year.

に与えバルク法によって求めた。熱収支法で得られた時間単位の表面融雪量を昼間の時間帯で積算し、雪尺法で得られたその日の積算融雪量と比較し異常値がないかどうかを確認した。

積雪断面観測は融雪期前の厳冬期に1回、融雪期間中に3回（ほぼ融雪初期、前期、後期に相当）実施した。測定項目は層構造、雪温、密度、硬度（木下式）、含水率（融雪期のみ）および全層の積雪深・積雪水量・ラム硬度である。また同時に、積雪粒子のアニリン薄片用の雪試料を採取し、厳冬期と融雪期の雪粒の状態を比較した。

観測は主に1994年の2月中旬から融雪期を含む5月中旬までの期間に行なったが、一般気象要素および積雪深については1993年11月から自記計による連続観測を行ない、冬期の気象条件や積雪の状態を知る上での基礎資料とした。

### III. 観 測 結 果

#### 1. 厳冬期および融雪期間中の積雪の特性

1993年11月中旬から1994年5月中旬までの富良野および母子里における積雪深変化をFig. 2に示す。また、両地点における厳冬期および融雪初期・前期・後期の積雪層構造をFig. 3に、それぞれの時期における積雪全層の平均的な特性値をTable 2に示す。厳冬期の雪質は、富良野では底面から60 cmまでの深さでもしざらめ雪が発達しているのに対し、母子里では所々にしざらめ雪層を挟むものの全体としてはしまり雪が優勢である。融雪初期の雪質は、表面や底面附近に薄いしざらめ雪層や氷板ができてはいるが、全体としては富良野ではしざらめ雪、母子里ではしまり雪の特徴を残している。観測期間中の富良野の積雪深は母子里のおよそ1/2であるが、積雪水量も1/2程度であるため全層平均密度の違いは小さい。また、含水率もほぼ等しいため乾き密度の違いも小さいが、空隙率は富良野の方がやや大きめである。一方、雪の硬さの違いは明瞭で、富良野の全層平均ラム硬度は母子里の1/5~1/10と小さく、きわめて脆い雪質である。融雪期間全体のちょうど中頃に当たる時期（富良野；4月12日14時頃、母子里；4月26日9時頃）の雪質の鉛直プロファイルを図4に示す。観測した時間帯が富良野では午後、母子里では午前で

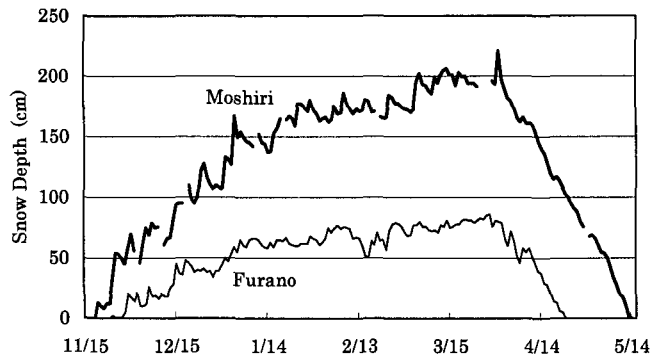


Fig. 2. Snow depth variations from November 1993 to May 1994.

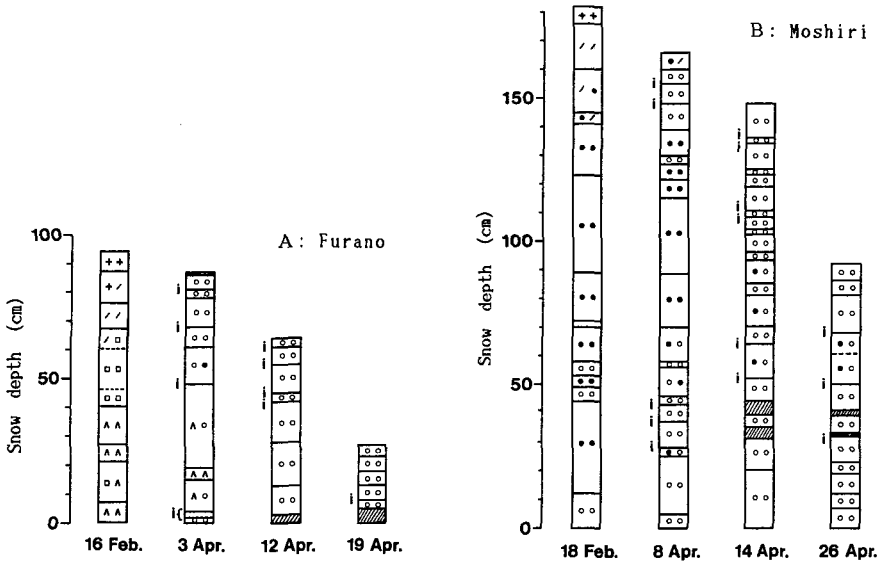


Fig. 3. Snow property and stratification in midwinter, beginning of snowmelt, early-, and late-snowmelt period. Each symbol follows the international classification for snow cover (JSSI, 1998), where, +: new snow, /: lightly compacted snow, ●: compacted snow, ○: granular snow, ^: depth hoar, □: solid-type depth hoar, -: ice layer, respectively.

あったため、含水率が富良野では積雪の中ほどで、母子里では表面付近で大きな値となっている。しかし、融雪水の浸透に伴って含水率が増すにしても15%程度までしか増加せず、濡れ密度と乾き密度の差は大きくても $50\sim 80\text{ kg/m}^3$ である。母子里での $0\sim 60\text{ cm}$ 深の濡れ密度が概ね $500\text{ kg/m}^3$ であるのに対し、富良野での $0\sim 30\text{ cm}$ 深は $400\text{ kg/m}^3$ で $100\text{ kg/m}^3$ 程度小さい。特に $20\text{ cm}$ 深では $300\text{ kg/m}^3$ と著しく小さい。この特徴が空隙率や硬度に反映され、富良野における $0\sim 30\text{ cm}$ 深の積雪層は空隙に富むきわめて脆い雪質となっている。

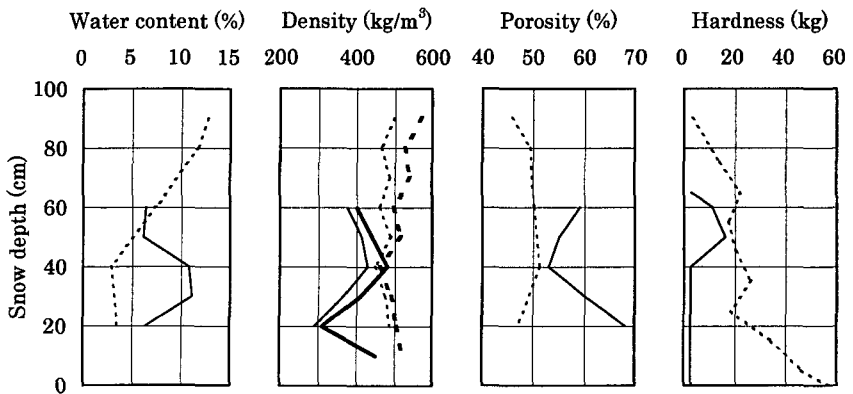
富良野における厳冬期(2月16日)と融雪前期(4月4日)の $35\text{ cm}$ 深の積雪粒子、および母子里における厳冬期(2月18日)と融雪前期(4月14日)の $95\text{ cm}$ 深の積雪粒子のアニリン薄片写真をFig. 5に示す。富良野における厳冬期のやや空隙に富んだ雪質は融雪期まで残存している。厳冬期と融雪期とでは雪試料の採取場所が多少異なったり、同じ深度から採取しても粘性圧縮による沈下の影響を受けたりするために、粒径の変化をこの写真だけから直接比較することはできない。しかし、富良野における断面観測時の目視観察では、融雪期の粒径が大きくなる傾向が $5\sim 40\text{ cm}$ 深のしもざらめ雪層で認められた。ほかの $2\sim 3$ の積雪層についても同様の薄片写真を作成したが、概ね類似した結果が得られた。

## 2. 表面融雪量の変化

1994年春の融雪は富良野では3月30日頃、母子里では4月2日頃から始まり、消雪日は富良野が4月22日、母子里が5月14日であった。このうち、晴天日の典型的な融雪現象を観測できた

**Table 2.** Depth averaged snowpack properties in Furano and Moshiri as compared with in Québec.

Site and properties	Midwinter	Snowmelt period		
		beginning-	early-	late-
<i>Furano:</i>				
Date	16-Feb-94	3-Apr-94	12-Apr-94	19-Apr-94
Depth (cm)	94	87	64	29
Water equivalent (mm)	285	345	278	138
Wet density (kg/m <sup>3</sup> )	310	400	430	480
Ram hardness (kg)	8	9	5	2
Water content (%)	—	6	9	11
Porosity (%)	66	59	57	53
Volumetric water content	—	2	4	5
<i>Moshiri:</i>				
Date	18-Feb-94	8-Apr-94	13-Apr-94	26-Apr-94
Depth (cm)	182	166	148	92
Water equivalent (mm)	613	751	700	465
Wet density (kg/m <sup>3</sup> )	340	460	470	510
Ram hardness (kg)	37	58	36	26
Water content (%)	—	—	6	8
Porosity (%)	63	50	52	49
Volumetric water content	—	—	3	4
<i>Québec:</i>				
Date		24-Feb-91	27-Apr-91	5-May-91
Depth (cm)		99	83	50
Water equivalent (mm)		404	338	203
Wet density (kg/m <sup>3</sup> )		410	410	410
Ram hardness (kg)		—	—	—
Water content (%)		11	7	9
Porosity (%)		60	59	59
Volumetric water content		5	3	4



**Fig. 4.** Comparisons of water content, snow density, porosity and snow hardness between Furano and Moshiri in the active snowmelt period. Solid and dotted lines show the data in Furano and Moshiri, respectively. In the density profiles, thick and thin lines show the wet and dry density, respectively.

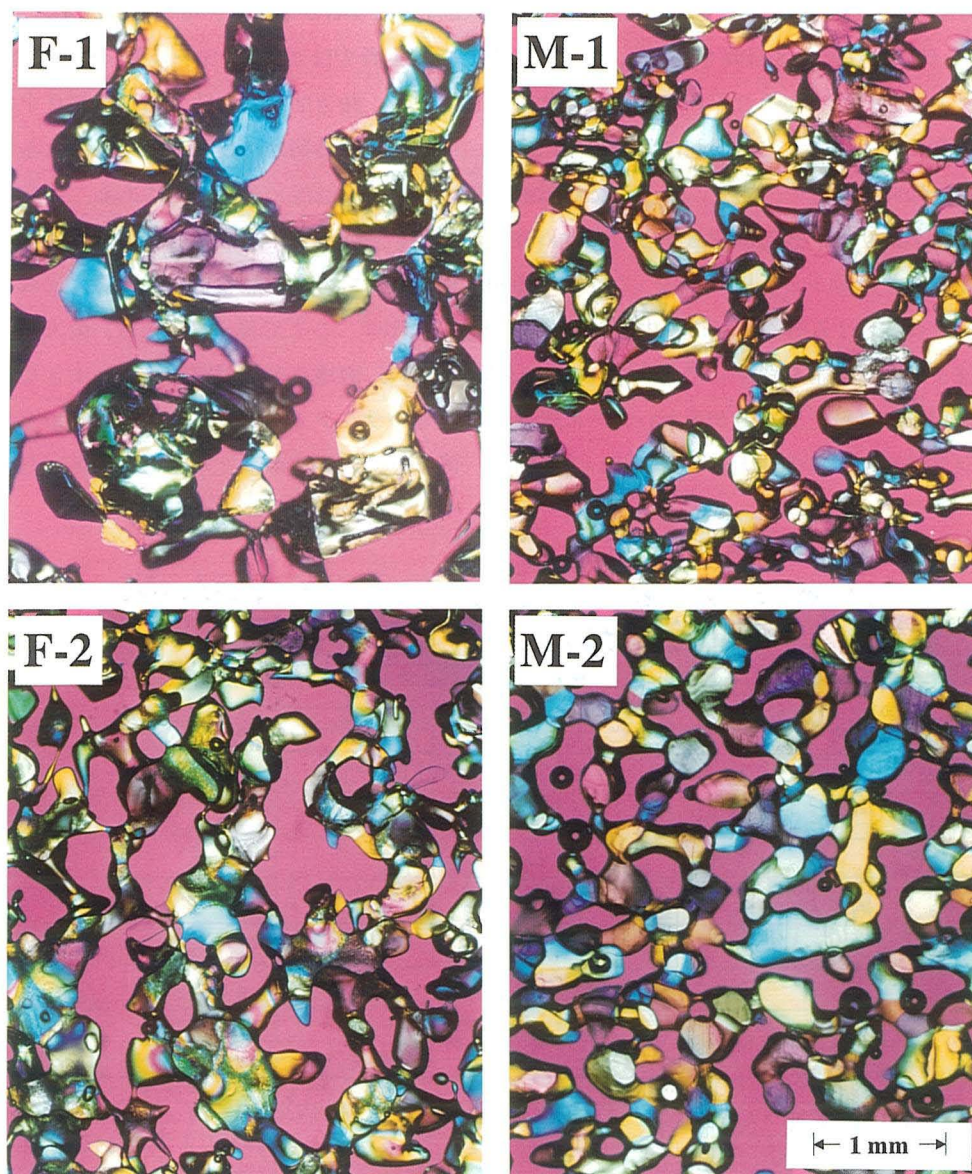


Fig. 5. Photographs of aniline thin section of snow grains in midwinter and in early-snowmelt period. F-1 and M-1: midwinter in Furano and Moshiri, F-2 and M-2: early-snowmelt period in Furano and Moshiri, respectively.

日数は、富良野で6日間、母子里で19日間であった。融雪期間中における主な気象要素の変化を Fig. 6 に示す。この図では、融雪前期として富良野では4月4日から6日、母子里では4月14日から16日のそれぞれ3日間を、また、融雪後期として富良野では4月14日から16日、母子里では5月1日から3日のそれぞれ3日間の変化を示している。融雪前期における富良野の日中の気温・湿度は母子里に比べ低温かつ乾燥傾向にある。一方、融雪後期は富良野では風速が大きく高温・乾燥傾向であるのに対し、母子里では風速が極めて小さく低温・多湿傾向にある。富良野の観測点はダムサイト近傍に位置するため強い谷風の影響を受けやすく、盆地底部に位置する母子里と比べると風速が大きくなる。こうした傾向は積雪表面での融雪熱収支にも顕著に反映される。両地点における雪面上での日中の熱配分を Fig. 7 に示す。ここで言う日中とは、全日射量が正值となる時間帯を意味しており概ね13~15時間である。両地点の放射収支量には大きな違いはないが、富良野では風速が大きいために顕熱及び潜熱フラックスの寄与が大きく、結果として表面融雪量が母子里より大きくなっている。特に、母子里での風速がほとんどゼロであった融雪

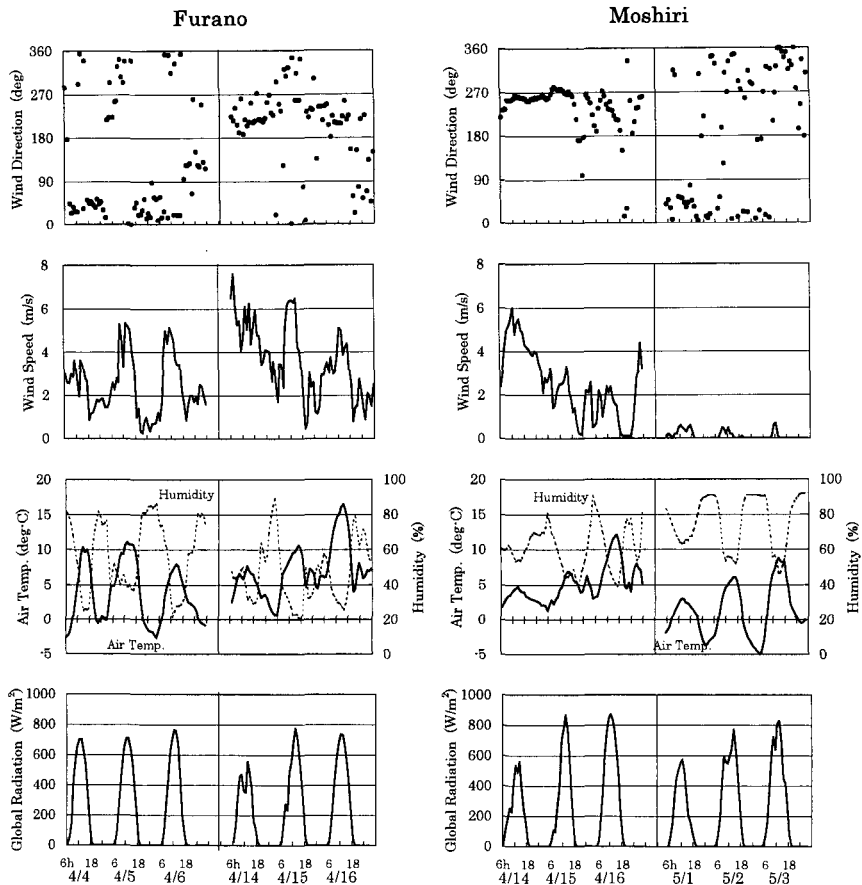


Fig. 6. Variations in meteorological elements during the early- and the late-snowmelt period.

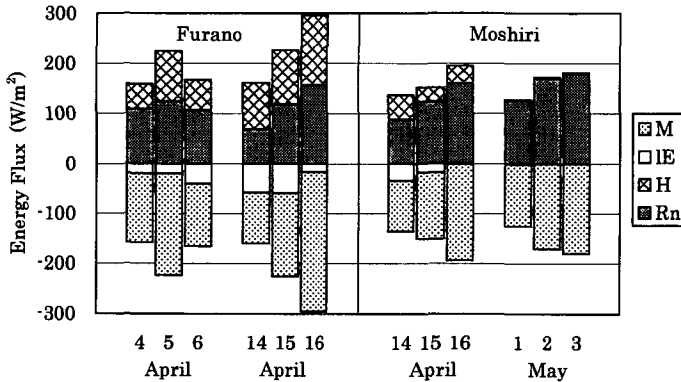


Fig. 7. Energy fluxes over the melting snow surface in Furano and Moshiri. Rn: net radiation, H: sensible heat flux, IE: latent heat flux, M: energy available for snowmelt

後期に顕著である。

熱収支法で求めた融雪量と雪尺法から得た融雪量を比較して Fig. 8 に示す。両者は概ね 1 : 1 に対応しており、表面融雪量の算定が妥当であったと判断される。

### 3. 積雪底面流出量と浸透速度

Fig. 6 と同じ典型的な融雪が起きた期間の積雪底面流出量の変化を Fig. 9 に示す。それぞれの時期の流出量を比較すると、母子里では日融雪量の大小によって多少のバラツキはあるものの融雪前期と後期の日流出量が同じ程度である。一方、富良野では前期に比べ後期の方が明らかに日流出量が多い。両地点における日融雪量と日流出量を比較して Fig. 10 に示すが、母子里ではいずれの時期も融雪量と流出量とがほぼ 1 : 1 に対応し、積雪層を通じての 1 日の水収支が釣り合っている。ところが、富良野では融雪前期には流出過少、後期には流出過多となり、積雪内部での貯留の影響が顕著に認められる。

なお、融雪期間全体を通じての表面流入量（融雪量+降雨量）の総和と底面流出量の総和は、富良野が 292 mm と 290 mm、母子里が 844 mm と 861 mm で、その比はいずれもほぼ 1.0 であり水収支は釣り合っている。

母子里の積雪深は富良野に比べ融雪前期で 60 cm、後期で 30 cm も大きい。それにもかかわらず、両地点における積雪底面流出の毎日のピーク流量は融雪前期が 14 時から 15 時頃、後期が 13 時頃とほぼ同時刻に現れている。このことは、積雪内での融雪水の浸透速度は母子里の方が富良

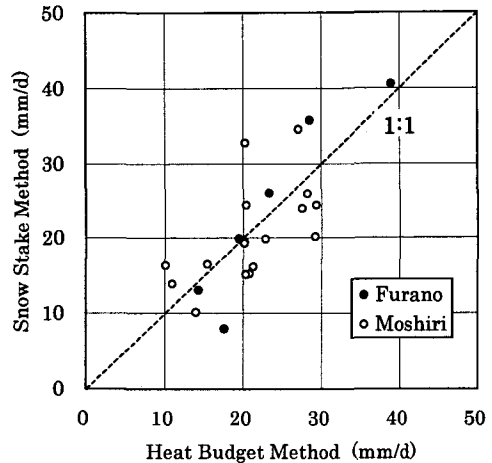


Fig. 8. Comparison of daily snowmelt amount by heat budget method with that by snow stake method.

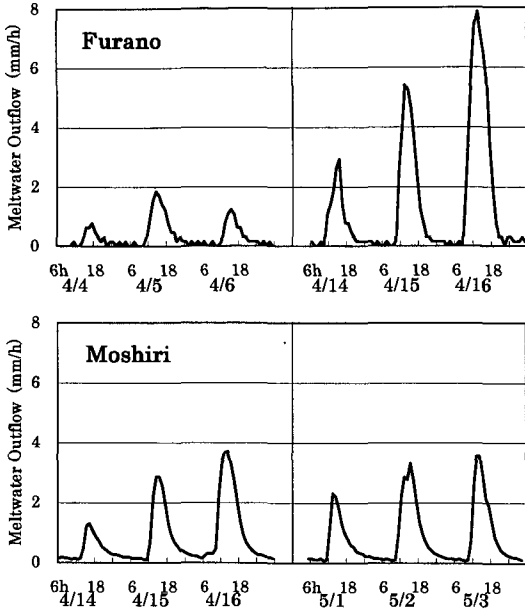


Fig. 9. Variations in meltwater outflow from the bottom of snowpack during the early- and the late-snowmelt period.

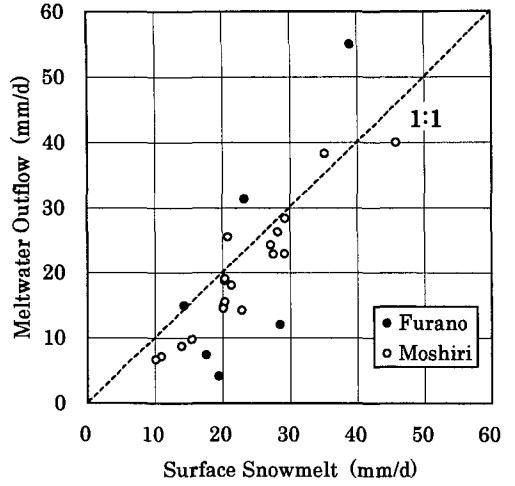


Fig. 10. Relationship between the daily amount of snowmelt at the surface and that of meltwater outflow from the bottom.

野より速いことを意味する。そこで、浜田ほか (1988) や野村ほか (1992) と同様に次式で表される見かけ浸透速度を求めてみる。

$$V_p = HS/t_p \tag{1}$$

$$V_{50} = HS/t_{50} \tag{2}$$

ここで、 $V_p$ ：ピークの浸透速度、 $HS$ ：その日の朝の積雪深、 $t_p$ ：表面融雪のピーク時から底面流出のピーク時までの経過時間、 $V_{50}$ ：重心の浸透速度、 $t_{50}$ ：日積算表面融雪量の50%値の生起時刻から日積算底面流出量の50%値の生起時刻までの経過時間である。典型的な融雪日を対象に求めた浸透速度とそれらの平均値を Table 3 に示す。ここでも、参考のためにカナダ東部の試験地で得られた結果を併記した。富良野における浸透速度は母子里に比べピークで20.6 cm/h、重心で7.5 cm/h も小さく、どちらかと言えばカナダで得られた値に近い。

底面流出量と重心の浸透速度との関係を Fig. 11 に示す。浸透速度が浸透量(流出量)に依存することはよく知られているが(Colbeck, 1978; Nomura, 1994 など)、必ずしも一義的な関係があるわけではない。本研究の両地点においても、浸透速度と底面流出量との間に明瞭な関係は認められず、浸透速度は概ね一定値をとる。

**Table 3.** Infiltration rates and those averages in Furano, Moshiri and Québec under the typical fine weather condition.

Site	Date	Infiltration rate (cm/h)	
		$V_p$	$V_{50}$
<i>Furano:</i>	4-Apr-94	13.8	13.8
	5-Apr-94	32.0	21.9
	6-Apr-94	18.3	14.4
	14-Apr-94	18.3	14.4
	15-Apr-94	28.0	18.7
	16-Apr-94	22.0	16.5
	Average	21.6	16.1
<i>Moshiri:</i>	14-Apr-94	35.0	25.5
	15-Apr-94	68.0	44.2
	16-Apr-94	64.5	55.4
	18-Apr-94	28.8	19.7
	19-Apr-94	39.0	21.3
	20-Apr-94	57.0	22.4
	21-Apr-94	36.3	22.6
	22-Apr-94	51.5	25.8
	25-Apr-94	30.3	15.6
	26-Apr-94	44.0	27.1
	27-Apr-94	40.0	28.3
	28-Apr-94	15.2	16.3
	29-Apr-94	36.0	14.6
	30-Apr-94	11.3	9.1
	1-May-94	69.0	17.6
	2-May-94	66.0	24.0
3-May-94	61.0	22.2	
7-May-94	14.3	16.7	
8-May-94	34.0	20.4	
Average	42.2	23.6	
<i>Québec:</i>	24-Apr-91	18.4	13.2
	25-Apr-91	19.4	17.6
	26-Apr-91	21.2	17.3
	27-Apr-91	15.9	15.9
	28-Apr-91	15.2	14.7
	29-Apr-91	19.0	19.0
	30-Apr-91	16.4	11.2
	Average	17.9	15.6

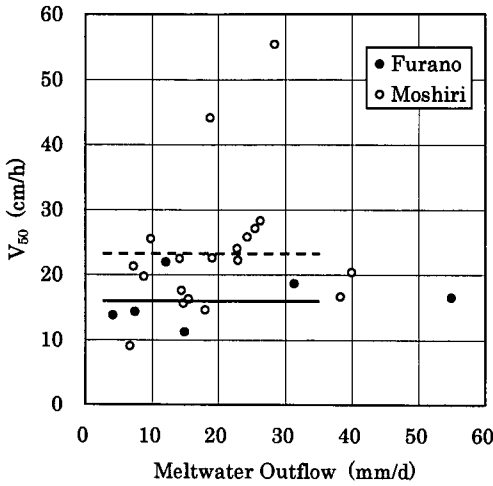


Fig. 11. Relationship between the daily amount of meltwater outflow and the infiltration rate for  $V_{50}$ . Thick solid and broken lines show the average values of  $V_{50}$  in Furano and Moshiri, respectively.

#### IV. 考 察

富良野やカナダ東部などのしもざらめ雪地帯では、春先の融雪期における積雪内部での融雪水の浸透速度がしまり雪地帯に比べて小さいことが明らかになった。浸透速度が小さくなる理由として、1) 積雪内部での貯留、2) 空隙に富んだ脆い雪質、3) 水みち流下の有無、などが考えられる。ここでは、それぞれの可能性について考察する。

##### 1. 積雪内部での貯留

若浜 (1963) は積雪の成層境界を雪粒の大きさ ( $R$ ) と粒子間距離 ( $a$ ) とで模式化し、融雪水が  $R$  や  $a$  の小さな層から大きな層に流下しようとする時、水体にかかる重力が毛管力 (粒子間空隙で水体を重力に抗して保持しようとする力) に打ち勝つまでは水が層境界で止水されると論じた。土壌内での浸透に関しても佐倉 (1989) が同じような説明をしているが、こうした現象は「インク瓶効果」 (Hillel, 1971) として知られている。止水面ができれば融雪水の浸透はそこで妨げられ、一時的な貯留が起きるか、あるいはより止水効果の弱い箇所へと横方向に流動するであろう。いずれにせよ、その分だけ鉛直下向きの浸透が遅れ、結果的に浸透速度は小さくなる。富良野においては、融雪初期でもなお 0~50 cm 深でもしもざらめ雪の特徴が残っている (Fig. 3)。この層内では深さ毎の密度や空隙率の変動が大きく、成層境界では止水面が形成され、融雪水が一時貯留される割合も高かったと考えられる。実際に 4 月 3 日の層構造では、2~4 cm 深に氷板層、15~19 cm 深に顕著な粗粒層が現れており、4 月 4 日から 6 日の顕著な融雪期間にはこれらの場所で融雪水が貯留されたと推察される。4 月 12 日には氷板層は帯水層に変化し、粗粒層は消失している。

ところが、Table 3 に示された浸透速度は、流出過少で貯留量が増加した融雪前期でも、流出過

多で貯留量が減少した融雪後期でも、ほとんど同じような値となっており、積雪内部貯留量の増減に応じて浸透速度が変化する傾向は認められない。Fig. 11でも明らかのように、浸透速度は浸透量（底面流出量）の大小には依存しておらず、成層境界や氷板などで浸透水の流下が妨げられて浸透量は減るものの、一部の止水されなかった水がそれまでと同じ浸透速度で流下を続けるのであろう。また、4月14～16日のように、その日の融雪水に前日までの貯留水が加わり浸透量が大きくなっても浸透速度には変化が見られない。これらのことから、雪質に応じた固有の浸透速度があるようにも考えられる。

## 2. 雪質と浸透速度の関係

融雪水の積雪内部での流下機構には、大量の融け水がひとかたまりとなって流下する場合の水路流下と、融け水が雪粒表面を皮膜状に包みながらゆっくりと流下する場合の皮膜流下とがある（吉田，1965；若浜，1968）。富良野と母子里における浸透速度の差異は、雪粒の大きさ・密度・空隙率など雪質の差異に起因する流下機構の違いで起きたことも考えられる。

若浜（1968）は母子里における色水観測から、ざらめ雪内の水路流下速度として2～3 cm/s、皮膜流下速度として雪質によらず2～4 cm/minを得た。しかしながら、これらの値は本研究で得られた浸透速度と比べて著しく大きい。藤野（1968）は、若浜（1968）が測定した流下速度は着色された水塊の先端速度であり、融け水の浸透速度が過大に見積られていると論じた。さらに、融雪水の積雪内部での浸透は拡散を伴った流下現象であると考え、電解質をマーカーとした現地測定からざらめ雪内の融け水の流下速度として $2 \sim 5 \times 10^{-3}$  cm/sを得た。これは吉田（1965）が求めた皮膜流下の理論値にほぼ近い値であり、本研究で得られた浸透速度とも同じ程度である。水路流下と皮膜流下のいずれが起きていたにせよ、富良野と母子里における浸透速度の違いは2～3倍にも及ぶわけではなく、また、含水率にもほとんど違いはない。したがって、流下機構の違いで浸透速度の差異が生じたとは考え難い。なお、本研究で議論している浸透速度と若浜や藤野が測定した水塊の流下速度とでは、求め方が異なるものの大きな違いはなく、また、本研究の浸透速度の方がより平均的な値とみなされる。

富良野と母子里における雪質の違いとして注目されるのは空隙率である。積雪内での透水性については Shimizu（1970）が次の関係式を得ている。

$$k_s = 0.077 d^2 \exp(-7.8 \rho_d / \rho_w) \quad (3)$$

ここで、 $k_s$ ：固有透水係数、 $d$ ：雪粒の平均粒径、 $\rho_d$ ：雪粒の乾き密度、 $\rho_w$ ：水の密度である。(3)式によれば、積雪内での透水性は粒径が大きく乾き密度が小さいほど大きくなる。富良野と母子里を比べた場合、平均粒径はほぼ等しいので、乾き密度が小さい富良野の方の透水性が大きく、浸透速度も大きくなるはずである。しかし、観測結果はそれとは逆になっており、(3)式では富良野での浸透速度が小さくなる点を説明できない。一方、Colbeck（1978）は融雪水の積雪内浸透を Darcy 則が適用可能な不飽和鉛直流動とみなし、重力流理論を提唱した。この考え方によれば、

融け水の浸透速度は次のように表される。

$$v = 3(\rho_w g \mu_w^{-1})^{1/3} k_s^{1/3} \phi^{-1} q^{2/3} \quad (4)$$

ここで、 $v$ ：フラックスの伝播速度(浸透速度)、 $g$ ：重力加速度、 $\mu_w$ ：水の粘性係数、 $\phi$ ：積雪内の有効空隙率、 $q$ ：フラックス(浸透量)である。(4)式によれば、浸透速度は有効空隙率に逆比例するので、富良野での小さな浸透速度を説明できそうである。しかし、Fig.11 で示したように、浸透速度と浸透量との間には明瞭な関係はなく、(4)式の適用そのものに無理がある。一般に、積雪内での融雪水の浸透は飽和度がかなり小さい状態で起きており、そのために皮膜流下のような考え方が提唱されている。(4)式を導くためには、土壌内での浸透現象と同じような形で不飽和 Darcy 則が適用されているが、このように強い不飽和状態での流動であるにもかかわらず不飽和 Darcy 則を仮定することには無理がある。吉田(1965)は皮膜流下を理論的に考察し、流下速度の平均値として次式を得た。

$$u = \rho_w g \delta^2 (3\mu_w)^{-1} \quad (5)$$

ここで、 $u$ ：皮膜流下速度の平均値、 $\delta$ ：皮膜の厚さである。 $\delta$ の値は雪粒と比べて十分小さく、一定値とみなせるであろうから、 $u$ もまた雪粒や空隙の大きさによらず一定値となり、成層境界の有無や浸透量の大小にはよらない。このように考えると、前項で述べたように、富良野での浸透速度が融雪前期後期を問わずいつもほぼ同じ速度になることも説明ができる。

### 3. 水みちを通じたの集中流下

ここでは、今までの議論とは逆に、母子里における浸透速度が富良野と比べて大きくなる理由について考察する。積雪内での浸透速度を(5)式で考える限り、富良野と母子里とは同じ浸透速度が得られるはずである。しかし、実際には母子里での浸透速度は富良野に比べて明らかに大きかった。その理由として、水みちを通じたの集中流下が考えられる。Nomura(1994)は母子里における1989~1992年の4回の融雪期について、本研究と同じ大型ライシメータを用いて積雪底面流出を観測し、融雪量と底面流出量の関係を明らかにした。そして、必ずしも明瞭ではないが、(4)式を用いて浸透量と浸透速度の関係を論じた。母子里では、融雪最盛期には氷板による明瞭な層境界ができやすく、そこでは流下を妨げられた浸透水の集中化が起きる。集中によって水量が増すと、止水効果の弱い箇所から滞っていた水の下方への浸透が始まるが、その速度は(4)式で表されるように集中によって水量が増した分だけ以前よりも速くなる。ひとたび水みちが形成されると、それ以降は水みちを経路とした浸透が優勢となり、非水みち部との透水性のコントラストが明瞭になる。母子里では例年、断面観測によって非常によく発達した水みちが確認されることが多く、この点が富良野との大きな違いである。氷板が何層あるか、それぞれがどの程度の止水効果を持つかは時期や日あるいは場所によって様々に異なり、そのために母子里における浸透速度はばらつきが大きくなっている(Fig.11)。水みち内では含水率が高く飽和度も大きくなるの

で、水路流下あるいは(4)式のような考え方が適用しやすくなるのであろう。

## V. ま と め

しもぎらめ雪地帯の富良野としまり雪地帯の母子里において、1994年の融雪期に、大型積雪ライシメータを用いた積雪底面流出量の比較観測を行なった。雪質が異なると融雪水の積雪内浸透にどのような違いが生じるかを調べた結果、以下のようなことが明らかになった。

1) しもぎらめ雪からぎらめ化した富良野の雪質は、しまり雪からぎらめ化した母子里の雪質と比べ、空隙に富んだ脆い雪質であった。しかし、硬度の違いはきわめて顕著であるが、空隙率は富良野の方がやや大きめの程度で(全層平均で約10%)、粒径や含水率には明瞭な違いが認められなかった。

2) 表面融雪量と底面流出量のそれぞれ日積算値を比較すると、母子里ではばらつきが大きいもののほぼ1:1に対応するのに対し、富良野では融雪前期は流出過少、融雪後期は流出過多となり、明らかな積雪内貯留が認められた。

3) 表面融雪量と底面流出量の時間変化から見積った融雪水の浸透速度は、母子里( $V_p=42.2$ ,  $V_{50}=23.6$  cm/h)に比べて富良野( $V_p=21.6$ ,  $V_{50}=16.1$  cm/h)の方が明らかに小さく、カナダ東部のしもぎらめ雪地帯で観測された値( $V_p=17.9$ ,  $V_{50}=15.6$  cm/h)に近かった。

4) 富良野での浸透速度が小さくなる理由として、積雪内部での貯留、空隙に富んだ脆い雪質、水みちを通じた集中流下について考察した。その結果、富良野での浸透速度が小さいわけではなく、むしろ母子里における浸透速度が大きいことに起因すると推察された。母子里では、例年、積雪層内の顕著な水みちを通じて優勢な集中流下が起きている。このため、積雪深が大きいにもかかわらず迅速な積雪内浸透が生じている。

謝辞 この研究を進めるにあたり、北大低温研の小林大二教授(現・北大名誉教授)、野村睦氏(現・北大北方生物圏フィールド科学センター天塩研究林々長)、尾関俊浩氏(現・北海道教育大助教授)には現地観測とその解析方針について多くの協力と助言を頂いた。北大低温研の石川信敬助教授と兒玉裕二助手からは有益な助言を、また、松本慎一技官からは大型ライシメータの設計やテストに関して多大な協力を頂いた。北海道大学雨龍地方演習林(当時)ならびに東京大学北海道演習林の教職員の諸氏には現地観測を進める上で様々な便宜を図って頂いた。以上の皆様に深謝致します。なお、この研究の一部は文部省科学研究費(課題番号05680352, 代表・石井吉之)および文部省特定研究経費(代表・小林大二)によって行なわれた。

## 文 献

- 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.  
 Colbeck, S. C., 1978. The physical aspects of water flow through snow, *Advances in Hydrosience*, 11, 165-206.

- 藤野和夫, 1968. 積雪内部での融雪水の流下速度の測定 I, 低温科学物理篇, **26**, 87-100.
- 浜田和雄・兒玉裕二・小林大二, 1988. 融雪水の積雪内浸透 I, 低温科学物理篇, **47**, 89-101.
- Hillel, D., 1971. *Soil and water: Physical principle and processes*, Academic Press, New York, 288pp.
- 石井吉之・鈴木啓助・兒玉裕二・小林大二, 1992. カナダ東部, 北方針葉樹林地における融雪水の流出 I - 融雪特性と流出応答 -, 低温科学物理篇, **51**, 77-92.
- Ishikawa, N. and Y. Kodama, 1994. Transfer coefficients of sensible heat on a snowmelt surface, *Meteorology and Atmospheric Physics*, **53**, 233-240.
- JSSI (日本雪水学会), 1998. 日本雪水学会積雪分類, 雪氷, **60**, 419-436.
- Kobayashi, D. and H. Motoyama, 1985. Effect of snow cover on time lag of runoff from a watershed, *Annals of Glaciology*, **6**, 123-125.
- Marsh, P. and M. K. Woo, 1985. Meltwater movement in natural heterogeneous snow covers, *Water Resour. Res.*, **21**, 1710-1716.
- 野村睦・兒玉裕二・石井吉之・小林大二, 1992. 融雪水の積雪内流下の非一様性, 京都大学防災研究所水資源研究センター報告, **12**, 13-22.
- Nomura, M., 1994. Studies on the delay mechanism of runoff to snowmelt, *Contr. Inst. Low Temp. Sci., Ser. A*, **39**, 1-49.
- Papineau, M., 1987. *Effects of acid precipitation on a boreal forest ecosystem: Ion budgets and changes in water chemistry for the Laflamme Lake watershed*, Environment Canada, Inland Waters and Lands Branch, Québec Region, 108pp.
- 佐倉保夫, 1989. 浸透, 気象研究ノート, **167**, 47-57.
- Shimizu, H., 1970. Air permeability of deposited snow, *Contr. Inst. Low Temp. Sci., Ser. A*, **22**, 1-32.
- 若浜五郎, 1963. 積雪内における融雪水の移動 I, 低温科学物理篇, **21**, 45-74.
- 若浜五郎, 1968. 積雪内における融雪水の移動 III - 水路流下速度, 皮膜流下速度 -, 低温科学物理篇, **26**, 77-86.
- Wakahama, G., 1968. The metamorphism of wet snow, *IAHS Publ. No.* **79**, 370-379.
- Wankiewicz, A., 1978. Water pressure in ripe snowpacks, *Water Resour. Res.*, **14**, 593-599.
- 吉田順五, 1965. 融雪水の積雪内浸透, 低温科学物理篇, **23**, 1-16.