

積雪重量計を用いた積雪層の観測について

MEASUREMENT OF SNOWCOVER CHARACTERISTICS USING SNOWCOVER WEIGHTOMETER

谷瀬 敦¹・山下 彰司¹

Atsushi TANISE, Shoji YAMASHITA

¹ 正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

Approximately half of the precipitation in Hokkaido falls as snow, and snowmelt floods in spring are an important factor in the river environment and in flood control and other river management. In Hokkaido, water storage at dams is managed using snowmelt water, and accurate estimation of snow water equivalent is important for flood management. We investigated how snow water equivalent changes with time in the Jozankei Dam basin, a basin that typifies those in snowy regions. Investigation was done by continuously monitoring snowcover weight and melted weight using a snowcover weightometer, which allows direct measurement of snowcover weight, and other instruments. Temporal changes in snow water equivalent and snow density were identified. The snow density was around 0.2 g/cm^3 at the initial stage of snow-accumulation, but at the late stage, the snow became granular in all layers and its density stabilized at around $0.4 - 0.5 \text{ g/cm}^3$.

Key Words : *snow water equivalent, snowcover Weightometer, snow density*

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道の降水量の約半分は降雪によるものであり、春季の融雪に伴う出水は河川環境や治水を主とした河川管理上の重要な要素の一つである。

また、北海道のダムは融雪水を利用して、年間を通して水運用を行うため、融雪期における出水予測が必要となり、その基礎データである積雪相当水量を如何に精度よく推定するかがダムの水運用にとって非常に重要となる。積雪相当水量の推定については、現在は、流域を直接踏査し積雪深、積雪重量を計測するスノーサーベイによって行われているが、スノーサーベイでは多大な労力を必要とする一方で、時間的に連続した観測は費用などの面から行われてはいない。

本研究では、年間の積雪期間を通して、積雪の質的变化や積雪相当水量を経時的に把握する可能性を探るために、積雪の重量を直接測ることの出来る積雪重量計等を用いた積雪・融雪量の連続観測を行ったので報告するものである。

2. 現地観測手法



写真—1 積雪重量計設置写真

現地観測は代表的な積雪寒冷地の北海道札幌市に位置する定山溪ダム流域内において実施した。

ここでは写真—1 及び図—1 に示すように積雪重量計による積雪重量の計測のほか、積雪深、降水量、気温、風速、積雪表面温度、相対湿度、全天日射、反射日射、大気放射、地球放射及び直接融雪量を計測するためライシメータ ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) による積雪底面流出量観測を行った。データ採取は平成 17 年 12 月から平成 18 年 5 月

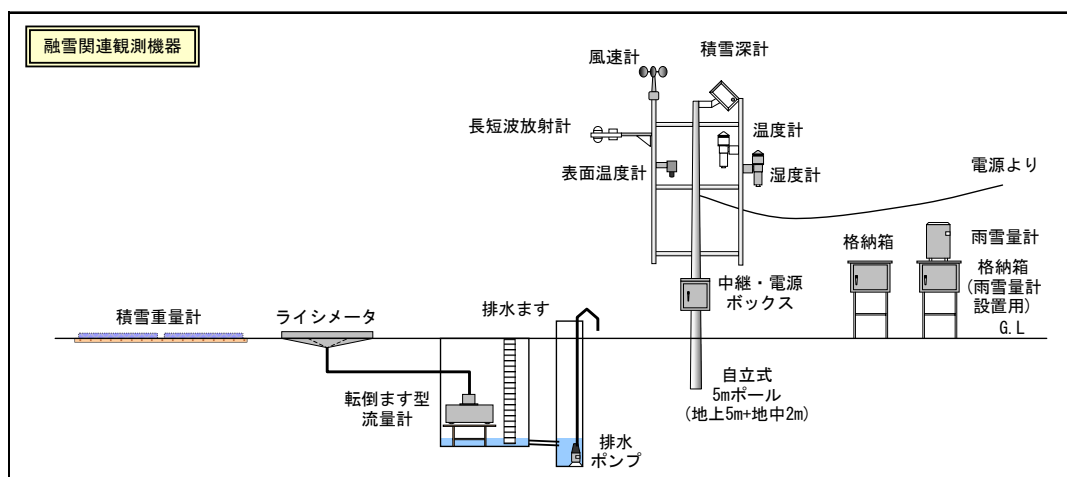


図-1 観測機器構成図

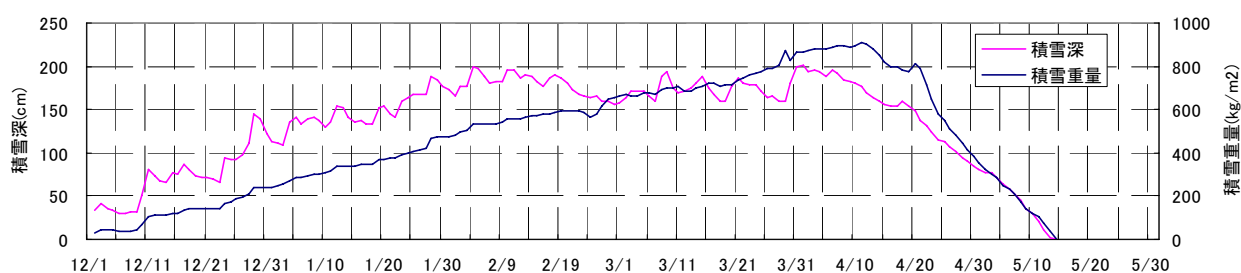


図-2 積雪深及び積雪重量の経時変化図

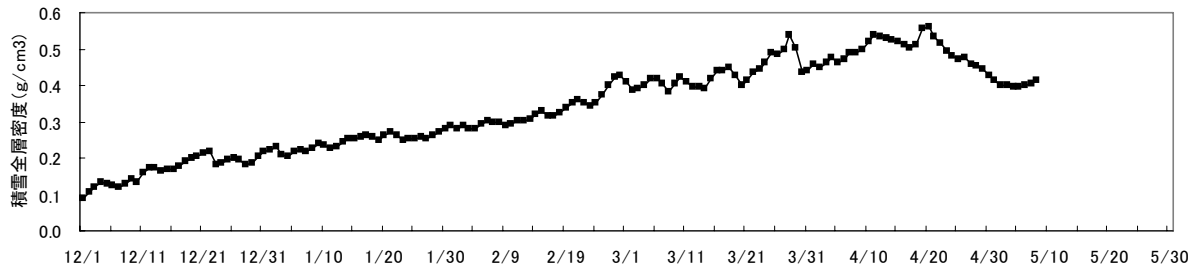


図-3 積雪全層平均密度経時変化図

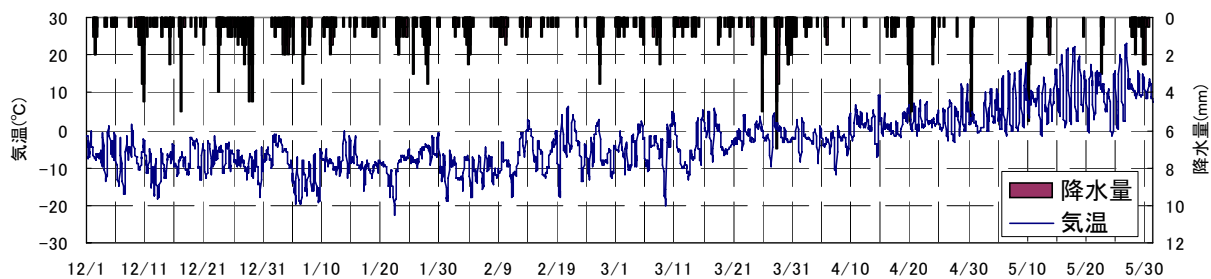
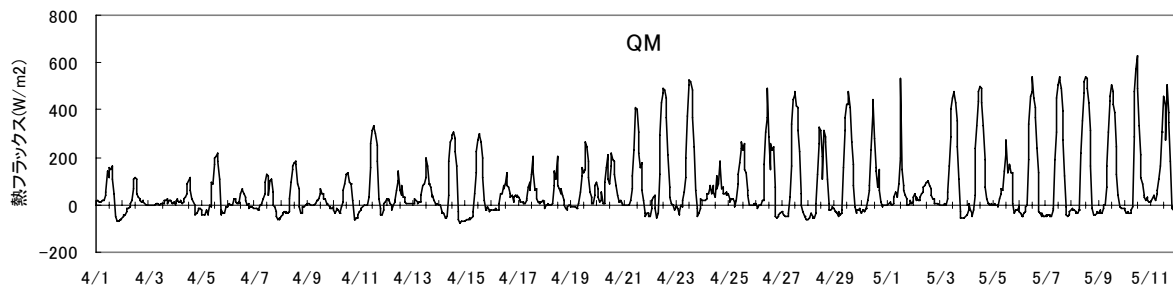


図-4 降水量及び気温の経時変化図

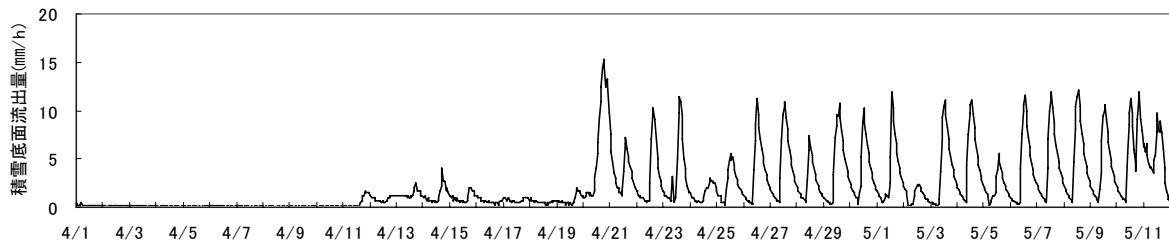
にかけて、1時間毎に行った。

積雪重量の計測に用いた積雪重量計は新潟電機（株）製 MN-301 であり、ステンレス製の薄板扁平容器 2 枚の中に不凍液を充填し、容器内の圧力を圧力センサーで電

氣的に計測するものであり、一枚あたり $1\text{m} \times 2\text{m}$ の大きさで、最大 $1,999\text{kg/m}^2$ まで計測可能となっている。なお、この機器の計測誤差は $\pm 10\text{kg/m}^2$ である。本研究ではこの積雪重量計を 2 セット用いて観測を行った。



図－5 QM（融雪熱量）経時変化図



図－6 積雪底面流出量経時変化図

（ライシメータによる、ただし4月25日4:00～5月10日15:00は放射量による欠測補正）

3. 観測値の経時変化

12月1日から積雪深、積雪重量他、各種気象観測を始めた。図－2より、積雪深は2月初旬にはピークを迎え、それ以後はあまり増減しないが、4月10日前より減少し始める。また、単位面積あたりの積雪重量は積雪開始より一貫して増加していき、4月10日後から減少し始める。積雪深と積雪重量の経時変化には数日のずれが生じるが、これは密度変化によるものであることが図－3からも明らかである。積雪深、積雪重量及び積雪全層密度は4月20日より、急激に減少し始めるが、これは図－4に示されるように、4月20日付近でまとまった降水量があったことと、日気温も0℃を超えるようになったことから考えられる。いわゆる、本格的な融雪が始まった時期と考えられる。

なお、積雪重量 1kg/m^2 は水の密度を 1000kg/m^3 とすると水量 1mm に相当するため、積雪相当水量のピーク値を求めると、4月10日前後でおよそ 900mm になる。

4. 経時的熱収支の算出

ライシメータによる積雪底面流出量と積雪表面での融雪量の関係を把握するため、熱収支を計算した。積雪層の熱収支は次式で示される。

$$NR + SH + LH + QP = QM \quad (1)$$

ここで、NR：放射収支量、SH：顕熱伝達量、LH：潜熱伝達量、QP：雨からの伝達量、QM：融雪熱量を表す。融雪熱量 QM は正の時に融雪、負の時に融雪水再凍

結を意味する。なお、雪温が 0°C 未満の場合には、QM は、積雪層内の貯熱量の変化を表す。なお、積雪中の伝達熱量及び地中伝達熱量は、融雪時期のため積雪温度を一律 0°C とみなせ、地中熱も冷えて小さいことから共に無視した¹⁾。

熱収支の各項の計算方法は以下に示される。

$$NR = (1 - \alpha)SR + \varepsilon AR - \varepsilon \sigma ST^4 \quad (2)$$

ここで α は積雪表面のアルベド、SR は全天日射量、AR は大気放射量、ST は積雪表面温度、 σ はステファンボルツマン定数、 ε は積雪の射出率を表す。

顕熱伝達量 SH 及び潜熱伝達量 LH はバルク法によって算出した。

$$SH = \rho a C_p \cdot K_H (AT - ST) WS \quad (3)$$

$$LH = \rho a L \cdot K_E (Aq - Sq) WS \quad (4)$$

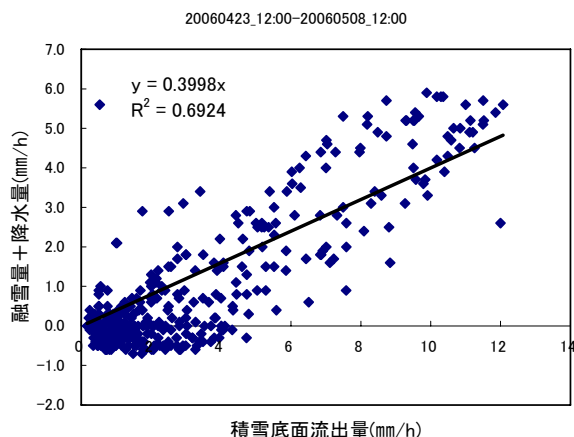
ここで、気温を AT、比湿を Aq、風速を WS、積雪表面の温度を ST、比湿を Sq、 K_H 、 K_E は無次元バルク数、 ρ a、 C_p は、空気の密度と比熱、L は気化の潜熱である。雨によってもたらされる熱量は次式により表される。

$$QP = PR \cdot C_w (PT - 0) / \Delta t \quad (5)$$

ここで、PR は単位時間 Δt 間の降水量、PT は雨水の温度、 C_w は比熱である。

5. 融雪熱量と積雪底面流出量の関係

前項で算出された雪面での融雪熱量 QM の経時的変



図－7 (熱収支による融雪量＋降水量)－積雪底面流出量相関図

化を図－5に示す。また、現地でライシメータを用いて直接計測された積雪底面流出量の経時変化を図－6に示す。3項で述べたように、定山溪ダム流域における2006年春季の融雪は4月20日前後の降水と気温上昇により本格的に始まっている。これは、図－6でも顕著に示されている。4月20日以降の積雪底面流出量の日周期変化は極端に大きくなり、その周期は図－5に示される融雪熱量の約2時間遅れ程度とほぼ同期している(4月20日直後は除く)。

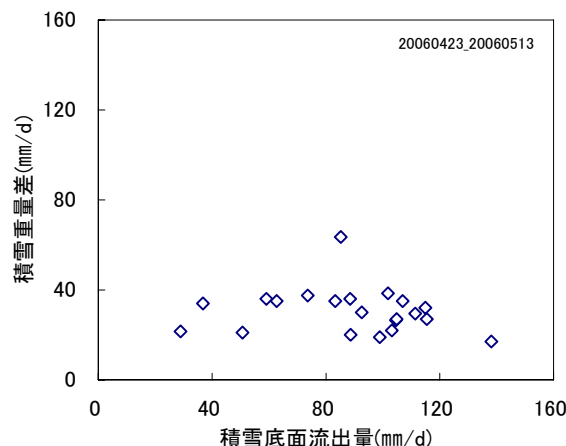
図－7は主要な融雪期間である2006年4月23日～2006年5月8日のデータを用いて、熱収支による融雪量に降水量を加えたもの(以下、融雪量と呼ぶ)と2時間データを遅らせた積雪底面流出量の相関を示したものである。融雪量がプラスの領域を見てみるとおおむね正の相関が見て取れる。融雪量がマイナスである領域は熱を放出していることから融雪は生じない。また、融雪量がマイナスなのに積雪底面流出量があるのは、滞留した融雪水分が流出しているためと思われる。

流出の遅れ時間は時間とともに変化する積雪深や雪質に大きく左右される。今回の調査では、流出の時間遅れは約2時間程度となっており、観測地は異なるが既往の研究結果²⁾(石狩川下流付近の平地)の2～3時間遅れと大きな相違はない。ただし、今回の検討は雪質がザラメ雪で安定すると思われる融雪期間に限定したものであり、また、この傾向が2006年の気象条件や観測地の地形条件に固有のものか、あるいはある程度普遍的なものであるかは今後の調査によるとと思われる。

図－7に関して近似曲線の傾きをみると、0.3998と1を大きく下回っている。積雪表面での融雪量に降水量を加えた値は、積雪底面から流出してくる値と1:1の関係になるはずであるが、時間当たりの量で比較すると大きな差が生じている結果となった。また、積雪底面流出量と融雪量および積雪重量差に関して、4月23日から5

表－1 積雪・融雪に関する総水量
(4月23日から5月13日)

項目	総水量[mm]
積雪底面流出量	1850
積雪重量差	641
融雪量(熱収支)＋降水量	672



図－8 積雪重量差－積雪底面流出量関係図

月13日までの間の総水量について整理したものが表－1である。積雪重量差については、融雪による重量の減少を正、降水による重量の増加を負とした。融雪量(熱収支)＋降水量と積雪重量差は互いに近い値であるが、積雪底面流出量は両値を大きく上回っていることがわかる。

積雪底面流出量と積雪重量差の関係(図－8)についても傾きは1:1の関係になるはずであるが積雪重量の減少と比較して積雪底面流出量の増加は大きなものとなっていた。

主として積雪表面で発生した融雪水は、積雪層内を浸透、流下する過程において水みちを形成して流れの「集中化」を生じさせるとされている。野村ら³⁾は融雪水の流下の非一様性を調べるため、1.4m×1.4mの大きさのライシメータの内部を14cm×14cmの大きさで100個の柵に仕切り融雪量の観測を行っている。その結果、100個の柵の内14個の柵で全体の98.5%の水が流出し、特に最も流出量の多い柵は1個の柵で全体の流出量の35%を占める結果を得ている。本観測において積雪底面流出量が融雪量などの値の2倍を大きく超えていたことは、野村らの観測と同様の集中化が生じライシメータのエリア外からの融雪水が多量にライシメータ内に集まってきたのではないかと推測される。

6. 積雪深と積雪重量の経時変化の特徴

表—2 雪質分類表

雪質		記号	密度 (g/cm ³)
大分類	小分類		
新雪	新雪	+	0.05~0.15
しまり雪	こしまり雪	/	0.15~0.25
	しまり雪	●	0.25~0.50
ざらめ雪	ざらめ雪	○	0.30~0.50
しもざらめ雪	こしもざらめ雪	□	0.30前後
	しもざらめ雪	△	
氷板		—	
表面霜		▽	
クラスト		▽	

表—3 雪の粒径

粒度範囲	表記
0.2mm未満	very fine
0.2mm以上 0.5mm未満	fine
0.5mm以上 1.0mm未満	medium
1.0mm以上 2.0mm未満	coarse
2.0mm以上 5.0mm未満	very coarse
5.0mm以上	extreme

2005年12月16日					
高さ cm	雪温 ℃	密度 g/cm ³	高さ 雪質	粒度	備考
65	-2.8	0.05			全層乾燥
60	-2.3	0.06			
50	-2.5	0.13	8 ++ 新雪	very fine	
40	-2.9	0.21	22 // こしまり雪	fine	
30	-3.7	0.23	15 ●● しまり雪	fine,medium	
20	-3.3	0.3	3 ○○ ざらめ雪	medium	
10	-2.4	0.32	4 ●● しまり雪	medium,coarse	
5	-1.3		8 ○○ ざらめ雪	coarse	
0	-0.2		5 — 氷		
0	-0.2				

図—9 断面観測結果 (2005年12月16日)

2006年1月20日					
高さ cm	雪温 ℃	密度 g/cm ³	高さ 雪質	粒度	備考
146	-5.7	0.08			全層乾燥
140	-6.3	0.08			
130	-7.6	0.11	7 ++ 新雪	very fine	
120	-7.7	0.15			
110	-6.7	0.16	30 // こしまり雪	very fine,fine	
100	-5.7	0.25			
90	-4.9	0.27			
80	-4.0	0.29			
70	-3.5	0.31			
60	-2.6	0.35	65 ●● しまり雪	fine,medium	
50	-2.0	0.40			
40	-1.3	0.39			
30	-0.9	0.42	35 ●● しまり雪	medium,coarse	
20	-0.6	0.42			
10	-0.3	0.39	6 ○○ ざらめ雪	coarse	
4	0.0	0.39	4 — 氷		
0	—				

図—10 断面観測結果 (2006年1月20日)

2006年2月13日					
高さ cm	雪温 ℃	密度 g/cm ³	高さ 雪質	粒度	備考
185	-0.9	0.08			
180	-2.5	0.12	5 ++ 新雪	fine	
170	-5.4	0.12			
160	-5.3	0.20	19 // こしまり雪	very fine	
150	-6.0	0.23			
140	-6.0	0.28	29 ●● しまり雪	very fine	
130	-5.5	0.26			
120	-4.9	0.27			
110	-4.2	0.32	15 ●● しまり雪	fine	
100	-3.6	0.37	33 ●● しまり雪	very fine	
90	-3.2	0.40	3 ○○ ざらめ雪	medium	
80	-2.8	0.42	7 ●○ しまり雪	fine	
70	-2.4	0.42	7 ●○ ざらめ雪	medium	
60	-2.1	0.42			
50	-1.7	0.44			
40	-1.4	0.46	54 ●● しまり雪	fine,medium	
30	-1.1	0.46			
20	-0.8	0.46			
10	-0.5	0.46	17 ○○ ざらめ雪	medium	
3	-0.1	0.42	3 ○○ ざらめ雪	coarse	湿
0	0.0				

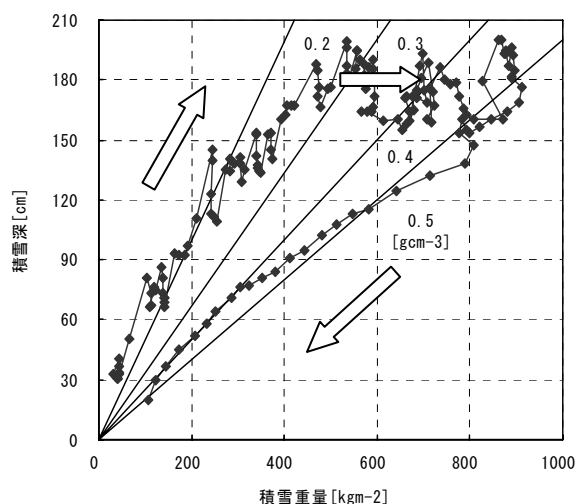
図—11 断面観測結果 (2006年2月13日)

2006年3月10日					
高さ cm	雪温 ℃	密度 g/cm ³	高さ 雪質	粒度	備考
164	0.0	0.20	4 +○ 新雪、ざらめ	medium	ざらめは濡れ
160	-0.1	0.11	15 // こしまり雪	medium	上下1cmずつ氷層 になりかけ
150	-2.9	0.15	4 ○○ ざらめ雪	medium	
140	-2.5	0.25	6 /□ こしまり雪、 こしもざらめ雪	medium	
130	-1.2	0.33	2		氷板
120	-0.2	0.37	2		氷板
110	-0.9	0.42			
100	0.0	0.42	6 ○○ ざらめ雪	medium,coarse	氷板
90	0.0	0.40	7 ●● しまり雪	medium,coarse	氷板
80	0.0	0.45	14		氷板
70	0.0	0.45	2		氷板
60	-0.1	0.44	22 ○○ ざらめ雪	medium,coarse	濡れ 水含む
50	-0.1	0.44	2 ○○ ざらめ雪	medium	
40	-0.1	0.45	5 ●● しまり雪	medium	
30	-0.1	0.48	1 ○○ ざらめ雪	medium	
20	-0.1	0.44	65 ●● しまり雪	medium,coarse	
10	-0.1	0.44	3 ○○ ざらめ雪	medium,coarse	
0	0.0	0.51	2 シャーベット	medium,coarse	

図—12 断面観測結果 (2006年3月10日)

2006年4月18日					
高さ cm	雪温 ℃	密度 g/cm ³	高さ 雪質	粒度	備考
147	0.0	0.32	11 ○○ ざらめ	coarse	
140	0.0	0.33	10 ○○ ざらめ	coarse,very coarse	
130	0.0	0.36	1 氷板厚さ1cm		氷板
120	0.0	0.38	1 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
110	0.0	0.35	1 氷板厚さ1cm		氷板
100	0.0	0.46	3 ○○ ざらめ	medium,coarse	空隙多い
90	0.0	0.47	5 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
80	0.0	0.42	4 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
70	0.0	0.44	7 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
60	0.0	0.49	5 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
50	0.0	0.46	7 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
40	0.0	0.48	20 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
30	0.0	0.49	10 ○○ ざらめ	medium,coarse	氷板
20	0.0	0.50	7 ○○ ざらめ	fine,medium	
10	0.0	0.50	51 ○○ ざらめ	fine,medium	
0	0.0	0.66	4 シャーベット	fine,medium	

図—13 断面観測結果 (2006年4月18日)



図－1 4 積雪深－積雪重量経時変化図

「雪氷調査法：日本雪氷学会北海道支部編」により、積雪の層構造、雪質を観測し、積雪層内の鉛直分布、各積雪層の密度を測定した。雪質分類及び雪の粒径は日本雪氷学会の表記に従い、表－2及び表－3での分類で行った。断面観測は2005年12月16日、2006年1月20日、2006年2月13日、2006年3月10日及び2006年4月18日に行った。各断面観測の結果を図－9～13に示す。

積雪断面観測より、雪質については12～2月観測時には新雪か、しまり雪が積雪の大部分を占めており、3月観測時に積雪上部1/3程度がザラメ雪、積雪上部がしまり雪新雪であるが、4月観測時にはほぼ全層でザラメ雪化しており、雪密度の経時変化との関係が示唆される。また、3月観測時より、氷板の形成が多数見られ、4月には厚さ1cmのものも形成されている。積雪層内の氷板は積雪内の水の流動に大きな影響を及ぼす。これは、前項で述べた積雪底面水量が表面での融雪量の2倍を大きく超えた結果になった要因であると考えられる。

図－1 4に積雪重量計で計測した積雪深－積雪重量の経時的関係の変化を示す。図中において、斜線は左からそれぞれ0.2g/cm³、0.3g/cm³、0.4g/cm³及び0.5g/cm³の等密度線を示す。矢印は時間の推移を示すものであり、積雪初期に左下から右上に推移していき、厳寒期中にはほぼ水平に推移した後、融雪期に右上から左下に推移していくことを示している。具体的には、積雪初期においては、降雪による積雪深の増加に伴い、全層平均密度は0.2g/cm³弱から0.3g/cm³弱へと増し、その後ほぼ同じ積雪深（180cm前後）に対して、積雪重量が次第に増加していく傾向が認められる。これは降雪によって一時的に

積雪深は増加するが圧密によって、積雪重量が増加し、積雪深が調整されてしまう結果である。そして積雪重量が極大値に達した後、融雪によって積雪重量、積雪深とも減少している。しかしながら、融雪期においては、全層平均密度は0.4～0.5g/cm³でほぼ一定で推移することがわかる。この結果は断面観測結果ともよく一致する。

7. おわりに

北海道の降水量の約半分は降雪によるものであり、冬季の積雪量は治水の観点からは融雪水量に影響を与え、あるいは利水の観点からは寒冷地のダムの有する包蔵水量に影響を与える。

冬季水文に関する研究は今まで数多く行われて来ているが、本研究のように、単位面積あたりの積雪重量を時系列的に連続観測した例は少ない。今回の調査によって得られたデータにより、積雪の密度の時間的推移が明らかになった。積雪初期には雪密度は0.2g/cm³程度で推移するが、特に、融雪期には雪質もほぼ全層でザラメ雪になることから、雪密度がほぼ0.4～0.5 g/cm³で安定的に推移することが明らかになった。

今後、さらに調査を進めて、冬季の流出や包蔵水量の推定の精度向上に資することができれば幸いである。

謝辞：本研究は北海道開発局の受託研究により実施された。また、北海道開発局石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所には観測場所の提供を受けるなど多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)小野延雄、石川信敬、新井 正、若土正暁、青田昌秋：基礎雪氷学講座VI、雪氷水文現象、p58、1994
- 2)山崎真一：積雪下面からの流出量測定におけるライシメータ受水部の大きさによる影響、北海道開発土木研究所月報、581、pp.15～24、2001
- 3)野村 睦、兒玉裕二、石井吉之、小林大二：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、pp13～22、1992
- 4)中津川 誠、工藤啓介、星 清：積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析、水工学論文集第48巻、pp.37～42、2004.2
- 5)石井吉之、兒玉裕二、小林大二：融雪流出の遅れ課程I、低温科学物理編第49輯、1990

(2006. 9. 30 受付)