

積雪重量計を用いた融雪観測と積雪相当水量に関する一考察

A Study On Snowmelt Measurement Using Snowcover Weightmeter And Snow Water Equivalent

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○正 員 鳥谷部寿人(Toshihito Toyabe)  
(独)土木研究所 寒地土木研究所 正 員 山下彰司(Syoji Yamashita)  
国土交通省 北海道開発局 石狩川開発建設部 正 員 新目竜一(Ryuuichi Shinme)

1. まえがき

融雪出水は寒冷地域においては重要な水資源であるが、春先の暖気や雨の影響で治水上重大な問題を引き起こすこともある。したがって、積雪相当水量の正確な評価や融雪流出量の予測は河川管理には大変重要である。

本研究では、年間の積雪・融雪観測を通して、積雪の密度変化や積雪相当水量を経時的に把握し、融雪機構を把握するため、積雪重量を経時的に直接測ることの出来る積雪重量計とライシメータによる観測を 2005 年より行っており、この観測データを用いて積雪相当水量について評価を行った。

2. 現地観測

現地観測は代表的な積雪寒冷地の札幌市南部の石狩川流域の支川豊平川流域に位置する定山溪ダム観測露場(標高 400m)において実施した。

表-1 観測項目一覧

| 観測項目    | 計測器名                | 単位                |
|---------|---------------------|-------------------|
| 融雪量     | ライシメータ<br>+転倒ます型流量計 | mm/hr             |
| 積雪重量    | 積雪重量計               | kg/m <sup>2</sup> |
| 降水量     | 雨雪量計                | mm/hr             |
| 積雪深     | 積雪深計                | cm                |
| 気温      | 温度計                 | ℃                 |
| 湿度      | 湿度計                 | %                 |
| 風速      | 風速計                 | m/s               |
| 下向き短波放射 | 長短波放射計              | W/m <sup>2</sup>  |
| 下向き長波放射 |                     | W/m <sup>2</sup>  |
| 上向き短波放射 |                     | W/m <sup>2</sup>  |
| 上向き長波放射 | 放射温度計               | ℃                 |
| 積雪表面温度  |                     | ℃                 |

観測項目は表-1に示す各項目で、積雪重量計による積雪観測とともに、融雪量を計測するためライシメータ(2m×2m)による積雪底面流出量観測を行った。データ収集は 2005 年から3シーズンにおいて12月から翌年の5月にかけて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気(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 1m×2m の大きさで、最大 2,500kg/m<sup>2</sup>まで計測できる。なお、この計器の計測誤差は±10kg/m<sup>2</sup>である。

3. 融雪状況のとりまとめ

3.1 2008 年春季観測

熱収支法<sup>1)</sup>により算出した積雪表面融雪流出高  $Q$  と現地観測された降雨量及びライシメータによる積雪底面流出高の時系列変化の比較を図-1に、積雪重量計の時間変化(下向き:減少、上向き:増加)と積雪表面融雪流出高  $Q$ -降雪量(上向き:積雪表面融雪流出高>降雪量、下向き:積雪表面融雪流出高<降雪量)の比較を図-2に示す(なお単位面積当積雪重量の時間変化は、融雪流出高 mm/h に換算している)。定山溪ダム流域における 2008 年春季の融雪は観測を開始した 2005 年以降最も早く3月8日前後の気温上昇に伴い本格化している。融雪の初期から4月7日の間は積雪表面融雪との間に時間遅れが生じているものの、4月8日から4月15日の消雪日までは、積雪表面融雪流出高と積雪底面流出高において良い一致が観測された。

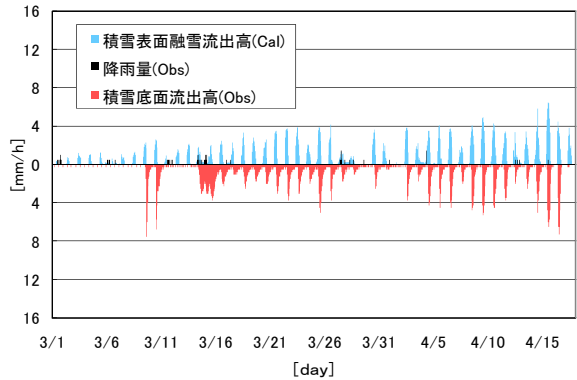


図-1 表面融雪流出高と底面流出高

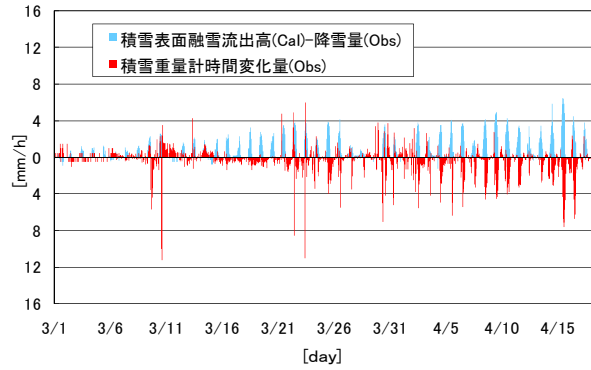


図-2 重量時間変化と表面融雪流出高-降雪量

また、融雪開始直後や降雨が観測された3月15日前後には一時降雨+積雪表面融雪流出高を上回る底面流出

表－2 積雪断面観測結果（3月6日）

| 定山溪ダム      |            |                             | 03/06/08   |  | 雪質分類  |       | 粒 度 |
|------------|------------|-----------------------------|------------|--|-------|-------|-----|
| 高さ<br>(cm) | 雪温<br>(°C) | 密 度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 厚さ<br>(cm) |  | 雪 質   |       |     |
| 136        | -0.2       | 0.10                        | 2          |  | 新雪    | 2mm   |     |
| 130        | -0.2       | 0.09                        | 5          |  | こしまり  | 2mm   |     |
| 120        | -1.8       | 0.17                        | 5          |  | こしまり  | 2mm   |     |
| 110        | -3.2       | 0.20                        |            |  | 氷板形成中 |       |     |
| 100        | -3.6       | 0.17                        | 33         |  | しまり   | 1mm   |     |
| 90         | -3.4       | 0.26                        |            |  |       |       |     |
| 80         | -3.1       | 0.26                        | 8          |  | しまり   | 1mm   |     |
| 70         | -2.6       | 0.32                        | 17         |  | 氷板形成中 |       |     |
| 60         | -2.2       | 0.33                        |            |  | しまり   | 1mm   |     |
| 50         | -1.8       | 0.37                        |            |  |       |       |     |
| 40         | -1.4       | 0.35                        | 45         |  | しまり   | 1mm   |     |
| 30         | -1.2       | 0.36                        |            |  |       |       |     |
| 20         | -0.9       | 0.36                        |            |  | ざらめ   | 2-4mm |     |
| 10         | -0.5       | 0.30                        | 7          |  | 氷板形成中 |       |     |
| 0          | -0.2       | 0.32                        | 14         |  | ざらめ   | 2-4mm |     |

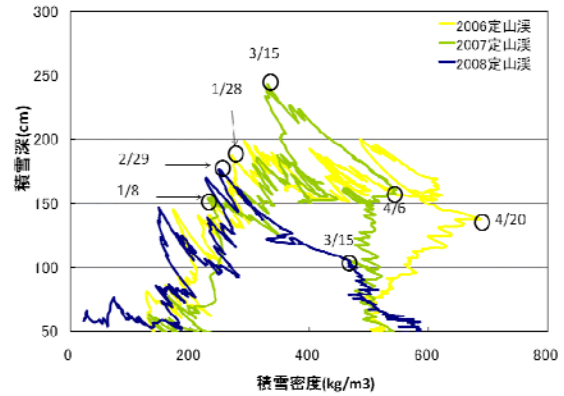
高が観測されているが、積雪表面融雪流出高の2倍近い値を観測した過去2ヶ年のような極端な違いはない。表－2に融雪期直前の3月6日に実施した積雪断面観測の結果を示す。これを見るとこの時点で多層の氷板が形成され始めているが、4月15日に実施した観測では積雪深が20cmしかなく、全層ザラメ雪となっていた。また、3月15日前後の降雨やその後の気温が上昇していることから、形成中の氷板が消失したためと思われる。

また4月8日以降、積雪表面融雪流出高と積雪底面流出高の関係において良い一致が観測されている。この日の最大積雪深は39cmであり、積雪深が52cm以下になると貯留効果を考慮する必要がなくなったとする中津川ら<sup>2)</sup>の報告を裏付ける結果となった。

### 3.2 2006年～2008年春季観測のとりまとめ

谷瀬ら<sup>3)</sup>によると積雪の中期には圧密によってほぼ同じ積雪深に対して、単位面積あたりの積雪重量が次第に増加していくことが報告されている。現地で観測された積雪重量と積雪深から算出した積雪密度と積雪深の関係を図－3に示す。2006年1月末と2007年1月初めにそれぞれ積雪深が150cmを超えており、これ以降約3ヶ月間堆積と圧密を繰り返している。新目ら<sup>4)</sup>によれば積雪密度が500kg/m<sup>3</sup>前後に到達後、密度を一定に保ちながら融雪によって積雪深が減少していくことが報告されている。一方、2008年は2月末に一時的に150cm以上の積雪が観測されたものの3月半ばの気温の上昇とともに融雪が始まり一気に積雪深が減少している。この年の積雪重量最大時(492kg/m<sup>2</sup>)の密度は450kg/m<sup>3</sup>で、500kg/m<sup>3</sup>まで到達していない。このため十分な圧密を受ける前に融け出したことが伺える。なお、図中2006年は4月20日の前で密度が大きく増加し、これ以降大きく減少しているが、この前後に時間雨量5mmを超える降雨が観測されており、積雪が保水することによりみかけの密度が一時的に増加したことに起因しているものと思われる。

次に定山溪ダムの水文諸量を用いて2006年春から2008年春までの融雪期の水収支を整理した。ここで融雪期間の算定は融雪期のピーク流入量と減衰期の各時刻の流入量の比を片対数グラフにプロットし、遞減曲線を



図－3 積雪深－積雪密度変化

表－3 融雪期の水収支

| 年月日(西暦)        | 積雪相当水量a<br>1.0×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | 降水量b<br>1.0×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | 流入量c<br>1.0×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | 流出率<br>c/(a+b) |
|----------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| 2006/4/12-7/5  | 127                                           | 20                                         | 130                                        | 0.88           |
| 2007/4/8-6/27  | 105                                           | 17                                         | 108                                        | 0.88           |
| 2008/3/15-6/12 | 86                                            | 14                                         | 63                                         | 0.63           |

基に行った。表－3は定山溪ダムのスノーサーベイから求めた積雪相当水量と降水量に対する流入量の比から流出率を算出した。蒸発散などの損失があるので実際にダムに流入する量は少ないが、2006年および2007年の流出率は共に8割を超えている。一方2008年の流出率は6割程度と算出された。2008年は過年度に比べ積雪量が少ないうえ、消雪日も融雪の最大の頃であったこれまでより2週間程早くなっている。近藤ら<sup>5)</sup>によると積雪の熱収支を考える上での支配的なパラメータであるアルベードの値は雪面では40から70%であるのに対し、裸地(乾燥)では20から30%程度と小さいことから、融雪の早い時期に消雪したことで、土壤中の水分の蒸発が進んだ可能性もある。さらに融雪初期からピークにかけて降水量がほとんど無かった。このような要因が流出率の減少に影響を及ぼしたと推察される。

## 4. 融雪流出高の推定

### 4.1 積算暖度による融雪流出高の推定

長期間の融雪を取り扱う場合の実用的なモデルとして積算暖度法がよく用いられている。

ここでは積雪重量計から得られたデータを使い、定山溪ダム観測露場における融雪流出高の推定を試みた。

単位面積当積雪重量最大日を起算日として時間単位の積算暖度(0℃以上の気温の積算値)を日単位に換算した値(以下、積算暖度) $\sum T_d$ と起算日以降の日当り積雪深 $H_s$ (以下、積雪深)の関係を図－4に示す。図より年ごとに積雪深の違いはみられるものの、積算暖度と積雪深が負の相関関係にあることがわかっている。この関係を考慮し、各年の積算暖度 $\sum T_d$ と起算日における積雪深(以下、最大積雪深) $H_{high}$ をパラメータにとり、次の重回帰式を仮定し、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ の最適化を行った。表－4に重回帰係数一覧、図－4に推定値を示す。

$$H_s = \alpha \sum T_d + \beta H_{high} + \gamma \quad (1)$$

表-4 重回帰係数一覧

| $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $r^2$ |
|----------|---------|----------|-------|
| -0.06    | 0.99    | -1.73    | 0.99  |

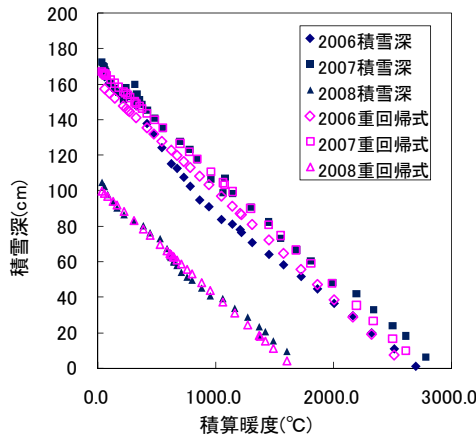


図-4 積雪深と積算暖度の関係

単位面積当たりの積雪重量は積雪相当水量に換算できるのでこの最大値をもって年最大積雪相当水量と見なすことができる。故にこの時の積算暖度と積雪重量差から求まる累積融雪流出高  $R$  の関係に着目し解析を行った。

図-5に積算暖度と累積融雪流出高の関係並びに気温と降水量の関係を示す。図より各年の傾向にはばらつきがみられる。日野ら<sup>5)</sup>はこの要因として融雪水の一部は積雪層に浸透して再び凍結し積雪層の密度が変化するためとしている。そこで各年の融雪期の気温と降水量についてみると、2008年は融雪が始まってから10日目くらいに寒波があり、一方2006年は10日目くらいに降雨が観測されている。また各年共通して20日目以降気温上昇が見られる。このように年ごとにばらつきはみられるものの図-4に示したような積雪深と積算暖度の関係から、累積融雪流出高  $R$  について積算暖度  $\Sigma T_d$  と最大積雪深  $H_{high}$  を説明変数とした次の重回帰式を仮定し、 $a, b, c$  を最適化した。

$$R = a \Sigma T_d + b H_{high} + c \quad (2)$$

表-5に重回帰係数一覧、図-6に現地観測結果から算出した累計融雪流出高  $R$  と重回帰式から推定された累積融雪流出高  $R^*$  を示す。

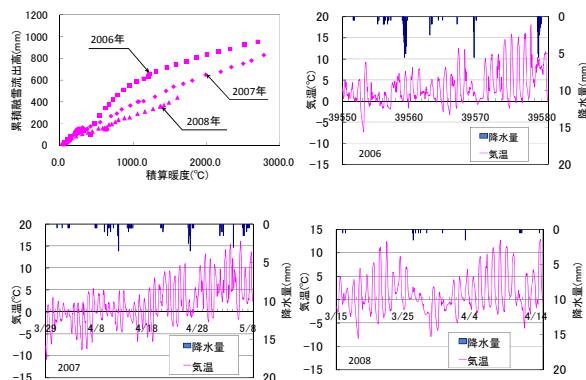


図-5 積算暖度と累積融雪流出高の関係並びに気温と降水量の関係

表-5 重回帰係数一覧

| $a$  | $b$  | $c$     | $r^2$ |
|------|------|---------|-------|
| 0.33 | 1.43 | -182.04 | 0.90  |

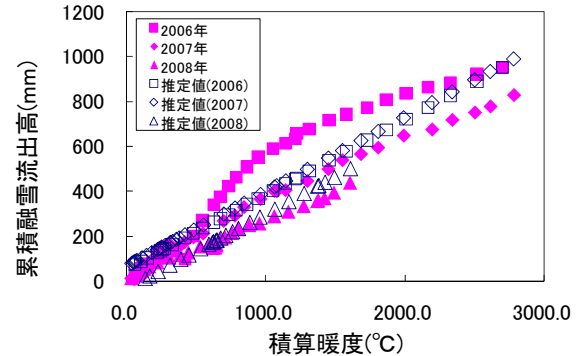


図-6 重回帰式による推定累積融雪流出高

ここで図-4より  $H_s=0$  の時の積算暖度について式(1)を使用して  $\Sigma T_d$  について解くと式(3)となる。これを式(2)に代入し、累積融雪流出高を推定した結果を表-6に示す。ここで  $\Sigma T_d^*$  は  $H_s=0$  となる推定日積算暖度、 $R^*$  はこのときの定山溪ダム観測露場地点における推定累積融雪流出高を示す。

$$\Sigma T_d^* = \frac{\beta}{\alpha} H_{high} + \frac{\gamma}{\alpha} \quad (3)$$

表-6 累積融雪流出高推定結果 (定山溪ダム観測露場: 標高 400m)

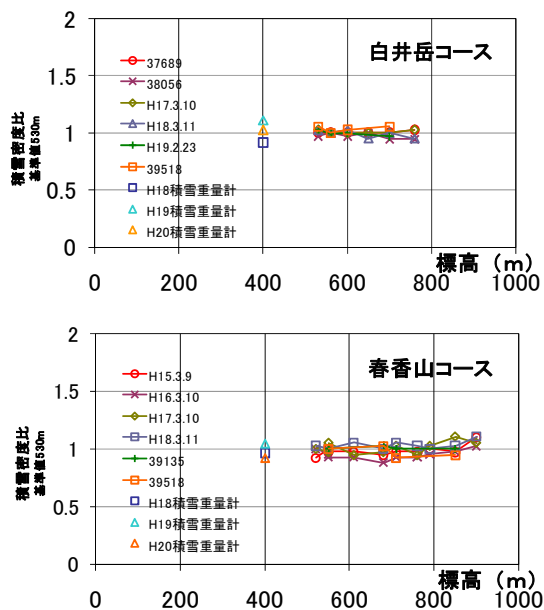
|                                      | 2006   | 2007   | 2008   |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| $H_{high}$ (cm)                      | 164.2  | 172.6  | 104.5  |
| $\Sigma T_d$ (°C)                    | 2697.5 | 2781.6 | 1604.8 |
| $\Sigma R$ (mm)                      | 952    | 830    | 440    |
| $\Sigma T_d^*$ (°C)                  | 2637.4 | 2773.8 | 1668.2 |
| $\Sigma R^*$ (mm)                    | 930    | 988    | 523    |
| $\Sigma R^* - \Sigma R$ (mm)         | -22    | 158    | 83     |
| $ \Sigma R^* - \Sigma R  / \Sigma R$ | 0.02   | 0.19   | 0.19   |

## 4.2 積雪相当水量の推定

積雪相当水量の推定は、流域内の高度の異なる地点を直接調査し、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、2月から3月にかけての厳冬期の調査であり、多大な労力を必要とすることや安全面から、得られるデータは限られている。

そこで融雪期の現地観測を時系列的に連続観測した結果を用いて定山溪ダム流域の積雪相当水量の推定を試みた。積雪相当水量の推定を困難にしているものは、積雪密度の推定と積雪深の空間分布推定にあるが、積雪深の空間分布推定については、工藤ら<sup>6)</sup>による当該流域での高度差による積雪深増加率を用いる方法や高度比による回帰式を用いる方法などが考えられる。

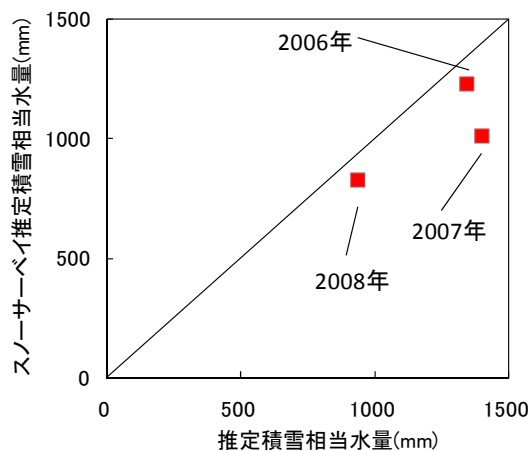
ここで、積雪深分布について、工藤ら<sup>6)</sup>による高度差100m当たりの積雪深増加率0.25を用いた。次に積雪密度の推定であるが、スノーサーベイによる各年の任意の標高(530m)における積雪密度を基準とした各地点標高と密度比の関係を図-7に示す。山田ら<sup>7)</sup>によると全山融雪状態となると融雪量が高度によらず一



図－7 積雪密度の高度分布一定山溪ダム流域－

定となり、積雪相当水量分布の傾きも一定となることが指摘されている。スノーサーベイは融雪が始まる直前をねらって行われるため、この状況に近いといえる。図より、融雪期の積雪密度は高度に関係なくほぼ均一な値となることがわかる。

このことから融雪期の積雪密度は空間的に変化しないという仮定のもと積雪相当水量を求めてみる。すなわち工藤ら<sup>9)</sup>の積雪深増加率を用いてメッシュ毎の $H_{high}$ を求め、これを(3)式に代入しメッシュ毎の $\Sigma T_d^*$ を求め、さらに(2)式に代入して推定累積融雪流出高 $R^*$ を求める。なお、ここでいう推定累計融雪流出高は積雪相当水量を意味する。また定山溪ダム流域内の高度分布を知る必要があるが、石狩川流域ランドスケープ情報<sup>8)</sup>のメッシュ値(約1km×1km)を用いた。高度ごとの気温減率は0.6℃/100mで補正した。積雪重量最大日の推定積雪相当水量とスノーサーベイによる値との比較を図－8に示す。



図－8 積雪相当水量の推定結果一定山溪ダム流域－

## あとがき

北海道の降水量の約半分は降雪によるものであり、こ

のため当該地域の河川では春先には融雪出水が生じることとなり、ダムではこの融雪出水を調節しかつ有効利用することで水運用を図っている。ダムの運用を考えた場合、積雪相当水量を的確に把握することは重要な課題となる。冬季水文に関する研究はこれまで数多く行われてきているが、本研究のように、積雪重量を時系列的に直接連続観測した例は少ない。今回スノーサーベイの結果を基に各年の任意の標高を基準とした積雪密度比を求めたところ、融雪期の積雪密度は高度によらずほぼ均一な値となることを確認した。さらに単位面積当積雪重量が最大となる日以降の積算暖度と積雪深の関係より重回帰式を用いて積雪相当水量を推定した。積雪重量最大日における推定値はスノーサーベイによる値との比較において大きな値を示す結果となっているが、3ヶ年のデータのための推定結果であり、推定値には2割程度の誤差を含む。また、積雪相当水量を求めるときに積雪深の空間分布を標高に比例して増加するものとして扱ったが、岡本ら<sup>9)</sup>の航空レーザ測量に基づく調査によると標高の増大による積雪深の明瞭な増加は認められなかったとの事例もあることから、今後の課題としたい。2008年は札幌のアメダスにおいて、平年より12日早い消雪を記録している。こうしたことから2008年の観測結果を過去2年と比較すると、異なる傾向を示している。IPCCの第4次評価報告書によると、地球温暖化は今後も進行し、その影響は避けることはできないといわれており、2008年にみられたこうした傾向が将来的にどのようなかをデータの蓄積を行い評価していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 近藤純正編書：水環境の気象学、朝倉書店、1994.
- 2) 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、pp37－42、2004.
- 3) 谷瀬敦、山下彰司：積雪重量計を用いた積雪層の観測について、水工学論文集、第51号、pp355－360、2007.
- 4) 新目竜一、山下彰司：積雪重量計を用いた冬季水文観測について、水工学論文集、第52巻、pp493－498、2008.
- 5) 日野幹雄、長谷部正彦、野田賢治：融雪時の河川の流出機構の研究、水工学論文集、第27巻、pp355－358、1983.
- 6) 工藤啓介、中津川誠：石狩川流域の水文メッシュ値の推定、土木学会59回年次学術講演会、pp151－152、2004.
- 7) 山田知充、西村寛、水津重雄、若浜五郎：大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程、低温科学、物理篇、37、pp1－12、1978.
- 8) (財)北海道河川防災研究センター編集・発行：石狩川流域ランドスケープ情報、CD-ROM、1998.
- 9) 岡本隆、黒川潮、松浦純生、浅野志穂、松山康治：山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討、水文・水資源学会誌、第17巻5号、pp529－535、2004.