

## 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

### Influence of lysimeter size to gaging accuracy of bottom melts

山崎 真一

Shin-ichi YAMAZAKI

融雪水は貴重な水資源であると同時に災害の危険をもたらすものであり、自然界においては土砂、栄養塩類等を輸送する大きな役割を果たしている。河川管理の観点からすると、主要な河川では河道整備が進んできており一般災害が生ずるような融雪出水は少なくなっているが、融雪出水が長期間にわたること、降雨・暖気等の気象要因により非洪水期に比較的規模の大きな出水となる場合があることから、融雪出水の予測は、ダム、放水路等で洪水時の体制、放流計画等を判断する上で特に重要であると考えられる。

融雪量予測の基礎データとなる積雪下面から流出する融雪水量はライシメータによって計測されるが、基本的な原理は雨量計と何ら変わるものではない。しかし、融雪現象の実態を考慮に入れた場合、どのような受水面積のスケールをとるべきか検討が十分に出来ているとは言い難い。このため、ライシメータの入水部を4 m×4 mとし、それを12分割しそれぞれの融出水量を計測することによりこの問題について考察した。

《キーワード：融雪；ライシメータ；積雪下面流出量》

Snowmelt runoff is a precious water resource in cold snowy region. In the river environment, the flood has an important role in the transportation of nutrients and sediments.

However, the duration of snowmelt runoff is long and sometimes causes disasters. Therefore, the forecast of snowmelt discharge is very important for the river disaster prevention and management of dam or floodway in cold snowy region.

The basic data for forecasting snowmelt flood is amount of bottom melt. This is observed by lysimeter which has the same mechanism as rain gage.

The outflow process in the snow coverage of a snowmelt is very complicated. Therefore it seems that the size of lysimeter influences a observed results.

In this paper, the influence on observation data was considered using actual observation.

《Key word ; Snowmelt ,Lysimeter ,Amount of bottom melt》

はじめに

融雪出水の予測については、現状では実際の河川管理においてはほとんど実用化されていないのが実情である。しかし、融雪出水は長期間にわたることから、洪水体制の判断、放流計画の立案等、ダム、放水路等の施設管理において融雪出水の予測が必要である。また、非洪水期に洪水調節容量を持たないダムでは、予備放流の実施、但し書き操作の可能性の判断等、ある意味で融雪出水は管理上非常にやっかいな問題である。融雪出水に関する確かな情報が得られればダム等の管理の確実性は大幅に向上し、管理職員の負担軽減も図れるものと考えられる。

融雪出水の流出予測方法は、原理的には積雪下面からの流出量を直接観測しそれを入力値とし流出計算を行えば良い。しかし、実際には積雪深、気象要因、地被状態、地形等によって積雪下面からの流出量は場所毎に異なっているものと考えられる。このため、実用的な流出量の計測システムを確立することが必要である。しかし、これを計測するライシメータについては、融雪現象の実態を考慮に入れた場合、どのような受水面積のスケールをとるべきか検討が十分に出来ているとは言い難い。このため、ライシメータの入水部を4m×4mとし、それを12分割しそれぞれの融出水量を計測することによりこの問題について考察することにした。

## 1. 調査方法

### 1) 現地観測

現地観測は平成12年12月から平成13年3月末にかけて当研究所の石狩実験場において実施し、ライシメータによる流出量の観測、断面の観察、気象観測を行った。ライシメータは図-1に示すとおり、4m×4mの受水部を12分割し転倒マスにより流出量を観測した。積雪断面の観察は、積雪層、雪質と流出状況の関係を把握することを目的として観測期間内に3回実施した。また、気象観測は、熱収支を計算し、得られた融雪量と実際の流出量との関係性を評価するために行った。気象観測は表-2に示す項目を実施した。

### 2) 熱収支の考え方

図-2に熱量の出入りの概念図を示す。各項目の概要は下記の通りである。

- ・放射収支量 (NR) ; 放射収支量は、積雪に照射された日射量と反射量の差、及び大気、積雪表面間の長波放射の授受総量であり、正味積雪に吸収される放射量を表す。
- ・顕熱伝達量 (SH) ; 風によって輸送される大気



写真 - 1 現地観測の状況

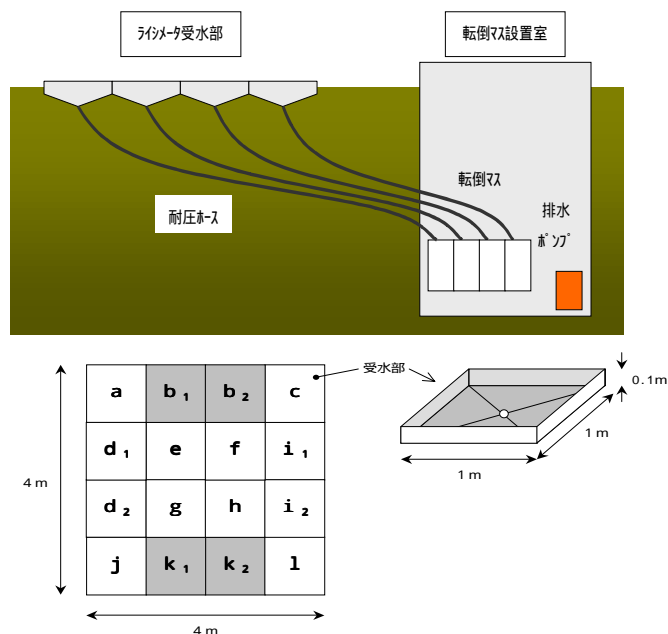


図 - 1 実験に用いたライシメータの概要図

表 - 1 気象観測項目

観測機器	観測項目	観測期間
温湿度計	気温・相対湿度	平成12年12月 ～平成13年3月
風速計	風速	
放射収支計	放射収支量	
アルベドメータ	全天日射量 及び反射日射量	
放射温度計	積雪表面温度	
熱流板	地中熱流量	
防災雪氷研究室気象データ	積雪深	
"	降水量	

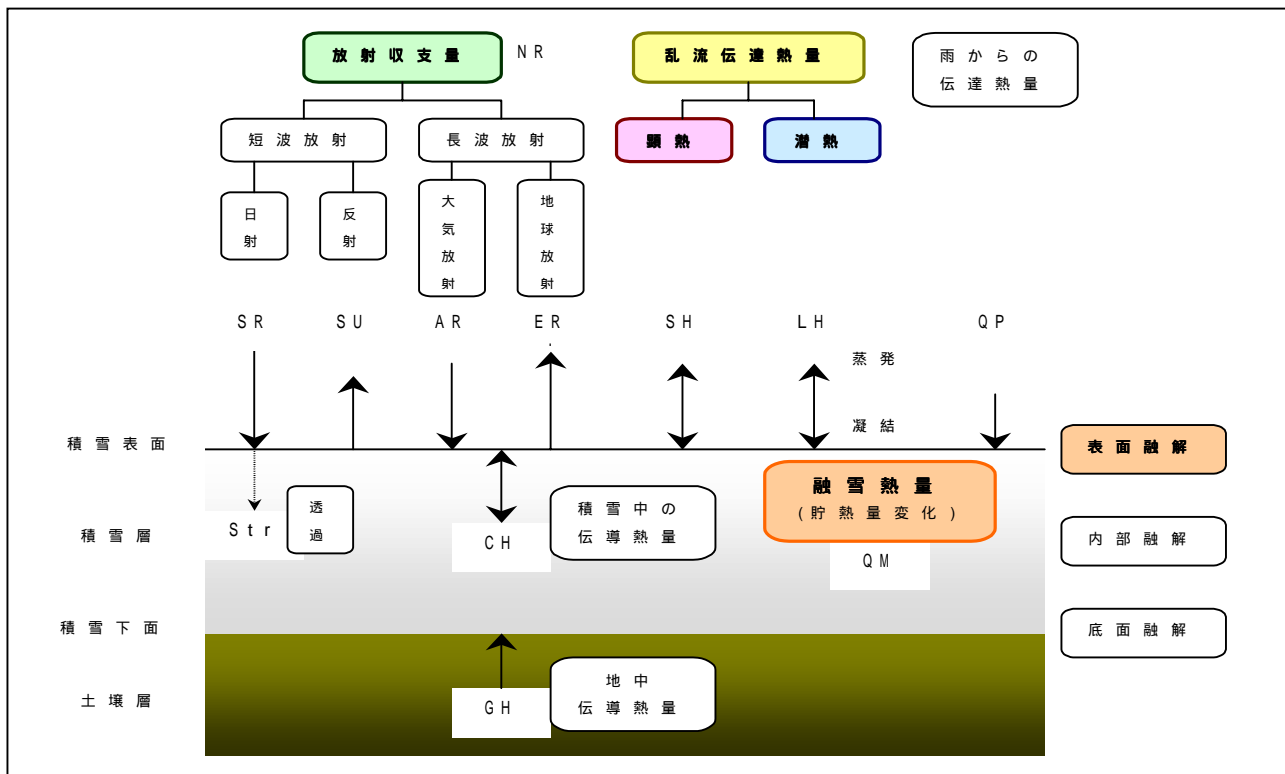


図 - 2 積雪層の熱収支の概念図

の熱量（気温）を表す。

- ・ 潜熱伝達量（LH）； 風を介して大気中の水蒸気が雪面に凝結、もしくは雪面から蒸発する際に輸送される熱量を表す。
- ・ 積雪中の伝達熱量（CH）； 積雪層中の温度勾配に比例して積雪中を移動する熱量を表す。
- ・ 地中伝達熱量（GH）； 土壌から積雪底面に与えられる熱量を表す。
- ・ 雨からの伝達熱量（QP）； 降雨により積雪層に伝達される熱量を表す。

積雪層の熱収支は次式で示される。

$$NR + SH + LH + CH + QP + GH + QM = 0$$

ここで、QMは融雪熱量を示し、積雪層に伝達される熱量を正の熱量、積雪層から奪われる熱量を負の熱量とする。なお、雪温が0未満の場合には、QMは、積雪層内の貯熱量の変化を表す。各項の算出方法は巻末1に記した。

## 2. 観測データ

観測期間において融雪及び降雨によって積雪下面より生じる流出量が多い3月のデータについて整理を行った。

### 1) 気象観測データ

この期間では図3に示すとおり、3月4日、3月26日にまとまった降雨があり3月4日には総降水量41mm、ピークは17時に7mm/hrを記録し、また26日は総降水量6mmであった。気温は13日までは低く、その後日中の気温はプラスになった。雪温は、積雪底面（0cm）では常に0となっており、地中伝達熱量によってわずかながら融雪が進んでいることがわかる。その上層については、全層が雪温が0となる18日以降は積雪表面で生じた融雪水は底面まで到達出来る条件にあるものと考えられる。雪温が0以下の場合には積雪表面の熱収支によって生じた融雪水は、積雪層の内部に貯留、再凍結しているものと考えられる。積雪深は、3月の初旬には約100cmであったが、3月末には40cm程度となった。

### 2) 流出量データ

ライシメータ全体（4m×4m）の1時間当たり、単位面積当たりの流出量を図4に示す。3月4日に降雨のあった日には一時的に流出量が増加している。3月18日頃から周期的に融雪が発生しており、最大流出量は、2～4mm/hr程度で、日流出量は日によって差があるが多いときでも40mm/day以下であった。

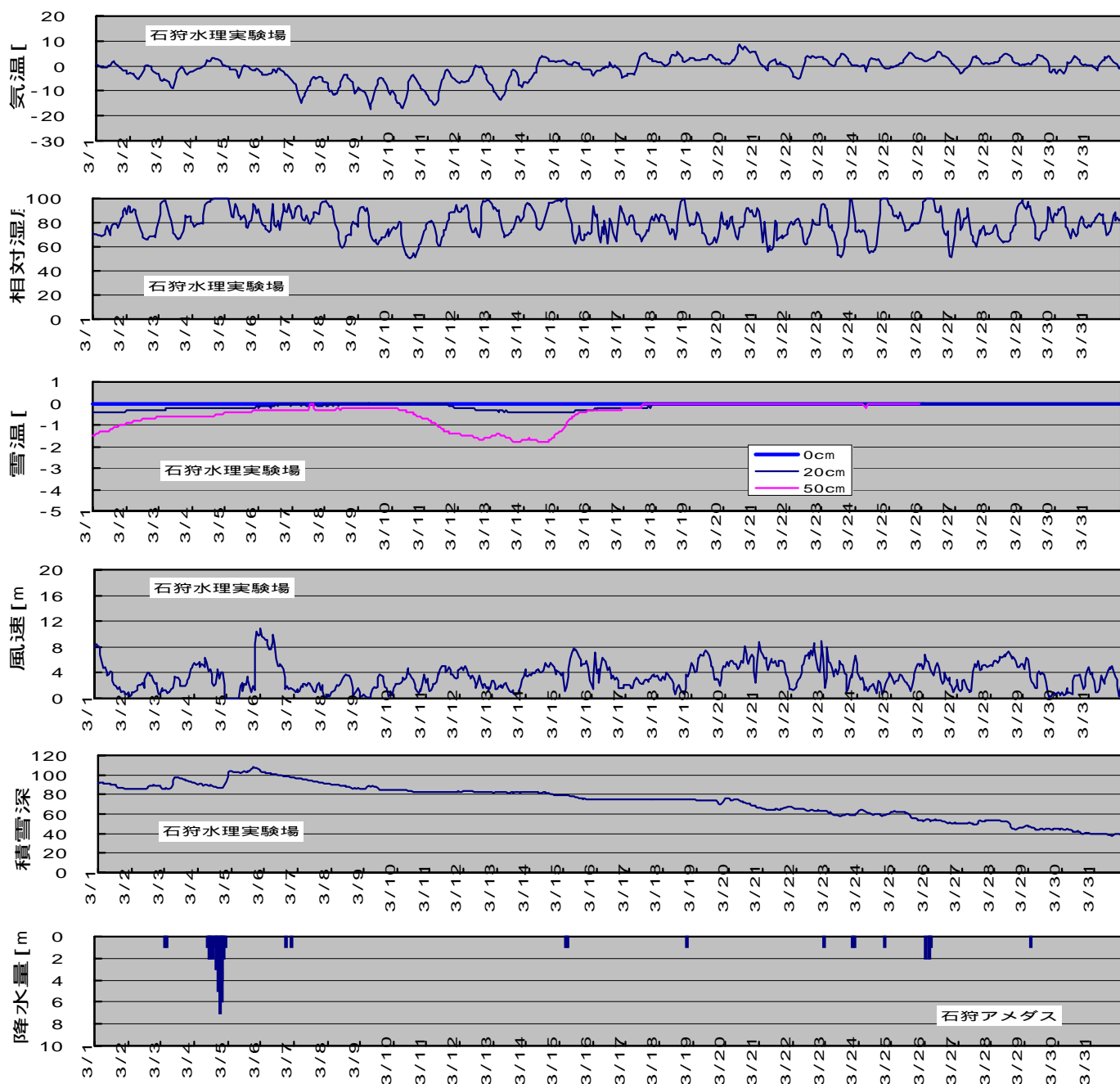


図 - 3 主要な気象観測データ

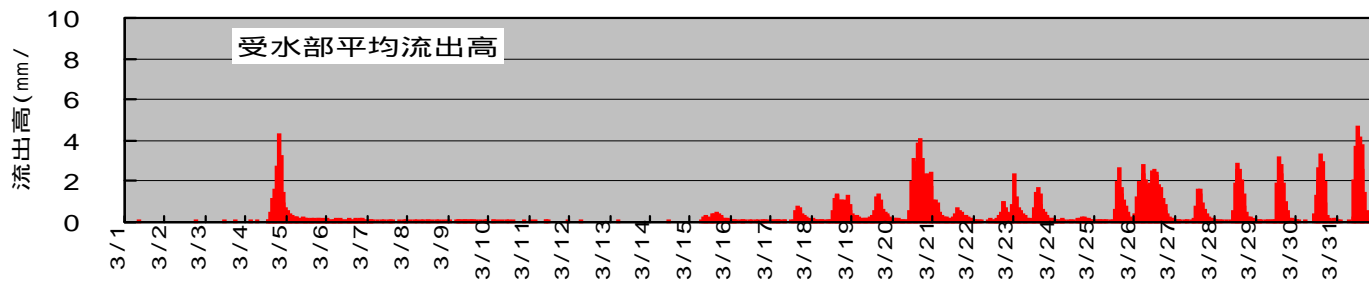


図 - 4 ライシメータにより観測された積雪下面からの流出量

### 3) 熱収支成分の推移

熱収支計算結果を図 5 に示す。放射収支量は融雪が進んだ15日以降大きな値となり、日中には300 W/m<sup>2</sup>近い値をとり日収支はプラスとなった。潜熱・顕熱は放射収支に比べて小さな値をとるが、3月20日、26日

頃に比較的大きな値をとる。地中伝達熱量の値は小さく4 W/m<sup>2</sup>程度である。雨からの伝達量は3月4日で最大14 W/m<sup>2</sup>であったが、放射収支熱量に比べると小さな値である。従って融雪熱量は、計算上はほとんどが放射熱収支によってまかなわれていることになる。

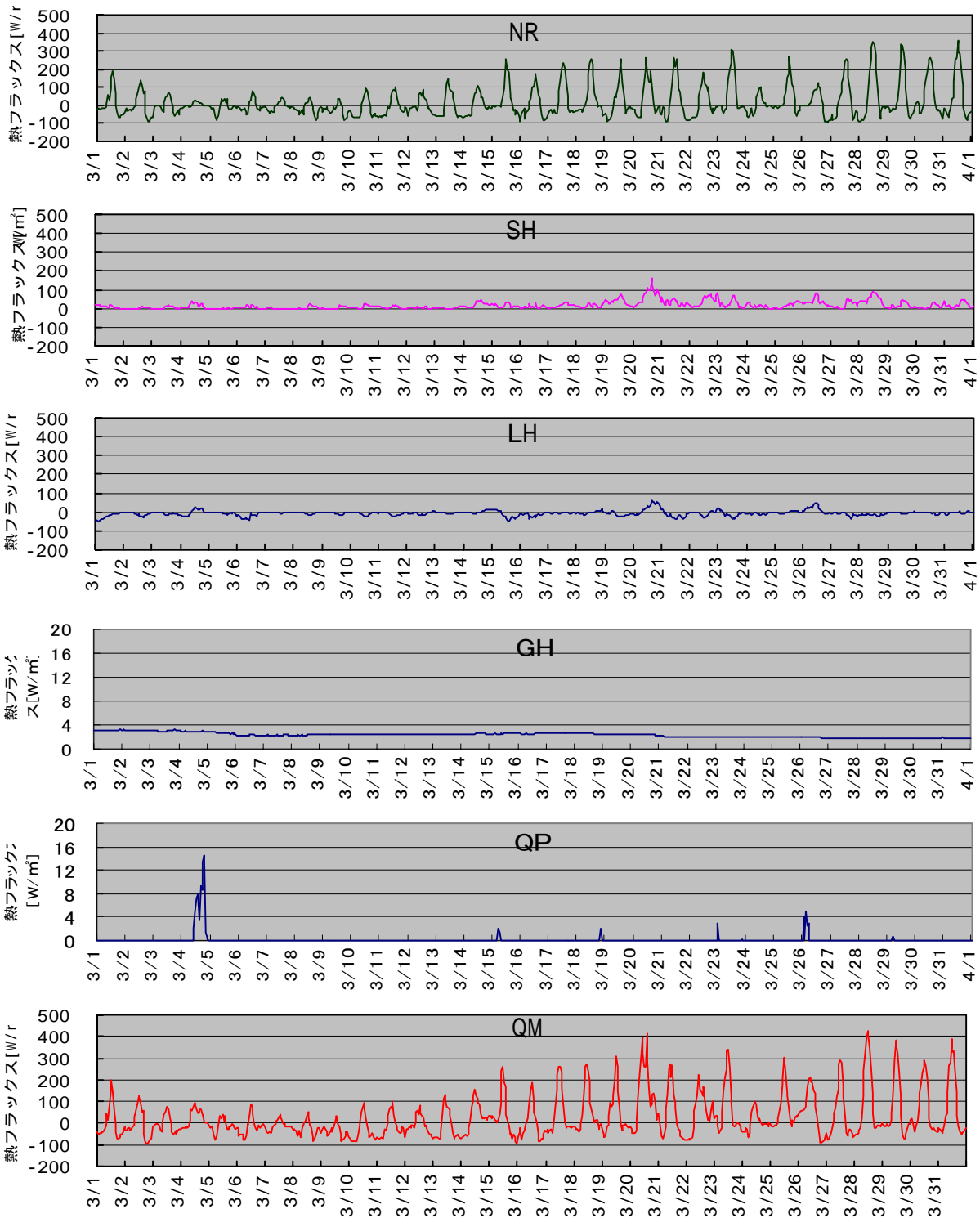


図 - 5 熱収支計算結果

4) 熱収支と流出量の状況

ここでは、流出量の大きな3月4日、20日、26日の状況について整理した。

3月4日

3月4日は、10時から23時にかけて降雨を観測し、降水量4.1mmでピークは19時頃に7mm/hrを記録した。この日の熱収支を見ると顕熱、及び潜熱が比較的大きな値を示し融雪熱量 $Q_M$ がプラスとなるが、降雨による熱量は小さく直接の融雪にはあまり影響はないものと考えられる。下面流出量を見ると波形は、降水量と類似しているが、流出の始まりは降雨が発生してから3時間程度遅れている。しかし、ピーク時間は殆ど同じであり、降雨開始時とピーク時では積雪中を降雨が流出するのに従い浸透流れであったものが、水みちの発達によりパイプフロー化したものと考えられる。また、下面流出量は最大値と最小値で大きく異なっており、平面的に流出量がばらついていることがわかる。

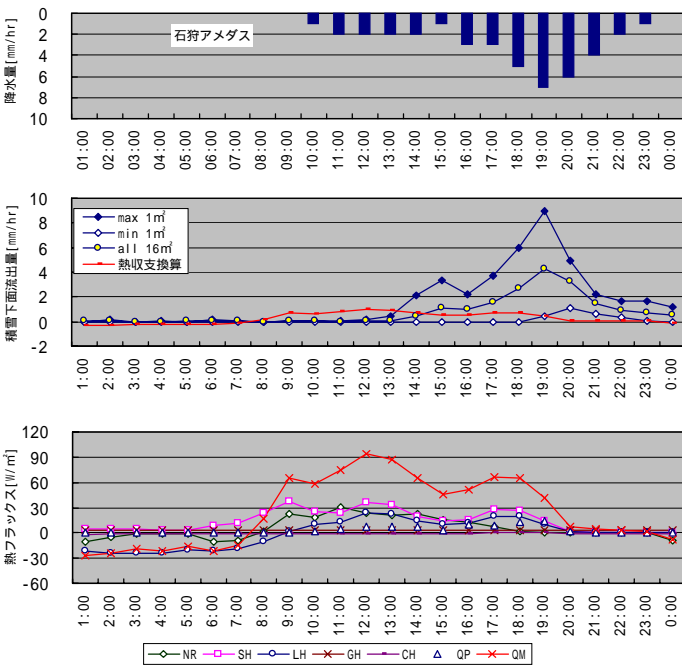


図 - 6 3月4日の融雪状況

3月20日

この日は降雨が無かったが、熱収支を見ると放射収支量(NR)が大きく、風速が5mと比較的強かったため顕熱伝達量(SH)、潜熱伝達量(LH)が1日をとおして比較的大きな値を示している。これは、日中、日没後に融雪が進む要因となっている。この日の熱収支によ

る融雪熱量と実際の下面流出量の波形はピークの遅れ時間が約1時間程度あるものの類似している。また、各受水マス(No.1-16)の下面流出量の最大値と最小値は比較的近い値を示しており、平面的に均等に流出しているものと考えられる。

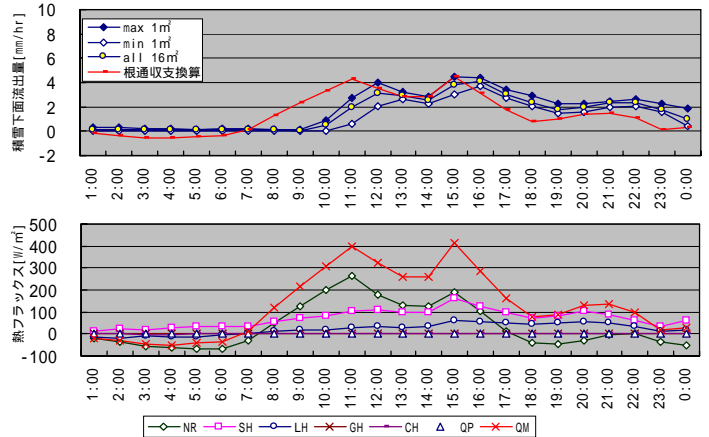


図 - 7 3月20日の融雪状況

3月26日

この日は、0時から6時までに6mmの降水量が観測されている。熱収支を見ると潜熱、顕熱が比較的大きな値をとり、融雪熱量のピークは11時頃であった。下面流出量を見ると午前9時頃までは降雨が原因と思われる流出が生じているが、その後は、融雪熱量とほぼ流出波形は一致する。各受水マスの下面流出量の最大値と最小値を比較すると、降雨がある時間帯にはばらつきが大きい、その後ばらつきは小さくなる。

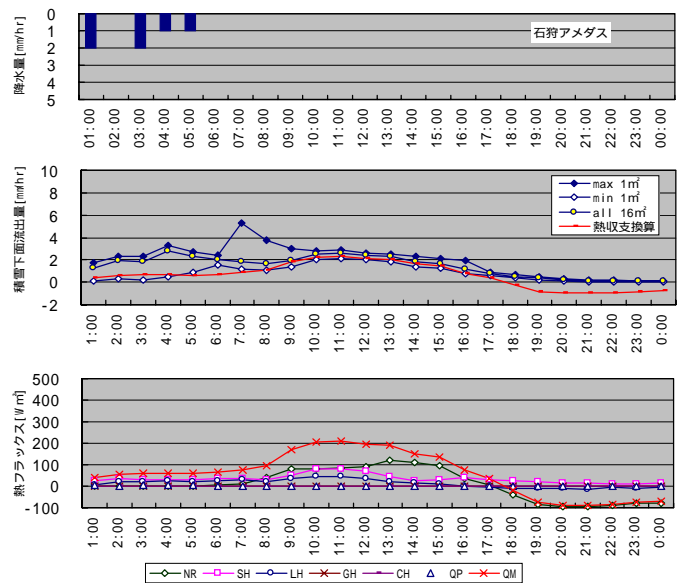


図 - 8 3月26日の融雪状況

5) 積雪断面観察結果

積雪断面の観察は2月27日、及び3月7日、3月16日等を実施した。流出量のばらつきは、積雪の層構造、特に氷板との関連があると考えられる。氷板は浸透能力が著しく小さく、氷板中に生じている水みちによって下方に水を受け渡していると考えられる。2月27日の断面では氷板はあまり発達していないが、3月7日には、氷板も地表から48cmの地点で約3cmの厚さまで発達している。3月4日の降雨時の状況は3月7日の断面から考えると、徐々に氷板が発達し、そのため平面的に流出量の大きなばらつきが生じたものと考えられる。その後16日には雪質はほとんどが「ざらめ」になり、氷板数も減少し均一に近い状態となっており、平面的な流出量は均一化するものと考えられる。

なお、2月27日及び3月7日の雪の密度から換算した積雪相当水量を比較すると2月27日には228mmであったものが3月7日には240mmと増加しており、積雪内に3月4日の降水量の一部が貯留されたことがわかる。

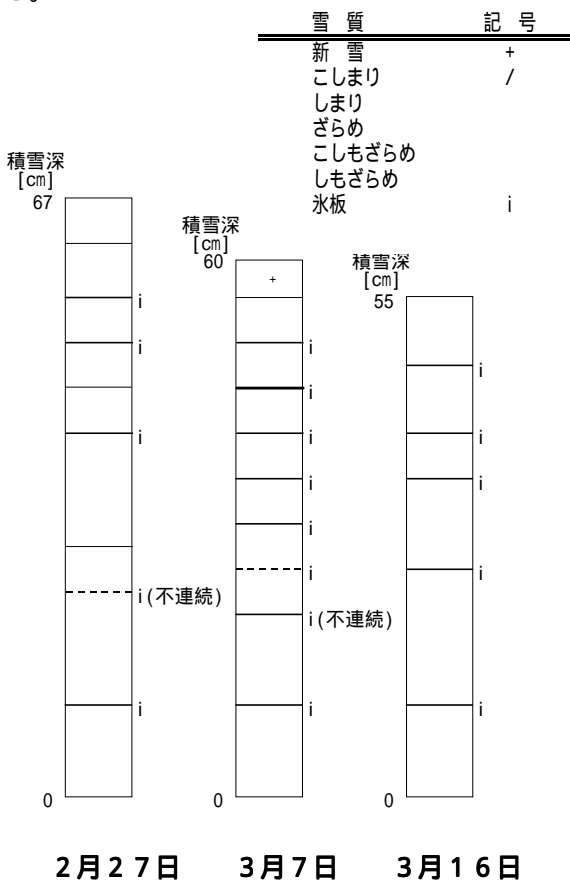


図 - 9 積雪断面観察結果

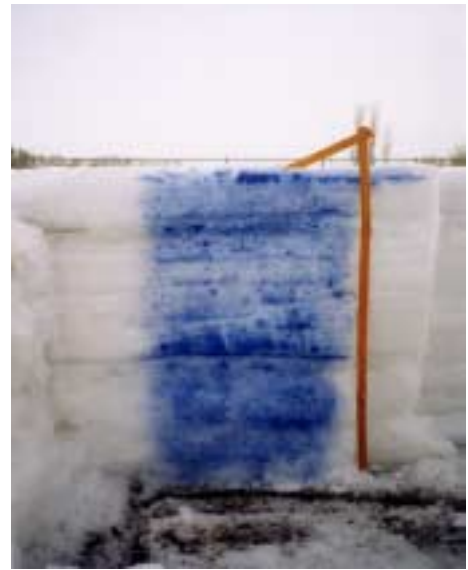


写真 - 2 積雪断面観察状況

3. 積雪下面からの流出量の評価

1) 下面流出量の平面的なばらつきについて

図10に3月の毎日の下面流出量について受水面積が1m<sup>2</sup>の8例について平面的なばらつき状況を整理した。標準偏差は、3月4日、20日、26日、31日等が高い値を示しているが、これは、流出量自体が大きいためと考えられる。標準偏差を平均流出量で割った値を見ると3月初旬の融雪が本格化する以前は大きなばらつきがあるが、その後徐々に減少し3月下旬には0.2程度まで減少し、浸透能力が徐々に均一化している傾向にあることがわかる。

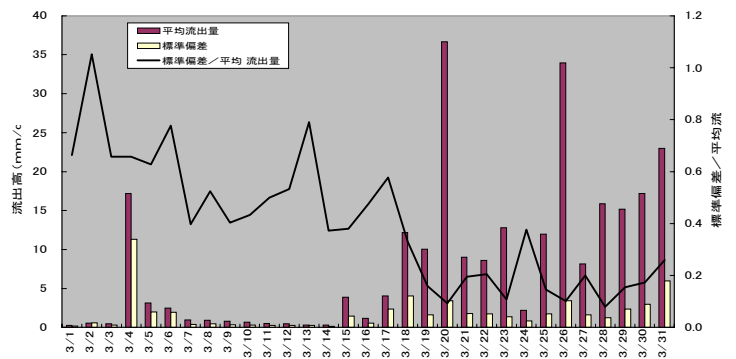


図 - 10 毎日の流出量と平面的なばらつき状況

図11に標準偏差の大きな4日、20日、26日、31日の流出量の平面分布図を示す。ただし、受水面積2m<sup>2</sup>のb、d、i、kは、1m<sup>2</sup>の値に直し1m<sup>2</sup>の棒柱

2本に同一の値を与え表示している。3月4日の流出量を見ると明らかに流出量の大きな部分と小さな部分があり、大きな受水面積を取らなければ平均的な値は得られないものと考えられる。それに比べ3月20日、26日については、最大値と最小値で10mm程度の差はあるが、1m<sup>2</sup>程度の観測によっても平均的な融雪量の把握が可能と考えられる。3月31日は積雪深が相当小さく、積雪断面記録では20cm程度しかなく、融雪量が場所的に相当ばらついていたものと考えられる。

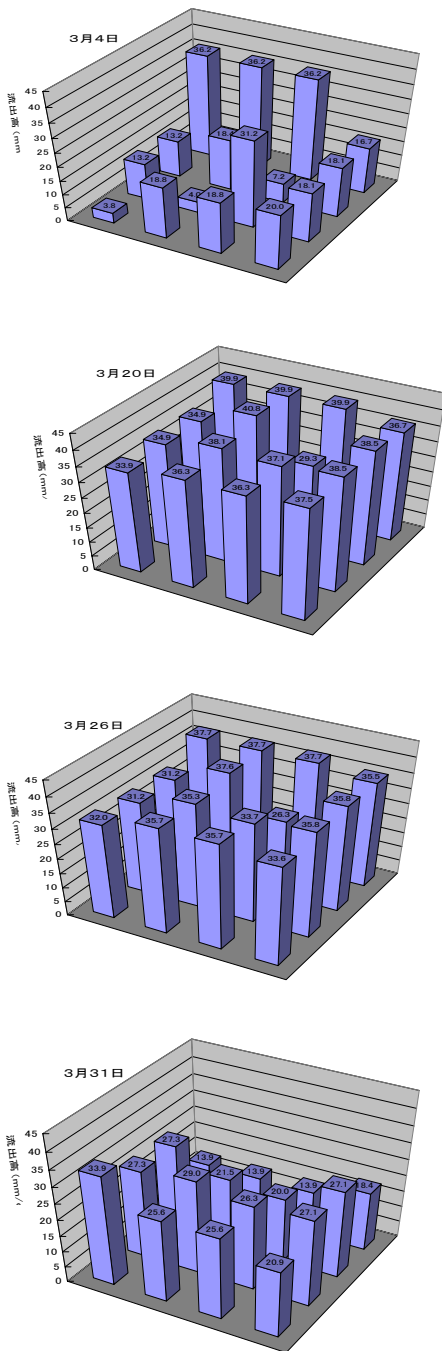


図 - 1 1 日流出量の平面分布

流出面積を大きくとった場合に、実際にどの程度平均的な値を得ることが出来るかを見るため、受水面積が2m<sup>2</sup>、3m<sup>2</sup>、4m<sup>2</sup>となるように受水部を組み合わせ、その標準偏差 / 平均流出量を求めた。ただし、それぞれの受水面積毎に標準偏差が大きくなるような組み合わせを取り評価している。採用した組み合わせは巻末2に示した。その結果を図12に示すが受水面積を大きく取ることではばつき度合いは小さくなり、特に融雪が本格化する18日以降では31日を除くとおおむね1割程度まで抑えることが出来る。流出量の小さな場合には相対的には変動が大きい絶対値自体が小さく、あまり実用上問題は無いと考えられる。しかし、3月4日の様に降雨が発生した日については、流出量自体が大きく精度は良いとは考えられない。従って降雨を伴うような場合にはライシメータにより得られるデータについては十分な吟味が必要である。

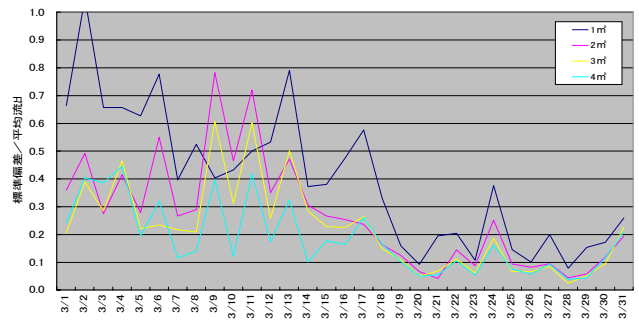


図 - 1 2 受水面積毎の標準偏差 / 平均流出量

## 2) 熱収支計算の融雪量と流出量の関係について

熱収支計算から得られた融雪量と実際の下面流出量との関係は図-13に示すようになる。なお、降雨による流出量は差し引いている。日集計値であるので正確ではないが、流出量に比べ融雪量が大きな値を示している例が多い。これは、積雪表面付近での融雪水が下方に浸透する時間の遅れ、浸透する間に再度凍結することが原因と考えられる。また、3月4日、3月26日のまとまった降雨がある場合には値は単に降雨量を差し引いても余り良い相関とはならない。特に3月4日については、本格的な融雪が開始する前であり、積雪内の温度が低く降水量の一部が凍結し積雪中に貯留されている結果が現れている。

融雪が本格化する3月15日以降の各日毎の熱収支計



算ピークと流出量のピークの遅れ時間を見ると、図 - 14 に示すように、融雪水の流出には比較的大きな遅れがあることがわかる。遅れ時間は融雪初期には積雪深 1 m 程度でも 3 時以上かかるが融雪末期には 1 時間程度となっており、雪質が殆ど均一であることから積雪深との関係が明確に現れている。

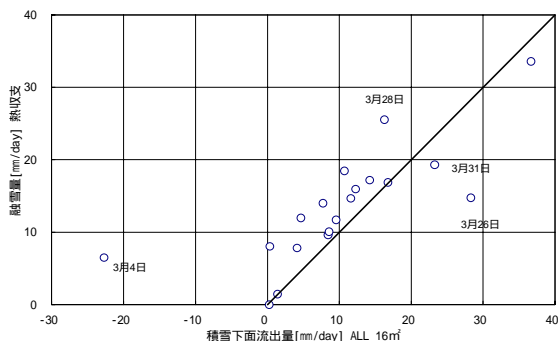


図 - 13 融雪量と積雪下面流出量の関係

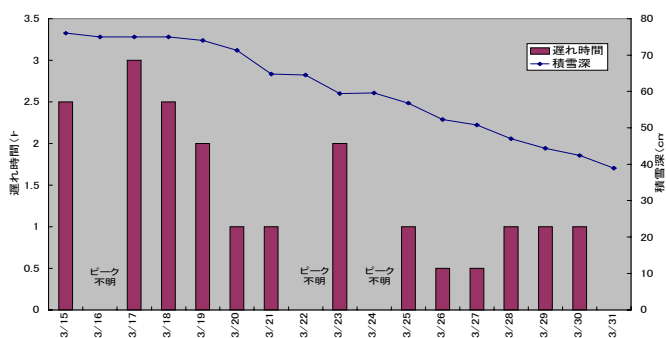


図 - 14 3月15日以降の流出遅れ時間

おわりに

融雪出水の予測を行うためには地表面への融雪水、降雨の流入量を把握することが必要である。気象観測を実施し熱収支計算により融雪量求め積雪下面に到達する水量を算出することも可能であるが、地表への流入量を直接計測することが可能であれば、積雪内への貯留の影響、降雨の影響、流入の遅れ時間も含めた値が得られることとなり実用的であると考えられる。このため、ライシメータにより計測される流出水量が実際にどの程度の精度を持つデータであるかを評価した。その結果次のようなことが分かった。

- 1) 積雪下面からの流出量は、降雨が生じている場合には、平面的なばらつき度合いが大きい。
- 2) 融雪が進むに従い流出量の平面的なばらつきは小さくなる傾向がある。

3) 受水面積を大きくするとばらつきを小さくすることができる。

#### 参考文献

- 1) 小島賢治 気象研究ノート第136号 融雪・なだれ特集 第1部第1章 融雪機構と熱収支 1-61 1979
- 2) 山崎剛 融雪係数の熱収支的検討 日本雪氷学会誌 雪氷 第7巻3号 239-244 1995
- 3) 石川信敬、小林俊一、小島賢治 融雪期の顕熱フラックス 低温科学物理編 第41号 1982
- 4) 中津川誠、星清 熱収支を考慮した流域スケールの時間融雪流出量の推定 開発土木研究所月報 第506号 2-9 1995

#### <巻末1> 熱収支計算の各項の計算方法

放射収支量は、次式で示される。

$$NR = (1 - \alpha)SR + AR - \sigma T^4 \quad \dots (1)$$

ここで  $\alpha$  は積雪表面のアルベド、 $SR$  は全天日射量、 $AR$  は大気放射量、 $T$  は積雪表面温度、 $\sigma$  は、ステファンボルツマン定数、 $\epsilon$  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。

$$SH = a C_p \cdot K_H (AT - ST) WS \quad \dots (2)$$

$$LH = a L \cdot K_E (Aq - Sq) WS \quad \dots (3)$$

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、 $a$ 、 $C_p$  は、空気の密度と比熱、 $L$  は気化の潜熱である。

積雪中の伝導熱量 ( $CH$ ) は次式により表される。

$$CH = (\lambda (ST_1 - ST_2)) / z \quad \dots (4)$$

ここで、 $\lambda$  は積雪の熱伝導率、 $ST_1$ 、 $ST_2$  は  $z$  の距離間における雪温を示す。融雪期では、全層が 0 の等温状態になるため、 $CH = 0$  となる。

雨によってもたらされる熱量は次式により表される。

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

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

雨は、融雪を促進するように一見思えるが、水の比熱が  $4.2 \times 10^3 (J kg^{-1} K^{-1})$ 、水の融解熱が  $336 \times 10^3 (J kg^{-1})$  と 80 倍もあることを考えると、直接融雪に寄与する割合は小さく、降雨がもたらす湿潤で温暖な気団が強風によって輸送されることにより、潜熱、顕熱伝達量が大きくなり融雪を促進することになる。

< 巻末 2 > 標準偏差を求めた受水面積の組み合わせ

2m<sup>2</sup>

a	b	c
d	e	f
	g	h
j	k	l

3m<sup>2</sup>

a	b	c
d	e	f
	g	h
j	k	l

4m<sup>2</sup>

a	b	c
d	e	f
	g	h
j	k	l

---

山崎 真一  
北海道開発土木研究所  
環境水工部  
河川研究室  
副室長

