

九頭竜川水系滝波川流域の融雪出水に関する研究

西沢利栄*・古藤田一雄・新井 正・立石由己・本多 修

河川水温調査会

Snow-melt of the Takinami River

By T. Nishizawa*, K. Gotoda, T. Arai, Y. Tateishi and O. Honda

Kasen-Suion-Chosa-Kai (The Research for River Water Temperature)

Abstract

The Takinami River is one of the branches of the Kuzuryu River, which has rather a narrow drainage area (68 km²). Just before the ablation season of 1963, a snow survey was made along six snow courses in the river basin.

Total water equivalent of snow in the drainage area amounted to about $9,606 \times 10^4$ m³ at the end of March. Discharge from the basin was measured at Yakushi gauging station. The daily peak of discharge appeared about seven hours later after the time when the daily maximum heat supply to snow surface appeared. This time lag may be caused by the transmission and retention of water in the snow layer.

Heat balance of the snow cover was measured at Kinehashi station in the last decade of March. The data and calculations are summarized in Table 4. Local climatic survey of the snow-melt was also made in the same observation period at five fixed stations. Ablation was measured directly by the small tank ablation meter, and the results showed a good agreement with the decrease in total water equivalent of snow.

まえがき

1963年の豪雪に際して、九頭竜川の支流の滝波川において、融雪と出水に関する調査を行なった。この調査は、科学技術庁によって企画された雪害調査の一環である。そして、その多量の雪が融雪した際に予想される融雪災害の基礎資料を得ることを目的としたものである。それゆえ、その計画立案および調査実施は、1963年の3月中旬以降に短時日の間になされたもので、この上記のような、内容豊富な主題の解決には、かなり無理な点多かった。しかし、ここに、一応得られた結果の報告をし、多くの方々のご批判、ご討議をいただき、さらに、次の研究の礎石とすることができれば幸いである。

さて、調査に当っては、調査項目を1) 積雪相当水量の調査、2) 積雪面における熱収支の観測、3) 流域内

の小気候の調査、4) 流出量の調査の四つに大別し、1) の積雪相当水量調査は電源開発株式会社の花沢正男氏に、4) の流出量調査は電力中央研究所の岡田篤也氏と工藤正介氏にご協力をいただいた。また2) の積雪面における熱収支の観測は、岡山大学瀬尾琢郎教授を中心になされたものである。

さらに、この調査に当って多大のご協力をいただいた北陸電力福井支店に心から感謝致す次第である。

1. 調査地域の概況と調査方法

1.1 調査地域の概況

滝波川は図—1に示すように、周囲を約1,000~1,700 mの山々に囲まれた、約68 km²の流域面積を持つ、九頭竜川の支流である。

そして、本流沿いには、小原地点で取水する水路式の

* 執筆者 (The writer assigned for the report)

木根橋発電所（最大出力 800 kW，常時出力 650 kW）さらに下流に同じく水路式の中尾発電所（最大出力 800 kW，常時出力 710 kW）と薬師発電所（最大出力 800 kW，常時出力 390 kW）の三つの発電所がある。

この最下流に位置する薬師発電所の取水地点が，この滝波川流域の流出量を求め得る地点と考えられるので，後にも述べるが，ここを流量観測点として，自記水位計を設置した。

1.2 調査方法

1.2.1 積雪相当水量調査

積雪相当水量調査は，気象庁型の採雪器3本を使用し，3班に分け，6コース，53地点（図-1参照）において測定した。調査期間は3月26日から28日の3日間である。

1.2.2 積雪面上の熱収支の観測

観測点は，ほぼ南東に面した斜面上の平坦地（勝山市北谷小・中学校校庭，海拔高度 375 m）に設けた。観

測は3月25日18時から28日18時まで，27/28日の晩中断されたほか，連続的に行なわれた。

積雪面の受ける正味の放射量の測定は Albrecht 型の放射交換計を用い，水平面日射量は，Gorcziński 日射計で測定した。また，風速は理工研式小型ロビンソン風速計を用いて測定し，さらに，気温と水蒸気圧は2台のアスマン通風乾湿計を使用し，積雪面上 50 cm と 10 cm で同時測定を行なった。

1.2.3 融雪量計による融雪量，日射量ならびに小気候的連続同時観測

図-1に示した北谷，薬師，杉山，中野俣，小原の計5地点に，ロビッチ日射計，ロビンソン自記風速計，最高，最低温度計（ただし，この気温の測定は都合により4月11日までである。），アスマン通風乾湿計，棒状温度計（1/5°C目盛），融雪量計（内径 20 cm，高さ 25 cm のポリエチレン容器を内外共に白色にし，その中に 2 mm メッシュの雪受け網をくさりでつるようにし，採

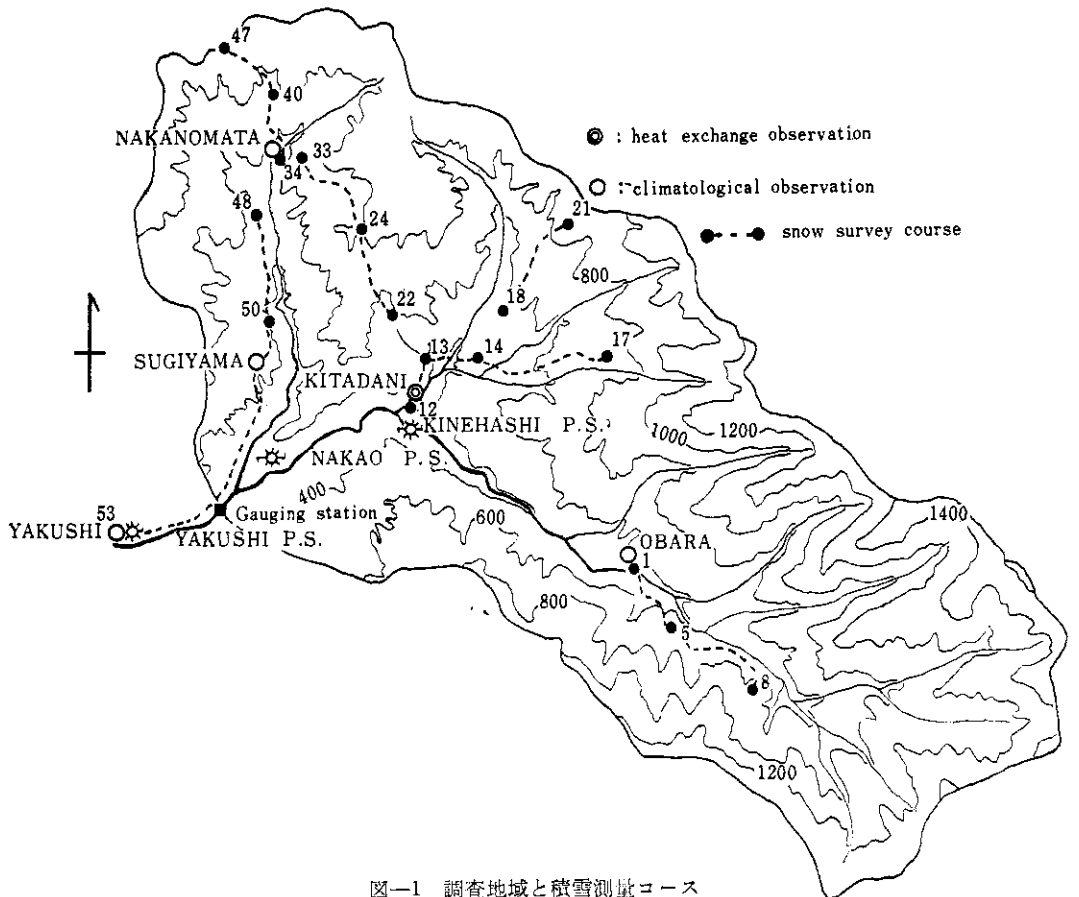


図-1 調査地域と積雪測量コース
Location of the observation points and snow survey courses.

雪した雪の厚さを 15 cm まで自由にかえることができるようにしたものである。), 雪尺をおき, 毎日 9 時に自記紙を取りかえると同時に, 最高・最低気温, アスマン通風乾湿計による温度, 棒状温度計で積雪表面下 1 cm と 5 cm の雪温さらに積雪深, 融雪量計による融雪量の測定を行なった。

融雪量計は, その上縁を積雪面より少し低目に設置し, 融雪水は凍結したものをとからして, メスシリンダーで測った。

1.2.4 流量調査

調査地域の流出量を求め得る薬師発電所取水口地点にリシャル型 1 日巻きの自記水位計を設置し, 取水堰越流量, 排砂門流量を算出し, これに発電所使用水量を加算して, 流出量を求めた。(流出量算出方法については, 昭和39年度の調査報告に詳述する。)

2. 調査の結果

2.1 積雪相当水量の調査結果

3 班によって実施された, 積雪測量の 6 コースは, 谷の方向によって分類したもので, 表-1 にも示すように, A コースは W~E の谷方向で地点 1 から地点 11 (ただし, 地点 11 は地点 1 と一致する。), B コースは S~N の谷方向で, 地点 34 から地点 47, C コースは SSE~NNW の谷方向で, 地点 22 から地点 33, D コースは S~N の谷方向で, 地点 48 から地点 53, E コースは, W~E の谷方向で, 地点 13 から地点 17, F コースは SW~NE の谷方向で, 地点 18 から地点 21 までである。

表-1 海拔高度と積雪深の関係式
Regression equation between snow depth (D) and elevation (H).

Course	Regression equation	Date of snow survey	Direction of valley
A (1-8)	$D=0.92+0.0030H$	March 26-28	NW-SE
B (34-47)	$D=0.99+0.0030H$	26-27	S-N
C (22-33)	$D=0.90+0.0030H$	28	SSE-NNW
D (48-53)	$D=0.17+0.0043H$	26-27	S-N
E (13-17)	$D=1.10+0.0025H$	26-27	W-E
F (18-21)	$D=1.30+0.0020H$	27	SW-NE

そこで, これらの各コースごとに, 一応海拔高度と積雪深の回帰式 ($D=\alpha+\beta H$) を求め, (ただし, 地点 21 と 47 は尾根地点のため除く。) 各コースを延長した場合に交わる地点で, 両コースの回帰式から推算した積雪深の差が, 最も小さくなるように, 各コースごとの α を手さ

表-2 滝波川流域の積雪相当水量
Water equivalent of snow in the Takinami River Basin.

Division by the elevation range 100m (m)	Area of each division (km ²)	Mean snow depth (m)	Water equivalent of snow (m ³)
200- 300	0.81	0.62	50.2×10 ⁴
300- 400	3.04	0.76	231.0
400- 500	6.56	0.97	648.0
500- 600	6.68	1.18	788.2
600- 700	8.10	1.18	955.8
700- 800	6.86	1.33	912.4
800- 900	11.05	1.41	1,558.1
900-1,000	5.82	1.66	966.1
1,000-1,100	5.69	1.87	1,064.0
1,100-1,200	4.74	1.89	895.9
1,200-1,300	4.30	1.87	804.1
1,300-1,400	2.39	1.68	401.5
1,400-1,500	2.03	1.63	330.9
Total	68.07		9,606.2

ぐり法で調整して, 最終的な海拔高度と積雪深の回帰式を求めた。(表-1 参照)

次に, 積雪層全層の平均密度と海拔高度の関係を調べたところ, この両者の間には, 明確な関係が認められなかった。そこで, 調査全地点の全層平均密度の平均値 0.52 g/cm³ を, 3 月 26 日から 28 日まで滝波川流域における代表値とした。

そこで, この積雪深と雪密度から, 調査地域の全積雪相当水量を推算するに当たっては, 積雪測量コースの谷方向を基準にして, 全調査地域を 7 区分した。そして, この区分ごとに海拔高度 100 m の間隔の区間面積を求め, この区間の平均積雪深と雪密度 0.52 g/cm³ から区間の積雪相当水量を推算し, さらに, 各区分ごとのこの値を加算して, 全流域の総積雪相当水量を求めた。表-2 はこの結果を示し, 38 年 3 月末の滝波川流域の総積雪相当水量は 9,606.2×10⁴ m³ であった。

2.2 積雪面上の熱収支観測の結果*

熱収支の各成分 S (放射による受熱), L (空気から積雪面に運ばれる顕熱), V (蒸発または昇華によって失われる潜熱), B (熱伝導によって積雪内に移行する熱量) の値およびそれらの値を熱収支方程式に代入して残差として得られた積雪の融解熱 M の値を表-3 にとりまとめて示す。

各成分の値を昼夜別に積算すると次のようになる。(表-4 参照)

* 瀬尾琢郎・山口信之 (1964): 融雪期における積雪面上の熱収支の一観測例, 農学研究, 50, No. 3, 139~149. (積雪面における熱収支の項参照)

表-3 積雪表面の熱収支
Thermal exchange on snow surface.
(Unit: cal cm⁻² per 3 hrs)

Time	S	L	V	B	M
25-26 days					
18-21 h	-21.6	-1.6	0.0	-1.4	-18.6
21-0	-22.5	-2.3	-1.4	-1.0	-17.8
0-3	-21.6	-3.8	-2.4	-1.9	-13.5
3-6	-18.0	-4.0	-3.3	-0.9	-9.8
6-9	10.8	-2.6	0.6	4.7	8.1
9-12	37.6	-5.2	5.1	1.3	86.4
12-15	63.3	-5.3	10.1	0.0	58.5
15-18	0.5	-4.8	4.5	0.0	0.8
26-27 days					
18-21 h	-20.7	-2.4	-2.8	-1.4	-14.1
21-0	-19.8	-1.8	-2.9	0.2	-15.3
0-3	-18.0	-3.4	-1.0	0.0	-13.6
3-6	-15.3	-4.5	-0.6	-1.3	-8.9
6-9	22.5	-4.1	2.2	2.4	22.0
9-12	78.0	-3.7	1.9	0.3	79.5
12-15	64.8	-5.4	6.5	0.0	63.7
15-18	13.0	-6.6	3.3	0.0	16.3
28 days					
6-9 h	11.3	-4.9	1.4	2.2	12.6
9-12	74.2	-17.6	10.1	0.0	81.7
12-15	60.8	-9.6	-0.3	0.0	70.7
15-18	13.1	-10.9	-2.9	0.0	26.9

S: net radiation on snow surface.
L: sensible heat flux on snow surface.
V: latent heat flux.
B: heat flux conducted into snow cover.
M: heat of fusion of snow.

表-4 熱収支の要約
Summary of heat balance items.
(Unit: cal cm⁻² per 12 hrs)

date	25/26	26	26/27	27	28
	18-6h	6-18h	18-6h	6-18h	6-18h
S	-83.7	162.2	-73.8	178.3	159.4
L	-11.7	-17.9	-12.1	-19.8	-43.0
V	-7.1	20.3	-7.3	13.9	8.3
B	-5.2	6.0	-2.5	2.7	2.2
M	-59.7	153.8	-51.9	181.5	191.9

屋間、好天の日(26, 27日), 積雪面の受ける熱の約60%が放射による受熱(S)で占められている。空気から積雪面に運ばれる顕熱(L)は全受熱量の約10%に達するが、蒸発による潜熱(V)によって相殺されて、結局積雪面とその直上の空気との間の熱交換は正味の量としては小さくなっている。また、伝導によって積雪内に移行する熱(B)も少量であり、このような時、積雪の融解熱(M)の大きさは放射による受熱量(S)によって規制されていると考えてよい。

28日は前2日に比し、乱渦によって空気から積雪面に運ばれる顕熱が増大し、蒸発は逆に減少している。表-4をみると、28日午後には凝結が起こっていることがわかる。これらのことは、暖かい湿った空気が流入する時、空気からの乱渦による熱輸送が融雪過程において重要な

要素となり得ることを示している。

夜間、積雪面からの放熱は放射過程のみによって行なわれている。全放熱量の約30%は、空気からの顕熱および潜熱の輸送(負のLとV)と、積雪内部からの伝導による熱移動(負のB)とによってバランスされるが、残り70%に相当する分が負のMとして現われている。これは夜間積雪表層が凍結する際放出される潜熱を表すものと考えられることができる。

次に、積雪の融解熱Mをとけた水量に換算した値M'と、積雪面の沈下量に直した値ΔHを、実測値ΔH_{obs}と対比して示す。

表-5 積雪の消融
Daily ablation of snow.

date		26	27	28
		6-18h		
M'	(g cm ⁻²)	1.92	2.27	2.39
ρ	(g cm ⁻³)	0.39	0.44	0.50
ρ(1-w/m)	(g cm ⁻²)	0.34	0.40	0.46
ΔH=M'/ρ	(cm)	4.9	5.2	4.8
=M'/ρ(1-w/m)	(cm)	5.6	5.7	5.2
ΔH _{obs}	(cm)	6	5-5.5	7

ΔH: depression of snow surface.

M: water equivalent of snow cover.

w/m: mean water content in snow cover.

このΔHは、積雪層に水がないとした場合(ΔH=M'/ρ, ρは実測された0~10cm層の平均密度)と、積雪内の氷のみがとけるとした場合(ΔH=M'/ρ(1-w/m)), w/mは実測された平均含水率)について示してある。正確な比較を行なうには、積雪の断面構造についての資料が必要であるが、計算値と実測値の一致は熱収支法による融解量の算出の可能性を示すに十分であるといえる。

2.3 融雪量計による融雪量、日射量ならびに小気候的連続同時観測の結果

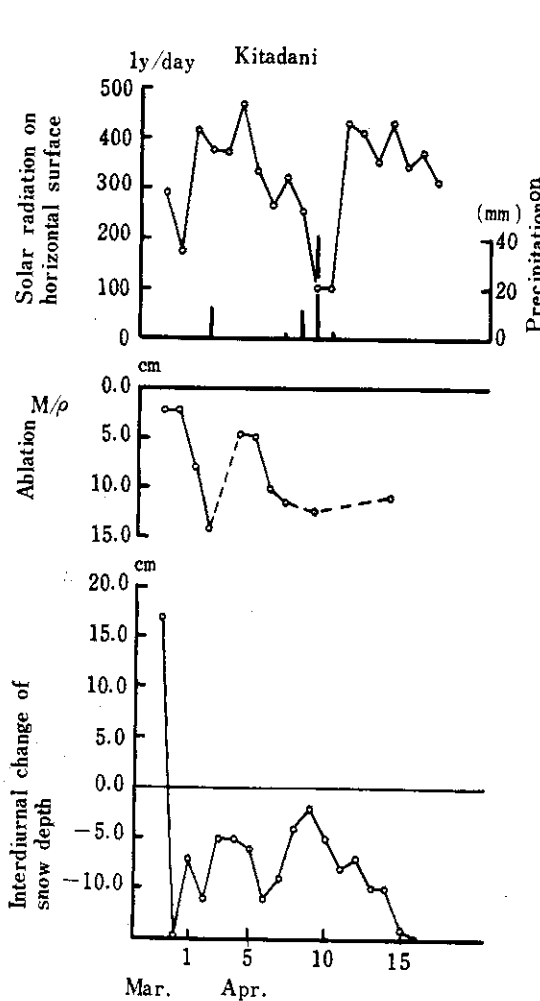
前記5地点において得られた積雪深その他の諸結果を各地点ごとに3月30日から長期積雪の終日(以後根雪の終日とする)までの平均値として、表-6に示す。

この結果によると、小原地点は、5地点の中では、海拔高度が高い割には、積雪深が少なく、また根雪の終日も早い。そして、高度の最も低い薬師地点と同じである。

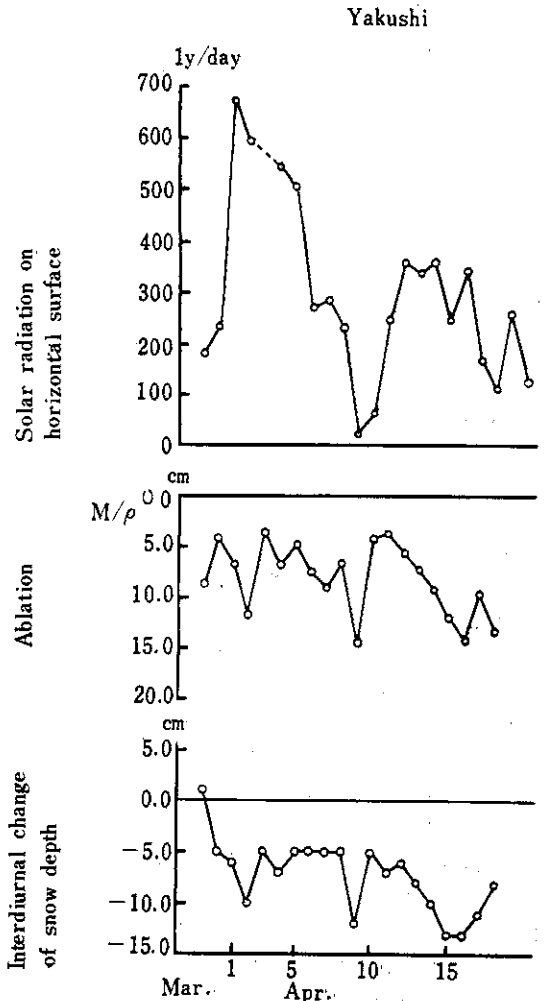
また、平均融雪速度(3月30日の積雪深を3月30日から根雪の終日までの日数で除した値)は、北谷、中野俣の両地点がほぼ同じ約8.9 cm/dayを示し、杉山地点が

表—6 流域内気候表
Climatological data in the river basin.

Element	Station	Yakushi	Kitadani	Sugiyama	Obara	Nakanomata
Elevation of point (m)		190	357	420	530	560
Snow depth on Mar. 30		146	186	193	148	284
The end of continuous snow cover		Apr. 18	Apr. 20	Apr. 22	Apr. 18	May 1
The ablation speed from Mar. 30 (cm/day)		7.68	8.86	8.35	7.79	8.84
The average solar radiation from Mar. 30 to the end of continuous snow cover (ly/day)		303	313	—	292	314
The average of max. temperature from Mar. 30 to Apr. 11 (°C)		15.73	17.51	15.79	15.61	11.04
The average of min. temperature from Mar. 30 to Apr. 11 (°C)		1.46	1.13	1.98	—	1.51
The average of mean temperature from Mar. 30 to Apr. 11 (°C)		8.60	9.32	8.89	—	6.31
The average wind speed from Mar. 30 to the end of continuous snow cover (m/s) (6—18 h)		0.77	0.74	1.09	0.66	0.45



図—2(1) 積雪深, 融雪量および日射量の変化
Interdiurnal change of snow depth, ablation and solar radiation.



図—2(2) 積雪量, 融雪量および日射量の変化
Interdiurnal change of snow depth, ablation and solar radiation.

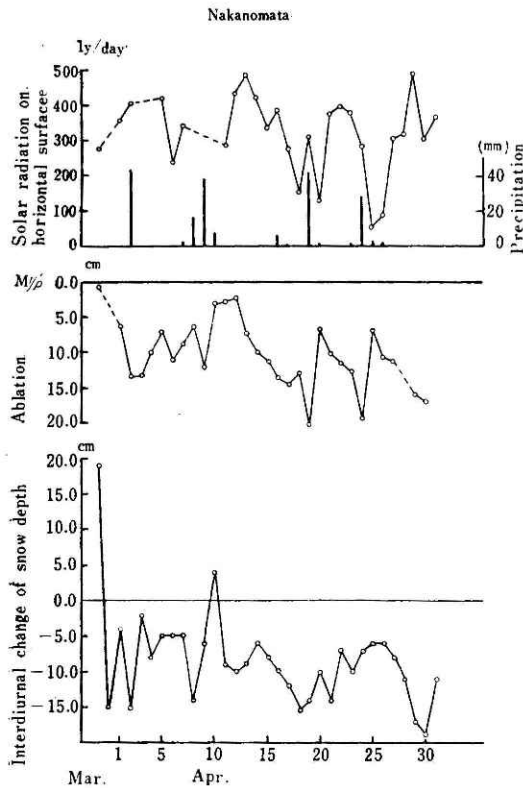


図-2(3) 積雪量, 融雪量および日射量の変化
Interdiurnal change of snow depth,
ablation and solar radiation.

約 8.4 cm/day, 小原地点は 7.9 cm/day, 薬師地点は約 7.7 cm/day の値を示している。

いま仮に, この平均融雪速度を算出した期間の平均雪密度を積雪測量の時の 0.52 g/cm^3 とし, 雪の含水率を熱収支観測時の値から約 0.09 とすると, この平均融雪速度を生ずるに要するおおよその熱量は, 中野侯, 北谷地点で約 334 cal, 杉山地点で約 316 cal, 小原地点で約 297 cal, 薬師地点で約 290 cal 程度で日射量と非常に近い値を示している。

すなわち, 雪面のアルベドを考慮しなければならないのはもちろんであり, 3月30日から各地点の根雪終日までの期間には雨の日もあったのであるが, 平均的にみて, この地域においては融雪に要する熱量の大半が日射量によるものと考えられる。

次に, 融雪量計による融雪量と積雪深の変化について考察してみよう。

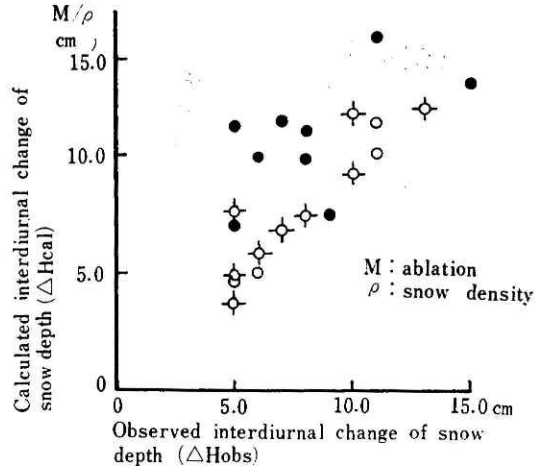


図-3 積雪深の変化と融雪量との関係
Relation between the calculated interdiurnal
change of snow depth (ΔH_{cal}) and the
observed change (ΔH_{obs}).

図-2は, 観測値の割合整っている薬師, 北谷, 中野侯の地点の実測積雪深変化 ΔH_{obs} (cm/day) と融雪量計によって測られた融雪量 (M') を雪密度 (北谷地点で測った表層 10 cm の値を用いた) で除した値 $\Delta H_{obs} = (M'/\rho)$, および水平面日射量の経過を3月30日から示したものである。さらに, 北谷, 中野侯地点については雨量も付記した。

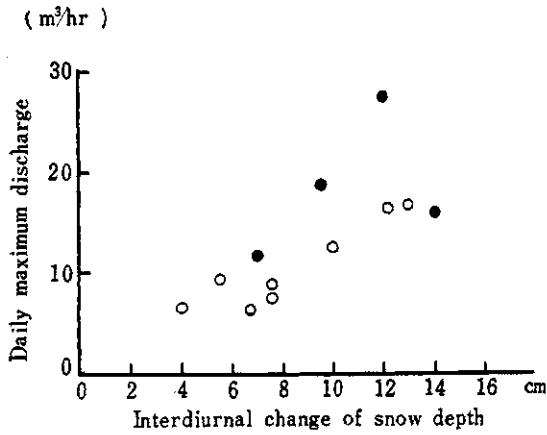
ΔH_{obs} と ΔH_{cal} は降雪, 降雨の日およびその後 1~2 日を除くとかなりよい一致をみせている。

そこで, この3地点の ΔH_{obs} と ΔH_{cal} の関係を降雪をみた日から4日目以後 (新積雪深が数 cm であり, 圧密沈下は少ないと考えられる。) と降雨日から3日目以後の晴れた日について図-3を作成した。

ΔH_{cal} を算出する際に用いた融雪量計による融雪量は, 毎日9時に測定したので, 前日の融雪水が網目に凍結していることが多く, この凍結分は注意深く取り, とかしてからメスシリンダーで全体の融雪量を測ったのであるが, 凍結による誤差は, いく分あるものと考えられる。

図-3から ΔH_{obs} と ΔH_{cal} との間には, ほぼ直線的な関係があり, 薬師地点 (✦) については, かなりよい一致が認められる。

次に, 単位日射量に対する ΔH_{cal} の変化を算出してみると, 晴れた日が3日~4日続くと, 大きな値を示



図—4 積雪深の減少と日最大流量の関係
Relation between daily maximum discharge
and interdiurnal change of snow depth.
(○: fine day, ●: rainy day)

し、また降雨の翌日にかかなり大きな値を示している。このことは、顕熱や潜熱の変化によることもあろうが雪層内含水率の変化がかなりあることを暗示しているように考えられ、含水率の連続観測が望まれる。

2.4 流出量調査の結果

流出量調査の結果によると日最大流量の出現起時は20時前後であり、最も融雪が盛んと考えられる時刻から数時間のおくれである。これは、流域の広さやこの時期の積雪深にもよると思われるが、一応この流域の融雪水の大半は、その日のうちに流出するとみられる。

そこで、上記5地点で求められた積雪深変化 ΔH_{obs} の平均値と日最大流出量の関係を図—4とし、両者の関係をみると、 ΔH_{obs} の増大に伴って、日最大流量が直線的に増大し、降雨日については、その雨量によってかなりちらばりがみられる。

まとめ

1. 昭和38年3月末の滝波川流域の総積雪相当水量は約 $9.6062 \times 10^7 m^3$ であった。
2. 昭和38年3月末の滝波川流域の融雪に要する熱量は正味の放射量によってその大半を占められている。
3. 融雪量計による融雪量から求めた ΔH_{cal} と ΔH_{obs} とは、圧密沈下がなくなってからの晴れた日にはほぼ等しい。ただし、単位日射量に対する ΔH_{cal} の値の変化から考えて含水率の連続観測が望まれる。
4. 日最大流出量は5地点の平均 ΔH_{obs} とほぼ直線関係にある。