

融雪期における積雪面上の熱収支の一観測例

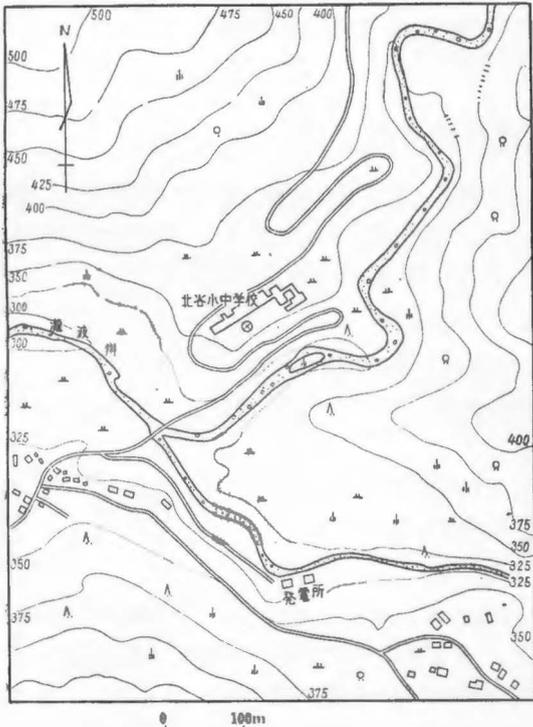
瀬尾 琢郎・山口 信之

1962/1963年冬の北陸地方の豪雪に際して、水温調査会は融雪出水の調査を計画し、1963年3月、滝波川（九頭竜川水系）流域で水文観測を実施した*。その際、熱収支法による融雪量の算定の可能性を検討するために行なわれた積雪面上の熱収支観測の結果を報告する。

観測に当り終始ご指導を受けた京都大学名誉教授滑川忠夫博士に深く感謝の意を表する。この研究の経費の一部は文部省科学研究費によった。

観測地点および期間

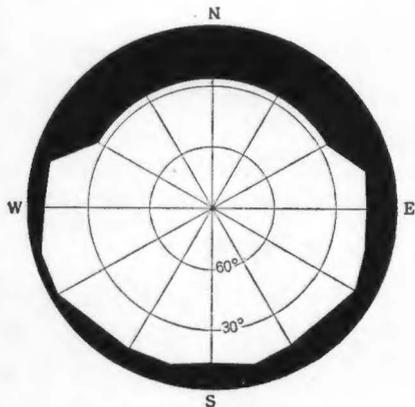
観測点はほぼ南東に面した斜面上の平坦地（福井県勝山市北谷小中学校校庭、海拔高度375m）に設けられた。付近の地形と観測点から見た地平線をそれぞれ第1図及び第2図に示す。



第1図 観測点付近の地形 観測点を⊗で示す

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。この間天気は比較的良好で27日朝までは快晴、同日午前中は薄曇りとなったが、午後からは一旦回復し、28日午後には本曇りとなり夕方から雨となった。

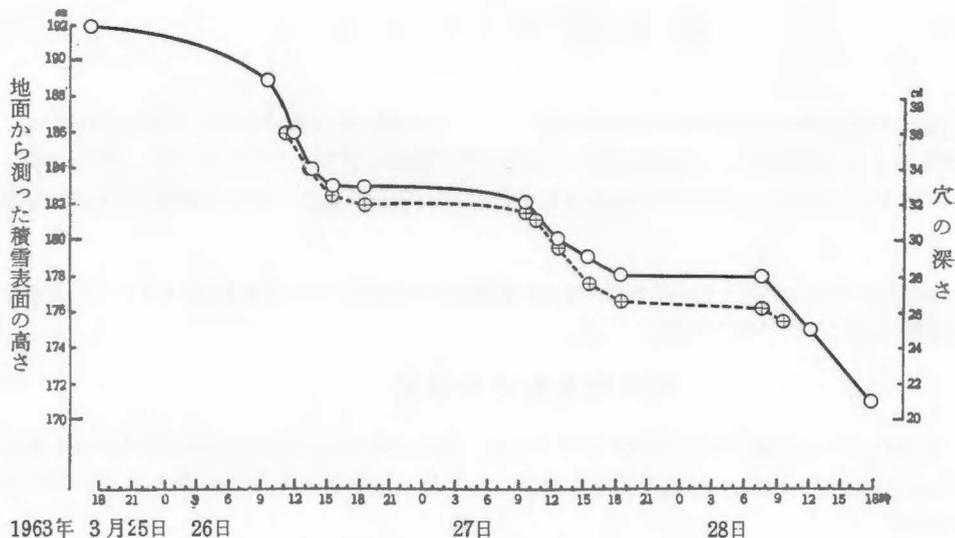
観測開始時校庭には深さ約2mの



第2図 観測点における地平線

* この調査は、昭和38年度科学技術試験研究「融雪出水に関する調査研究」として水温調査会が科学技術庁の委託を受けて行なったものである。

ザラメ雪の積雪があった。観測期間中の積雪面の沈下の経過を第3図に示してある。



第3図 地面から測った積雪表面の高さ(—○—)及び積雪にかけた径2 cmの垂直な穴の底の深さ(—⊕—)

熱収支成分の決定

積雪面の受ける正味の輻射量を S とし、乱渦により直上の気層に運ばれる顕熱を L 、蒸発又は昇華によって失われる潜熱を V とし、又熱伝導によって積雪内に移行する熱量を B 、融雪に使われる熱量を M とすると、これらの量の間に熱収支方程式

$$S = L + V + B + M$$

が成立つ。今回の観測では、 S, L, V, B の各成分を一般に使われている方法〔文献1, 2, 3, 4〕に準拠して測定又は算定し、積雪の融解熱 M は熱収支方程式の残差として算出することとした。

このために必要な観測は原則として昼間は1時間毎に、夜間は3時間毎に行なうこととし、各回の観測は定時から始め定時後10分に終るようにした。

(1) 輻射収支

積雪面が受ける正味の輻射量(全輻射交換量) S は従来使用してきた Albrecht 型輻射交換計〔4〕を使って測定された。測器は、受感部が雪面上高さ50 cmに来るように設置され、ミリボルトメーターで、10分間に30回の指示の読み取りを行ない、それに基づいて S の値を算出した。各定時の観測値から求めた3時間毎の平均値を付表1に与えてある。

付表1には、全輻射交換量のほかに水平面日射量と、短波長領域で積雪面が受ける正味の輻射量(短波輻射交換量)の観測値が記されている。水平面日射量は Gorczynski 日射計

で測定したものである。短波輻射交換量は、直径 6 cm の球形のガラスフラスコの中に封入した熱電堆を、雪面上高さ 50 cm に設置して測定した。これらは共に打点式自記電位差計で記録し、1 分おきの打点 10 を読み取って求めた値を各観測時の値としてとった。

以上の輻射計はいずれも Linke-Feußner の actinometer を標準とし日射を光源として検定したものをを用いた。

水平面日射量から短波輻射交換量を減じたものは積雪面で反射される短波輻射を表わすので、観測結果から積雪面の albedo (反射能) を算出することができる。その値は付表 1 に記されている通りで、この期間の albedo の値は 50 % 前後の値を示し、新雪の場合に比べかなり小さくなっていることが分る。

付表 1 には観測された全輻射交換量から短波輻射交換量を減じて求めた長波長における輻射交換量が示されている。その値から昼夜別の平均をとると次のようになる。

25/26日	26日	26/27日	27日	28日
18—6 h	6—18 h	18—6 h	6—18 h	6—18 h
-0.12	-0.10	-0.10	-0.07	-0.04
(cal cm ⁻² min ⁻¹)				

このように積雪面は晴天時 (25—27日) 昼夜を通じて 0.1 cal cm⁻² min⁻¹ 程度の熱を長波長領域で放出していると見ることが出来る。又 28 日午後高層雲が厚くなるにつれて、放熱量は減じ、遂に夕刻には受熱に転じていることは、このような場合大気からの逆輻射が積雪面の温度輻射を越えることがあり得ることを示している。

(2) 積雪面と空気との間の熱交換

積雪面からその直上の空気に運ばれる顕熱 L と、積雪面での蒸発又は昇華によって失われる熱 V は流体力学的方法によって算定することとし、計算は次の Thornthwaite の表式を用いて行なった。

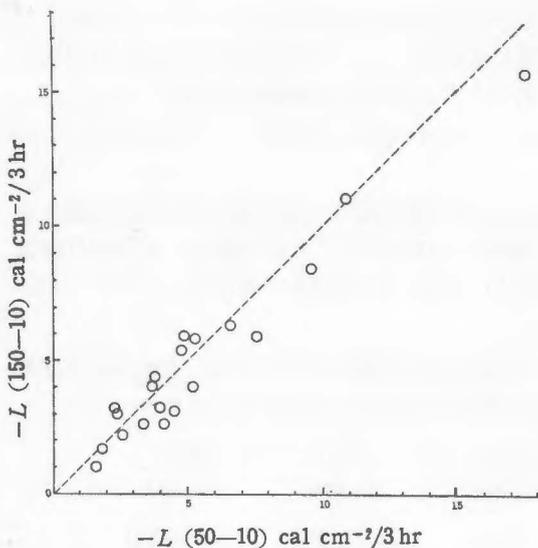
$$L = \frac{c_p \rho k^2 (U_2 - U_1) (T_1 - T_2)}{(\ln z_2/z_1)^2}$$

$$V = \frac{\left(\frac{600}{680}\right) \rho k^2 (U_2 - U_1) (q_1 - q_2)}{(\ln z_2/z_1)^2}$$

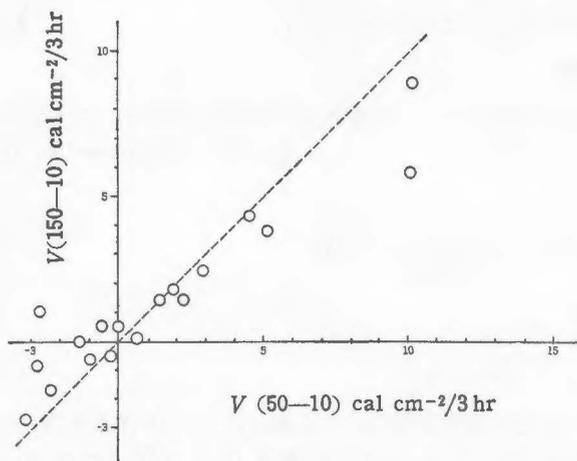
ここで、 $U_1, T_1, q_1; U_2, T_2, q_2$ はそれぞれ接地気層内の 2 高度 z_1, z_2 における風速、気温及び比湿を表わす。又 k は Kármán 常数 (0.4), ρ は空気密度 (1.25×10^{-3} g cm⁻³), c_p は空気の定圧比熱 (0.24 cal g⁻¹ deg⁻¹), 係数 $\left(\frac{600}{680}\right)$ は水の蒸発又は昇華の潜熱 (cal g⁻¹) である。

計算に使われた観測資料は付表 2 に示されている。風速は、理工研式小型ロビンソン風速計を用い 10 分間風程から求められた。気温と水蒸気圧は 2 台のアスマン通風乾湿計を使って測定し、高さ 50 cm と 10 cm での測定は同時に行なうようにした。

付表 2 に見られるように、気温の逆転は全期間を通じて存続し、その度合は夜間よりむしろ日中に強くなっている。水蒸気圧の垂直分布はそれ程簡単でないが、一般的に昼間は lapse の状態 (水蒸気圧が高さと共に減ずる) を示し、夜間は逆転を示している。28 日午



第4図 高さ50 cmと10 cmの観測値から計算された顕熱のフラックス $L(50-10)$ と、150 cmと10 cmの値から計算された $L(150-10)$ との比較



第5図 高さ50 cmと10 cmの観測値から計算された潜熱のフラックス $V(50-10)$ と150 cmと10 cmの値から計算された $V(150-10)$ との比較

後天気の悪化とともに、空気の水蒸気圧が積雪面における飽和蒸気圧（氷点における6.11 mb）より高くなっていくことに注目される。

第4図及び第5図で、それぞれ L と V について、高さ $z_1=10$ cm, $z_2=150$ cm の観測値を用いて計算した値を、 $z_2=50$ cm とした場合の値に比較してある。両者の一致は十分ではなく、流体力学的方法の適用に検討すべき点があることを示しているが、以下の熱収支の考察では、advection 及び安定度の影響が比較的小さいと見られる50 cmと10 cmの2高度の観測値から計算した値を採用することとする。

(3) 積雪内の伝導による熱交換

積雪内に伝導によって移行する熱 B は、かつて蛭ヶ野で行った観測の際に用いた方法〔4〕を踏襲して決定された。すなわち、表面から深さ10 cmまでの積雪層で交換される熱は、その温度の時間的変化と単位断面当りの熱容量から算出され、深さ10 cmの面を上下に移行する熱は Albrecht の地中熱交換計で測定された。 B は両者の和として求めることができる。関係の観測資料と、それに基づく計算の結果は付表3及び付表4に掲げられている。

積雪面における熱収支

上述のようにして定めた S , L , V , B の各成分の値及びそれら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 の値を付表5にとりまとめて示してある。

各成分の値を昼夜別に積算すると次のようになる。

	25/26日 18—6 h	26日 6—18 h	26/27日 18—6 h	27日 6—18 h	28日 6—18 h
	cal cm ⁻² /12 h				
<i>S</i>	-83.7	162.2	-73.8	178.3	159.4
<i>L</i>	-11.7	-17.9	-12.1	-19.8	-43.0
<i>V</i>	-7.1	20.3	-7.3	13.9	8.3
<i>B</i>	-5.2	6.0	-2.5	2.7	2.2
<i>M</i>	-59.7	153.8	-51.9	181.5	191.9

昼間 好天の日(26, 27日), 積雪面の受ける熱の約60%が輻射による受熱量(*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。又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*)の大きさは輻射による受熱量(*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している。第5表を見ると、28日午後には凝結が起っていることが分る。これらのことは、暖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うることを示している。

夜間 積雪面からの放熱は輻射過程のみによって行なわれている。全放熱量の約30%は、空気からの顕熱及び潜熱の輸送(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わすものと考えることができる。

次に、積雪の融解熱*M*を融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。

		26日	27日 6—18 h	28日
$M' = M/80$	g cm ⁻²	1.92	2.27	2.39
ρ	g cm ⁻³	0.39	0.44	0.50
$\rho(1 - w/m)$	g cm ⁻³	0.34	0.40	0.46
$\Delta H = M'/\rho$	cm	4.9	5.2	4.8
$= M'/\rho(1 - w/m)$	cm	5.6	5.7	5.2
ΔH_{obs}	cm	6	5—5.5	7

この ΔH は、積雪層に水がないとした場合($\Delta H = M'/\rho$, ρ は実測された0—10cm層の平均密度)と、積雪内の氷のみが融けるとした場合($\Delta H = M'/\rho(1 - \frac{w}{m})$), $\frac{w}{m}$ 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雪量の算出の可能性を示すに十分であるといえる。

文 献

- (1) Sverdrup, H. U. 1936. The eddy conductivity of the air over a smooth snow field. Geof. Publ. XI, No. 7.
- (2) Untersteiner, N. 1958. Grazial-meteorologische Untersuchungen im Karakorum II. Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B, 8 : 137.
- (3) Ambach, W. 1961. Investigations of the heat balance in the area of ablation on the Greenland Ice Cap. Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B, 10 : 278.
- (4) 関西電力株式会社：人工融電実験（昭和31年6月）
Seo, T. 1957-1958. A microclimatological study of thermal exchange at the earth's surface. The Meteorological Notes of the Meteorological Research Institute, Kyoto University Ser. 2, No. 17.
- (5) Geiger, R. 1961. Das Klima der bodennahen Luftschicht. 4. Aufl. S. 220.

付表 1 水平面日射量, 全輻射交換量 (S), 短波輻射交換量の観測値の3時間平均⁽¹⁾, 及びそれから求められた長波輻射交換量と albedo. 参考のため雲量と代表的雲形を付す

	水平面 日射量	全輻射 交換 (cal cm ⁻² min ⁻¹)	短波輻 射交換	長波輻 射交換	Albedo	雲量・雲形
3月						
25—26日						
18—21 h	0.01	-0.12	0.00	-0.12	—	1 Ac
21— 0	0.00	-0.12	0.00	-0.12	—	0
0— 3	0.00	-0.12	0.00	-0.12	—	0
3— 6	0.02	-0.10	0.00	-0.10	—	0
6— 9	0.36	0.06	0.17	-0.11	0.53	0
9—12	0.96	0.49	0.48	0.01	0.50	0
12—15	0.98	0.35	0.50	-0.15	0.49	0
15—18	0.33	0.00	0.16	-0.16	0.52	1 Ci
26—27日						
18—21 h	0.00	-0.12	0.00	-0.12	—	0
21— 0	0.00	-0.11	0.00	-0.11	—	0
0— 3	0.00	-0.10	0.00	-0.10	—	2 Ci
3— 6	0.01	-0.08	0.00	-0.08	—	6 Cs
6— 9	0.32	0.12	0.15	-0.03	0.53	10 Cs
9—12	0.98	0.43	0.50	-0.07	0.49	5 Cs
12—15	0.92	0.36	0.48	-0.12	0.48	2 *
15—18	0.25	0.07	0.13	-0.06	0.48	2 *
28日						
6— 9 h	0.28	0.06	0.15	-0.09	0.46	7 *
9—12	0.97	0.41	0.50	-0.09	0.48	8 As
12—15	0.71	0.34	0.35	-0.01	0.51	10 As
15—18	0.08	0.07	0.04	0.03	0.50	10 As

(1) 夜間は期間の初めと終りの観測値しかないが, その平均を期間の平均と見做している。

付表 2 風速, 気温及び水蒸気圧の観測値の3時間平均及び卓越風向

高さ (cm)	風速 (cm/sec)			気 温 (°C)			水蒸気圧 (mb)			風 向
	150	50	10	150	50	10	150	50	10	
3 月										
25—26日										
18—21 h	114	102	76	1.0	1.0	0.6	5.4	5.4	5.4	E
21— 0	132	114	90	-0.3	-0.9	-1.4	4.4	4.6	4.4	E
0— 3	128	112	84	-1.3	-2.0	-2.7	3.9	3.8	3.6	E
3— 6	108	100	73	-2.0	-2.6	-3.3	4.2	4.0	3.6	ENE
6— 9	107	89	69	0.9	0.7	0.1	4.2	4.1	4.2	W→E
9—12	111	90	66	7.9	7.8	6.7	4.1	4.2	4.8	WSW
12—15	102	79	58	10.8	10.0	8.8	3.4	3.6	5.2	WSW
15—18	129	110	84	8.5	7.7	6.8	4.4	4.7	5.3	W→E
26—27日										
18—21 h	126	113	87	3.4	2.7	2.2	5.1	5.6	5.3	E
21— 0	100	90	69	2.0	1.7	1.2	5.2	5.4	5.0	ENE
0— 3	88	82	54	2.2	1.6	1.0	5.4	5.4	5.3	ENE
3— 6	107	104	70	2.0	1.4	0.8	5.3	5.4	5.4	ENE
6— 9	97	91	70	5.3	5.0	4.0	5.0	5.1	5.4	E→NW
9—12	95	(75)	55	10.7	10.2	9.3	4.5	4.6	4.9	W
12—15	120	98	73	13.3	12.6	11.5	*	4.0	4.7	SW
15—18	136	113	88	9.9	9.4	8.1	*	5.3	5.7	SW→E
28 日										
6— 9 h	94	77	59	7.7	6.7	5.4	5.0	5.1	5.3	E
9—12	257	220	170	14.8	14.0	12.3	*	4.6	5.3	不定
12—15	189	168	130	14.8	14.1	12.8	6.9	6.9	6.8	E
15—18	232	197	156	13.1	12.4	11.1	8.0	7.9	7.7	S~E

() 内の値は推定値.

付表 3 雪温 (T_s), 0—10 cm 層の積雪密度 (ρ) 及び含水率 (w/m) の測定値と, それから算出される積雪層 (0—10 cm) で交換される熱 ($\int_0^{10} C\rho \frac{\partial T_s}{\partial t} dz$)

	雪 温 (T_s) (°C)			ρ g cm ⁻³	w/m (%)	$\int_0^{10} C\rho \frac{\partial T_s}{\partial t} dz$ (3)	(cal cm ⁻² /3hr)
	表面	5 cm	10 cm				
3月							
25—26日						25—26日	
18 h	-0.7	-0.1	(0.0)	0.32	13	18—21 h	-1.4
21	-3.5	-0.2	(0.0)	*	*	21—0	-1.0
0	-5.1	-0.4	-0.3	0.30	0	0—3	-1.8
3	-7.7	-1.6	-0.2	*	*	3—6	-0.8
6	-7.6	-2.6	-0.9	0.28	0	6—9	4.8
9	-0.9	-0.7	-0.2	0.36	14	9—12	1.4
12	(0.0)	(0.0)	(0.0)	0.45	24	12—15	0.0
15	(0.0)	(0.0)	(0.0)	0.43	18	15—18	0.0
18	-0.2	(0.0)	(0.0)	0.41	8		
26—27日						26—27日	
18 h	-0.2	(0.0)	(0.0)	0.41	8	18—21 h	-1.4
21	-2.3	-0.2*	(0.0)	0.42	8	21—0	0.2
0	-2.4	0.0*	(0.0)	*	7	0—3	0.0
3	-2.4	-0.1*	(0.0)	0.39	0	3—6	-1.2
6	-2.7	-1.1*	(0.0)	0.40	0	6—9	2.5
9	(0.0)	(0.0)	-0.3	0.48	12	9—12	0.3
12	(0.0)	0.0	(0.0)	0.45	13	12—15	0.0
15	(0.0)	(0.0)	(0.0)	0.47	10	15—18	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.39	13		
28日						28日	
6 h	-2.7	-0.7	-0.4	0.44	0	6—9 h	2.2
9	-0.3	0.0	-0.5	0.49	6	9—12	0.0
12	(0.0)	0.0*	(0.0)	0.50	21	12—15	0.0
15	(0.0)	0.0*	(0.0)	0.50	9	15—18	0.0
18	(0.0)	0.0*	(0.0)	0.55	10		

(1) 雪温は熱電対温度計による観測値の外, 水銀温度計で測定した値 (* を付けて示す) をもってある。() 内の値は推定値。

(2) w は, 採取した雪の試料 mg 中の水の質量 (g)

(3) 積雪の比熱 $C = \frac{w}{m} + 0.5 \frac{m-w}{m}$ (水の比熱と氷の比熱の和)。

付表 4 Albrecht 型地中熱交換計で測定された積雪内の深さ
 $Z=10\text{ cm}$ における温度傾度 ($\partial T_s/\partial z$), 熱伝導率
 (λ) 及びフラックス ($-\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=10}$)

	$\frac{\partial T_s}{\partial z}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)	$10^4 \cdot \lambda$ (1) (cgs)		$(-\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big _{z=10})$
3月 25—26日			25—26日	
18 h	0.0	1.7	18—21 h	0.0
21	0.0	*	21—0	0.0
0	0.05	1.5	0—3	-0.1
3	0.05	*	3—6	-0.1
6	0.05	1.2	6—9	-0.1
9	0.15	*	9—12	-0.1
12	-0.05	1.7	12—15	0.0
15	0.0	*	15—18	0.0
18	0.0	1.8		
26—27日			26—27日	
18 h	0.0	1.8	18—21 h	0.0
21	0.0	*	21—0	0.0
0	0.0	*	0—3	0.0
3	0.0	*	3—6	-0.1
6	0.15	*	6—9	-0.1
9	0.0	1.5	9—12	0.0
12	0.0	*	12—15	0.0
15	(0.0)	1.8	15—18	0.0
18	0.0	2.3		
28 日			28 日	
6 h	0.0	*	6—9 h	0.0
9	0.0	2.0	9—12	0.0
12	0.0	2.5	12—15	0.0
15	0.0	3.3	15—18	0.0
18	0.0	*		

(1) 従来値 [文献5] に比べ過少であるように思われるが、以下の計算にそのまま使用した。

付表 5 積雪面における熱収支

S = 全輻射交換量； L = 乱渦による顕熱の輸送；
 V = 蒸発（凝結）又は昇華； B = 積雪内の伝導による熱交換； M = 積雪の融解熱

	S	L (cal cm ⁻²)	V per 3 hours	B	M
25—26日					
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	87.6	-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日					
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 日					
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