



Title	融雪期の顕熱フラックス I : バルク法と渦相関法の比較
Author(s)	石川, 信敬; ISHIKAWA, Nobuyoshi; 小林, 俊一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 41, 109-116
Issue Date	1983-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18462
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_p109-116.pdf



融雪期の顕熱フラックス I*

——バルク法と渦相関法の比較——

石川信敬・小林俊一・小島賢治

(低温科学研究所)

(昭和57年10月受理)

I. ま え が き

顕熱伝達量 Q を $Q=K\Delta T V$ の式を用いて求める方法がある。融雪期においては全融雪熱量から日射融雪熱量を差し引いたもの(気温融雪熱量)を上式の Q とし、一方積雪表面近傍の気温と表面温度の差 ΔT 、風速 V を測定し上式の定数 K が経験的に求められる。これまでの測定において Q を1時間あたりの熱量、 ΔT と V を1時間平均値であらわすと K は0.3~0.4の値をとるものが多い^{1,2)}。

近年超音波を利用した風速温度計の開発が進み、顕熱伝達量を精度よく直接的に求めることが可能になった。この顕熱測定は渦相関法と呼ばれるが³⁾、一方上式で求める方法はバルク法と呼ばれる³⁾ ものの一種である。

融雪期の日中に気温は正(プラス)になり、積雪表面では融雪のため表面温度は0°Cに保たれる。さらに夜間には放射冷却により表面温度は気温より低くなるので、融雪期の晴天日には昼夜にわたって恒常的に接地逆転が存在している。すなわち融雪期の顕熱測定は雪面付近の大気が強い安定な状態における測定といえる。

筆者らは融雪期において渦相関法による顕熱伝達量を測定し、バルク法による値と比較を行なった。さらに経験定数 K についての考察を試みた。

II. 観測の方法と結果

(1) 観測方法

1982年4月20日~28日に北海道北部の母子里において融雪期の熱収支観測を行なった。積雪表面上1.2~1.5mにおいて各気象要素を測定したが、観測項目と使用測器は第1表に示した。

雪尺の読みとり、密度と含水率の測定は1日2回(09^h-10^h, 17^h-18^h)行なった。

(2) 観測結果

(i) 気象要素の時間変化

気温(AT)、表面温度(T_0)、風速(V)の1時間平均値を第1図に示した。なお、図には温

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2496号

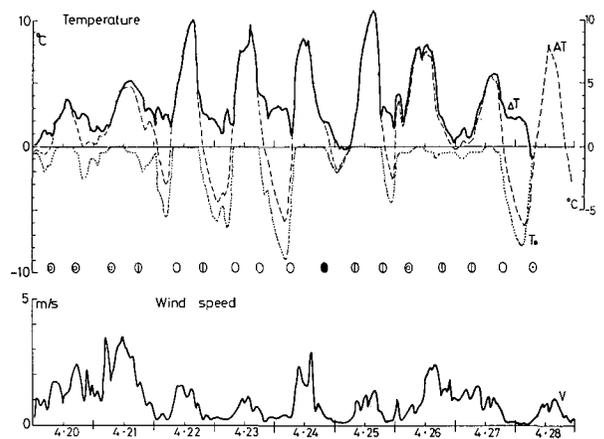
第1表 観測項目と使用測器

測定項目	表面からの高さ	使用測器	備 考
気 温	1.2 m	測温抵抗体	シェルター内, 通風
〃	0.2, 1.2, 5.5 m	〃	通風なし, 6 m ポール
風 速	1.2 m	エアロベーン	10 分移動平均値
〃	0.5, 1.5, 3.0, 5.5 m	3 杯光電式	6 m ポール, 10 分平均値
露 点	0.3, 1.4 m	塩化リチウム露点計	
日射, 反射量	1.5 m	MS-42, ゴルチンスキー	
波長別日射量	〃	MS-800, 日射計	フィルター, 395 nm, 705 nm
正味放射量	〃	CN-11 示差放射計	
表面温度		赤外線放射温度計	
		測温抵抗体	
雪中温度	-2, -5, -15 cm	測温抵抗体	17h リセット
雪中熱流量	0~0.4 m a.g.s.	熱流板	a.g.s. (地表面上)
顕熱フラックス	1.2 m	超音波風速温度計 (DAT-100)	
融 雪 量		雪尺, ラインメータ	09h, 17h 雪尺読みとり
積 雪 密 度	0-2.5 cm, 5-10 cm	サンプラー	09h, 17h 測定
含 水 率	0-2.5 cm, 5-10 cm	秋田谷式含水率計	09h, 17h 測定

度差 $\Delta T (=AT - T_0)$ と 09 時, 17 時の天気も示してある。20 日~21 日午前は風の強い曇天日で気温の日較差は小さかった。21 日午後~24 日午前と 25 日~28 日は晴天日で, 最高気温 $+10^\circ\text{C}$ 以上, 最低気温 -6°C 以下で大きな日較差を示した。24 日夕方より 25 日朝にかけては降雨があった。融雪が生じる日中に表面温度は 0°C を保ち, 夜間はほとんどの場合放射冷却のため表面温度は気温より低くなり, ほぼ観測全期間中接地逆転 ($\Delta T > 0$) が存在した。とりわけ日中により強い逆転が現われている。

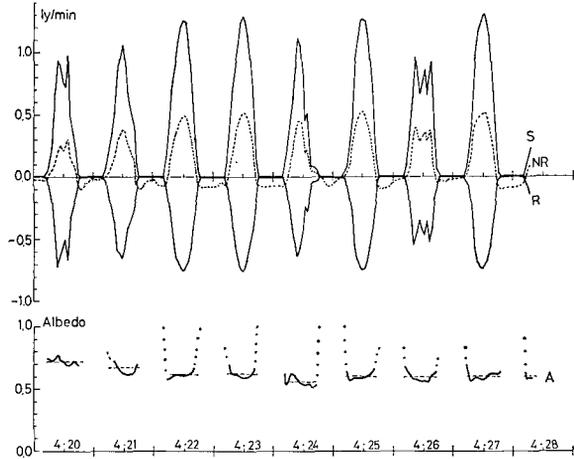
天気が良い時, 風速は日変化を示し日中に強く夜間に弱くなっているが, この風については, 盆地における風の特徴として以前に詳しく報告した⁴⁾。このような風の時, 気温の日較差も大であるが, 天気が良くても夜間に風が強い時 (例えば 26 日夕方~27 日早朝) や, 夜の風が弱くても天気が悪く雲の多い状態 (例えば 24 日夕方~25 日早朝) では, 夜間の冷却は進まず ΔT は小さい。

第 2 図には放射各成分の時間変化を示した。S は全天日射量, R は雪面反射量, NR は正



第1図 気温 AT , 風速 V , 表面温度 T_0 , 温度差 $\Delta T (=AT - T_0)$ の時間変化 (1 時間平均値)

味放射量, A は積雪表面アルベードであり, 値は1時間平均値で熱量の単位は ly/min である。アルベードは早朝と夕方到大, 日中に小さくなる太陽高度依存性⁵⁾を示しているが, 太陽高度毎の検定を測器にほどこしていないため, 低高度におけるアルベードの検討はここでは行なわない。日中の融雪が生じている時のアルベード A は $0.54\sim 0.60$ の値をとり, 冬期に比べて $0.3\sim 0.2$ 程小さい値となっている。日射が大でアルベードが小さいため短波長放射吸収が増し日中の正味放射量は, 最大約 $0.5 \text{ ly}/\text{min}$ にもなった。



第2図 放射各成分の時間変化図(1時間平均)

S: 日射量, R: 反射量, NR: 正味放射量
A: 表面アルベード

(ii) 顕熱フラックスの測定

先にのべたように顕熱伝達量の測定にはいくつかの方法がある³⁾。この観測ではまず,

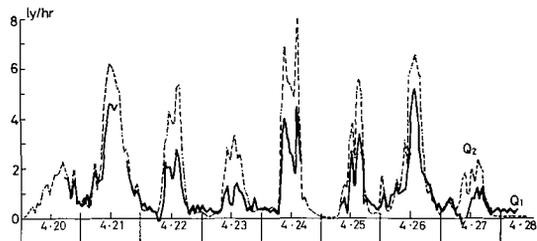
$$Q_1 = \rho C_p \overline{W'T'} \quad (1)$$

の式を用いて求めた。ここで, Q_1 は渦相関法により得られた顕熱伝達量, ρ は空気密度, C_p は空気の定圧比熱, W' は風速の垂直成分の変動量, T' は気温の変動量であり, W' と T' は超音波風速温度計 (DAT-100) を用いて測定し, フラックスメーター (UDF-03, 平均時間 60 秒), ミーンメーター (平均時間 600 秒) を用いて処理した。

顕熱伝達量はバルク法からも求められ,

$$Q_2 = K \Delta T V \quad (2)$$

の式を使用した。ここで K は経験定数, ΔT は気温 (AT) と表面温度 (T_0) の差, V は風速である。融雪期の K の値は色々報告されているが²⁾, 本研究では母子里で長年にわたって観測を行なっている小島ら²⁾の求めた $K=0.38$ を用いた。なおその時の ΔT , V は 1 m 高度において測定された値の1時間平均値であり Q_2 の単位は ly/hr である。今回の気温, 風速の測定高度は, 融雪による積雪表面沈下により約 40 cm 変化したが, 平均 1.2 m とした。 $K=0.38$ を得た時の測定高度より約 20 cm 程高くなっているが, 気温も風速も両高度でほとんど差がないためにそれらの値に補正を加えてはいない。



第3図 顕熱伝達量 (ly/hr) の時間変化図

実線: Q_1 点線: Q_2

第3図は(1), (2)式を用い1時間平

均値で表わした顕熱伝達量の時間変化である。24日午後より25日早朝にかけては雨のため垂直方向に設置した超音波風速温度計のプロープ部分に水滴がつき欠測となっている。顕熱量は昼と夜で大きく異なる時間変化を示している。渦相関法による値 Q_1 と比較するとバルク法から求めた Q_2 は、日中により大、夜間により小さくなっている。

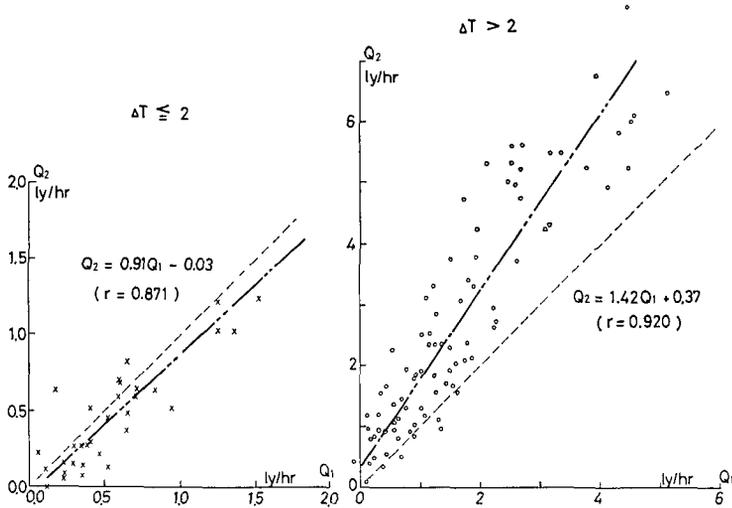
(1), (2)式から求めた顕熱量 Q_1 と Q_2 の関係を逆転の大きさ (ΔT) に注目して第4図に示した。なお $\Delta T \leq 2^\circ\text{C}$ の図において横、縦座標軸のスケールは $\Delta T > 2$ の2.5倍になっている。逆転が小さい時 ($\Delta T \leq 2^\circ\text{C}$) は、

$$Q_2 = 0.91 Q_1 - 0.03 \quad (\text{相関係数 } r = 0.871),$$

逆転が大きい時 ($\Delta T > 2^\circ\text{C}$) では、

$$Q_2 = 1.42 Q_1 + 0.37 \quad (\text{相関係数 } r = 0.920)$$

の関係式が得られた。逆転が小さい時バルク法から求めた顕熱量は渦相関法で求めた値より小さく、逆転が大きくなると渦相関法で求めた値より大きくなっている。第3~4図から(3)式で用いた経験定数 $K = 0.38$ は逆転の大きな日中には大きすぎ、逆転の小さな夜間には小さ過ぎたことになる。



第4図 逆転の大きさ (ΔT) 別に比較した渦相関法とバルク法による顕熱伝達量 (ly/hr) 破線は $Q_2 = Q_1$ をあらわす

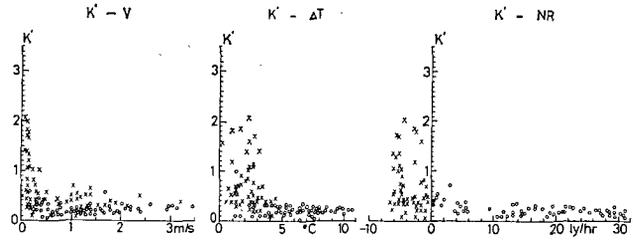
(iii) 経験定数 K の決定

渦相関法において求められた顕熱伝達量 Q_1 を真の値としてバルク法で使用する定数が算定される。すなわち

$$K' = \frac{Q_1}{\Delta T V} \tag{3}$$

第5図に各気象要素と(3)式で求めた経験定数の関係を示した。左は定数と風速 ($K' - V$), 中央は定数と温度差 ($K' - \Delta T$), 右は定数と正味放射量 ($K' - NR$) であり, (○) は日中 ($NR \geq$

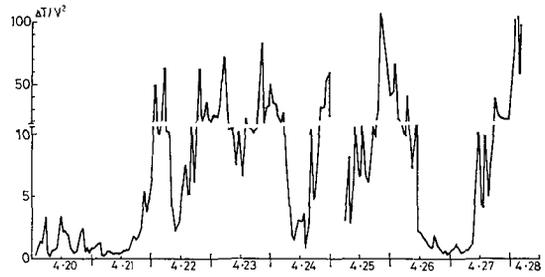
0), (×) は夜間 ($NR < 0$) を意味する。風速 V と K' から、日中は風が弱くても K' は一定値をとるが、夜間には弱風 ($V < 0.5$ m/s) 時に K' はばらつき大きな値も現われている。逆転度 ΔT と K' の関係からも日中はほぼ一定値になるが、夜間には $\Delta T < 3^\circ\text{C}$ で K' は大きな値をとる。 $K' - NR$ の図で日中と夜間にお



第5図 定数 K' と各気象要素の関係

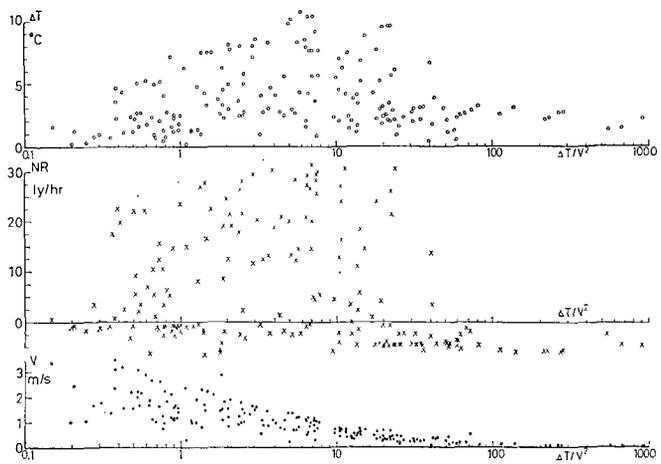
$K' - V$ (定数と風速), $K' - \Delta T$ (定数と温度差),
 $K' - NR$ (定数と正味放射量)

ける K' の相違がはっきり表われている。日中に K' は平均 0.26 の値をとった。逆転時でしかも ΔT が大であるほど大気は安定になると思われる。しかし大気の安定度は気温差と風速に依存する。そこで大気安定度の目安として安定比⁶⁾ $L = \Delta T / V^2$ を求めた。第6図は安定比の時間変化を示したものである。晴天弱風日の夜間に安定比は大きくなっている。すなわち融雪期の夜間には日中に比べて ΔT はそれ程大きくはないが、風が弱くなるため大気は非常に安定になる。



第6図 安定比 $L (= \Delta T / V^2)$ の時間変化
(1時間平均値)

大気が安定な状態 ($L > 0$) での各気象要素 (気温, 風速, 正味放射量) と安定比の関係を第7図に示した。横軸は対数目盛である。 ΔT と安定比の間には、はっきりした関係はなく安定比 1~20 で



第7図 安定比 L と各気象要素の関係 (横軸対数目盛)

ΔT : 温度差 $= AT - T_0$ ($^\circ\text{C}$), NR : 正味放射量 (ly/hr),
 V : 風速 (m/s)

大きな逆転が現われている。先に述べたように融雪期の日中には、積雪表面は日射を受けても融雪のため温度は強制的に 0°C に保たれるが、気温は 0°C 以上に上昇しその結果大きな逆転となる。一方、夜間には放射冷却により積雪表面はエネルギーを失い表面温度は降下するがそれ程大きな逆転は現われていない。強い安定時に大きな逆転が現われないのは、積雪表面層内における融雪水が再凍結し潜熱を

放出し表面温度の降下を妨げているためと思われる。風速と安定比の間には、はっきりした関係がみられ、よく知られているように安定比が増大する程、風速は小さくなっている。正味放射と安定比には関係がなく、日中 ($NR \geq 0$) において安定比は 50 以下、夜間 ($NR < 0$) には 0.1 から 1000 までの広い値をとっている。

第 8 図は日中と夜間の別に安定比 L と K' の関係を示したものである。安定比が 10 以下では、夜間、日中ともにバラつきが小さく平均して

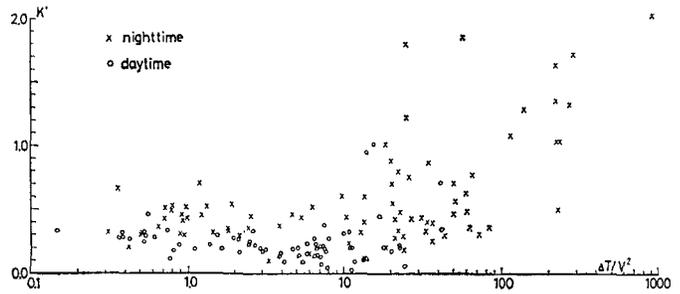
$K' = 0.26$ (日中), $K' = 0.47$ (夜間) を得る。しかし、安定比が大きくなると K' は非常にバラつく。観測期間中の K' の時間変化を第 9 図に示した。夜間の K' の値は観測日によって大きく変動する。しかし日中は観測日の違いによる変化は少なく 0.2~0.35 の範囲にある。

先に述べたごとく日中よりも夜間の方が安定度は増加し、顕熱伝達量は日中大で夜間は極めて小さい値になった。しかし定数 K' の値は日中より夜間に増大した。(2) 式の定数 K をバルク係数と考えると、安定度が增加する程係数が大きくなるという矛盾した現象になる。これまでのところ、この現象を説明するデータをもたないが、弱風強安定時には乱流拡散だけでなく対流、移流、波動といった別の熱輸送のメカニズムがあるのかもしれない。著者らは冬期の積雪表面上の気温の測定より、放射冷却が卓越する夜間に極めて大きな気温の短周期変動を報告したが⁷⁾、この定数 K の増加と関係があるように思われる。強安定時の乱流構造についていくつかの報告があるが^{8,9)}、さらに詳しい解析が待たれる。

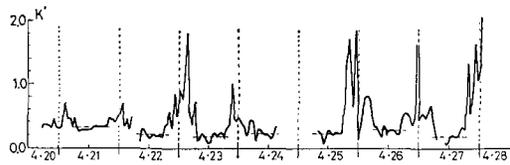
第 6, 8, 9 図で示したように顕熱量 (気温融雪量) を算定する経験定数は、日中において、安定度にかかわらずほぼ一定の値を得た。第 10 図は ΔTV と $Q_1 (= \rho C_p \bar{W}' T^v)$ の関係を示したもので、

$$Q_1 = 0.26 \Delta T \cdot V - 0.1 \quad (r = 0.904) \quad NR \geq 0$$

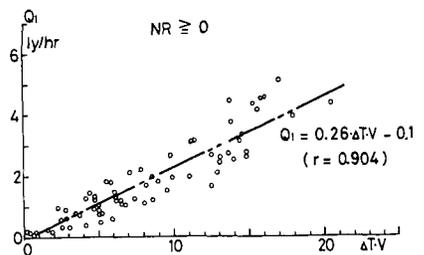
の関係式を得た。経験定数 K' はこれまでに報告されたものの中でもっとも小さい。観測期間中の 09^h~17^h の気温融雪量 Q 、正味放射量 (NR) 及び顕熱伝達量 (2) 式 Q_2 、及び $Q_2' = 0.26 \Delta TV$ を第 2 表に示した。本観測期間中の蒸発潜熱は実測と水蒸気圧勾配を用いたバルク法から算定したが、いずれも小さく (日中の



第 8 図 安定比 L' と経験定数 K'
(○) 日中 (×) 夜間



第 9 図 経験定数 K' の時間変化



第 10 図 日中の経験定数 K' の算定

第2表 日中(09^h~17^h)の融雪熱量 M , 正味放射量 NR , 顕熱伝達量 (Q_1, Q_2, Q_2')

日	Δh (cm)	$\bar{\rho}_w$ (g/cm ³)	M (ly)	NR (ly)	$Q = M - NR$ (ly)	Q_2	Q_2'	$\frac{Q}{Q_2}$	$\frac{Q}{Q_2'}$
						$K=0.38$ (ly)	$K'=0.26$ (ly)		
4/20	3.2	0.38	97.3	88.8	8.5	12.7	8.7	0.67	1.06
4/21	4.6	0.44	161.9	130.8	31.1	41.1	28.1	0.76	1.11
4/22	5.8	0.44	204.2	174.6	29.6	31.1	21.3	0.95	1.39
4/23	5.5	0.45	198.0	183.0	15.0	19.9	13.6	0.75	1.10
4/24	4.1	0.45	147.6	108.0	39.6	38.6	26.4	1.03	1.50
4/25	5.0	0.51	204.0	185.7	18.3	26.8	18.3	0.68	1.00
4/26	4.4	0.45	158.4	135.6	22.8	38.5	26.3	0.59	0.87
4/27	5.3	0.46	195.0	187.2	7.8	13.3	9.1	0.59	0.86
4/20~4/27	37.9		1366.4	1193.7	172.7	222.0	151.8		
平均	4.7	0.45	170.8	149.2	21.6	27.8	19.0	0.78	1.14

最大値 2 ly, 最低 0.5 ly), 日射融雪量の 1/10 以下であるため無視した。すると, 全融雪量 M より日射融雪量 NR を除いた気温融雪量 Q から日平均顕熱量 21.6 ly を得る。一方 $K'=0.26$ を用いて $Q_2'=19.0$ ly, $K=0.38$ を用いて $Q_2=27.8$ ly の値を得た。この時, 渦相関法による顕熱量は $Q_1=17.7$ ly であった。右端には気温融雪量 Q と顕熱量 (Q_2, Q_2') の比を示したが, 1 日毎さらに全観測期間中にわたっても $K=0.26$ を使用した場合の方が精度はよくなっている。

III. ま と め

融雪期の顕熱伝達量を渦相関法とバルク法で求め, バルク法の経験定数 K を算定した。その結果 ① 顕熱量は顕著な時間変化を示し, 日中に大, 夜間に減少した。② 融雪が生じている日中には, 大気安定状態のいかんにかかわらず定数 K はほぼ一定の値 ($K=0.26$) をとり, この値を使って気温融雪量を求めることができた。③ 夜間において定数 K は増加し変動も大であった。融雪期の積雪表面近傍において, 日中は風速が増加する一方, 気温と表面温度の差も増す。夜間の温度差は日中程大きくないが, 風が弱くなり $\Delta T/V^2$ で定義した安定比は日中より大となる。安定な大気状態で経験定数はどのような乱流現象を反映しているのか今後の詳しい観測が待たれる。

謝 辞

本観測を行なうにあたり北海道大学雨竜地方演習林母子里作業所の皆様に多大の援助を頂いた。データ収集には低温科学研究所融雪部門及び大学院生の協力を得た。理学研究科学生本山秀明君にはデータの計算機処理に協力して頂いた。深く感謝いたします。この研究に要した費用の一部は文部省科学研究費補助金(自然災害特別研究(1), 寒冷地域における融雪および融雪流出の予測に関する雪氷学的研究, 代表者小林大二) から支出された。

文 献

- 1) 成瀬廉二・大浦浩文・小島賢治 1970 気温融雪の野外研究. 低温科学, 物理篇, **28**, 191-202.
- 2) 小島賢治 1979 融雪機構と熱収支. 気象研究ノート, 第 **136**号, 1-38.
- 3) 竹内清秀・近藤純正 1981 大気科学講座 1. 地表に近い大気, 東京大学出版会, 226 pp.
- 4) 石川信敬・小島賢治 1979 母子里における盆地風について. 低温科学, 物理篇, **38**, 113-119.
- 5) Carroll, J. J. and Fitch, B. W. 1981 Effects of solar elevation and cloudiness on snow albedo at the South Pole. *J. Geophys. Res.*, Vol. **86**, No. C6, 5271-5276.
- 6) 和達清夫監修 1974 気象の事典. 東京堂出版, 704 pp.
- 7) 石川信敬 1979 安定層内の気温変動について. 低温科学, 物理篇, **38**, 179-182.
- 8) 小林俊一 1972 盆地冷却における接地気層の乱流構造. 低温科学, 物理篇, **30**, 93-102.
- 9) Kondo, J., Kanechika, O. and Yasuda, N. 1978 Heat and momentum transfers under strong stability in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1012-1021.

Summary

A number of methods enable to estimate sensible heat flux. Since the heat amount of snow-melting (M) and net radiation amounts (NR) were measured, the heat amount of snow-melting (Q) due to the sensible heat flux is obtained as the difference of (M) and (NR) in the snow-melting season.

On the other hand the wind velocity (V) and the temperature difference (ΔT) at two heights above the snow surface were measured; one gets the sensible heat flux (Q_2) using the relation of $Q_2 = K\Delta TV$, where K is the empirical constant. This is called the bulk method. Values of K obtained by many investigators converge around 0.3~0.4 using one hour mean values of ΔT and V .

Recently the sensible heat flux (Q_1) is measured directly by using the ultrasonic anemometer, which is called the eddy correlation method. The measurements of sensible heat flux were carried out by using three different methods (bulk, correlation and heat amount of snow-melt) at Moshiri in April 1982.

Time variations in sensible heat flux were investigated, and Q_2 were compared with Q_1 in order to decide the empirical constant K . The following are the results obtained:

- (1) the remarkable time variations in sensible heat flux were obtained, which showed the maximum and the minimum in the daytime and at night, respectively;
- (2) the values of K which were obtained the daytime were around 0.26 regardless of the stability ratio;
- (2) the values of K at night were scattered widely in the region of the high stability ratio.