HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪中の融雪水の皮膜流下速度　I
Author(s)	小林, 大二
Citation	低温科學. 物理篇, 31, 135-142
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18225
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_p135-142.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Daiji KOBAYASHI 1973 Flow-Down Speed of Melt Water in Snow Cover, I. *Low Temperature Science, Ser. A, 31.* (With English Summary p. 141)

積雪中の融雪水の皮膜流下速度 (1)

小林大二
(低温科学研究所)

(昭和48年0月受理)

I. まえがき

融雪期における熱収支と水収支の研究を小島を中心として1967年以来，北海道北部の多雪地帯の母子里盆地において行っている（大浦他[1]，小林他[2]，小島他[3),4),5)]）。選定した流域面積は11.4 km²，高度差300 m足らずの小流域であり，平均して深さ2 m前後の積雪が4月中旬から5月上旬にかけて融ける。この流域末端における流量のピークは流域の融雪量のピークより5～8時間遅れる。この遅れには，斜面を河道まで流下する時間と河道を流下する時間が含まれるのはもちろんであるが，他に積雪中を垂直に流下する時間として1 mの積雪に対して2時間前後はみこまれる。

積雪中の融雪水の動きは吉田[6]，若浜[7),8),9)]，藤野[10),11)]等によって理論的，実験的に詳細な研究がなされている。しかるに含水量が比較的多い場合のデータが多く，実際に北海道北部の4月中旬～下旬の融雪速度（多くとも0.5 g/cm²·hr）にみあう含水量の時の滲透流下速度についてのデータは充分ではない。

そこで著者は，0°Cの恒温槽中で，円筒に採取した積雪の上部から水を注いで下部からの滲出を調べて滲透流下速度（以下単に流下速度とする）の測定を行った。実験は乾き密度0.34～0.47のざらめ雪について行った。結果は7～15%の含水率の時，流下速度$1\sim6\times10^{-3}$ cm/sと幅広いものになったが，従来のざらめ雪で得られた値より低い。

又，この実験では，多量の水を含んだ積雪を10時間前後放置した場合どのように滲出量（又は保水量）が変化するかの測定も行った。これは，融雪期の積雪中の水収支を算定する場合はもちろん，積雪表層の熱収支，特に夜間の氷結層の形成などの問題解明にも役立つ。

なお，この実験では，含水率15～16%以下のざらめ雪を対象としたので吉田[6]の水路流下と皮膜流下の分類では後者になる。以下皮膜流下を単に流下という。

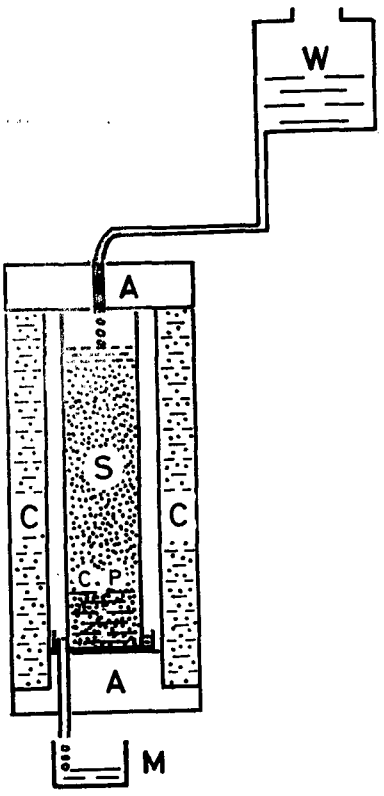
II. 実験方法

実験装置の略図を第1図に示す。0°Cの恒温槽は外部円筒の二重部分（C）に雪と水をつめて作り，上下部分は厚さ6～8 cmの断熱材（A）で断熱してある。積雪試料（S）は，直径10 cm，長さ45 cmの円筒に入れてある。試料上部から水を注いで下部に滲出する水量を下においた重

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1272号

量計 (M) で読みとる。試料の下部には水受けの皿を置き，あらかじめ毛管水帯 (C.P) は水で飽和した状態にしてある。このために積雪内部を流下してきた水は，毛管水帯の上部に達するとほとんど同時に受皿の出口から流出する。

実験は2つの方法で行った。第1の方法は，上部から一度に大量の水を注ぎ，滲出速度と含水量の時間変動を求めて，その時々の流下速度を算出するやり方である。この方法は若浜[9]にならったものであるが，非定常法と呼ぶことにする。第2の方法は，上部の水だめ (W) から一定量の少量の注水を長時間続行するやり方である。下部からの滲出量が一定になってから，含水量を調べ，流下速度を算定する。この方法を定常法と呼ぶことにする。



第1図 実験装置。**S**：雪試料，**C.P**：毛管水帯，**C**：0°C 恒温槽，**A**：断熱材，**M**：滲出水量計，**W**：水だめ

いずれの方法においても，積雪内の水全部が移動すると仮定すれば，若浜[9]が示したように平均流下速度 U は滲出量 Q，含水量 w とから $U=Q/w$ として求められる。

第1の非定常法においては，0°C の約 200 g (2.6 g/cm^2) の水を 10～15 秒かけて上から注いだ。注水後 30～60 秒で水が滲出をはじめる。滲出量の測定は約 10 時間にわたって行った。実験途中の積雪試料の含水量を調べるために，同じ積雪層から試料を2本ずつ採取した。同一の条件下において，1本は途中でとり出して含水量を測定した。含水量の測定は試料 2～3 ヶ所を吉田式含水率計[12]で調べ，他の部分は，密度測定から推定する方法によった。試料を直接測定できない時間の含水量の推定は注水量と滲出水量の変動とから，途中と実験終了時の含水量直接測定のデータを参考にして計算する。

非定常法では，試料内において下に行くほど含水量が多くなり，毛管水帯のすぐ上の，滲出速度を決める部分の，皮膜水の含水量の測定が困難である。従って含水量と皮膜流下速度の正しい関係を得ることが難しい。

そこで，第2の定常法による実験もあわせて行った。この方法においては，0.3～0.6 g/cm^2·hr の一定量の水を 3～8 時間注いだ。実験は 0°～+1°C の低温室で行った。4月下旬の北海道母子里では，1時間当たり 0.4～0.5 g/cm^2 が日中 11～12 時における最大融雪量である。その時の日射量は 80～90 cal/cm^2·hr，正味輻射量は 25～30 cal/cm^2·hr，高さ 1 m の気温は +10°C 前後である。下部に滲出してくる水量は，高さ 40～43 cm の試料において 2～3 時間で注水量と等しい一定の値となる。

この実験では，採取後 1～2 年 −10°C 前後で保存されたざらめ雪を 0°C にしてから用い

た。乾いた試料を用いたので，注水後の含水量は密度変化から求めた。この方法では含水量は毛管水帯を除いてはほぼ一様になる。

III. 実験結果と考察

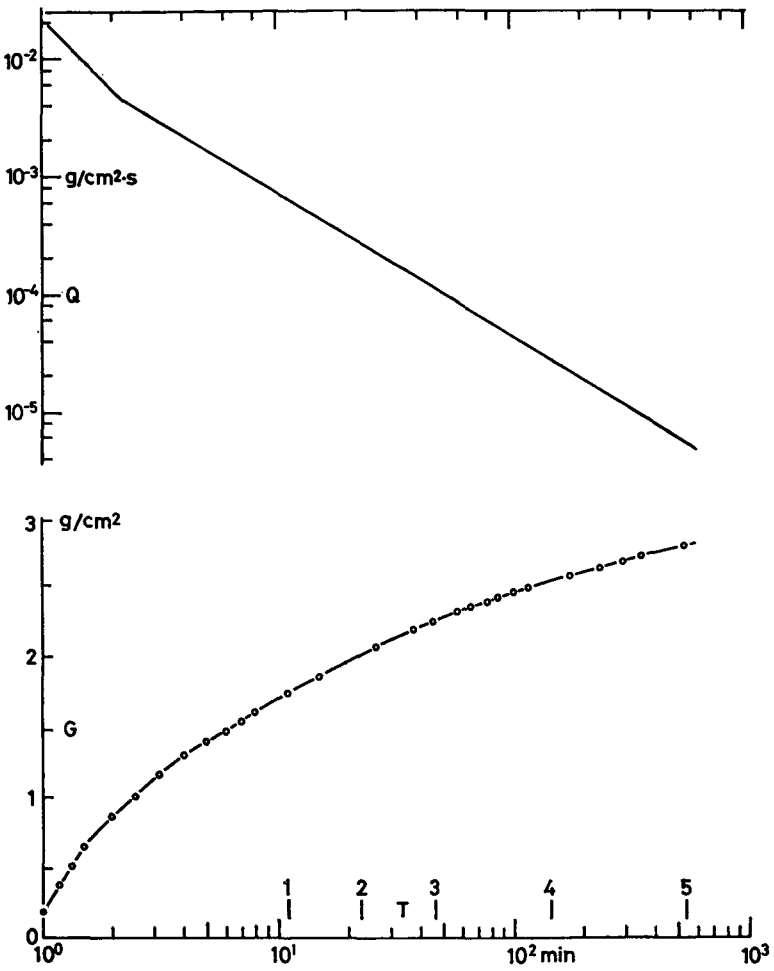
雪試料の上部から一度に水を注ぐ非定常法の結果を第1表に示す。第1表には試料の乾き密度，粒径，毛管水のしみ上り高さ，8～13時間後の試料上部の含水比，実験途中の毛管水帯直上部の含水比，滲出量，流下速度等が示してある。用いた雪は，乾き密度にして 0.462, 0.473 0.474 の3種の自然積雪のざらめ雪で，粒径は1～2 mm のものである。第1表の各項目は第2図～第4図を通じて順次説明する。

第1表　非定常法による流下速度

試料番号		注水後の時間 (分)	ぬれ密度	含水量 (g/cm^3)	含水率 (%)	含水比 W	滲出量 Q ($g/cm^2 \cdot s$)	流下速度 U (cm/s)
1					(高さ 8 cm)			
	乾き密度 0.474	7.5	0.574	0.10	17	0.21	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-2}
	粒径 1～2 mm	14	0.561	0.087	15	0.18	4.4×10^{-4}	5.1×10^{-3}
	しみ上り高さ 3.5～6.5 cm	36	0.549	0.075	14	0.16	1.2×10^{-4}	1.6×10^{-3}
	812 分後の上部	120	0.536	0.062	12	0.13	2.4×10^{-5}	3.9×10^{-4}
	含水比 0.067	812	0.524	0.050	9.5	0.11	2.2×10^{-6}	4.4×10^{-5}
2					(高さ 10 cm)			
	乾き密度 0.473	11	0.565	0.092	16	0.20	6.6×10^{-4}	7.2×10^{-3}
	粒径 約1 mm	21	0.553	0.080	15	0.17	3.0×10^{-4}	3.8×10^{-3}
	しみ上り高さ 5.7～9 cm	46	0.541	0.068	13	0.14	1.2×10^{-4}	1.8×10^{-3}
	535 分後の上関	145	0.529	0.056	11	0.12	3.0×10^{-5}	5.3×10^{-4}
	含水比 0.076	535	0.518	0.045	8.7	0.095	5.7×10^{-6}	1.3×10^{-4}
3					(高さ 7 cm)			
	乾き密度 0.462	12	0.545	0.083	15	0.18	6.3×10^{-4}	7.6×10^{-3}
	粒径 1.2 mm	24	0.533	0.071	13	0.15	2.6×10^{-4}	3.7×10^{-3}
	しみ上り高さ 3～6 cm	51	0.521	0.059	11	0.13	1.1×10^{-4}	1.9×10^{-3}
	640 分後の上部	130	0.509	0.047	9.2	0.10	3.1×10^{-5}	6.6×10^{-4}
	含水比 0.049	640	0.497	0.035	7.0	0.075	3.9×10^{-6}	1.1×10^{-4}

第2図には例として試料2の場合の滲出水量の積算値 G (g/cm^2) 及び滲出速度 Q ($g/cm^2 \cdot s$) と注水後の時間 T (min) との関係を示す。滲出量は最初急激で，最初の10分間でその後の1000分間に相当する分以上が出てしまう。最初の2～3分を除いては $\log Q$ と $\log T$ の関係は1本の直線で近似でき，$Q \propto 1/T^n$ となる。図のように滲出速度 Q を $g/cm^2 \cdot s$，時間 T を分であらわせば，n はほぼ1となる。このような滲出状態は含水量分布によって決まる。

第3図に含水比の高さによる分布をやはり試料2の場合を例として示す。ぬれ雪の一定体積中の水の氷に対する重量比を含水比と呼ぶことにする。数字は第2図に示した時刻をあらわ

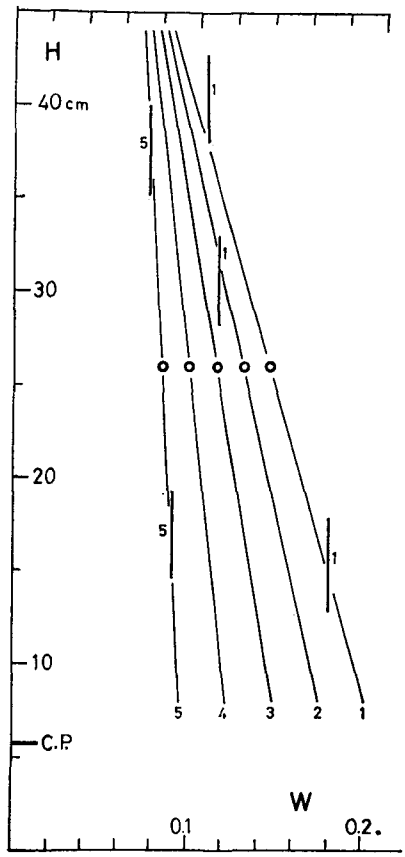


第2図 滲出水量 G (g/cm²·s) 及び滲出速度 Q (g/cm²·s) と注水後の時間 T (min) との関係 (試料2)

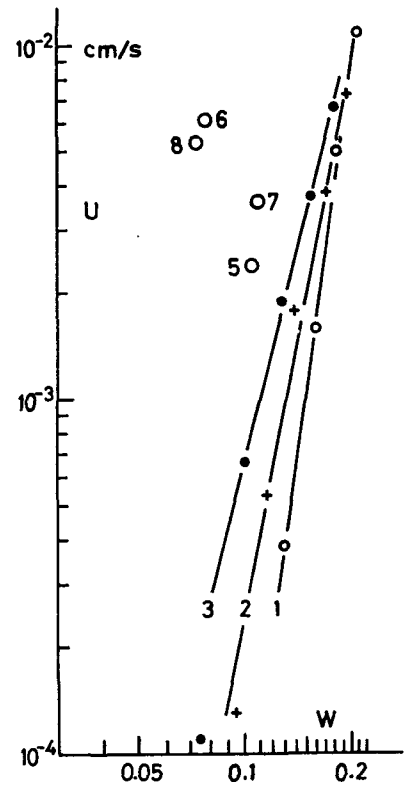
す。数字1は注水から11分後，数字5は9時間後を示す。この2つの分布は，試料を数個に分けて密度を測定した結果と，吉田式含水率計による含水率の測定の結果 (図中短い縦の直線で示したもの) とから直線近似で求めた。他の中間の分布は滲出水量から推算した。分布直線の途中の丸印はその時の平均含水比をあらわす。

第1表と第2図に示す如く，注水後10時間前後経過してもなお試料上部ですら5～7%の保水量を示している。又，試料の下から色水を吸わせて，濃くそまる高さとうすくにじむ高さをしみ上り高さの範囲とした。

第4図に流下速度 U と含水比 W の関係を示す。非定常法の場合は含水比 W は，毛管水帯直上 (第1表には高さを示した) の含水比を用いてある。図中の数字は試料番号で，1～3が非定常法の結果である。含水比と流下速度の関係はおおよそ次のようになっている。含水比 W が 0.20 (含水率16～17%) で，流下速度 U は $7\sim10\times10^{-3}$ cm/s，W が 0.15 (含水率13%)



第3図　雪試料内の含水比の高さ分布（試料2)。数字は第2図に示した時間



第4図　流下速度 U(cm/s) と含水比との関係。数字は第1表，第2表の試料番号

で，U は $1\sim3\times10^{-3}$ cm/s，W が 0.10（含水率 9%）では $1\sim7\times10^{-4}$ cm/s と含水比のわずかな減少に対して流下速度は急激に減少している。吉田[6]の予測では $U\propto W^3$ になっているのに対し，今回の実験では $U\propto W^4\sim W^6$ になる。ざらめ雪の比表面積を成田[13),14)]に従って 40 cm²/cm³ とすると，含水量 0.05～0.10 g/cm³（含水比 0.1～0.2）の時，皮膜水の平均の厚さは 10～20 μ となり，吉田[6]の式から $U=2\sim10\times10^{-2}$ cm/s となる。この値は，非定常法の実験値の 10 倍以上である。

実験値が吉田[6]の理論値より小さくなった原因として，毛管懸垂水（下部の毛管水帯と結びついていないで，部分的に毛管力によって積雪中に保持されている水）の存在が考えられる。というのは一度に上部から多量の水が流下してきた場合，最初は水路流下がおこり，その水が部分的にとり残されるからである。一旦懸垂水となると，その水は見かけ上ほとんど動き得ない。含水量が大きくても，その何割かは懸垂水となって皮膜流下の運動に一度には加わらない。注水後10時間たってもなお7～8%の含水率を保つのは，懸垂水の存在の一つの裏付けであろう。

次に 0.3～0.6 g/cm²·hr の注水を長時間続けた定常法の結果を第2表と第4図に示す。第2表には，注水量，含水比，流速等が雪試料の乾き密度，粒径，しみ上り高さ等と合わせて示

第2表 定常法による流下速度

試料番号	5	6	7	8
乾き密度	0.340	0.343	0.406	0.410
ぬれ密度	0.376	0.370	0.451	0.440
粒径 (mm)	約 1	0.8～1	1～2	1～2
しみ上り高さ (cm)	2.7～4.5	2.5～4	3～5	3～5
滲出量 Q (g/cm²·s)	8.6×10^{-5}	1.65×10^{-4}	1.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}
含水量 w (g/cm³)	0.036	0.027	0.045	0.030
含水率 (%)	9.6	7.3	10	6.8
含水比 W	0.106	0.078	0.11	0.073
流下速度 U (cm/s)	2.4×10^{-3}	6.1×10^{-3}	3.6×10^{-3}	5.3×10^{-3}

してある。定常法の結果は数字5～8で示した。含水比0.07～0.11に対して流下速度は2.4～6.1×10^{-3} cm/sとなっている。第4図にみられるように，定常法においては，非定常法の場合に比して同じ含水比に対しては流下速度が3～20倍も大きい。定常法における流下速度が含水比の割に大きい理由は定性的には2つ考えられる。1つは，定常法に用いた雪試料が採取後低温室（−10°C前後）で1～2年保存されていたため，組織が単調になって水が流れやすくなっていた。もう1つは，乾いた雪にごく少量の注水を行ったために懸垂水の形成量が多くなかった。

非定常法の場合と同じく，比表面積を40 cm²/cm³と仮定して含水量から皮膜水の厚さを求めると7～11 μとなる。吉田[6]の式により流下速度を計算すると0.95～2.5×10^{-2} cm/sとなり，実験値の1.5～7倍になっている。

従来の実験値と比較することは雪質，含水率等異なるので難しいが，次のような値が得られている。若浜[9]は重量法によって乾き密度0.34～0.45，含水率13～15%のざらめ雪について$4.8\sim6.8\times10^{-2}$ cm/sの流下速度を求めている。又，若浜[9]は色水法によって乾き密度0.45，含水率15%のこざらめ雪について$0.8\sim1.2\times10^{-2}$ cm/sの値も得た。藤野[10),11)]は，塩水法によって，乾き密度0.4，含水率13～15%のざらめ雪に対して$0.8\sim3\times10^{-2}$ cm/sの流下速度を得ている。これ等のざらめ雪について得られている値は，今回の小林の得た値より大きい。

今回の実験では，前述の如く2つの実験方法によって含水比に対する流下速度の値に大きな差がある。しかしながら0.3～0.6 g/cm²·hr程度の融雪量（4月下旬の北海道母子里の最大融雪量）にみあう滲出量の時，積雪中の流下速度は$10^{-3}\sim6\times10^{-3}$ cm/sの範囲に入る。この時の含水比は非定常法の場合0.13～0.17（含水率11～15%），定常法の場合0.07～0.11（含水率6～10%）であった。

今後は，非定常法と定常法による積雪内の含水比及び流下速度の差異を求明することと，融雪量の日変化にみあう注水を試料上部に与えた時，滲出量及び流下速度がどのような変動をするかを調べる予定である。

今回の測定ならびに論文の作製にあたって，小島賢治，若浜五郎両教授に御指導をいただいた。又，測定にあたっては，大学院学生，藤井俊茂氏の御協力を得た。あわせて感謝の意を表わす。

文　献

1) 大浦浩文・小島賢治・小林大二・小林俊一 1967 金山ダム及び朱鞠内湖付近における融雪の研究. 低温科学, 物理篇, **26**, 99-117.
2) 小林大二・成瀬廉二・大浦浩文 1968 母子里における融雪量と流出量. 低温科学, 物理篇, **26**, 105-111.
3) 小島賢治・小林大二・小林俊一・油川英明・石川信敬 1970 母子里の小さい川の流域における融雪. 流出, および熱収支 I. 低温科学, 物理篇, **28**, 175-190.
4) 小島賢治・小林大二・小林俊一・成瀬廉二・石川信敬 1970 母子里における融雪・気象観測資料 (1968). 低温科学, 物理篇, **28**, 資料集, 1-23.
5) 小島賢治・小林大二・油川英明・成瀬廉二・石本敬志・石川信敬・高橋修平 1971 母子里の小流域における融雪, 流出, および熱収支の研究 II. 低温科学, 物理篇, **29**, 159-176.
6) 吉田順五 1968 融雪水の積雪内滲透. 低温科学, 物理篇, **23**, 1-16.
7) 若浜五郎 1963 積雪内に於ける融雪水の移動 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 45-74.
8) 若浜五郎 1968 積雪内に於ける融雪水の移動 II. 低温科学, 物理篇, **26**, 53-76.
9) 若浜五郎 1968 積雪内に於ける融雪水の移動 III. 低温科学, 物理篇, **26**, 76-86.
10) 藤野和夫 1968 積雪内部での融雪水の流下速度の測定 I. 低温科学, 物理篇, **26**, 87-100.
11) 藤野和夫 1971 積雪内部での融雪水の流下速度の測定 II. 低温科学, 物理篇, **29**, 151-158.
12) 吉田順五 1959 積雪含水率測定用熱量計. 低温科学, 物理篇, **18**, 17-28
13) 成田英器 1969 積雪の比表面積の測定 I. 低温科学, 物理篇, **27**, 77-88.
14) 成田英器 1971 積雪の比表面積の測定 II. 低温科学, 物理篇. **29**, 69-79,

Summary

An experiment on the flow-down speed of melt water in a granular snow cover was carried out by using the apparatus shown in Fig. 1. The flow-down speed U can be evaluated by the equation $U=Q/w$, where Q is the water discharge in g/cm^2·s and w is the water content in a snow cover in g/cm^3. The water with a temperature of 0°C was poured down on the snow sample (S) and the water discharge from the snow sample into the cup (M) was weighed. Two methods of water charge into the snow sample were used in this experiment. In the first method, which is named the nonstationary flow method, water, 2.6 g/cm^2 in amount was charged entirely at once and the decreasing rate of discharge was measured for a period of about ten hours. In the second method, which is named the stationary flow method, water was charged at a constant rate of 8.6×10^{-5} or 1.6×10^{-4} g/cm^2·s, whereby it was confirmed that the rate of discharge was constant and the same as the rate of charge.

The flow-down speeds U are shown in Fig. 4 against the water content ratio W, which is defined, here, by the weight ratio of the water content to the dry snow content in a volume. The numericals attached to the straight lines or plotted points numbered in Fig. 4 show the experiment numbers, which are the same as these in Tables 1 and 2. The groups of the plotted points, Nos. 1～3, show the values gained by the nonstationary flow method and the points, Nos. 5～8, show the values by the stationary flow method. They scatter in a wide range, 10^{-4}～10^{-2} cm/s, but they con-

verge in a smaller range, $1\sim6\times10^{-3}$ cm/s, at the discharge rates, $0.86\sim1.6\times10^{-4}$ g/cm^2·s, which are equivalent to the rates of snow melt in late spring in Hokkaido, nothernmost part of Japan. Those values U shown in Fig. 4 are about a tenth as small as both the values derived theoretically by Yoshida (1968) and also the values obtained experimentally by Wakahama (1968) and Fujino (1971).