



Title	地心ぶき時における風速の垂直分布特性
Author(s)	大浦, 浩文; OURA, Hirobumi; 小林, 大二 他
Citation	低温科学. 物理篇, 25, 73-88
Issue Date	1967-12-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18062">https://hdl.handle.net/2115/18062</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	25_p73-88.pdf



## 地ふぶき時における風速の垂直分布特性 I\*

大浦浩文・小林大二・小林俊一

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和42年7月受理)

### I. ま え が き

地ふぶきの現象は、風と雪面との相互作用によって発生するものと考えて、著者等は、風洞実験や、野外に於いて、地ふぶきの研究を続けている<sup>1)</sup>。特に、雪面上を吹く風の構造を研究する事は、地ふぶきの発生機構と関連して重要であるばかりでなく、接地気層の乱流構造に関しても興味ある問題である。

そこで、主に野外に於いて、地ふぶき時と、地ふぶきが発生していない時の雪面上で、高さ2mまでの風速の垂直分布の測定を行ない、対数法則を使って、各々の雪面の表面粗度  $z_0$ 、雪面上の摩擦応力  $\tau_0$  (又は摩擦速度  $V_*$ ) と、風速との関係に就いて、興味ある結果を得た。

然し、一般に雪面の物理的性質を、何らかの方法で決めるのが困難であるため、地ふぶきの発生と関連させる事が、今回は出来なかった。特に、地ふぶきの発生が、雪面上に於ける降雪の履歴に、著しく左右されるため、今後これらの点を深く考慮して、研究を進めてゆかねばならない。

### II. 測定場所及び測定方法

測定は、北海道大学構内にある第一農場で、1967年1月から3月に亘って行なわれた。雪原は非常に平坦で、大部分の地ふぶきについては、北又は北西の風が卓越する時のみ観測が行なわれた。

高さ2mの支柱に、理工研式小型3杯ロビンソン風速計5個を、雪面から略対数間隔の高さに取り付け、各々からの導線を電磁式度数計に入れ、一定時間(少なくとも30秒間以上)の電接回数より、平均風速を求めた。風速が1m/s以下になると誤差が大きいが、観測時に於いては、最下位の風速計でも1m/s以上であった。又風速計は使用する毎に、入れ替えて各点に取り付け、各風速計自身の器差の影響を平均化した。

雪面の大体の状態を知るために、雪温、気温、雪面の密度、雪面の硬度、地ふぶき量等を時々測定した。地ふぶきの発生に関しては、雪面の温度の効果が大きい<sup>1)</sup>ので、アルコール温度計で雪温、気温を測定した。又地ふぶきの発生が、風の摩擦力や、飛雪粒子の雪面への弾性的な衝突、所謂 saltation の現象によって、雪面が破壊される事に原因すると思われるので、

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第831号

雪面の強さを代表する量として、雪面の硬度を木下式硬度計<sup>2)</sup>で測定した。その際、表面の平均的な強さを出来るだけ測るため、直径 20 cm の大きな円板を用い、重錘の落下高さは最低の 5 cm とした。同時に雪面の密度を、厚さ 3 cm のスノーサンプラーで測定した。然し、雪面の硬度に就いては、雪面にさざなみ模様の凹凸が出来て居る状態では、細かい部分で硬度が著しく違うので、この点を今後追求しなければ、地ふぶき発生に関係した雪面の物理的性質を詳細に表わす事が出来ない。最も重要であると思われる雪面自身の構造、即ち雪粒同志の結合状態を知るためには、その薄片の顕微鏡観察が必要であるが、今回はなされなかった。更に、地ふぶきの強さの程度を知るために、黒いラシャ布を貼付けた棒を雪面に立て、それに附着した雪粒により地ふぶきの高さを測定した。大部分の雪粒は雪面の数 cm の間を移動する低い地ふぶきであったが、高さの境界を決めるのはこの方法では困難であった。そこで二、三の地ふぶき計<sup>1)</sup>を用いて、単位時間に風向に垂直な単位面積を通過する量として定義される地ふぶき強度の測定を試みたが、地ふぶき計の捕捉率を推定する事が出来ずそのままの値を掲げた。

以上の測定は、系統的に測定したものではないので、各々の風速測定と関連させる事が出来なかった。

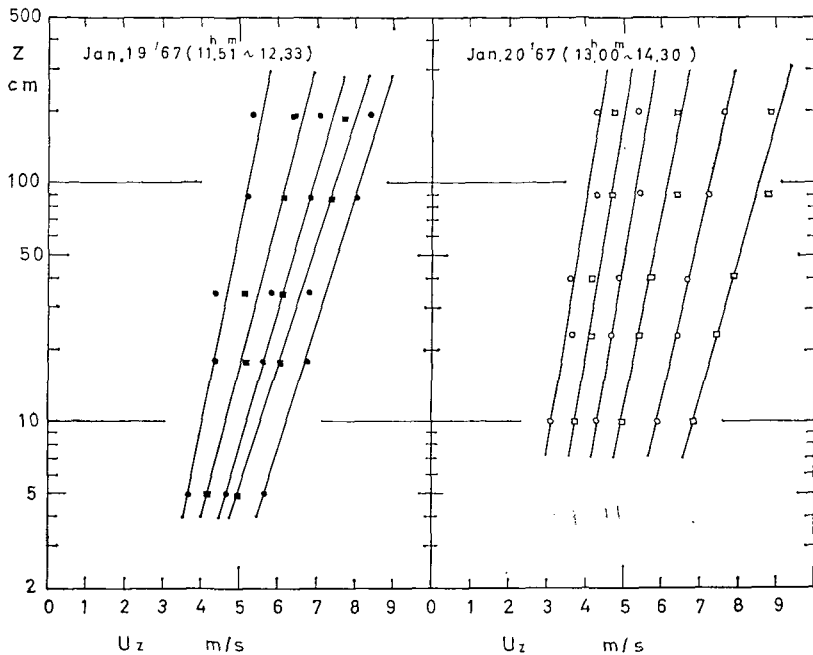
### III. 雪面上の平均風速の垂直分布

地表面付近の風速の垂直分布を表わす関係式は、乱流境界層の問題と関係して色々な理論式及び実験式があるが、雪面上の比較的平坦な場所では、Prandtl の対数式(1)を使って整理するのが最も便利であり、比較の実測値と良く一致するようである。

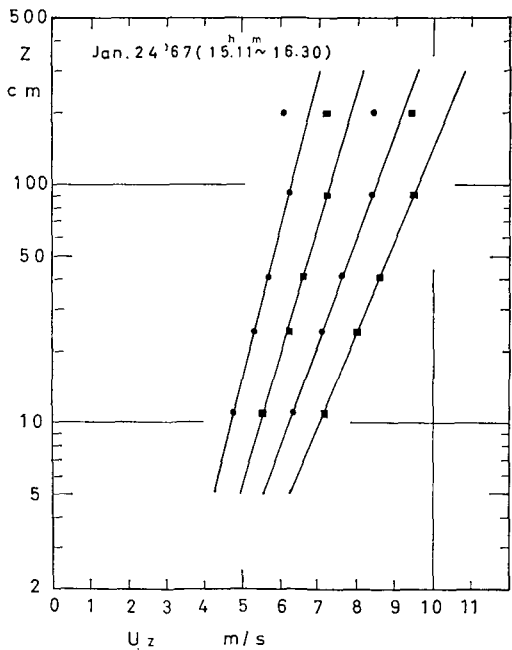
$$U_z = \frac{V_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} = 5.75 V_* \log \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

(1) 式の理論的な導入は、一般的な気象学の教科書にゆずる (例えば Sutton, pp. 53-54)<sup>3)</sup>。なおこの理論は、大気の状態が中立の安定度の時成り立つと云われている。

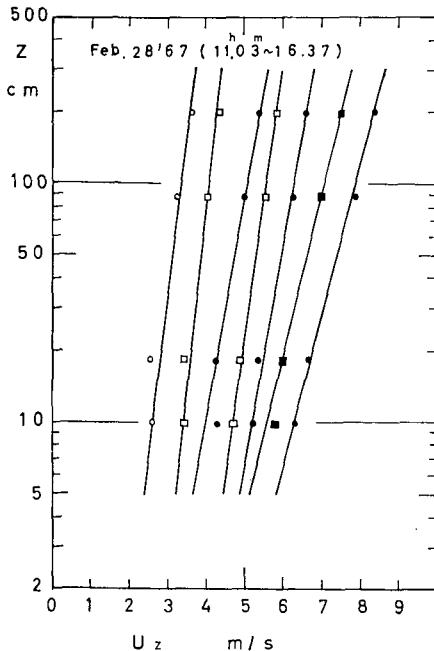
ここで、 $U_z$  は高さ  $z$  の平均風速、 $V_*$  は速度の次元を持つ量で、摩擦速度と呼ばれ  $\sqrt{\tau_0/\rho}$  に等しい。但し  $\tau_0$  は表面に働く摩擦応力、 $\rho$  は空気の密度である。 $k$  は Kármán 定数と呼ばれ、流体の性質によらない普遍定数で普通 0.4 の値が使われ、ここでもこの値をそのまま使用した。然し、鈴木義男氏が、比較的表面粗度の大きい海氷上での  $\tau_0$  の測定から  $k$  の値を計算しているのによれば、 $k$  は多少変化するようであるが、 $\tau_0$  の測定誤差から考えて 0.4 の値は妥当な値だと報告している<sup>4)</sup>。 $z_0$  は、地表面の空気力学的な粗さを示す長さの次元を持つ定数で、粗度と呼ばれる。飛砂のない状態での砂漠では、一般に  $z_0$  は砂粒の直径の 1/30 に相当する事が報告されている<sup>5)</sup>。かくして、片対数グラフを使って、たて軸に高さの対数を取り、よこ軸に風速をプロットすれば、その直線の勾配から摩擦速度  $V_*$  が求まり、且つこれから風による雪面上での摩擦応力  $\tau_0$  が計算出来る。又この直線の外挿によって、即ち風速が零になる高さが雪面の表面粗度  $z_0$  を与える事になる。



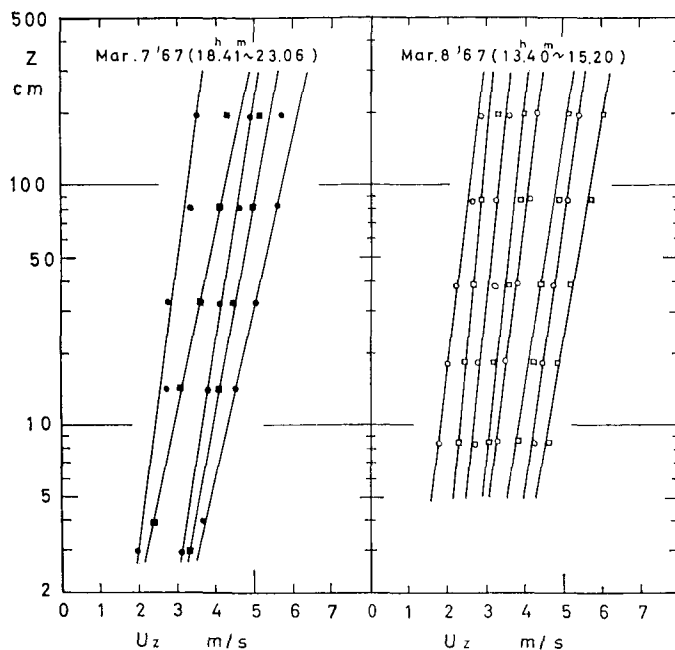
第1図 (a) 雪面附近の風速垂直分布  
1月19日 (地ふぶき時), 1月20日 (地ふぶきなし)



第1図 (b) 雪面附近の風速垂直分布  
1月24日 (地ふぶき時)



第1図 (c) 雪面附近の風速垂直分布  
2月28日  
(●印; 地ふぶき時, ○印; 地ふぶき休止時)



第1図 (d) 雪面附近の風速垂直分布  
3月7日 (地ふぶき時), 3月8日 (地ふぶきなし)

#### IV. 測定結果

##### 1. 風速垂直分布例

風速垂直分布の測定は、1967年1月から3月までの間に、地ふぶき時が4回(1月19日と24日、2月28日、3月7日)、地ふぶきのない時が2回(1月20日、3月8日)行なわれた。各々の代表的な例を第1図(a)~(d)に示す。一般に、風速測定の際の平均化時間は10分間の電接回数を読み取るのが普通であるが、30秒以上であれば、測定値は対数分布に従う。地ふぶき観測の都合で、読み取りは写真機で接写して記録したので、1月、3月の測定は大体1分間平均の測定値であり、2月は5分間平均の値で、厳密には夫々の測定値の重みが違う。後で10分間平均をとって検討した結果、或る程度のバラツキは平均化されたが、その代り測定値の数が極度に減少したので、統一した平均化時間に直さず、上述の1分間と5分間のままの値で整理した。

##### 2. 地ふぶきの概況

###### (a) 1月19日 (地ふぶき時)

11時20分頃から観測を開始した。既に地ふぶきは盛んに発生し、11時51分から12時33分まで風速の測定を行なった。この時の気温は、高さ9~80cmの間で $-2.2 \sim -2.5^{\circ}\text{C}$ 、雪温は表面で $-2 \sim -2.2^{\circ}\text{C}$ であった。

午後になって、20時頃の雪面の硬度は $(1.7 \sim 2.25) \times 10 \text{ g/cm}^2$ であった。その時の雪面の密

第1表 風で運ばれた雪の堆積増加(1月19日)

時刻 (時・分)	相対的な高さ $h$ (cm)	前観測時から の高さの増加 $\Delta h$ (cm)	期 間 $\Delta t$ (分)	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$ (mm/min)
20.03	—	+0.5	17	+0.294
20.20	+0.5	+0.4	13	+0.308
20.33	+0.9	+0.8	7	+1.14
20.40	+1.7	+0.1	5	+0.2
20.45	+1.8			
計	+1.8	+1.8	42	+0.43

度は平均  $0.118 \text{ g/cm}^3$  で、気温は高さ 20 cm の所で  $-8^\circ\text{C}$ 、雪温は  $-9^\circ\text{C}$  と午前中よりも下った。なお高さ 20 cm での風速は、平均  $3\sim 4 \text{ m/s}$  で、時々  $6\sim 8 \text{ m/s}$  の強い風が吹き、時には降雪を伴い地ふぶきが盛んに発生していた。写真測定<sup>6)</sup> から、地ふぶきの高さは  $4\sim 5 \text{ cm}$  であった。又観測地点での、風で運ばれた雪の堆積状態を知る事は興味ある問題なので、試みに硬度測定用の円板を、表面から 1.5 cm の雪の中に埋め、表面が平坦になった所で、その板上から雪面までの高さを測定した結果が第1表に掲げてある。但し、これの測定期間中は殆んど降雪はなかった。第1表から、この地点では飛び立つ雪粒よりも、残る雪粒の方が多し事がわかった。この変化と風速の変化を、将来結合して測定したら興味ある結果が得られるかも知れない。これと同じ測定は、以降の測定日にはなされていないので、比較検討が出来ない。

(b) 1月20日(地ふぶきなし)

1月19日の雪原の状態に最も近くはあるが、19日とちがって、地ふぶきのない時の風速分布が、13時00分から14時30分まで測定された。天候は、うす曇りの後、殆んど快晴の状態、気温は 2~80 cm の高さの間で、 $-1.5\sim -3.5^\circ\text{C}$  でこの高さの間に温度勾配が認められた。その時の雪温は表面で  $-2\sim -3^\circ\text{C}$ 、雪面の硬度は  $(2.25\sim 3.7)\times 10 \text{ g/cm}^2$ 、雪面の密度は  $0.130\sim 0.142 \text{ g/cm}^3$  であった。1月19日より硬度、密度共にやや増加した。

(c) 1月24日(地ふぶき時)

1月19日、20日と余り雪面の状態(特に表面の凹凸)が変化していない24日に、高い地ふぶきが発生した。風速分布は11時51分から12時33分の間測定した。雪面はさざなみ模様が顕著に出来た。又15時39分の雪温は  $-7^\circ\text{C}$ 、19時30分頃の雪面の硬度は  $(2.2\sim 2.6)\times 10 \text{ g/cm}^2$ 、密度は  $0.111 \text{ g/cm}^3$  であった。1月20日より、硬度、密度共に小であるから、この間に降雪があったに違いない。試みに15時39分~15時49分の10分間、地ふぶき量を測定した。種々の地ふぶき計<sup>1)</sup>が使われたが、捕捉率の補正を施していない値を第2表に示す。但し、 $z'$ は始めに設置した雪面から入口中心までの高さで、 $z$ は地ふぶきのために雪面が変化した終りの高さである。小型サイクロンと、大型サイクロンの入口の中心の高さは同一であるが、入口の直径が違うため、大部分の地ふぶき量は高い地ふぶきの時でさえ、表面近くに分布する<sup>7)</sup>ので、大型の方が余計捕捉する結果となった。以上の測定から、1 m の高さにおいても

第2表 地ふぶき強度の例

月日	型†	観測時間 (h・m)	雪面からの設置高さ		入口の 風速 $U_z$ (m/s)	地ふぶき 強 度# $Q$ (g/cm <sup>2</sup> ・s)	摩擦速度 $V_*$ (cm/s)	摩擦応力 $\tau_0$ ( $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$ )	粗 度 $z_0$ (cm)
			観測始 $z$ (cm)	観測終 $z$ (cm)					
1.24	サイクロン小†	15.39~15.49	5	2	5.5	$1.06 \times 10^{-3}$	33.0	1.48	0.08
1.24	"	15.39~15.49	23	20	6.8	$4.88 \times 10^{-4}$	33.0	1.48	0.08
1.24	"	15.39~15.49	103	100	8.1	$2.44 \times 10^{-4}$	33.0	1.48	0.08
1.24	サイクロン大	15.39~15.49	5	4.5	5.5	$4.75 \times 10^{-3}$	33.0	1.48	0.08
1.24	メ チ エ ル	15.39~15.49	5	4.0	5.5	$5.1 \times 10^{-3}$	33.0	1.48	0.08
2.28	サイクロン小	11.55~12.47	2.5	—	5.0	$6.76 \times 10^{-3}$	20.0	0.54	0.00013
2.28	"	11.55~12.47	6.0	—	5.5	$3.63 \times 10^{-5}$	20.0	0.54	0.00013
2.28	"	11.55~12.47	7.0	—	5.55	$3.63 \times 10^{-5}$	20.0	0.54	0.00013
2.28	サイクロン小	15.20~16.30	4	—	3.1	$7.75 \times 10^{-4}$	18.3	0.452	0.0023
2.28	サイクロン大	15.12~16.30	3	—	3.0	$3.5 \times 10^{-3}$	18.3	0.452	0.0023
2.28	メ チ エ ル	15.12~16.30	3	—	3.0	$3.11 \times 10^{-3}$	18.3	0.452	0.0023

† 入口直径は小型サイクロンは 3.0 cm, 大型サイクロンとメチエル型は 5.0 cm。

# 捕捉率を考慮しない値である。

地ふぶきがあった。これは著者等が観測した比較的高い地ふぶきである。

(d) 2月28日(地ふぶき時と休止時の混合)

10時45分頃、晴後時々降雪があり、地ふぶきが発生したり、休止したりの状態であった。風速分布は11時03分から16時37分の間測定した。雪面は極めて滑面を呈していた。従って地ふぶき時にもかかわらず風速垂直分布から求めた粗度  $z_0$  の値は小さい(第2図(b)を参照)。16時13分頃天候は快晴になって、地ふぶきは止んだ。但しこの日の風速分布は、風速計の度数計が1個故障したので4点しか測定出来なかった。又風速観測中、試みに、幅1cm位の棒に黒いラシャ布を貼り雪面に立てて地ふぶき中に露出し、そこに附着した雪粒を目印に地ふぶきの高さを測定した結果1~80cmであった。但し殆んど1cm位の高さの所に大部分の地ふぶきは集中していた。第2表にその時の地ふぶき量を示した。1月24日に比較して低い地ふぶきであると言える。風速分布の観測期間中、気温は  $-3.0^{\circ}\text{C}$  から  $-6.2^{\circ}\text{C}$ 、雪温は  $-3.0^{\circ}\text{C}$  から  $-7.5^{\circ}\text{C}$  と段々と下って行った。降雪中又は降雪直後のために、地ふぶきが発生し易い状態であった。表面の硬度と密度は測定していない。

(e) 3月7日(地ふぶき時)

18時41分から23時06分の夜間、地ふぶき時に風速分布の測定を行なった。18時30分頃時々降雪があり、21時15分頃降雪は殆んど認められず、23時頃地ふぶきは止んだ。気温は  $-6.0 \sim -9.0^{\circ}\text{C}$ 、雪温は  $-7.0 \sim -10^{\circ}\text{C}$  であった。雪面の硬度、密度は測定しなかった。この時、超音波風速計を雪面上約30cmに設置して乱流測定を試みたので、後の機会に報告したい。

(f) 3月8日(地ふぶきなし)

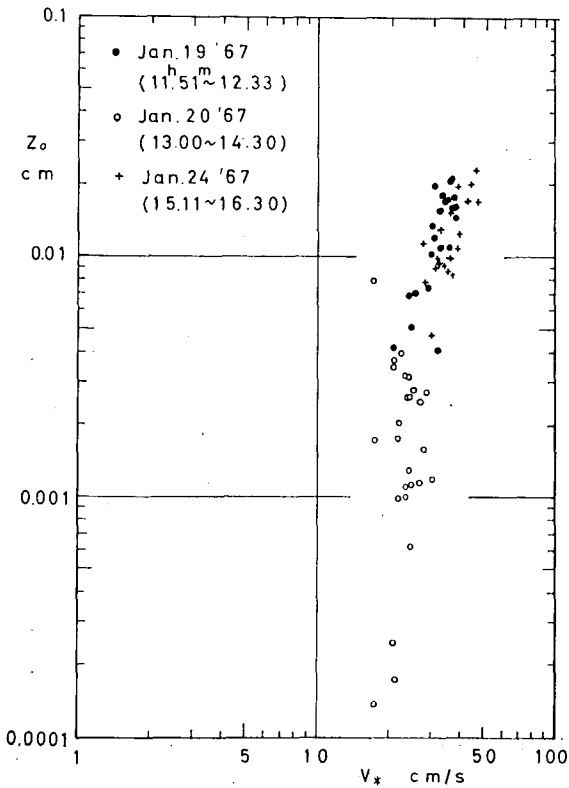
昨日からの地ふぶきで、雪面はすこぶる平坦であった。13時40分から15時20分の風速

測定中は全く地ふぶきは認められなかった。気温は  $-3^{\circ}\text{C}$ 、雪温は  $0\sim-1^{\circ}\text{C}$  で天候は快晴であった。雪面に超音波風速計を設置して、乱流測定を試みた。

V. 雪面の粗度  $z_0$  と摩擦速度  $V_*$

風速分布直線の外挿から求めた粗度  $z_0$  の値が、野外での地ふぶき時では、 $0.0042\sim 0.11\text{ cm}$  と、風速と共に増加する傾向のある事を昨年<sup>1)</sup>に報告した。今回の測定では、地ふぶき時と、地ふぶきが発生していない時の風速分布が得られた。その結果、一般に、定性的には、地ふぶき時では地ふぶきの発生していない時よりも  $z_0$  が大きい値を示す傾向がわかった。第2図(a)~(c)に  $z_0$  の変化を示してある。但し、 $z_0$  は実際対数グラフ上の外挿から求めた値は、技術的に誤差が大きいので、(1)式から、 $\log z_0 = 1 - (U_{10}/5.75 V_*)$  として、計算によって求めた。但しこの  $U_{10}$ 、 $V_*$  はグラフ上の測定点を考慮して引かれた直線の  $z=10\text{ cm}$  の読み、および傾きをあらわす。

1月19日、24日の地ふぶき時では、 $z_0$  は  $0.004\sim 0.025\text{ cm}$  にばらつき、その間の  $V_*$  は  $20\sim 50\text{ cm/s}$  の範囲にある(第2図(a))。1月20日の地ふぶきのない時では、 $z_0$  は  $0.00015\sim$



第2図 (a) 摩擦速度  $V_*$  と粗度  $z_0$  の関係

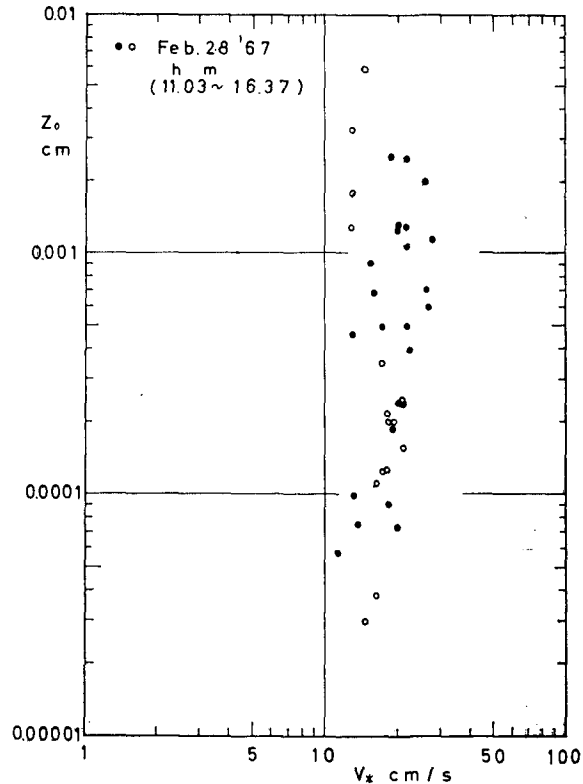
- , +印: 地ふぶき時
- 印: 地ふぶき無し

0.004 cm,  $V_*$  は 15~30 cm/s である。大体  $z_0$  が 0.0045 cm,  $V_*$  が 25 cm/s を境界にして地ふぶき発生の限界が考えられる。

2月28日は、地ふぶき時と、地ふぶきの休止時が同時に観測されたが、余り顕著な差は認められない(第2図(b))。大体地ふぶき時では、 $z_0$  は 0.00006~0.0025 cm,  $V_*$  は 10~30 cm/s, 地ふぶきの休止時では、 $z_0$  は 0.00003~0.006 cm,  $V_*$  は 13~20 cm/s 程度の範囲にある。傾向として、地ふぶき時では  $V_*$  の増加と共に  $z_0$  は増加するが、休止時では余り  $V_*$  に関係なくばらついているようである。むしろ  $V_*$  の減少と共に  $z_0$  が増加する傾向さえ見られる。そして1月の観測と比較すると  $z_0$ ,  $V_*$  共に地ふぶき時であるにもかかわらず小さい。雪面が地ふぶきの発生し易い状態であったと考えられる。

3月7日の地ふぶき時と、3月8日の地ふぶきのない時とを比較すると(第2図(c)), 地ふぶき時の  $z_0$  は 0.0005~0.09 cm,  $V_*$  は 10~30 cm/s, 地ふぶきのない時の  $z_0$  は 0.00002~0.03 cm,  $V_*$  は 10~20 cm/s の範囲にあり、2月の時と同様に、地ふぶきのない時の  $z_0$  は、 $V_*$  に余り関係しないで、大きくばらついている。

大雑把には、地ふぶき時の  $z_0$  は大きいのだから、地ふぶきのない時の雪面を滑面と見な



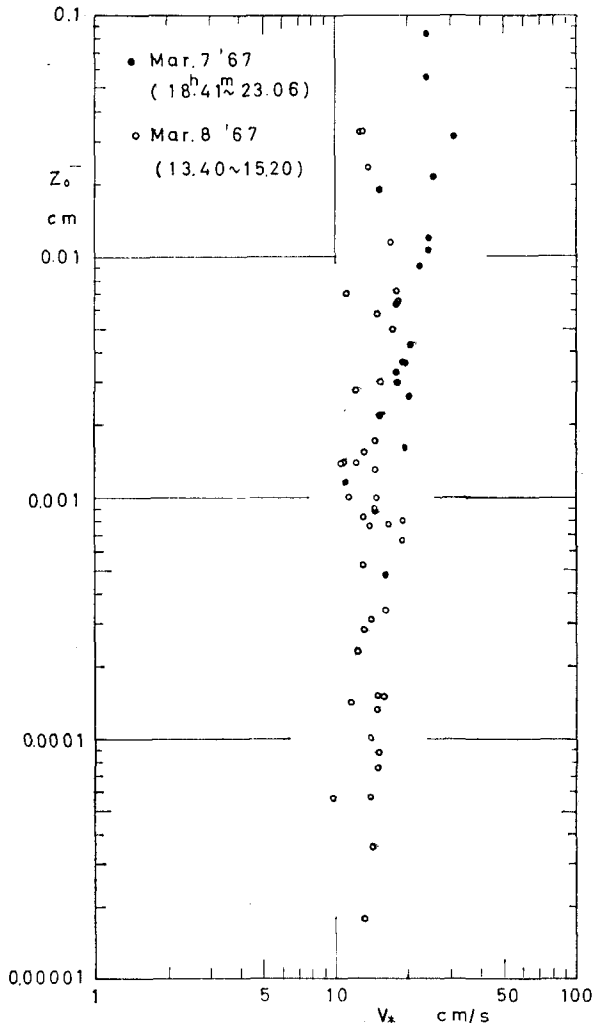
第2図(b) 摩擦速度  $V_*$  と粗度  $z_0$  の関係

- 印: 地ふぶき時
- 印: 地ふぶき休止時

せば、地ふぶき時の雪面は粗面に変ったと考えて良いだろう。そのために見かけ上、 $z_0$ が増加すると考え得る。

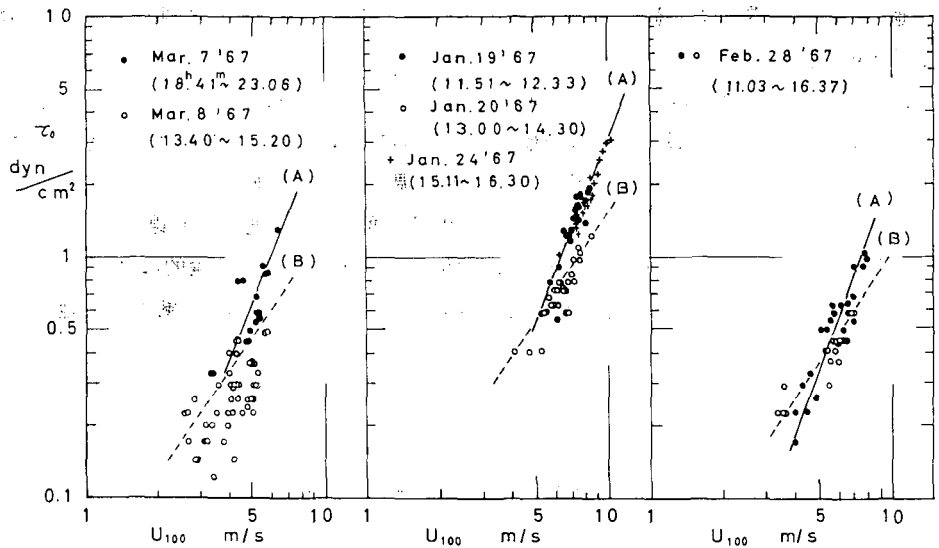
地ふぶきの無いとき、地面の粗度はあまり変っていないと思われるのに、約100分の間に $z_0$ が大きくばらつき、その最大値が最小値の2,000倍にも達するというのは少し考えなければならぬ。今後風速計の吟味、(1)式適用の限界等を調べる予定である。

次に雪面上の摩擦応力 $\tau_0$ を与えるところの摩擦速度 $V_*$ は風速分布直線の勾配で、 $U_{100}$ と $U_{10}$ を読みとれば、 $V_*=(U_{100}-U_{10})/5.75$ により容易に計算出来る。理論的には、 $z_0$ が一定ならば(1)式から風速と $V_*$ とは一次の比例関係があるが、実際には、 $z_0$ が風速や、地ふぶきの



第2図 (c) 摩擦速度  $V_*$  と粗度  $z_0$  の関係

- 印：地ふぶき時
- 印：地ふぶき無し



第3図 摩擦応力  $\tau_0$  と風速  $U_{100}$  との関係

- (A) 地ふぶき時  $\tau_0 \propto U_{100}^{2.6}$   
 (B) 地ふぶきのない時  $\tau_0 \propto U_{100}^{1.47}$

発生によって変化するため、 $V_*$  も変化する。第3図には、 $V_*$  から求めた摩擦応力  $\tau_0 (= \rho V_*^2)$  と風速  $U_{100}$  (高さ 1 m での) との関係を示してある。但し空気の密度  $\rho$  は、気温が  $0 \sim -5^\circ\text{C}$  の間では  $1.30 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 、 $-5 \sim -10^\circ\text{C}$  の間では  $1.35 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$  として計算した。地ふぶき時では、 $\tau_0$  が地ふぶきのない時に比べて大きいことがわかった。

1月の観測では、地ふぶき時の  $\tau_0$  は  $0.5 \sim 3 \text{ dyn/cm}^2$ 、地ふぶきのない時の  $\tau_0$  は  $0.4 \sim 1.2 \text{ dyn/cm}^2$ 、2月では、地ふぶき時の  $\tau_0$  は  $0.2 \sim 1.0 \text{ dyn/cm}^2$ 、地ふぶきのない時の  $\tau_0$  は  $0.2 \sim 0.5 \text{ dyn/cm}^2$ 、3月では、地ふぶき時の  $\tau_0$  は  $0.2 \sim 1.2 \text{ dyn/cm}^2$ 、地ふぶきのない時の  $\tau_0$  は  $0.12 \sim 0.8 \text{ dyn/cm}^2$  の範囲であった。ここで興味ある事は、1月の測定点は、地ふぶき時では、 $\tau_0 \propto U_{100}^{2.6}$ 、地ふぶきのない時では、 $\tau_0 \propto U_{100}^{1.47}$  と違った勾配の直線に乗ることである。この直線の勾配をそのまま、2月、3月の各々に平行移動してみると、良くあてはまる。このように高さ 1 m の風速  $U_{100}$  が大体 5 m/s を境にして、雪面の  $\tau_0$  が、地ふぶきの発生のために急に大きくなる傾向を示す。地ふぶき発生と、雪面が滑面から粗面に変って、雪面上の  $\tau_0$  が増加する事とは、一つの現象の二つの側面を示していると考えられる。

## VI. 空気力学的な考察

雪面が、空気力学的に滑面か、粗面かを定めるためには、Reynolds 数に相当する  $V_* z_0 / \nu$  を計算してみると良い。ここで、 $\nu$  は空気の動粘性係数で著者等は、気温が  $0 \sim -5^\circ\text{C}$  の間では  $0.130 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $-5 \sim -10^\circ\text{C}$  の間では  $0.125 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の値を用いた。Nikuradse (1933) は、円筒管の内面に砂粒を貼り付けて、人工的に作った粗面上の流れを研究した。その結果が地表風にも適用されるとすれば、次の3つの流れに分類される (Sutton, 1953, p. 82)<sup>8)</sup>。

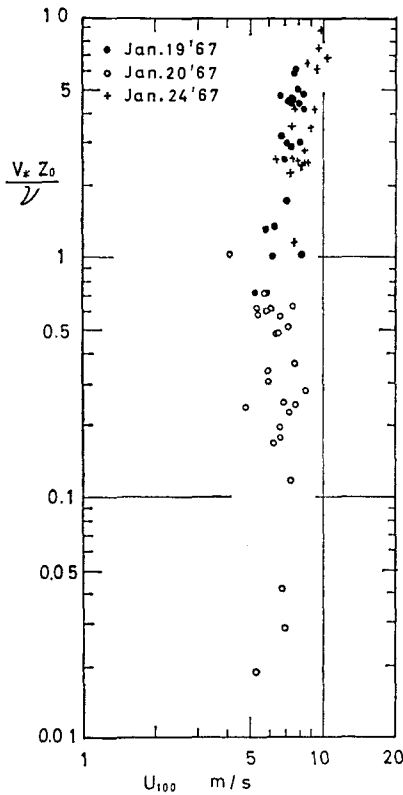
$$\frac{V_* z_0}{\nu} < 0.13 \quad \text{空気力学的滑面}$$

$$0.13 \leq \frac{V_* z_0}{\nu} \leq 2.5 \quad \text{転移状態}$$

$$2.5 < \frac{V_* z_0}{\nu} \quad \text{空気力学的粗面}$$

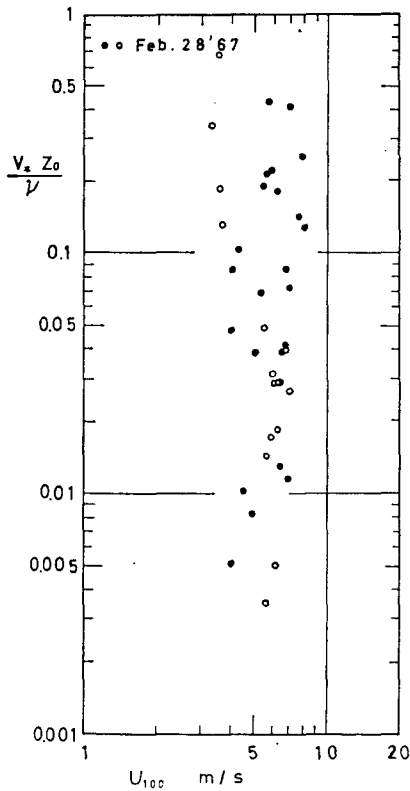
測定結果から  $V_* z_0/\nu$  を計算して、風速  $U_{100}$  との関係を見たのが第4図(a)~(c)である。余りはっきりした結果は得られないが、1月の測定では、 $V_* z_0/\nu$  が、地ふぶき時では、 $U_{100}$  が5~10 m/s の範囲で、ほぼ1~10で粗面流をなし、地ふぶきのない時では、 $U_{100}$  が5~8 m/s の間で、0.02~0.7 の値で流れは滑面流から粗面流への転移状態にある。

2月の測定では、地ふぶき時で  $U_{100}$  が4~8 m/s、地ふぶきのない時で  $U_{100}$  が3~7 m/s であり、 $V_* z_0/\nu$  は地ふぶき時も、休止時も顕著な差はなく、0.003~0.7 の値で滑面流と、粗面流への転移状態にあった。この日は、地ふぶき発生が容易であり、雪面は極めて平坦であったことに関係しているように思える。



第4図(a)  $\frac{V_* z_0}{\nu}$  と風速  $U_{100}$  との関係

●, +印: 地ふぶき時  
○印: 地ふぶき無し



第4図(b)  $\frac{V_* z_0}{\nu}$  と風速  $U_{100}$  との関係

●印: 地ふぶき時  
○印: 地ふぶき休止時

3月の測定では、地ふぶき時で、 $U_{100}$ が3~6 m/sの範囲で、 $V_* z_0/\nu$ は0.1~20となり、完全な粗面流をなしている。この時は高い地ふぶきであった。地ふぶきのない時では、 $U_{100}$ が2.5~5 m/sの間で、臨界値は0.001~3の広い範囲に亘って変化し、流れは滑面流、転移状態にある。以上の様に、雪面を吹く風の流れの状態を、空気力学的な $V_* z_0/\nu$ の値によって分類したのでは余りはっきりと地ふぶきと関係づけられない。この $V_* z_0/\nu$ は $z_0$ に大きく依存しているために、 $z_0$ のばらつきが著しく効いて来る。

次に、 $V_* z_0/\nu$ と、表面の性質に依存する量である抵抗係数 $C_d$ との関係を調べた。抵抗係数 $C_d$ は、摩擦応力 $\tau_0$ と、或る高さ $z$ の風速 $U_z$ との関係式

$$\tau_0 = \frac{1}{2} C_d \rho U_z^2 \quad (2)$$

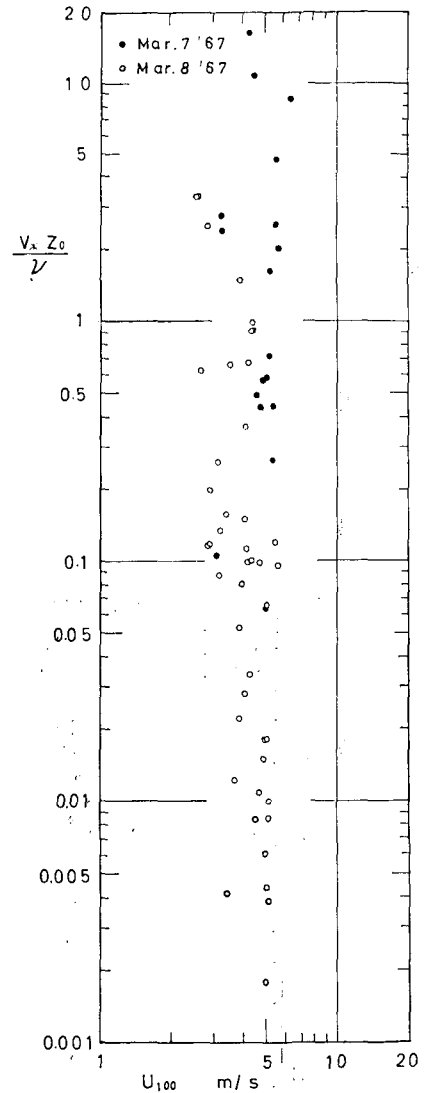
の中で定義される。ここで、 $\rho$ は流体の密度である。 $V_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ を考慮すれば、 $C_d$ は(3)式のように、 $V_*$ と $U_z$ とから計算出来る。

$$C_d = 2 \left( \frac{V_*}{U_z} \right)^2 \quad (3)$$

高さ10 cmの風速 $U_{10}$ と $V_*$ とから(3)式によって $C_d$ を計算し、第5図(a)~(c)に示してある。又(2)式は、 $U_z$ が対数関係(1)式に従うとすれば、(4)式のようになる。

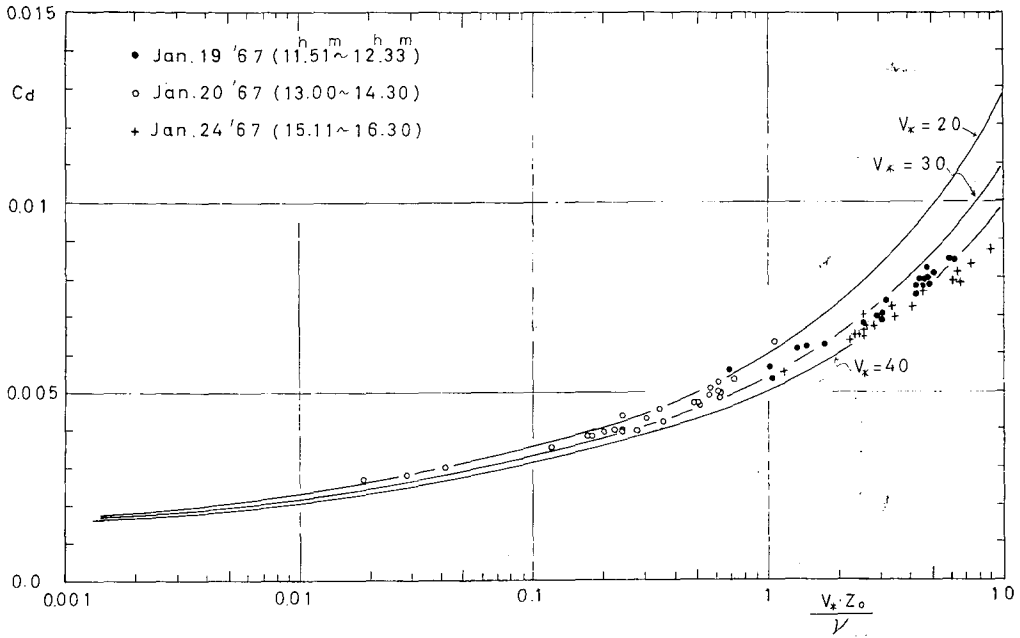
$$C_d = 2k^2 / \left( \log \frac{z}{z_0} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 $k=0.4$ 、 $z=10$  cmとすれば、 $C_d$ は $z_0$ だけの関数となる。第5図には $V_*$ 一定の曲線を実線で表わしてある。又この図には前述の測定によって決定された $V_*$ 、 $z_0$ の組み合わせから予想される $C_d$ の値も記入してある。

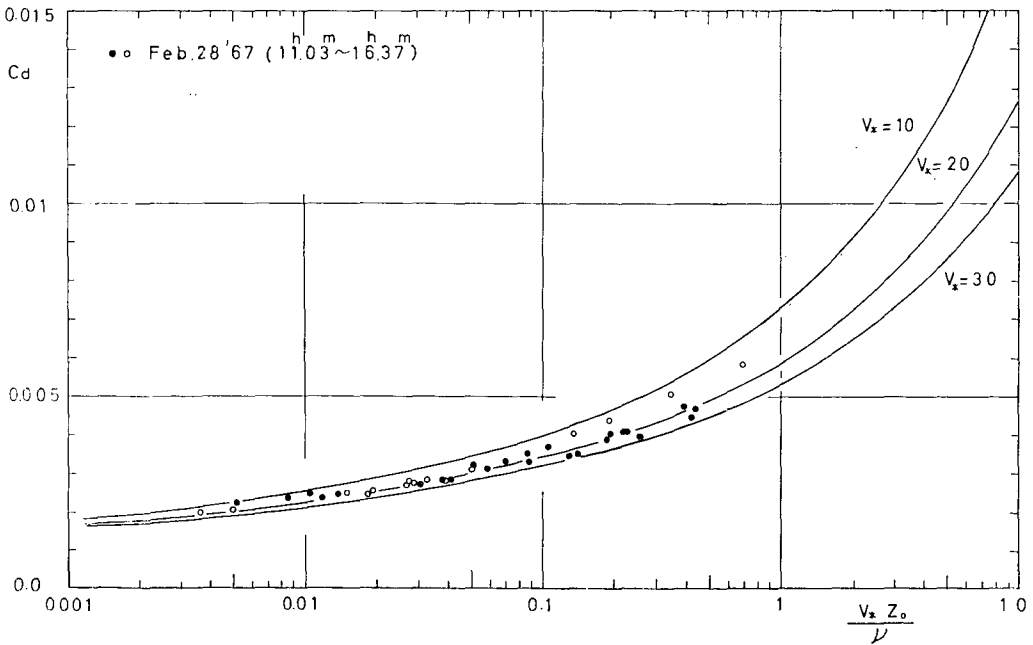


第4図(c)  $\frac{V_* z_0}{\nu}$ と風速 $U_{100}$ との関係

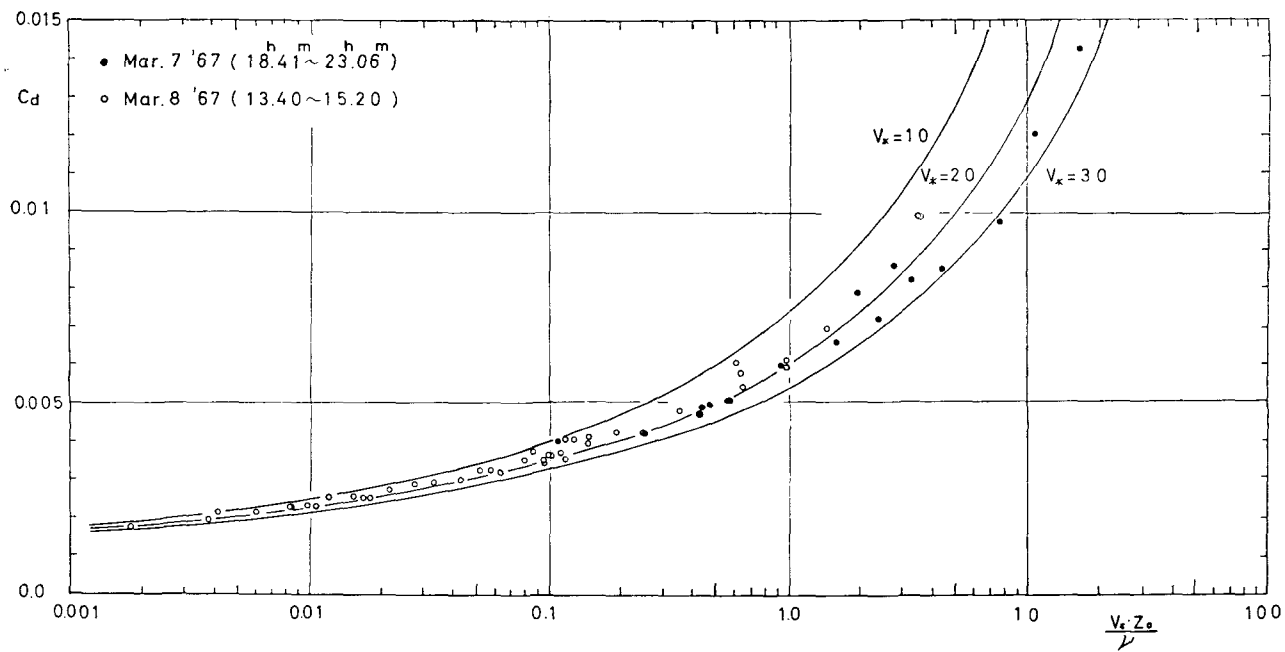
- 印; 地ふぶき時
- 印; 地ふぶきなし



第5図 (a) 抵抗係数  $C_d$  と  $\frac{V_* z_0}{\nu}$  との関係  
 実線は、理論式(4)を、 $V_*$  を決めて表わした



第5図 (b) 抵抗係数  $C_d$  と  $\frac{V_* z_0}{\nu}$  との関係  
 実線は、理論式(4)を、 $V_*$  を決めて表わした



第5図(c) 抵抗係数  $C_d$  と  $\frac{V_* z_0}{\nu}$  との関係

実線は、理論式(4)を、 $V_*$  を決めて表わした

## VII. あとがき

地ふぶき時と、地ふぶきのない時の風速垂直分布の測定から、雪面の物理的性質を余り考慮しないで、表面粗度  $z_0$  と摩擦応力  $\tau_0$  を求めてその差違を調べた。表面の摩擦応力  $\tau_0$  は、どの観測の場合にも、地ふぶき時と、地ふぶきのない時とでかなりはっきりとした差違が認められたが、ばらつきの大きい  $z_0$  の議論に関しては、顕著な差違が認められない。もっと雪面の物理的性質と関連させて説明されない限り、満足な解答は得られないだろう。Mellor は、地ふぶきに関して総合的な報告<sup>9)</sup>を出しているが、その中に色々な研究者達によって測定された表面粗度  $z_0$  の値が掲げてある。それによれば、地ふぶき時で、風速が 13~32.5 m/s で、 $z_0$  は  $1.5 \times 10^{-2} \sim 5.8 \times 10^{-1}$  cm、地ふぶきのない時には、風速が 14.7~27.2 m/s で、 $z_0$  は  $10^{-2}$  cm (Liljequist)、又は、地ふぶき時で、風速が 14.7~27.2 m/s で、 $z_0$  は  $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-1}$  cm (Dingle と Radok) とか、更に、地ふぶき時で、風速が 10~24 m/s の時、硬い平坦な雪面で、 $z_0$  は  $1.19 \times 10^{-2}$  cm、dune, barchan, sastrugi 上で  $z_0$  は  $1.46 \times 10^{-2}$  cm、軟い雪面で、 $z_0$  は  $2.20 \times 10^{-2}$  cm (Budd, Dingle, Radok) 等報告されている。著者等の観測でも、地ふぶき時で、 $z_0$  は  $10^{-5} \sim 10^{-1}$  cm、地ふぶきのない時で  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  cm の程度で上述の範囲内にある。

今後雪面の物理的性質と関連させながら研究を進めたい。

終りに農場での測定を許可して下さった農場関係者の方々にお礼を申し上げる。又風速計一式を長い間貸して下さった鈴木義男助教授に感謝の意をあらわす。

## 文 献

- 1) Ôura, H., Ishida, T., Kobayashi, D., Kobayashi, S. and Yamada, T. 1967 Studies on Blowing Snow. II. *In* Physics of Snow and Ice, Part 2 (H. Ôura, ed.). Inst. Low Temp. Sci., Sapporo, 印刷中.
- 2) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.
- 3) Sutton, O. G. 1949 Atmospheric Turbulence, Methuen, London, 107 pp.
- 4) 鈴木義男 1964 氷板のうける風の力の測定. 低温科学, 物理篇, **22**, 155-170.
- 5) R. A. Bagnold 1954 The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London, 265 pp.
- 6) 大浦浩文・小林大二・小林俊一 1967 低い地ふぶきに於ける雪粒の運動. 低温科学, 物理篇, **25**, 89-97.
- 7) 大浦浩文・小林大二 1966 地ふぶきの研究. 予報 積雪表面を流れる雪に対するみぞの影響. 低温科学, 物理篇, **24**, 305-309.
- 8) Sutton, O. G. 1953 Micrometeorology, McGraw-Hill, New York, 333 pp.
- 9) Mellor, M. 1965 Blowing Snow, Cold Regions Science and Engineering, Part III, Section A 3 C, CRREL, Hanover, 79 pp.

## Summary

When the wind-speed profile is assumed to obey the logarithmic law, the roughness parameter  $z_0$  is defined as the height where the extrapolation of the wind speed profile shows the wind speed as zero. The wind speed was measured by three-cup anemometers at five levels lower than 2 m in height. For example, 200, 85, 35, 15 and 5 cm in height.

The measurements were made for 6 days. On 3 of the 6 days, drifting snow occurred and on 2 of the 6 days, no drifting snow was seen. On the remaining day, the drifting snow occurred twice for an hour or so and then subsided. On this day, a light snowfall was seen occasionally. The difference between  $z_0$  during drifting snow and that when no drifting snow was seen, was investigated for the same surface condition. It appeared that  $z_0$  becomes larger during drifting snow. But, such a tendency was not seen during a snowfall, even when the snowfall was light. It appeared that the drifting seldom occurs on a day when the snow surface has a higher degree of hardness and a higher temperature. However, under the same wind conditions and similar roughness of surface, the drifting snow occurred one day and did not the next. Thus, the necessity for a detailed investigation arose.

The drag velocity  $V_*$  is proportional to the inclination of wind speed profile in the diagram of log-height versus wind speed. The drag force per square centimeter of snow surface,  $\tau_0$  is derived from  $V_*$  by the equation  $\tau_0 = \rho V_*^2$ . The relation between  $\tau_0$  and  $U_{100}$  which is the wind speed at 100 cm in height is shown in Fig. 5. The solid circles for the drifting snow are represented by the line  $\tau_0 \propto U_{100}^{2.6}$  and the white circles for no drifting snow are represented by the different line  $\tau_0 \propto U_{100}^{1.47}$ .

The strength of these driftings was measured by the amount of snow caught by cyclone type collectors and the Meteyelemeters (Russian type collector).