HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪面の硬さ、飛雪形、温度が地ふぶき現象に及ぼす影響
Author(s)	成田, 英器
Citation	低温科學. 物理篇, 35, 77-89
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18328
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p77-89.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hideki NARITA 1977 Influence of Hardness of Snow Surface, Particle Shape of Drifting Snow and Temperature on Driffting Snow Phenomena. *Low Temperature Science, Ser., A, 35.* (with English Summary p. 88)

雪面の硬さ，飛雪形，温度が地ふぶき現象に及ぼす影響*

成田英器
(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

I. 緒　言

東南極大陸・みずほ高原および宗谷海岸において成瀬[1]，小林(俊一)[2]，井上等によって地ふぶきの観測がなされた。筆者もまた，日本南極地域観測隊(第13次)・雪氷部門に参加し，みずほ観測拠点において地ふぶきの観測を行った。これらの研究観測は，上記雪氷部門がエンダービーランドの水収支を知ろうという試みの一環としてなされたものであった。これらの観測者によって得られた結果を使って，小林(俊一)[4]は，風速に対する地ふぶき発生の確率を考慮し，風速と地ふぶき量の関係を用いてみずほ観測拠点での1年間に沿岸方向に運ばれる地ふぶき量を見積った。その結果の値は 1×10^9 kg/km·year であった。

いままで，地ふぶきその他地ふぶき現象を示す量は風速に対する量として主にまとめられてきた。しかしながら，これらの量は風速ばかりではなく，雪面の状態，飛雪粒子の形，大きさ，温度などによっても変り得る。これら地ふぶき現象を左右する要素がこれらに対してどのようにかかわっているかを知ることは，先に述べた地ふぶき量の見積り方をより正確なものにし，また地ふぶきによる自然災害の対策を考える上でも調べておく必要があろう。そこで，筆者はみずほ観測拠点で得られた測定記録を整理して，地ふぶき現象が雪面の状態，飛雪形，温度によってどのような影響を受けているかに注目し調べてみた。

使用した地ふぶき計は箱型地ふぶき計と平型地ふぶき計であった。これらは主に雪面附近を跳躍している地ふぶき粒子，そして空中を浮遊している地ふぶき粒子を補捉するものであった。これらの地ふぶき計は，雪面状態が軟かい所と硬い所に設置された。同時に，測定中の飛雪粒子を補捉し，その顕微鏡観察を行った。

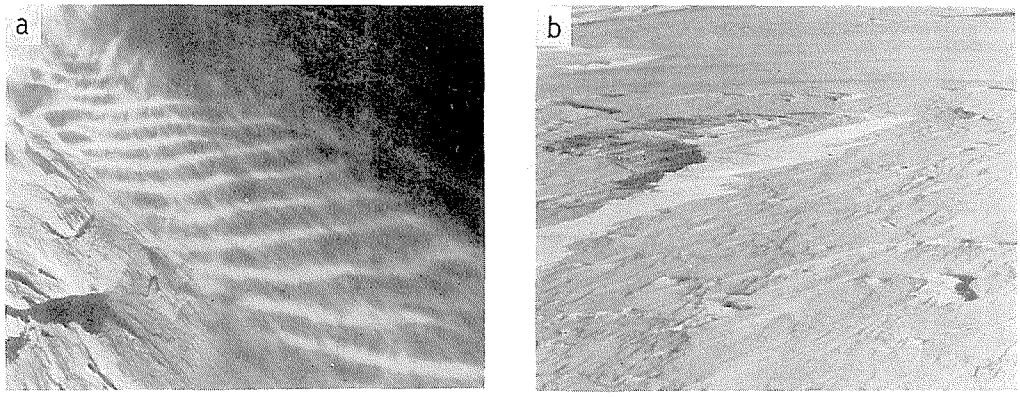
その結果，地ふぶき量は温度に強く依存し，0°C附近の地ふぶき量は −50°C附近の量の1/200という結果となった。また，飛雪形の違いで多少異なり，飛雪が降雪結晶の形を残しているばあいの地ふぶき量は丸みをおびたばあいの $\frac{1}{5}\sim\frac{1}{6}$ という倍小さい値を示した。一方，飛雪粒子の平均跳躍距離は，軟かい雪面で降雪結晶をなしているものは75～40 cm，丸みをおびた粒子は45～10 cm であった。また，雪面が硬いほど，それらの平均跳躍距離は長くなった。

II. 測定器と測定方法

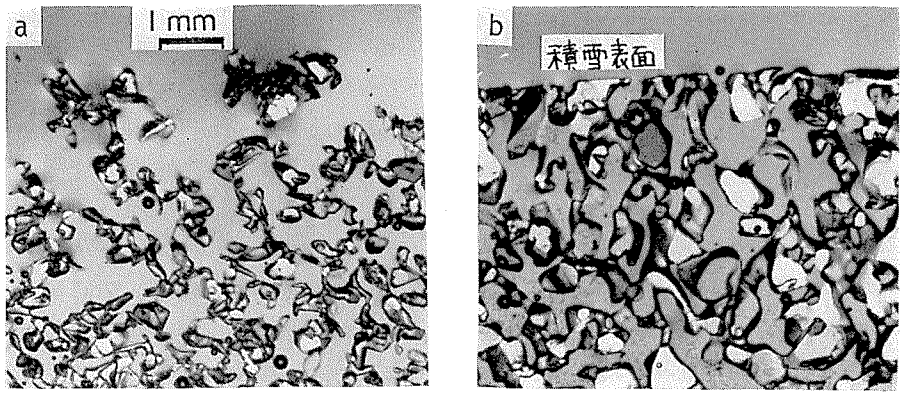
空中を飛んでいる雪粒子，また雪面附近で跳躍運動しながら移動している雪粒子を地ふぶ

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1865号

き計により補捉し，その雪の質量を計り，地ふぶき量，飛雪粒子の跳躍距離，単位面積当たりの雪粒子の反撥量を計算した。それと同時に，飛雪粒子の顕微鏡観察を行った。測定場所は，成長しつつある dune, barchan 上と比較的平らな Sastrugi 地帯，または glazed surface 上であった。この dune や barchan の雪面は軟らかく，木下式硬度計による測定では 200 g/cm^2 程度，Sastrugi や glazed surface 上では硬く，2,000 g/cm^2 程であった。Barchan と glazed surface, Sastrugiの雪面状態を第1図の写真に示し，各々の表面の縦断面の薄片写真を第2図に示した。この図の (a) からわかるように，軟かい雪表面は北海道でみられる一般的な積雪表面とよく似ていて，微視的に非常に粗な表面であった。一方，硬い雪表面は，(b) のように飛雪粒子で研摩されたように平らなものであった。



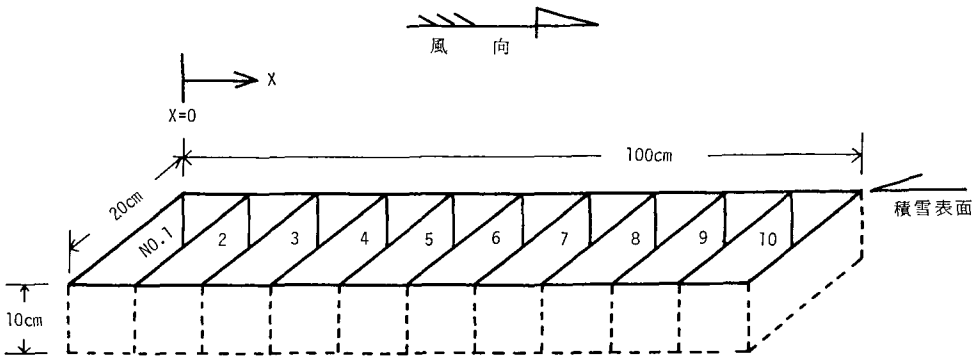
第1図 地ふぶき計設置場所の雪面状態
(a) 軟かい雪面 (dune), (b) 硬い雪面 (glazed surface)



第2図 第1図の雪面の縦断面の薄片写真
(a) 軟かい雪面, (b) 硬い雪面

1. 箱型地ふぶき計

箱型地ふぶき計の略図を第3図に示した。この地ふぶき計は主に跳躍運動で運ばれる地ふぶき粒子を補捉するものである。この地ふぶき計は小林 (大二)[5] が考案したものと同一の形のものであった。図に示されているように，10×10×20 cm の寸法の小箱が 10 個ならべられている



第3図　箱型地ふぶき計の略図

実際に使った時は，この10個の箱が同時に入るような箱におさめて持ち運んだ。これらの箱を上端が雪面と同じ高さになるように埋め，箱と雪穴の間にすき間がないようにする。このようにして，各小箱にたまる地ふぶき粒子の質量を計り，河村[7]が飛砂について解析した方法を用いて整理した。すなわち，風向方向に x 軸，箱の風上先端を原点にとり，飛雪粒子の跳躍距離を l とすると，x 軸上に落下する雪粒子の質量の分布関数 $F(x)$ は

$$F(x) = G\left\{\int_0^\infty g(l)\,\mathrm{d}l - \int_0^x g(l)\,\mathrm{d}l\right\}$$

$$= G\left\{1 - \int_0^x g(l)\,\mathrm{d}l\right\}$$

となり

$$g(x) = -\frac{\mathrm{d}F(x)}{\mathrm{d}x}, \quad \lim_{x\to 0} F(x) = G$$

$$Q = G\cdot\bar{L} \qquad (1)$$

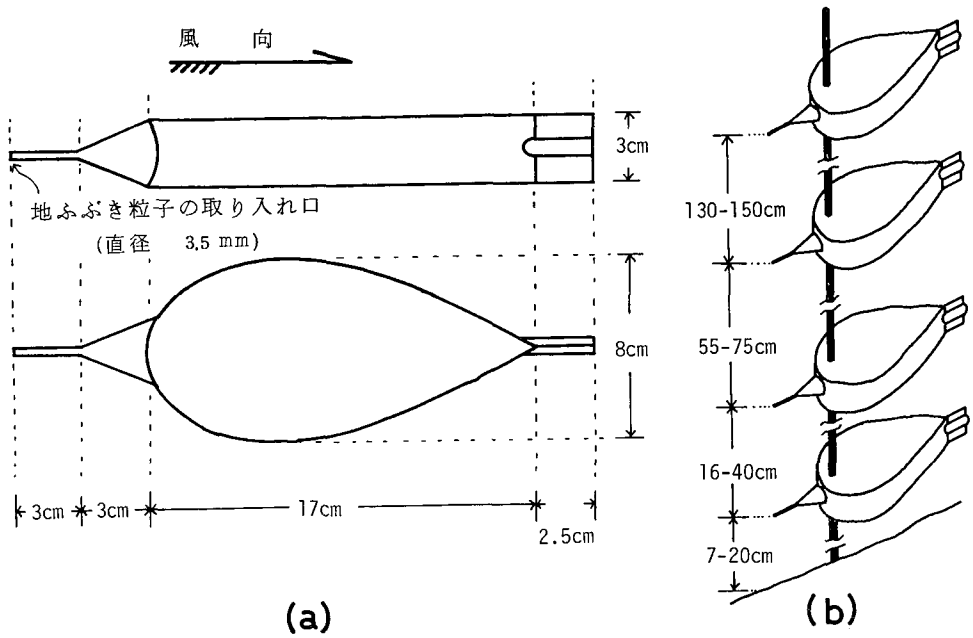
なる関係で互いに結ばれている。ここで，$g(l)$ は雪粒子の跳躍距離分布 G は雪面から飛び出す地ふぶき量，$\bar{L}$ は雪粒子の平均跳躍距離，Q は地ふぶき量である。

筆者はこのことから，各小箱にたまった地ふぶき雪の重さを計り，$F(x)$ を求めて (G g/m²·sec)，Q (g/m·sec)，$\bar{L}$ (m) を計算した。

地ふぶき計が地ふぶきにさらされた時間は1～2分間であった。このときの風速はビラム式風速計で雪面上1mの高さの所で測った。

2. 平型地ふぶき計

平型地ふぶき計を第4図 (a) に，そして設置した配置を第4図 (b) に示した。この観測では4個の地ふぶき計が使われ，各々の地ふぶき計を地ふぶきの強さに応じて雪面から7～20 cm，16～40 cm，55～70 cm，130～150 cm の高さに設置した。この地ふぶき計は本来 Mellor[8] が Saltation gauge として設計したものであった。しかし，筆者はこの地ふぶき計を第4図 (b) のようにして使用した。そのために，ここで Saltation gauge という呼び名は箱型地ふぶき計とまぎらわしくなるので，この論文に限り「平型地ふぶき計」と呼ぶことにした。この計器の飛雪粒子の取り入れ口の直径は3.5 mm，補捉率は風速12 m/sec で0.72であった。



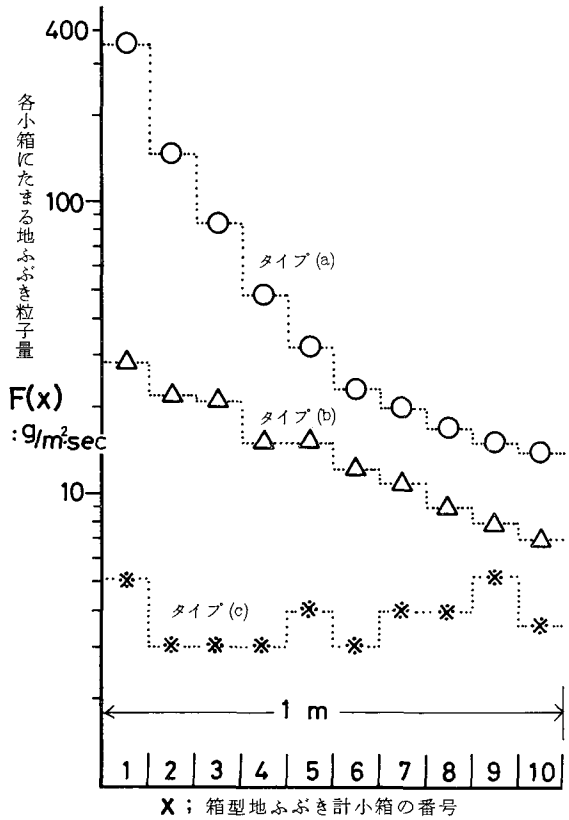
第4図 平型地ふぶき計 (a) とその設置状況 (b)

III. 測 定 結 果

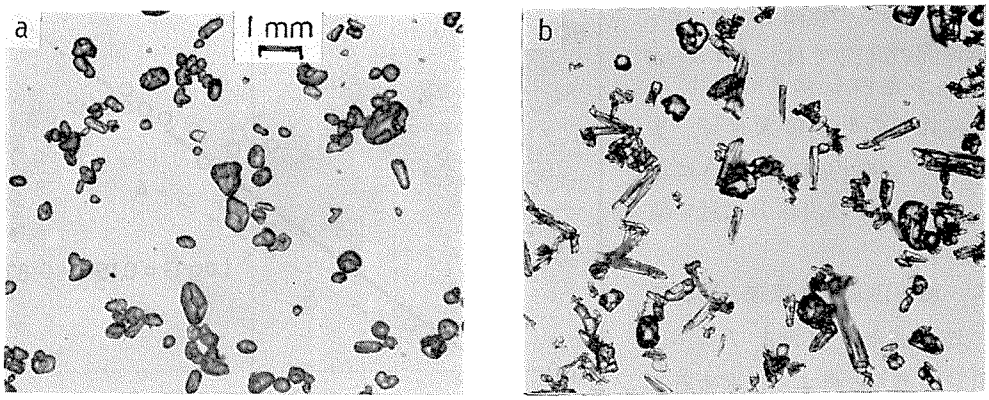
III-1 箱型地ふぶき計による測定結果

1. 地ふぶき分布関数 $F(x)$

地ふぶき計を雪面に設置し，小箱 1, 2, 3, …… に適当な量の雪がたまった後，各々の箱の雪の質量を計った。実際の代表される3つの例を第5図に示した。すなわち，縦軸に対数目盛で $F(x)$, 横軸に箱の位置である x をとると，分布関数 $F(x)$ は雪面の硬さ，飛雪形の違いによって3つのタイプに分けられた。最も風上に位置する小箱1には最も多量の雪がたまり，小箱 2, 3, …… の順に指数関数的に少なくたまるタイプ-(a) と直線的に減少していくタイプ-(b) と各小箱には極めて少量の雪しかたまらず，その量は各小箱によってあまり変らないタイプ-(c) であった。タイプ-(a), (b) は軟かい雪面上での地ふぶきの場合で，そのときの飛



第5図 箱型地ふぶき計の各子箱にたまる地ふぶき粒子の質量；地ふぶき量分布関数 $F(x)$ と x との様子



第6図　地ふぶき粒子の顕微鏡写真；(a) 丸みをもった飛雪粒子，(b) 降雪結晶形を保っている飛雪粒子

第1表　分布関数の形と飛雪形，雪面の硬さの関係

表面状態 (第1, 2図)	飛雪粒子の形 (第6図)	箱型地ふぶき計へのたまり方 (第5図)	図への表示
軟雪面 (硬度約 200 g/cm²)	丸みをおびている	タイプ-(a)	○
	降雪結晶の形が保存されている	タイプ-(b)	△
硬雪面 (硬度約 2,000 g/cm²)	丸み＋降雪結晶	タイプ-(c)	※

雪の形は，タイプ-(a) において，丸みをおびた粒子，タイプ-(b) では降雪結晶が主に含んでいる粒子であった。これらの飛雪粒子の顕微鏡写真を第6図に示した。タイプ-(c) は硬い雪面上での地ふぶきを観測したもので，飛雪形によって差違はみられなかった。

タイプ-(c) の場合，飛雪粒子の跳躍距離が非常に長いために各小箱に平均的に雪粒がたまったと考えられる。このようなときの地ふぶきをこの箱型地ふぶき計で測定することは適当でないのかもしれない。

タイプ-(a), (b) (c) を第1表にまとめた。そして，これらの条件にあてはまる地ふぶきを以後の図にそれぞれ○，△，※印で表わすことにする。

2. 雪面から飛び出す地ふぶき粒子の量と風速との関係

第II章1. で述べたように，単位時間に単位面積から飛び出す地ふぶき量 G は $\lim F(x)$ であった。この G と風速 V との関係を第7図に示した。図の中の点線 A, B は小林 (大二)[5] が北海道で観測した結果で，彼の測定値は A, B にはさまれる範囲にあった。筆者の観測したみずほ観測拠点の気温は −35～−54.5°C の範囲に対し，小林の観測中の気温は −1.8～−7.8°C であった。

図のタイプ-(a) に注目すると，G と V との関係は

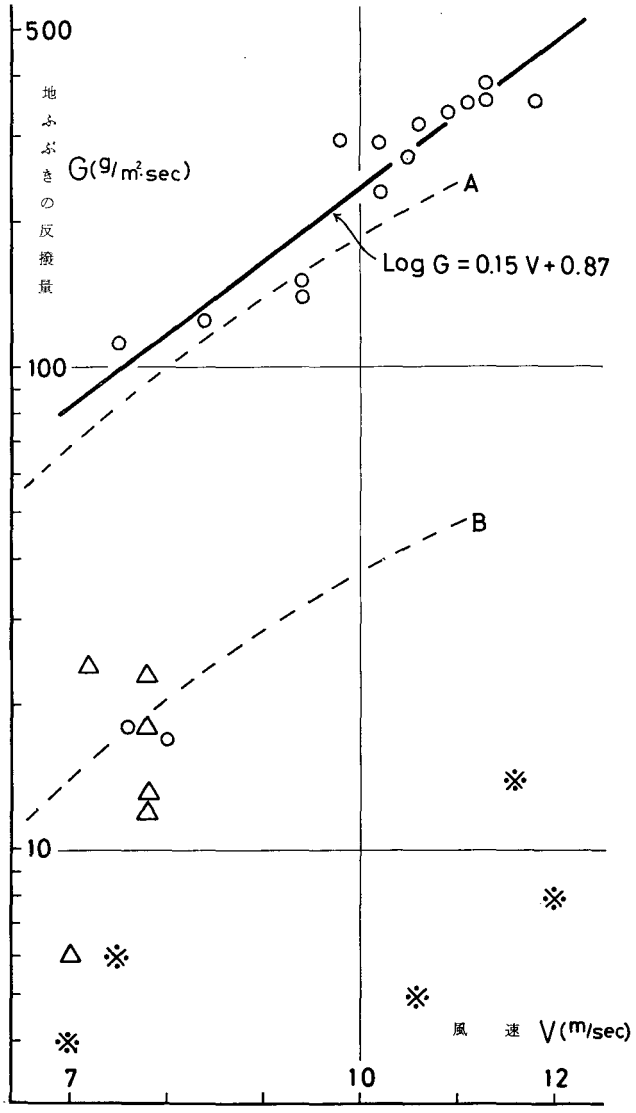
$$\log G = 0.15V + 0.87$$

となった。ここで，G は g/²m·sec, V は m/sec で表わされる。一方，タイプ-(b) の測定値は風

速 7～8 m/sec の範囲しかないが，この範囲の風速では，タイプ-(a) の地ふぶきの G はタイプ-(b) のそれに比べて 8～9 倍大きい。また，タイプ-(a) の値は点線 A に近く，タイプ-(b) は点線 B に近い値を示した。

3. 地ふぶき量と風速との関係

地ふぶき量 Q は $\int_0^\infty F(x)\cdot dx$ を計算することによって求めることができる。第 II 章 (1) で述べたように，地ふぶき計の長さは 1 m であった。そして，各小箱にたまる雪の量は小箱 1, 2, 3, …… の順に少なくなっていき，最も風下にある10番目の箱にもわずかであったが雪はたまった (第 5 図参照)。このことは，1 m 以上の跳躍距離をもつ地ふぶき粒子が存在していることを意味している。それで，地ふぶき量 Q を計算するばあいに，地ふぶき分布曲線 $F(x)$ を $x=1.5$ m まで外挿した。この地ふぶき量 Q と風速 V との関係を第 8 図に示した。点線 A, B は前節と同じ意味の小林 (大二)[5] の値である。前節と同様に，タイプ-(a) に注目した Q と V との関係は



第 7 図 地ふぶきの反撥量と風速との関係

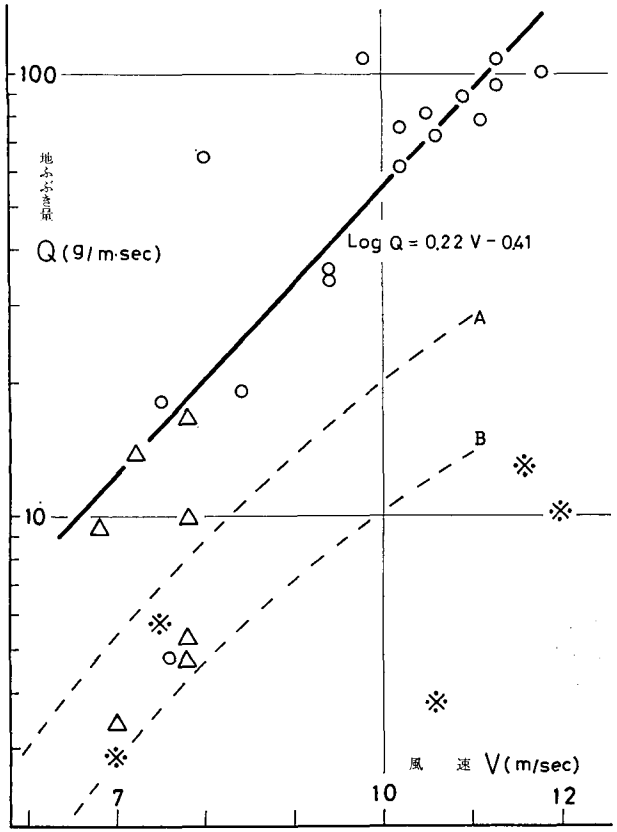
$$\log Q = 0.22V - 0.41$$

であった。ここで，Q と V は g/m·sec, m/sec でそれぞれ表わされる。

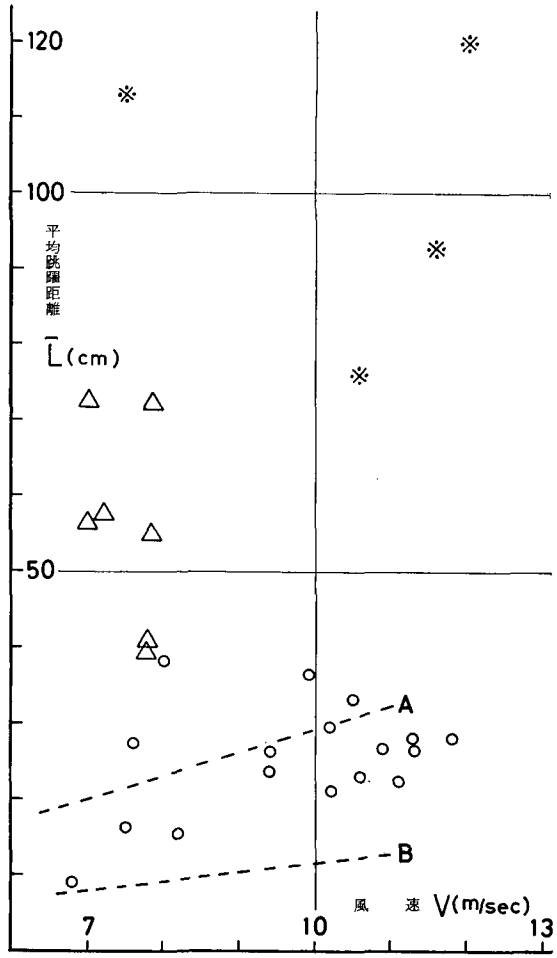
タイプ-(b) の値はタイプ-(a) に比べ 5～6 倍大きい。また，小林 (大二) の値を比べるとタイプ-(a), (b) とも大きい値を示した。

4. 平均跳躍距離と風速との関係

前項で G と Q の値が求められた。これらを使って，(1) 式より平均跳躍距離を $\bar{L}$ 求めた。$\bar{L}$ と風速 V との関係を第 9 図に示した。この図をみると，もしタイプ分けをしなければ，$\bar{L}$ と V との間には全く規則性はないといってよい。しかしながら，タイプ-(a) の測定値に着目してみると，風速の増大とともに平均跳躍距離は長くなっている。そして，風速 6～12 m/sec の範



第8図 地ふぶき量と風速との関係



第9図 平均跳躍距離と風速との関係

囲では，$\bar{L}$ の値は9～40 cm の間にちらばった。タイプ-(b) に関しては，風速 7～8 m/sec の範囲で 40～75 cm であった。これはタイプ-(a) に比べ3～4倍大きい値である。また，硬い雪面での $\bar{L}$ を計算してみると，75～125 cm となった。この場合の分布関数 $F(x)$ (第 III 章) をみると，$F(x)$ は x の値にかかわらずほぼ一定であった。このことは，硬い雪面での地ふぶき粒子の跳躍距離は極めて長いことが予想されるわけで，実際の平均跳躍距離は一応計算した 75～125 cm という値よりさらに大きくなるであろう。

5. 平均跳躍距離と地ふぶき量の温度依存性

大浦[5] は，地ふぶきの温度依存性を昭和基地で地ふぶきが観測されたときときの風速と気温の関係を調べることによって確めた。その結果は，−7°C より高い気温では気温が高いほど地ふぶきは発生しにくく，−7°C 以下では気温の変化によらず，風速 6.5 m/sec 以下で地ふぶきは観測されなかった。

一方，筆者は地ふぶき現象の物理量のうち平均跳躍距離と地ふぶき量の温度依存性を調べるために，筆者の南極みずほ観測拠点での測定値と小林 (大二) の北海道での測定値を以下の条件で整理した

1) 雪面状態が同一であること

2) 飛雪粒子が同じ形をしていること

3) 風速が同じ範囲にあること

1) については，みずほ観測拠点附近は一般に硬い雪面 (第1図 (b)) であるが，その中に dune とか barchan がときどき発達した。その表面は，第2図 (a) にみられるように微視的にあらい構造をしていた。木下式硬度計による測定ではほぼ 200 g/cm² 程度で，北海道の冬期の積雪表面状態と形態的によく似，硬度も同程度であった。

2) については，小林 (大二) の観測した地ふぶき粒子は降雪結晶がまじっているものが多い。その結晶形は主に樹枝状のものであった。みずほ観測拠点における飛雪粒子の観察によると，第6図にあるように地ふぶき時の飛雪はすべて丸みをおびたものであるか，降雪結晶が主になっているかの2通りであった。その降雪結晶の形は砲弾形，又は骸晶角柱形をなしていた。これらは樹枝状結晶と形を異にする。しかし，これらは丸みをもった地ふぶき粒子と比べるとはるかに形として樹枝状のものに近い。

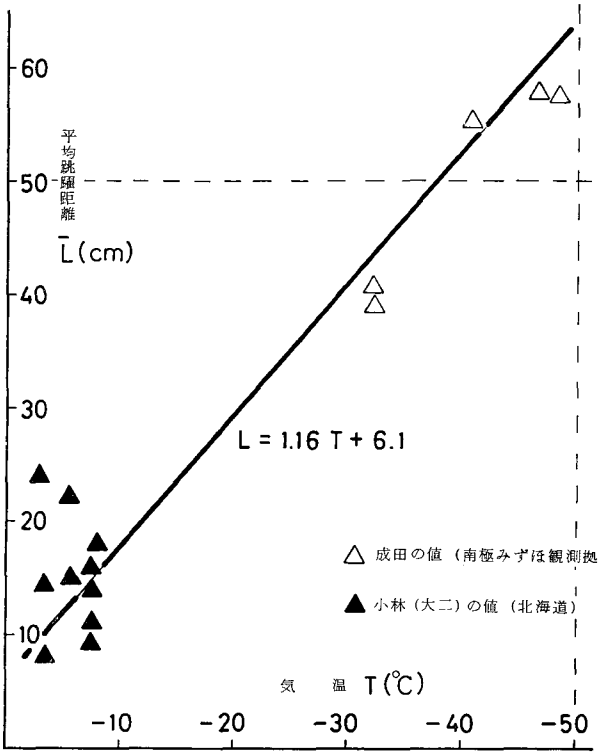
3) については，みずほ観測拠点において得られた測定値の中で，上の 1, 2) の条件にあてはまるものは，風速が 7～8 m/sec の時だけであった。

以上の 1, 2, 3) の条件をもとにして，えらび出された測定値を気温に対してまとめたものを第10, 11図に示した。第10図は平均跳躍距離 $\bar{L}$ と気温 T との関係，第11図は地ふぶき量 Q と気温 T との関係である。図の中の △-印はタイプ-(b) の値，▲-印は小林 (大二) の値である。これら図からわかるように，平均跳躍距離と地ふぶき量は温度 (気温) に極めて強く依存していることがわかるであろう。

これらの関係は，それぞれ

$$\bar{L} = 1.16\,T + 6.1$$

$$\log Q = 0.036\,T + \log 2$$



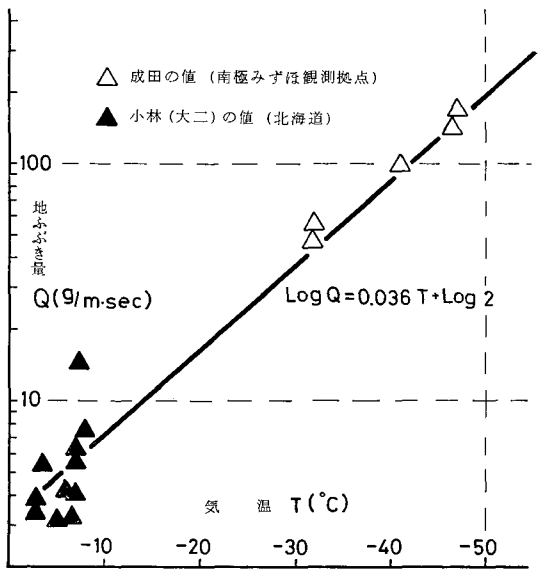
第10図　平均跳躍距離と気温との関係

となった。ここで，Q, $\bar{L}$, T の単位は g/m·sec, cm, °C である。

特に，−50°C 附近の地ふぶき量は 0°C のそれに比べて約 200 倍も大きい。この温度依存性は，地ふぶき量を見積る場合でも，地ふぶきによる自然災害の対策について考える上でも無視できない要素となろう。

以上，地ふぶき現象が雪面の状態（硬さ），飛雪形，温度でいろいろ変るということが実際の野外観測で確めることができた。

一方，地ふぶき現象に関する実験的研究が小林(大二)[5]，竹内等[9]によってなされた。小林は，氷の球を氷の面に落下させたときの反撥係数を求め，温度の低下とともにその係数が増加することを確めた。また，竹内等は傾斜させた自然積雪表面にいろいろな種類の雪粒を落とし，それらの間の摩擦係数を求めた。これによると，丸みをおびた粒子ほど摩擦係数が小さく，そして温度の低下とともに



第11図　地ふぶき量と気温との関係

その係数も減少することを確めた。

温度の低下にともなう反撥係数の増大と摩擦係数の減少，丸みをおびた粒子ほど摩擦係数が小さくなることは，地ふぶきの飛雪輸送に対する抵抗に大いに関係してくるであろう。これらの実験的結果は，筆者の野外での観測結果をよく説明している。

III-2 平型地ふぶき計による測定結果

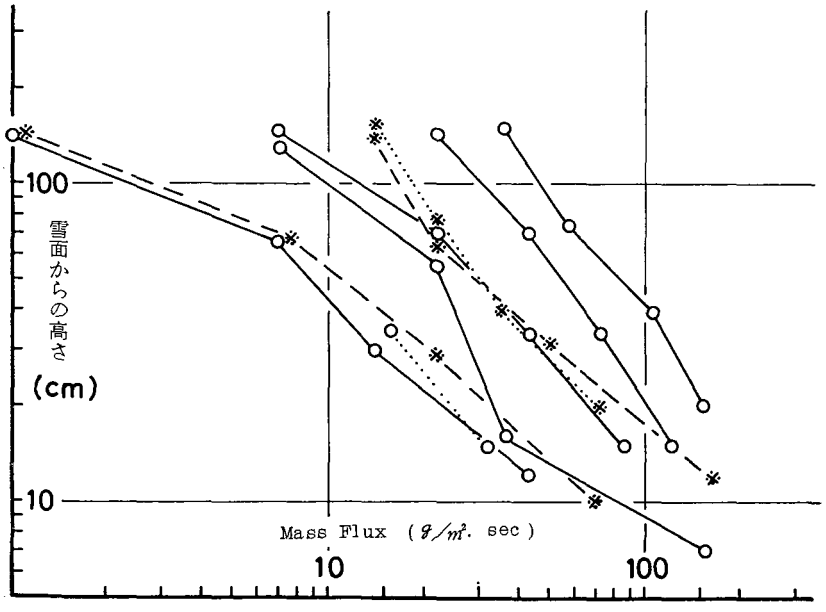
平型地ふぶき計4個を第4図(b)のように設置し，1～2時間放置した。その後，地ふぶき計の中にたまった雪の質量を計り，単位時間に風向に直角な単位面積を通過した雪の質量 (Mass Flux : g/m²·sec) を計算した。縦軸に各地ふぶき計の高さを，横軸に Mass Flux の値をそれぞれ対数目盛りにとって第12図に示した。地ふぶき計の高さは，最とも高くて150cmであった。しかし，実際の地ふぶきの高さの上端は150 cm以上であった。それで，第12図の各々の折線を直線に近似しそれを下端は雪面まで，上端は雪面から10 mの高さまで外挿し，その範囲内で積分して地ふぶき量 Q を計算した。地ふぶき量は単位時間に風向に直角な幅を通過する量 (g/m·sec) である。

地ふぶき量 Q と雪面から1 mの高さの風速 V との関係を第13図に示した。図の中の○-印は軟かい雪面，※印は硬い雪面での地ふぶき量の値である。これによると，雪面の状態による Q の違いはみられない。そして，この地ふぶき量 Q と風速 V との関係は

$$\log Q = 0.17\,V - 0.24$$

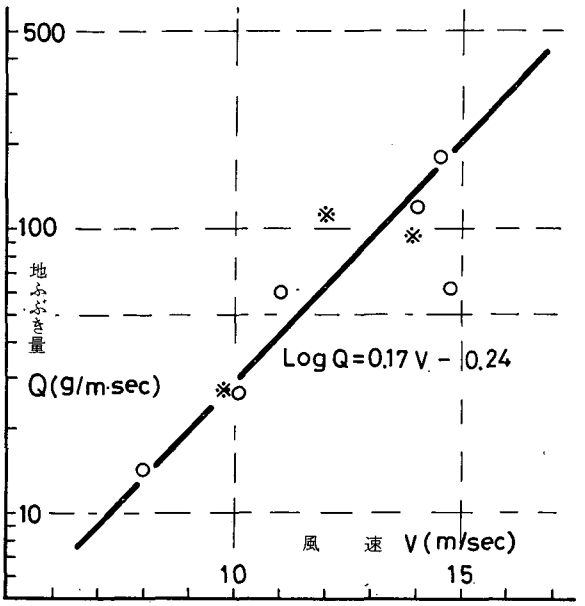
と近似することができる。この関係は箱型地ふぶき計によって得られたタイプ-(a)のときの地ふぶき量と風速との関係とほぼ一致した。

平型地ふぶき計による地ふぶき粒子の補捉時間は1～2時間で，箱型地ふぶき計のそれは



第11図 風向に直角な単位面積を単位時間に通過する雪の量の垂直分布

1～2分間であった。この大幅な補捉時間の差は，地ふぶきの空間密度が雪面附近と雪面上数mの所では異なるためと，地ふぶき粒子の取り入れ口の大きさの差によるものであろう。また，平型地ふぶき計の観測では雪面の硬さによる地ふぶき量の違いはみられなかった。このことは次の理由によるものと考えられる。即ち，軟かい雪面をもつ dune や barchan の大きさは最も大きくて長さ10m，幅2～3m程度で囲りの硬い雪面の面積に比べ極めて小さかった。そのために，dune や barchan 上に設置した平型地ふぶき計の雪の補捉はどうしても周囲の硬い雪面の影響を受け易いであろう。



第13図　第12図の各線を雪面から雪面上10mまでの範囲を積分して求めた地ふぶき量と風速との関係

IV. 摘　　要

東南極大陸・みずほ観測拠点において，箱型地ふぶき計と平型地ふぶき計による地ふぶきの観測を行った。この測定結果を整理し，地ふぶき現象が雪面状態（硬さ），飛雪形，温度でどのように変り得るかを調べた。

先ず，雪面附近で跳躍運動によって運ばれている地ふぶき粒子を主に補捉する箱型地ふぶき計による結果は次のようであった。

雪面の硬度が約 200 g/cm² という軟かいところの場合，単位時間，単位面積で反撥する雪の質量 G は，飛んでいる地ふぶき粒子が丸みをもったものほど大きな値を示した。その値は風速 7～8 m/sec のときで約 100 g/m²·sec，そして，この値は降雪結晶形を保った飛雪粒子の場合の8～9倍であった。地ふぶき量 Q についても同様に風速 7～8 m/sec で約 20 g/m·sec で降雪結晶形を保った飛雪粒子のときの3～4倍大きな値を示した。飛雪粒子の平均跳躍距離は，降雪結晶の形を保っている飛雪粒子のとき，風速 7～8 m/sec で 40～75 cm，丸みをもった粒子では風速 7～12 m/sec で 10～45 cm であった。

また，みずほ観測拠点での測定値の中から地ふぶき粒子が降雪結晶の形を残しているもの，雪面状態が軟かく硬度にして約 200 g/cm²，風速が 7～8 m/sec の条件のものをえらび出し，そして北海道での小林 (大二) の測定結果の中から上条件のものをえらび，平均跳躍距離と地ふぶき量について温度依存性を調べた。その結果，両者とも極めて強く温度に依存した。すなわち，温度の低下とともにそれらは増大し，平均跳躍距離については −50°C 附近の値は 0°C 附近の値に対して7～8倍，地ふぶき量の値にとっては約200倍も大きい結果となった。

一方，硬い雪面（硬度が 2,000 g/cm² 程度）では，飛雪粒子の跳躍距離が非常に長いためか箱型地ふぶき計（長さ 1 m）の各小箱に補捉された地ふぶき雪の質量はほぼ同程度の量であった。そのために，第 II 章 1. で述べた Q の値は無限大になってしまい解析することはできなかった。従って，このような状態のところで箱型地ふぶき計を用いることは適当でないのかもしれない。

次に，雪面上 7～20 cm 以上の高さを飛んでいる粒子を補捉するための平型地ふぶき計による測定も行われた。これらによると，雪面状態による地ふぶき量の違いはみられなかった。これは，軟かい雪面である dune や barchan の大きさが囲りの硬い雪面の広さに比べ極めて小さいために，結果的に平型地ふぶき計を dune や barchan 上に設置していても硬い雪面上の地ふぶきの影響を大いに受けていたためと考えられる。

終りに，この問題を示唆して下さり，興味を向けて下さった小林大二助教授に感謝するとともに，本論文を書くにあたり有益な助言と御意見を下さった石田完教授，清水弘助教授，小林俊一助手に感謝致します。

また，みずほ観測拠点において観測を行うにあたり，川口貞男隊長ほか第 13 次日本南極地域観測隊の隊員の皆様から多くの御配慮と御支援をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

文　献

1) 成瀬廉二 1970 南極昭和基地対岸の大陸沿岸部における地ふぶき量の測定. 低温科学, 物理篇, **28**, 147-154.
2) Kobayashi, S. and Yokoyama, K. 1977 Measurements of drifting snow on the route between Syowa station and Mizuho camp, 1973. *JARE Data Report*, **36**, 154-155,
3) Inoue, M. 1977 Measurements of drifting snow at Mizuho camp, 1974-1975. *JARE Data Report*, **36**, 156-157.
4) Kobayashi, S. 1977 Snow transport by the katabatic winds in Mizuho camp areas, East Antarctica. *J. Meteorol. Soc.*, Japan, (投稿中).
5) Kobayashi, D. 1972 Studies of snow transport in low level drifting snow. *Contri. Inst. Low Temp. Sci.*, **A 24**, 1-58.
6) 大浦浩文 1958 地ふぶきの発生に関する研究. 雪氷, **30**, 6 号, 1-7.
7) 河村龍馬 1951 飛砂の研究. 東京大学理工研究報告, **5**, 95-122.
8) Mellor, M. 1960 Gauging antarctic drifting snow. *in* Antarctic Meteorology, 347-354, Pergamon Press, Oxford.
9) 竹内政夫・村木義男 1970 積雪表面の摩擦角と吹雪発生限界について. 昭和 45 年度日本雪氷学会秋季大会（口頭発表）.

Summary

It has been found from measurements by a box-type drift gauge that the phenomena of drifting snow changed remarkably by degrees of hardness of a snow surface, shapes of snow particles and temperatures. Their effects on snow drifting are summarized in the following: When the snow surface was soft:

(1) The rebound mass G of the round-shaped particle was larger 8 to 9 times as much as

that of the angular-shaped particle.

(2) The amount snow drift transport Q had a tendency to increase with wind speed; besides, Q of the round-shaped particle was slightly larger than that of the angular-shaped particle.

(3) The mean length of saltation path of the angular-shaped particle was longer than that of the round-shaped particle.

(4) The amount of snow drift transport and the mean length of saltation path increased remarkably with decrease of air temperature.

When the snow surface was hard:

(5) The mean length saltation path was longer than 1 meter, which was the length of the box-type drift gauge.

Details are reported in English in Memoir of National Institute of Polar Research, Special Issue, 7 "Glaciological Studies in Mizuho Plateau, East Antarctica, 1965-1975"