



Title	地ふぶき時における風の乱流 III : 波状雪面形成時の観測例
Author(s)	小林, 俊一; KOBAYASHI, Shun'ichi; 石田, 完 他
Citation	低温科学. 物理篇, 32, 81-87
Issue Date	1974-03-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18247">https://hdl.handle.net/2115/18247</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p81-87.pdf



## 地ふぶき時における風の乱流 III\*

— 波状雪面形成時の観測例 —

小林俊一・石田 完

(低温科学研究所)

(昭和49年10月受理)

### I. 緒 言

風の乱流からみた地ふぶきの研究が主に超音波風速計を使って筆者等のグループで行われつつある<sup>1-5)</sup>。現在あつかっている地ふぶき時における風と雪面の相互作用としては、風の乱流要素と雪面にみられる種々な模様との関係や、雪の吹き溜りの問題、地ふぶき量の問題等がある。これらは地上数 m 内の接地気層を対称にしているが、最も重要と思われる数 10 cm 以内の雪面近くの乱流微細構造にはまだ及んでいないのが現状である。雪面近くを運動する雪粒の saltation の現象から、飛雪量や地ふぶきの発生に関しての小林大二<sup>6)</sup>による研究がある。筆者等は雪面から約 1 m の高さでの乱流測定が主であるが、雪面近くに集中している飛雪粒子の影響が 1 m の高さの所に及ぶのか、又は風の持っている潜在的な乱流要素が雪面に影響を及ぼす方が大きいのかはまだはっきりしていない。今回たまたま、盆地冷却の際の風の乱流測定<sup>7)</sup>を北海道天塩郡幌延町間寒別にある北大天塩地方演習林内で行っている時に降雪があり、雪面が約 20 cm の新雪で被われ、続いて高い地ふぶきが発生し雪面上に波長 10 m、波高 15~20 cm の波状雪面 (Snow-Wave)<sup>8)</sup>が形成された。この時、風の乱流観測を行ったのでその結果について報告する。なおこの波状雪面は数 cm/min の速さで移動し、ある点の雪面の高さの変化は振動的である。

### II. 観測方法

観測は高さ 3 m のポールに、3 杯のカップ型風速計 5 点とサーミスタ温度計 6 点 (このうち 3 点は雪温、残りの 3 点は気温測定に使った) を取り付け、風速と気温分布を測定した。更に 135 cm の高さに一成分超音波風速計 2 台を取り付け垂直成分と水平成分の風速変動の測定を行った。雪面の状態は新雪が表面にあり、降雪を伴った高い地ふぶきが発生していた。特に雪面には波長 10 m、波高 15~20 cm の波状雪面が形成されつつあった。

観測は 1972 年 1 月 22 日 10 時 30 分から 11 時 10 分の間、超音波風速計の記録紙を早廻し (1 cm/sec) にし、1 回約 2 分間の観測を 7 回行った。風速変動の記録から 0.25 秒間隔で風速値を続取り統計的な解析を行った。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1328 号

解析方法は、垂直成分と水平成分の風速変動  $w(t)$ ,  $u(t)$  の cross-correlation と cross-spectrum を計算して、雪面に波状雪面が形成されつつある時の風の乱流状態を知る事を意図している。解析の手順は以下の如くである。

1) 風速の垂直、水平成分の読みとり値  $w_i$ ,  $u_i$  に高域濾波演算を施して長周期の変動分を除く。ここで  $i=1, 2, \dots, N$  であって、読みとり時間  $\Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t$  に対応している ( $\Delta t=0.25$  秒)。フィルタは3角形型高域濾波器を用いた。すなわち入力を  $x_i$ , 出力を  $y_i$  とした時、

$$y_i = x_i - \frac{1}{m^2} (x_{i-m+1} + 2x_{i-m} + \dots + (m-1)x_{i-1} + mx_i + (m-1)x_{i+1} + \dots + x_{i+m-1})$$

である。実際には計算時間を短縮するために漸化式、

$$y_{i+1} = y_i + x_{i+1} - x_i + \frac{1}{m^2} v_{i+1},$$

$$v_{i+1} = v_i - x_{i-m} + 2x_i - x_{i+m}$$

によって計算した。今の場合  $m=10$  としたが、このフィルタを通すことによって周波数 0.4 Hz 以上のパワーには変化なく、0.2 Hz のパワーはもとの 0.35 倍に、0.1 Hz のパワーは更に 1/10、すなわち 0.036 倍に減少する。

2) かくして 0.2 Hz 以下の周波数成分をとり除いた  $w_i$ ,  $u_i$  の自己相関関数と相互相関関数を計算する。すなわち、

$$C_{uu}(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} u_i \cdot u_{i+j}$$

$$\equiv \langle u_i \cdot u_{i+j} \rangle_i,$$

$$C_{ww}(j) = \langle w_i \cdot w_{i+j} \rangle_i,$$

$$C_{uw}(j) = \langle u_i \cdot w_{i+j} \rangle_i,$$

$$C_{uw}(-j) = \langle w_i \cdot u_{i+j} \rangle_i,$$

ここで  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $j=0, 1, \dots, M$  である。

3) 次に自己相関関数の cos 変換と相互相関関数の cos 及び sin 変換を求める。すなわち、

$$F_u(k) = \delta_k \langle C_{uu}(j) \cdot \cos \frac{k\pi j}{M} \rangle_j,$$

$$F_w(k) = \delta_k \langle C_{ww}(j) \cdot \cos \frac{k\pi j}{M} \rangle_j,$$

$$CO_{uw}(k) = \delta_k \left\langle \frac{C_{uw}(j) + C_{uw}(-j)}{2} \cos \frac{k\pi j}{M} \right\rangle_j,$$

$$Q_{uw}(k) = \delta_k \left\langle \frac{C_{uw}(j) - C_{uw}(-j)}{2} \sin \frac{k\pi j}{M} \right\rangle_j,$$

ここで  $j, k=0, 1, \dots, M$ ;  $k=0, M$  のとき  $\delta_k = \frac{1}{2}$ ;  $k \neq 0$  のとき  $\delta_k = 1$  である。

4) 以上で求めた cos 変換, sin 変換をなめらかにするために更に hamming window を通す。すなわち入力を  $x_i$ , 出力を  $y_i$  とすれば、

$$y_0 = 0.46x_0 + 0.46x_1,$$

$$y_i = 0.23x_{i-1} + 0.54x_i + 0.23x_{i+1}, \quad 1 \leq i \leq M-1,$$

$$y_M = 0.46x_{M-1} + 0.46x_M,$$

である。この演算を施して最終的に得られた  $F_u(k)$ ,  $F_w(k)$  は夫々  $u_i$ ,  $w_i$  の power spectrum であり,  $CO_{uw}(k)$  は co-spectrum,  $Q_{uw}(k)$  は quadrature spectrum である。

以上の power spectrum, co-and quadrature spectrum を用いて coherence  $CH(k)$  及び位相差  $Y(k)$  を次式で計算した。

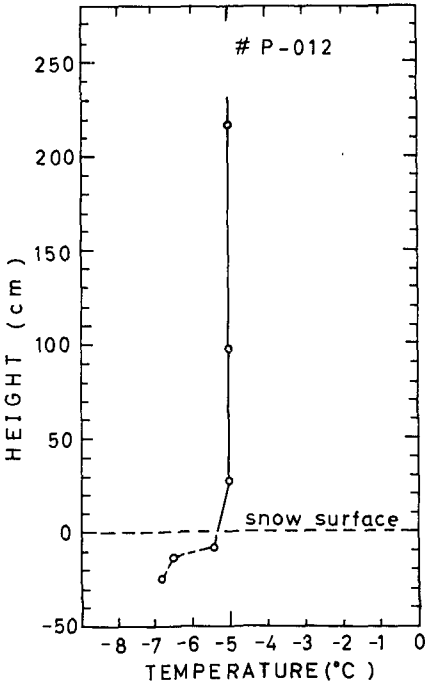
$$CH(k) = \frac{CO_{uw}(k)^2 + Q_{uw}(k)^2}{F_u(k) \cdot F_w(k)} \quad (\text{coherenc}),$$

$$Y(k) = \tan^{-1} \left( \frac{Q_{uw}(k)}{CO_{uw}(k)} \right) \quad (\text{phase lag}).$$

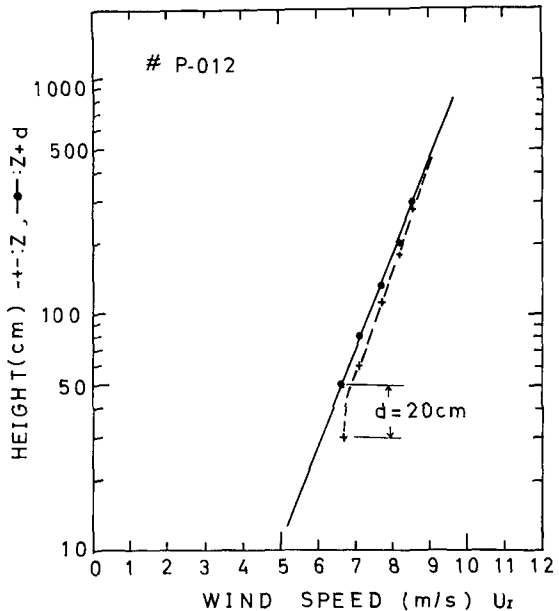
ここで, co-spectrum  $CO_{uw}(k)$  は  $\overline{u \cdot w} = \int_0^\infty CO_{uw}(k) dk$  の関係から Reynolds stress と関係があり, coherence は  $u(t)$ ,  $w(t)$  の2つの変動について, 各周波数成分の power がどれだけ相関があるかを示す値で 0 から 1 の値まで変化する。そしてこの平方根は, 2つの変動の間の各々の周波数成分に分解した波についての相互相関係数を表わしている。又  $Y(k)$  は  $w(t)$  が  $\theta$  だけ  $u(t)$  に遅れている各周波数成分についての位相のずれ (radian) を示している。

### III. 観測結果

乱流観測時の大気は, 第1図に示した温度分布の如く中立状態である。その時の風速分布を第2図に示した。雪面近くでは対数法則から外れ, 地面修正量 (zero plane displacement)

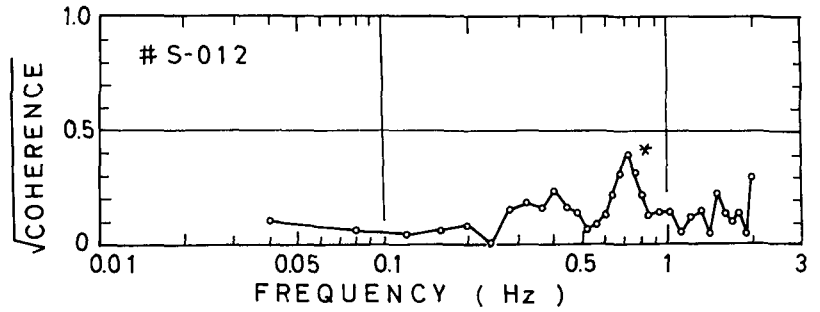


第1図 気温分布の例



第2図 風速分布の例

点線; 雪面を高さの基準とした場合 (たて軸は  $z$  cm)  
 実線;  $d$  だけ高さを修正した場合 (たて軸は  $z+d$  cm)



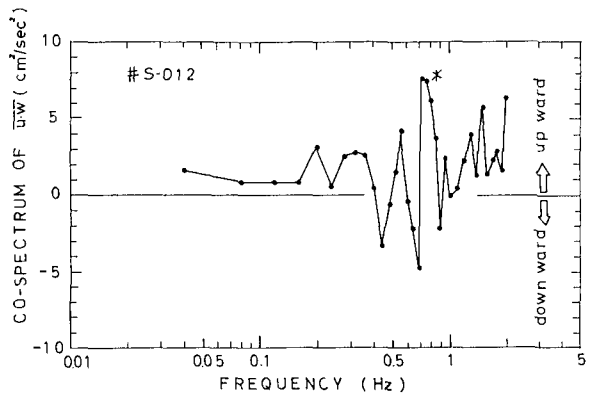
(a) 波状雪面形成時

第3図 垂直と水平方向の風速

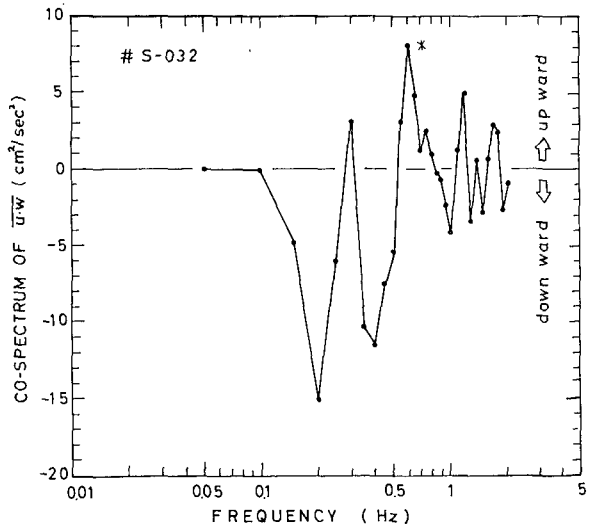
の  $d$  の値を適当に選ぶと対数法則が成り立つ。この  $d$  の値は時間の経過と共に 20 cm から 15 cm に変わった。この値は雪面の波状雪面の波高と一致した。雪面近くの流れの状態が波状雪面の波高の影響を受けたものと考えられる。

風速の垂直成分と水平成分の風速変動間の coherence を第3図の (a), (b) に示した。(a) は観測の始め (10時30分) で波状雪面が活発に形成されている。(b) は観測の終り (11時10分) の例で、地ふぶきは生じているが波状雪面は形をあまり変えずに安定している。(a) の場合には周波数  $n=0.7$  Hz に高い相関を示すピークがみられる。1 m の高さの平均風速が 7.5 m/s であるから波長 10 m に対応し、波状雪面の波長と一致している。それから約 40 分後の雪面がやや安定した時、(b) の場合) 即ち波状雪面の形が時間の経過と共にあまり変わらなくなった時には (波状雪面の安定時)、coherence に顕著なピークはみられない。位相については、概して位相の変動が大きく、明らかな結果を得るにはいたらなかったので結果を示さなかった。

co-spectrum については、第4図 (a)~(d) に示した。(a) は10時30分、

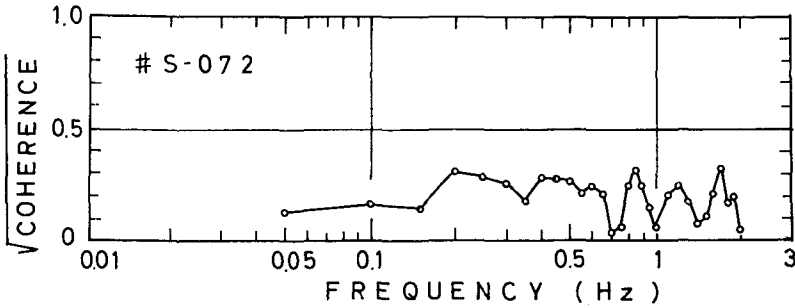


(a) 波状雪面形成時 (10:30)



(b) 波状雪面形成時 (10:40)

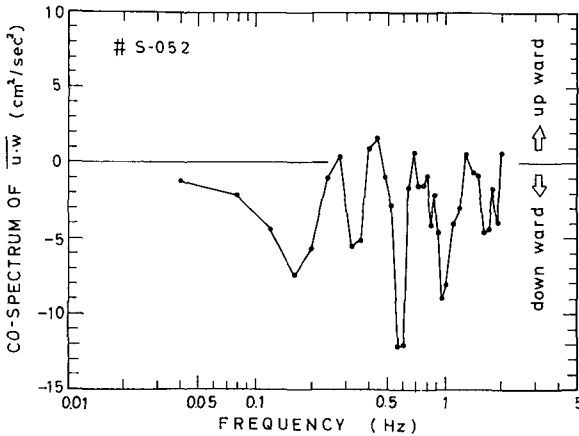
第4図 垂直と水平方向の風速



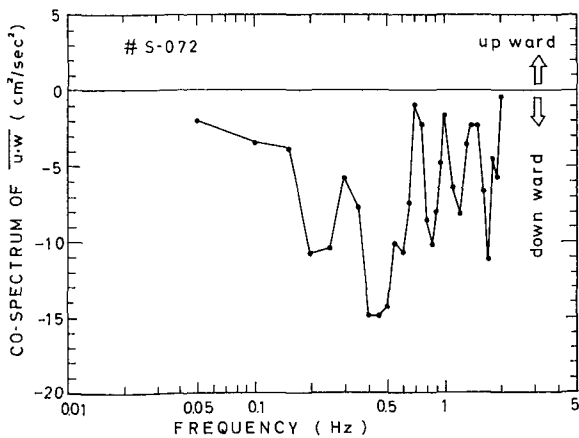
(b) 波状雪面安定時 ((a)より約40分後)

変動間の coherence の例

(b) は 10 時 40 分, (c) は 10 時 50 分, (d) は 11 時 10 分頃の観測例である。(a), (b) は波状雪面形成時の例で, 周波数  $n=0.6\sim 0.7$  Hz の所に上向きのピーク (\*印) が見られ,



(c) 波状雪面安定時 (10:50)



(d) 波状雪面安定時 (11:10)

変動間の co-spectrum の例

(c), (d) の波状雪面の安定時には, 顕著なピークはみられない。また波状雪面の形成時には, 運動量輸送を表現しているこの co-spectrum は上向きで, 波状雪面の安定時には運動量輸送は下向きになる傾向を示した。即ち波状雪面の形成時には, 雪面では堆積-削剝が活発にくりかえされている事に対応し, そのような時には飛雪の空間密度の変動は大きいと考えられる。波状雪面の安定時には, 雪面ではそこから飛び立つ雪粒の量と雪面に落下してそこに滞在する雪粒の量がほぼ平衡状態にある事に対応していると考えられる。運動量輸送が上向きである事は, 飛雪の空間密度が平均的な飽和状態 (その時の風が輸送する能力の平均的な限度) の附近で振動していると考えて説明が出来る。すなわち飛雪の空間密度の飽和量は風速によって異なり一般的には風速が増すにしたがって増加する (Дюнин (1963)<sup>9)</sup>, 小林大二 (1967)<sup>6)</sup>)。特に波状雪面の形成時は, 飛雪の空間密度の飽和量が大きい時で, この飽和量

を中心に変動しているのが堆積-削剝がくりかえされる。そして波状雪面は堆積の部分が移動する現象である<sup>8)</sup>。いいかえれば、地ふぶきの飛雪粒子の運動量は一般的には風から貰うけれども何んらかの原因で生じた飛雪の空間密度の過飽和分(平均的な飽和量を越えた分)が波状雪面を形成できるほど大きくなった場合、逆に風に運動量を与えて雪面に落下して堆積すると考えられる。すなわち飛雪の空間密度の変動は、ある風速で平均的な飽和量を中心にしていつも振動しているけれども、風に大きな運動量を与える場合は、変動の振幅が大きくて過飽和量が大きい時で波状雪面が形成されつつある時に特に顕著である。

#### IV. 結 語

新雪が 20 cm 位の厚さに一様に積った後で、強風となって高い地ふぶきが発生し、雪面に波長 10 m、波高 15~20 cm の波状雪面が形成されつつある時の風の乱流観測結果から次の事がわかった。

波状雪面の形成時には、風速の水平と垂直成分の風速変動の間の coherence と co-spectrum に、波状雪面の波長と一致する周波数 0.7 Hz でピークが認められた。更にこの時 co-spectrum は上向きの値を示した。これらの事は雪面と風の乱流状態との間の相互作用が顕著である事を示している。将来波状雪面形成時の飛雪の空間密度の変動の観測を行い、風と雪面との相互作用に飛雪粒子の空間密度の変動がどのように関係しているかを調べたい。

終りに、風の乱流構造の解析における統計計算は、北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-60 で行ったことを附記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 小林俊一・石田 完 1970 地ふぶき時における風の乱流. 低温科学, 物理篇, **28**, 125-133.
- 2) 石田 完・小林俊一・小林大二・石川信敬 1971 天塩地方山地の雪庇調査 I. 低温科学, 物理篇, **29**, 93-101.
- 3) 小林俊一・石田 完 1972 地ふぶき時における風の乱流 II. 低温科学, 物理篇, **30**, 73-84.
- 4) 小林俊一 1972 障害物附近の風の乱流と雪の吹溜り. 低温科学, 物理篇, **30**, 85-91.
- 5) 西尾文彦・石田 完 1973 地ふぶきにおける乱れのエネルギー消散率. 低温科学, 物理篇, **31**, 65-85.
- 6) Kobayashi, D. 1972 Studies of snow transport in low-level drifting snow. *Contri. Inst. Low. Temp. Sci.*, **A 24**, 58 pp.
- 7) 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**, 92-102.
- 8) 小林俊一 1971 地ふぶきにおける雪面の波状模様の生成と運動. 低温科学, 物理篇, **29**, 81-92.
- 9) Дюнин, А. К. 1963 Механика Метелей. Сибирского Отделения АН СССР, Новосибирск, 378 pp.

#### Summary

Turbulent fluctuations in the horizontal and vertical velocity components were measured by using two sonic anemometers at the same height 135 cm for each component under a condition of snow-wave forming. The snow-wave formed when a strong wind blew with a speed more than 7 m/s after newly snow had accumulated in the thickness of 20 cm on the snow field. The snow-wave had a wave length of 10 m and a wave height of 15 to 20 cm. The coherence and co-spectrum of horizontal

and vertical with velocity components were calculated. Examples of coherence and co-spectrum are shown in Fig. 3(a),(b) and Fig. 4(a)-(d).

In regard to coherence, which concerns itself with a correlation between the horizontal and vertical variables at various frequencies, it was recognized that the peak of frequency was 0.7 Hz in the case of Fig. 3(a) where the snow-wave was formed. The length computed from the mean wind speed and this peak-frequency was 10 m, which agreed to the wave length of the snow-wave. On the other hand, when snow-wave forming was weakened in such a case as is shown in Fig. 3(b), remarkable peaks of frequency could not be found.

Co-spectrum which concerns itself with momentum transfer also had remarkable peaks of frequency at 0.6 to 0.7 Hz as shown in Fig. 4(a) and (b), corresponding to the wave length of the snow-wave. In this case, the upward direction was dominant in the momentum transfer. This fact means that the wind turbulence and the snow-wave forming interact with each other. In the meantime, when the snow-wave forming was weakened as shown in Fig. 4(c) and (d), there were no remarkable peaks and the momentum transfer came to the downward direction.