



Title	積雪層内の微気圧変動
Author(s)	石田, 完
Citation	低温科学. 物理篇, 39, 25-31
Issue Date	1981-03-18
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/18410">http://hdl.handle.net/2115/18410</a>
Type	bulletin (article)
File Information	39_p25-31.pdf



[Instructions for use](#)

## 積雪層内の微気圧変動\*

石 田 完  
(低温科学研究所)  
(昭和55年10月受理)

### I. ま え が き

地ふぶき発生機構を明らかにする上で、積雪表面層内の気流速分布を知ることは重要な課題となっている。今迄にも熱線風速計等を用いて雪内気流速の測定が試みられているが<sup>1,2)</sup>、熱線を積雪内に設置するために、積雪内に空洞を作ることになり、積雪構造を乱す。積雪内に空洞を作ったために、そこで測定される流速が自然のままの積雪内の流速より大きくなることを吉田<sup>3)</sup>は明らかにしているが、まだ充分信頼できる結果が得られてはいない。小型ピトー管を用いたこともあるが、ピトー管は元来、層流中で用いるものであり、ピトー管の大きさより、はるかに小さな積雪内のような網目状通路には適用できず失敗している。

そこで間接的な方法であるが、積雪内の微気圧変動の測定から気流速を推定することを試みた。積雪内の微気圧変動と気流速との関係については吉田<sup>3)</sup>の理論的研究がある。

### II. 微気圧変動の2地点における相互相関

$x$ 軸方向に波数  $k$  の微気圧余弦波  $p$  が位相速度  $c$  で伝播してゆくことを考える。

$$p = \cos k(x - ct) \quad (1)$$

この微気圧波を  $x$  軸上に置いた2台の微圧差計で測定する。1台は  $x=0$  と  $x_1$  における微圧差を測定し、他は  $x_1$  と  $x_2$  における微圧差を測定する。 $x=x_1$  地点では微圧差計1および2の基準圧となり、1, 2に共通とする。すると1および2で測られる微気圧変動は

$$p_1 = \cos kct - \cos k(x_1 - ct) \quad (2)$$

$$p_2 = \cos k(x_2 - ct) - \cos k(x_1 - ct) \quad (3)$$

となる。この両者の圧力変動の相互相関関数  $R(\tau)$  を計算すると

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p_1(t) \cdot p_2(t + \tau) \cdot dt \\ &= \frac{1}{2} (c_2 - c_1 - c_1 c_2 - s_1 s_2 + 1) \cos k c \tau + \frac{1}{2} (s_2 - s_1 + c_2 s_1 - c_1 s_2) \sin k c \tau \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \cos kx_1, & c_2 &= \cos kx_2 \\ s_1 &= \sin kx_1, & s_2 &= \sin kx_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第2275号

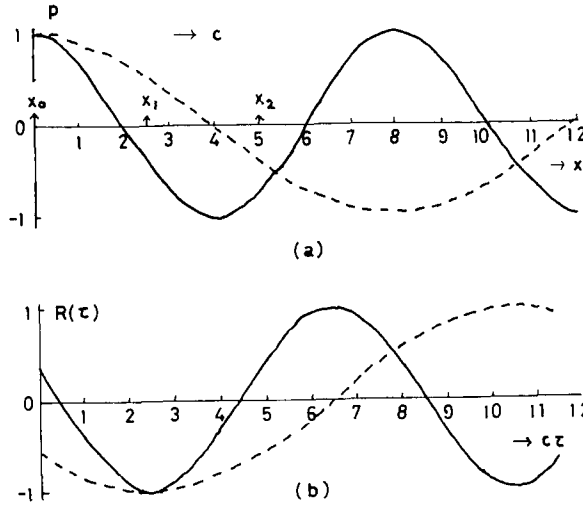
である。基準圧測定点  $x_1$  を  $x_2$  までの中央にとり、すなわち  $x_2 = 2x_1$  とすると

$$\left. \begin{aligned} c_1 c_2 + s_1 s_2 &= c_1, & c_2 s_1 - c_1 s_2 &= -s_1 \\ s_2 &= 2s_1 c_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

の関係から (4) 式は

$$\left. \begin{aligned} R(\tau) &= c_1(c_1 - 1) \cos kc\tau + s_1(c_1 - 1) \sin kc\tau \\ &= (c_1 - 1) \cos k(x_1 - c\tau) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。



第1図 (a) 微気圧波と差圧センサの関連位置，センサ1は  $x_0$  と  $x_1$  の差圧，センサ2は  $x_2$  と  $x_1$  の差圧を測定  
(b) センサ1, 2により測定された波動の相互相関係数

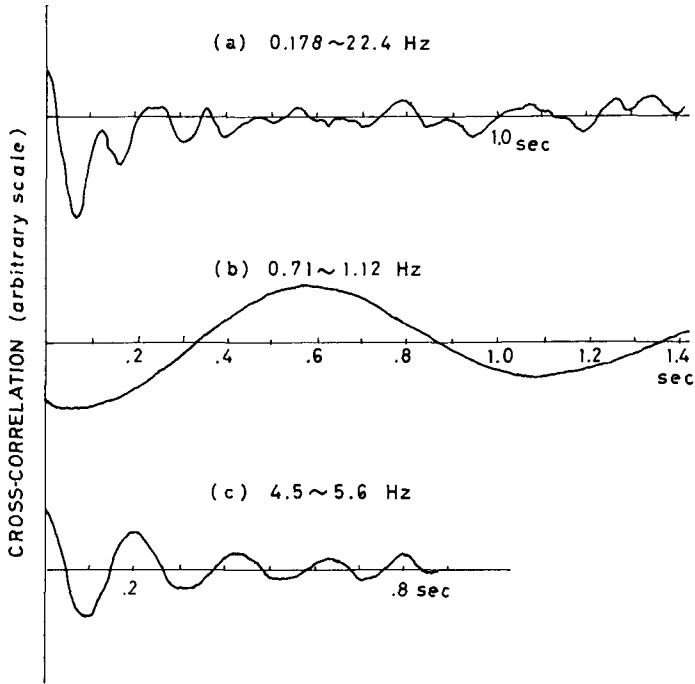
微気圧波の波長を  $\lambda$  とし、第1図 (a) の如く、 $x_1$  が  $\lambda/4 < x_1 < 3\lambda/4$  (実線) および  $0 < x_1 < \lambda/4$  (点線) の範囲にあれば、夫々の場合の相互相関係数は第1図 (b) の如くなる。ここで横軸は  $c\tau$  で目盛っている。いずれの場合も  $R(0)$  で正値となるか、負値となるかの違いはあるが、最初に最小値をとる時間を  $\tau_1$  とすれば  $x_1 - c\tau_1 = 0$  から

$$c = x_1 / \tau_1 \quad (8)$$

により微気圧変動の伝播位相速度  $c$  が求まる。

実際に観測される微気圧波は多くの波長を含み、個々の成分波も無限に持続する余弦波ではなく、短時間だけ現われる wave packet であろうから、その相互相関係数は  $\tau$  の増加と共に急に減衰する。第2図は積雪内2地点(風上側と風下側、間隔 38 cm) で測定された微気圧変動の相互相関係数の一例である。サンプリング間隔は 20 ms、平均化時間は約 40 s である。(a) は 0.178~22.4 Hz、(b) は 4.5~5.6 Hz、(c) は 0.71~1.12 Hz のフィルタを介して解析した結果で、狭い周波数範囲の (b)、(c) は第1図 (b) の夫々、実線、点線に対応している。

微気圧変動が多くの周波数成分からなる場合、相互相関係数のフーリエ変換から求められるクロススペクトル  $S_{12}(\omega)$  はコスペクトル  $K_{12}(\omega)$  とクオドスペクトル  $Q_{12}(\omega)$  とからなり



第2図 観測された2地点間の相互相関関数。(a) 周波数帯域 0.178~22.4 Hz, (b) 0.71~1.12 Hz, (c) 4.5~5.6 Hz。(b), (c)が第1図(b)の点線と実線に対応することを示す

$$S_{12}(\omega) = K_{12}(\omega) - iQ_{12}(\omega) \quad (9)$$

両者の位相差

$$\theta_{12}(\omega) = \tan^{-1}(Q_{12}(\omega)/K_{12}(\omega)) \quad (10)$$

から、各成分波の伝播速度  $c(\omega)$  は

$$c(\omega) = x_1 \cdot \omega / \theta_{12}(\omega) \quad (11)$$

により求められる。

尚、2地点における各成分波間の相互相関はコヒーレンス

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{K_{12}^2(\omega) + Q_{12}^2(\omega)}{S_{11}(\omega) \cdot S_{22}(\omega)} \quad (12)$$

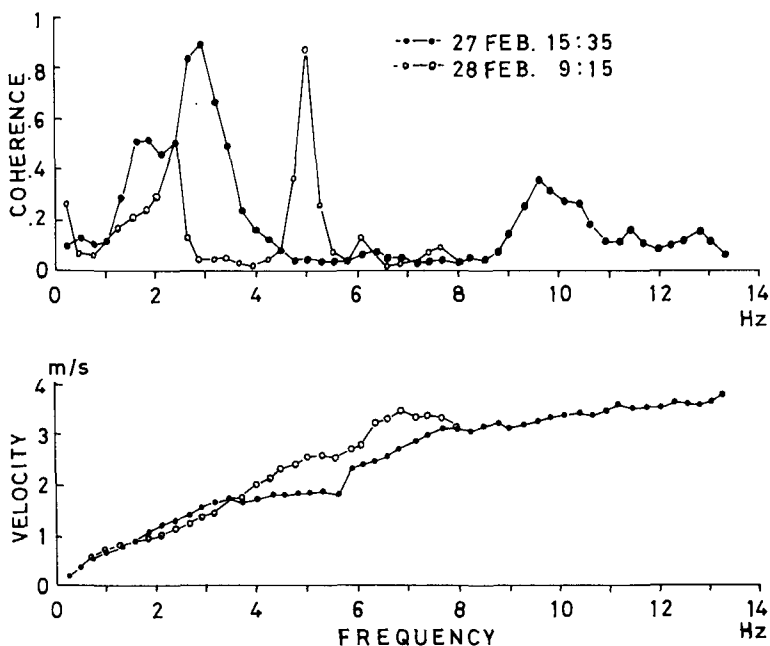
により確かめられる。ここで  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  は 1, 2 地点における微気圧変動のパワースペクトルである。

### III. 伝播速度の測定結果

観測は北海道羽幌町の海岸より約 2 km 内陸に這入った水田地帯で、1980 年 2 月に行なわれた。当時積雪深は 69 cm であり、表面から 8 cm 下までは密度 0.10 g/cm<sup>3</sup> の、こしまり雪であった。微気圧変動の測定には 2 台の歪計型微圧差変換器を用い、夫々の測定圧部には外径 5 mm、長さ 15 cm のガラス管をビニール管で接続し、そのガラス管を積雪内に雪上平均風向

に沿って約 40 cm 間隔で挿入する。2 台の変換器の基準圧部は Y 字管により共通とし、それに測定圧部と同様のガラス管を接続して、2 本の測定圧ガラス管の中央部に挿入した。変換器の出力は動歪測定器、直流増幅器を介して、カセット型 7 チャンネル・データレコーダに記録した。このレコーダには雪上 1 m の高さに設置した 3 成分超音波風速計による風速変動も同時に記録した。

解析は 2 チャンネル・4 ビット AD 変換器のデジタル相関計 (TEAC, C-110) とスペクトルアナライザ (TEAC, F-100) により行なったが、一部のデータを低温科学研究所流氷研究施設の 4 チャンネル・12 ビット AD 変換器と PDP-11/34 計算機とで処理した結果と殆んど差異がなかったため、前者により各スペクトルを求め、(10), (11), (12) 式は手計算で行なった。



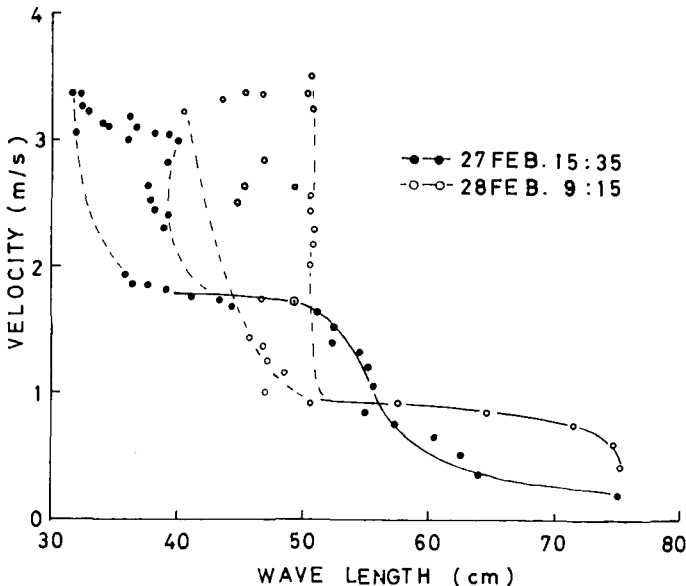
第 3 図 27 日と 28 日に雪面下 8 cm, 水平距離 19 cm で観測された圧力変動 2 波のコヒーレンスと位相速度

第 3 図に 27 日と 28 日に測定した伝播速度を周波数に対して示した。同図に 2 測点におけるコヒーレンスも示してあるが、いずれの場合も二つの主要なピークがある。28 日の場合は 8 Hz 以上でコヒーレンスが殆んど 0 となるので、速度計算は 8 Hz までにとどめた。これらの測定の場合、微気圧変動測定の 3 細管は 19 cm 間隔で雪面下 8 cm に挿入し、その雪面上を約 1 m 四方の厚手のビニールシートで覆った。それは雪面上の微気圧変動の直接の影響をできるだけ少なくするためである。ビニールシートで覆わない場合は、2 測点における変動波形の間に殆んど時間差が認められなかった。測定される微気圧変動振幅は非常に小さく、1~2 Hz と 4~5 Hz にピークがあり、その平均振幅は  $0.86 \text{ mg/cm}^2$  ( $0.84 \text{ dyn/cm}^2$ ) 程度である。従って測定器系のノイズをおさえるため 30 Hz 以上はフィルタでカットして記録した。さらに相関計の入力には直流成分を除くためと、サンプリング間隔できまるナイキスト周波数以上を除くた

め、0.178~22.4 Hz のバンドパス・フィルタを通した。相関関数を求める計算は 20 ms のサンプリング間隔で、積分時間は 41 s とした。従って得られた相関値の誤差の標準偏差は相関最大値の 9.7% である。なお時間および周波数に関しては水晶発振器による 1 MHz のクロックパルスを使用しているので充分精度は良い。1 回の測定時間は約 5 分であったが、積分時間を長くすると相関値が小さくなってしまいますので、明らかな相関波形が得られる適当な区間を選んで計算した。すなわち微気圧変動は非定常で、積雪層内 19 cm 隔たった 2 地点間の相関が認められるのは高々 1 分以内である。

#### IV. 結果の考察

第 3 図は周波数  $f$  に対する伝播速度  $c$  の変化を示したものであるが、 $\lambda=c/f$  の関係を用いて波長  $\lambda$  に対する速度  $c$  の変化を見ると第 4 図のようになる。波長が小さくなると速度は急に大きくなり、値がバラつく。ここで注意しなければならないのは、時間的に連続な波動を  $\Delta t$  の時間間隔で測定した場合、その波動中に  $f_N=1/2\Delta t$  以上の周波数成分を含んでいると、それが  $f_N$  以下に折り重ね現象を起したように、空間的に連続な圧力波動を第 1 図のように  $x_1$  隔てた 2 地点における圧力差として観測しているの、その波動中に  $\lambda_N=2x_1$  より短い波長の波が含まれていると折り重ね現象を起す。今の場合、 $x_1=19$  cm なので  $\lambda_N=38$  cm となり、伝播速度が急に大きくなるあたりは折り重ねが起っていると見なければならぬ。そこで、第 3、4 図より周波数 1.8 Hz で速度 100 cm/s、波長 55 cm の波動は確からしい。



第 4 図 位相速度と周波数から計算された波長に対する微気圧波の位相速度

吉田理論<sup>3)</sup>によると変動雪内気流速の絶対値  $Q$  は

$$Q = 2\pi P(B/s)(1/\lambda) \exp(-2\pi z/\lambda) \quad (13)$$

で表わされる。 $P$  は雪面における圧力変動の振幅であるが、雪面上 20 cm の高さで観測された

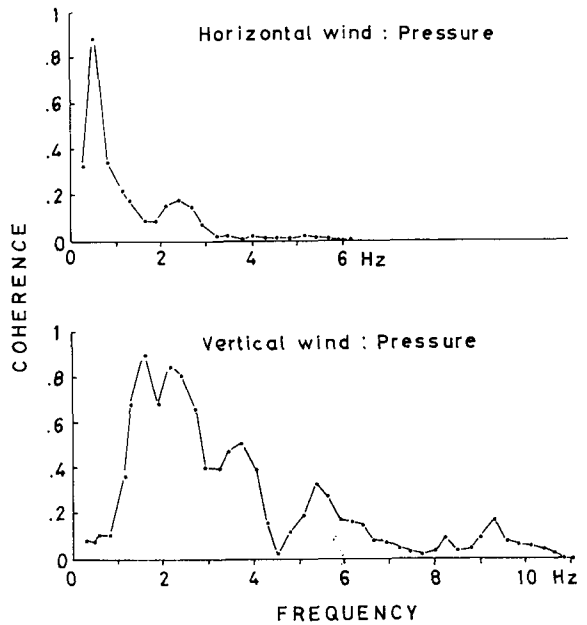
圧力変動振幅は 0.3 Hz にピークがあり 98 dyn/cm<sup>2</sup>, それ以上の周波数では急に減衰して, 1.8 Hz では 34.6 dyn/cm<sup>2</sup> であった。かりにこの値を  $P$  とし,  $\lambda=55$  cm, 通気度  $B=0.35$  cm<sup>4</sup>/dyn·s, 空隙率  $\epsilon=0.9$  を (13) 式に代入すると, 深さ 0.5 cm で  $Q=1.5$  cm/s, 伝播速度を実測した深さ 8 cm で  $Q=0.62$  cm/s となる。

(1) 式の振幅 1 の波動を  $x$  へだてた 2 点の圧力差として観測した振幅  $A$  は

$$A = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{n} \right), \quad n = \frac{\lambda}{x} \tag{14}$$

であるから,  $x=19$  cm,  $\lambda=55$  cm の振幅は 0.78 となる。実測された振幅は前節で述べた如く 0.84 dyn/cm<sup>2</sup> なので, 真の振幅は 1.08 dyn/cm<sup>2</sup> となる。圧力変動振幅は深さ  $z$  と共に  $\exp(-2\pi z/\lambda)$  で減衰するので<sup>3)</sup>, 深さ 8 cm で観測された値から雪面上の圧力変動振幅を推定すると 2.69 dyn/cm<sup>2</sup> となり, 雪面上 20 cm の値より 1 桁小さい。これは雪面上をビニールシートで覆ったためかもしれない。ビニールシートの中央下部で観測された圧力変動はシートの縁から雪面上の圧力変動が伝播してきたものと考え, その雪内距離が等価深 30 cm に相当すると考えれば, 1.08 dyn/cm<sup>2</sup> の値は雪面上では 34.6 dyn/cm<sup>2</sup> となる。

第 5 図に雪面上 20 cm で観測された微気圧変動と 1 m 高度における超音波風速計による風速変動とのコヒーレンスを示した。水平平均風速は



第 5 図 1 m 高度の超音波風速計による風速変動と 20 cm 高度の微気圧変動とのコヒーレンス

6 m/s, 垂直平均風速は ±0.3 m/s であった。6 Hz 以上の水平風速変動成分は非常に小さく, 圧力変動とのコヒーレンスも 6 Hz 以上では殆んど 0 であるのに対し, 垂直風速変動とのコヒーレンスは 11 Hz まで認められた。1 Hz 以下の微気圧変動は主に水平風速変動と関連し, 1 Hz 以上の高周波気圧変動は主に垂直風速変動と関連しているものと思われる。

第 3, 4 図に示す微気圧伝播速度を観測した時間内の 1 m 高度における超音波風速計から求められた水平平均風速とレイノルズ応力は

観 測 日 時	水平平均風速	レイノルズ応力
27 日 15 : 35	4.39 m/s	0.84 dyn/cm <sup>2</sup>
28 日 9 : 15	5.18 "	1.19 "

となり、雪面下 8 cm で観測された微気圧変動振幅と乱流によるレイノルズ応力とは同程度であった。

## V. あとがき

積雪層内 2 地点における微気圧変動の相互相関関数から微気圧波動の位相速度と波長が求まり、吉田理論を用いて変動雪内気流速が推定された。

雪内微気圧変動は地ふぶき中の種々の観測要素との関連において求めたかったのであるが、観測期間中に地ふぶきが殆んど起らなかったことと、気圧変動の観測結果もまだ少いので詳しい考察はさけた。風洞による室内実験も試みたが、雪内微気圧変動は非常に小さく、冷凍機や送風機による振動雑音と区別できなかつた。今後感度のよい微気圧変換器を少なくとも 3 台以上、自然積雪内に立体的に配置した観測が望まれる。

最後に、この観測は気象学部門の大学院生諸君の協力によるものであることを記すると共に、流氷研究施設の計算機を使用するに当って、大井正行技官、福土博樹技官の協力を得たことを記し、諸氏に感謝します。

なお本研究は文部省科学研究費補助金「空気と雪粒子の相互作用の研究」(課題番号354115)によって行なわれた。

## 文 献

- 1) 小林俊一 1969 雪面に働く風の力の測定. 低温科学, 物理篇, **27**, 87-97.
- 2) Ôura, H., Ishida, T., Kobayashi, D., Kobayashi, S. and Yamada, T. 1976 Studies on blowing snow, II. *In* Physics of Snow and Ice, Part 2 (H. Ôura *ed.*), Inst. Low Temp. Sci, Sapporo, 1099-1117.
- 3) 吉田順五 1977 風が誘起する雪内気流. 低温科学, 物理篇, **35**, 47-65.

## Summary

Micro-pressure waves in a snow layer were observed by the use of two micro-pressure difference sensors of the strain gauge type. We computed cross correlations between two pressure waves at two points, 19 cm apart, 8 cm below the snow surface and obtained propagation velocities of pressure waves against frequency and wavelength, as shown in Figs. 3 and 4 respectively.

A flow velocity of air in the snow layer may be discussed in terms of the theory of Z. Yoshida<sup>3)</sup>. Let  $Q$  be the absolute flow velocity at a depth of  $z$  from the snow surface, and  $P$  the amplitude of a pressure wave at the snow surface. The absolute flow velocity  $Q$  produced by the pressure wave, with the wavelength of  $\lambda$  is given by

$$Q = 2\pi P (B/\epsilon) (1/\lambda) \exp(-2\pi z/\lambda).$$

We obtained the absolute flow velocity of 0.62 cm/s from this expression, given that  $P = 34.6$  dyn/cm<sup>2</sup>, observed at a height of 20 cm from the snow surface, the permeability of air through the snow  $B = 0.35$  cm<sup>4</sup>/dyn·s, the porosity of the snow  $\epsilon = 0.9$ , and the wavelength of a pressure wave  $\lambda = 55$  cm, observed at a depth of  $z = 8$  cm.