



Title	雪面上のレイノルズ応力の測定
Author(s)	菊地, 時夫; KIKUCHI, Tokio; 石田, 完 他
Citation	低温科学. 物理篇, 34, 93-97
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18302
Type	departmental bulletin paper
File Information	34_p93-97.pdf



雪面上でのレイノルズ応力の測定*

菊地時夫

(北海道大学大学院 理学研究科)

石田完

(低温科学研究所)

(昭和51年10月受理)

I. まえがき

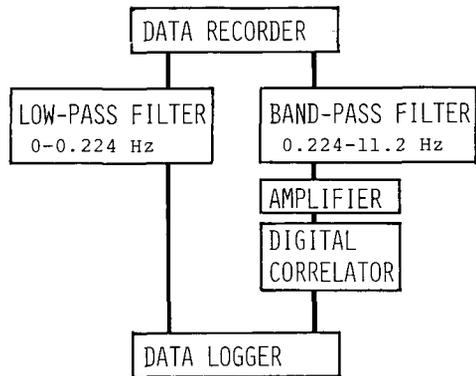
雪面に働く風の力の測定は、地ふぶきの研究や流氷漂流の研究にとって重要であり、鈴木¹⁾や小林²⁾によって直接測定が行なわれている。しかし、小林も指摘しているように雪面上での精密な直接測定は難しく、むしろ渦相関法によってレイノルズ応力 ($\tau = -\rho \overline{uw}$, ρ : 空気の密度, u : 風速の乱れの平均風方向成分, w : 同じく鉛直方向成分) を測った方がよいだろう。ここでは従来使われてきた分布法と、乱れのスペクトルの慣性小領域での値を用いるスペクトル法 (Hicks and Dyer³⁾) を渦相関法と比較してみた。なお、気象学では応力の代わりに摩擦速度 $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ を用いることが多いので、本論文でもそれに従い各々の方法で求めた u_* を比較した。

II. 測定及び解析方法

測定は本研究北側にある北海道大学農場で、1976年3月におこなった。三成分の風速は超音波風速計 (海上電機, PAT-311-1) を1.6 mの高さに設置して、また風速の鉛直分布は三杯風速計 (牧野, AC-750 P) 5個を高さ約3 mの支柱にとりつけて測定した。なお、1回の測定にかけた時間は5分間である。

1) 渦相関法

超音波風速計の出力は、データ・レコーダ (TEAC R-200) によって磁気テープに記録し、研究室に持ち帰って第1図に示す手順で解析した。はじめに、再生信号を0.224 Hzの低域フィルターに通し、データ収録装置 (Hewlett Packard 5020 A) を用いて平均風速、各成分の低周波域における分散と共分散を計算した。次に同じ信号を0.224~11.2 Hzの帯域フィルターに通し、デジタル相関計 (TEAC C-110) の掛算・積分機能を利用して高周波域での分散と共分散を求めた。なお、相関計の出力は電圧で出ている



第1図 超音波風速計データの解析手順

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1784号

ので、それをデータ収録装置で読みとった。このように高低ふたつの帯域に分けて解析したのは、データ収録装置と相関計の、周波数特性と精度を相互に補い合うためである。フィルターの遮断周波数は、データ収録装置のデータ採集間隔 (2 秒) から決めた。

以上の解析により、平均風速 U と渦相関法による摩擦速度 $u_* = \sqrt{-uw}$ が求まった。また同時にモーニン・オブコフの長さ $L = -(\theta/kg) \cdot (u_*^3/\overline{wT})$ も計算した。但し g は重力の加速度、 k はカルマン定数 (=0.4), θ は平均気温を絶対温度で表わしたもの、 T は気温変動である。

2) 分布法

三杯風速計のデータは、最小自乗法によって中立時の風速分布を表わす対数法則

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \tag{1}$$

(但し z は雪面からの高さ, z_0 は粗度定数) に合わせ、分布法による u_* を求めた。

3) スペクトル法

スペクトル法の基礎となるのは、乱流のエネルギー・スペクトルの慣性小領域における、 $-5/3$ 乗則である⁴⁾。これは無次元化して表わすと大気が中立状態のとき次の様になる。

$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{\alpha}{(2\pi k)^{2/3}} f^{-2/3},$$

$$\frac{nS_v(n)}{u_*^2} = \frac{nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{4}{3} \frac{\alpha}{(2\pi k)^{2/3}} f^{-2/3} \tag{2}$$

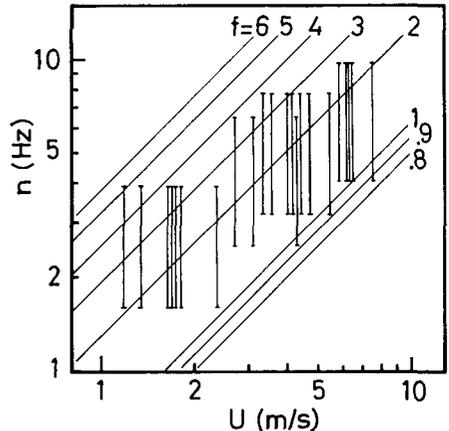
但し、 $S_u(n)$, $S_v(n)$, $S_w(n)$ はそれぞれ、周波数 n における u, v (水平横方向), w のスペクトル密度、 $f = nz/U$ は無次元周波数、 α はコルモゴロフ定数 (=0.5) である。Kaimal ら⁵⁾ によれば、中立状態の時 f が 1 以上であれば風速の三成分とも (2) 式が成立する。また超音波風速計の応答周波数の上限は測定の高さが 1.6 m のとき $f = 5$ 程度である。したがって帯域フィルターの上限及び下限周波数 n_H, n_L を上記の範囲に入るように設定し、各風速成分の分散

$$\sigma_i^2 = \int_{n_L}^{n_H} S(n) dn$$

を求めれば、(2) 式より

$$u_*^2 = \left(\frac{3}{4}\right)^{1/2} \frac{2\sigma_i^2(2\pi k z/U)^{2/3}}{3\alpha(n_L^{-2/3} - n_H^{-2/3})} \tag{3}$$

となり、 u_* を計算できる (このついた係数は v と w の時必要となる)。 n_H と n_L は平均風速によって変えなければならない。実際の平均風速と用いたフィルターの範囲との関係を第 2 図に縦の棒で示した。



第 2 図 スペクトル法で用いたフィルターの周波数と平均風速の関係

た。1 < f < 5 の範囲からはみ出ているものもあるが、フィルターの幅を広くとってあるので余り影響はないものと思われる。フィルターを通した信号は渦相関法における高周波域と同様の手順で σ_i^2 を計算した。

III. 結果と考察

1) 平均風速

最初に、超音波風速計による平均風速と、三杯風速計によるものとを第3図に比較して示した。三杯風速計の風速は、内挿によって超音波風速計の高さでの値に直してある。かなりよい一致を示しているが、全体に三杯風速計の方が5%程大きく出ている。これは、三杯風速計の測る平均風速が、ベクトル平均 (mean velocity) でなくスカラー平均 (mean speed) であることや、風杯の慣性による影響を考えれば当然である。より正確な風速の測定にはこの点を考慮する必要があるだろう。分布法の計算には風速値を修正せずそのまま用いた。

2) 摩擦速度

a) 分布法

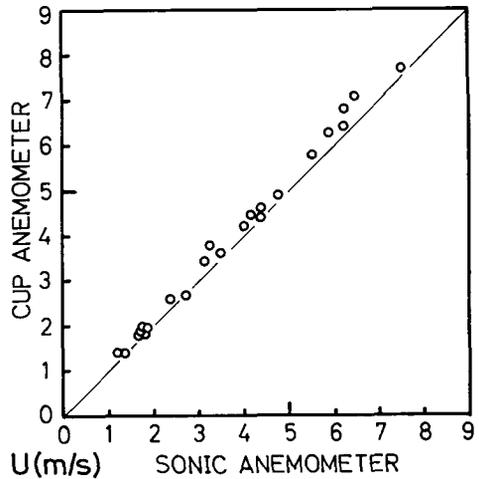
第4図に渦相関法と分布法を比較して示した。平均風速の測定と比べてかなりばらつくが、 u_* の最も小さい時を除いてよく一致している。

u_* の小さい時の誤差は、大気不安定度の影響を無視したためと考えられる。安定度が風速分布に及ぼす影響は、無次元シア-

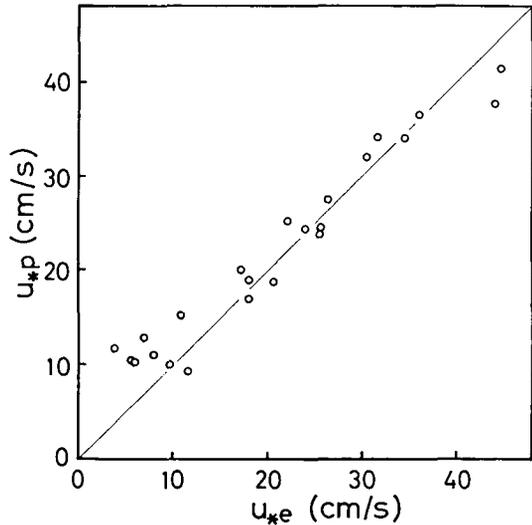
$$\phi_M = \frac{kz}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (4)$$

と安定度 z/L との関係で表わすのが一般的である。(1)式を微分するとわかるように、分布法で求めた u_* は $kz(\partial U/\partial z)$ に相当する。一方、(4)式の u_* は渦相関法で得られたものに相当する。従って、 ϕ_M は分布法で計算した u_* を渦相関法で求めたもので割って得られる。第5図に ϕ_M と z/L との関係を示した。この際、 z には風速分布測定の高さの平均である1mを使用した。

図には、Webb⁶⁾ や Businger ら⁷⁾ による $\phi_M = 1 + 5z/L$ の関係を実線で示してある。測定期間中の温度変動は小さくて、 z/L の値の精度には問題があり、他の文献と比べることはできないが、少なくとも z/L の増大とともに ϕ_M が大きくなる傾向があらわれている。中立状態に近いデータ ($z/L \leq 0.02$) から、三杯風速計のまわりすぎを考慮して、 k を評価すると、 0.41 ± 0.04 となる。また三杯風速計の風速をそのまま用



第3図 超音波風速計と三杯風速計による平均風速の比較

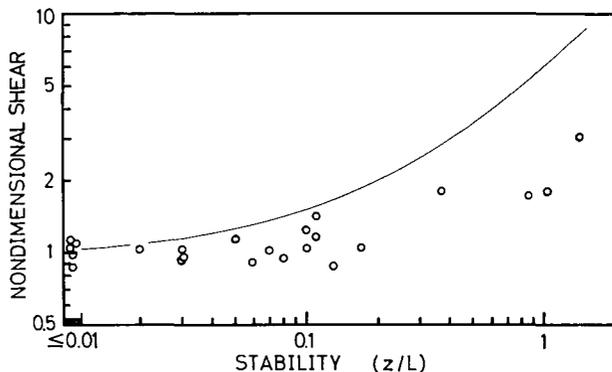


第4図 渦相関法 (u_{*e}) と分布法 (u_{*p}) の比較

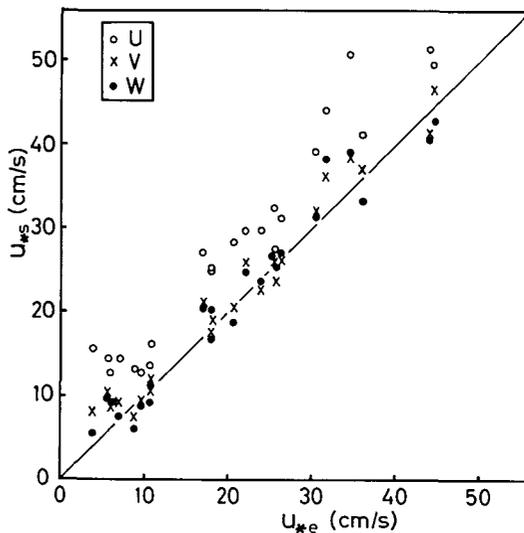
いた場合には 0.39 ± 0.04 となり、今回用いた従来からの値 0.4 を支持している。また、測定期間中に関する限り、風速が 3 m/s 以上の時 z/L は 0.1 以下で、データのばらつきからいってほぼ中立状態と見なしてよい。

b) スペクトル法

第 6 図に渦相関法とスペクトル法を比較して示した。風速の三成分からそれぞれ計算できるため、記号を変えて示してある。全体的にみて、 v と w から求めたものが比較的良好一致を見せているのに対し、 u から求めたものは過大評価となっている。 $-5/3$ 乗則からの低周波側でのずれは、 v と w の方が高い周波数ではじまり、 u のスペクトルは比較的低い周波数まで $-5/3$ 乗則に従うことが知られている^{4,5)}。従って、 u からの計算の過大評価の原因が、フィルターの周波数が慣性小領域に入っていなかったためとは考えられない。 α の値が違っていたとしても、 u を合わせるには 0.75 という大きな値が必要となる。さらに注意深い測定によってこの点を明らかにしていく必要がある。



第 5 図 無次元シアア (ϕ_M) と安定度 (z/L) の関係



第 6 図 渦相関法 (u_{*e}) とスペクトル法 (u_{*s}) の比較

IV. あとがき

雪面上で渦相関法により u_* を測定し、分布法、スペクトル法と比較した。 $k=0.4$, $\alpha=0.5$ として求めた結果は、スペクトル法の u 成分を除いて良好一致を示した。 k と α の値は上にあげた値が一般に使われてきたが、 k はより小さい値、 α はより大きい値であるという議論がある^{4,7,8)}。今回のデータは一応これを否定する結果になったが、結論を下すにはより多くのデータが必要である。スペクトル法は、特定の周波数を使うため、海上や飛行機での測定に向いているが、必ずしも大きな三成分超音波風速計を設置できるとは限らない野外での観測に応用できる可能性がある。渦相関法は雪面のような直接測定の難しい面上での応力や、熱流量などの測定に適している。しかし、今回のような解析方法では連続的な観測を行なうことは困難である。今後もこの方法を追求していくのであれば、解析システムの改善が必要である。

終わりに、データ収録装置を貸して下さった藤野和夫助教授、測定にあたり援助していただいた気象部門の皆さんに感謝いたします。

文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Hicks, B. B. and Dyer, A. J. 1972 The spectral density technique for the determination of eddy fluxes. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **98**, 838-844.
- 4) Tennekes, H. and Lumley, J. L. 1972 A first course in turbulence. MIT Press, 300 pp.
- 5) Kaimal, J. C., Wyngaard, J. G., Izumi, Y. and Cote, O. R. 1972 Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **98**, 563-589.
- 6) Webb, E. K. 1970 Profile relationships: the log-linear range, and extension to strong stability. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **96**, 67-90.
- 7) Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Bradley, E. F. 1971 Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181-189.
- 8) Frenzen, P. 1972 The observed relation between the Kolmogorov and von Karman constants in the surface boundary layer. *Boundary-Layer Met.*, **3**, 348-358.

Summary

This paper describes the measurements of the friction velocities carried out on a snow surface using a) the eddy-correlation method [Reynolds' stress], b) the profile method [Eq. (1)], and c) the spectral density method [Eq. (3)]. The Karman constant $k=0.4$ and the Kolmogorov constant $\alpha=0.5$ are used to estimate u_* from the profile data, and from the variances of three component wind fluctuations in the inertial subrange of spectra. The results show good agreements with one another, except with the spectral density method computed from the u -component fluctuations, which over-estimated u_* by 20%. Slight deviations from 1:1 relation observed in low- u_* conditions are shown to be due to the effect of stability. The results also suggest that the values of k and α used in this study are valid, though we need more data to confirm this.