

平均風速および風向の評価方法について

光田 寧・森 征洋・藤谷徳之助・花房龍男

ON THE DEFINITIONS OF MEAN WIND SPEED AND DIRECTION

By Yasushi MITSUTA, Yukihiro MORI, Tokunosuke FUJITANI
and Tatsuo HANAFUSA

Synopsis

The mean wind speed has been defined as the quotient of the wind way over the averaging time period in ordinary meteorology. However, the vector mean wind speed is more acceptable definition of the mean wind speed. In the present paper, the difference of the both definitions are discussed and compared by the field experiment.

1. は じ め に

本研究の目的は従来から習慣的に用いられて来た気象における風向風速の評価の方法について再検討して見ようということにある。風は空気の流れであり当然ながら「風は、風向と風速によってベクトルで表わされる。風向や風速は絶えず変動するほぼ水平な大気の流れについて、観測時前10分間の平均値で表わす。また、変動する風速については瞬間風速として表わす。平均風速は大気の流れた距離、すなわち風程を時間で割った値である¹⁾。」これが現在気象学で行われている約束であるが、風はベクトルで表わされるとしながら正確にベクトル的な取り扱いをしているのは瞬間風速だけであり、平均風速についてはベクトルの平均ではなく、各瞬間の風速の大きさのスカラ的な平均を用い、また平均風向には風速を考慮することなく角度のみの平均を取ることになっているのである。これは、従来から用いられて来た測定方法、すなわち風速計としては風向には感じない風杯式のものを用い、風向計としては単に向きだけを示す矢羽根を用いるという方法に起因していることは明らかである。しかし、瞬間の風をベクトルで表現する以上そのベクトル的な平均値を平均風ベクトルとし、その向きを平均風向とし、大きさを平均風速とすると考える方が物理的に受け入れやすいものであると思われる。

風は他の気象要素に比べてその変動がはげしく、風速の場合その変動が平均値とほぼ同程度の大きさを示すことも珍しくない。従って平均方法によってその結果が少し異って来ることも当然考えられる。特に平均風速の小さい時にはその差が大きくなる。たとえば、極端な例として空気の平均的な動きが無く零点を中心に左右に動いているというような場合を考えると、ベクトル平均値は平均時間さえ変動周期より充分長くとなれば正しく零となるが、従来の平均風速では変動値の絶対値の平均値を取ることになって、風速零とはならず有限の値を取るようになる。従って従来の定義による平均風速を取ると空気の平均の流れ、あるいは流量を示すことにはならないことは明らかである。また、異った種類の風向計、あるいは風速計を用いると予想外に従来の定義に従ったものは計測困難を生じることがある。特に平均風向の機械的計算などでは簡単なので容易に出来ない。

そこで、従来の平均風向風速の定義の方法とベクトルの平均風向風速とを比較したらどうなるかということについて検討して見たのがこの論文の内容である。ベクトルの平均方法を採用することによって平均値は

容易にかつ一意的に決定することが出来ることになる。またそのようにした場合、風速風向の変動を表現する方法としてどのような方法があるかについても検討してみた。

2. 平均風向風速の定義と乱れの性質

上にも述べたとおり瞬間の風 $\mathbf{v}(v, \theta)$ と定義すると、従来の定義による平均風速、風向（仮に以後スカラー平均風速、風向と呼び s のサフィックスを用いる）、 $\bar{v}_s, \bar{\theta}_s$ は次のようにして計算される。

$$\bar{v}_s = \frac{L}{T} = \frac{1}{T} \int_{t=t_0-T}^{t=t_0} v dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{\theta}_s = \frac{1}{T} \int_{t=t_0-T}^{t=t_0} \theta dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

但しここで L は風程、 T は平均風速の評価時間である。(2) 式の値は必ずしも常に一意的に決定されるとは限らないので現在の気象観測法ではこれを人間の目による判断で決定することにしており、しかも風向が急変した時には観測時 (t_0) に近い側での平滑値をとることとしている。

一方、ベクトルの的に定義した平均風速、風向 $\bar{V}, \bar{\theta}$ は次のように定義される。

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \cot^{-1} \frac{\bar{V}_y}{\bar{V}_x} + \pi & \text{if } \bar{V}_x > 0 \\ \cot^{-1} \frac{\bar{V}_y}{\bar{V}_x} & \text{if } \bar{V}_x \leq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し V_x, V_y に $\mathbf{v}$ の東西および南北成分であり、東向きおよび北向きを正とする。これによって平均風向も確定させることが出来る。このようにして定義されたベクトル風向風速と従来のスカラー的な風向風速との間にどの程度の差があるかは予測出来ない。

この差は風速の分布がどのような形を示すかによって決定される。風速変動の分布が実際どのような形になっているかについて試験的に調べた結果は次のとおりである。すなわち地上 15 m の高さで超音波風速計を用いて行った観測²⁾の機会に風速の東西および南北成分を測定し、同時にそれを合成して風向と風速を求めて見た。その結果は **Table 1** に示したとおりである。表からも明らかとおり瞬間的な風速分値を合成して

Table 1 An example of the comparison of the scalar and vector mean winds. (Ooi, Fukui, 09: 00-09: 24 Aug. 23, 1970)

\$ Scalar	Mean Wind Speed	1.75 m/sec
	Wind Direction	SSE
\$ Vector	Mean Wind Speed	1.62 m/sec
	Mean Wind Direction	136°
	NS Component Mean	-1.17 m/sec
	S.D.	0.88
	EW Component Mean	1.12
	S.D.	0.96

求めた瞬間の風向風速を従来の定義に従ったスカラー的に平均して得た平均風速は 1.75 m/sec であるのに反して風速分値を平均したものから求めたベクトル平均風速は 1.62 m/sec となる。その差は約 10% である。この差は各分速度の分布を示した **Fig. 1** および **2** で見ると明らかである。風速は明らかに両成分共零点をはさんで両側に分布する正規分布をなしている。従って平均風速と正反対の向きになっている時もあることを示している。しかし、スカラー的な風向は常に正であるから、このような場合のスカラー風速の分布は歪んで来る。このことは **Fig. 3** に示すとおりである。またスカラー的な風向の分布は **Fig. 4** に示すとおり

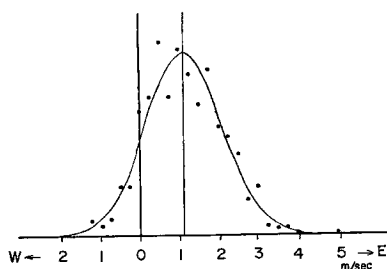


Fig. 1 Distribution of E-W component of wind velocity (Ooi, 1970).

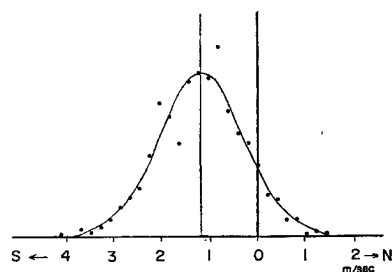


Fig. 2 Distribution of N-S component of wind velocity (Ooi, 1970).

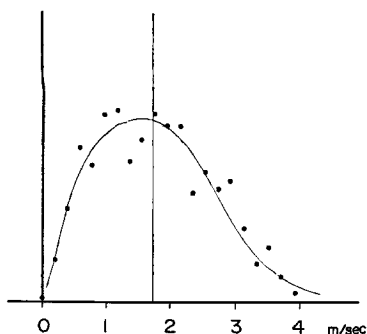


Fig. 3 Distribution of wind speed (Ooi, 1970).

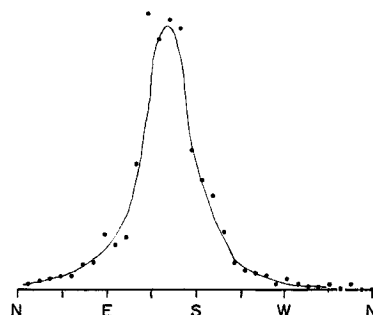


Fig. 4 Distribution of wind direction (Ooi, 1970).

である。この場合にも風向は最多風向の反対側にまで分布しており単純に算術平均によって平均風速を作ることは困難であることは明らかである。従ってこのような場合にはベクトル平均を用いる方が全てにおいて合理的である。また、風速の2つの分速度の標準偏差はほぼ等しいところから乱れの成分は等方であると見ても良いのではないかと考えられる。

上に示したのは一例であるが、風速の分布については、米国の Izumi 等³⁾が行った筆者と同じ超音波風速計を用いての観測結果をまとめて見たものが **Table 2** である。この表から明らかとなり平均風向に平行な風速成分も直角な風速成分もいずれも shewness がほぼ零、Kurtosis がほぼ3になっているところから

Table 2 Statistical character of horizontal wind components. (Kansas, U.S.A.)

Height of Observation	5.66m	11.31m	21.63m
Numbers of the data	25	25	25
RMS of cross wind component	0.90	0.92	0.94
RMS of along wind component	0.90	0.92	0.94
Intensity of turbulence	0.17	0.15	0.14
Skewness of along wind component	0.09	-0.01	0.00
Skewness of cross wind component	0.00	-0.02	-0.02
Kurtosis of along wind component	2.99	3.04	3.27
Kurtosis of cross wind component	3.21	3.17	3.27
Wind speed range	m/sec 2.2-8.5	m/sec 3.2-9.4	m/sec 4.7-10.3

正規分布をなしていると考えてもよい。さらに2つの成分のRMS値の比もほぼ1に近いからここに示されたベクトル平均風からの偏奇、すなわち風の乱れの成分は等方的な2次元正規分布をなしていると考えても良いことが解る。従って風速の分布は Fig. 5 に示すような形をなしていることになる。

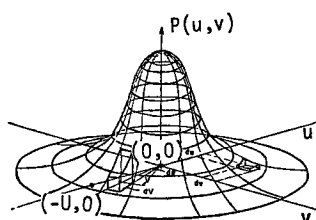


Fig. 5 Schematic diagram of wind velocity distribution.

この事実によって風速の解析は非常に簡単になり、風の乱れの成分の大きさを示すものとしては $\frac{\sigma_{v_x} + \sigma_{v_y}}{2}$ を用いれば良いことになる。そして乱れの強さ (I) は

$$I = \frac{\sigma_{v_x} + \sigma_{v_y}}{2\bar{V}} \quad (5)$$

で示され乱れの変動幅 σ_θ とは

$$\sin \frac{\sigma_\theta}{2} = I = \frac{\sigma_{v_x} + \sigma_{v_y}}{2\bar{V}} \quad (6)$$

という関係式で近似的に関係づけることができる。

3. 比較観測

上に述べたようにベクトルの定義した平均風と、従来のスカラー的な平均風向風速との値がどの程度異なるかを明らかにするための比較観測を行った。比較観測は直接風速の方向別成分を測定することができる超音波風速計⁴⁾を用い潮岬風力実験所本館屋上の観測塔の上(地上高19m)で行った。平均化、標準偏差計算、ベクトル合成などはいずれもアナログ計算ユニット²⁾を用いて行い、出力はデータロガーによりデジタル化して1分毎に打ち出した。そのブロックダイアグラムは Fig. 6 に示すとおりで同一感部で得られた2方向分速度を瞬間的に合成して風向風速を求め、それを平均したものや分速度の平均値を求めてから合成してベクトル平均風速を求めたものと2種類の結果が出るようになっている。

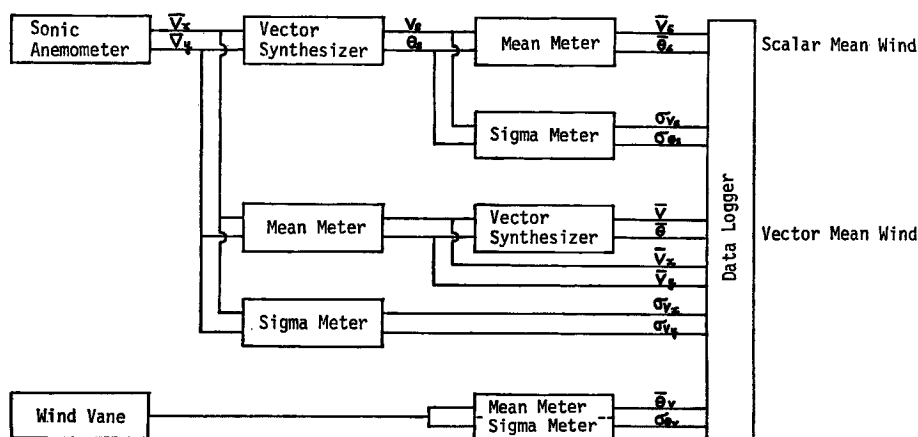


Fig. 6 Block diagram of comparative observation at Shionomisaki.

観測は昭和47年6月より開始したが9月には台風の直撃を受け、一部計測器に被害を受けたので観測を中断した。この間の観測結果を整理した結果は次のようなものである。観測結果はすべて10分間平均値で比較されている。

ベクトル平均風速とスカラー平均風速との対比は Fig. 7 に示すとおりである。全体として両者は良く一

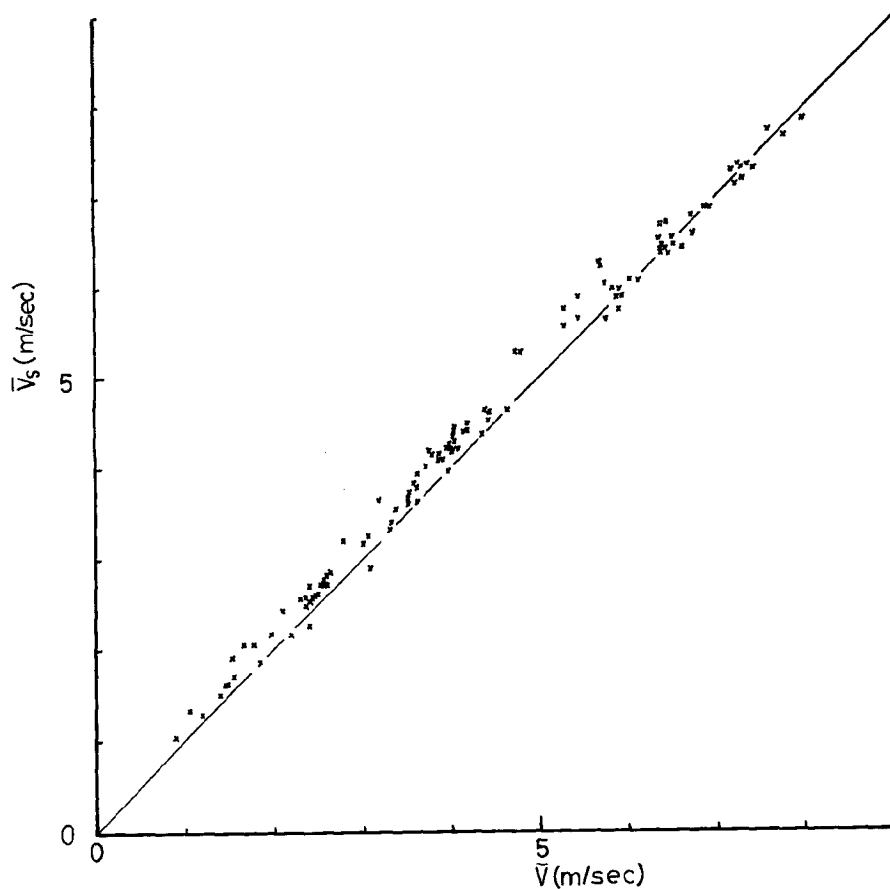


Fig. 7 Comparison of the scalar and vector mean wind speed.

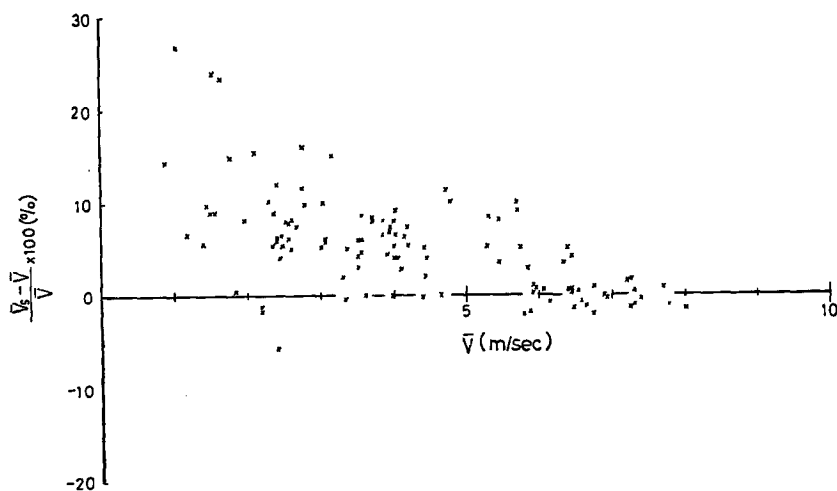


Fig. 8 Relative errors of scalar mean wind speed as the function of mean wind speed.

致しているように見えるが、風速の弱いところでは多少系統的にスカラー平均風速の方が少し大きくなっている。この差を相対誤差として示したものが Fig. 8 である。これによれば相対誤差は平均風速が 1 m/sec の時は 20% ぐらいに達し、風速の増大と共に急に差は減少し、6~7 m/sec 以上では差はなくなる。

また、ベクトル平均風向とスカラー的な風向との関係は Fig. 9 に示すとおりである。この一致は風速の

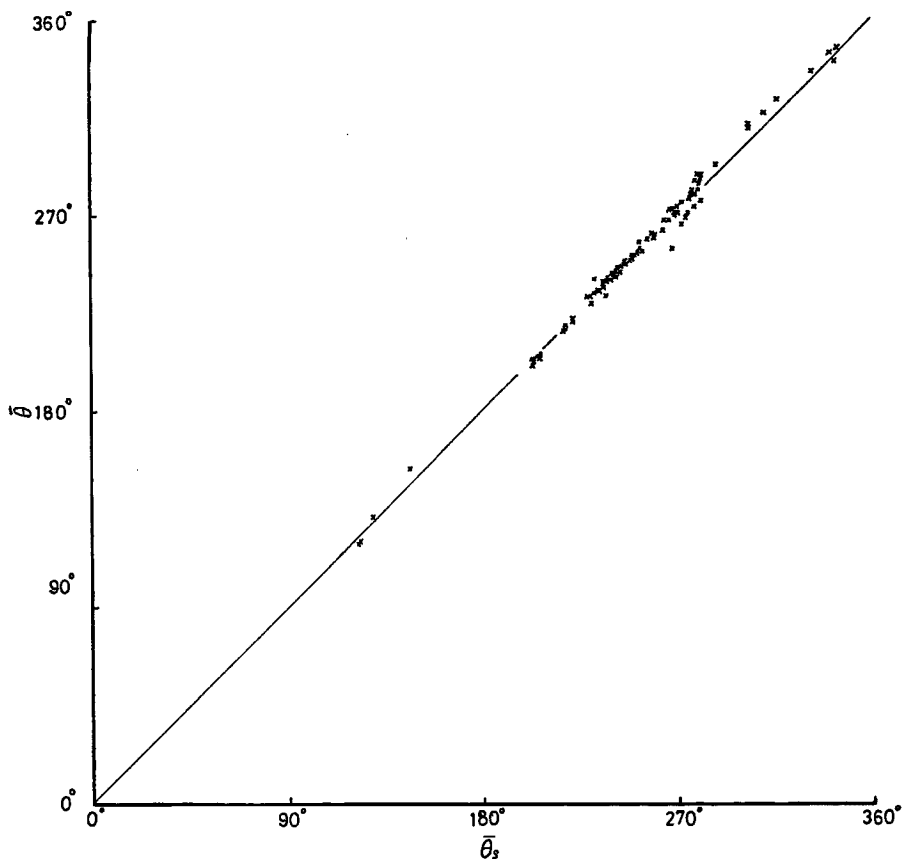


Fig. 9 Comparison of the scalar and vector mean wind direction.

場合よりも良く、殆どの場合風速にかかわらず誤差は 5° 以内である。このことは風向を定義する場合従来の定義によりスカラー風向と、ベクトル平均風向との間には系統的な差は認められないとしても良いことを示している。もっとも平均風速が 1 m/sec 以下の場合今回の観測例では殆どないので極端な微風時の性質については別に調べなくてはならない。

風向変動の標準偏差をスカラー的な風向 $\bar{\theta}_s$ について求めたものと、ベクトル平均風向からの偏差とベクトル平均風速 ($\bar{V}$) の比から逆算したものの対比は Fig. 10 に示すとおりである。両者の関係は必ずしも比例関係ではなく、風向の変動幅の狭いところではベクトル的な風向変動の方が、スカラー的な変動幅よりも 2 倍弱くらい大きい。大きな変動幅の時には両者は比較的良く一致している。従って、この関係については少し詳しく調べる必要性が感じられる。

この風向変動の計算に当っては、スカラー的な風向が風向出力の切換点を通り、そのために見かけ上大きな変動の生じたような場合 (平均 1 分間くらい誤差が生じる) は省いてある。このような作業は機械的処

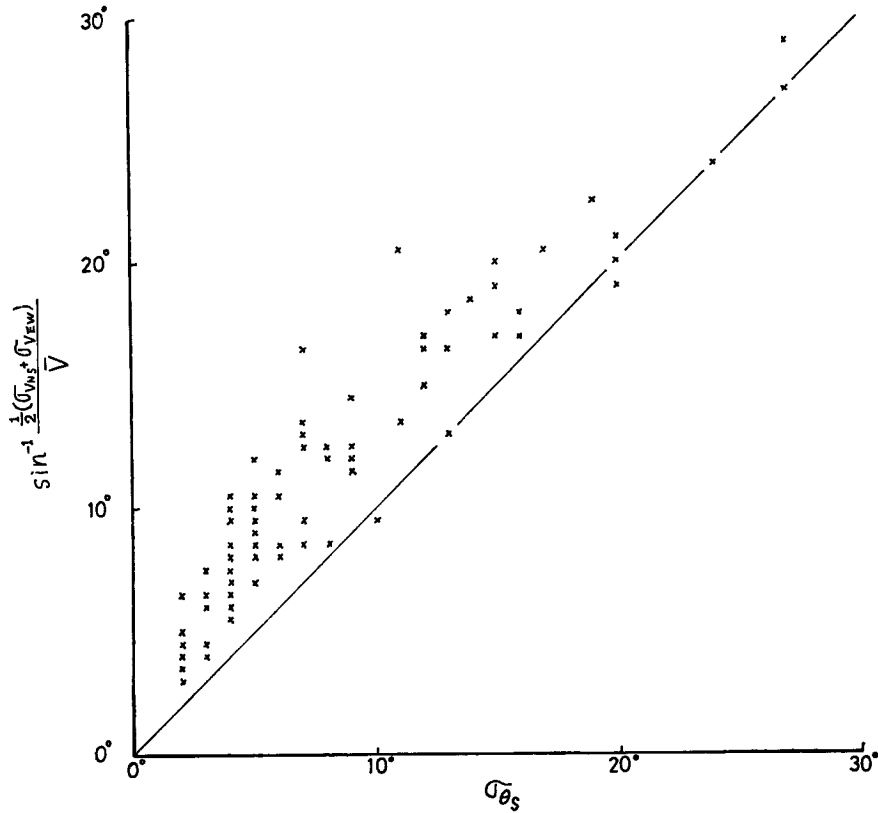


Fig. 10 Comparison of the reduced wind direction fluctuation and standard deviation of wind direction.

理においては比較的手数のかかるものであり、ベクトル風向変動の方が各成分風速の変動を用いているので処理はもっと簡単である。

また、この超音波風速計で求められたスカラー的な風向変動幅と、参考のために行った矢羽根による風向の測定値から求めた風向の変動幅との対比を示したものが Fig. 11 である。データの数が多いので断定はできないが、矢羽根による風向変動の幅は真の風向変動の幅の2倍くらいの値を示している。この差は矢羽根のダンピングの悪さによる固有振動の影響であると思われる。

4. 結 語

このようにしてベクトル的な定義による平均風は、当然のことながら風の強い場合には今日用いられているスカラー的な定義による平均風向風速と一致しており、計測方法を変更しても問題はなさそうである。従来から用いられてき

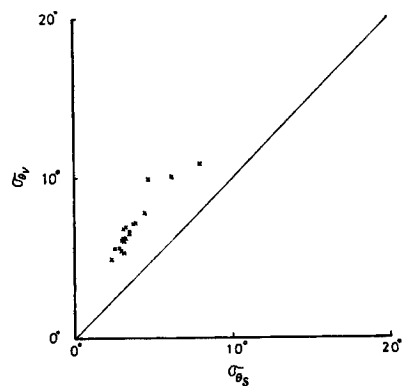


Fig. 11 Comparison of standard deviation of wind direction measured by the sonic anemometer and that by the wind vane.

た風向風速計では測定が困難となる場合、風の範囲ではスカラー的な定義によるものとベクトル的な定義による平均風速の差が比較的大きくなる。ベクトル的な考えによる平均風向風速の方が物理的な意味のはっきりしている上に、データの処理が簡単に出来るという有利な点がある。また、データの処理が簡単に出来るという有利な点がある。また、矢羽根型風向計による変動の標準偏差は真の風向変動より 2 倍程度大きい。

参 考 文 献

- 1) 気象庁編：地上気象観測法，気象庁，1961 年，pp. 77-88.
- 2) 光田 寧・花房龍男・藤谷徳之助：大気乱流特性の実時間解析について，京都大学防災研究所年報，第 14 号A, 1971, pp. 505-511.
- 3) Izumi, Y.: Kansas 1968. Field program data report Environmental Research Papers, AFCRL, No. 379, 1971, p. 79.
- 4) 光田 寧：超音波風速温度計とその大気境界層への応用，天気，Vol. 18, No. 8, 1971, pp. 377-386.