

風程とベクトル合成による平均風速の分布性状の比較

Distribution Characteristics of Mean Wind Speed and Direction Averaged by Scalar and Vector Algorithm

眞 田 早 敏

要 約

風の実測では、風杯式やプロベラ式の風速計による風程の測定や、超音波風速計による風速ベクトルの測定が行われてきた。スカラー的な風程による平均風速がベクトル合成による平均風速より大きいことは、その定義より明らかであり、実測によっても示されている。しかし、差異の程度や風速値との関係等については、それほど明らかではない。ここでは、東京都心の建物の屋上で4年間の超音波風速計による風向風速の測定値を、スカラー的およびベクトル的な整理を行って統計的に比較検討した。2種類の平均風速の相関や平均風向の相関からは、風速が大きい時には両者の差は小さいことが示された。しかし、低風速領域のデータが含まれる風向風速同時分布の性状には両者の間に差異が見られた。

目 次

- I. はじめに
- II. 使用データと処理方法
- III. スカラー平均とベクトル平均による風速および風向の相関
- IV. 風向風速出現確率の分布
- V. おわりに

I. はじめに

建物に作用する風を実測することは、複雑な自然風の現象を解明するために重要であり、近年その機会が増加している。そして、電子技術の発展により、例えば10分間の統計値を長期間に亘って収録することも容易になっている。風向風速計としては、通常、①プロベラ式や風杯-矢羽根式あるいは②超音波式のものが利用される。風は大気の移動現象であり、3次元のベクトル的な定義が本来的である。建物と風の間を論ずる時にも、このような定義が望ましい。ところが、古くから利用されている①の風速計は、ほぼ水平な大気の移動距離(風程)をスカラー的に計測する方式のものである。一方、近年利用されるようになった②の風速計は本来的な風速ベクトルを計測する方式のものである。したがって、平均風速を対象にした場合、後に(III.) 端的な一例を示すように、①の風速計によるスカラー的な平均風速の値が、②の風速計によるベクトル的な平均風速を超えてしまうので、平均風速の値だけを扱う場合には注意を要する。勿論、水平成分に限れば、①の場合にも風向、風速からベクトル成分を計算して、②のように処理することは原理的には可能であるが、追従性や風向の分解能に問題があるため行われていない。また、平均風向についても、III. に記するように、①の風向計の出力を単純に時間平均することには問題がある。

①と②の平均値の差異については文献1)に示されている程度である。そこで本報では、東京都心(神田錦町)に建つビルの実測²⁾の定時観測記録を用いて両者の比較を行った。また、風向風速同時

分布および、風速分布をWeibull分布で近似して求めた風向風速出現確率について比較検討を行った。なお以下では、①の場合の10分間平均をスカラー平均、②の場合をベクトル平均と称する。

II. 使用データと処理方法

本実測では、風向、風速はGL+83mの位置の超音波風速計で測定されており、X,Y,Z-3成分風速(u,v,w)と、水平2成分風速u,vから合成された風向、風速が得られている。また収録モードとして、通常の強風時の時刻歴記録の収録の他に、10分毎の定時観測記録の収録を行っている。定時観測記録では、各収録要素の前10分間の時刻歴(10Hzサンプリング)を統計処理した平均値、最大値、分散値を収録している。風向、風速については、上記の風速計出力の他に、収録部で統計処理の前にu,vから合成された風速を加えた6要素が収録されている。以下では、スカラー平均風速 U_s として最後の要素の平均値を使用し、ベクトル平均風速 U_v はu,vの平均値($\bar{u}, \bar{v}$)を合成して求める。すなわち、 U_s と U_v は次式のように表される:

$$U_s = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}, \quad (1)$$

$$U_v = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}. \quad (2)$$

ここに、 $\bar{\quad}$ は時間平均操作を表す。この定義より、 $U_s \geq U_v$ は明らかである。また、スカラー平均風向としては、上記の風速計の風向出力の平均値を使用し、ベクトル平均風向としては、 $\bar{u}, \bar{v}$ により計算される風向角度を使用することとする。

なお、以下の解析に使用したデータは、1993年12月~1997年11月の4年間の10分毎のものであり、欠測時およびノイズによる不調時の10196個を除いた200188個のデータである。

III. スカラー平均とベクトル平均による風速および風向の相関

1. 平均風速の関係

スカラー平均風速 U_s とベクトル平均風速 U_v の相関をプロットした

キーワード： 実測、平均風向、平均風速、風程、Weibull分布、風向風速出現確率

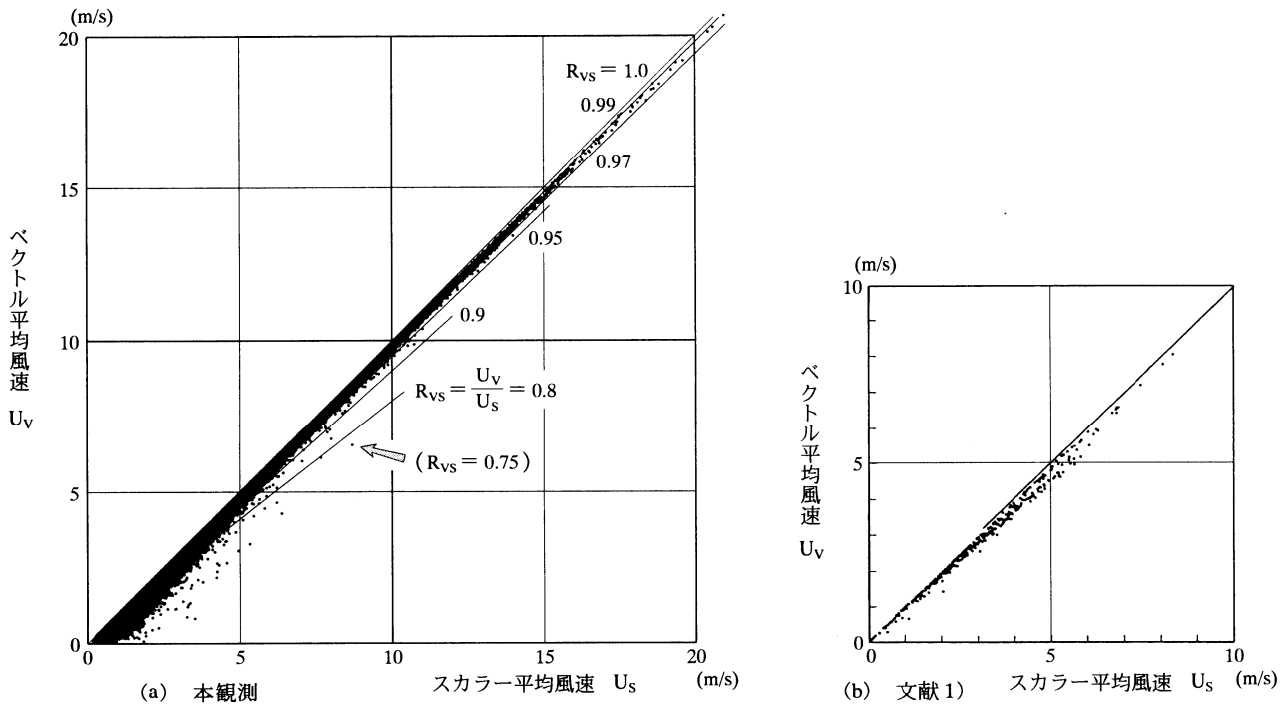
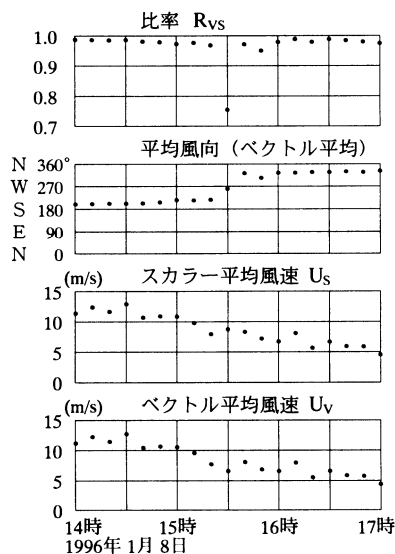
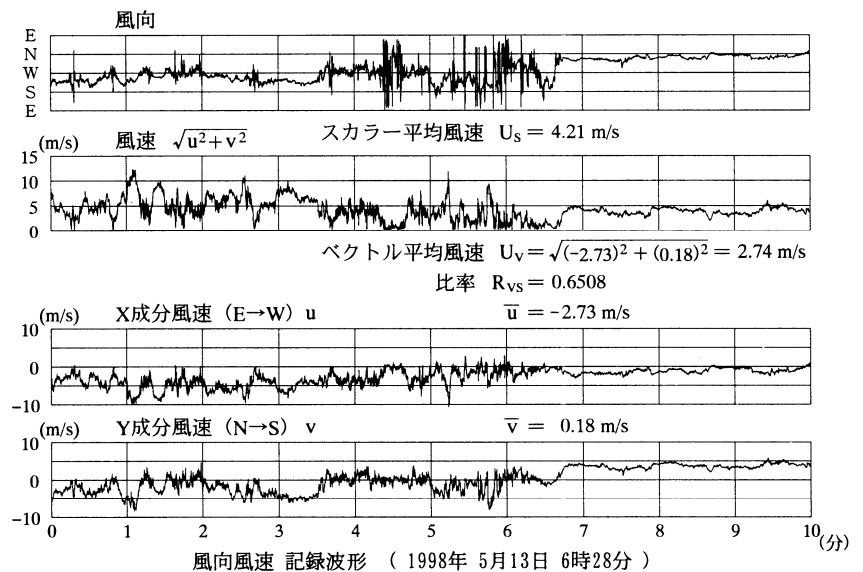


Fig.1 Distribution of Scalar-mean Wind Speed and Vector-mean Wind Speed

ものがFig.1(a)である。図中には、目安として比率 $R_{VS} = U_V / U_S = 1.0, 0.99, 0.97, 0.95, 0.9, 0.8$ の直線を併記した。比較のために文献1)より引用した相関図をFig.1(b)に示す。両者の傾向は類似しているが、Fig.1(a)の方がデータ数が多く、風速の範囲も広いので、より一般的な性状が読み取れる。Fig.1(b)にはデータ数が少ないため見られないが、Fig.1(a)の低風速領域ではプロットが比率 R_{VS} の小さい領域まで広がって分布している。しかし、 $U_S \geq 5 \text{ m/s}$ ではほとんどのプロットの比率が 0.8 以上となり、 $U_S \geq 7.5 \text{ m/s}$ ではほとんど $R_{VS} \geq 0.9$ 、 $U_S \geq 10 \text{ m/s}$ では $R_{VS} \geq 0.95$ 、 $U_S \geq 15 \text{ m/s}$ では $R_{VS} \geq 0.97$ となっている。一方上限としては、 $U_S \geq 15 \text{ m/s}$ ではほとんどのプロットについて $R_{VS} \leq 0.99$ となっている。

上記のほとんどのプロットから外れた観測値について検討する。一例として、Fig.1(a)に矢印で示す観測値に着目する。これは、Fig.2に

示す前後3時間の定時記録の中の15時30分の観測値に対応する。この例においては、 $U_S = 8.7 \text{ m/s}$ とかなりの高風速なのにもかかわらず、 $R_{VS} = 0.75$ と比率が前後の観測値に比べて随分小さくなっている。この要因としては風向の変化が考えられる。すなわち、Fig.2より分かるように、観測時刻の前後で風向がSSW→NNWに変化し、この時刻の風向は中間のWとなっている。したがって、この10分間に風向が大きく変化したことが推測される。この例の場合には時刻歴波形が得られていないので、その状況を確認できないが、類似した状況で風向が変化している時刻歴波形の例をFig.3に示す。この記録では、最初の約3分間風向WSWから6m/s前後の風が吹き、その後7分迄風速が低く、その後安定して風向NNWからほぼ5m/sの風が吹いている。この時刻歴では、 $U_S = 4.2 \text{ m/s}$ 、 $U_V = 2.7 \text{ m/s}$ 、 $R_{VS} = 0.65$ となっている。以上のように、10分の間に風向が大きく変化する場合、

Fig.2 An Example of Observation when Ratio R_{VS} is SmallFig.3 An Example of Time Histories when Ratio R_{VS} is Small

スカラー平均風速がベクトル平均風速を大きく上回ることが分かる。

Fig.1(a)のデータを比率 R_{VS} にして Fig.4 にプロットした。Table 1 と Fig.5 には、表中に記した U_S の範囲のデータについて求めた R_{VS} の分布性状を示す。Fig.5 の頻度分布曲線の基準位置はそれぞれの範囲の U_S の統計的な平均値であり、×印は R_{VS} の平均値である。低風速領域で広範囲に広がった R_{VS} の頻度分布の状況が、風速が大きくなるに従って平均値のまわりに集中するようになり、平均値も1に近付いていく。すなわち、高風速時には、10分間の風向の変化は非常に小さいと考えられる。しかし、 R_{VS} の平均値が1に達している訳ではなく、 $U_S \geq 14 \text{ m/s}$ でも0.983であった。また、このように分布が集中することから、ある程度の高風速(例えば $U_S \geq 7.5 \text{ m/s}$)のスカラー平均風速 U_S は、Table 1 の比率によりベクトル平均風速 U_V に変換することができると考えられる。

なお風速の変動に関して、乱れの強さとガストファクターの分布性状を Table 1 と Fig.6, 7 に示す。それ等の平均値は、低風速領域では変化するが、 $U_S \geq 5 \text{ m/s}$ では安定し、それぞれ 25~27%, 1.77~1.80 となっている。これ等の値は、10 Hz サンプルした瞬時値を対象とした評価時間の短いものであることを考慮すれば、従来からの報告³⁾と同様である。したがって、ここに使用した観測値が一般性を持っていると考えられる。

2. 平均風向の関係

Fig.8 にスカラー平均風向とベクトル平均風向の関係を示す。ここに、スカラー平均風向は、風向のアナログ出力の10分間の時間平均値であり、ベクトル平均風向は、風速2成分の時間平均値 $\bar{u}, \bar{v}$ から求められる風向である。

図の縦軸(ベクトル平均風向)は $0 \sim 360^\circ$ であるが、横軸(スカラー平均風向)は $0 \sim 540^\circ$ となっている。これは Fig.9 に一例を示すように、風向計のアナログ出力が波形の連続性を少しでも確保するために、通常 $0 \sim 540^\circ$ で出力するという特殊性によっている。しかし、風速が

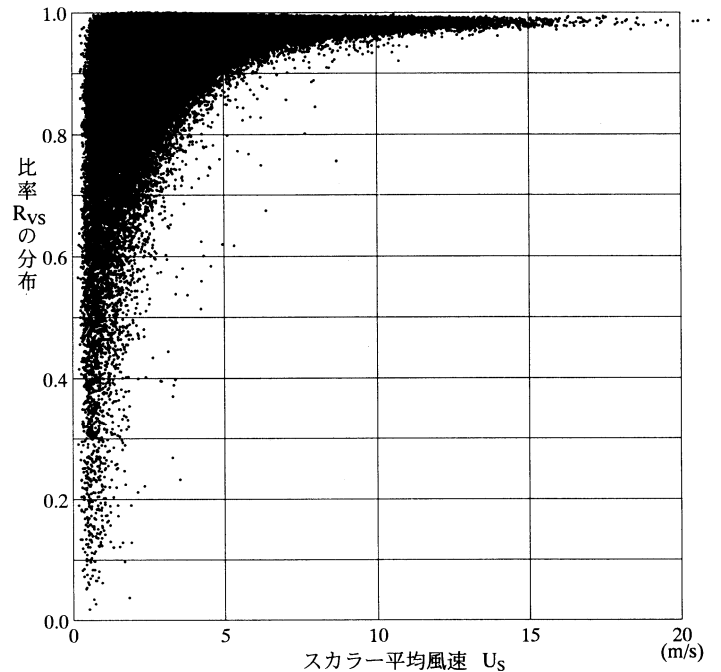


Fig.4 Distribution of Ratio $R_{VS} = U_V / U_S$

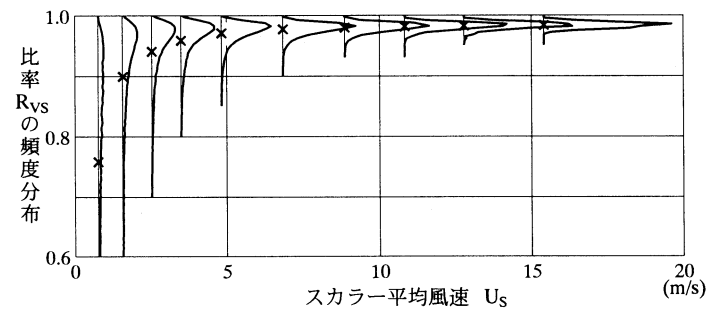


Fig.5 Frequency Distribution of Ratio R_{VS}

Table 1 Variation of Mean and Standard Deviation of Ratio R_{VS} , Intensity of Turbulence and Gust Factor

スカラー平均風速 U_S			比率 $R_{VS} = U_V / U_S$		乱れの強さ (%)		ガストファクター	
範囲 (m/s)	個数	平均 (m/s)	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
$0 \leq U_S < 1$	6849	0.76	0.758	0.1934	49.7	12.23	2.64	0.596
$1 \leq U_S < 2$	29178	1.56	0.899	0.0995	39.0	13.18	2.16	0.481
$2 \leq U_S < 3$	44650	2.52	0.940	0.0547	32.1	11.16	1.93	0.372
$3 \leq U_S < 4$	43642	3.48	0.958	0.0350	28.8	9.32	1.84	0.305
$4 \leq U_S < 6$	49033	4.83	0.970	0.0210	26.8	7.68	1.78	0.251
$6 \leq U_S < 8$	17025	6.84	0.977	0.0116	26.4	6.41	1.78	0.213
$8 \leq U_S < 10$	6493	8.86	0.980	0.0086	26.1	5.64	1.79	0.191
$10 \leq U_S < 12$	2451	10.82	0.981	0.0066	25.5	4.94	1.77	0.173
$12 \leq U_S < 14$	657	12.77	0.982	0.0056	24.9	4.55	1.77	0.175
$14 \leq U_S$	210	15.41	0.983	0.0045	25.4	4.17	1.80	0.160

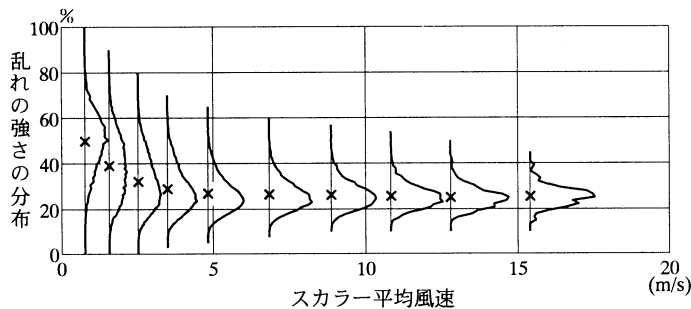


Fig.6 Frequency Distribution of Intensity of Turbulence

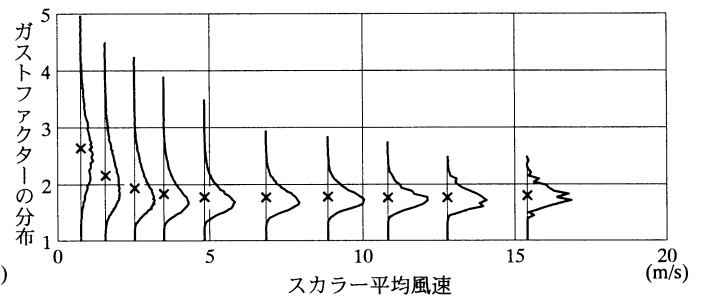


Fig.7 Frequency Distribution of Gust Factor

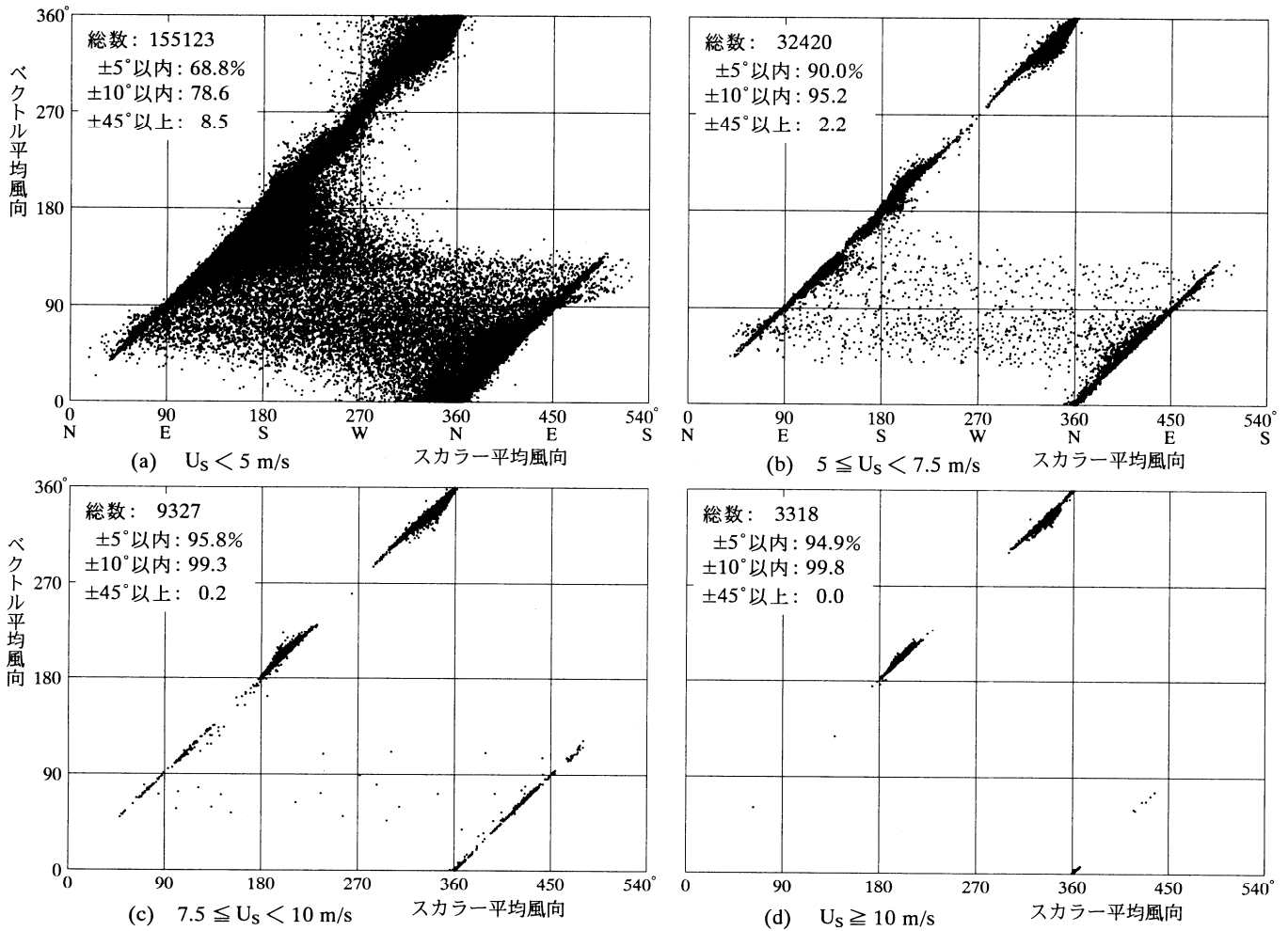


Fig.8 Distribution of Scalar-mean Wind Direction and Vector-mean Wind Direction

0に近づくと図のように360°ズレた出力に切り換わることがあり、かえって連続性が途切れてしまうことがある。この例のような場合に波形を単純に時間平均すると、その角度は全然別の風向となることが分かる。

Fig.8を見ると、低風速領域では、ベクトル平均風向が0~180°と270~360°の範囲で対応の大きくズレたプロットもあるが、これは上記のことによっている。風速が大きくなるに従って、図中に併記した割合からも分かるように両者の対応関係は良くなる。しかし、 $U_s \geq 10 \text{ m/s}$

の場合でも対応状況にはそれなりの幅が見られる。これは、ベクトル平均風向では考慮されている風速の変動による重みづけが、スカラー平均風向では考慮できないためである。

IV. 風向風速出現確率の分布

これまで平均風速と平均風向を別々に見てきたが、以下では、風向風速を同時に把えて検討する。Fig.10にスカラー的およびベクトル的に求めた平均風向と平均風速の同時分布を示す。この分布性状は当観測地点の風の吹き方の特性を示したものであるが、ここでは、本来的なベクトル平均による風向風速の分布性状が、スカラー平均による場合に、どのように変化するかということに注目する。Fig.4から理解できるように、スカラー的に求めた場合には(Fig.10(a))、風速0付近(図の中心部)で空白(出現しない)となっている。また、WSW→WNWの風向で、本来的なベクトル平均の場合に(Fig.10(b))、5m/sに達する頻度が小さいが、スカラー的な場合には頻度が大きく、黒く埋まっている。これは、Fig.8(a),(b)から分かるように、スカラー的な場合に、本来的(ベクトル的に)別の風向のデータがカウントされるためである。5m/s以下の分布では、プロットが相当に入れ替わっていることが考えられる。一方、10m/s以上の分布性状は可成り良い対応を示している。

更に詳細に風向風速出現頻度を比較検討する。ここでは、各風向における風速分布をWeibull分布で近似して、風向風速出現確率を求める。すなわち、ある値 u を超える風速が、ある風向(16方位を考

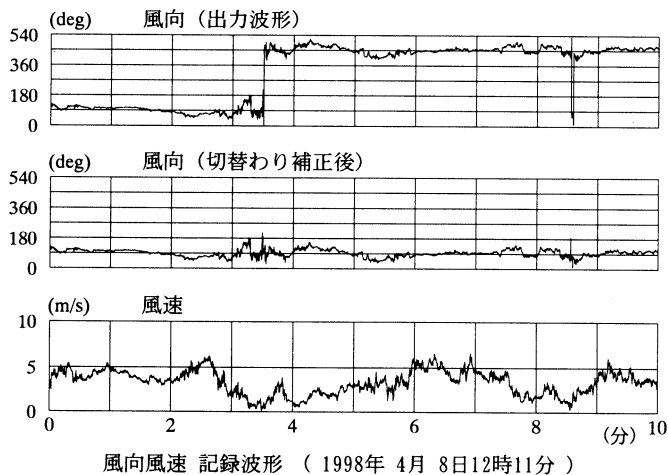
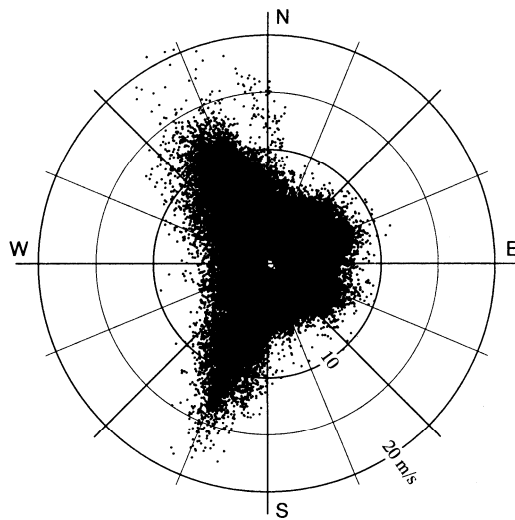
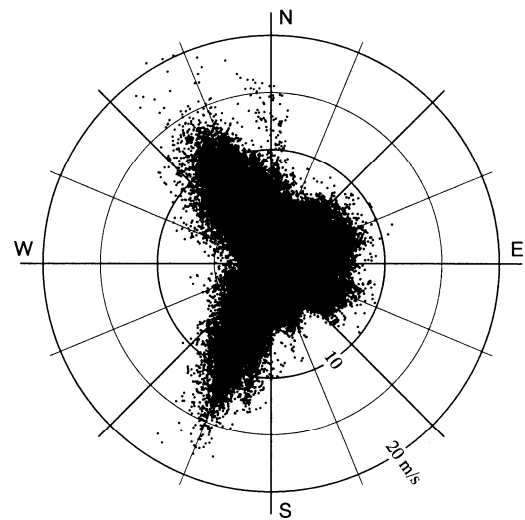


Fig.9 An Example of Switching of Wind Direction

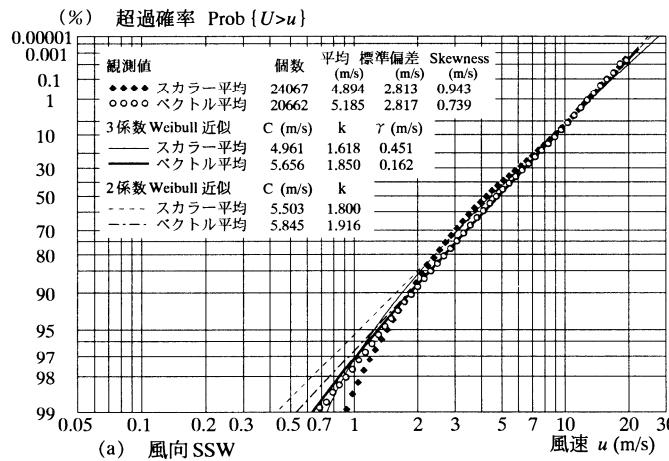


(a) スカラー平均 風向風速分布

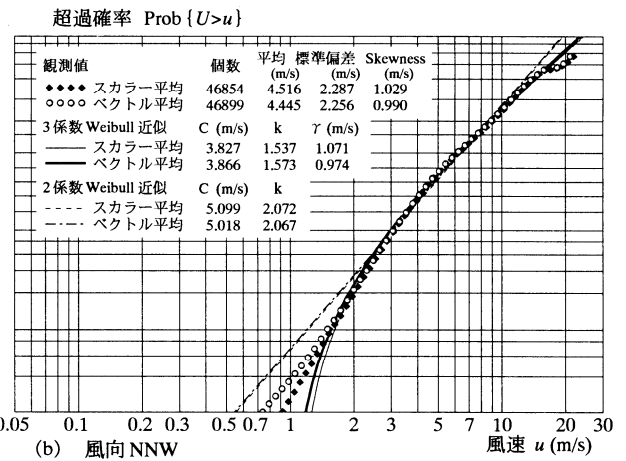


(b) ベクトル平均 風向風速分布

Fig.10 Distribution of Mean Wind Direction and Speed Obtained by Scalar and Vector Average



(a) 風向 SSW



(b) 風向 NNW

Fig.11 Examples of Approximation of Wind Speed Distribution with Weibull Distribution

えて22.5°の範囲とする)から、出現する確率を次式で表す:

$$\text{Prob.}\{U>u, \text{ per } 22.5^\circ\} = A \exp\left\{-\left(\frac{u-\gamma}{C}\right)^k\right\}. \quad (3)$$

ここに、Aは、風配(風向出現確率)である。またC, k, γ はWeibull分布関数の係数であり、それぞれ、位置係数, 尺度係数, 形状係数である。なお、簡便さの面から、 $\gamma=0$ とした2係数のWeibull分布が用いられることも多い。

ここでは、風向別に平均風速データを統計処理して1,2,3次の統計モーメントを計算し、それらに合わせるようにC, k, γ を定める方法で(3)式の近似を行っている。スカラー的およびベクトル的に求めた平均風向風速を対象にして、2係数と3係数のWeibull分布で近似した結果の内、一例として、風向SSWとNNWのものをFig.11に示す。なお図中では、A=1としている。

Fig.11のようなWeibull確率紙上では、2係数のWeibull分布は直線となり、3係数のWeibull分布は γ により曲率を持つ。風速の頻度分布はWeibull確率紙上で直線的でないことが多いので、3係数の方が近似機能は高い。Fig.11の(b)の場合や(a)のベクトル平均の場合が好例である。

次に、スカラー平均とベクトル平均の性状に関してであるが、Fig.11の(a)の場合には、1.8m/sで両者が交差しており、9m/s以上ではほぼ一致

している。これはFig.8(a)から分かるように、スカラー平均風向SSW(191.25~213.75°)に、本来のベクトル平均による別の風向の観測値が混入したり、本来SSWの観測値が除外されたりすることの結果である。

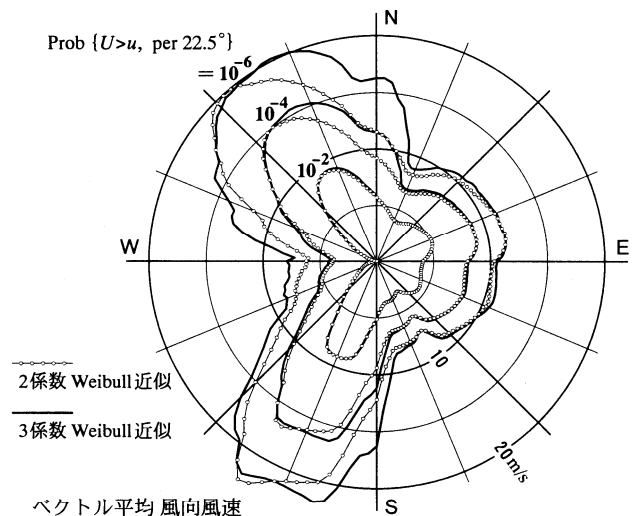
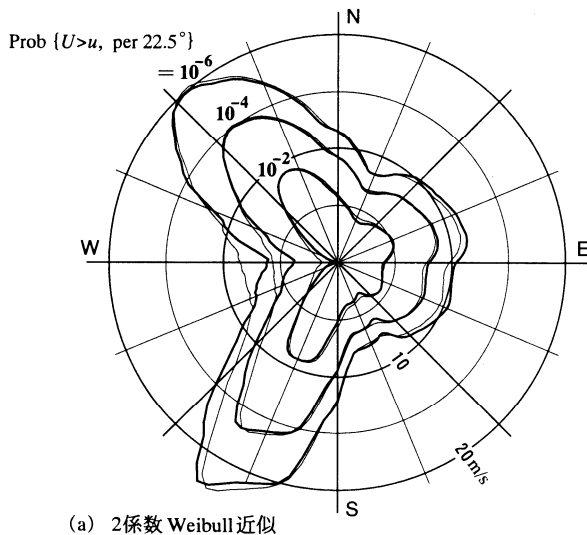
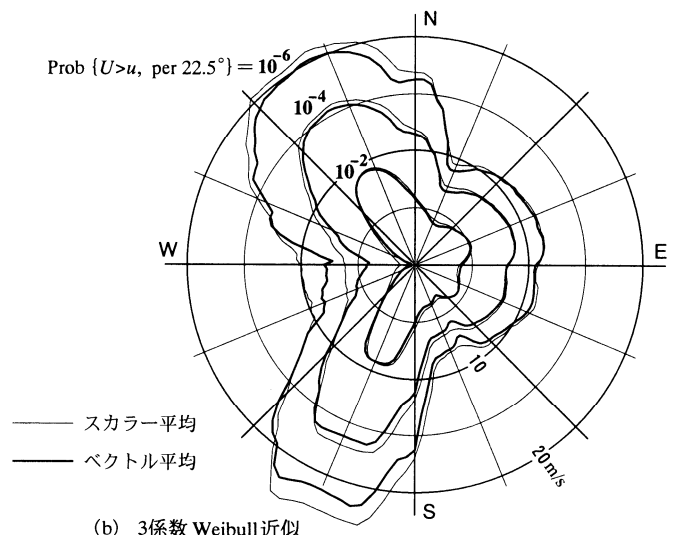


Fig.12 Probability Distribution of Wind Direction and Speed Approximated with 2-parameters and 3-parameters Weibull Distribution



(a) 2係数 Weibull 近似



(b) 3係数 Weibull 近似

Fig.13 Probability Distribution of Mean Wind Direction and Speed Obtained by Scalar and Vector Average

この場合には、Fig.11(a)に記した個数と平均から分かるように、別風向の中程度の風速の観測値が多数混入したと考えられる。一方 Fig.11の(b)の場合には、このようなことが起らなかったようであり、類似した傾向を示している。

Fig.12に、ベクトル平均による風向風速の出現確率を2係数と3係数のWeibull分布で近似した結果を示す。図に描いた曲線は、(3)式に示すように、その点の示す角度を中心にした22.5°の範囲の風向から吹く風が、その点の示す風速を超過する確率を等高線として表している。確率値としては 10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-6} の三つの場合を示している。Fig.10(b)で黒く塗り潰された領域が 10^{-2} の曲線に対応すると考えられる。また他の確率の曲線では、風向SSWの付近とNNW~Nで形状が少し異なっている。これは、Fig.12には22.5°の幅で平滑化された性状を示していることもあるが、やはり、各風向での風速分布の性状の違いにもよっていると考えられる。

さて、確率 10^{-2} は評価期間を1年として1日単位で見ると約3日半に1度の頻度に相当する。したがって、この観測場所では3日半の間に、SSWやNNWの風向からは8m/sを超える風が吹くが、Wの風向からはほとんど風が吹かないということが理解できる。一方、確率 10^{-6} の曲線はそれぞれの風向から現れた最大風速の分布に対応しているようである。三つの確率の2係数と3係数のWeibull近似による分布形状を比べると、確率の低下(風速の増大)に伴う分布形状の変化の様子が、2係数近似より3係数近似の方が激しく、高風速の分布との対応が良好である。この点から見ると、3係数Weibull分布による近似の方が2係数Weibull分布によるものよりも優れているように思われる。なお、日常的な風の分布性状(確率 10^{-2} の例)には2係数Weibull近似と3係数Weibull近似の差は見られなかった。

Fig.13には、2係数と3係数のWeibull分布によって、スカラー平均とベクトル平均による風向風速の出現確率を近似した結果を示している。2係数近似の場合も3係数近似の場合も、全般的には両者は類似した分布性状を示している。しかし、風向Wの付近でスカラー平均の場合に風速が高くなっている。これは前述したように、本来的には別の風向の観測値が混入したためである。次に、2係数Weibull近似による場合には、風向EとSWの付近でスカラー平均の場合に風速が低くなっている。また、3係数近似の場合には、頻度の高いSSWとNW~Nの

風向でスカラー平均の場合に風速が大きくなっている。前節では、ある程度の高風速になると、スカラー平均の場合でも平均風速と平均風向がベクトル平均の値と比べてそれ程大差ないことを示したが、風向変化の大きい低風速領域からの累積の貢献度の高い風向風速出現確率の分布で見ると、ここに示したような差異が生じるようである。

V. おわりに

東京都心(神田錦町)に建つビルの屋上で計測した4年間のデータに基づいて、超音波風速計の出力をスカラー的に時間平均した10分間平均風向と平均風速を、流体力学の定義に従って、ベクトル的に求めた平均風向、平均風速と比較した。

その結果は次のようである。

- スカラー平均風速 U_s に対するベクトル平均風速 U_v の比率 R_{vs} は、 U_s が小さい時には広い範囲に分布するが、 U_s が大きくなるに従って分布は集中し、 R_{vs} の平均は1に近付いていく。
- ベクトル平均風向が $0 \sim 180^\circ$, $270 \sim 360^\circ$ の範囲で、風速計の風向出力を単純に時間平均したスカラー平均風向が大きく異なることがある。風速が大きくなるに従って、この頻度は減少し、両者の対応は良くなるが、 $U_s \geq 10 \text{ m/s}$ の場合でも対応状況に幅が見られる。
- 風速分布をWeibull分布で近似して、風向風速の出現確率を分布図に表して検討した。スカラー的およびベクトル的に求めた風向風速の出現確率の分布を比較すると、分布性状は全般的には類似しているが、幾つかの差異も見られた。

この結果は、スカラー的に求められた平均風向風速のデータを利用する際の基礎資料として利用できる。また、c.の風向風速出現確率の分布図により、風向と風速の両面から見た風の吹き方を適切に表現することができると考えられる。

参考文献

- 光田 寧, 気象のはなし I, 技報堂出版, (1991), pp.162-166.
- 真田 早敏, 吉田 正邦; 都心の高層建物に作用する風と風圧の実測, 風工学シンポジウム論文集, 13, (1994), pp.161-166.
- 日本鋼構造協会(編), 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, (1997), pp.383-385.