

平成 8 年度卒業研究論文

風向風速計センサの特性比較

(Comparison of Characteristic of Anemometer)

指導教官 小野木 茂
著者 横井 信太郎

目次

目次	1
要旨	2
1. 研究の目的	3
2. 風向風速計について	4
2.1 風向風速計センサについて	4
2.1.1 風速部動作原理	4
2.1.2 風向部動作原理	6
2.2 各風向風速計センサの仕様	8
3. 実験	10
3.1 自然風に対する特性の比較	10
3.2 プロペラの物理的特性の比較	20
3.2.1 プロペラの慣性モーメント	20
3.2.2 発生トルク	25
3.2.3 減速トルク	29
3.3 数値計算	30
3.3.1 距離定数	31
3.3.2 変動する風速に対する応答	32
4. 考察	41
5. 謝辞	43
参考文献	44

要旨

気象庁では1995年度末より、地上観測装置のJMA-80型(以下80型)からJMA-95型(以下95型)への移行を開始した。95型は1996年現在東京管内14官署に設置されている。また、気象大学校にも研修用として設置されている。

この中で風向風速計センサの仕様が大幅に変更されている。本研究ではこれらの風速センサで得られるデータの中で、応答特性の違いを最も反映する瞬間風速のデータについて比較した。同時にプロペラの物理学的な特性についても比較を行った。

その結果、最大瞬間風速の観測値が95型の方が若干大きくなることがわかった。

1 . 研究の目的

本研究では、実際の自然風での比較データとプロペラの物理学的特性を調べ、応答特性の違いと瞬間風速のデータを多面的に考察するものである。

2 . 風向風速計について

2.1 風向風速計センサについて

風圧によってプロペラ等を回転させ、その回転速度から風速を求める方式の風速計を「回転型風速計」と呼ぶ。代表的なものには、「風杯型風速計（以下風杯型）」と「風車型風向風速計（以下風車型）」がある。

この2種類の風速計の違いは風速と同時に風向も観測できるか否かという点である。風車型は風向も同時に観測できるが、風杯型は風速のみしか観測できない。よって、風杯型は別に風向計の設置が必要になるが、全く同じ場所に風向計を設置するのは物理的に不可能である。このため、風の乱れが強いときは、風の風向と風速を同時に観測しているとは言い難い。

風車型は風向も同時に観測できるが、プロペラが風上に向かないと風速に対応した回転速度にならないので、風向の乱れが強いときは、風速の観測値が実際より小さくなる。ところが風杯型は風向とは無関係に風速を測定しているため、このような風向の変化の影響はほとんどない。

本研究の対象となっている80型と95型で使用されている風速計は、どちらも風車型である。

2.1.1 風速部動作原理

風速測定の原理は80型、95型ともに基本的に同じである。

これらの風向風速計の風速感部には、4枚の羽根のついたプロペラが使用されている。また、このプロペラの軸はベアリングによって支えられ、胴部に取り付けられている。このようにすることによって軸周りの摩擦を軽減している。

プロペラは風を受け、トルクが発生して回転する。この回転は、プロペラに発生しているトルクと、回転の2乗に比例して働く抵抗が釣り合うときに定常の回転速度となる。この定常の回転速度 (rad/sec)は風速 V (m/sec)の一意的な関数 $=F(V)$ になる。しかし、実際の風には変動があり、トルクと空気抵抗が釣り合う事はほとんどない。なぜならばプロペラには慣性モーメントがあるため、その回転が風速の変化に瞬時に追従するのは不可能であるからである。

このような風速計の追従の特性を表すために距離定数という定数が用いられる。距離定数というのは一定の風速の風が吹いているところに風速計を置き、プロペラが停止した状

態から定常の回転速度の63%に達するまでに必要な大気の動いた距離のことである。風速計の時定数は風速によって変わるが、時定数に風速をかけたものに相当するこの距離定数は風速によって変わらない。

また、加速時と減速時ではプロペラにかかるトルクが違う。一般に加速時の方が加速するためのトルクが大きく、減速時の減速するためのトルクは小さい。このために風速計の風速の指示値は実際の風速より小さく示されるよりことよりも、大きく示されるときの方が多い(図2.1参照)。

プロペラが完全に停止しているときには回転軸の静止摩擦力があり、風によって発生するトルクがそれを超えて初めてプロペラが回転し始める。このプロペラを回転させるために必要な最小の風速を風速計の起動風速という。しかしプロペラは風上に向かないと回転しないので、起動風速や風速に対する追従性は風向に対する追従の特性によっても影響する。

プロペラの回転速度の測定は、軸に取り付けられたスリットの付いた回転円盤とこれを挟むフォトインタラプタによって行われる(図2.2参照)。フォトインタラプタは回転円盤にあるスリットの通過を光学的に読みとり、電気パルス信号に変換する素子と考えて良い。この信号はケーブルを経てデータ変換部に出力され、そこでパルス数から非線形の式によって風速値に変換される。この非線形の式は先ほどの関数 $F(V)$ の逆関数である。但し、電気信号はパルスで出力されるため一秒あたりに出力されるパルス数、すなわち周波数 f (Hz) を角速度に変換する必要がある。回転円盤上のスリットの数 N とすると

$$=F(V)=2 \quad f / N$$

となるので、

$$V=F^{-1}(2 \quad f / N)$$

これが風速を求めるための式である。

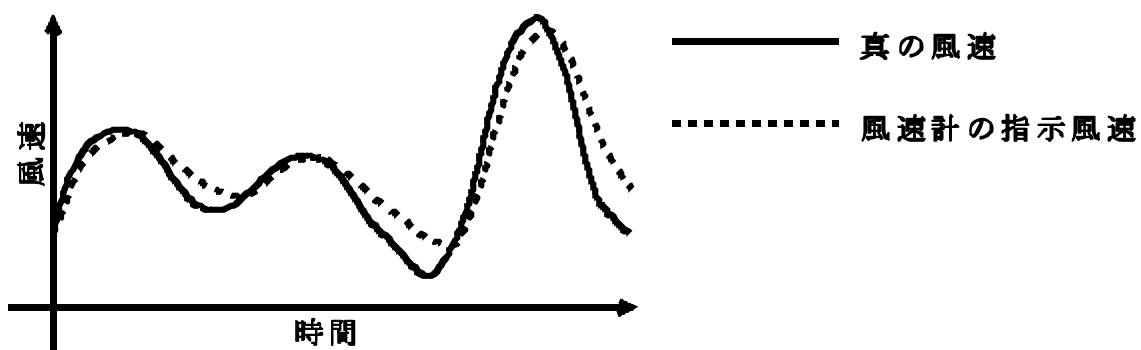
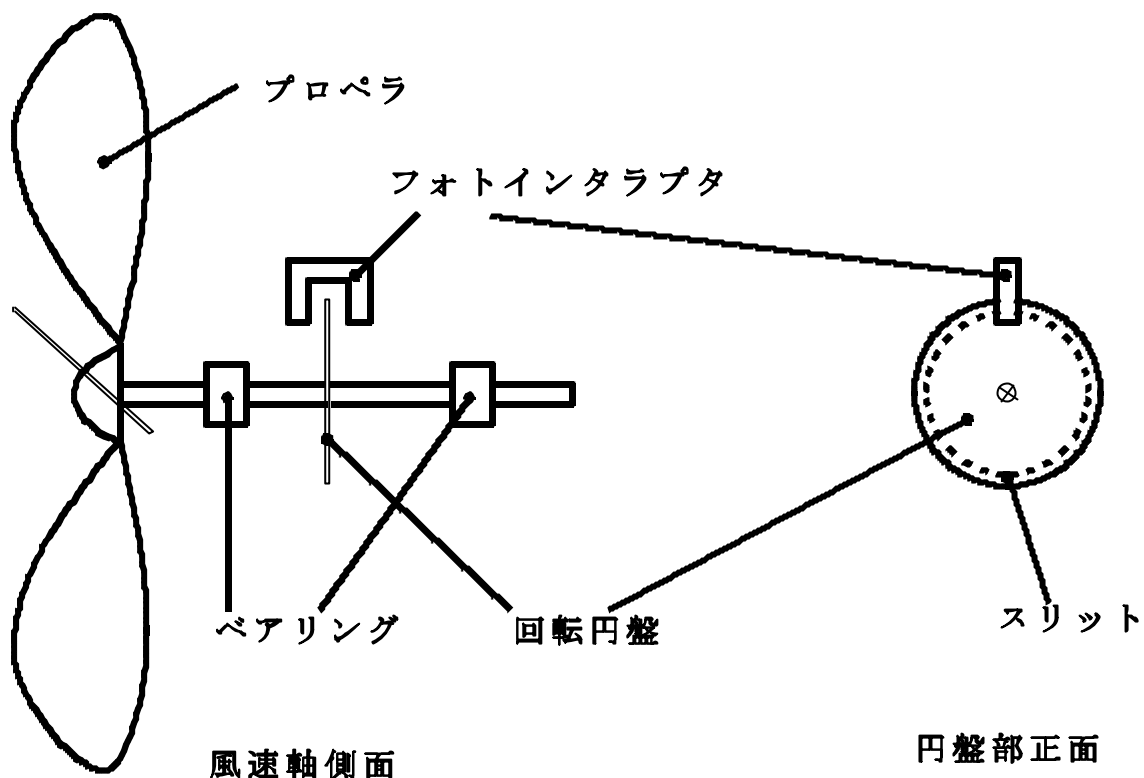


図2.1 真の風速と風速計の指示値の関係



風速部の構造模式図

図2.2 風速センサの構造

2.1.2 風向部動作原理

風向は胴部の向きによって測定する。胴部の向きは尾翼の側面にかかる風圧によって変えられる。この風圧は尾翼の側面が風上に垂直になっているときに最大になり、プロペラが風上の方向に完全に向いているときはかからない。しかし、風圧のみでは風上の方向に向いて胴部は止まらず振動する。風上を向いて止まるのは回転することによって生じる空気の抵抗があるからである。すなわち風向に応答して動く胴部の向きは、風が復元力として、回転運動による空気抵抗は回転速度に比例もしくは2乗に比例する抵抗として、軸周りの摩擦は一定の抵抗として働く、減衰振動となる（図2.3参照）。風向に対して一定の角

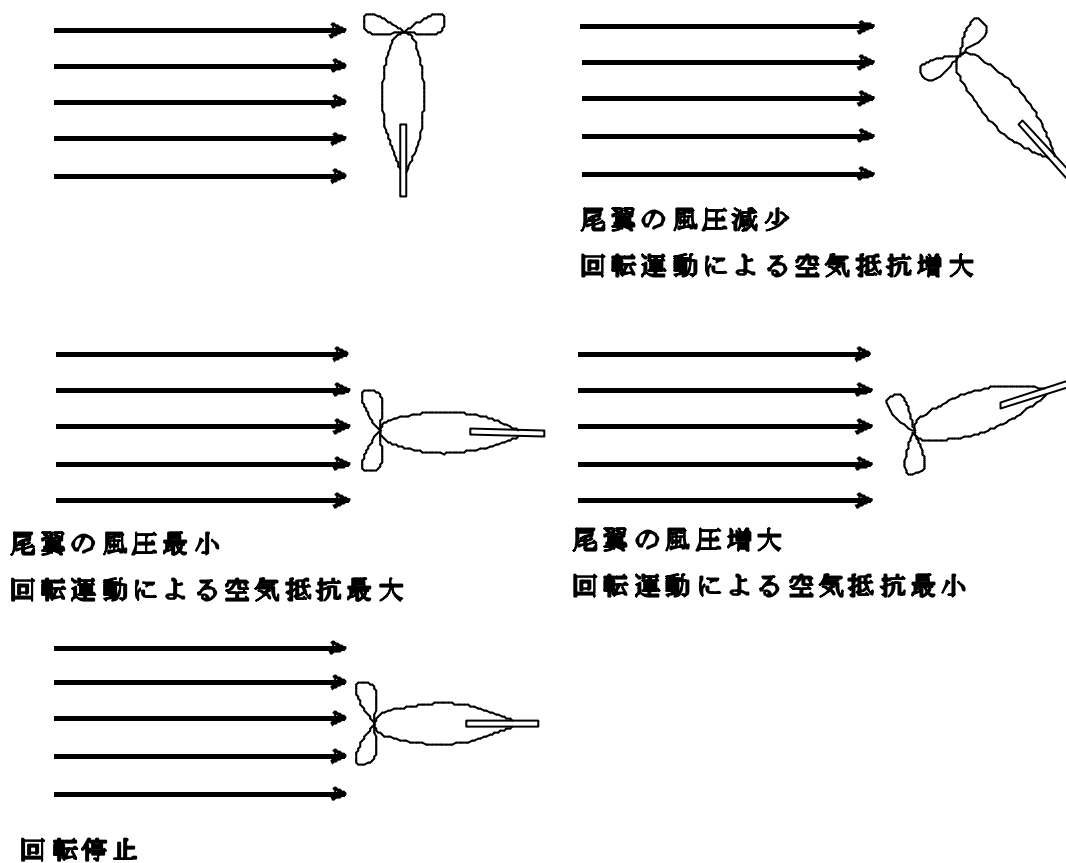


図2.3 風向部動作原理

度を持たせた胴部が減衰振動をして正対するまでの過程において、その63%に達するまでに必要な風程を周期定数といい、これは風速によらない定数となる。風向は胴部の回転によってそれが向いた方向で測定されるため、風向に対する追従性は風向回転軸周りの慣性モーメント、風によって発生するトルク、摩擦力によって決まる。また胴部を動かすのに必要な最小の風速を風向計の起動風速という。

このようにしてプロペラのついている部分が風上を向いた胴部の向きは、80型ではトルクシンクロ方式で検出し、95型ならばロータリーエンコーダで検出する。ロータリーエンコーダは光学的に位置を読みとる方式だが、トルクシンクロ式は電気機械的な方式であるので、摩擦が大きくなる。

得られた位置信号はデータ変換部に送られ、風向に変換される。

2.2 各風向風速計センサの仕様

JMA - 80型風向風速計センサ（図2.4参照）の仕様は次のとおり。

プロペラの直径	350mm
プロペラの材質	アルミダイキャスト
全重量	5.2kg
プロペラの重量	540g
全高長	770mm
胴部全長	680mm
風向発信部	交流シンクロ式 風向誤差 ± 2 度以下
風速発信部	パルス信号 48パルス/回転 $\pm 2\%$ 以下 風程信号 1パルス/60m風程
起動風速	2m/s以下
耐風速	最大瞬間風速 110m/s
動特性	風速感部 距離定数 8m
風向振動特性	周期定数 15m
風速の評価時間	0.25秒



図2.4 80型風向風速計センサ外観

JMA - 95 型風向風速計センサ（図2.5参照）の仕様は次のとおり。

プロペラの直径	250mm
プロペラの材質	ポリカーボネイト樹脂
全重量	4.0kg
プロペラの重量	100g
全高長	600mm
胴部全長	596mm
風向発信部	8bit光エンコーダ式
風速発信部	パルス信号 60パルス/回転 風程信号 なし
起動風速	0.5m/s以下*
耐風速	最大瞬間風速 90m/s
動特性	風速感部 距離定数 5m以下*
風向振動特性	周期定数 10m以下*
風速の評価時間	0.25秒

*測候時報63.5（1996）によると実験値では起動風速は0.35m/s以下、距離定数が3.1m、周期定数が8.0mとなっている。

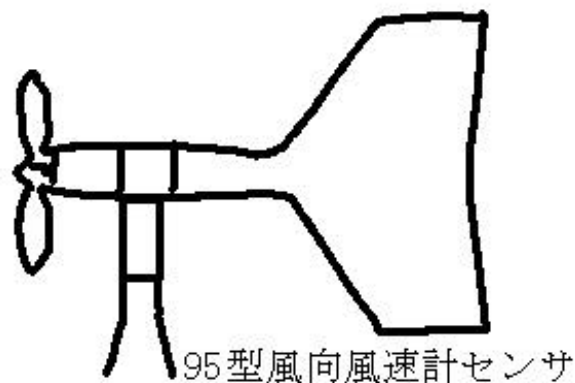


図2.5 95型風向風速計センサ外観

3 . 実験

3.1 自然風に対する特性の比較

<目的>

80型と95型とで、自然風の風速の観測値を比較してみることにより、観測値にどのような差異が生じるかを調べる。

<方法>

今回の実験では風向風速計センサを気象大学第2校舎屋上に設置した(図3.1参照)。地上からの高さは26.3m、センサ同士の距離は4.15mである。設置場所の北西にはレーダー塔があり、センサは東西方向に並べているので、南向きの風以外では、乱された風を観測する恐れがある。このように乱された風を比較するのをさけるため、比較の対象とするデータは南向きのものを使うことにした。ここで南向きの風というのは真北を0度として、130度から210度までの範囲と定義しておく。

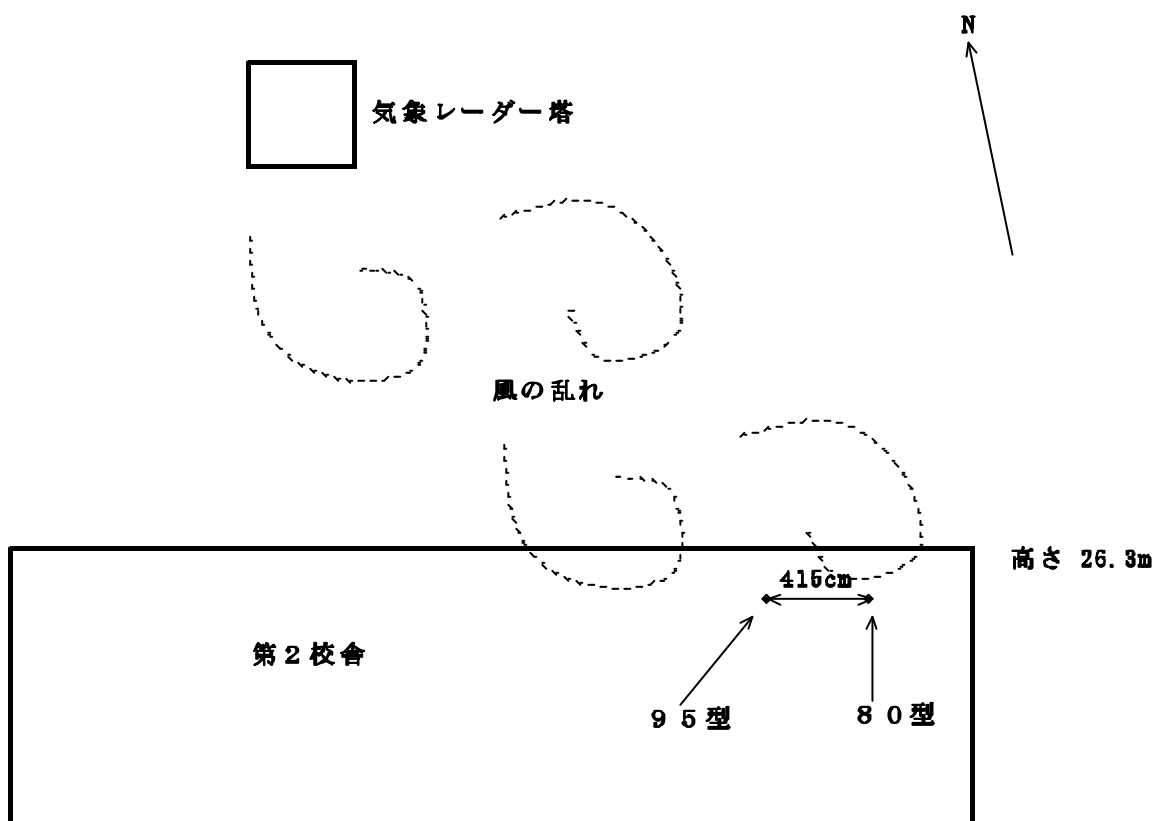


図3.1 センサ配置図

観測データは80型、95型ともにそれぞれの1分ごとにデータ変換部から得られる。それぞれのデータ変換部からはRS-232C端子から200bps、7bit、偶数パリティで出力されているが、現在パソコンで使用できる通信速度は 75×2^n bpsであり、ここからパソコンでデータを得るためにはパソコンのRS-232Cの設定を150bpsに設定し、クロックのカウントを2/3倍にしなければならない。この問題点はパソコンのメモリにあるRS232Cの通信速度を決めるカウンタテーブルをデータ取り込みプログラムで書き換えることにより、200bpsによるデータ通信を可能にし、解決した。

このようにして得られる風に関するデータの内容は風程値、風向16方位、風向36方位、1分間内最大瞬間風速である。このうちの平均風速と1分間内最大瞬間風速の比較を行う。また風向はデータの南向きの風を選別するために使用し、風程値は平均風速を求めるのに使用する。

< 結果 >

(1) 平均風速について

図3.2は10分間平均風速の観測値について80型を横軸、95型を縦軸にとったものである。この図から、風速が1.5m以上のところでは、80型も95型も同一の風速を示していることが多いことがわかる。しかし、それ以下の風速のときになると95型の方が明らかに速い風速を示していることがわかる。

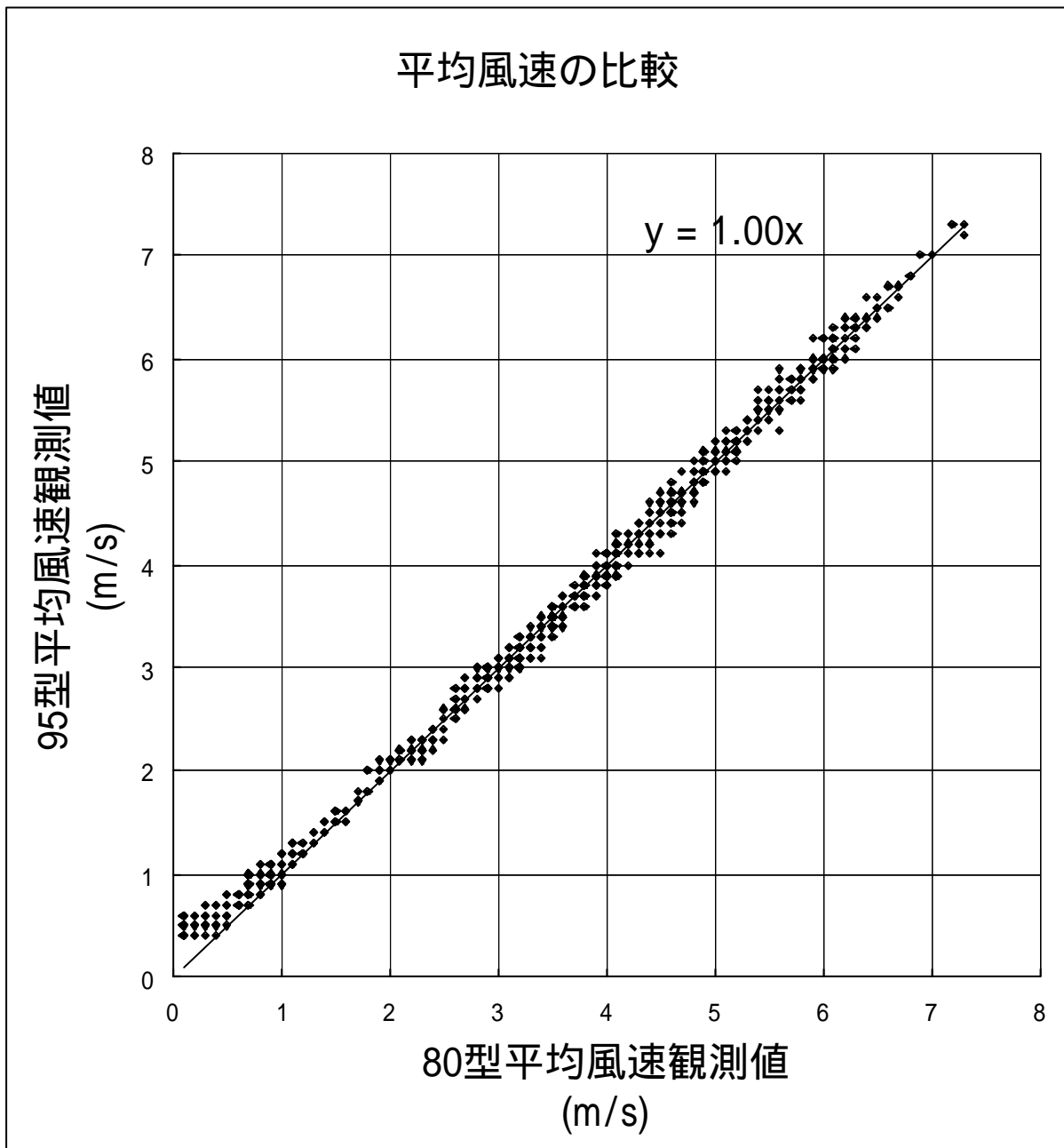


図3.2 平均風速の比較

(2) 最大瞬間風速について

図3.3~7は、80型と95型の1分間内の最大瞬間風速の観測値の比をとったものの分布を示すもので、横軸は対数で表している。1分間内の最大瞬間風速は、95型の方が大きい値を示していることが多い。また、95型の観測値がかなり大きい値を示しているデータも見られる。

平均風速別で見ると、平均風速が小さいときほど95型の観測値が80型より大きく出ていることがわかる(表3.1参照)。

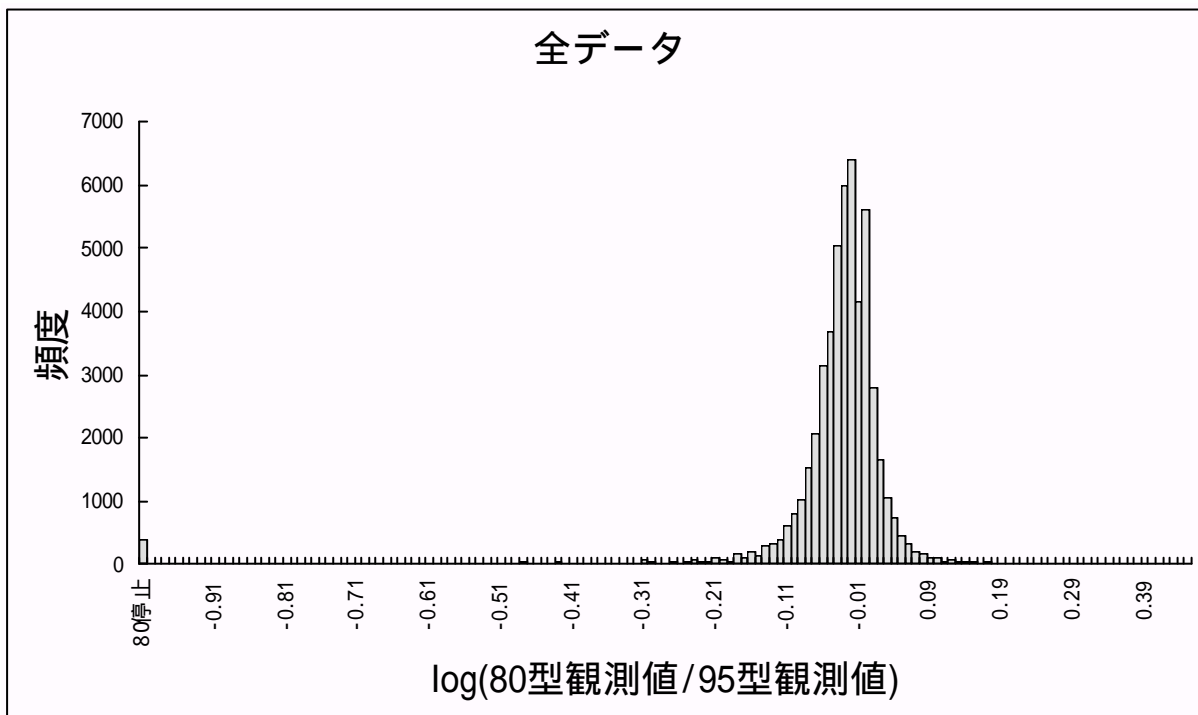


図3.3 最大瞬間風速の比較 (全データ)

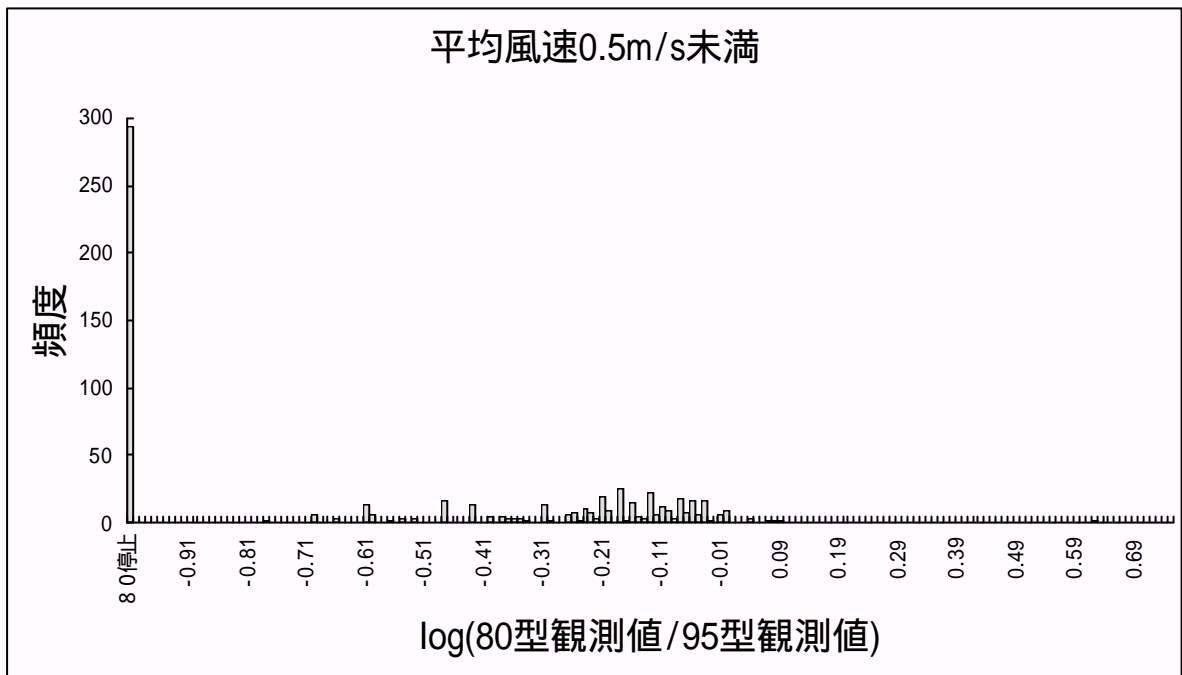


図3.4 最大瞬間風速の比較（平均風速0.5m/s未満）

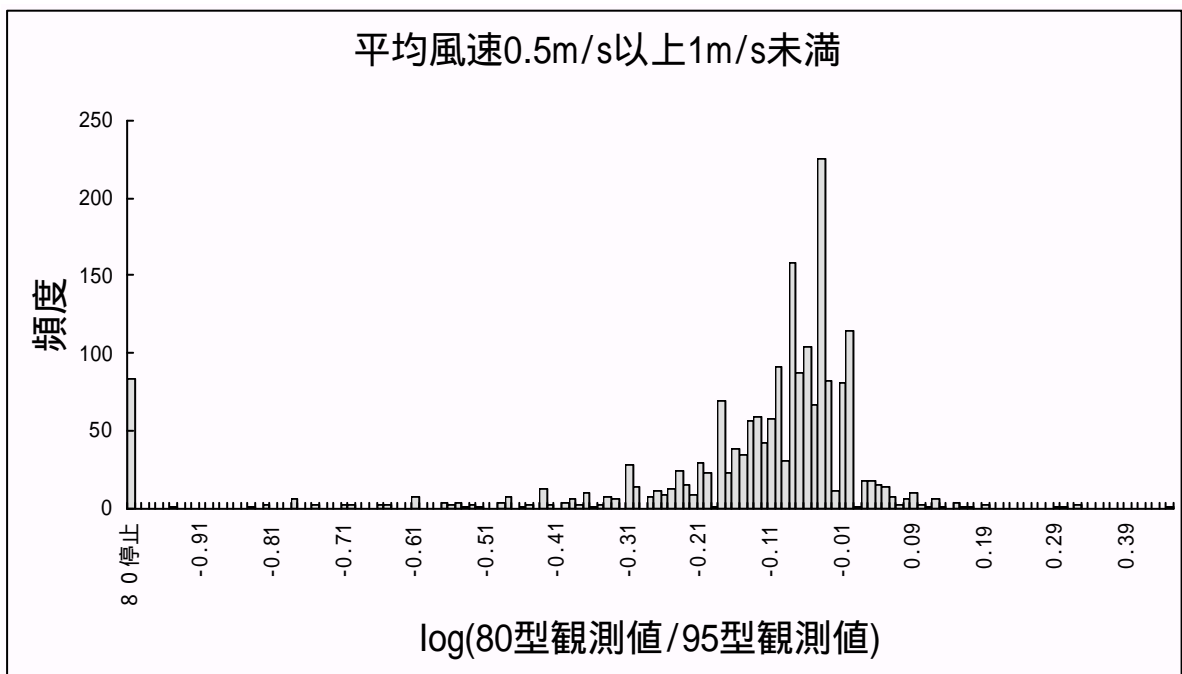


図3.5 最大瞬間風速の比較（平均風速0.5m/s以上1.0m/s未満）

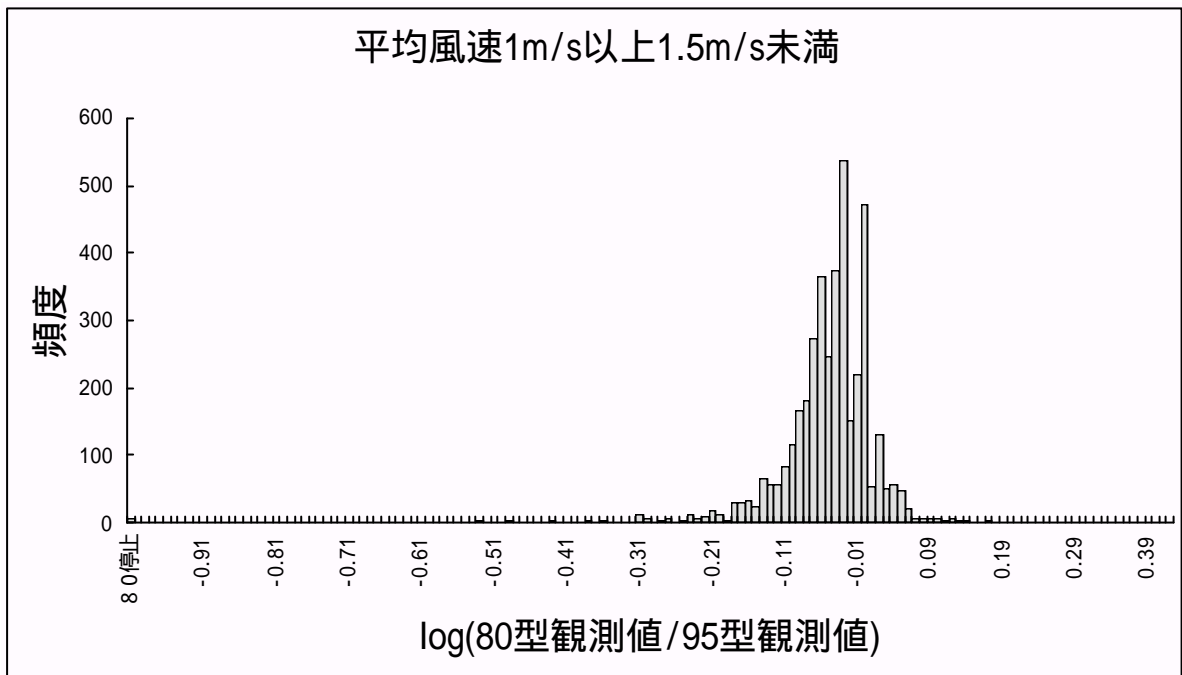


図3.6 最大瞬間風速の比較（平均風速1.0m/s以上1.5m/s未満）

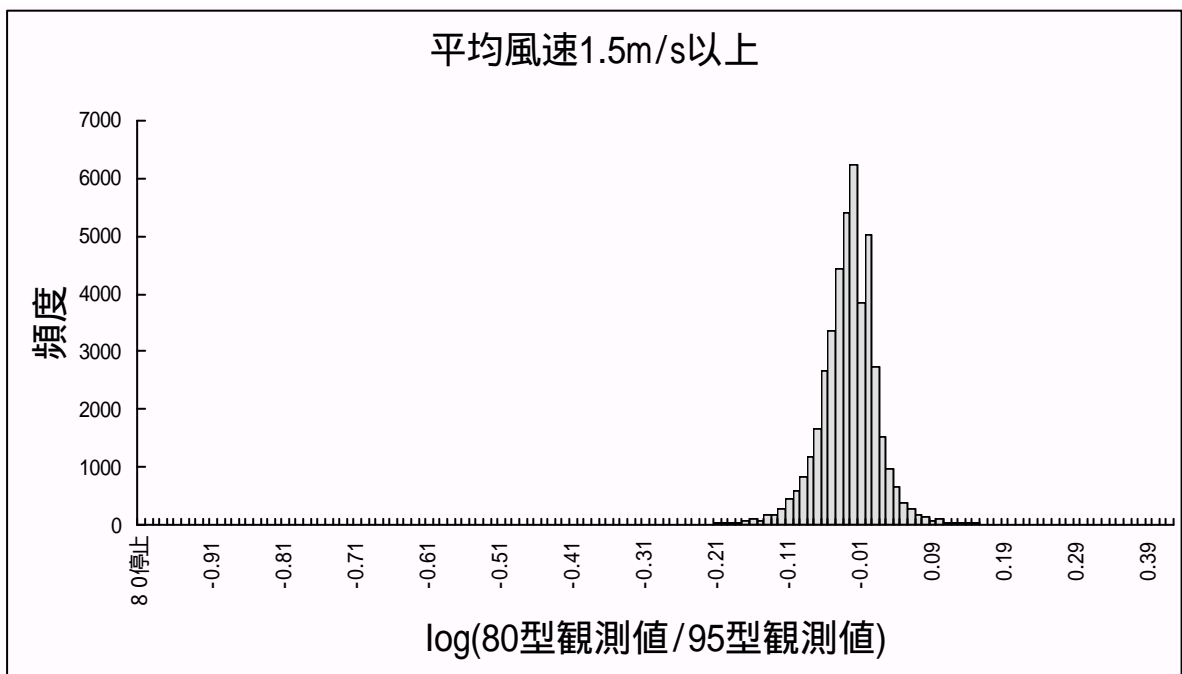


図3.7 最大瞬間風速の比較（平均風速1.5m/s以上）

平均風速	80型/95型
0.5m/s未満	0.60
0.5m/s以上1.0m/s未満	0.78
1.0m/s以上1.5m/s未満	0.89
1.5m/s以上	0.94
全データ	0.93

表3.1 平均風速別の最大瞬間風速の観測値の比（平均値）

（3）突風率について

ここでいう突風率とは、10分間の平均風速と最大瞬間風速の比のことである。なお、最大瞬間風速の評価時間は0.25秒である。また平均風速1.5m/s未満の突風率は95型の方が平均風速が大きいため比較の対象にはしなかった。

図3.8は突風率の分布を示すもので、横軸は対数で表している。突風率も最大瞬間風速の場合と同様の分布をしているが、最大瞬間風速の場合よりも正規分布に近い分布となっている。また平均風速別にみると平均風速が大きくなるにつれて分散が小さくなる傾向がみられる。また、表3.2からは突風率の観測値の比はどの平均風速においてもほとんど変わらないことがわかる。

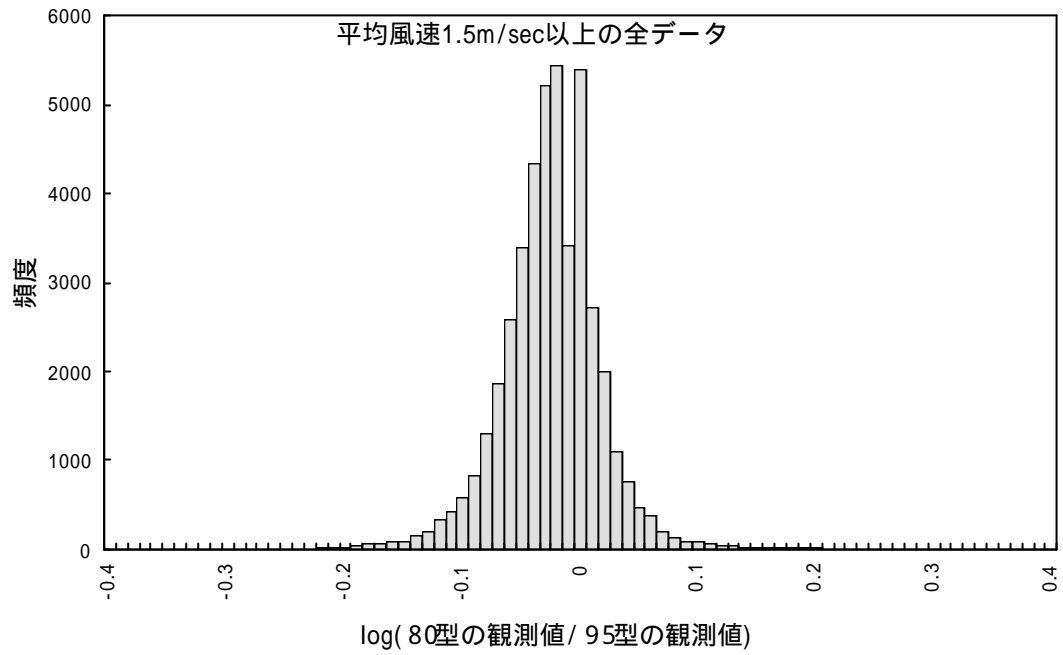


図3.8 突風率の比較（平均風速1.5m/s以上の全データ）

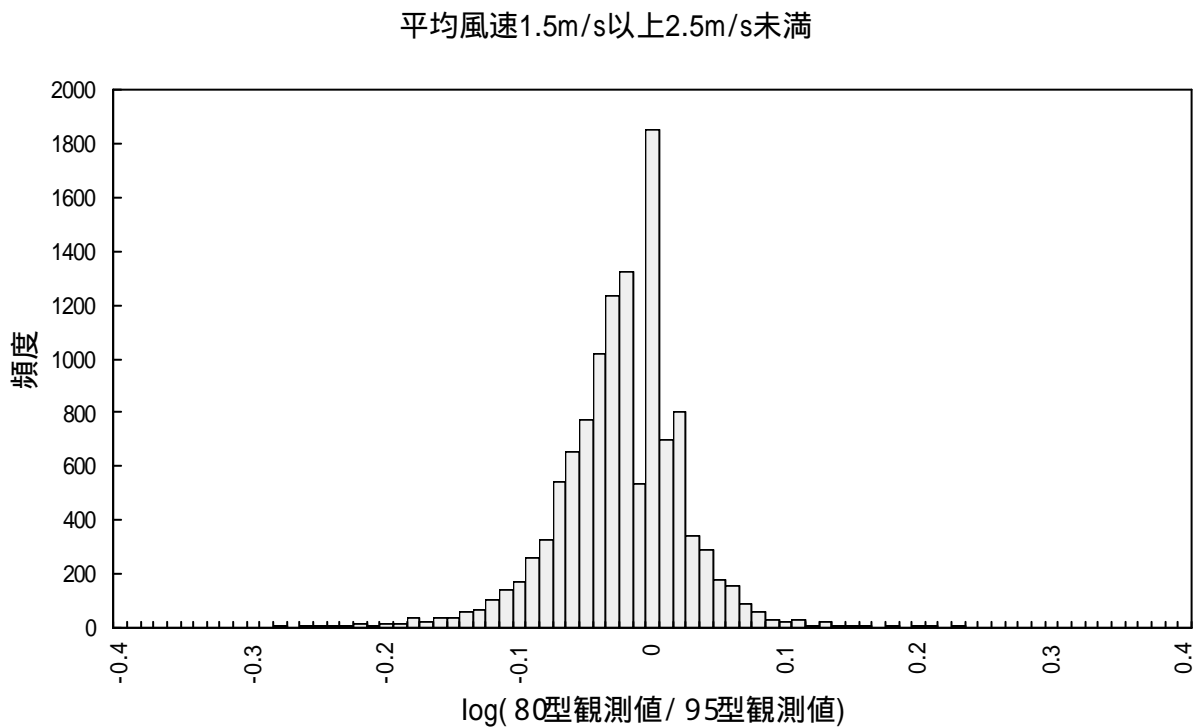


図3.9 突風率の比較（平均風速1.5m/s以上2.5m/s未満）

平均風速2.5m/s以上3.5m/s未満

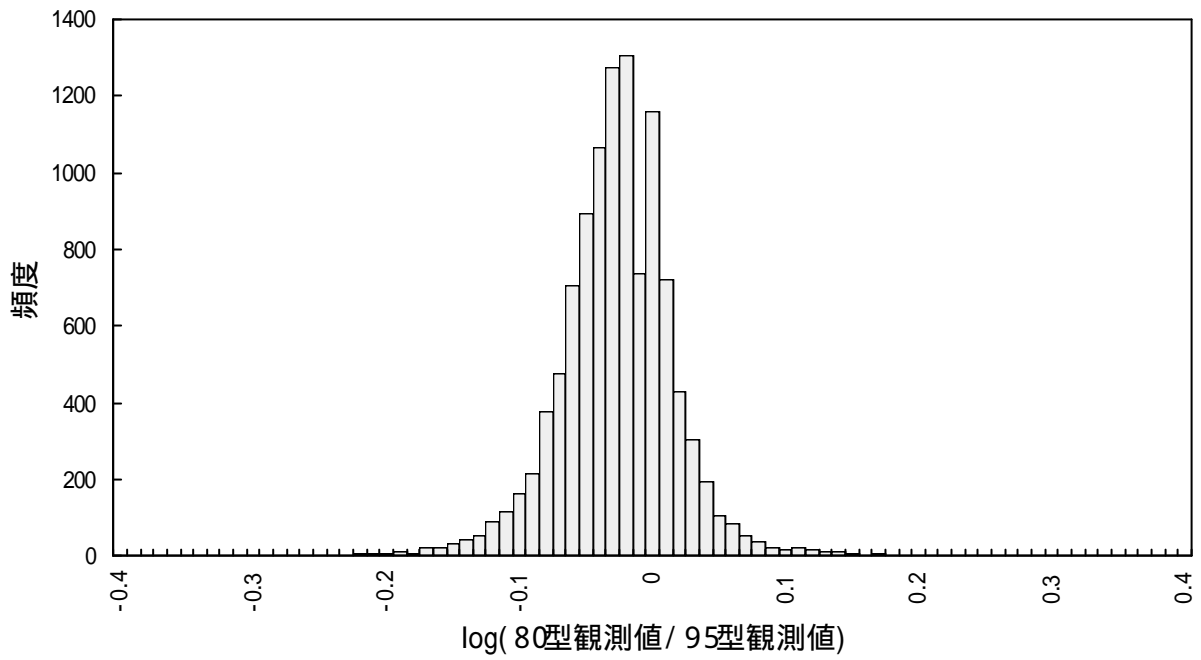


図3.10 突風率の比較（平均風速2.5m/s以上3.5m/s未満）

平均風速3.5m/s以上4.5m/s未満

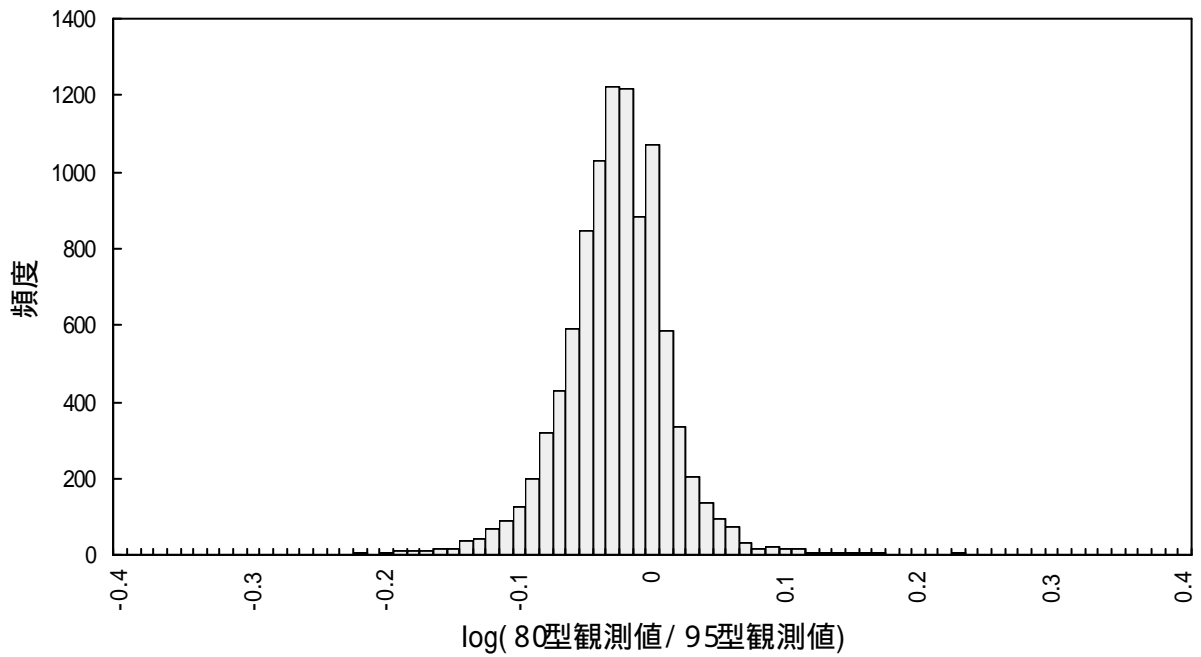


図3.11 突風率の比較（平均風速3.5m/s以上4.5m/s未満）

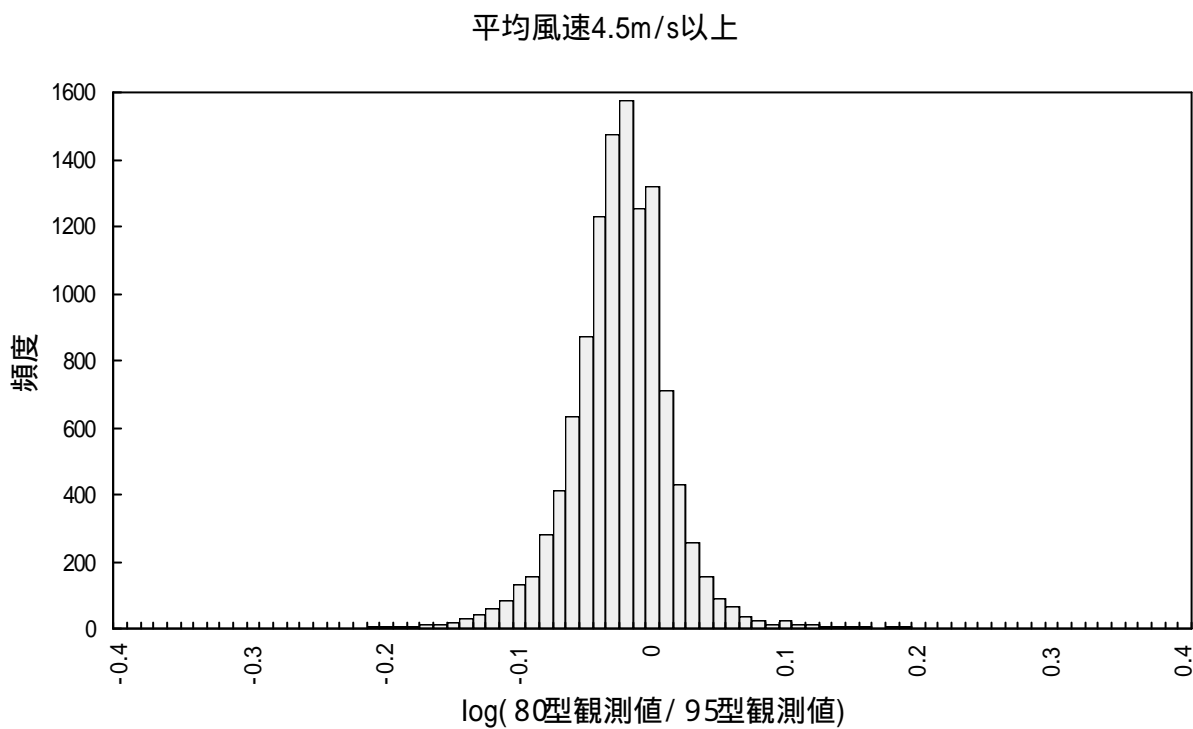


図3.12 突風率の比較（平均風速4.5m/s以上）

平均風速	80型/95型
1.5m/s以上2.5m/s未満	0.95
2.5m/s以上3.5m/s未満	0.94
3.5m/s以上4.5m/s未満	0.94
4.5m/s以上	0.95
全データ	0.94

表3.2 平均風速別の突風率の観測値の比（平均値）

3.2 プロペラの物理的特性の比較

<目的>

この実験によって80型風向風速計と95型風向風速計の慣性モーメントと風の発生するトルクを知ることにより、プロペラの慣性モーメントが自然風の観測データに与える影響を物理的に考察できる。また、プロペラの回転速度が小さくなる時のトルクについて調べることにより、減速時のプロペラの挙動を考察できる。

3.2.1 プロペラの慣性モーメント

<原理>

プロペラの回転軸に一定のトルクを加えることによってプロペラの回転速度は上昇していく。回転速度の小さいときは空気の摩擦が小さいので、

$$T = I \times \frac{d}{dt} + \mu$$

T ; トルク

I ; 慣性モーメント

$\frac{d}{dt}$; 回転角速度

μ ; 動摩擦によるトルク

すなわち、

$$\frac{d}{dt} = (T - \mu) / I$$

という式に従う。よっておもりの重さを変え、 $\frac{d}{dt}$ を T の一次関数として最小二乗法で係数を求めることで慣性モーメント I を求めることができる。この最小二乗法で求めた回帰直線の式を

$$Y = Ax + B$$

ただし、 $Y = \frac{d}{dt}$ 、 $x = T$

とすれば、慣性モーメント I は、

$$I = 1 / A$$

また、同時に軸周りの動摩擦によるトルク μ も求まり、

$$\mu = -B / A$$

となる。

<方法> (図3.13参照)

(1) プロペラの軸を取り付けているねじを長いねじに取り替えて軸を延長する。これはおもりを取り付けるための糸にプロペラが当たらないようにするためである。ねじに糸を取り付けその先端におもりをつける。また、プロペラの回転による空気抵抗と周りの空気の流れを軽減するためプロペラにカバーをつける。カバーの性能は図3.14に示す。このカバーの慣性モーメントはあらかじめ材質の面積密度から計算する。

(2) あらかじめおもりをつけた糸を軸に巻き付けておき、おもりを放すとプロペラの軸に一定のトルクがかかる。このとき軸にかかるトルクは、

$$T = rmg$$

r ; ねじの半径

m ; おもりの質量

g ; 重力加速度

となる。

回転速度は、風向風速計の風速出力に電源回路を接続し、電気信号を取り出し、記録器に記録する(図3.15参照)。

(3) おもりの重さを10種類変えて1種類あたり10回、この実験を繰り返す。

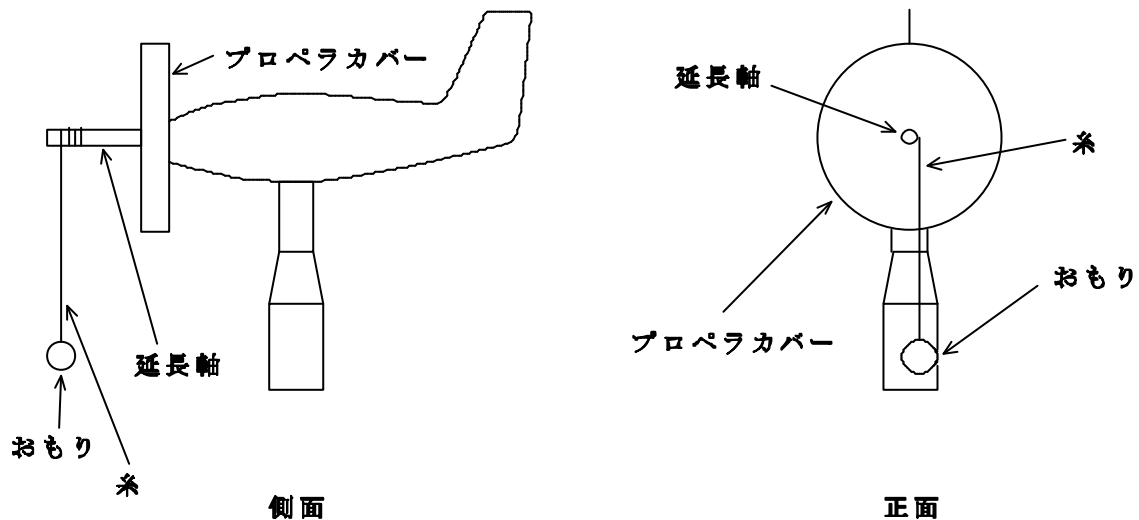
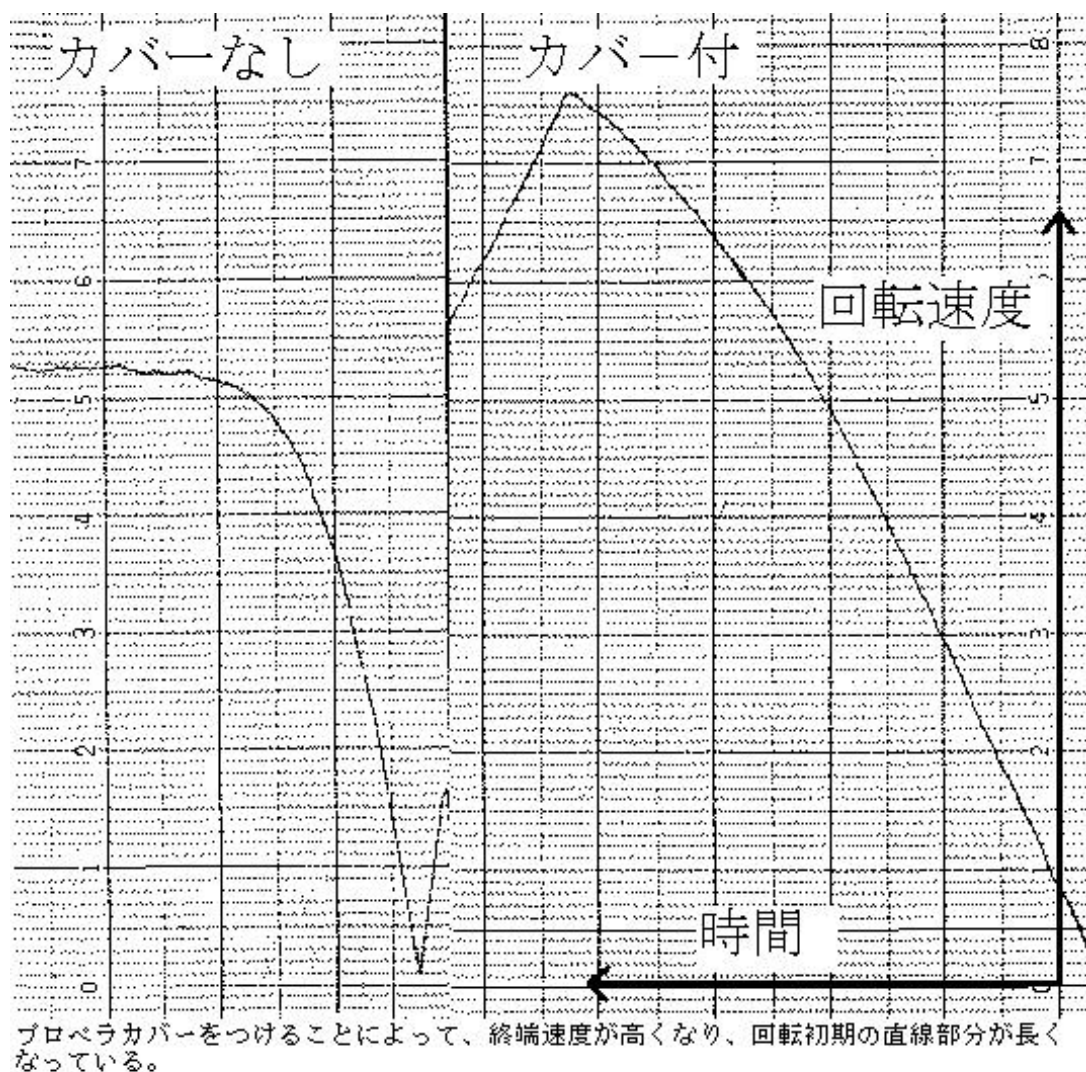


図3.13 慣性モーメント測定用実験装置



プロペラカバーをつけることによって、終端速度が高くなり、回転初期の直線部分が長くなっている。

図3.14 プロペラカバーの効果

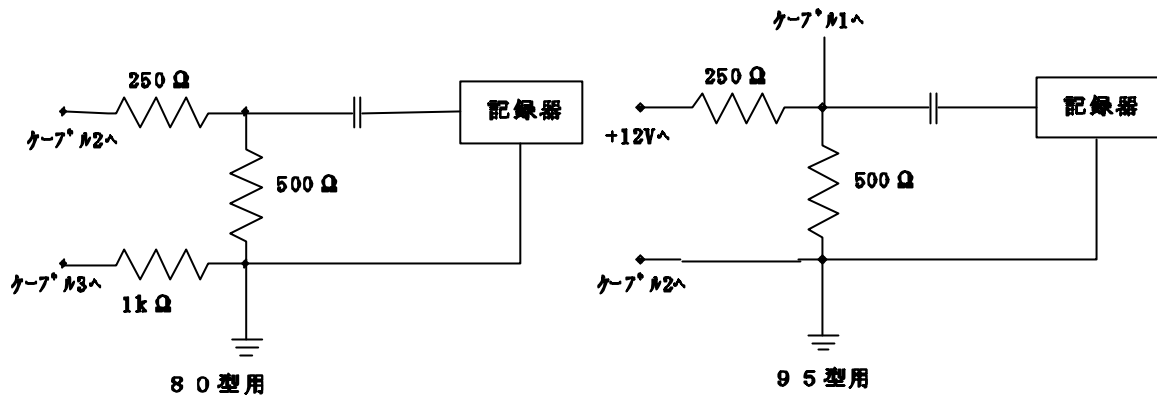


図3.15 風速出力取り込み回路

ただし、この図でいうケーブルとは風向風速計の入出力ケーブルであり、80型のケーブル2、3はそれぞれ出力、アース、95型のケーブル1、2はそれぞれ出力、アースである。また80型のケーブル1と95型のケーブル3には+15V電源に接続される。

< 結果 >

図3.16、図3.17は実験から得られたデータをグラフにしたものである。また、このデータから求められた慣性モーメントと動摩擦を表3.3に示す。

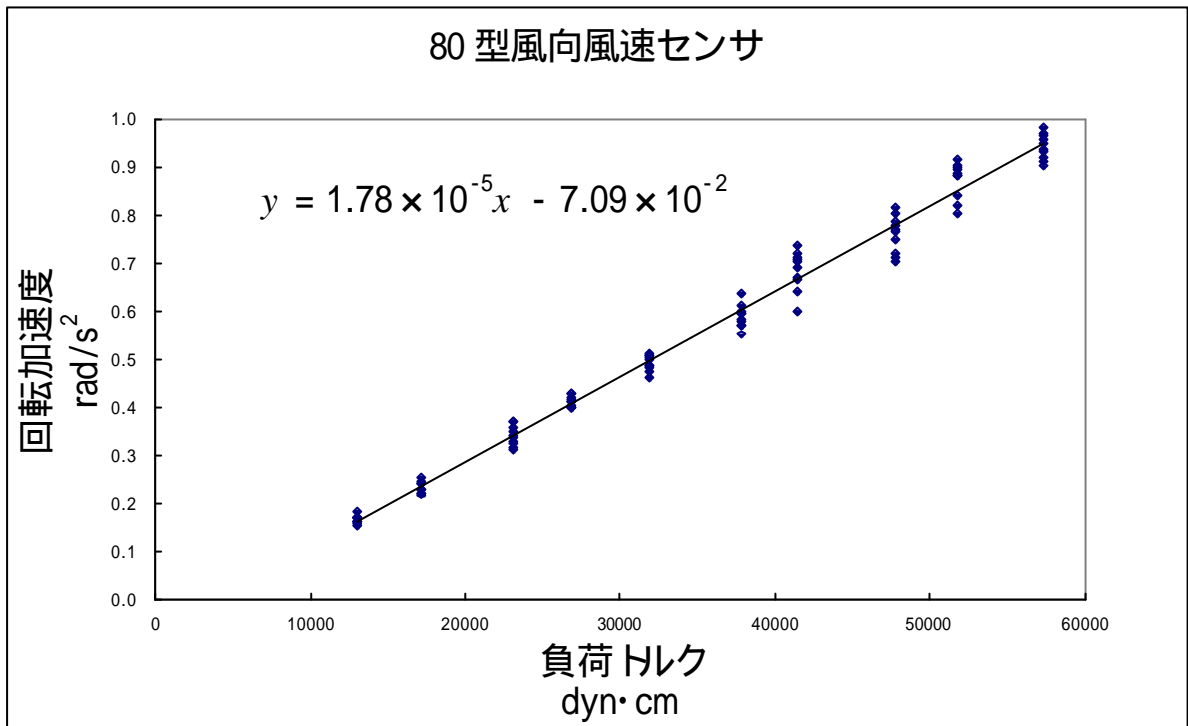


図3.16 80型の慣性モーメントを求める実験の結果のグラフ

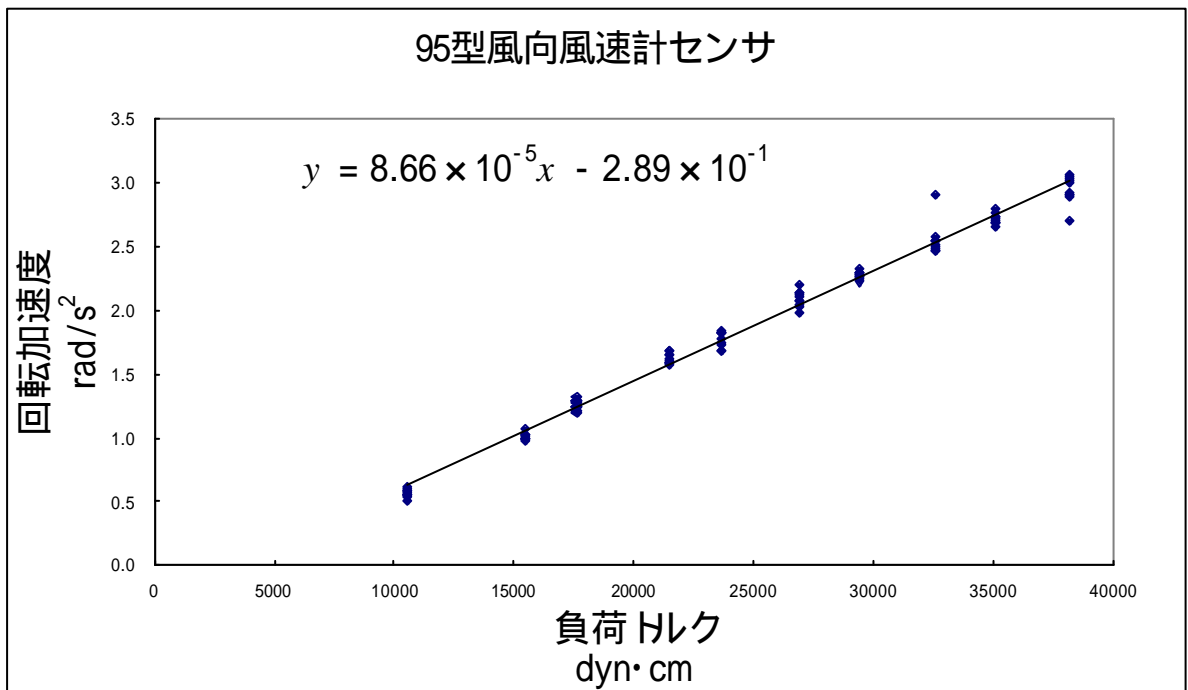


図3.17 95型の慣性モーメントを求める実験の結果のグラフ

	80型	95型
慣性モーメント ($\text{g} \cdot \text{cm}^2$)	32000	3200
動摩擦 ($\text{dyn} \cdot \text{cm}$)	4000	3300

表3.3 プロペラの軸まわりの慣性モーメントと動摩擦

この実験結果は80型の方が95型よりも、慣性モーメントが10倍大きいことを示している。すなわち、プロペラに同じトルクが加わったときに、プロペラの回転加速度が10倍大きいということになる。

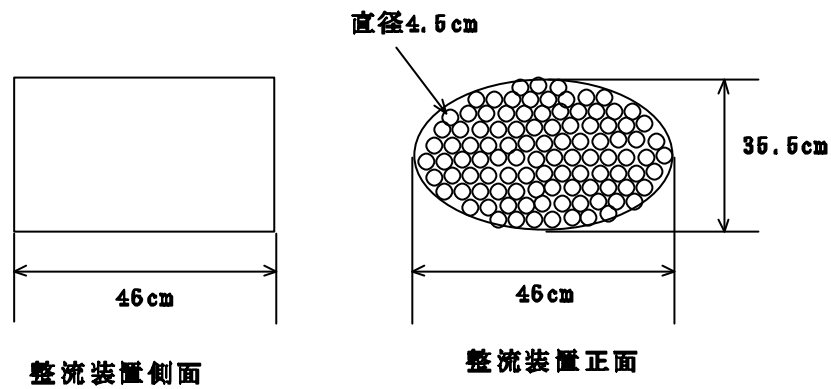
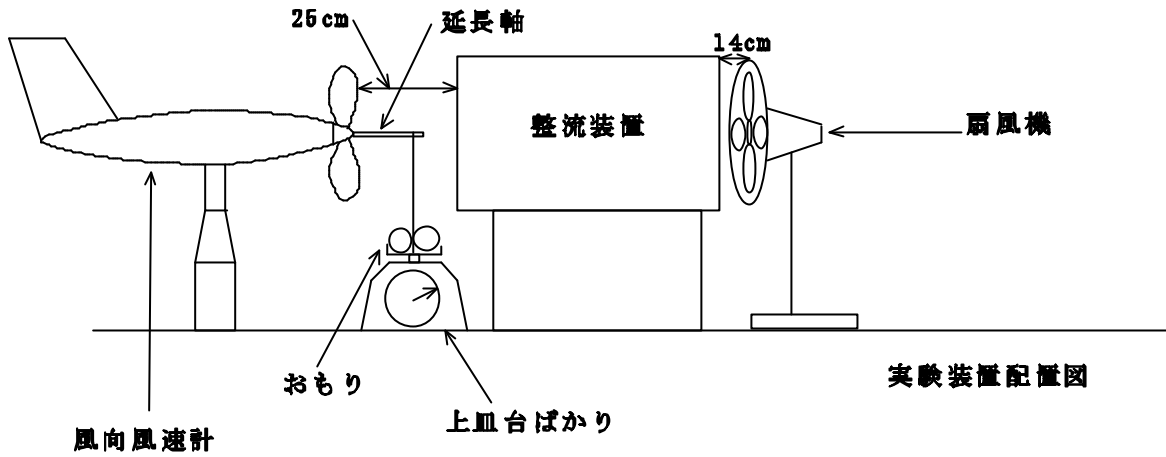
3.2.2 発生トルク

<原理>

プロペラを固定して風を送ることによりプロペラはトルクを発生する。この時のプロペラを固定するための力が、静止しているプロペラが風によって発生するトルクと考えることができる。

<方法> (図3.18参照)

- (1) 3.1.2の実験と同様にプロペラの軸を取り付けているねじを長いねじに取り替えて軸を延長する。
- (2) ねじに糸を取り付け糸の他端を上皿台秤に結びつける。この時、台秤の上に適当な重さのおもりを載せる。これは、プロペラがトルクを発生すると台秤を引っ張るのでマイナスの方向にふれるからである。この時の台秤の目盛り m_1 を読んでおく。
- (3) 整流装置を風速計の前に置く。さらに整流装置の前に扇風機を置く。図3.19を見ると、この整流装置がこの実験に必要な程度の整流をする能力があることがわかる。



整流装置

図3.18 トルク測定用実験装置

- (4) 扇風機を回すと、風速計のプロペラが回転を始め、プロペラが台秤を引っ張る力と台秤がプロペラを引っ張る力が釣り合い、回転が止まるのでそのときの台秤の目盛り m_2 を読む。 $(m_1 - m_2)gr$ が発生したトルクとなる。ただし、 g は重力加速度、 r は延長軸の半径である。
- (5) 延長軸をはずし元のプロペラ固定用のねじを取り付け、フリーで回転させ(4)の測定時の風速を測定する。実験3.1.1と同様に風向風速計の風速出力に電源回路を接続し、風速信号を取り出す。取り出した信号は周波数を電圧に変換しレコーダに記録する(図3.15参照)。このとき得られるデータは風速値そのものではなく周波数が得られるので次の変換式で周波数を風速に換算する。

$$80 \text{ 型} : -2.99814 \times 10^{-7} X^2 + 0.0306920 X + 0.0956421$$

$$95 \text{ 型} : 1.78543 \times 10^{-14} X^4 - 1.68475 \times 10^{-3} X + 2.88556 \times 10^0 X + 0.0197052 X + 0.1321401$$

ただしXは周波数(Hz)。

- (6) (4)、(5)の操作を風速を3段階に変えて、それぞれ10回繰り返す。風速を変えることにより、風速の増加に対するトルクの増加量を知ることができる。この増加の比率を「トルク係数」と呼ぶことにする。

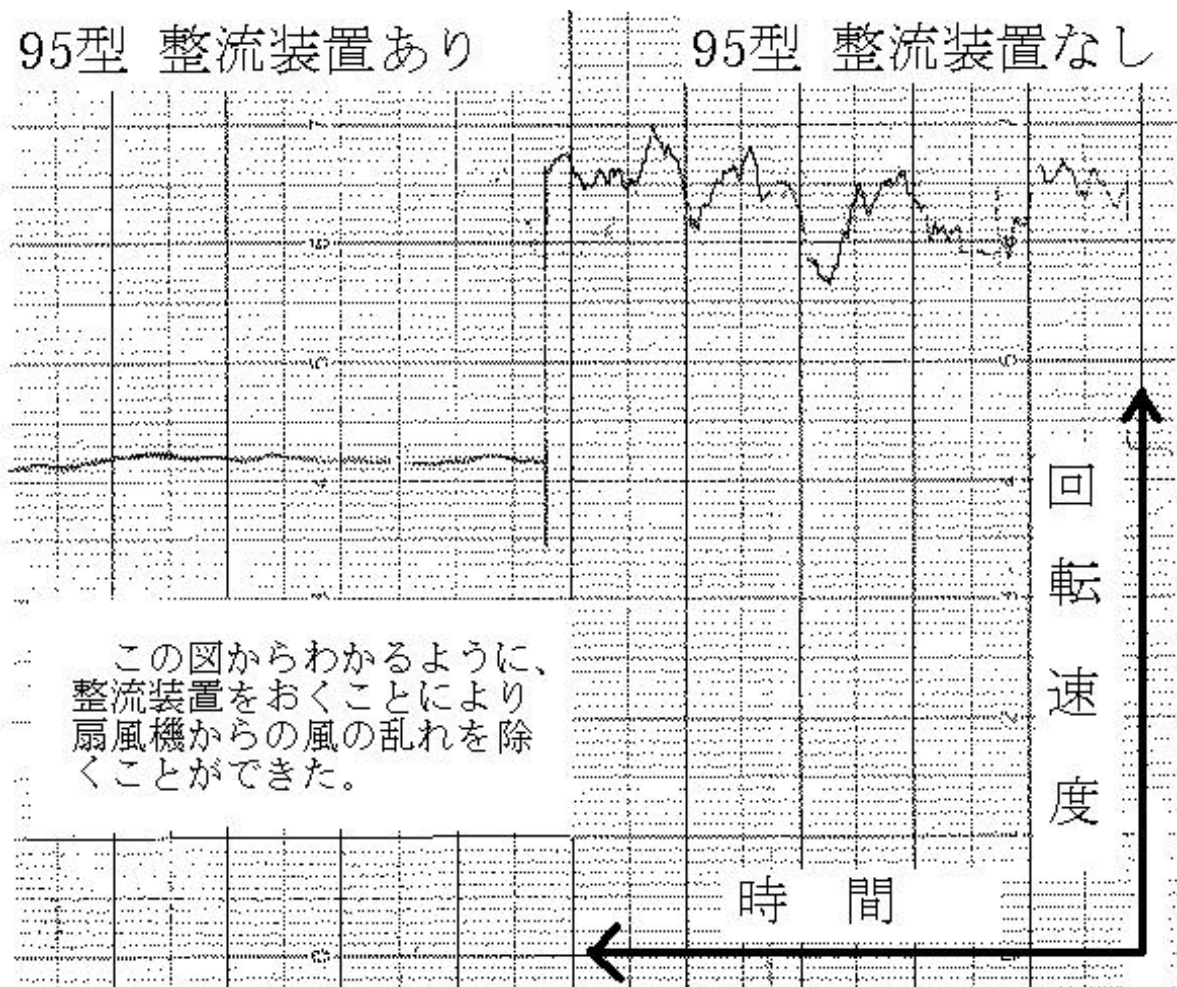


図3.19 整流装置の効果

< 結果 >

図3.20は実験の結果のグラフである。これらのグラフから風速が2mから4mの付近では発生するトルクが風速に比例して大きくなっていることがわかる。

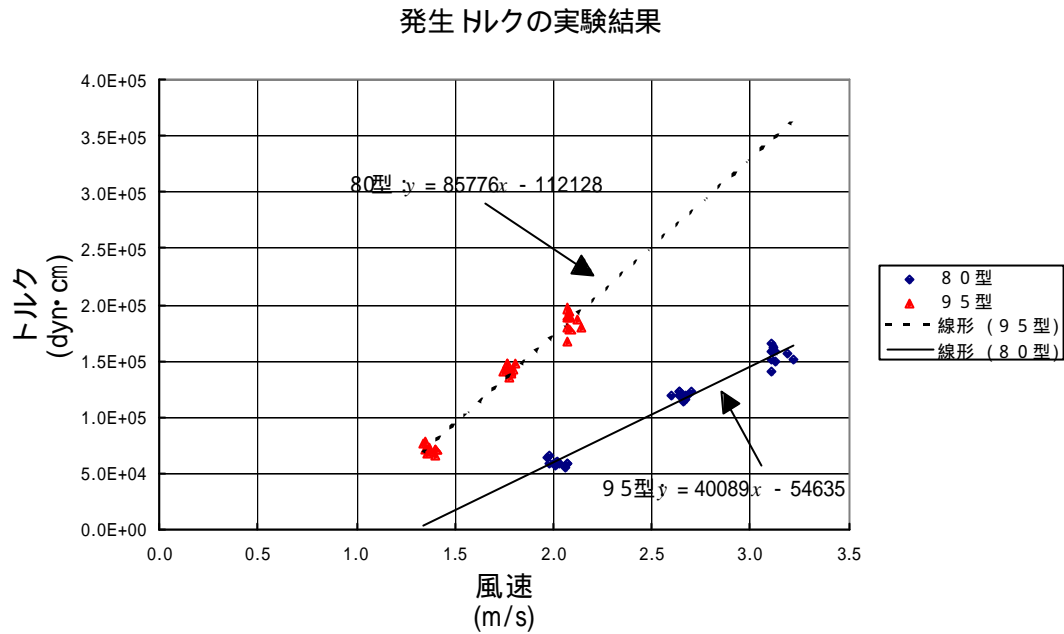


図3.20 発生トルクを求める実験の結果のグラフ

	80型	95型
トルク係数 (dyn·cm / (m/s))	85700	40000
切片 (dyn·cm)	-112000	-55000

表3.4 実験3.2.2の結果

表3.4は得られたデータから回帰直線を求め、発生トルク T を

$$T = Ax + B$$

A ; トルク係数

x ; 風速

B ; 切片

と近似したときのトルク係数である。

この実験は、同一風速に対して発生するトルクが80型の方が2倍ほど大きいということを示している。

3.2.3 減速トルク

<原理>

風速が風速計の指示値よりも小さくなるとプロペラの回転速度は小さくなっていく。このときプロペラの回転は次の運動方程式を満たす。

$$I \frac{d\omega}{dt} = -C \omega^2$$

I ;慣性モーメント

ω ;回転速度

C ;減速トルク係数

この式は簡単に解けて、

$$\omega = \omega_0 / (C \omega_0 t + I)$$

ω_0 ;初期回転速度

となる。また、回転速度が $\omega_0/2$ になる時間を $t_{1/2}$ とすれば減速トルク係数 C は、

$$C = I / \omega_0 t_{1/2}$$

となる。

<方法>

無風状態でプロペラを手で適当な速さで回転させ、3.2.1と同様に回転速度を記録する。その記録紙から ω_0 と $t_{1/2}$ を読みとり、 C を求める。

<結果>

減速トルク係数 $C(\text{cm}\cdot\text{dyn}\cdot\text{s}^{-2})$ は80型で324.9、95型では83.15という結果がでた。

3.3 数値計算

< 目的 >

3.2の実験から得られたデータを用いて数値計算することにより風速計の挙動を知る。

< 方法 >

風速計が加速するときと減速するときで、プロペラにかかるトルクが違うので、両者の運動方程式をそれぞれ変えなければならない。また、3.2.2で求められたトルク係数は風速が1～3m/s程度のときのものであるので、この計算で使う風速の値はなるべくこの風速に近いものでなくてはならない。さらに、このトルク係数を用いると風速約1.3m/sで負のトルクになるので、風速1.5m/s未満の時は、0と風速1.5m/sの時のトルクを結ぶ直線の傾きをトルク係数とした。実際に用いた運動方程式は、

$$\text{加速時 ; } I \frac{d\omega}{dt} = Av + B$$

$$\text{減速時 ; } I \frac{d\omega}{dt} = -C \omega^2$$

I ; 慣性モーメント

ω ; 回転速度

A ; トルク係数

B ; 切片

v ; 真の風速

C ; 減速トルク係数

である。

3.3.1 距離定数

風速3m/sにおける距離定数を計算してみると図3.21のような結果であった。風速計の観測値が実際の風速の63%(1.89m/s)に達したのは、80型で約2.7秒後、95型で約0.8秒後であったので距離定数はそれぞれ8.1m、2.4mとなった。80型の距離定数はほぼ公称値と等しいが、95型は測候時報63.5(1996)の実験値よりも小さな値となった。

また、減速時についての特性をみるため30秒後から風速を0m/sにした。この図から減速時よりも加速時の方が応答が早いことがわかる。

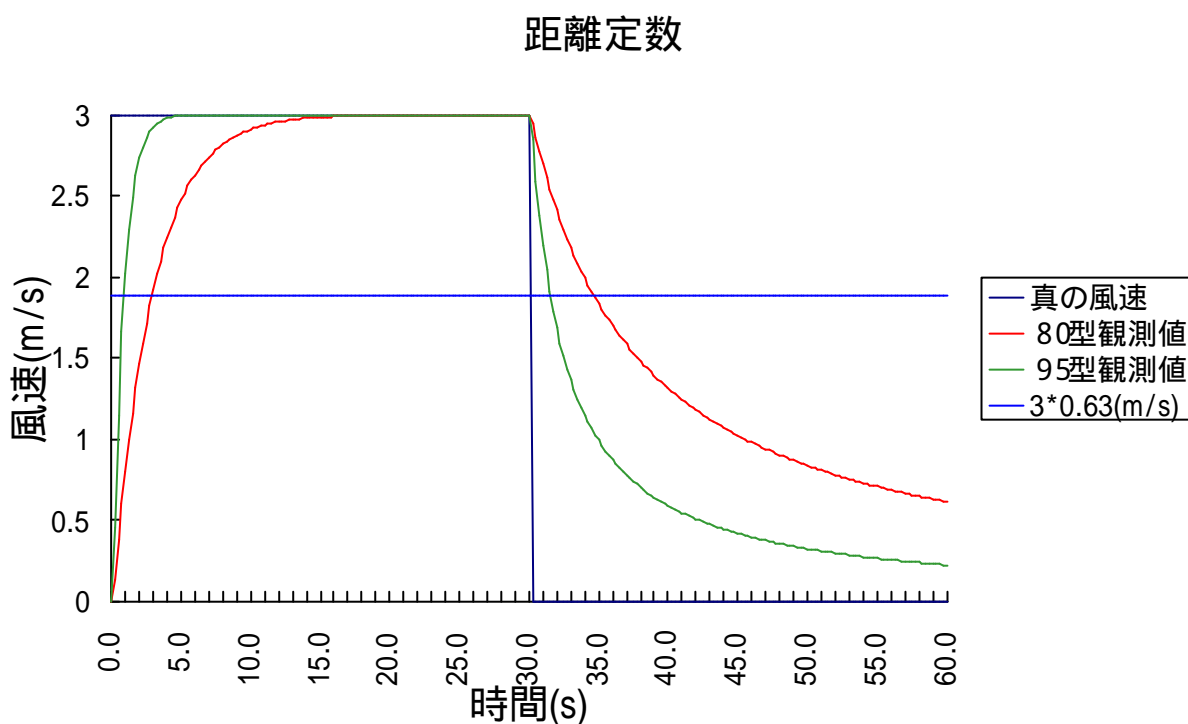


図3.21 風速3m/sにおける距離定数

3.3.2 変動する風速に対する応答

風速計に風速の変動する風を与えたときに風速計がどのような挙動を示すか計算した。風速の変動は正弦波と方形波で与えた。また、平均風速や振幅、周期を変え、観測値がどのように変化するかを調べた。ここでは、平均風速、最大瞬間風速、突風率の観測値は1分間の最後の1周期から求めた。なお以下の表中の80型/95型はデータを丸める前に計算したものである。

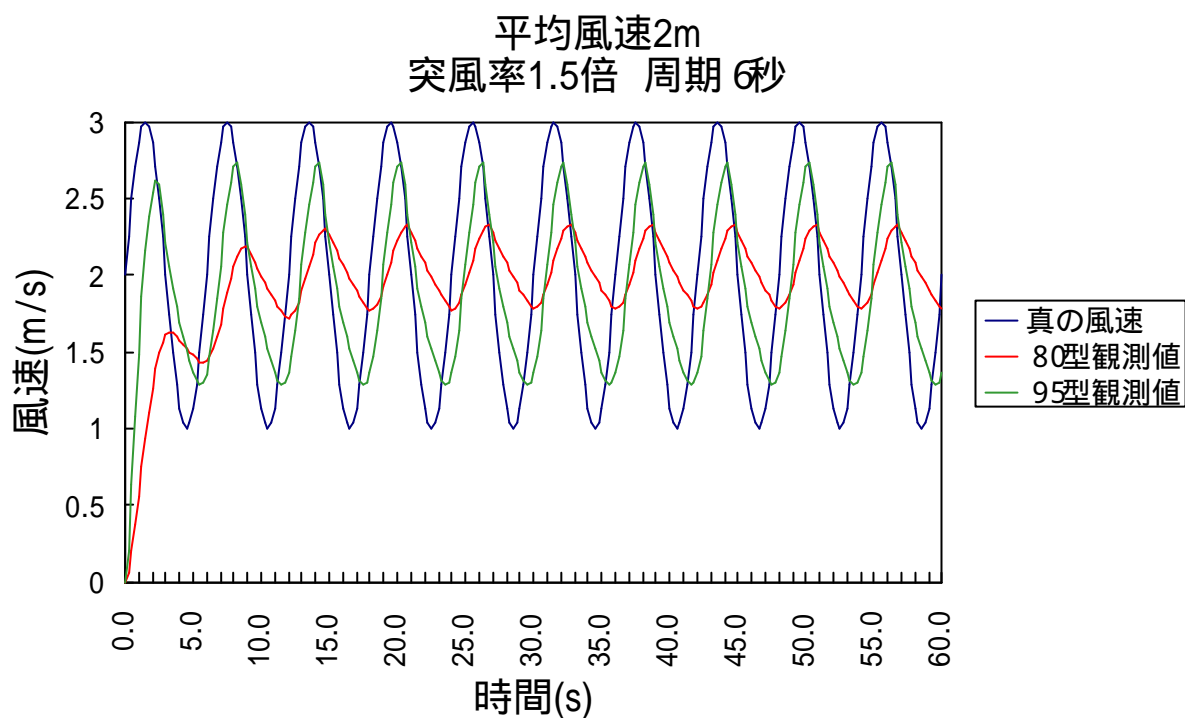


図3.22 正弦波（平均風速2m、突風率1.5倍、周期6秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	2.0	1.9	1.07
最大瞬間風速(m/s)	2.3	2.7	0.85
突風率	1.1	1.4	0.80

表3.5 正弦波（平均風速2m、突風率1.5倍、周期6秒）

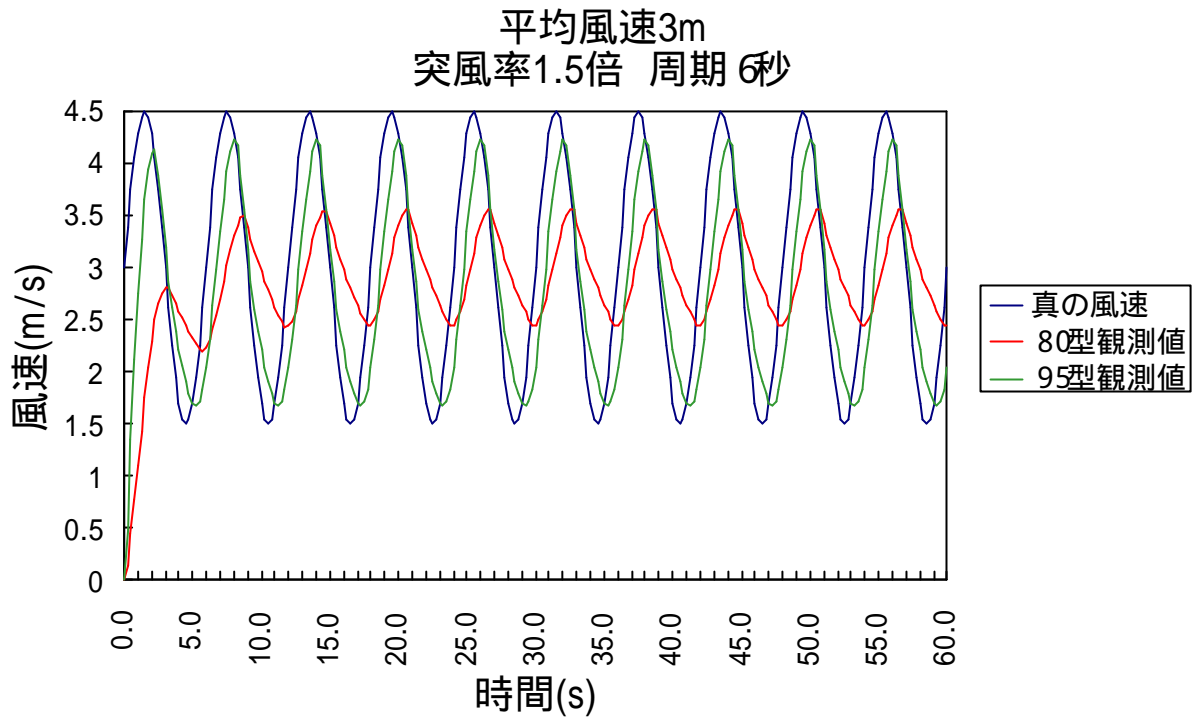


図3.23 正弦波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期6秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	3.0	2.8	1.06
最大瞬間風速(m/s)	3.6	4.2	0.86
突風率	1.2	1.5	0.81

表3.6 正弦波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期6秒）

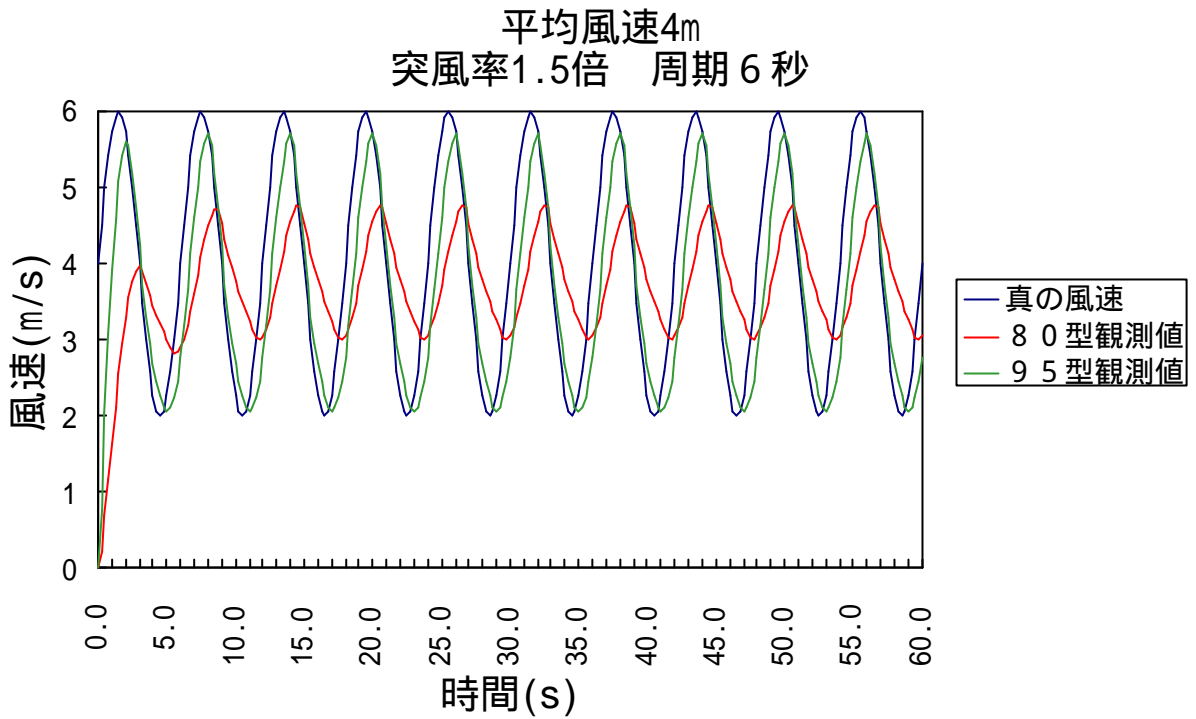


図3.24 正弦波（平均風速4m、突風率1.5倍、周期6秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	3.8	3.7	1.04
最大瞬間風速(m/s)	4.8	5.7	0.84
突風率	1.3	1.6	0.81

表3.7 正弦波（平均風速4m、突風率1.5倍、周期6秒）

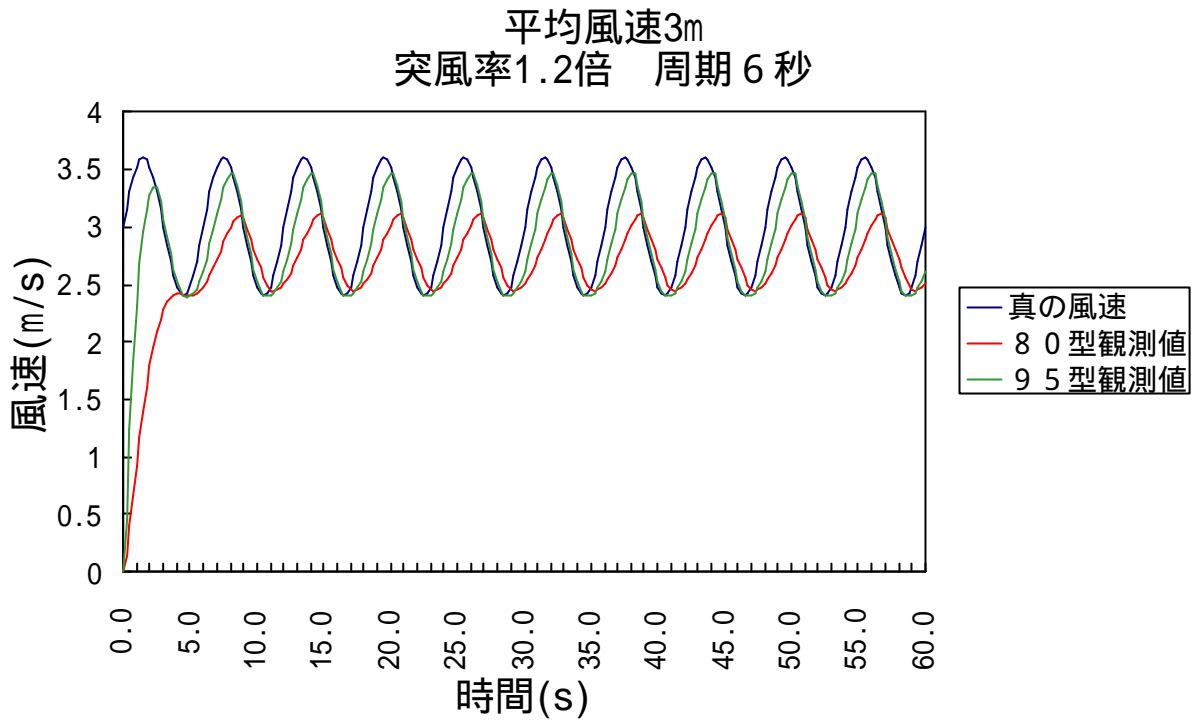


図3.25 正弦波（平均風速3m、突風率1.2倍、周期6秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	2.8	2.9	0.96
最大瞬間風速(m/s)	3.1	3.5	0.89
突風率	1.1	1.2	0.92

表3.8 正弦波（平均風速3m、突風率1.2倍、周期6秒）

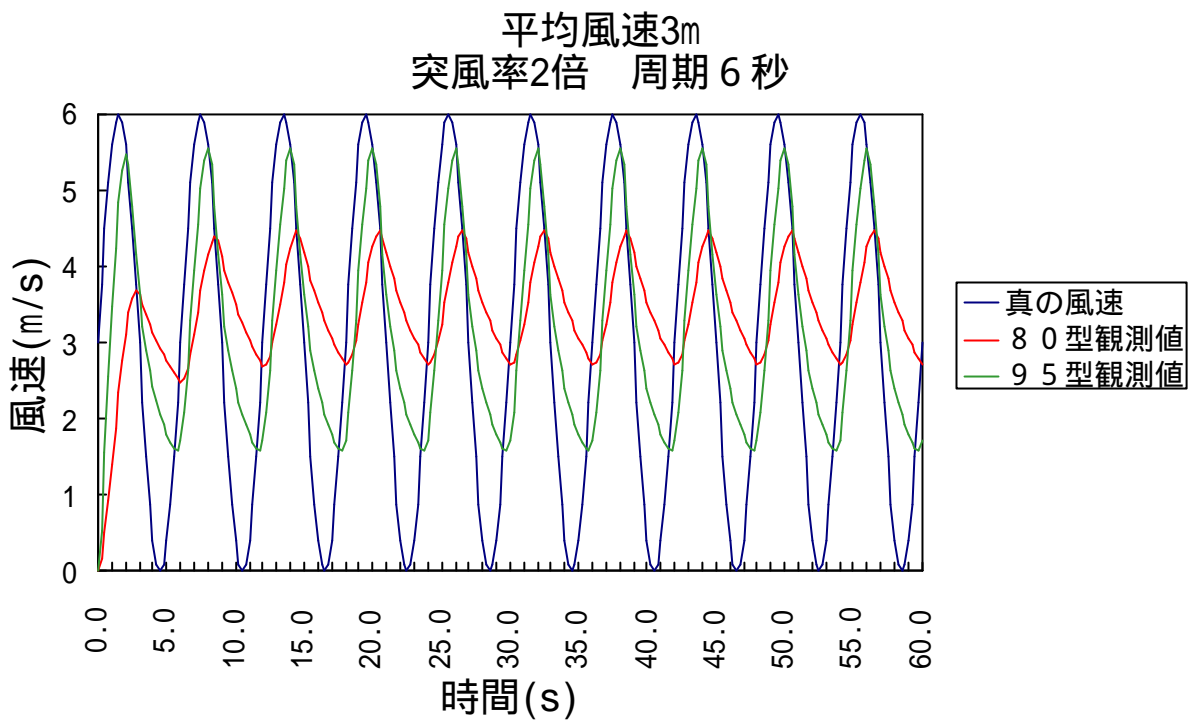


図3.26 正弦波（平均風速3m、突風率2倍、周期6秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	3.5	3.2	1.11
最大瞬間風速(m/s)	4.5	5.6	0.80
突風率	1.3	1.8	0.73

表3.9 正弦波（平均風速3m、突風率2倍、周期6秒）

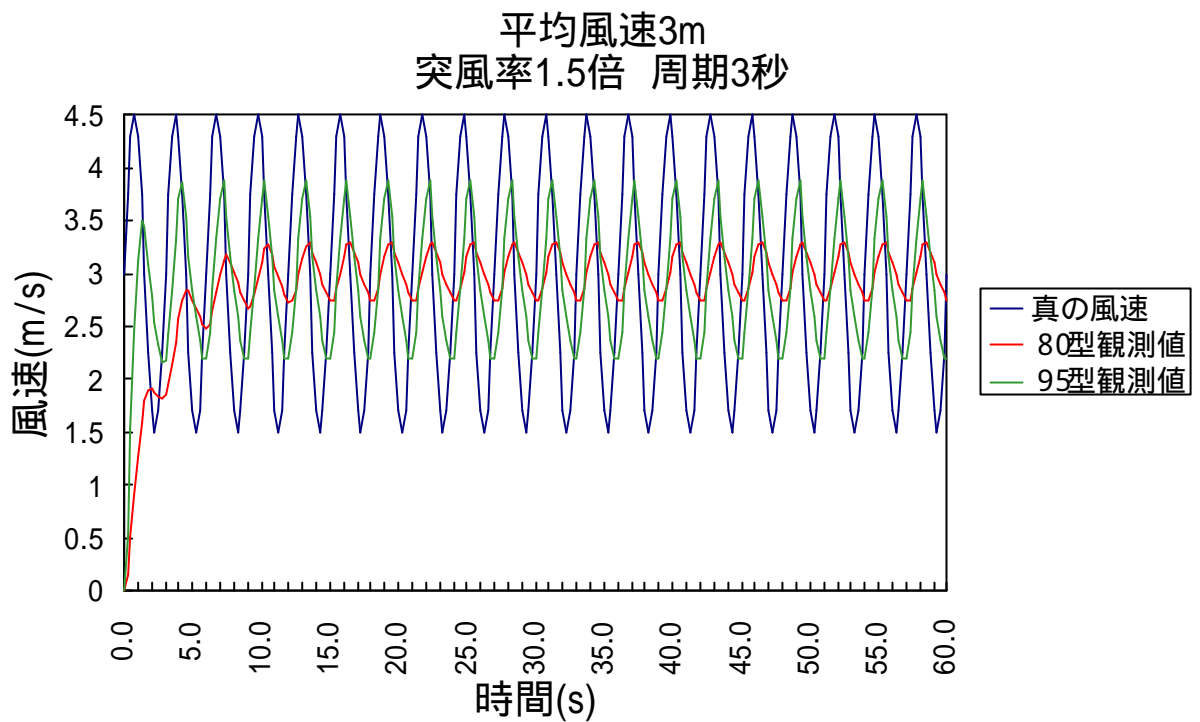


図3.27 正弦波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期3秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	3.0	2.9	1.03
最大瞬間風速(m/s)	3.3	3.8	0.87
突風率	1.1	1.3	0.85

表3.10 正弦波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期3秒）

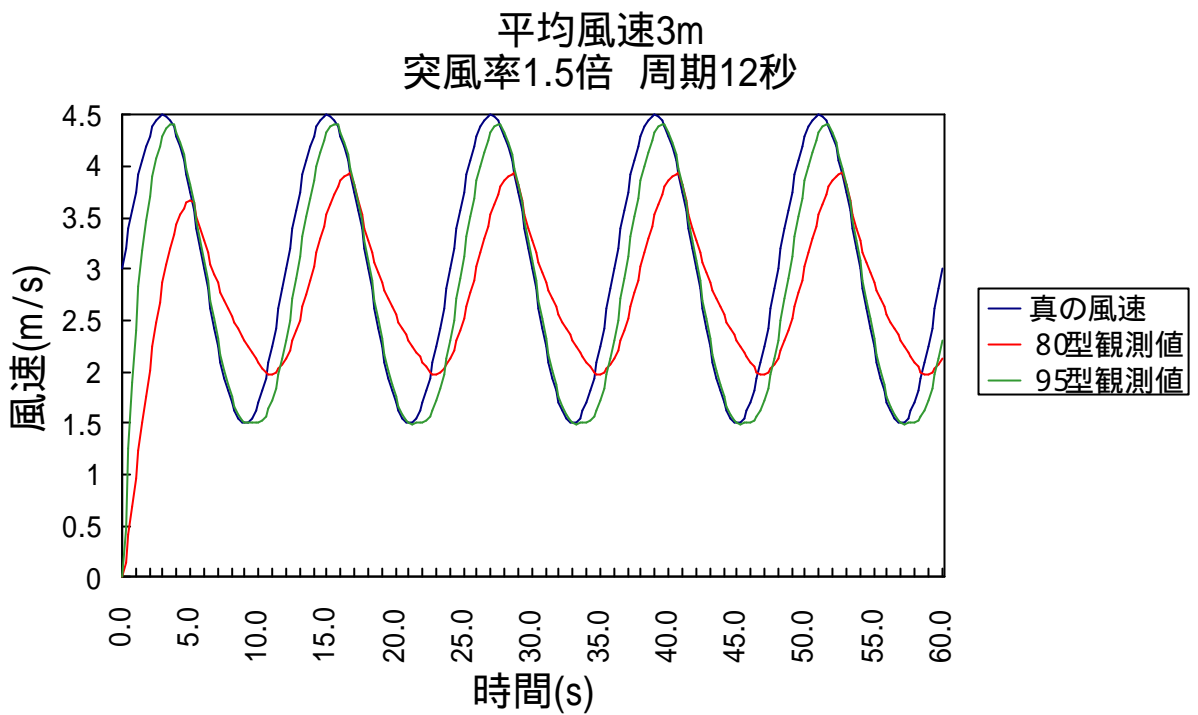


図3.28 正弦波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期12秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	2.4	1.9	1.27
最大瞬間風速(m/s)	3.9	4.4	0.89
突風率	1.6	2.3	0.70

表3.11 正弦波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期12秒）

方形波 平均風速1.5m/s 突風率 2倍 周期6s

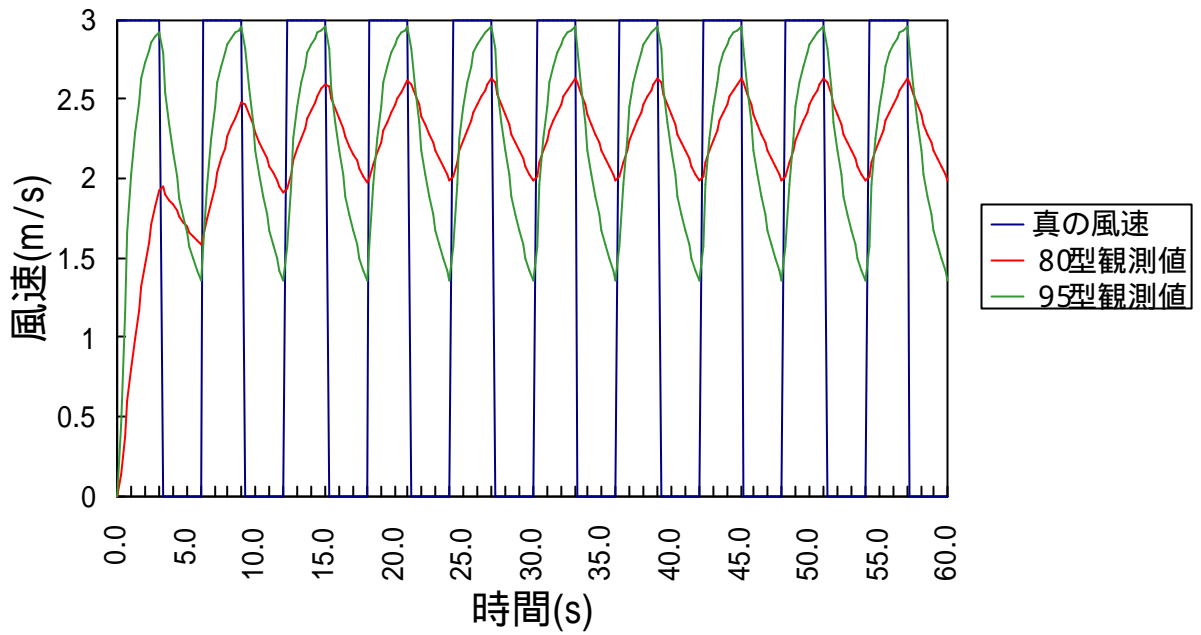


図3.29 方形波 (平均風速1.5m、突風率2倍、周期6秒)

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	2.3	2.3	1.03
最大瞬間風速(m/s)	2.6	3.0	0.87
突風率	1.1	1.3	0.84

表3.12 方形波 (平均風速1.5m、突風率2倍、周期6秒)

方形波 平均風速3m 突風率1.5倍 周期6s

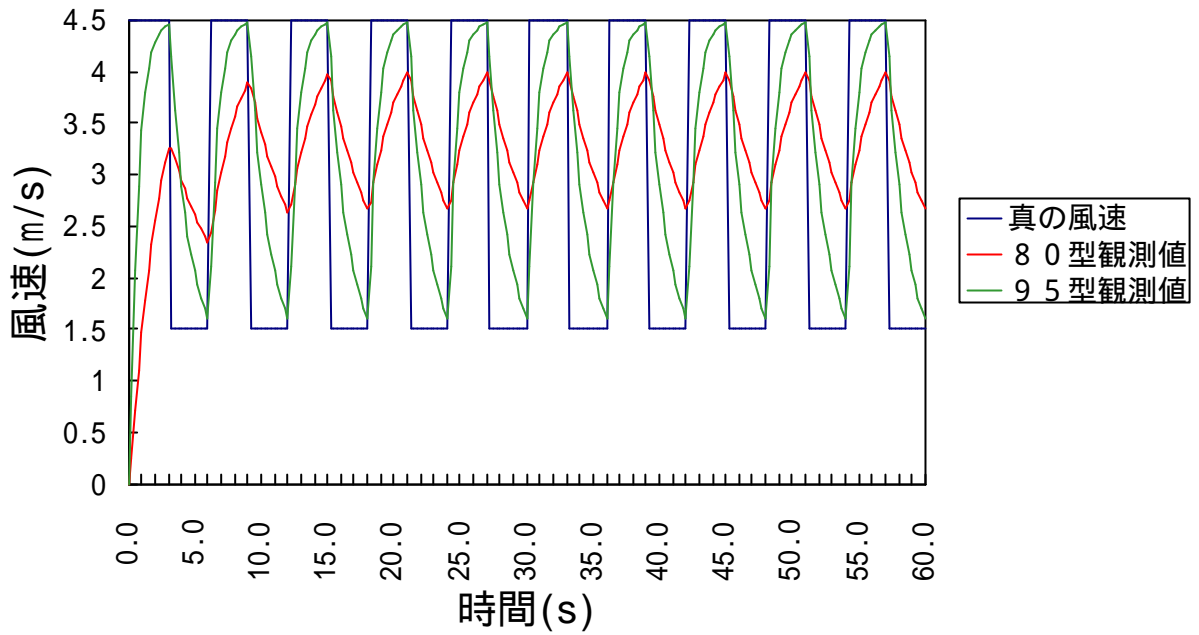


図3.30 方形波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期6秒）

	80型	95型	80型/95型
平均風速(m/s)	3.4	3.2	1.04
最大瞬間風速(m/s)	4.0	4.5	0.89
突風率	1.2	1.4	0.85

表3.13 方形波（平均風速3m、突風率1.5倍、周期6秒）

4 . 考察

3.1の実験結果では、平均風速は95型と80型でほぼ等しいという結果がでたが、これは、風速が増大するときには95型の示す値の方が大きく、風速が減少するときには95型の方が小さくなるので平均するとほぼ等しくなるものだと考えられる。また、平均風速が小さいときに80型より95型の方が示す値が大きくなるのは、80型の起動風速が大きいため、プロペラが80型が静止しているのにも関わらず95型のプロペラは回り続けているのからであると考えられる。このため、風の弱い日の日平均風速は95型の方が大きくであると予想される。

次に最大瞬間風速については、95型の方が若干大きな値を示すことがわかるが、特に、平均風速が小さくなるほど95型の示す値が大きく80型に比べて大きくなるという傾向がみられた。これは、風速が小さくなると示す値が真の風速の63%に達するまでの時間が長くなるので、80型と95型の風速に対しての応答の差が顕著になるためであると考えられる。

突風率については、最大瞬間風速と同様に95型の方が若干大きな値を示すが、正規分布により近い形になる。これはそれぞれの測器について最大瞬間風速を自らが観測した平均風速で割ることにより、個体差をなくすることができたからであると考えられる。また、平均風速が大きくなると分散が小さくなるのは風速が大きいほど応答が早くなり、真の風速と指示値の差が小さくなるためであると考えられる。

3.2.1、3.2.2の実験から80型は95型に比べて慣性モーメントが10倍、同一風速に対しての発生トルクは2倍であることがわかった。従って回転加速度は、0.5倍ほどになる。また、ある風速に対する定常の回転速度は80型は95型の約0.8倍であるので、単純に考えれば0.63倍の応答になる。しかし、3.1の実験では、平均して80型は95型の0.93倍にもなった。そこで、3.2.1、3.2.2の実験から得られたデータを用い、3.3で数値計算により距離定数と真の風速に対する風速計の応答を求めてみることにした。

数値計算から求めた95型の距離定数は、実験で測定されたものと異なる値になったが、これは95型のプロペラの慣性モーメントが小さいため、プロペラカバーの慣性モーメントを求めたときの誤差が80型に比べて大きく影響したためだと考えられる。

変動する風を与えたときは、ほとんどの条件で80型の平均風速の観測値が95型に比べて大きくなった。しかし、自然風を観測したときのデータはどちらもほぼ等しかった。これは、自然風の場合は風向の変動もあるので風向に対する応答の速い95型が80型に比べて風を正面で受けることができるため、80型よりも大きな風速を観測できるからだと考えられる。

正弦波を与えた場合、80型、95型ともに真の平均風速と最大瞬間風速の観測値との関係はほとんどないことがわかる。最小瞬間風速の観測値は平均風速が大きいほど実際に近い値になることがわかる。突風率を変えると突風率の小さな時は平均風速の観測値が実際よりも小さくなり、大きくなると実際よりも大きくなることがわかるが、これはこの数値計算で平均風速が3m/sとしたため、変動を大きくすると減速トルクが小さな領域に風速計の回転速度が入ってしまうからだと考えられる。従って平均風速をより大きな値にして最小風速が大きくなるようにすれば、このような差は小さくなっていくと考えられる。また、風速計の応答が加速時よりも減速時の方が速いように見えるが、これは加速するときには最初の方でトルクが弱く、真の風速と観測値の差が小さくなってもトルクが弱まってしまいが、減速時には最初の方でトルクが強く、真の風速と観測値の差とは無関係なのでこのようになってしまうと考えられる。

また、突風率が大きくなると95型と80型の最大瞬間風速の観測値の比が大きくなることがわかる。さらに、周期との関係であるが、これも周期が短いほど95型と80型の瞬間最大風速の観測値の比が大きくなっていることがわかる。すなわち、95型の方がより早い風速の変化に対しても応答がよいといえる。

次に方形波を与えた場合であるが風速0からの場合でも風が吹いている場合であっても95型は3s程度の突風に対しては十分に追従していることがわかる。

5 . 謝辞

本研究において的確かつユーモアあふれる指導を行って下さいました小野木茂指導教官に厚くお礼申し上げます。

また、本研究の実験におきまして、整流装置の製作を協力してくれた山田崇君に、この場を借りまして、お礼申し上げます。

参考文献

- 川上峻史、1991：PC-9801 BIOS と C プログラミング、工学図書株式会社、115-134.
- 気象測器工場、1991：風速感部の試験（中間報告）、測器技術資料 **303**、1-4.
- 気象測器工場、1992：小型風速計感部の試験、測器技術資料 **401**、横田良夫、佐々木泉、福田武幸、1-3.
- 気象庁、1985：気象測器取扱指針（JMA - 80型地上気象観測装置編）39-44
- 佐貫亦男、1956：地上気象器械、共立全書、8-59.
- 中浅測器株式会社、1988：JMA - 80型地・上気象観測装置 取扱説明書
- 明星電気株式会社、1995：JMA - 95型地上気象観測装置 技術解説書
- 守屋義信、田森俊彦、1996：風向風速計の開発を試験、測候時報 **63.5**、気象庁、265-269