

前置形および後置形水平軸風車翼に働く 変動力に関する比較研究*

(フィールド実験結果の考察)

清水幸丸*¹, 松本稔久*², 高橋正人*³
中村俊祐*³, 古久保憲治*², 葛原定郎*¹

Studies on the Variable Force Acting on the Rotating Blades of the Upwind and Downwind Type Horizontal Axis Wind Turbines (Results of Field Test)

Yukimaru SHIMIZU, Toshihisa MATSUMOTO, Masato TAKAHASHI,
Shunsuke NAKAMURA, Kenji FURUKUBO, and Sadao KUZUHARA

In this paper, two kinds of horizontal axis wind turbines, namely, upwind and downwind, were investigated and compared. In this experiment, the strain distribution and the rate of strain fluctuation on the surface of the rotating blade, and the strain and bending moment on the blade root, etc. were measured. As a result, the difference between upwind and downwind types was solved. The result is very important for the design of a horizontal axis wind turbine.

Key Words: Unsteady Flow, Fluid Machine, Horizontal Axis Wind Turbines, Upwind Type, Downwind Type, Distributions of Strain, Rotating Blade, Bending Moment, Blade Root, Field Test, Annular Momentum Theory, Fluctuation

1. 緒 言

水平軸風車には翼車をタワー上流側に置く upwind type, すなわち前置形と, 下流側に置く downwind type, すなわち後置形がある。前報⁽¹⁾では, 前置形水平軸風車の発電回転中の翼根(翼付け根)に働く力を実測し, 理論値と比較した。しかし, 翼面上の各部分に働く変動力, さらにそれらの間の関係等については未検討であった。さらに, 後置形の場合については全く検討されなかった。実際に風車を設計する場合, 変動風速と翼面各部分に働く力の関係は知りたいことの一つである。また, 後置形水平軸風車は実用上多数使用されており, この問題を検討せずにほっておくのはいささか片手落ちである。

本報では, 前報で未検討の前置形水平軸風車の実験的解析を行いながら, さらに後置形水平軸風車の発電回転中の翼に働く力の実験的解析を行い, 両者の一致点および相違点を検討した。その結果, 水平軸風車を設計する上で参考になる貴重なデータを得ることが

できた。研究に際しては翼面に40枚, 翼根に3組のひずみゲージを張り付け, 発電回転中の翼に働くひずみ量を実測する方法を用いた。

2. 実験装置および方法

図1には実験に用いた水平軸風車を示す。その概略は直径6mφ, 2枚翼, 回転軸高さは8mである。本報に用いた風車は, 前報⁽¹⁾と同一のものである。本水平軸風車は翼車をタワー前方あるいは後方のどちらに設置しても発電が可能である。(a)は翼車をタワー上流側で回転させた場合, (b)はタワー下流側で回転させた場合を示す。熱線風速計は, 回転面に流入する風に影響を与えないように約12m離れた位置に設置した。

図2はハブ, ナセル内部, ナセルとタワー接合部の構造を示す。翼車回転軸は中空であり, 左側から増速歯車, ディスクブレーキ, スリップリングIが, 上段の発電機軸には, トルク計および交流発電機がそれぞれ接続されている。増速歯車による増速比は1:3である。ナセルとタワーの接合部は, 翼車回転面の方向制御のため, ギアードモータによって任意の方向に回転および固定が可能である。発電機の出力取り出しはスリップリングIIを介して行われる。

* 昭和62年8月21日 第65期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年1月12日。

*¹ 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町)。

*² 学生員, 三重大学工学部。

*³ 准員, 富士電機(株) (〒210 川崎市川崎区田辺新田)。

図3には実験に用いた翼の概略を示す。翼幅の約1/2は適切なねじり角が与えられている。翼のねじり角度は前報の図3参照。本翼は前報と同一なので詳細は省略する。図4には翼根および翼面のひずみゲージ取付け位置を示す。ひずみゲージは翼根に作用する曲げひずみ(またはモーメント)測定のため、回転面に平行方向(回転力モーメント)および垂直方向(推力モーメント)に各々1組、翼面に作用する曲げひずみ測定用に圧力面に40枚取付けられている。また、風速の測定には定温度形熱線流速計(5μφタングステン線を使用)を用いた。実験に際しては注意深くひずみゲージの検定を行った。ひずみゲージの検定方法については前報に述べてあるので省略する(前報の図2参照)。

以上の方法により測定された各実験値は各種アンプを通して磁気テープに収録され、その後100HzにてA/D変換を行い、パーソナルコンピュータにより演算処理される。

3. 実験結果の表示式および理論式

100Hzでサンプリングされたひずみの測定値 $S(t)$ の平均値 \bar{S} は、

$$\bar{S} = \frac{1}{T \times 100} \sum_{t=0}^1 S(t) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 T は平均時間である。ひずみの変動量 ΔS は

$$\Delta S = S(t) - \bar{S} \dots\dots\dots (2)$$

ひずみの変動割合 $\Delta s(t)$

$$\Delta s(t) = \Delta S / \bar{S} = \frac{S(t) - \bar{S}}{\bar{S}} \dots\dots\dots (3)$$

ひずみの変動割合の実効値は

$$f = \sqrt{\Delta s(t)^2} \dots\dots\dots (4)$$

2種類の時系列データ $x(t)$ と $y(t)$ に対するタイムラグ K での相互相関係数は

$$CR = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) \cdot y(t+K)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x(t)]^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t)]^2}} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 N はデータ個数である。また、 $x(t)$ および $y(t)$ は検討対象になる翼面上の点および翼根(推力方向)のひずみ値を表す。AMT⁽¹⁾により求められた翼根部に加わる回転力モーメント M_{pr} 、推力モーメント

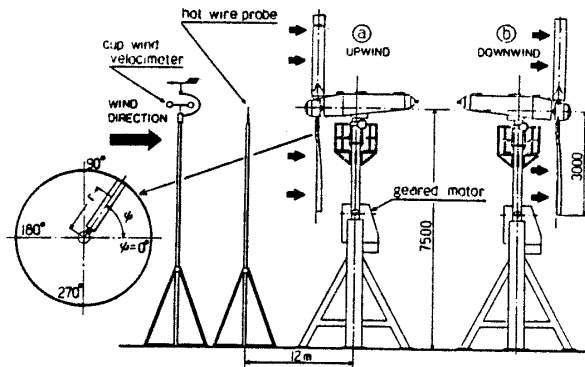


図1 前置形および後置形水平軸風車のフィールド実験概略

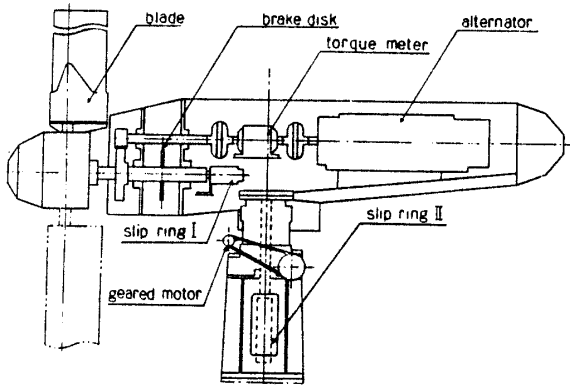


図2 実験に用いた風車のハブ、ナセル内部およびナセルとタワー接合部の概略

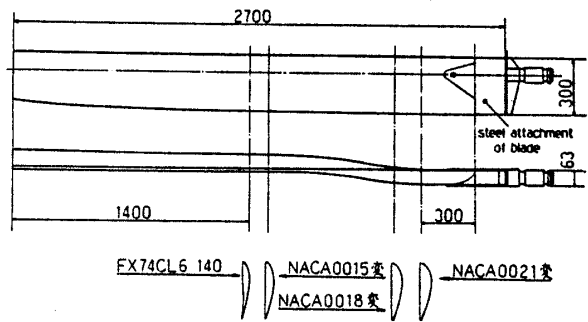


図3 風車翼の概略

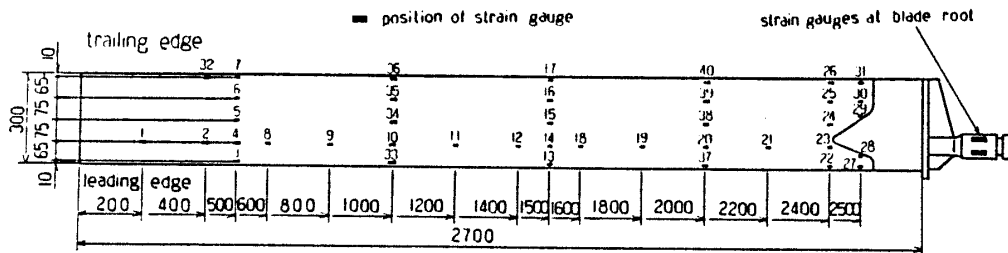


図4 風車の翼根および翼面上にはりつけられたひずみゲージの位置

M_{nr} は前報の式(9)に示されているので説明は省略する。

4. 実験結果と考察

図5には翼車後置形水平軸風車 (downwind type) の場合、発電回転中の翼根部に働く回転力モーメント M_{pr} および回転面に垂直な力による推力モーメント M_{nr} の 1/100 秒間隔出力値を示す。図中の細い実線は実験値、太い実線は理論値、および破線は自重のみによる曲げモーメントの値である。理論としては、前報の式(9)で述べた AMT 理論を用いた。後置形風車の場合も、実験値と理論値は比較的よい一致を示す。

以下では前置形および後置形両風車の翼根および翼面に張り付けた約 40 枚のひずみゲージの値を用いて、図5のように 1/100 秒間隔で出力させた発電回転中の風車翼に働く変動力を考察することにする。

4.1 翼車が1回転する間の平均値より求めた翼面上のひずみ分布 図6には、翼面に張り付けた 40 枚および翼根部のひずみゲージ出力をもとに作製した回転中の翼面上 (圧力面側) の等ひずみ量分布線図を示す。作図の際には各ゲージ間を内挿し、等しいひずみ量の点を結んだ。図中の値は、翼根部の推力方向ひずみ量で無次元化した値〔(翼面上のひずみ量÷翼根の推力方向のひずみ量)×100〕である。

また、各ひずみ量は翼車が1回転する間の平均値、すなわち、1/100 秒間隔に測定した値の1回転中の平均値である。この場合、翼の自重によるひずみ量は相殺され、無視することができる。図(a)は、翼車を上流側に設置 (upwind type) し、100 rpm で回転した場合である。翼端から約 1/2 翼長までは翼根に近づくとひずみもしいに大きくなる。ところが、約 1/2 翼長から翼根までは翼長方向のひずみにはあまり変化が見られない。この理由を考察する。前者の部分ではボルツマン翼形を用い高揚力を発生しているため流体力の加わり方が適当に分布しているが、後者の翼根側では翼の強度を大きくするため翼厚の厚い変形 NACA 0015~NACA 0021 翼形を用いており、しかもねじり角を小さくしてある。さらに、翼根に近づくとひずみもしいに大きくなるので発生揚力が翼端側に比べて著しく小さくなる。すなわち、翼根側の 1/2 翼長部分では発生流体力は小さく、もっぱら強度部材的作用をはたすことになり、上記のような結果になる。ひずみ分布図では翼根側の翼断面のうちで最も

翼厚が大きい前縁から約 1/4 弦長の部分にピークができる。また、翼が薄くなる後縁部分に近づくとひずみ量がゆるやかに小さくなる。翼根金具付近では、ほとんどの力を翼厚の厚い部分で吸収するため、後縁側では、本来この位置に見られるであろうと考えられるひずみ量よりもかなり小さくなる。図(b)は、同じく前置形で翼車回転数が約 150 rpm 時のひずみ量分布図である。全体的な分布傾向は 100 rpm の場合と同様である。しかし、周速度が大きく増加しているため、100 rpm 時にはあまり揚力の発生していない翼根側でもある程度の揚力が発生するため、ひずみ量が 250% を越える場合もある。図(c)は、翼車を下流側に設置した場合の翼車回転数 100 rpm でのひずみ量分布を示す。図(a)と比較すると翼端前縁側に大きな違いが見られる。この部分のひずみ量が大きいのは風車翼が

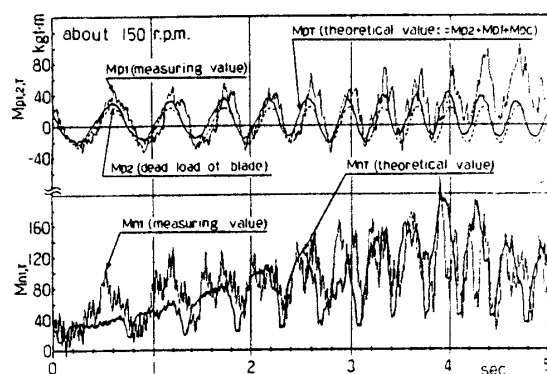


図5 後置形水平軸風車、回転中の翼根に働く回転方向および推力方向(回転面に垂直方向)の曲げモーメント、実測値と理論値の比較 1/100 秒間隔出力

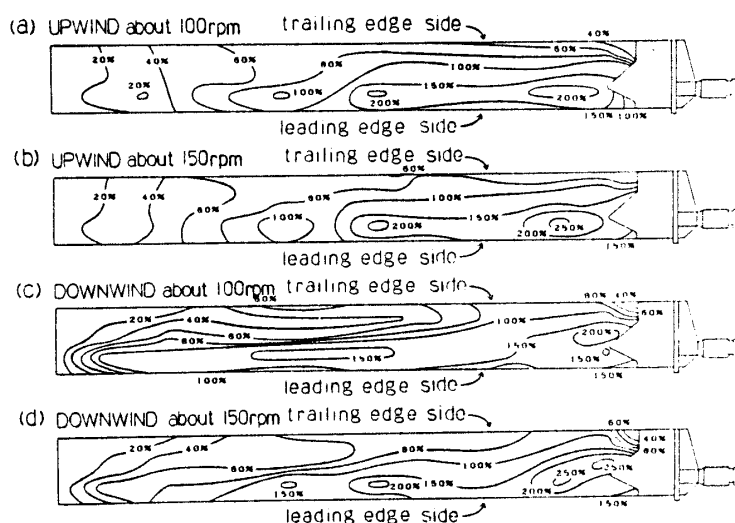


図6 前置形および後置形水平軸風車、回転中の翼面に働く曲げひずみの分布図、翼1回転の平均値、無次元値

タワー後流を通過中、風速が小さくなり、その結果翼に対する風の相対流入角がかなり小さくなり、発生流体力が減少し、流れ方向に翼が弾性復元する結果と考えられる。図(d)は、同じく後置形で翼車回転数が約150 rpmの場合を示す。全体的には図(c)の傾向に似ているが、周速度が大きくなっているため発生揚力も大きく、比較的上流側に設置した場合に似てくる。

4.2 アジマス角に対応した翼面上のひずみ分布
 翼面上のひずみ量分布をアジマス角(図1参照)に対応させて求め、自重によるひずみへの影響を考える。前置形を代表例に採用する。ここでは各アジマス角に対応するひずみ値が必要になる。このため、作図では各アジマス角に対応する1/100秒出力値10個を取り出し、その平均値、すなわち1/10秒平均値を用いた。図7(a)~(d)は各々アジマス角 $\psi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ に対応している。 $\psi=0^\circ$ では、翼は自重の影響を

最も強くうけるが、流体力の作用方向と自重の作用方向が逆になるためひずみ値は小さくなる。 $\psi=90^\circ$ の場合、自重の影響はほとんどなく、流体力による力のみが作用する。すなわち、地上から上空へ速度こう配(前報、図7の風速分布模型参照)のため、このアジマス角 $\psi=90^\circ$ で翼に対する風速が最も大きくなり、流体力による曲げモーメントも最大になると考えられる。翼端から約1/2翼長付近までは、 $\psi=0^\circ$ の場合と似ているが多少大きなひずみを示す。 $\psi=180^\circ$ は $\psi=0^\circ$ の場合と同じく自重の影響を最も強く受ける角度位置であるが、 $\psi=0^\circ$ の場合とは逆方向に自重が作用するため、ひずみ量の大きさは流体力と自重の重畳した値になる。したがって翼根の金具付近のひずみ値は大きくなり、しかもその値は全アジマス角の中で最大になる。 $\psi=270^\circ$ では、タワーの影響により流入風速はある程度減少する。その分ひずみ量は減少する。また、 $\psi=90^\circ$ の場合同様、自重の影響は受けないと考えられる。

以上の結果を要約すると翼端から約1/2翼長までは、流体力が支配的でありアジマス角による違いはあまり認められないが、自重の影響を大きく受ける翼根の金具近傍では、アジマス角変化により、その値は大きく変動する。

4.3 翼面上のひずみ変動割合の考察 図8に翼車回転数100 rpmでの翼面の代表的な位置2箇所(ゲージ4, 23)についてのひずみ変動割合を示す。ここで用いた値は1秒間および0.1秒間での曲げひずみ変動割合の実効値[式(4)参照]である。曲げひずみの変

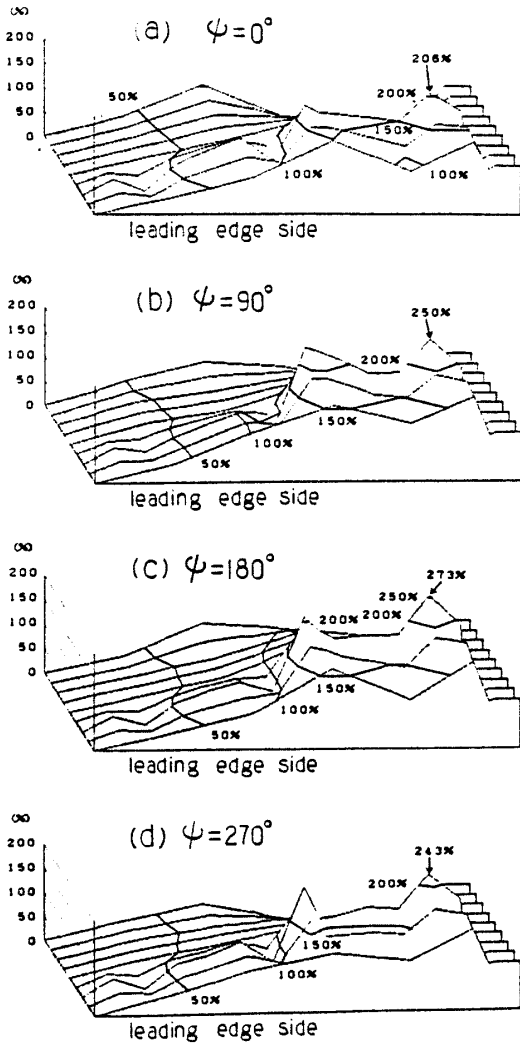


図7 前置形の場合、アジマス角 ψ 変化と翼面に働く曲げひずみ分布(無次元値)の関係、 ψ は図1参照

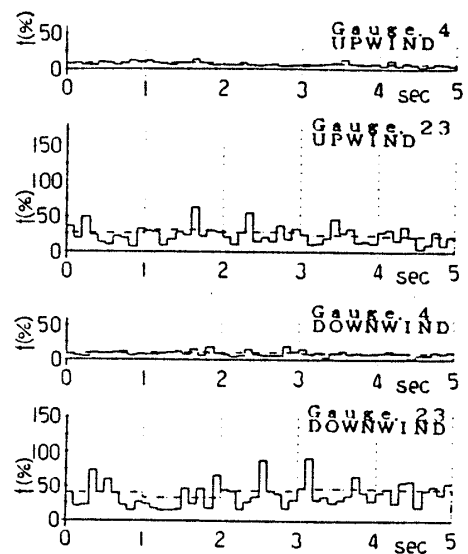


図8 前置形および後置形の場合、翼面上の曲げひずみ変動割合の比較、代表点ゲージ4および23(図4参照)

動割合は翼車を上流側に設置した場合は、下流側に設置した場合よりも小さく、また翼の先端側よりも翼根側が大きくなる傾向にある。

図9は翼根軸線上の各ひずみゲージ1, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 18, 19, 20, 21, 23位置における曲げひずみ変動割合(変動割合は5秒間二乗平均値)を求めた結果である。●印は翼車を上流側に設置し自重を含めた場合、▲印は実測値から自重を差し引いた場合である。下流側の場合も同様に、○印(自重含む)、△印(自重差し引く)で示す。図から明らかなように先端から1.5mの位置で変動割合が極めて大きい。これは、1.5m付近で翼形状、および翼厚が急激に変化するためと考えられる(図3参照)。下流側の場合、上流側と比べ、相対的に大きな値を示す。下流側の場合には、タワー後流の風速低下が大きく、そこを通過する際翼が大きな振動をするためと考えられる。また、ひずみの変動割合という点では自重による影響はあまり重要でないといえる。

図10は翼車回転数が100rpmで翼車をタワー上流側、あるいは、下流側に設置した場合の翼根の垂直方向曲げひずみ量に対する翼面上の代表点のひずみ量との相互相関係数(CR, 式(5))を示す。横軸はデータ相互の遅れ時間を示す。(a), (b)両図は最大厚み部の翼長方向に離れた2点、ゲージ12およびゲージ21と翼根との相互相関係数、(c), (d)両図は翼弦方向に離れた2点、ゲージ13およびゲージ17と翼根との相互相関係数を示す。(a), (b)両図ともCRは0.9前後でかなり1に近い値を示すが、翼の前縁近くの(c)図ではCRは0.7~0.8の間、後縁近くの(d)図では0.6~0.8の間にあり相互相関係数は低下する。この理由は前縁および後縁近くでは翼厚が薄いため、翼根に比べよく微振動する結果と考えられる。これに対して、(a), (b)両図では翼厚が最も厚いため翼根と同周期の曲げ振動を行うと考えられる。さらに、図より上流側に設置した場合と下流側に設置した場合を比較すると、上流側に設置した場合のほうが下流側に設置した場合に比べて(a), (b), (c), (d)いずれの場合もCRは大きな値を示す。この理由は、後者では翼がタワー後流の低風速領域を通過するため大きな変動荷重が働き、翼の曲げ振動が大きく、かつ複雑になるためと考えられる。

4.4 翼根部に働く変動曲げモーメントの統計的考察
瞬時値のみの検討では測定時間が短く全体が把握しにくいので、ここではビンメソッド**1を用いて

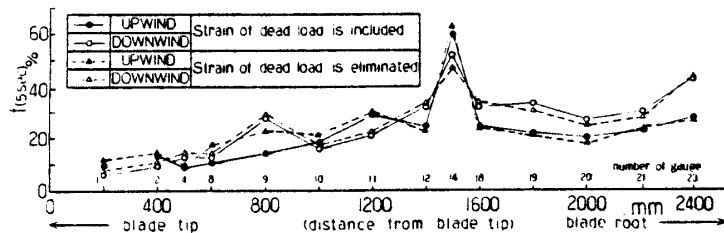


図9 前置形および後置形の場合、各断面の最大翼厚位置のひずみゲージにおける曲げひずみ変動割合fの比較、fは無次元値で式(4)で定義

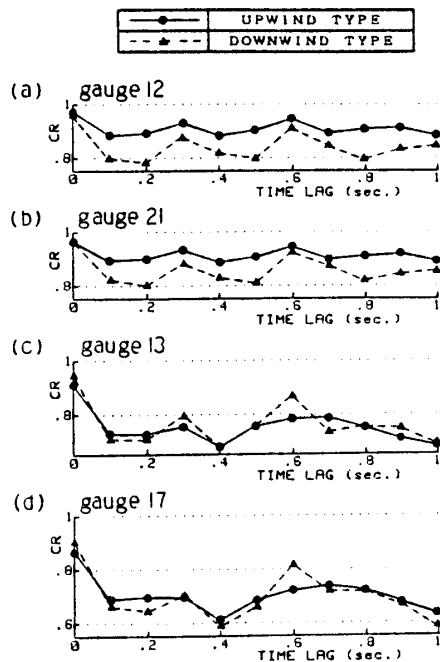


図10 前置形および後置形の場合、翼根とひずみゲージ位置12, 13, 17, 21との曲げひずみ変動の相互相関係数

長時間測定データの統計的解析を行う。

図11には後置形水平軸風車の結果を示す。採用データ個数は144000個と十分な量を用いた。(a)図の回転方向曲げモーメントについては、各ビンのAMT理論平均値と実測平均値は、全回転領域でよく一致する。しかし、(b)図の推力方向曲げモーメントでは、AMT理論平均値は実測平均値より大きくなる。特に回転数が100rpm以上の大きな範囲でその差は大きくなる。この差の最大値は約125rpmで生じ、両者の差は約2倍になる。

著者らは、この後置形風車データ整理の結果から前報の図14で述べた前置形風車の結果に対して実験デ

**1 ビンメソッド: $n \pm 1$ 回転で1ビン(1マス)を作り、その1ビンに含まれる各値から平均値を求める方法である。図の縦線は1ビンの最大値と最小値を結んだ線分である。したがって1ビン中の全データが棒線上に並ぶことになる。その平均値が一印、理論平均値が●印である。

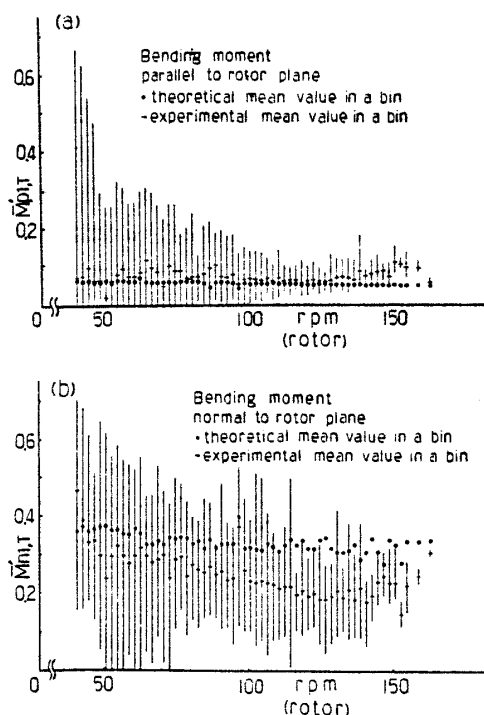


図 11 後置形水平軸風車, 回転中の翼根に働く (a) 回転方向および (b) 推力方向曲げモーメントの実測値と理論値の比較, ビンメソッドによる統計的な平均値を用いた場合

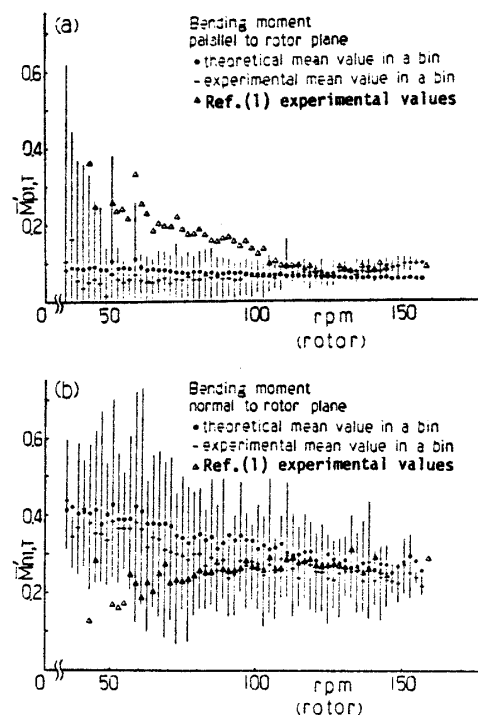


図 12 前置形水平軸風車, 回転中の翼根に働く (a) 回転方向および (b) 推力方向曲げモーメントの実測値と理論値の比較, ビンメソッドによる統計的な平均値を用いた場合

ータ数の不足を感じ, 再実験を行い後置形風車同様 144 000 個以上のデータを対象に再整理を行った. その結果を図 12 に示す. 図中の Δ 印は前報の実験結果, \bullet 印および $-$ 印は今回の理論値および実験値の平均値を表す. この結果によれば, 十分なデータ数を用いれば, 前置形の場合は後置形の場合以上に理論値と実測値はよく一致することが明らかになった. 続いて前置形と後置形の回転力方向および推力方向曲げモーメント \bar{M}_{p1} および \bar{M}_{n1} を比較すると, 後置形のほうが前置形に比べ変動幅 (図 11, 12 中の縦線の長さ) が大きくなる. この理由は後置形では翼がタワー後流領域を通過する際, 相対速度が大きく低下するため翼に働く流体力の変動が大きくなる結果と推定される.

5. 結 論

以上の研究によって主に次のような結論を得た.

- (1) 前置形および後置形水平軸風車発電回転中の翼面上に働く曲げひずみの分布とその変動量の測定の結果, 前置形に比べて後置形風車翼に働く変動力のほうが大きいことが明らかになった.
- (2) 前置形および後置形風車翼に働く流体力と翼自重の関係が明らかになった.
- (3) 統計的なデータ整理の結果, AMT 理論は後置形水平軸風車でも有効であることが明らかになった. ただし, 後置形に比べ前置形のほうが, 理論値は実験値と一段とよく一致する.

文 献

- (1) 清水・ほか 3 名, 機論, 53-485, B (昭 62), 114.

討 論

〔質問〕 奥田 教海〔室蘭工業大学〕

抜刷図9において先端から1.5mの位置で変動割合が非常に大きい。前刷中にも説明があるがさらに説明していただきたい。

〔回答〕 図9の1.5m附近でひずみが急激に大きくなる理由は本文中に述べたように翼断面形状が変化するためである。以下具体的に述べる。本研究では

図3に示したようなブレードを使用した。翼端側半分ぐらいがブレードの性能を支配するので、この部分は高揚力係数を持つFX74CL6140という翼形断面を使用した。ブレードのつけ根側は強度上の問題を考慮し、翼形状を図3のごとく選んだ。1.5mの附近は翼断面形状が変わる部分に相当し、応力集中をまねいたようである。