

風力発電用風車に作用する風力特性

Wind Forces acting on a Wind Turbine

山 本 学 近 藤 宏 二
吉 田 正 邦¹⁾ 眞 田 早 敏²⁾

要 約

日本での風力発電施設の導入は、1990年代後半に本格化し、現在では国内の各所で見られるようになったが、強風によるタワーの倒壊やブレードの破損といった耐風安全性の問題が表面化してきている。耐風安全性の評価に必要な風車に作用する風力は、風車のブレード形状やピッチ制御による運転状態などにより大きく左右されるため、不明な点が多い。本研究は、大型風車の主流である3枚翼プロペラ型の風力発電用風車に作用する風力特性を一樣流と一樣乱流を用いた風洞実験により調査したものである。実験では、風力特性に影響を与える要因として、気流、翼のピッチ角、翼の静止状態、ロータの回転状態（周速比）を考慮した。主な実験結果は、以下のとおりである。1) フェザリング時に横風を受ける場合の風車静止時における平均抗力係数は、一樣流では翼位置の違いにより1.9から2.1の値を示し、一樣乱流では2.7から3.0の値を示した。2) 風車回転時における平均抗力係数は、周速比の増加に伴い値が増加した。また、ピッチ角が小さい方が値は大きく、風に乱れがある方が値は大きい。3) 風車回転領域内でのタワーに作用する変動層横力係数は、タワーの渦発生周波数と風車回転数の3倍周波数（3枚翼通過周波数）が一致すると値が増加した。

目 次

- I. はじめに
- II. 風洞実験方法
- III. 風車静止時の実験結果
- IV. 風車回転時の実験結果
- V. おわりに

I. はじめに

日本での風力発電施設の導入は、1990年代後半に本格化し、現在では国内の各所で見られるようになった¹⁾。今後、地球環境問題やエネルギー問題への対応などにより、風力発電の導入は益々増加し、風車の大型化が進むことが予想される。しかしながら、近年の風力発電用風車の増加及び大型化に伴い、強風によるタワー（支柱）の倒壊やブレード（翼）の破損といった耐風安全性の問題が表面化し、最近では、2003年9月に沖縄県宮古島を直撃した台風14号により、複数の風車が倒壊した例^{2),3)}がある。このような被害を踏まえ、風車の耐風安全性を適切に確保する必要性が高まっている。しかし、風車に作用する風力の特性は、風車の翼形状やピッチ制御⁴⁾による運転状態などにより大きく左右されるため、不明な点が多い。

本研究は、大型風車を想定した3枚翼プロペラ型の風力発電用風車に作用する風力特性を風洞実験により調査したものである。特に、設計用風荷重として考えられる風車静止時の風荷重（設計で設定する最大風速時の荷重）と風車回転時の風荷重（地震時に想定する荷重）への適用を考慮して実験を行った。実験では、風力特性に影響

を与える要因として、気流、翼のピッチ角、翼の静止状態、ロータの回転状態（周速比）をパラメータとして考慮した。

II. 風洞実験方法

風洞実験は鹿島技術研究所の大型境界層風洞（測定部断面 幅4.5m × 高さ2.5m）で、天秤装置（KISTLER 9257B）を用いた風力測定とタワー部を対象とした風圧測定を行った。実験模型をFig.1に示す。模型縮尺は1/50であり、風車回転時での風洞測定断面に対する閉塞率は6%である。風車模型は、3枚の翼、タワー、ナセル、ハブで構成される。翼は以下の条件を基に作成した。翼の形状をFig.2に示す。

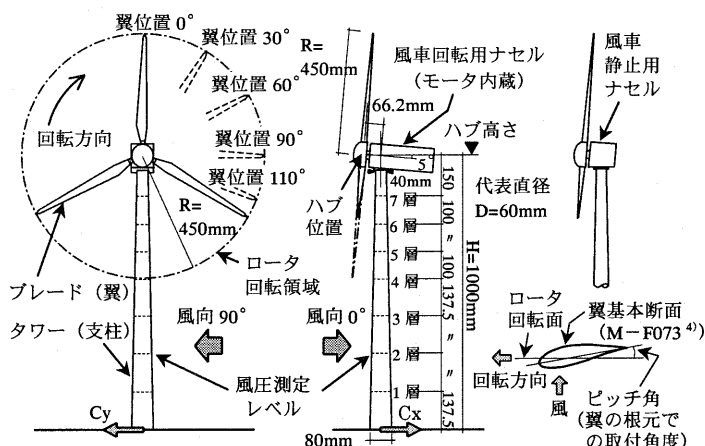


Fig.1 実験模型の概要
(Outline of Test Model)

- 1) 神奈川大学工学部建築学科 研究員 (元 鹿島技術研究所)
- 2) 元 鹿島技術研究所

キーワード： 風力発電, 風車, 風洞実験, 風力係数, 周速比, ピッチ角

- a) 翼の基本断面形状は、(独)産業技術総合研究所と富士重工業(株)が共同開発した M-F073⁹⁾とした。
- b) スパン方向の翼弦は、三菱重工業(株)の水平軸プロペラ式可変翼型アップウインド式風車⁹⁾を参考にした。
- c) スパン方向の翼厚は、回転中心を 0 とした場合、翼の先端に向かい $0.09R \sim 0.13R$ (R : 回転面半径) の範囲は、円 ($0 \sim 0.09R$ はハブ部) とし、 $0.13R \sim 0.28R$ は、円から基本断面の 2 倍の翼厚へ直線的に変化させ、 $0.28R \sim 0.5R$ は、2 倍の翼厚から基本断面へ直線的に変化させた。 $0.5R \sim R$ は、全て基本断面形状と相似とした。
- d) スパン方向の翼振り角は、直線的に変化させ、翼の根元で 0° とした場合、先端部で 6.6° とした。

翼のピッチ角 (Fig.1) は、 3° 、 5° 及び $7^\circ \sim 16^\circ$ の範囲の 1° 間隔とフェザリング¹⁰⁾状態を想定した 93° (翼中央で約 90°) で設定可能である。なお、フェザリング状態での風向 90° は、実機において、停電などによりヨー制御¹¹⁾が不可能となった場合に横風を受ける状態に相当する。また、風車回転中でのピッチ角制御機能、ヨー制御機能は設置していない。ナセルは、風車静止用と回転用がある (Fig.1)。風車静止時の実験では、翼静止位置による影響を検討する。そのため、翼静止位置は、翼の 1 枚が真上を向いた状態を 0° とし、風車回転方向に $0^\circ \sim 110^\circ$ の範囲を 10° 間隔とした (Fig.1)。また、参考のためタワー単体の場合とタワー+ナセルのみの場合 (以後、タワー+ナセル) の風力特性も合わせて検討する。風車回転時の実験では、ロータの一定回転を対象とし、風車回転数は、ナセルに内蔵されているモータにより制御した。最大回転数は 2000rpm である。なお、風車回転用ナセルの形状は、ナセル内部にモータが内蔵されているため実機と相似ではない。タワー部の風圧測定点は、Fig.1 に示すように 7 層に配置し、各層円周方向に等間隔に配置し、4, 6 層は 16 点、その他の層は 8 点とした。実験気流は、一様流と格子を用いた一様乱流の 2 種類である。Fig.3 に実験気流の鉛直分布を示す。乱れの強さは、風洞床面から高さ 400mm の範囲を除けば、一様流で 0.3% 、一様乱流で $15 \sim 16\%$ である。実験風速は、ハブ高さ H で $U_H \approx 10\text{m/s}$ とした。タワーのレイノルズ数は、 4×10^4 (代表長さは代表直径 D) である。また、静止翼のレイノルズ数は、 2×10^4 (代表長さは回転中心から $R/2$ での翼弦)、回転翼のレイノルズ数は、 $2 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ (代表長さは見付幅、風速は接近風速と周速度との相対風速) である。本実験は、実機でのレイノルズ数に比べ 10^2 程度低い領域を対象としており、実機との相似性については、今後の検討課題である。実験風向は、風車静止時の実験の場合、ロータ回転面を風向に正対させる 0° とそれに直交する 90° 、風車回転時の実験の場合、 0° とした。サンプリング条件は、測定周波数を 1000Hz 、測定個数を 32768 とした。

III. 風車静止時の実験結果

1. 風向 0° 、ピッチ角 10° の全体風力係数

Fig.4, 5 に、風向 0° の時にピッチ角が通常運転状態である 10° の静止風車全体に作用する平均風力係数及び変動風力係数と翼位置の関係を示す。また、参考として、タワー単体及びタワー+ナセルの値を図中に示した。なお、静止時の風力係数は、タワー部の受風面積 ($=D \times H$) とハブ高さでの速度圧 q_H で無次元化した。

一様流の場合、平均抗力係数 $\bar{C}_x$ は、翼位置 60° では翼の一枚がタワーと重なり、受風面積が減少するため、約 1.7 の値を示すが、その他の翼位置では約 2 の値を示す。なお、 $\bar{C}_x$ は、翼なしに比べ

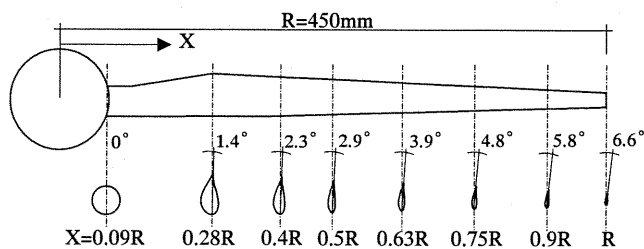
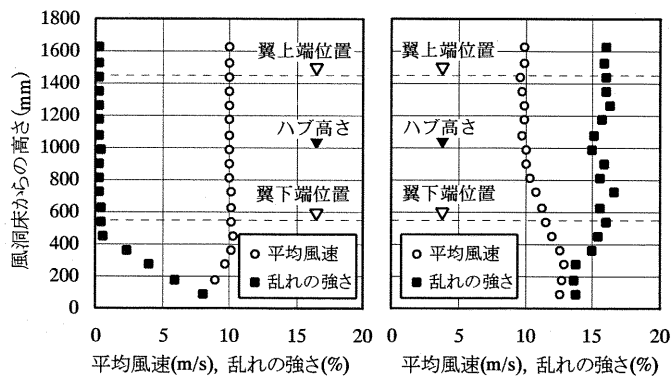


Fig.2 翼形状
(Shape of a Blade)



(a) 一様流 (b) 一様乱流

Fig.3 実験気流の鉛直分布
(Wind Tunnel Flow)

受風面積が大きいため、タワー単体の約 0.9 、タワー+ナセルの約 1 に比べて値が大きい。平均横力係数 $\bar{C}_y$ は翼がタワーと重なる翼位置 60° 付近では、 $-0.1 \sim 0.15$ の値を示すが、ほかの翼位置では、翼がない場合と同様にほぼ 0 である。変動抗力係数 C_x' 及び変動横力係数 C_y' は、翼位置によらず、翼がない場合と同様に約 0.04 と小さい。一様乱流の場合、 $\bar{C}_x$ 及び $\bar{C}_y$ は、一様流とほぼ同様の傾向を示す。 C_x' は、タワー単体の 0.13 、タワー+ナセルの 0.16 に比べ大きく、翼位置の違いにより、 $0.2 \sim 0.23$ で値が変化する。 C_y' は、翼がない場合とほぼ同様であり、 $0.21 \sim 0.23$ の値を示す。

2. 風向 90° 、ピッチ角 93° の全体風力係数

Fig.6, 7 に、風向 90° の時にピッチ角がフェザリング状態である 93° の静止風車全体に作用する平均風力係数及び変動風力係数と翼位置の関係を示す。

一様流の場合、平均抗力係数 $\bar{C}_y$ は、翼位置の違いにより、 $1.9 \sim 2.1$ の値を示す。なお、 $\bar{C}_y$ は、翼がない場合に比べ受風面積が大きいため、タワー単体の約 0.9 、タワー+ナセルの約 1 に比べて値は大きい。平均横力係数 $\bar{C}_x$ は、翼位置によらず、翼がない場合と同様にほぼ 0 である。変動抗力係数 C_y' 及び変動横力係数 C_x' は、翼位置によらず、翼がない場合と同様に約 0.04 と小さい。

一様乱流の場合、 $\bar{C}_y$ は、翼位置の違いにより、 $2.7 \sim 3.0$ で値が変化し、タワー単体の約 1 、タワー+ナセルの約 1.2 に比べて値は大きい。 $\bar{C}_x$ は、翼位置によらず、翼がない場合と同様にほぼ 0 である。 C_y' は、 $0.22 \sim 0.27$ で値がばらつくが、翼の一枚がタワーに近接する翼位置 60° で増加傾向が見られる。なお、タワー単体の 0.13 、タワー+ナセルの 0.16 に比べて値は大きい。 C_x' は、翼位置によらず、約 0.17 の値を示し、翼がない場合の 0.23 に比べ小さい。また、 C_x' は、 C_y' よりも値が小さい。

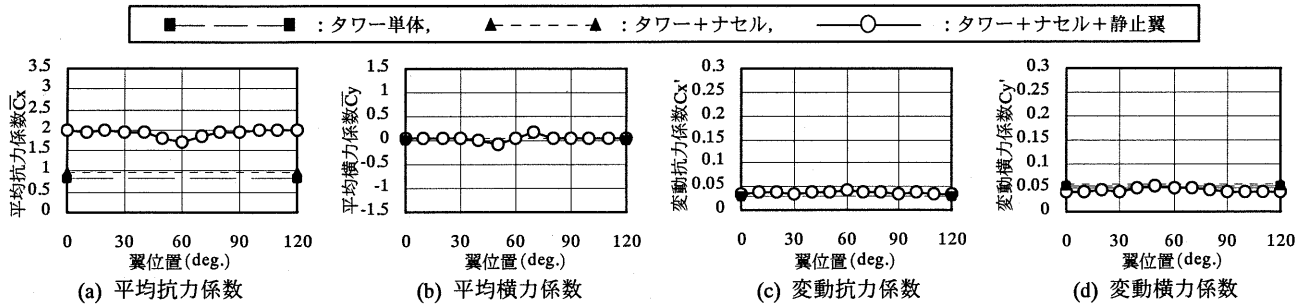


Fig.4 風車静止時の風力係数（一樣流，風向0°，ピッチ角10°）

(Wind Force Coefficients acting on a Stationary Wind Turbine with Blades of Pitch Angle=0° in Uniform Flow [Wind Direction = 0°])

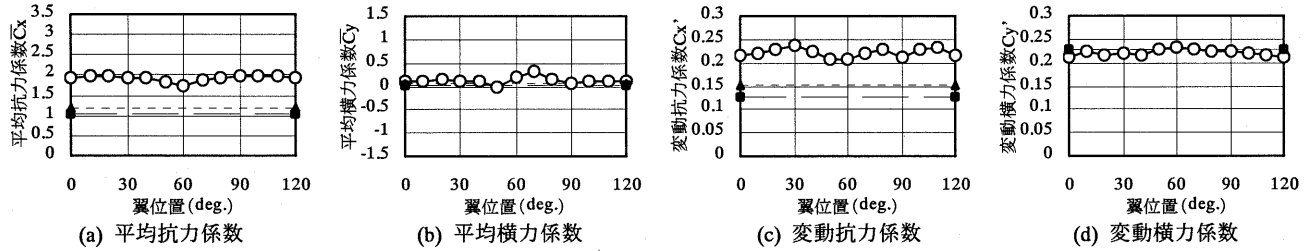


Fig.5 風車静止時の風力係数（一樣乱流，風向0°，ピッチ角10°）

(Wind Force Coefficients acting on a Stationary Wind Turbine with Blades of Pitch Angle=10° in Grid Turbulence Flow [Wind Direction = 0°])

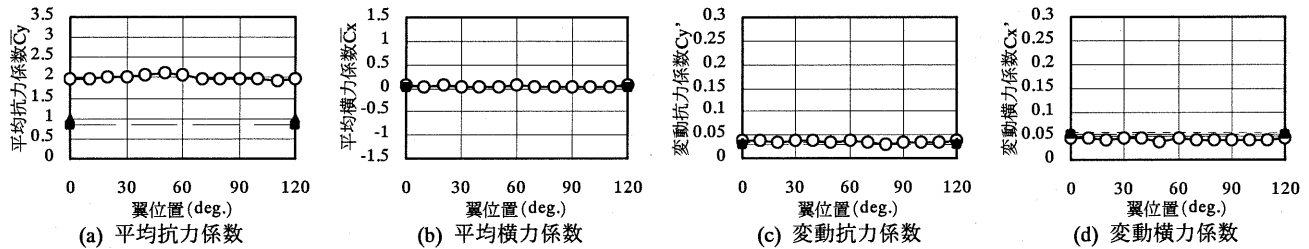


Fig.6 風車静止時の風力係数（一樣流，風向90°，ピッチ角93°）

(Wind Force Coefficients acting on a Stationary Wind Turbine with Blades of Pitch Angle=93° in Uniform Flow [Wind Direction = 90°])

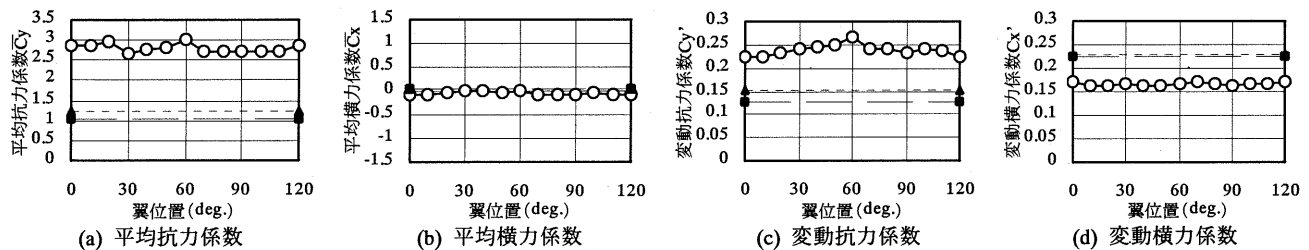


Fig.7 風車静止時の風力係数（一樣乱流，風向90°，ピッチ角93°）

(Wind Force Coefficients acting on a Stationary Wind Turbine with Blades of Pitch Angle=93° in Grid Turbulence Flow [Wind Direction = 90°])

IV. 風車回転時の実験結果

1. 風車模型の回転特性

回転時の風力実験に先立ち，風車のモータ制御を解除し，風力のみで回転する自由回転特性を調べた。Fig.8(a)に，実験風速の $U_H = 10\text{m/s}$ における周速比（＝翼先端での周速度／ハブ高さでの平均風速）とピッチ角の関係を示す。一樣流での周速比は，ピッチ角7°以上で4.1～4.5の値を示すが，一樣乱流での周速比は，一樣流よりも大きく，ピッチ角7°～10°で約11となる。次に，Fig.8(b)に，風力測定実験で用いたピッチ角10°と13°に注目して，風速と周速比の関係を示す。一樣流の場合，周速比は，風速の増加に伴い徐々に増加するが，4～6程度である。ただし，ピッチ角13°では， $U_H = 17\text{m/s}$ で周速比が5から12に急増する。一樣乱流の場合，周速比は

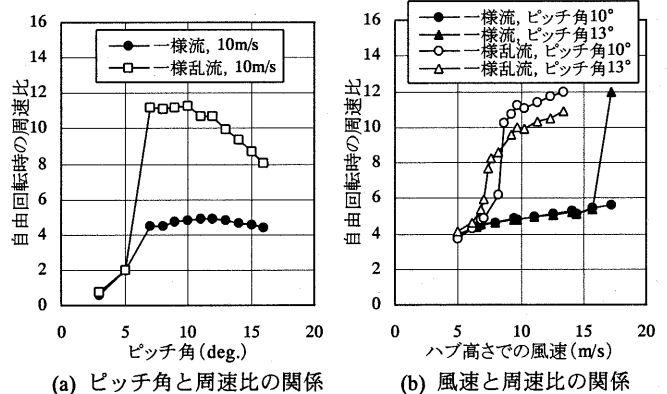


Fig.8 風車模型の回転特性

(Characteristics of a Rotating Wind Turbine Model)

$U_H \approx 7 \sim 8 \text{ m/s}$ で急増し, $U_H \approx 10 \text{ m/s}$ 以上で 10 以上の値を示す。風車の自由回転特性は, ピッチ角, 気流, 風速 (翼に関するレイノルズ数) の影響を顕著に受ける。また, 以下の検討において, Fig.8 に示した周速比以上の回転数で風車を回転させる場合は, モータにより回転力を補助し, それ以下では回転力を抑制している。

2. 周速比と全体風力係数の関係

Fig.9 に, 周速比と風車全体に作用する風力係数の関係を示す。風車回転時の風力係数は, 風車静止時と異なり, 風車ロータの回転領域面積 ($=\pi R^2$) とハブ高さでの速度圧 q_H で無次元化している。ピッチ角は, 10° と 13° に注目した。図中に矢印で示した周速比 4.5 以上は, 一樣流でのモータ回転補助力の付加を表わす。一樣乱流の場合は, 実験での周速比範囲以下で, モータ回転補助力は付加されていない。なお, 変動風力係数は, 天秤-模型の振動系の共振成分と風車回転数成分の影響を除去して求めたが, これらの成分がタワーの渦発生周波数と風車回転数の 3 倍成分と一致し, その影響を除去できない場合は解析から除外した。

平均抗力係数 $\bar{C}_x$ は, 一樣流の場合, 周速比の増加に伴い値が増加するが, 増加する勾配は, 周速比 8 以上で大きくなる。ピッチ角の違いによる影響は, ピッチ角 10° の方が 13° よりも大きい値を示す。特に, 周速比 4~8 及び 10 付近で大きな差が見られる。一樣乱流の $\bar{C}_x$ は, 一樣流と同様に, 周速比の増加に伴い値が増加するが, 周速比 4 以上で, 一樣乱流の方が一樣流よりも値が大きい。変化の様子は, 一樣流とは異なりほぼ直線的である。ピッチ角による影響は, 周速比 6 以上でピッチ角 10° の方が 13° より値が大きい。平均横力係数 $\bar{C}_y$ は, 気流や周速比の違いによらず, ほぼ 0 である。

変動抗力係数 C_x' は, 一樣流の場合, 周速比によらず 0.03 以下と小さいが, 周速比 8 以上で値が若干増加する傾向が見られる。一樣乱流の場合は, 一樣流よりも値が大きく, 周速比の増加に伴い値が増加する。変動横力係数 C_y' は一樣流, 一樣乱流共に, C_x' とほぼ同様な傾向を示すが, 一樣乱流の場合, 周速比約 3 でピークを示す傾向が見られる。この周速比 3 は, タワーからの渦発生周波数と風車回転数の 3 倍周波数がほぼ一致している。

3. タワーに作用する層風力係数

Fig.10, 11 に, ピッチ角 10° でのタワーの 6, 4, 3 層について, 層風力係数と周速比の関係を示す。層風力係数は, 各層の直径 D_i $\times$ 単位高さでハブ高さの速度圧 q_H で無次元化した。層風力は, 各層の風圧を層毎に積分して求めた。図中の周速比 0 での値は, タワー+ナセルの値である。

平均層抗力係数 $\bar{C}_{x_i}$ は, 一樣流の場合, 風車回転領域内の 6 層では, 周速比 3 で値が約 1 のピークを示すが, 風車後流部での風速低下の影響⁹⁾を受け, 周速比の増加に伴い値が減少する。翼先端と同一レベルの 4 層は, 周速比 6 以下では 0.9~1.0 で値がばらつくが, 周速比 3 でピークを示す傾向が見られる。周速比が 6 を超えると 6 層と同様に, 周速比の増加に伴い値が減少する。風車回転領域外の 3 層では, 周速比によらず, 0.8~1.0 で値がばらつくが, やはり周速比 3 でピークを示す傾向が見られる。各層で見られた周速比 3 でのピークは, 何に起因するのか今後の検討課題である。一樣乱流の場合, 各層共に, 周速比 3 まではほぼ同じ値を示すが, 6, 4 層は一樣流と同様に周速比の増加に伴い値が減少する。平均層横力係数 $\bar{C}_{y_i}$ は, 一樣流の場合, 4, 3 層では周速比によらず約 0 であるが,

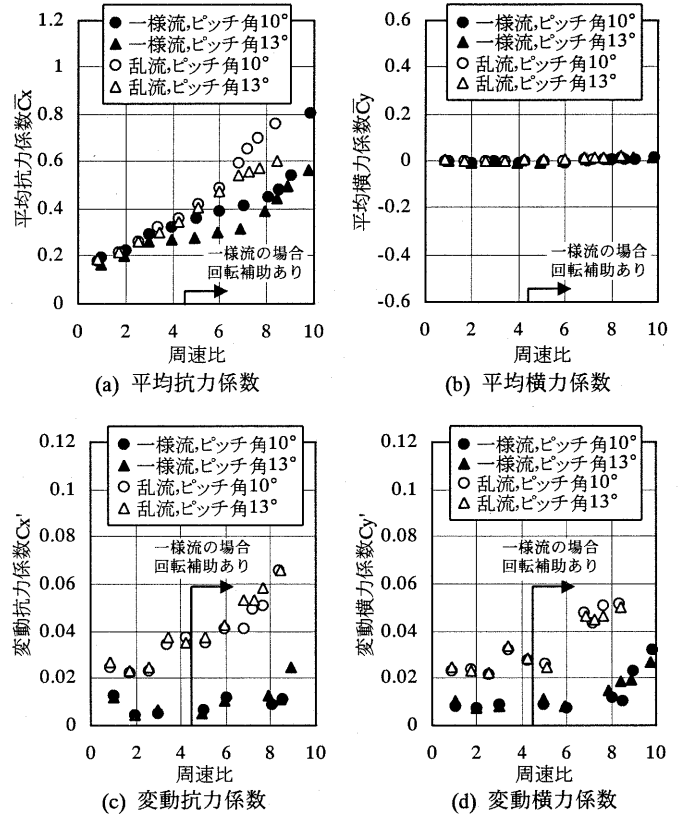


Fig.9 風車回転時の全体風力係数

(Wind Force Coefficients acting on a Rotating Wind Turbine)

6 層は周速比 3 の約 0 を除き, $-0.1 \sim -0.15$ の値を示し, 翼通過の影響が見られる。一樣乱流の場合は, 周速比によらず, 3 層は約 0, 4 層は約 -0.05 , 6 層は約 -0.1 の値を示し, 上層程値は小さい。

変動層抗力係数 C_{x_i}' は, 一樣流の場合, 4 層を除き, 周速比によらず, 3 層は約 0.05, 6 層は $0.2 \sim 0.25$ の値を示し, 6 層の方が値は大きい。翼先端と同一レベルの 4 層の C_{x_i}' は, 周速比 8 以下では, 約 0.1 の一定値を示すが, 周速比 8 を超えると周速比の増加に伴い値が増加する。これは, 高周速比の場合, 風車後流部の乱れの強さが翼先端部で増加する⁹⁾ためであると考えられる。一樣乱流の場合は, 4 層を除き, 周速比によらず, $0.3 \sim 0.4$ 程度の値を示す。4 層の C_{x_i}' は, 周速比 6 以下では, 約 0.3 の一定値を示すが, 周速比 6 を超えると, 一樣流と同様に, 周速比の増加に伴い値が増加する。変動層横力係数 C_{y_i}' は, 一樣流の場合, 周速比 3 及び 6 でピークを示し, 上層程値は大きい。特に, 周速比 3 は明瞭なピークを示す。一樣乱流の場合は, 6, 4 層では, 一樣流と同様に, 周速比 3 付近でピークを示すが, 3 層では見られない。

4. タワーに作用する層風力の時刻歴波形及びパワースペクトル密度

ここでは, 一樣流中でのタワーの 6 層 (風車回転領域内) に注目し, 層風力の時刻歴波形とパワースペクトル密度について述べる。

Fig.12 に, 一例として, タワー+ナセル及び周速比 3 の抗力係数の時刻歴波形を示す。風車回転時の時刻歴波形は, タワー+ナセルに比べ, 変動が大きく, 風車の回転による特定周期の変動が含まれていることが分かる。次に, Fig.13 に, 抗力のパワースペクトル密度の一例を示す。タワー単体及びタワー+ナセルのパワースペクトル密度は, 共になだらかなピークを持つが, タワー+ナセルの方が

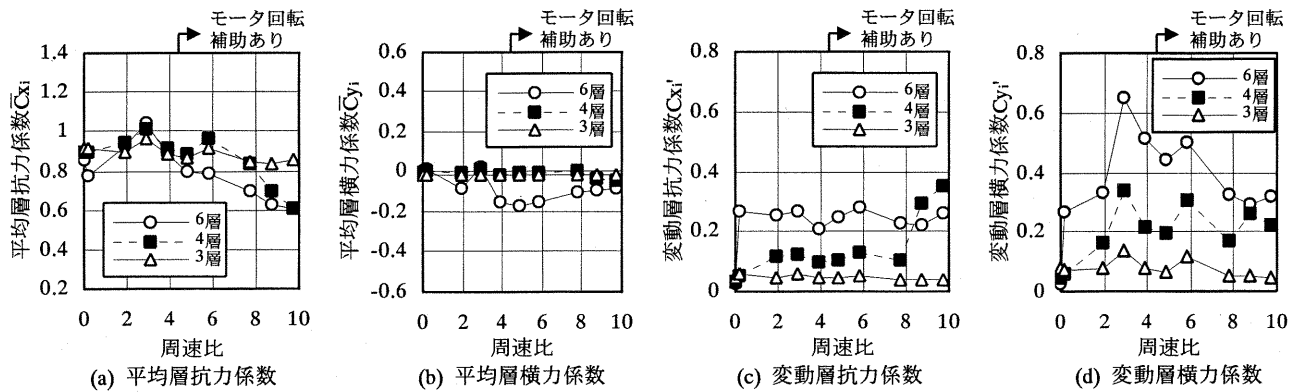


Fig.10 風車回転時のタワーに作用する層風力係数 (一様流, ピッチ角 10°)

(Local Wind Force Coefficients acting on a Rotating Wind Turbine Tower with Blades of Pit Angle= 0° in Uniform Flow)

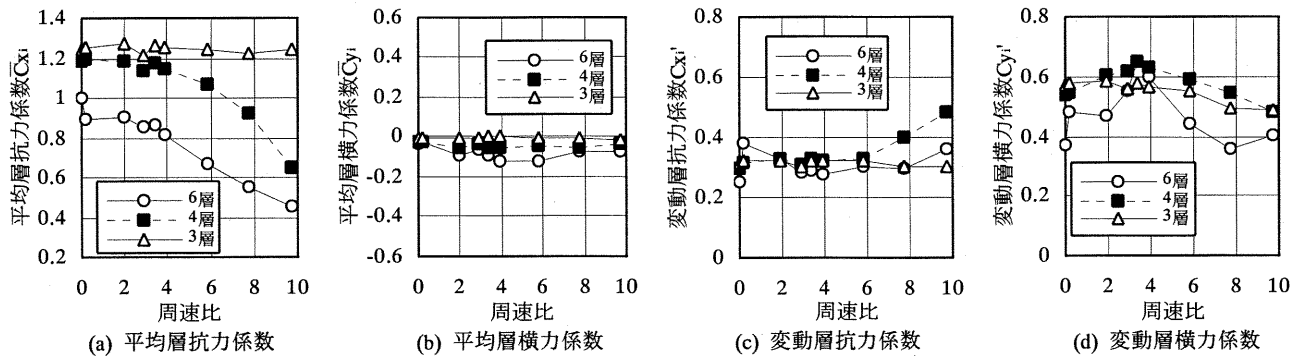


Fig.11 風車回転時のタワーに作用する層風力係数 (一様乱流, ピッチ角 10°)

(Local Wind Force Coefficients acting on a Rotating Wind Turbine Tower with Blades of Pit Angle= 10° in Grid Turbulence Flow)

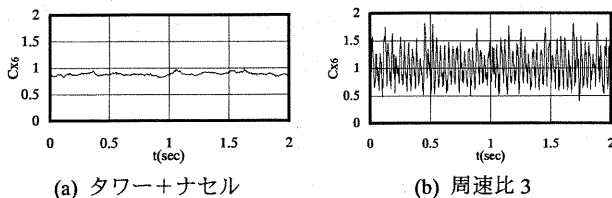


Fig.12 風車回転時のタワーに作用する層抗力の時刻歴波形 (一様流, ピッチ角 10° , 6層)

(Time History of Local Drag Coefficients acting on a Rotating Wind Turbine Tower with Blades of Pit Angle= 10° in Uniform Flow [6 Level])

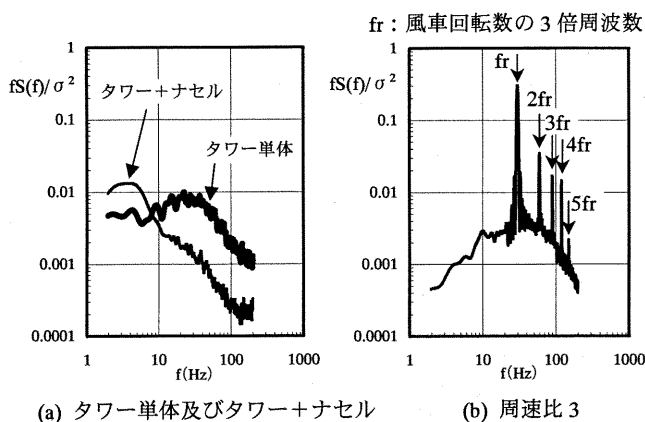
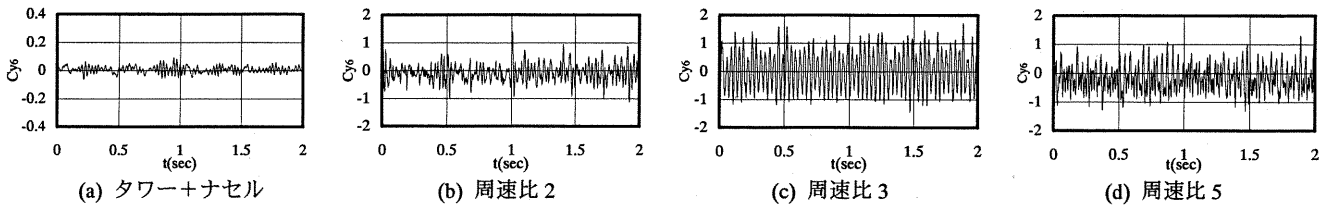


Fig.13 風車回転時のタワーに作用する層抗力のパワースペクトル密度 (一様流, ピッチ角 10° , 6層)

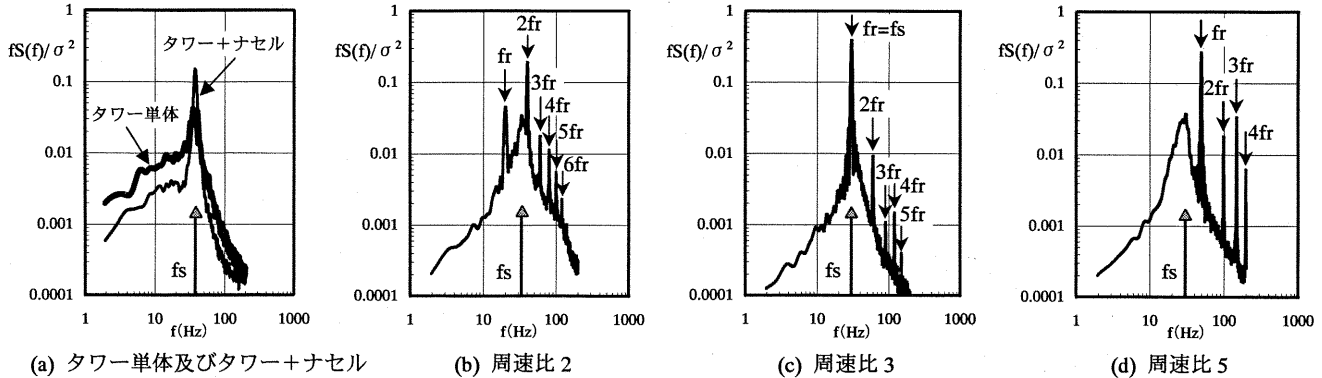
(Power Spectrum of Local Drags acting on a Rotating Wind Turbine Tower with Blades of Pit Angle= 10° in Uniform Flow [6 Level])

低周波数側になだらかなピークを持つ。風車回転時のパワースペクトル密度は、風車回転数の3倍の周波数 f_r で明瞭なピークを示し、3枚翼がタワーの前方を通過する影響が現れている。この f_r に対して、 n 倍のピークも見られる。また、タワー+ナセルで見られた低周波数側のなだらかなピークは見られない。

Fig.14 に、一例として、タワー+ナセル及び周速比2, 3, 5の横力係数の時刻歴波形を示す。風車回転時の時刻歴波形は、抗力係数と同様に、風車回転の影響が見られる。特に、周速比3の時刻歴波形は、周速比2や5に比べ振幅が大きく、正弦波状の変動となっている。次に、Fig.15に、横力のパワースペクトル密度の一例を示す。タワー単体及びタワー+ナセルのパワースペクトル密度は、タワーの渦発生周波数と考えられる明瞭なピークを示すが、タワー+ナセルの方がピークは顕著である。これは、タワー頂部付近の三次元的な流れがナセルにより二次元的に変化したためであると考えられる。ストローハル数 $St_i (=f_{s_i} D_i / U_i)$, f_{s_i} : i 層の渦発生周波数, D_i : i 層の直径, U_i : i 層の平均風速) に換算すると、 $St_6 \approx 0.18$ である。風車回転時のパワースペクトル密度は、風車回転数の3倍周波数 f_r とその n 倍で明瞭なピークを示し、3枚翼がタワーの前方を通過する影響が現れている。風車回転時のタワーの渦発生周波数 f_s を見ると、タワー+ナセルに比べ、ピークが鈍くなり、ピーク周波数が低下している⁵⁾。これは、風車後流部での風速の低下と風の乱れの増加⁶⁾ によるものと考えられる。変動層横力係数 C_{y_i} が明瞭なピークを示した周速比3は、タワーの渦発生周波数 f_s と風車回転数の3倍周波数 f_r がほぼ一致しており、その他の周速比に比べスペクトルピークが顕著である。この現象は、一様乱流中においても確認されている。

Fig.14 風車回転時のタワーに作用する層横力の時刻歴波形（一様流，ピッチ角 10° ，6層）(Time History of Local Lateral Force Coefficients acting on a Rotating Wind Turbine Tower with Blades of Pitch Angle= 10° in Uniform Flow [6 Level])

fs: タワーの渦発生周波数, fr: 風車回転数の3倍周波数 (3枚翼通過周波数)

Fig.15 風車回転時のタワーに作用する層横力のパワースペクトル密度（一様流，ピッチ角 10° ，6層）(Power Spectrum of Local Lateral Forces acting on a Rotating Wind Turbine Tower with Blades of Pitch Angle= 10° in Uniform Flow [6 Level])

V. おわりに

3枚翼プロペラ型の風力発電用風車に作用する風力特性を風洞実験により調査し、以下の結果が得られた。

- 風車静止時における平均抗力係数は、通常運転状態での風向、ピッチ角において、翼とタワーが重なる翼位置の場合、ほかに比べ値が減少した。フェザリング時に横風を受ける場合、一様流では翼位置の違いにより1.9から2.1の値を示し、一様乱流では2.7から3.0の値を示した。変動抗力係数は、一様流では翼位置によらず一定値を示したが、一様乱流では翼位置の違いにより値がばらついた。平均及び変動横力係数は、翼位置による影響はあまり見られなかった。
- 風車回転時における平均抗力係数は、周速比の増加に伴い値が増加した。また、ピッチ角が小さい方が値は大きく、風に乱れがある方が値は大きい。平均横力係数は、これらに関係なく0である。変動抗力係数及び変動横力係数は、一様乱流では、周速比の増加に伴い値が増加した。
- 風車回転時のタワーに作用する層風力係数は、タワーの風車回転領域内の部位に影響が現れた。風車回転領域内の平均層抗力係数は、周速比の増加に伴い値が減少したが、一様流では周速比3で値が増加した。平均層横力係数は、上層程値が小さくなる傾向が見られた。翼先端と同一レベルの変動層抗力係数は、周速比8以上で値が増加したが、ほかのレベルでは周速比の影響はあまり見られない。風車回転領域内の変動層横力係数は、タワーの渦発生周波数と風車回転数の3倍周波数（3枚翼通過周波数）が一致する周速比3で値が増加した。なお、自然風を模擬した接近流及びタワーと翼に関するレイノルズ数の相似性、モータにより強制回転させた一様流、周速比4.5以上の風力係数の妥当性については、今後の検討課題である。

注1) 風車の回転や出力を制御するため、翼のピッチ角を変化させ

る制御。

- 注2) 風で回転しないようにピッチ角を風向きに平行にした状態。
- 注3) 風車回転面を風向に対して直交するように追尾させる制御。
- 注4) 風車のロータに作用するスラスト係数（平均推力係数）を得るためには、風車回転時の平均抗力係数から翼以外の部位（タワー+ナセル）の平均抗力係数（ ≈ 0.11 [無次元化の代表面積は風車ロータ回転領域面積 πR^2]）を引く必要がある。
- 注5) 文献8)では、翼後流の乱れにより、タワーからの渦生成が妨げられると指摘しており、本実験の結果と異なる。

参考文献

- 1) 例えば、松浦勝博；風力発電の日本の現状と将来，日本エネルギー学会誌，Vol.83，(2004.1)，pp.38-42.
- 2) 奥田泰雄，喜々津仁密，岡田恒，松井正宏，田村幸雄，土谷学，山本学，林田宏二，近藤宏二；2003年台風14号（マエミー）による宮古列島での強風被害，日本風工学会誌，No.97，(2003.10)，pp.49-60.
- 3) 石原孟，山口敦，藤野陽三；2003年台風14号による風力発電設備の被害とシミュレーションによる強風の推定，土木学会誌，Vol.88，(2003.12)，pp.45-48.
- 4) <http://www.aist.go.jp/RIODB/db060/>; (独)産業技術総合研究所 HP.
- 5) 齊藤利光，奥田裕久，林英輝，榎本恵太；名立町コンクリートタワー風力発電施設，第25回風力エネルギー利用シンポジウム，(2003.11)，pp.161-164.
- 6) 服部康男，山本学，江口譲，近藤宏二，須藤仁，田中伸和，吉田正邦，真田早敏；風車後流部の乱流挙動，第18回風工学シンポジウム論文集，(2004)。(投稿中)
- 7) 牛山泉；風車工学入門，森北出版，(2002)。
- 8) Det Norske Veritas and Riso National Laboratory；Guidelines for design of wind turbines (Second edition)，(2002)。