九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

風向変化に対する風車の特性

烏谷, 隆
九州大学応用力学研究所

沖野, 誠心
三菱重工・名古屋航空宇宙システム製作所

渡辺, 公彦
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

https://doi.org/10.15017/27048

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 136, pp.23-27, 2009-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

風向変化に対する風車の特性

烏谷 隆*, 沖野 誠心†, 渡辺 公彦*, 大屋 裕二*

(2009年 1月 20日受理)

On the Effects of the Change of Wind Direction to the Dynamical Property of a Wind Turbine

Takashi KARASUDANI, Masamune OKINO, Kimihiko WATANABE and Yuji OHYA
E-mail of corresponding author: *karasu@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

We experimentally and numerically studied on the dynamical property of a wind turbine of a blade having fixed-pitch angle to the change of wind direction. We assumed that the aerodynamic properties of the blade were given by a torque coefficient, which was measured in constant wind speed. We also assumed that the coefficient was a function of a tip speed ratio only. Averaged power was found to depend on the cube of cosine of yaw angle. Thus, change of yaw angle can be regarded as the change of wind speed upstream. We got an expression for the phase difference between wind and power variation as a function of the ratio of the variational frequency to a characteristic frequency. The behavior of wind turbine to the change of yaw angle showed glasses frames-like figure, and was numerically reproduced.

Key words: *dynamic property of wind turbine, change of wind direction, delay of phase, torque coefficient*

1. はじめに

化石燃料の大量消費に伴う大気汚染や地球温暖化などの環境問題に対処するため，消費を抑制することが求められている．このため代替エネルギーとして，風力，太陽光，バイオマスなどの再生可能エネルギーを利用することが図られている．風力エネルギーは風車による風力発電として世界中で広く利用されるようになってきた．多数の大型風車を備えたウインドファームが各地に建設され，利用拡大が進んできた．最近では，身近にあるエネルギー源として，市街地や住宅地の街灯や非常灯などの局所電源として利用されるようになってきた．この目的を達成するために安全で効率が良く低騒音の小型風車の開発が盛んに行われている．

このような用途を想定したとき，小型風車は風の変動の激しい状態で使われることが多い．高い効率を維持するように風車を制御するためには，風車が風の変動に対してどのように振る舞うのかを知ることが必要である．本論文では，風向の変化が風車の出力に及ぼす影響を検討する．風洞実験と数値モデルによる計算により，風向変化の影響を調べる．

第２章では風洞実験と数値モデルについて述べる．第３章では風洞実験の結果と数値計算の結果について比較検討する．第４章にはまとめを記す．

＊ 九州大学応用力学研究所
† 三菱重工・名古屋航空宇宙システム製作所

2. 風洞実験と数値モデル

風向の変化を模擬するため，風洞内に設置した風車の支柱を揺動運動させた．実験装置の概略図をFig.1に示す．風車の支柱は風洞の床下にある回転可能な軸受け①に取り付けた．軸受けには長さ250mmの長方形の板が取り付けている．この板には，支柱の中心軸から215mmの位置に軸径が8mmのベアリングを取り付けた．また，支柱の軸から風上側に415mmの位置にサーボモータにより回転する軸②を配置した．この軸には長さ80mmの

長方形の板を取り付け，軸から65mmの位置に軸径が8mmのベアリングを取り付けた．上記２つのベアリングの間を430mm離して，両端に直径8mmの丸棒を取り付けた長方形の連結板で接続した．軸②を回転させることにより軸①は揺動し，軸①に取り付けた風車は風向を中心として左右に首振り運動をする．軸①と連結板の取りつけ位置の間隔を調整することにより，首振り運動の最大角度がおよそ50°になるように調整した．サーボモータの回転数を変更することにより首振り運動の周期を変化させた．実験では周期をT=5, 10, 20, 30, 60, 105, 420[sec]とした．風車の軸とポテンショを取り付けたプーリの間をワイヤーで結び，首振り運動によるワイヤーの移動をポテンショの抵抗変化として捉えることにより，ヨー角ϕの変化を測定した．

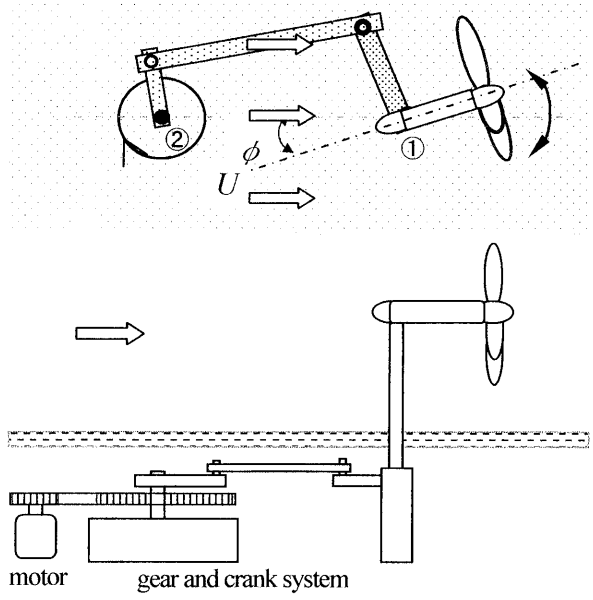

Fig1. Schematic diagram of the experimental setup.

次に，数値モデルについて検討する．翼の運動を支配しているのは風による回転を促すトルクである．翼が発生するトルクは翼の周りの流れにより規定されるため，風速や回転数が変化するとそれに伴って変化する量である．本論文では，風速を一定に保ち測定された翼の空力特性を基に議論する．この準静的近似が成立すると期待されるのは，林らにより示されているように[1]，翼まわりの風の流れは翼の回転速度に比較して速やかに定常状態の風の流れになると思われることによる．

準静的近似が成り立つと仮定すると，翼のレイノルズ数が10^5以上あれば，空力特性は周速比λ（$\equiv r\omega/U$：rは翼の半径，ωは翼の回転角速度，Uは風速）のみに依存する[2]．翼が発生するトルクT_Uと出力Pは周速比の関数であるトルク係数$C_T(\lambda)$と出力係数$C_W(\lambda)$を使って，次のように書ける．

$$T_U = C_T(\lambda)(1/2)\rho A r U^2 \qquad (1)$$

$$P = C_w(\lambda)(1/2)\rho A U^3 \qquad (2)$$

$$A \equiv \pi r^2$$

式（1, 2）のρは空気密度である．

T_Uを求めるために必要なトルク係数は風速 6, 7, 8, 9, 10[m/s]のトルク計による測定値の平均値より複数の値の周速比において係数値を定め，それらの点を自然スプラインにより滑らかに接続することで係数とした[3]．λ=0 の値は固定値 0.02 とした．

翼と発電機をあわせた慣性モーメントをIとし，発電機につながっている負荷による翼の回転を抑制するトルクをT_Lとすると，翼の運動方程式は次式となる．

$$I\frac{d\omega}{dt} = T_U - T_L \qquad (3)$$

式(3)を，時間刻みを 0.001 秒として，ルンゲ・クッタ法で積分した．この時T_Lは次のようにして与えた．翼が定常に回転しているならば，T_Lは翼のトルクに等しくなる．通常，風車は風速の変化に応じて負荷を調整することにより出力が最大となるように制御されている．出力が最大となる周速比をλ_wとすると，その時の負荷トルクは，翼のトルクに等しいので，

$$T_L = T_U(\lambda_w, U)$$
$$= (1/2)\rho A C_T(\lambda_w) r^3 \omega^2 / \lambda_w^2$$
$$\equiv \beta\omega^2 \qquad (4)$$

となる．この式から明らかなように，係数βは風速に関係なく，空気密度，風車の大きさ，翼のトルク特性により定まる定数である．すなわち，ωに応じて負荷トルクが式(6)の値となるようにすれば，風車は定常風下において最高の効率を示す周速比λ_wで動作していることになる．数値モデルでは，このいわゆる「オメガ二乗制御」を模擬するために，積分の各ステップにおいて負荷を式(4)の値になるように調整した．具体的には，負荷によるトルクの n ステップ目の値をT_L^nとすると，n+1 ステップ目の値を次式で与えた．

$$T_L^{n+1} = T_L^n + \kappa(\beta\omega_n^2 - T_L^n) \qquad (5)$$

比例定数κは 0.5，制御間隔は 0.05 秒間隔とした．

風洞実験に使用した風車の仕様は次のようなものである．

水平軸後流型

翼枚数：３枚

翼直径 D：1.16 [m]

慣性モーメント（翼と発電機）：0.26[kgm^2]

定格出力：230[W]（風速 10[m/s]）

制御器：(有) 浪越エレクトロニクス製，トラッカー

Fig.2 に実験に使用した風車の，トルク計と回転数計で測定した，出力係数とトルク係数を示す．

3. 実験および計算結果

最初に，サーボモータとクランク機構による角度の変化を調べた．ヨー角度はほぼ正弦的な変化を示す．Fig.3に周期が20秒の時のヨー角度の時間変化を示す．実線がポテンショによる計測値である．クランク機構に隙間があるため，最大／最小値のあたりでスパイク状の変動がある．また，変動の幅は左右対称ではなく，３° 程度の偏りがある．図中の波線は次式の周期20秒の正弦関数である．クランク機構によりほぼ正弦的にヨー角度が変化していることが分かる．

$$\phi = 49\sin(2\pi t/20 + 1.4) + 3.0 \qquad (6)$$

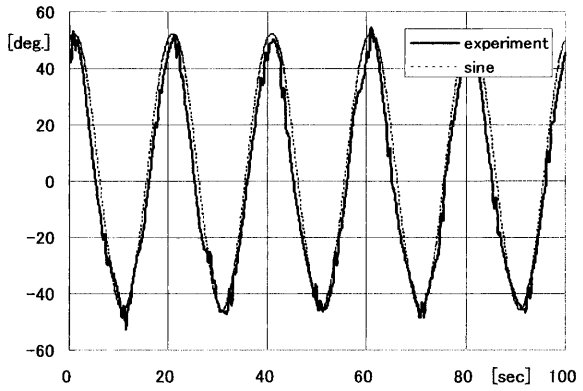

Fig.3 Example of time variation of yaw angle at period of 20 sec. oscillation.

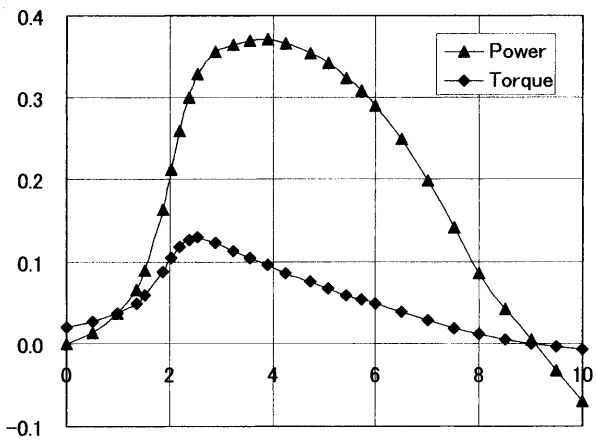

Fig.2 Torque and power coefficients of the wind turbine used in the wind tunnel experiment.

近寄り風速を9[m/s]に設定し，ヨー角度を0°より60°まで10°ごと設定したときの出力の様子をFig.4に示す．縦軸は各

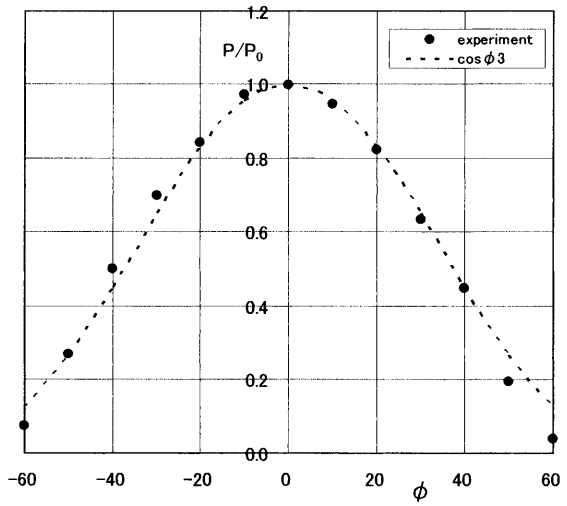

Fig.4 The ratio of power to the power at ϕ=0 for each yaw angle ϕ. Dashed line is $\cos^3\phi$.

角度の出力を角度が0°の時の出力P_0で規格化した値である．

この図より，ヨー角度の変化による出力の変化はヨー角度の余弦の3乗になっていることが分かる．この結果は，ヨー角度の変化が風車出力に及ぼす影響は，風の風車翼面に沿った方向の成分は風車の平均出力に影響を及ぼすことはなく，翼面に垂直な成分により風車の出力が決まることを示している．ヨー角度の変化は角度の余弦に比例して風速が変化したと見なすことができる．すなわち，角度変動に伴う過渡的な効果を無視できるならば，ヨー角度の変化は，風速の変化としてとらえることができる．　文献(4)において，風速が正弦的に変化する時の平均出力を予測するために，風速の変動周期と周速比の関係を導いた．ヨー角度の変動に対しては出力の平均値よりも角度変化と出力変化の関係に関心がある．この関係を解明するためには，風速変化と出力変化の位相関係を知る必要がある．

文献(3)の数値計算の結果より風速変化と出力変化の位相差を求めた．解析は以下のようにした．風速変動と出力変動をそれぞれフーリエ変換（FFT）した．それぞれのパワースペクトルが最大となる周波数が一致することを確認し，最大となる周波数の複素フーリエ成分のクロススペクトルを求めた．クロススペクトルより風速に対する出力の位相の遅れ$\Delta\theta$を次式で求めた．

$$\Delta\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{U_I P_R - U_R P_I}{U_R P_R + U_I P_I}\right) \qquad (7)$$

上式において，風速の複素フーリエ成分をU，出力をPで表している．また，添え字R, Iはそれぞれ実数項と虚数項を表している．結果をFig.5に示す．図の横軸は風速の変動周波数fを，次式で定義される風車の応答を特徴づける周波数f_rで規格化した値である[5]．

$$f_r \equiv \frac{(3/2)\rho\pi r^4 C_w(\lambda_w)U}{I\lambda_w^2} \qquad (8)$$

図中の点線で表した曲線は数値計算の結果より求めた回帰曲線である．曲線の式は図中の凡例に示している．

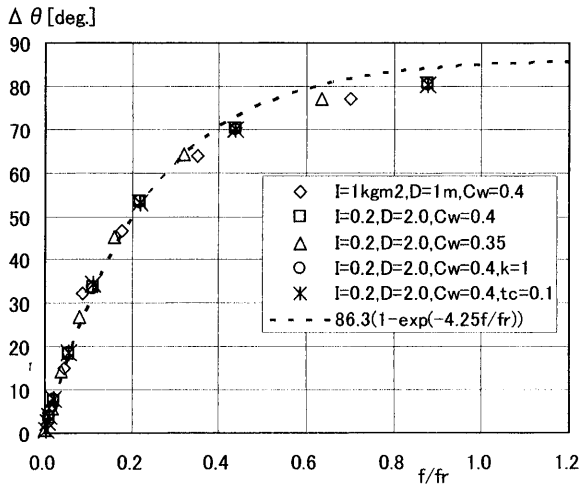

Fig.5 The difference of phase between wind and power as a function of frequency ratio. A regression line for the data is the dashed line. The expression of the line is given in the legend.

ヨー角度の変化を近寄り風速がヨー角度の余弦に比例して変化するとして，式（3,4,5）により数値計算した結果と風洞試験の結果をFig.6に示す．振動の周期はそれぞれ（a）T=420[s]，（b）T=60[s]，（c）T=30[s]，（d）T=20[s]，（e）T=10[s]，（f）T=5[s]である．実験ではクランク機構のガタによるばらつきがあるが，図では1周期分を載せている．

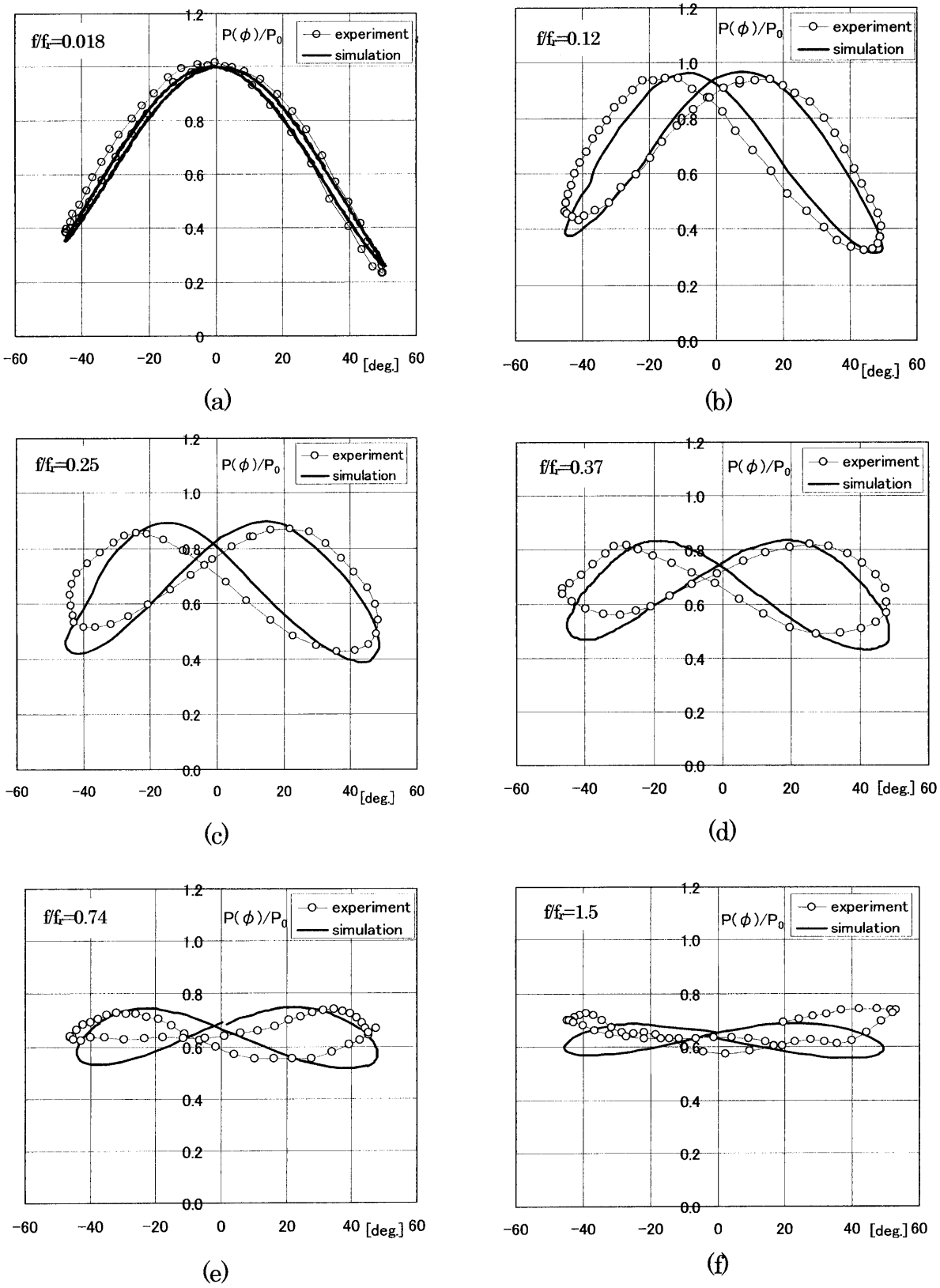

Fig. 6 The relation between power and yaw angle for (a) T=420[s], (b) T=60[s], (c) T=30[s], (d) T=20[s], (e) T=10[s], (f) T=5[s]. The characteristic frequency f_r=0.27[Hz]. The figures are drawn for one period.

実験と数値計算の結果は概ねあっている．ヨー変化の周期が短くなるにつれ位相差が大きくなり，Fig.4の余弦の3乗特性から外れていく様子はよく再現されている．ヨー角度の変化に対して出力の変化が遅れるためヨー角度と出力の関係がメガネ形ループになることは清水，片山によって報告されている[6]．彼らの実験では負荷としてディスクブレーキを使用した．そのため回転数に比例した負荷となり，出力係数の最大点を維持する最適制御にはなっていない．負荷のかけかたによらずヨー角度と出力の関係がメガネ形ループになるのは，出力変化の風速変化に対する位相遅れは風車の慣性モーメントに起因するためである．

数値計算と実験結果が定量的には一致しているとは言い難い．原因としては，数値計算に用いたトルク係数はトルク計により機械的に測定したものであり，発電機の特性や損失などを考慮していないことによるものと思われる．また，風速が遅くなった時には翼の空力特性がレイノルズ数に依存するが，これも考慮していない．

位相差とヨー変化の周波数の関係をFig.7に示す．ヨー変化を風速の変化と見なしたので，fはヨー変化の周波数$1/T$の2倍とした．実験に使用した風車の，(8)式で定義される，応答周波数はf_r=0.27[Hz]となった(周速比は5.0，風速は平均風速7.67[m/s]で計算した)．Fig.7の凡例"calculate"はFig.5の回帰式より求めた結果である．回帰式より求めた位相差と実験とは良く一致している．実験ではf/f_r=1.5の時は，出力の変動に明確な周期性が見られず定まった値を得ることはできなかった．

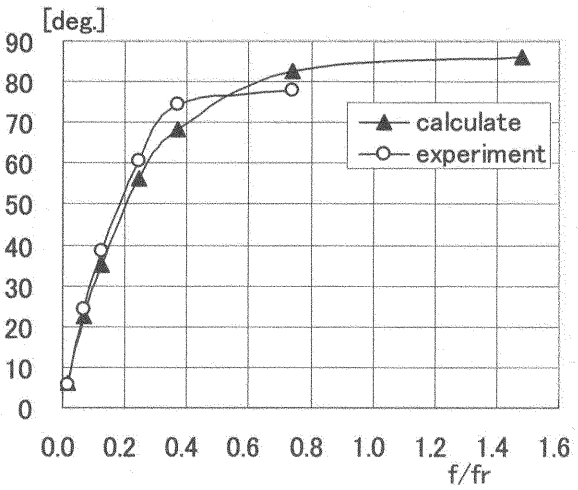

Fig.7 Phase delay vs. frequency ratio. Triangle marks are calculated by the regression equation in fig.5.

4. まとめ

ヨー角度の変化にたいして風車の出力がどのように変化するのかを調べた．出力に対するヨー角度の変化は風向と翼の回転軸がなす角度の余弦の3乗に比例することを風洞実験により示した．この結果，ヨー角度の変化を近寄り風速の変化と見なせることが分かった．

ヨー角度の変動に対する出力の振る舞いを知るために，風速変化に対する出力変化の位相の遅れを表す式を求めた．

ヨー角度の変化に対して出力の変化が遅れるためヨー角度と出力の関係がメガネ形ループになることを計算と実験により示した．

謝　辞

一連の研究は，経済産業省大学発事業創出実用化研究開発事業，日本学術振興会科学研究費，吉田学術教育振興会，住友財団環境助成研究，原田記念財団流体機械自然科学研究，(株) 九州電力，九州大学P&P研究プロジェクトの支援のもとに行われて来ました．ここに記して深く感謝いたします．

参考文献

1) 林農，康仁勝，原豊，河村哲也：直線翼鉛直軸風車のステップ風に対する過度応答について（一定回転数条件および一定トルク条件)，日本機械学会論文集(B編)，74, No. 738, pp406-413, (2007)．

2) 例えば，牛山泉：風車工学入門，(株)森北出版，(2002)．

3) 吉村和美，高山文雄：パソコンによるスプライン関数，東京電機大学出版局，(1989)．

4) 烏谷隆，大屋裕二，渡辺公彦：正弦的変動する風速に対する固定ピッチ翼風車の出力について，日本風力エネルギー協会誌，32, No. 1, pp128-132, (2008)．

5) 烏谷隆，大屋裕二，渡辺公彦：マイクロ風車の応答に関する小考，日本風力エネルギー協会誌，30, No. 2, pp113-116, (2006)．
烏谷隆，大屋裕二，渡辺公彦：小型風車の風速および負荷の変動に対する応答について，日本風力エネルギー協会誌，31, No. 2, (2007), pp. 120-123.

6) 清水幸丸，片山薫：水平軸風車の動特性に関する実験的研究（風速・風向が周期的に変動する場合)，日本機械学会論文集(B編)，49巻445号 (1985)，pp. 1869-1878.