

小型風車の動特性に関するいくつかの考察

烏谷, 隆
九州大学応用力学研究所

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/10.15017/27066>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 137, pp.165-174, 2009-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



小型風車の動特性に関するいくつかの考察

鳥谷 隆*, 渡辺 公彦*, 大屋 裕二*

(2009年6月2日受理)

Some Observations on the Dynamical Property of a Small Wind Turbine

Takashi KARASUDANI, Kimihiko WATANABE and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: karasu@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

We theoretically and experimentally studied on the dynamical property of a small wind turbine. We assumed that the aerodynamic properties of a blade were given by a torque coefficient, which was a function of a tip speed ratio only. A numerical model of a wind turbine having an optimum regulation system was given. We derived formulas of response time to the change of wind speed and load as a function of the torque coefficient, inertial moment and wind speed. We showed that the deviation of the tip speed ratio from the optimum value by the change of wind speed was approximated well to the second order of wind variation. The deviation was expressed by a function of characteristic frequency. We also got the expression for the phase difference between wind and power variations. Those results were in good agreement with the numerical simulation for the model. We propose a framework to discuss the dynamical property of a small wind turbine.

Key words: wind turbine, dynamical property, torque coefficient, response time, delay of phase, change of wind direction

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、化石燃料の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ィ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。この目的にふさわしい、効率が良く安全で低騒音な小型風車の開発が活発に行われている。

風力発電機に関する多方面からの研究がある。空力的観点からの翼に関する研究。電磁氣的観点から発電機に関する研究。システム制御の観点から翼と発電機の適合に関する研究など多くの研究が行われている。

風車の運動を支配するもっとも基本的な物理量は風によるトルクである。翼の空力係数とトルクとの関係を求めるための手法には、翼素運動量理論、渦理論、局所循環理論などがある^{1,2)}。

風洞実験により、翼形状と空力特性の関係を翼の周りの流れを調べることで解明しようとする研究もある¹⁾。

風力発電にふさわしいコギングトルクが小さく軽量で効率の高い発電機に関する研究も活発である。制御を簡潔にするため、回転数の2乗に比例するトルク特性をもつ発電機を作成する試みもなされている³⁾。

風車の制御に関しては、パワーエレクトロニクスの進展により風速の変化に応じて負荷を調整することにより、出力の最大点を追跡する最適制御がなされるようになってきた⁴⁾。

上記の研究とは異なり、本論文では風車を構成する個々の要素の詳細に立ち入ることはせず、風車の運動の一般的な取り扱い方を検討する。風車の運動を風により駆動される固定軸周りの回転運動として扱い、与えられたトルク係数の下における風車の振る舞いを検討する。風車の動的振る舞いを議論する際の骨組みを構築することを目的とする。

第2章ではトルク係数の性質について考察し、風車の振る舞いを調べるために用いる数値モデルについて述べる。第3章では風速や負荷の変動に対する風車の応答時間を見積もる表式を導く。第4章では風速の変化に対する振る舞いを、第5章では風向の変化に対する振る舞いを調べる。第6章にまとめを記す。

*九州大学応用力学研究所

2. 風車の運動方程式と数値モデル

2-1 運動方程式とトルク係数の形状

風車の運動を支配しているのは風による翼の回転を促すトルク T_U と負荷による回転を抑制するトルク T_L である。 I を風車(翼と発電機その他を含んだ)の慣性モーメントとすると、風車の運動方程式は次式のように書ける。

$$I \frac{d\omega}{dt} = T_U - T_L \quad (1)$$

風によ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。以下の考察では、風速を一定に保ち測定された、言わば、静的な空力特性を基に、風速が変化したときの風車の応答を議論する。風速が変化したとき翼の周りの流れは、過渡の状態を経て風速に応じた流れになる。静的な空力特性を用いた議論では、過渡の状態を無視している。この準静的近似が成立すると期待されるのは、風速が変化したときに翼まわりの風の流れは、速やかに過渡の状態から風速に応じた状態の流れになると予想されることによる³⁾。

翼まわりの流れが風速に応じた状態になるためにかかる時間は翼が通過する時間のオーダーと見なせる。この時間が、翼が1回転するために要する時間と比べて小さいならば、翼は常に風速に応じた状態の空力特性を示すものと期待できる。過渡の状態が無視できるためには、風速の変動に対しても条件が課される。風速の変動周期は過渡の状態の時間より長くなければならない。風が翼を通過する時間より長いことが要請される。このことより、準静的近似は風速の変動が数十Hz程度より緩やかである時に成立する。

準静的近似が成り立つ時は、よく知られているように、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 は近寄り風速) で規定される。小型風車では、風速が小さい時には翼のレイノルズ数 Re ($\equiv cU/\nu$: c は翼のコード長, ν は空気の動粘性係数) が 10^4 程度と小さいため、空力特性はレイノルズ数にも依存する。翼が発生するトルクと出力 P は λ と Re の関数であるトルク係数 $C_T(\lambda, Re)$ と出力係数 $C_W(\lambda, Re)$ を使って、次のように書ける。

$$T_U = C_T(\lambda, Re)(1/2)\rho\pi R^3 U^2 \quad (2)$$

$$P = C_W(\lambda, Re)(1/2)\rho\pi R^2 U^3 \quad (3)$$

式(2),(3)の ρ は空気密度である。出力はトルクと角速度の積であるので、

$$P = T_U \omega \quad (4)$$

式(2), (3), (4)より出力係数とトルク係数の間には次の関係式が成り立つ。

$$C_W(\lambda, Re) = C_T(\lambda, Re)\lambda \quad (5)$$

翼が発生するトルクと翼の回転数の関係から、周速比の変化に対するトルク係数の振る舞いに関して、一般に次のようなことが言える。周速比がゼロの時(静止している時)に小さな正値を持ち、 λ が大きくなる(回転数が大きくなる)につれて大きくなり最大値をとる(そのときの周速比を λ_T とする)。その後減少し、回転数が非常に速いときにはプロペラとして働くこと

になるので負の値に転じる。まとめると、 $C_T(\lambda, Re)$ は次のような性質の関数であると期待できる。

1. $C_T(0, Re) > 0$
2. $\lambda = \lambda_T > 0$ で $C_T(\lambda, Re)$ は最大値(極大)をとる
3. $\lambda = \lambda_0 > \lambda_T$ で $C_T(\lambda, Re) = 0$ となる
4. $0 < \lambda < \lambda_T$: 単調増加, $\lambda_T < \lambda < \lambda_0$: 単調減少

トルク係数が上記のように振る舞う関数であるならば、出力係数との間に成り立つ関係式(5)より $C_W(\lambda, Re)$ について、次のことが言える

1. $C_W(0, Re) = 0$
2. $C_W(\lambda_0, Re) = 0$
3. ある λ_w ($0 < \lambda_w < \lambda_0$) で最大値(極大)をとる。

また、式(5)より λ_T と λ_w の間に大小関係を導くことができる。式の両辺を λ で微分して、 $\lambda = \lambda_w$ とおくと、($\dot{C} \equiv \partial C / \partial \lambda$)

$$\dot{C}_T(\lambda_w, Re) = -C_T(\lambda_w, Re) / \lambda_w \quad (6)$$

となる。

$\lambda_w > 0, C_T(\lambda_w, Re) > 0$ であるため、

$$\dot{C}_T(\lambda_w, Re) < 0 \quad (7)$$

一方、 λ_T で $C_T(\lambda_T, Re) = 0, 0 < \lambda < \lambda_T$ 間で単調増加であるので、この間で $\dot{C}_T(\lambda, Re) > 0$ である。 $C_T(\lambda_w, Re)$ は負であるから

$$\lambda_T < \lambda_w \quad (8)$$

の関係が要請される。

これらをまとめるとトルク係数と出力係数は Fig.1 の模式図で表すことができる。

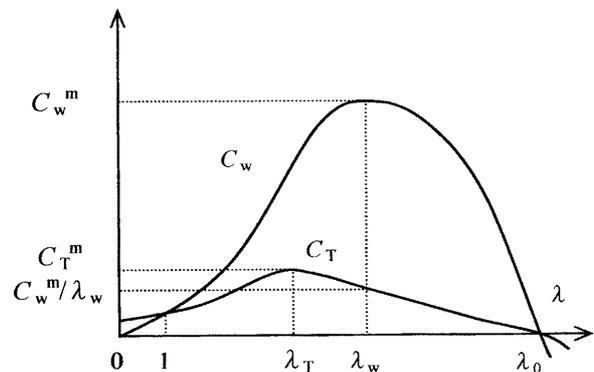


Fig.1. Diagrammatic representation of torque and power coefficients C_T and C_W vs. tip speed ratio λ .

トルク係数はレイノルズ数の変化に対してはおおよそ $Re = 10^5$ が境界値となり、次式のような振る舞いを示す。

$$\begin{cases} \frac{\partial C_T(\lambda, Re)}{\partial Re} > 0, & Re < 10^5 \\ \frac{\partial C_T(\lambda, Re)}{\partial Re} \cong 0, & Re > 10^5 \end{cases} \quad (9)$$

以後の章では、議論を簡潔にするため、レイノルズ数は充分大きいと仮定し、レイノルズ数に依存しないものとする。

2-2 数値モデル

数値計算により風速の変動による風車の振る舞いを調べるため、数値モデルについて検討する。運動方程式(1)を数値積分するためには T_U を決める必要がある。 T_U を求めるために必要なトルク係数は出力係数より式(5)の関係をを用いて決定する。出力係数は、実験結果などを参考に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する⁹⁾。式(5)によるトルク係数の決定では $\lambda=0$ で特異点となるため、 $\lambda=0$ のトルク係数は固定値 0.02 とする。

負荷トルク T_L は、翼が定常回転しているならば、翼のトルクに等しくなるので、出力係数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

$$\begin{aligned} T_L &= T_U(\lambda_w, U) \\ &= (1/2)\rho A C_T(\lambda_w) R^3 \omega^2 / \lambda_w^2 \\ &= \beta \omega^2 \end{aligned} \quad (10)$$

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。このいわゆる「オメガ二乗制御」を模擬するために、数値積分の各ステップにおいて負荷を式(6)の値になるように調整した。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。比例定数 κ は 0.5 あるいは 1.0 とした。

$$T_L^{n+1} = T_L^n + \kappa(\beta \omega_n^2 - T_L^n) \quad (11)$$

数値積分にはルンゲ・クッタ法を用いた。時間刻みは 0.001 秒、式(11)による制御は 0.05 秒間隔とした⁷⁾。

3. 風速および負荷の変化に対する風車の応答

運動方程式に基づいて風速あるいは負荷が変動した時に風車がどのように振る舞うのかを考察する。すなわち、ある動作点 λ_p で運転している時

- ①風速の変化 (負荷は一定) : $U \rightarrow U + \Delta U$
- ②負荷の変化 (風速は一定) : $T_L \rightarrow T_L + \Delta T_L$
- ③風速に応じて負荷が変化する (周速比は一定)

に対して、風車がどのように応答するのかを調べる。

3-1 風速の変化に対する応答⁷⁾

風速が U から $U + \Delta U$ に変化したときの風車の振る舞いを検討する。以下の表式では、 C_T 、 C_w の変数の表記は省略する。

風速の増加 ΔU により、動作点 (周速比) は

$$\begin{aligned} \Delta \lambda^U &= \frac{R \omega}{U + \Delta U} - \lambda_p \\ &\cong -\frac{\lambda_p}{U} \Delta U \end{aligned} \quad (12)$$

移動する (小さくなる)。

一方、風速の増加によりトルクの変化 ΔT は

$$\begin{aligned} \Delta T &= \Delta T_U \cong \frac{d}{dU} T_U \Big|_{\lambda_p} \Delta U \\ &= \left\{ \frac{\partial C_T}{\partial R_c} \frac{c}{v} U^2 \xi + \dot{C}_T \left(-\frac{R \omega}{U^2} \right) U^2 \xi + 2 C_T U \xi \right\} \Delta U \\ &= \xi U (\delta + 2 C_T - \lambda \dot{C}_T) \Delta U \\ \xi &\equiv (1/2) \rho \pi R^3 \\ \delta &\equiv R_c \partial C_T / \partial R_c \end{aligned} \quad (13)$$

となる。トルクの変化が正の時とは、風速の増加に応じて角速度が増加することになる。このトルクの増加による時間 Δt 間の角速度の増加は、運動方程式より、

$$\Delta \omega \cong \frac{\Delta T}{I} \Delta t \quad (14)$$

この角速度の増加により周速比は

$$\Delta \lambda^\omega \cong \frac{R \Delta \omega}{U} = \frac{R}{U} \frac{\Delta T}{I} \Delta t \quad (15)$$

増加する。 U の増加による λ の減少、トルクの増大による ω の増加、 ω の増加による λ の増加という、一連の動作で周速比が元の値に戻るとすると、戻るまでに要する回帰時間 Δt_U は、 λ の変化が打ち消される時間として、

$$\begin{aligned} \Delta \lambda^U + \Delta \lambda^\omega &= 0 \\ -\frac{\lambda_p}{U} \Delta U + \frac{R}{U} \frac{1}{I} U \xi (\delta + 2 C_T - \lambda_p \dot{C}_T) \Delta U \Delta t_U &= 0 \\ \Delta t_U &= \frac{I \lambda_p}{\xi R (\delta + 2 C_T - \lambda_p \dot{C}_T) U} \end{aligned} \quad (16)$$

空力係数がレイノルズ数に依存しないとき、出力係数が最大値を示す λ_w を動作点とすると、式(5),(6)より、回帰時間は

$$\begin{aligned} \Delta t_U &= \frac{I \lambda_w^2}{(3/2) \rho \pi R^4 C_w(\lambda_w) U} \\ &= \frac{2}{3} \frac{(1/2) I \omega^2}{(1/2) \rho \pi R^2 C_w(\lambda_w) U^3} \\ &= \frac{2}{3} \frac{(\text{回転のエネルギー})}{(\text{翼の出力})} \end{aligned} \quad (17)$$

と簡潔に表すことができる。

上でみてきたように、風速の増加に対してトルクの変化 ΔT が正の時、動作点に戻るよう作用するため、この動作点は安定である。トルクの変化の正負は

$$D \equiv \delta + 2 C_T - \lambda \dot{C}_T \quad (18)$$

の正負による。

$\lambda_0 > \lambda \geq \lambda_T$ では $\delta \geq 0$ 、 $C_T > 0$ 、 $\dot{C}_T(\lambda, Re) \leq 0$ であるため $D > 0$ となり、安定である。

トルク係数がレイノルズ数に依存しない ($\delta = 0$) ときには、 $0 < \lambda < \lambda_T$ における D の正負の判定は次のようにしてできる。

正負を判定する動作点 (λ_p , $C_T(\lambda_p)$) を通る 2 次曲線 $C(\lambda)$ を引く。Fig2 の実線がこれにあたる。この曲線は点 λ_p で

$$2 C_T(\lambda_p) - \lambda_p \dot{C}_T(\lambda_p) = 0 \quad (19)$$

となる。それゆえ、点 λ_p における傾きが $C(\lambda)$ より小さい点線の $C_T(\lambda)$ は $D > 0$ となり、傾きが $C(\lambda)$ より急な一点鎖線の $C_T(\lambda)$ では $D < 0$ となる。

トルク係数 $C_T(\lambda)$ は最大点 λ_T 近傍では上に凸で丸まっており, この領域では $C(\lambda)$ より急な傾きを持つことはないので, $D > 0$ となり安定な動作点である. この近傍から離れたところでも $C_T(\lambda)$ に急激な減少が無ければ $D > 0$ のままである. D が負になるということは, 風速が増加するとトルクが減少するということであるので非常に考えにくい状況である. そのため, 通常 D は λ の全領域で正になると思われる.

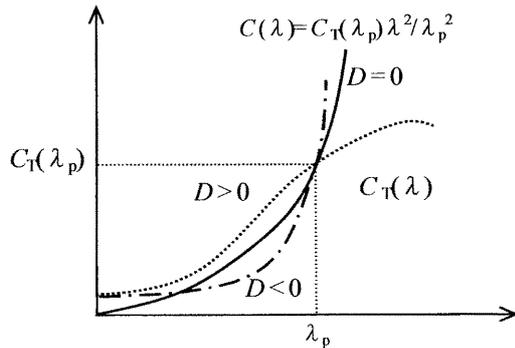


Fig.2. Judging the sign of D from the slope of a $C_T(\lambda)$ curve at working point λ_p

3-2 負荷の変化に対する応答⁸⁾

風速が一定の下で負荷が変化したときの風車の振る舞いを検討する. 負荷が ΔT_L 増加したとき, 回転させる正味のトルクが減少するため角速度が $\Delta \omega^L$ 変化 (減少) したと仮定すると, 運動方程式より,

$$\Delta \omega^L \cong -\frac{\Delta T_L}{I} \Delta t \quad (20)$$

この角速度の変化による周速比の変化は

$$\Delta \lambda^L = \frac{R}{U} \Delta \omega^L \quad (21)$$

この周速比の変化による翼が発生するトルクの変化は

$$\begin{aligned} \Delta T_w &\cong \left. \frac{dT_w}{d\lambda} \right|_{\lambda_p} \Delta \lambda^L \\ &= -\xi U^2 \dot{C}_T \frac{R}{U} \frac{\Delta T_L}{I} \Delta t \end{aligned} \quad (22)$$

となる. $\dot{C}_T < 0$ ならば翼の発生するトルクが増加して, 負荷トルクの増加分とつり合うようになれば風車は定常に回転するようになる. つりあうまでに要する時間 Δt_r は, 式(22)を ΔT_L に等しいとすると, 次式が得られる.

$$\Delta t_L = \frac{-I}{\xi R \dot{C}_T U} \quad (23)$$

式(23)より, $\dot{C}_T < 0$ ならば負荷トルクが増加したときに翼の発生するトルクも増加するため, 周速比が $\Delta \lambda^L$ 減少した点が新たな動作点となる. $\dot{C}_T > 0$ ならば負荷トルクが増加したときは静止するまで翼の回転数は減少する. 逆に負荷トルクが減少したときは, 翼トルクが負荷トルクにつりあう周速比になるまで回転数は増大する. このときの周速比は λ_T よりも大きな値になる. 負荷により動作点を定めることができるという意味で, $\dot{C}_T < 0$ の領域は安定であり, $\dot{C}_T > 0$ の領域は不安定である.

空力係数がレイノルズ数に依存しないとき, 動作点 λ_w は $C_T(\lambda_w) < 0$ であるので安定であり, 応答時間は式(5),(6)より次式となる.

$$\Delta t_L = \frac{I \lambda_w^2}{(1/2) \rho \pi R^4 C_w(\lambda_w) U} \quad (24)$$

3-3 風速に応じて負荷が変化するとき

風速の変化に応じて周速比を最適値に維持するように負荷が変化するときの応答時間について検討する. 風速の変化によるトルクの変化は式(13)で与えられる. 制御による負荷の調整のため周速比は設定値に維持されていると仮定すると, 風速変化 ΔU と角速度の変化 $\Delta \omega$ の間には次の近似式が成り立つ.

$$\lambda_p \cong \frac{R \Delta \omega}{\Delta U} \quad (25)$$

運動方程式(1)と式(13)より, 角速度の変化に対して, 次式が導かれる⁸⁾.

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} \cong \frac{R}{I \lambda_p} \left. \frac{dT_U}{dU} \right|_{\lambda_p} \Delta \omega \quad (26)$$

この式より, 風速の変化に応じて周速比を一定に維持するように負荷を調整すると, 角速度は指数関数的に変化し 63% 応答時間 Δt_c は

$$\begin{aligned} \Delta t_c &= \frac{I \lambda_p}{R (dT_U/dU)|_{\lambda_p}} \\ &= \Delta t_U \end{aligned} \quad (27)$$

となることが期待される⁹⁾. この結果, 風速に応じて最適な周速比に維持するように制御したとき, その応答時間は動作点への回帰時間に等しいと予想される.

3-4 安定性の判定

これまでの結果を考慮すると, 運転時の安定性に関しては次のようになる. 風速と負荷の両方の変動が有るとき, 両者の変化に対して安定な $\dot{C}_T(\lambda_p) < 0$ の領域では, 負荷により定まる動

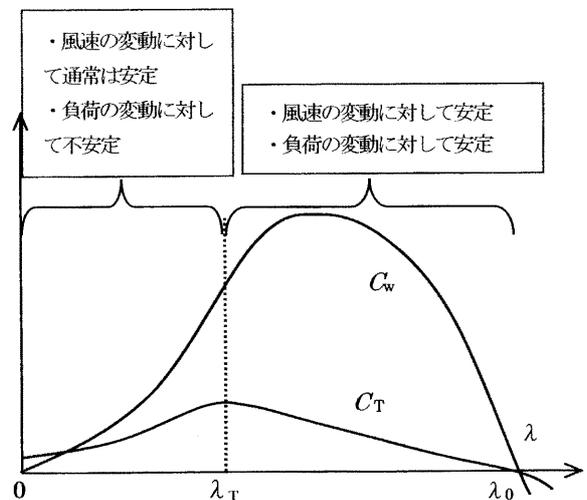


Fig.3. A drawing showing the relationship between stability and tip speed ratio.

作点に戻るように振る舞うので、安定に運転できる。第2章の式(7)で示したように、最高の効率を示す周速比 λ_w は安定な領域内にある。風速変動と負荷変動に対する安定性に関する領域図をFig.3に示す。

3.5 シミュレーション結果との比較

前節で求めた回帰時間と応答時間について2-2節で説明した数値モデルによるシミュレーションから求めた結果と比較する。計算に用いた諸元は次のようなものである。

翼半径 $R : 1.0[\text{m}]$

慣性モーメント $I : 1.00[\text{kgm}^2]$

周速比 $\lambda_w : 5.0$

空気密度 $\rho : 1.21[\text{kg/m}^3]$

モデルのトルク係数と出力係数の形状は Fig.4 に示している。出力係数は周速比5.0の時最大値をとり、その値は0.40である。

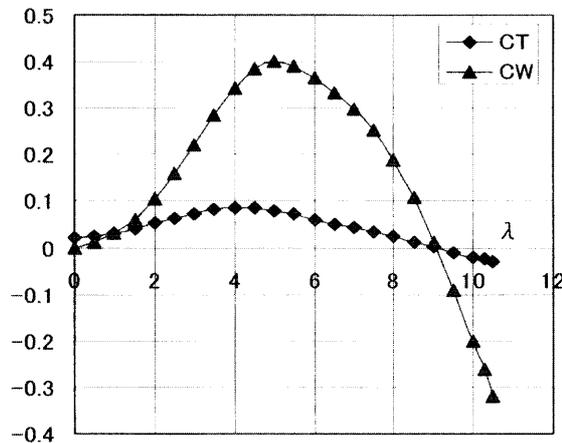


Fig.4 Curves of the torque and power coefficients of the numerical model.

風車の諸元より、式(17)(24)(27)により回帰時間・応答時間の予測式は

$$\Delta t_U = \Delta t_C = 11.0/U [\text{m/s}] \quad [\text{s}] \quad (28)$$

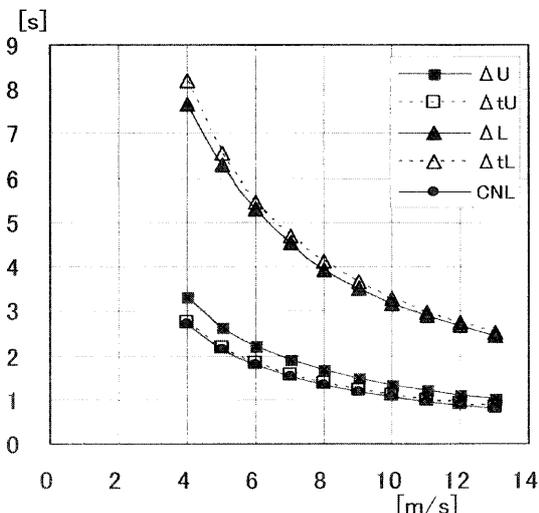


Fig.5 Comparison of response times between the values calculated by the formulas (17),(24),(27) and the values given by the simulation.

となる。シミュレーションの結果と予測式の値をFig.5に示す。シミュレーションの結果は凡例 ΔL (負荷変化), ΔU (風速変化), CNL (制御時)で、予測式の値は凡例 Δt_U , Δt_L でそれぞれ表している。シミュレーションでは風車が定常になるまで風速を一定に保ち、その後風速あるいは負荷を設定値の5%ほど増加あるいは減少させた。増加と減少に対する回帰/応答時間の平均を設定風速における回帰/応答時間とした。

負荷が変動した時には負荷トルクと翼のトルクが釣り合う周速比に漸近的に接近してゆく。そのため、シミュレーションでは変化幅の63%になるまでの時間を ΔL とした。一方、風速が変化した時の回帰時間 ΔU は、予測式の定義通り、周速比が設定周速比になるまでの時間とした。また、最適制御を行っている時の応答時間 CNL は角速度の変化が変動幅(終端値と初期値の差)の63%に達するまでの時間とした。

回帰時間に関する予測式はシミュレーション結果より17%程度小さい。負荷変動に関しては4-7%程度予測式の方が大きい。制御がかかっているときの応答時間に関しては予測式とシミュレーション結果は非常に良く一致している。以後の章において風車の振る舞いを調べる時、風車の運動を特徴づける時間として式(27)の応答時間を用いる。

4 風速変化に対する振る舞い

風速の変化に対して翼の回転運動は瞬時に対応できるわけではなく、風速に対応した運動に至るまでに遅れがある。この遅延効果として動作点の変化と風速の変動に対して位相遅れがある。遅延効果と変動の早さの関係を求めるために、数値モデルを用いて風速が正弦的に変化したときの振る舞いを調べる。

4-1 周速比の変化と風速変動振動数の関係

計算に用いた風車は①慣性モーメント $I=1[\text{kgm}^2]$ 、翼直径 $D=1.0[\text{m}]$ と② $I=0.2[\text{kgm}^2]$ 、 $D=2.0[\text{m}]$ の2種類である。また、②の風車に関しては、出力係数の最大値が0.35そのときの周速比が4.0の場合についても調べた。

風速を $10[\text{m/s}]$ に維持し出力や周速比が一定になるまで待ち、その後、 $10[\text{m/s}]$ を中心に振幅 $2.0[\text{m/s}]$ で正弦振動させた。振動

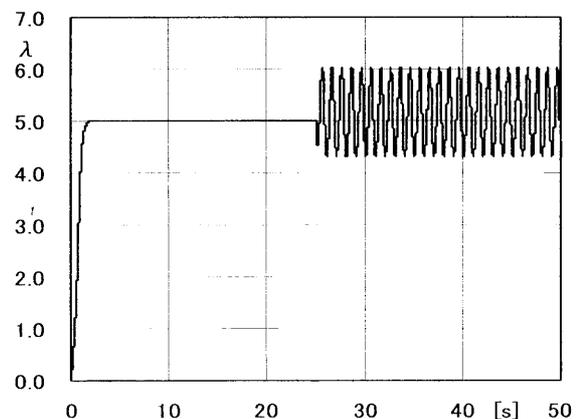


Fig.6 A sample of the simulation for $I=0.2 [\text{kgm}^2]$, $\Delta U=2[\text{m/s}]$, $f=1 [\text{Hz}]$.

周波数 f は 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 [Hz] である。Fig.6 に計算例を示す。

図から分かるように、風速が変動している間、周速比は設定値を中心に正弦的に変化した。設定値より大きい方への変位のほうが小さい方への変位より数%から 10%程度大きい。この変化の様子を表すために変動の中と偏倚の大きさを表す二つのパラメータ $\Delta\lambda$, $\varepsilon\lambda$ を導入する。

風速がステップ的に $\Delta U (>0)$ 変化したとする。この時、周速比の変化は、 ΔU 増加したときと減少したときで、

$$\begin{aligned} \lambda_+ &= \frac{R\omega}{U + \Delta U} \\ &= \lambda_w - \lambda_w \frac{\Delta U}{U} + \lambda_w \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2 - \lambda_w \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^3 + \dots \quad (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_- &= \frac{R\omega}{U - \Delta U} \\ &= \lambda_w + \lambda_w \frac{\Delta U}{U} + \lambda_w \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2 + \lambda_w \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^3 + \dots \quad (31) \end{aligned}$$

となる。この2式より、次の2つのパラメータで変動の中と偏倚を表すことができることが分かる。

$$\Delta\lambda \equiv \frac{1}{2}(\lambda_- - \lambda_+) \equiv \Delta\lambda_\infty g \quad (32)$$

$$\varepsilon\lambda \equiv \frac{1}{2}(\lambda_- + \lambda_+) - \lambda_w \equiv \varepsilon\lambda_\infty h \quad (33)$$

$$\Delta\lambda_\infty \equiv \lambda_w \frac{\Delta U}{U}, \quad \varepsilon\lambda_\infty \equiv \lambda_w \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2$$

$\Delta\lambda_\infty$, $\varepsilon\lambda_\infty$ は風速が瞬間的に変化したときの周速比の変化であるので、各パラメータの最大値になると期待される。式(32),(33)の g, h は変動の周波数が高くなると 1 に近づく関数である。この関数を、シミュレーションの結果より、振動している周速比の最大値を $\lambda_{\text{最大}}$ 、最小値を $\lambda_{\text{最小}}$ として求めた。応答時間(17)の逆数 f_r がこの系を特徴づける応答振動数であるので、 f_r により変動の振動数を規格化した。

振動周波数と周速比の変化の関係を Fig.7, 8 に示す。図中の凡例の “ $\kappa=1, \tau_c=0.5$ ” は式(11)の比例係数を 1 に負荷の制御間隔を 0.5 秒に設定した結果である。

これらの図は風車の慣性モーメント、翼半径、出力係数や制御間隔にかかわらず風速の変化に対する周速比の変化は、 $\Delta\lambda_\infty$, $\varepsilon\lambda_\infty$ と f_r で規格化すると、それぞれ一本の曲線で表すことができることを示している。この曲線は、回帰分析より、次のようになった¹⁰⁾。

$$g(x) = 1.04(1 - \exp(-7.49x)) \quad (34)$$

$$h(x) = 1.37(1 - \exp(-3.76x)) \quad (35)$$

Fig.7, 8 より、応答振動数の半分程度以上の振動数の変動に対して、変動の中と偏倚はほぼ一定値になることが分かる。これらのパラメータを用いると、風速の変動成分の振幅が ΔU 、振動数が f である時、周速比の変化は次式で近似できる。

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lambda_w - \Delta\lambda_\infty g(f/f_r) \sin(2\pi ft) \\ &+ \varepsilon\lambda_\infty h(f/f_r) \sin^2(2\pi ft) \quad (36) \end{aligned}$$

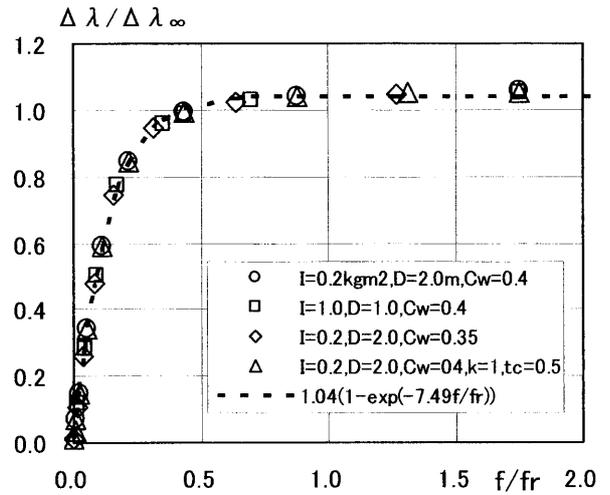


Fig.7 Width of change of tip speed ratio by the sinusoidal change of wind speed. $\Delta\lambda$ vs. f .

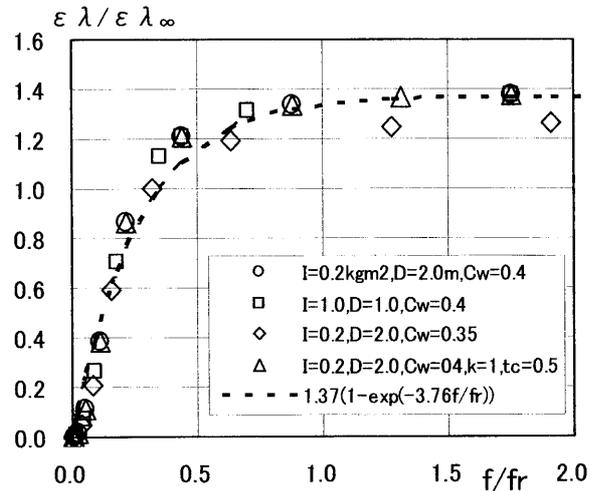


Fig.8 Displacement of tip speed ratio from the optimum value by the sinusoidal change of wind speed. $\varepsilon\lambda$ vs. f .

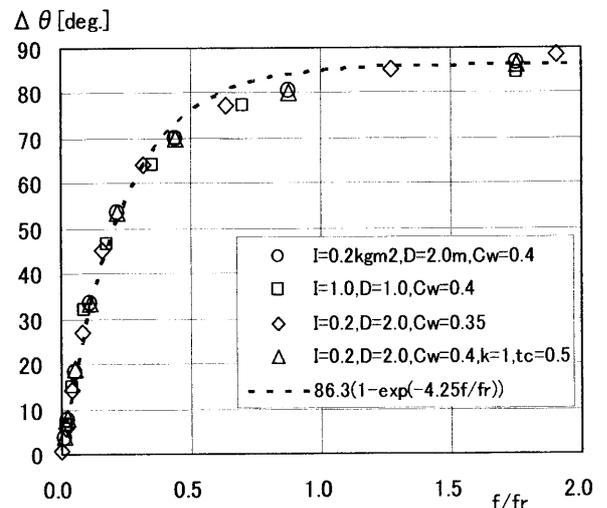


Fig.9 The difference of phase between wind and power as a function of frequency ratio. A regression line for the data is the dashed line. The expression of the line is given in the legend.

4-2 位相遅れと風速変動振動数の関係

風速が正弦的に変動するときは出力も同様に正弦的に変動する。遅延効果のため出力の変動は風速の変動に対して位相が遅れる。風速変化の早さと位相遅れの関係を求めた。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。

$$\Delta\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{U_I P_R - U_R P_I}{U_R P_R + U_I P_I}\right) \quad (37)$$

上式において、風速の複素フーリエ成分を U 、出力の複素フーリエ成分を 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.9 に示す。図中の点線は数値計算より求めた位相遅れを回帰分析した曲線である。曲線の式は次のようになった。

$$\Delta\theta(x) = -86.3(1 - \exp(-4.25x)) \quad (38)$$

4-3 変動風下の平均出力

風速が変化しているときの風車の性能を平均出力で評価する。平均する時間を T とすると平均出力 P_A は

$$P_A = \frac{1}{T} \int_0^T C_w(\lambda(t)) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3(t) dt \quad (39)$$

と書ける。

風速を平均値 U_A と変動値 u に分離して式(39)に代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{P_A}{(1/2)\rho\pi R^2 U_A^3} &= \frac{1}{T} \int_0^T C_w(\lambda(t)) dt + \frac{3}{U_A} \frac{1}{T} \int_0^T C_w(\lambda(t)) u(t) dt \\ &+ \frac{3}{U_A^2} \frac{1}{T} \int_0^T C_w(\lambda(t)) u^2(t) dt + \frac{1}{U_A^3} \frac{1}{T} \int_0^T C_w(\lambda(t)) u^3(t) dt \end{aligned} \quad (40)$$

となる。式(40)に式(36)を代入して一周期に渡って平均することにより、風速が正弦振動している時の平均出力を推定できる¹⁰⁾。

風速の変動成分と出力係数との相関を無視する近似をすると、風速変動の1次の項は零になるので、出力は次式で推定できることになる。

$$\frac{P_A}{(1/2)\rho\pi R^2 U_A^3} \cong C_w^A \cdot (1 + 3\sigma^2) \quad (41)$$

$$C_w^A \cong \frac{1}{T} \int_0^T C_w(\lambda(t)) dt \cong \frac{1}{\lambda_- - \lambda_+} \int_{\lambda_-}^{\lambda_+} C_w(\lambda) d\lambda$$

$$\sigma^2 \cong \frac{1}{U_A^2} \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt$$

風速変動の分散 σ^2 は正であるので、変動風時の出力が平均風速が同じ定常風時の出力より増加するかあるいは減少するかは、平均出力係数 C_w^A に依存することになる。

5 風向変化に対する振る舞い

垂直軸風車では風向変化を考慮しなくて良いが、水平軸風車では風向が変化することにより風車の翼面に対して斜めから風が当たるようになる。このため、水平軸風車では風向変化によ

る影響を考慮しなければならない。翼に当たる風を翼面に垂直な成分と平行な成分に分けてその影響を検討する。翼面に垂直な成分は回転による相対風と常に直交しているため相対風を下流側へ傾けるように作用する。傾きの大きさは翼の回転位置によらず常に一定であるので、翼は迎角が最適な値になるようにこの傾きを考慮して設計されている¹²⁾。

翼面に平行な成分は回転に伴い相対風の大きさと向きを変えようように作用する。平行な成分による相対風の向きの変化は翼面に沿った方向であり、迎角は変化しないので、翼の空力特性に及ぼす影響は小さいと思われる。相対風の大きさの変化は迎角の変化を引き起こす。その影響は平行な成分を V 回転軸からの距離を r とすると、 $V/r\omega$ の程度である。一方、風車の出力は主に翼端領域が担っており、また水平軸風車では周速比は通常4~7程度である。そのため、翼端領域では $V/r\omega$ の値は小さいので、平行成分が風車の特性に及ぼす影響も小さいと期待される。この推論を検証するため風洞実験を行った。

5-1 試験装置の概要

風向を変化させるため、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.10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。サーボモータにより回転する軸②を配置し、軸①②の間を長方形の連結板で接続した。軸②の回転により軸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。連結板の取り付け位置を調整し、首振り運動の最大角度がおよそ50°になるようにした。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。

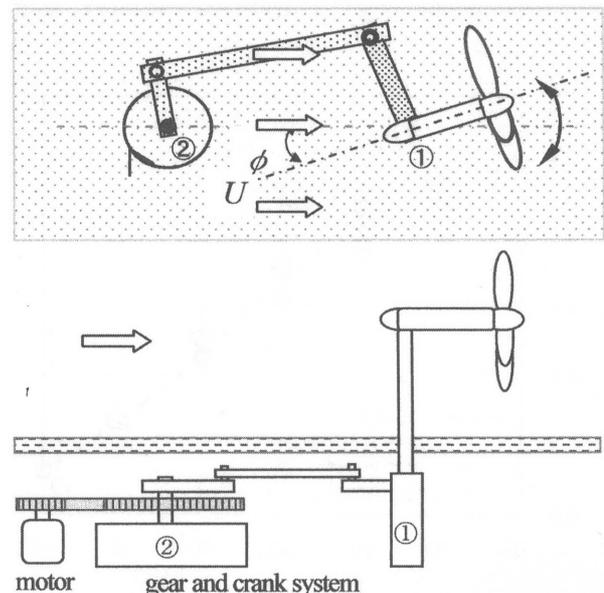


Fig10. Schematic diagram of the experimental setup.

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 [kgm²]

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.11 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。

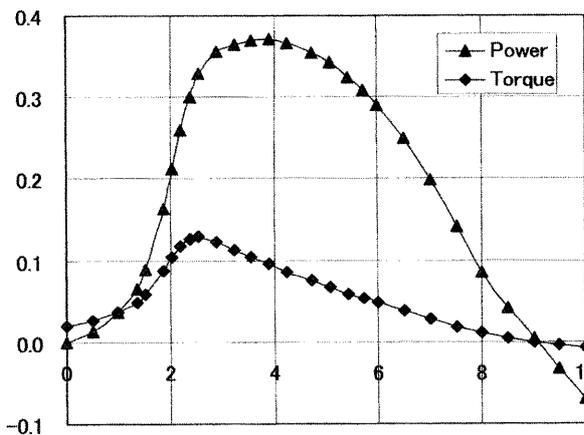


Fig.11 Torque and power coefficients of the wind turbine used in the wind tunnel experiment.

5-2 風洞実験の結果

近寄り風速を 9[m/s]に設定し, ヨー角度を 0°より 60°まで約 10°ごとに設定したときの出力の様子を Fig.12 に示す。縦軸は各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。Fig.13 に最大出力時の周速比を角度が 0°の時の周速比 λ_0 で規格化した値を示す。近寄り

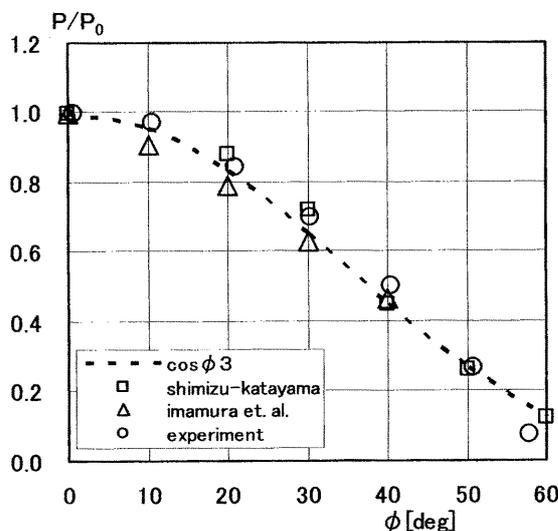


Fig.12 The ratio of power to the power at $\phi=0$ for each yaw angle. Reference data is in ref. (11), (12). Dashed line is $\cos^3 \phi$.

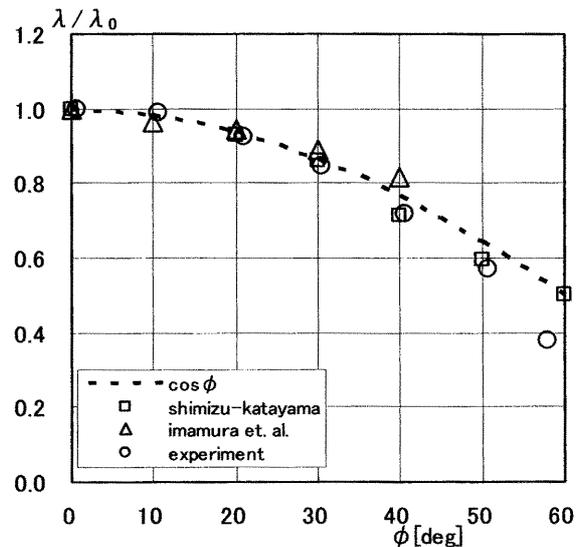


Fig.13 The ratio of the tip speed ratio of maximum power to that at yaw angle $\phi=0$ for each yaw angle. Reference data is in ref. (11), (12). Dashed line is $\cos \phi$.

風の翼面に垂直な成分を参照風速として周速比を定義すると, 空力特性が垂直成分で規定されるならば, 出力係数が最大となる周速比はヨー角度によらず一定値になる。垂直成分を参照風速とした周速比が一定ならば近寄り風速を参照風速に取った周速比はヨー角度の余弦に比例することになる。Fig.12,13 には清水-片山¹¹⁾, 今村-沼尻-黒田¹²⁾らの実験から求めた値も載せている。

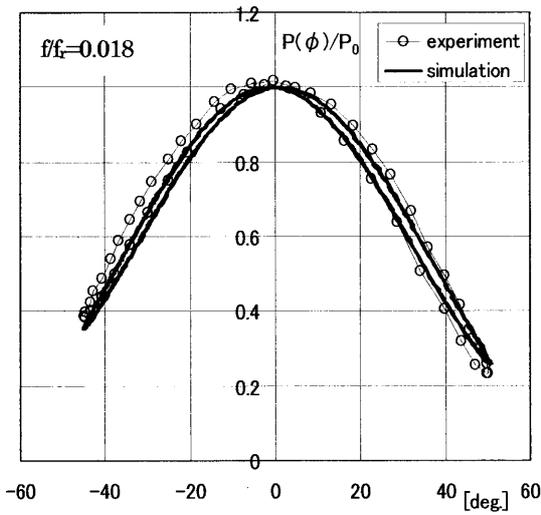
Fig.12,13 は, 最高効率点では翼面に垂直な成分により風車の空力特性が決まることを示している。清水-片山, 今村-沼尻-黒田の実験結果を見ると, 失速領域より大きい周速比域ではヨー角度の変化によるトルク係数 (出力係数) の変化は Fig.12,13 の関係でだいたい近似できる。これらのことより, 風向の変化はヨー角度の余弦に比例して風速が変化すると見なして良いと思われる。

5-3 周期的変動実験と数値計算の結果

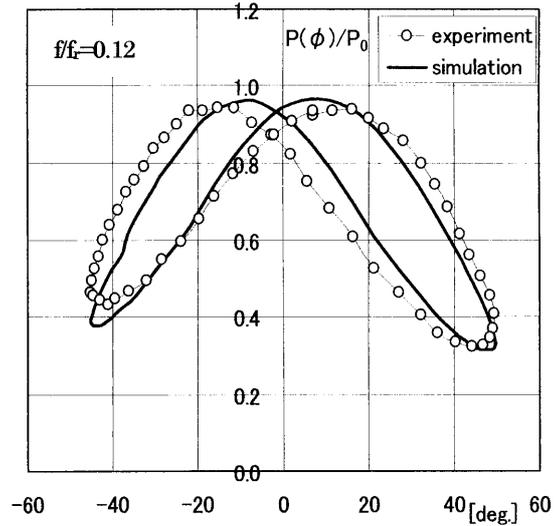
風向変化に対する風車の振る舞いを調べるため, 周期的にヨー角度を変化させる実験を行った。サーボモータの回転数を変更することにより首振り運動の周期を変化させた。実験では周期を $T=5, 10, 20, 30, 60, 420$ [sec] とした。

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, シミュレーションを行った。シミュレーションの結果と風洞試験の結果を Fig.14 に示す。

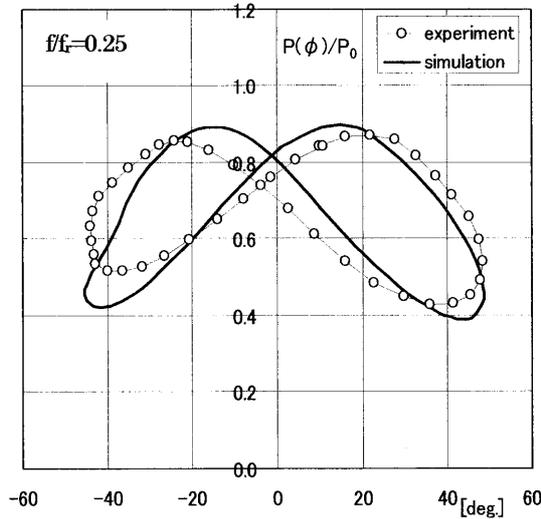
実験とシミュレーションの結果は概ねあっている。ヨー変化の周期が短くなるにつれ位相差が大きくなり, Fig.12 の余弦の 3 乗特性から外れていく様子はよく再現されている。ヨー角度の変化に対して出力の変化が遅れるためヨー角度と出力の関係がメガネ形ループになることは清水-片山によって報告されている¹¹⁾。ヨー角度の変化と出力変化の関係がメガネ形ループになる原因は, 出力変化が風速変化に対して, 慣性モーメントに起因する, 位相遅れを生じるためである。



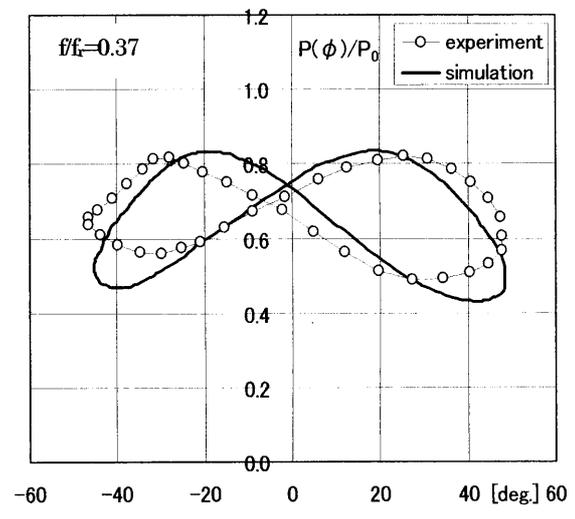
(a)



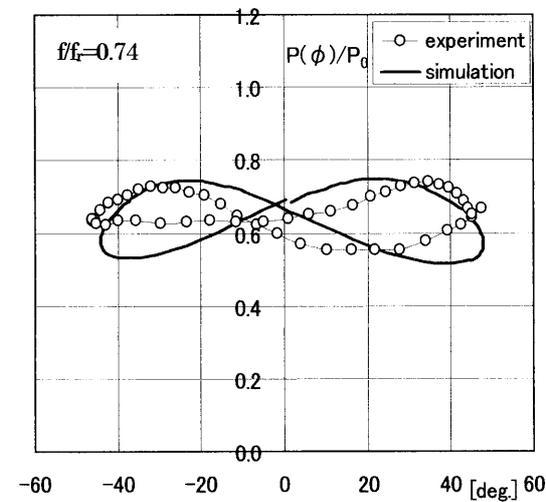
(b)



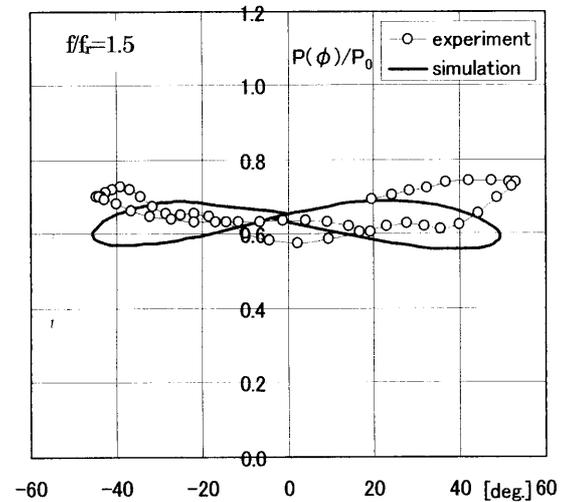
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 14 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 $f_c=0.27[Hz]$. The figures are drawn for one period.

シミュレーションと実験結果は定性的な傾向はよい一致を示している。応答周波数の2割程度までの緩やかな変動の時には定量的にも良い一致を示している。しかしながら、変動が応答周波数程度以上では定量的には一致しているとは言い難い。原因としては、支持軸の回転による相対風を考慮していないこと、最高効率点から離れるとトルク係数の“余弦近似”が良くないことによるのではないと思われる。

位相差とヨー変化の周波数の関係を Fig.15 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、式(17)で定義される、応答周波数は $f_f=0.27$ [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.15 の凡例 “calculate” は式(38)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 $f/f_f=1.5$ 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。

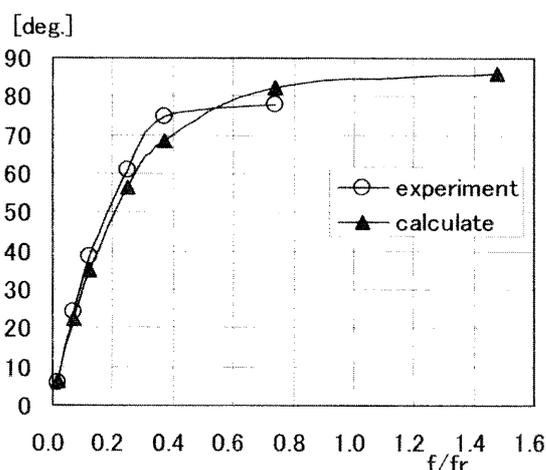


Fig.15 Phase delay vs. frequency ratio. Triangle marks are calculated by the regression equation (38).

6 まとめ

風車の空力特性を規定するトルク係数と出力係数について周速比によりどのように振る舞うのかを考察した。トルク係数が一山曲線で表すことができるならば、トルク係数が最大値を取る周速比は出力係数が最大値を取る周速比よりも常に小さいことを示した。

トルク係数を基に風速および負荷が変動したときの風車の応答について考察した。風速の変動により動作点に変化したとき、元の動作点に回帰するまでの回帰時間を求めた。また、負荷の変動に対しては、負荷により定まる動作点に移行するまでの時間をもとめた。最適制御を行っている時は周速比が一定に維持されていると仮定して応答時間を求めた。これらの動特性を定める時間は風車の慣性モーメントに比例し、風速に反比例することが分かった。

風速が変化するときの出力を予測する方法を検討した。風速の変動振動数と周速比の最適値からの変位を関係づける式を導いた。また、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。平均出力を、この変位領域内を一樣に変化するとして平均した平均出力係数と風速変動の分散で表した。

風向変動に対する風車の振る舞いを調べるため、ヨー角度の変化に対する出力の変化を調べた。出力はヨー角度の余弦の3乗に比例することを示した。また、周速比の参照風速として近寄り風の翼面に垂直な成分を用いると、出力係数が最大となる周速比はヨー角度によらずほぼ一定になることを示した。この結果、風向の変化はヨー角度の余弦に比例して風速が変化した場合と解釈できることが分かった。

この結果に基づいて、風向の変化に対するシミュレーションを行った。出力変化は風向変化より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シミュレーション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きました。ここに記して深く感謝いたします。

また、詳細な風洞実験をしていただいた当時の学生であった伊庭氏、沖野氏、高田氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 清水幸丸：風力発電技術、(株)パワー社、(1999)。
- 2) 牛山泉：風車工学入門、(株)森北出版、(2002)。
- 3) 塩田剛, 井坂勉, 関和希: CCレス方式風力用発電装置の開発 (風力発電システムと発電機の整合性に関する研究), 日本風力エネルギー協会誌, 32, No.2, pp.117-122, (2008)。
- 4) 例えば, 久保大二郎: マイクロ風力発電機の設計と製作, OQ出版社, (2007)。
- 5) 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)。
- 6) 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)。
- 7) 烏谷隆, 渡辺公彦, 大屋裕二: 小型・マイクロ風車の風速変動に対する応答について, 九州大学応用力学研究所所報, 127, pp69-73, (2002)。
- 8) 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, pp.120-123, (2007)。
- 9) 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)。
- 10) 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)。
- 11) 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, No.445, pp.1869-1878, (1985)。
- 12) 今村博, 沼尻智宏, 黒田淳: 斜め流入風における水平軸風車ロータ周りの非定常流れ (速度場と流体力の計測および推定), ターボ機械, 33, No.3, pp178-184, (2005)。