自己可変ピッチ翼を有する波力タービンの研究*
(周期的往復流における性能評価)金子 賢二^{*1}, 瀬戸口 俊明^{*1},
濱川 洋充^{*2}, 井上 雅弘^{*3}Air-Turbine with Self-Pitch-Controlled Blades
for Wave Power Generator(Estimation of Performances in Periodically
Oscillating Flow)Kenji KANEKO, Toshiaki SETOGUCHI,
Hiromitsu HAMAKAWA and Masahiro INOUE

In the development of an air-turbine with self-pitch-controlled blades for a wave power generator, existence of hysteretic characteristics in a reciprocating flow has been examined, which results in the inaccurate prediction of performance in a quasi-steady analysis. In order to clarify the usefulness of the quasi-steady analysis, a numerical simulation has been made by use of the experimental results obtained from a steady unidirectional flow-condition. The comparison between the analysis and experiment has shown that the quasi-steady analysis is available for this turbine. Furthermore, the running and starting characteristics have been investigated analytically taking into account the blade turning process.

Key Words: Fluid Machine, Wave Power Turbine, Wave Power Generator, Self-Pitch-Controlled Blades, Quasi-Steady Analysis

1. まえがき

波力発電用タービンとしてウエルズタービンが弁の保守に難点のある従来の波力発電用タービンの欠点を克服するものとして注目されているが、ウエルズタービンは通常の軸流タービンに比べて効率が低く、さらに高速型であるため軸の保守に不安がある。⁽¹⁾そこで著者らは、図1に示すような動翼が波の往復運動により自動的に揺動する自己可変ピッチ翼波力タービンを提案し、本タービンがウエルズタービンに比べて起動特性に優れ、かつ低回転数で高出力を達成できることを定常モデル試験により示した。⁽²⁾

ところで、自己可変ピッチ翼波力タービンの設計法については、在来の軸流タービンのように半径平衡条件を考慮して行う方法もあるが、複雑な二次流れや先端すきま流れの影響は考慮しにくいので、構造が簡単な本タービンの場合はモデルを試作して定常流でター

ビン試験を行い、その結果よりタービンの非定常特性を算出(準定常解析)する方が得策と思われる。しかし、ウエルズタービンのヒステリシス特性⁽³⁾のように準定常解析が妥当でない場合もありうるので、自己可変ピッチ翼波力タービンについてもその妥当性を検討する必要がある。

本研究は、自己可変ピッチ翼を有する波力発電用タービンの設計法を確立するための一段階として、前報⁽²⁾で報告した定常モデル試験結果を用いて非定常作動特性の解析を行い、取付け角を固定した状態での往復流における実験結果と比較することで、本タービンにおける準定常解析の妥当性を検討する。なお本論文の解析的および実験的取扱いは周期的な往復流に限定する。

図1 自己可変ピッチ翼の概要

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月14日。

^{*1} 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町一)。

^{*2} 学生員、佐賀大学大学院。

^{*3} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎町)。

2. 記号

- b : 翼高さ
 C_a : 入力係数 $= \Delta p_0 Q / \{ (1/2) \rho (v_a^2 + U_R^2) z b z V_a \}$
 C_H : モーメント係数 $= M / (\rho \omega_1^2 L^2 / 2)$
 C_p : 圧力係数 $= (p - p_1) / (\rho \omega_1^2 / 2)$
 C_T : トルク係数 $= T_i / \{ (1/2) \rho (v_a^2 + U_R^2) z b z R \}$
 f : 波の振動数
 F : 無次元トルク $= T_i / (\pi \rho V_a^2 R^3)$
 I : 慣性モーメント
 L : 翼弦長
 M : ピッチング・モーメント
 p : 翼面圧力
 p_1 : 羽根車入口静圧
 Q : 体積流量
 R : 平均半径
 S : 無次元周波数 $= Rf / V_a$
 t : 時間
 t^* : 無次元時間 $= tf$
 T_i : 出力トルク
 T_L : 負荷トルク
 U_R : 平均半径における周速
 V_a : 平均流入軸流速度
 V_A : v_a の最大値
 ω_1 : 相対流入速度

- x : 前縁から翼弦方向の距離
 X_I : 無次元慣性モーメント $= I / (\pi \rho R^5)$
 X_L : 無次元負荷トルク $= T_L / (\pi \rho R^3 V_a^2)$
 y : x 軸に垂直な距離
 z : 翼枚数
 α : 翼入口における平均迎え角
 γ : 翼の取付け角
 Δp_0 : 空気室全圧と大気圧の差
 $\bar{\eta}$: 波の一周期の平均効率
 ρ : 空気密度
 ω : ロータの角速度
 ω^* : 無次元角速度 $= \omega / f$

3. 非定常作動特性の解析

ここでは定常流におけるタービン特性を用いて、非定常運動を行うタービン動特性の解析を準定常的考えで行う。さて波力発電用ウエルズタービン（設定取付け角 $\gamma = 0^\circ$ ）の定常特性については、数多くの研究^{(4)~(8)}がある。自己可変ピッチ翼波力タービンで対象とする取付け角の範囲は小さいので、 $\gamma = 0^\circ$ と $\gamma \neq 0^\circ$ における翼列干渉の差異は無視できると仮定すれば、ウエルズタービンの性能試験結果を用いて本タービンの平均効率を推算することができる。すなわち取付け角 $\gamma \neq 0^\circ$ のときと $\gamma = 0^\circ$ のときのトルク係数や入力係数〔文献(2)で定義〕は、相対流れに対する迎え角が同一であれば同じ値になると仮定して特性を推定する。

図2は、前報⁽²⁾で示したNACA0020翼（翼枚数6）の取付け角を固定して一方方向定常流で得られた自己可変ピッチ翼波力タービンの特性試験結果である。図2の二点鎖線はウエルズタービンの特性に対応し、このトルク係数と入力係数を用いて、 $\gamma \neq 0^\circ$ の場合の正弦波状軸流速度中の一周周期における平均効率 $\bar{\eta}$ を推定した結果を図3に示す。図より、 γ とともに $\bar{\eta}$ の最大値が増加し、最大効率を示す V_a/U_R が大きくなることが

(a) トルク係数

(b) 入力係数

図2 定常流におけるトルクおよび入力係数と相対流入角の関係

図3 定常データ ($\gamma = 0^\circ$) より推定した平均効率

わかる。なお前報⁽²⁾に示したように不規則波気流中における自己可変ピッチ翼波力タービンの最適な取付け角は約 6° であるため、以下の議論では $\gamma \leq 6^\circ$ について考察を行う。

4. 実験装置と方法

本報では、周期的な往復流におけるタービンの空力的非定常特性を調べることを目的とするので、可変ピッチ機構は設けず翼の取付け角 γ を固定した状態で特性試験を行った。供試タービン(NACA0020, 6枚翼, $l = 90\text{mm}$)はマイコン制御でピストンを駆動することにより任意波形が得られる特殊風洞⁽⁹⁾に設置し、流速の時間変化を正弦波状としタービン回転数を一定に保って非定常特性を求めた。また正弦波気流中で翼に働くピッチング・モーメントを算出するため、NACA0015翼(6枚翼)の翼面圧力分布の測定を行った。

5. 実験結果と考察

5.1 準定常解析の妥当性 ウェルズタービンの挙動は、次式で与えられる回転軸まわりのロータの運動方程式により解析できる。⁽²⁾

$$S^2 X_1 (d\omega^*/dt^*) + X_1 = F(\omega^*, t^*) \dots \dots \dots (1)$$

ここで F はロータにより発生する無次元トルクで、周期的往復流に対しては $F = zb1C_T(\alpha)(v_a/V_a)^2/(2\pi R^2 \sin^2 \alpha)$ で与えられる。⁽³⁾式(1)は波の運動 $v_a/V_a(t^*)$ と定常流れにおけるトルク特性 $C_T(\alpha)$ が与えられれば初期値問題として数値解法で解くことができる。周期的往復流の作動特性は波の一周期における平均値によって得られ、一周期における平均値に $\bar{\omega}$ を付せば、軸受などの損失動力を含むタービン出力は $\bar{T}_L \bar{\omega} = \bar{X}_L \bar{\omega}^* \pi \rho V_a^2 R^3 f$ となる。従って、タービンの平均効率は $\bar{\eta} = \bar{T}_L \bar{\omega} / \Delta p_a \bar{Q}$ で与えられる。実験で求めた平均効率と準定常解析により算出した平均効率の比較を図4に V_a/U_R に対して示す。図は設定取付け角 6° の場合で、一点鎖線

と破線はそれぞれ図2で示した $\gamma=0^\circ$ の定常データを用いて算出した推定値と $\gamma=6^\circ$ の定常データを用いて算出した推定値である。図より実験値(実線)は破線とよく一致するが、一点鎖線とはかなり異なる。詳細については後述するが、この事実は $\gamma=0^\circ$ の定常データを用いて $\gamma \neq 0^\circ$ の性能を推定する方法は妥当でないことを示している。

図5は、準定常解析により求めた平均効率の最大値 $\bar{\eta}_{mt}$ と実験により求めた最大効率 $\bar{\eta}_{me}$ の比を取付け角 γ に対して示す。図の $\bar{\eta}_{mt}$ については、 $\gamma=0^\circ$ と $\gamma=\gamma^\circ$ の定常データから算出した場合をそれぞれ破線と実線で示している。図より、 $\gamma=0^\circ$ では $\bar{\eta}_{mt}/\bar{\eta}_{me} > 1$ であり、 γ の増加とともに実線は減少して $\bar{\eta}_{mt}/\bar{\eta}_{me} \approx 1$ となるが、破線は増加し続けることがわかる。 $\gamma=0^\circ$ において $\bar{\eta}_{mt}/\bar{\eta}_{me} > 1$ になる理由は、文献(3)で述べたようにウェルズタービン特有のヒステリシス特性のためである。 $\gamma > 2^\circ$ の範囲では実線は $\bar{\eta}_{mt}/\bar{\eta}_{me} \approx 1$ であり、本タービンのヒステリシス特性の影響が無視し得ることを示している。この事実は図6に示す相対

図5 実験と解析の最大平均効率の比較

(a) $\gamma = 0^\circ$ (b) $\gamma = 6^\circ$

図6 取付け角によるヒステリシスの差異

図4 実験結果と解析結果の比較

図7 翼面圧力分布

流入角に対する C_a の変化からも明らかである。すなわち図6(b)に示す $\gamma = 6^\circ$ の場合は、図6(a)の $\gamma = 0^\circ$ の場合に比べて前方の翼のウェークが負圧面から遠ざかるので文献(3)で述べたようなヒステリシスは小さくなる。以上の考察より、図5の γ の増加にともなう破線の増加は、解析において採用した仮定、すなわち $\gamma = 0^\circ$ と $\gamma \neq 0^\circ$ の翼列干渉の差異を無視した仮定が適切でないことによると結論でき、図4の平均効率の差異もこのために生じたものである。以上の議論より、自己可変ピッチ翼波力タービンではピッチ角 γ が比較的小さな場合でも、 $\gamma = \gamma^\circ$ の定常データを用いた準定常解析が非定常特性を推定する際に有効であると結論できる。

5.2 取付け角の反転過程を考慮した非定常特性

以上の解析では空気流の方向が変わると同時に設定取付け角まで翼が反転すると仮定した。しかし実際には摩擦トルクのためある流入条件に達するまで反転が完了せず、タービントルクを発生しない。従って、翼に作用する回転モーメントに関する資料は、可変ピッチ機構の設計に不可欠であるばかりでなく、往復流における性能の定量的予測にも必要である。ここではその基礎的資料を得るために、NACA0015翼(翼枚数6、 $l=90\text{mm}$)を用いたロータの $\gamma=0^\circ$ の場合について、翼面

図8 ビボット位置がモーメント係数に及ぼす影響

図9 タービン翼の最小有効相対流入角が平均効率に及ぼす影響

圧力分布を測定し、圧力分布に基づいて図1に示す x 軸上の支点(ビボット)まわりのピッチング・モーメントを算出した。⁽¹⁰⁾なお翼面圧力測定は、翼スパン中央で行った。すなわち翼の前縁、正圧面、負圧面に合計41個の圧力孔を設けてロータ軸の中心から圧力を取り出し、ロータの回転による遠心力の影響を補正して翼面圧力を求めた。図7はその代表例を示し、相対流入角が 10° の場合である。図の縦軸および横軸はそれぞれ圧力係数 C_p および前縁からの距離と翼弦長との比 x/l である。圧力係数分布における負圧面前縁近傍のへこみは、前方の翼から流出するウェークとの干渉により生じたものと思われる。⁽¹¹⁾

図8は、ビボット位置が翼のピッチング・モーメント係数 C_m に及ぼす影響を示す。図中の $(x/l)_p$ はビボットの位置を示し、例えば $(x/l)_p=0$ の曲線は前縁回りのモーメント係数である。なおモーメント M については図1に実線で示した空気流の方向と翼形に対して矢印 M で示す回転方向を正とする。図より、 $(x/l)_p < 0.3$ までは相対流入角の増加とともに C_m は正值で増加するが、 $(x/l)_p=0.4$ では負値となり、 $(x/l)_p > 0.4$ では翼の揺動運動に必要なモーメントが得られないことを示す。 $(x/l)_p$ が小さいほど小さい相対流入角で大きいモーメントが得られ、揺動運動が容易に行われる。

次に翼の反転は相対流入角がある値 $[\tan^{-1}(v_a/U_R)]$ 。(これを最小有効相対流入角とよぶ)の間で行われるとして、それが平均効率 $\bar{\eta}$ に及ぼす影響をシミュレーションにより調べた。なおこの過程(反転時間中)では流量が少なく全体性能に及ぼす影響が小さいので C_T および C_a 特性は近似として $\gamma=0^\circ$ の値を使用した。すなわち、最小有効相対流入角までは $\gamma=0^\circ$ の定常データを用い、それ以上の相対流入角に対しては $\gamma=\gamma^\circ$ の定常データを用いて平均効率を推定した。図9は反転角 $\gamma=6^\circ$ の場合のシミュレーション結果である。図より反転過程が $\bar{\eta}$ に及ぼす影響は小さいが $[\tan^{-1}(v_a/U_R)]_d \approx 7^\circ$ で最大効率が得られることがわかる。

図10 反転過程を考慮した起動特性

なお最大効率点における最小有効相対流入角は、図2(a)に示す $\gamma = 6^\circ$ の定常性能において、 C_r 値が負から正になる近傍の角度に対応している。

起動特性に及ぼす反転過程の影響を調べるため、往復気流中におけるタービンの挙動(ω^*-t^* 特性)を式(1)を用いて準定常的に解析した。⁽¹²⁾

タービンへの軸流速度を正弦波状と仮定した場合の式(1)の計算結果を図10に示す。図の破線は反転過程を考慮しない場合、実線は最小有効相対流入角が 7° (図9で最大効率を示す)で、一点鎖線はウエルズタービンの場合である。図よりタービン翼の反転過程を考慮しても本タービンはウエルズタービンより起動特性に優れ、かつ低回転数化が達成できることがわかる。なお図では $t^* > 1.2$ でウエルズタービンの ω^* が $\gamma = 6^\circ$ の場合より大きくなっているが、例えば $X_L = 0.05$ と仮定して $t^* = 0$ から20まで積分した平均効率はウエルズタービン:0.06、反転過程を考慮する場合:0.13、反転過程を考慮しない場合:0.16であり、ウエルズタービンの方が劣る。

6. まとめ

自己可変ピッチ翼を有する波力タービンは、ウエルズタービンに比べて特性のヒステリシスが小さく、定

常モデル試験データを用いて非定常特性を推定する準定常解析法が設計に有効であることを確認した。またタービン翼の取り付け角の反転中の無効時間を考慮して作動および起動特性をシミュレーション計算により調べ、本タービンがウエルズタービンよりも優れていることを明らかにした。

終わりに本実験に協力された佐賀大学中野智弘助手および末次忠信技官に感謝する。

文 献

- (1) 井上・ほか3名, 機械の研究, 39-2(1987), 275.
- (2) 井上・ほか3名, 機論, 54-498, B(1988), 419.
- (3) 井上・ほか3名, 機論, 51-468, B(1985), 2746.
- (4) 井上・ほか2名, 機論, 50-459, B(1984), 2599.
- (5) 井上・ほか2名, 機論, 51-461, B(1985), 338.
- (6) S. Raghunathan et al., J. Energy, 7-3(1983), 226.
- (7) S. Raghunathan et al., J. Energy, 7-6(1983), 741.
- (8) 鈴木・ほか2名, 機論, 50-449, B(1984), 241.
- (9) 井上・ほか3名, 機論, 53-496, B(1987), 3691.
- (10) E. L. Houghton et al., Aerodynamics for Engineering Students, (1982), 451, Edward Arnold.
- (11) 井上・ほか3名, 機論, 53-496, B(1987), 3699.
- (12) 井上・ほか2名, 機論, 50-459, B(1984), 2592.