自己可変ピッチ翼を有する波力タービンの研究*

(モデル実験による性能評価)

井上 雅弘^{*1}, 金子 賢二^{*2}瀬戸口 俊明^{*2}, 濱川 洋充^{*3}

Air-Turbine with Self-Pitch-Controlled Blades for Wave Power Generator

(Estimation of Performance by Model Testing)

Masahiro INOUE, Kenji KANEKO, Toshiaki SETOGUCHI

and Hiromitsu HAMAKAWA

In order to develop an air-turbine with self-pitch-controlled blades for wave power utility, experimental investigations have been performed by model testing of turbine rotors with fixed staggered blades under steady operating conditions. Twelve kinds of rotors have been manufactured and tested to investigate the effect of setting angle, thickness/chord ratio, aspect ratio and solidity on the turbine performance. The results have shown that the self-pitch-controlled turbine is superior to the Wells turbine both in starting and running characteristics. A suitable choice of the design factors has been suggested.

Key Words: Fluid Machine, Wave Power Turbine, Air-turbine, Wave Power Generator, Self-pitch-controlled blade

1. まえがき

資源の少ない我が国においては、目先のエネルギー事情にとらわれる事なく、不慮の事態に備えて自然エネルギーを資源化するポテンシャルを高めることが必要であり、中でも波浪エネルギーの利用技術の開発は四方を海に囲まれた我が国にとって重要な課題である。現在波力発電用タービンとしてウェルズタービンが、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⁽¹⁾。しかし、ウェルズタービンの効率や自己起動性は在来タービンに比べて劣り、更に高速型であるため軸受の保守に不安がある⁽²⁾。

本研究は、これらの欠点を補う新しいタービンとして対称翼よりなる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の開発を目的とする。本報ではまずタービン翼のピッチ角を固定し

て一方向定常流でタービンの特性試験を行い、翼車の幾何形状が特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 作動原理

ここに提案する波力発電用タービンは、動翼配置などはウェルズタービンと同じであるが、図1に示す様に動翼がピボットによりハブに取付けられている。すなわち動翼はピボットまわりに設定取付け角が $\pm\gamma$ の範囲で自由に回転でき、波による往復気流により自動的にピッチング運動ができるようにピボット位置は空力中心より前縁側にある。翼は軸流速度が小さい間に反転してピッチ角が所定の取付け角に設定され、軸流速度が大きくなるとタービン作用を行う。

3. 実験装置と方法

本報では、タービンの空力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 を固定した状態で性能試験を行った。供試タービン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の往復流が得られる特殊風洞⁽³⁾に設置し、矩形に近い波形の流速一定の区間でタービン回転数を一定に保って定常特性を求めた。供試ロータについては、翼形

* 昭和62年11月4日 第947回講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月30日。

^{*1} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*2} 正員、佐賀大学理工学部 (〒814 佐賀市本庄町1)。

^{*3} 学生員、佐賀大学大学院。

にNACA4桁翼を採用し、翼厚比、翼先端の弦節比 σ_t 、アスペクト比 AR および翼の取付け角 γ がタービン特性に及ぼす影響を調べるため、表1に示す12種類のロータを用いた。なお、上記以外のタービン形状パラメータについては、ウェルズタービンの資料⁽⁴⁾を参考にして、ハブ比0.7、翼先端すきま比 TC/l (TC :翼先端すきま) 約0.01に設定し翼面は滑らかにしてある。

4. 実験結果と考察

4.1 トルク及び入力係数 図2(a)および(b)は4種類の取付け角 γ のロータについて定常流におけるトルク係数 C_T と入力係数 C_A を相対流入角 $\tan^{-1}(v_a/U_R)$ に対して示したものである。 C_T と C_A はそれぞれ次式で定義される。

$$C_T = T / \{ (1/2) \rho (v_a^2 + U_R^2) z b l r_R \} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$C_A = \Delta p_0 Q / \{ (1/2) \rho (v_a^2 + U_R^2) z b l v_a \} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに T :トルク、 ρ :空気密度、 v_a :断面平均軸流速度 ($=Q/\text{流路面積}$)、 Q :体積流量、 U_R :平均半径でのロータ周速度、 z :翼枚数、 b :翼高さ、 l :翼弦長、 r_R :平均半径、 Δp_0 :ロータ前後の全圧差である。また、図中 $\gamma=0^\circ$ の特性はウェルズタービンの定常特性である。

図2(a)より、 C_T 値は $\tan^{-1}(v_a/U_R)$ が失速相対流入角より小さい範囲では γ が大きいほど減少するが失速相対流入角より大きな範囲では γ とともに大きくなる。

図1 自己可変ピッチ翼の概要

表1 供試ロータの仕様

Airfoil	Chord length l	Aspect ratio AR	Number of blades	Tip solidity σ_t	Setting angle γ	Abbrev.
NACA 0020	90mm	0.5	3	0.29	6	N20-3
	90	0.5	4	0.38	6	N20-4
	90	0.5	5	0.48	6	N20-5
	90	0.5	6	0.57	0.4, 6, 8	N20-6
	90	0.5	7	0.67	6	N20-7
	108	0.42	5	0.57	6	N20-5'
0015	60	0.75	9	0.57	6	N20-9
	90	0.5	4	0.38	6	N15-4
0012	90	0.5	3	0.29	6	N12-3
	90	0.5	4	0.38	6	N12-4
	90	0.5	5	0.48	6	N12-5
	90	0.5	6	0.57	6	N12-6

る。また、 $\gamma \neq 0^\circ$ のロータは、失速後の C_T 値が負とならない。次節で詳細に示すが、このことは γ が大きいロータほど起動特性が優れていることに対応する。一方図2(b)において、 C_A はすべての相対流入角で γ が小さいほど大きな値を示す。これは γ が小さいロータほど高反動度形になるためである。また $\gamma \neq 0^\circ$ のロータにおいて、 $\tan^{-1}(v_a/U_R)$ の小さい領域で C_A は負値になり、相対流入角が小さいとロータが送風機として作動することを示している。上記範囲では C_T も負値となり往復流での性能が低下する作用があるが自己可変式にすればこの領域では自動的にトルクが零になるので問題はない。

4.2 起動特性 起動特性の優劣を判定するため、往復流中におけるタービンの挙動を次式により準定常的に解析⁽⁵⁾した。

$$S^2 X_I (d\omega^*/dt^*) + X_L = F(\omega^*, t^*) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 S :波の無次元周期、 X_I :無次元慣性モーメント、 ω^* :無次元角速度、 t^* :無次元時間、 X_L :無次元負

(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の特性

荷トルク, F :ロータにより発生する無次元トルクで, それぞれの定義式は文献(5)と同じである。

図2(a)に示す定常流より得られた C_T 特性を F の計算に用い, タービンへの軸流速度を正弦波状と仮定した場合の式(3)の計算結果の例を図3に示す。図より, 取付け角が大きいほど起動特性がよく, 起動後の回転数は低いことが分かる。

なお, 起動特性に及ぼすその他のパラメータの影響については次の通りである。

- (1)弦節比 σ_t が大きいほど起動特性は良い(図4)。
- (2)一般的に, 翼厚が厚い翼ほど起動特性が良くなる傾向にあるが, 薄翼と比較して差は顕著ではない(図5)。
- (3)アスペクト比 AR は0.42~0.5が最適である(図6)。

4. 3 作動特性 定常状態におけるタービン効率 η は C_T および C_A の定常特性を用いて次式より求まる。

$$\eta = T\omega / (\Delta p_0 Q) = C_T / \{C_A (v_\alpha / U_R)\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに, ω :ロータの角速度, 図7は式(4)より求めた $\eta = \tan^{-1}(v_\alpha / U_R)$ 特性の例でパラメータは γ である。図より定常流では γ が大きいほど効率がよく, $\gamma = 8^\circ$ の場合はウェルズタービンよりも効率がほぼ10%も上昇する。しかし, 実際の往復流では翼の迎え角が 0° から波高によって定まる最大迎え角まで変化するので, 効率特性に及ぼす γ の影響は必ずしも図7の傾向と一致しない。

ところで起動特性のシミュレーションと同様に, 定常特性値を準定常的に用いて任意波形の往復流中でのロータの運動方程式を解き, 十分な時間間隔の平均値を取れば, 往復流中の平均効率 $\bar{\eta}$ が得られる。任意波形中でのロータの運動方程式の定式化および解法については文献(3)に詳述している。この場合の効率特性は, 図7の代わりに縦軸に平均効率 $\bar{\eta}$, 横軸に $1/(K\omega^*)$ をとって表示する⁽³⁾と便利である。ここに, $K = r_R / (V\bar{T})$, $V = h_{1/3} / (m\bar{T})$, $\bar{T}$:波の平均周期, $h_{1/3}$:有義波

高, m :タービン入口断面積と空気室断面積の比, $\omega^* = \omega \bar{T}$ である。図8には不規則波としてISSCスペクトル分布⁽⁶⁾を有する海洋波を使用し, 上述のシミュレ

図4 起動特性に及ぼす σ_t の影響
(軸流速度が正弦波状の場合)

図5 起動特性に及ぼす翼厚の影響
(軸流速度が正弦波状の場合)

図6 起動特性に及ぼす AR の影響
(軸流速度が正弦波状の場合)

図3 起動特性に及ぼす γ の影響
(軸流速度が正弦波状の場合)

図7 定常流における効率特性

図8 不規則波における平均効率

ーションで求めた平均効率特性を示す。図によれば不規則波中では定常流の場合と異なり、効率は $\gamma=6^\circ$ のとき最大となり、最高効率はウェルスタービンよりもほぼ3%高くなるにすぎない。しかし、効率が最大になる $1/(K\omega^*)$ 値はウェルスタービンの場合よりも約1.5倍大きくなる。このことは本タービンの設計回転数がウェルスタービンのその約2/3となることを意味し、タービン低速化の観点から有利である。

図9は、同様のシミュレーションによって求めた平均効率に及ぼす弦節比の影響を示す。図より σ_t とともに効率は上昇して $\sigma_t=0.57$ のとき最大になり、 σ_t が過大になると減少する。図10は平均効率に及ぼす翼厚比の影響を示す。一般に最大効率は翼厚比が15%と20%では大差はないが、厚翼の方が最大効率を示す $1/(K\omega^*)$ 値が大きくなり、ロータの低速化に有利であると言える。また、図11に示すようにアスペクト比ARの影響については、 $0.42 < AR < 0.75$ の範囲で $AR=0.5$ の場合が高効率を示す。

以上、本実験の範囲で、起動および作動特性の両者を考慮にいれて自己可変ピッチ翼波力タービンの最適幾何形状を推論すれば、設定取付け角 6° 、翼先端弦節比0.57、翼形NACA0020およびアスペクト比0.5である。

5. まとめ

自己可変ピッチ翼を有する波力発電用タービンの開発を目的として、種々の固定取付け角で対称翼を配したタービンの定常モデル試験を行い、次の結論を得た。

(1)対称翼の取付け角を波力で自動的に反転させる自己可変ピッチ翼波力タービンは、ウェルスタービンに比べて起動特性に優れ、かつ低速回転で高出力を得る可能性がある。

(2)起動特性は、設定取付け角、翼先端弦節比および翼厚の大きいロータほど良く、またアスペクト比は0.42~0.5の場合が良い。

(3)作動特性は、翼形NACA0020、設定取付け角 6° 、

図9 平均効率に及ぼす弦節比の影響

図10 平均効率に及ぼす翼厚比の影響

図11 平均効率に及ぼすアスペクト比の影響

翼先端弦節比0.57及びアスペクト比0.5の場合が良い。

(4)上記結論(2)、(3)を総合すると、自己可変ピッチ翼を有する波力発電用タービン形状として、NACA0020近傍の翼形を用い、設定取付け角約 6° 、翼先端弦節比約0.57、アスペクト比0.5近傍が最適と推論される。

終わりに本実験に協力された佐賀大学中野智弘助手、末次忠信技官および学生の猿渡哲郎氏に感謝致します。

文 献

- (1)井上・ほか3名, 機械の研究, 39-2(1987), 275.
- (2)井上・ほか2名, 機論, 51-461, B(昭60), 338.
- (3)井上・ほか3名, 機論投稿中(論文No.86-1121A).
- (4)井上・ほか2名, 機論, 50-459, B(昭59), 2599.
- (5)井上・ほか2名, 機論, 50-459, B(昭59), 2592.
- (6)日根野・山内, 日本造船学会誌, 609(昭55), 78.