自己可変ピッチ案内羽根を有する 波力発電用衝動タービンに関する研究* (リンクで結合された案内羽根の場合)

瀬戸口 俊明^{*1}, 金子 賢二^{*1}, 谷山 英己^{*2}
前田 英昭^{*3}, 井上 雅弘^{*4}

Impulse Turbine with Self-Pitch-Controlled Guide Vanes for Wave Power Generator (Control of Guide Vanes Connected by Link Motion)

Toshiaki SETOGUCHI, Kenji KANEKO, Hideki TANIYAMA,
Hideaki MAEDA and Masahiro INOUE

Experimental investigations on improving the performance of the impulse turbine with self-pitch-controlled guide vanes are reported. A new type of guide vanes which are connected by link motion is presented and tested. The behavior of guide vanes in reciprocating flow is also shown relation to the axial flow velocity. The results show that a high-efficiency impulse turbine can developed by the use of guide vanes connected by link motion. Furthermore, it is found that the running and starting characteristics of this turbine in the reciprocating flow can be evaluated from the performance of the turbine with fixed nozzle and diffuser vanes in a unidirectional steady flow.

Key Words: Fluid Machinery, Guide Vane, Natural Energy, Ocean Wave, Impulse Turbine, Wave Power Generator, Link Motion

1. まえがき

波力発電用空気タービンとして往復気流中で作動できるウェルズタービンは、在来のタービンに比べて効率が低く、原理上ロータの周速が大きいので高出力の場合、強度、保守および騒音に難点がある。著者らは、衝動形タービンロータの前後に設置した案内羽根が、往復気流の作用で自動的にピッチ角を変えることによりノズルとディフューザの作用を交互に繰り返すタービンを提案し、固定案内羽根による性能試験に基づいてシミュレーション計算を行い、ウェルズタービンよりかなり高効率で低速運転が可能であることを示した⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、下流側案内羽根のピッチ角が所期の設定角に至らず、往復気流中でモデル試験を行った結果、効率は予想値を大幅に下回り、ウェルズタービンと同程度であった⁽³⁾。

本研究は、上記の欠点を改良するためにリンク機構

で互いに結合された案内羽根が波の往復流により自動的に揺動する波力発電用衝動タービンを新たに提案し、その非定常特性を解明するとともに、本タービンの有意性を示す。

2. 供試タービンの概要

図1は、以前著者らが提案した自己可変ピッチ案内羽根を有する衝動タービンの子午面形状の概要を示す⁽³⁾。本タービンでは、案内羽根の支持軸を図に示すようにベアリングを介してハブに取り付けているため、ハ

図1 自己可変ピッチ案内羽根を有する
衝動タービンの概要⁽³⁾

* 原稿受付 平成6年10月21日。

^{*1} 正員, 佐賀大学理工学部 (〒804 佐賀市本庄町1)。

^{*2} 学生員, 佐賀大学大学院。

^{*3} 正員, (株)西島製作所 (〒569 高槻市宮田町1)。

^{*4} 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6)。

ブ、ケーシング両側における翼端すきまを小さく設定できる。しかし、往復気流の速度振幅が大きくなるとロータ下流側の案内羽根のピッチ角（案内羽根直線部と周方向のなす角）がノズル設定角の方向に逆戻りしてディフューザ効率が低下するため、高効率のタービンは期待できない。

このディフューザ作用時の案内羽根の回転を制御するために、本論文では図2に示すように、リンクで案内羽根を結合した新たな衝動形タービンを提案する。すなわち、供試タービンの案内羽根のピボットはベアリングを介してケーシング外へ出され、ロータ前後のそれをリンク機構で結合されている。したがって、ノズル作用時（ノズル設定角を θ_1 とする）に案内羽根に作用する空力モーメントを、下流側案内羽根のピッチ角逆戻り現象の抑制に利用できるものと思われ、案内羽

図2 リンク付き案内羽根を有する衝動タービンの概要

図3 リンク付き案内羽根を有する衝動タービンの概要

根の適切なディフューザ作用（ディフューザ設定角を θ_2 とする）が期待できる。

図3にリンク付案内羽根を有する衝動タービンの外観を示している。

3. 実験装置と方法

実験装置は文献(1)～(3)と同じである。すなわち、直径1.4m、長さ1.7mの円筒シリンダ内でマイコン制御によりボールネジを回転させてピストンを駆動する往復気流発生風洞にタービン試験装置を接続し、く形状の波形および正弦波状の速度変化をする気流を発生させ、タービンの回転数を一定に保って実験を行った。実験に際しては、タービン角速度 ω 、空気流量 Q 、案内羽根を含むタービン前後の全圧差 Δp および出力トルク T を測定した。また往復気流における可変ピッチ案内羽根の挙動を調べるため、一つの翼のピボット軸にポテンシオメータを取り付け、ピッチ角 θ を測定した。なお動翼弦長を基準にしたレイノルズ数は、タービンの最大効率点近傍で約 4×10^4 である。

供試ロータは文献(2)で用いたものと同一で、外径:298mm、ハブ比:0.7、翼の厚み比:30%、翼の入口および出口角（翼前、後縁における反り線方向と軸方向のなす角）:60°、アスペクト比:0.85、翼平均高さにおける節弦比:0.5、スタック角（翼弦と軸方向のなす角）:0°、翼端すきま1mmの衝動タービンである。

案内羽根は、文献(2)、(3)で用いたものと同一で、反り角70°の円弧と直線からなる反り線を有する0.5mmの薄翼で、案内羽根の弦長 l_g :70mm、翼平均高さにおける節弦比:0.44である。なお、ハブ面は案内羽根の揺動を考慮して球状にしたが、製作の便宜上ケーシング面は円筒状とした。したがって、翼端すきまはハブ側では任意に変化させることができるが、ケーシング側では、ノズル作用時で約0.5mm、ディフューザ作用時で約8mmである。

4. 実験結果と考察

4.1 タービンの好適幾何形状 2節で示したように、リンク付案内羽根を有する衝動タービンは、ピボットをケーシングに垂直に設定していることや翼端すきまの状態が、従来著者らが提案した衝動タービン（図1）と異なる。したがって、まず定常流れにおいて、ハブの翼端すきまとタービン設定角 θ_1 がタービンの定常特性に及ぼす影響を調べた。

図4は、次式で定義される定常効率 η がハブ側のクリアランス C に及ぼす影響を流量係数 $\phi = v_a / U_R$ （ v_a : 流路断面平均軸流速度、 U_R : 平均半径 r_R におけるロー

タの回転速度)に対して示す。

$$\eta = (T\omega) / (\Delta p Q) \cdots \cdots (1)$$

図は、案内羽根のノズル設定角が $\theta_1=17^\circ$ 、ディフューザ設定角が $\theta_2=72.5^\circ$ (案内羽根翼弦が軸方向に一致した場合で、最適設定角である⁽¹⁾⁽²⁾)の場合である。図より、すべての流量係数の範囲で、ハブクリアランスが小さいほど高い効率が得られる。これは、明らかに C が小さいほど案内羽根のノズル作用が適切に行われるため、タービンのトルク出力が増大することを示す。なお $C/l_g=0.71 \times 10^{-2}$ は $C=0.5\text{mm}$ の場合であり、ハブクリアランスは 1mm 以下に設定すべきである。

図5は、タービンの最大定常効率 η_m に及ぼすタービン設定角 θ_1 の影響を示す。 $15^\circ \leq \theta_1 \leq 19^\circ$ の範囲では、さほど η_m に差異はないが、 $\theta_1=17^\circ$ が好適である(図1のタービンでは $\theta_1=15^\circ$ が最適であった⁽¹⁾⁽²⁾)。

以上の定常試験結果より、以下議論は、 $\theta_1=17^\circ$ 、 $\theta_2=72.5^\circ$ 、 $C/l_g=0.71 \times 10^{-2}$ の場合のタービン特性について示す。

4.2 正弦波におけるタービン性能 正弦波状の

図4 タービン効率に及ぼす
ハブクリアランスの影響

図5 タービンの最大効率に及ぼす
ノズル設定角の影響

往復流に対して案内羽根のピッチ角 θ が変化する様子を、リンク付案内羽根とリンク無案内羽根の場合について図6に示す。図6(a)は、正弦波状の周期が10秒の場合の軸流速度 v_a と時間 t の関係であり、 v_a の正値はタービン部に流れが大気側から流入する場合を示す。図6(b)は、大気側に位置する案内羽根のピッチ角が、流量係数 $\Phi = V_a / U_R$ (V_a : v_a の最大値) $=0.666$ の場合に変化する様子である。図6(b)によれば、ノズル作用時には両方のタイプの変可ピッチ案内羽根のピッチ角 θ はノズル設定角 θ_1 の値に保たれており、 v_a が減少して負になり絶対値がある値に達すると(点①)、回転し始め、リンク付案内羽根の場合は急激にディフューザ設定角 θ_2 に達する。しかし、文献(3)、(4)にも述べたようにリンク無しの案内羽根の場合には、図中に破線で示すように θ が変化して、 θ_2 への移行は行われない。すなわち、リンク無しの案内羽根では軸流速度 $|v_a|$ が大きい区間で下流側のピッチ角が減少してディフューザ効率が劣化して、これが所期の性能を満足しない主因である。これに対してリンク付案内羽根の場合、 θ は v_a が負の間 θ_2 を保ち続け、 v_a が増加してある正の値に達する点②で急激に θ_1 へ移行する。この事実は、案内羽根のノズル作用時に発生する空力モーメントを、下流側案内羽根のピッチ角逆戻り現象の抑制に利用で

(a) 軸流速度の変化

(b) ピッチ角の変化

図6 案内羽根の挙動

きたことを示す。以上のことから、図2のリンクで案内羽根を結合することによりディフューザ作用時の可変ピッチ角の挙動が改善されることがわかった。

図7は、次式で与えられる正弦波状周期的往復流における1周期の平均効率 $\bar{\eta}$ と流量係数 Φ の関係を示す。

$$\bar{\eta} = \left(f \int_0^{1/f} T \omega dt \right) / \left(f \int_0^{1/f} \Delta p Q dt \right) \cdots (2)$$

ここに、 f は、波の周波数である。図より、リンク付案内羽根の場合、流量係数の全域にわたって効率がリンク無案内羽根より著しく高い。これは主として、リンクで案内羽根を結合することにより、軸流速度が大きい領域でも下流側の案内羽根をディフューザ設定角に保持でき、適切なディフューザ作用がなされたことによる。また本タービンは、自己可変ピッチスプリッタ形案内羽根を有する衝動タービン^{(2) (4)}と比較しても、約6%程度効率が高い。なお、図中に破線で示すシミュレーション結果については次節で述べる。

図8は、タービンの起動特性、すなわち正弦波状の周期的往復流において、無負荷のタービンが静止状態から準定常の(周期的な)無拘束回転状態に達するまでの回転数の変化を示す。図の縦軸と横軸は、それぞれ波の周波数 f で無次元化した角速度 $\omega^* (= \omega/f)$ と無次元時間 $t^* (= t \cdot f)$ である。また図中の文字 S 、 X_L および X_L はそれぞれ波の無次元周波数、タービンロータの無次元慣性モーメントおよび無次元負荷トルクで、それらの定義式および破線で示すシミュレーション結果については次節で述べる。リンクの有無にかかわらず、いずれの案内羽根の場合も数回の波で準定常の無拘束回転状態に達しており、ウェルズタービンに比べると起動特性は極めてよい。これは衝動タービンの特徴であり、波高が変化する海洋において正味の出力が得られる時間を増すために有利な性能である。なおリンク無しの案内羽根の場合、無拘束回転数がリンク付案内羽根の

場合よりも低いのは、ノズル作用時に流れが十分転向されていないことを示す。このことは、図7で示されているように、リンク無し案内羽根の場合には、無負荷時($\bar{\eta}=0$)における流量係数がやや増加していることから分かる。

4.3 正弦波におけるタービン性能のシミュレーション 本研究では、案内羽根をリンク機構で結合した場合の衝動タービンを製作してその特性を調べ、その有意性を明らかにした。本形式の可変翼列の開発に際しては、定常流れにおける特性を準定常的に用いて往復気流中の特性が評価できれば便利である。そこで、著者らがウェルズタービンの特性改善に際して使用した準定常解析手法⁽⁵⁾を本タービンに適用し、その妥当性を確かめることにする。なお、案内羽根の挙動は、図6で示したように実際には軸流速度に対して時間遅れが存在するが、シミュレーションでは時間遅れがなく軸流速度が正から負(あるいは負から正)に変化すると同時に設定ピッチ角に移行すると仮定した。

上流および下流の案内羽根のピッチ角を、それぞれノズル設定角およびディフューザ設定角に固定するとき、与えられた形状のタービンの定常特性は流量と回転数、すなわち流路断面平均軸流速度 v_a と平均半径におけるロータの回転速度 U_R によって決まる。いま、特性を次式で定義されるトルク係数 C_T と入力係数 C_A で整理すれば、 C_T および C_A は $\phi = v_a/U_R$ の関数となる。

$$C_T = T / \{ \rho (v_a^2 + U_R^2) b l z r_R / 2 \} \\ = C_T(\phi) \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$C_A = (\Delta p Q) / \{ \rho (v_a + U_R^2) b l z r_R v_a / 2 \} \\ = C_A(\phi) \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここに ρ 、 b 、 l および z は、それぞれ空気密度、動翼の翼高さ、翼弦長および翼枚数である。

v_a が正弦波状に変化する往復気流においても式(3)、(4)の定常特性が使用できるものとし、式(3)、(4)およ

図7 平均タービン効率の比較

図8 起動特性の比較

(a) トルク係数

(b) 入力係数

図9 タービンの定常特性

び $\phi = \Phi \sin(2\pi t^*)$ を用いて式(2)を書き換えれば,

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^\Phi \left\{ C_T(\phi) \cdot (1 + \phi^2) / \sqrt{\Phi^2 - \phi^2} \right\} d\phi}{\int_0^\Phi \left\{ C_A(\phi) \cdot (1 + \phi^2) \cdot \phi / \sqrt{\Phi^2 - \phi^2} \right\} d\phi} \dots (5)$$

図9は、リンク付案内羽根に対し、上流側のピッチ角を $\theta_1 = 17^\circ$ 、下流側を $\theta_2 = 72.5^\circ$ に設定して、定常流におけるタービンのトルク特性および入力特性を調べた結果である。なお定常特性は本試験装置においてく形波の流速一定の区間を使用して求めた。

図7に示す破線は、図9の定常特性を用いて式(5)により求めた平均効率を示す。計算値は実験値よりやや高いものの、比較的それをうまく説明できる。両者の差異は、実験における案内羽根の回転の遅れを正確に考慮しないことによる。

次に、起動特性のシミュレーションについては、回転軸回りのロータの運動方程式より解析できる⁽⁶⁾。正弦波状の往復流に対しては、

$$S^2 X_I (d\omega^* / dt^*) + X_L = 2C_T \sigma (1 - \nu) \{ \sin^2(2\pi t^*) + 1/\Phi^2 \} / (1 + \nu) \cdot (6)$$

ここに $S = r_R f / V_a$, $X_I = I / (\pi \rho r_R^5)$ (I : タービンの慣性モーメント), $X_L = T_L / (\pi \rho r_R^3 V_a^2)$ (T_L : 負荷トルク), σ : ロータの弦節比, ν : ハブ比である。波およびロータの条件が与えられるとき、式(3)の定常トルク特性を準定常的に用いて式(6)を初期値問題として数値的に解けば起動特性が得られる。

図8に示す破線は、式(6)による起動特性のシミュレーション結果をリンク付案内羽根の場合について示す。実験結果は、準定常の無拘束回転数がシミュレーション結果よりやや低い、起動特性に関しても、工学的に準定常解析の有効性がわかる。なお、作動特性の場合と同様に、起動特性の正確な見積には、案内羽根の回転の遅れを考慮する必要がある。

5. まとめ

自己可変ピッチ案内羽根を有する波力発電用衝動タービンの特性を改善するため、案内羽根をリンク機構で結合した新たな波力発電用衝動タービンを提案し、周期的な往復流によるモデル試験を行った。その結果、リンク付案内羽根の採用により、従来のタービンと比較して高効率を実現できる可能性を示した。また本衝動タービンの案内羽根を固定した場合に得られる定常特性を準定常的に用いて往復気流中の特性を予想する数値シミュレーション法が工学的に有効であることを明らかにした。

文 献

- (1) 金子・ほか3名, 機論, 55-514, B(1989), 1618.
- (2) 瀬戸口・ほか4名, 機論, 59-567, B(1993), 3482.
- (3) 瀬戸口・ほか4名, 機論, 57-541, B(1991), 3105.
- (4) 井上・ほか4名, 機論, 58-555, B(1992), 3347.
- (5) 井上・ほか2名, 機論, 50-459, B(1984), 2592.