三次元案内羽根によるウエルズタービン性能の改善*

高尾 学^{*1}, 瀬戸口 俊明^{*2}, 金子 賢二^{*2}
, 金 太 昊^{*3}, 井上 雅 弘^{*4}

Improvement of Wells Turbine Performance by Means of 3D Guide Vanes

Manabu TAKAO, Toshiaki SETOGUCHI^{*5}, Kenji KANEKO,
Tae-Ho KIM and Masahiro INOUE^{*5} Saga University, Dept. of Mechanical Engineering, 1, Honjo-machi, Sasa-shi, Saga, 840-8502 Japan

Performance of a Wells turbine was improved by equipping 2D guide vanes before and behind a rotor. For further improvement, 3D guide vanes have been proposed in this paper. The performance of the Wells turbine with 2D and 3D guide vanes have been investigated experimentally by model testing under steady flow conditions. Then, the running and starting characteristics in irregular ocean waves have been obtained by a computer simulation. As a result, it is found that both of the running and starting characteristics of the Wells turbine with 3D guide vanes are superior to those of the turbine with 2D guide vanes.

Key Words: Fluid Machinery, Guide Vane, Stall, Natural Energy, Wells Turbine, Wave Energy Conversion, Ocean Wave Energy

1. まえがき

現在, 風向切替弁が不要な波力発電用空気タービンとして, ウエルズタービンと衝動形タービンが有望視されている。これまでの研究結果⁽¹⁾⁻⁽³⁾によれば, 実際の海洋で発生する不規則波に対しては, 衝動形タービンの方が起動および作動特性の両面においてウエルズタービンより優れていることが明らかにされている。しかし, 世界的な主流は構造が簡素であるウエルズタービンであり, 高性能を有する波力発電システムを実現するためには, その性能をさらに改善する試みも重要な研究課題である。

ウエルズタービンは, 比較的効率が低く起動特性が悪いという欠点がある⁽⁴⁾。これらを克服するための一手法としてロータ前後に案内羽根を設置することが考えられ, ウエルズタービン性能に及ぼす影響が明らかにされている⁽⁵⁾⁻⁽¹¹⁾。しかし, 従来の研究では二次元形状の案内羽根を採用しているため, 案内羽根を設置

していない場合⁽¹²⁾以上にハブ側におけるロータに対する迎え角が大きくなり, ハブ面近傍の負圧面上において流れのはく離が生じやすい状態となっている。この失速特性の改善には, 三次元形状を有する案内羽根を採用し, ハブ面近傍における流れの転向角 β_1 (図1参照) を小さくすることが有効と思われる。

本研究では, ウエルズタービン用として二次元^{(8),(10)}, ⁽¹¹⁾および三次元案内羽根の設計を行い, 定常流における性能を実験的に調べるとともに, 両者を比較することで三次元案内羽根の効果を明らかにした。さらに, 準定常解析を用いた数値シミュレーションにより, 不規則波における性能を明らかにすることで三次元案内羽根の有意性を示した。

2. 記号

A_c	: 空気室の断面積
A_t	: タービンの流路面積
b	: ロータの高さ
C_A	: 入力係数 {式(2)}
C_T	: トルク係数 {式(1)}
D	: 抗力

* 原稿受付 1999年8月11日。

^{*1} 正員, 佐賀大学大学院 (〒840-8502 佐賀市本庄町1)。^{*2} 正員, 佐賀大学理工学部。^{*3} 佐賀大学大学院。^{*4} 正員, 九州大学工学部 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6)。

E-mail: setoguci@me.saga-u.ac.jp

$\bar{f}$	: 不規則波の平均周波数 $=1/\bar{T}$
g	: 重力加速度
G	: 平均半径 r_R におけるロータ中心から案内羽根間の距離
H	: 海洋波の波高
$H_{1/3}$	: 不規則波の有義波高
H^*	: 無次元波高 $=H/H_{1/3}$
I	: ロータの慣性モーメント
K	: 無次元周期 $=r_R m/H_{1/3}$
l	: 翼弦長
L	: 揚力
m	: 絞り比 $=A_t/A_c$
Q	: 空気流量
r	: 半径
t	: 時間
$\bar{t}^*$	: 無次元時間 $=t/\bar{T}$
T	: 波の周期
T_o	: 出力トルク
T_L	: 負荷トルク
$\bar{T}$	: 不規則波の平均周期 $=1/\bar{f}$
U	: ロータ周速度
v	: 絶対速度
v_a	: 軸流速度
V	: 代表速度 $=H_{1/3}/(m\bar{T})$
w	: 相対速度
X_i	: 無次元慣性モーメント $=I/(\pi\rho_a r_R^5)$
X_L	: 無次元負荷トルク $=T_L/(\pi\rho_a V^2 r_R^3)$
z	: 翼枚数
α	: 迎え角
β	: 転向角
γ	: スタッガ角
Δp	: タービン前後の全圧差
η	: 定常流におけるタービン効率 {式(3)}
$\tilde{\eta}$	: 総合変換効率
$\tilde{\eta}_c$	: 一次変換効率
$\tilde{\eta}_i$	: 不規則波におけるタービン効率
θ	: そり角
ν	: ハブ比
ρ_a	: 空気の密度
σ	: ソリディティ $=lz/(2\pi r)$
ϕ	: 流量係数 {式(4)}
ω	: ロータの角速度
$\bar{\omega}^*$	: 無次元角速度 $=\omega\bar{T}$

添字

 g : 案内羽根

r	: ロータ
R	: 平均半径
1	: 上流
2	: 下流

3. 案内羽根の設計

本研究においては、ウエルズタービン性能に及ぼす三次元案内羽根の効果を明らかにするため、二次元案内羽根の場合との性能比較を行う。これらの案内羽根の設計法を以下に示す。

二次元案内羽根の設計は、従来の研究^{(8),(10),(11)}により用いられた方法を採用した。すなわち、平均半径におけるロータの設計トルク係数〔後に式(1)で定義〕を案内羽根無しの場合の最高効率点における値に設定し、これに適合する円弧翼翼列を翼列試験資料⁽¹³⁾より選定した。供試二次元案内羽根の概要を図 2(a)および表 1 に示す。その形状は、弦長 $l_g=91\text{mm}$ の二次元円弧翼で、スタッガ角 $\gamma:16.3^\circ$ 、平均半径 r_R における弦節比 $\sigma_{gR}:1.25$ (z_g は 11 である)、そり角 $\theta:60^\circ$ 、アスペクト比:0.5、ロータ中心から案内羽根までの距離 $G:39\text{mm}$ 、翼厚み:1mm の一様厚さで、翼の前・後縁は半円に仕上げてある。

一方、三次元案内羽根の設計は、最大効率点近傍におけるロータの迎え角 α (図 1 参照) が半径方向に一定となるように行った。その手順は、まず二次元案内

Fig. 1 Velocity diagrams before and after rotor (v_1, v_2 : absolute velocity, w_1, w_2 : relative velocity)

羽根を有するウエルズタービンの最大効率点 ($\phi = 0.22$, ϕ : 流量係数 (後に式(4)で定義)) における平均半径 r_R での迎え角 ($\alpha = 14.8^\circ$) を設計値とし、次に半径 r における速度三角形より迎え角が設計値となる轉向角 β_1 を算出し、これに適合する案内羽根形状を翼列試験資料⁽¹³⁾より選定した。ここで、案内羽根の翼弦長 l_g は、弦節比 $\sigma_g = \{z_g l_g / (2\pi r)\}$, z_g : 案内羽根枚数} が従来の研究⁽¹⁰⁾により明らかにされた最適値となるように決定した。

Fig. 2 Outline of guide vanes

Table 1 Specifications of guide vanes

$r/D_t/2$	2D guide vane			3D guide vane		
	l_g mm	θ °	γ °	l_g mm	θ °	γ °
0.7				75.0	-7.1	-2.1
0.775				83.0	28.7	8.7
0.85	91.0	60.0	16.3	91.0	60.0	16.3
0.925				99.1	77.5	23.4
1.0				107.1	91.0	27.3

- 1 Cylinder
- 2 Piston
- 3 Ball-screw
- 4 Servomotor
- 5 D/A converter
- 6 Micro-computer
- 7 Potentiometer
- 8 Servo-pack
- 9 Turbine
- 10 Torque transducer
- 11 Servomotor-generator
- 12 Pressure transducer
- 13 A/D converter
- 14 Micro-computer
- 15 Test section
- 16 Settling chamber

Fig. 3 Test rig

本研究において採用した三次元案内羽根を図 2(b)および表 1 に示す。その形状は、弦節比 $\sigma_{gR} : 1.25$ (z_g は 11 である)、平均半径 r_R におけるロータ中心から案内羽根までの距離 $G : 39$ mm, 翼厚み: 2 mm の一様厚さで (翼厚みは薄い方が好ましいが、強度上の観点から 2 mm とした)、翼の前・後縁は半円に仕上げてある。また、 l_g , γ および θ は、図 2(b)および表 1 に示されるように半径 r とともに変化する。

なお三次元案内羽根に関し、文献(5)と(6)に、それぞれ運動量理論および二次元ポテンシャル理論と子午面流線の曲率を考慮した半径平衡条件式を用いた設計が行われている。しかし、両者ともハブ側の β_1 の方がチップ側のそれより大きくなる形状であるため、案内羽根無しおよび二次元案内羽根の場合以上にハブ側の α の方がチップ側より大きくなる形状となっており、失速を生じる流量係数が比較的小さくなるような形状となっている。

4. 実験装置と方法

実験装置と方法は文献(14), (15)と同じであり、実験装置の概要を図 3 に示す。すなわち、直径 1.4 m, 長さ 1.7 m の円筒シリンダ内でコンピュータ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、ピストン速度を一定にすることで定常の空気流を発生させ、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_o を測定した。なお、本実験における測定誤差は、後に式(3)で定義するタービン効率 η について約 $\pm 1\%$ である。

供試ロータは、従来の研究^{(4), (16)}により明らかにされた好適な幾何形状を採用し、翼型: NACA0020, 翼弦長 $l_r : 90$ mm, 翼端直径 $D_t : 298$ mm, ハブ比 $v : 0.7$, アスペクト比: 0.5, 平均半径における弦節比 $\sigma_{gR} : 0.67$ である。

なお、ロータ翼弦長を基準としたタービンの最大効率点近傍におけるレイノルズ数は、約 2.4×10^5 である。

5. 実験結果と考察

5.1 定常流におけるタービン特性 定常流におけるタービン特性を、次式で定義するトルク係数 C_T , 入力係数 C_A , 効率 η と流量係数 ϕ の関係により評価する。

$$C_T = T_o / \{ \rho_a b l_r r_R (v_a^2 + U_R^2) z_r / 2 \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_A = \Delta p Q / \{ \rho_a b l_r v_a (v_a^2 + U_R^2) z_r / 2 \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta = T_o \omega / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \phi) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = v_a / U_R \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 ρ_a : 空気密度、 b : 翼高さ、 z_r : ロータ翼枚数である。

図4は、ウエルズタービンの定常特性に及ぼす二次元および三次元案内羽根の影響を示す。ここで、比較のために案内羽根無しの場合の結果を実線で表す。図4(a)より失速時における ϕ 値は、三次元案内羽根を有するウエルズタービンの場合が最も大きいことがわかる。これは三次元案内羽根の場合、ハブ面近傍におけるロータに対する迎え角 α が他の場合より小さいため、はく離の発生が抑制されたことによるものと思われる。さらに失速後の C_T 値についても、三次元案内羽根の場合の方が二次元案内羽根よりも高い値を示していることがわかる。以上の結果より、案内羽根がウエルズタービンの失速特性の改善に有効であることがわかる。また三次元案内羽根の場合、トルク係数 C_T が他の場合より大きいことがわかる。これは、ロータに作用する接線力(C_T に対応)が $L \sin \alpha - D \cos \alpha$ (L :揚力、 D :抗力)となるので、チップ側の α が比較的大きい三次元案内羽根の方が他の場合より接線力が大きくなるためと思われる。

次に図4(b)より、失速が生じていない ϕ 領域において、案内羽根を設置した場合の C_A 値が案内羽根無しの場合より低いことがわかる。この事実は、二次元および三次元案内羽根がディフューザとしてタービン効率の増加を果たすとともに、その存在が後述する波力発電システムの一次変換効率の向上に重要であることを示している。また、二次元と三次元案内羽根を比較すると、失速点より高い流量係数においては、二次元案内羽根の C_A 値の方が三次元案内羽根よりやや高いが、失速点以下の流量係数領域では両者の C_A 値はほぼ一致しており、全体的にはほぼ同様のディフューザ作用をなしていることがわかる。

図4(c)は、定常流におけるタービン効率 η の比較である。図より、三次元案内羽根の場合に最大効率を得られ、さらに高効率の作動領域が広いことがわかる。これは、図4(a)に示される $C_T - \phi$ 特性より明らかである。すなわち、三次元案内羽根の場合の C_T 値が他の場合に比べて最も高く、さらに失速時の流量係数が最も大きいためである。しかし、ここで注意すべきは、本結果がタービンへの空気流の流入状態が同一の場合に得られたものであり、波力発電システムとしてタービン性能が評価されていないことである。したがって、とくに波の一次変換効率を考慮した不規則波に対するタービン性能評価が必要である。

5. 2 上流および下流案内羽根の効果 ウェル

(a) Torque coefficient

(b) Input coefficient

(c) Efficiency

Fig. 4 Turbine characteristics under steady flow conditions

ズタービン性能に及ぼす上流および下流案内羽根の影響を調べるため、一方の案内羽根のみを設置して実験を行った。図5および図6は、それぞれ二次元および三次元案内羽根の場合の結果を示す。両図を比較すると、 C_T - ϕ および η - ϕ 特性に対する上流および下流案内羽根の影響は、二次元および三次元案内羽根とも定性的にほぼ同様である。すなわち、案内羽根付ウエルズタービンにおける効率 η の増加は上流案内羽根の効果であり、また失速直後の C_T 値については、上流案内羽根のみの場合に $C_T < 0$ の領域が存在するのに対して、下流案内羽根のみの場合には $C_T > 0$ となっている⁽¹⁰⁾。しかし、図5(a)に示されるように二次元案内羽根の場合、最高効率点近傍において、上流案内羽根のみの場合と上流および下流の両方に設置した場合の η が

ほぼ等しいのに対して、図6(a)に示される三次元案内羽根の場合にはその差が大きい。また失速直後の C_T 値については、上流と下流案内羽根の両方を設置した場合は三次元案内羽根の方が二次元案内羽根より高い値となっているが、下流案内羽根のみの場合には、二次元案内羽根の方が高い C_T 値を示している。したがって、これらの事実より、三次元案内羽根を設置した場合のウエルズタービン性能の向上は、上流および下流案内羽根の相乗的な効果によるものである。

5.3 不規則波におけるタービン特性 図7に示す振動水柱（OWC：Oscillating Water Columnの略）型波力発電装置に、案内羽根付ウエルズタービンを設置した場合の不規則波中の性能を、数値シミュレーションによって明らかにする。波力発電システム性能の

(a) Efficiency

(b) Torque coefficient

Fig. 5 Effect of 2D guide vanes before and after rotor on turbine characteristics

(a) Efficiency

(b) Torque coefficient

Fig. 6 Effect of 3D guide vanes before and after rotor on turbine characteristics

シミュレーションは、文献(2)と同様である。すなわち、エネルギー変換効率 $\tilde{\eta}$ を、不規則波における一次変換装置の波エネルギー変換効率 $\tilde{\eta}_e$ と定回転数制御法を仮定したタービン効率 $\tilde{\eta}_t$ の積によって求める。また起動特性については、不規則波におけるタービンロータの回転軸まわりの運動方程式⁽¹⁷⁾をルンゲ・クッタ・ギル法により解くことで、タービン静止状態($\omega=0$)から $\tilde{t}^*=10$ までの挙動を求める。なお、起動特性のシミュレーションは無負荷状態($T_L=0$)で行った。

図8は、本研究で使用したテスト波群で、文献(2)の図11と同一であり、有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 、平均周波数 $\bar{f}=0.167\text{Hz}$ のISSC不規則波⁽¹⁸⁾を使用している。この波形に対し、タービンの流路断面積 A_t と空気室の断面積 A_c の絞り比 m を0.0234とし、タービン特性として図4に示した定常特性を準定常的に使用して数値シミュレーションを行った。

図9は、波力発電装置のエネルギー変換効率の比較を示す。図の縦軸と横軸は、それぞれエネルギー変換効率 $\tilde{\eta}$ と定常流における試験の流量係数に対応する $1/(K\bar{\omega})$ ($\bar{\omega}=V/U_R$, V :代表速度($=H_{1/3}/(m\bar{T})$, $\bar{T}$:不規則波の平均周期))を表す。図より明らかなように、二次元および三次元案内羽根を設置した場合、その最

大効率は案内羽根無しの場合より約7%も高いことがわかる。これは図4より明らかなように、案内羽根を設置した場合の方がタービン効率が高いことと、最高効率点においては案内羽根無しの方が C_A 値が高くOWCの挙動が抑制されるため⁽²⁾、一次変換効率が低くなることに起因する。一方、2つの案内羽根の場合を比較すると、最大効率の差はわずかであるが三次元案内羽根の方が広い流量係数域において高い変換効率を示している。これは図4(c)より明らかなように、三次元案内羽根の場合の作動領域が広いためである。したがって、三次元案内羽根を有するウェルズタービンの方が二次元案内羽根の場合より優れた作動特性を有することが明らかである。

図10は、起動特性に及ぼす案内羽根の影響を示す。

Fig. 7 Schematic layout of OWC-air turbine type wave conversion system

Fig. 8 Test irregular wave

Fig. 9 Conversion efficiency of wave energy under irregular wave conditions

Fig. 10 Starting characteristics under irregular wave conditions

ここで縦軸と横軸は、それぞれ無次元角速度 $\bar{\omega}^*$ ($=\omega \bar{T}$) と無次元時間 $\bar{t}^*$ ($=t/\bar{T}$) である。また、図中の文字 K ($=r_R m/H_{1/3}$)、 X_I ($=I/(\pi \rho_a r_R^5)$)、 I : ロータの慣性モーメント、 X_L ($=T_L/(\pi \rho_a V^2 r_R^3)$)、 T_L : 負荷トルクは、それぞれ無次元周期、無次元慣性モーメント、無次元負荷トルクである。図より、三次元案内羽根を有するウエルズタービンは、二次元案内羽根の場合に比べ短時間で高速回転に達し、負荷運転への切替えが可能になることが分かる。これは、図 4(a) に示すタービンの C_T - ϕ 特性より明らかなように、三次元案内羽根の場合、二次元案内羽根に比べ失速を生じる ϕ 値が大きいことと失速後の C_T 値が高いことに起因する。

したがって、三次元案内羽根を有するウエルズタービンを採用した波力発電システムの方が、二次元案内羽根を用いた場合より、作動および起動特性の両面において優れているといえる。

6. まとめ

ウエルズタービン性能に及ぼす三次元案内羽根の効果を調べるために、定常流におけるタービン性能を実験的に調べるとともに、二次元案内羽根の場合との比較を行った。さらに、準定常解析を用いた数値シミュレーションにより不規則波における性能を明かにした。その結果、三次元案内羽根を使用することでウエルズタービンの失速特性が大きく改善され、二次元案内羽根を使用した場合に比べ、作動および起動特性が向上することがわかった。

文 献

- (1) 瀬戸口俊明・ほか 4 名, "波力発電用衝動タービンに関する研究", 機論, 65-629, B(1999), 255-261.
- (2) 瀬戸口俊明・ほか 5 名, "波力発電用諸タービンの性能比較", 機論, 65-634, B(1999), 2063-2070.
- (3) Santhakumar, S., et al., "Performance of an Impulse Turbine Based Wave Energy Plant," Proc. of 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol.1, (1998), 75-80.
- (4) 井上雅弘・ほか 2 名, "ウエルズタービンに関する研究 (第 2 報, 定常性能試験によるロータ形状の選定)", 機論, 50-459, B(1984), 2599-2605.
- (5) Sturge, D. P., "Turbine for an Oscillating Water Column Wave Power System", CEEB Memo., MM/MECH/TA41, (1977).
- (6) Gato, L. M. C. and Falcao, A. F. de O., "Performance of the Wells turbine with a Double Row of Guide Vane", JSME Int. J., Ser. II, 33-2, (1990), 262-271.
- (7) Grant, R. J., et al., "Performance of a Wells Turbine for Use in Wave Energy System", Proc. of I. E. E. Conf., No. 192, (1981), 117-122.
- (8) 井上雅弘・ほか 2 名, "ウエルズタービンに関する研究 (第 3 報, 案内羽根の効果)", 機論, 51-461, B(1985), 338-343.
- (9) 荒川忠一・ほか 2 名, "波力発電用ウエルズタービンの性能改善", エネルギー・資源研究会第 6 回研究発表会講演論文集, (1987), 39-44.
- (10) 高尾学・ほか 3 名, "ウエルズタービン性能に及ぼす案内羽根の影響", 機論, 63-606, B(1997), 577-582.
- (11) Takao, M., et al., "A Wells Turbine with Guide Vanes for Wave Energy Conversion (Effect of Gap between Rotor and Guide Vane)", Proc. of the 5th Asian Int. Conf. on Fluid Machinery, Vol. 2, (1997), 511-518.
- (12) 鈴木正己・ほか 2 名, "波力発電用ウエルズタービンにおける動翼面上の流れ", 流れの可視化, Vol. 4-Suppl., (1984), 51-56.
- (13) 生井武文・ほか 2 名, "円弧翼翼列の設計法", ターボ機械, 2-2, (1975), 177-182.
- (14) 瀬戸口俊明・ほか 4 名, "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)", 機論, 61-586, B(1995), 2173-2177.
- (15) 瀬戸口俊明・ほか 4 名, "複葉式ウエルズタービンの性能改善", 機論, 56-532, B(1990), 3763-3768.
- (16) 瀬戸口俊明・ほか 3 名, "ウエルズタービンに関する研究 (第 5 報, 失速限界を支配する因子の考察)", 機論, 53-487, B(1987), 945-949.
- (17) 井上雅弘・ほか 3 名, "ウエルズタービンに関する研究 (第 7 報, 不規則波におけるタービン性能と設計パラメータ)", 機論, 53-496, B(1987), 3691-3698.
- (18) 日根野元裕・ほか 1 名, "海洋波のスペクトル", 日本造船学会誌, 609, (1980), 160-180.