

沖合浮体式波力装置の発電出力の検討

大澤 弘 敬* ・ 鷲 尾 幸 久** ・ 今 井 正 明**
岡 山 修 三*** ・ 中 川 寛 之****

1. はじめに

現在, 地球温暖化現象等の地球環境問題が, 世界的に注目されている中, クリーンで再生可能な自然エネルギーの有効利用の気運が高まりつつある。

海洋科学技術センターでは, 自然エネルギーの一つである波エネルギーを, 効率良く吸収して沿岸海域の有効利用に役立てるとともに, 装置の後背海域を静穏化して, この海洋空間を養殖漁業や海洋性レジャー等に活用することのできる沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」の研究開発を昭和 62 年より実施している。

「マイティーホエール」は, 波の上下運動を利用して波エネルギーを有効な電気エネルギーに変換することができる振動水柱型の浮体式波力発電装置としての機能を有し, 実海域実験を含めた研究開発が進められている。

この「マイティーホエール」の設置海域の波浪条件は, 過去に計測した波浪観測データの波高一周期の頻度分布結果より台風シーズンを除き比較的静穏であることがわかっている。従って, 波力発電装置としては, 低波高時における空気出力, タービン出力を予測し, 設置海域の波浪条件下において最適な発電出力を得るように検討することが必要である。そこで本論では, 設置海域の波浪条件下における発電出力を把握することを目的に, 沖合浮体式波力装置の 1 次変換過程, 2 次変換過程の模型実験を行い, 最適な発電出力を得るように 1 次変換装置である振動水柱による波エネルギー吸収効率と 2 次変換装置であるウエルズタービン及び発電機との全体的なマッチングを検討する。

2. 沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」

2.1 「マイティーホエール」の概要

沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」は, 図-1 に示すように, 波エネルギーを吸収する空気室の区画が装置の前面(波上側)にあり, その後方は装置の波浪中



図-1 沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」

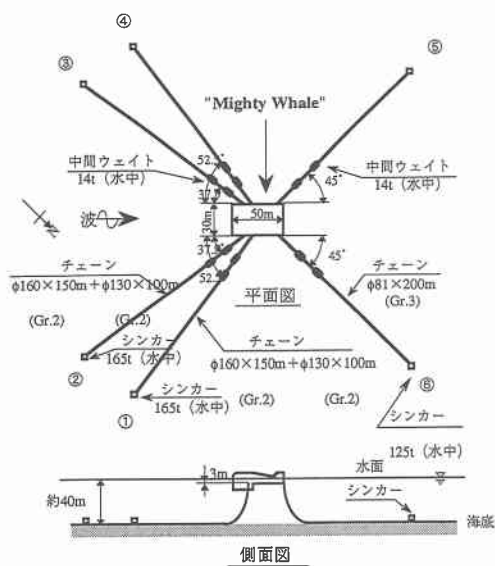


図-2 係留配置図

の動揺を抑えるためのスロープを持つ「鯨」のような外観をしており, 図-2 に示すように 6 条の係留索により係留される。

そして, 各空気室の上にはノズルと呼ばれる開孔があり, この上に空気タービン発電機が搭載される。また, 空気室の水面下は波を取り入れるために開放されており, 波の入射により空気室の水面が上下し, これにより

* 正会員 工博 海洋科学技術センター 海洋技術研究部
** 海洋科学技術センター 海洋技術研究部
*** 富士電機(株)システム事業本部
**** (株)三井造船昭島研究所 海洋エンジニア リング事業部

空気室上のノズルを通過する高速の往復空気流が発生する。この空気流を利用して、空気タービン及びそれに接続する発電機や空気圧縮機を駆動することにより、エネルギーを取り出す機構になっている。この「マイティ・ホエール」の変換装置は、波エネルギーを利用しやすい力学的エネルギー、すなわち空気エネルギーへの変換を行う1次変換装置である空気室と1次変換装置以降のエネルギー形態への変換を行う装置であるタービン及び発電機等の2次変換装置に分類される。「マイティ・ホエール」の諸元を表-1に示す。

表-1 「マイティ・ホエール」の緒元

長さ (L)	50.0 m
幅 (B)	30.0 m
型深さ (D)	12.0 m
計画喫水 (d)	8.0 m
空気室 長さL×幅B×高さH	10.0 m×8.0 m×12.0 m 3室
排水量	約 4,400 ton
軽荷重量 (内訳)	1,260 ton
	浮体鋼構造重量 1,091 ton
	浮体機装重量 84 ton
	タービン発電機 80 ton
	電気・計装 5 ton

2.2 2次変換装置

波エネルギーから変換された空気エネルギーを電気エネルギーなどに変換するための2次変換装置として、各空気室上に空気タービン・発電機を搭載する。このうち

表-2 2次変換装置の諸元

空気タービン	種 類	ウェルズタービン
	配 置	タンデム配置
	形 状	NACA 0021, 8枚翼
	直 径	1.7 m
	材 質	耐食アルミニウム合金
	重 量	約 480 kg
発電機	最大回転数	1,900 rpm
	種 類	3相誘導発電機
	冷却構造	強制風冷式
	定格出力	(50 kW+10 kW)×1台 30 kW×2台
	発電回転数	250~1,900 rpm
	出力電圧	AC 200 V, 3相
空気圧縮機	種 類	汎用空冷式オイルレスコンプレッサー
	定格出力	7.5 kW
	最高圧力	約 7 kgf/cm ²
	作動電圧	AC 200 V

1台の発電機には、空気圧縮機が接続され、圧縮空気の製造実験を行う。

タービン・発電機は、荒天時等の特別な状況を除いて常時運転状態で運転可能状態に設定され、発電可能な海象状態の時に自動的に発電し、発電不可能な海象状態(波高が低い)になった場合には、タービン・発電機は遊転状態となる。また、発電不可能な荒天(波高が非常に高く、タービン・発電機が危険回転数に達する場合)になった場合には、タービンへの空気入力を安全弁により自動的に遮断し、タービン・発電機は停止する。尚、今回「マイティ・ホエール」に用いる誘導発電機の特徴として、定格回転速度以下ではトルク一定制御を行い、広範囲で高い発電能力を有したシステムとして波力エネルギーを最大限電気変換できるよう考慮している。表2に2次変換装置である空気タービン・発電機・空気圧縮機の諸元を示す。

3. 模型実験

3.1 波エネルギー吸収効率

1次変換である波エネルギー吸収効率の実験は、それぞれの空気室内に波高計を設置した縮尺1/20のモデル(幅B=1.5 m, 長さL=2.5 m, 喫水d=0.4 m)を用い、海洋科学技術センター所有の波動水槽において図-3の状態で行った。

実験条件は実海域実験の海域での条件を基にし、模型スケールで入射波高3.0 cm~15.0 cm, 波周期1.0 s~2.5 sの規則波により造波し、空気室内上部のノズル比 ϵ は $\epsilon=1/90, 1/110, 1/200, 1/250$ の4種類の条件下で実験を行った。また、計測項目は入射波高, 空気室内波高, 空気室内圧力について計測した。尚、「マイティ・ホエール」の1次変換効率である空気室内による波エネルギー吸収効率は、堀田ら(1987)の方法により、水槽実験で計測した各空気室内の圧力の平均値より求めた波吸収エネルギーと入射波エネルギーの比より求めた。

図-4に各ノズル比の波エネルギー吸収効率の結果を

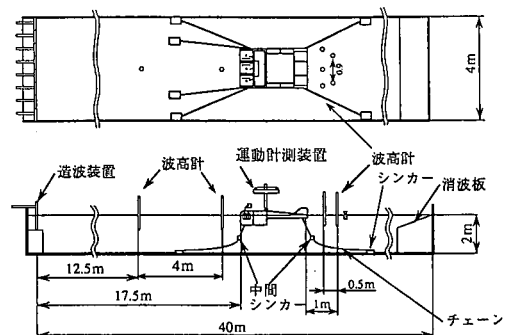


図-3 1次変換装置の実験取置図

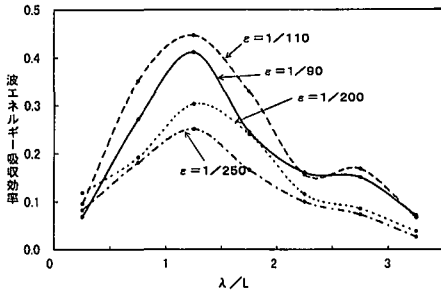


図-4 「マイティーホエール」波エネルギー吸収効率

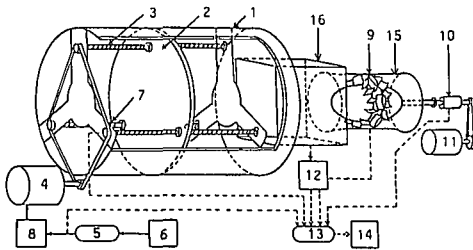
示す。この結果より、全てのノズル比における波エネルギー吸収効率は λ (波長)/ L (装置長) = 1.5 付近でピークを持っていることがわかる。このピークにおける波周期は、「マイティーホエール」設置予定海域の年間発生頻度の最も多い波周期 6～8 秒と一致している。

また、各ノズル別で比較すると、波エネルギー吸収効率はノズル比 $\varepsilon = 1/110$ が約 50% で最も効率が良く、「マイティーホエール」の最適ノズル比は $\varepsilon = 1/110$ 付近にあるものと考えられる。

3.2 タービン特性

2 次変換装置のタービンの模型実験は、図-5 に示すマイコン制御により、ボールねじを回転させてピストンを駆動する佐賀大学の風洞実験設備内 (直径 1.4 m、長さ 1.7 m の円筒シリンダー) で行った。タービン模型は、直径 298 mm の案内羽根付 8 枚翼ウェルズタービン (ハブ比 0.7, ソリディティ 0.64, 翼形状 NACA 0021) を用い、定常空気流中において、タービンの回転数 (0～5000 rpm) を一定にして実験を行い、タービン角速度、トルク、タービン前後の差圧、空気流量を計測した。

尚、ウェルズタービンの設計では 1 次変換の水槽実験結果より、ノズル比 $\varepsilon = 1/110$ と等価となるようにタービンの環状流路断面積を決定した。



- | | |
|---------------|----------------|
| (1) シリンダ | (9) タービン |
| (2) ピストン | (10) トルク検知器 |
| (3) ボールねじ | (11) サーボモータ |
| (4) サーボモータ | (12) 圧力変換器 |
| (5) D/A 変換器 | (13) A/D 変換器 |
| (6) 制御用コンピュータ | (14) 測定用コンピュータ |
| (7) ポテンショメータ | (15) テストセクション |
| (8) サーボバック | (16) よどみ室 |

図-5 タービン実験装置の概要

「マイティーホエール」に用いる案内羽根付 (19 枚) ウェルズタービンのタービンの迎角 α に対するトルク係数 C_T 、差圧係数 Ψ 、効率 η_t の模型実験結果を図-6～図-8 に示す。尚、迎角、トルク係数、差圧係数、効率は以下の式により定義される。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_a}{U_t} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_a W^2 A (D_t/2)} \quad (2)$$

$$\Psi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_a W^2} \quad (3)$$

$$\eta_t = \frac{T\omega}{\Delta P Q} \quad (4)$$

ここで、 v_a : 軸流速度、 T : タービントルク、 ρ_a : 空気密度、 A : タービン環状流路断面積、 D_t : タービン直径、 ΔP : タービン前後の全差圧、 Q : 空気流量であり、タービン角速度 ω 、翼端周速 U_t 、相対速度 W は、タービン回転数 N により次式で与えられる。

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (5)$$

$$U_t = \frac{D_t}{2} \omega \quad (6)$$

$$W = \sqrt{U_t^2 + v_a^2} \quad (7)$$

図-6 の迎角 α に対するトルク係数 C_T の特性は、迎角 $\alpha = 18^\circ$ 付近で失速角があることがわかり、トルク係数 C_T に負の領域は現れていない。一般的にブレードの形状が NACA 0021 で案内羽根がない場合、鈴木ら (1984) の試験結果では、迎角 α に対してトルク係数 C_T に負の領域が存在し、案内羽根の影響によりトルク係数 C_T が常に正の値になったものと推察される。このことは、タービンの自己起動に対して良い方向に作用するものと考えられる。

また、図-7 の迎角 α に対する差圧係数 Ψ の特性で

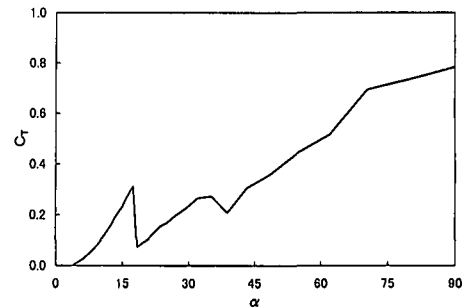


図-6 「マイティーホエール」タービントルク係数

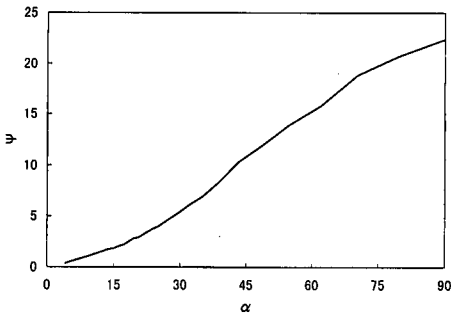


図-7 「マイティーホエール」タービン差圧係数

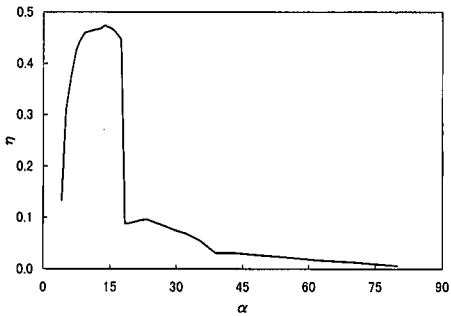


図-8 「マイティーホエール」タービン効率

は、差圧係数 Ψ はほぼ迎角 α に比例しており、従って翼端周速 U_t が軸流速度 v_a に比べて大きいときは、本タービンによる振動水柱の運動に及ぼす負荷減衰力は線形負荷であるものと考えられる。この結果は鴛尾ら (1984) が過去において実施したウェルズタービンの実機性能結果と同様の傾向を示している。

さらに、図-8の迎角 α に対するタービン効率 η_t に関しては、図-6のトルク係数 C_T の傾向と同じであり、高速回転領域においてタービンの最大効率は約47%であることがわかる。

4. タービン・発電出力の検討

振動水柱型の波力発電装置の最大発電出力の推定は、1次変換装置の空気室内での最大波エネルギー吸収効率、2次変換装置のタービンの最大効率を個別に求め、そこから発電機の効率を考慮して、最大発電出力を推定するのが最も簡単で一般的な方法であると言える。

しかしながら、発電出力は詳細には空気室内特性とタービン特性及び発電機の特性を全体系として検討する必要がある、固定式の波力発電装置においては、高橋ら (1985, 1988) により検討されているものの浮体式に関しては検討された例が少ないのが現状である。

ここでは、このような背景を踏まえ、沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」の発電出力推定に関し、1次変換過程と2次変換過程の全体的なマッチングを考える

ため、先に示した模型試験の結果を用いて発電出力を検討した結果について述べる。

まず、ウェルズタービンの等価ノズル比が回転数によって変化するため、1次変換装置である空気室内特性と2次変換装置であるタービン特性のマッチングを、「マイティーホエール」の水槽実験結果より求めた各波高、各ノズル比による空気室内水面速度をベースとして、タービンの各回転数による差圧の関係を検討する。

今、水槽実験により計測した平均空気室内波高 H_c 、平均圧力両振幅 P_c と入射波高 H_I との比を次式のように定義する。

$$H_A = H_c / H_I \dots\dots\dots (8)$$

$$P_A = P_c / H_I \dots\dots\dots (9)$$

ここで H_A 、 P_A は波高比、圧力比と呼ぶことにする。この波高比 H_A 、圧力比 P_A を用いると、各実機波高 H における空気室内の最大水面速度 v とタービン差圧 ΔP は次式で与えられる。

$$v = \frac{1}{2} \sigma \cdot H_A \cdot H \dots\dots\dots (10)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} P_A \cdot H \dots\dots\dots (11)$$

ここで σ は実機波浪の円周波数である。

これらの値は規則波中での結果であるが、実海域における不規則波中での値を推定する場合には、前田ら (1979) の方法に従い、これらの規則波中の値に係数0.5を乗じて、各ノズル及び各波高ごとの空気室内水面速度、タービン差圧を推定した。

また、タービン特性に関してはタービン内に吹き込む空気流量 Q と空気室内の水線面積 A_w の関係より、各タービン回転数に対する空気室内水面速度 v をタンデム型として下式のように求めた。

$$v = 2 \cdot Q / A_w \dots\dots\dots (12)$$

この時のタービン差圧 ΔP 及び空気流量 Q は先に示した (2)～(7) 式により求めることができる。

さらに、この水面速度に対応するタービン出力 W_T はタービントルク T とタービン角速度 ω を用いて下式のように定義できる。

$$W_T = 2 \cdot T \cdot \omega \dots\dots\dots (13)$$

図-9は、各タービンの回転数 (250 rpm～1000 rpm) における空気室内水面速度 v とタービン差圧 ΔP の関係を示したもので、図中には実機で波周期6.8sの水槽実験結果より求めた各ノズル比 ($\epsilon = 1/90 \sim 1/250$) の実機換算の波高変化 ($H = 0.6 \text{ m} \sim 2.0 \text{ m}$) の空気室内水面速度に応じた差圧 ΔP の結果が同時に示してある。この時、ノズル比が $\omega = 1/90$ からタービン回転数が高くなり、ノズル比が絞られるに従い、空気室内の水面速度が緩やかに減少していくことがわかる。また、波高2.0m以下の

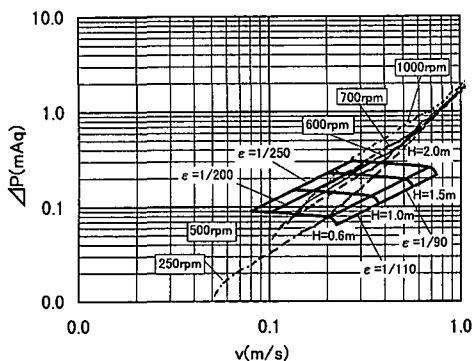


図-9 空気室内水面速度とタービン差圧の関係

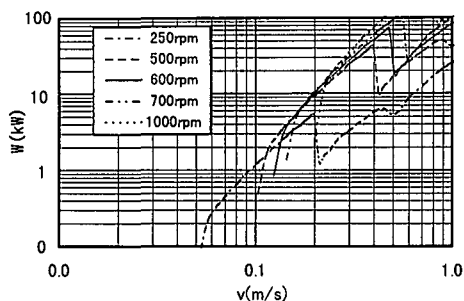


図-10 空気室内水面速度とタービン出力の関係

条件ではノズル比 1/110~1/250, タービン回転数 1000 rpm 以下の回転数でタービン出力が得られることがわかった。

さらに図-10 は空気室内水面速度とタービン出力の関係を示したもので、タービン出力は図-9 の各ノズル比の等波高線と各タービン回転数の交点の空気室内水面速度の結果を用い、各波高時のタービン回転数に応じた出力を推定することができる。

この結果より、タービン出力は、どの回転数においてもほぼ高速回転領域にあり、タービン設計としては妥当であるものと考えられる。以上の結果を基に、図-11 は各波高別のタービン回転数に応じたタービン出力の結果に機械損失、発電機効率等を考慮して求めた発電出力と、低波高時に用いられる発電機である 10 kW 発電機の発電出力特性の一部を比較したものを示す。

各海象における発電出力は図中のタービン側の出力特性曲線と、発電機側の特性曲線の交点として求めることができる。この結果から波高 0.6 m の低波高条件でも回転数 300 rpm 程度の発電運転が可能であること、及び波高 1.5 m~2.0 m で回転数約 650 rpm~900 rpm において、ほぼ定格出力の 8 kW~10 kW の発電が可能であることわかる。尚、ここで推定した各波高時の最大発電出

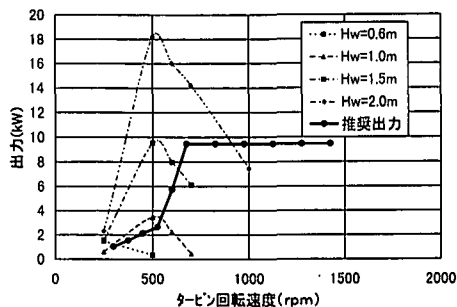


図-11 10 kW 発電機の発電出力

力は、一般的な方法である入射波エネルギーと最大 1 次変換効率, 最大タービン効率, 最大発電機効率のそれぞれの積より求めた発電出力とほぼ一致する。

5. おわりに

本論で検討した結果を整理すると、以下のような結論を得た。

1) 1 次変換効率のノズル比はウェルズタービンの等価ノズル比が回転数によって変化することを考えると、タービン出力特性と合わせてノズル比の最適値を検討することが必要であるものと考えられる。

2) 浮体式波力装置の最適発電出力を検討する際には、設置海域の波浪条件により 1 次変換装置と 2 次変換装置のマッチングを考えた上に、発電機の出力特性を調整して、その仕様を決定することが望ましいと考えられる。

最後に、今後、海洋科学技術センターが平成 10 年度、11 年度に計画している実海域実験により当初の期待通りの成果が得られれば、浮体式波力装置の実用化に目処を立てることができるものとする。

参考文献

- 鈴木正巳・荒川忠一・田古里哲夫 (1984): ウェルズタービンと空気室からなる波力発電装置の基礎研究, 第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集, pp. 201-210.
- 高橋重雄・鈴木論司・明瀬一行 (1985): 波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法—波エネルギーに関する研究—第 4 報一, 港研報告, 24 巻, 2 号, pp. 205-238.
- 高橋重雄・安達 崇 (1988): 固定式水中振動型波力発電システムの設計と実験的検証, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 837-841.
- 堀田 平・宮崎武晃・鷺尾幸久・田中 浩 (1987): ターミネーター型波エネルギー利用装置の研究, 第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集, pp. 1-10.
- 前田久明・木下 健 (1979): 波浪発電, 生産研究, 31 巻, 11 号, pp. 717-726.
- 鷺尾幸久・堀田 平・宮崎武晃・益田善雄 (1984): タンデムウェルズタービンの実機性能試験, 第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集, pp. 191-199.