

# 航路標識用波力発電システム

Wave Activated Generator System for Navigation Aids.

築 貫 義 人\*・矢 作 勝\*\*

Yoshito Tsukinuki Masaru Yahagi

## 1. ま え が き

船舶航行の安全のために欠かすことのできない航路標識のうち、隔離した岬の突端に設置される灯台や、航路限界や障害物を直接示すために海中に設置する灯標や灯浮標は、孤立しているため電源の確保がしばしば問題となる。1965年、海上保安庁では、浮体である灯浮標の電源確保に波浪エネルギーを利用した波力発電装置を世界に先がけ実用化し、以来20年間、日本周辺の海域に420基余りを設置し利用している。

一方、比較的大出力を必要とする海中の灯台や灯標の電源は、激浪を受けるため、太陽電池の利用が困難であり、コストやメンテナンスの面で問題の多い海底ケーブルによる受電か、小電力の一次電池によらざるを得ない状況で、キロワットオーダーの経済的で安定した独立電源を得ることが急務となっている。このような事情から我々は隔離した灯台や海中の岩礁、浅瀬等に設置される灯標用としての波力発電の利用に着目し昭和58年度より3ヶ年計画でその実現に向けて研究開発を実施し、画期的進展が見られるに至った。

本書では、すでに実用化している航路標識用の浮遊式波力発電システムを紹介すると共に、灯標等に利用する新方式の固定式波力発電システムについて紹介する。

## 2. 浮遊式波力発電システム

### 2.1 概要

航路標識用として利用している波力発電システムには灯浮標(ブイ)に利用するいわゆる浮遊式波力発電システム(以下波力ブイ)がある。

本方式は、1963年海上保安庁の指導のもとに航路標識として開発し、実用化したものである。

\* 海上保安庁灯台部工務課課長

\*\* 緑星社技術部部长

波力ブイは、浮体(空気室)と空気タービン、発電機、管制器で構成された波力発電装置及び蓄電池、灯器から構成されており、使用しているタービンの種類によって、衝動タービン4枚弁方式、衝動タービン1枚弁方式、それに加えて最近注目されている弁を必要としない、ウェルズタービン方式、サボニウスタービン方式などがある。ここでは、現在波力ブイで最も多く利用されている衝動タービン4枚弁方式について、その動作原理、構造、発電性能について紹介する。

### 2.2 波力ブイの動作原理

図-1に示すように、波エネルギーを吸収する浮体(空気室)がある。浮体中央には、パイプが貫通しており、パイプ下端は海水中に開口している。一方パイプ上端は、浮体上に開口し、そこに空気タービン、弁機構部等の発電装置が取り付けられている。

浮体は、波エネルギーによって、Heave(上下運動)し、また中央パイプ内の水柱も振動する。ここで浮体の上下運動周期  $T_h$  は次式で与えられる。

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{W(1+m)}{\rho \cdot g \cdot s}} \quad (\text{Sec})$$

W; 浮体重量 (kg)

m; 付加質量係数

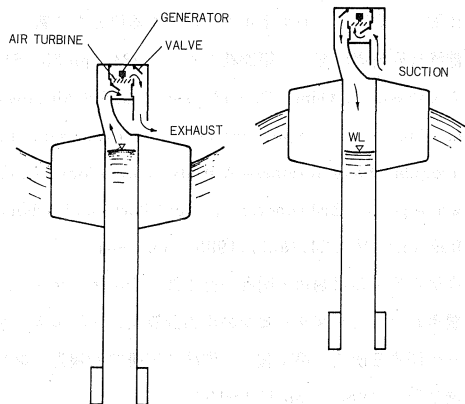


図-1 波力ブイの動作原理

$\rho$  ; 海水の単位体積重量 (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  ; 重力加速度 (m/Sec<sup>2</sup>)

$S$  ; 浮体の喫水断面積 (m<sup>2</sup>)

また、パイプ内水柱の振動周期  $T_w$  は次式で近似できる。

$$T_w = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (\text{Sec})$$

$l$  ; 中央パイプ内水柱長さ (m)

波力ブイは、これら2つの振動系によって生ずる相対運動によって、中央パイプ内の水位が変化し、同時にパイプ内の空気が圧縮、膨張する。このとき中央パイプに取付けたタービンノズルから空気エネルギーを発生させ、空気タービンを回し、タービンによって得られる回転トルクによって発電機を回転させ電気エネルギーに変換するものである。

### 2.3 波力ブイの構造

#### (1) 浮体 (空気室)

波力発電方式の航路標識ブイに使用されている浮体は、直径2.6 m、重量約5.5 tonのものから、直径6.0 m、重量約31tonのものまで数種類あるが、その中で最も多く使用されている浮体は図-2に示すL-1型(T

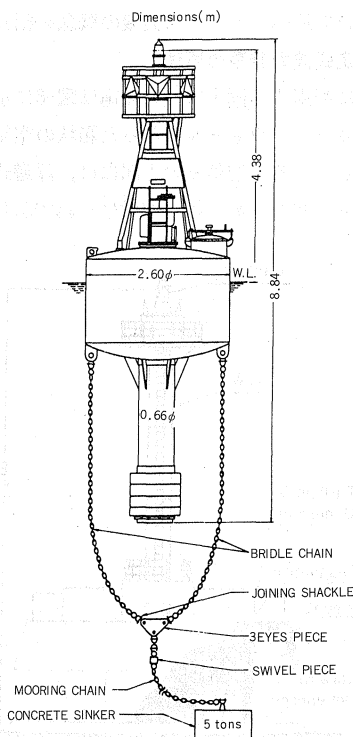


図-2 L-1型(T-1)波力発電ブイ

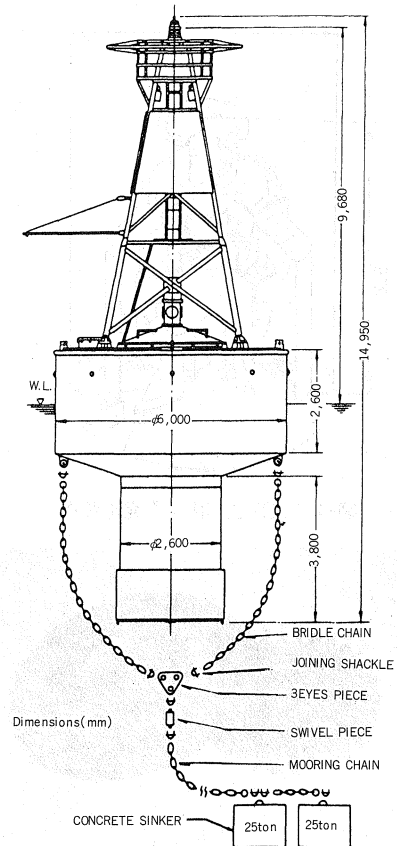


図-3 L-4型(LL-1)波力発電ブイ

ー1)である。L-1型ブイは浮体径2.6 m、全高8.9 m(MWL上4.3 m) 尾筒径0.64 m、重量5.5 tonのブイで以下に示す4枚弁方式の波力発電装置を塔載し、浮体内部には波力発電による電力を貯蔵するためにバッテリーが納められている。また上部には夜間光を点滅させる灯器をはじめ、消灯した時警報を発する消灯警報器等が取付けられている。本体は、海上に設置され、32mm~38mm程度のチェーンでコンクリートシンカーに結ばれ、水深10~30mの航路に沿って係留されるよう設計されている。また図-3に示すブイは、浮体径6 m、全高15m(MWL上9.7 m)、重量約31tonのL-4型(LL-1型)波力ブイである。この波力ブイは発電出力が最大500 Wの発電装置を塔載し現在実用化されている波力発電システムとしては世界最大のものである。このブイは、また水面高が約10mあるので昼標効果も大きく、東京湾入口の浦賀水道、名古屋方面の航路である伊勢湾入口、それと大阪湾の主要航路に設置されている。またL-4型ブイは航路標識としてのみならず、各種海象、気象観測機器の塔載が発電電力からも可能

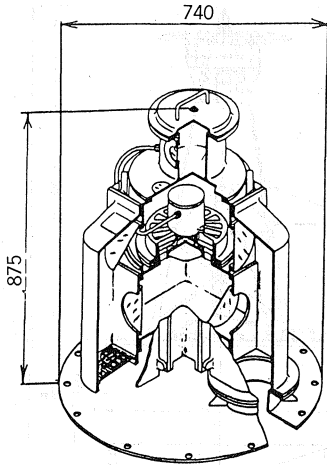
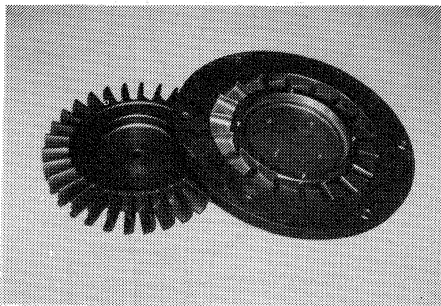


図-4 TG-2A型 波力発電装置



写-1 φ200mm 衝動タービン

であり、多目的ブイとして実用性の高いブイである。

(2) 波力発電装置

波力発電装置は、空気の往復流を一方方向に整流する弁機構部と空気タービン、交流発電機そして整流、充電制御を行う管制器によって構成されている。図-4に示す装置はTG-2A型の波力発電装置で直径約70cm、高さ約90cm、重量約70kgである。

本装置は4枚弁方式であり、吸排気を整流し、タービンに対し一定方向に空気流を作用させるために4枚のフラップ弁を内蔵している。写1に外観を示す空気タービンは、動翼、静翼からなる直径200mmの耐食アルミ製の衝動タービンが使用されている。発電機は、自励マグネット式の三相交流発電機(WAG-70型)であり、最大出力70W(5,000 r・p・m)、最大効率47%(1,100 r・p・m)である。図-5にL-1型波力ブイの発電出力を示す。横軸に実海域の波高、縦軸に発電出力をとり、同調点での波周期における特性を示している。グラフからもわかるように、標準的な湾内の波浪である。 $T_{1/3} = 2.8 \text{ Sec}$ 、 $H_{1/3} = 20 \text{ cm}$ のとき平均17Wの出力を得ることができる。

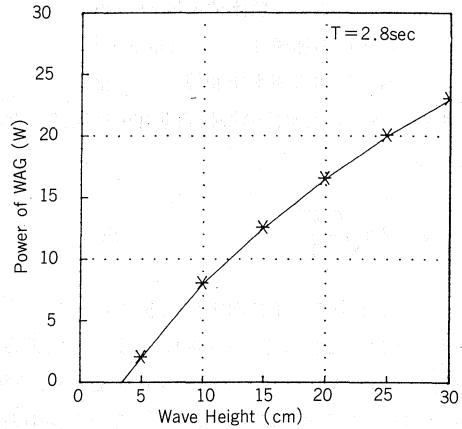


図-5 L-1型波力ブイの発電出力

3. 固定式波力発電システム

3.1 概要

これまで、航路標識用波力発電システムとしては、浮遊式のみ実用されてきたが、近年灯標等固定式構造物に利用する波力発電としていわゆる固定式波力発電の研究開発が進み、現在ではその実用化段階にきている。ここでは固定式波力発電システムについて動作原理、空気室模型の水槽実験結果、タービン発電機の試験結果、実海域における発電出力のシュミレーション結果について述べるとともに実機の内容を紹介する。

3.2 固定式波力発電の原理

灯標等に利用する固定式波力発電は図-6に示すように前壁がカーテンウォールになった箱状の空気室が海中に開口している。空気室の上部には、浮遊式と同様に、空気タービン・発電機が取り付けられており、波の

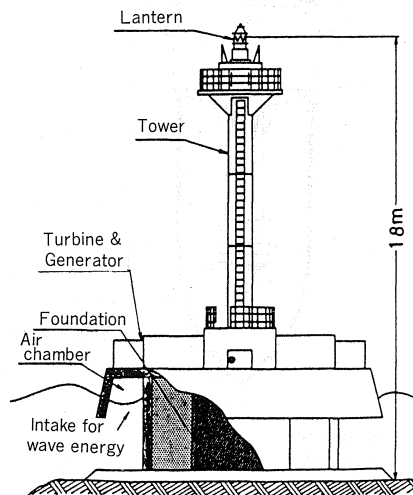


図-6 固定式波力発電

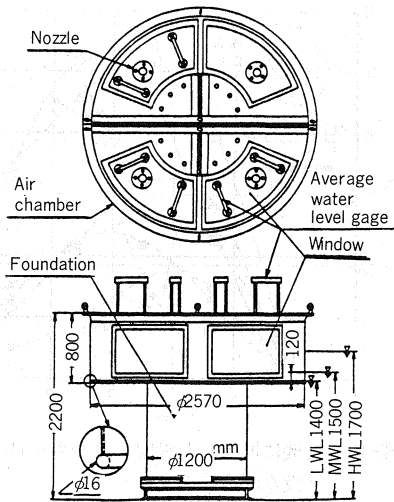


図-7 空気室模型

エネルギーによって空気室内の水柱が振動し空気室内の空気が圧縮・膨張する（一次変換）。

このとき発生する空気エネルギーを使ってタービン・発電機を回転させ電力を得るものである（二次変換）。ここで水柱の運動方程式は次式で表わされる。

$$(m + m_z) \ddot{Z} + (N + d_0) \dot{Z} + \rho g A Z = F_z e^{i\omega t}$$

- $m$  ; 水柱の質量
- $m_z$  ; 付加質量
- $N$  ; 造波ダンピング係数
- $d_0$  ; 負荷ダンピング係数
- $A$  ; 空気室内の水線面積
- $F_z$  ; 波強制力

### 3.3 一次変換装置（空気室）の開発

#### (1) 空気室模型

空気室の模型を図-7に示す。灯標の電源としての波力発電システムは年間を通してのエネルギー供給が必要である。そのためには一次変換装置である空気室は

表 1 空気室模型の要目

縮尺	1/5
空気室外径 $D_1$	2.56 m
“ 内径 $D_2$	1.24 m
“ 奥行 $a$	0.66 m
“ 高さ $b$	0.7 m
“ 没水部長さ $d$ (MWL)	0.12 m
“ 水線面積 (4 分割) $A_1$	0.985 m <sup>2</sup>
“ “ (2 分割) $A_2$	1.975 m <sup>2</sup>

潮汐の干満による水位の変動、波高及び波周期、波向きの変化にかかわらず必要最小限の波エネルギーを吸収しなければならない。このような条件に適した空気室の形状として、灯標基部の周囲に円筒形の空気室をもつ構造とし、また円筒形の空気室は複数の扇形空気室に分割する構造とした。模型は二次元模型実験のもとに設置想定地域の波浪及び潮汐のもとで設定発電量が可能となるよう設計した。模型の主要寸法は表 1 のとおりである。

#### (2) 実験状態

実験は空気室分割数、前面没水部長（潮汐変化想定）、波向、ノズル開口比及び波高、周期を変化させて行った。表 2 に実験状態を示す。実験は運輸省船舶技術研究所の海洋構造物試験水槽で行った。計測項目は入射波、模型の側方の波、空気室内の水位と空気圧などである。

#### (3) 実験の結果

図-8～図-10には、模型実験で計測した吸収エネルギー  $E_a$  を実機に換算して示した。図-8は 4 分割空気室について波向  $\chi = 0^\circ$ 、没水長  $d = 0.6$  m、開口比  $R = 1/100$  のときの値で、入射波高は  $H_i = 0.5$  m である。波周期 4 sec のとき空気室トータルで約 10 kW の空気エネルギーを吸収する。また AC No. 1 単体でも約 5 kW の

表 2 実験状態

空気室数		4			2		
波 向 $\chi$		0°	22.5°	45° - 22.5°	0°	45° 90°	
水深及び没水長	h (m)	1.5	1.7	1.4			
	d (cm)	12	32	2			
ノズル開口比 R		1/100	1/150	1/270			
波	規則波	T (sec)	1.0	1.5	2.0	2.5 3.0	
		$H_i$ (cm)	5	10			
	不規則波	$T_m$ (sec)	1.2				
		$H_{1/3}$	6	11			

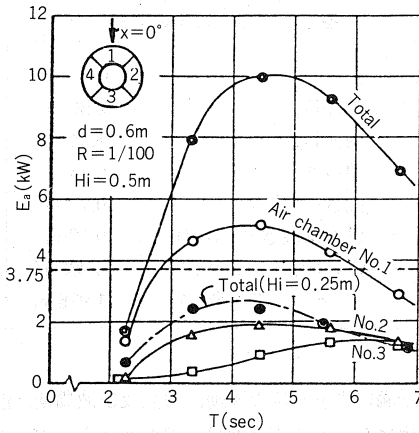


図-8 実機に換算した吸収エネルギー  $E_a$   
(4分割  $\chi=0^\circ$ ,  $d=0.6\text{ m}$ ,  $R=1/100$ )

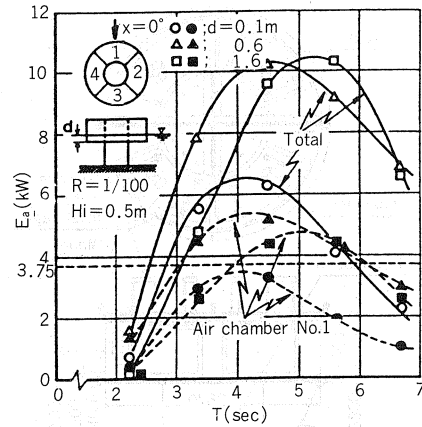


図-10 実機に換算した吸収エネルギー  $E_a$   
(没水部長  $d$  の変化)

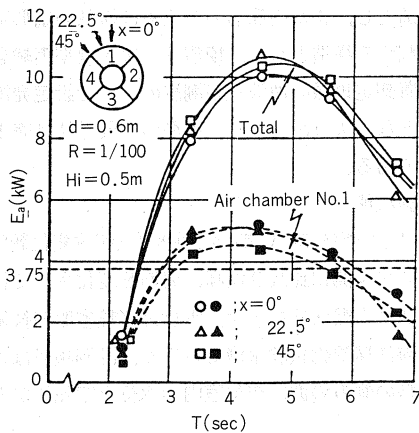


図-9 実機に換算した吸収エネルギー  $E_a$   
(波向  $\chi$  の変化)

空気エネルギーを吸収する。図-9は波向を変化させた場合であるが、本空気室は波向  $\chi$  が  $0^\circ \pm 45^\circ$  変化しても吸収エネルギーが変化しないことがわかった。図-10は没水部長さの変化(潮汐影響)による吸収エネルギーの変化を示したものである。  $d=0.1\text{ m}$  では没水部下端が空气中にさらされるために値はやや小さいが、  $d=1.0, 1.6\text{ m}$  では同等の値を示している。以上の結果から、本空気室は各種条件にかかわらず必要最小限のエネルギー吸収が可能であることがわかった。

### 3.4 二次変換装置(タービン・発電機)の開発

#### (1) 実験模型

##### a) タービン

灯標用の波力発電装置では、どこまで小さな波のエネルギーを利用できるかが年間の出力予測やバッテリー容量の決定に大きな影響を与える。また灯標用の電源として比較的大電力を要する本システムのタービ

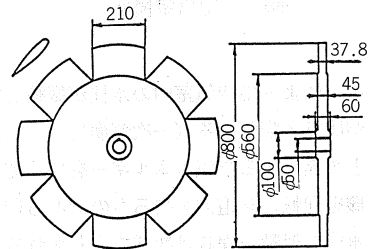


図-11 実寸大ウェルズタービン模型

表 3 実寸大ウェルズタービンの諸元

外 径	$\phi 800\text{ mm}$
ハ ブ 径	$\phi 560\text{ mm}$
翼 形	NACA0018, 矩形
翼 厚	37.8 mm
翼 弦 長	210 mm
翼 枚 数	8 枚
リリディティ	0.8
材 質	CFRP
重 量	12.8 kg
ガイドベーン	あり

ンとしては、これまでの衝動タービンでは大きな弁機構が必要となる。そこで種々の実験の結果往復流に対しても一方向に回転し、弁機構を必要としない無弁式のウェルズタービンを使用することにした。

ウェルズタービンは、構造が簡単でしかも無弁式なので装置本体を小型にできることから広さに制限のある場所に有利である。しかし、反面、ウェルズタービンは一般には失速域を有し駆動トルクが小さいので自己起動しにくいという性質を持つと言われていた。しかし縮小タービン模型による各種翼形の実験を行い、

その実験をもとに本システムに適合する翼形を選定し、その実寸大模型の製作・性能実験を行った。図-11に実寸大ウェルズタービン模型の外観図を、又、表3にその諸元を示す。タービンは起動性向上と軸受負荷の

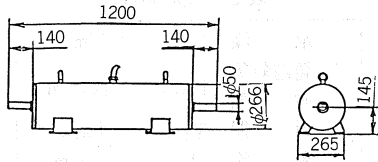


図-12 実寸大発電機模型

表4 実寸大発電機の諸元

型式	誘導子式自励型
相数	3相
定格回転数	1000rpm
定格出力	350W
定格電圧	24V
最大回転数	3000rpm
最大出力	500W
重量	187kg

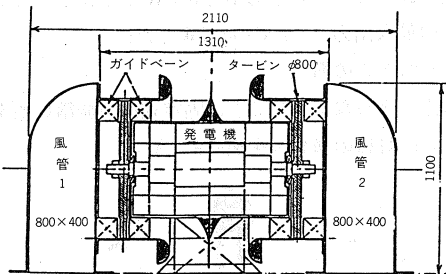


図-13 ダンデム式発電装置

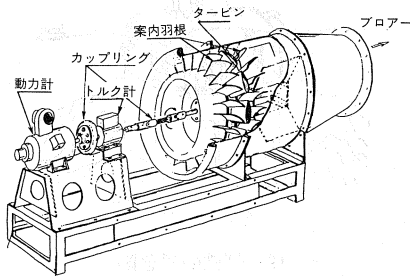


図-14 実寸大タービン発電装置

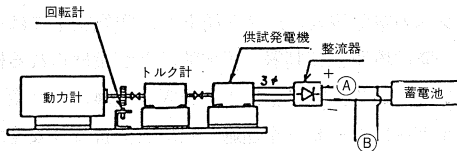


図-15 実寸大発電機の計測システム

軽減を目的に軽量化をはかるため、カーボンファイバー (C.F.R.P.)で製作した。

b) 発電機

図-12に実寸大模型の外観を表4にその諸元を示す。ウェルズタービン用の発電機は起動性向上のため発電開始回転数以下では磁場による負荷のかからない誘導子式自励型を採用した。またこの発電機は図-13に示すように2枚のタービンを向い合わせ、大きな軸スラスト荷重を打ち消し合うようにタンデム方式とした。

(2) 実験方法

図-14にタービン実験装置を示す。実験装置は運輸省船舶技術研究所の75馬力送風機に取付けて実験を行った。計測項目はタービン回転数・トルク・圧力差・流量でデータはパーソナルコンピュータにより収録、解析を行った。また図-15には発電機の計測システムを示す。実験は発電機を動力計で回転させ、発電機の出力は整流器で整流し24Vのバッテリー負荷に接続し、回転数・トルク・発電電流、電圧を計測した。

(3) 実験結果

図-16にタービンの定常流での回転数N-トルクTの特性を示す。パラメータPはタービン前後の総圧差である。

タービンのトルク係数  $C_t$ 、圧力計数  $\Psi$  を次式で定義

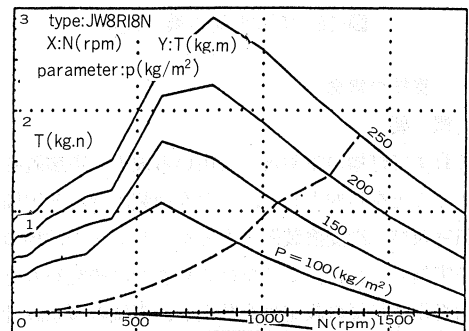


図-16 回転数N-トルクT特性(定常流)

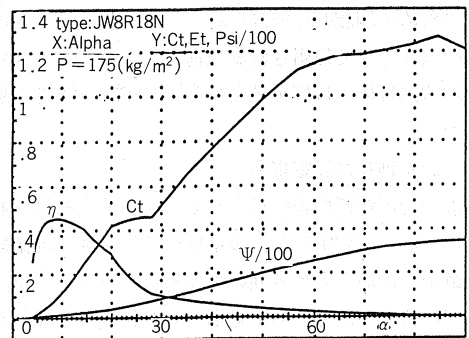


図-17 トルク係数、圧力係数、効率(定常流)

する。

$$T = C_t \cdot \frac{1}{2} \rho W^2 A R_t$$

$$P = \psi \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot P \cdot W^2$$

$\rho$  : 空気密度

$W$  : 翼への相対流入速度

$A$  : タービンの環状面積

$R_t$  : タービン半径

図-17にトルク係数 $C_t$ 、圧力係数 $\psi$ 、効率 $\eta$ を示す。 $\alpha_m = 10^\circ$ 付近で効率最大46%を得、出力性能、起動性共に良好である。図-18発電機の実験結果を示す。低回転時の駆動トルクが小さく、発電機効率は最大55% (700 r. p. m.)を得、出力性能は良好であることがわかった。

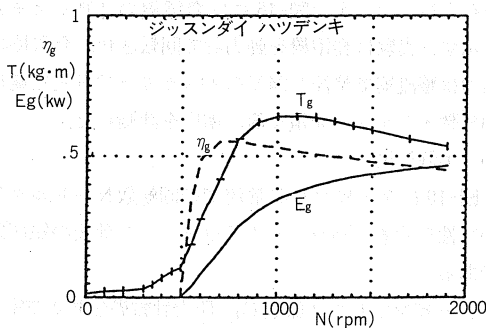


図-18 実寸大発電機の性能

### 3.5 実機 の 概 念

#### (1) 概 要

これまで灯標の電源として用いる波力発電装置を開発することを目的として、一次変換装置である円筒型空気室及び二次変換装置であるタービン・発電機の研究を実施してきた。ここではこれまでの研究をもとに波力発電式灯標の設定地を想定し、実機 の 概 念 設 計 を 行 っ た。実機の場合、特に考慮した点は経済的な規模を考えた実用性の高いものを想定することであった。そのために理想的な波高を設定したり得るべき発電出力を大きくして使用される負荷を大きくしたりせず、平均的な灯標の規模を考えて常用100Wの消費を想定した。

#### (2) 設定地及び設定場所

波力発電灯標の設定地として、徳島県小松島市沖の「沖ノ瀬」を想定した。設定地の「沖ノ瀬」は徳島一和歌山、徳島一阪神方面の主要航路に位置し、水深3m程の浅瀬があるために以前より灯標建設の要望が高かった。また本地域は年間を通じて小さな波浪が存在

する典型的太平洋岸の海象とも言える場所であり、今後さらに波力発電灯標の利用を広める場合、対象地としては、標準的な地域でもある。設計条件を表5に示す。

表5 設計条件

水深	$h$	5 m
発電対象	$H_{1/3}$	0.35 m
波高	$H_{1/3}$	0.35 m
周期	$T_{1/3}$	4 sec
潮汐	$\Delta h$	$\pm 1$ m
波向	$\chi$	$0^\circ \pm 90^\circ$

#### (3) 計画電力

灯標用電源として想定される消費電力としては、

- a. 主灯の点滅等光波標識の電源
- b. レーダービーコン・フォグホーン等電波標識等の電源
- c. 各種計器、安全装置等の電源

など、システム全体の消費電力を考慮する必要がある。今回計画したシステム全体の消費電力は常用100Wとしたがそのために設計条件の波浪における発電出力は年間の波浪を考慮し平均出力350Wとした。またシステムの最大出力は1.2kWに設定した。

#### (4) システムの概念

以上のような条件をもとに固定式波力発電灯標を設計した、灯標の概念図を図-19に示す。

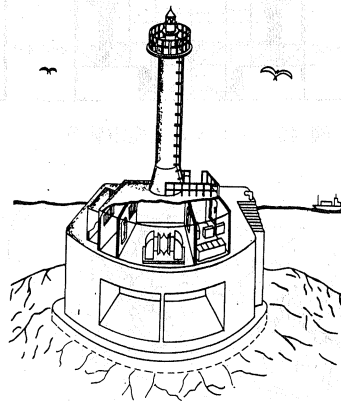


図-19 灯標の概念図

灯標基部に扇形空気室を設け空気室の天井にはタービンへの空気流入口が2ヶ所あき、空気室上にはタービン発電機及び管制器、蓄電池などが設けられる構造となっている。空気室により吸収・変換された空気エネルギーはタービンを通じたあと消音及び安全装置の格納を目的とした消音室を通り外部へ排気される。

一方発電された電力は電池室のバッテリーに蓄えられ、灯器、計器、安全装置等の電源となる。

### 3.6 実海域における発電出力の予測

#### (1) 概要

これまでの研究をもとに波力発電装置を装備した灯標の実海域における発電出力の予測を行った。出力の予測は設定海域の波浪、潮汐、波向の2時間毎に観測された年間のデータを使い時々刻々の出力変動を計算した。空気室の吸収エネルギーの推算ではタービンの塔載時の空気室の波エネルギー吸収特性と等価な円形オリフィス負荷における空気室の特性と同等になるという実験結果(等価開口比)を用いた。またタービンの出力及び発電機出力は、実寸大模型による特性実験の結果を用いた。

#### (2) 出力予測の方法

出力予測は次の手順で行った。

- 使用電力、バッテリーの初期容量を設定する
- 2時間毎に観測された波高、波周期、潮位、波向のデータをもとに空気室の開口向きを設定し、空気出力 $E_a$ 、及び空気圧 $P_m$ を計算する。
- $P_m$ の値よりタービン回転数 $N$ を求める。
- $N$ に対する発電機出力 $E_g$ を求める。
- 使用電力を差し引きバッテリー残量を求める。

計算及び計算結果によるグラフ作成は、パーソナルコンピュータにより行った。

#### (3) シミュレーションの結果

シミュレーションの結果を図-20に示す。

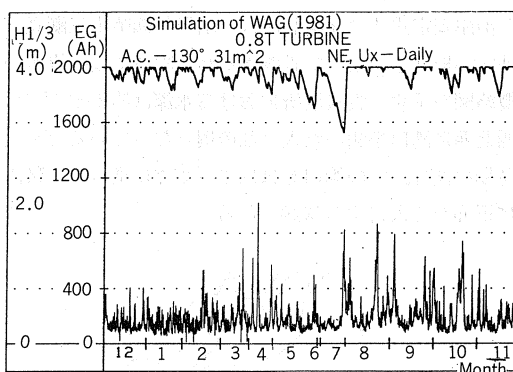


図-20 出力シミュレーションの結果

横軸は観測月、縦軸はバッテリー容量を示している。波浪データは昭和56年の一年間を使用し消費電力を常用100Whバッテリーの初期容量を2,000Ahとして計算した。空気室の向きは波向データをもとにNEに設定した。図中にはバッテリー容量の変化の他にその時の

有義波高 $H_{1/3}$ も示した。

シミュレーションの結果、設置想定海域では、6月7月の波高の小さな期間において、バッテリー容量が1,500 Ahまで低下するが、それ以外の期間は100~200 Ah程度の容量変動しかみられず、本システムは年間を通して安定した電力を供給することが明らかになった。

#### 3.7 むすび

現在、航路標識用の波力発電システムとして、灯浮標に利用する浮遊式波力発電システムは、その発電性能、耐久性等実用性を高く評価されている。これら浮遊式の波力発電システムは、今後灯光の電源のみならず光力の増大や各種観測機器の塔載による洋上ステーションとしての利用が期待される。

一方、海中に孤立している多くの灯台や灯標は経済的に安定した所要出力の電源が得られぬために小出力で小規模なものによぎなくされていた。灯標等における大出力の独立電源の出現は標識の光力増大はもとより霧信号やレーダービーコン等の電波標識や機器の監視・コントロール装置の附加、更には各種観測機器、各種情報提供装置やヘリポートの併設等を考えれば各種の多目的な総合ステーションとして実現性を非常に高くする。これら灯台や灯標への波力発電の導入では発電された電力をその現場において即利用、消費する所に特長があり、配電線路等の施設が省略されるため経済性が高く、それゆえ、将来のローカルエネルギーとしての利用の展望は豊かであろうと思われる。

なお本研究の一部は(財)日本造船振興財団(会長 笹川良一氏)の補助金によって行われ、また実験等研究の一部は運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部、機関開発部との共同研究として行われた。

#### 参考文献

- 海洋科学技術センター；第1回波浪エネルギー利用シンポジウム1984. 11月
- (財)日本航路標識協会；灯標等に利用する波力発電システムの研究開発、中間報告書1984, 1985
- (財)日本航路標識協会、(株)緑星社；灯標等に利用する波力発電システムの研究開発完了報告書1986
- 井上、岩井、ほか；船舶技術研究所研究発表会、講演集(第42回)1983. 12. p. 106~p. 109, (第44回)1985. 11. p. 26~p. 29, (第46回)1985. 11. p. 38~p. 41, (第47回)1986. 6. p. 25~p. 28.
- 勝原、北村、ほか；船舶技術研究所研究発表会；講演集(第44回)1984. 11. p. 26~p. 29, (第46回)1985. 11. p. 38~p. 41, (第47回)1986. 6. p. 25~p. 28.
- 勝原ほか；日本舶用機関学会講演会前刷(第38回)1986. 5. p. 31~p. 38, (第39回)1986. 10.