

波力発電と魚礁システムの開発

「波浪エネルギーと魚礁」開発研究委員会*

Combination System of Wave Power Generator and Artificial Fish Habitat

Committee for Wave Power Generator and Artificial Fish Habitat

The practical use of wave energy utilization has been closed up since the first oil crisis in 1973. Since then the useful technology of wave energy utilization has been developed mainly in Japan, UK, Norway and some other countries. Up to now a lot of wave-power device concepts have been proposed. In any case each device comprises multiple converter. The primary converter changes wave power into another mechanical power and plays the role of an interface between the waves and the secondary converter to generate electric power. From the viewpoint of technical feasibility, the oscillating water column device with wells turbine and electric generator is one of the most prospective concepts. On the basis of this concept, Port and Harbour Research Institute has conducted full-scale tests on the shore-fixed wave power generating system from 1979 through 1982 at the port of Sakata in Yamagata prefecture. Japan Marine Science and Technology Center has carried out full-scale tests on the offshore floating wave power generating system from 1978 through 1985 off the coast of Yura in Yamagata prefecture. On the other hand, a theoretical approach has been developed to estimate the interaction of the incident waves and the water elevation in the air chamber. The theory was extended to include the wave irregularity by assuming the linear relation of the wave height to the air pressure and the water elevation in the air chamber. A series of full-scale test mentioned above were conducted to verify the effectiveness of the theory.

Our studies have been conducted under such a technical background and for the purpose to design the wave power generator and to investigate modern artificial fish habitats. The shore-fixed wave power generating system is used for the artificial fish habitat to increase fish-farming density and to clean sea water by optimum environmental control. Finally the results of this study are summarized in four items as follows:

- (1) State of arts is reviewed for the wave power generating system of oscillating water column type.
- (2) The characteristics of Wells turbine are presented for the interaction between primary and secondary devices of wave power converter.
- (3) The characteristics of electric generator are presented for the interaction of Wells turbine and a quality control device to improve the irregularity of electric power is proposed.
- (4) The constructions of wave power extracting caisson and artificial fish habitat are designed. Some ideas for optimum environmental control of sea water are discussed.

1. まえがき

エネルギーおよび食料資源に乏しい我が国は、幸いにも四方を海に囲まれ、海からのエネルギーと資源の確保は、新世紀の我が国の発展に不可欠であり、国策として推進すべき重要な課題である。本研究委員会は波力発電を中心に波浪エネルギー利用技術の調査研究および具体的設備の開発を進めるとともに、この設備と人工魚礁との組み合わせを検討し、

※ 電気電子工学科 機械工学科 建設工学科 応用理化学科

エネルギーと漁業資源の確保を図ることを目的とする。この目的の達成は、福井工業大学の教員を主体にプロジェクトチーム結成し、その総力を結集して進めるものとする。

本調査研究では、港湾技術研究所及び海洋科学技術センターが実用化を目的として実施した振動水柱型ウェルズタービン方式の波力発電システムに関する実証実験およびその解析に用いられた理論を分析的に検討し、30 kW 波力発電システムの試設計を試み、併せてこの電力を利用する魚礁について調査したので、その概要を次の三項目に分けて報告する。

振動水柱型波力発電システムの基礎理論 30 kW 振動水柱型波力発電装置の試設計 波力発電ケーソンと魚礁の構造

2. 振動水柱型波力発電システムの基礎理論^{1) 2) 3) 4) 5)}

波力から空気出力への変換は、一次変換と呼ばれ、図 1 に示すようにカーテンウォールを透過した波により空気室の水柱が上下動し、水柱の上下動によって生ずる往復空気流がタービンを駆動するパワー変換である。その変換効率には波の入力パワー、振動水柱の上下運動、空気室水面に働くタービン反力、空気出力パワーより分析的に求めることが出来る。

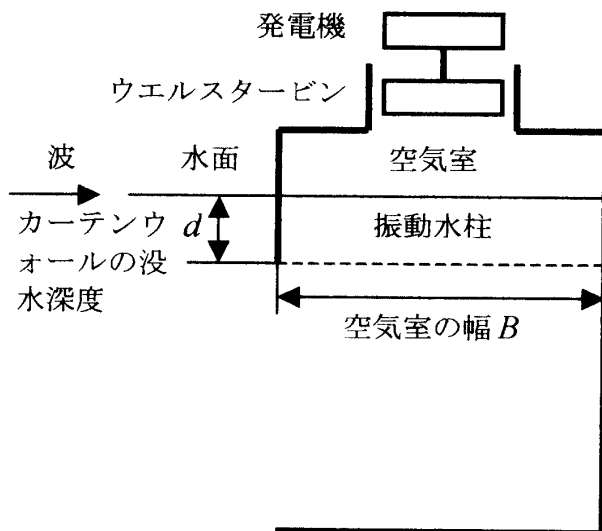


図 1. 振動水柱型一次変換装置

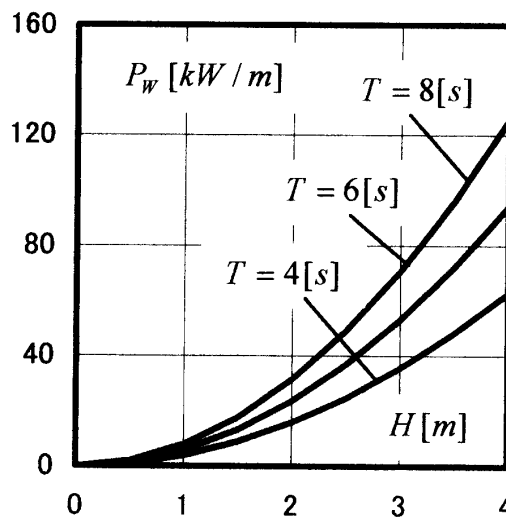


図 2. 波高と波のパワー

2.1 海洋波の特性とパワー⁶⁾

水面を伝播している規則波の振幅を a 、周波数を ω 、波数を k とすれば、場所 x 、時刻 t の波形 $\zeta_w(x, t)$ は

$$\zeta_w = a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

この規則波の単位幅当りのパワー P_w は海水の密度を $\rho = 105 \text{ [kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4]$ 、重力加速度を $g = 9.8 \text{ [m/s}^2]$ 、波周期を $T = 2\pi / \omega$ 、波高を $H = 2a$ とすれば、

$$P_w = \frac{\rho g^2 a^2}{4\omega} = 0.98 H^2 T \text{ [kW/m]} \quad (2)$$

で与えられるので、波高 H と波パワー P_w の関係を図 2 に示す。

一方、海洋波は一般に不規則で、振幅と周波数が異なる無数の素成波が不規則に重なり合っておりと考えられ、その固有の性質は波スペクトル $S(\omega)$ で定義される。この場合、沿岸のように限定された海域で発生する海洋波については、標準スペクトルとして有義

波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{H1/3}$ で与えられるブレットシュナイダー・光易のスペクトル

$$S(\omega) = \frac{401}{\omega^5} \left(\frac{H_{1/3}}{T_{H1/3}^2} \right)^2 \exp \left[-\frac{1605}{\omega^4 T_{H1/3}^4} \right] [m^2 \cdot \text{sec}] \quad (3)$$

を用いれば、このスペクトル $S(\omega)$ で与えられる海洋波のパワー $P_w(H_{1/3})$ は次式で与えられる。

$$P_w(H_{1/3}) = \frac{1}{2} \rho g^2 \int_0^\infty \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega = 0.44 H_{1/3}^2 T_{H1/3} [kW/m] \quad (4)$$

2.2 空気室の特性と空気出力パワー^{4) 5)}

空気室前壁のカーテンウォールの没水深度は出来るだけ深いほうが安全であるが、深いほど水柱が重くなり、空気出力効率は落ちるため、設計有義波高の波高程度の深さが必要となる。また、空気室の幅は設計有義波周期と共振する固有周期になるように定める。空気室の長さは要求電気出力を満足するように定める。この場合、主要目に関する空気室内水面の上下変位は等価浮体の概念に従って、空気室で上下動する振動水柱の重心の変位 ζ_G に関する次の運動方程式で記述することができる。

$$(M+m)\ddot{\zeta}_G + (N+D)\dot{\zeta}_G + \rho g A_w \zeta_G = F_C \cos \omega t - F_S \sin \omega t \quad (5)$$

$$F_C = 2a(\rho g A_w - m\omega^2) \exp \left[-\frac{\omega^2 d}{g} \right] \left(\frac{g}{\omega^2 B} \right) \sin \frac{\omega^2 B}{g} \quad (6)$$

$$F_S = 2aN\omega \exp \left[-\frac{\omega^2 d}{g} \right] \left(\frac{g}{\omega^2 B} \right) \sin \frac{\omega^2 B}{g}$$

ここで、 M は等価浮体の質量、 m は等価浮体の付加質量、 N は等価浮体の造波減衰力係数、 D は空気室水面に働くタービン反力の減衰力係数、 A_w は空気室水面の面積、 F_C 及び F_S は波浪強制力の振幅である。

これらの流体力学的係数を等価浮体法により解析的に求めると、一次変換装置の主要目 L, B, d との間には次の関係がある。

$$M = \rho L B d, \quad A_w = L B, \quad m = \frac{\rho \pi C B^2 L}{4}, \quad N = \frac{\rho g^2 \bar{A}^2 L}{2\omega^3}, \quad (7)$$

ここで、 C は付加質量係数、 \bar{A} は進行波振幅比と呼ばれ、微小動揺理論より与えられる。この線型微分方程式の解から空気室内部の定常上下変位 $\zeta_G(t)$ は

$$\zeta_G(t) = \bar{\zeta}_G \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (8)$$

水面の上下振幅 $\bar{\zeta}_G$ 、波浪強制力係数 μ 、水面の上下変位と波浪強制力との位相差 ε はそれぞれ次式のように与えられる。

$$\bar{\zeta}_G = \frac{a\mu}{\sqrt{[\rho g A_w - (M+m)\omega^2]^2 + (N+D)^2 \omega^2}} \quad (9)$$

$$\mu = 2 \exp \left[-\frac{\omega d}{g} \right] \frac{\sin \frac{\omega^2 B}{g}}{\omega^2 B / g} \sqrt{(\rho g A_w - \omega^2 m)^2 + (\omega N)^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \frac{(\rho g A_w - \omega^2 m)(N+D)\omega - [\rho g A_w - (M+m)\omega^2]N\omega}{[\rho g A_w - \omega^2 (M+m)]N\omega + (\rho g A_w - \omega^2 m)(N+D)\omega} \quad (11)$$

各波周波数における振動水柱の上下振幅は一次変換装置の主要目 L, B, d とタービン反力の

減衰係数 D があたえられると、上式より求めることが出来る。

この振動水柱の上下運動において、エネルギーを消費するのは振動水柱の上下運動によって生ずる造波減衰力とタービンノズルを出入りする空気流による減衰力の項で、このうち空気流のパワーはタービン負荷で吸収されるパワーに等しく、一周期間の平均パワー P_A は次式で与えられる。

$$P_A = \frac{1}{2} D (\bar{\zeta}_G \omega)^2 = \frac{1}{2} \frac{(a\mu\omega)^2 D}{[\rho g A_w - (M+m)\omega^2]^2 + (N+D)^2 \omega^2} \quad (12)$$

この場合、空気パワー P_A が最大となるタービン負荷の減衰係数 D は $dP_A/dD = 0$ となる条件より最適負荷

$$D\omega = \sqrt{(N\omega)^2 + [\rho g A_w - (M+m)\omega^2]^2} \quad (13)$$

を得るので、波と振動水柱との共振条件

$$\rho g A_w - (M+m)\omega_0^2 = 0 \quad (14)$$

を満たすとき、タービンの最適負荷は造波減衰係数と等しくなる。

$$D = N_0 = \frac{\rho g^2 \bar{A}_0^2 L}{2\omega_0^3} \quad (15)$$

ここで、 N_0 は固有周波数における造波減衰係数、 \bar{A}_0 は固有周波数における進行波振幅比、 ω_0 は振動水柱の固有周波数と呼ばれ、次式で与えられる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{M+m}} \quad (16)$$

この最適負荷の条件を満足するようにタービン負荷を定めると、空気出力パワーは次式で与えられる。

$$P_A = \frac{1}{2} \frac{(a\mu\omega)^2 N_0}{[\rho g A_w - (M+m)\omega^2]^2 + (N+N_0)^2 \omega^2} \quad (17)$$

幅 L の一次変換装置に入射する規則波のパワー $P_w L$ を空気出力パワー P_A に変換する効率 η_A は次式で与えられる。

$$\eta_A = \frac{P_A}{P_w L} = \left(\frac{2\omega}{\rho g^2 L} \right) \frac{(\mu\omega)^2 N_0}{[\rho g A_w - (M+m)\omega^2]^2 + (N+N_0)^2 \omega^2} \quad (18)$$

一方、不規則な海洋波が入射する場合、海洋波のスペクトル $S(\omega)$ に対するパワー $LP_w(H_{1/3})$ を空気出力パワー $P_A(H_{1/3})$ に変換する効率 $\eta_A(H_{1/3})$ は、規則波の各周波数に対する変換効率 $\eta_A(\omega)$ を用いて、次式で与えられる。

$$\eta_A(H_{1/3}) = \frac{P_A(H_{1/3})}{LP_w(H_{1/3})} \quad (19)$$

ここで、

$$P_A(H_{1/3}) = \frac{1}{2} \rho g^2 L \int_0^\infty \eta_A(\omega) \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega \quad (20)$$

2.3 ウェルズタービン・発電機の特性とパワー^{7) 8) 9) 10)}

波によって空気室水面が上下すると、空気室上面のタービンを通過する空気の往復流が

発生し、ウェルズタービンが一定方向に回転する。このタービンの空気力学特性は回転に伴って発生するタービン前後の圧力差 Δp と回転トルク T_T の両者によって特定することが出来る。差圧係数を ψ 、トルク係数を C_T とすれば、それぞれ次式で定義される。

$$\psi = \Delta p / \frac{1}{2} \rho_a U^2, \quad C_T = T_T / \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_T R_T \quad (21)$$

ここで、 $\rho_a = 0.125 [kg \cdot s^2 / m^4]$ は空気の密度、 U はタービン翼に流入する合成速度で、タービンを通過する空気の上下速度 v とタービン翼端の半径 R_T 及びタービンの回転角速度 $\dot{\theta}$ とすれば $U = \sqrt{v^2 + (R_T \dot{\theta})^2}$ 、 A_T はタービンの環状流路断面積と呼ばれタービンボスの半径を R_B とすれば、 $A_T = \pi(R_T^2 - R_B^2)$ で定義される。

この場合、空気室水面の面積 A_w に働く空気圧力 $A_w \Delta p$ は次式で与えられる。

$$A_w \Delta p = \frac{1}{2} \rho_a U^2 \psi A_w = \frac{1}{2} \rho_a \frac{A_w^2}{A_T} C_\psi U \dot{\zeta}_G \quad (22)$$

ここで、差圧係数は迎角 $\alpha = v/U$ に対する比例定数 $C_\psi = \partial \psi / \partial \alpha$ を用いて $\psi = C_\psi (v/U)$ 、またタービンを通過する上下速度 v は空気室内水柱の上下速度 $\dot{\zeta}_G$ との関係を用いて $v = (A_w / A_T) \dot{\zeta}_G$ である。

この空気圧力 $A_w \Delta p$ は水面に働くタービン反力 $D \dot{\zeta}_G$ と等しくなければならないので、減衰係数は

$$D = \frac{1}{2} \rho_a \frac{A_w^2}{A_T} C_\psi U \quad (23)$$

また、この減衰係数は (15) 式で与えられる共振時 $\omega = \omega_0$ の造波減衰係数と等しいとき、最適負荷となるので、次の関係を満足するようにタービンを設計しなければならない。

$$\rho g^2 \bar{A}_0^2 L / \omega_0^3 = \rho_a \frac{A_w^2}{A_T} C_\psi U / A_T \quad (24)$$

この場合の空気圧力パワー P_A とタービンの回転力パワー P_T はそれぞれ

$$P_A = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_T \psi v, \quad P_T = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_T C_T R_T \dot{\theta} \quad (25)$$

で与えられるので、タービンの効率 η_T は次式で表される。

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_A} = \frac{C_T}{\psi \tan \alpha} \quad (26)$$

タービンの最適な空気力学特性を得るには (26) 式において、差圧係数とトルク係数をタービン翼の迎角 α の関数として理論または実験的に求め、定格回転時のトルクと差圧を最適にする迎角 α を見出さなければならない。高速定常回転状態では、上下速度 v に比べて回転速度 $R_T \dot{\theta}$ がかなり大きいので、タービンの回転角速度 $\dot{\theta}$ は回転数を $n [rpm]$ とすれば、合成速度は $U = 2\pi n R_T / 60$ で近似することが出来る。

また、タービン・発電機の回転運動方程式はタービンと発電機ロータの慣性モーメントを I 、タービン・発電機の機械的損失負荷トルクを $T_L(\dot{\theta})$ 、発電負荷トルクを $T_G(\dot{\theta})$ とすれば、次式で与えられる。

$$I \ddot{\theta} + T_L(\dot{\theta}) + T_G(\dot{\theta}) = T_T(t) \quad (27)$$

この運動方程式より、タービン・発電機の機械的損失パワー P_L と発電パワー P_G は次式で与

えられる。

$$P_L = T_L \dot{\theta} \quad P_G = T_G \dot{\theta} \quad (28)$$

従って、発電効率 η_G はタービンパワー P_T と発電パワー P_G との比として次式で与えられる。

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_T} = \frac{T_G}{0.5 \rho_a U^2 C_T A_T R_T} \quad (29)$$

これまでの解析結果より、波力から電力への変換は次式で表すことができる。

$$P_G = \eta_G \eta_T \eta_A P_W \quad (30)$$

3. 30 kW 振動水柱型ウェルズタービン方式変換装置の試設計

振動水柱型ウェルズタービン方式変換装置は一次変換装置の空気室と二次変換装置のウェルズタービンおよび発電機より構成されているので、ここではこれら三者の効率と相互干渉を定量的に分析検討するために試設計を試みる。

3.1 空気室の主要目と効率

振動水柱型一次変換装置の空気室主要目 長さ L 、幅 B 、カーテンウォールの没水深度 d の内、 d と B は装置を設置する海域の出現頻度の高い波を設計波とし、設計波の波高と周波数より、定める。設計波と空気室主要目は表1に示すように、日本海における年間の有義波を参考にして、出現頻度の高い有義波高を $H_{1/3} = 1.8m$ 、その周期を $T_{H1/3} = 1.56sec$ とし、この波高に対するカーテンウォールの深さを $d = 3m$ とすれば、共振の条件(16)式より幅は $B = 6m$ 、発電出力より長さは $L = 20m$ が得られる。

表1 設計波と空気室主要目

$H_{1/3}[m]$	$T_{H1/3}[s]$	$L[m]$	$B[m]$	$d[m]$
1.8	5.56	20	6	3

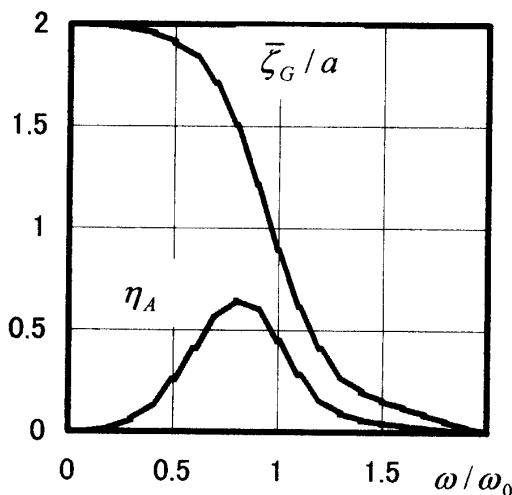


図3. 規則波中の一次変換効率と振動水柱の振幅比

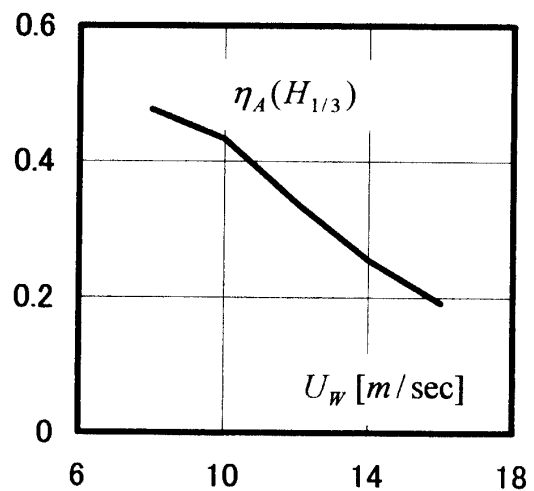


図4. 不規則波中の一次変換効率

振幅 a の規則波に対する空気室水面の上下動振幅 $\bar{\zeta}_G$ は、共振状態でタービンが最適負荷の条件(15)式を満足している場合、(9)式より求めることができる。また、このときの一次変換効率は(18)式より与えられるので、図3に波周波数比 ω/ω_0 に対する

振動水柱の振幅比 $\bar{\zeta}_G/a$ と一次変換効率 $\eta_A(\omega)$ を示す。この図より、空気室の固有周波数 $\omega/\omega_0 = 0.8$ 近傍で一次変換効率は最大値 0.65 となり、このときの振動水柱の振幅比は 1.5 倍となり、その他の波周波数では次第に減少することがわかる。また、不規則な海洋波中の一次変換効率はブレッグシュナイダー・光易の波スペクトル (2) 式を用いると、(19) 式より、風速 U_w の関数として図 4 に示すように求めることが出来る。ここで、有義波高とその周期は風速との間に次の関係がある。

$$H_{1/3} = 0.3(U_w^2/g) \quad T_{H1/3} = 8.6(U_w/g) \quad (31)$$

この式より、各季節の風速が与えられると、風速に対応する有義波高及び波周期と一次変換効率を求めることが出来る。

3.2 ウェルズタービンの主要目と効率^{11) 12)}

ウェルズタービンは往復流中で常に一定方向に回転し続けるタービンで、その特性は差圧係数とトルク係数により表すことが出来る。ウェルズタービンの運転方式として単段型タービン、直列式タンデム型タービン、及び並列式タンデム型タービンがあるが、本二次変換装置に用いるタービンは図 5 に示すような迎え角の広い範囲で高効率を示す直列タンデム型ウェルズタービンを採用し、表 2 に示す主要目とする。

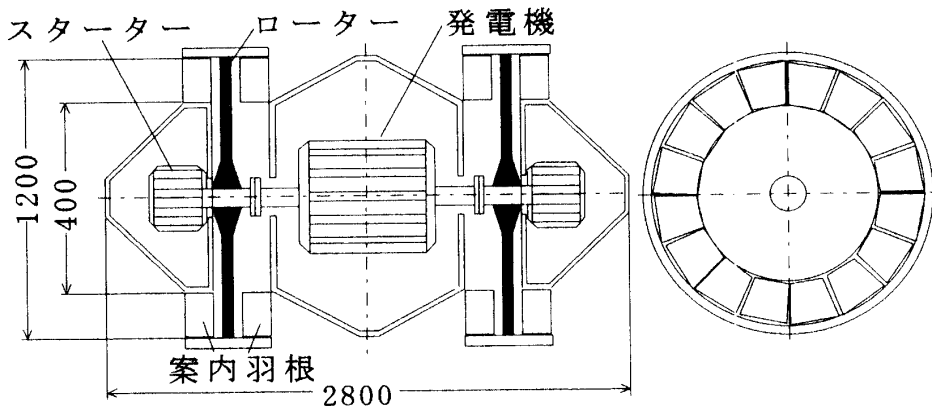


図 5. 直列タンデム型ウェルズタービンの構造

表 2. ウェルズタービンの主要目

翼断面	NACA0021
翼枚数	16
チップ直径	1.2 m
環状流路断面積	1m ²
弦長	0.07 m
弦節比	0.7
アスペクト比	0.175
定格回転数	1800 r p m

表 3. かご型誘導発電機の主要目

定格出力	30 k W
相数	3φ
定格周波数	60 Hz
定格電圧	200V
同期回転数	1800 r p m
回転数範囲	750~2500 r p m
極数	4 p
GD ²	220kgm ²

表 2 に示すウェルズタービンの主要目が与えられると、翼理論に基づいてタービンの差圧係数及びトルク係数曲線を迎角 α の関数として、図 6 及び 7 に示すように推定することが出来る。この両係数を用いれば、タービン効率 η_T は (26) 式より図 8 に示すように与えられる。また、迎角と波高より波高に対するタービン回転数を図 9 に示すように求めることが出来る。これら結果とり、出力 30 k W の発電機を駆動するに必要なタービンの回転トル

ク T_T 、そのパワー P_T を推定することが出来る。この場合、差圧係数 ψ は一次変換装置のタービン負荷 D に関係し、(24) 式に示すように、この負荷 D の最適値は共振時の造波減衰係数 N_0 と等しとき、理論的には効率が最大となるが、実際には水の粘性による造渦損失などを考慮すると、 D/N_0 は 2~3 のほうが効率が向上すると考えられる。また、トルク係数 C_T は発電機の駆動トルクに関係し、定格回転数で所定の出力を得るように定めなければならない。さらに、差圧とトルクの両係数に関係し、高効率を得るように選択しなければならない。このことから、タービンの差圧係数曲線とトルク係数曲線は一次変換装置と発電機とのインターフェイスであることがわかる。従って、一次変換装置と二次変換装置とのマッチングをとる必要がある。

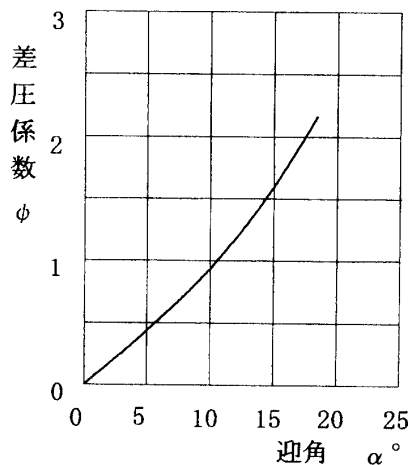


図 6. 迎角に対する差圧係数曲線

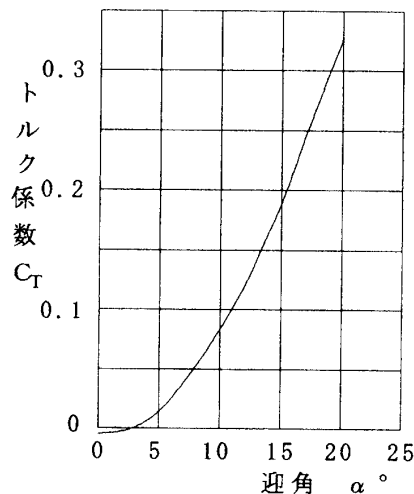


図 7. 迎角に対するトルク係数曲線

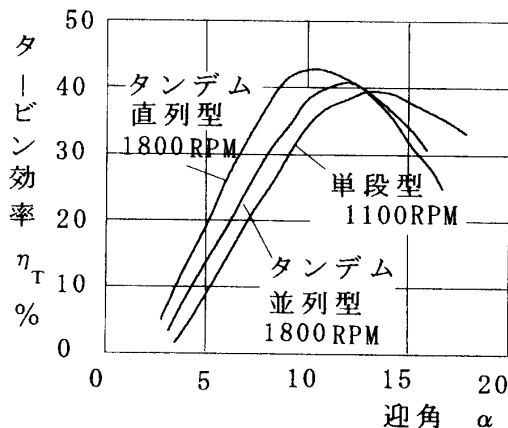


図 8. 迎角に対するタービン効率

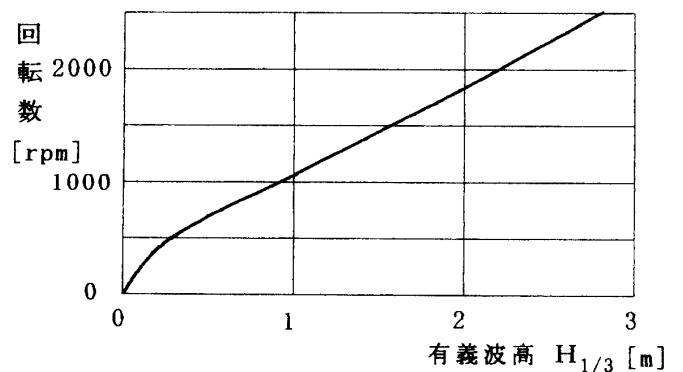


図 9. 波高に対するタービン回転数

3.3 30 kW かご型誘導発電機の主要目と電気システム^{13) 14)}

発電機の型式としては、誘導発電機、同期発電機、差動式同期発電機、極数変換式誘導発電機、無整流発電機、直流発電機（整流子式）などがあるが、本システムにおいては、発電機価格、耐久性、メンテナンスなどを考慮して、かご型誘導発電機を採用するものとする。波力発電と二次変換装置としては類似の風力発電においても、従来から多く用いられてきたのは、かご型誘導発電機である。

かご型誘導発電機は同期発電機と比べると、第一に構造が簡単で、頑丈であり、安価である。第二に運転制御上の付属設備が簡単で、系統並列時の同期化の必要がないので、励磁機、自動電圧調整器、自動力率調整器、自動無効電力調整器が不要であり、経済的で、保

守上も有利であるとともに、起動、並列投入、運転の操作が簡単である。第三に回転子がかご型導体を有する円筒形であるから高い回転数の採用が可能で、速度上昇率を高くとれるため、 GD^2 も小さくなる等の特徴を持っている。

誘導発電機は、固定子と回転子を主体とするもので、構造的には回転軸に対して対称的に配置された円筒形を持っているので、その主要寸法は固定子と回転子の境である空隙における直径 D と軸方向の長さ L との二つの寸法である。この二つの寸法が決定すれば、他の事項はこれに関連して順次に決定することができる。したがって、この D と L との値をどのようにして決めるかが設計上の基礎問題である。

この発電機を設計する場合、最初に、効率を $\eta_G = 86\%$ 、力率を $\cos\phi = 86\%$ と仮定し、固定子巻き線を Δ 結線するものとすれば、出力容量は $40kVA$ 、全負荷電流は $115A$ 、全負荷相電流は $66.4A$ となる。ここで、固定子の毎極毎相の溝数を $q = 3$ に選び、2層巻き線として巻き線のピッチを極間隔の $8/9$ の短節巻きとすれば、分布巻き数係数は 0.96 、短節巻き係数は 0.985 となるので巻き線係数は $K_1 = 0.96 \times 0.985 = 0.946$ である。固定子巻き線は Δ 結線であるから相電圧 E_1 は線電圧に等しく $200V$ となり、毎相の直列導体数は 108 となる。また、 $q = 3$ と選んだので固定子毎相の溝数は $P \times q = 12$ 、固定子全溝数は 36 となり、1溝内に納める導線数は 9 本となる。したがって、磁気装荷は 1.47×10^6 、電気装荷は 5088 となる。

次に、主要寸法はそれぞれの比装荷を適当に選んで決定する。まず電気比装荷を $a_c = 210$ に選べば、極間隔は $5088/210 = 24.2cm$ 、空隙における直径は、 $4 \times 24.2/\pi = 30.8cm$ となるので、これをきりのよい数にして $D = 300mm$ と決定する。このときの極間隔は、 $\tau = \pi \times 30/4 = 23.6cm$ である。次に磁気比装荷を $B_g = 4000$ ガウスに選べば、 $L \times \tau = (\pi/2) \times 1.47 \times 10^6 / 4000 = 577$ 、鉄心の正味の長さは $24.5cm$ となるので、これをきりのよい数として $L = 250mm$ と決定する。

最後に、固定子鉄心の寸法は、固定子巻き線を埋める溝の深さを $25mm$ 程度と考え、固定子鉄心の厚さはこれのほぼ倍の値を取るものとすれば、固定子鉄心の外径は、 $300 + 2 \times 50 = 400mm$ となる。なお、固定子と回転子との空隙は $1mm$ 以下とするのが普通である。以上の結果を踏まえて、外扇やフレームを装備した誘導発電機の主要目を表3、外形寸法を図10、電気出力を図11にそれぞれ示す。

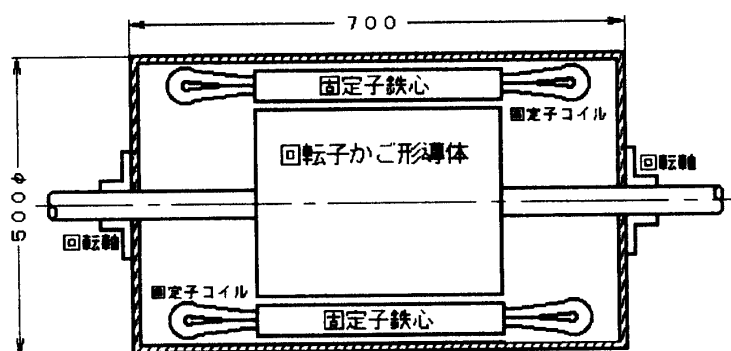


図10. 30kW 誘導発電機の構造と外形寸法

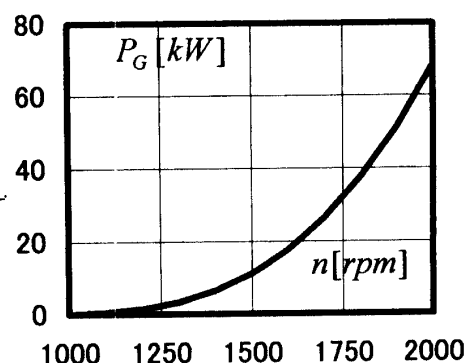


図11. 発電機パワーと回転

以上述べたウェルズタービンの回転力を誘導発電機で電力に変換する発電システムの概念図を図12に示す。発電電力は、スイッチング素子を用いたAC/DCコンバータにより所望の直流電力に変換される。DC側には、電力平準化および電力蓄積用のバッテリーを接続し、インバータによって系統へ電力を供給している。このときAC/DC変換を正確に

行うために、発電機には速度または位置センサを取り付け、電源の位相および周波数を検出する。また、コンバータの制御にはDSPなどのマイクロプロセッサを用いる。

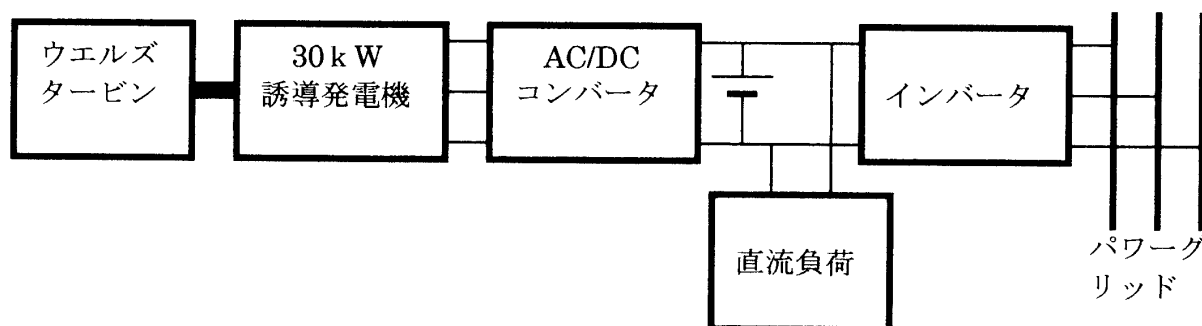


図 12. 30 kW 波力発電の電気系統概念図

4. 波力発電ケーソンと魚礁の構造

空気室とウエルズタービン・発電機を内蔵し、保護対策装置を装備したケーソンは波力発電ケーソン防波堤と呼ばれ、1982 年から港湾技術研究所で研究と酒田港で実証実験が実施されてきたので、これらの成果に基づいて試設計を行う。実際には、冬の日本海は季節風による大波浪の出現頻度が高く、空気室前面の波面がカーテンウォール下端より下がった場合、再び上昇する波面によって空気室内の空気が衝撃的に圧縮されるので、これを防ぐためにバイパス弁、圧抜弁、遮断弁などの保護対策装置が必要となる。

人工魚礁は古くから知られているが、1974 年に沿岸漁場整備開発法が制定されて以来、人工魚礁による漁場造成は大規模化し、その重要性が一般に認識され、特許件数は 23,000 件を超えている。人工魚礁を目的と機能によって区分すると、産卵保護魚礁、幼稚魚保護魚礁、誘致魚礁、漁獲管理魚礁に大別され、これらには浮体型、移動型、沈設型などがあり、さらに魚礁資材別に魚礁の種類が分けられている。福井県では大型魚礁設置事業として、鷹巣、越前海岸沖および三国沖で実施していることから、魚礁はかなり広く一般的に行われていることが推察される。このような沿岸漁業における海洋環境問題の一つは漁業公害対策や赤潮防止など漁場環境保全であり、もう一つは増養殖における漁場環境制御である。波力発電の電力利用技術の開発は波力発電装置の活路を開く上で、最も重要な課題である。本研究では波力発電の電力利用技術として、漁場環境保全と漁場環境制御を行う新しいシステムを検討する。

4.1 波力発電ケーソンの構造と機能^{16) 17)}

波力発電ケーソンは空気室と呼ぶ中空の箱の部分とこれを支持する通常のケーソンから構成され、空気室の前壁はカーテンウォールとなっており、波が空気室に透過できる開口部をもつ構造となっている。空気室は水面の上下動により空気を圧縮・膨張させ上部のノズルに空気の往復流を発生する水柱振動型の一次変換装置である。タービン・発電機はケーソン上部の電気室に設置され、往復空気流でタービン・発電機を回転させることによって電力を得るものである。タービンは往復空気流中で一方向の回転力が得られるウエルズタービンを用い、図 5 に示すように発電機をはさむ形で同軸上に 2 台配置する。

これはウエルズタービンに働く軸方向力を相殺する構造で直列タンデム型と呼ばれている。電気室にはこのほか空気室からタービンへの空気流を制御する装置とバイパス弁、圧抜弁、緊急遮断弁などの保護対策装置が装備されている。従って、波力発電ケーソンはこれら装置を内蔵できる構造と大波浪に対する耐波安定性が基本的な検討項目となる。発電出力が 30 kW の発電施設を福井県嶺北地域の日本海地先の水深 10 m の海岸に設置するものとして、その海象条件を元運輸省第一港湾建設局敦賀港工事事務所の長期観測結果に基づいて、当該海岸地域における厳しい冬季波浪に対して十分安全となるよう構造設計

を行った。その装置の配置と形状寸法は、図 13 に示すように、おおよそ、長さ 23.9m、幅 19.7m、高さ 16.0m、の規模となった。

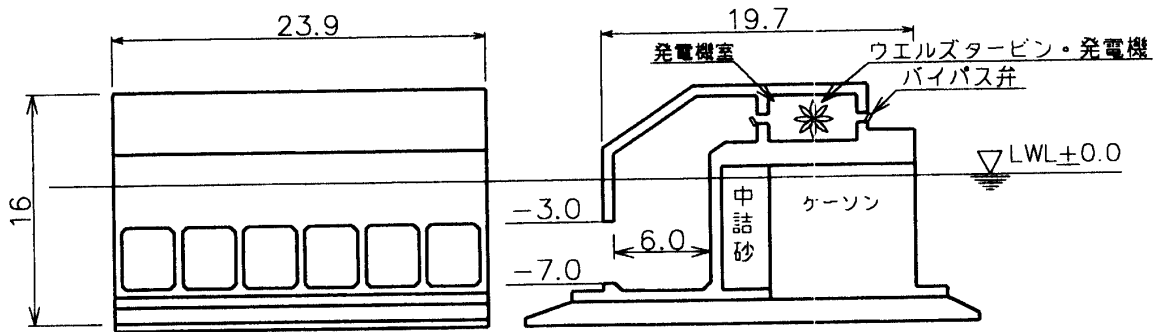


図 13. 30 kW 波力発電ケーソンの構造 (単位: m)

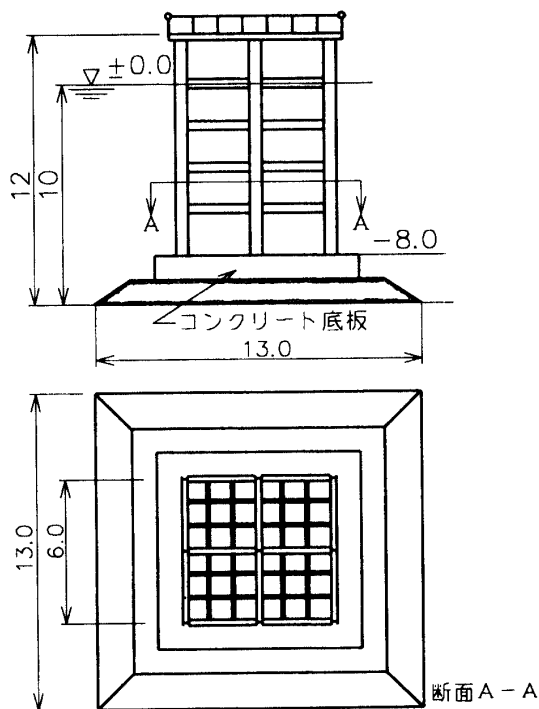


図 14. 底生生物用魚礁施設 (単位: m)

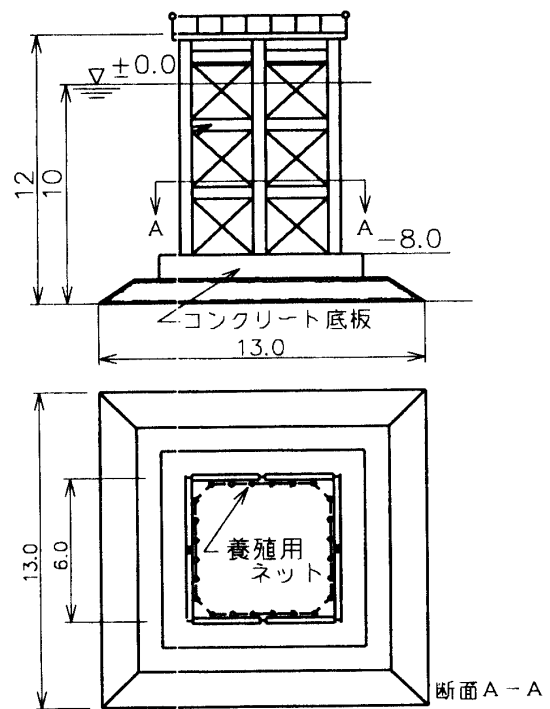


図 15. 遊魚用魚礁施設 (単位: m)

4.2 魚礁の構造と機能^{18) 19) 20) 21)}

波力発電の電力を利用して漁場環境保全と漁場環境制御の機能を加える魚礁施設として、図 14 に示す底生生物用魚礁施設と図 15 に示す遊魚用魚礁施設を波力発電ケーソンの背後の静穏化された沿岸海域に配置することとした。魚礁上部構造物は上屋ともいえるもので、この構造物に漁場環境保全及び制御の機能をもつ機器を搭載し、熱・音・光・エアレーション・海水浄化などの誘魚機能に加えて、プランクトン、塩分、水温・産卵及び稚魚の生態調査を目的とした計測機器を装備する。これらの機器の駆動に波力発電の電力を利用して高生産海域の造成を今後の検討課題とする。この概念は自然の波浪エネルギーを利用して、自然の海洋環境を保全するもので環境負荷の少ない、環境にやさしい高生産技術を確立しようとするものである。

5. あとがき

本調査研究は 2000 年 10 月から 2001 年 10 月までの間、機械部門、電気部門、構造部門の主査会を 10 回開催し、波力エネルギーの電力への吸収変換装置と魚礁への電力利用技術について、基礎的検討を行った。主な結論は次のとおりである。

- 1) 波力発電システムに関するパワー変換理論には現在、熱力・波動法と等価浮体法がそれぞれ実用化しているが、本研究では不規則な海洋波を取り扱うために便利な等価浮体法の基礎理論に関する現状を調査検討した。
- 2) この等価浮体法に基づいて、電気出力 30k W の波力発電装置を試設計し、海洋波エネルギー特性、空気室の特性、ウェルズタービン・発電機の特性、および三者の間の相互干渉を具体的に検討し、定量的に分析した。
- 3) 波力発電装置は燃料を必要としないため、ランニングコストは小さいが、海洋波のエネルギーは化石燃料やウラン燃料に比べてエネルギー密度が小さく、季節による稼働率が低いいため、(運転コスト) / (発電出力) の比として定義される発電コストが高くなる。従って、この発電コストに見合う電力利用技術及びシステムの研究開発が波力発電の実用化を図る上で最も重要な課題と考えられる。
- 4) こうした考えに基づき現在までに、送電コストの高い離島用電力、灯台用電力、道路融雪、栽培漁業への温水供給、海水浄化、海水の淡水化などが提案されているが、本委員会では電力利用技術として、漁場環境保全と漁場環境制御に用いる新しい魚礁について基礎的調査を行い、アイデアを提案し、今後の具体化に備えた。

本稿をまとめるに当たり、大阪大学大学院工学研究科 内藤林教授から関連資料の提供をいただいた。また、図面作成に本学機械工学科 小澤康美教授にご協力をいただいた。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 海洋科学技術センター：波力発電装置「海明」の研究に関する総合報告、1981.
- 2) 前田久明・山下誠也：波浪エネルギー一次変換装置、日本造船学会誌、No.637 別冊、1982.
- 3) 高井忠夫、山本茂、一色浩、根角幸明：2 枚の垂直板間の水柱の運動と透過度について、関西造船協会誌、第 164 号、1977.
- 4) 前田久明・木下健・益田光一・林秀郎・加藤渉：波浪発電に関する基礎的研究 その 5、日本造船学会論文集、第 152 号、1982.
- 5) 木下健・増田光一・宮島省吾・加藤渉：固定式振動水柱型波浪発電装置のシステムシミュレーション、日本造船学会論文集、第 156 号、1982.
- 6) 合田良実：沿岸波浪の統計的性質、第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1984.
- 7) 鈴木正巳・荒川忠一・田古里哲夫：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的研究、第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1984.
- 8) 高橋重雄・鈴木諭司・明瀬一行：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—、港湾技術研究所報告、第 24 巻 第 2 号、1985.
- 9) 鈴木正巳・荒川忠一・田古里哲夫：波力発電用ウェルズタービン性能に及ぼす諸因子の影響、第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1987.
- 10) 鈴木正巳・荒川忠一：波力発電防波堤の発電装置特性、第 3 回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1991.

- 11) 気象庁：「気象庁波浪観測資料」、1999.
- 12) NACA: NACA Rep. No.385, 1931.
- 13) 野中作太郎：電気機器Ⅱ（森北出版）、1984.
- 14) 石崎彰：誘導機器設計入門（電気書院）、1962.
- 15) 中田博昭、鈴木勝、高橋重雄、鹿籠雅純：波力発電防波堤ケーソンの設計と観測結果—酒田港波力発電実証実験—、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1991.
- 16) 土木学会 新エネルギー利用技術小委員会：波エネルギー利用技術の現状と将来展望、土木学会、1990.
- 17) 高橋重雄：波エネルギー変換装置の現状について、土木学会水理小委員会、1993.
- 18) 新水産ハンドブック編集委員会：改訂版 新水産ハンドブック、講談社、1988.
- 19) 川口勝之、植木弘信：波動ポンプ式高生産海域造成システム、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1991.
- 20) 加藤直三、宮崎武晃：海域環境制御と沖合浮体式波力装置、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センター、1991.
- 21) 波浪エネルギーと魚礁の開発研究委員会：「クリーン波浪エネルギー魚礁の開発」調査報告書、福井工業大学、2001.

「波浪エネルギーと魚礁」開発研究委員会委員

委員長：三宅正宣 学長

代表幹事：浜本剛実 建設工学科、藤井博知 機械工学科

機械部門：主査 木村雄吉 機械工学科、細川欽延 機械工学科、岡田東一 機械工学科、
宇治橋康行 建設工学科

電気部門：主査 田中光雄 電気電子工学科、村瀬正義 電気電子工学科、
藤井求 電気電子工学科、村上吉繁 電気電子工学科、
道上勉 電気電子工学科

構造部門：主査 松並仁茂 建設工学科、高瀬信忠 建設工学科、芝野照夫 建設工学科、
高島正信 建設工学科、川上英男 建設工学科、前田博司 建設工学科、
江川隆進 建設工学科、鈴木計夫 建設工学科、辻岡静夫 建設工学科、
福浦雄飛 応用理化学科、岩本多実 応用理化学科、木村一雄 応用理化学科、
草桶秀夫 応用理化学科