

海洋エネルギー変換システム

近 藤 俣 郎

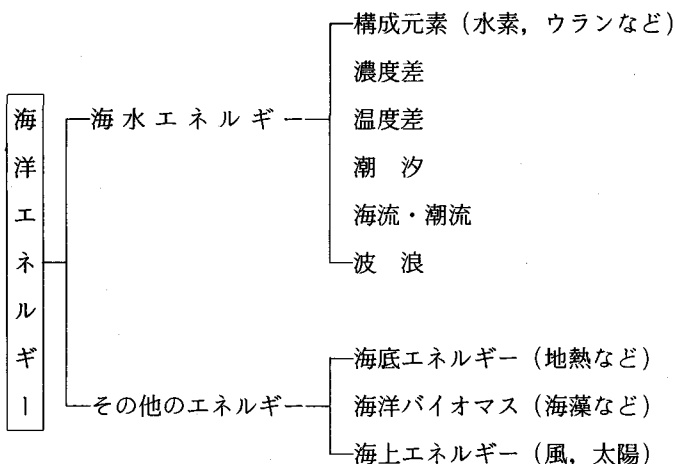
1. まえがき

本研修会は1964年以来、約1/4世紀に涉って継続している長い歴史をもっているが、海洋エネルギーに関する講義はこれまでになされていない。土木学会は他の学協会に劣らず海洋エネルギーの開発利用に関心を寄せ、海岸工学講演会や海洋開発シンポジウムを主な舞台として多くの研究成果を紹介してきたことと考え合わせると、これは意外な感を受ける。

海洋エネルギーの開発利用は様々なエネルギーについて、入力エネルギー、1次および2次変換、貯蔵ならびに移送の各段階があって幅の広いテーマであるから、短時間の講義にまとめ難い性格のものである。ここでは第1次石油パニック後のこの15年間に画期的な発展を遂げた1次変換システムに主眼をおくこととする。

2. 海洋エネルギーの種類と利用手順

海洋エネルギーを広義に把え、考えられるものを挙げて分類したものが下表である。



これらの海洋エネルギーに限らず一般に自然エネルギーの特質は、密度が低いこと、地球上のいたるところに存在することならびに非定常性が強いことにある。したがってそのようなエネルギーを変換して電気や熱などの実用的エネルギーを得るには高度なシステム技術が必要である。自然エネルギー利用は古くかつ新しい研究テーマである理由はそこにある。

図-1 に自然エネルギーの入力から最終需要までのフローの概念図を示してある。本講では海水エネルギーのうちの構成元素と濃度差を除いた他の4種を対象とする。そしてそれぞれについて、入力エネルギー量の推定法、変換システムの種類ならびに開発状況の順に述べることにする。

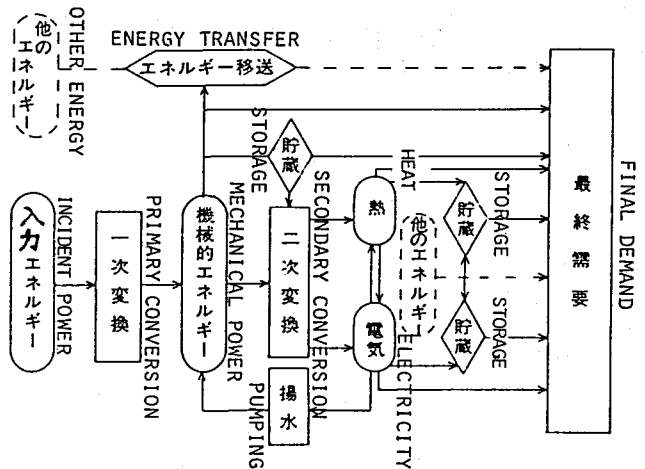


図-1 自然エネルギー利用の流れ図

3. 温度差

海洋温度差エネルギー変換

(Ocean Thermal Energy Conversion,

略称 OTEC) は海面近くの温水と海底付近の冷水との温度差を利用して電力などに変換するものである。その原理はフランスのダルソンバール (d'Arsonval) が1881年に発表し、その後クロード (Claude) が室内実験を経て、1930年には現地実験も行なって実証に成功した。しかし、その後現在に到るまで幾つかの現地試験が試けられてはいるが、未だ実用化はしていない。

3.1 入力エネルギー量の推定

表層水温 T (°K), 比熱 C (J/g · °K) の海水が、それよりも ΔT (°K) の温度差の冷水との間で生ずるエネルギーを水頭 h_e は、換算水頭 $C \cdot \Delta T / g$ にカルノー効率 $\Delta T / T$ を乗じて下式のように表わされる (G. 1)。

$$h_e = \frac{C \cdot \Delta T^2}{gT} \quad (1)$$

水頭は温度差の2乗に比例する。例として $T = 25^\circ\text{C}$ (298.2 °K) で $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ とすると、 $C = 4.18$ (J/g · °K) であるから

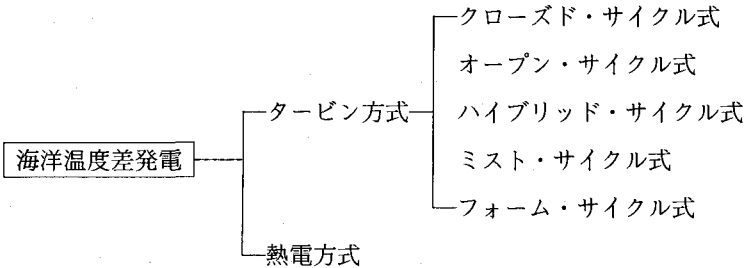
$$h_e = \frac{4.18 \times 10^7 \times 20^2}{980 \times 298.2} = 572 \text{ (m)}$$

となり、極めて大きな水頭を有していることが知れる。エネルギー変換を行なうのは、冷水を海面近くに持ち上げなくてはならない。基本的な仕組みは、海中に底開きの垂直な管を立てて管内に冷水を導き入れ、それを汲み上げ続けるものである。

表層と水深1000mの水温の温度差と世界的に調べた結果によると、温度差が最も大きい海域は太平洋の北緯15°～南緯5°の範囲にある (O. 1, G. 2)。

3.2 変換システムの種類

OTEC の種類は、設置方式からは陸上設置型、沖合設置型、可動型（船型）に分類される。発電方式からの分類は上原（O.2）によると下のようになる。



今日までの研究の主対象はクローズドサイクル式である。この方式は図-2 a に示すように蒸発器の中に作動流体を入れておき、約18～30℃の表層の温海水を通過させる。そうすると蒸発器の中で作動流体が沸騰して蒸気が発生し、それでタービンを回して発電する。タービンを出た蒸気は凝縮器に入り、ポンプによって汲み上げられた底層の冷海水によって冷却され、元の流体に戻される。この流体を作動流体ポンプで再び蒸発器に送り戻して、同様な操作を繰り返す。作動流体は温水温で蒸発し、冷水温で凝縮するような流体であることが基本的条件であり、その他の条件も勘案して、今日ではアンモニア（ NH_3 ）とフロン22（ $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$ ）が用いられている。

これに対してオープン・サイクル式は図-2 b に示すように表層の海水の一部が作動流体としての役割を果し、それは凝縮された後に蒸発器に戻らずに冷海水で冷却された後に海に放出される。

その他については図-2 c に熱電式を示すに留める。

3.3 開発の状況

OTEC の研究開発にはアメリカと日本がこれ迄に主導的に進めてきたが、ここに来て足踏み状況にある。それに対してフランス、ノルウェイなどが最近になって熱意をもっている。

アメリカは連邦政府の機関（DOE、NOAA など）、ハワイ州ならびに民間企業が研究開発を進め、1979年にはハワイ

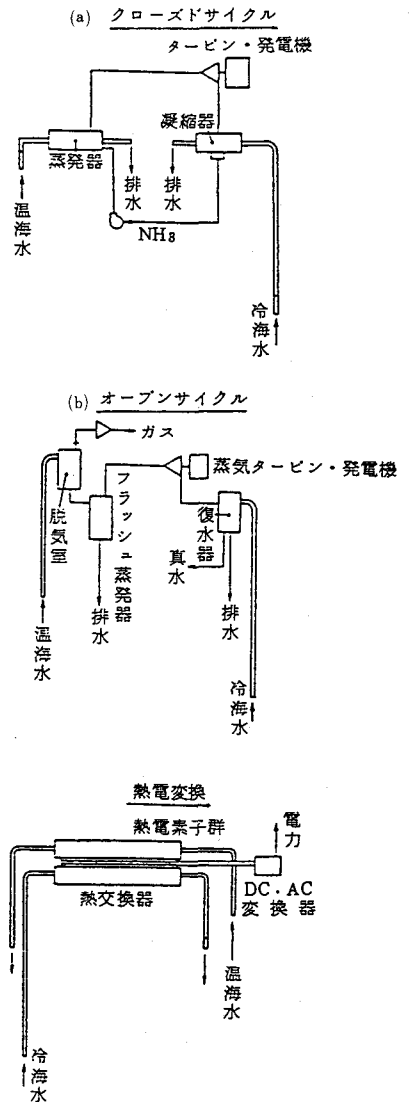


図-2 OTEC 主要発電方式 (梶川, 1985)

島ケアホレ沖で Mini-OTEC と称する50 kWe の試験を行ない、さらに1980年には1 MWe の出力をもつ OTEC - 1 の実験を実施した。これらはいずれも船上に取付られた装置を用いて行なわれたものである。

OTEC に関する我が国での研究開発は1974年に発足した通産省の「サンシャイン計画」の中で取り上げられてから本格的に動き出したとみられる。そして主要な研究機関としては電子技術総合研究所、佐賀大学、九州電力、東京電力などである。1981年に東京電力は東電設計と清水建設の協力を得て、ナウル島において100 kWe の陸上設置型の発電実験を行なった。図-3にその構成を、表-1にはプラントの概要、また図-4に定格出力実験時の熱収支を示している。このプラントは約10日間の運転を行って、後に撤去されたが、本格的な現地試験を行なった陸上設置型とし

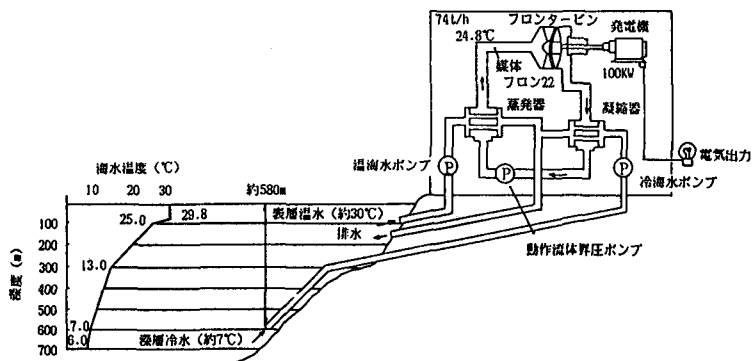


図-3 ナウル島100 kW 実証試験プラント (山本, 1983)

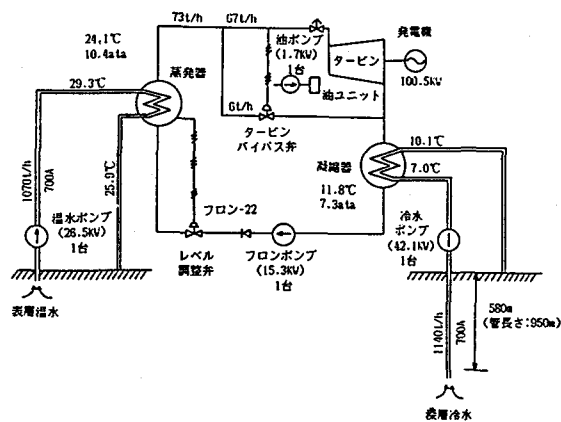


図-4 定格出力時のヒースバランス (山本, 1983)

表-1 ナウル島試験プラント概要 (山本, 1983)

項 目	仕 様
発 電 出 力	100KW (送電端出力11KW)
表 層 温 海 水	29.8℃
深 層 冷 海 水	7.8℃
作 動 媒 体	R-22 (フロン)
熱 交 換 器	蒸発器1基, 凝縮器1基
ポ ン プ	冷水ポンプ1台, 温水ポンプ1台, 媒体ポンプ1台
フロントービン	二段衝動軸流式1台
発 電 機	空冷式1台
冷水取水管	延長 1,093m ポリエチレン管 932m, φ 750×t30~35mm 塩 び 管 161m, φ 732×t21mm
温水取水管	延長 118m 鋼 管 φ 711.2×t6mm
冷温水排水管	延長 140m 鋼 管 φ 1,016.0×t8.7mm
そ の 他	機器基礎一式

て貴重な成果が得られた (G. 3)。

その他フランスがタヒチ島で、インドネシアとオランダがバリ島での現地試験や実用発電の計画があるとされている。

4. 潮 汐

潮汐の干満差を利用した発電は、今から20年以前の1966年にフランスのドーバー海峡に面したランス川の河口に200 MWe の発電所が完成して運転を続けている。しかしその後は、小規模のものを除くと実用化していない状況が続いている。

4.1 入力エネルギー量の推定

潮汐エネルギー利用の原理は水力発電に類似していて、河口や入江などの狭い口の部分にダムを築いてその陸地側に貯水池に相当する潮池を設け、高潮時に外海からの水を流入させ、低潮時には海に放出させる。そして放出あるいは流入時にダムの内部に設けた水車タービンにより発電するものである。

後出する単潮池の場合の理論出力は下のように求められる。

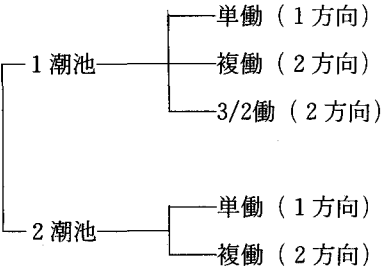
$$P = w_b \bar{Q} H_t = w_b F H_t^2 / T = 0.0028 F H_t^2 / T \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

ここで F は潮池面積 (m²)、H_t は潮差 (m)、w_b は海水の単位容積重量で 1.025 (kgf / m³) = 10.05 (kN / m³) としている。また $\bar{Q}$ は放出時間 T (h_r) の間の平均流量 (m³ / s) を意味する。

これにより潮汐エネルギー利用は潮差の大きいことが第一に必要である。次いで潮池が広いこと即ち懐の広い湾か入江であることが有利である。

4.2 変換システムの種類

潮汐発電所の種類は潮池の数と運転方式から下表のように分類される (G. 4)。



単働とは潮汐の1周期間に、潮池から海に向けて放出して1回のみ発電するもので、複働とはそれに加えて海から潮池に流入するときも発電するものである。3/2働式とは、2周期間に3回発電する方式である。図-5にこれら1潮池式の運転方式を示す。現存の潮汐発電所はいずれも1潮池式である。

潮汐発電用水車タービンとしては、低落差用プロペラ式タービンが用いられるが、タービンの固定方式によって(a) バルブ型、(b) チューブ型、(c) リム型の三型式がある (図-6)。ランスで用いられているのはバルブ型である (T. 1)。

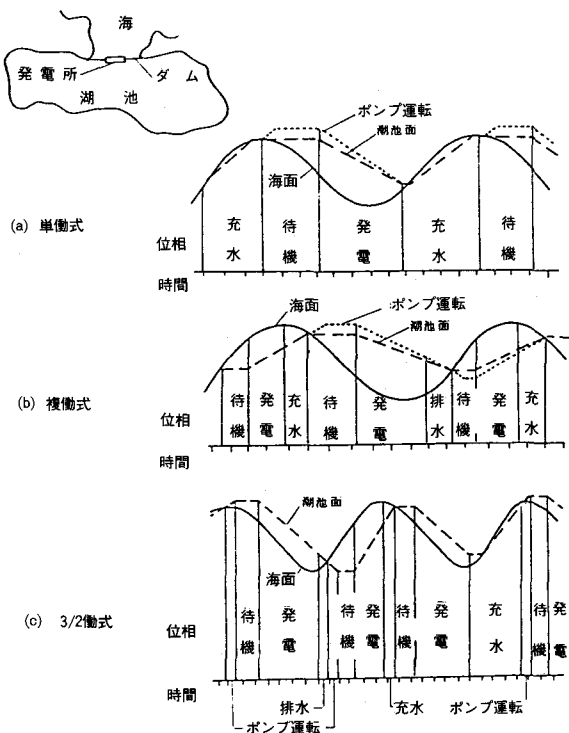


図-5 1 潮池発電所の運転方式

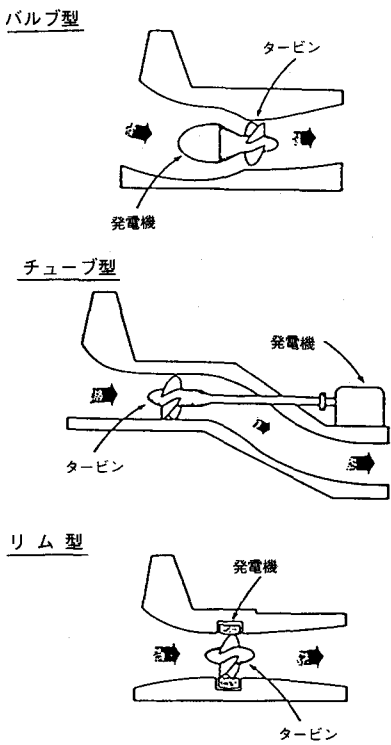


図-6 発電機取付の方式

4.3 開発の状況

ランス潮汐発電所の1980-84年の運転結果が表-2に掲げてある (G. 5)。これによると複働式とは言っても、潮池から海に向う流れによる発電 [DT] がその逆の流れによる発電 [RT] に比べて数倍も多い。またポンプによって揚水するため総出力の約20%が消費されていることがわかる。

ランス以後、大型の潮汐発電所は建設されていないが数百 kW 級の小規模発電は中国やソ連で稼働している。カナダでは1984年に潮差が大きいことで有名なファンデー湾沿岸のアナボリス・ロイヤルに18 MW の発電所を設けて試験中である。ここでは、タービンの径を大きくできることから安定性にすぐれているリム型の直流れ (Straight-Flow) 式タービンを使用している (G. 5)。

計画中のものとしては、ファンデー湾マイナス入江 (カナダ, 5000 MW), サンホセ湾 (アルゼンチン, 5000 MW) を始めとして数多くあり、日本の近海でも仁川 (韓国) やベンジナ湾 (ソ連) などがある (G. 2, G. 6, G. 7, T. 1)。

潮汐エネルギー利用については発電装置そのものは完成度が高い技術であるから、これ迄にも実用

表-2 ランス発電所の運転結果 (Hillairet and Weisrock, 1986)

Year	Production (GWh)			Period (total for the 24 sets)						
	Gross	Net (2)	True (2)	DT (3)	RT (3)	DP (3)	RP (3)	O (3)	Total	Hours
1980 (1)	503	495	485	64	5	3	0.1	28	100	116,800
1981 (1)	570	562	500	61	2	16	0	21	100	134,700
1982 (1)	607	599	511	59	2	18	0	21	100	151,000
1983	610	601	503	57	6	17	0.1	20	100	155,900
1984	609	601	494	58	3	18	0	21	100	157,500
	(100%)	(98.7%)	(81%)							

(1) Major normal maintenance works: 1976-82

(2) Net=Gross-auxiliaries; True=Net-pumping

(3) DT=Turbining Basin → Sea

RT=Turbining Sea → Basin

DP=Pumping Sea → Basin

RP=Pumping Basin → Sea

O =Orifice (generally Sea → Basin)

目的の発電所が上出の地点で建設されたとしても不思議ではないはずである。そうならなかった理由は、経済性の他に発電を行なうことによる周辺海域の潮汐の変化ならびにそれに伴う各種の環境変化に対する予測が困難であったことによると考える (G. 6)。

5. 海流・潮流

流水のエネルギーを変換して実用に技術の歴史は古いが、海の流れを本格的に利用するシステムは未だ実現していない。その理由はエネルギー変換技術そのものよりも、そうした変換装置を海中に設置することの困難さにもとづくようである。

5.1 入力エネルギーの推定

一方向に流れ、ほぼ一定の流速をもつ海の流れが海流である。それに対して潮汐による海水の水平流動が潮流であるが、これは振動流の性質をもっている。沿岸域では海流と潮流はほぼ同程度の大きさををもつことが多い。

断面積 A (m^2) を流速 v (m/s) で流れている海流のパワーは下式のように求められる。

$$P = w_0 Q \frac{v^2}{2g} = \frac{1.025 A v^3}{2} \quad (\text{kN} \cdot \text{m/s})$$

$$= 0.513 A v^3 \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

潮流を含む海の流れの速度は、ベクトル表示をすると

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \sum_{i=1}^N \mathbf{v}_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad (5)$$

となる。ここで $\mathbf{v}_0$ は海流の速度である。一方向のみの単周期の潮流では、流速は下のようにおける。

$$v = v_t \cos \sigma t \quad (6)$$

この潮流の平均パワー $\bar{P}$ は下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \bar{P} &= 0.513 A \left\{ \frac{1}{(T/4)} \left\{ \int_0^{T/4} v_t^3 dt \right\} \right\} \\ &= \frac{4}{3\pi} [0.513 A v_t^3] = 0.218 A v_t^3 \quad (\text{kW}) \end{aligned} \quad (7)$$

海流に単周期の潮流が加わった流れの最大パワーは

$$P_m = 0.513 (v_0 + v_t)^3 \quad (8)$$

平均パワーは $v_0 \gg v_t$ とおける場合は

$$\bar{P} = 0.513 A \left(v_0^3 + \frac{3}{2} v_0 v_t^2 \right) \quad (9)$$

となる。

5.2 システムの種類

変換装置による海流・潮流発電システムは、下に示すように大別してタービンの回転運動によるもの、非回転運動によるものならびに電磁流体発電の3方式がある。タービン式はさらにその形成、機構で細分される。

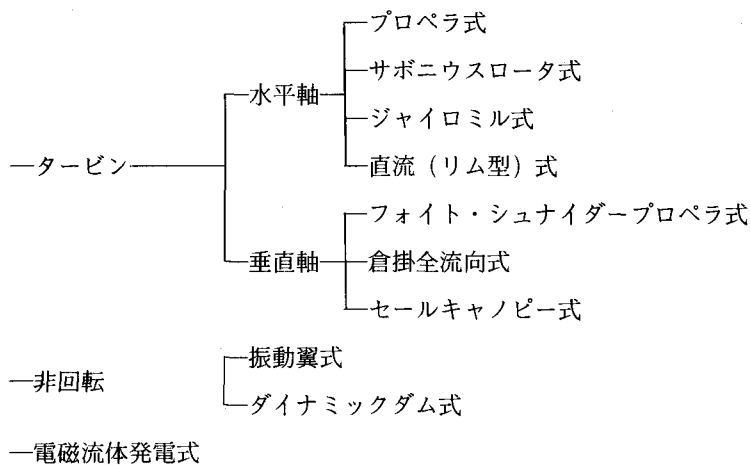
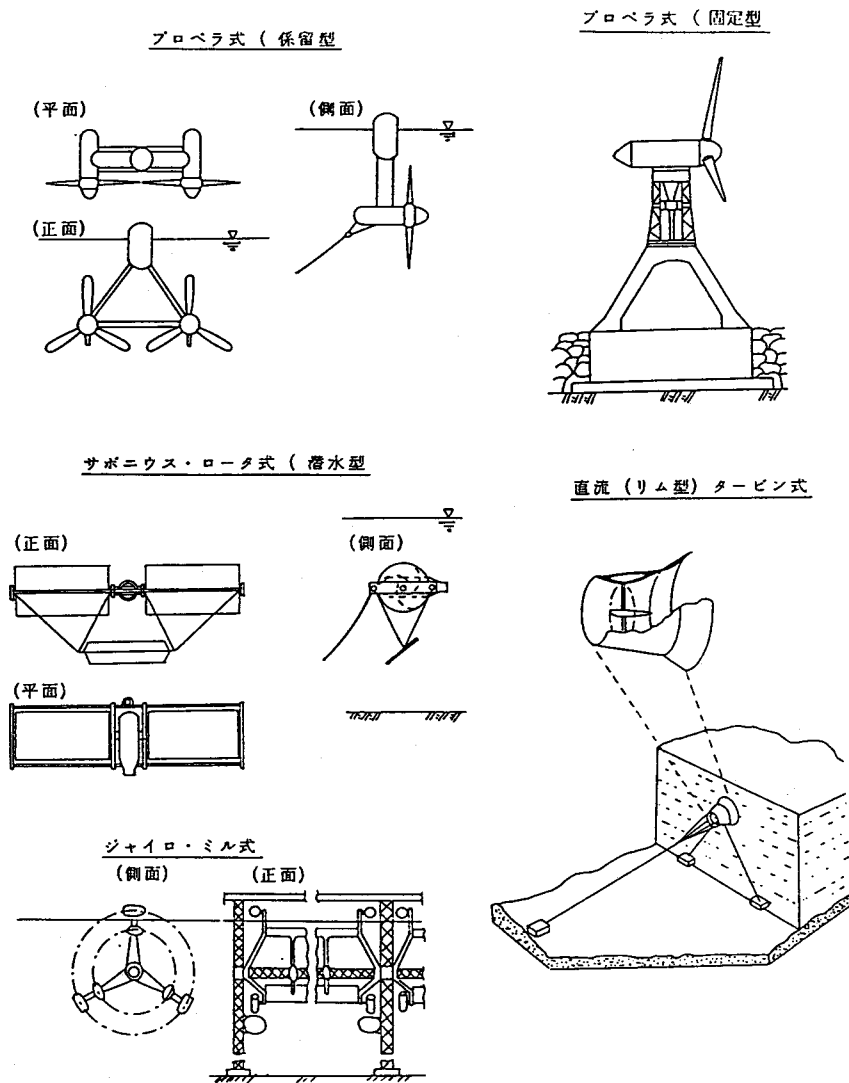


図-7 に主なものを示してある。

この他に設置の場所に着目すると沖合型と沿岸型に、設置方法から固定型と係留型に、そして水中設置位置から浮体型、潜水型、着底型に、それぞれ分類できる。

5.3 開発の状況

海流・潮流エネルギー利用の最近の研究は本講で扱う他種のエネルギーに比べて格段と低調である。僅かにイギリスが沿岸域での潮流利用の研究を進めている。その対象システムは、固定型プロペ



図一 海・潮流発電システムの主要案

ラ式である (G. 5)。タービン効率を57%として、1 MW の出力を得るためのプロペラ直径は式(7)から計算すると約20mである。

日本でも8年以前には、瀬戸内海の架橋計画の中で橋脚など利用した潮流利用が検討された (C. 1) が、その後の研究はきわめて少い。

海流・潮流エネルギーの実用化が実現しない理由は、他種の場合も当てはまることであるが外海での強力な波力に抗して装置を海中に固定あるいは係留するための経済的負担が大きいことである。さらに、潮汐と同様にエネルギー取得に伴う海象変化の影響を正しく評価することが困難であることが加わる。

しかし、前者については内海のように波高の小さいところでは、橋や海中トンネルなどの施設と共用できるならば、かなり負担が軽減できる。したがって沿岸における海・潮流利用は今後有望である。流れの方向変化に追従する方向可変型のシステムとしては、一点係留型が提案されている（C. 2）。

6. 波 浪

各種の波浪エネルギーのうちで波浪利用の研究は、この15年間に最も進歩した。当初はイギリスが、続いて日本が熱心に研究したが、最近ではノルウェーやインドも力を注いでいる。波浪エネルギー利用に関するこのような研究の高まりは、1973年当時の技術水準がほとんど白紙に近い状態にあったことと、温度差や潮汐とは異なって波浪の場合はスケールメリットが少ないことなどから、世界各地に実用化の適地であることによる。

6.1 入力エネルギー量の推定

海上の1地点における波浪の入力エネルギーの大きさを表わす指標は、単位峰幅当りの平均パワー $\overline{W}$ (kW/m) であって、スペクトル構造を持つ不規則波の場合は下のように求められる。周波数帯 ($f, f + df$) と波向帯 ($\theta, \theta + d\theta$) の平均パワー dW は、その帯域の単位面積当りの全エネルギー $w_0 S(f, \theta) \cdot df \cdot d\theta$ に群速度 C_g を乗じたものとして求まる。これより $\overline{W}$ は下のように表現される。

$$\overline{W} = w_0 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} dW = w_0 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) C_g df d\theta = w_0 \int_0^\infty S(f) C_g df \quad (10)$$

ここで

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (11)$$

は周波数スペクトルである。 $S(f)$ は種々提案されているので、ここでは統一的な表示として下式を用いる。

$$S(f) = Af^{-5} \{ \exp(-Bf^{-4}) \} \gamma^{\exp(-\frac{(f/f_p - 1)^2}{2\sigma^2})} \quad (12)$$

水深 h が波長 L の1/2よりも大きい深水波の場合の群速度は $C_{g,0} = g/4\pi f$ で与えられる。表-1は深水波の $\overline{W}$ を計算した結果である（W. 1）。

浅水域に波が進んでくると、深水での方向スペクトル $S_0(f, \theta_0)$ は屈折などにより変形する。水深 h での周波数スペクトルを $S(f, h)$ とすると、その地点での平均パワー $\overline{W}(h)$ は、

$$\begin{aligned} \overline{W} &= w_0 \int_0^\infty S(f, h) \cdot C_g(f, h) df \\ &= w_0 \int_0^\infty C_{g,0}(f) \int_0^{2\pi} K_r^2(f, h, \theta_0) \cdot S_0(f, \theta) d\theta df \end{aligned} \quad (13)$$

表-3 各種スペクトルの単位峰幅当りの平均パワー $\bar{W}$ (近藤, 1985)

スペクトルの名称	A	B	r	$\bar{W}$ (kw/m)
Pierson - Moskowitz	$\frac{1}{4\pi} H_{1/3}^2 \bar{T}_2^{-4}$	$\frac{1}{\pi} \bar{T}_2^{-4}$	1	$0.59 H_{1/3}^2 \bar{T}_2$
ISSC (国際船体構造会議)	$0.111 H_{1/3}^2 \bar{T}_1^{-4}$	$0.44 \bar{T}_1^{-4}$	1	$0.545 H_{1/3}^2 \bar{T}_1$
Bretschneider - 光易	$0.257 H_{1/3}^2 \bar{T}_1^{-4}$	$1.03 T_{1/3}^{-4}$	1	$0.441 H_{1/3}^2 T_{1/3}$
JONSWAP	$0.072 H_{1/3}^2 \bar{T}_1^{-4}$	$\frac{5}{4} T_p^{-4}$	3.3	$0.458 H_{1/3}^2 T_{1/3}$

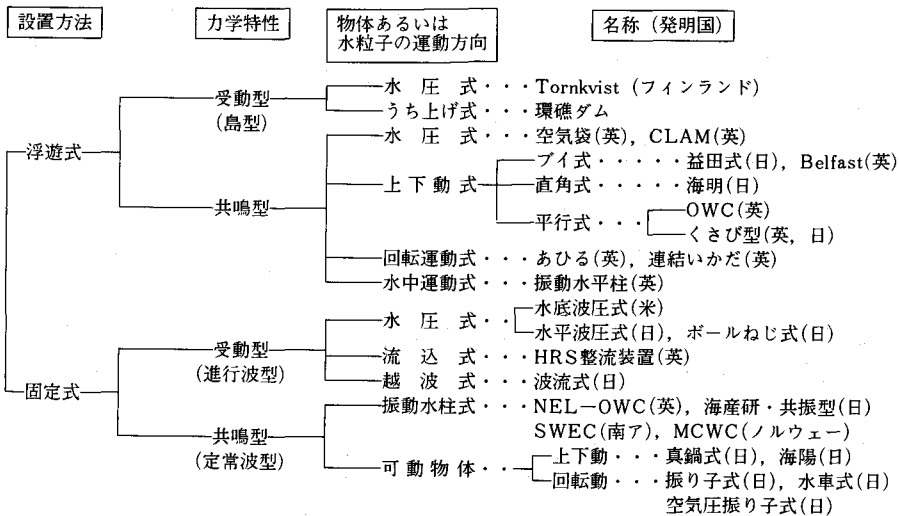
註: (1) $\bar{T}_1 = \int_0^\infty S(f) df / \int_0^\infty f S(f) df$, $\bar{T}_2 = \sqrt{\int_0^\infty S(f) df / \int_0^\infty f^2 S(f) df}$
 (2) JONSWAP では $\sigma = 0.07$ ($f \leq f_p$), 0.09 ($f > f_p$) とする
 (3) $w_0 = 1025$ (kgf/m³) = 10.1 (kN/m³)

$S_0(f, \theta_0)$ として, 表-3 に示すブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルに光易型の方向分布関数を乗じたものを用いることとし, 直線平行等深線海岸と Pocinhi による仮想的な円形島について数値計算で求めた結果によると (W. 2), 直線等深海岸の $\bar{W}$ は h/L_0 の減少とともに低下する傾向があり, $h/L_0 = 0.1$ では深水波の値 ($\bar{W} = 0.441 H_{1/3}^2 T_{1/3}$) より 11% ほど減少し, その後も減少を続ける。円形島の場合は, $h/L_0 = 0.1$ までは同様に減少するが 0.07 付近で最小値をとり, それよりも小さくなると $\bar{W}$ は再び増加する。したがって長周期のうねりが多い広い海域にある小規模な離島では, 水深の浅い沿岸域に装置をおく方が有利となる。

6.2 システムの種類

波浪エネルギー変換システムの種類は表-4 に示すように, 大別して浮遊式と固定式に分かれたれ,

表-4 波浪エネルギー一次変換装置の分類



その中でさらに受動型と共鳴型に分類される。図-8, 9にはこれらの中から、これ迄に現地試験を行なったものあるいはこれから行なう予定のものなど技術的に意義の深いと思われるものを挙げた。浮遊式と固定式と比較すると、前者は沖合での高いエネルギーを吸収することができやすく、また周辺の海象環境を乱さない。後者は防波堤などの他の目的の構造物に併設が容易である特長がある。

受動型と共鳴型の比較では、エネルギー吸収効率の高い後者の方が望ましく、近年開発されたものはほとんどがこの型式である。

波浪エネルギーの1次変換装置の理論は、装置の種類によって多少異なるが基本的には次のような

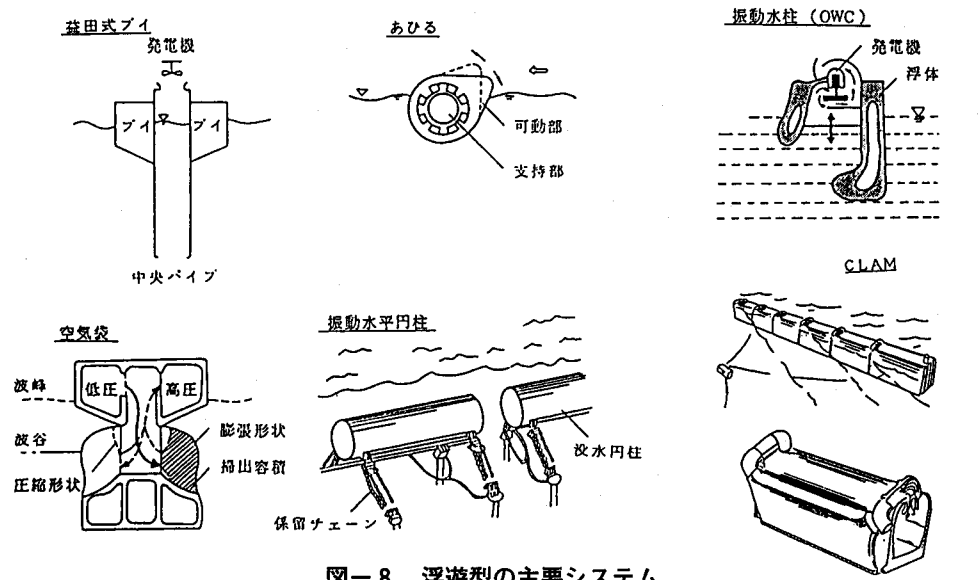


図-8 浮遊型の主要システム

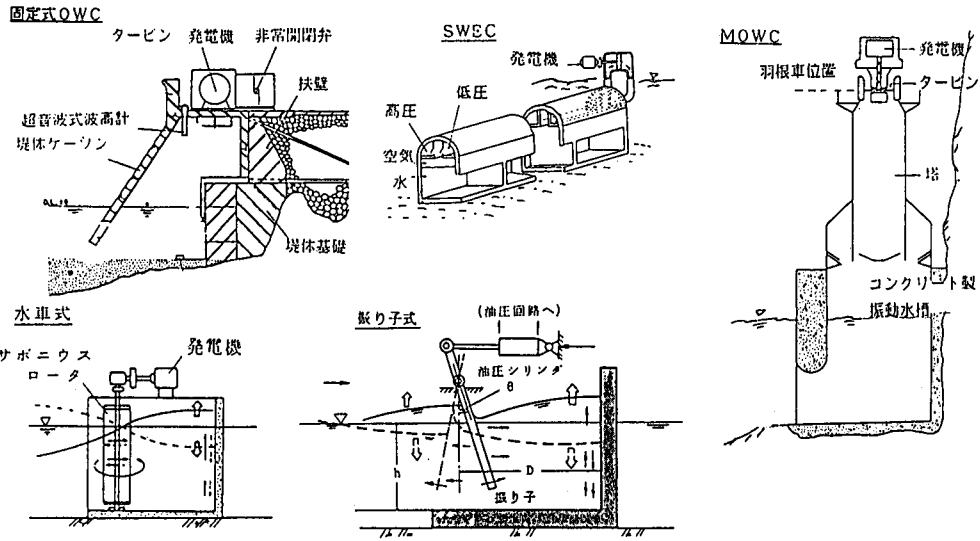


図-9 固定式の主要システム

構成となっている。

- (1) 入射波による物体（もしくは水塊）への作用波力ならびに散乱波の推定
- (2) 運動方程式を解いて物体などの変位，速度を求める
- (3) 物体などの運動による発散波の推定
- (4) 吸収エネルギー量を求める

これまでに線形問題としての解が主なシステムについて求まっており，満足すべき結果が得られている（W. 3～W. 7）。

6.3 開発の状況

表－5 は我が国でかつて，あるいは現在存在している実海域試験プラントの一覧である。これまでの現地試験の結果をみると，浮遊式は浮体の動揺による変換効率の低下や，係留装置に費用が大きいなどの理由で，沿岸域で多目的利用が可能な固定式に比べて不利となっている。

表－5 日本の主要波浪エネルギー実験プラント

実 施 者	実 験 海 域	変 換 シ ス テ ム	実施期間
海 洋 科 学 技 術 セ ン タ ー	日 本 海 (山形県由良沖)	海 明	1978－1980 1985
室 蘭 工 業 大 学	噴 火 湾 (室蘭港南防波堤沖)	水 車 式 振 り 子 式	1980－1984 1983
日 立 造 船 K.K.	日 本 海 (増毛港北防波堤)	振 り 子 式	1981－
新 技 術 開 発 事 業 団	日 本 海 (山形県三瀬立岩)	固定式 OWC	1983－
日 本 造 船 振 興 財 団	太 平 洋 (沖縄県八重山郡竹 富町西表船浮地区)	海 陽	1984－
エ ン ジ ニ ア リ ン グ 振 興 協 会	太 平 洋 (千葉県九十九里町 片貝漁港)	固定式 OWC (定圧化タンク付き)	1988－

固定式のうちでも多くの研究機関が対象としているのが振動水柱（OWC）型の空気タービン式である。図－10は，図－9の固定式 OWC についての，現地試験の結果であるが（W. 5），入力エネルギーに対する取得電力までの最終効率は約12%程度である。

固定式の中で現在，最も一次変換効率が高い値が報告されているのが，可動物体型の振り子式である（図－10参照）。図－11に示すように現地試験での一次変換効率は約40%で（G. 5），最終効率は空気タービン式の2倍以上と推定される。この違いは空気からタービンへのエネルギー伝達の際の損失が大きく影響している。図－12は振り子式について実測値と推定値の比較であり，理論値の方が20%程度大きく現われている（W. 8）。

外国の実験プラントとしては1986年にノルウェイのクバーナー社がベルゲン近郊の海岸に建設した

多重共鳴型 OWC 装置 (500 kW) が新しい (図-13)。この装置は崖海岸に接して孤立して設置された多重円筒構造物の中での波の共振を利用しているものである。点集中型吸収装置 (Point Absorber) としての効果も有しているので、直線上に一樣に配列された二次元的施設と比較すれば、単体としてはエネルギー吸収量が多くなる。

波浪は本質的に非定常性が激しいので、変換されるエネルギーも当然非定常性が残っている。そのままの状態では利用上不都合であるから、最終需要までのいずれかの状態で定常化しておくとう便利であ

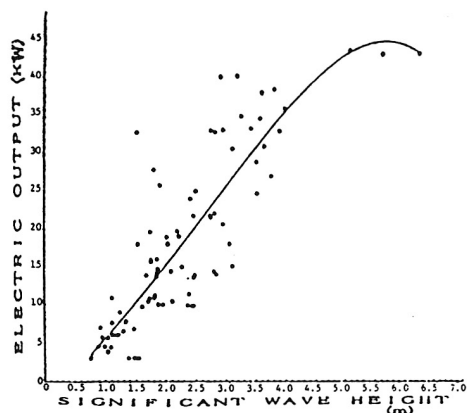


図-10 波高に対する出力—三瀬プラント (平本ほか, 1984)

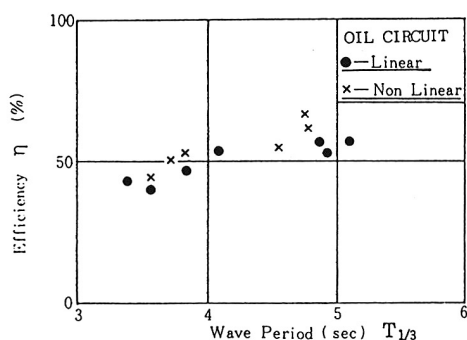


図-11 実験プラントでの変換効率 (Watabe et. al., 1986)

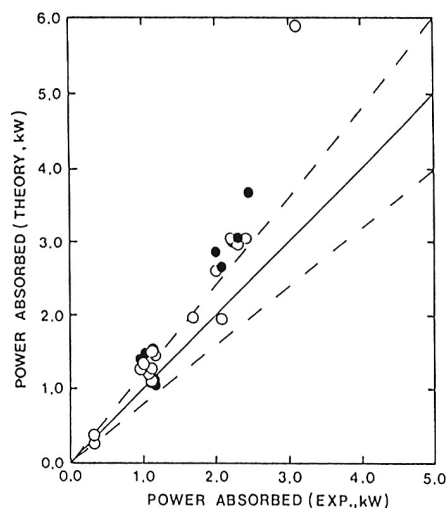


図-12 振り子式の吸収パワー推定値と実測値 (Yano et. al., 1986)



図-13 クバーナー社の MOWC (ノルウェイ, ベルゲン)



図-14 空気タービン式波浪発電用定圧化タンク (千葉貝漁港)

る。図-14は空気タービン式の空気を定圧化するための装置である（W. 9）。

7. 取得エネルギー価格

自然エネルギーの利用の場合、そのエネルギー価格を支配する要因は、(1)入力エネルギー量、(2)変換システムの効率、(3)システムの建設費、(4)運転費などである。その結果定まるエネルギー価格が、既往のエネルギー価格に対抗できるものでなければならない。近年の石油価格の低下と円高は、火力発電の価格を大幅に低下させて我が国の経済発展に寄与しているが、このことが理由で自然エネルギーの実用化が進まないのは事実である。アメリカの電力研究所（EPRI）がアメリカにおける適地について試算した価格推定によれば、潮汐の価格が最も安価で113（mills/kWh）で次いでOTECが217、波浪274となっている（G. 8）。波浪の変換システムとしてはCLAMを用い、東海岸に設置した場合である。潮汐でさえも現在の末端消費電力の平均価格の2倍以上高い。

我が国では最近、空気タービン式についての波浪エネルギーの取得価格の精しい試算が（財）沿岸開発技術研究センターでなされている（W. 7）。

以上の結果を総合すると、我が国で海洋エネルギーの実用化が早い時期に実現するには、(1) 離島など既存のエネルギー取得価格が極めて高くかつ入力エネルギー量が大い地点で、(2) 他の目的の施設や構造物と共用できるシステムとし、(3) 高効率の変換システムを用いる、ことが必要条件と考えられる（W. 10）。

8. む す び

エネルギー開発は、それが水力発電で代表された時代は、土木技術者が中心的な役割を果たしていた。やがて火力発電、原子力発電の時代になるにつれて、それが土木から少しづつ遠ざかってゆく感があった。

しかしながら、ここで扱った各種の海洋エネルギーを始めとする自然エネルギーの開発利用は人類の将来のために不可欠な仕事であり、そのための主役は再び土木技術者が演じなくてはならないはずである（G. 3）。本講が若い技術者諸氏のこの分野への関心を高めることに役立つことができれば、幸いである。

本文の波浪エネルギーに関する個所は、室蘭工大波浪エネルギー研究グループ各位とりわけ渡部富治教授と谷野賢二（元）助手（現北海道開発局開発土木研究所）のご支援によるところが大であることを記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

文献の探さくにより便利のように、一般（G）、温度差（O）、潮汐（T）、海流・潮流（C）、波浪（W）に分類して主要なものを示す。引用の論文が多い論文集などについては、個々の論文名を挙げない

で論文集の名称のみを示してあることをお断わりする。また本文中で引用しないものも付け加えてある。

〔一 般〕

- G. 1) 本間・黒木・梶川：海洋エネルギー読本，オーム社，233 p., 1980.
- G. 2) ECOR 日本委員会：海洋エネルギー—商業化の時期と条件—に関するシンポジウムテキスト，163 p., 1985.
- G. 3) 土木学会海岸工学委員会：沿岸域における海洋エネルギー開発に関するシンポジウム前刷（第30回海岸工学講演会），31 p., 1983.
- G. 4) 北海道港湾・海岸研究会：海洋エネルギー利用技術，120 p., 1983.
- G. 5) BHRA : Papers presented at the 3rd International Symposium on Wave, Tidal, OTEFC, and Small Scale Hydro Energy, Brighton, England, 409 p., 1986.
- G. 6) 近藤叔郎：海洋流体発電の将来，技術予測シリーズ，第二巻（エネルギー編），日本ビジネスリポート社，p. 165～174, 1985.
- G. 7) 日本造船学会海洋工学委員会性能分科会海洋エネルギーパネル：「海洋エネルギー利用」特集，80 p., 1982.
- G. 8) Carmichael, A. D. and J. S. Feher : Ocean Energy : Can it compete ?, Civil Engineering, Nov. 1987, ASCE, pp. 70 ~ 73, 1987.
- G. 9) 高野健三：海のエネルギー，共立出版，205 p., 1984.

〔温 度 差〕

- O. 1) UN Dept. of International Economic and Social Affairs : A Guide to Ocean Thermal Energy for Developing Countries, 1984.
- O. 2) 上原春男：海洋温度差発電読本，オーム社，202 p., 1982.

〔潮 汐〕

- T. 1) 沼知福三郎・本間 仁（監修）：水工学便覧，森北出版，1246 p., 1966.
- T. 2) A.D. クーパー（編著）：世界海洋アトラス，講談社，272 p., 1983.

〔海流・潮流〕

- C. 1) 本州四国連絡橋公団：海中構造物を使用して自然エネルギー利用を図る調査研究報告書，104 p., 1980.
- C. 2) 近藤・平田・松岡：一点係留された海・潮流発電用潜水体の水理特性，土木学会42回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 608～609, 1987.

術講演会講演概要集, 第2部, pp. 608~609, 1987.

〔波 浪〕

- W. 1) 近藤・奥田・渡部・松田・土手・谷野: 沿岸固定方式による波浪エネルギー利用に関する研究, 文部省科学研究費報告, 85 p., 1985.
- W. 2) 近藤・谷野・渡部・倉内・松岡: 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(4)—取得エネルギー量の推定—, 土木学会海岸工学講演会論文集, 32回, pp., 697~701, 1985.
- W. 3) Count, B. (Ed.): Power from Sea Waves, Academic Press, 449p., 1980.
- W. 4) McCormick: Ocean Wave Energy Conversion, John Wiley & Sons, 233p., 1981.
- W. 5) 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論文集, 494 p., 1984.
- W. 6) Evans, D. V. and A. F. de O. Falcão (Ed.): Hydrodynamics of Ocean Wave—Energy Utilization, Springer-Verlag, 452p., 1986.
- W. 7) 海洋科学技術センター: 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集, 501 p., 1987.
- W. 8) Yano, K., H. Kondo and T. Watabe: Method of estimating the power extracted by fixed coastal type wave power extractors, Proc. of 20th International Conf. on Coastal Engineering, ASCE, Vol. III, pp. 2392 ~ 2404, 1986.
- W. 9) (財)エンジニアリング振興協会, ENAA NEWS, 昭和63年3月24日.
- W. 10) 近藤・渡部・谷野: 沿岸域における波浪エネルギー利用計画試論, 第10回海洋開発シンポジウム論文集, 土木学会, pp. 78~82, 1985.
- W. 11) McCormick and Y. C. Kim (Ed.): Utilization of Ocean Waves—Wave to Energy Conversion, ASCE, 205p., 1987.
- W. 12) Ross, D.: Energy from the Waves, Pergamon, 121p., 1979.