

波力発電ケーソン防波堤の特性

Wave Energy Converter with Caisson Breakwater

高橋 重雄*
Shigeo Takahashi

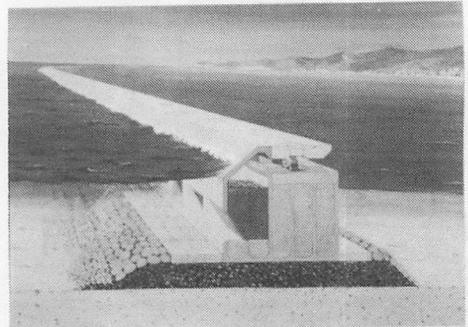


図-1 波力発電ケーソン防波堤概念図

1. はじめに

海の波は強大であり、海を利用するとき、海の波は非常に大きな障害となる。我々は、この障害を取り除くこと、あるいはこれに耐えうるものを作ることに、多大の努力をはらってきた。いかえれば、「波とのたたかい」によって海の利用がすすめられてきた。これに対し、昭和48年以後の石油危機以来、海の波を資源として把え、海の波を利用することが現実的に考えられるようになっており、各国の研究機関等で研究が進められている。

運輸省港湾技術研究所においても、昭和57年度より5ヶ年の計画で、「港湾構造物による波エネルギーの利用に関する研究」を行っている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。この研究は、「波とたたかう」代表的な構造物である防波堤に、波のエネルギーを吸収し電力に変換する機能、すなわち、波を利用する機能を持たせようとするものである。

図-1は、そうした機能を合せもつ防波堤、波力発電ケーソン防波堤の概念図である。この防波堤は、特殊な形状をしたケーソン（波力発電ケーソン）からなる。波力発電ケーソンは、空気室と呼ぶ中空の箱の部分と、それを支持する通常のケーソンの部分からなる。空気室の前壁はカーテンウォールとなっており、波が空気室に侵入できるよう開口部を有する。したがって、波の作用によって空気室の水位が変動し、空気室内の空気を圧縮・膨張させ、ノズル内に空気流を発生させ、波のパワーを空気のパワーに変換する。この空気流をタービンによって回転力に変え、発電機を回転させることによって電力を得ようとするものである。波力発電ケーソンに搭載するタービンとしては、ウエルズタービンを採用することにしていく。

波力発電ケーソン防波堤は、現在までの研究によってほぼ設計できる段階にある。本稿では、波力発電ケ

ーソンの概要を紹介したい。

2. 防波堤と波力発電

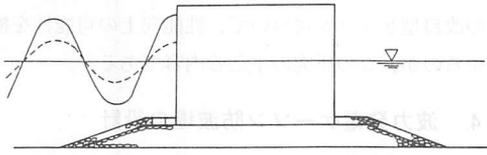
2.1 日本の防波堤

防波堤は、外海の荒海から港内の船舶や諸施設を守る重要な構造物であり、特に外海に面した港において、その役割は大きい。大規模な港では、防波堤の延長は数kmにおよぶことがある。日本全国の港湾の防波堤の総延長は800kmにおよび、毎年20km程度建設されている。

図-2(a)は、日本における防波堤の基本的な断面形状である。これは、石のマウンド上に、ケーソンと呼ばれるコンクリートの函を設置し、砂を中詰めしたものであり、混成式防波堤と呼ばれる⁶⁾。混成式防波堤は、種々の特徴をもつが、鉛直な壁面で波を反射するため、波の反射率が高いという短所をもつ。これに対し、昭和40年代半ばころから、図-2(b)のような直立消波ケーソン防波堤とよばれる防波堤が開発され、種々の型式のものが実際に建設されている。この防波堤のケーソンは、前壁が透過な壁であり、それに続く遊水室とよばれる中空の室をもつ。波は透過壁を出入りするときにエネルギーを失い、波の反射率は低くなる。このように、直立の壁で波を消すことより、直立消波ケーソン防波堤と呼ばれている⁷⁾。

* 運輸省港湾技術研究所水工部エネルギー研究室長
〒239 神奈川県横浜須賀市長瀬3-1-1

a) 在来型防波堤



b) 新直立消波構造

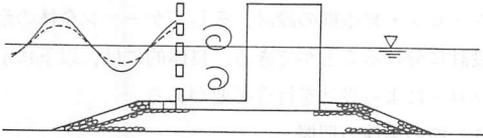


図-2 混成式防波堤と直立消波ケーソン防波堤

2.2 防波堤の機能と波エネルギー変換の機能

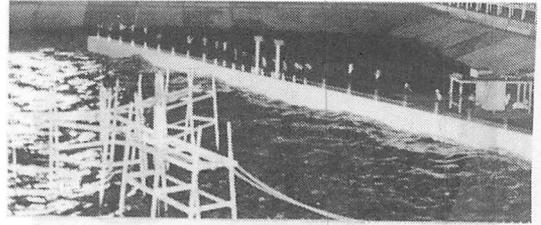
通常の混成式防波堤は波を防ぐという機能を持つ。そして直立消波ケーソン防波堤は、波を防ぐ機能に波を消すという機能を合せもつ。波力発電ケーソン防波堤は、波を防ぎ、波を消すばかりでなく、波のエネルギーを利用するという機能を合せもつものである。

1948年、前出は、雑誌「港湾」⁶⁾に波力発電の機能を持つ防波堤の提案をすでに行っており、彼の考案した防波堤は、図-1のものに近い形状ですらあった。現在まで、波エネルギー変換装置として考案されたものは非常に多いが、実用化が期待できるものは残念ながら多くはない。これは、波の変動性が問題であり、特に台風時などの異常波浪時の波に耐えられ、しかも経済的なものを設計することが困難であったからである。前出は、この異常波浪に対して設計される防波堤こそ経済的な波エネルギー変換装置としての可能性があることを指摘している。波力発電ケーソン防波堤は、防波堤の機能と波エネルギー変換装置の機能を合せもつことにより、一つの機能あたりのコストの低減をはかるものである。また、これまでの防波堤の建設、すなわち「波とのたたかい」で蓄積された技術を、有効に利用しようとするものである。

なお、防波堤の延長方向（法線方向）の一函のケーソンの長さは、通常10～20m程度である。たとえば、防波堤の延長が1kmであり、ケーソンの長さが20mとすると、50函のケーソンが必要となる。波力発電ケーソンに対する種々の検討は、一函のケーソンを単位にしたものが標準である。

3. 波力発電ケーソン防波堤の研究の概要

波力発電ケーソン防波堤に関して、種々の研究が行



写1 空気出力に関する平面模型実験

われている。その概要を以下簡単に説明する。

3.1 空気出力に関する研究

波のパワーは、空気室によって空気のパワーに変換される。この過程を表わす理論、「熱力・波動法」が提案され¹⁾、実験的に検証された。また、この理論は、実際の海の波のように不規則で、しかも方向分散性をもつ波（多方向不規則波）⁶⁾にも適用できるように拡張され、実験的に検証された³⁾⁹⁾。写1は、波力発電ケーソン防波堤に多方向不規則波を作用させ、波向きと波の方向分散性が空気出力に及ぼす影響を調べているところである。

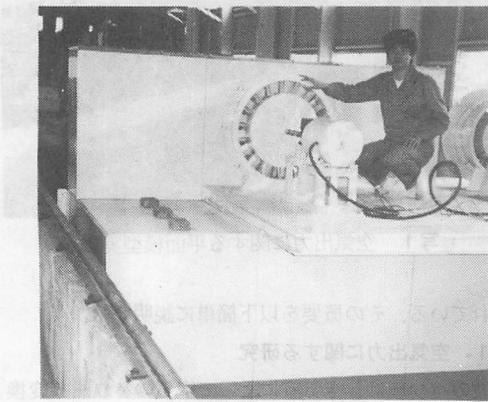
空気室の最適な諸元は、この理論に基づいて決定することができる。おおまかにいえば、空気室の幅は波長の10～20%程度で、空気ノズルの開口率が $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{250}$ 程度がよい。こうした条件であれば、波エネルギーから空気エネルギーへの変換効率 EFF_a が70%以上となる。このとき、波の反射率は50%以下となる。

3.2 タービンに関する研究

空気のパワーは、タービンによってタービンパワーに変換される。前述した「熱力・波動法」の理論を、タービンを含むものに拡張し、実験的に検証した⁴⁾。したがって、波の条件や空気室の条件が与えられたとき、タービンの出力が計算できるようになった。特に、不規則な波によって生ずる空気流に対し、タービンの出力が時々刻々計算できるようになった。また、波および空気室の条件が与えられたとき、最適なタービンの直径と回転数を定めることができるようになった。

3.3 大型模型による発電実験

現地の $\frac{1}{3}$ 程度的大型模型を用いて、発電実験を行っている。ここで用いた空気室模型は、約6m²の面積をもち、設置されたタービンも直径80cmの大型のものである。発電機の定格は1kwであり、これによって発生した電力はバッテリーに充電され、複数の電燈（防波堤灯台用電燈：100W/個）をともしている。写2は、模型を後方からみたもので、空気室上にタービンと発電機がある。



写2 大型模型による発電実験

この実験は、波力発電装置の総合的なシステムとしての検討を行うもので、これまで提案している空気室やタービンの設計法の妥当性を確認するとともに、発電機の設計法の検討を行うものである。また、こうした装置が、日々変化する波の条件に対し、どう運転できるかも検討する。さらに、この模型を用いて、異常波浪時のタービン・発電機等の保護対策についての検討も行う予定である。

3.4 波力発電ケーソンの耐波設計法に関する研究

波力発電ケーソン防波堤は、当然台風などによる激しい波に対して安定でなければならない。波力発電ケーソンの耐波安定性について模型実験を行い、実験結果に基づき耐波設計法を提案している²⁾。実験によって、波力発電ケーソンには、前掲図-2(b)の直立消波ケーソンと同様な波力が作用し、その設計法⁷⁾を準用できることがわかった。また、タービンのノズルの開口部から海水が侵入する危険性があるときには、その開口部を閉じてよいが、必ず別にダミーのノズルを設け、そこを開く必要があることがわかった。ただし、この開口部があまり大きすぎると、水位の上下動が大きくなり、空気室の天井板に下から波面が衝突することに留意する必要がある。

3.5 波力発電ケーソンの性能向上に関する研究

波力発電ケーソンの形状は、二つの型に分けられる。その一つは、基本型と呼ぶ直方体の空気室がある場合である。前述した(1)~(4)の検討は、すべてこの基本型を対象としている。もう一つは、改良型と呼ぶものであり、基本型の形状を、空気出力の増大、耐波安定性の向上を目的に種々に変えたものであり、前掲図-1のものもその一つである。前掲図-1のケーソンは、空気室前壁を斜面とすることによって、耐波安定性の向上

を主たる目的としたものである。このほか種々の形状の改良型ケーソンについて、性能向上の可能性を検討するのが、この研究の主たる内容である。

4. 波力発電ケーソン防波堤の設計

4.1 設計のフロー

波力発電ケーソン防波堤の設計は、空気室の設計、タービン・発電機の設計、そしてケーソン全体の耐波設計に分けることができる。具体的には、以下に示すフローによる設計を行う必要がある。

a) 波の条件の把握

設計波と呼ぶ異常波浪時の波の、特に最大波を決定する。同時に、発電運転のための常時波浪のデータも把握しなければならない。

b) 空気室の形状の決定

空気室の幅 B 、前壁カーテンウォールの没水水深 d_c および空気室の高さ D を、空気出力および耐波安定性、そして、ノズル内に海水が侵入する危険性等から判断して決定する。なお、設置されるタービンの形状は、空気出力を大きく変化させるため、空気室の形状の決定にも影響する。ただし、タービンの設計と空気室の設計を同時に行うことは複雑となるので、タービンを等価なノズルとみなし、その最適な等価開口率 ϵ' を決定する。具体的な空気出力の計算は、「熱力・波動法」による計算によって行う。

c) タービンの決定

ウェルズタービンの形状は、その翼数やソリディティ、あるいはハブ比等によって異なる。どの形状が効率が高く、しかも経済的であるかは、現在検討が進んでいる¹⁰⁾。その形状が決まったならば、タービンについては、その直径と運転する回転数を決めなければならない。この決定には、不規則な変動風に対するタービンの特性図が用いられる。この特性図は、そのタービンの定常風に対する特性図をもとに、「熱力・波動法」の計算によって求めることができる。

d) 発電機の決定

発電機については、その機種、定格、そして制御方法を決めなくてはならない。これらのいずれも、発生した電気パワーの利用方法によって大きく異ってくる。ただし、それぞれの波の条件において最大の電気パワーを得るためには、その波の条件に最も適切なタービンの回転数となるように運転しなければならない。そのためには、その時発生するタービンのトルクと、発電機側のトルクを一致させる必要がある。

発電機の定格は、発電パワーの平均的な出力量とその変動性に大きく影響する。定格を小さくすれば、発電量の変動性は小さいが平均出力も小さい。一方、定格を大きくすれば、その逆となる。

e) ケーソン全体の設計

ケーソン全体が最大波に対して、石のマウンド上で滑動したり、転倒したり、あるいは地盤が破壊したりしないよう、ケーソン全体の幅等を決定する。また、空気室の壁等を、空気圧や波圧で破壊しないよう設計する。なお、タービン・発電機等を設置する機械室も同時に適切に設計する必要がある。この機械室の設計において、タービン・発電機の保護対策装置の設計も行う必要がある。

4.2 設計例

波力発電ケーソン防波堤の全体像を把握するため、十分でないが、これまで明らかにされた方法に基づいてケーソンやタービン等の設計を行った。ここに示す例は、酒田港の水深-19mの位置に、波力発電ケーソンによる防波堤を設けることを想定したものである。ただし、設計潮位はH. W. L. = +0.5m、設計波の有義波高 $H_{1/3} = 10.9\text{m}$ 、周期15s、入射角度 6° とした。最高波高 H_{max} は14.8mである。なお、発電は冬期(10月~3月)に限る場合を考えており、冬期には 14.8kW/m (1970年から82年までの平均値)の波パワーが来襲する。

図-3は、ケーソンの断面図と平面図を示すものである。空気室の幅は7m、ケーソン全体の幅は27m、ケーソンの天端高さは11.5m、ケーソンの法線方向の長さは20mである。ケーソンの幅は周期6sの波の長さの13%である。このケーソンの空中重量は、12,800tfであり、滑動に対する安全率は1.2である。

ケーソンに設置するタービンは、16枚翼でハブ比が

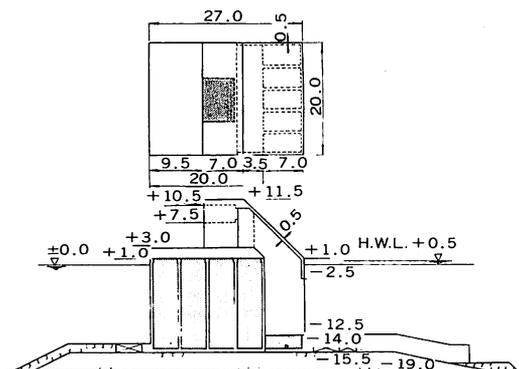


図-3 波力発電ケーソン防波堤の試設計例

0.75、平均ソリディティが0.7のウェルズタービンを用いることにした¹¹⁾。このタービンを二台、タンデム型に設置すると、一台のタービンの直径は2.17mとなる。これは、空気ノズルとしての等価開口率を $\frac{1}{210}$ にとったことになり、空気出力効率は50~70%程度である。このタービンを600~1200rpmの回転数の範囲で最適に運転すると、タービン効率は50%程度となる。図-3の平面図の斜線部分が、このタービン等を設置する機械室である。なお、ケーソン一函に一台の発電機を設置することにしている。

4.3 発電運転シミュレーション

波パワーは変動する。この変動する波パワーによって、日々どのような発電ができるかを知るためには、発電運転シミュレーションを行えばよい。運輸省港湾局では、全国37地点で波の観測を行っており、港湾技術研究所でそのデータの集中処理を行っている¹²⁾。このデータによって、各地点の波パワーの平均量はもちろん、時間的な変動も把握できる。

図-4は、酒田港の1980年10月から1981年3月までの6ヶ月間の波のデータをもとに、発電運転シミュレーションを行った結果である。ただし、前項の空気室とタービンを用いた場合について計算したもので、発電機の効率は簡単のために100%とし、ケーソン一函(20m分)について行っている。発電機の定格は100kWであり、定格の10%以下の発電量になるときは運転を停止し、定格以上のときには別のノズルから空気流を逃がすことにより、定格運転をすとした。また、このシミュレーションでは、6ヶ月間の平均発電量の80%を常時使用することとし、必要な電力の貯蔵容量も検討している。このケースでは、6ヶ月間の平均発電量が52.5kWであり、その80%の42kWを常時使用すると、14日分の貯蔵容量が必要となる。図-4は、この必要最小限の貯蔵容量に対するシミュレーション結果である。10月の最初は波パワーが小さいため、発電量が使用量を下まわる日が多く、蓄電量が減少し、10月20日ごろ最小となる。また、11月の後半にやや波パワーの小さい日が続くため、蓄電量の減少が認められる。しかし、その後は発電機が定格運転をする日が多く、蓄電量が100%となり過充電となるため他に電力を放出する日が多い。

表1は、発電機の定格と使用量を変えて行ったシミュレーションの結果を示すものである。表には、蓄電容量、運転時間率(運転している時間の割合)、定格運転時間率、充電時間率(発電量が使用量以上となる時

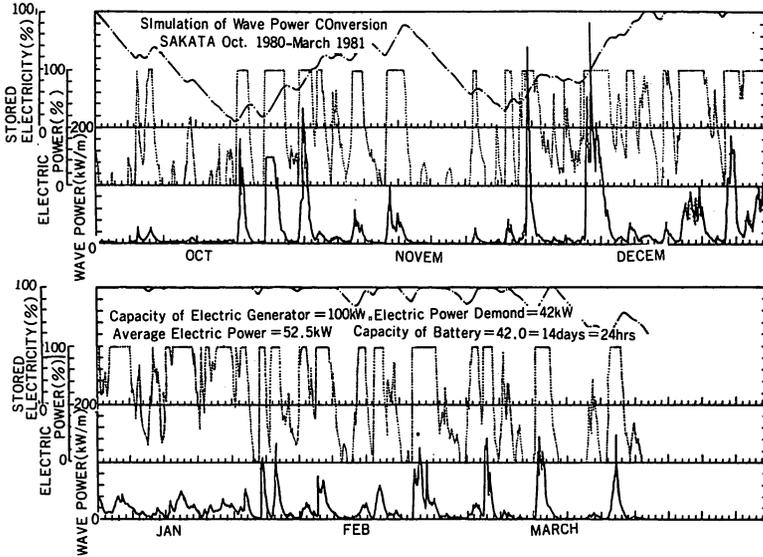


図-4 発電運転シミュレーションの例 (酒田 1980.10~1981.3)

表1 発電運転シミュレーション結果

平均 $H_{1/3} = 1.84$ m, 平均 $T_{1/3} = 6.4$ s, 平均波パワー 21.2 kW/m (424 kW/20m)

発電機定格 (kW)	発電量 (稼働率) (kW)	使用量 (電力利用率) (kW)	運転時間率 (%)	定格運転時間率 (%)	充電時間率 (%)	蓄電容量 (日数)	過充電時間率 (%)	総合発電効率 (%)
100	52.5 (52.5%)	52.5 (100%)	78	32	49	22	7	12.4
100	52.5	42.0 (80%)	78	32	53	14	25	9.9
100	52.5	26.2 (50%)	78	32	63	10	49	6.2
80	45.8 (57.3%)	45.8 (100%)	81	38	51	22	7	10.8
80	45.8	36.6 (80%)	81	38	56	13	28	8.6
80	45.8	22.9 (50%)	81	38	66	7	52	5.4
50	33.1 (66.2%)	33.1 (100%)	86	50	58	19	9	7.8
50	33.1	26.5 (80%)	86	50	62	10	33	6.3
50	33.1	16.6 (50%)	86	50	71	7	58	3.9

間率), 過充電時間率, さらには総合発電効率(ケーソンに入射する平均波パワーに対する電力使用量の割合も示している。たとえば, 図-4の場合の定格 100 kW で使用量が80%の場合には, 運転時間率が78%, 定格運転時間率32%となり, 発電機の稼働率が52.5%である。この表をみれば, 発電機の定格を小さくしたり, 電力の利用度を小さくすれば, 利用できる電力量は小さくなるが, その変動性が小さくなるのがわかる。

こうしたシミュレーションは, 太平洋側の鹿島港の1980年の1年間のデータによっても行っている。酒田の冬期間の場合と比較して, 鹿島の場合は, 平均波パワーは1/2以下と小さいが, 波パワーの変動性が小さい

ことが特徴である。したがって, 比較的大きな定格の発電機を用いても, 発電機の稼働率は高い。たとえば, 同じ定格100 kW の発電機でも, 鹿島の場合は酒田の場合とほぼ同じ平均発電量となる。なお, 酒田のような日本海側では, 夏期には波パワーがほとんどないため¹³⁾, 波力発電は冬期に限られるが, 鹿島のような太平洋側では年間を通じて比較的安定な運転ができることにも留意すべきである。

5. あとがき

波力発電ケーソン防波堤の実用化をはかるためには, 得られたエネルギーをどう利用するかについても検討

する必要がある。現在、(財)沿岸開発技術研究センターによって、政府機関、大学等の研究機関、電力会社、電機会社、さらには建設会社等を結集した「波力エネルギー利用に関する総合調査委員会」が設けられ、利用方法を中心に、波力発電ケーソン防波堤の実用化にむけた検討が行われている。委員会では、発電コストの試算も行われているが、波力発電ケーソンを防波堤としての費用と考え、タービン発電機や制御機器等を発電コストの対象に考えると、通常の電力の発電コストと大差がないことがわかっている。ただし、発電コストの大半が、ウェルズタービンのコストによるものであり、このコストの低下が重要である。

波力発電ケーソンの実用化をはかるため、運輸省港湾局では、昭和62年度より現地実証実験を行う方向で検討を進めており、港湾技術研究所でもさらに研究を進めることにしている。これまで他の機関の多くの方々の協力を得て、研究を進めてきたが、今後の研究では他の分野の専門家の協力が一そう大切になると考えている。たとえば、ケーソン一函一函から出力される電力をどのように結合すればよいのかについては、電力の専門家の協力が不可欠である。

なお、波力発電ケーソンを含め、波エネルギー変換装置の実用化において、最も必要とされるのが、安価で大規模な蓄電装置の開発であると考えている。そうした装置の実現を心から希望して、本稿を終りたい。

参 考 文 献

- 1) 小島朗史・合田良実・鈴木諭司；波力発電ケーソンの空気出力効率の解析，一波エネルギーに関する研究第1報一，港湾技術研究所報告，第22巻3号，(1983)，pp. 125~158.
- 2) 小島朗史・鈴木諭司；波力発電ケーソンに働く波力特性に関する実験，一波エネルギーに関する研究第2報一，港湾技術研究所報告，第23巻1号，(1984) pp.53~81.
- 3) Takahashi, S., Ojima, R., and Suzumura, S.; Air power of pneumatic-type wave power extractors due to irregular wave actions. —A study on development of wave power (3rd report)—, Rept Port and Harbour Res. Inst., Vol. 24. No.1, (1985) pp.3~41.
- 4) 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，一波エネルギーに関する研究，第4報一，港湾技術研究所報告，第24巻2号，(1985)，pp.159~192.
- 5) 高橋重雄；波力発電ケーソン防波堤の開発，昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集，(1985)，pp.1~57.
- 6) Goda, Y.; Random seas and design of maritime structures, Univ. of Tokyo Press, 1985, 323 p.
- 7) 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄；混成堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について，港湾技術研究所報告，第20巻2号，(1981)，pp.3~39.
- 8) 前出繁吉；波力発電装置を有する防波堤の考察，港湾，1948年1~3月合併号，pp.18~21.
- 9) 高橋重雄・明瀬一行；波力発電ケーソンの空気出力に及ぼす波向きと平面配置の影響，第33回海岸工学講演会論文集，(1986).
- 10) 荒川忠一；波浪エネルギー二次変換装置，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集，(1984)，pp.93~103.
- 11) 石井進一ほか；沿岸固定式空気タービン波力発電装置の発電運転試験報告，海洋科学技術センター試験研究報告第14号，(1985).
- 12) たとえば，菅原一晃・小舟浩治・橋本典明・亀山豊；沿岸波浪観測年報（昭和59年），港湾技術研究所資料，No. 545，(1986)，324p.
- 13) 田端竹千穂・柳生忠彦・福田功；日本沿岸における波のエネルギー，港湾技術研究所資料，No.364，(1980)，20p.

