

他方向不規則波中における沖合浮体式波力装置 FOWADの波エネルギー吸収特性の推定法について

堀田 平^{*1}

沖合浮体式波力装置 FOWAD は、沖合に設置されるターミネー型の振動水柱型波力装置である。これまで、これについては幾度もその縮尺模型を用いた水槽実験が実施され、その波エネルギー吸収効率が優れ、将来実用に供する資質が十分にあることが確認されている。また、これの諸特性の推定方についても前報で提唱し、その有効性を明らかにした。

そこで本報では、実海域の波浪である多方向不規則波中における FOWAD の波エネルギー吸収効率を推定するための手法を確立するため、前報で示された規則波中特性推定方法により求められた効率特性を用い、多方向不規則波に線形重ね合わせする手法を開発した。その結果、これにより得られた計算値は実験値とほぼ合っており、本手法が実用上十分な精度で有効であることが判った。

これにより、今後ケーススタディや試設計の際に、FOWAD 実海域波浪中出力は本手法を用いて容易に推定することが可能となった。

キーワード；海洋エネルギー，波エネルギー，波力発電，波力装置

A Method for Estimating the Performance of a Floating Offshore Wave Power Device (FOWAD) in Short Crested Waves

Hitoshi HOTTA^{*2}

The Floating Offshore Wave Power Device (FOWAD) is a floating terminator Oscillating Water Column (OWC) wave power device which is installed some distance offshore. So far, several tests using a scale model in a wave tank have been carried out. The tests have confirmed that FOWAD performs well in absorbing wave energy and it appears suitable for practical application in the future. The method used to estimate the efficiency of wave energy absorption and predict device motions was described in an earlier paper and the validity of the methodology was also confirmed.

*1 海洋開発研究部

*2 Marine Research and Development Department

In this paper, the method used to estimate the efficiency of wave energy absorption of FOWAD in the short-crested seas in which it will operate is described. This method calculates the efficiency by linear multiplication of the power spectrum and the efficiency characteristics in the frequency domain, developed in the earlier paper.

Using this method, the calculated performance agreed very closely with the measured performance of the model. Consequently it was determined that this method is valid for estimating the performance of a full scale device in the sea.

Development of this method of estimating performance simplifies the estimation of performance of FOWAD in case studies and basic design work.

Key word ; Ocean energy, Wave energy, Wave power generation,
Wave power device.

1 まえがき

FOWAD (Floating Offshore Wave power Device ; 沖合浮体式波力装置) のようなターミネーター型波力装置は、比較的水深が大きい沖合に設置されて稼働することを特徴としている。これは、砕波する以前のより大きな波エネルギーを入力とするという技術的な理由に加えて、水際線近傍における海面の過密な利用形態を考慮することも不可欠だからである。沖合海面はこれらの課題に対しては適するが、しかし一方、波の性質が水際線近傍に比べて少々異なってくる。つまり、波の水粒子運動のメカニズムはいわゆる微小振幅理論が適用され、数学的に容易に解析されるのであるが、いま一つの問題として様々な周波数成分の波が様々な方向から来襲して来るということがある。つまり、多方向不規則波 (多方向スペクトル波もしくは“きれ波”とも言う。英訳としては, multidirectional waves もしくは short crested waves) の問題である。

「海明」のような振動水柱型 (Oscillating Water Column ; OWC) の波力装置の波エネルギー吸収効率を向上させるには空気室の下部に底板を、また、空気室前面に projecting wall を取り付けることが効果的であることは、これまでに幾つかの機会を得て報告して来た^{1) 2)}。しかし、これらは波の入射方向に対する装置の指向性を高めることになることは明らかであり、従って波の入射角度に対し、波エネルギー吸収性能が大きく影響される懸念があった。「沿岸固定式波力発電システ

ム」³⁾「波力利用熱回収システム」⁴⁾ および「波力発電ケーソン」⁵⁾ などのような波打際に固定されるタイプの装置であれば、波の入射角の変化はさほど大きくなく、ほぼ安定した方向を得られるので問題は無かったが、底板や projecting wall を取り付けた FOWAD を沖合に設置するとなると、にわかにこれは重要な問題の一つになってくる。つまり、波の入射方向が変化することにより、期待される程の性能向上が見られないのではないかという問題である。

著者らは、これまでにこの問題について縮尺モデルを用いた水槽実験を実施し^{6) 7) 8)}、その“解答”について概ねを知り得た。しかしながら、それはモデルをはじめ多くの設定条件下において明らかにされたことであり、必ずしも汎用的な把握とはなっていない。今後、FOWAD を実験化可能レベルまで引き上げるには、あらゆるケースに対応してその諸性能を推定することが可能な“デバイス”を作っておくことは不可欠であろう。そこで、著者らはこの“デバイス”として比較的簡易な計算プログラムを作製し、それによって得られた結果と FOWAD を用いた水槽実験結果と比較してみた。本報では、これについて報告する。

2 多方向不規則波中波エネルギー吸収

2.1 多方向不規則波の賦存波エネルギー量

エネルギー吸収装置による吸収エネルギー E_a は、入力エネルギー量と E_i とエネルギー吸収効率 η を用いて、

$$Ea = Ei \cdot \eta \quad (1)$$

として得られる。ここで、入力エネルギー量である、単位長さあたりの多方向不規則波の持つ波エネルギー量 Ei は、次式で得られる。

$$Ei = \rho g \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^\infty S(\omega) G(\theta) \cdot Cg(\omega) d\omega d\theta \quad (2)$$

ここで、
 S ; 波浪のパワースペクトル
 G ; 方向分布関数
 Cg ; 波の群速度
 ρ ; 水の密度
 g ; 重力加速度
 θ_1, θ_2 ; 多方向波浪の出現角度の下、
 上限値
 ω ; 角周波数
 θ ; 角度

(1) 波浪パワースペクトル

波浪のパワースペクトルはこれまで幾種類か提案されているが、沿岸海域に適することを考慮し、次式で表される JONSWAP 型のスペクトルを用いることとする⁹⁾。

$$S(\omega) = \frac{\alpha H_s^2 s \rho}{T_p^4 \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^5} \exp \left\{ -\frac{5}{4} \left(T_p \cdot \frac{\omega}{2\pi} \right)^{-4} \right\} \cdot j^{\exp \left\{ \frac{-(T_p \cdot \frac{\omega}{2\pi} - 1)^2}{2\lambda^2} \right\}} \quad (3)$$

ここで、
 H_s ; 有義波高期
 T_p ; スペクトルのピーク周期
 $(\approx 1.1 T_{H1/3})$
 $T_{H1/3}$; 有義波高周期
 $\lambda = 0.166$
 $\gamma = 3.3$
 $\tau = \begin{cases} 0.07 & (\omega \leq \omega_m) \\ 0.09 & (\omega < \omega) \end{cases}$
 ω_m ; スペクトルのピーク周波数

(2) 方向分布関数

方向分布関数 G は、次式で表される^{10) 11)}。

$$G(\theta) = Cs \cdot \cos^{2s}(\theta) \quad (4)$$

式中の Cs はいわゆる規格化関数であり、

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} G(\theta) d\theta = 1 \quad (5)$$

とするための係数である。なお、 θ は装置長手方向に直角な方向を 0° とすれば、 θ の範囲としては、本報では、 -90° から 90° までとする。したがって、(5)式において、 $\theta_1 = -90^\circ$ 、 $\theta_2 = 90^\circ$ となる。

(3) 波の群速度

波の群速度 Cg は、波周波数の関数であり、次式で求められる¹²⁾。

$$Cg(f) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h_w}{\lambda} \frac{1}{\sinh 4\pi h_w / \lambda} \right) C \quad (6)$$

ここで、 h_w ; 波長 (深海波の場合；

$$\lambda = gT_w^2 / 2\pi$$

C ; 波速 (深海波の場合；

$$C = gT_w / 2\pi$$

T_w ; 波周期

2.2 多方向不規則波中波エネルギー吸収量

(1)式中に示したエネルギー吸収効率 η について、全波周波数および全入射波入射角の対する値を求めることができれば、これを(2)式で得られた波エネルギー量に乗じることにより、吸収波エネルギー量が求められる。つまり、

$$Ea = \rho g \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^\infty Ei(\omega, \theta) \cdot \eta(\omega, \theta) d\omega \cdot d\theta \quad (7)$$

として表される。

但し、波エネルギーを他のエネルギーに変換する二次変換装置が、一次変換装置の可動部、つまり OWC 型装置の OWC (振動水柱) の動揺に対し線形の負荷となるようなときに(7)式は成り立つ。幸いなことに OWC 型装置に用いられる二次変換装置は空気タービンであり、これは線形負荷として取り扱うことができる。また、他の方式の装置

でも概ね線形化して取り扱うことは不可能でない。従って、波エネルギー吸収効率 η は波高の変化を考慮すること無く波周波数および波入射角の関数として求められ、またこの値を各周波数、各入射角に対応した波エネルギー E_i に乘じ、つまり線形重ね合わせを行い、これを(7)式に示すような積分を行うことによって、多方向不規則波中における波エネルギー吸収量を推定することができるようになる。

2.3 波エネルギー吸収効率

図1に示すような沖合浮体式波力装置 (Floating Offshore Wave power Device ; FOWAD) の波浪中挙動および波浪中波エネルギー吸収特性などについて、著者はこれまでに縮尺模型を用いた水槽実験^{6) 7)} およびそれらの計算方法⁸⁾ について報告してきた。

とりわけ、前報において規則波 (正面および斜め規則波) 中における波エネルギー吸収効率の推定法について示し、それを用いた計算結果が模型実験結果と比較的良く一致していることが確認できた。この計算はFOWADの波浪中応答運動による各空気室への相対入射波高の変化を、Heaveおよびpitchの鉛直方向運動にのみ影響されるとして導いたものである。そして、波エネルギー吸収効率を算出するにあたっては、高橋ら⁸⁾ の提唱する“熱力波動法”を用いている。前者については、現象を全て線形として扱っているが、後者については非線形な取り扱い方となっている。

しかし、小島らは¹⁴⁾、このような非線形の系であっても、不規則波中出力を推進するにあたって、入射波と空気室内波面変動の位相が波高に依存しないと仮定して求めた結果は実用上有効であるとしている。

そこで本報においては、系は線形であるとし、規則波中で得られた波エネルギー吸収効率の周波数に対する値を用いて不規則波中のパワースペクトルと重ね合わせることとする。

一方、多方向不規則波中における波浪外力は、一方方向不規則波中におけるそれとは、FOWADの長手方向に積分するのであるから異なってくる。この差違が大きいと前述したような線形重ね合わせ法が有効でなくなる。しかし、模型実験によって得られたHeaveのパワースペクトルは、図2

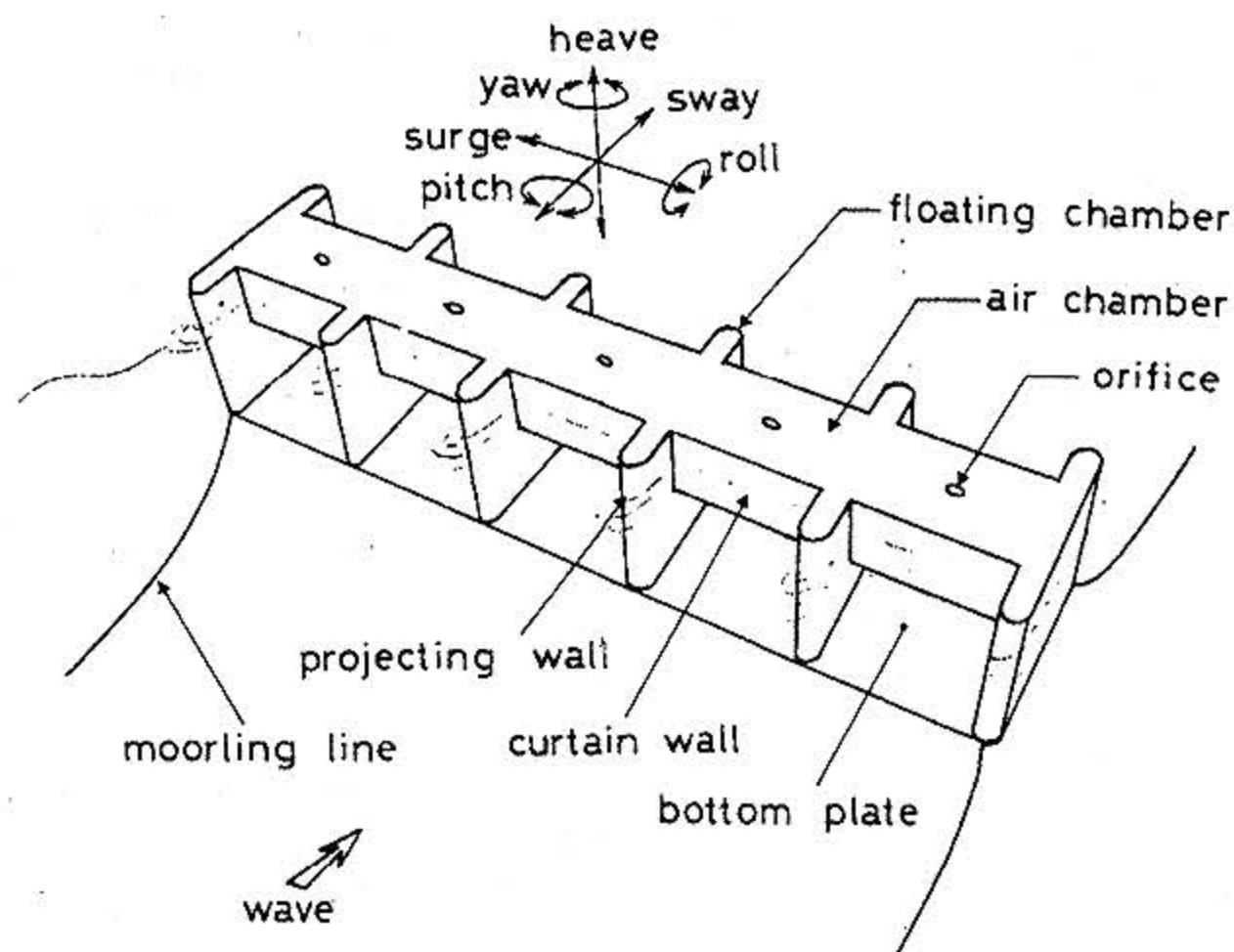


図1 FOWAD 概略図と座標系

Fig. 1 Scheme of the FOWAD and coordinate system

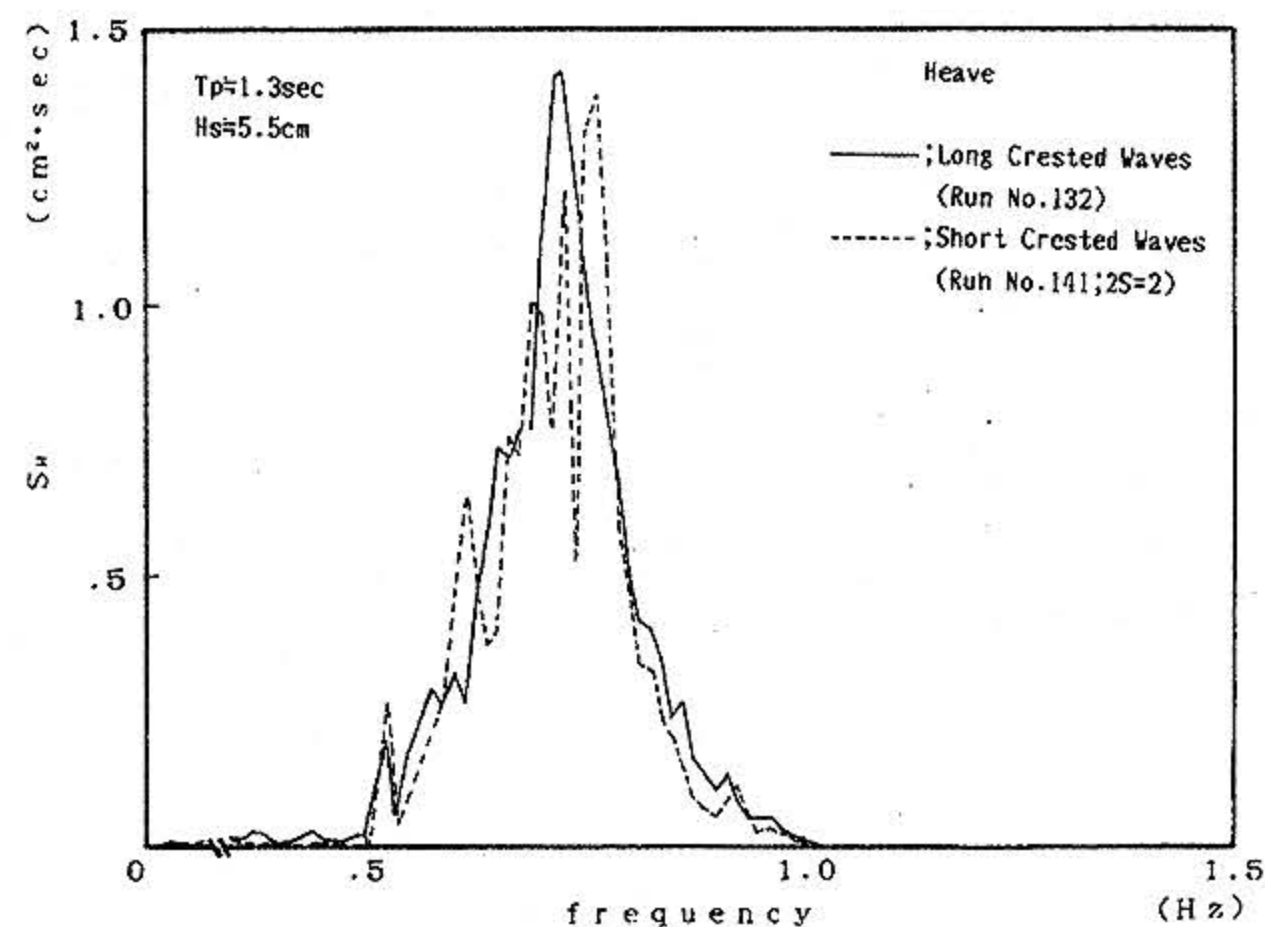


図2 Heave 運動のパワースペクトル

Fig. 2 Power spectrum of heave motion

に示すように一方方向不規則波中のものと多方向不規則波中のものがほぼ一致している。またPitchに関しては、多方向不規則波中においてもピーク周期 (約0.75Hz) においても $0.8 \text{ deg}^2 \cdot \text{sec}$ と小さい。従って、多方向不規則波中においても前法⁸⁾で示した計算方法で求めた波エネルギー吸収効率の周波数応答関数を用いて線形重ね合わせすることは、実用上の精度において十分有効であろうと考えられる。

3 計算および考察

3.1 多方向不規則波

計算に使用した不規則波中のパワースペクトルの数列を図3に示す。これらはJONSWAP型の

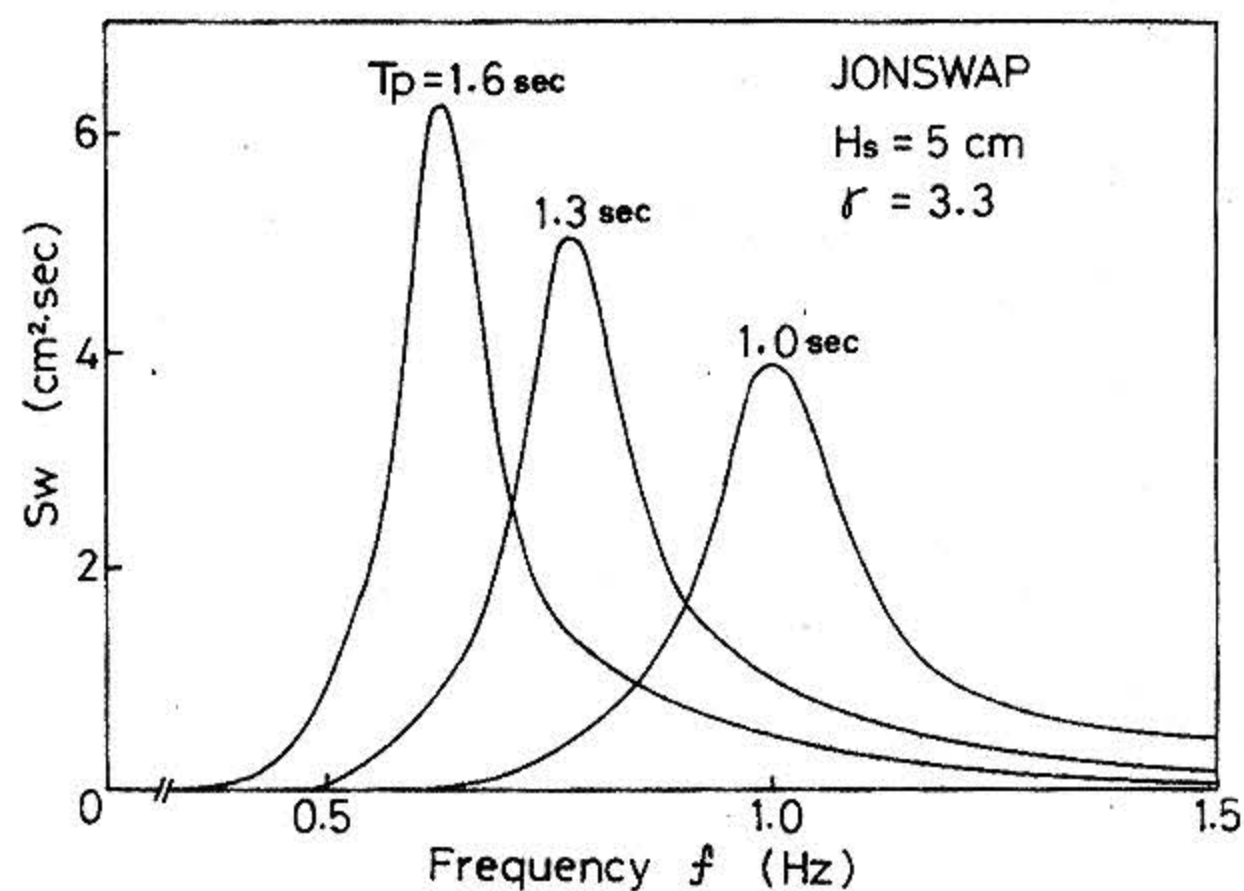


図3 計算に用いたパワースペクトル例
Fig. 3 Examples of wave power spectrum used in the calculation

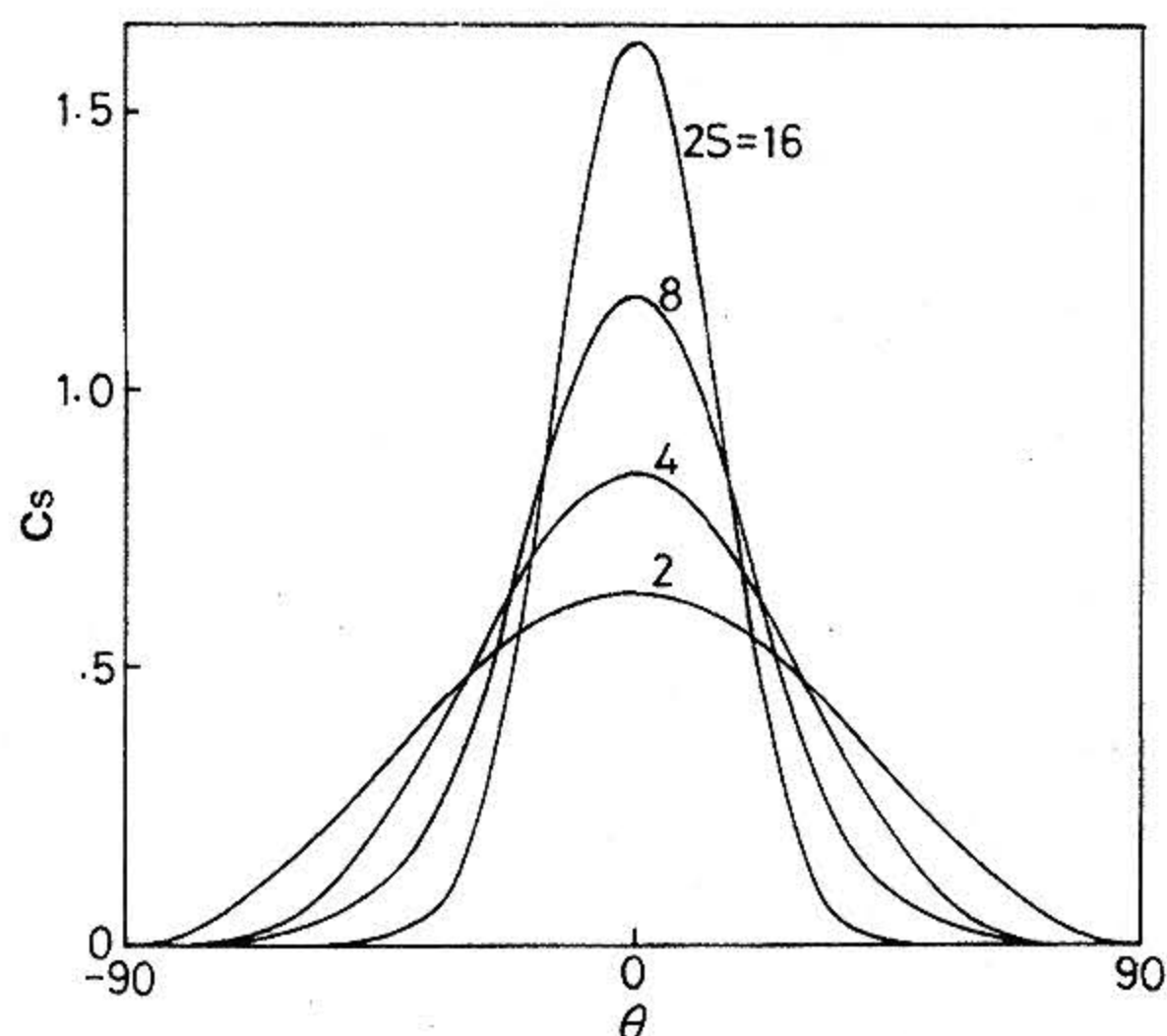


図4 計算に用いた方向分散関数例
Fig. 4 Examples of wave directional distribution parameter used in the calculation

スペクトルであり、(3)式を用いて求められたものである。なお、図中の T_p はスペクトル・ピーク周期である。

一方、方向分布関数については図4に示す。これらは(4)式を用いて求められたものであり、図中の $2S$ は(4)式中に用いた $2S$ であり、つまり、波エネルギーの方向分布の集中度を支配するパラメータ (Exponent of Directional Spectrum) である。

3.2 波エネルギー吸収効率

FOWADの波エネルギー吸収効率特性として、

前報に示したものを図5に示す。これは、 $\chi = 90^\circ$ つまり正面規則波中における波周期に対する波エネルギー吸収効率の実験値と計算の比較である。これにより、計算方法の妥当性が確認された。

この計算方法を用いて、各周波数 (f) について、波入射角 χ に対する波エネルギー吸収効率 η の変化を求めてみた結果が図6に示すような特性となる。なお、これより、 $F < 1.0\text{Hz}$ の範囲では、 χ が小さくなる。つまり入射波方向が斜めになるにつれて波エネルギー吸収効率が増大していることが判る。このようにして求められた η が(7)式中に示す $\eta(\omega, \theta)$ である。

3.3 多方向不規則波中における波エネルギー吸収効率

以上に示した波浪パワースペクトル、方向分散関数、波の群速度および斜め規則波中波エネルギー吸収効率特性として、 $2S$ (方向集中度パラメータ) に対する特性を図7に、有義波周期に対する特性を図8に示す。なお、いずれの図も実験値⁷⁾をプロットしてある。

図7より、計算値は実験値と比べ、定量的には20~30%高めになってはいるが、定性的には実験値を良く再現していることが確認された。これより、FOWADは沖合の方向分散性の大きい多方向

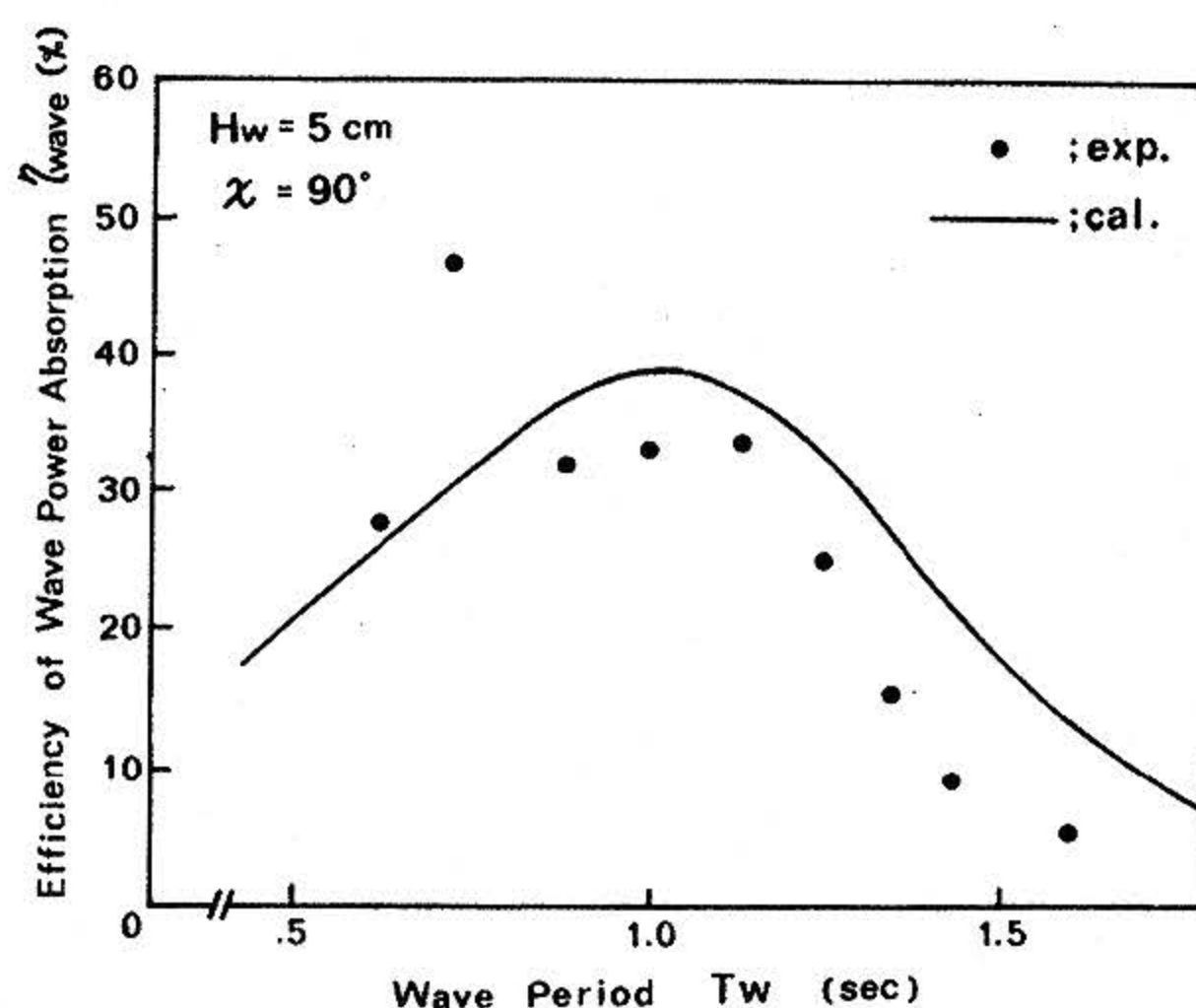


図5 規則波中における波エネルギー吸収効率の実験値と計算値の比較

Fig.5 Comparison of the performance of wave power absorption by the text and the calculation in regular waves

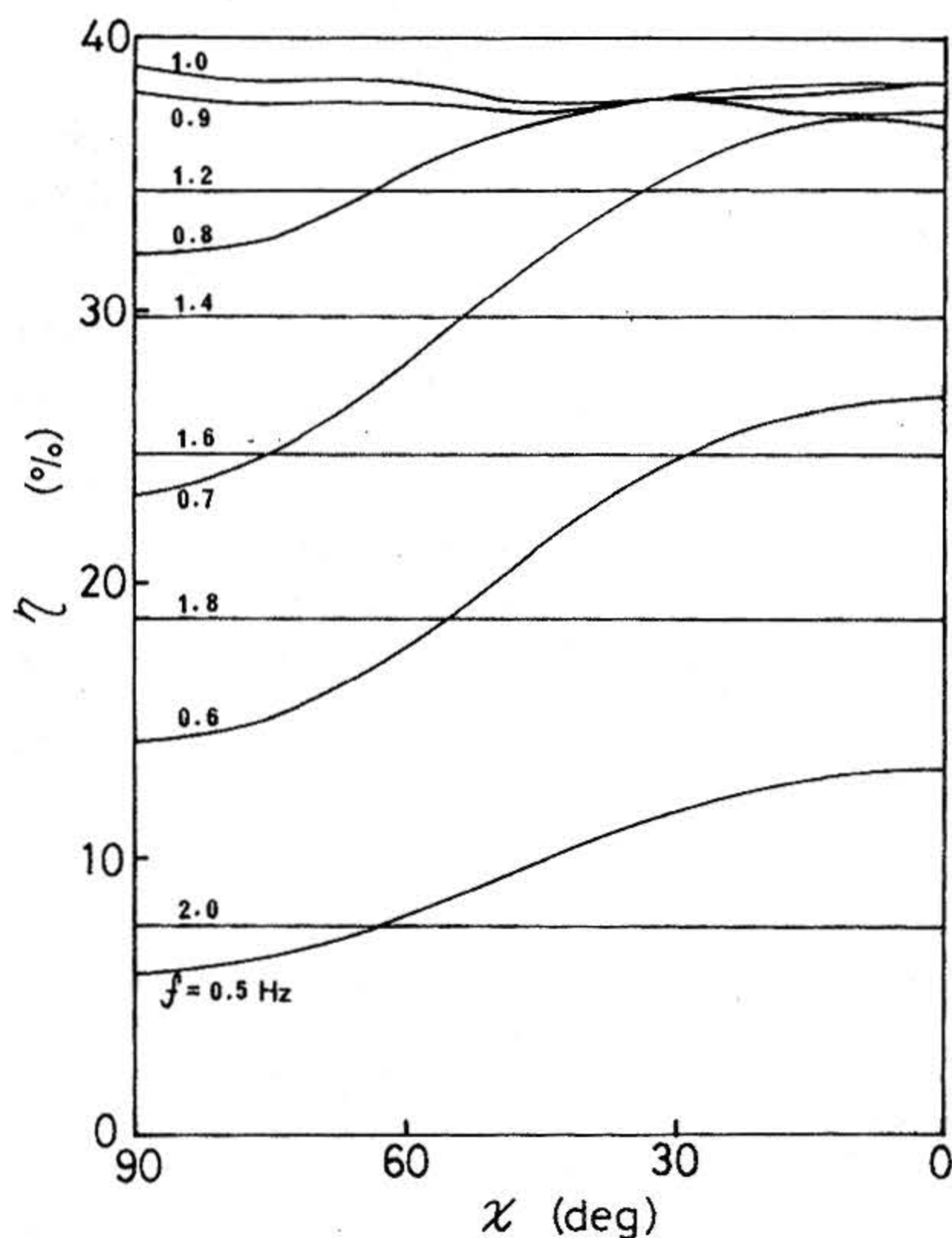


図6 斜め規則波中波エネルギー吸収効率特性
Fig.6 Efficiency of wave power absorption by FOWAD in the oblique waves

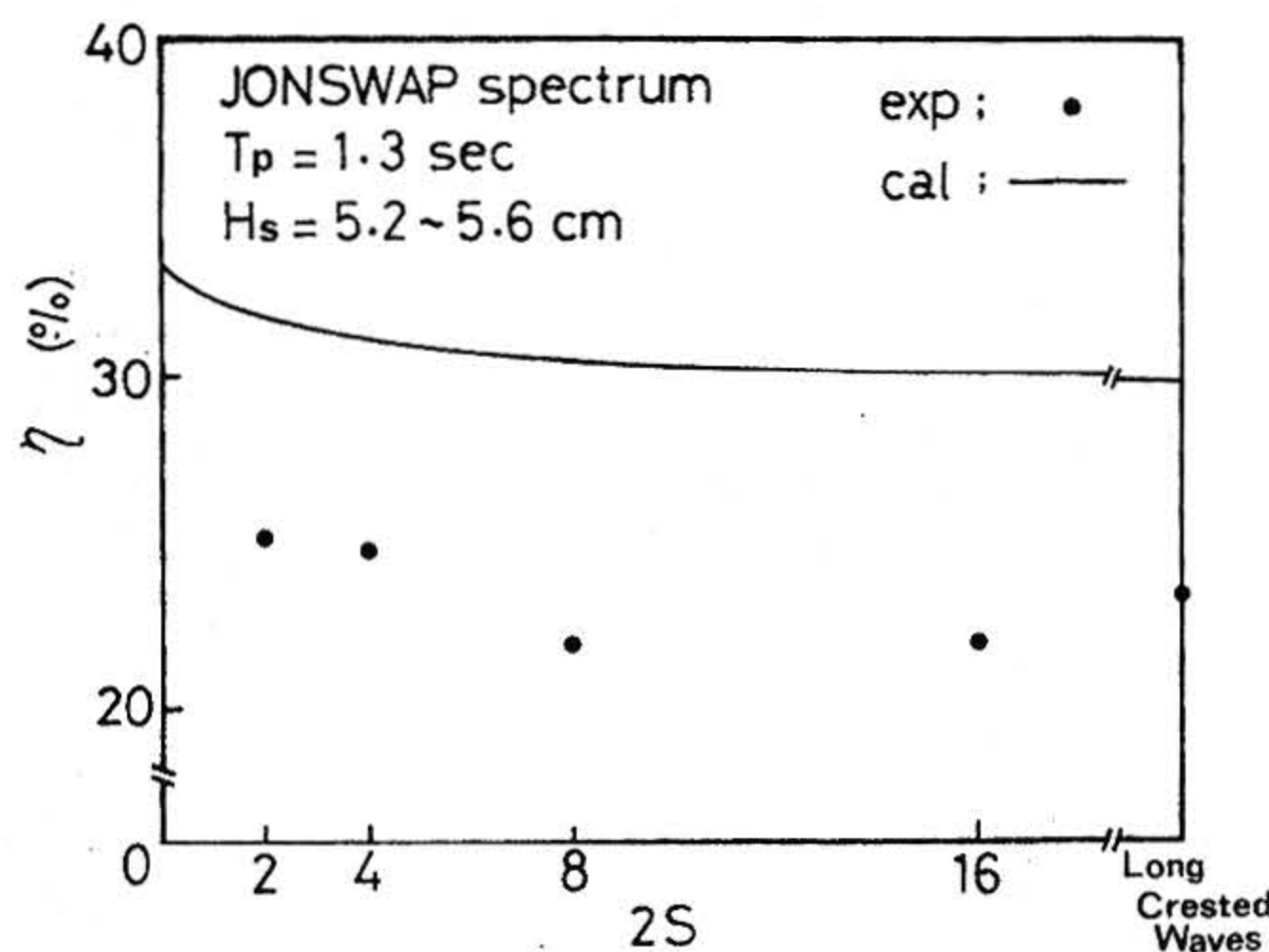


図7 方向集中パラメーターに対する波エネルギー吸収効率の特性
Fig.7 Characteristics of efficiency of wave power absorption versus the wave directional distribution parameter

向不規則波中においても決して出力を低下させることなく、むしろより大きな出力を発生させるこ

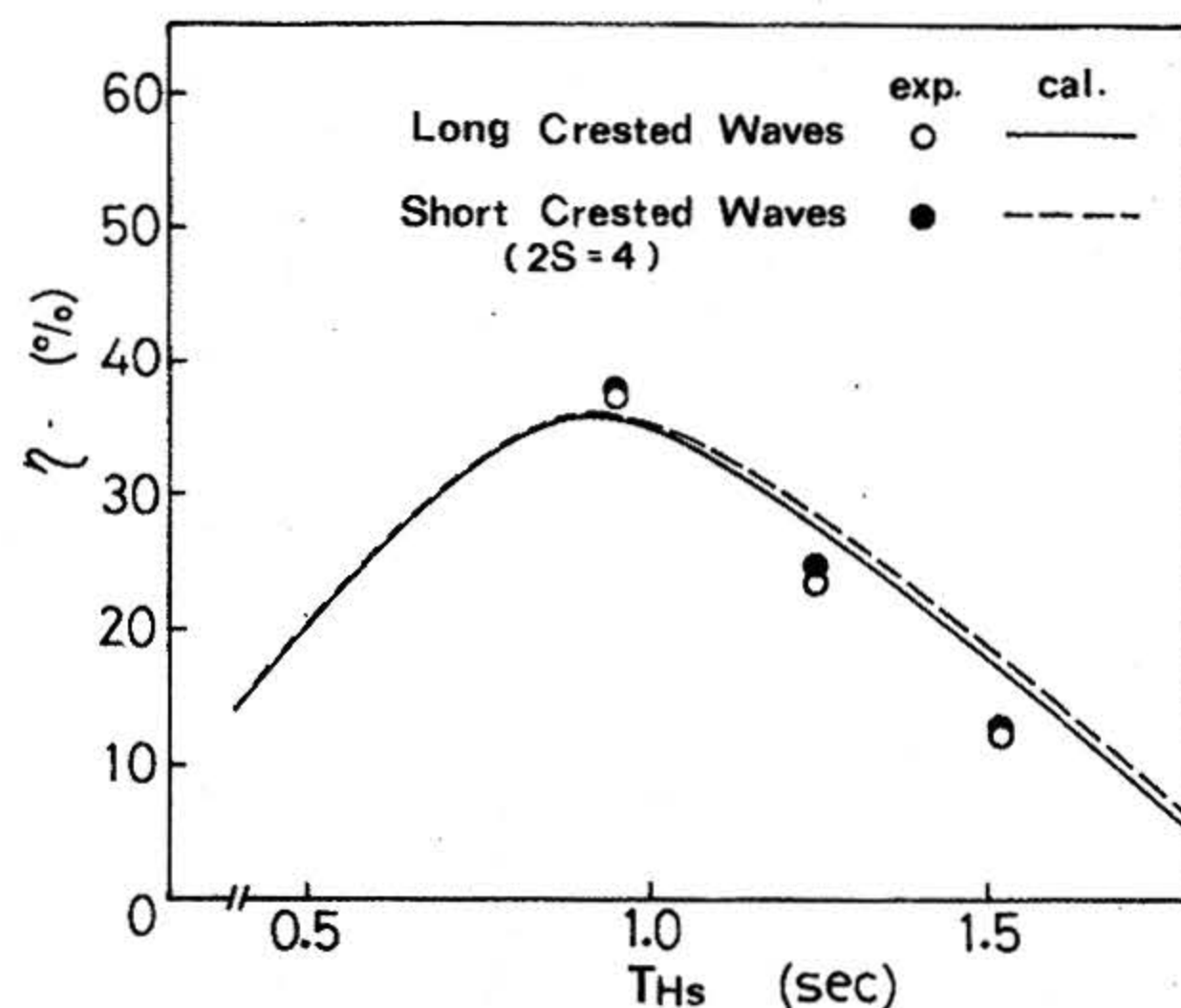


図8 不規則波中波エネルギー吸収特性効率
Fig.8 Performance of wave power absorption in the irregular waves

とが可能であることが確かめられた。

一方、図8には、一方方向不規則波 (Long Crested Waves) と多方向不規則波 (Short Crested Waves) における実験値と計算値を示したが、実験値がそうであるように、計算値についても一方方向および多方向の不規則波中の結果に差異は余り見られない。これは、多方向不規則波の実験および計算の条件が $2S=4$ であり、これを図7に照合してみるとその付近の効率 η がほぼ Long Crested Waves と等しいことから推測できる。有義波周期に対する波エネルギー吸収効率の特性については、図8からも良く判るとおり、計算値は実験値と良く合っており、これより本報に示した計算法により、多方向不規則波中においても、波エネルギー吸収特性を推定することが実用上十分可能であることが明らかになった。

4 おわりに

これまで浮体式ターミネーター型の OWC 型波力装置は、波エネルギー吸収効率が高く、従ってコストパフォーマンスの面からも実用上優れていることが推測されてきた。実際、これまでの著者らの幾度かの実験によってもそれが実証されてきている。しかし、それらは定性的な推測の範囲にとどまっていた。定量的な推定手法が確立されていなかったためである。

しかし、本報に示したように、実海域の波であ

る多方向不規則波中においてでさえ、ほぼ実用上十分な精度で、浮体式ターミネーター型装置の一つである FOWAD 波のエネルギー吸収効率を予測する計算法が完成した。本報では計算法の妥当性の確認のため、まず僅かなケースについてのみ計算を行ったが、今後これを用いて多くのパラメーターについて計算をすることによって、より適した FOWAD をあきらかにしていくことが可能となろう。

また、更に、その最適モデルを用い、コスト試算のためのケーススタディを実施することも必要である。

最後に、不規則波の計算についてアドバイスを頂いた MARINTEK (Norwegian Marine Technology Institute) の Dr.C.T.Stansberg に感謝致します。

また、本研究の一部はスカンジナビア・日本笹川基金からの助成金によって行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 堀田 平, 宮崎武晃, 鷺尾幸久, 田中 浩 ; 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, 海洋科学技術センター, p. 1 - p. 10, 1987年
- 2) 堀田 平, 宮崎武晃, 鷺尾幸久, 竹内俊介; 振動水柱型波力発電装置の空気出力に関する基礎的研究 — projecting wall 付き固定空気室 —, 第30回海岸工学講演会論文集, 土木学会, p.633 - p.637, 1983年
- 3) 堀田 平, 鷺尾幸久, 益田善雄, 石井進一, 宮崎武晃, 工藤君明; 沿岸固定式波力発電装置の発電運転試験, 第32回海岸工学講演会論文集, p.702 - p.706, 土木学会, 1985年
- 4) 中塚健司, 東江隆夫, 勝井秀博, 箭原憲臣, 土屋義行; 波力利用熱回収システム現地実証実験, 第35回海岸工学講演会論文集, 土木学会, p.847 - p.851, 1988年
- 5) 合田良実, 神田勝己, 千山善幸, 大根田秀明, 高橋重雄, 鈴木博史, 高木栄一; 波力発電ケーソン防波堤の実証実験, — 堤体・発電装置の設計製作及び実証実験の計画 — 第14回海洋開発シンポジウム論文集, 土木学会海洋開発委員会, p. 1 - p. 6, 1989年
- 6) 堀田 平, 鷺尾幸久, 宮崎武晃; 沖合浮体式波力装置の多方向波浪中特性について, 海洋科学技術センター試験報告, 第21号, p.69 - p.98, 1989年 3 月
- 7) 堀田 平, 鷺尾幸久, 宮崎武晃; 沖合浮体式波力装置 FOWAD の実海域中諸特性の予測について, 海洋科学技術センター試験報告, 第23号, p.141 - p.175, 1990年 3 月
- 8) 堀田 平; 沖合浮体式波力装置の波浪中特性の推定法について, 海洋科学技術センター試験報告, 第24号, p. - p. , 1990年 9 月
- 9) 元良誠三, 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明; 船体と海洋構造物の運動学, pp.362, 成山堂書店, 1982年
- 10) 日根野元裕, 山内保文; 海洋波のスペクトル, 日本造船学会誌, 第 609 号, p.78 - p.98, 1980年
- 11) Stansberg,C.T., Kjeldsen,S.P. ; , MARINTEK Ocean Basin Wave Catalogue 1988 MARINTEK Report No.511031.00, MARINTEK, pp.76, 1988年
- 12) 堀川清司; 海岸工学, pp.317, 東京大学出版会, 1979年
- 13) 高橋重雄; 波力発電防波堤の開発, 昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集, p. 1 - p.57, 1985年
- 14) 小島史郎, 高橋重雄, 合田良実; 波力発電ケーソン防波堤の水理特性, 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, p.163 - p.173, 1984年

(原稿受理: 1990年10月31日)