

浮上型振り子式波浪発電システムに関する基礎的実験

A Fundamental Experiment for Uplifting Type of Pendulum Wave Power Extracting System

近藤 俊郎*・藤間 聡**・藤原 満***・渡部 富治****・古澤 彰範*****

Hideo KONDO, Satoshi TOHMA, Mitsuru FUJIZAWA, Tomizi WATABE, Akinori FURUSAWA

The bottom standing type of pendulum wave power system developed at Muroran Institute of Technology in 1979 had been revealed to be one of the most promising wave energy converter. And it had the function of breakwater too. But in case the system is installed at greater water depth, considering the horizontal wave force against them, it requires large caisson structures. Therefore, the uplifting type which has vacant space below the chamber may not require as heavy as the bottom standing type and the construction cost of the uplifting type is cheaper than of the bottom standing type. This experimental study has been conducted to make sure the function of breakwater and to get primary conversion efficiency. As a result of this study, reflection coefficient has been decreased with motion of the pendulum. And the uplifting type's conversion efficiency is as good as the bottom standing type's for the case of $d/h \geq 0.5$.

Keywords: (uplifting type, reflection coefficient, primary conversion efficiency)

1. はじめに

近年、安全でクリーンな化石エネルギーの代替エネルギーとして注目されているのが、太陽熱や風力等の自然エネルギーである。本研究の対象となる海洋エネルギーもその有効な1つの自然エネルギーであり、それを利用するためのエネルギー吸収装置は世界の様々な研究機関において研究、開発されている。しかし、実用化されているものは数える程しかないのが現状である。その原因の一つとして、取得エネルギーコストが在来のエネルギーコストを上回ることが挙げられ、その改善こそが実用化への近道であると考えられる。したがって、それを考慮に入れた変換装置の研究開発が不可欠となる。

振り子式波浪発電システムは、1978年に本学において開発しており、有効な波力吸収装置の1つであることが確認されている。しかし、防波堤の機能を併設させた水底固定型として考案したために、非常に深い水深に設置する場合、全水平波力に耐えるためには相当な重量が必要となり、建設コストが高くなることが考えられた。そこで、その問題点を十分に考慮に入れた有効な波エネルギー吸収装置として、図-1のような浮上型振り子式波浪発電システムを提案する。このシステムはケーソン下方に空間を有しているので、入射波エネルギーをその空間を通して岸方向へ伝播させる形状とすることで、システム全体に作用する水平波力を低減し、低重量化することが可能となる。したがって、コストの低減も可能となってくるわけである。更に、ケーソン部が浮上していることで海水が循環し、内水域の汚染を防ぐという利点も有している。またエネルギーの抽出に関して簡単な分析評価を行うと、図-2に示すとおり、相対水深 h/L の増加に伴って波力 W が水深の浅い部分に集中することが確認でき、相対水深が増加する程浮上型がエネルギー抽出には効果的であると言える。

本研究はそれらを実証するために、規則波および不規則波を用いてこのシステムの防波堤としての機能を確認する。その上で、入射波エネルギーをどの程度抽出して機械的エネルギーに変換することが可能であるか、2次元水槽実験を行い、今後の本研究を進めて行く上での基礎資料とすることを目的としている。

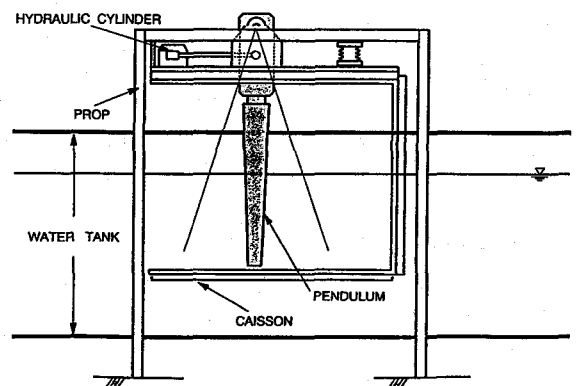


図-1 振り子式波浪発電システムの概念図

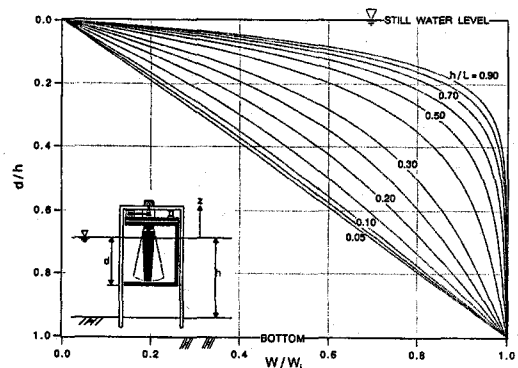


図-2 本システムが抽出可能な波力

* 正会員	室蘭工業大学工学部建設システム工学科	(050 室蘭市水元町27-1)
** 正会員	同	同
***	同	機械システム工学科
**** (前)	同	機械システム工学科
***** 学生員	同	建設システム工学専攻

2. 基本的な概念

本実験で対象となる浮上型振り子式波浪発電システムは図-1に示した通りである。その装置にケーソン開口部方向から進行波が作用すると、ケーソン内部の水室内に図-3に示すような重複波が形成され、ケーソン後壁から1/4波長沖側の位置に、全波エネルギーが水平方向の運動エネルギーとなっている節が発生する。したがって本システムの動作原理は、この節に振り子板を設置し、水粒子の往復運動を利用して振り子を動揺させ、波エネルギーを振り子の振動エネルギーに変換する。更に、その振動エネルギーを油圧シリンダーに伝達し、油圧エネルギーに変換して発電を行うとするものである。ここで前者を一次変換、後者を二次変換と呼ぶこととする。

また、このシステムのもう一つの機能である防波堤としての働きであるが、入射波エネルギーを振り子の振動エネルギーとして吸収する形となるので、振り子の固有周期を入射波周期と一致させることで相当な消波効果が得られる。したがってその周期で振り子は共振し、全入射波エネルギーを吸収すると考えられるので、高効率のエネルギー変換が期待できる。

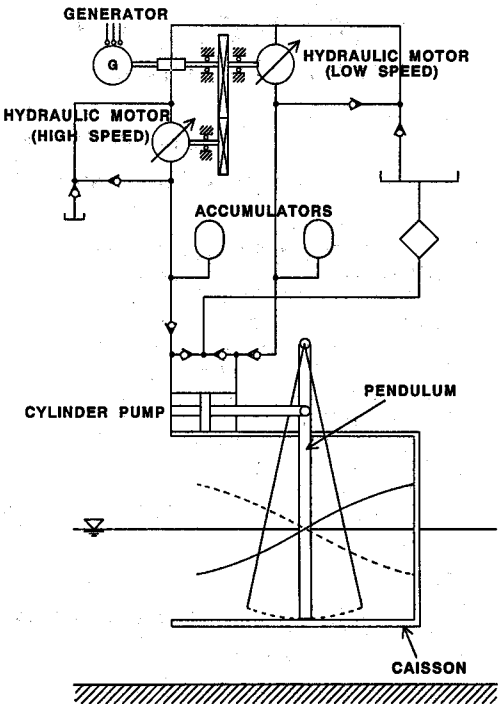


図-3 本システムの動作原理

3. 実験水槽及び実験模型設置位置

本実験水槽は長さ24m、幅0.6m、高さ1.0mの2次元水槽であり、一端に吸収式造波システム、他端に消波工を設置している。そこで、図-4に示すように実験模型を設置し、水深を一樣水深0.6mとする。この実験模型は、ケーソンの設置位置を上下に、振り子の設置位置前後にを任意に変化させることが可能である。従って、ケーソン内の重複波の節の位置に振り子を設置することができる。更に、入射波高及び反射率、伝達率を計測するために、模型前後方にそれぞれ波高計を3本、2本設置した。

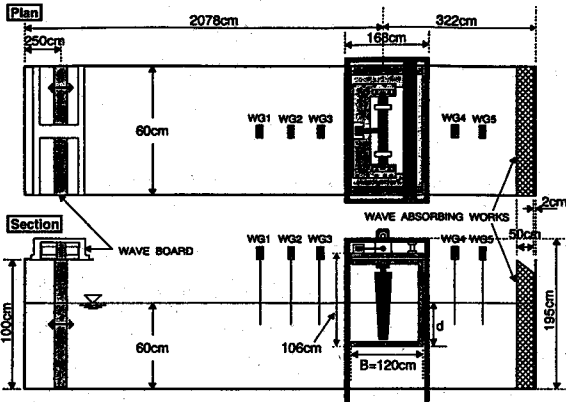


図-4 実験水槽及び実験模型設置位置

4. 実験方法

表-1 実験条件(規則波、不規則波)

周期 T sec (有義周期 $T_{1/3}$)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6
波高 H cm (有義波高 $H_{1/3}$)	5.0, 7.5, 10.0
吃水 d cm	30.0, 45.0, 60.0

() 内は不規則波の場合

前述のように実験水槽に実験模型を設置した後、吃水 d を水深の50%、75%、100%と変化させ、この模型に表-1に示した実験条件の規則波及び不規則波の進行波をそれぞれ作用させ、その反射率 K_R 、伝達率 K_T を測定して、本装置の消波性能に関する検討及び吃水の相違による比較を行う。また、規則波については本装置を矩形状浮体と仮定して伊藤の理論(1972)を適用することで考察の補足とする。次に、不規則波はBretschneider-光易型を期待スペクトルとし、水深に対する吃水の割合 $d/h=1.0$ の状態を水底固定型と仮定する。その際、振り子が効率良く波エネルギーを吸収するため、造波周期を変化させる度に、ケーソン後壁から1/4波長の位置に、振り子の設置位置を移動する。更に、 K_R 、 K_T の計測と同時に、振り子が動揺することによって生ずる、油圧シリンダー部に作用する反力やピストン部の移動変位を測定し、その測定値から振り子が取得した平均エネルギー

E_m を算出する。続いて、振り子に作用した入射波エネルギー W_i も規則波、不規則波に対してそれぞれ算出し、入射波エネルギーに対する振り子の取得エネルギー（振動エネルギー）の割合、一次変換効率 η を求めて検討を行う。これらの算出方法については後述する。

5. 一次変換効率の算出方法

前述した入射波エネルギーを振り子の振動エネルギーに変換する一次変換効率 η は、振り子や油圧シリンダーを含めた一次変換システムの平均取得エネルギー量 E_m 、入射波エネルギー量を W_i として次式のように定義する。

$$\eta = \frac{E_m}{W_i} \quad (5.1)$$

ここで平均取得エネルギー量 E_m (kgf・m/sec) は、計測した油圧シリンダー部の反力 f_s (kgf) とピストンの移動変位 Δx_s (m) を用いると、次のように表される。

$$E_m = \frac{D}{n} \sum_{s=1}^n f_s \cdot \Delta x_s \quad (5.2)$$

ただし、 n はデータ収集数（個）、 D は振り子の幅（m）を表す。

また、入射波エネルギー量 W_i は規則波と不規則波で異なるので、それぞれについて次式を用いる。

（規則波の入射波エネルギー量）

$$W_i = E_R C_g D = \frac{1}{8} w_0 H^2 C_g D \quad (5.3)$$

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} E_R : \text{規則波の単位面積当たりの全エネルギー} \\ C_g : \text{群速度 } (C/2 (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh) \text{ m/sec}) \\ C : \text{波速 (m/sec)} \\ k : 2\pi/L \\ h : \text{水深 (m)} \\ D : \text{振り子の幅 (m)} \\ w_0 : \text{単位体積重量 } (1.03 \times 9.8 \text{ tf/m}^3) \\ H : \text{波高 (m)} \end{array} \right.$$

（不規則波の入射波エネルギー量）

一次元のスペクトル密度関数を $E(f)$ (m²・sec)，不規則波の単位面積当たりの全エネルギーを E_I とすると、入射波エネルギー量 W_i は、

$$W_i = E_I C_g D = w_0 D \int_0^\infty E(f) C_g df \quad (5.4)$$

ここで C_g を周波数 f (Hz) を用いて表すと、深水波近似の場合には、

$$C_g = \frac{1}{2} \frac{gT}{2\pi} = \frac{g}{4\pi f} \quad (5.5)$$

また $E(f)$ は、Bretschneider-光易のスペクトル密度関数を用いて、

$$E(f) = 0.257 H_{1/3} T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp(-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}) \quad (5.6)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} g : \text{重力加速度 } (9.8 \text{ m/sec}^2) \\ H_{1/3} : \text{有義波高 (m)} \\ T_{1/3} : \text{有義周期 (sec)} \end{array} \right.$$

6. 実験結果及び考察

(1) 反射率 K_R

図-5, 6は規則波実験, 図-7, 8では不規則波実験のそれぞれ $d/h=0.5$ と 1.0 のケースの反射率を示している。ここで縦軸は反射率, 横軸は堤体幅 B (1.2m) を波長 L で除した値を取っている。まず規則波実験の結果から明らかなことは, 吃水が浅くなると反射率が0.2前後減少することである。このことから浮上型を用いることによって, 構造物に作用する波力は低減されていることが考えられる。また吃水に関わらず, B/L が大きい程, つまり入射波周期が短い程反射率が低くなる傾向がある。更に, 図-5に実線で示した伊藤の矩形浮体の理論値(1972)と比較すると, 本システムの反射率は0.3~0.6程度と, 矩形断面を持つ構造物よりも優れた消波性能を有していることが確認できる。それに対して不規則波実験の結果では, 規則波実験の結果と同様な傾向が見られるが, 反射率の値は規則波実験よりも多少大きめである。しかし, その値の範囲は0.4~0.6程度と規則波実験の結果と大きな差は無く, 従って規則波実験から不規則波実験の結果を推定することは可能であり, 実海域における反射率の低減は非常に期待できる。この実験から得られた最も重要な結果は, 規則波, 不規則波を問わず反射率の値が小さくことであり, その要因としては振り子が効率の良い波エネルギーの吸収を行っていると思われる。また規則波実験と不規則波実験の双方において, 吃水の変化による反射率の違いが見られ, 水底固定型と浮上型との比較を行うと, 構造物に作用する波力に関しては浮上型のほうが有利であることが確認できる。

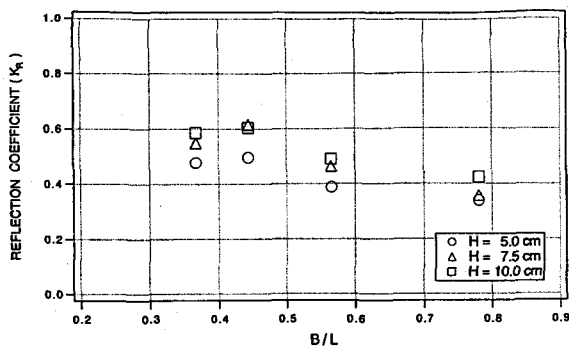


図-5 規則波実験の反射率 ($d/h=1.0$)

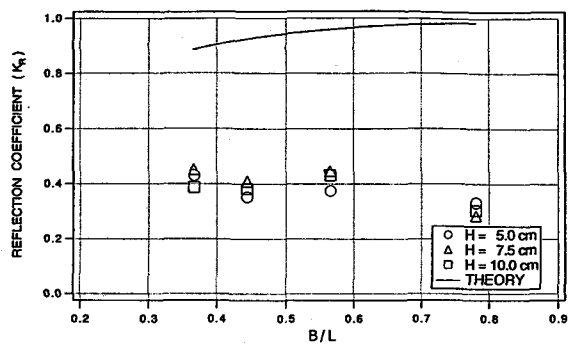


図-6 規則波実験の反射率 ($d/h=0.5$)

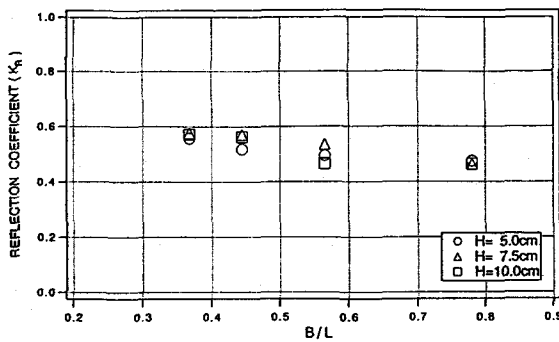


図-7 不規則波実験の反射率 ($d/h=1.0$)

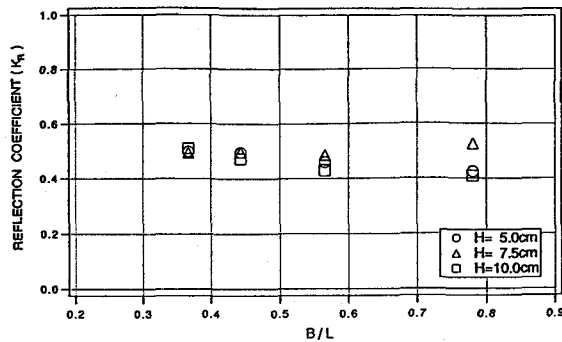


図-8 不規則波実験の反射率 ($d/h=0.5$)

(2) 伝達率 K_T

図-9, 10は規則波実験, 図-11, 12は不規則波実験のそれぞれ $d/h=0.5$ と 1.0 のケースであり, 縦軸には伝達率, 横軸には図5~8と同様の値をとっている。まず規則波実験における浮上型の結果をみると伝達率が0.1前後とかなり消波性能が高いことが確認できる。また, 図-10に実線で示した矩形浮体の理論値とほぼ一致した結果が得られたことから, 規則波に対する伝達率については, 本装置を矩形浮体と見なしての推定が可能である。更に, 水底固定型と浮上型のケースにおける比較では大きな違いは無いと判断できることから, 浮上型でも相当な消波効果を期待でき, 短周期側程その効果は優れていると思われる。このことは, $d/h=0.75$ のケースにおいても確認できた。さらに補助実験として行った $d/h=0.25$ のケースでも周期1.4程度までは同様の結果が得られたことを付け加えておく。それに対して不規則波実験の $d/h=0.5$ のケースでは, 伝達率が0.2~0.4と規則波に比べると相当大きな値であり, このケースにおいては50%強の消波効果しか得られなかった。尚, $d/h=0.75$ のケースでは, 伝達率は0.2前後と規則波実験で得られた程度の値であった。このように規則波実験と不規則波実験の結果では傾向が異なるため, 規則波実験の結果から不規則波実験の結果を推定すること

は難しいが、不規則波実験の結果から判断すると、実海域においても水底固定型よりは浮上型のほうが伝達率は大きくなることは必至である。ただし、 $d/h=0.75$ 程度であれば浮上型を用いても、かなりの消波効果は期待できるであろう。従って、浮上型でも十分防波堤としての機能は満足すると思われる。

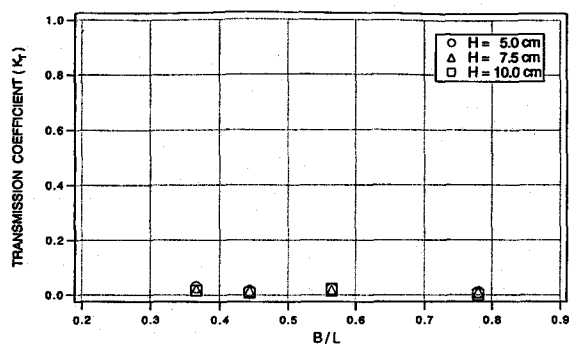


図-9 規則波実験の伝達率 ($d/h=1.0$)

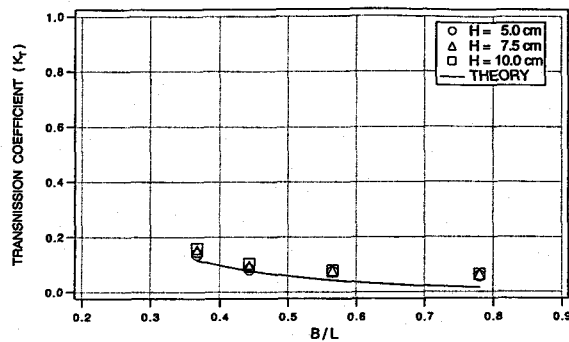


図-10 規則波実験の伝達率 ($d/h=0.5$)

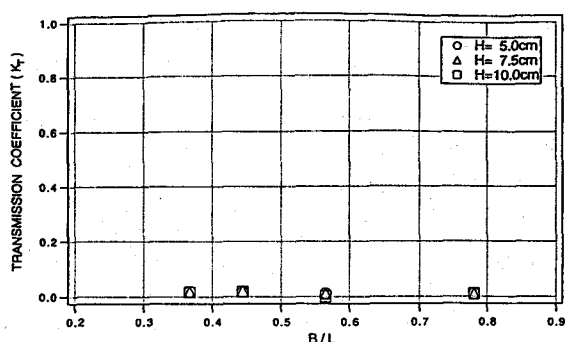


図-11 不規則波実験の伝達率 ($d/h=1.0$)

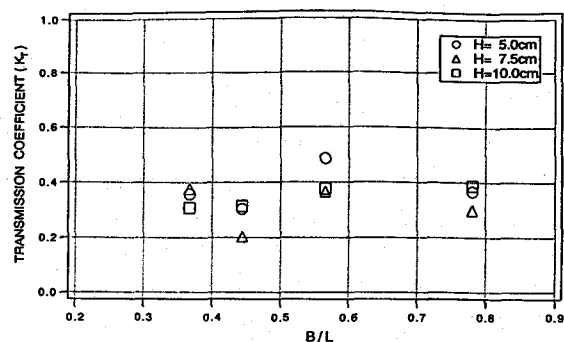


図-12 不規則波実験の伝達率 ($d/h=0.5$)

(3) 一次変換効率

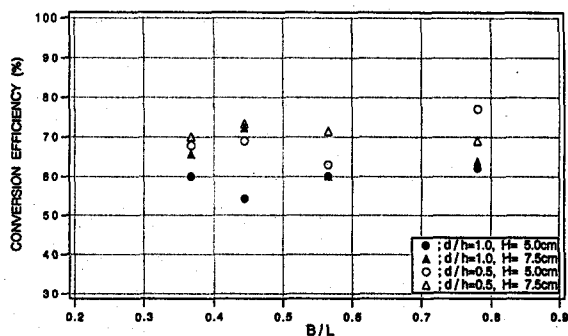


図-13 規則波実験の一次変換効率

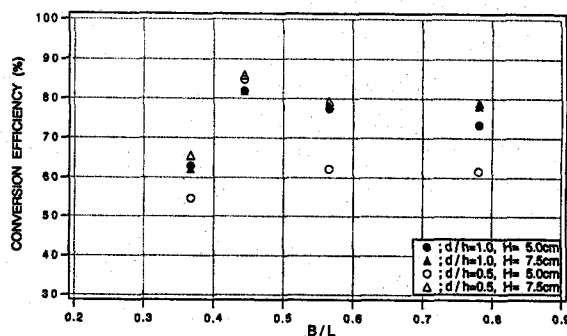


図-14 不規則波実験の一次変換効率

図-13、14はそれぞれ規則波、不規則波実験における一次変換効率を示した。まず規則波実験の結果を見ると、本実験の対象である $0.5 \leq d/h \leq 1.0$ （水底固定型）においては、波のエネルギーを受ける振り子の断面積が大きい $d/h=1.0$ のケースが最もエネルギーを取得するには有利であると思われる。しかし結果は逆に、その断面積が小さい $d/h=0.5$ のケースのほうが比較的良好な傾向を示し、一次変換効率は60~70%程度とかなり高い値で安定している。それに対して不規則波実験における変換効率は、 $d/h=0.5$ 、 $H=5.0$ cmのケースを除けば、 $0.5 \leq d/h \leq 1.0$ の範囲においてはほぼ同値である。また不規則波実験における変換効率は、振り子の動揺が一定しないために、規則波実験の変換効率よりも低下すると思われたが、実際には同程度かあるいはそれ以上の値を示した。更に、 $T=1.4$ sec付近にピークが存在することも示され、この周期では規則波を大幅に上回ることが確認でき、浮上型でも効率80%強と相当高い値を示した。このように、規則波実験よりも不規則波実験のほうが、 d/h に関係なく一次変換効率が良好であったことで、振り子式浮上型波浪発電システ

ムを実海域に適用した場合の一次変換効率も高い値が期待できる。

7. むすび

本研究を通じて、防波施設を併設した浮上型振り子式波浪発電システムの基本的性能を調査した結果、実海域の波に類似していると考えられる不規則波における波浪エネルギー吸収性能は非常に高いことが確認された。また現在のところ、一次変換効率について浮上型 ($0.5 \leq d/h < 1.0$) が水底固定型 ($d/h = 1.0$) に見劣りする所は少なく、波高がある程度あれば (本実験では7.5cm) 双方の差が無くなり、ほぼ同値となる。さらに、本振り子式変換装置が $T = 1.4\text{sec}$ 付近で、一次変換効率のピークを有することは注目に値する。また、このシステムのもう一つの働きである消波機能であるが、こちらのほうは振り子が入射波のエネルギーを吸収するために、実験値からも反射率、伝達率の低減は非常に期待できる。したがって、浮上型振り子式波浪発電システムとしての消波性能に何ら問題は無い。やはり問題となる点は、変換装置の機械的性能であり、当初の課題としては本研究における不規則波実験で取得できる高い一次変換エネルギーを、どの程度の効率で二次変換エネルギーとして取得できるのか、実験的に明らかにすることである。またその他の今後の課題としては、浮上型振り子式波浪発電システムの堤体としての安定性についても、実用化するためには追及していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 近藤俊郎・谷野賢二・高橋幹夫・渡部富治・奥田教海 (1981) : 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究——波力水車方式——, 第28回海岸工学論文集, pp. 381~385.
- 2) 渡部富治・近藤俊郎・谷野賢二・竹田英章・黒井昌明 (1982) : 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究 (2) ——振り子式——, 第29回海岸工学論文集, pp. 486~490.
- 3) 谷野賢二・渡部富治・近藤俊郎 (1984) : 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究 (3) ——実海域性能実験——, 第30回海岸工学論文集, pp. 581~585.
- 4) 近藤俊郎・谷野賢二・渡部富治・倉内公嘉・松岡 功 (1985) : 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——, 第32回海岸工学論文集, pp. 697~701.
- 5) 近藤俊郎・渡部富治・谷野賢二 (1988) : 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究 (5) ——システムの最適化——, 第35回海岸工学論文集, pp. 842~846.
- 6) 谷野賢二 (1992) : 振り子式波浪エネルギー変換装置の設計法に関する研究, 北海道開発局開発土木研究所・水産土木研究所.
- 7) 伊藤喜行 (1972) : 水工学シリーズ72-B-8, 海洋構造物の諸問題.
- 8) 井島武士・田淵幹修・湯村やす (1971) : 矩形断面をもつ浮体の浅海波による自由運動——1. 理論——, 第18回海岸工学論文集, pp. 173~180.
- 9) 近藤俊郎・竹田英章 (1983) : 消波構造物, 森北出版, 222 p.