

II-60

脚柱型離岸堤に付設する振り子式波浪発電の三次元特性

室蘭工業大学大学院	学生会員	長谷川 覚也
室蘭工業大学工学部	正会員	近藤 俊郎
戸田建設株式会社	正会員	梅田 宏
戸田建設株式会社	正会員	西牧 均

1. はじめに

化石燃料に過度依存している現代社会において、慢性的なエネルギー危機と地球規模の環境悪化が進行している。その問題の解決策の一つとして、自然エネルギーの積極的な利用が上げられる。自然エネルギーの中でも、日本のような世界屈指の200海里経済水域面積を有する海洋国にとっては、波浪エネルギーの利用が有望かつ重要であると考えられる。

室蘭工業大学では”振り子式波浪発電装置”を開発し、1978年より実験、研究を行ってきた¹⁾²⁾。振り子式波浪発電装置の原理は図-1に示されるように、水面上部に支点を持つ振り子板が入射波によって動揺し、支点下部に接続された油圧シリンダーへの往復運動へと変換され、油圧エネルギーから油圧モーターなどを介して電力へと変換される仕組みである。振り子式波浪発電装置の特徴として、波浪エネルギーを直接機械的運動エネルギーへと変換するため一次変換効率が高い、システムの主要部分が水面より上部に存在するためメンテナンスが容易である、防波堤、堤防、護岸等の設置対象構造物を問わずに付設し易いなどの利点を持つ。

本研究は、近年建設された脚柱型離岸堤(図-2参照)の隣接する堤体間に振り子式波浪発電装置を設置した場合のエネルギー吸収性能、消波性能、波浪変形などの特性に関して行われた。このシステムは従来のケーソン内蔵型とは、

- (1) 側壁、底板、後壁を有しない。
- (2) ポイントアブソーバーの構造物である。

という点で異なっている。

脚柱型離岸堤に振り子式波浪発電装置を付設することで取得されるエネルギーは、水産、レクリエーションの他に、堤体支柱等の鋼

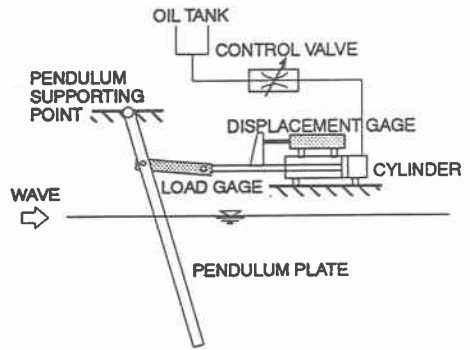


図-1 振り子発電機構及び油圧回路

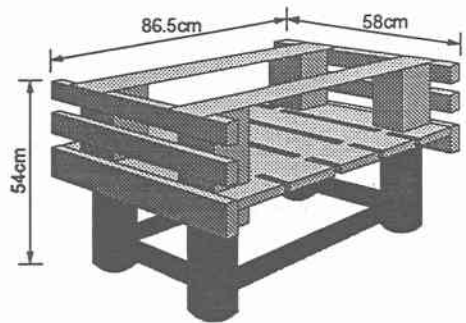


図-2 脚柱型離岸堤模型 (1/16.7)

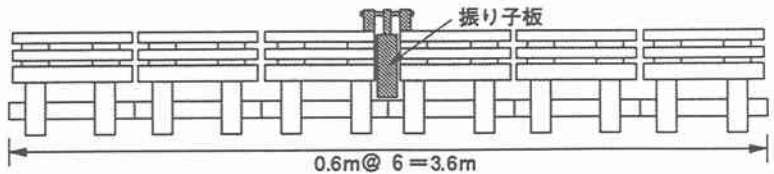


図-3 振り子板設置位置

3D Characteristics of Pendulum Wave Power Converter Attached to Detached Breakwater of Pillar Type by Kakuya HASEGAWA, Hideo KONDO, Hiroshi UMEDA and Hitoshi NISHIMAKI

製部分の電気防食、警告灯電源などで活用される。

2. 実験装置

実験は、図-4に示す本学の地域共同研究開発センターに設置されている20m×8mの平面水槽で一様水深45cmで行った。本水槽には、11機のスネーク式多方向不規則波造波装置、側壁及び後壁には直立消波工が設置されており、実験模型は縮尺比1/16.7の図-2に示される脚柱型離岸堤を6基と、振り子板を図-3に示すよう中央部に付設したものを水槽中央部に設置した。振り子支点下部には図-1に示すように速度比例負荷を与えるための油圧シリンダーを接続し、振り子板に与える負荷を調節できる流量調整弁を設けた。また、振り子板の振れ角と負荷による反力を計測するため、変位計と荷重計を取り付けた。

3. 実験方法

ここで述べる実験は全て、造波開始から30秒後に、インターバルタイム80(msec)で1024個のデータを約1分30秒間収集した。入射波高、反射波高は、合田の入反射分離法を用いて計測した。

3-1 波高分布実験

新型の脚柱型離岸堤は、従来のブロック式離岸堤と全く異なる形状を有しているが、一般的なブロック式離岸堤とはほぼ同程度の消波性能であることが二次元模型実験により確認されている(透過率 ≤ 0.6 , 反射率 ≤ 0.5)^{4),5)}。しかし、回折、屈折等による堤体周辺海域の波高分布は二次元実験では求められず、三次元実験によって新たに確認する必要がある。そこで、振り子板に負荷を与えない状態で、模型周辺の波高分布を計測する実験を表-1に示す条件で行った。波高は50cm間隔で、図-4に示す3×9mの範囲を計測した。

3-2 反射率、伝達率実験

この離岸堤のような複雑な形状を有した堤体を堤体群として設置した場合、反射波、透過波は一樣な方向には伝搬しないことが予想される。また、振り子板を設置した堤体中央部と堤体端部でも、反射率、透過率の値が異なることが予想される。そこで、堤体中央部から堤体端部まで10cmおきに反射率及び透過率の計測を行う実験を、表-2に示す条件で行った。反射率の計測は模型から一波長離

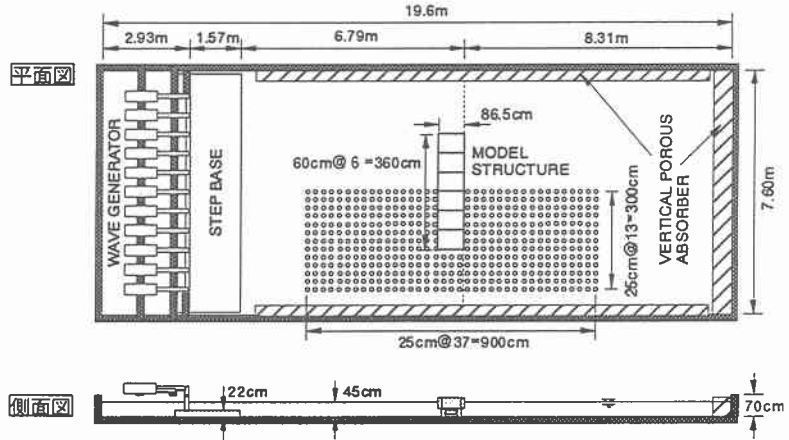


図-4 三次元実験水槽及び波高分布実験における波高計配置図

表-1 波高分布実験の実験条件

対象波	$H, H_{1/3}(cm)$	$T, T_{1/3}(sec)$	振り子幅(cm)	入射波角度($^{\circ}$)
直進規則波	5.0	1.0	10.0	90
直進不規則波	5.0	1.0	10.0	90

表-2 反射率、伝達率実験の実験条件

対象波	$H, H_{1/3}(cm)$	$T, T_{1/3}(sec)$	振り子幅(cm)	入射波角度($^{\circ}$)
直進規則波	5.0	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8	10.0	90
直進不規則波	5.0	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6	10.0	90

表-3 負荷実験の実験条件

対象波	$H, H_{1/3}(cm)$	$T, T_{1/3}(sec)$	振り子幅(cm)	入射波角度($^{\circ}$)
直進規則波	5.0	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6	10.0	90
直進規則波	5.0	1.0, 1.6	20.0	90
直進規則波	5.0	1.0, 1.6	30.0	90
直進規則波	5.0	1.0	10.0	90, 80, 75, 70, 65

した位置で、伝達波は堤体の50cm後方で計測した。

3-3 負荷実験

振り子板に油圧回路を取り付けて、脚柱型離岸堤群に振り子式波浪発電装置を付設したシステムとしてのエネルギー吸収効率を求める実験を様々な条件で行った。

まず、このシステムの三次元水槽内での基本的な一次変換性能を知るために、直進規則波による一次変換効率を計測する負荷実験を行った。実験方法は、あらかじめ最大効率を得られる負荷を設定することが困難なため、負荷を変化させた実験を繰り返し行った。次に、振り子板の幅を20cm, 30cmにした時の変換効率の変化を求める実験を同様な方法で行った。次に、実海域では堤体に入射してくる波は様々な方向から来襲するため、波向きの異なる条件での変換効率を求める必要がある。そこで、波向きを90° から80°、75°、70°、65°と変化させてエネルギー吸収性能が入射波の角度によってどのように変化するかを実験によって求めた。これらの実験条件を、表-3に示す。また、表-4に実験値の現地換算値を示す。

表-4 実験値の現地換算値

実験値	波高 (cm)	周期 (sec)					
	5.0	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
現地換算値	83.33	3.27	4.08	4.90	5.72	6.53	7.35

4. 解析方法

一次変換効率は、振り子幅当たりの入射波パワー W_I 、油圧シリンダーへと伝達される平均取得パワー W_S として次式のように定義する。

$$\nu = \frac{W_S}{W_I} \quad (4.1)$$

ここで入射波パワー W_I は次式を用いる。 E_R : 規則波の単位面積当たりの全エネルギー、 c_g : 群速度、 B_o : 振り子の幅、 w_o : 水の単位体積重量、 H : 波高である。

$$W_I = E_R c_g B_o = \frac{1}{8} w_o H^2 c_g B_o \quad (4.2)$$

また、平均取得パワー W_S は、計測した油圧シリンダー部の反力 F とピストンの移動変位 x を用いると、次のように表される。 t : サンプルング時間、 n : データ収集数を表す。

$$W_S = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^n \left\{ \frac{F_s + F_{s-1}}{2} (x_s - x_{s-1}) \right\} \quad (4.3)$$

さらに、振り子の属性に関する負荷減衰モーメント係数 N_o 及び振り子に作用する流体力に関する造波減衰モーメント係数 N は次式で求められる。

$$N_o = \frac{1}{t_o} \sum_{s=1}^n \left\{ \frac{(F_s + F_{s-1}) r_N^2 (t_s - t_{s-1})^2}{2 (x_s - x_{s-1})} \right\} \quad (4.4)$$

$$N = - \frac{2\rho\sigma B_o (k_o z_o \sinh k_o h + \cosh k_o h - 1)}{k_o^4 (k_o h + \sinh k_o h \cosh k_o h)} \quad (4.5)$$

ここで ρ : 水の密度 (= w_o/g)、 r_N : 振り子支点からシリンダー接続部までの距離、 t_o : 計測時間、 σ : 角周波数、 z_o : 振り子の支点から水面までの距離、 h : 水深であり、 k_o は次式から求まる固有値である。

$$\sigma^2 = g k_o \tanh k_o h \quad (4.6)$$

ここで、 g は重力加速度である。さらに、負荷比は N_o/N で求められる。

5. 実験結果

5-1 波高分布実験

波高分布実験における実験結果は、規則波を図-5、不規則波を図-6に示す。まず規則波の結果を見て目につくことは、この条件における波長1.49mの半波長0.75m毎に、堤体前面から高い波高の部分が生じていることである。これは、堤体からの反射波による重複波と判断できる。周期1.0秒すなわち $B/L = 0.58$ 程度の比較的短周期の波の場合、反射波の影響が大きい、透過率はかなり小さいことがわかる。また、堤体に波が接

近するほど堤体中央部に波が集まっており、これは回折の影響と思われる。この結果は、堤体中央部に振り子板を設置して波浪エネルギーを取得する場合、非常に有利な傾向である。不規則波についても重複波が生じていないこと以外、規則波とほぼ同様の傾向が得られた。堤体背後の回折波の影響は、この実験からはあまり見られなかった。また、水槽側壁側の波高が低いのは、側壁消波工の影響と考えられる。

5-2 反射率、伝達率実験

反射率の実験結果を図-7, 8に、伝達率の実験結果を図-9, 10に示す。図の横軸は模型中央部から堤体端部方向への距離をとったものである。反射率の結果は規則波、不規則波ともほぼ同様に短周期ほど高く、長周期ほど低い値となった。模型中央部ほど、特に短周期の反射率が大きくなる傾向を示し、二次元実験では得られない三次元的な特性が得られた。堤体端部で短周期と長周期の反射率が逆転しているのは、水槽後壁の反射波の影響と考えられ、実際の反射率は特に長周期ほど今回の実験値より低い値となる

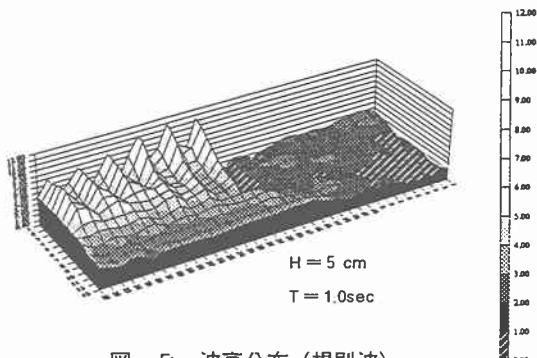


図-5 波高分布 (規則波)

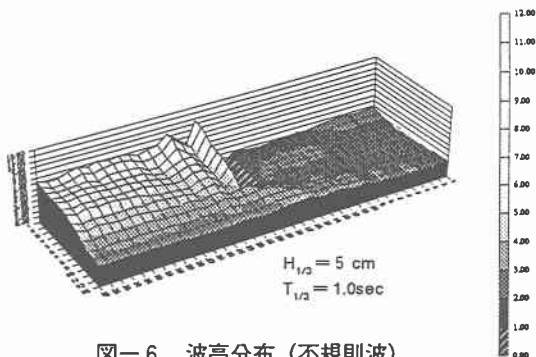


図-6 波高分布 (不規則波)

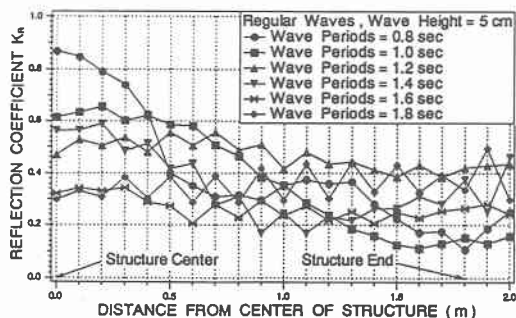


図-7 反射率の法線方向の変化 (規則波)

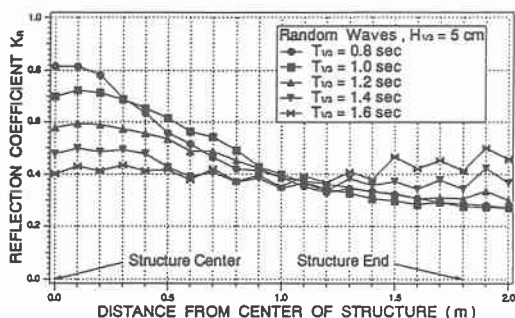


図-8 反射率の法線方向の変化 (不規則波)

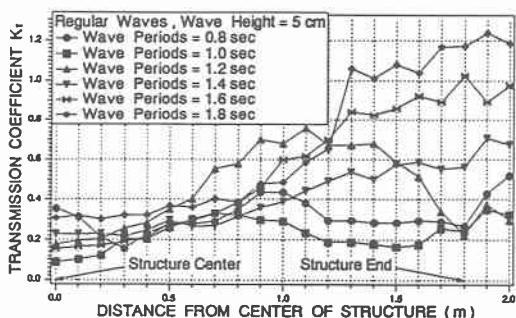


図-9 伝達率の法線方向の変化 (規則波)

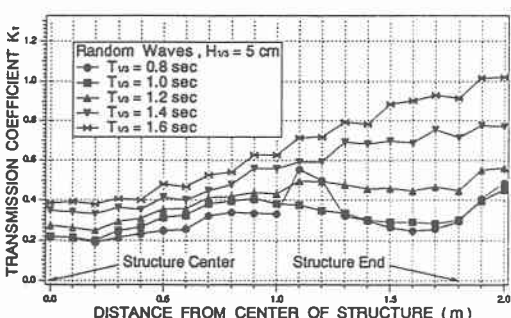


図-10 伝達率の法線方向の変化 (不規則波)

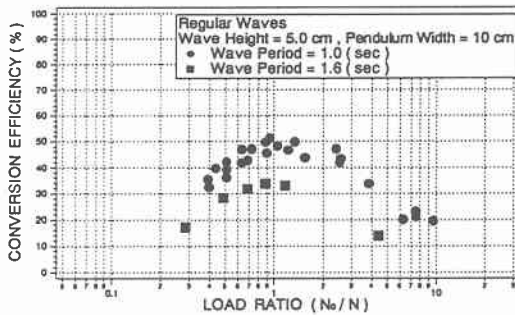


図-11 一次変換効率-負荷比(Bp=10.0cm)

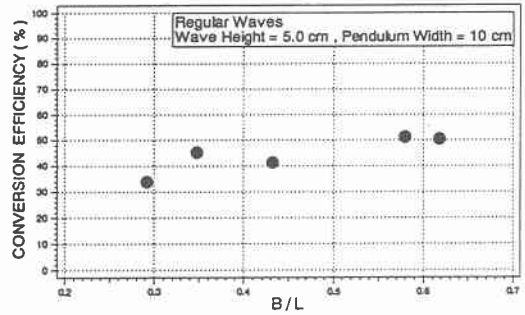


図-12 一次変換効率-B/L

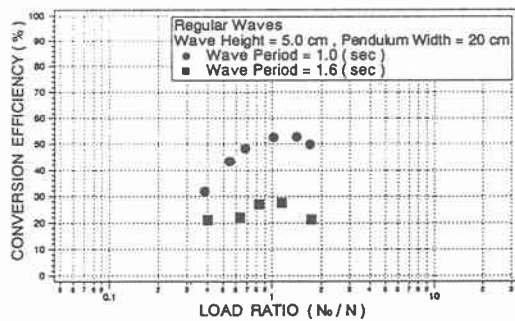


図-13 一次変換効率-負荷比(Bp=20.0cm)

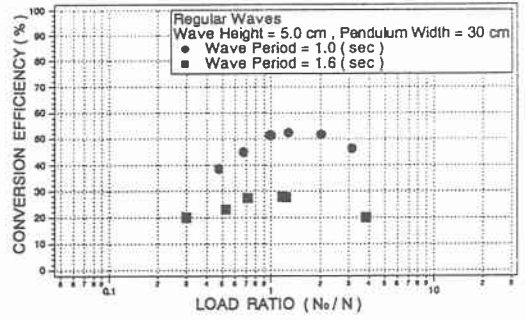


図-14 一次変換効率-負荷比(Bp=30.0cm)

ものと思われる。伝達率の結果は反射率の結果とは反対に、長周期ほど高く、短周期ほど低い値となった。どの周期も模型端部になるにつれて伝達率は増大し、特に長周期ほどその傾向は大きい。これらの結果は、回折の影響が起因していると思われる。

5-3 負荷実験

図-11に周期1.0,1.6秒の負荷実験の結果を、図-12に周期0.8,1.0,1.2,1.4,1.6秒の負荷実験における最大効率の値を示す。B/Lは堤体長(B=86.5cm)をそれぞれの周期での波長Lで割って無次元化したものである。周期1.0、1.6秒とも負荷比1.0付近で最大効率を示し、周期1.0秒では50%、周期1.6秒では30%強の値となっている。今回の振り子システムは、側壁、底板、後壁を有した水室部を持たない形状のため、振り子自身によって造波された波浪エネルギーを回収することができない。したがって、このような形状の振り子システムは、振り子の重量や支点の抵抗などの様々なエネルギー損失を除いた場合、最大50%の効率となる。しかし、周期1.0秒の実験結果からは様々な損失があるにもかかわらず50%の効率を記録した。これは、波高分布実験によって得られた堤体中央部に波浪エネルギーが集中すること、振り子板両サイドの鉛直角柱部による回折等の影響による効果と考えられる。周期による最大効率は、周期1.0秒が最も高く長周期になるにつれ減少していく傾向にある。周期1.0秒の波が最も高い一次変換効率を記録した要因については、この実験で使用した振り子板の固有周期がほぼ1.0秒だったこと、振り子板の喫水長 $d = 30\text{cm}$ ($d/h = 0.67$)がこの周期に対して適当な長さだったこと等が考えられる。

振り子幅 B_p を20cm、30cmと変えたときの一次変換効率の実験結果をそれぞれ図-13,14に示す。周期1.0秒の波は、振り子幅を変えても最大効率、最大効率を得たときの負荷比、また負荷の変化による効率の減少の仕方などほとんど変化は無い。周期1.6秒の波も、振り子幅が20、30cmの場合若干最大効率が落ちるがほぼ同様の傾向を示した。すなわち、この実験範囲においては、単純に振り子幅の増加にともない、それに比例したエネルギー取得が可能なのことが確認できた。

斜め入射波による一次変換効率の結果を図-15に示す。縦軸は、波向き 90° のときの効率 ν で、そのほかの波向きでの効率 ν' を除した値である。横軸は、波向き θ のときの振り子板の投影幅 $B_p \sin \theta$ を振り子の幅 B_p で除した値である。図中の丸印は、入射波パワー W_i を式 (4.1) の振り子の幅 B_p を用いて計算した場合で、三角印は入射波パワー W_i を波向き θ のときの振り子の投影幅 $B_p \sin \theta$ で計算した場合である。入射波パワーを振り子の幅で計算したときの効率は、波向きが増すと共に減少していくが、入射波パワーを振り子の投影幅で計算した場合でも、殆ど変わらない割合で減少している。また、効率の減少の仕方は、振り子の投影幅の減少の割合よりも大きく、このことから、このシステムは斜め入射の波に対する効率低下が見られ、高効率の一次変換性能を維持するためには、できるだけ卓越した波向きへ向けて堤体を設置することが望ましいと考えられる。

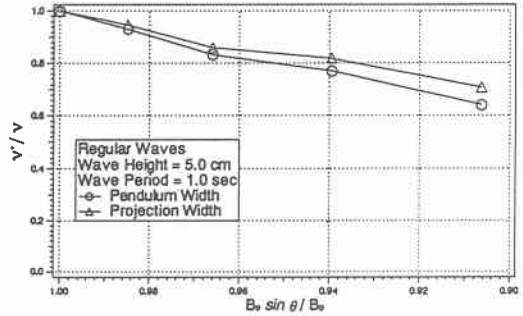


図-15 斜め入射波の効率

6. 結論

これらの実験結果より、以下のことが確認できた。

- ・波浪変形に関しては堤体群の中央部付近では回折等により波高が増大し、堤体中央から端部になるにしたがい反射率は減少し、伝達率は増大する。
- ・一次変換効率は $B/L = 0.58$ 前後の波で最大 50% となり、水室の無い、伝達波を伝える本システムの最大理論効率 50% を得たことは、ポイントアブソーバー的效果が得られたと考えられる。また本システムは、振り子の幅にほぼ比例した波浪エネルギーが取得できる。
- ・このシステムは、斜め入射の波に対する効率低下が見られ、できるだけ卓越した波向きへ向けて堤体を設置することが望ましい。

今後は、不規則波に対する効率性能実験などを行う予定である。

最後に本研究を行うにあたって、コメントをいただいた開発土木研究所の谷野 賢二博士、また、実験、データ整理等多大なる協力をいただいた本学 4 年生、尾崎 理人、谷口 恵一両君に感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 近藤 俊郎, 渡部 富治, 谷野 賢二: 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, 1988
- 2) 谷野 賢二, 水野 雄三, 遠藤 宣世, 高橋 哲美: 斜め入射波に対する振り子式波エネルギー吸収装置の出力特性, 第39回海岸工学論文集(2), pp.876~880, 1992
- 3) 古澤 彰範, 近藤 俊郎, 藤間 聡, 長谷川 覚也: 浮上型振り子式波浪発電システムの研究, 第41回海岸工学論文集(2), pp.1166~1170, 1994
- 4) 長谷川 覚也, 近藤 俊郎, 梅田 宏, 西牧 均: 脚柱型離岸堤に振り子式波浪発電付設する装置, 第51回土木学会北海道支部論文報告集, pp.304~307, 1995
- 5) 長谷川 覚也, 近藤 俊郎, 梅田 宏, 西牧 均: 脚柱型離岸堤に振り子式波浪発電付設する装置の性能, 第11回海洋開発論文集, pp.271~275, 1995
- 6) 戸田建設株式会社: 新型離岸堤内蔵型波力発電技術開発報告書, 1994