

波力発電用開口ケーソンの安定性に関する検証

浦島三朗*・近藤倅郎**・谷野賢二***・長内戦治****

1980年に室蘭工業大学が設置した波力発電テストプラントの開口ケーソンは、それまでに類を見ない特殊なケーソンであり、その安定設計については不明な点が多かった。そこで本研究では、室内波力実験の結果をもとに波力特性を検証し、設計法を提案した。実験より水平波力と揚圧力の最大値は逆位相で生じ、合成滑動力は相対水深 $h/L_0 < 0.2$ の浅海域では通常のケーソンの約1/2以下となることが知れた。実験による滑動限界波高 H_c は4.0mとなり、これに対応する超過確率はおよそ0.001%である。20年間でこの H_c 以上の波高の出現回数は、およそ2回となり、テストプラント開口ケーソンの安定性が確認された。

1. はじめに

室蘭工業大学では波浪エネルギー利用の研究を1975年より開始し、防波堤に付設する波エネルギー変換システムとして、波力水車、空気圧振り子式並びに振り子式システムを順次、室内実験により開発してきた。その後、それらのエネルギー変換の現地性能を検証するため、室蘭市絵鞆岬を始点とする室蘭港南外防波堤の沖側にテストプラントを1980年に設置した(図-1)。テストプラント本体は写真-1、図-2に示すようなR.C.の開口ケーソンで、中央の隔壁によって形成される2つの水室に2基の変換システムを設置できるようになっている。なおケーソンは、文部省科学研究費補助金に関連する営繕費で建設された。

このテストプラントにおいて、最初は波力水車式、次に振り子式の海域実験が行われた。特に振り子式については長期間研究され、研究費の制約もあって発電までは到らなかったものの、変換システムの現地性能評価という初期の目的を達成することができた(近藤ら, 1999; 長内, 1999)。こうしたことと、周辺漁民の要請もあって設置後20年を経た2000年3月に撤去されている。

使用した開口ケーソンはそれまでに類を見ない特殊なケーソンであり、その安定設計については不明な点が多い。一方、予算の制約面と安定性に関する現地試験の目的をもたせ、当初設計時の限界設計波高は2.3mと低く設定した。しかし、限界設計波高以上の波が20年間で数多く発生したにもかかわらず、ケーソンは安定を保っており、実際の波力は設計値よりかなり小さい。したがって、限界波高は設計値よりかなり大きいと推察できる。そこで本研究では、開口ケーソンについての室内波力実験の結果をもとに波力特性を検証し、この種の開口ケー

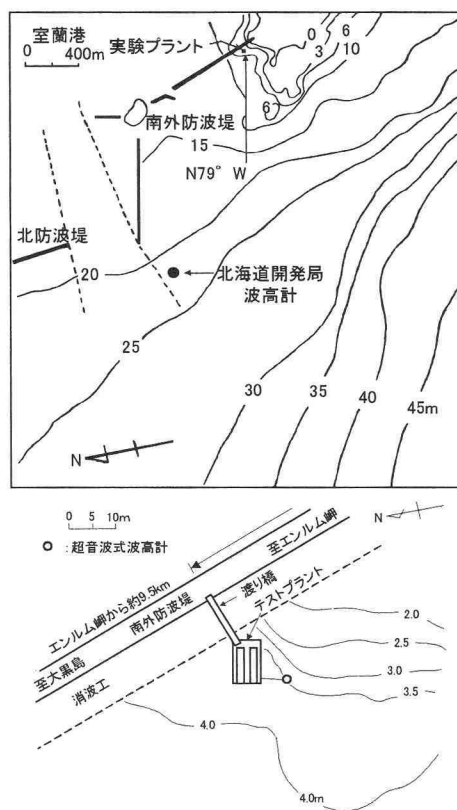


図-1 テストプラント設置位置(室蘭港南外防波堤)
※水深はLWLからの値を示す。

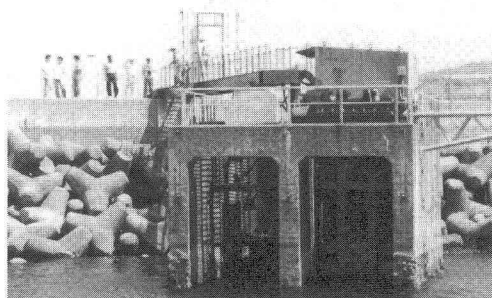


写真-1 室蘭港のテストプラント

* 正会員 博(工) 苫小牧工業高等専門学校教授環境都市工学科
** 名誉会員 工博 室蘭工業大学名誉教授
*** 正会員 博(工) 北海道東海大学教授工学部海洋環境学科
**** フェロー 博(工) 北日本港湾コンサルタント(株)代表取締役社長

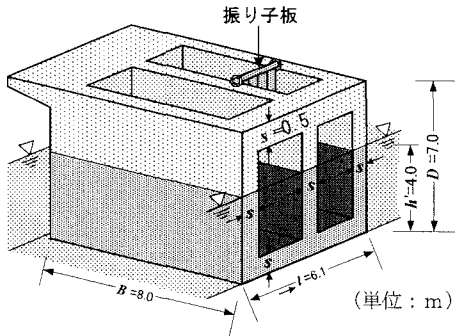


図-2 テストプラント本体概略図

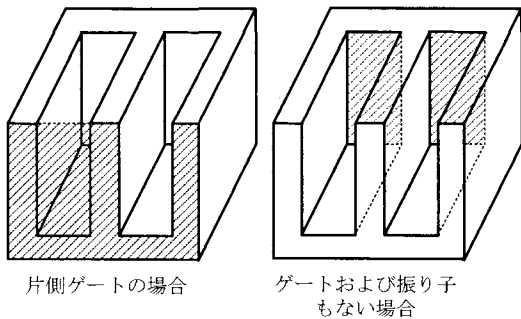


図-3 波力の作用面

ソンの設計法を提案するものである。

2. 設計法

(1) 当初設計

室蘭港における波浪観測結果(1969～1970年)から波高2mの未超過出現率は99.9%以上であることから、設計波高として2mを採用した。波力は波が正面から構造物に作用する場合水室前面のゲートを降ろすと通常の直立堤と同様な計算となるが、ゲートが無く、また水室内に振り子が無い場合は後壁に波力が直接作用する。当初設計では片側のみゲートを降ろした場合、後壁に作用する波力と前面ゲートに作用する波力はそのピークに時間的なずれが生じる。したがって、最大波力が前面の

みに作用すると仮定して計算している(図-3の斜線部分)。また、ゲートおよび振り子もない場合、水平波力は後壁に作用する(図-3の斜線部分)として安定計算を行っている。

なお、開口ケーソンの設置後の静水時水圧の合力は水平方向がゼロで、鉛直方向は水中部分の物体に作用する浮力に等しい。波が作用する時に発生する波力は、これらを基準として算定される。

(2) 安定限界波高

テストプラントの開口ケーソンの場合の波力は、図-4に示すような3ケースが考えられる。このうちで最も不安定と見なされる(A)のケースで設計された。

波力を受ける直立不透水構造物の滑動の安定式は次式で与えられる。

$$\frac{\mu(W - B_U - P_V)}{P_H} = f.s. \quad (1)$$

ここで、 W は堤体の空中重量、 B_U は静水時の揚圧力(浮力)、 P_H と P_V は水平方向と鉛直方向の波力、 μ は底面の摩擦係数、 $f.s.$ は安全率である。上式で安全率 $f.s.=1$ とにおいて得られる限界重量 W_c は次式となる。

$$W_c = \frac{P_H + \mu(B_U + P_V)}{\mu} \quad (2)$$

ここで、碎波帯を対象とし、簡便のため廣井式を適用すると P_H と P_V はそれぞれ次式のように表される(図-4(A)参照)。

$$P_H = p_h D' l = 1.5 w_0 H D' l \quad (3)$$

$$P_V = \frac{1}{2} p_h B l = 0.625 w_0 H B l \quad (4)$$

ここで、 D' は水平波圧 p_h の作用高さ、 B は堤体幅員、 l は堤体長、 w_0 は海水の単位体積重量である。

また、堤体全体が波を被る状態を想定すると、静水時浮力 B_U と揚圧力 P_V の和を、堤体全体にかかる浮力 B_T で置き換えられ次式のように表される。

$$B_T = w_0 V_s = \frac{w_0 W}{\gamma} \quad (5)$$

但し、 γ は鉄筋コンクリートの単位体積重量を示し、この場合の限界重量 W_c は次式となる。

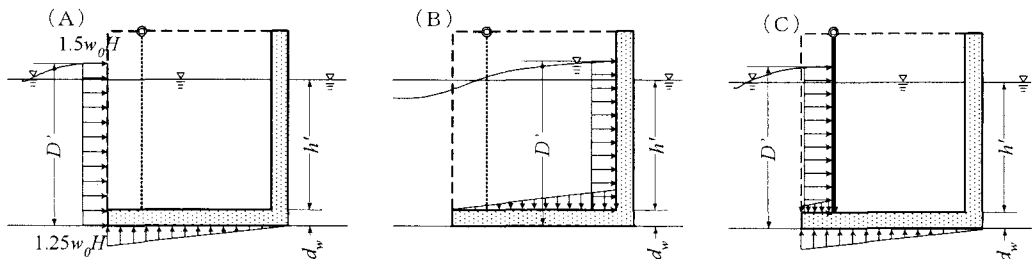


図-4 波力の作用状況

$$W_c = \frac{P_H}{\mu(1-w_0/\gamma)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

W が与えられた場合の安定限界波高 H_c は式(2), (6)に対してそれぞれ次式である.

$$H_c = \frac{\mu(W - B_U)}{w_0 l (1.5D' + 0.625B_U\mu)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$H_c = \frac{\mu W (1 - w_0/\gamma)}{1.5w_0 D' l} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(3) 超過確率

テストプラントの開口ケーソンの重量 $W=3.028$ kNに対する安定限界波高 H_c を式(8)で求めると $H_c=2.3$ mとなる. 沖合とプラント前方において同時刻に観測された波浪データから波高の相関を調べた(加藤ら, 1998). これよりプラント前方の波高2.3 mは, 沖合波高2.7 mに相当する. この沖合波高以上の発生頻度を図-5の室蘭港の波浪データから求めると, 超過確率が約0.1%となり, 一時間ごとの観測での20年間の発生回数は175回となる. これからすると, 波力は設計値よりかなり小さく, したがって安定限界波高は上出の $H_c=2.3$ mよりもかなり大きいと推察できる.

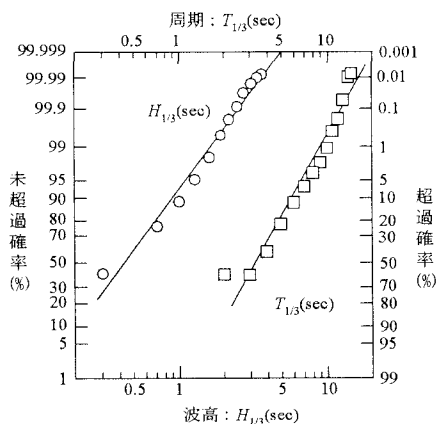


図-5 室蘭港の波浪超過確率図(1980-87)

3. 波力実験

エネルギー吸収現地実験と並行して, 発電用開口ケーソンの安定性を調べる目的で, 2次元造波水路において波力実験を行い, 水平波力および揚圧力と相対水深の関係が調べられた(近藤ら, 1986, 1988; 谷野, 1992). 図-6, 7, 8はそれぞれ振り子板, 後壁, 底板に作用する波力を谷野がまとめたものに, 各実験値の上限值として直線で表し, 次式のように整理した. ただし, B は堤体幅員, l は堤体長, h' は水室内水深である. そして振り子固定時, 負荷時および無負荷時における波力の作用状況を推定した. これらの結果をもとに滑動合成波力についても調べている.

A 振り子に作用する波力

$$\left. \begin{aligned} (a) \text{固定時} &: P_{HP,F} = 0.8(w_0 H h' l) \\ (b) \text{負荷時} &: P_{HP,L} = 0.35(w_0 H h' l) \\ (c) \text{無負荷時} &: P_{HP,N} = 0.25(w_0 H h' l) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

B 後壁に作用する波力

$$\left. \begin{aligned} (a) \text{固定時} &: P_{HW,F} = 0 \\ (b) \text{負荷時} &: P_{HW,L} = \{0.7 - 0.6(h/L)\}(w_0 H h' l) \\ (c) \text{無負荷時} &: P_{HW,N} = 0.7(w_0 H h' l) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

C 底板に作用する波力

$$\left. \begin{aligned} (a) \text{固定時} &: P_{UB,F} = 0.15(w_0 H B l) \\ (b) \text{負荷時} &: P_{UB,L} = \{0.4 - 0.6(h/L)\}(w_0 H B l) \\ (c) \text{無負荷時} &: P_{UB,N} = 0.5(w_0 H B l) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

この結果によれば, 振り子板に作用する水平波力は大きい順に固定, 負荷, 無負荷となり, 後壁では逆に無負荷, 負荷, 固定の順である. また底板に作用する揚圧力は無負荷, 負荷, 固定の順である. 上出の振り子固定時, 負荷時の波力作用状況はそれぞれ図-9, 10のように, また無負荷時は図-4のようになっていると推定される. これらの結果をもとに谷野らは, 滑動合成波力を調べて, 滑動し易いのは無負荷で沖向きの場合, ついで固定時の岸向き, 沖向きの順とした.

波力実験による滑動限界波高 H_c は4.0 mとなり, こ

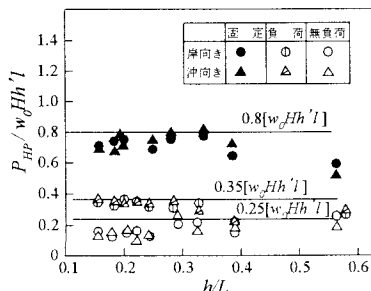


図-6 振り子に作用する波力

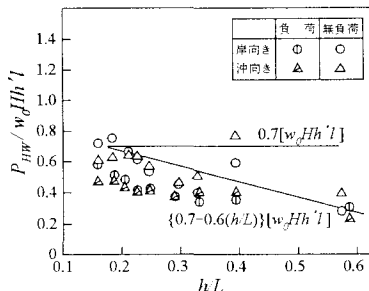


図-7 後壁に作用する波力

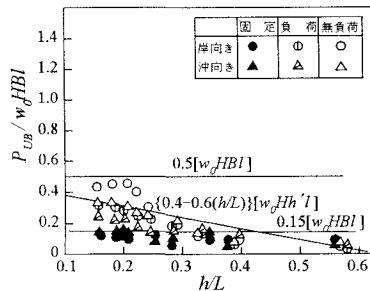


図-8 底板に作用する波力

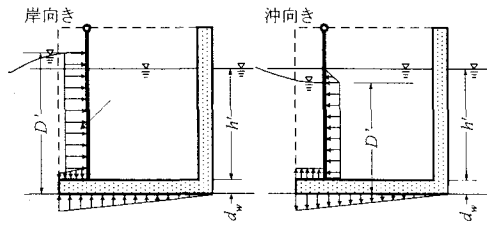


図-9 波力の作用状況(振り子固定時)

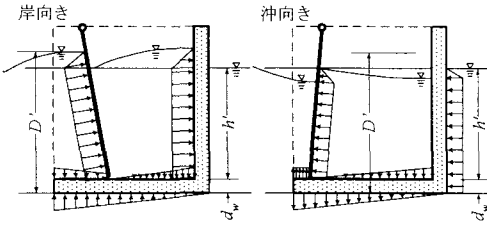


図-10 波力の作用状況(振り子負荷時)

これは沖波波高に換算すると約4.8 mに相当し、これに対応する超過確率はおよそ0.001%である。20年間でこの H_c 以上の波高の出現回数は、およそ2回程度となり、テストプラント開口ケーソンの安定性が確認された。

4. 開口ケーソンの波力特性

さらに通常のケーソンと開口ケーソンの波力の位相を確認する目的で2次元実験を行い、全水平波力および全

揚圧力を測定し、開口ケーソンの波力特性について調べた(浦島, 1999; 近藤, 2000)。その結果は図-11, 12に示すように、通常ケーソンの場合は水平波力と揚圧力の最大値が同位相で生じているのに対して、開口ケーソンの場合はほぼ逆位相で生じていることが認められた。また、合成滑動力は、相対水深 $h/L_o < 0.2$ の浅海域では通常のケーソンの約1/2以下となることが知れた。この場合の開口ケーソンの波力の作用状況は図-13のように推定される。これはテストプラント開口ケーソンの無負荷時の波力に相当するので、この結果から開口ケーソンの優れた安定特性が裏づけられた。

5. N室ケーソンの提案式

以上の結果をもとにして、複数の水室を有する振り子式波力発電用開口ケーソン(N室ケーソン)の波力計算式を提案する。

1. 岸向き一振り子固定—(図-14)

(1) 水平波力

$$P_H = 2P_{sw}d_{sw} + (N-1)P_{Dw}d_{pw} + NC_wP_p \dots (12)$$

振り子が前面と近いなら、 $P_H \approx lP_p$ とおける

$$\left. \begin{aligned} P_p &= p_{pl}D' \\ P_{pl} &= 0.8w_0H \text{ (実験値より)} \\ D' &= h' + d_w + 1.25H \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

(2) 揚圧力

$$\left. \begin{aligned} P_u &= p_u l B \\ P_u &= 0.15w_0H \text{ (実験値より)} \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

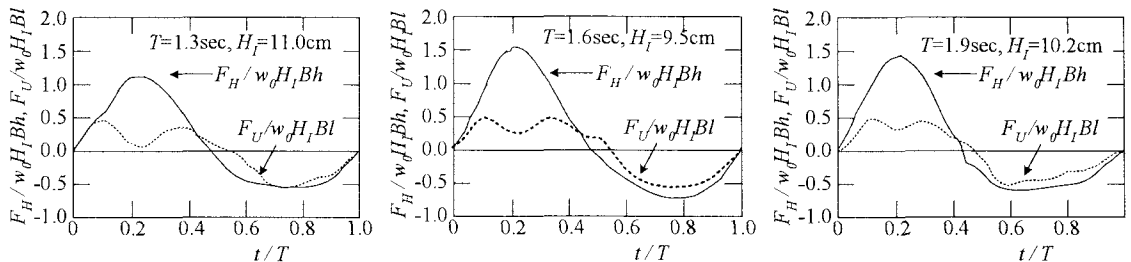


図-11 通常のケーソンに作用する波力の時系列

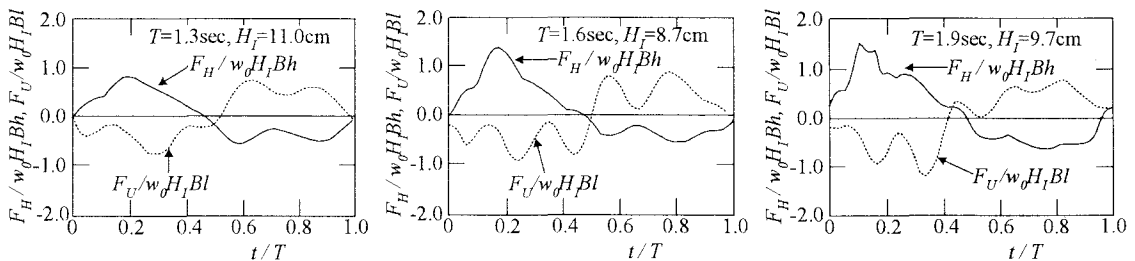


図-12 開口ケーソンに作用する波力の時系列

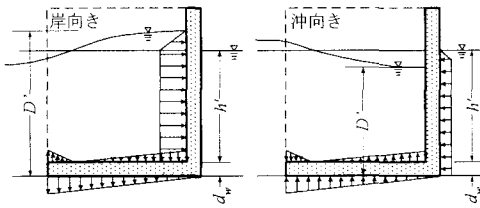


図-13 開口ケーソンの波力作用状況

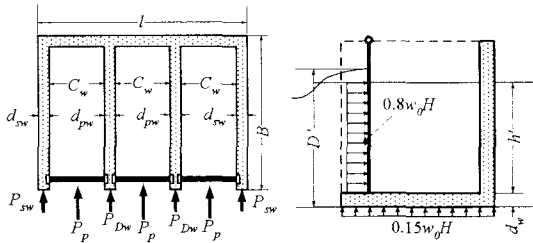


図-14 開口ケーソンの波力作用状況(岸向き)

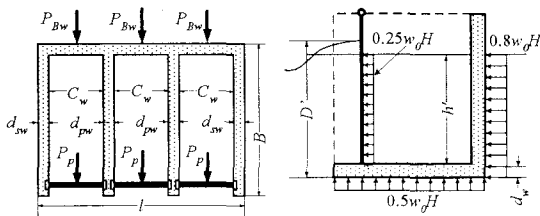


図-15 開口ケーソンの波力作用状況(沖向き)

表-1 滑動限界波高(m)

計算法	滑動方向		
	岸向き	沖向き	45°斜め入射
当初設計	2.3	3.5	2.7
波力実験による	4.0	4.3	4.0
提案式	4.9	3.7	—

2. 沖向き—振り子無負荷— (図-15)

(1) 水平波力

$$\begin{aligned}
 P_H &= NC_w(P_p + P_{Bw}) \approx l \cdot (P_p + P_{Bw}) \\
 P_p &= p_p h' \\
 p_{ps} &= 0.25w_0H \text{ (実験値より)} \\
 P_{Bw} &= p_{bs}(h' + d_w) \\
 p_{bs} &= 0.8w_0H
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots (15)$$

(2) 揚圧力

$$\begin{aligned}
 P_u &= p_u l B \\
 p_u &= 0.5w_0H \text{ (実験値より)}
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots (16)$$

上式をテストプラントのケーソンに適用し、二室共振り

子を設置した場合 $l=6.1\text{ m}$, $B=8\text{ m}$, $D=7\text{ m}$, 空中重量 $W=3,028\text{ kN}$, 浮力 $B_u=730\text{ kN}$, 摩擦係数 $\mu=0.6$ で滑動限界波高を計算すると、岸向きが $\approx 4.9\text{ m}$, 沖向きが 3.7 m となる。当初設計、波力実験による滑動限界波高と共に表-1に示す。

6. ま と め

- (1) 振り子板に作用する水平波力は大きい順に固定, 負荷, 無負荷となり, 後壁では逆に無負荷, 負荷, 固定の順である。また底板に作用する揚圧力は無負荷, 負荷, 固定の順である。
- (2) 通常のケーソンの場合は水平波力と揚圧力の最大値が同位相で生じているのに対して, 開口ケーソンの場合はほぼ逆位相で生じていることが認められた。
- (3) 合成滑動力は, 相対水深 $h/L_0 < 0.2$ の浅海域では通常のケーソンの約1/2以下となることが知れた。
- (4) 波力実験による滑動限界波高以上の波高の出現回数は, 20年間でおよそ2回程度であり, テストプラント開口ケーソンの安定性が確認された。
- (5) N室ケーソンの波力式 (12)~(16) を提案した。

謝辞: 本論文は2000年3月までに室蘭工業大学を中心としてなされた波力発電の共同研究の成果をベースとして, 作成されたものである。共同研究の遂行に協力された同大学, 北海道開発局, 室蘭市, (社)寒地港湾技術研究センター他の関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 浦島三朗(1999): スリット壁型防波構造物の消波効果と波力特性に関する研究, 室蘭工業大学博士学位論文, 114p.
- 長内戦治(1999): 振り子式波浪発電装置の高度化と利用に関する研究, 室蘭工業大学博士学位論文, 96p.
- 河海研究室(1979): 波力発電プラント本体ケーソン設計計算書, 室蘭工業大学
- 加藤 満・近藤俊郎・長内戦治・井上達治(1998): 波浪発電実験プラントによる三次元波浪変形特性, 土木学会北海道支部論文報告集, 第54号(B), pp. 344-347.
- 近藤俊郎(1986): 沿岸固定式による波浪エネルギー利用に関する研究, 科学研究費報告書, 室蘭工業大学, 85p.
- 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回海岸工学講演会論文集, pp. 842-846.
- 近藤俊郎・谷口史一・渡部富治・浜田和哉(1999): 新型振り子式波浪発電の現地性能試験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1261-1265.
- 近藤俊郎(2000): 波浪発電と海岸保全のための新型式消波システムの開発, 科学研究費報告書(A2), 室蘭工業大学, 82p.
- 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, 開発土木研究所報告, 第97号, pp. 1-48.