

波浪発電と海岸保全のためのハイブリッド型システム

近藤 俣郎* ・ 藤 間 聡* ・ 加 藤 満**・ 飯 島 徹***
渡 部 富 治****・ 浦 島 三 朗*****・ 太 田 典 之*****

1. はじめに

振り子式波エネルギー吸収システムについて著者らは海域実証実験を含む研究を行い, その高効率性と低コスト性を明らかにしてきたが, その場合でも発電コストは火力発電に比べて3倍以上の価格となる(Kondo, 1996). しかしながら環境保全の観点からすれば, 発電コストのみの経済性ではなく, 環境修復や社会的な費用も考慮したトータル的なコストで検討される必要があり, その観点からの考察が必要である(Kondo et al., 1993). 一方, わが国では治水工事の普及, 交通路の高密度化並びに沿岸地区の都市化により海岸への流出土砂量が顕著に減少し, 砂浜海岸の多くは慢性的な侵食傾向が進行している. 沿岸域で波浪エネルギーを吸収すれば岸向きの波パワーが減少するので, 海岸侵食量を減少させる効果がある. 本論文では, 侵食性海岸において離岸堤の機能をもつ振り子式波エネルギー吸収システムを提案し, その二次元的な海岸保全機能と共に取得された電力のトータル的な経済性について石油火力発電や他の自然エネルギーと比較検討する.

2. システムの二次元構造

2.1 システムの条件と基本構造

従来の振り子式波浪発電システムは箱状コンクリートケイソンの前壁を取り去り, 代わりに振り子板を設けた構造である. これは防波堤に付設もしくは組み込まれる方式のものである. 砂浜海岸で海岸侵食抑止の機能を持つには, 海岸への入射波エネルギーを減少させると同時に構造物による局所的な漂砂への影響を少なくする必要がある. これらのことを基に, 下のような条件を定めた.

(1) 年平均入射波エネルギーの配分を, 反射 30, 吸収 40, 伝達 10%を目標とする.

(2) エネルギー吸収装置としては, 高効率である振り子式を対象にし(渡部ら, 1985; 谷野 1992), エネルギー変換には最近開発されたロータリーベーンポンプを採用する(Watabe, 1993; 長内ら, 1998).

(3) 沿岸漂砂に支障が少なく, かつ岸沖漂砂も一部通過できる構造とする.

(4) 大波浪時には振り子板を固定するものとし, その状態でも直立の離岸堤としての有し, かつシステムが倒壊しない構造とする.

そうしたシステムの一案としてケイソン型に替えて図-1のような杭, 没水後壁並びに従来の振り子からなる脚柱構造形式を提案する. この構造では図-2のケイソン型に比べて側壁と底板が無いので, 沿岸方向の漂砂移動は殆ど阻害されない. 岸沖方向についても掃流砂についても大きく阻害しないように, 没水後壁はその下端と地

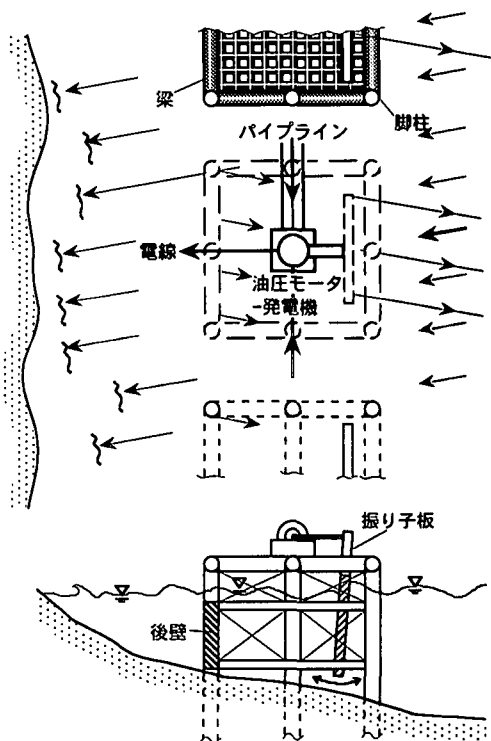


図-1 ハイブリッドシステムの概念図

・フェロー	工博	室蘭工業大学教授	建設システム工学科
・学生会員		室蘭工業大学大学院	建設システム工学専攻
***正会員	工博	室蘭工業大学助教授	地域共同研究開発センター
****	工博	Tウェーブコンサルタント	ボランテア
*****正会員		苫小牧工業高等専門学校助教授	環境都市工学科
*****		室蘭工業大学建設システム工学科	技術職員

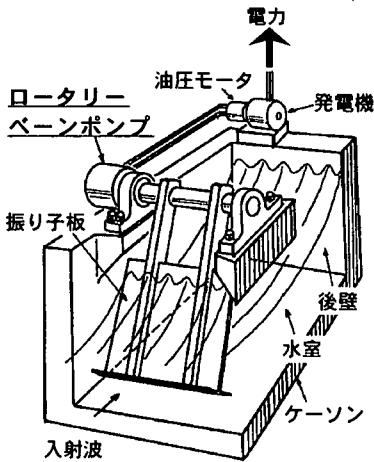


図-2 ケイソン型振り子システム

盤との間に隙間（以下クリアランスという）を置く構造としている。

また大波浪時の波力の低減は後壁の天端高を低くすることで可能となる。したがって、主たる課題は、側壁がなくかつ水平なスリットを有する後壁でも上出の効率を得られるか、にある。そこで上出の条件を満足する主要な形状構造を二次元波動実験をもとに定めることとした。

2.2 二次元性能実験

上出の条件を満足するための後壁の形状を決定するた

め基礎的な二次元水槽実験を実施した。実験水槽は $24 \times 1.0 \times 0.6$ m の不規則波造波水槽である。実験用の模型の概要を図-3 に示す。この模型では、長さの縮尺比 $1/20$ 程度を想定している。水平固定床での実験波の諸元は、水深： $h=0.5$ m、波高： $0.05 \sim 0.15$ m、周期： $T=1.1 \sim 2.7$ sec. である。規則波と不規則波（プレットシュナイダー・光易スペクトル）を用いた。

振り子の負荷状態を、自由（負荷なし）から過負荷、まで変化させ、反射率、伝達率並びにエネルギー吸収効率を求め、2.1 の条件を満たす後壁の天端高とクリアランスを見出すこととする。吸収パワーの平均値 P_a は、油圧モータの押しのけ容積が D_p のポンプの吐出圧 p_p と角速度 θ を測定し下式で求める。

$$P_a = \frac{D_p}{2\pi\eta_i T_0} \int_0^{T_0} p_p \theta dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで η_i はトルク効率、 T_0 は測定時間である。

一次変換効率 η_1 は入射パワー bW （ここで b は水路幅員）に対する P_a の比である。

$$\eta_1 = P_a / bW \quad \dots\dots\dots (2)$$

2.3 実験結果

以下の図-4～9 の結果はクリアランス $C=10$ cm で越波なしの状態の不規則波の結果を示す。

図-4 は振り子と後壁の距離 B を一定として入射波周期を変化させて得られた効率 η_1 を相対幅員 B/L の関係で示している。図-5 は最大効率を与える条件の一つである $B/L=0.25$ について、周期ごとに B を変化させた

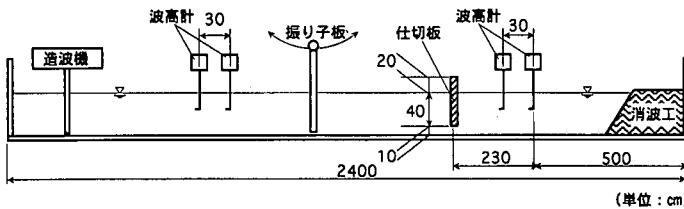


図-3 実験水槽の配置と実験用ベーンポンプ

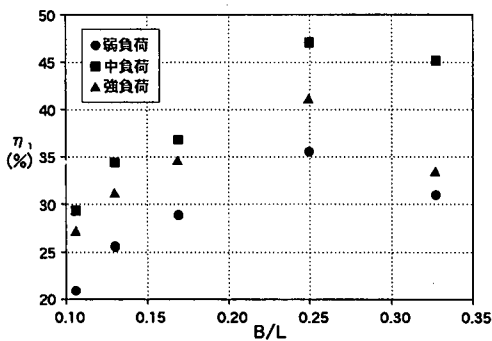


図-4 エネルギー吸収効率 ($B=0.6$ m)

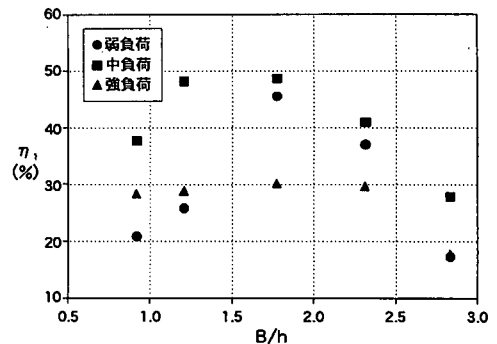


図-5 エネルギー吸収効率 ($B/L=0.25$)

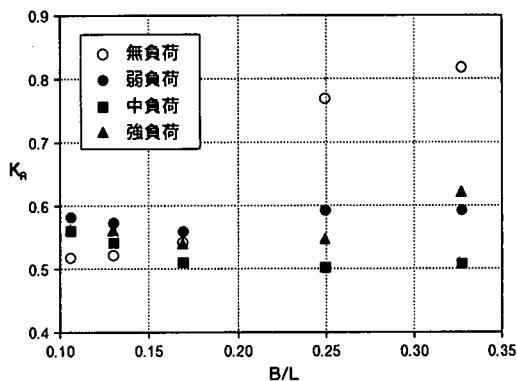
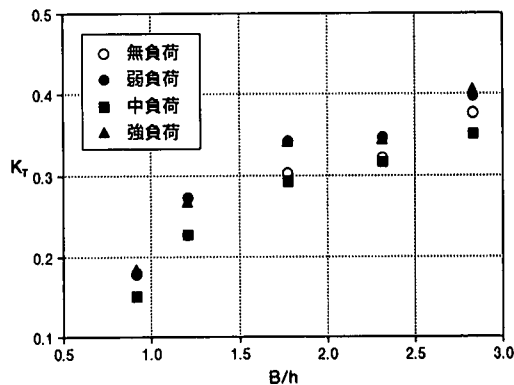
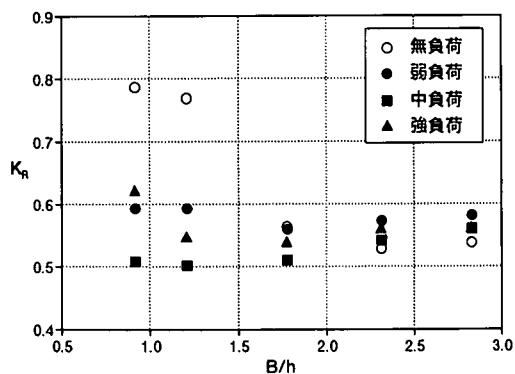
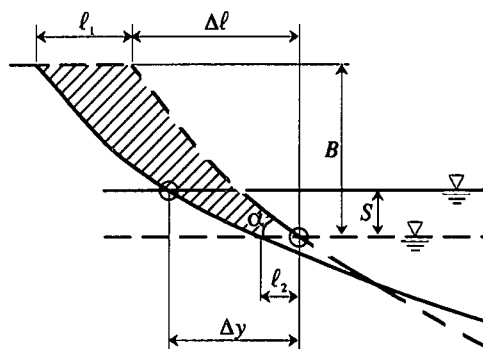
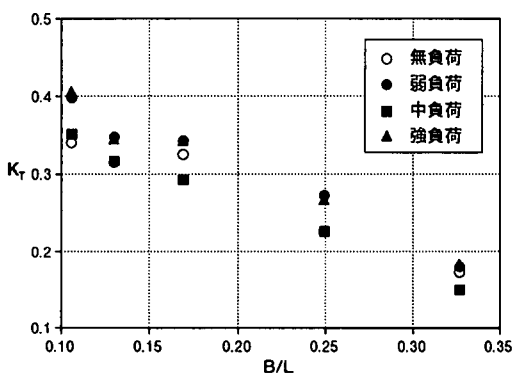
図-6 相対幅員による反射率の変化 ($B=0.6$ m)図-9 $B/L=0.25$ における伝達率図-7 $B/L=0.25$ における反射率

図-10 システム配置による海浜地形変化

図-8 相対幅員による伝達率の変化 ($B=0.6$ m)

場合の効率の変化である。これより η_1 は 40% 以上となるケースがあることが認められた。

図-7 は反射率の周期による変化を、図-8 は $B/L=0.25$ のもとでの B の影響を示すものである。波高反射率 K_R は負荷があると 0.6 以下であるので、エネルギー反射率は 0.4 以下となる。

波高伝達率は同じ様式で図-9, 10 に示す。不規則波と規則波では若干の違いがあった。波高伝達率 K_T は 0.3

以下が多いので、エネルギー伝達率は 0.1 以下となっている。

3. 海岸保全機能

この構造物は直立の離岸堤の機能を有する。漂砂については側壁と底版が無いので、沿岸方向の漂砂移動は阻害されない。岸沖方向についても、後壁下端と地盤との間隙をおくので掃流砂については運動が阻害されないようになっている。

離岸堤の波に関する機能は、入射波エネルギーを減殺し、岸側への伝達波のエネルギーを減少させることにある。2 章に示したように本構造物の波高伝達率は 0.3 以下にできるから、離岸堤としての十分な機能を有する。海岸へ作用する波の波高が減少すると、侵食性の砂浜海岸では侵食から堆積に転ずることが期待できる。離岸堤による海岸保全機能の定量的な評価は、本来は三次元的である。ここでは手始めに二次元的に評価することとし、平均海面変動と汀線変化の関係を応用する。

岸向き伝達波の減衰は Wave Set-Up の減少を招き、それにより侵食を抑止し汀線の前進をもたらす。波エネルギー吸収前後の平均海面の差は、汀線の量の差と仮定する。Set-Up 量は Longuet-Higgins と Bowen の方法

で、また前進距離の推定には三村らによる海面上昇と汀線の後退との関係を応用し推定する。汀線変化量推定のための対象波は、その地点の年平均波とする。

図-10に示すように本システム設置に平均海面が S だけ下降することで、汀線は Δy だけ前進する。平均海面からのバームの高を B とすると、海面より上に堆積した土量 V は単位汀線長あたり、(3)式のように推定される。

$$V=(l_1+l_2)B/2\cong\Delta y B/2 \cdots\cdots\cdots(3)$$

4. 経済性評価

発電コスト P_g (円/kWh) の推定は火力発電などに用いられている方法で行う。トータルコスト P_t は、発電コストに環境コスト P_e と社会コスト P_s を加えたものとする。

$$P_t=P_g+P_e+P_s \cdots\cdots\cdots(4)$$

環境コストとしては、発電過程で発生した環境への負荷の変化を修復するためのコストとする。

近藤は P_e を下式で与えている(近藤, 1996)。

$$P_e=\sum \Delta P_{i,j}=\sum \frac{\partial E_{p,j}}{\partial x_i} \Delta x_i \cdots\cdots\cdots(5)$$

ここで $\Delta P_{i,j}$ は、 j という環境要因に対して発電過程で発生する i という環境要因の変化量 Δx_i が及ぼす被害に対する修復コストで、 $E_{p,j}$ は j の環境価値とする。

火力発電の場合は、 CO_2 などの廃ガスの、原子力発電の場合放射能廃棄物の処理費がそれにあたる。本システムの場合、そうした悪影響がなく逆に海岸保全工事費を減少させるから環境コストはマイナスとなる。その際のコスト計算としては、下のようなものが対象となると考えられる。

- 1) 海岸線1m当たり Δy の面積の補償
- 2) 堆積土量 V を養浜する費用
- 3) 海岸に護岸を設置して保護するとしてその建設費の差

この他に発電施設以外の施設費は公共事業費で行うとして除外することもあり得るが、その費用をすべて環境コストできるかについては議論が残される。

社会コスト P_s としては、波浪発電については既存の産業等との間に空間利用の競合を生ずるので(近藤ら、

1998)、そのための補償費などがそれに相当する。石油を始めとする輸入化石燃料の場合は、それに加えてシーレーン確保のための防衛費の一部がそれに相当する。

5. ケーススタディ

上出の結果をもとに日本沿岸の北海道日本海岸、東北太平洋岸、関東太平洋岸を代表する3ケースを対象にコストを推定する。各海域における年平均有義波、年平均効率および50年確率設計有義波は表-1とする(土木学会, 1990)。

表-1 代表海岸の波浪諸元(有義波)

海岸/海洋	年平均波			計設波	
	H_{av} (m)	T_{av} (m)	W_{av} (kmh/h)	H_D (m)	T_D (sec.)
北海道/日本海	1.1	4.9	5.3	7.5	12.0
東北/太平洋	1.1	7.4	6.3	7.5	14.0
関東/太平洋	1.5	7.4	11.5	11.0	15.0

上表の諸元に対して3節の D 、 Δy および V を計算した結果は表-2のようになった。

表-2 海岸変形のパラメータ

海 岸	B (m)	Δy (m)	V (m^3/m)
北海道	0.8	2.0	0.8
東 北	1.2	4.7	2.8
関 東	1.5	6.8	5.0

発電コスト P_g の推定は4章でのべたように火力発電の計算法に準じて行う(Kondo, 1996)。年発電力量は年間の入射波エネルギー・パワーに基づき推定する。発電

表-3 発電コスト P_g とトータルコスト P_t

海 岸	P_g	P_e	P_s	P_t
北海道	62.4	- 2.6	0.6	60.4
		-18.0	0.6	45.0
東 北	60.5	-10.2	0.6	50.9
		-16.0	0.6	45.1
関 東	46.0	-12.5	0.9	34.4
		-11.0	0.6	35.9

表-4 エネルギー種別による各種コスト (円/kWh)

種 類	地 域	P_g	P_e	P_s	P_t	$P_t/T_{t,D}$
波 浪	関 東	46.0	-12.5	0.9	34.4	1.4
波 流	津 軽 海 峡	33.3	3.3	1.0	37.0	1.5
潮 汐	有 明 海	73.0	3.7	2.2	78.9	3.2
風 力	室 蘭	48.0	- 7.0	1.0	42.0	1.7
石 油 火 力	関 東	12.0	12.5	1.0	25.0	1.0

註： $P_{t,D}$ は石油火力の P_t

装置ロータリーベーンポンプによる振り子式とし、入射エネルギーから電気までの総合効率は40%とする。耐用年数は土木構造物と発電施設についてそれぞれ50年、15年とする。推定結果は表-3の右端のようになった。これによれば P_0 , P_e とも関東が最も安く、次いで東北、北海道の順である。

環境コストは4節で示した環境劣化の場合は(+)で、環境を改善する場合は(-)となる。表-3中の上段は、4章の2)の年間の海岸侵食量を資浜によって修復する費用から算定したものを、下段は3)の護岸費用から推定した。火力発電の場合の環境コストとしては、CO₂の処理の費用の差から計算された。表-4は波浪とその他の海洋エネルギー、風力ならびに石油火力とのコスト比較をした。以上の結果は利率を年6%としているものである。エネルギーコストは利率に敏感であり、利率が2%のときのコストは表-5のようになる。 P_e の上段、下段の値は表-3と同じ意味である。

表-5 利率2(%)の場合のコスト (円/kWh)

海 岸	P_0	P_e	P_s	P_t
北海道	40.3	- 2.6 -14.0	0.3 0.3	38.0 26.6
東 北	39.0	-10.2 -13.0	0.3 0.3	29.1 26.3
関 東	31.4	-12.5 - 8.0	0.6 0.6	19.5 24.0

6. 結 論

1) 本ハイブリッドシステムにおいてエネルギーの配分条件(反射20, 吸収40, 伝達10%)とするには、没水後壁の天端高は設計水面上+ C_{av} , 下端の間隙を水深の約10%とすればほぼ条件が満たされる。

2) 年平均波による平均海面変化から推定された本システムによる汀線前進量は、それぞれ20(北海道), 4.7(東北), 6.8m(関東)また堆積土量はそれぞれ0.8, 2.8, 5.0 (m³/m)と推定された。

3) システムによって得られる電力のコストは関東太平洋岸が最も安価で、発電コストとトータルコストはそれぞれ46, 34(円/kWh)となった。これを石油火発と比較すると発電コストは3.2倍が高いがトータルコストは

1.4倍になる。またもし利率2%ならトータルコストは20 (円/kWh) 以下となる。

今後二次元の波力及び漂砂実験、さらには三次元の波浪変形及び波力実験と解析を行って、本システムについての設計法を確立する所存である。

本研究は平成9年度文部省科学研究費補助金基盤A「波浪発電と海岸保全のための新形式消波システムの開発」(1997~99, 代表 近藤俊郎) によるものである。

本研究の実験に協力された建設システム工学科四年次学生山内 功, 浜田和哉の両君に感謝する。

参 考 文 献

- 長内戦治・近藤俊郎・水野雄三・渡部富治 (1998): ロータリーベーンポンプによる振り子式波力エネルギー変換装置の実用機開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1221-1225.
- 近藤俊郎 [編著] (1996): 海洋エネルギー利用技術, 森北出版, 185p.
- 近藤俊郎・長内戦治・加藤 清 (1998): 波浪発電の環境影響と空間利用競合性の評価, 海洋開発論文集, 24, pp. 501-505.
- 土木学会エネルギー委員会 (1990): 波エネルギー利用技術の現状と将来展望, 219p.
- 濱津弘美 (1995): 環境保全効果を考慮した波浪発電のコスト, 室蘭工大建設システム工学科卒業論文(平成6年度), 103p.
- 三村信男・幾世橋慎・井上啓子: 砂浜に対する海面上昇の影響評価, 海岸工学論文集, 第40巻2, pp. 1046-1050.
- 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, 97, pp. 1-48.
- 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), 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 486-490.
- Kondo, Hideo (1996): Cost effectiveness of wave power extraction at erosive coasts, Proc. 25th International Conf. on Coastal Engineering, Vol. 4, ASCE, pp. 4583-4590.
- Kondo, H., S. Osanai and I. Sugioka (1993): The concept of true cost of energy and its application to ocean energies, Proc. of International Symposium on Ocean Energy Development, Muroran Inst. Tech. and Cold Region Port & Harbor Eng. Research Center, pp. 11-106.
- Osanai, S., H. Kondo, Y. Mizuno and T. Watabe (1996): Feasibility test new Pendulum type wave energy apparatus, Proc. of 25th International Conf. on Coastal Engineering, Vol. 4, ASCE, pp. 4591-4600.
- Watabe, Tomiji (1993): Pendulum wave power convertor—15 years study and its future prospect—, Proc. of International Symposium on Ocean Energy Development, Muroran Inst. Tech. and Cold Region Port & Harbor Eng. Research Center, pp. 41-52.