

浮体式波浪制御構造物による波エネルギー回収システムに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE ENERGY CONVERTING SYSTEM USING FLOATING BREAKWATER

渡辺洋輔¹・Peng WEI²・水谷法美³
Yosuke WATANABE, Peng WEI, Norimi MIZUTANI

¹正会員 修士(工学) 清水建設(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

²工学修士 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工学博士 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

This paper is intended to discuss the possibility of a new wave energy converting system using a floating breakwater. The performance of the proposed system is demonstrated by conducting hydraulic model experiments. Experimental results show that this system work more efficient for the long wave period condition. Moreover, it is revealed that the resistance due to the system affects the wave-induced response of the floating breakwater, which leads to the performance of the wave control function as well. However, the present energy converting system has only 2.2% energy conversion efficiency at maximum, which requires more improvement of the system.

Key Words : *Renewable energy, wave energy converting system, floating breakwater, inclined plate mooring system*

1. 背景

近年, 化石燃料に変わる新しいエネルギー, 特に再生可能なエネルギーの開発の必要性が高まっている。再生可能なエネルギーには太陽光や風力などが代表的であるが, 四方を海に囲まれた日本では, 波力も有力なエネルギーとして期待される。波浪エネルギーの賦存量は日本の全沿岸域を合わせれば3,600万kWにもなるとされている¹⁾。これは日本国内における総発電量の約1/3に相当する。これまでに波エネルギーの回収システムについて数多く研究が行われてきており²⁾⁻⁷⁾, 海外では一部実用化まで進んでいる^{8),9)}。しかし, 我が国では, コスト面等の観点から実用化は進んでおらず, 波力発電は洋上風力発電¹⁰⁾のように新エネルギーとして位置づけられるには至っていない。しかし, コスト面に関しては, 波浪制御構造物の付随施設のように, 付加機能として設置することができれば改善の余地はあると考えられる。

著者らは, 有孔式の傾斜板で支持された浮体式波浪制御構造物の波浪応答特性や波浪制御特性について検討してきた¹¹⁾。この浮体式波浪制御構造物は, 係留索のように弛まないことから衝撃張力の発生の懸念が小さいこと, 浮体を支持する傾斜板が有孔式であることからそこのエネルギー消散が期待でき

ること, さらにこの傾斜板が波の作用により岸側に移動すると浮体天端の岸側が上昇して傾斜することにより砕波の促進が期待される, などの点で利点があると考えられるものである。一方, この構造物は波浪による動揺も有意な大きさであり, この運動から空気の運動などに置き換えることなくエネルギーを回収できれば効率的なエネルギーの回収も期待される。

本研究では, 波浪制御構造物の付加機能としての波エネルギーの回収システムを検討するため, 傾斜板を不透透として単純化させた傾斜板支持式の浮体式波浪制御構造物によるエネルギー回収について, 浮体の波浪応答特性と波制御機能と関連づけながら検討を加えることとした。

2. 実験方法

本研究では, 波エネルギー回収システムを付加した際の浮体の動的挙動や波浪制御機能の変化特性を検討するため, 二種類の水理模型実験を行った。

(1) 浮体の応答に対するバネ負荷の影響

まず, エネルギー回収システムの負荷の影響を考察するために, その負荷を回転バネによる反力で近似し, 浮体と傾斜板の間に回転バネを設置し, 波浪

動揺および波浪制御機能への影響を検討した。回転バネの直径は 10mm でバネ定数は 4.5 Nmm/deg である。

実験は、名古屋大学所有の片面ガラス張り断面二次元造波水槽を用いて行った。実験水槽の概略を図-1 に示す。水路内部に写真-1 に示す傾斜板で係留した浮体を設置した。本研究では、傾斜板は単純化し、沖側は浮体の動揺を大きくするために無加工の木製の板を、岸側は流体抵抗が小さくなるよう開口率の大きい板を使用した。この単純化には将来の数値解析モデルへの適用も考慮した。なお係留角度は 45 度で一定とした。負荷としての回転バネは、浮体と傾斜板の接続部に取り付けた。なお取付け箇所は浮体の前後左右で対称とした。

実験条件は表-1 に示すように、回転バネの本数を 3 種類（前後対称に 2 本ずつ 4 本、4 本ずつ 8 本と無し）、水深を 57cm から 63cm の 3 種類、入射波を規則波に限定し、周期を 0.6s から 2.0s までの 10 種類、波形勾配を 0.02 から 0.04 の 5 種類に変化させた。

実験では、浮体上部にポリスチレンボードで作製した軽量の板を取り付け、これをターゲットにし、上部から 2 台、波進行方向に 2 台のレーザー変位計を取り付け、浮体の動揺の計測を行った。また併せて水槽の側面からデジタルビデオで浮体の動揺を撮影した。

(2) エネルギー回収システムに関する実験

本実験では浮体式防波堤の動きを利用して発電を試みた。実験は名古屋大学所有の平面水槽内に導波板を設置して幅 70cm の水路を製作して実施した。エネルギー変換装置と浮体を接続するために、浮体

上部に鋼材 L 型アングルで構成されている型枠を設置し、浮体とエネルギー回収システムを図-2 に示すようにラックギアで接続した。エネルギー回収システムとシステム内のギア群の概略図をそれぞれ

表-1 バネ負荷による実験条件

バネの数 n_s	水深 $h(\text{cm})$	入射波周期 $T_i(\text{s})$	波形勾配 H/L_i
0, 4, 8	57~63	0.6~2.0	0.02~0.04

表-2 エネルギー回収システムによる実験条件

発電機の数	システムとの結合の有無	水深 $h(\text{cm})$	入射波周期 $T_i(\text{s})$	波形勾配 H/L_i
0	無	57, 60	1.0~2.0	0.02~0.04
	有			
1, 2	有			

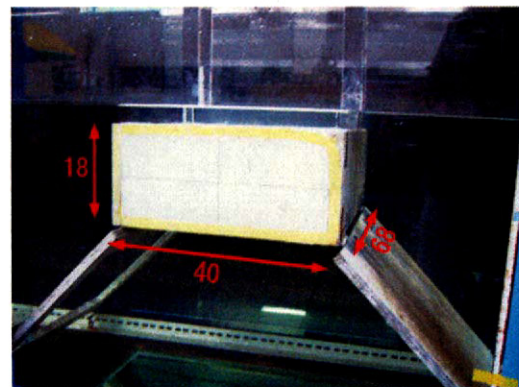


写真-1 傾斜板支持式浮体式波浪制御構造物

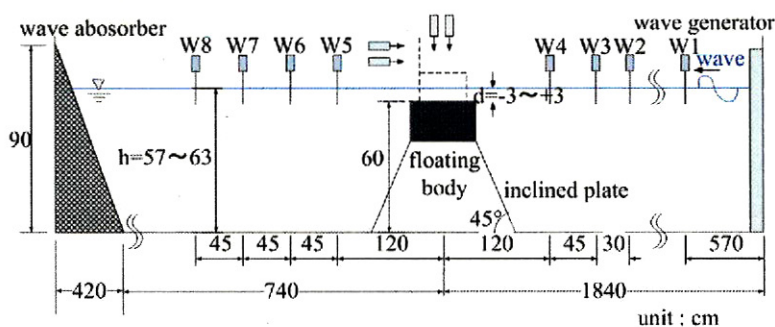


図-1 バネ負荷による実験の概略図

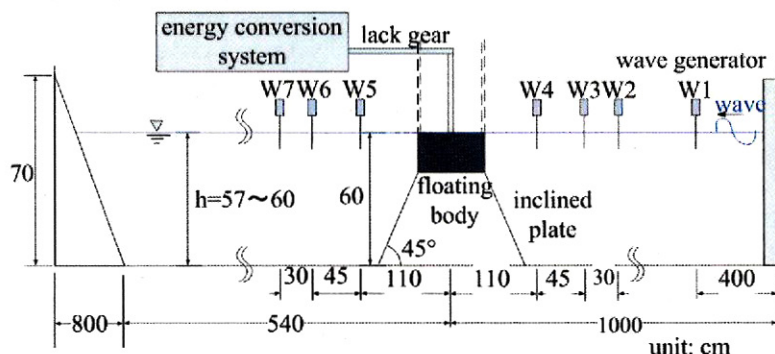


図-2 エネルギー回収システムによる実験の概略図

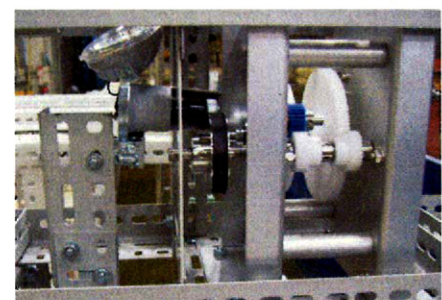


写真-2 エネルギー回収システム

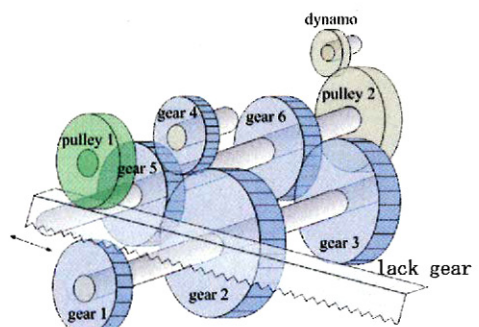


図-3 エネルギー回収システムのギア群

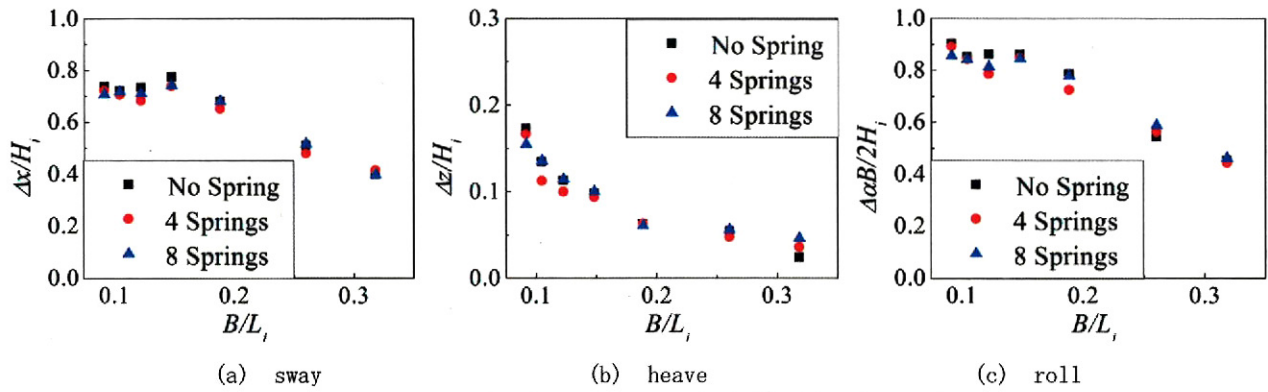


図-4 浮体の動揺特性に及ぼすバネ負荷の影響 ($h=60\text{cm}$)

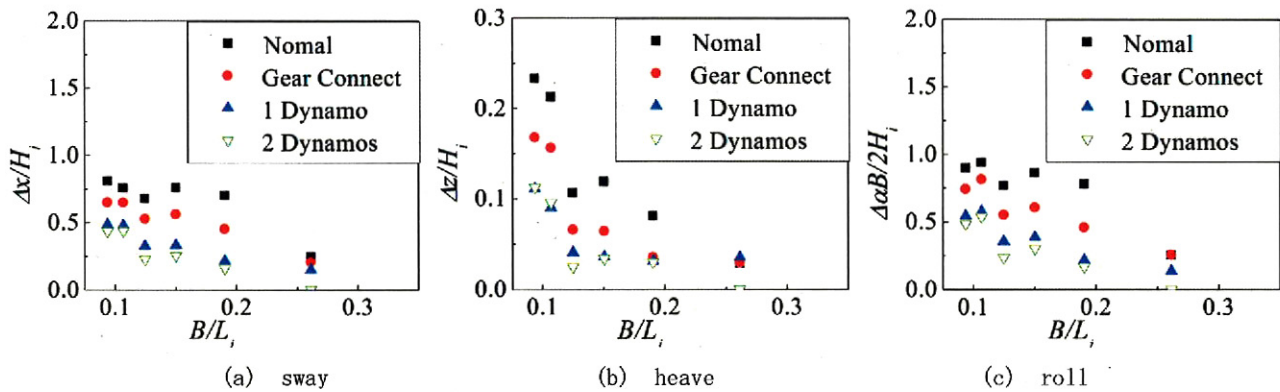


図-5 浮体の動揺特性に及ぼす負荷の影響 ($h=60\text{cm}$)

写真-2 と図-3 に示す。本システムは図-3 のように径の異なるギア群を組み合わせた装置により、最終的にプーリー2 に接続する発電機を回転させる仕組みである。なおプーリー2 と同軸上にあるギア(図-3 のギア 5 とギア 6)の内部には、石田ら¹²⁾に倣ってワンウェイクラッチが組み込まれているため、浮体の運動方向が逆転しても、プーリーは常に一方に回転する仕組みになっている。また、浮体の roll, heave にともなうラックギアの角度に変化があってもプーリー1 で離れないようになっている。また、発電機は通常の自転車用のものを用い、電力は発電機からの電流による既知の抵抗間の電圧から求めた。

実験条件は表-2 に示すように、負荷を掛けない場合、ギア群と浮体を接続する発電機は取り付けない場合、および発電機を1個および2個取り付けた場合の4種類、水深を57cm, 60cmの2種類、入射波の周期を1.0s から2.0s までの6種類、波形勾配を0.02 から0.04 の3種類に変化させた。

本実験では、浮体上部に、マーカーを付した軽量の板を取り付け、それをデジタルビデオで撮影した。そして画像解析ソフト(DIPP Motion Pro)を使用して浮体の動揺を解析した。

3. 実験結果および考察

(1) 浮体の動揺特性

a) 浮体の応答に対するバネ負荷の影響

エネルギー回収システムによる負荷を回転バネで想定した場合の無次元動揺振幅と無次元浮体幅との関係を図-4 に例示する。全般的に B/L_i が大きくなるにともない動揺は小さくなる傾向を示すが、0.15 付近で sway が大きくなっており、共振に近い状態になっていることが推察される。

また、回転バネの負荷が小さいために、バネの数による変化が明瞭ではないが、波長が長くなり、浮体の動揺が大きくなると、バネのない場合に比べバネによる負荷のある方が、また本数の多い方が浮体の動揺振幅が小さくなる傾向が認められる。

b) 発電システムを取り入れた実験

発電システムを取り入れた際の浮体の動揺特性を図-5 に示す。本実験で使用したエネルギー回収システムは、ギア群の抵抗が非常に大きかったため、負荷のない場合とギア群のみ付けた場合との差が明瞭に現れ、負荷がかかることで浮体の動揺は小さくなっていることが確認できる。さらに発電機を取り付けると浮体の動揺は更に小さくなる。全体的には B/L_i が大きくなると動揺は小さくなるが、負荷による差は動揺の大きい長周期側で大きい。また、全体的に B/L_i が 0.15 近傍で動揺が大きい、その傾向は負荷があってもあまり変化しない。

発電機の個数を増やした場合の変化量は最初の1個を付けた場合の変化量に比べて小さく、線形的な

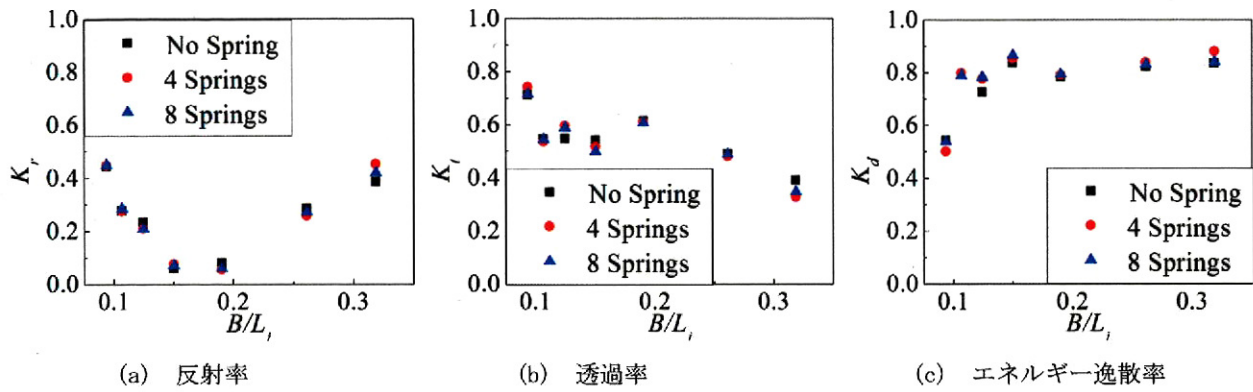


図-6 浮体の波浪制御に及ぼすバネ負荷の影響 ($h=60\text{cm}$)

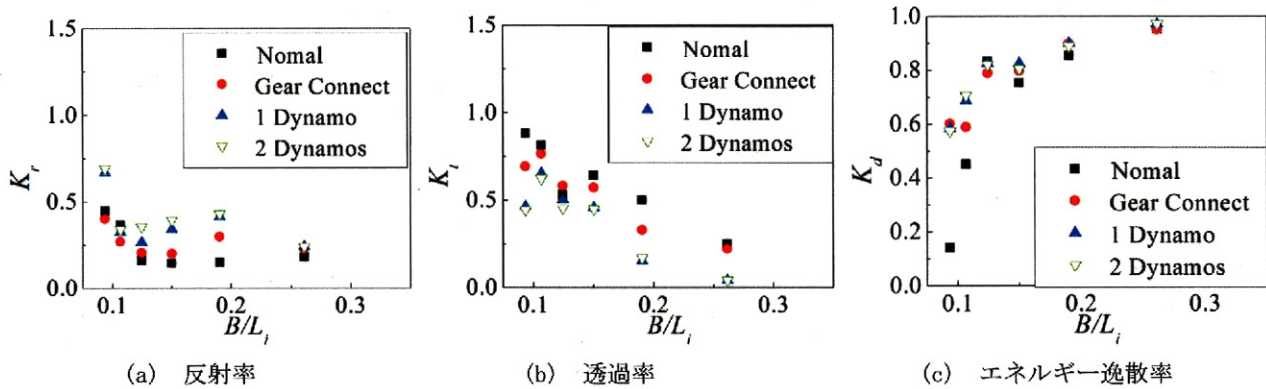


図-7 浮体の波浪制御に及ぼす負荷の影響 ($h=60\text{cm}$)

変化量は認められなかった。なお、負荷をかけない状態での動揺振幅が図-4の無負荷の場合と多少差があるが、動揺の求め方が異なったことが一原因として挙げられる。

(2) 波浪制御機能

本研究では浮体式波浪制御構造物の波浪応答を利用して波エネルギーの回収を検討しているが、回収システムの負荷により、浮体の波浪応答が変化するため、波浪制御機能にも影響を及ぼすことになる。そこで浮体に与えた負荷が浮体の波浪応答に及ぼす影響について、反射率 K_r 、透過率 K_t 、エネルギー逸散率 K_d を対象に検討する。なお、反射率・透過率は合田ら¹³⁾の手法により求めた。

a) 浮体の波浪制御に対するバネ負荷の影響

図-6に反射率、透過率、エネルギー逸散率と無次元浮体幅の関係に及ぼすバネ負荷の影響を示す。動揺特性の場合と同様、バネの負荷が小さかったため、バネ負荷の効果は明瞭ではないが、全般的には負荷が大きくなると浮体の動揺が小さくなる傾向にあるため、反射率は大きく、透過率は小さくなる傾向にあるようである。

B/L_i が 0.15 付近で反射率 K_r は最小になることが確認できる。これは既述したように、この付近では動揺が比較的大きいことから共振に近い状態であるためであると考えられる。透過率は全般的に B/L_i が大きくなると小さくなる傾向にあり、 B/L_i が 0.15 より大きい範囲で 0.6 以下となる。 B/L_i が

0.15 付近では全体的な傾向よりは若干透過率が小さいようにも見受けられる。そして、エネルギー逸散率はこの付近で急に大きくなっており、消波機能が高くなっていることが確認できる。また、エネルギー逸散率は短周期側で大きくなっており、浮体上の砕波が寄与していると考えられる。

動揺特性や反射率・透過率の特性から B/L_i が 0.15 以下では浮体の動揺に伴う radiation 波の影響が大きく寄与しており、一方、 B/L_i が 0.15 より大きいときには浮体の動揺は小さく、どちらかといえば固定構造物に近い状態で波浪制御を行っているといえる。

図示していないが、水深が小さくなるにしたがって特に長周期側で K_t は増加することが確認された。これは水深が小さくなると、浮体の動揺量が増加するため、浮体の運動によって波が伝播しやすくなるためであると考えられる。

b) 発電システムを取り入れた実験

図-7に浮体による波浪制御に及ぼすエネルギー回収システムの影響を示す。ギア群や発電機による負荷が増加するにしたがって、反射率 K_r が増加することが分かる。また、入射波周期が短く B/L_i が大きい場合、浮体の動揺が小さくなるため、負荷の増加による大きな違いは明瞭ではないが、入射波周期が長くなり、 B/L_i が小さくなると顕著な違いが確認できる。そして B/L_i が 0.15 付近で反射率 K_r が小さくなることも確認できる。一方、負荷が増加するとともに、透過率 K_t が減少していることが確認で

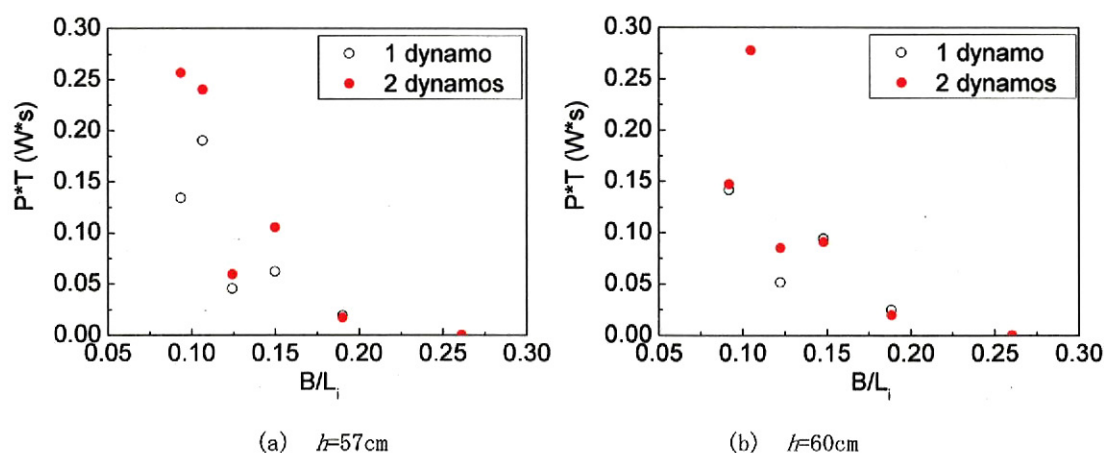


図-8 1周期当たりの電力量の変動特性

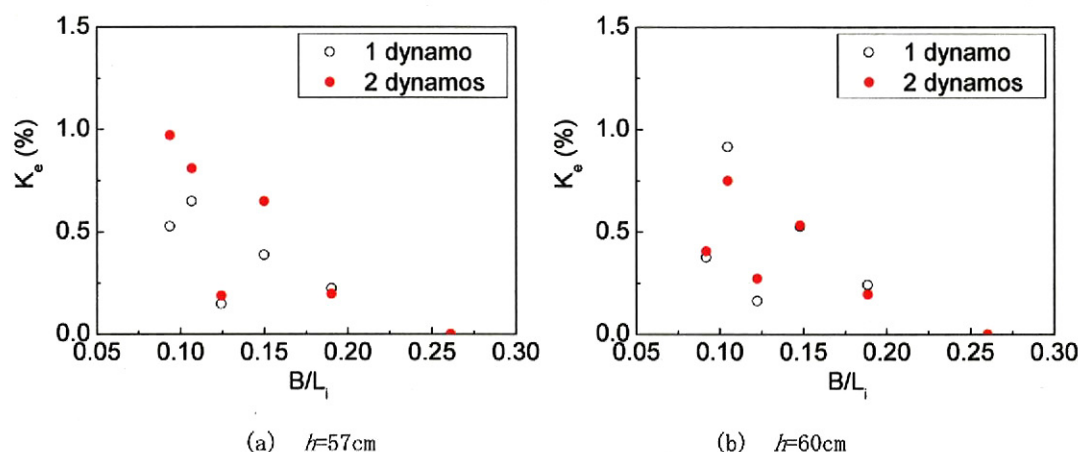


図-9 発電効率の変動特性

き、反射率 K_r が小さくなった B/L_1 が 0.15 付近の時、透過率 K_t は周りと比べて増加していることがわかる。また、負荷が増加するにしたがってエネルギー逸散率 K_d が増加していることが確認でき、動揺の大きい B/L_1 が小さい範囲では負荷によるエネルギー逸散率 K_d の差は大きくなるが、逸散率そのものは小さくなる傾向にある。

(3) 発電機能

本エネルギー回収システムによる発電能力を検討するために、発電機の設置個数の違いによる一周あたりの電力量を求めて比較した。結果を図-8 に示す。同図より、水深が大きいケースでは発電機を増加しても一周あたりに得られる電力量に大きな違いは見られなかった。これは発電機の設置個数の増加によって負荷が大きくなり、図-5 に示したように浮体の動揺量が減少するため、発電機一つあたりの発電量が減少したためである。したがって発電機の設置個数にともなう負荷の増加は、浮体の波浪制御機能を高めるが、発電量の増加に結びつけることは難しく、発電機の設置個数の変化による負荷の増減が、発電機能および波浪制御機能と密接な関係にあることが確認される。

以上のことから浮体式波浪制御構造物の波浪動揺

を利用した波エネルギーの回収は可能であるが、回収システムによる負荷や浮体の動的挙動、波浪制御機能は互いに連成しており、したがって発電効率を最適化することはこのような連成問題を考えながら見いだす必要がある。このような条件を模型実験で見いだすことは非常に多くの実験ケースを要し、必ずしも効率的ではなく、数値解析手法の開発が望まれる。

最後に、一周あたりに得られた電力量を入射波エネルギーから反射や透過したエネルギーを除いた値で除した値をエネルギー回収効率と定義し、図-9 に示す。図-9 より、本研究で開発した波エネルギー回収システムによる回収効率は長周期側で大きくなる。動揺特性や波浪制御機能も考慮すると、本システムのような浮体式波浪制御構造物からのエネルギー回収については、短周期側より浮体の動揺が大きい長周期側でより効果的といえる。ただし、回収率は最大で約 1% 程度であり、非常に小さい。本実験で使用した回収システムのギア群は微調整が完了しておらず、そのため非常に抵抗が大きいままのものであった。この抵抗を減らすことで回収率の向上は可能であると思われるが、回収率の向上に向けて更なる改善が必要である。

4. まとめ

本研究では浮体式波浪制御構造物の波による動揺を利用した波エネルギー回収システムの開発を目的として、傾斜板に支持された浮体模型に波エネルギー回収システムを取り付け、その影響による浮体の動的挙動および波浪制御機能の変化を検討した。以下に本研究で得られた主要な結論を述べる。

- (1) 本研究で使用した浮体式波浪制御構造物の透過率は、 B/L_f が 0.15 以上で約 0.6 以下となっており、比較的短周期の波に対して天端上で強制砕波を促す効果が期待できる。ただし、短周期側では動揺は小さく、エネルギー回収は効果的ではない。
- (2) 浮体式防波堤に波エネルギー回収システムを取りつけることにより、浮体への負荷が増大し、浮体の動揺は小さくなる。負荷による動揺の差は短周期側で小さい。一方、長周期側では動揺が大きく、また負荷の有無による変化も比較的大きい。そして、発電効率も相対的に高くなり、エネルギー回収には長周期側でより期待できる。
- (3) 浮体の動揺特性、波浪制御機能と波エネルギー回収システムの負荷は互いに連成する。そのため、最適条件を選定するため、これらを考慮できる数値解析手法の開発が望まれる。

最後になるが、本システムの一周期あたりのエネルギー回収率は非常に小さく、ギア群の抵抗の減少も含め、発電効率の改善が大きな課題として挙げられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、金沢大学自然科学研究科・石田啓教授に貴重なご助言・ご指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 高橋重雄：波エネルギー利用への再挑戦，海洋開発論文集，Vol.24，pp.7-12，2008。
- 2) 宮崎武晃・益田善雄・長崎作治：波力発電装置"海明"の研究開発，海岸工学講演会論文集，第26回，pp.660-

663，1979。

- 3) 大澤弘敬・鷺尾幸久・今井正明・岡山修三・中川寛之：沖合浮体式波力装置の発電出力の検討，海岸工学論文集，第45巻，pp.1216-1220，1998。
- 4) 鷺尾幸久・大澤弘敬・永田良典・藤井文則・古山裕喜・藤田俊助：沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」実海域実験その1 実験システム概要及び係留設置工事，海洋科学技術センター試験研究報告，第40号，pp.1-17，2000。
- 5) Mueller, M. and Wallace, R.: Enabling science and technology for marine renewable energy, Energy Policy, Vol.36, pp. 4376-4382, 2008。
- 6) 神吉博・有井士郎・福井喜一郎・奥圭介：ジャイロ式波力発電装置の消波効果に関する基礎研究，日本機械学会2007年度年次大会講演論文集，vol.3，pp.49-50，2007。
- 7) 田中博通・鈴木厚志・淀川巳之助：波力発電の現状と重力式(越波型)波力発電装置の開発，海洋開発論文集，第25巻，pp.359-364，2009。
- 8) Henderson, R.: Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter, Renewable Energy, Vol.31, pp.271-283, 2006。
- 9) Kofoed, J.P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E. and Sorensen, H.C.: Prototype testing of the wave energy converter wave dragon, Renewable Energy, Vol.31, pp.181-189, 2006。
- 10) 福本幸成，池谷毅，安野浩一朗，大山巧，石原孟，鈴木英之：洋上風況の観測結果と洋上風力発電システムの研究開発状況について，海洋開発論文集，Vol.24，pp.1-6，2008。
- 11) Mizutani, N., Rahman Md. A., and Shimabukuro, H.: Experimental Study on Interaction Between Waves and Submerged Floating Breakwater Supported by Perforated Plates, Annual Jour. of Civil Engineering in the Ocean, JSCE, Vol.20, pp.1271-1276, 2004。
- 12) 石田啓・高橋太郎・松田耕治・森田博紀・南利枝：新型波力水車の作成に関する研究，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，II-80-81，1997。
- 13) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治：不規則波実験による入・反射波の分離推定方法，港湾技術研究所資料，pp.1-24，1976。