

小型の波浪発電を想定した 浮体運動の最大化を目的とした浮体形状に関する研究

西澤 峻也^{*1}, 岡田 尚樹^{*1}, 村井 基彦^{*2}

Studies on the floating body shape to maximize the kinetic energy that are intended to be small wave power generator

Shunya NISHIZAWA^{*1}, Naoki OKADA^{*1} and Motohiko MURAI^{*2}

^{*1*} Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai,
Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, Japan

In late years, the action for the environmental problem becomes more and more active in the world. The country like Japan, being surrounded by the sea, is rich in ocean energy. It is relatively easy to get wave energy among ocean renewable energies. The wave power generation device to collect wave energy has been studied in many countries of the world including Japan. However, these studies have focused to make or improve the method of power generation and have not thought about the motion of the floating body. By working out a floating body which has higher kinetic energy than before, it is possible to increase the power generation efficiency of wave power. In this study, we check how the center of gravity position and the shape whose affect the motion of the floating body in waves and aim to improve the efficiency of the power generation using the piezoelectric element and pendulums.

Key Words : wave power generation, floating body, shape, piezoelectric element

1. 緒 言

近年世界全体で環境問題に対する取り組みがますます活発化している。とりわけ、四方を海に囲まれた日本では、豊富な海洋エネルギーの有効活用への期待は大きい。中でも波エネルギーは比較的容易に得られるエネルギー源といわれており、世界各国で波エネルギーを回収する為に多種多様な波力発電装置の研究が行われている。現在我々の研究している圧電素子を用いた振子式発電装置⁴⁾では、波浪中における浮体の運動を大きくすることによって発電効率を向上させることができると考えられる。今回は浮体形状に着目し、後述する設定範囲で運動が大きくなる形状の探索を数値計算で行った。さらに検討した形状の中で特徴的な運動特性を示した形状を複数選び、これらを用いて水槽試験を行った。尚、浮体運動と発電量の関係性を検討する目的で圧電素子を用いた発電試験も併せて行った。

2. 対象浮体の解析手法と浮体のパラメータの範囲

波浪中において、剛体浮体は6自由度の運動をするが、固有周期近傍では大きな運動を伴う。特に浮いている状態で復原力のある Heave, Roll, Pitch は浮体形状や重心位置、慣動半径(重量分布)などを工夫することで、固有周期の調整が可能である。さらに、これらの条件によっては固有周期近傍の広い範囲における応答が相対的に大きい状態が達成されることが期待される。そこで、本研究では浮体形状、重心位置、慣動半径(重量分布)をパラメトリックに変化させることで、それら個別の特性や相互の連成影響についての検討を行った。

* 原稿受付 2013年07月31日

^{*1} 横浜国立大学大学院 環境情報学府

^{*2} 横浜国立大学大学院 環境情報学研究院

E-mail: m-murai@ynu.ac.jp

2・1 解析手法

浮体運動の計算においては, 境界要素法に基づく線形の流体力計算と浮体を剛体と見なした運動方程式を連成させる. Fig.1 本研究における座標系および定義等を記す. 座標原点は浮心を通る鉛直線と水線面の交点とする. 波の進入角度は x 軸正方向から向かってくるものとする.

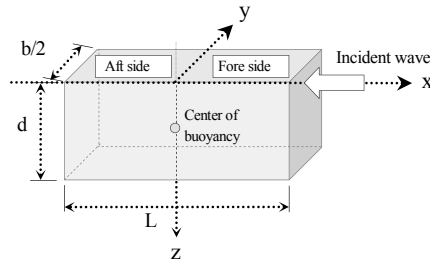


Fig.1 Coordinate system

境界要素法については, 柏木らの手法²⁾を参考に解析コードを作成した. 流体力の解析手法や運動との連成の取り扱いについては, 参考文献を参照されたい.

また, 運動の評価においては, 6自由度のうち Pitch に限定して検討する. 次式に示すように, 横軸を波長と浮体の長さ方向長さの比 (以下 ' λ/L ') とした周波数応答関数の 2 乗を適宜積分し, その積分量 (以下 ' 評価値 ') で大小を評価するとした.

$$\text{Evaluation value} = \int \left(\frac{X_s}{k\zeta} \right)^2 \frac{d\lambda}{L} \quad (1)$$

2・2 諸パラメータの設定範囲

本研究では浮体形状について検討を行うが, 浮体形状についてはその可能性が無数にある. そこで, 基本的な特性を把握するため, ここで扱う形状は xz 断面を有する柱型であると仮定し, まず xz 断面の形状について検討することにした. また, 形状変化の範囲についても, Fig.1 のように浮体の断面を前後の 2 つの部分に便宜的に定義し, それぞれの断面形状について, 次の制約条件を設け, その範囲内で検討を行った.

浮体側面形状は深さ方向に 1 周期となる三角関数で表現する. 位相をパラメトリックに変位させることで, 体積を一定に保ちながら断面形状の凹凸が出現する場所を連続的に変化させる. 今回用いた浮体の断面形状 (半分だけ図示) を Fig.2 に示す.

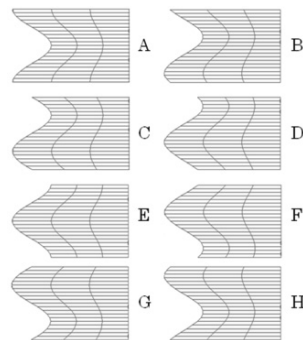


Fig.2 Floating shapes defined by trigonometric function.

重心位置および慣動半径は浮体運動に直接関わる要素であり, 互いに相関関係にある. 一般的に重心が低い位置にあると浮体は安定するが, 本研究の目的は浮体の運動が大きくなる状態を目指すので, 重心は GM が負にな

らない範囲で上方に設定する。一方、慣動半径は数値計算で算定する事は難しい。浮体形状と重心高さが等しい状態で、慣動半径だけを大きくすると回転運動の固有周期は長周期側へと移り、裾野が広がる傾向を示す。

本稿では評価値の算定にあたり、浮体形状の比較を横軸を ' λ/L ' とした応答関数の二乗の面積で比較する方法をとるため、積分範囲の中に固有周期がある方が評価値は高くなる。

本研究では重心高さおよび慣動半径をそれぞれ浮心高さおよび波進入方向の浮体最大長で除した割合で与えることにする。これらはそれぞれ次式で表せる。ただし、OG は水面からの重心高さ、OB は水面からの浮心高さであり、 κ は y 軸まわりの慣動半径である。これらを一定の割合で固定して浮体形状の探索を行った。

$$G_{ratio} = OG / OB \quad [\%] \quad (2)$$

$$c = \kappa / L \quad [\%] \quad (3)$$

2・3 数値計算結果

Fig. 2 で示した 8 種の浮体形状半断面を組み合わせて計算した結果を Fig.3 に示す ($G_{ratio} = 100 [\%]$, $c = 30 [\%]$, 排水量一定)。横軸は検討した浮体形状 (8×8 通り) を波上側の断面形状毎に並べており、縦軸は評価値である。赤で示しているものは前後対称の形状である。参考のため、箱型浮体 (同排水量で最も評価値が高くなる条件) の計算結果も示す。

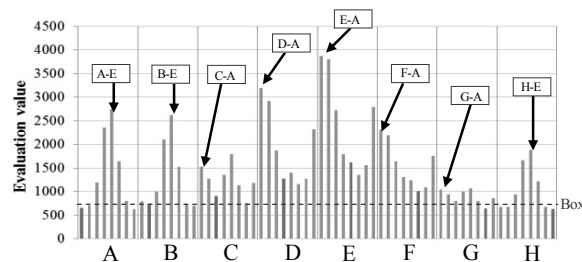


Fig.3 Evaluations of floating bodies defined by trigonometric function.

この中から 3 つの浮体形状 ("E-A", "A-E", "E-D") を選別し次章で述べる水槽試験で検証した。また、これらの形状を改めて浮体形状 1~3 とする。選択した形状の RAO (Pitch) を Fig.4 に示す。これらの特徴をまとめると次のようになる。

- ①E-A (浮体形状 1) 最も評価が高い形状
- ②A-E (浮体形状 2) 最も評価が高い E=A を前後反対にした形状
- ③E-D (浮体形状 3) 長周期帯での応答が大きく、他に比べて裾野が非常に広い

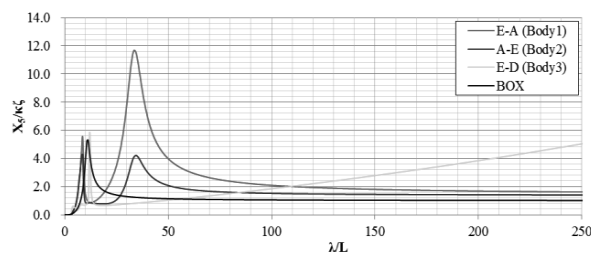


Fig.4 Response Amplitude Operators of the "E-A", "A-E" and "E-D".

3. 水槽試験

計算で得られた結果の整合性を確認するために水槽試験を行った。

3・1 試験概要

試験は波浪中で発電機を設置せず浮体のみを運動させることによって (1) 浮体形状の比較, (2) 同一形状における重心高さおよび慣動半径の影響の検討を行い, さらに浮体に発電機を搭載することによって (3) 圧電素子を利用した発電試験を行った。入射波は, 浮体のみを用いる試験においては波高を 1.0[cm]とし, 0.6[s]~4.0[s]の範囲で波周期を変化させた。また, 発電試験においては事前に設定した, 振子の固有周期周辺の 0.70[s]~0.85[s]の範囲の波周期で波高 1.0[cm]および 2.0[cm]の波を用いた。

3・2 試験配置

水槽試験は佐賀大学海洋エネルギー研究センターの水槽 (18×0.85×0.90[m]) で行った。浮体前後に長く柔軟なバネを取付けて係留し, 漂流を防ぐ。ただし, 上下揺れと縦揺れを拘束することがないように注意した。また, 波高計を浮体前後および真横に設置する。Heave および Pitch は, 小型 3 軸ジャイロセンサと浮体側面に設置した追跡カメラで計測した。入射波は規則波に限定し, 進入波周期を変更して試験した。

試験配置図を Fig.5 に示す。

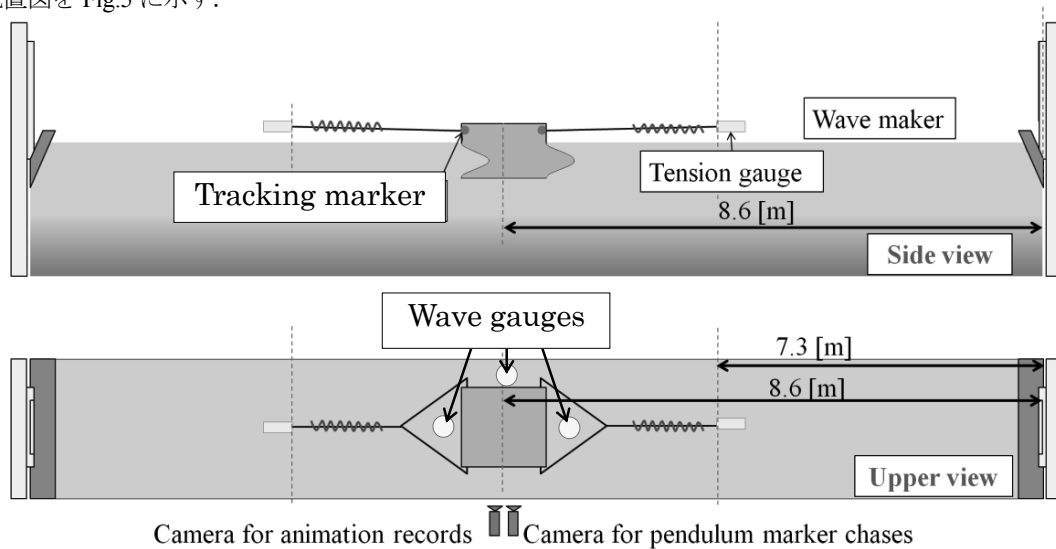


Fig.5 Arrangement of the experiment.

3・3 試験浮体

前述の数値計算結果をもとに 3 つの形状を選定した(Fig.6~8)。尚, 波は向かって右側から入射するものとし, 浮体形状 1 と浮体形状 2 は前後が逆向きのものである。浮体底部に板錘を置き, その上に 3 軸ジャイロセンサを設置した。また, 重心が浮心を通る鉛直線上にあるように, 自由に移動できる可動錘で位置を調節する。この錘は浮体の内部に設置できるようにした。Table.1 に試験で使用した浮体の諸元を示す。

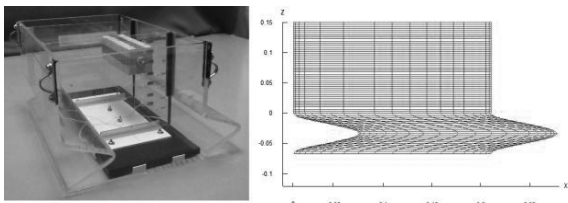


Fig.6 Specifications and picture of the floating body1 (E-A).

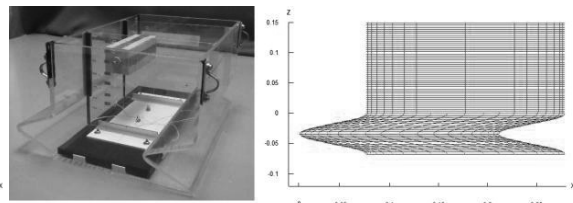


Fig.7 Specifications and picture of the floating body2 (A-E).

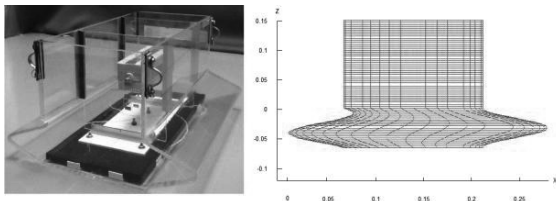


Fig.8 Specifications and picture of the floating body3 (E-D).

Table 1 Principal particulars of the floating bodies.

	Body1 (E-A)	Body2 (A-E)	Body3 (E-D)
L [cm]	26.7		
b [cm]	30.0		
D [cm]	15.7		
d [cm]	6.7		
displacement [kgf]	39.2		

3・4 発電装置

2011年に行われた実験⁴⁾で用いたものを改良した、圧電素子を用いた振子式発電機を用いて発電試験を行った。圧電素子は変形や衝撃を与えることで発電する(圧電効果)物質であり多種多様な形状に加工されている(Fig.9)。

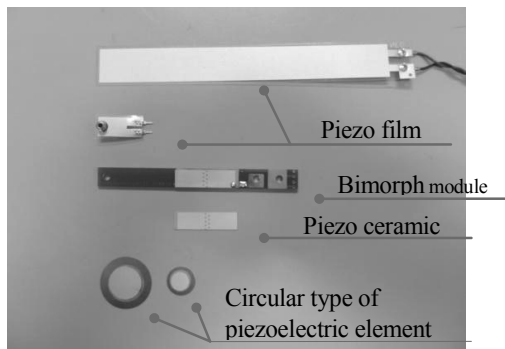


Fig.9 Variety of piezoelectric elements

圧電素子の発電量は素子の変形量と変形速度に依存する。圧電素子は Fig.9 に示すような圧電バイモルフモジュールを使用した。これは圧電セラミックが FRP 基盤の両面にプリントされており、並列回路となっている。また、この圧電素子を用いて Fig.10 に示す発電振子を作成した。この振子は、鋼球が基盤に衝突してから次の衝突までの間は基盤の固有周波数で振動する。この固有周波数は、基盤が固いため浮体運動の固有周波数より高いものとなる。発電振子は Fig.12 のように浮体に設置する。また、データの信憑性の向上のため 2 つ設置する。2 つの振子は区別のため Fig.12 の右側を P1、左側を P2 とする。

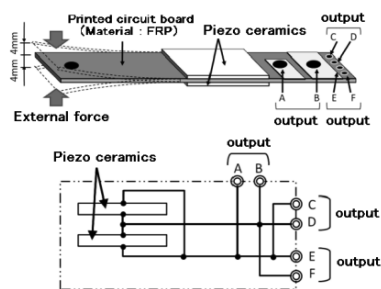


Fig.10 View and circuit diagram of a bimorph module



Fig.11 Picture of the pendulum

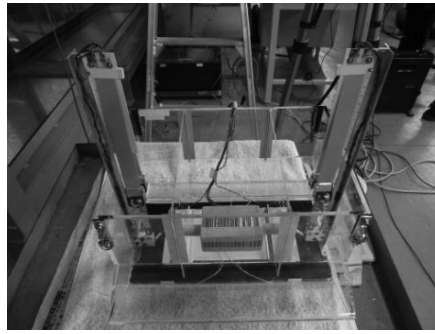


Fig.12 Picture of the pendulum on the floating body

3・5 試験結果

(1) 浮体形状の比較

Fig.13 は Pitch の固有周期 ($\lambda/L = 40$) で動揺する浮体形状 3 である。

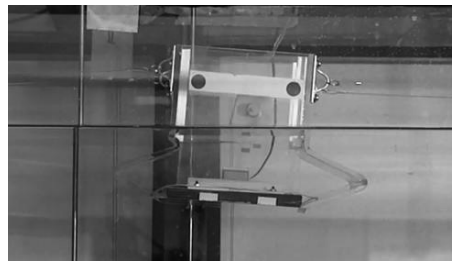


Fig.13 View of the floating body3 in the waves.

試験における重心高さ及び重量分布（慣動半径）について Table.2 に示す。形状の違いによる応答の変化を比較しやすくするため、浮心高さに対する重心高さ G_{ratio} および無次元化した慣動半径 c が 3 つの浮体の間で近い値となるように調節した。

Fig.14~16 に 3 つの形状における RAO (Pitch, Heave) , Fig. 17 に位相差 (Pitch)を示す。横軸は波長浮体長比 λ/L で、縦軸は無次元応答振幅を示す。示したグラフはそれぞれ Pitch と Heave を示しており、数値計算結果と試験結果を重ねて示す。

Fig.14~16 より、Heave に関してはいずれの浮体も試験結果と数値計算結果が概ね一致しており、無次元応答振幅は浮体形状 3 の固有周期近傍を除いて全体的に小さいことがわかる。

一方 Pitch に関しては、 $\lambda/L \leq 20$ 程度における結果は概ね一致しているが、これよりも波長が長くなると試験結果が数値計算結果より大きな値を示すという傾向が見られる。特に浮体形状 3 の固有周期近傍は、試験結果と数値計算結果が大きく異なる結果となった。この原因として使用している数値計算方法では再現しにくい形状であった、係留索の影響等の原因が考えられる。特に数値計算方法については、今回用いた浮体形状がいずれも水面付近で急激にくびれた形状をもつため、波を受けて動揺することで非線形な応答となってしまった可能性がある。特に形状 3 は他の形状と比較してくびれの斜度が大きいため、その傾向が他の形状に比べて顕著に現れたのではないかと考えられる。

次に、Fig.17 に示した位相差について考察を行う。位相の基準は入射波の谷が浮体の重心位置の真横に来た時としている。実線は数値計算結果で、マーカーは試験結果を示している。いずれの浮体も位相の特徴について、数値計算結果と試験結果の概ねの一致が見られる。また、各浮体とも応答のピーク付近において、位相の 90° 反転も確認できる。Body3 の結果に着目すると、応答のピークが見られる $\lambda/L = 40$ 付近で実験結果と計算結果の誤差が確認でき、これは計算が上手くできていないということも考えられるが、他の浮体においてもピーク付近ではある程度の誤差が確認できるため無視できる程度であるといえると思われ、計算結果がそれほど間違った結果を示しているということはないと考えられる。

今回試験した浮体形状はいずれも固有周期よりも長い波長帯で、無次元化した応答振幅が1.0よりも大きいという結果となった。特に形状3は他の2形状と比較して固有周期が長い波長帯にあるため、同じ海域で同程度の応答振幅を要求されたとき、波に対して相対的に装置を小型化の可能性があることが期待できる。

上述した点を考慮すると浮体形状3はこの3形状の中で最も発電装置に適した形状であるといえる。

Table 2 Principal particulars of the floating bodies.

	Body1	Body2	Body3
G_{ratio} [%]	65		65
GM/L [%]	9.9		6.5
GM [cm]	2.6		1.7
c [%]	71		79
κ [cm]	19		21

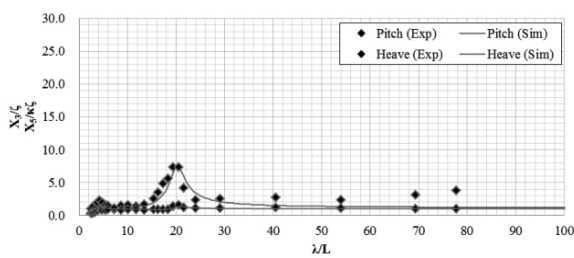


Fig.14 Response Amplitude Operators of the floating body1.

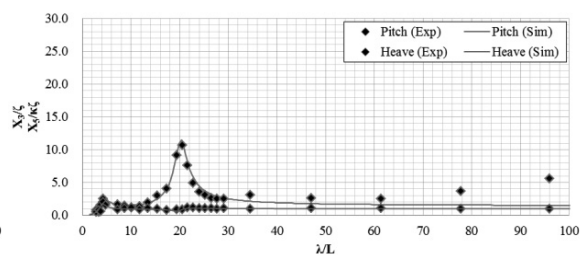


Fig.15 Response Amplitude Operators of the floating body2.

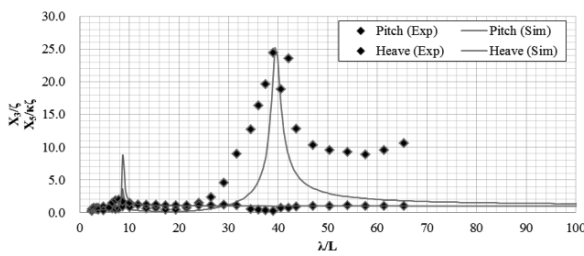


Fig.16 Response Amplitude Operators of the floating body3.

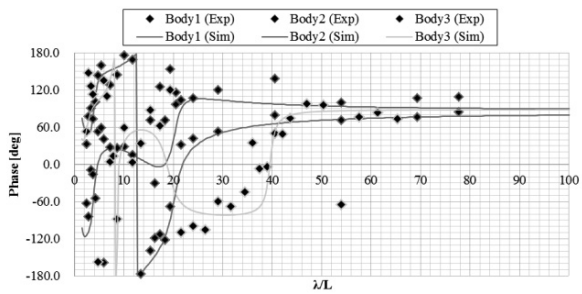


Fig.17 Phase difference of the floating body1,2 and 3.

(2) 同一形状における重心高さおよび慣動半径の影響

次に重心高さおよび慣動半径が浮体の動揺に与える影響に関して検討を行う。これは特定の浮体形状で重心高さを3箇所に移動して試験した。このときの諸元を Table.3 に示す。この実験には Body1 を用いた。

Table 3 Principal particulars of the floating bodies.

	Case1	Case2	Case3
G_{ratio} [%]	69	67	65
GM/L [%]	17.6	14.5	9.9
GM [cm]	4.6	3.8	2.6
c [%]	53	61	71
κ [cm]	14	16	19

Table.3 に示すように Case1 が最も重心が低く、Case3 が最も高い位置にある状態である。また Fig.18~20 に Case1~3 の3状態での試験結果の RAO(Pitch, Heave)を、位相差(Pitch)を Fig.21 に示す。

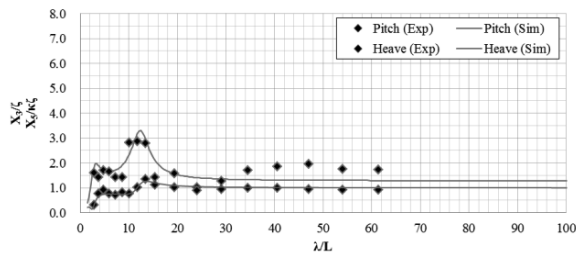


Fig.18 Response Amplitude Operators of the Case1.

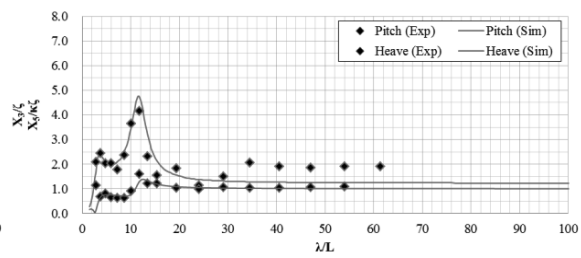


Fig.19 Response Amplitude Operators of the Case2.

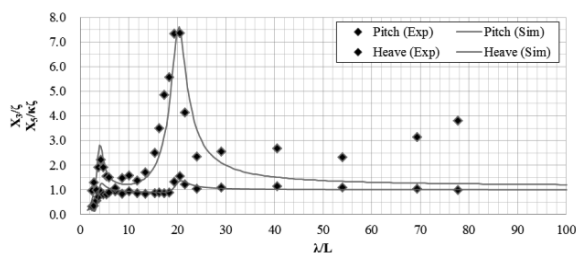


Fig.20 Response Amplitude Operators of the Case3.

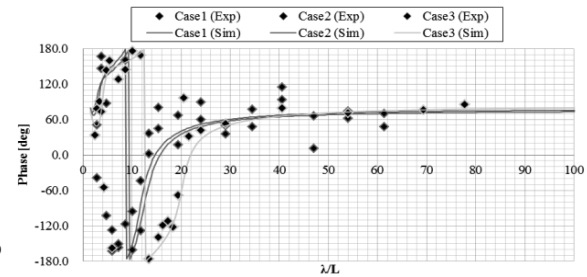


Fig.21 Phase difference of the Case1, 2 and 3.

Fig.18~20 より, Case1~3 の変更点は重心位置を鉛直方向に移動させただけなので Heave の変化は Pitch との連成箇所を除き, ほとんど確認できない. Pitch は前述した結果と同様に, $\lambda/L \leq 20$ 程度における結果は数値計算と概ね一致しているが, $\lambda/L \geq 50$ 程度になると試験結果が数値計算結果より大きな値を示している. 固有周期に関しては, 重心が高くなるにつれて長周期 (長波長) 側へとシフトしている. また, 無次元応答振幅は増加する傾向にあることが分かる. しかし, Case 1~3 の変化の過程で浮体高さに対する重心高さ G_{ratio} および無次元化した慣動半径 c は, ほぼ一定の割合で変化していくのに対して, Case 1 から Case 2 および Case 2 から Case 3 にわたって変化する RAO の変化率は一定ではないことがわかる. ピークが 2 箇所あることや固有周期よりも長い周期 (長波長) 帯で無次元応答振幅が増加傾向である等の特徴は類似しているが, ピークの位置や応答が小さくなる範囲等が一定の割合で変化していない. 固有周期近傍から長周期 (長波長) 帯にかけて応答の大きさを比較すると, Case 1 と Case 2 は同程度であるが, Case 3 はそれに比べて比較的大きな応答を示している. しかし, 固有周期近傍から短周期 (短波長) 側の応答振幅の大きさを比較すると, Case 1 と Case 2 は同程度で長周期 (長波長) 帯の方と同様であるが, Case 3 はそれに対して比較的小さい. この結果より, 重心高さおよび慣動半径と応答振幅の関係は必ずしも比例しないといえる.

次に, 位相差について考察を行う. 位相の基準は入射波の谷が浮体の重心位置にきた時としている. 実線が数値計算結果でマーカーが試験結果を示している. Fig.21 より位相差に関しては, Case 1, Case 2 と Case 3 では違いが見られるが, 一方で全体的な変化の特徴については類似点が見られる. (1)で見られたのと同様この場合もピーク付近での位相の反転が見られる. 重心位置を変更したことによる位相の変化はピークの移動によるものが殆どであり, そのほかの要因はあまり見られないといえる.

(3) 圧電素子を利用した発電試験

圧電素子振子を用いた発電実験結果から, 本浮体の発電効率の評価を行う. 試験は Body1Case 3 に発電振子を二つ設置して前述のように $0.70[s] \sim 0.85[s]$ の範囲の波周期で波高 $1.0[cm]$ および $2.0[cm]$ の入射波を用いた. Body1Case 3 にはもう一つ運動のピークが存在するが, 今回作成した振子の発電に適した振動周期でないため, 発電を行うことができなかった.

発電の結果得られた電圧の積分値から, 単位波高, 単位時間 (波高 $1.0[m]$, $1.0[s]$) あたりの発電電圧を算出することで発電性能の評価を行った. 算出した電圧とその時の浮体の応答振幅のグラフを Fig.21 に示す. WH は試験時の波高を表し, P1, P2 は前述のようにそれぞれの発電振子を表す. Fig.22 を見ると値がやや異なるが傾向としては一致している. このため, この結果は妥当な計測結果だといえる.

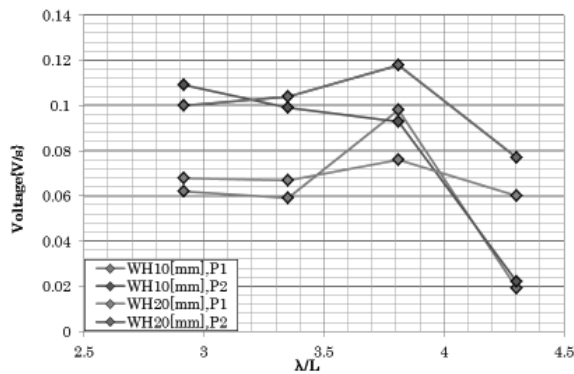


Fig.22 magnitude of the voltage

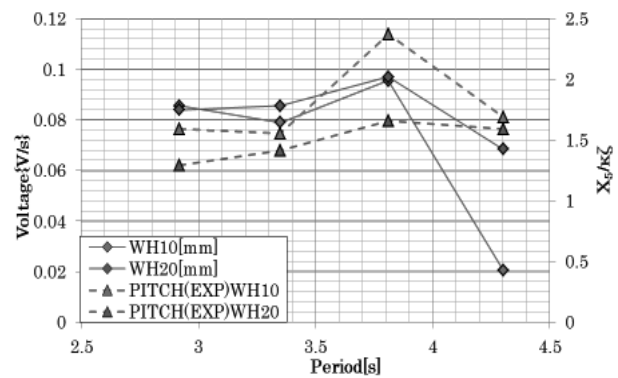


Fig.23 Comparison with experiment

次に各振子の波高毎の電圧の平均を用いて、浮体の応答振幅(PITCH)との比較を Fig.23 に示す。波高毎の電圧の平均を実線で、波高毎の応答振幅を破線で表わしている。Fig.23 から、波高 10[mm]と 20[mm]での結果を比較すると 2つの結果に大きな違いは確認できなかったため、波高が変化した場合も単位波高あたりの発電電圧はあまり変わらないということを確認することができた。また、発電した電圧が最大の点において浮体の PITCH 運動も最大になっているなど二つの間には相関がみられるため、発電電圧は浮体の PITCH 運動に関係していると言える。

一方で

次に、求めた電圧を用いて最大発電効率を求める。用いる電圧は今回の試験で最大の発電電圧を示した P2 の周期 0.8[s]の電圧を用いる。発電効率は、発電振子 1 つ分の幅を 9.0[mm]としてその範囲に 1.0[s]あたりに作用する波エネルギーで発電によって得られたエネルギーを除することによって得る。

受ける波エネルギーは浮体前後に取り付けた計測機で得た波高を用いる。尚、浮体前後での波エネルギー減少分は全て浮体に吸収されたものと仮定する。浮体前面(波入射方向)の波高を H、波を受ける幅を S とすると、浮体に吸収される波のエネルギーは次式となる。

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H S \quad (4)$$

発電電圧電素子が生成する電気エネルギー E_p は圧電素子の静電容量 C[F]を用いて次式のように求められる。

$$E_p = \frac{1}{2} C \bar{V}^2 \quad (5)$$

最後に次式のように発電効率を求める。

$$\eta = \frac{E_p}{E_w} \quad (6)$$

このように計算を行った結果、周期 0.8[s]において発電効率は 0.00524%となった。参考までに 2011 年の実験での最高発電効率は、周期 1.3[s]のときの 0.0186%であった。発電効率は劣っているが、今回の研究で作成した浮体はもう 1つのピークがあるので、それを活用することでさらに発電効率を伸ばすことができる可能性がある。

5. 結言

先の研究¹⁾で、圧電素子を用いた波力発電について研究を行い、振子を用いた発電が可能であることを確認した。本稿はその続編であり、発電効率の向上のため浮体についての検討を行い、数値計算によって検討を行った複数の浮体形状の中で特徴的な動揺特性のある形状を用いた水槽試験を実施した。その結果次の知見を得た。

- ・今回試験した浮体形状の Pitch に関して、いずれも固有周期より長い周期（波長）帯での無次元応答振幅が 1 より大きい。特に形状 3 は固有周期が浮体長に対して長い周期（波長）帯にあるため、応答振幅は大きく、波に対する位相差が幅広い周期帯で安定している。これより同じ海域で同程度の応答振幅を要求されたとき、装置を小型化することが可能となる
- ・浮体形状を固定して重心高さを変更した結果より、重心高さおよび慣動半径と応答振幅の関係は必ずしも比例しないことがわかった
- ・発電実験を行った結果、振子を用いた発電では浮体の運動周期によって発電量が大きく異なることがかくにんできたため、浮体の運動特性を十分生かすことができるような発電装置の工夫が必要である。

今後は、GA を組み合わせる等でさらに広範囲の浮体形状を効率的に探索し、より効率の良い発電を可能にすることを旨とする。

文 献

- (1) 岡田尚樹, 村井基彦: 波浪中での運動エネルギー最大化を目的とした浮体形状に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号, 2012, pp.359-362.
- (2) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会編: 実践 浮体の流体力学前編—動揺問題の数値計算法, 成山堂, 2003, pp.99-196.
- (3) 柏木正, 西松早紀, 酒井克弘: 内部回転振子型浮体による波エネルギーの吸収, OES23-051, 2012, 第 23 回海洋工学シンポジウム.
- (4) 岡田尚樹, 谷部祥一郎, 村井基彦: 浮体と振子の運動による圧電素子を用いた発電実験, OTEC: 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告 第 17 号.