

## S1-4

**海洋再生可能エネルギー利用のため複合浮体システムの研究**  
**要素研究と新規プロジェクト立ち上げ**  
**The Floating Complex System for Utilization of Ocean Renewable Energy**  
**Sub-studies and standing up the new project**

居駒知樹<sup>1\*</sup>, 羽多野正俊<sup>2</sup>, 塩野光弘<sup>2</sup>, 西川省吾<sup>2</sup>, 近藤典夫<sup>2</sup>, 田畑昭久<sup>2</sup>, 恵藤浩朗<sup>2</sup>  
 Tomoki Ikoma<sup>1\*</sup>, Masatoshi Hatano<sup>2</sup>, Mitsuhiro Shiono<sup>2</sup>, Shogo Nishikawa<sup>2</sup>,  
 Norio Kondo<sup>2</sup>, Akihisa Tabata<sup>2</sup> and Hiroaki Eto<sup>2</sup>

Abstract: This reports the circumstance of the symbolic research project on the ocean utilization system. The project mainly focuses ocean renewable energy and the floating system for it. As ocean renewable energy, the project develops some devices of wave energy converters and marine turbines. The large floating structure which is a complex system can be installed with marine turbines as well as wave energy converters. Besides, in the project, R&D of AUV started. Based on the project researches, the joint research for actual sea tests is in progress together with Niigata prefecture.

### 1. はじめに

平成 22 年度よりスタートした本研究プロジェクトも 3 年目を迎えた。「海洋利用システム」として走り出した本研究プロジェクトであるが、「海洋利用」の範疇は極めて広い。陸上利用に対応する意味合いを考えれば極めて総合的な考えが必要である。その中で、近年話題となっている「海洋再生可能エネルギー利用」に焦点をあてて本研究プロジェクトはスタートした。

海洋再生可能エネルギー（以下、海洋エネルギー）には波力発電、潮流発電、海流発電や海洋温度差発電などがある。洋上風力発電、特に浮体式洋上風力については研究分野としてはこれに含めて説明されることも多い。それぞれの発電方式は波や流れのパワーを最終的に電力に変換するが、より効率的にその変換を実行するために、波や流れと機械的変換装置部分の相互作用をさまざまな形で検討する必要がある。通常は 1 次変換と呼ばれる過程を通して、発電機での 2 次変換によって電気エネルギーとして利用できる形になる。この過程だけを見ても、波や流れとの相互作用、機械的装置の効率、発電機自体の効率と発電後の蓄電や送電といった全体システムを考える必要がある。さらに、装置を搭載する構造物だけをとっても、海上にそれを設置するために、波浪中・流れ中の構造物の耐流体性能や構造性能を考える必要がある。

これらは構造物を設計するために必要な技術といえるが、海洋エネルギー利用のもつ課題は発電コストにある。初期コストは当然であるが、現実問題としてコストを増加させる要

因は維持・管理コストである。これに必要な技術が向上しなければ、海洋エネルギー利用の実現は難しい。

本学部において海洋工学に直接関わる研究は極めて小規模であった。しかしながら、海洋構造物や海洋エネルギー利用に必要な要素技術研究がなかったわけではない。本研究プロジェクトはそのような要素研究を海洋エネルギー利用を本学部内で推進するためにスタートし、その芽をこの 3 年間で築いてきた。

本報告では、本研究プロジェクトの研究内容・成果の概要を紹介するとともに、本研究プロジェクト発の自治体との連携研究立ち上げについて紹介する。

### 2. 浮体コンセプト

ベースとなる浮体式構造物はポンツーン型を想定し、その規模は大型浮体と呼ばれるような数百メートル以上を考える。ポンツーン型は波浪中における動揺性能がセミサブ型よりも劣るが、波力発電装置による浮体動揺へのダンパー効果を考慮して、大きなオープンデッキ部を利用可能であるポンツーン型を考えた。

Fig. 1 はそのイメージ図である。500m×250m程度の長方形ポンツーンであり、浮体周縁部には振動水柱型波力発電装置を搭載し、デッキ部を利用して太陽光発電、さらに風車による風力発電も考慮可能である。浮体下部には潮流発電用の水車を搭載できる。

多くの海洋エネルギー利用の提案では、独立した波力発電装置や潮流発電用水車が個々に独立して設置され、発電ファームが構成される、ということになっている。しかしながら、設置海域の水深が深くなり、個々の装置の係留装置に要されるコストの増大を考慮すれば、1 つの浮体に複数の装置が搭載されることは初期コストのみならず、稼働後の維持・管理においても海

上移動や装置への乗りこみの観点から明らかに有利である。

1 つの大きな浮体上（下部も）に複数の風車や水車を設置するのは面積的な制約を考慮する必要がある。水平軸型（主にプロペラ型）では直径の数倍以上の横方向の間隔や 10 倍以上の前後の間隔が必要となるなど、搭載可能基数は大きく制限される。そこで、水車と風車ともに垂直軸型（主にダリウス型）を提案した。

このような浮体を設計する際必要な要素技術は個々の発電装置性能と浮体自身の波浪中・流れ中性能を検討する必要がある。また、設置後の維持・管理に必要な技術として、メンテナンス用海中ロボットと構造診断手法も長期的なコスト削減の観点、すなわちライフサイクル・コストの観点から極めて重要である。

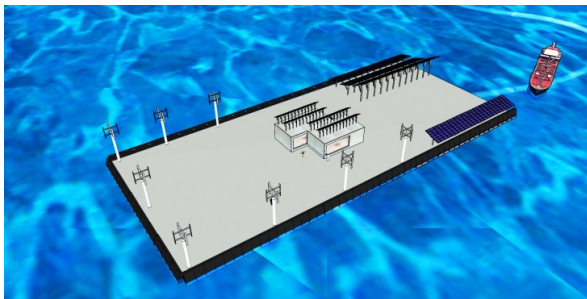


Figure 1. Conceptual image of ocean energy complex

### 3. 要素研究

#### 3. 1. 浮体の耐波性能と波力発電装置

基本となる浮体にポンツーン型を採用し、そこに振動水柱型波力発電装置を搭載する、ことで現実的になどの程度の発電出力を期待できるのかは大きな問題であった。これが非現実的な数字の場合には本研究プロジェクトのコンセプトそのものが成立しなくなる。そこで、500m規模の浮体において発電容量の可能性について検討した。なお、本検討には水槽実験との比較によって検証された線形ポテンシャル理論を基本として開発した方法を適用した。

Fig. 2 は長さ 500m、幅 250m のポンツーン型浮体の周縁部に 146 基の装置を配置したイメージである。1 つの装置は 10m 四方の区画を有し、実際には浮体内部があるため波力発電用の振動水柱分は 6m 四方となっている。Fig. 3 は Fig. 2 の浮体の  $x$  軸に平行に規則波が入射した際の波パワーから圧縮空気パワーへの変換効率を縦軸に示したものである。横軸の  $L$  は浮体長さ、 $\lambda$  は入射波の波長である。500m の浮体では横軸 8~12 は波周期 6 秒~5 秒程度の範囲である。Fig. 3 中の凡例は振動水柱上部で圧縮空気を生成するための空気室高さ

であり、この設定は耐波設計上重要であるとともに、波パワーの吸収特性にも影響することがわかる。

この周期域での平均的な 1 次変換効率を 200% 程度（入力幅を 250m とするが、吸収箇所は 4 辺となるため）と仮定し、発電機出力までの 2 次変換効率を 45% 程度と仮定すれば、発電出力は 11MW 程度を期待できる。ただし、この見積りは有義波高 4m の不規則波中での想定であるので、最大出力ではなく年間の平均値に近い。1 基あたりでは 64kW 程度を期待できる。さらに、実際には斜波中での出力はさらに 2 倍程度大きくなるため、十分な発電容量見込める可能性が高い。

Fig. 4 は幾つかの振動水柱の配置による規則波中での浮体の弾性応答の結果を比較した。Model 2 が Fig. 2 の装置の配置時の結果である。縦軸は応答振幅  $\zeta$  を入射波振幅  $a$  で無次元化した値である。平面的に弾性変形するため、 $y=0$  上における値を代表して示した。Pontoon の結果は波力発電装置が一切搭載されていない一般的なポンツーン型浮体であり、変形量が多いことが明らかである。Model 2 はおおよそ 1/2 程度に動揺量が低減される。ただし、この程度は入射波周期によってことなるので、どの波周期域でも振動水柱のダンパー効果によって応答が低減するわけではない。しかし、装置の負荷の制御によって、応答特性を変化させたり、少なくとも設計荷重に対する最大値を低く抑えることが可能になるという点で、本研究の当初の目的を達成できると考えている。

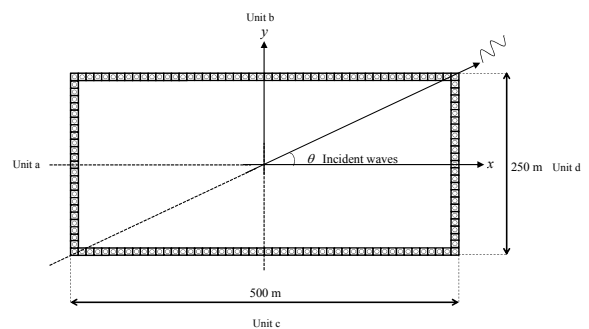


Figure 2. Horizontal arrangement of OWC type WECs

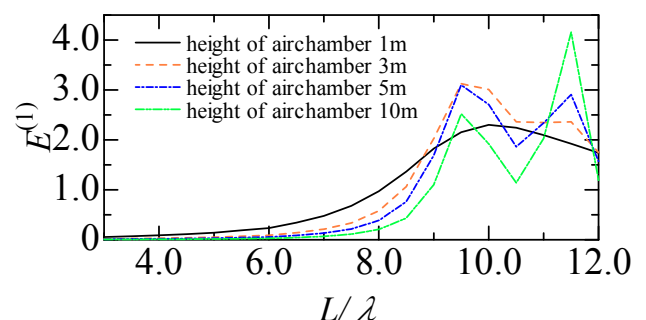


Figure 3. Efficiency of primary conversion from wave power to power of compressed air in head sea conditions

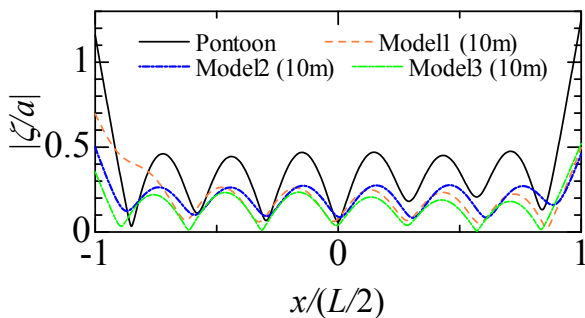


Figure 4. Comparison of distribution of amplitude of vertical displacement due to elastic motion on  $y=0$

### 3. 2. 衝撃荷重および構造診断

基本的な浮体の波浪中性能の検討は線形ポテンシャル理論を基本とした手法で行われるのが一般的である。しかしながら、一発大波や浮体上甲板への海水打ち込みなどの非線形現象を扱うには、相応の手法の検討が必要である。一般的には弱非線形過程から強非線形モデルまでであるが、CFD 計算に代表される強非線形モデルが有効な手段であることは間違いない。幾つかの手法のうち、CIP 法を適用した方法の開発を行っている。Fig. 5 に気液二層流とした場合のダム崩壊モデルによる計算結果のスナップショットの一例を示す。空気巻き込みによる影響を Tangent 関数の導入によりより高精度化した。この手法は浮体デッキへの海水打ち込みや浮体上部構造物への衝撃荷重の評価に適用できる。

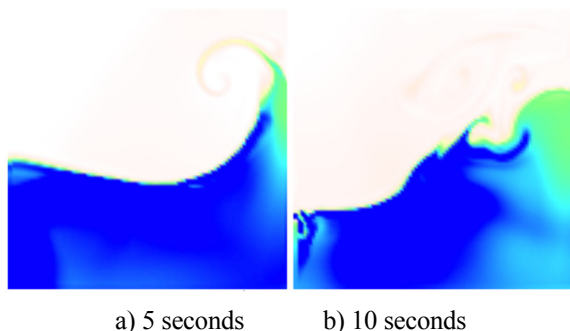


Figure 5. Examples of two-phase flow of air and water with tangent transform

浮体設置後の構造診断は浮体規模やそれ自身が海上に存在することなどから容易でない。そこで、局所的な構造損傷をモニタリングするシステムを開発中である。方法としては、健全時の振動特性との比較から損傷同定を行っていくというものであり、構造物の損傷個所や係留システムの損傷個所やその状態を予測するシステムである。

### 3. 3. 海中ロボット開発

理工学部において海中ロボット技術の実績を構築するために、その製作を進めている。メンテナンスを目的としているため、目視観測のためのカメラとサンプル採取を可能とするためのアーム搭載型での開発を進めている。形状は魚雷型である、AUV (autonomous underwater vehicle) が開発されている。Fig. 6 は浮力試験を実施している様子である。



Figure 6. Buoyancy test of one part of AUV body

### 3. 4. 潮流発電用水車

垂直軸型水車であるダリウス水車と並行して可変ピッチ機構を導入した水車の研究を進めている。サイクロイダル機構を導入することで Fig. 7 のようなピッチ角制御を機械的に行える。各々の位置でのピッチ角は翼素運動量理論から求められた最適ピッチ角に極めて近い。これを実現する水車模型を Fig. 8b のように制作した。Fig. 8a は通常のダリウス水車である。この模型を用いて回流水槽にて負荷試験から Fig. 9 の水車模型自身のパワー係数 (水車効率) と強制回転試験から Fig. 10 の本ピッチ角制御における水車パワーの理想値を求めた。製作上、機械的損失が大きいため実際の効率は Fig. 9 のように 10%程度と低い、Fig. 10 から理想値としては 45%の効率を超える、非常に高精度な水車を製作できる可能性が示された。また、自由表面での造波による損失も大きいため、より高い性能を期待することもできると考えている。なお、Fig. 9 では実験値と CFD 計算の結果を比較した。CFD 計算の整備も進めている。

### 4. 新潟県との海洋エネルギー研究協力協定

海洋エネルギー研究を飛躍させるためあるいは装置の実現を目指すためには実験室レベルの実証だけでなく、実海域での実証実験が必要である。このことは規定化される方向で世界での標準化が進んでいる。新潟県は日本海に浮かぶ粟島を海洋エネルギー実証フィー

ルドとして整備することを検討している。また、県を挙げての海洋エネルギー研究を本格化するための準備を進めている。本研究プロジェクトグループはその事業への技術協力をする立場として参加することになった。さらに、日本大学理工学部として新潟県との研究協力協定を締結することで話を進め、最終段階に入っている。新潟県は若干の潮流と冬季の恵まれた波浪条件、海上風条件をもつ比較的海洋エネルギー利用には恵まれた海域を有する。

本年度中には潮流観測を主目的とした水車付の小規模浮体を設置することで現在準備中である。

### 5. まとめ

本研究グループは要素研究そのものからの立ち上げがほとんどであったが、実質 2 年間で具体的な研究に発展させるための準備が整ったといえる。予算の多くを情報収集、水車研究、海中ロボット開発に投入してきたが、その結果として新潟県との研究協力につなげることができた。新潟県とは本研究プロジェクトのコンセプトである、波浪、潮流と風力を含めた複合浮体の実証まで協働で進めたいという話になっている。

### 参考文献

[1] Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Chang-Kyu Rheem, Hisaaki Maeda and Yuka Watanabe, "Primary Conversion Efficiency of OWC Type WECs Installed on a Large Floating Structure," Proceedings of the ASME 2012 31st International Conf. on OMAE2012, file-OMAE2012-83337, 2012.

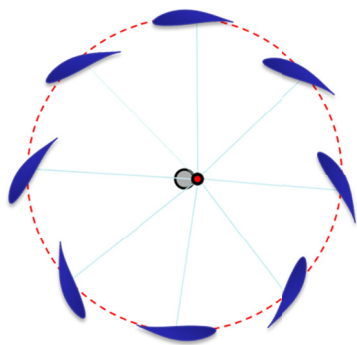
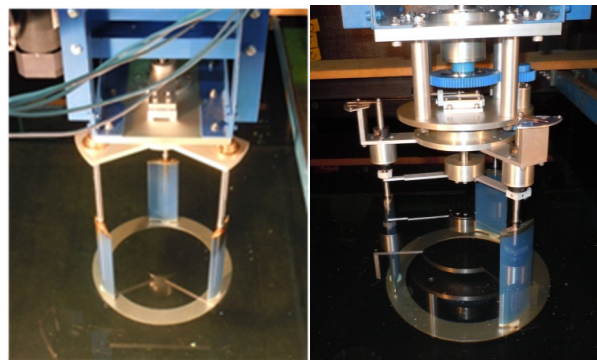


Figure 7. Variable-pitch-controlled blade behaviours



a) typical Darrieus type      b) variable-pitch type  
Figure 8. Experimental models of water turbine

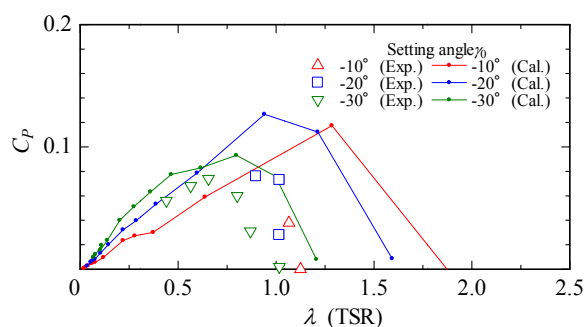


Figure 9. Net power coefficients of pitch-controlled turbine model

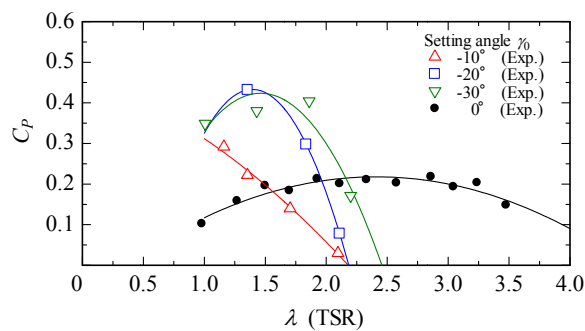


Figure 10. Gross power coefficients of models