岸壁設置式 OWC 型波力発電装置の MPS 法による 数値シミュレーションに関する基礎的研究

笹原 裕太郎¹・増田 光弘²・南 清和²

A Fundamental Study on Numerical Simulation of the Coastline OWC Type Wave Energy Converter by the MPS method

Yutaro SASAHARA, Mitsuhiro MASUDA and Kiyokazu MINAMI

Abstract

This research investigates applicability of the two-phase flow MPS (Moving Particle Semi-implicit) method to performance analysis of the OWC (Oscillating Water Column) type WEC (Wave Energy Converter). Estimating detail behavior of an OWC type WEC under any sea state including heavy weather is important for evolution of development of OWC type WECs. Basic applicability and effectiveness of the present method is indicated by numerical simulation of reproducing a coastline OWC type WEC model against a large wave. In addition, arrangement of air particles for setting computational domain is examined. Numerical results about wave impact force analysis by the simulation that air particles are arranged small agree well with the results by the simulation that air particles are arranged full. The result indicates that the present method with pseudo air pressure can reduce computational costs. The full arrangement simulation indicates effectiveness to response analysis of OWC type WECs in the severe wave by the present results including numerical results of response in the chamber. In case of carrying out the small arrangement simulation, suitable boundary condition is required at the end of duct for improving calculation accuracy of response analysis in the air chamber.

Keywords : *Ocean Engineering, Wave Energy Converter, Oscillating Water Column type, MPS method*

キーワード: 海洋工学, 波力発電, OWC 型, MPS 法

1. 緒言

港湾地域は大規模インフラや物流システムが集中する産業活動の拠点としての機能を有していることから、低炭素化社会の実現に向けた温室効果ガスの排出量削減および災害時等における電力需給ひっ迫時における機能保持が課題となっている。そのような状況の中で、港湾地域における海洋再生可能エネルギーの利活用に対する関心が高まっている。本

研究では、港湾地域で利用可能な海洋再生可能エネルギーの中で、波エネルギーに着目した。波エネルギーは他の再生可能エネルギーと比較して、単位面積当たりのエネルギー密度が高くエネルギーの変動が小さいといった利点がある⁽¹⁾。波エネルギーを電力へ変換する波力発電装置は、その変換過程の違いにより、振動水柱型、可動物体型および越波型の3種類に分類される⁽²⁾。上記の3種類の発電形式の中

¹ 学生会員 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 応用環境システム学専攻
(〒135-8533 東京江東区越中島 2-1-6) d142009@edu.kaiyodai.ac.jp

² 正会員 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 海事システム工学部門

でも、振動水柱 (Oscillating Water Column: 以下、OWC) 型波力発電装置は、海面下に可動部を持たず比較的簡素な構造であるため設置やメンテナンスにおいて他の形式と比較して優位性があると考えられる。また、上記の特徴に加え、大波高波浪の入射時に空気室内の空気が衝撃力を緩和することから荒天下における安全性が高い形式として認識されている⁽³⁾。そのため、わが国では益田式航路標識ブイ⁽⁴⁾をはじめとして、OWC 型波力発電装置の研究開発が進められている。現在、永田ら⁽⁵⁾や Ikoma et al.⁽⁶⁾により性能向上に向けた数値シミュレーションによる性能評価手法が提案されている。

一方で、実際の荒天下において大波高波浪が構造体および空気室に及ぼす影響や、装置への海水打ち込みによる空気ダクトおよびタービン部への浸水可能性といった装置の安全性を評価するための手法は十分に確立していない。1998 年、沖合浮体式波力装置「マイティーホエール」⁽⁷⁾は実海域実験中に台風 6 号の接近による高波により通信アンテナや通気ダクトからの浸水に伴う補助発電機等の損傷を被ったことが確認されている⁽⁸⁾。荒天下における大波高波浪はスラミングや海水打ち込み、構造体前面での砕波にともなう衝撃圧といった非線形性の強い水波と構造体の連成現象を引き起こす。これらの現象は従前の線形理論に基づく数値計算手法や水槽実験では再現が困難な場合が多く、強非線形現象の再現に優れる数値計算手法を用いる必要がある。

そこで著者らは自由表面のトポロジー変化や流体一構造体の連成解析に優れる粒子法の一つである MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法に着目し、OWC 型波力発電装置の波浪中応答解析への適用を検討している。MPS 法はこれまで、Shibata et al.⁽⁹⁾、橋本ら⁽¹⁰⁾および増田ら⁽¹¹⁾によって船舶海洋工学分野に関する強非線形現象解析への有効性が示されている。一方で、OWC 型波力発電装置の波浪中応答解析に際しては、強非線形現象に対する応答解析への適用例は著者らの知る限り前例はない。

本研究では、MPS 法を用いた OWC 型波力発電装置の荒天下を含む総合的な環境下での波浪中応答解析の確立を最終的な目標として位置付けている。著者らはこれまで計算精度を向上した気液二相流 MPS 法を開発し、一発大波下での沿岸固定式 OWC 型波力発電装置の応答解析への有効性について検討してきた⁽¹²⁾。しかしながら、当該研究では空気粒子の分布が空気室内およびノズル部近傍のみとしており、構

造体前面での空気巻き込みを伴う衝撃砕波圧の発生可能性について考慮できていなかった。

本論文では、空気粒子の配置を計算領域全体へ拡張させ、空気巻き込みを伴う砕波およびその構造体への衝突力を表現するための 2 次元数値シミュレーションを実施する。そして、本開発手法のさらなる有効性について検討を行う。一方で、計算領域全体への空気粒子の配置は将来的な 3 次元大規模計算を実行する際に爆発的な計算コストの増加を招くことから、空気粒子を空気室内部周辺のみならず空気粒子を配置した場合の計算結果との比較により、効果的な空気粒子配置についての考察を行う。

2. 気液二相流 MPS 法

2.1 本手法の概要

本研究で用いる気液二相流 MPS 法は、著者らが独自に開発⁽¹¹⁾し計算精度向上アルゴリズムを導入した単相流 MPS 法⁽¹³⁾に対して、Koshizuka et al.⁽¹⁴⁾の気液二相流を扱うためのアルゴリズムを取り入れたモデルである。

MPS 法は式(1)に示す連続の式および式(2)に示す Navier-Stokes 方程式を支配方程式としている。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 t は時間、 ρ は密度、 P は圧力、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトルである。

MPS 法では式(2)に含まれる微分演算子を、粒子間相互作用モデルを用いて離散化する。ある粒子 i が位置ベクトル $\mathbf{r}_i$ および物理量 ϕ_i および任意の物理ベクトル Ψ_i を保持しているときの、勾配、発散および Laplacian モデルを式(3)、式(4)および式(5)にそれぞれ示す。なお式(3)の勾配モデルは高精度勾配モデルである。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \left[\sum_{j \neq i} w(\mathbf{r}_{ij}) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \otimes \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \right]^{-1} \left(\sum_{j \neq i} \left[(\phi_j) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} w(\mathbf{r}_{ij}) \right] \right) \quad (3)$$

$$\langle \nabla \cdot \Psi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\Psi_j) \cdot (\mathbf{r}_{ij})}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} w(\mathbf{r}_{ij}) \right] \quad (4)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} [(\phi_{ij}) w(|\mathbf{r}_{ij}|)] \quad (5)$$

ここで d は次元数、 w は重み関数、 n^0 は計算開始時における初期粒子数密度である。 λ は変数分布の分散を解析解と一致させるための係数である。

本手法は半陰解法であり式(2)の圧力勾配項以外を陽的に解いたのち、非圧縮条件を満たすように陰的に解く。本研究では圧力勾配項を解く際に生成する圧力の Poisson 方程式のソース項に式(6)に示す圧力の数値振動を低減したモデルを用いている。

$$\nabla^2 P_i = \alpha \left(\frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^0 - n_i^*}{n^0} \right) + (1 - \alpha) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \quad (6)$$

ここで、 Δt は時間刻み、 n^* および $\mathbf{u}^*$ はそれぞれ陽的計算後の粒子数密度および粒子速度を表す。また、 α は数値安定化のための係数であり、本研究では経験的に 0.3 を用いる。

2.2 気液二相流アルゴリズム

気相－液相間には約 800 倍という極端な密度差があるため特に気液界面における圧力勾配の非対称性により数値的に不安定となる。本研究では気液相間の数値安定性を担保しつつ計算するために前項で述べた通りの気相－液相間の圧力計算を分割するアルゴリズム⁽¹⁴⁾を導入している。まず、粘性項および重力項を計算する陽的ステップでは気固液を同時に解き、仮の粒子位置および速度の計算を行う。そして、圧力項計算のための陰的ステップでは重い粒子(液相および壁粒子)の圧力項を計算する。その際、重い粒子の自由表面条件判定のための粒子数密度計算には軽い粒子は含めないが、固液界面に存在する気相粒子の平均圧力を Dirichlet 境界条件として与える。その後、二段階目に軽い粒子(気相粒子)の圧力項を計算する際には、重い粒子を軽い粒子と同密度の固定壁とみなして計算を行う。このとき、軽い粒子の圧力の Poisson 方程式を生成する際に、気相粒子の限られた圧縮性を考慮し、式(6)右辺の基準粒子数密度 n^0 を式(7)のように修正する。

$$n_i^c = n^0 + \frac{n^0}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial P} (P_i - P_0) \quad (7)$$

ここで、 n_i^c は粒子 i における基準粒子数密度、 P_0 は基準圧力である。なお、限られた圧縮性とは式(7)内の圧力に対する密度変化が線形近似できる範囲であり、本研究では気相液相ごとに定数としている。

3. 数値シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

本手法の OWC 型波力発電装置の波浪中応答解析への有効性を検討するために、沿岸固定式 OWC 型波力発電装置の一つである LIMPET⁽¹⁵⁾を参考とした OWC モデルを作成し、一発大波に対する応答シミュレーションを実施する。Fig. 1 に本 OWC モデルの各寸法を示す。設定水深は対象海域の満潮時を想定し 7.7m としている。本研究では Fig. 2 に示す計算領域全体に空気粒子を配置した状態を Case 1、空気室周辺にのみ空気粒子を配置した状態を Case 2 とする。Case 2 における空気粒子の配置範囲は Fig. 2 内の赤破線で囲まれた領域である。なお、Case 2 では空気室外部における空気影響を疑似的に表現するために、空気室内の自由表面に作用する平均気圧を基準圧力として空気室外の自由表面に境界条件として与える。また、本数値シミュレーションは今後実施を検討している水槽実験との比較を想定している。そのため実験スケールと同等である 1/20 スケールで実施する。その計算条件を Table 1 に示す。

解析対象は入射波の構造体衝突時の飛沫分布形状、構造体に作用する波荷重、並びに空気室内の水位および空気圧力としている。

Fig. 1 Main dimensions of the OWC model geometry

Fig. 2 Dimension of numerical wave tank

Table 1 Calculation condition at model scale

Item	Value
Scale number (real/model) [-]	20
Number of particles [-]: Case 1	121,204
Case 2	36,494
Distance between particles [m]	0.01
Simulation time [s]	6.0
Density of fluid [kg/m ³]: Water	999.1
Air	1.2
Kinematic viscosity [m ² /s]: Water	1.0×10^{-6}
Air	1.44×10^{-5}
Coefficient of compressibility [-]: Water	6.64×10^{-9}
Air	7.04×10^{-6}
Reference pressure of Case 2 [Pa]	28.51
Courant number [-]	0.2

3.2 入射波条件

本研究では入射波として水柱崩壊による一発大波を用いる。入射波高は LIMPET 設置海域の海象⁽¹⁵⁾が最も厳しい状態かつ 1/10000 最大波が生じたと仮定し、波高が 9.9m となるように水柱の大きさを調整している。

Fig. 3 に OWC モデル前 25.0m における入射波の水位時系列波形を示す。Fig. 3 より両 Case の波形はほぼ一致しており、入射波の水位変動に関して空気粒子の有無は大きな影響を及ぼさないことが分かる。これは碎波前の入射波の自由表面近傍の空気圧力分布は大幅に擾乱されることがないため、境界条件としての空気圧力が両ケースともにほぼ同一であることから挙動が同様になるためであると考えられる。また、Fig. 4 および Fig. 5 に巻き波碎波の形状が現れた 3.35s における各ケースの碎波形状をそれぞれ示す。Fig. 4 には巻き込まれている空気粒子の圧力値をコンターで表している。Fig. 4 および Fig. 5 より、両者の碎波ジェット形状および空気が巻き込まれている範囲の形状がおおむね一致していることがわかる。Fig. 4 において巻き込まれた空気粒子の圧力が外部と比較して 2 倍以上となっているが、入射波の形状への影響は大きくないと考えられる。Fig. 4 の Case 1 のほうがわずかに前傾しているが、これは Case 1 の場合は気液界面において液相粒子と気相粒子の間に式 (2) 右辺第二項の粘性項計算を行っていること、また陽的ステップ後に粒子の異常接近を回避するための衝突判定計算を行っていることに起因する空気粒子からの抵抗を受けているためであると考えられる。

Fig. 3 Water level of incident waves

Fig. 4 Breaking wave shape of Case 1 at 3.35s

Fig. 5 Breaking wave shape of Case 2 at 3.35s

4. 結果および考察

4.1 碎波形状

Fig. 6 に 5.27s における入射波衝突時の飛沫形状をそれぞれのケースで比較したものを示す。Fig. 6 より、両 Case における飛沫形状および遡上波の概形はおおむね一致していることから、疑似的な空気圧を取り入れた場合でも十分に碎波時の現象を再現することができると考えられる。これは飛沫の周囲では、空気の圧縮影響がない Case 1 と一様気圧である Case 2 では飛沫周辺の状態がほぼ同一であるためであると考えられる。

一方で、構造体上面付近における碎波形状に違いがみられる。Case 1 の場合は構造体斜面中腹の付加物を越波した際に水塊下部に封じ込められた空気粒

子がクッション的な影響を果たしたことにより、Case 2 の場合よりも水塊先端位置が上方へと移動したためであると考えられる。そのため、局所的な空気巻き込みによる衝撃空気圧を表現するような場合では、巻き込みが発生したと判断される箇所に対して空気粒子を発生させることができれば、計算コストを削減しつつ空気粒子を計算領域全体に配置した環境を簡易的に再現することができると考えられる。

Fig. 6 Spray form at 5.27s (left: Case 1, right: Case 2)

4.2 構造体前面への作用波荷重

Fig. 7 に構造体前面に作用する波荷重の時系列波形を示す。時系列全体として衝撃砕波荷重の様相を呈していることがわかり、特に 4s 付近に入射波の衝突による衝撃的な波荷重が表れている。この時の波荷重の大きさは両ケースともほぼ同程度であることから、飛沫形状と同様に大局的な評価は空気粒子の有無を問わないといえる。しかしながら、5s 付近では Case 1 は Case 2 と比較して荷重が大きくなり時系列の振動が大きくなっていることがわかる。この時刻付近の各 Case の圧力分布を Fig. 8 および Fig. 9 にそれぞれ示す。Fig. 8 より構造体前面の防波堤上部から斜面に沿って Fig. 9 よりも高い圧力分布が得られていることが分かる。これは前項と同様に Case 1 において防波堤を越波した際に巻き込んだ空気が構造体に叩き付けられ、押し潰されたことによるものであり、単純に構造体に作用する粒子の数が空気粒子分多くなっていることも影響している。一方で、Fig. 7 よりこの 5s 付近の荷重の振動の程度は衝突直後の最大値と比較すると小さく、Case 2 の場合でもおおむね Case 1 の平均値をとっていることから、本計算における作用波荷重に対する空気粒子の存在影響は限定的であると考えられる。前章の入射波形状の比較ならびに前項および本項の結果から、局所的な空気影響は認められるため、計算コストに

十分な余裕がある場合には Case 1 のように計算領域全体に空気粒子を配置するほうがより実現象を再現していると考えられる。ただし、空気が封入された巻き波砕波の衝撃圧の解析に関しては Case 1 と Case 2 では顕著な差は認められないことから、計算コストを削減したい場合には Case 2 のような疑似的な空気圧の付与でも問題ないと考えられる。

Fig.7 Horizontal wave load acting to the structure

Fig. 8 Pressure distribution of Case 1 at 5.18s

Fig. 9 Pressure distribution of Case 2 at 5.18s

4.3 空気室内水位および空気圧

Fig. 10 に空気室内平均水位および平均空気圧の時系列波形を示す。Fig. 10 より Case 1 では空気室

内水位の上昇に伴い空気圧も比例して上昇しているが、Case 2 では水位上昇に対して空気圧が上昇しない。そのため、Case 2 では自由表面と空気との相互作用が表れず、空気室内水位の誤差要因となっている。これは Case 1 の計算領域が四方を固定壁で囲まれているのに対して、Case 2 では空気粒子領域の上面を常に圧力ゼロの自由表面としているためと考えられる。Case 2 の空気領域が流入水塊により上昇させられても空気領域の上方から下方までの圧力分布が初期値から大きく変動せず、空気室内自由表面に水位を押し下げようような力が働かなかったと考えられる。そのため前節で述べたような空気粒子を部分的に発生させるアルゴリズムを開発する際には、同時にノズル部または空気領域上面で空気室内の圧縮を適切に制御するための境界条件が必要となる。

Fig. 11 および Fig. 12 に両 Case において平均気圧が最大となる時刻の空気室内圧力分布をそれぞれ示す。Fig. 11 では空気室内の圧力がほぼ均一であり平均気圧と各空気粒子の圧力は一致する。一方で、Fig. 12 より Case 2 では、衝撃的な圧力は空気室内を遡上した水塊が巻き込んだ空気の急激な圧縮によるものであり、自由表面以上に存在する空気粒子の平均圧力はほぼ一様であることが分かる。また、Fig. 10 の 7s 付近において Case 2 の水位上昇のピークと同じタイミングで圧力の衝撃的な上昇がみられる。これは、Fig. 10 の水位時系列が示すように流入水塊がノズル部上面まで達することによりノズル部が塞がれたことで空気室内が急激に圧縮されたためであると考えられる。なお、Fig. 10 および Fig. 11 は OWC 型波力発電装置の特徴の一つである、空気室内空気全体が急激な水位変動に伴う衝撃的な荷重を吸収し緩和する、ということを再現できている。

Fig. 10 Air pressure and water level in the chamber

Fig. 11 Pressure distribution of Case 1 at 4.92s

Fig. 12 Pressure distribution of Case 2 at 5.99s

4.4 計算コスト

本研究において使用した PC は一般的な計算機用パソコンである。なお、本手法のプログラムコードは並列処理を行っていない。本研究における計算所要時間は Case 1 では 72,021 s であるのに対して、Case 2 では 18,919 s とおよそ 3.8 分の 1 となる。一般的に MPS 法における計算量は総粒子数の 1.5 乗に比例するため、大規模三次元計算の実施を検討する際に、Case 1 のように計算領域全体に空気粒子を配置する場合には計算コストが非常に膨大となる。そのため、Case 2 のように空気粒子を限定的に配置する手法の方が実用的であると考えられる。

以上より、本手法を用いることで、構造体前面における水波—構造体連成問題については Case 2 のような計算条件で十分に解析できることがわかる。一方で、OWC 型波力発電装置の重要な解析対象である空気室内応答の解析をするには Case 1 のように計算領域全体に空気粒子を配置する必要があり、計算コストは増加するものの荒天下における OWC 型波力発電装置の波浪中応答を再現することができる。Case 1 の計算結果と同様の結果を Case 2 で得るためには、局所的な空気粒子影響の表現や、空気室近傍の空気領域の特別な境界条件が必要となる。

5. 結言

本研究では、OWC 型波力発電装置の荒天中における応答解析手法の確立を目的として著者らが開発した気液二相流 MPS 法を用いて、空気巻き込みを伴う

一発大波に対する沿岸固定式 OWC 型波力発電装置の応答解析シミュレーションを実施した。また、計算コスト削減を目的として空気粒子の配置領域の違いが計算結果におよぼす影響について考察した。以下に主要な結果について述べる。

- (1) 本手法は一発大波の構造体の衝突といった気液二相流の非線形性の強い現象を十分に表現しており、荒天下での OWC 型波力発電装置の波浪中応答解析に対する強力な手法である。
- (2) 入射波の碎波形状には空気粒子の影響が局所的に表れるものの、飛沫形状や構造体前面における衝撃碎波力は疑似的な空気圧の付加により空気粒子の存在を仮定できることから、計算コストを削減可能である。
- (3) 空気室内の自由表面の挙動については、空気粒子を限定的に配置した場合には空気圧縮に伴う空気室内空気-自由表面の相互作用を十分に得ることができないことから、現状では空気粒子は計算領域全体に配置する必要がある。

以上より、本手法は計算コストを考慮しない場合には現段階においても本問題に対する高い有用性を持つといえる。一方で、計算コストを削減するためには局所的な空気影響の表現やノズル部における適切な境界条件の設定が必要となることが分かった。今後は、本手法の妥当性を明らかにするための水槽実験を実施する。また、計算コスト削減のための局所的な空気影響の再現やノズル部における適切な境界条件の導入に向けたアルゴリズムの開発を行う。

6. 参考文献

- (1) B DREW, A R PLUMMER and M N SAHINKAYA: A Review of Wave Energy Converter Technology, Proc. IMechE Part A, Vol. 223, No. 8, pp. 887-902, 2009. 12.
- (2) IRENA: Wave Energy Technology Brief, 2014. 6.
- (3) NEDO: 再生可能エネルギー白書 ー第 6 章 海洋エネルギー, 2014. 2.
- (4) Yoshio MASUDA: Wave-activated Generator, Int. Colloq. Exposition Oceans.
- (5) 永田修一・豊田和隆・今井康貴・瀬戸口俊明・中川寛之: 浮体式振動水柱型波力発電装置の一次変換効率性能評価法の開発 ー第一報 周波数領域での 2 次元問題解析法一, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 14, pp. 123-133, 2011. 3.
- (6) Tomoki IKOMA, Koichi MASUDA, Hikaru OMORI, Hiroyuki OSAWA and Hisaaki MAEDA: Improvement of Wave Power Take-Off Performance Due to the Projecting Walls for OWC Type WEC, Proc. ASME 2013 32nd Int. Conf. OMAE, OMAE2013-10384, 2013. 6.
- (7) 大澤弘敬・宮崎剛・宮島省吾: 沖合浮体波力装置「マイティーホエール」の流体力学的特性と発電出力特性, 日本造船学会論文集, Vol. 196, pp. 115-112, 2004. 5.
- (8) JAMSTEC: 沖合浮体波力装置「マイティーホエール」の現状について, https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/1998/19981012/, 2016. 7.
- (9) Kazuya SHIBATA, Seiichi KOSHIZUKA, Mikio SAKAI and Katsuji TANIZAWA: Lagrangian simulations of ship-wave interactions in rough seas, Ocean Engineering, Vol. 42, pp. 13-25, 2012. 3.
- (10) 橋本博公・伊藤悠人・末吉誠: 損傷船舶の浸水時シミュレーション手法の構築, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 17, pp. 41-47, 2014. 1.
- (11) 増田光弘・南清和・増田光一: 津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災に関する研究 (その 3) ー浮体式津波対策岸壁の提案一, 日本航海学会論文集, Vol. 131, pp. 131-138, 2014. 12.
- (12) Yutaro SASAHARA, Mitsuhiro MASUDA and Kiyokazu MINAMI: A Study on the Applicability of the Two-Phase Flow MPS Method to Performance Analysis of the OWC Type Wave Energy Converter, Proc. ANC2015, pp. 548-565, 2015. 11.
- (13) 笹原裕太郎・増田光弘・南清和・増田光一: 係留浮体の波浪中応答解析に対する MPS 法の適用性に関する研究 (第二報), 日本航海学会論文集, Vol. 129, pp. 31-37, 2013. 12.
- (14) Seiichi KOSHIZUKA, Hirokazu IKEDA and Yoshiaki OKA: Numerical Analysis of Fragmentation Mechanisms in Vapor Explosions, Nuclear Eng. And Des., Vol. 189, pp. 423-433, 1999. 5.
- (15) Queen's University Belfast: Islay LIMPET Wave Power Plant, Queen's University Belfast, 2002. 4.