浮体式大型津波シェルターに関する研究

—粒子法シミュレーションの運動解析への適用に関する基礎的検討—

学生会員 岸 拓 真* 正会員 南 清 和**
正会員 増 田 光 弘**

Basic study of application of numerical simulation by MPS method on Floating Large size Tsunami Shelter motion

by Takuma Kishi, *Student Member* Kiyokazu Minami, *Member*
Mitsuhiro Masuda, *Member*

Summary

In this study, the proposal of Floating Large size Tsunami shelter (FLTS) and the analysis of motion of FLTS when the shelter is attacked tsunami flow using the experiment and the numerical simulation by moving particle semi-implicit method (MPS). FLTS is an evacuation facility without seeking refuge to a hill and the tower. Because an evacuation place surface by itself buoyancy.

FLTS will solve some critical problems. For example, improve to seek for refuge of people of requiring assistance during a disaster, protect daily and medical goods and improve quality of life level after the disaster. To realize such services, we evaluated the validity and safety of a floating large size tsunami shelter using the mooring dolphin by water tank experiment and numerical simulation. As a result, enough performance was recognized. However, it became clear about the numerical simulation that improvement was more necessary.

1. 結 言

東日本大震災時の南三陸町の事例など、入院患者や高齢者等の災害時要援護者とその支援者の逃げ遅れが大きな問題となっている¹⁾²⁾³⁾。既存の津波避難ビルは、被災時に倒壊せず被災者の一次避難場所として大きな役割を果たしたが、災害時要援護者にとって狭い階段やスロープの昇降は避難遅延の原因となった⁴⁾。この課題に対し、階段の昇降を必要とせず、備蓄物資等を保護することが可能な「浮体式津波シェルター」（密閉された浮体構造物、避難者が浮体に入り津波流に対して安全に漂流する避難器具）が注目されている。

本研究は、このシェルターを大型構造物へ応用する「浮体式大型津波シェルター」を提案する。平時陸上構造物として機能（介護施設や病院等の災害時要援護者が集まる施設）し、被災後、復旧復興の中心的な施設に活用できることを目標とする。本施設により「被災時に居るその場が避難場所になる避難」が実現できる。また、物資の備蓄の保護により被災後の被災者の生活水準を向上させることができる。

津波シェルターの既存の研究として陸田ら⁵⁾は、浮沈式津波シェルターの開発研究を行っている。浮沈式津波シェルタ

ーとは、低波高時にシェルターは水面へ浮上し、高波高時に没水する。このシェルターであれば津波の波高によらず津波から避難者を守ることができ、想定外の大津波に対して有効である。しかしシェルターが沈下する場合、平時利用を考えた施設をシェルターへ応用するにあたり、建築物への浸水を防止するために構造を堅牢化する必要がある。そのため、建築条件を厳しくせざるをえなく、また建造コストが浮上式に比べ増大すると推測される。そこで、本研究のシェルターは水面に浮上する方式を採用している。重松ら⁶⁾は球状の浮体式津波シェルターの漂流について安全性ならびにその漂流モデルについて検討を行っている。

浮体式大型津波シェルターの大きな課題として、津波入射直後において、水流の跳水や飛沫、浮体と水面が離れる現象、その現象による急激な運動の変化が考えられる。そこで本研究では、大津波入射直後の浮体式津波シェルターの挙動について明らかにすることを目的とする。この検討にあたり、無歪模型による水理実験を実施する。また津波の特性上、水理実験の結果だけでの検討は、十分でないと考え、数値シミュレーションを実施する。水理実験と数値シミュレーションの結果を比較検討し、再現性について明らかにする。

また、浮体式大型津波シェルターの大きな課題として、最適な係留手法について検討を行う必要がある。そこで、東日本大震災の津波の際に、津波中での係留の有効性が発揮された事例があるドルフィン係留を採用し、そのときの浮体の挙動について明らかにする。

* 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科

** 東京海洋大学大学院 海洋工学系

2. 浮体式大型津波シェルターの概要

浮体式大型津波シェルターは自己完結型で生活が可能な浮体式構造物である。海岸線から離れた沿岸地域の市街地の中心に設置することを想定している。本研究では、災害時の汎用的な避難所である体育館を参考とし、シェルターの規模を縦 50m、横 60m、高さ 13m に設定、Fig. 1 にそのイメージを示す。浮体式構造物のコンセプトは東京湾等に停泊している浮体式防災基地を参考⁷⁾とし、シェルターは流体力の低減等を目的に底部を面取りした箱型浮体とした。浮体周囲を係留柱で取り囲み、ドルフィン係留するものとする。ドルフィン係留採用の理由は、増田ら⁸⁾の研究より、ドルフィン係留された浮体橋が、津波中において係留機能を保持できる点を明らかにしており、遡上津波に対してもその効果が発揮できると考えられるためである。また、内陸に堀を設けその上に浮体式大型津波シェルターを設置する。浮体式大型津波シェルターの収容能力は定員を 1500 人とし、定員が一週間生活するために必要と考えられる生活用品、清水、医療品、燃料油等について算定を行い⁹⁾、算定より浮体の喫水を 2.0m とした。

堀は、浮体から地面の堀の深さを 10m、堀の射角を 45 度、堀内水深を 8m とした。堀の諸元は、無係留時の浮体が漂流する際に壁へ衝突しないよう、十分深く、離脱しやすいと考えられる斜角 45 度とした。また係留時の係留柱は、縦横 4m、高さ 15m の角柱を四隅に設置した。係留柱の高さは想定最大波高を 10m とし、その波高時でも十分係留できるような高さとした。係留時の断面図を Fig. 2 に示す。

Fig. 1 Image of Floating Large size Tsunami Shelter (FLTS).

Fig. 2 Arrangements of FLTS and mooring system.

Table 1 Design for weight balance.

Item	Max Person	For each person	Total
Max Person	1500	Average 50kg	75t
Flesh water & Foods	1500	Water-5kg/day Food-1kg/day	63t
Blanket & Life goods	1500	Blanket-2kg Goods-5kg	11t
Medical etc.			50t
Oil			1000t
Structure			About 3500t

3. 数値計算手法

3.1 MPS 法

本研究では、数値シミュレーション手法として越塚ら¹⁰⁾によって開発された粒子法の一つである MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit method) を用いた。MPS 法は、浮体が自由表面上から波等により剥離するような現象や砕波等を伴う強非線形流体现象に対しての解析への適用性が明らかになっている^{8) 11) 12)}。従って本研究で想定される陸上への遡上流が入射した時の浮体運動のシミュレーションに対して適用可能だと考えられ、本手法を採用した。本研究で用いた計算プログラムは、著者らの研究室で作成された MPS 法プログラムであり、MPS 法の支配方程式を式(1)(2)に示す。

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

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

本研究では流体を非圧縮、表面張力なしとして扱う。式(1)は時間 t に対して密度一定を示す連続の式である。式(2)はナビエ・ストークスの方程式であり、左辺は流速 $\mathbf{u}$ に対するラグランジュ微分、右辺は圧力勾配項、粘性項、重力項の和である。 P は圧力、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{F}$ は重力項としている。本手法の離散化ならびにモデル化の詳細については増田ら⁸⁾、越塚ら¹⁵⁾の論文に示されているため割愛する。本計算は、越塚の標準 MPS より改良された笹原ら¹³⁾の研究で開発されたプログラムを使用している。本プログラムでは MPS 法の既知の問題点である圧力振動の低減のため、新井¹⁴⁾の手法を用いている。新井の手法は、従来の MPS 法における圧力に関する式(3)に示すポアソン方程式に含まれる粒子の粒子配置が不規則になると時間、空間ともに数値振動を引き起こすため、速度の発散がゼロかつ非圧縮性流体における粒子数密度一定であること組み合わせた式(4)に示す圧力のポアソン方程式にて

計算する手法である。αは安定化のための係数であり、経験的に 0.2 を用いている。

$$\nabla^2 P = \frac{\rho}{dt^2} \frac{n^0 - n^*}{n^0} \quad (3)$$

$$\nabla^2 P = \alpha \left(\frac{\rho}{dt^2} \frac{n^0 - n^*}{n^0} \right) + (1 - \alpha) \frac{\rho}{dt} \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \quad (4)$$

3.2 衝突

浮体と壁の衝突は、壁または剛体粒子とその近傍の粒子の距離が最接近距離以下の場所に存在する場合、粒子同士の衝突とみなし、計算点が接触したと判断する。本研究における、最接近距離は粒子間距離の 2 乗とした。接触したと判断したとき、対象粒子とその近傍粒子の粒子間の速度差から式(5)によって力積 $\mathbf{I}m$ を求め、その力積をもとに、粒子の速度修正を行っている。k は衝突緩和係数であり本計算において 1.2 としている。

$$\mathbf{I}m_i = \sum_{j=1}^{n-1} k \cdot |u_i - u_j| \cdot (m_i + m_j) \quad (5)$$

3.3 浮体運動モデル

本研究で用いる MPS 法の浮体運動モデルは、粒子の連続体として表現し、流体と相互作用させつつ剛体として運動させる越塚ら¹⁴⁾による手法を採用している。まず、重力ならびに重心位置、慣性モーメントを初期時刻で計算する。次に浮体を剛体と仮定し、剛体を流体と相互作用させる。まず、流体粒子と剛体粒子を区別することなく MPS 法のアルゴリズムによって計算を行い、新しい時刻 k+1 における速度と位置に更新する。その後、重心座標変化量 $\mathbf{r}'_g$ と回転角変化量 θ' が保たれるように、剛体粒子の位置関係を元に修正している。

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}'_g + \begin{bmatrix} \cos \theta' - 1 & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' - 1 \end{bmatrix} (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_g^{k+1}) \quad (6)$$

浮体モデルの回転を表現するにあたって、本モデルは回転行列を用いた。式(6)第 2 項の行列部分が回転行列である。なお、3 次元の浮体運動を計算する際には、式(6)第 2 項に 3 次元の回転行列かクォータニオンを用いる。本研究では、回転行列を用いてモデル化を行っている。式(7)に、3 次元での式(6)の回転行列を考えた場合における変位ベクトルの式 $\mathbf{r}'_i$ を示す。

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}'_g + \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_g^{k+1}) \quad (7)$$

この時、ある規格化された軸 $\mathbf{a}$ 回りに θ だけ回転させる際の回転行列を式(8)に示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_x &= \begin{pmatrix} a_x a_x (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ a_x a_y (1 - \cos \theta) + a_z \sin \theta \\ a_z a_x (1 - \cos \theta) - a_y \sin \theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{r}_y &= \begin{pmatrix} a_x a_x (1 - \cos \theta) - a_z \sin \theta \\ a_y a_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ a_y a_z (1 - \cos \theta) + a_x \sin \theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{r}_z &= \begin{pmatrix} a_z a_x (1 - \cos \theta) + a_y \sin \theta \\ a_y a_z (1 - \cos \theta) - a_x \sin \theta \\ a_z a_z (1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

4. 津波入射時の浮体式大型津波シェルターの運動と MPS 法シミュレーションの再現性の確認

MPS 法数値シミュレーションによる遡上津波が入射した際の浮体の運動解析への適用性を明らかにするために無係留時、ドルフィン係留時それぞれの模型実験を行った。

4.1 模型実験の概要

日本大学理工学部海洋建築工学科所有の 2 次元水槽にて模型実験を実施した。Fig. 2 の設置計画に対して、実験の縮尺は 1/100 とした。Fig. 3 に模型の設置状況と模型岸壁の様子を示す。浮体の諸元を Table 2 に示す。積載条件は、Table 1 に示した避難対象者、物資を積み込んだ時の条件とし、喫水を 0.02m とした。仮底上の水深は 0.15m とした。岸壁は、直立式岸壁とし、津波シェルターの設置してある堀までの距離を 0.20m 設けた。これは、岸壁端部から堀までの距離を長くすると 2 次元水槽の造波板の性能上、津波の岸壁遡上後の射流に十分な遡上高を持たせることが困難であったため、この位置に設置した。係留方法は Fig. 4 に示すように津波シェルター模型を、ドルフィン係留を模擬した係留柱によって四方を拘束とした。係留柱の寸法は、(縦) 0.04m × (横) 0.04m × (高さ) 0.15m、(没水高さ) 0.08m とした。本実験では、係留柱は十分な強度になるよう固定されている。

計測装置の設置状況は Fig. 3 に示す通りとした。浮体模型の水平方向・鉛直方向変位は、画像解析により測定した。水路内の波高ならびに流速の測定は、岸壁終端 1.0m、3.5m 前に容量式波高計およびプロベラ式流速計にて行った。計測値のサンプリング周期は全て 0.01sec とした。

入射波は、超長周期の特徴を持つ津波を再現することが困難であったため、水槽併設のピストン式造波機によって勾配の大きい模擬津波を造波した。本実験では、実スケール浸水深さ 6.0m 以上の津波を対象とし、Fig. 5 に示す実験スケール 0.06, 0.08, 0.10m の大波を岸壁に入射させた。この波のデータ計測は岸壁手前 3.5m 手前で実施した。なお、本報告

では押し波のみを対象とした。

Fig. 3 Experimental setup system and calculation system.

Fig. 4 Set experiment model.

Table 2 Design for Float model.

Size	(L)0.50m×(B)0.59m×(D)0.13m
Weight	5.94kg
Weight Position	0.1m from bottom surface
Moment of inertia	0.214kg・m ²
Natural period	2.2sec

Fig. 5 Time series of input wave height and velocity.

4.2 数値シミュレーションの概要

Fig. 3 に示す，実験と同じ領域を計算対象とする，無係留時と係留柱によるドルフィン係留を行った状態における数値シミュレーションを行った。2 次元水槽における実験のシミュレーションのため，無係留時の計算は 2 次元で計算を行った。しかし係留柱がある場合，3 次元性を考慮する必要性があるため 3 次元での計算を行った。無係留時の計算条件を Table 3，初期粒子配置図を Fig. 6 に示し，係留状態時の計算条件を Table 4，初期粒子配置図を Fig. 7 に示す。

浮体と堀部分の粒子配置は浮体内の構造を正確に表現するため，Fig. 8 に示す通り，外殻とバラストで密度を変え，浮体の重量分布が等しくなるように粒子を配置した。バラストは外殻の一部であり，流動しない。本シミュレーションは摩擦を考慮していない。

Table 3 Calculation condition (non-moor 2D simulation).

Particle distance(PD)	0.010m,0.005m
Particle number	PD=0.010m : 6574 PD=0.005m : 20000
Radius of influence	2.1×(PD)
Time step	5.0×10 ⁻⁴ sec
Kinematic viscosity	1.004×10 ⁻⁵ m ² /sec
Simulation time	6.5sec
Wave height	0.06m,0.08m,0.10m

PD=0.01m

PD=0.005m

Fig. 6 Calculation setup system (non-moor 2D simulation).

Table 4 Calculation condition (dolphin moor 3D simulation).

Particle number	501774
Particle distance	0.01m
Radius of influence	1.5×(PD)
Time step	5.0×10 ⁻⁴ sec
Kinematic viscosity	1.0×10 ⁻⁵ m ² /sec
Simulation time	6.5sec
Wave height	0.06m,0.08m,0.10m

Fig. 7 Calculation setup system (dolphin moor 3D simulation).

Fig. 8 Arrangements of Particle in canal.

5. 結果と考察

5.1 模擬津波伝播の再現性の確認

入射波のシミュレーションにおける再現性の確認として、岸壁模型 1m 手前の波高と流速における実験値と 2 次元の数値シミュレーションの結果の比較を Fig. 9～Fig. 14 に示す。造波境界は Fig. 5 に示した流速で造波板にみたてた圧力壁境界を動かして造波を岸壁模型 2.5m 手前で行っている。グラフより、すべての波が岸壁模型での反射波の影響を示す双峰性を有する波になっており、およそ波高においてピーク高さ及び立ち上がりは一致している。本研究は津波が岸壁に遡上するあとの射流が浮体に入射するため、本波の波形の一致は重要だと考えられる。しかし、造波板による造波により、模擬津波造波後の掃引（逆方向へ造波板が動くこと）が実際の境界条件と異なるため、流速において大きな違いが示されている。また、波高が高くなる Fig. 12 ならびに Fig. 14 においては掃引が追いついておらず、再現性の低下がみられる。境界の特性上、柴田ら¹⁶⁾の研究で行われているような流入流出境界が適当であると考えられる。

Fig. 9 Comparison of input wave height (H 0.06m).

Fig. 10 Comparison of input flow velocity (H 0.06m).

Fig. 11 Comparison of input flow height (H 0.08m).

Fig. 12 Comparison of input wave velocity (H 0.08m).

Fig. 13 Comparison of input wave height (H 0.10m).

Fig. 14 Comparison of input wave velocity (H 0.10m).

5.2 無係留時の浮体運動と MPS 法シミュレーション

水理実験の結果と鉛直 2 次元の数値シミュレーションにおける、無係留時の入射波高 0.06m～0.10m に対する浮体中心の軌跡を Fig. 15 から Fig. 20 に示す。それぞれ、粒子間距離 0.01m と 0.005m のそれぞれの結果を掲載している。Fig. 15, Fig. 17, Fig. 19 は水平方向の浮体の軌跡を示しており、縦軸が浮体の水平方向変位、横軸が時間を示している。Fig. 16, Fig. 18, Fig. 20 は鉛直方向の浮体の軌跡を示しており、縦軸が浮体の鉛直方向変位、横軸が時間を示している。Fig. 21～Fig. 25 に入射波高 0.08m の際の実験と数値シミュレーションのスナップショットの比較を示す。また、Fig. 26, Fig. 27 に衝突時の波高 0.08m と 0.10m の粒子間距離 0.01m ならびに 0.005m の時のスナップショットを示す。まず、水理実験の結果から浮体運動の特性について考察する。浮体に津波が入射し、波下側の壁に波が衝突している。衝突後浮体は反時計回りに運動している。波高

0.08m, 0.10m の時, Pitch 運動により水面と波下側の浮体底面の一部が水面と離れ, 波上側の浮体の壁が堀の壁と衝突する. 衝突の様子は Fig. 23, Fig. 26, Fig. 27 のスナップショットより確認できる. 波高 0.06m のときは堀に衝突しなかった. 衝突後は, 浮体は逆方向に回転運動をはじめ, 波下側の底面が水面と剥離した状態から水面に打ちつけるように運動した. その様子は Fig. 24, Fig. 25 で確認でき, 波高 0.10m の時にも同様の現象が確認されている. 堀への衝突もさることながら, 波下側の浮体底面が水面に打ちつけられるため, Surge ならびに Pitch の運動を抑制する係留が必要である. 次に MPS 法によるシミュレーション結果について検討を行う. Fig. 15 から Fig. 20 のグラフにおいて, 浮体が波に衝突する前に浮体が微小に振動している. これは, 堀内部の水深が浅く, また浮体の重量配分が完全に実験と同等でないことが原因と考えられる. また, MPS 法固有の圧力振動が抑制しきれていないことも要因と考えられる. しかし, 本研究の粒子間距離と比べ十分小さいものと考えられるため影響も十分小さいと考えられる.

波高が 0.06m のとき, Fig. 15, Fig. 16 より空間計算解像度が高く計算した 0.005m のとき再現性が向上している. このとき, 入射直後の浮体底面が水面からあまり離れておらず, また浮体の波上側と堀の壁が衝突していないことから, 浮体は堀に入射した模擬津波流による漂流運動が支配的で, 衝突の影響は少ないと考えられる. 次に波高が 0.08m ならびに 0.10m のとき, 入射波高に比例して浮体底面が水面と離れ, 浮体の波上側の壁と堀の壁が激しく衝突する運動が発生するためか, Fig. 26, Fig. 27 のような壁に衝突する直前ないし衝突時に波上側の浮体底面と水面に実験では見られない空白域が確認できる. この周囲の粒子を確認すると自由表面として扱われており, これは水理実験と異なる物理的状態であることを表す. 原因として, 第一に空白域において, 基準圧力 (大気圧) 以下の負圧が発生しているため, 浮体底面における圧力分布が実験と異なることが考えられる. 負圧を考慮した場合, この隙間を埋めるような圧力差が生じると考えられる. 第二に, 剛体修正時の位置修正時の変位量が考えられる. MPS 法における剛体は, 計算時流体として扱われ, 計算の最後にもととの剛体の形状に修正される. そのため, この修正に粒子間距離が影響する. よって, 大傾斜時に計算の誤差が予想しない空白域を形成する可能性が考えられる. そこで, 修正時の計算をより精度良く実施することによって改善できると考え, 波高が 0.08m, 0.10m のときの粒子間距離 0.005m の計算結果と比較する. Fig. 26, Fig. 27 より, 空間の計算解像度の向上による空白域の改善はスナップショットの結

果の上で確認することができなかった. ただし, Fig. 18 から Fig. 20, また後述する Fig. 29, Fig. 30 より, 空間解像度の向上により Pitch 運動が大きくなり水平方向への浮体の漂流が抑えられた. 特に波高 0.10m との時のシミュレーションにおける浮体の挙動がより実験と合致していると推測できる. ただし, 波高 0.08m, 0.10m の時, シミュレーション 5 秒付近で浮体の一部が波下側の斜面に乗り上がり, 波上側に漂流できずに留まった挙動になるなど, 十分な改善とはいえず, 先述の通り負圧や浮体運動に関するモデルを改良するべきであろう. また, 現在の衝突モデルでは水が壁と壁に挟まれてつぶれるような処理を行っていないため, 本来の物理現象と合致するものではない. よって, 表面張力等も考慮しながら, 本モデルの適用性について十分に検討すべきである. しかし, こうした強非線形性の水理現象中であっても, シミュレーションがある程度の誤差を含みながら計算が可能であることから, 本研究において MPS 法は改良とさらなる検証は必要であるが適用可能ではないかと考えられる. 最後に水理実験で計測できなかった Pitch 運動について, MPS 法シミュレーションの結果をもとに検討を行う. 本来であれば水槽実験との比較が必要であり, 今後検証の必要がある. Fig. 28~Fig. 30 に各波高における Pitch 角度の MPS 法シミュレーションの結果を示す. 波高 8m 以上の時, 傾斜が 10 度を超える結果となった. この結果は大型構造物として大きな傾斜運動である. さらに Fig. 31 に各波高における実験における浮体の中心点における鉛直成分加速度を実スケール寸法・時間として計算した結果を示す. 波高 10m の時 0.5G を超える加速度が作用していることが確認できる. 今里¹⁷⁾の研究から船酔いを引き起こす加速度が 0.7G 付近であることが示されている. 津波のような入射波形の勾配が大きい波において, 入射時 Heave, Pitch 運動が大きくなると考えられ, この結果より, 万が一離脱した場合でも固縛等を徹底することにより対応できる角速度, 加速度だと考えられるが, 同時に係留システム設計の重要性を示している.

Fig. 15 Comparison of surge motion of float (H 0.06m).

Fig. 16 Comparison of heave motion of float (H 0.06m).

Fig. 20 Comparison of heave motion of float (H 0.10m).

Fig. 17 Comparison of surge motion of float (H 0.08m).

Fig. 21 Snapshots for 0.08m 3.7 sec (Exp. and MPS).

Fig. 18 Comparison of heave motion of float (H 0.08m).

Fig. 22 Snapshots for 0.08m 3.9 sec (Exp. and MPS).

Fig. 19 Comparison of surge motion of float (H 0.10m).

Fig. 23 Snapshots for 0.08m 4.1 sec (Exp. and MPS).

Fig. 24 Snapshots for 0.08m 4.2 sec (Exp. and MPS).

Fig. 25 Snapshots for 0.08m 4.4 sec (Exp. and MPS).

Fig. 26 Snapshots for 0.08m 4.2 sec (Exp. and MPS).

Fig. 27 Snapshots for 0.10m 3.9sec (Exp. and MPS).

Fig. 28 The Pitch motion (using MPS) (H:0.06m)

Fig. 29 The Pitch motion (using MPS) (H:0.08m)

Fig. 30 The Pitch motion (using MPS) (H:0.10m)

Fig. 31 The vertical accelerations of center points

5.3 ドルフィン係留時の浮体運動

3次元の数値シミュレーションにおける、Fig. 32～Fig. 37に、係留ありの状態における入射波高 0.06m～0.10m に対する浮体挙動の軌跡を、実験結果と数値計算結果で比較したグラフを示す。Fig. 32, Fig. 34, Fig. 36 は水平方向の浮体の軌跡を示しており、縦軸が浮体の水平方向変位、横軸が時間を示している。Fig. 33, Fig. 35, Fig. 37 は鉛直方向の浮体の軌跡を示しており、縦軸が浮体の鉛直方向変位、横軸が時間を示している。Fig. 32～Fig. 37 の実験結果が示すように、係留ありの時は、係留柱の拘束により水平方向はほぼ動じず、鉛直方向の変位もゆっくりと浮上する運動となった。Fig. 38 に波高 0.08m おける実験時のスナップ写真とシミュレーション画像の比較を示す。実験値とシミュレーションの値を比較すると、Fig. 32, Fig. 34, Fig. 36 に示すように水平方向について実験結果とシミュレーション結果は概ね一致した。しかし、鉛直方向については Fig. 33, Fig. 35, Fig. 37 が示すように、シミュレーションの結果が実験結果よりも浮上する傾向が明らかになった。Fig. 38 のスナップショットからもその違いが確認できる。これは浮体と係留柱の間における相互影響がお互いの面の摩擦を考慮していないため、実際と異なる点が原因だと考えられる。今後この摩擦作用についてモデル化は必要であると考えられる。また浮体内に作用する加速度や傾斜角度について検証を行い、居住性について検討していく必要がある。

Fig. 32 Comparison of surge motion of float (H 0.06m-Moor).

Fig. 33 Comparison of heave motion of float (H 0.06m-Moor)

Fig. 34 Comparison of surge motion of float (H 0.08m-Moor)

Fig. 35 Comparison of heave motion of float (H 0.08m-Moor)

Fig. 36 Comparison of surge motion of float (H 0.10m-Moor)

Fig. 37 Comparison of heave motion of float (H 0.10m-Moor)

Fig. 38 Snapshots for 0.08m 6.5sec (Exp. and MPS).

6. 結 言

本研究によって、以下の知見を得ることができた。

- 1、 浮体式大型津波シェルターの津波中での挙動を把握するために模型による水理実験を行った。浮体への模擬津波入射により、水流の跳水現象や水面の大きな変動により浮体が大きく動揺することが考えられた。水理実験の結果より推測した通りの結果となった。また、浮体と堀の壁の衝突と波上側の一部の浮体の底面と水面が離れ、浮体底面が水面に打ち込み、浮体に大きな運動を引き起こす要因となっていることが明らかになった。大型構造物を想定する場合、こうした動揺は避けなければならない対象であり、効果的に Surge ならびに Pitch 運動を抑制する係留手法について検討するべきである。
- 2、 MPS 法による数値シミュレーションを実施した。今後さらなる改良と検証が必要であるが、非線形現象を多く含む本実験の状況において、入射直後やその後の回転運動、そして水平方向の漂流運動等の特徴的な運動についてシミュレーションで確認することができた。しかし、今後、跳水や衝突、浮体底面の水面への打ち込みといった現象に対して表面張力の考慮や、衝突モデルならびに剛体修正モデルの改良が必要である。さらに浮体運動の傾斜や作用する波の流体力について入射波の波高、流速、遡上後の射流変形等を考慮した検証が必要であることが明らかになった。また、その射流が浮体への入射後における自由表面上での運動へ負圧等を考慮しなければならぬと推定でき、今後検証を行う必要がある。
- 3、 Surge ならびに Pitch 運動を抑制する係留方法としてドルフィン係留によるシミュレーション並びに水理実験を実施した。MPS 法にて今後適切な係留の検討を行うための基礎的な検討となるように Heave 運動に注目した。結果として、MPS 法の結果が大きくなることが明らかになった。摩擦や表面張力といったような力の作用を考慮する必要がある、さらに先述した入射する射流の波形や流速について十分再現性の検証が必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 河北新報：証言 3.11 大震災公立志津川病院，2011.6.7.
- 2) 災害時要援護者の避難対策に関する検討会：災害時要援護者の避難支援ガイドライン，内閣府資料，27p，2006.
- 3) 総務省消防庁：東日本大震災記録集，pp.83-86，2013.
- 4) 国土交通省：平成 22 年度国土交通白書，pp.88-89，2011.
- 5) 陸田秀実，藤井俊輔，鎌田正也，土井康明：浮沈式大型津波シェルターに作用する流体力低減とその運動特性，日本船舶海洋工学会論文集，No.20，pp.49-57，2014.
- 6) 重松孝昌，中東大輔：二重式浮体式津波避難シェルターの運動特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 67，No. 2，pp.I_751-I_755，2011.
- 7) 日本建築学会海洋委員会：2004 年度日本建築学会海洋委員会活動報告スライド，pp.13-18，2005.
- 8) M. Masuda, K. Masuda, T. Ikoma and K. Shoji： Behavior of the Pontoon Supported by Mooring Dolphin in Tsunami, 2011 International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), CD-ROM file - 4973, 2011.
- 9) 農林水産省：東日本大震災から得られた教訓と首都直下地震に備えた今後の課題，2013.
- 10) Seiichi KOSHIZUKA, Atsushi NODA and Yoshiaki OKA： Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, Int.J.Numer.Mech.Fluid，26，pp.751-769，1998.
- 11) K. SHIBATA and S. KOSHIZUKA： Numerical Analysis of Shipping Water Impact on a Deck Using a Particle Method, Ocean Engineering 34 (2007) 585-593，2007.
- 12) 五十里洋行，後藤 仁志，吉年 英文：ケーソン式混成堤の大変形解析のための改良型弾塑性 MPS 法の基礎的検討，土木学会論文集 B2，海岸工学，67,2,731-735，2011.
- 13) 笹原裕太郎，増田光弘，南清和，増田光一：矩形浮体における波強制力に対する MPS 法の適用性に関する研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，16 号，pp.289-292，2013.
- 14) 新井淳：船首周りにおける水面挙動の数値解析手法に関する研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，12，2011S-G5-24，2011.5.
- 15) 越塚誠一：粒子法，丸善，144p，2005.
- 16) 柴田和也，越塚誠一，酒井幹夫，谷澤克治，辻本勝：粒子法による水波計算のための透過境界条件の開発，日本船舶海洋工学会論文集，Vol. 11，pp.125-136，201.
- 17) 今里元信，岡修二，原野勝博，塚田吉昭，森田良和：練習船における加速度と乗組員の作業性・乗り心地との関連について(第 2 報)，海上技術安全研究所第 3 回研究発表会講演集，PNM2B030018,2015.