

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

浮体式大型津波シェルターの設計に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-06-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岸, 拓真 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1575">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1575</a>

博士学位論文

浮体式大型津波シェルターの設計に関する研究

平成 29 年度

(2018 年 3 月)

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

岸 拓 真

目次

図表一覧

List of figures

List of Tables

## 第1章 序論

1-1	次世代型津波避難施設の創出—浮体式大型津波シェルター	1
1-2	数値シミュレーションを用いた浮体式大型津波シェルター の設計に必要なスキームの検討	2
1-3	本研究の目的と意義	6
1-4	論文の構成	7

## 第2章 MPS (Moving Particle Semi-implicit method) 法

2-1	緒言	9
2-2	粒子間相互作用	9
2-2-1	支配方程式	10
2-2-2	重み関数	10
2-2-3	粒子数密度	11
2-2-4	勾配モデル	11
2-2-5	発散モデル	12
2-2-6	ラプラシアンモデル	13
2-3	MPS 法数値シミュレーションの計算アルゴリズム	14
2-4	境界条件	15
2-4-1	自由表面条件	15
2-4-2	壁境界	16
2-4-3	流入流出境界	17
2-5	剛体モデル	18
2-6	圧力振動の抑制	20
2-7	波高減衰の抑制	21
2-8	結言	22

## 第3章 孤立波が入射した際の浮体式大型津波シェルターの運動特性に関する検討

3-1	緒言	23
3-2	無係留浮体式大型津波シェルターの津波流体中における挙動	23
3-2-1	水槽実験概要	23
3-2-2	実験結果	25
3-3	ドルフィン係留時の浮体式大型津波シェルターの津波流体中における挙動	42
3-3-1	水槽実験概要	42
3-3-2	実験結果	43
3-4	結言	46

## 第4章 MPS 法による浮体式大型津波シェルターの挙動解析に対する適用性

4-1	緒言	47
4-2	無係留浮体の津波流体中における挙動に対する MPS 法による数値シミュレーション の適用性の検討	47
4-2-1	2次元空間における検討	47
4-2-2	3次元空間における検討	58
4-3	ドルフィン係留時の浮体の津波流体中における挙動に対する MPS 法による数値シミュレーション の適用性の検討	66
4-4	結言	69

<b>第5章 MPS法による浮体式大型津波シェルターへの設計への適用に関する検討</b>	
5-1 緒言	70
5-2 浮体式大型津波シェルターの設計スキームの検討	70
5-2-1 設計図面の数値シミュレーションの初期空間配置データ への変換	70
5-2-2 MPS数値シミュレーションを実施するために必要な諸条件 の設定の検討	72
5-3 浮体式津波シェルターにおける津波挙動に関する検討	75
5-3-1 計算条件	75
5-3-2 シミュレーションの結果	77
5-4 結言	89
<b>第6章 結論</b>	91
<b>参考文献</b>	93
<b>謝辞</b>	95



## Figure list

Fig. 1-1	Design method of designated evacuation facility	...	3
Fig. 1-2	Floating Large Tsunami Shelter (for hospital)	...	5
Fig. 1-3	Design scheme of floating tsunami evacuation facility using MPS method	...	6
Fig. 2-1	Interaction between particles	...	11
Fig. 2-2	Concept of gradient model	...	12
Fig. 2-3	Concept of divergence model	...	13
Fig. 2-4	Concept of Laplacian model	...	13
Fig. 2-5	Computational algorithm of incompressible fluid	...	14
Fig. 2-6	Free surface boundary	...	16
Fig. 2-7	Wall boundary	...	16
Fig. 2-8	Model of inflow boundary	...	17
Fig. 3-1	Experimental setup system and calculation system (Not mooring)	...	24
Fig. 3-2	Set experiment mode	...	25
Fig. 3-3	Time history of wave height (H:0.05m)	...	27
Fig. 3-4	Time history of running up wave height (H:0.05m)	...	27
Fig. 3-5	Time history of wave velocities (H:0.05m)	...	27
Fig. 3-6	Time history of the pressure at front surface (H:0.05m, Non-mooring)	...	27
Fig. 3-7	Time history of horizontal displacements (H:0.05m, Non-mooring)	...	28
Fig. 3-8	Time history of elevation (H:0.05m, Non-mooring)	...	28
Fig. 3-9	Time history of wave height (H:0.06m)	...	29
Fig. 3-10	Time history of running up wave height (H:0.06m)	...	29
Fig. 3-11	Time history of wave velocities (H:0.06m)	...	29
Fig. 3-12	Time history of the pressure at front surface (H:0.06m, Non-mooring)	...	29
Fig. 3-13	Time history of horizontal displacements (H:0.06m, Non-mooring)	...	30
Fig. 3-14	Time history of elevation by heave motion (H:0.06m, Non-mooring)	...	30
Fig. 3-15	Time history of wave height (H:0.07m)	...	31
Fig. 3-16	Time history of running up wave height (H:0.07m)	...	31
Fig. 3-17	Time history of wave velocities (H:0.07m)	...	31
Fig. 3-18	Time history of the pressure at front surface (H:0.07m, Non-mooring)	...	31
Fig. 3-19	Time history of horizontal displacements (H:0.07m, Non-mooring)	...	32
Fig. 3-20	Time history of elevation (H:0.07m, Non-mooring)	...	32
Fig. 3-21	Time history of wave height (H:0.08m)	...	33
Fig. 3-22	Time history of running up wave height (H:0.08m)	...	33
Fig. 3-23	Time history of wave velocities (H:0.08m)	...	33

Fig. 3-24	Time history of the pressure at front surface (H:0.08m, Non-mooring)	… 33
Fig. 3-25	Time history of horizontal displacements (H:0.08m, Non-mooring)	… 34
Fig. 3-26	Time history of elevation (H:0.08m, Non-mooring)	… 34
Fig. 3-27	Time history of wave height (H:0.09m)	… 35
Fig. 3-28	Time history of running up wave height (H:0.09m)	… 35
Fig. 3-29	Time history of wave velocities(H:0.09m)	… 35
Fig. 3-30	Time history of the pressure at front surface (H:0.09m, Non-mooring)	… 35
Fig. 3-31	Time history of horizontal displacements (H:0.09m, Non-mooring)	… 36
Fig. 3-32	Time history of elevation (H:0.09m, Non-mooring)	… 36
Fig. 3-33	Time history of wave height (H:0.10m)	… 37
Fig. 3-34	Time history of running up wave height (H:0.10m)	… 37
Fig. 3-35	Time history of wave velocities (H:0.10m)	… 37
Fig. 3-36	Time history of the pressure at front surface (H:0.10m, Non-mooring)	… 37
Fig. 3-37	Time history of horizontal displacements (H:0.10m, Non-mooring)	… 38
Fig. 3-38	Time history of elevation (H:0.10m, Non-mooring)	… 38
Fig. 3-39	The relations of running up wave height and horizontal displacements	… 39
Fig. 3-40	The relations of running up wave height and elevation	… 39
Fig. 3-41	The relations of running up wave height and the pressure at front surface	… 40
Fig. 3-42	The relations of running up wave height and horizontal force	… 40
Fig. 3-43	The relations of running up wave height and vertical force	… 41
Fig. 3-44	The relations of horizontal acceleration and vertical acceleration	… 41
Fig. 3-45	Experimental setup system and calculation system (Mooring)	… 42
Fig. 3-46	Set experiment mode	… 42
Fig. 3-47	Time history of elevation (H:0.05m, Delphine mooring)	… 43
Fig. 3-48	Time history of pressure at front surface (H:0.05m, Delphine mooring)	… 43
Fig. 3-49	Time history of elevation (H:0.06m, Delphine mooring)	… 44
Fig. 3-50	Time history of pressure at front surface (H:0.06m, Delphine mooring)	… 44
Fig. 3-51	Time history of elevation (H:0.07m, Delphine mooring)	… 44
Fig. 3-52	Time history of pressure at front surface (H:0.07m, Delphine mooring)	… 44
Fig. 3-53	Time history of elevation (H:0.08m, Delphine mooring)	… 45
Fig. 3-54	Time history of pressure at front surface (H:0.08m, Delphine mooring)	… 45
Fig. 3-55	Time history of elevation (H:0.09m, Delphine mooring)	… 45
Fig. 3-56	Time history of pressure at front surface (H:0.09m, Delphine mooring)	… 45
Fig. 3-57	Time history of elevation (H:0.10m, Delphine mooring)	… 46
Fig. 3-58	Time history of pressure at front surface (H:0.10m, Delphine mooring)	… 46
Fig. 4-1	Conditions of calculation area (2D)	… 48
Fig. 4-2	Comparison of wave height (H=0.05m,2D, Non-mooring)	… 49
Fig. 4-3	Comparison of running up wave height (H=0.05m,2D, Non-mooring)	… 50

Fig. 4-4	Comparison of velocity (H=0.05m,2D, Non-mooring)	…	50
Fig. 4-5	Comparison of pressure at front surface (H=0.05m,2D, Non-mooring)	…	50
Fig. 4-6	Comparison of horizontal displacements (H=0.05m,2D, Non-mooring)	…	50
Fig. 4-7	Comparison of elevation (H=0.05m,2D, Non-mooring)	…	51
Fig. 4-8	Comparison of wave height (H=0.06m,2D, Non-mooring)	…	51
Fig. 4-9	Comparison of running up wave height (H=0.06m,2D, Non-mooring)	…	51
Fig. 4-10	Comparison of velocity (H=0.06m,2D, Non-mooring)	…	51
Fig. 4-11	Comparison of pressure at front surface (H=0.06m,2D, Non-mooring)	…	52
Fig. 4-12	Comparison of horizontal displacements (H=0.06m,2D, Non-mooring)	…	52
Fig. 4-13	Comparison of elevation (H=0.06m,2D, Non-mooring)	…	52
Fig. 4-14	Comparison of wave height (H=0.07m,2D, Non-mooring)	…	52
Fig. 4-15	Comparison of running up wave height (H=0.07m,2D, Non-mooring)	…	53
Fig. 4-16	Comparison of velocity (H=0.07m,2D, Non-mooring)	…	53
Fig. 4-17	Comparison of pressure at front surface (H=0.07m,2D, Non-mooring)	…	53
Fig. 4-18	Comparison of horizontal displacements (H=0.07m,2D, Non-mooring)	…	53
Fig. 4-19	Comparison of elevation by heave motion (H=0.07m,2D, Non-mooring)	…	54
Fig. 4-20	Comparison of wave height (H=0.08m,2D, Non-mooring)	…	54
Fig. 4-21	Comparison of running up wave height (H=0.08m,2D, Non-mooring)	…	54
Fig. 4-22	Comparison of velocity (H=0.08m,2D, Non-mooring)	…	54
Fig. 4-23	Comparison of pressure at front surface (H=0.08m,2D, Non-mooring)	…	55
Fig. 4-24	Comparison of horizontal displacements (H=0.08m,2D, Non-mooring)	…	55
Fig. 4-25	Comparison of elevation (H=0.08m,2D, Non-mooring)	…	55
Fig. 4-26	Comparison of wave height (H=0.09m,2D, Non-mooring)	…	55
Fig. 4-27	Comparison of running up wave height (H=0.09m,2D, Non-mooring)	…	56
Fig. 4-28	Comparison of velocity (H=0.09m,2D, Non-mooring)	…	56
Fig. 4-29	Comparison of the pressure at front surface (H:0.09m,2D, Non-mooring)	…	56
Fig. 4-30	Comparison of horizontal displacements (H:0.09m,2D, Non-mooring)	…	56
Fig. 4-31	Comparison of elevation by heave motion (H:0.09m,2D, Non-mooring)	…	57
Fig. 4-32	Comparison of wave height (H:0.10m,2D, Non-mooring)	…	57
Fig. 4-33	Comparison of running up wave height (H=0.10m,2D, Non-mooring)	…	57
Fig. 4-34	Comparison of velocity (H=0.10m,2D, Non-mooring)	…	57
Fig. 4-35	Comparison of pressure at front surface (H=0.10m,2D, Non-mooring)	…	58
Fig. 4-36	Comparison of horizontal displacements (H=0.10m,2D, Non-mooring)	…	58
Fig. 4-37	Comparison of elevation by heave motion (H=0.10m,2D, Non-mooring)	…	58
Fig. 4-38	Conditions of calculation area (3D)	…	60
Fig. 4-39	Comparison of wave height (H=0.06m,3D,Non-mooring)	…	61
Fig. 4-40	Comparison of running up wave height (H=0.06m,3D, Non-mooring)	…	61
Fig. 4-41	Comparison of velocity (H=0.06m,3D, Non-mooring)	…	61

Fig. 4-42	Comparison of pressure at front surface (H=0.06m,3D, Non-mooring)	… 61
Fig. 4-43	Comparison of horizontal displacements (H=0.06m,3D, Non-mooring)	… 62
Fig. 4-44	Comparison of elevation (H=0.06m,3D, Non-mooring)	… 62
Fig. 4-45	Comparison of wave height (H=0.08m,3D, Non-mooring)	… 62
Fig. 4-46	Comparison of running up wave height (H=0.08m,3D, Non-mooring)	… 62
Fig. 4-47	Comparison of velocity (H=0.08m,3D, Non-mooring)	… 63
Fig. 4-48	Comparison of pressure at front surface (H=0.08m,3D, Non-mooring)	… 63
Fig. 4-49	Comparison of horizontal displacements (H=0.08m,3D, Non-mooring)	… 63
Fig. 4-50	Comparison of elevation (H=0.08m,3D, Non-mooring)	… 63
Fig. 4-51	Comparison of wave height (H=0.10m,3D, Non-mooring)	… 64
Fig. 4-52	Comparison of running up wave height (H=0.10m,3D, Non-mooring)	… 64
Fig. 4-53	Comparison of velocity (H=0.10m,3D, Non-mooring)	… 64
Fig. 4-54	Comparison of pressure at front surface (H=0.10m,3D, Non-mooring)	… 64
Fig. 4-55	Comparison of horizontal displacements (H=0.10m,3D, Non-mooring)	… 65
Fig. 4-56	Comparison of elevation (H=0.10m,3D, Non-mooring)	… 65
Fig. 4-57	Overview Grid of tank test	… 66
Fig. 4-58	Comparison of elevation (H=0.06m,3D, mooring)	… 67
Fig. 4-59	Comparison of pressure at front surface (H=0.06m,3D, mooring)	… 67
Fig. 4-60	Comparison of elevation (H=0.08m,3D, mooring)	… 67
Fig. 4-61	Comparison of pressure at front surface (H=0.08m,3D, mooring)	… 67
Fig. 4-62	Comparison of elevation (H=0.10m,3D, mooring)	… 68
Fig. 4-63	Comparison of pressure at front surface (H=0.10m,3D, mooring)	… 68
Fig. 5-1	Solid model for calculation 3DCAD data	… 71
Fig. 5-2	Mesh model for calculation 3DCAD data	… 71
Fig. 5-3	Points model for calculation 3DCAD data	… 71
Fig. 5-4	Grid model for calculation 3D-MPS data	… 71
Fig. 5-5	Setting plan for FLTS model at city	… 75
Fig. 5-6	Set up calculation model	… 77
Fig. 5-7	Comparison of wave height at the front of FLTS and initial wave height	… 79
Fig. 5-8	Comparison of velocity at the front of FLTS	… 79
Fig. 5-9	Comparison of pressure on the front of FLTS	… 79
Fig. 5-10	Comparison of elevation of FLTS of time history	… 80
Fig. 5-11	FLTS of time history of vertical acceleration	… 80
Fig. 5-12	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 20 sec.)	… 80
Fig. 5-13	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 20 sec.)	… 81
Fig. 5-14	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 25 sec.)	… 81
Fig. 5-15	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 25 sec.)	… 81
Fig. 5-16	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 30 sec.)	… 82

Fig. 5-17	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 30 sec.)	...	82
Fig. 5-18	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 35 sec.)	...	82
Fig. 5-19	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 35 sec.)	...	83
Fig. 5-20	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 40 sec.)	...	83
Fig. 5-21	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 40 sec.)	...	83
Fig. 5-22	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 45 sec.)	...	84
Fig. 5-23	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 45 sec.)	...	84
Fig. 5-24	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 50 sec.)	...	84
Fig. 5-25	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 50 sec.)	...	85
Fig. 5-26	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 55 sec.)	...	85
Fig. 5-27	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 55 sec.)	...	85
Fig. 5-28	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 60 sec.)	...	86
Fig. 5-29	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 60 sec.)	...	86
Fig. 5-30	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 65 sec.)	...	86
Fig. 5-31	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 65 sec.)	...	87
Fig. 5-32	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 70 sec.)	...	87
Fig. 5-33	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 70 sec.)	...	87
Fig. 5-34	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 75 sec.)	...	88
Fig. 5-35	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 75 sec.)	...	88
Fig. 5-36	Snapshot FLTS (Box type) (Time for 80 sec.)	...	88
Fig. 5-37	Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 80 sec.)	...	89
Fig. 5-38	Computer Graphic image using MPS simulation result (Time for 60 sec.)	...	89

## Figure Table

Table 1-1	List of tsunami calculation formula (Tsunami wave pressure, tsunami wave force, buoyancy)	...	4
Table 1-2	Specification table of target floating large size tsunami shelter	...	5
Table 2-1	Condition of boundary of inflow	...	18
Table 3-1	Model floating body parameters	...	25
Table 4-1	Conditions of calculation(2D-MPS)	...	48
Table 4-2	Conditions of calculation(3D-MPS)	...	59
Table 4-3	Conditions of calculation(3D-mooring MPS)	...	66
Table 5-1	Main specifications of FLTS Hospital	...	73
Table 5-2	Conditions of calculation (FLTS-Box type)	...	76
Table 5-3	Conditions of calculation (FLTS-Cylinder type)	...	76

# 第1章 序 論

## 1-1 次世代への津波避難施設—浮体式大型津波シェルター—

2011年3月11日東日本大震災が発生、その災害の規模・被害に日本国民は胸を痛めた。過去の経験から、全世界のなかでも津波災害の減災に尽力してきた日本国でさえ、多くの命、財産を守れなかった。むろんこの災害後、津波減災にかかわる多くの研究者が、この事態を重く受け止め、本現象の解明と減災のためのソリューションを多く検討している。本研究は次世代の避難施設の創出として浮上式津波避難施設の開発の一端である。本研究の目標は、大津波を被災した住民の被災直後の生活水準を低下させないことである。現状、その最も適切な施策は、津波襲来の予想される沿岸地域に『適切な津波防御施設』を設置し、適切な避難行動をとることができる『ハザードマップの運用』を実施することであると考えられている。東北地方太平洋沖地震に起因する東日本大震災直後より、先述した通り、津波工学・土木工学・安全工学・船舶海洋工学などの多岐にわたる分野の研究者が、未曾有の災害を目の当たりにし、その定説を見直し、それに対応するように、国がその安全基準等を大きく多く見直した。行政・立法界にもその重要性を認識され、その一つの成果として、「津波防災地域づくりに関する法律（平成23年法律第123号）」が制定された。法律では、津波浸水想定国民への公表、想定から都道府県が「津波防災地域づくりを総合的に推進するための計画（推進計画）」の提示が求められるようになった。これは、想定基準を明確にし、その基準に従って、具体的な津波防護施策を、国による包括的な施策だけではなく、『地方行政』が主体に実施しなければならなくなったという大きな津波対策行政の転換であった。逆をとらえれば、災害直後の復旧復興を実質実施する地方行政が、過去の経験をもとに、積極的な津波防護施策を実施することが可能となった。<sup>(1-1)</sup>現状の施設や施策ではカバーしきれない課題は多い。そこで、次世代への津波避難施設や施策が、多くの津波災害に対する解決策となりうる可能性をもち、その需要は今後高まると考えられる。その一つに、浮体構造物を避難場所とすることにより、自身の浮力で津波波面上に避難空間を浮上させることが可能な著者ら<sup>(1-2)</sup>が提案した『浮体式大型津波シェルター（Floating Large size Tsunami Shelter）』がある。

高齢者や年少者、入院患者等、災害時の避難に支援が必要な「災害時要援護者」とその援護者にとって、津波来襲時の高台への避難は、津波から逃げ遅れる危険性が高く、現状避難対策が十分でない。東北地方太平洋沖地震による大津波の人的被害の主因が高齢者と障がい者等の「災害時要援護者」の水死であったことから明らかである。<sup>(1-3)</sup>現在までも、沿岸地域のうち、安全な避難場所に所定の時間と距離等の条件で避難ができない地域を「津波避難困難地域」と位置づけ、国は積極的に、堅牢な構造を持つ「津波避難ビル」、「津波避難タワー」の指定を促進してきた。この結果、東北地方太平洋沖地震による津波来襲時の避難の一助となり、人的被害の抑制に効果があったとされる報告がある。しかし、一方で設計時津波高さよりも高い津波が来襲し、人間が建物の屋上から津波に漂流した例も存在する。また、これらの建築物の浸水部は、建築の機能を

保持できず大半は大破した。そのため、大量の医療、生活等に必要な物資が漂流、流失し、さらに居住空間の損失、衛生環境の劣化等により、著しく生活水準が低下する可能性が高い。高野ら<sup>(1-4)</sup>は、東北地方太平洋沖地震に伴う津波を被災した沿岸地域において、災害後一週間、避難所生活、物資輸送の困難と物資の欠乏等から、著しく生活水準が低下していたことを明らかにしている。先述した「災害時要援護者」にとってこれらの地域では、生命の維持が厳しい環境であったと推測される。こうした「災害時要援護者」を中心に避難対策を考えたとき、移動を伴わない避難手段、そして避難施設がその施設機能を被災により低下させない新たな避難施設の創出により人的被害を減少させることができると考えられる。著者ら<sup>(1-2)</sup>は、浮体構造物を避難場所とすることにより、自身の浮力で津波波面上に避難空間を浮上させることが可能な「浮体式大型津波シェルター」を提案した。浮体式大型津波シェルターは平時、陸上の構造物として機能を果たし、津波来襲時に避難場所として機能し、被災後に被災者の生活拠点として機能する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。

## 1-2 数値シミュレーションを用いた浮体式大型津波シェルターの設計に必要なスキームの検討

津波防災地域づくり法における指定避難施設の要件、すなわち施設の指定にあたって、津波災害警戒区域内において、以下の3つの要件を満たす必要がある。<sup>(1-5)(1-6)</sup>

- ①構造上の要件（津波に対して安全な構造方法とすること）
- ②避難上の要件（避難上有効な場所に配置かつ、当該場所までの経路の確保）
- ③管理上の要件（津波発生時に住民等の開放されること）

浮体式大型津波シェルターは、構造を海上構造物に準じる形で据え付ける方式をとる場合、建築基準法等に対し、別途検討事項が必要となる。また、指定避難施設とする場合は、津波防災地域づくり法施行規則第31条の基準に従う必要があり、これも一般建築物に対する法令であるため、別途検討が必要である。本研究では、この点については本研究の趣旨と離れるため、前提として適合しているものとする。ここでは、事項①の津波中における構造物の構造上の要件について、その設計手法を提案するものとする。

この要件については、「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」（平成23年11月17日国住指第2570号）における「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定方針」<sup>(1-7)</sup>に定められており、その設計手法について明確に与えられている。Fig. 1-1にその設計方法の流れを示す。Fig. 1-1から、浮体式大型津波シェルターの設計を行うにあたり、津波流体中における「構造物へ作用する津波波圧の算定」、「構造物に作用する浮力の算定」の実施が求められる。Table 1-1に、現状の算定手法について整理をしている。地方自治体が波高している津波ハザードマップに示された浸水深を基に津波波圧、波力の算定、浮力の算定を実施している。しかしこの算定基準は当然、陸上に固定された建築物に適用できるものであると考えられる。

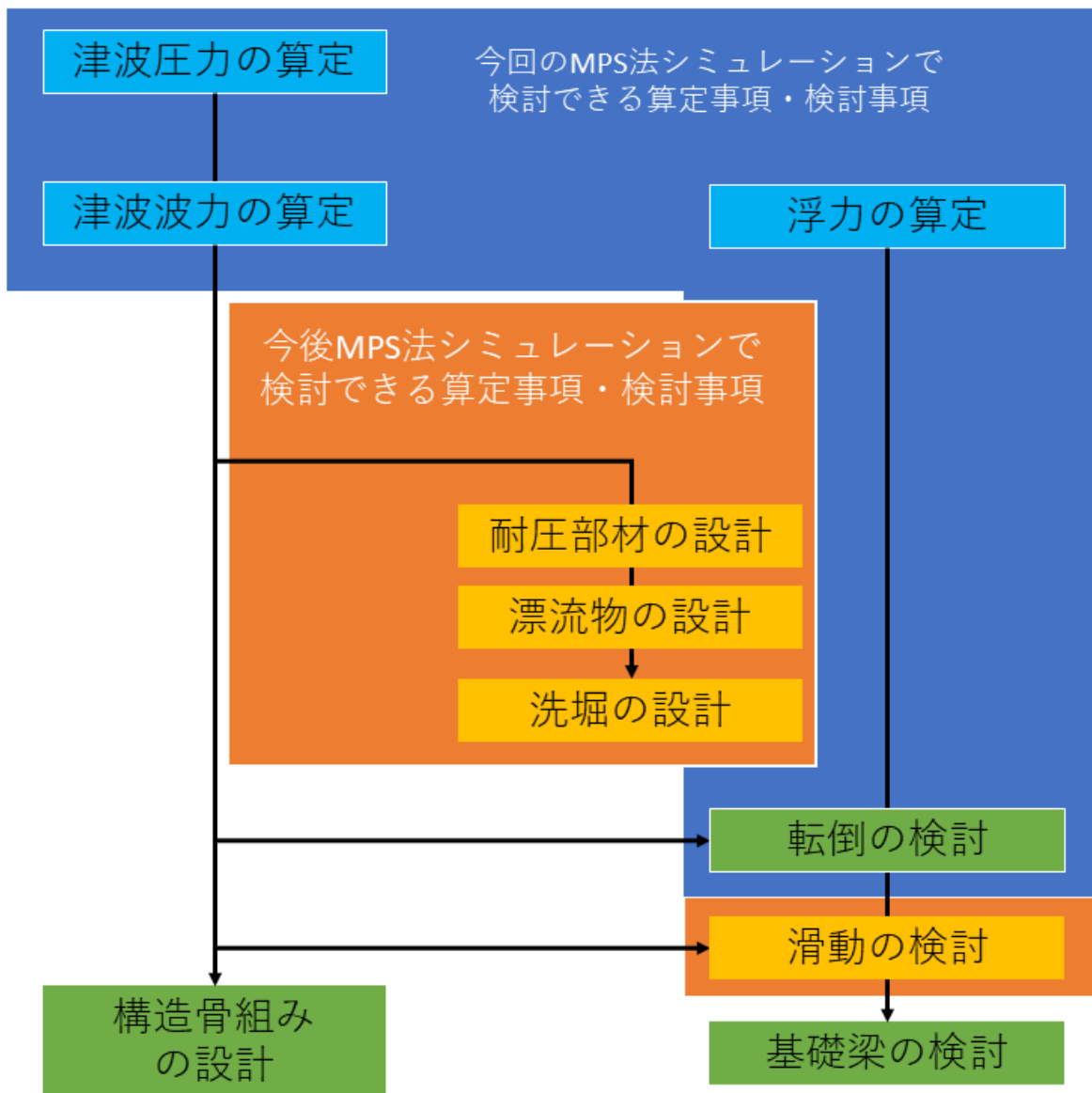


Fig. 1-1 Design method of designated evacuation facility<sup>(1-5)(1-7)</sup>



Table 1-1 List of tsunami calculation formula (Tsunami wave pressure, tsunami wave force, buoyancy)

算定項目	算定式 「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定方針」より <sup>(1-7)</sup>									
津波波圧算定式	<p>構造設計用の進行方向の津波波圧は下式により算定する。</p> $qz = \rho g(ah - z) \text{ —————(4.1)}$ <p>ここに、</p> <p>qz : 構造設計用の進行方向の津波波圧 (kN/m<sup>2</sup>)            ρ : 水の単位体積質量 (t/m<sup>3</sup>)            g : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)            h : 設計用浸水深 (m)            z : 当該部分の地盤面からの高さ (0 ≤ z ≤ ah) (m)            a : 水深係数。3 とする。ただし、次の表に掲げる要件に該当する場合は、それぞれ a の値の欄の数値とすることができる。(注: この係数は、建築物等の前面でのせき上げによる津波の水位の上昇の程度を表したものでない。)</p> <table border="1" data-bbox="507 719 1225 875"> <thead> <tr> <th></th> <th>要 件</th> <th>a の値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(一)</td> <td>津波避難ビル等から津波が生じる方向に施設又は他の建築物がある場合 (津波を軽減する効果が見込まれる場合に限る)</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>(二)</td> <td>(一)の場合で、津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から 500m 以上離れている場合</td> <td>1.5</td> </tr> </tbody> </table>		要 件	a の値	(一)	津波避難ビル等から津波が生じる方向に施設又は他の建築物がある場合 (津波を軽減する効果が見込まれる場合に限る)	2	(二)	(一)の場合で、津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から 500m 以上離れている場合	1.5
	要 件	a の値								
(一)	津波避難ビル等から津波が生じる方向に施設又は他の建築物がある場合 (津波を軽減する効果が見込まれる場合に限る)	2								
(二)	(一)の場合で、津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から 500m 以上離れている場合	1.5								
津波波力算定式	<p>構造設計用の進行方向の津波波力は、4.1 式の津波波圧が同時に生じると仮定し、下式により算定する。</p> $Qz = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \text{ —————(4.2)}$ <p>ここに、</p> <p>Qz : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)            B : 当該部分の受圧面の幅 (m)            z<sub>1</sub> : 受圧面の最小高さ (0 ≤ z<sub>1</sub> ≤ z<sub>2</sub>) (m)            z<sub>2</sub> : 受圧面の最高高さ (z<sub>1</sub> ≤ z<sub>2</sub> ≤ ah) (m)</p>									
浮力算定式	<p>津波によって生じる浮力は、下式により算定する。</p> $Qz = \rho g V \text{ —————(4.3)}$ <p>ここに</p> <p>Qz : 浮力 (kN)            V : 津波に浸かった建築物の体積 (m<sup>3</sup>)</p> <p>ただし、開口率を勘案して水位上昇に応じた開口部からの水の流入を考慮して算定することができる。</p>									

しかし、浮体式大型津波シェルターは、流体中において構造物が浮上することが予想されるため、様々な点で画一的な基準を設けて構造計算等を実施することはできない。そこで、水理実験による検証が適切であると考えられる。しかし、水理実験の場合、入射できる波長が限られるため、津波のような連続的な流れがあるような場合の検討には不十分<sup>(1-8)</sup>であり、量産を考える場合、非効率である。そこで、数値シミュレーションを使用した解析手法に着目する。津波などの非線形流体现象、自由表面上での流体-剛体等の複合的な条件下でもシミュレーションが可能であれば、本件の検討に十分通用する。津波流体下における数値シミュレーション、特にマイクロな範囲において使用されるものとして、有川らが開発した VOF 法をベースとした CADMAS-SURF<sup>(1-9)</sup>、粒子法である DEM 法<sup>(1-10)</sup>、越塚が開発した MPS 法<sup>(1-11)</sup>を用いる研究が多い。

本研究では、Table 2、Fig. 1-2 に示す規模の浮体式津波避難施設である浮体式大型津波シェルターの開発を対象とする設計スキームを Fig. 1-3 を提案する。通常、建築物の安全性の検討にシミュ

レーションを用いる場合、構造部材、基礎梁を検討したのちの構造物モデルに対し実施することが一般的であるが、津波流体中における浮体構造物への、浮上性能や津波による構造物への作用波圧は、構造部材・基礎梁の設計に必要な不可欠な情報であるため、設計スキームとして、設計の段階でシミュレーションを組み込みスキームとしている。

Table 1-2 Specification table of target floating large size tsunami shelter

延床面積	18000m <sup>2</sup>
横幅×縦幅×高さ	60m×60m×20m またはφ60m×20m
階層	地上5階もしくは地上3階2階（病院部は4階）
病床数	160床
最大許容収容可能人数	750人

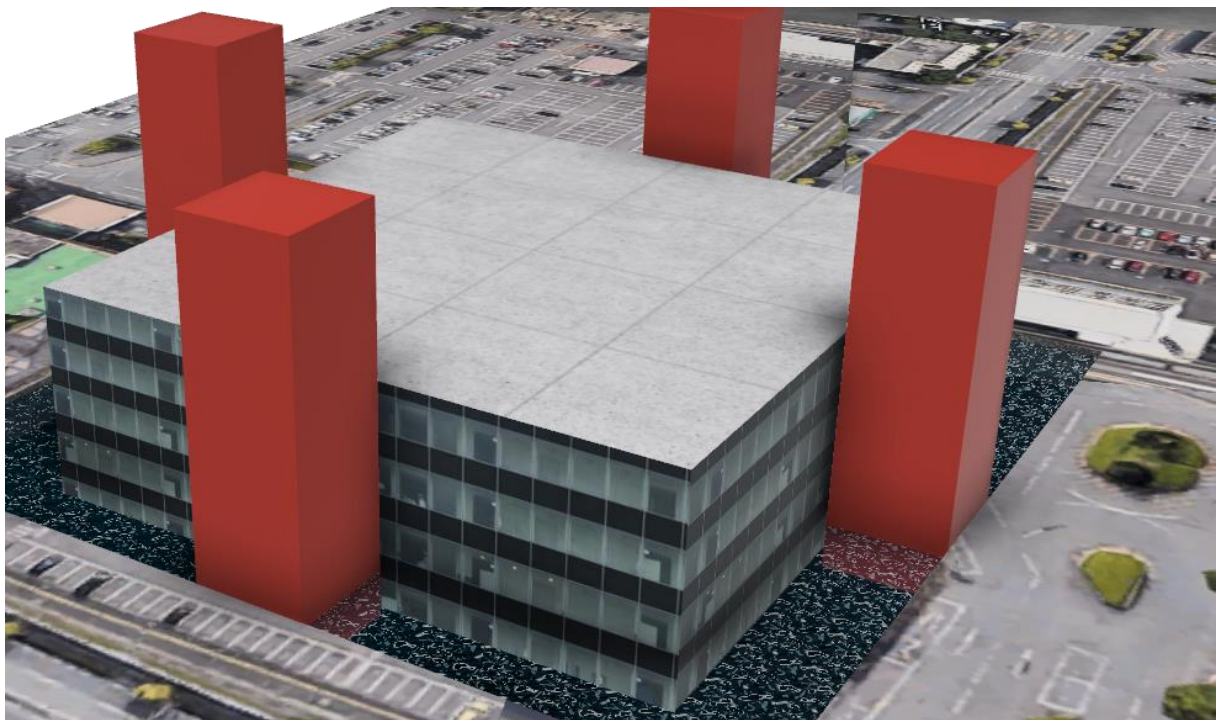


Fig. 1-2 Floating Large size Tsunami Shelter (for hospital)

## MPS法を用いた浮体式津波避難施設的设计スキーム

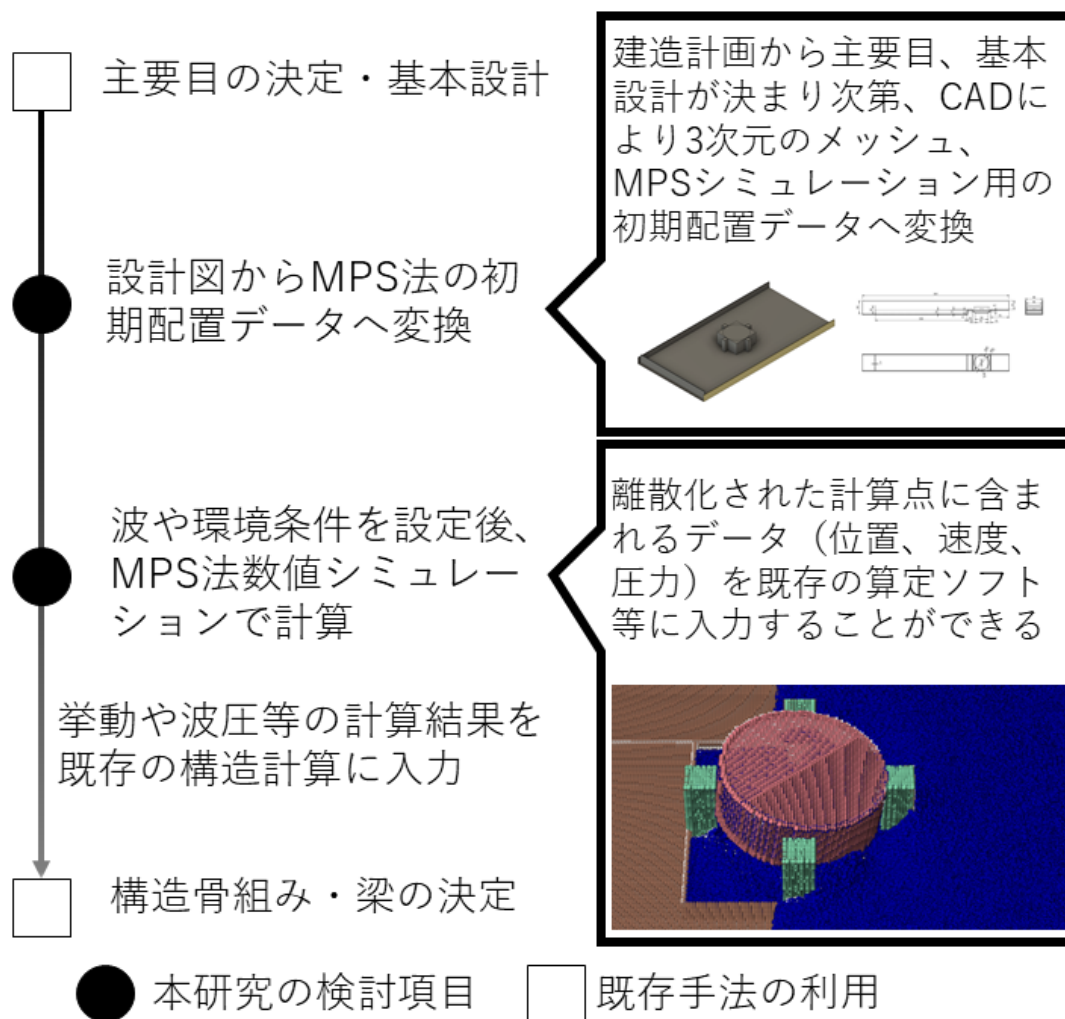


Fig. 1-3 Design scheme of floating tsunami evacuation facility using MPS method

### 1-3 本研究の目的と意義

津波避難施設的设计に必要な項目（津波波圧、浮力等）を、既存の固定式津波避難施設に適用した手法によって陸上設置型の浮体構造物への算定に使用することは適当でない。そこで、本研究の目的は、第一に陸上設置型の浮体式津波避難施設である「浮体式大型津波シェルター」の津波避難施設的设计に必要な項目の算定を、前節で提案した MPS 法数値シミュレーションを使用した設計スキームを用いることによって算定が可能であることを明らかにすることである。第二に、この検討により津波中の浮体式大型津波シェルターの動揺に問題がなく、構造物内の避難した人間や備蓄物資を保護するなどの浮体式大型津波シェルターがもつ機能を発揮することができるか明らかとし、他の津波避難施設との優位性を示すことである。陸上設置型の津波避難施設の研究開発は前節にあげたように、当該構造物が津波の波面上に浮上するため、避難の手間がないこと

が最大の特徴である。この特徴から、備蓄物資や被災後の生活衛生施設の保護が可能である。このような大規模な陸上設置型の浮体式建造物の挙動や建造物への作用圧力を検討する研究は著者以外にも、著者が知る限り、浮沈式津波避難用の建造物を提案した陸田らの研究<sup>(1-12)</sup>のみである。本研究では、津波被災後の使用不能区画の減少の抑制や被災後の災害復興拠点としての活用を目指し、浮上式を採用する。著者ら<sup>(1-2)</sup>は以前、浮体式大型津波シェルターが孤立波の入射により浮上することを水理実験ならびに MPS 法数値シミュレーションにて示した。しかし、この検討だけでは浮上性能を明らかにしたのみである。そこで本研究では、実津波の評価として適した連続的な波を入射波条件とし、陸上建造物として設置を想定した浮体モデルによって数値シミュレーションを実施し、現状の津波避難施設と同様の構造計算等へ活用できること示す。この点は、解明されておらず、機能性の高い浮体式大型津波シェルターの実現に向けて必須な検討であると考えられる。

## 1-4 論文の構成

第 1 章では、津波流体中、その場が避難場所となる浮体式大型津波シェルターの提案、その研究開発の重要性について述べた。その後、既存の手法のみでの設計は不十分であること、新たな設計スキームが必要であり、数値シミュレーションによる評価が有用であることを提案した。流体と浮体の連成問題、とくに津波流体下の現象に対して近年多くの研究が採用し適用性が明らかとなってきた MPS 法数値シミュレーションを本研究の設計スキームに採用し、その選択に至る経緯を述べた。

第 2 章では、「Moving Particle Semi-implicit method (MPS 法)」と題して、MPS 法について詳述した。基本的な離散化、計算アルゴリズムを述べたうえで、本研究の中核的な内容となる、流体と浮体の連成運動モデルや水流の流入流出境界モデルについて述べている。その構成は以下の通りである。

- 1) 粒子間相互作用モデル
- 2) MPS 法のアルゴリズム
- 3) 境界条件
- 4) 剛体モデル
- 5) 数値計算の精度向上（圧力振動の抑制、進行波の波高減衰の）

第 3 章、第 4 章は、MPS 法によって適切に浮体式大型津波シェルターが遭遇する津波流体下において、どのような挙動等において特性があるのか、また数値シミュレーションにて、適切に流体と浮体の連成運動がシミュレートできるかについて検討を行った章である。著者らは水理水槽実験ならびに粒子法数値シミュレーションの結果から、直方体型浮体を堀に設置することにより、津波波力検討等に多く用いられている孤立波を建造物に入射した実験において、において鉛直方

向へ浮上することを確認した。また、浮上中においても漂流が大きいことが明らかになったため、浮体周辺に係留柱を設置するドルフィン係留を提案、漂流運動を抑制することが可能であることを確認した。最終的に、係留施設の設計は本構造物において重要な検討事項であることを示した。しかし、2つのコンセプトについては示すには十分な検討を行っていない。

そこで本研究では、第3章にて浮体運動の特性を検討する。特に、陸田の検討においても、浮体の外面形状が運動特性と、浮体へ作用する力との因果関係について言及している。そこで、無指向性で浮体設計の基礎的な直方体と円筒型の浮体構造物における運動特性を検討する。津波流は波の進行方向とその鉛直方向に対しての作用が大きいと考えられるため、2次元面での運動について検討を行った。第4章では、その結果とMPS法数値シミュレーションの結果との比較により、本研究で使用する数値計算シミュレーションの本研究で扱う事象への適用性を明らかにする。

第5章では、「MPS法による浮体式大型津波シェルターへの設計への適用に関する検討」と題して、第1章で提案した「MPS数値シミュレーションを使用した浮体式大型津波シェルターの設計スキーム」について、その実用性を明らかにし、浮体式大型津波シェルターが対象となる津波流体下において、その果たすべき機能が果たされ、安全に津波を過ごすことができるか確認をした。

以上の検証を通して、第6章では、本研究で提案をした、MPS数値シミュレーションを使用した浮体式大型津波シェルターの設計スキーム」の検討から得られた成果を総括した。

## 第2章 MPS法

### 2-1 緒言

1994年に越塚が開発した Moving Particle Semi-implicit (MPS) <sup>(1-11)</sup>法は、非圧縮性流れの計算アルゴリズムによるラグランジュ法に基づいた数値計算手法である。粒子法における「粒子」とは、空間を離散化した計算点である。界面の大変形を扱うことが容易で、複雑な格子生成作業が必要ない利点を持つ。開発後から船舶海洋工学、土木工学、原子力工学、生体工学など多くの分野でMPS法が利用され<sup>(2-1)</sup>、現在では、SPH法とDEM法と並び、粒子法の代表的な数値シミュレーション法である。本研究の対象である、津波の構造物への作用や影響に関するMPS法数値シミュレーション用いた解析検討は、多くの検討が行われている。<sup>(2-2)(2-3)(2-4)</sup>

### 2-2 粒子間相互作用

#### 2-2-1 支配方程式

現在MPS法は、陽解法<sup>(2-5)</sup>と半陰解法<sup>(1-11)</sup>の2通りの手法があり、またこれに紐づけられる形で、支配方程式が非圧縮性の流体か、微小な圧縮性を認めた流体を取り扱うのかが変化してくる。本研究では、非圧縮性流れを取り扱う半陰解法アルゴリズムを使用した手法を採用する。MPS法を用いた津波に関する数値シミュレーションの研究において現在では、大規模な並列計算機を使用した陽解法による手法がみられるようになってきた。しかし、本研究では浮体式大型津波シェルター的设计のために必要な要件である必要があり、スタンドアローンのコンピューターで実行可能なプログラムを採用すべきである。また、計算の信頼性を向上させるため、検証例が多い手法を採用すべきである。これら両面からの検討で、半陰解法による手法を採用する。五十里らは、共役勾配法の計算行列の特性をついた手法から、半陰解法によるMPS法の並列化を実施している。本計算プログラムには導入されていない。非圧縮性流体の支配方程式は連続の式とナビエ・ストークスの方程式である。対象の流体の速度がマッハ数以下のため、非圧縮流体におけるナビエ・ストークスの式を用いる。式(2.1)は質量保存則であり、流体力学における連続の式である。また、式(2.2)は運動量保存則であり、Navier-Stokes方程式と呼ばれる。ここで、 $\rho$ は流体の密度、 $t$ は時間、 $\mathbf{v}$ は速度ベクトル、 $P$ は圧力、 $\mathbf{g}$ は重力ベクトルおよび $\nu$ は動粘性係数である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{g} \quad (2.2)$$

連続の式は密度の時間変化がゼロ、すなわち、密度が時間に対して一定であることを示している。同式は同時に速度の発散がゼロであることも意味しているが、MPS法では式(2.1)に示すように密度一定の条件を用いる。式(2.2)左辺の  $D/Dt$  はラグランジュ微分であり、流体とともに移動する視点からの時間微分である。よって、オイラー式の数値シミュレーションのネックである Navier-Stokes 方程式に含まれる移流項はラグランジュ記述では粒子の移動として捉えるため、移流項による数値拡散や数値振動は抑えられる。ラグランジュの方法を用いる MPS 法では左辺の速度ベクトルのラグランジュ微分はそのまま時間微分と考えてよい。右辺第一項は圧力勾配項、第二項は粘性項、第三項は重力項である。非圧縮性流体の支配方程式は、双曲型、放物型、楕円型の3つの偏微分方程式の型を含んでいる。双曲型は対流項であるが、粒子法はラグランジュの方法なので対流項を陽には計算しない。放物型は粘性項であり、非定常の拡散方程式である。楕円型は圧力勾配項と連続の式を組み合わせ得られる圧力のポアソン方程式である。

## 2-2-2 重み関数

MPS法では、式(2.3)の重み関数を導入し、この重み関数を利用して支配方程式の微分演算子に対して粒子間相互作用モデルを用意する。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r \leq r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (2.3)$$

ここで  $r$  は粒子間距離、 $r_e$  はパラメータであり重み関数の影響半径である。式(2.3)の重み関数を導入することにより、粒子間距離が  $r_e$  より離れた位置にある粒子の影響をなくすることができる。 $r_e$  は小さいほど相互作用する粒子数が減るので計算時間が短縮できる。しかし、小さすぎると計算が不安定になる。これまでの研究から  $r_e$  は粒子間距離  $l_0$  の2~4倍が推奨されている。本計算では、2次元による計算の時2.1、3次元の計算のとき1.5を採用している。

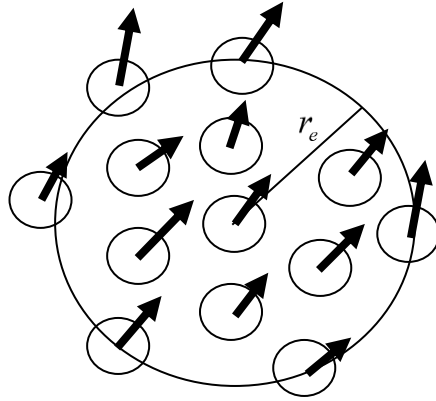


Fig. 2-1 Interaction between particles

### 2-2-3 粒子数密度

ある粒子  $i$  とその近傍粒子  $j$  の位置ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{r}_i$ ,  $\mathbf{r}_j$  とする。粒子  $i$  の位置における重み関数の和をとったものを粒子数密度と呼び、式(2.4)に示す。

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (2.4)$$

非圧縮性流体では流体の密度は一定である。したがって、粒子数密度も一定でなければならない。この一定値を  $n^0$  とおく。 $n^0$  の値は、初期粒子配置において十分内側にあり、かつその影響半径内に自由表面がない粒子の粒子数密度を用いる。以降、計算中はこの値を用いる。ところで、式(2.4)における重み関数は、2 個の粒子が互いに接近する場合には距離がゼロに近づくにつれて  $w$  の値は無限大に近づく。つまり、粒子数密度が限りなく大きくなる。これにより、2 個の粒子が完全に重なり合う前に必ず粒子数密度が  $n^0$  より上昇し、粒子間には斥力が働く。これは、粒子の通り抜けや粒子の空間分布のむらを防ぐのに有効であり、計算の安定化に寄与する。

### 2-2-4 勾配モデル

勾配(gradient)はスカラー変数に作用してベクトルが得られる演算子である。互いに近傍する粒子  $i, j$  がそれぞれ位置ベクトル  $\vec{r}_i, \vec{r}_j$  と物理量  $\phi_i, \phi_j$  を保持しているとき、粒子  $j$  の物理量  $\phi_j$  を粒子  $i$  周りで Taylor 展開する勾配ベクトルとして式(2.5)が得られる。

$$\langle \nabla \phi \rangle_{ij} = \frac{\phi_j - \phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) \quad (2.5)$$

異なる 2 点のスカラー変数値があれば、式(2.5)として勾配ベクトルが得られる。ただし、こ



の勾配ベクトルは、粒子間の相対位置ベクトルの方向成分を表すものであり、これと垂直な方向の成分が欠落している。そのため、 $d$ 次元空間において $1/d$ の情報しかない。

Fig. 2-2 に MPS 法における勾配モデルの概念図を示す。MPS 法では、式(2.5)に対して計算開始時における粒子数密度  $n^0$  および重み関数  $w$  を用いて重みつき平均を行い、近傍粒子が任意の方向に対して均等に存在すると仮定して  $d$  倍する。これによるえられる式(2.6)を粒子  $i$  の位置における勾配モデルとして用いる。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{i \neq j} \left[ \frac{\phi_j - \phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (2.6)$$

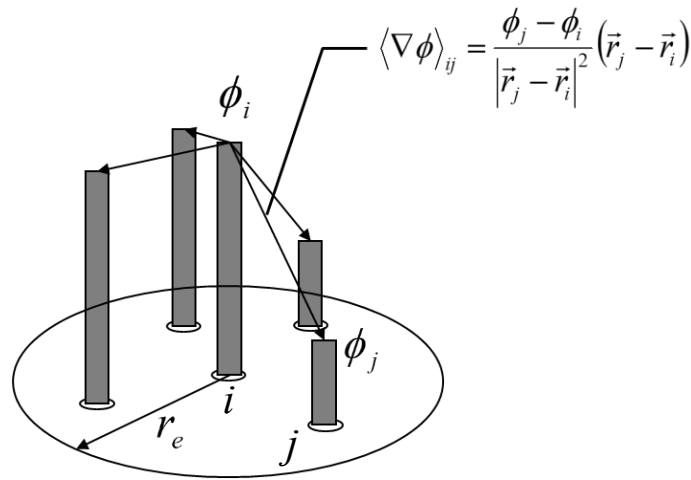


Fig. 2-2 Concept of gradient model

### 2-2-5 発散モデル

発散(divergence)はベクトルに作用してスカラーが得られる演算子である。互いに近傍する粒子  $i, j$  がそれぞれ位置ベクトル  $\vec{r}_i, \vec{r}_j$  とベクトル編数値  $\vec{u}_i, \vec{u}_j$  を保持しているとする。このときの 2 点間の相対位置ベクトル方向  $x'$  成分における発散を考えると式(2.7)のようになる。

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial x'} = \frac{(\vec{u}_j - \vec{u}_i) \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} \quad (2.7)$$

式(2.7)は式(2.5)と同様に、相対位置ベクトルの方向成分しか考慮されていない。そこで、勾配モデルと同様に他の方向における成分の寄与を考慮した式(2.8)を、MPS 法における発散モデルとする。MPS 法における発散モデルの概念図を Fig. 2-3 に示す。

$$\langle \nabla \vec{u} \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\vec{u}_j - \vec{u}_i) \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (2.8)$$

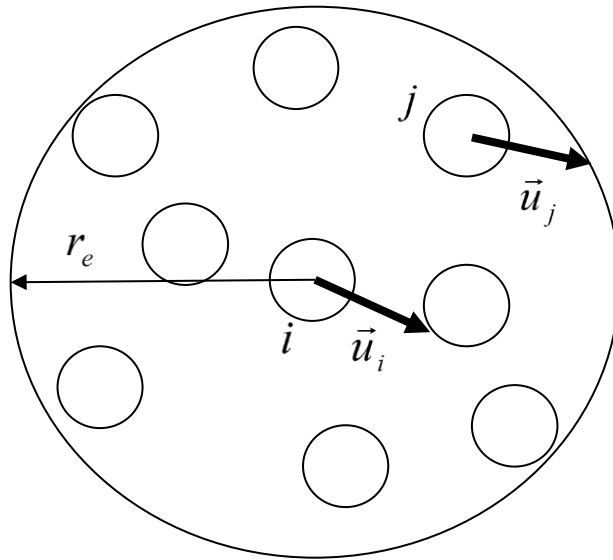


Fig. 2-3 Concept of divergence model

### 2-2-6 ラプラシアンモデル

ラプラシアンは物理的には拡散を意味する演算子である。MPS 法におけるラプラシアン (Laplacian) モデルは式(2.9)のように与えられる。また、MPS 法におけるラプラシアンモデルの概念図を Fig. 2-4 に示す。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(\vec{r}_j - \vec{r}_i)] \quad (2.9)$$

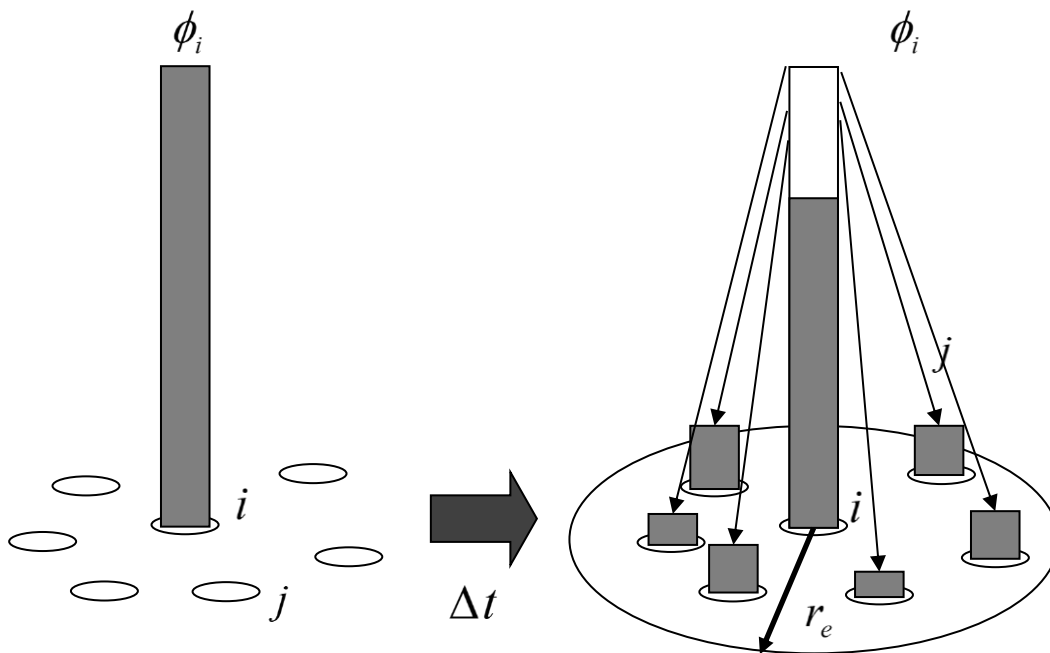


Fig. 2-4 Concept of Laplacian model

式(2.9)は Fig. 2-4 に示されるように、粒子  $i$  の変数値の一部を近傍粒子  $j$  に重み関数の分布で分配することを意味している。ここで、 $\lambda$  は統計的な分散の増加を解析解と一致させるための係数であり、式(2.10)のように表わされる。

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2 w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)}{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)} \quad (2.10)$$

$\lambda$  は初期粒子配置において、十分内部の粒子において計算したものをを用いる。計算中はこの値を使い続けるものとする。

## 2-5 MPS 法数値シミュレーションの計算アルゴリズム

MPS 法の計算アルゴリズムを Fig.2-5 に示す。アルゴリズム自身は SMAC 法<sup>(1-11)</sup>を基にしている。MPS 法はその名の Semi-implicit が示すように半陰的なアルゴリズムを用いている。アルゴリズムは全体として、時間進行の計算を繰り返しながら過去から未来に向かって進めていくようにする。各時間ステップでは、ある時刻における粒子の位置、速度、圧力が分かっているとして、新しい時刻の粒子の位置、速度、圧力を計算する。各時間ステップの計算は陽的な部分と陰的な部分に分かれる。支配方程式における、連続の式とナビエ・ストークス方程式の圧力勾配項を陰的に、ナビエ・ストークス方程式の粘性項と重力項を陽に計算する。Fig. 2-5 にアルゴリズムのフローチャートを示す。

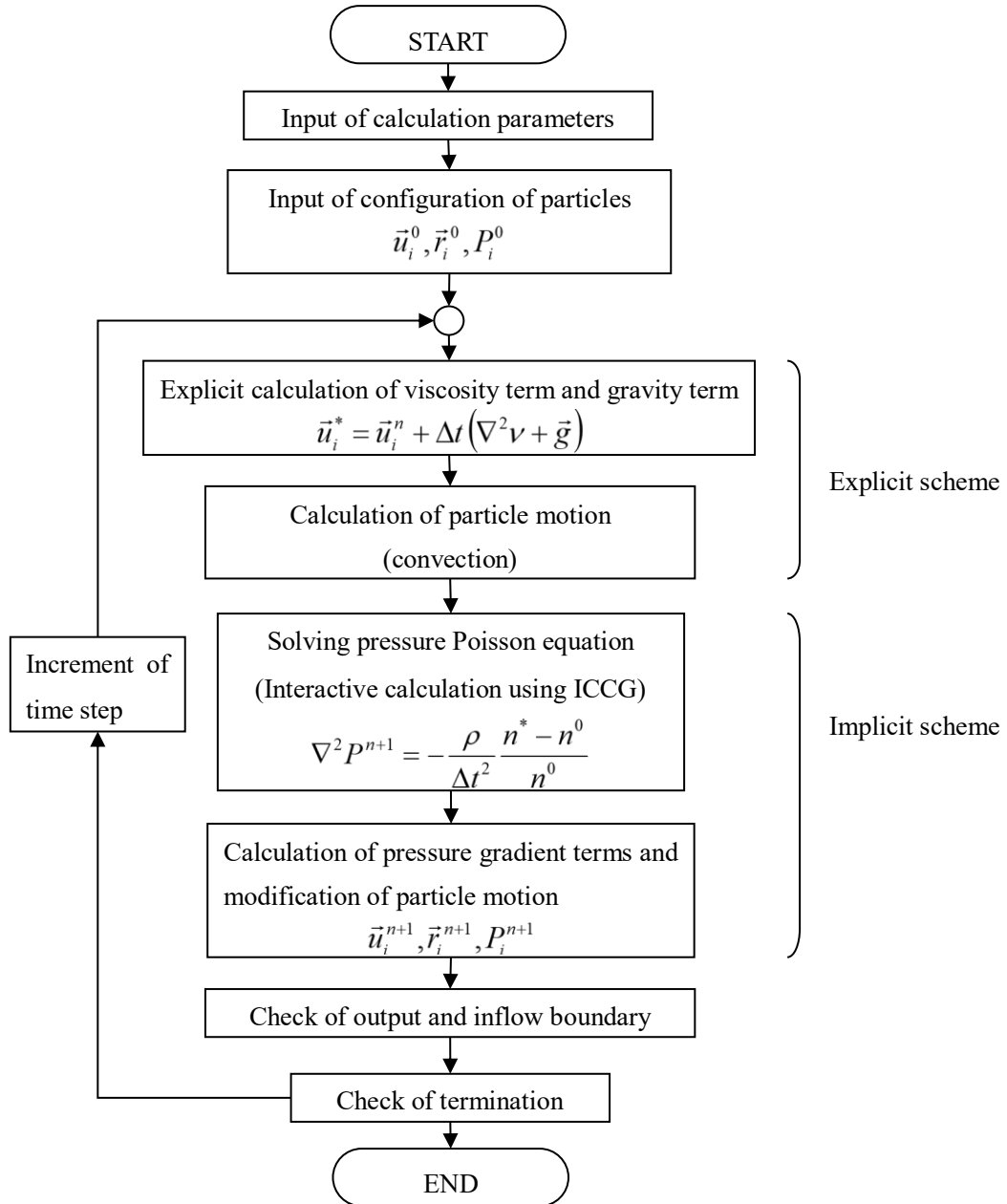


Fig. 2-5 Computational algorithm of incompressible fluid

## 2-4 境界条件

### 2-4-1 自由表面条件

自由表面条件では自由表面の判定条件に粒子数密度を用いる。前述の半陰的アルゴリズムにおける陽的な計算が終了した時点で式(2.11)を満たす粒子を、自由表面上に存在するとして判定する。

$$n_i^* < \beta n^0 \quad (2.11)$$

式(2.11)における  $\beta$  の値は経験的に、0.95 または 0.97 がよいとされている。<sup>(2-1)</sup>本計算では 0.97 を採用している。自由表面上の粒子にはディリクレ境界条件として、圧力のポアソン方程式を解く際に圧力がゼロであるという条件を与える。粒子数密度を用いる自由表面条件は単純であり、流体の分裂や合体といった表現にも特別なアルゴリズムを必要としないといった特徴がある。飛沫といった分散して孤立してしまった粒子であっても、粒子数密度の低下により自由表面粒子として判定される。自由表面粒子として判定された粒子は圧力勾配項の計算がなされないため、孤立した粒子は重力による自由落下の運動をすることになる。孤立した粒子が流体表面上に落下し取り込まれると、粒子数密度の上昇により通常の流体計算となる。

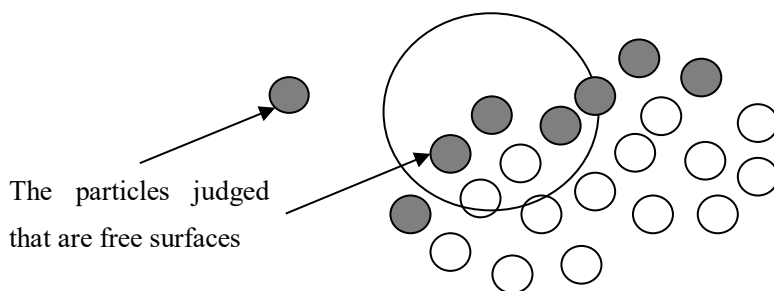


Fig. 2-6 Free surface boundary

## 2-4-2 壁境界

壁境界には Fig.2-7 に示すような座標を固定した壁粒子を配置する。壁粒子は圧力の計算を行う内側の壁粒子と圧力の計算を行わない外側の壁粒子の 2 種類を用意する。流体粒子と接する内側の壁粒子では計算された圧力を流体粒子の圧力勾配に用いると、壁に近づいた流体粒子は壁から跳ね返されるようになる。なお、壁粒子自体は座標が固定なので、圧力勾配項は計算しない。外側の壁粒子は、2-1-3 項で説明した条件により自由表面として判定されるのを防ぐために内側の壁粒子の外側に配置する。本研究で用いるプログラムは 2-1-2 項で説明した影響半径を粒子間距離の 2.1 倍としているので外側の壁粒子は 2 層分必要になる。

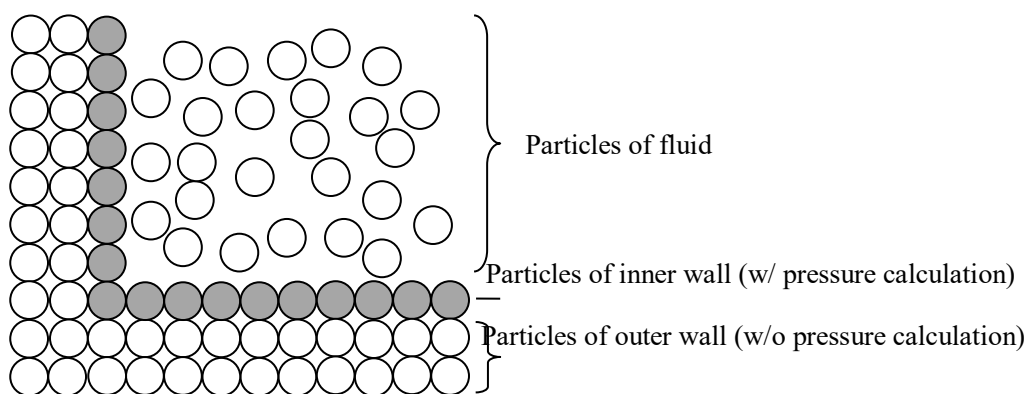


Fig. 2-7 Wall boundary

### 2-4-3 流入流出境界

流入境界の導入は、越塚の方法<sup>(2-1)(2-6)</sup>に従い導入を行った。粒子法はラグランジュ法であるが、流入・流出においては実際の粒子の流入や流出が必要となる。流入は基本的に速度を持って移動する壁粒子として計算する (Fig. 2-8)。最内側の流入粒子は壁粒子と同様の圧力を計算し、外側の流入粒子は圧力を計算しない、したがって、圧力に対して勾配ゼロのノイマン境界条件となる。最内側の粒子の移動距離が粒子間距離を超えたら、その粒子の位置に新しく流体粒子を発生させると同時に、移動する流入粒子を粒子間距離だけ戻す。これを繰り返すことで次々に流体粒子を流入することができる。この方法は、流入境界が一定でない場合でも適用することができるが (例えば、本件のような孤立波の造波等)、その場合は流入粒子にずれが生じるので、圧力を計算する粒子を2層分加える。

波の造波、境界に流速と波高を与え、その分の境界粒子が流体粒子に置き換わるように設定した。つまり、境界条件は Table 2-1 になるよう条件を与えている。また、引き波の再現が今後必要になる可能性があるので、境界付近で擬似的な流出境界を与えた。それは境界の近傍粒子が境界と衝突条件にある場合、粒子を消去するというものである。しかし、本方式であると、過剰な消去が行われてしまう可能性があることが分かっているため、それらの捕捉した流体粒子を圧力固定のディリクレ境界条件を与えて、柴田らのように一定の流速を保持したままの状態を仮想的に作り透過境界のような状態で粒子を消去する必要性がある。

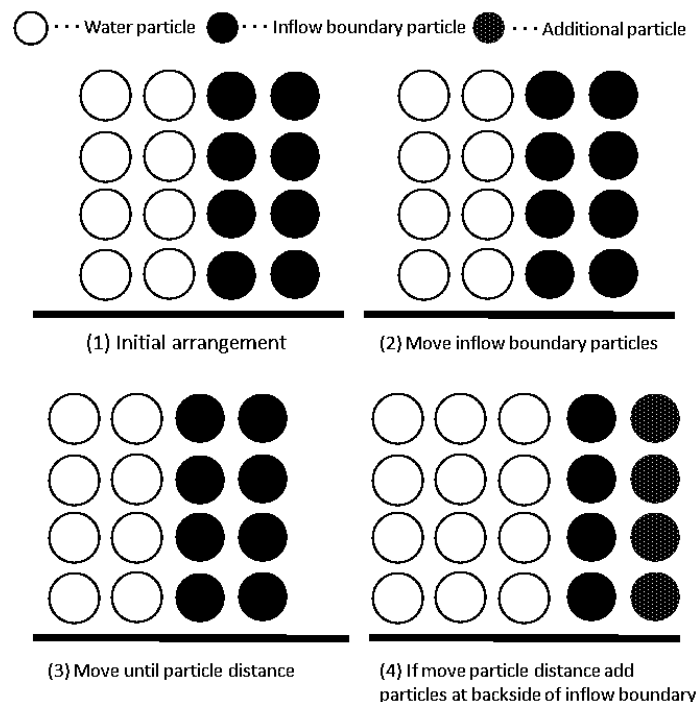


Fig. 2-8 Model of inflow boundary

Table 2-1 Condition of boundary of inflow

	Pressure	Wave Velocity	Wave Height
In flow	Neumann	Dirichlet	Dirichlet
Out flow	Dirichlet	Neumann	Neumann

## 2-5 剛体モデル

浮体のモデル化については、越塚らの浮体モデル<sup>(2-1)</sup>を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手法と、末吉らによる浮体に働く流体力から剛体の運動方程式を解く手法などが存在する。越塚らの手法を採用し、係留力の取扱い方法について定性的な有用性を示した。そこで、本研究においても同様の手法を採用する。

まず、 $N$  個の粒子で表された浮体モデルの初期位置での浮体形状、重心の座標  $r_g$ 、慣性モーメント  $I$  を求める。

$$\vec{r}_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \quad (2.12)$$

$$I = \sum_{i=1}^N m |\vec{r}_i - \vec{r}_g|^2 \quad (2.13)$$

$N$  個の粒子で表された剛体の重心座標を  $r_g$ 、慣性モーメント  $I$  とする。粒子  $i$  の座標を  $\mathbf{r}_i$ 、粒子 1 個の質量を  $m$  とする。慣性モーメントは時刻ゼロで計算し、それ以降は同じ値を用いる。

次に剛体を流体と相互作用させることを考える。ここで相互作用の強さはあまり大きくないと仮定し、陽的な段階で相互作用させる。まず、流体粒子と剛体粒子を区別することなく MPS 法アルゴリズムによって計算を行い、新しい時刻  $k+1$  の速度  $\vec{u}_i^{k+1}$  と座標  $\vec{r}_i^{k+1}$  を求める。ここで、非圧縮性流体の計算によって各剛体粒子は加速度  $\vec{a}_i^k$  を受けて流体として運動する。

$$\vec{u}_i^{k+1} = \vec{u}_i^k + \Delta t \vec{a}_i^k \quad (2.14)$$

$$\vec{r}_i^{k+1} = \vec{r}_i^k + \Delta t \vec{u}_i^{k+1} \quad (2.15)$$

この時、剛体粒子と流体粒子と一緒に運動するため、剛体粒子の相対位置がずれるが、時間刻み幅は大きくないため、位置のずれは大きくない。また、加速度  $\vec{a}_g^k$  は浮体モデルの重心の加速度であり、式(2.10)のように各剛体粒子が受ける加速度の平均値とする。

$$\vec{a}_g^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{a}_i^k \quad (2.16)$$

その後、重心座標変化量  $\vec{r}'_g$  と回転角変化量  $\theta'$  が保たれるように、剛体粒子の位置関係を元に戻

す。これは流体から剛体にかかる力を積分して剛体の運動を計算するのと同様の処理である。

$$\vec{r}'_i = \vec{r}_i^{k+1} - \vec{r}_i^k \quad (2.11)$$

$$\vec{r}_g^{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i^{k+1} \quad (2.12)$$

$$\vec{r}'_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}'_i \quad (2.13)$$

$$\theta' = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m \vec{r}'_i \times (\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^{k+1}) \quad (2.14)$$

$$\vec{r}'_i = \vec{r}'_g + \begin{bmatrix} \cos \theta' - 1 & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' - 1 \end{bmatrix} (\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^{k+1}) \quad (2.15)$$

最後に剛体粒子の速度と位置の修正を行い、それが終了したら次の時間ステップに進む。

$$\vec{u}_i^{k+1} = \frac{\vec{r}'_i}{\Delta t} \quad (2.16)$$

$$\vec{r}_i^{k+1} = \vec{r}_i^k - \vec{r}'_i \quad (2.17)$$

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(2.17)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(2.18)に、3次元での式(2.17)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。

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}'_g + \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_g^{k+1}) \quad (2.18)$$

この時、ある規格化された軸  $\mathbf{a}$  回りに  $\theta$  だけ回転させる際の回転行列を式(2.19)に示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_x &= \begin{pmatrix} a_x a_x (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ a_x a_y (1 - \cos \theta) + a_z \sin \theta \\ a_z a_x (1 - \cos \theta) - a_y \sin \theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{r}_y &= \begin{pmatrix} a_x a_x (1 - \cos \theta) - a_z \sin \theta \\ a_y a_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ a_y a_z (1 - \cos \theta) + a_x \sin \theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{r}_z &= \begin{pmatrix} a_z a_x (1 - \cos \theta) + a_y \sin \theta \\ a_y a_z (1 - \cos \theta) - a_x \sin \theta \\ a_z a_z (1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.19)$$



## 2-6 圧力振動の抑制

MPS法における圧力振動とは、粒子を模擬した計算点が保持する圧力値が時間的に大きく振動することである。各粒子の圧力が時間的に大きく振動する影響で、空間的にも圧力分布が不安定になる。圧力振動の原因は、MPS法アルゴリズムにおける圧力のポアソン方程式(Pressure Poisson Equation)のソース項が数値振動を起こすことである。MPS法の半陰的アルゴリズムでは、圧力勾配項を陰的に解く際に式(2.20)に示す圧力のポアソン方程式を用いる。

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \quad (2.20)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $\rho$ は流体密度、 $\Delta t$ は時間刻みを表す。また、 $n^0$ は初期粒子数密度であり、 $n^*$ は陽的ステップが終了時における仮の粒子数密度である。式(2.20)の右辺を圧力のポアソン方程式のソース項と呼ぶ。MPS法では圧力のポアソン方程式を導出する際に非圧縮条件として、粒子数密度  $n^*$  が任意の時刻および場所において、 $n^0$  を基準粒子数密度としてこれと等しいとする条件が与えられている。この条件を用いることにより、粒子数密度が基準粒子数密度と等しくなるように圧力が陰的に解かれることになる。この条件の利点としては、次の時間ステップへの誤差の蓄積がないことが挙げられる。粒子数密度は粒子の相対位置に関して非線形であるため、圧力のポアソン方程式を解き、粒子の座標および速度を修正した後であっても粒子数密度は厳密には基準粒子数密度と一致しない。しかしながら、本条件は任意の時刻において当該時刻の状態における基準値からのずれを用いた定式化となっているため、次の時間ステップへの誤差の蓄積が起こらない。一方で、本条件の欠点としては、 $n^*$  が計算過程において粒子配置が不規則になると基準粒子数密度と比較して極端に異なる値となる場合があり、圧力のポアソン方程式のソース項が発散してしまう。これが圧力振動の原因であると考えられている。

これまでも、圧力振動の抑制に関する研究はいくつか行われてきている。末吉ら<sup>(2-7)</sup>は MPS法アルゴリズムに対して圧力に関する補助計算を併用する手法を開発した。しかしながら、粒子の圧力計算を行う圧力と評価用の圧力に異なる計算過程を用いるため、物理的な再現性を欠いている。また、越塚らは圧力のポアソン方程式のソース項を速度の発散に関する項と密度誤差の修正に関する項に分解する手法を考案した。田中ら<sup>(2-8)</sup>は2つの非圧縮条件を組み合わせた圧力のポアソン方程式のソース項ならびに疑似圧縮性効果を加えた圧力計算の安定化手法を構築した。しかしながら、安定化に係る係数が多くパラメータ調整が困難である。

そこで本研究では、新井の手法<sup>(2-9)</sup>に着目した。本手法は、圧力振動抑制に効果的であるとされている圧力のポアソン方程式のソース項の改良に基づいたものであり、安定化のためのパラメータが1つのみであるといった特徴がある。新井の提案した圧力に関するポアソン方程式を式(3.2)に示す。

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = \alpha \left( -\frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \right) + (1 - \alpha) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_i^* \quad (2.21)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{u}}_i^*$ は陽的ステップを計算した後の仮の粒子速度ベクトルである。また  $\alpha$  が安定化のための係数となっており、0 から 1.0 までの値をとる。式(2.21)に示すように  $\alpha$  を 1.0 とした場合は式(2.20)と一致することがわかる。

本研究では、式(2.21)に示される圧力のポアソン方程式を圧力振動抑制モデルとして、本研究室所有の MPS 法アルゴリズムへ導入する。また、 $\alpha$  については笹原の研究を参考に本研究では、 $\alpha=0.2$  を採用している。

## 2-7 波高減衰の抑制

進行波の波高減衰の原因は、MPS 法における勾配モデルの精度が十分でないことである。前章でも述べたとおり、MPS 法の勾配モデルはその定式化を行う際に、ある粒子の近傍粒子は任意の時刻および場所においてその空間配置があらゆる方向に対して均等であるという仮定を用いている。そのため、自由表面のような粒子配置が極めて不均等となる状態下においては勾配モデルの計算精度が著しく低下することとなる。また、流体の内側では MPS 法流体解析においては時間発展とともに粒子配置はランダムになることが多い。にもかかわらず、圧力勾配計算時には粒子が均等に配置されているものとみなされる。勾配モデルに用いる上記の仮定は流体解析精度が低下する原因であり、粒子配置の影響を受けない勾配モデルをアルゴリズムに導入する必要がある。

そこで、本研究では入部ら<sup>(2-10)</sup>の高精度勾配モデルに着目し、アルゴリズムへの導入を行う。入部らの提案した高精度勾配モデルを式(2.22)に示す。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \left[ \frac{1}{n^0} \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \frac{(\vec{r}_j - \vec{r})}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \otimes \frac{(\vec{r}_j - \vec{r})}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \right]^{-1} \left[ \frac{1}{n^0} \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \frac{\phi_j - \phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \frac{(\vec{r}_j - \vec{r})}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \right] \quad (2.22)$$

ここで $\otimes$ はテンソル積を表す。なお、式(2.22)の右辺に含まれる逆行列は、近傍粒子の空間配置が均等であった場合に式(2.23)のように近似できる。

$$\left[ \frac{1}{n^0} \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \frac{(\vec{r}_j - \vec{r})}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \otimes \frac{(\vec{r}_j - \vec{r})}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \right] \approx \frac{1}{d} I \quad (2.23)$$

ここで、 $d$ は次元数、 $I$ は単位行列を表す。式(2.23)に表わされる近似を用いると式(2.20)は従来のMPS法勾配モデルと一致する。

## 2-8 結言

本章では、本研究で使用するMPS法数値シミュレーションの支配方程式、離散化手法、アルゴリズム、境界条件、MPS法の既知の問題に対する改善手法を示した。特に、本研究で用いるMPS法数値シミュレーションは、造波境界に流入流出を波高と流速によって決定的に与えることができる透過境界を設定している点は新規性が高い。この境界条件により、実験や実測値、また算定値を直接、設定し、造波することがきるため、津波のような長周期の波の流入条件に適している。4章より、本研究に用いるMPS法数値シミュレーションの適用性の検討を行う。

# 第3章 孤立波が入射した際の浮体式大型津波シェルターの運動特性に関する検討

## 3-1 緒言

本章では、水理実験によって浮体式大型津波シェルターの挙動やシェルターに作用する津波圧力について明らかにする。著者ら<sup>(1-2)</sup>は、箱型（直方体）の浮体式大型津波シェルターの浮上性能について明らかにした。しかし、陸田ら<sup>(1-12)</sup>も明らかにしている通り、浮体の形状の違いが運動に大きく影響すると考えられる。円柱（円筒型物体）は流体の抗力を示す抗力係数が角柱（箱型物体）に比べ小さいため、津波からの受ける力の作用は小さいと考えられる。また、指向性がないため、押し波と引き波がある津波において、波向を考慮する必要がない。そこで、従来の直方体の形状に加え、円筒型浮体について津波流体を模擬した孤立波中での挙動と津波波圧についての検討を行う。津波は水平方向への流速が支配的であるため、係留が前提のシステムである。そこで、水平方向において定点保持性の高い係留柱を用いたドルフィン係留を採用し、その係留された箱型形状、円筒型形状の孤立波中での浮体の挙動の違いを明らかにする。

## 3-2 無係留浮体式津波シェルターの津波流体中における挙動と特性

### 3-2-1 水槽実験概要

水槽実験を日本大学理工学部 2 次元水槽にて実施した。本水槽はピストン式造波装置を有する長水路である。長水路は奥行き幅が 0.6m で水槽の途中に仮底が挿入されている。造波位置の水深を 0.65m に対し、高さ 0.5m の斜路と仮底のため、仮底上での水深は 0.15m である。実験はこの仮底上で実施した。水槽実験の配置図を Fig. 3-1 に示す。本実験において、模擬津波には孤立波を適用した。斜路から 5m 先に、長さ 1.5m、高さ 0.17m、奥行き 0.6m の岸壁模型を設置している。岸壁模型には、浮体式大型津波シェルターを浮上しやすくするために、堀を設けている。堀の深さは 0.8m、側面両端は斜路になっており、高さならびに長さは 0.1m とした。岸壁端から堀の斜路前までには 0.2m の短い水路が設けられている。これは陸上へ遡上する津波が模擬的にその性質を持たせるために射流に変化させるために設けた。この水路が 0.2m である理由は、著者の前報より<sup>(3-1)</sup>、短い波長の孤立波で、津波のピーク時の衝撃を模擬するために流速並びに波高の勢いを実際の津波に近似できる長さが MPS 法を用いた試算により 0.2m であったため、この長さとした。

浮体模型は長さ 0.58m、高さ 0.13m、奥行き 0.58m の直方体浮体模型と  $\phi 0.58\text{m}$ 、高さ 0.13m の円筒型浮体模型を用意した。浮体模型の喫水は 0.02m とした。これは堀との衝突を防ぐ深さとし

て、この喫水とした。また箱型と円筒型の浮体は、津波流が水平方向への漂流が大きいと考え、浮体の運動は波面に追従すると考え、重量ではなく喫水をそろえた。浮体の中心点が堀の中心になるように設置した。浮体の諸元を Table 3-1 に示す。設置した様子を Fig. 3-2 に示す。

計測項目は斜路直後の波高と流速 (H0、V0)、入射波高と流速(H1、V1)、岸壁遡上水位(H2)、浮体式大型津波シェルターの波上側 (造波装置方向) 前面中心に作用する圧力、浮体挙動である。

波高は容量式波高計、流速はプロペラ式流速計を用いた。岸壁遡上水位は、Fig. 3-1 おける H3 に設置した波高計を用いて計測する。流速は、斜路直後 0.5m、水深 0.075m の位置 V0、H1 で流速計と波高計を用いて計測し、MPS 法での計算における流入流出境界のパラメーターとして使用する。浮体運動はビデオトラッカーを用いて、浮体の図心位置と重心位置を計測し、その軌跡を計測する。入射波高は、基準入射波高地点 (H1) において、波高 0.05m、0.06m、0.07m、0.08m、0.09m、0.10m となるような造波データを作成し、MPS 法における流入流失境界位置(V0、H0)から前章で述べた手法により造波している。岸壁非挿入時における波高並びに流速の時系列データを Fig. 3-3 に示す。模擬津波は斜路を駆け上がることによって波高が高くなるとともに波形が崩れ始めるが、分散は確認されていない。

なお、水槽実験では岸壁模型と水槽側面両側の間に 0.02m 程度、浮体と水槽両側面の間に 0.06m 程度の間隙が存在し、完全な 2 次元ではない。

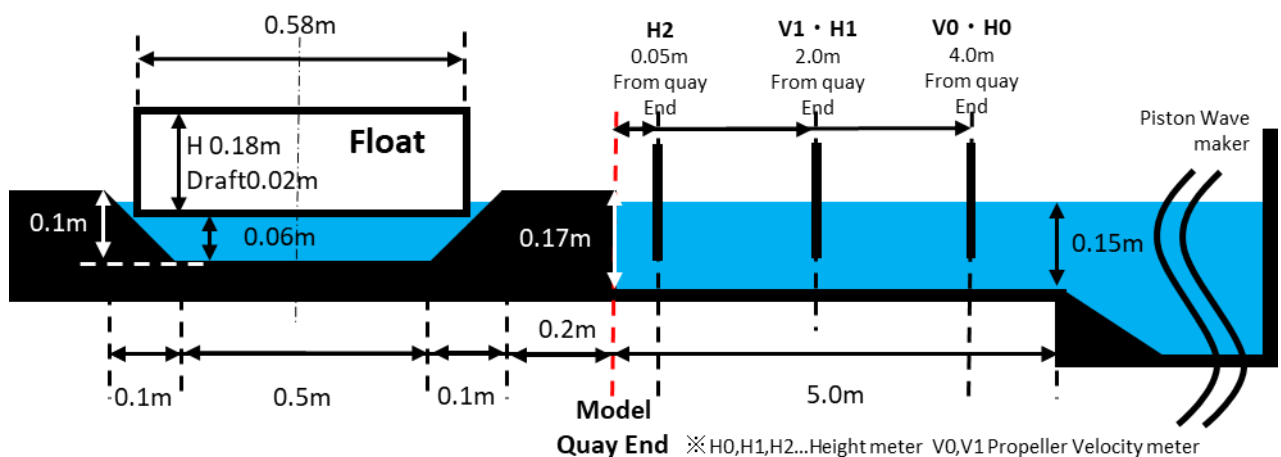
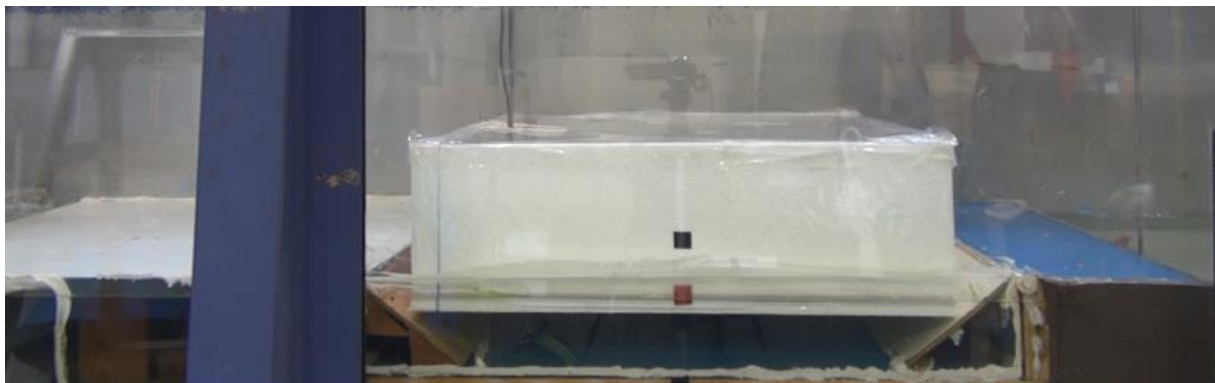


Fig. 3-1 Experimental setup system and calculation system (Not mooring)



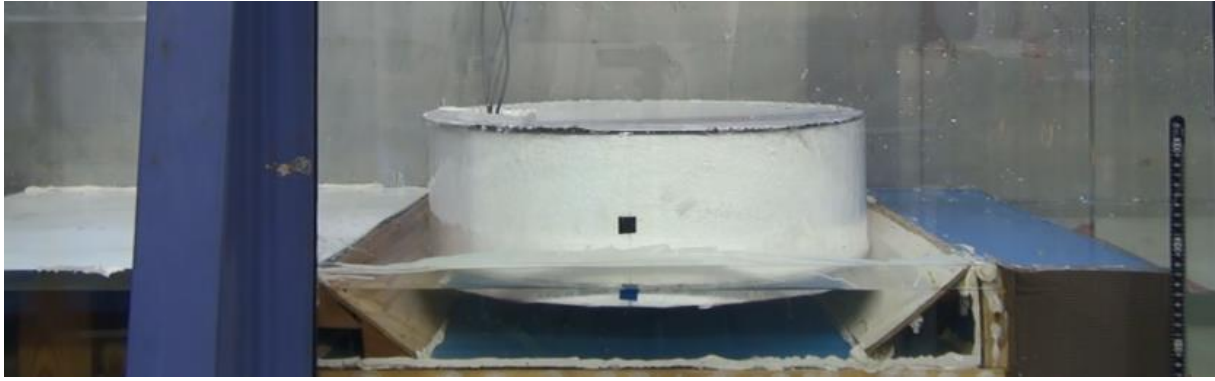


Fig. 3-2 Set experiment mode

Table 3-1 Model floating body parameters

Size	(Box) (L)0.58m×(B)0.58m×(D)0.18m (Draft:0.02m) (Cylindrical) $\phi$ 0.58m×(D)0.18m (Draft:0.02m)
Material Density	28kg/m <sup>3</sup>
Weight of model float	(Box) 6.73kg (Cylindrical) 5.28kg

### 3-2-2 実験結果

Fig.3-3 から Fig. 3-38 のグラフに、波高 0.05m、0.06m、0.07m、0.08m、0.09m、0.10m の孤立波を入射した時の H0、H1、H2 位置での波高、V1 位置での流速、浮体波上（なみかみ）側の波圧、浮体中心点の水平・鉛直運動の軌跡を示す。全計測時間は、数値シミュレーションの都合上、V0 の主峰が 3sec.に通過する時間をゼロ点とし、シフトしている。実験の再現性を確認するために、試行したデータはすべて掲載する。3回試行ともおよそその実験に再現性が確認できる。

Fig.3-3、Fig. 3-9、Fig. 3-15、Fig. 3-21、Fig.3-27、Fig.3-33 は基準波高と Fig.3-4、Fig. 3-10、Fig. 3-16、Fig. 3-22、Fig.3-28、Fig.3-34 は岸壁遡上直前 0.005m 地点の波高を示す。縦軸は水面からの測定波高、横軸は時間である。基準高さ付近では、主峰の孤立波がゼロクロスするまでは、反射波が重なり合っていないこと、砕波していない。そして、岸壁遡上直前において、波が前傾し、砕波直前の状態となっていることが確認できる。これは、数値計算シミュレーションの Validation を行う際、状態変化が起きているか確認する際に重要な検討事項である。Fig. 3-5、Fig. 3-11、Fig.3-17、Fig. 3-23、Fig. 3-29、Fig.3-35 は V1 位置での流速を示す。縦軸は流速、横軸は時間を示している。Fig.3-6、Fig. 3-12、Fig. 3-18、Fig. 3-24、Fig.3-30、Fig.3-36 は浮体波上側の浮体中心に設置した圧力の時系列結果である。特に、衝撃圧力について明らかとしている。計測では、LPF はかけていない。本来であれば、圧力の計測タイムステップを小さくするのがこのましいが、実験の都合上 100Hz としている。波圧計測点は、浮体の底から 0.07m の位置、奥行き方向で中心に設置した。横軸が時間で縦軸が最大作用圧力である。作用時は、すべて波の衝突時が最大であったため、衝撃波の特性であると考えられる。

Fig.3-7、Fig. 3-13、Fig. 3-19、Fig. 3-25、Fig.3-31、Fig. 3-37 に水平方向の浮体横断面の図心の挙動軌跡、Fig.3-8、Fig. 3-14、Fig. 3-20、Fig. 3-26、Fig. 3-32、Fig. 3-38 に鉛直方向の浮体横断面の図

心の挙動軌跡を示す。縦軸は、運動変位、横軸に時間を示している。浮体の運動解析には、設計時に誰も使用できるように、著者が運動解析用のビデオトラッカーを開発し、使用している。撮影精度は、時間精度が 30fps、空間精度は 720x480 のビデオ映像で最大 5mm 程度である。設定波高 0.07m の時以外はおおよそ再現性が確認できる。0.07m 際の 2 つのデータについては初期設置位置の影響性と考えられる。その点で初期設置位置の重要性を裏付ける結果となったと考えられる。

グラフから、全体的に大きく挙動は異ならないことが明らかである。おおよその挙動は以下の通りである。孤立波が岸壁模型に入射後、波は射流に変形し、浮体に衝突する。堀の外に乗揚げが発生しない場合その後、傾斜しながら堀の中でとどまり、元の位置付近まで返ってくる動きである。乗揚げが発生する場合は、波下側の斜面に衝突し、波上側が上に浮上するように傾き、そのまま波に乗り、波下側の堀外側に乗り上げる。グラフから、波高 0.09m 付近から浮体が元の位置に戻らない変位まで波により移動している。水平方向への最大変位量を示す Fig. 3-31、鉛直方向への最大変位量を示す Fig. 3-32 のグラフからも設定波高 0.09m から浮体が堀からの脱出していることが示されている。全体として、円筒型浮体の変位量は直方体の変位量よりも少ないが、円筒型浮体のほうが急激に運動する傾向があることが明らかである。

各種時系データから波高ごとのまたは各パラメーターで整理したものを Fig.3-39 から Fig. 3-44 に示す。Fig.3-39、Fig.3-40 は、水平方向ならびに鉛直方向への移動最大変位と岸壁直前遡上高さのグラフである。このグラフは、浮体が堀外側に乗りあがったかどうか確認することができる。縦軸が遡上直前波高、横軸が浮体の変位である。前述通り、今回のケースでは、0.09m を境に乗りあがるかどうかを判断できる。Fig.3-41 は形状と浮体への最大作用圧力の関係を示すグラフである。横軸が遡上直前波高、縦軸が構造物に作用した津波波圧である。圧力の傾向は波高が大きくなることにより、箱型浮体の方が、作用が大きいことが明らかである。円筒型の場合、流体を受け流し、前面に作用する圧力を低減したと考えられる。

Fig. 3-42、Fig. 3-43 は、津波からの浮体への作用力である。これは浮体の移動加速度に浮体重量をかけたものである。係留柱へ作用する力と比例すると考えられる。結果から、水平方向に作用する力は、波高に問わず円筒型の方が大きくなる傾向を示した。鉛直方向に作用する力は、波高が高くなるにつれて、円筒型のほうが作用する力が強いことが明らかになった。さらに、Fig. 3-44 に各実験ごとに水平方向加速度と鉛直方向加速度の関係を示したグラフになる。水平方向への運動が支配的であることが明らかだけでなく、円筒型が水平鉛直成分とも、加速度が大きいことが示されている。これは、津波の流体自身を受け流すことができるものの、波自身に乗りやすい、浮体が流れの抵抗とならないことによるものと考えられる。

したがって、この実験で、円筒型浮体は構造物への津波による構造物への作用圧力は小さく、波の入射後の挙動は小さいが、加速度は大きい。さらに、係留柱に与える力も大きいと考えられる。一方で、直方体浮体は、構造物への津波による圧力の作用が大きく、入射後の挙動は大きいものの、加速度は小さい。すなわちゆっくり変位し、係留柱へ作用する力は円筒型浮体に比べ小さいと考えられる。

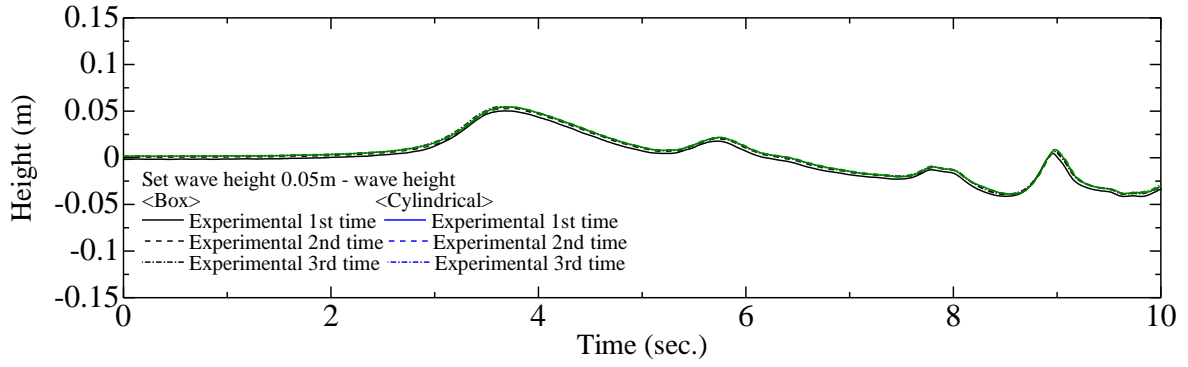


Fig. 3-3 Time history of wave height (H:0.05m)

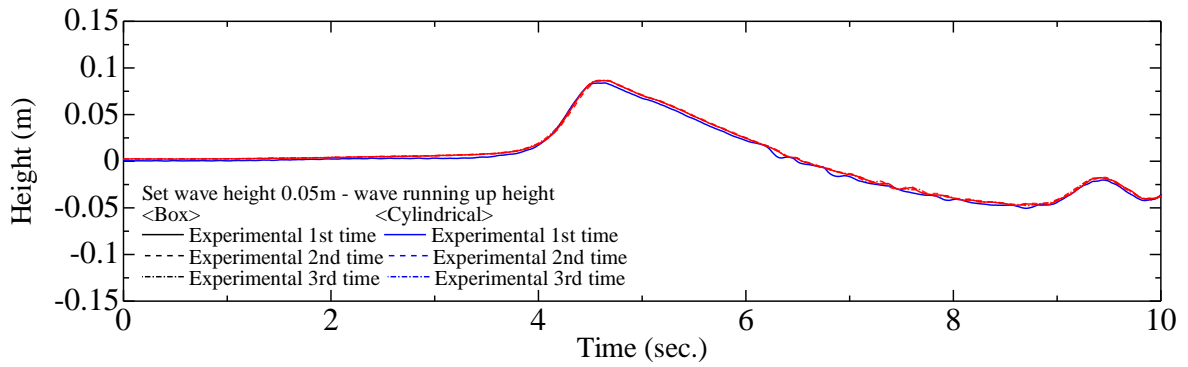


Fig. 3-4 Time history of running up wave height (H:0.05m)

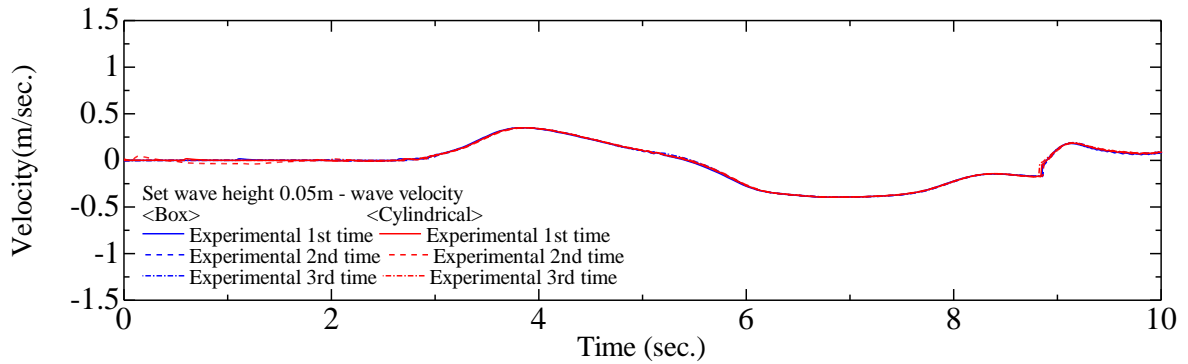


Fig. 3-5 Time history of wave velocities (H:0.05m)

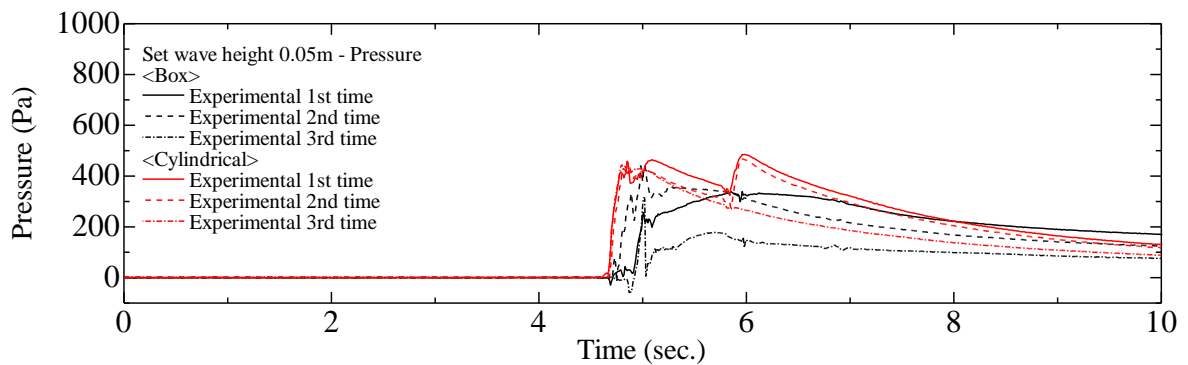


Fig. 3-6 Time history of the pressure at front surface (H:0.05m, Non-mooring)



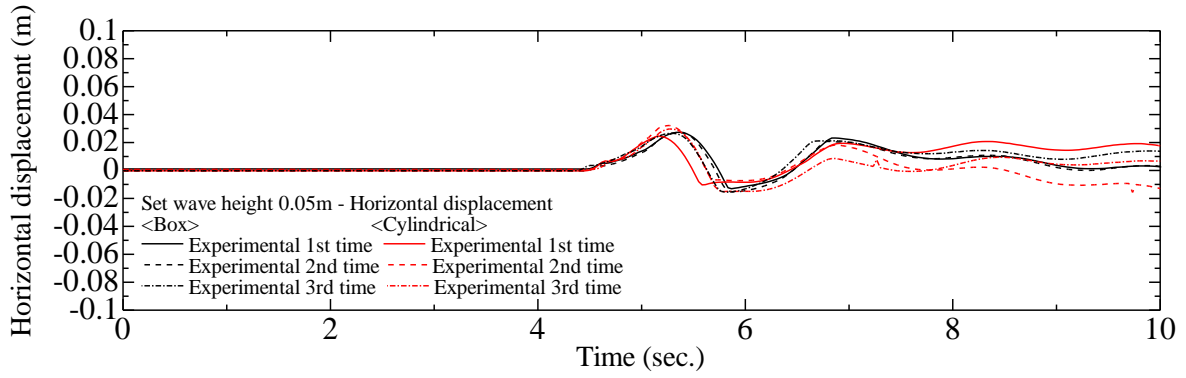


Fig. 3-7 Time history of horizontal displacements (H:0.05m, Non-mooring)

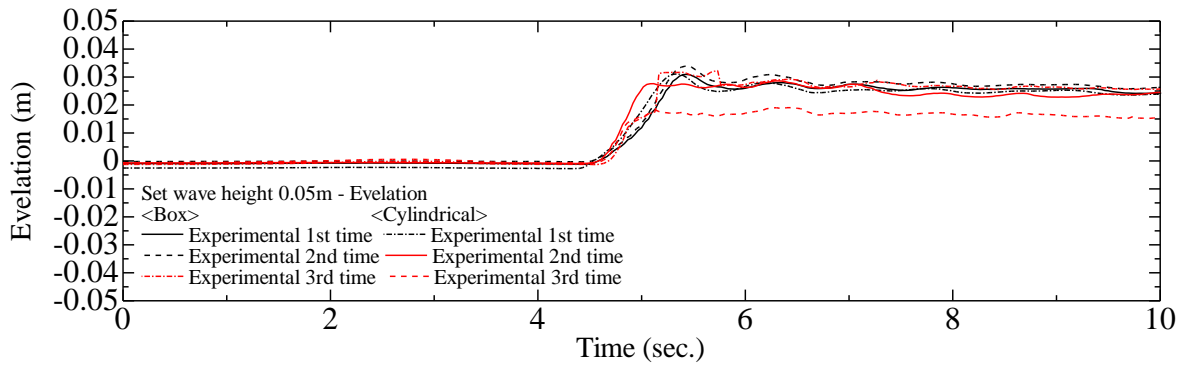


Fig. 3-8 Time history of elevation (H:0.05m, Non-mooring)

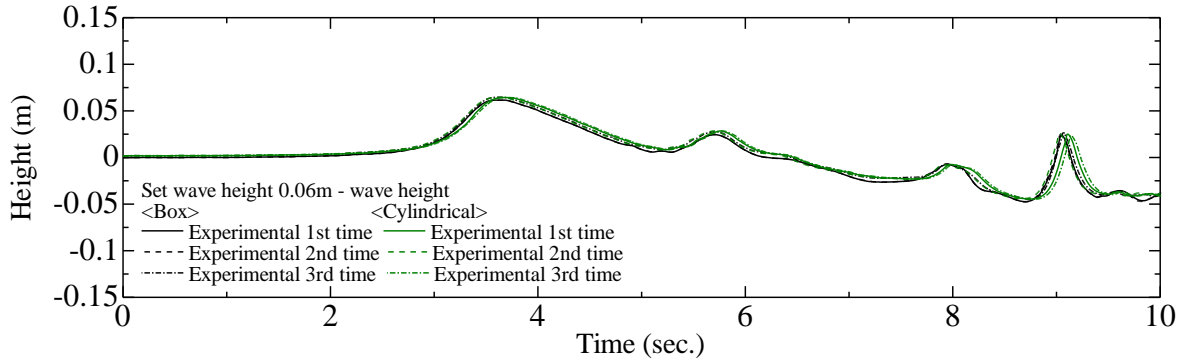


Fig. 3-9 Time history of wave height (H:0.06m)

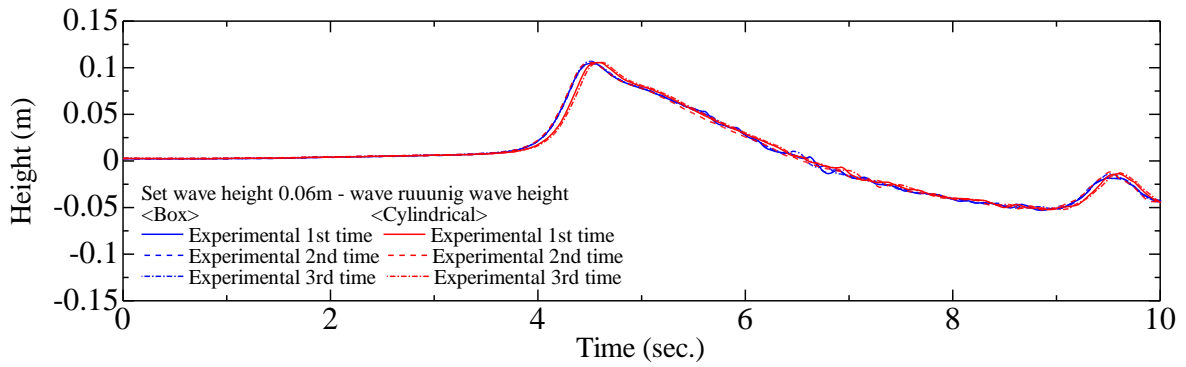


Fig. 3-10 Time history of running up wave height (H:0.06m)

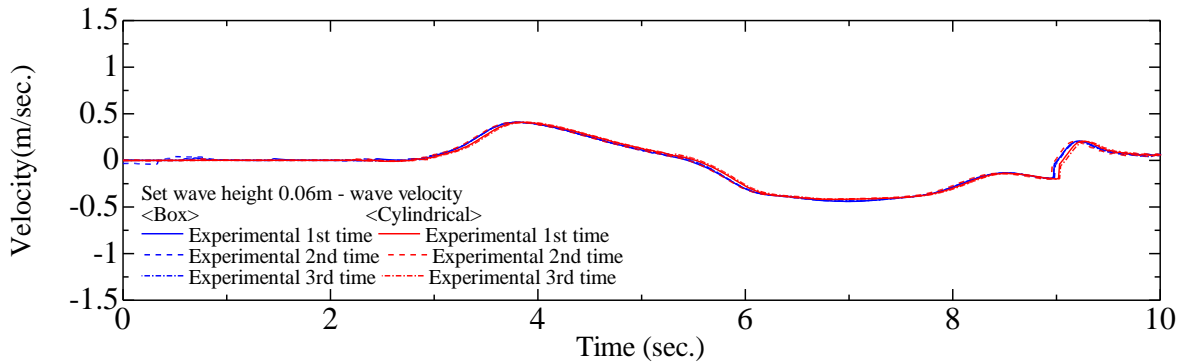


Fig. 3-11 Time history of wave velocities (H:0.06m)

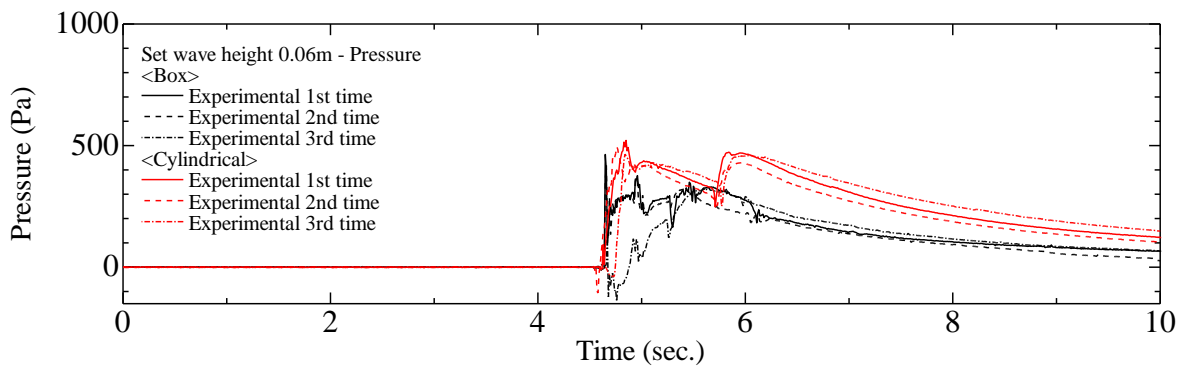


Fig. 3-12 Time history of the pressure at front surface (H:0.06m, Non-mooring)

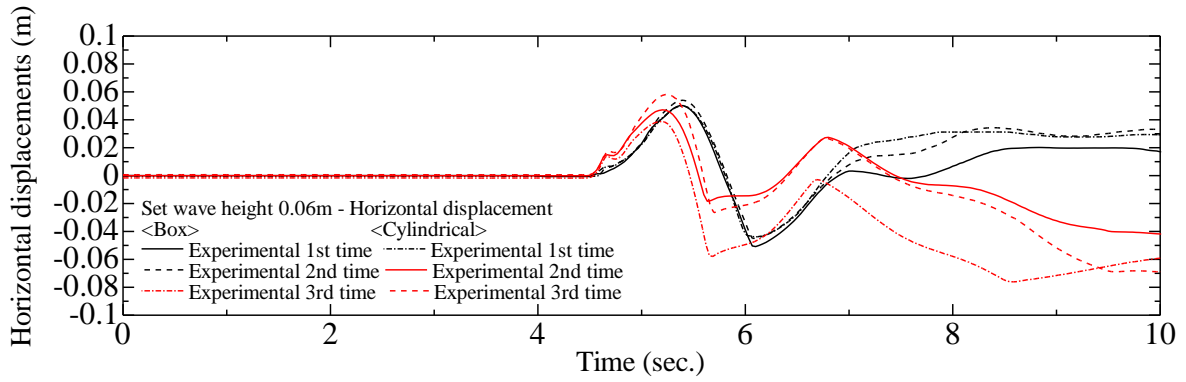


Fig. 3-13 Time history of horizontal displacements (H:0.06m, Non-mooring)

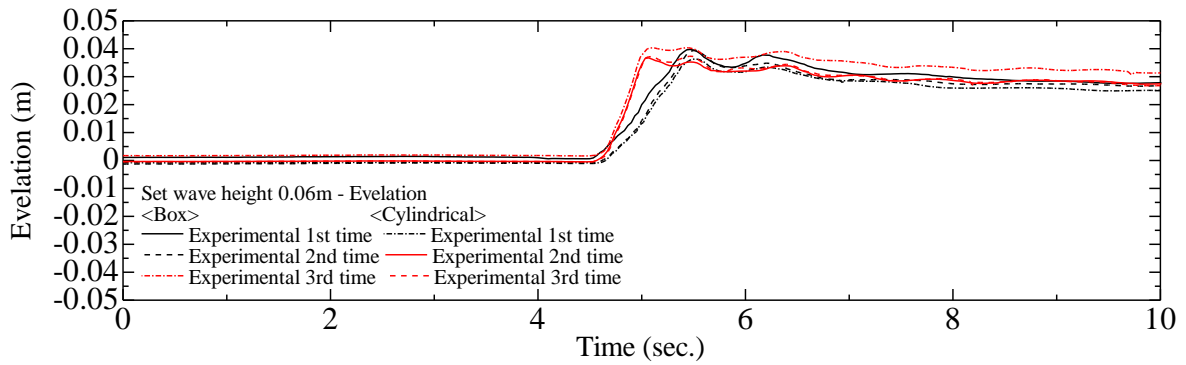


Fig. 3-14 Time history of elevation (H:0.06m, Non-mooring)

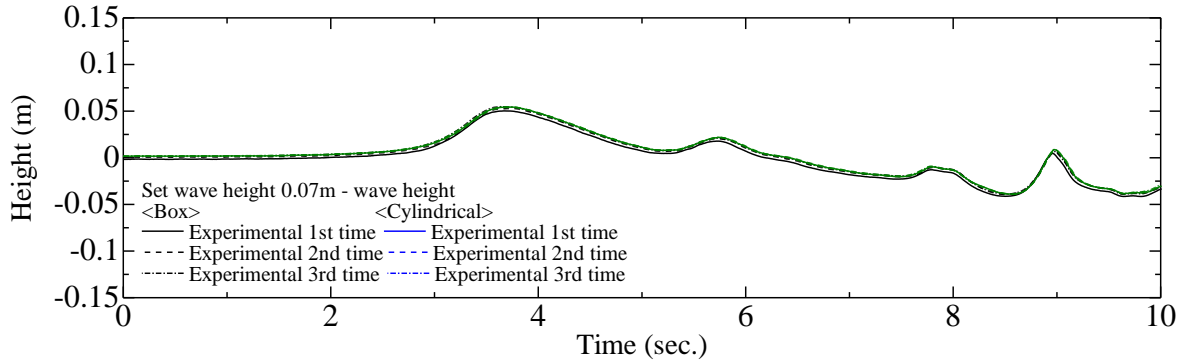


Fig. 3-15 Time history of wave height (H:0.07m)

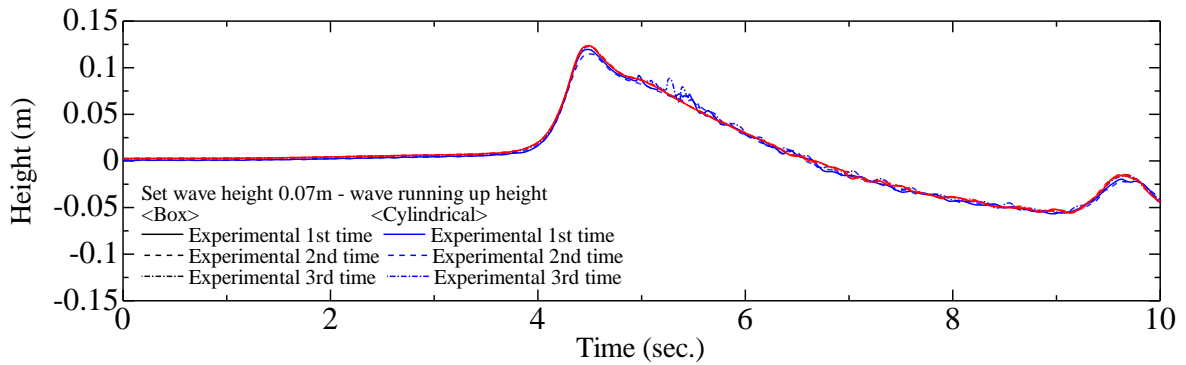


Fig. 3-16 Time history of running up wave height (H:0.07m)

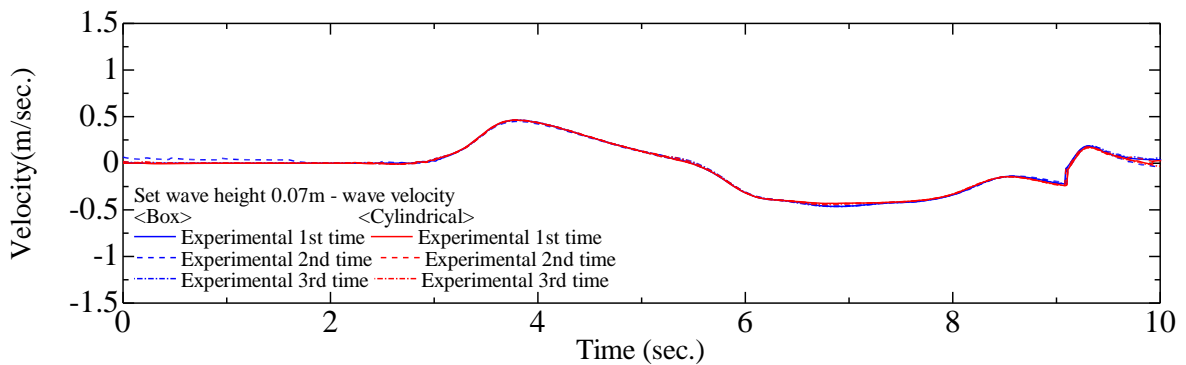


Fig. 3-17 Time history of wave velocities (H:0.07m)

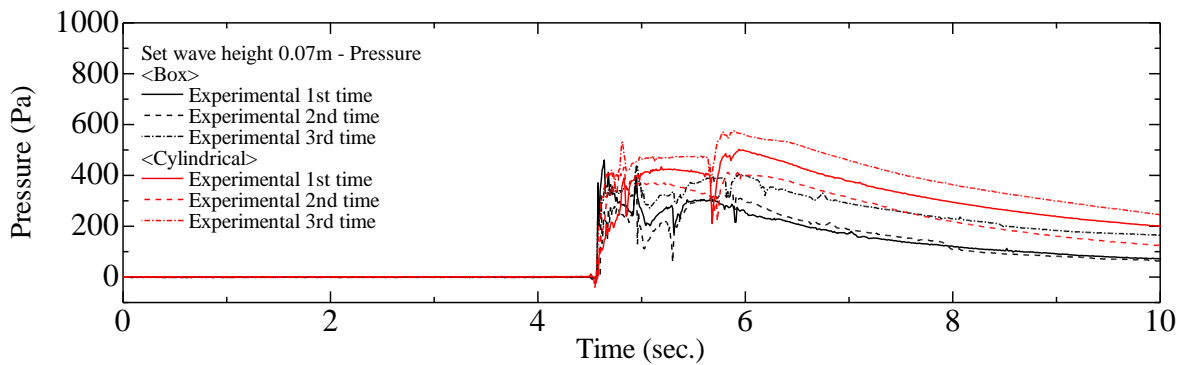


Fig. 3-18 Time history of the pressure at front surface (H:0.07m, Non-mooring)

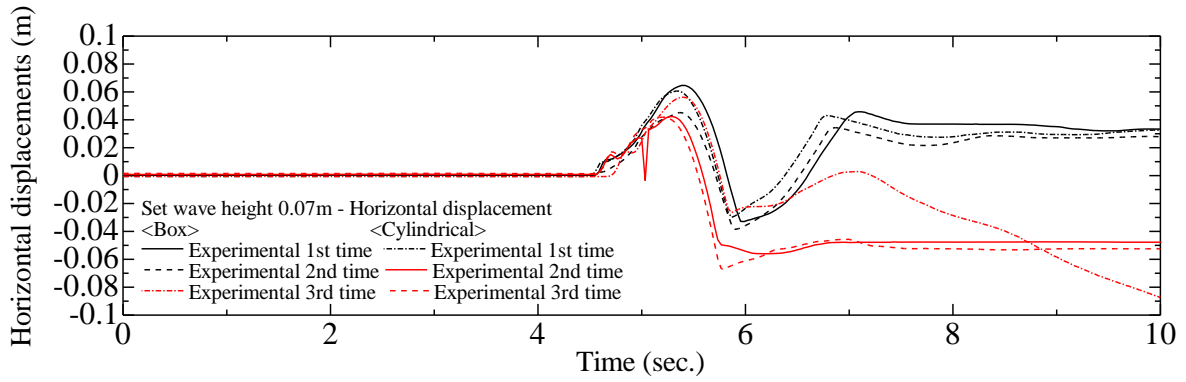


Fig. 3-19 Time history of horizontal displacements (H:0.07m, Non-mooring)

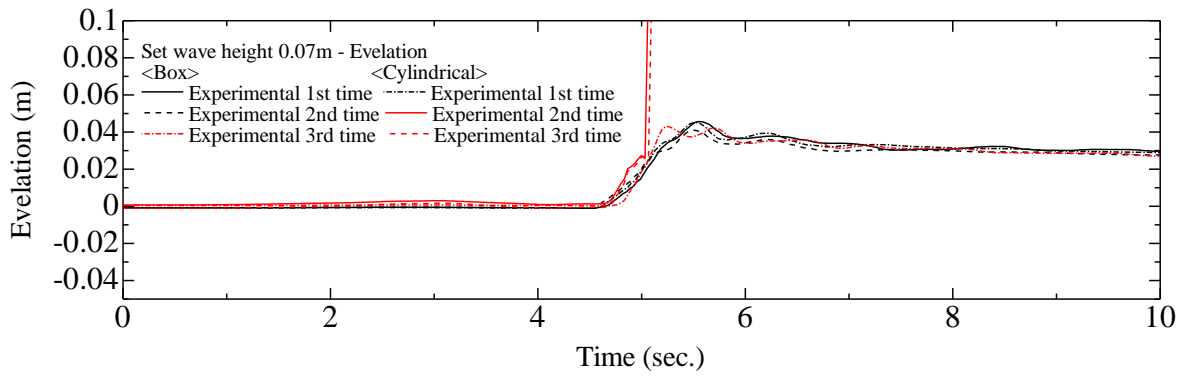


Fig. 3-20 Time history of elevation (H:0.07m, Non-mooring)

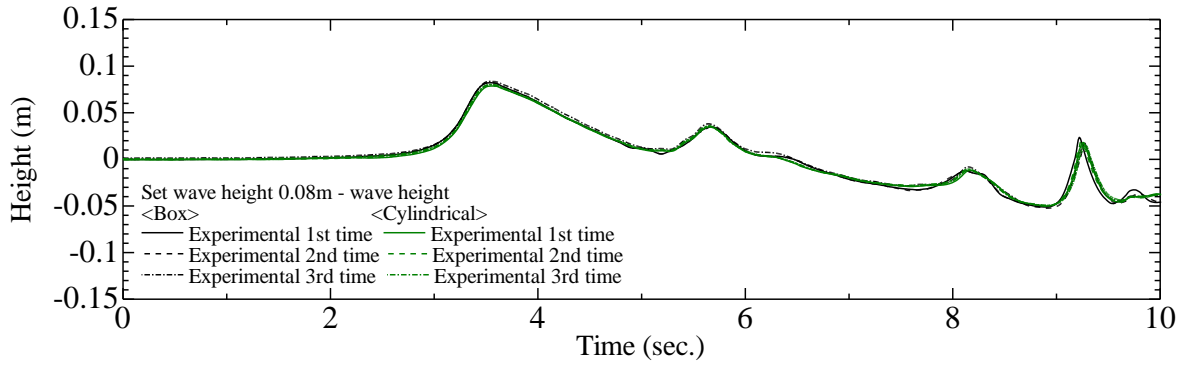


Fig. 3-21 Time history of wave height (H:0.08m)

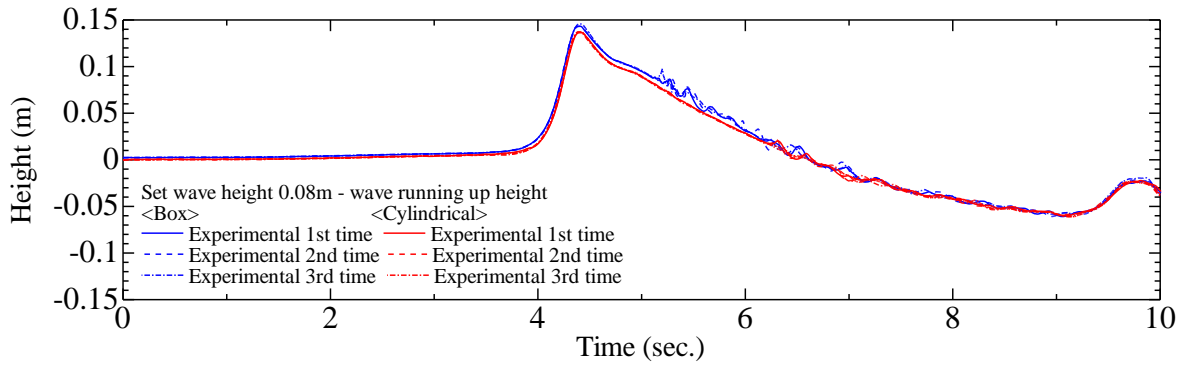


Fig. 3-22 Time history of running up wave height (H:0.08m)

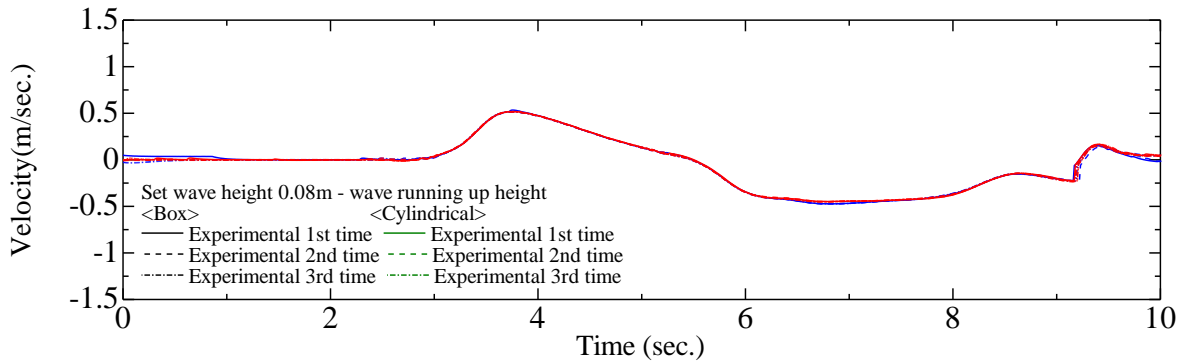


Fig. 3-23 Time history of wave velocities (H:0.08m)

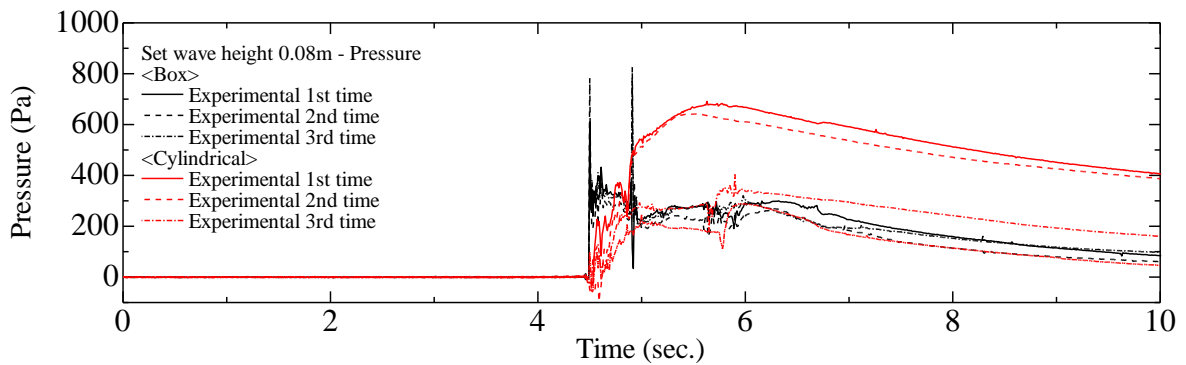


Fig. 3-24 Time history of the pressure at front surface (H:0.08m, Non-mooring)

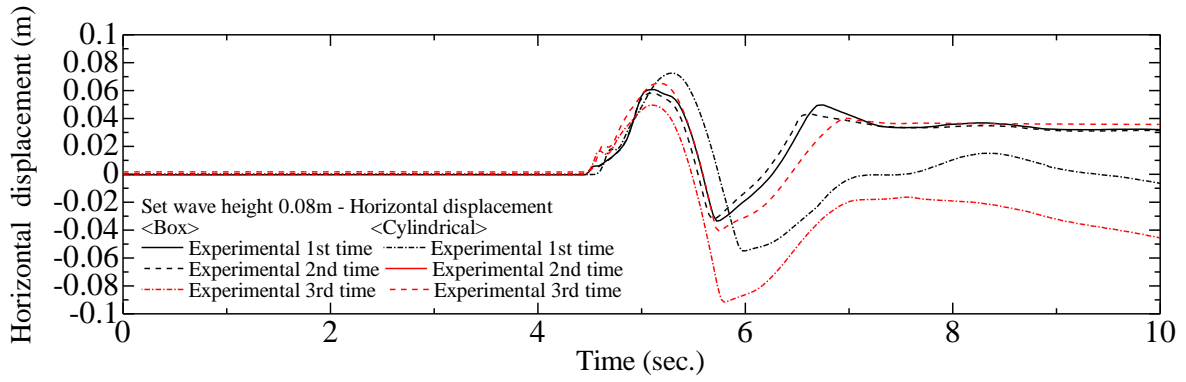


Fig. 3-25 Time history of horizontal displacements (H:0.08m, Non-mooring)

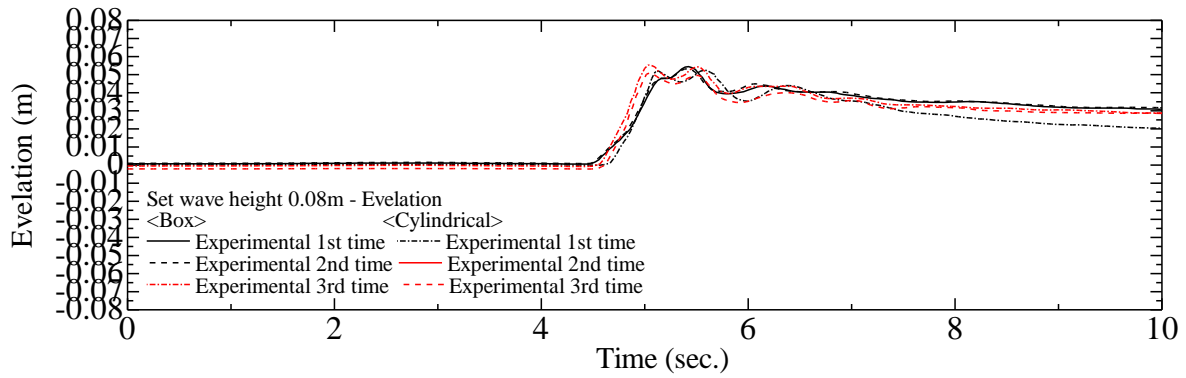


Fig. 3-26 Time history of elevation (H:0.08m, Non-mooring)

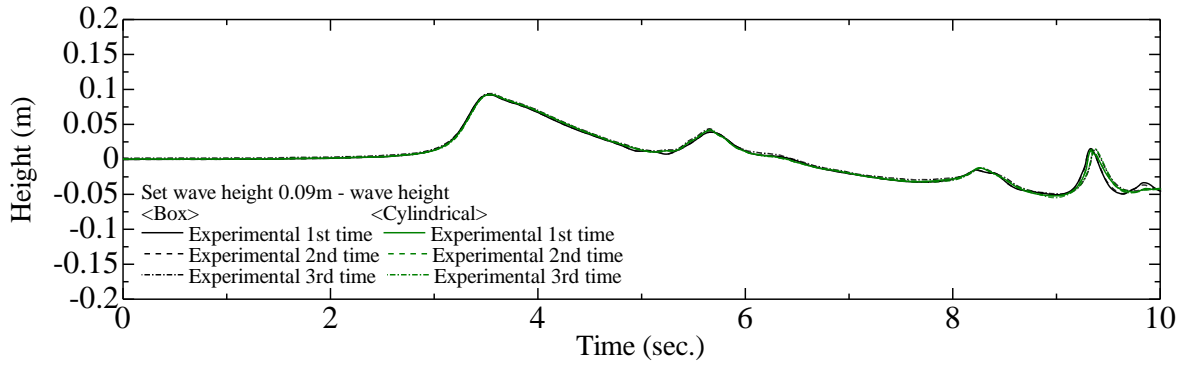


Fig. 3-27 Time history of wave height (H:0.09m)

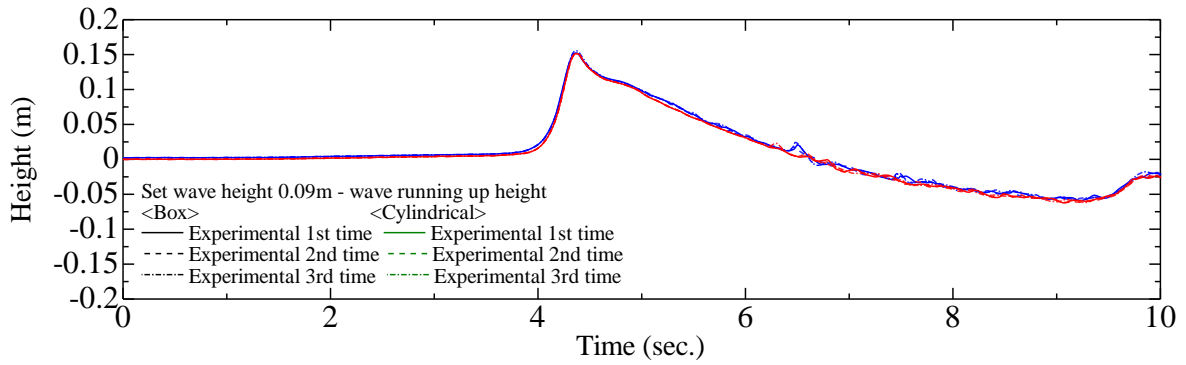


Fig. 3-28 Time history of running up wave height (H:0.09m)

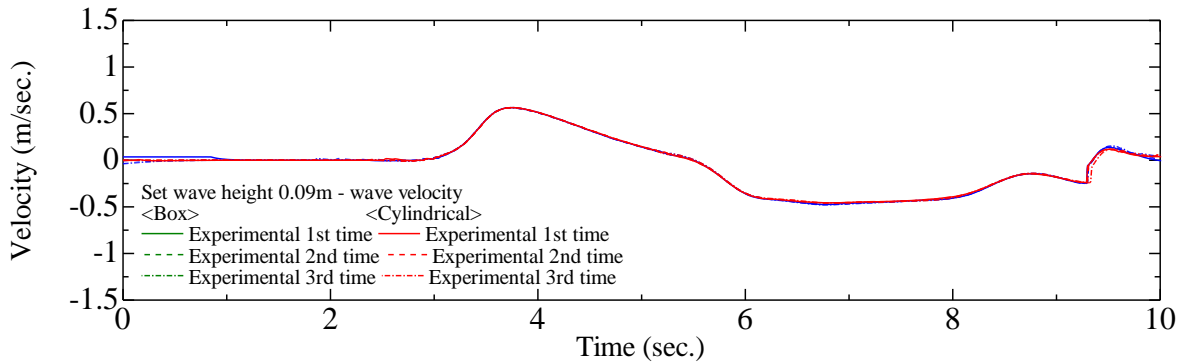


Fig. 3-29 Time history of wave velocity (H:0.09m)

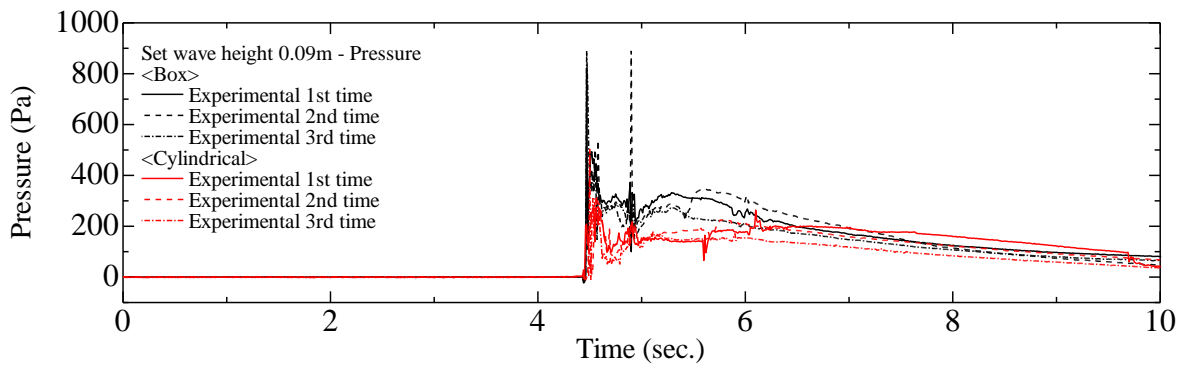


Fig. 3-30 Time history of the pressure at front surface (H:0.09m, Non-mooring)



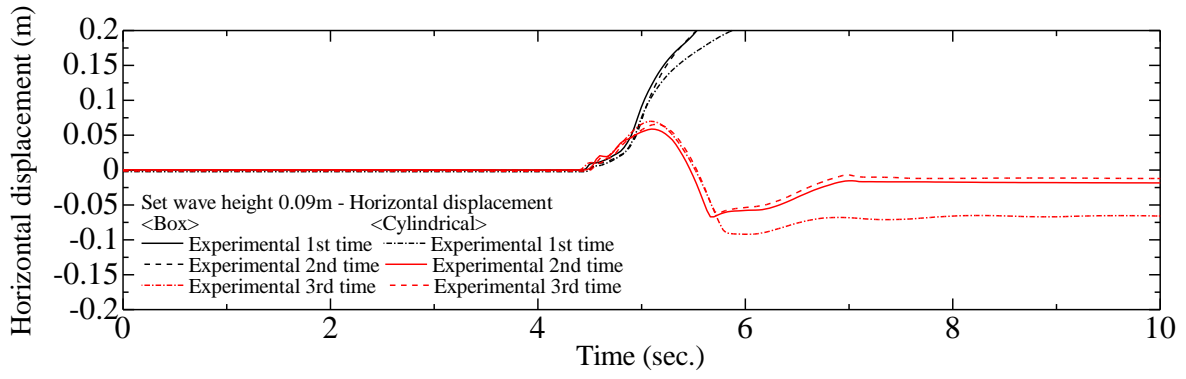


Fig. 3-31 Time history of horizontal displacement (H:0.09m, Non-mooring)

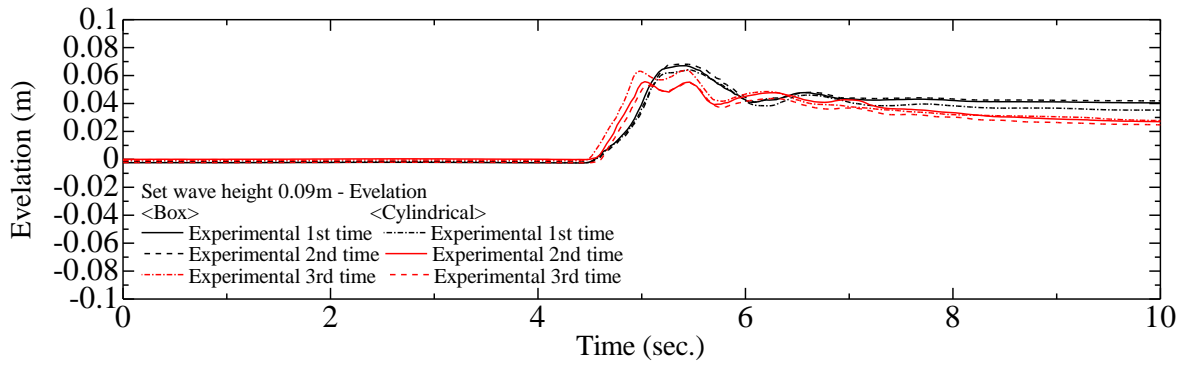


Fig. 3-32 Time history of elevation (H:0.09m, Non-mooring)

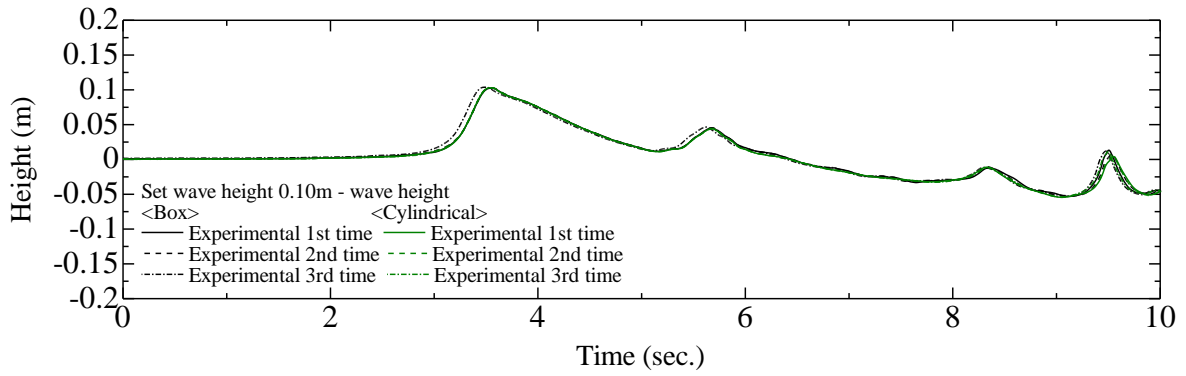


Fig. 3-33 Time history of wave height (H:0.10m)

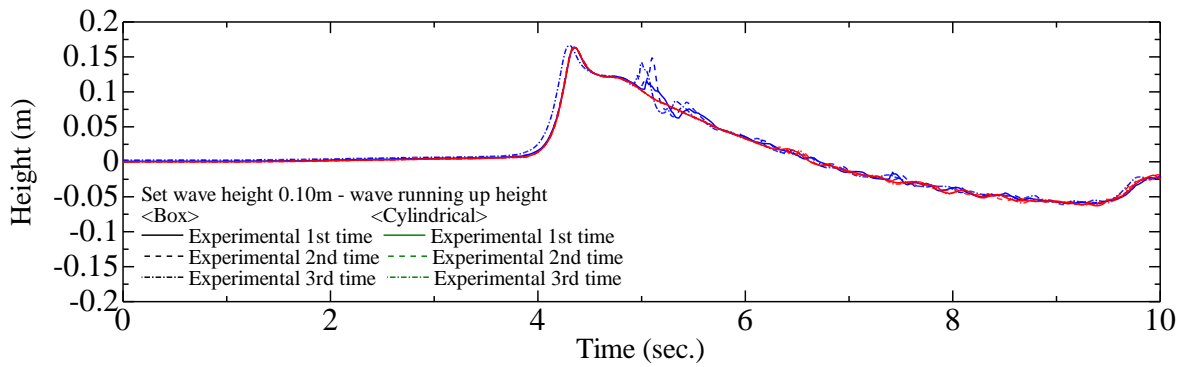


Fig. 3-34 Time history of wave height (H:0.10m)

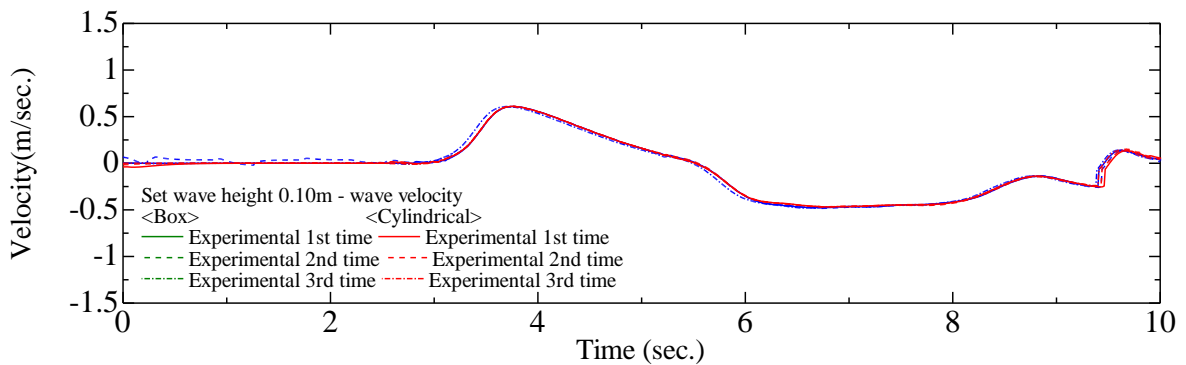


Fig. 3-35 Time history of wave velocity (H:0.10m)

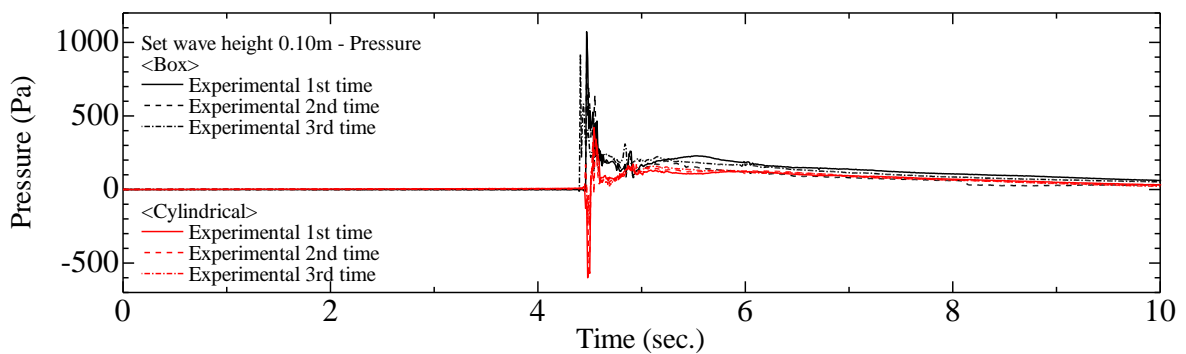


Fig. 3-36 Time history of the pressure at front surface (H:0.10m, Non-mooring)

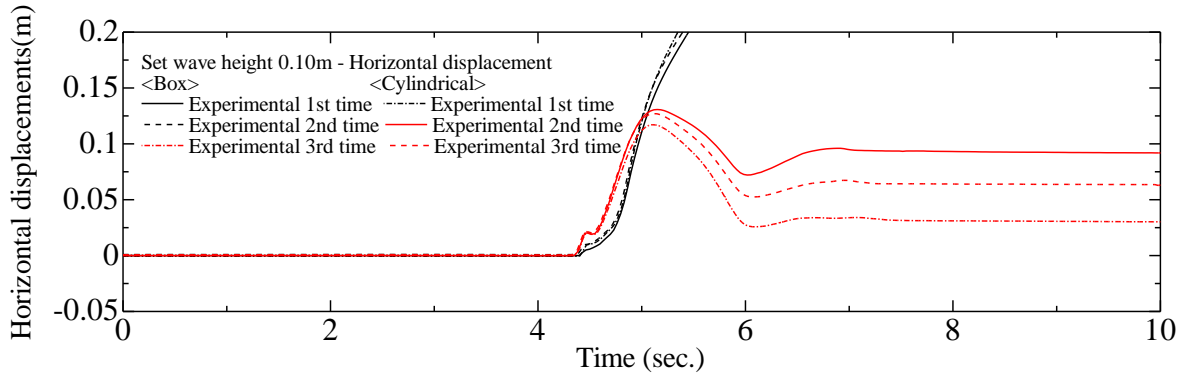


Fig. 3-37 Time history of horizontal displacements (H:0.10m, Non-mooring)

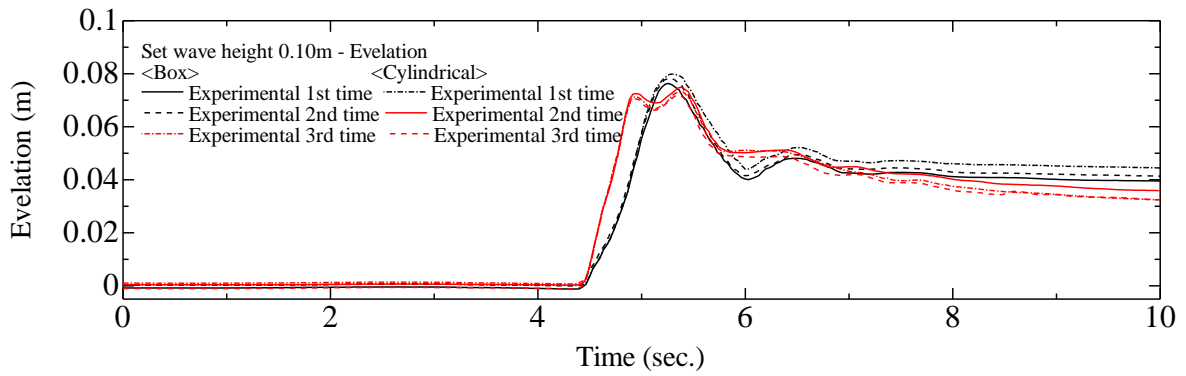


Fig. 3-38 Time history of elevation (H:0.10m, Non-mooring)

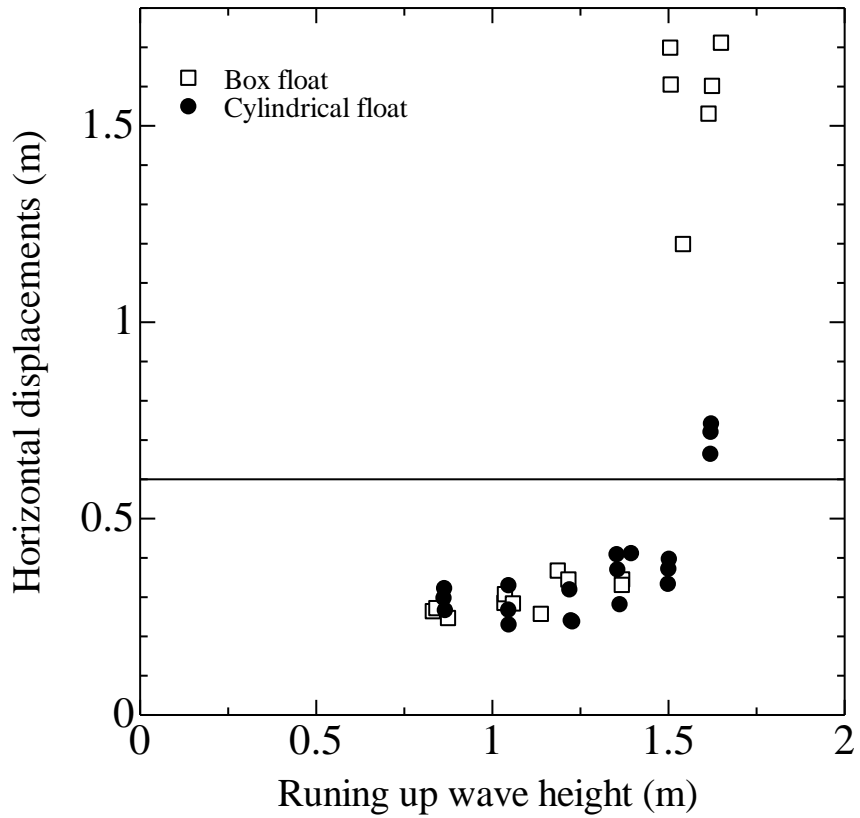


Fig. 3-39 The relations of running up wave height and horizontal displacements

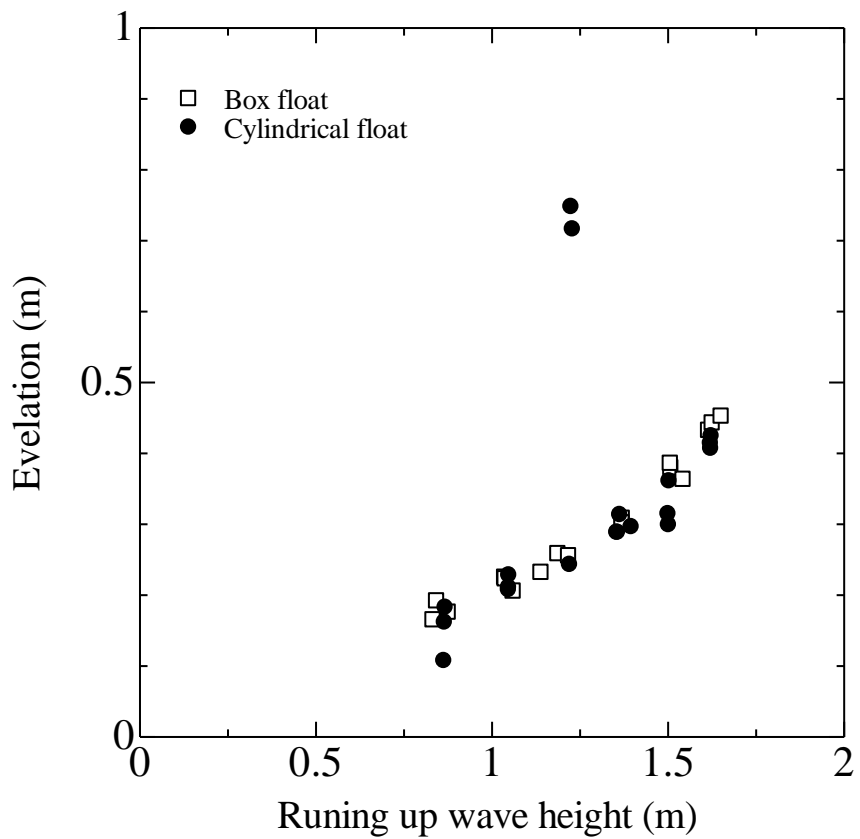


Fig. 3-40 The relations of running up wave height and elevation

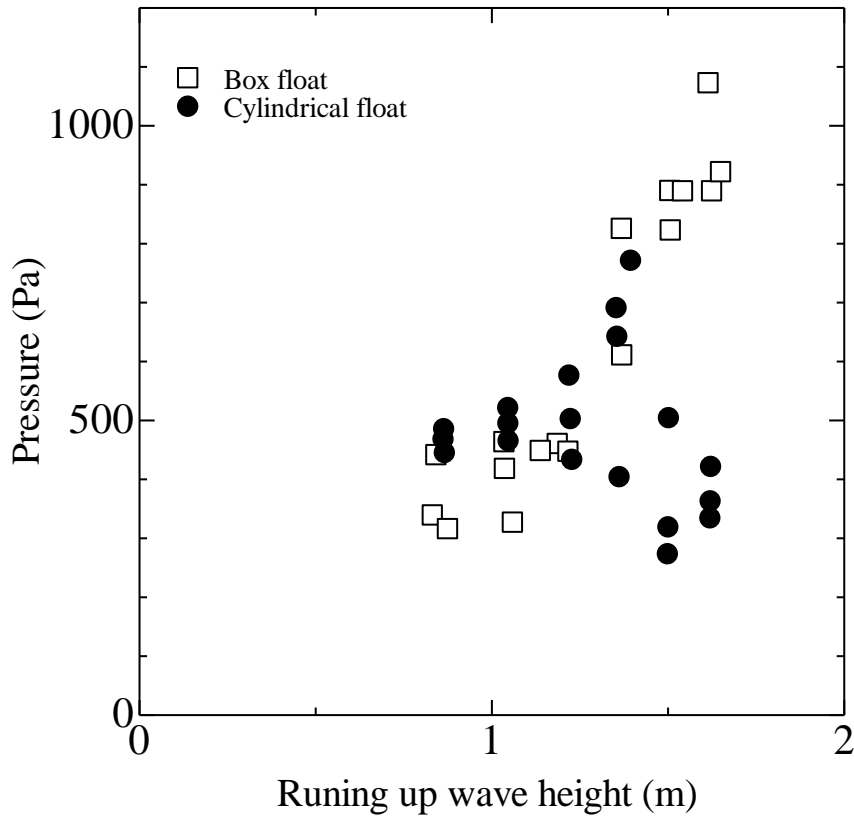


Fig. 3-41 The relations of Running up wave height and the pressure at front surface

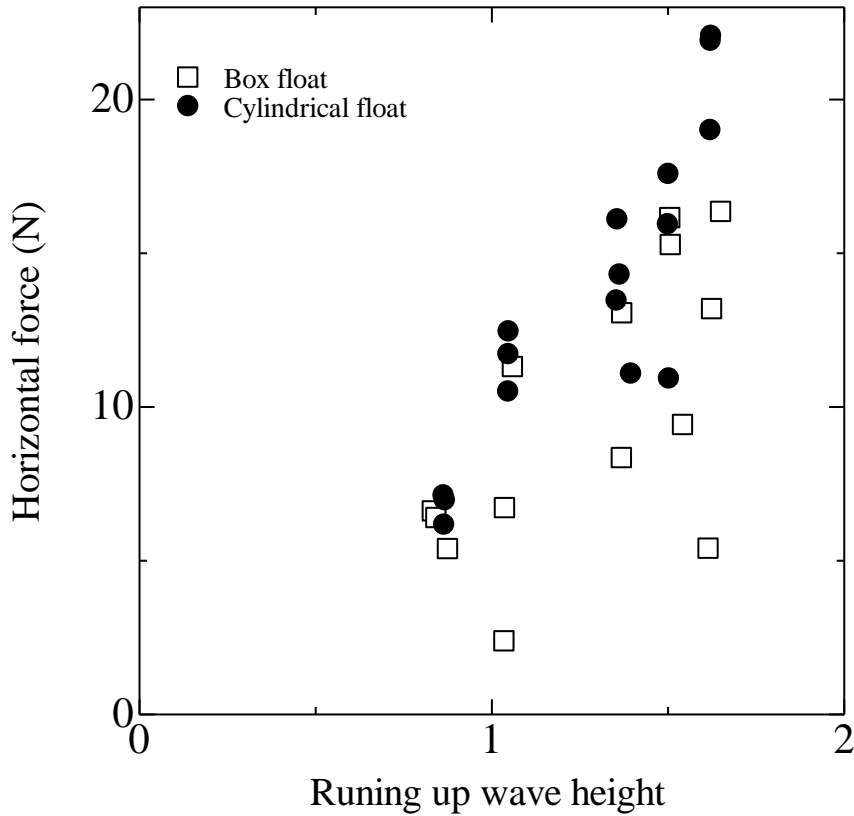


Fig. 3-42 The relations of wave height and surge acceleration of float

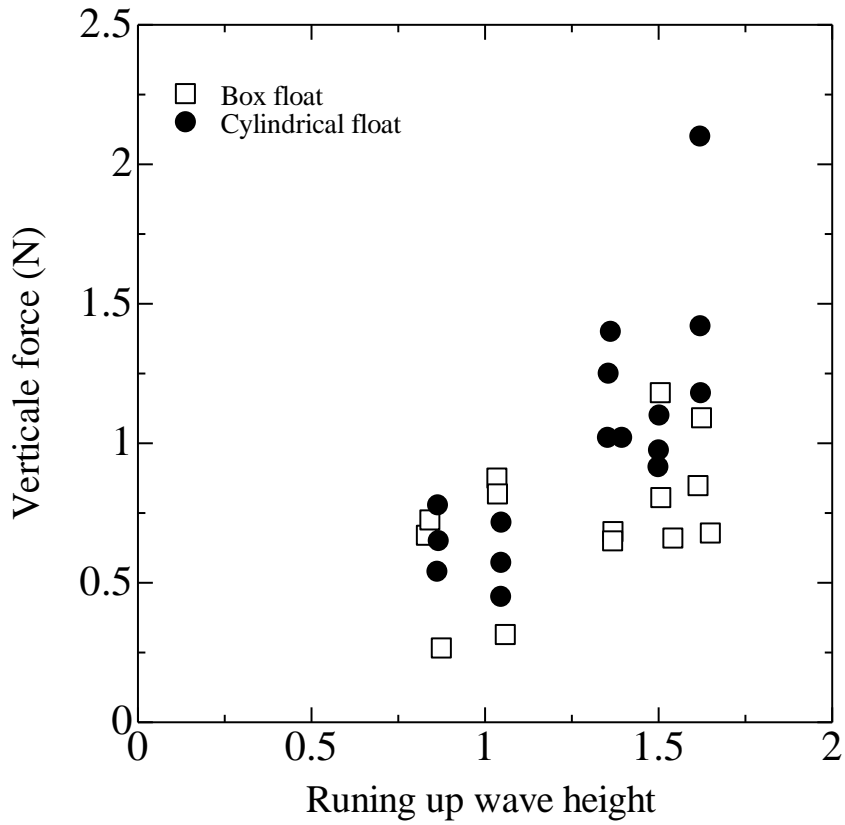


Fig. 3-43 The relations of running up wave height and vertical force

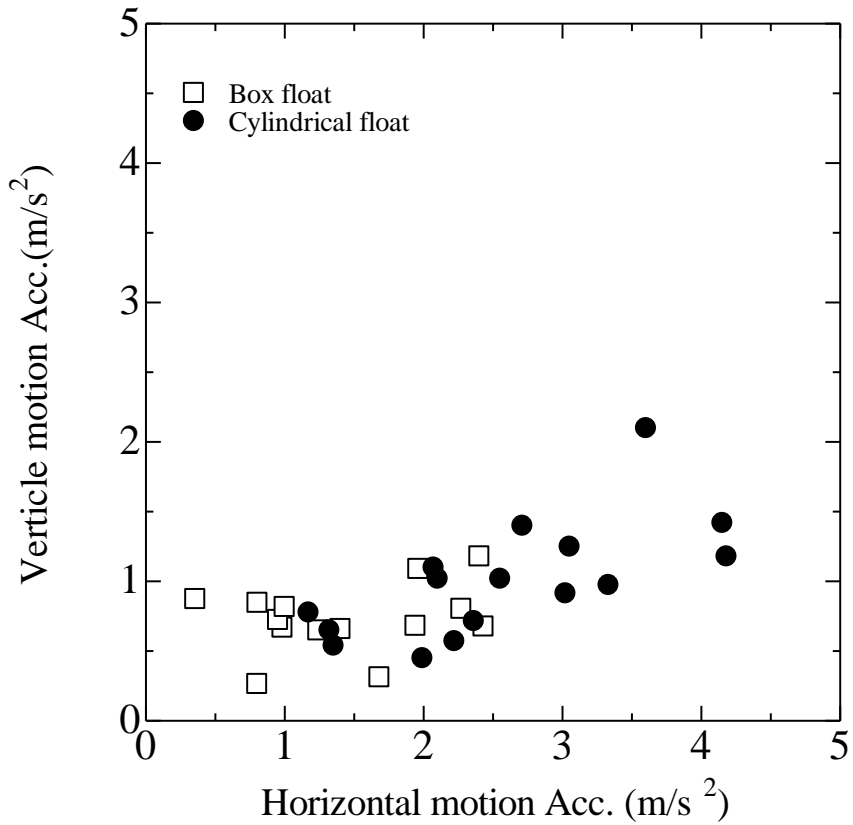


Fig. 3-44 The relations of horizontal acceleration and vertical acceleration

### 3-3 ドルフィン係留を使用した係留浮体式津波シェルターの 津波流体中における挙動と特性

#### 3-2-1 水槽実験概要

Fig. 3-45、Fig. 3-46 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した。係留柱の寸法は、東京湾等に係留されている浮体式防災基地等の過去の設計指針をもとに、(縦) 0.04m×(横) 0.04m×(高さ) 0.17m、(没水高さ) 0.02m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。そのほかの条件は、前節と同じである。圧力計の取り付け位置のみ、係留柱が奥行き中央に係留柱があるため、中央より離している。

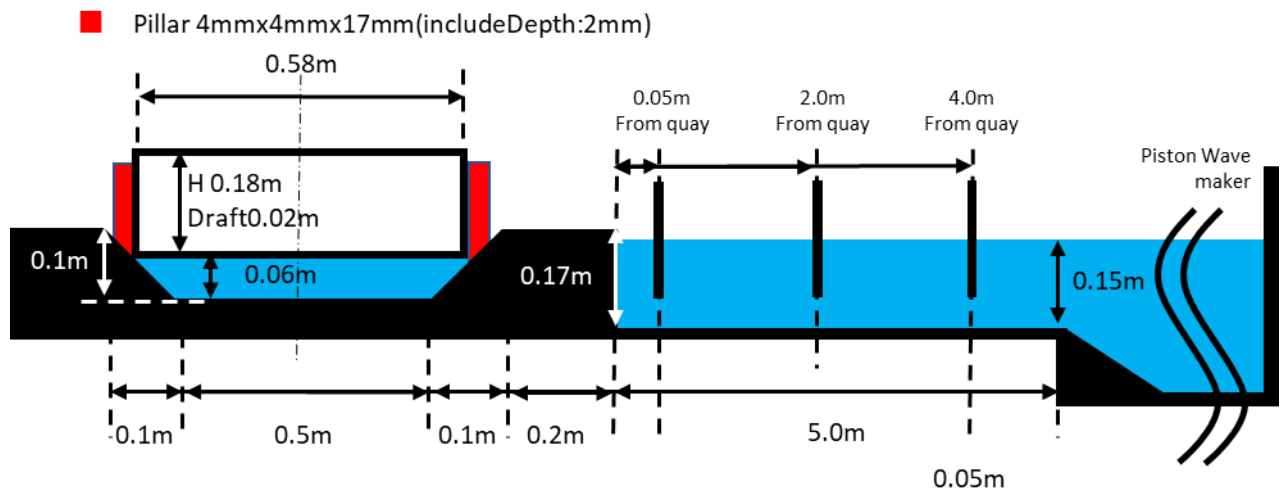


Fig. 3-45 Experimental setup system and calculation system (Mooring)

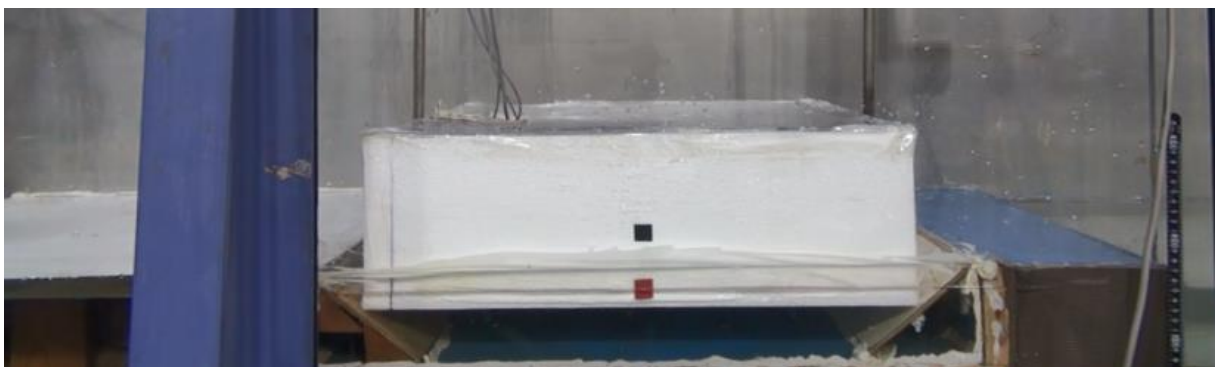




Fig. 3-46 Set experiment mode

### 3-2-1 実験結果

Fig.3-47、Fig. 3-49、Fig. 3-51、Fig. 3-53、Fig. 3-55、Fig.3-57 に鉛直方向の運動変位、Fig.3-48、Fig. 3-50、Fig. 3-52、Fig. 3-54、Fig. 3-56、Fig.3-58 は浮体への作用圧力を表している。すべての計測条件は無係留の状態と同じである。まず、鉛直方向への浮体の変位から考察する。入射波高が 0.05m、0.06m では、箱型浮体のほうが若干浮上し、入射波高が 0.07m 以降は円筒型浮体が箱型浮体よりも浮上する結果であった。また、入射波高が 0.07m 以上になると、浮体運動の応答の立ち上がりが円筒型浮体のほうが急となり、上昇運動が速くなった。

次に浮体に作用する津波波圧について検討する。無係留の場合、直方体と比較して円筒型に作用する圧力は小さいが、係留柱により係留した場合、波高が大きくなると特に衝撃波圧は大きくなった。しかし、箱型のほうが全体として受ける圧力は大きくなる結果となった。

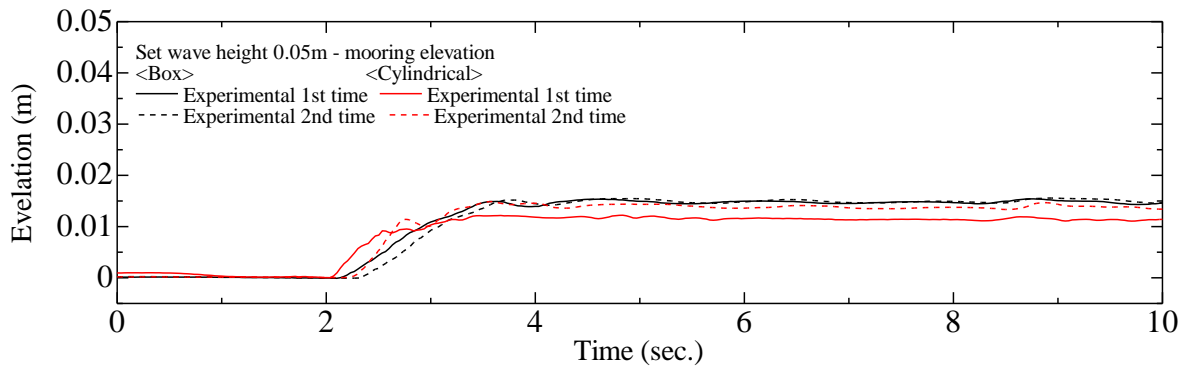


Fig. 3-47 Time history of elevation (H:0.05m, Delphine mooring)

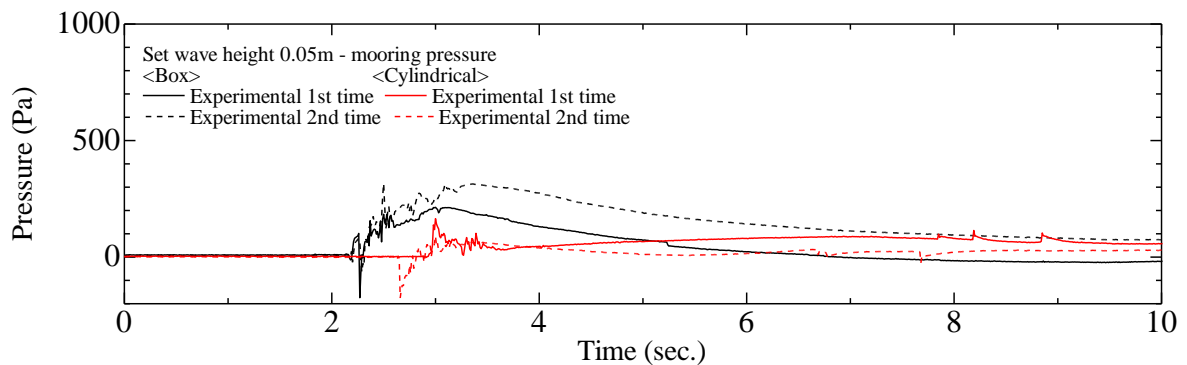


Fig. 3-48 Time history of pressure at front surface (H:0.05m, Delphine mooring)



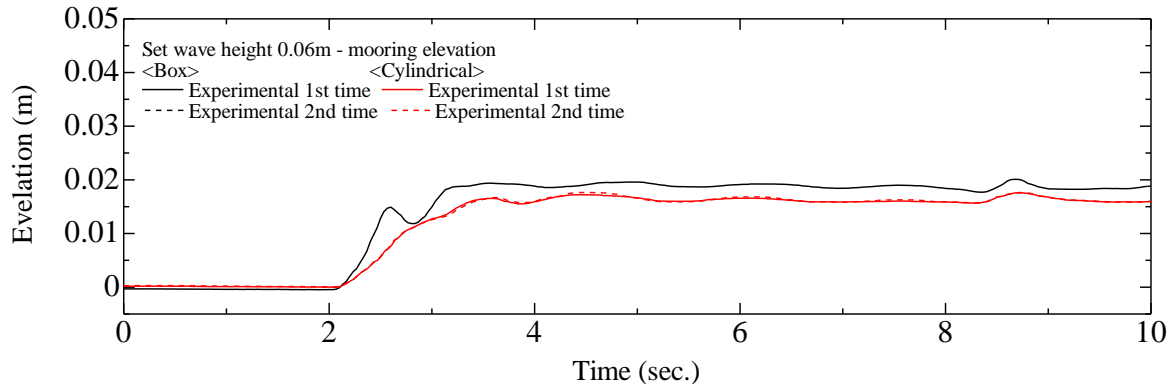


Fig. 3-49 Time history of elevation (H:0.06m, Delphine mooring)

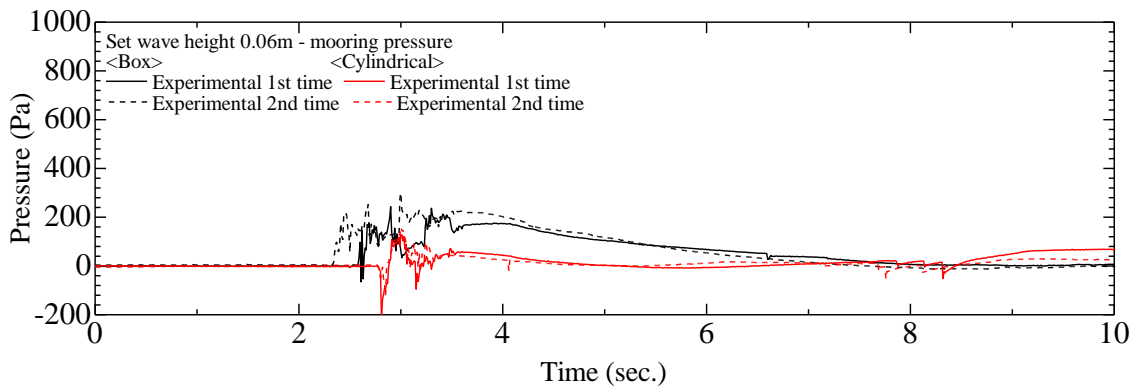


Fig. 3-50 Time history of pressure at front surface (H:0.06m, Delphine mooring)

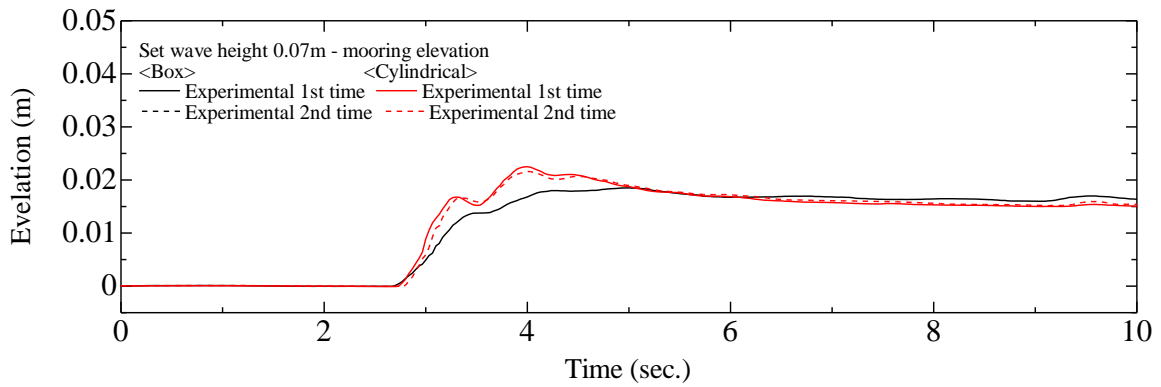


Fig. 3-51 Time history of elevation (H:0.07m, Delphine mooring)

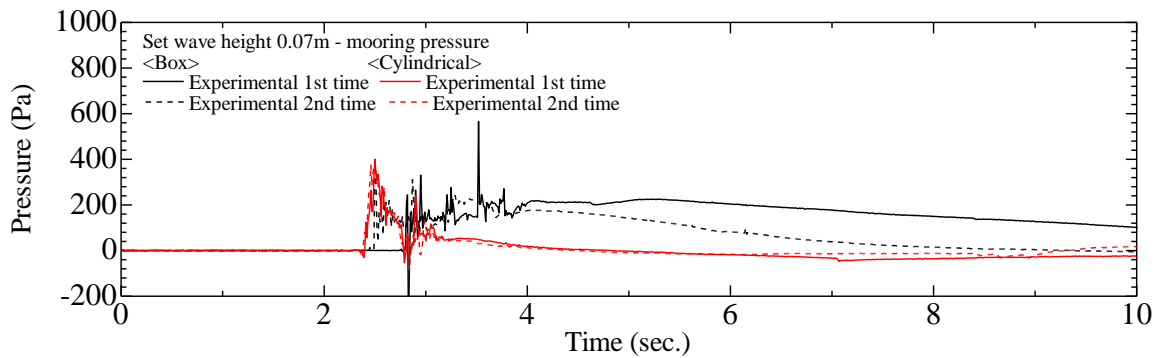


Fig. 3-52 Time history of pressure at front surface (H:0.07m, Delphine mooring)

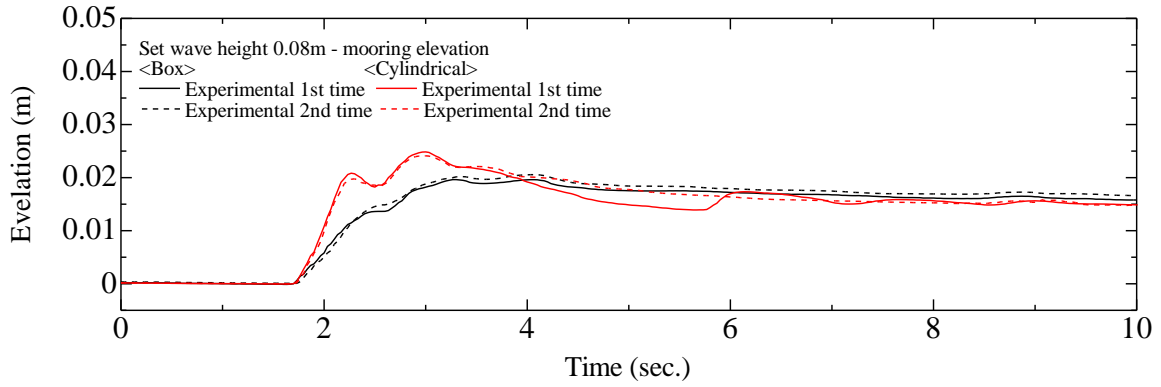


Fig. 3-53 Time history of elevation (H:0.08m, Delphine mooring)

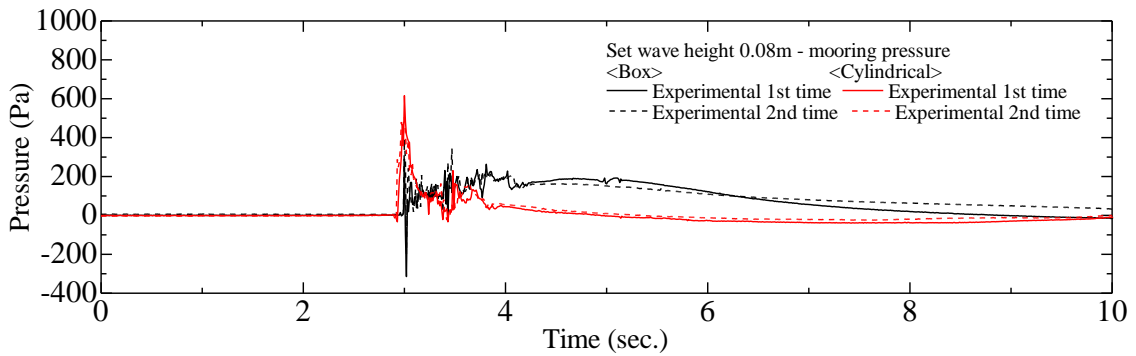


Fig. 3-54 Time history of pressure at front surface (H:0.08m, Delphine mooring)

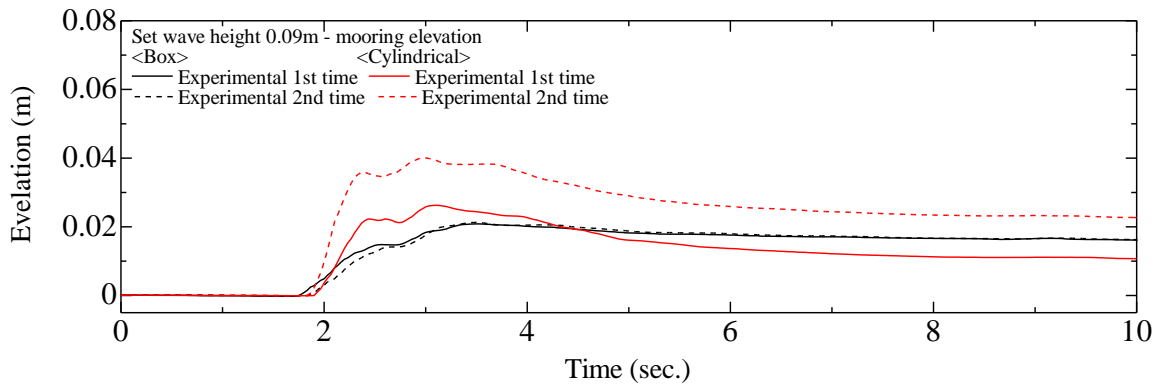


Fig. 3-55 Time history of elevation (H:0.09m, Delphine mooring)

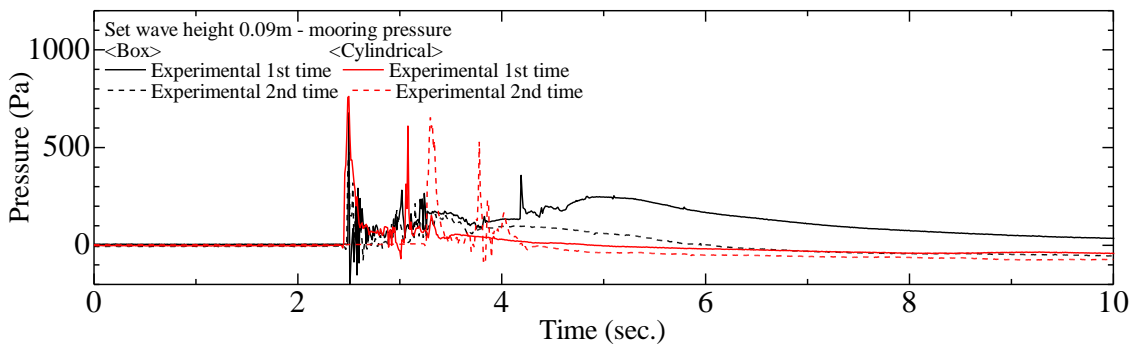


Fig. 3-56 Time history of pressure at front surface (H:0.09m, Delphine mooring)

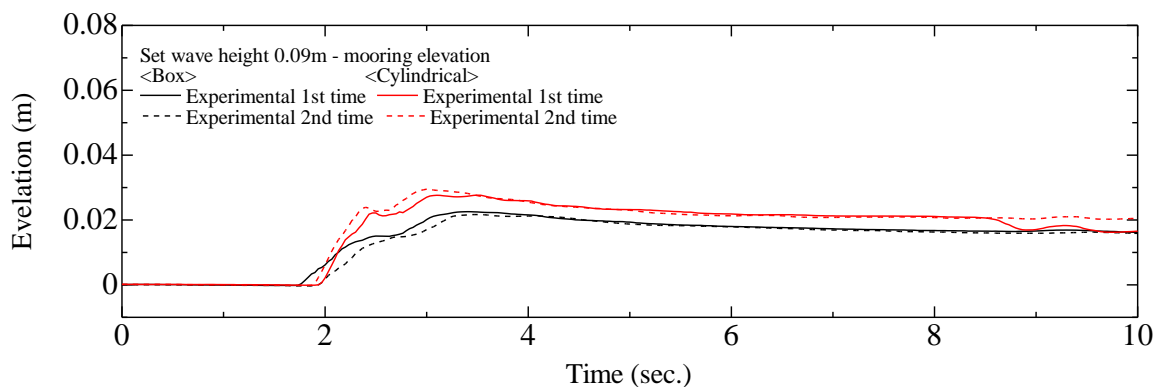


Fig. 3-57 Time history of elevation (H:0.10m, Delphine mooring)

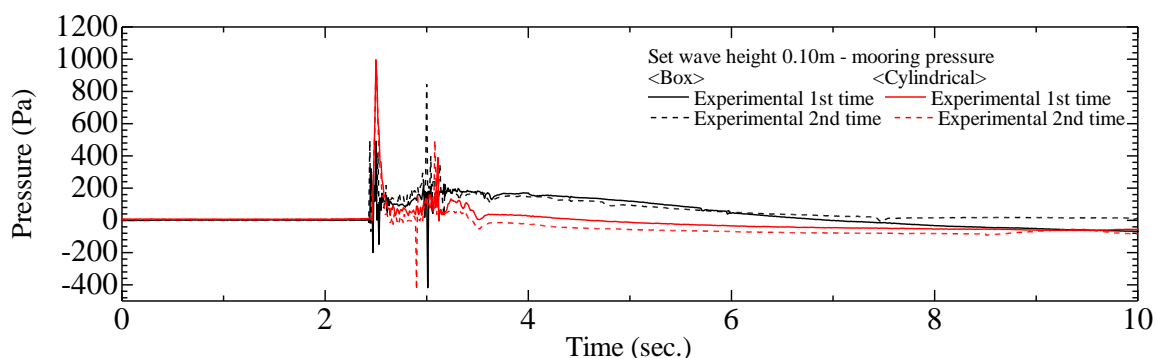


Fig. 3-58 Time history of pressure at front surface (H:0.10m, Delphine mooring)

### 3-4 結言

本章では、新しい津波シェルターである浮体式大型津波シェルターの挙動や作用する波圧の影響を明らかにし、その有効性を示す章であった。従来の直方体構造物に加え、優位性の高い円筒型構造物を用意し、形状の違いによる挙動や津波波圧の違いを示すこととした。無係留浮体において、円筒型浮体は構造物への津波による構造物への作用圧力は小さく、波の入射後の挙動は小さいが、加速度は大きい。さらに、係留柱に与える力は大きいと考えられる。一方で、直方体浮体は、構造物への津波による圧力の作用が大きく、入射後の挙動は大きいものの、加速度は小さい。すなわちゆっくり変位し、係留柱へ作用する力は円筒型浮体に比べ小さいことが明らかになった。

係留柱を用いたドルフィン係留により、浮上の確認を示すことにした。結果より、無係留の場合、直方体と比較して円筒型に作用する圧力は小さいが、係留柱により係留した場合、作用する力は大きくなった。しかし、直方体の場合のほうが、全体的な圧力として大きな結果となった。

このことから、形状による違いと優位性、またドルフィン係留を考慮した場合、円筒型の構造物はダイナミックなうごきとなり、そのうち直方体の構造の場合は、耐圧の部厚を選択することが可能である。

# 第4章 MPS法による浮体式大型津波シェルターの挙動解析に対する適用性

## 4-1 緒言

現在までに多くの研究が、津波工学の研究へ MPS 法数値シミュレーションが適用されてきた。これは、MPS 法の大きな特徴が津波現象と対応することにあると考えられる。本章では、前章で述べた MPS 法を用いた数値シミュレーション手法を、津波来襲時における浮体式大型津波シェルターの設計に必要な解析へ適用するにあたり、その適用性について以下の順で検討を行っていく。

1. 無係留浮体の津波流体中における挙動に対する適用性の検討（2次元解析・3次元解析）
2. 係留柱による係留浮体の津波流体中における挙動に対する適用性の検討（3次元解析）

第1に、前章に示した、堀を有する岸壁模型に設置された浮体式大型津波シェルター模型の挙動に関する水理実験同様の計算条件における MPS 法による数値シミュレーション結果と実験結果を比較検討し、その適用性について検討する。

第2に、前章に示した、堀を有し、ドルフィン係留柱が付された岸壁模型に設置された浮体式大型津波シェルター模型の挙動に関する水理実験を実施する。同様の計算条件における MPS 法による数値シミュレーション結果と、実験結果の比較検討を行い、その適用性について検討する。

## 4-2 無係留浮体の津波流体中における挙動に対する MPS 法による数値シミュレーションの適用性の検討

### 4-2-1 2次元数値シミュレーションによる検討

本節では、浮体式大型津波シェルターの挙動の解析に対する本 MPS 法プログラムコードの適用性について検討を行う。水槽実験を実施し、入射波高、岸壁遡上水位、岸壁に作用する流体圧力、浮体の挙動、浮体に取り付けられた作用圧力に関して比較を行う。数値計算では、MPS 法によって前章で扱った水槽実験の再現を行う。

境界条件は、前章で述べた、流速と波高をディレクトリ条件で、圧力をノイマン条件とした流入流出境界を採用し、計測地点で計測した波高・流速データを境界に入力し、水槽に入射した。

浮体構造物は剛体とし、完全弾性体としている。浮体構造物は、外側の発泡スチロール体と内部の錘をそれぞれ別の粒子として設定している。これはなるべく正確な重力分布を実現するものである。また、別の粒子としているが、浮体の動揺で粒子配置の構造が崩れることはない。初めに、2次元 MPS 法による実験の再現を行う。計算モデルの諸元は Fig.4-1 と同様である。を対象とする。ここでの粒子間距離は、前節の検証結果を基に 0.01m とする。この時、初期配置粒子数は 7620 個である。

Table 4-1 Conditions of calculation (2D-MPS)

Particle Number	7620	coefficient of kinematic viscosity [Pa · sec]	$0.89 \times 10^{-6}$
Distance between particles [m]	0.01	Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	9.80665
Simulation time[sec]	8	Time step [sec]	$5.0 \times 10^{-4}$ (Fix)

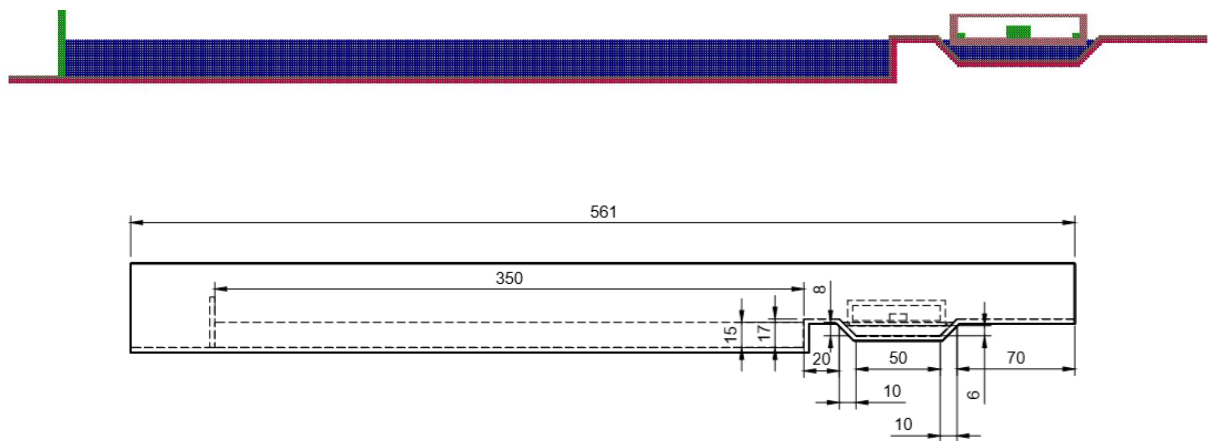


Fig. 4-1 Conditions of calculation area (2D)

#### 4-2-2 2次元数値シミュレーションによる比較結果

Fig. 4-2、Fig. 4-8、Fig. 4-14、Fig. 4-20、Fig. 4-26、Fig. 4-32 は岸壁終端から 2.0m 手前で計測した基準波高、Fig. 4-3、Fig. 4-9、Fig. 4-15、Fig. 4-21、Fig. 4-27、Fig. 4-33 は岸壁手前 0.05m で計測した岸壁直前の遡上波高である。流入流出境界を用いた場合でも、孤立波の主峰において基準波高において良い一致を示している。これは、水の流入流出境界の妥当性を示していると考えられる。ただし、双峰性のある孤立波において、2つ目の峰が遅れて出現している。これは後述するが、遡上後の津波の射流変形や浮体運動等の実験の違いにより、反射波が異なるものと考えられる。また、岸壁直前の遡上波高では、実験よりやや遅れて峰が計測位置に届いていることが明らかであり、また波高も少し高いことが確認できる。これは、解像度の問題、表面張力を考慮していないことが考えられる。このことにより、実験時よりも多くの水が堀に流入している可能性が高い。しかし、多くの水が流入する場合においては、流勢が大きくなる可能性が高いため、大き

な影響を及ぼさないと考えられる。ただし、正確なシミュレーションを求められる場合は、改良が今後必要である。次に、Fig. 4-4、Fig. 4-10、Fig. 4-16、Fig. 4-22、Fig. 4-28、Fig. 4-34 に基準流速位置での流速の結果の比較を示す。縦軸が流速、横軸が時間軸を示す。すべての結果ともに、流速の再現性は高い。入射波条件を適切に導入することができれば、数値シミュレーションは波高流速とも、砕波の伴いながらも適切に伝播することが明らかである。これは、同時に流入流出の境界条件での validation でもあり、良い適用性があると考えられる。Fig. 4-5、Fig. 4-11、Fig. 4-17、Fig. 4-23、Fig. 4-29、は浮体前面の波圧の値である。縦軸が波圧で横軸が時間である。結果から、0.05m 時を除いて、すべてのケースにおいて、同じかもしくは、MPS 法数値シミュレーションの結果が大きい結果となることが明らかになった。しかし、後述するが、浮体の挙動が異なるため、特に、波が浮体へ入射後から堀に衝突するまでの再現性は高いが、堀に衝突後は大きくことなる、圧力であれば実験結果が大きい結果となる。しかし、おおむね衝撃波圧は少し大きく出る傾向であるため、シミュレーション結果は安全な方向であると考えられる。波高が 0.05m の際、値の傾向が異なるのは、波圧計の取り付け位置によるものであると考えられる。そこから 0.07m の位置に設置されているため、計測位置に波が到達していなかったなどにより、数値シミュレーションの結果値が小さくなったものと考えられる。Fig. 4-6、Fig. 4-12、Fig. 4-18、Fig. 4-24、Fig. 4-30、Fig. 4-24 は水平方向、Fig. 4-7、Fig. 4-13、Fig. 4-19、Fig. 4-25、Fig. 4-31、Fig. 4-37 は鉛直方向の浮体の図心における運動変位を示している。縦軸がそれぞれ横変位、縦変位、横時間が時間を示している。全体の傾向として、数値シミュレーションの結果が、Pitch の回転方向の運動が小さくなるため、全体的にその運動がない分、水平方向への運動が大きくなることが示されている。これは、堀衝突直後の浮体の運動が異なることに起因していると考えられる。特に、今回の実験の場合、浮体の隅の片当たりが起りやすい状態にあり、これを適切に処理し、再現することは非常に難しい。これは数値シミュレーションの計算点の影響性にムラが起きることなどに起因する。また、堀から離れた場合も水につぶれ等を表現できていない、摩擦に関する考慮がないため、静止機構がないことによる水平方向への運動が大きくなる傾向である。一方、鉛直方向への運動は回転運動と水位の上昇に伴う位置変化以外であれば、おおむね一致していると考えられる。よって、2次元における計算結果でもおよその計算精度は得られていると考えられる。

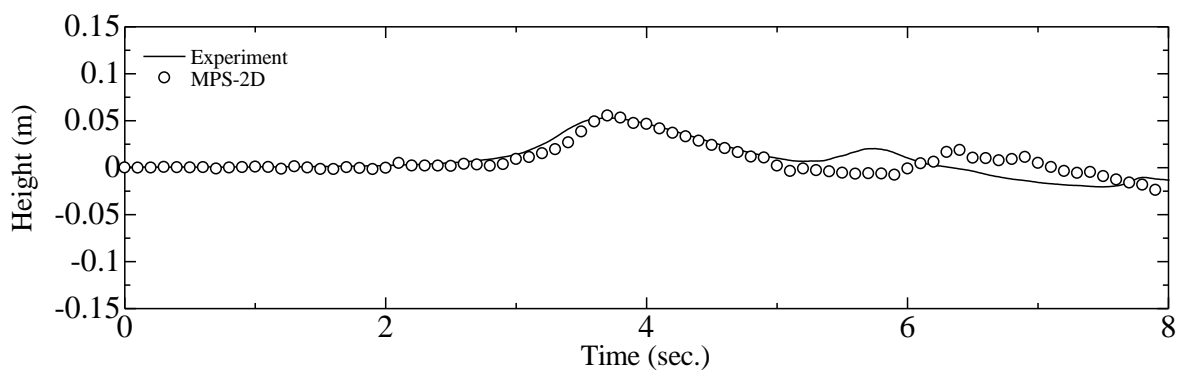


Fig. 4-2 Comparison of wave height (H=0.05m,2D, Non-mooring)

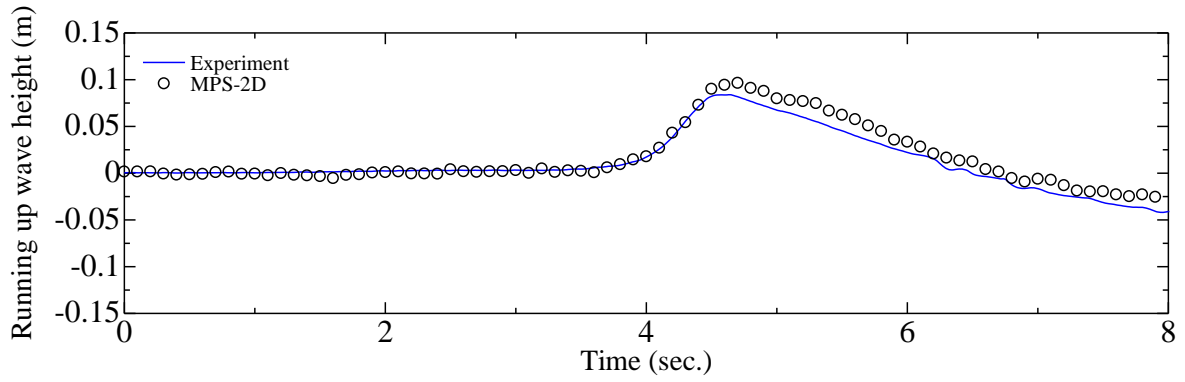


Fig. 4-3 Comparison of running up wave height ( $H=0.05\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

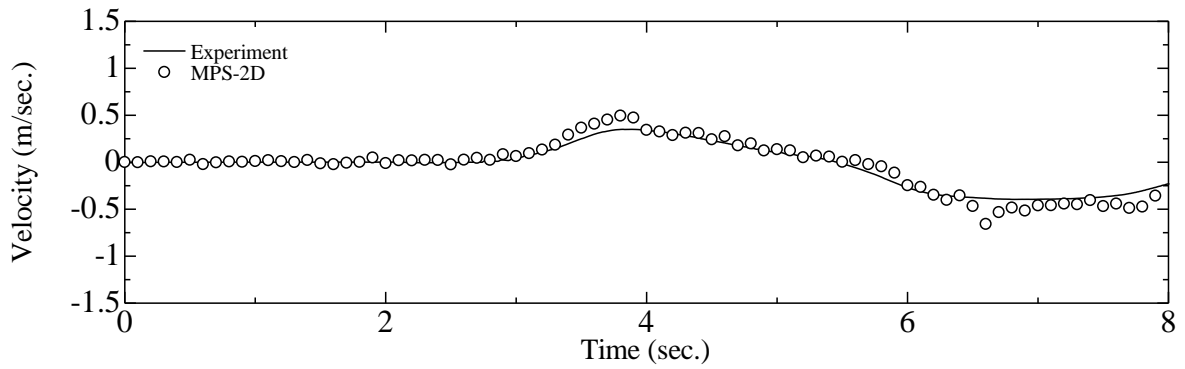


Fig. 4-4 Comparison of velocity ( $H=0.05\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

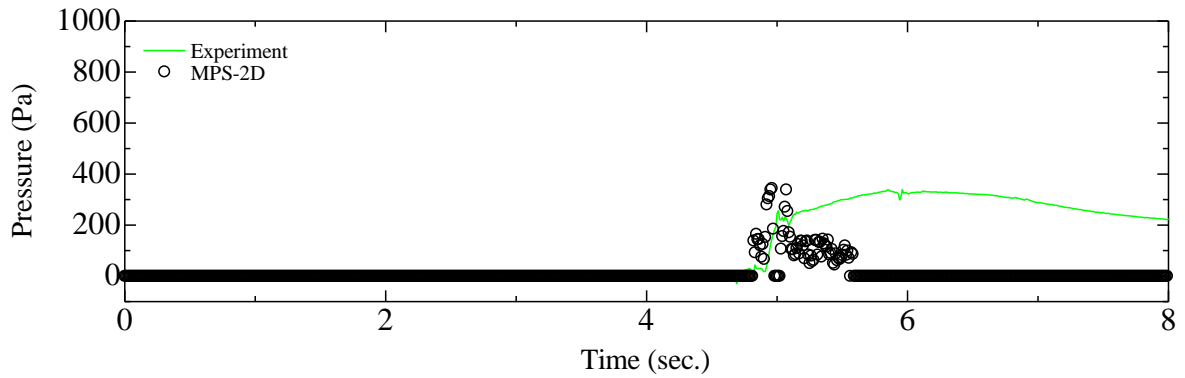


Fig. 4-5 Comparison of pressure at front surface ( $H=0.05\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

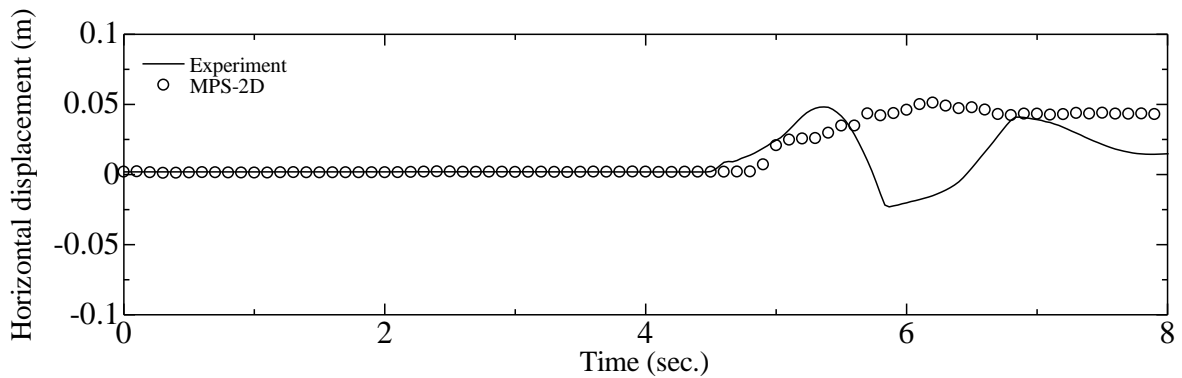


Fig. 4-6 Comparison of horizontal displacements ( $H=0.05\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

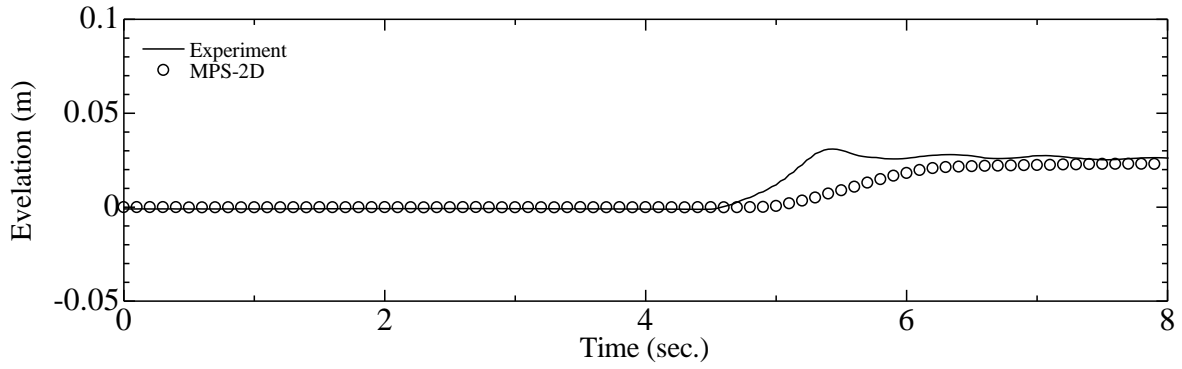


Fig. 4-7 Comparison of elevation ( $H=0.05\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

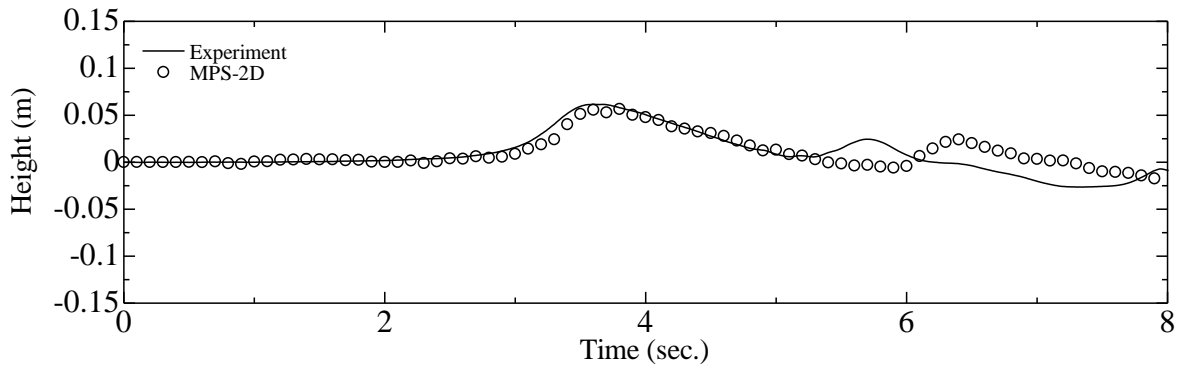


Fig. 4-8 Comparison of wave height ( $H=0.06\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

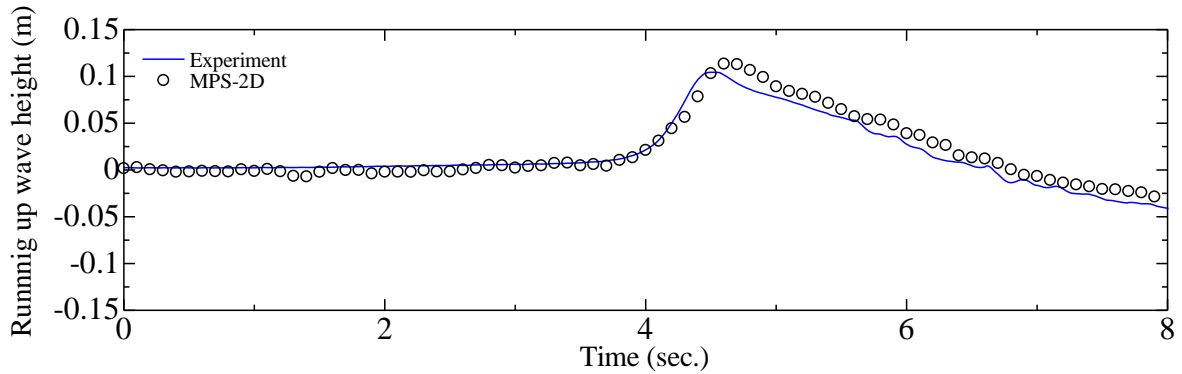


Fig. 4-9 Comparison of running wave height ( $H=0.06\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

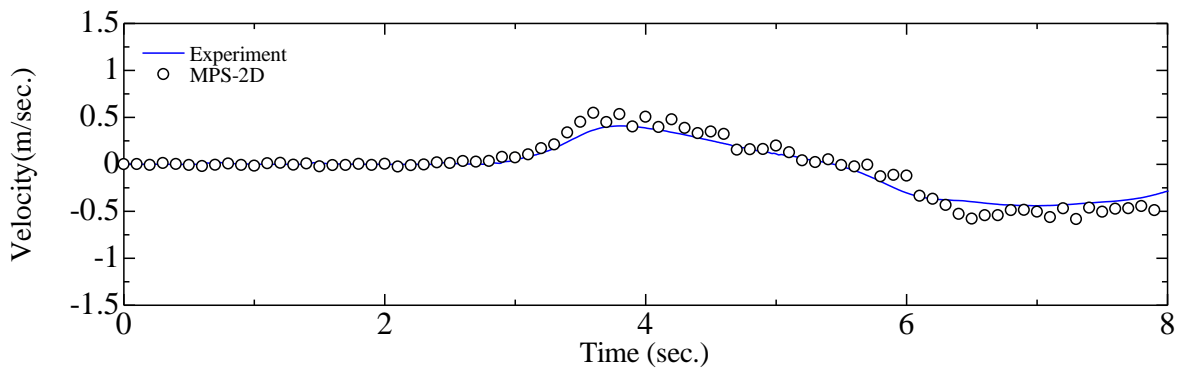


Fig. 4-10 Comparison of velocity ( $H=0.06\text{m}$ , 2D, Non-mooring)



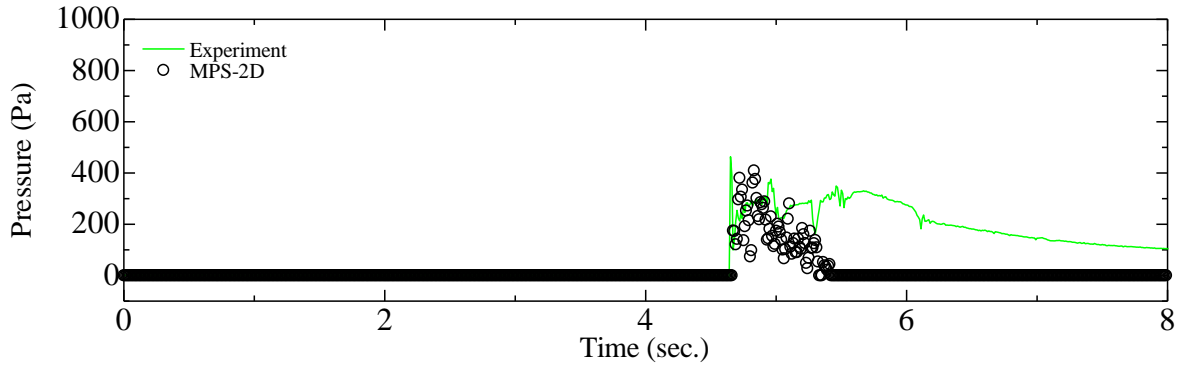


Fig. 4-11 Comparison of pressure at front surface ( $H=0.06\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

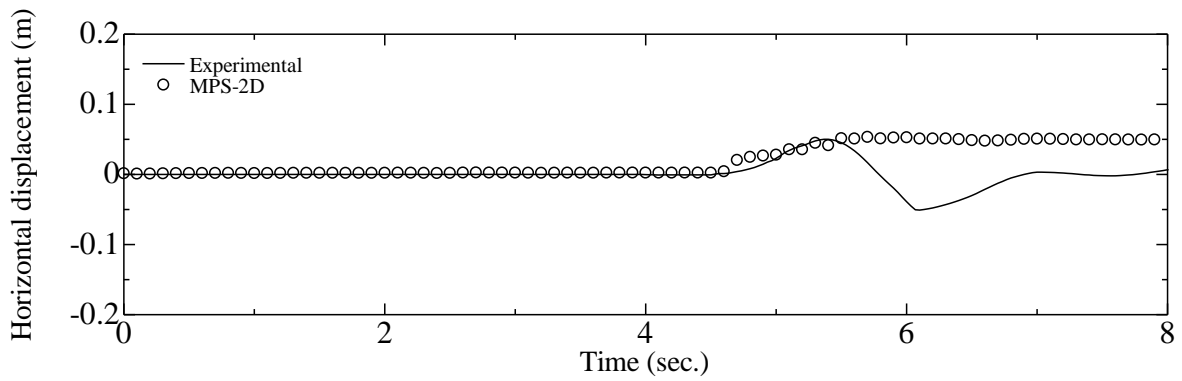


Fig. 4-12 Comparison of horizontal displacements ( $H=0.06\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

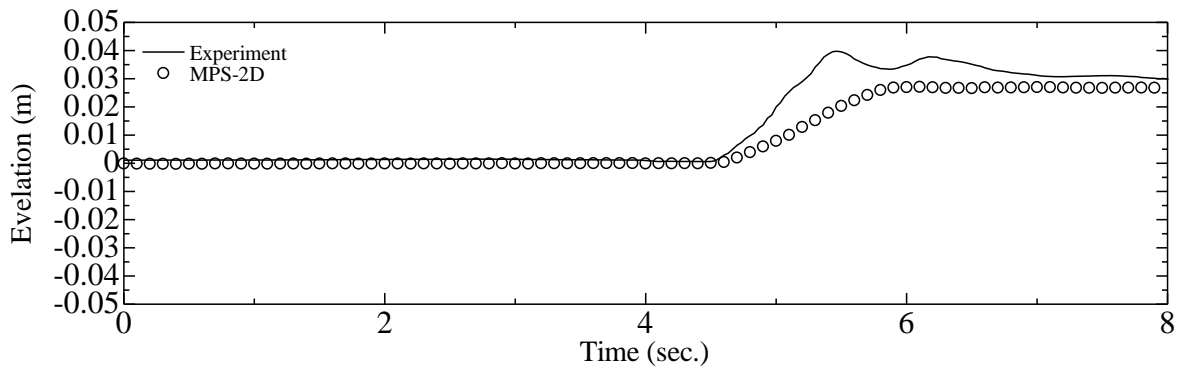


Fig. 4-13 Comparison of elevation ( $H=0.06\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

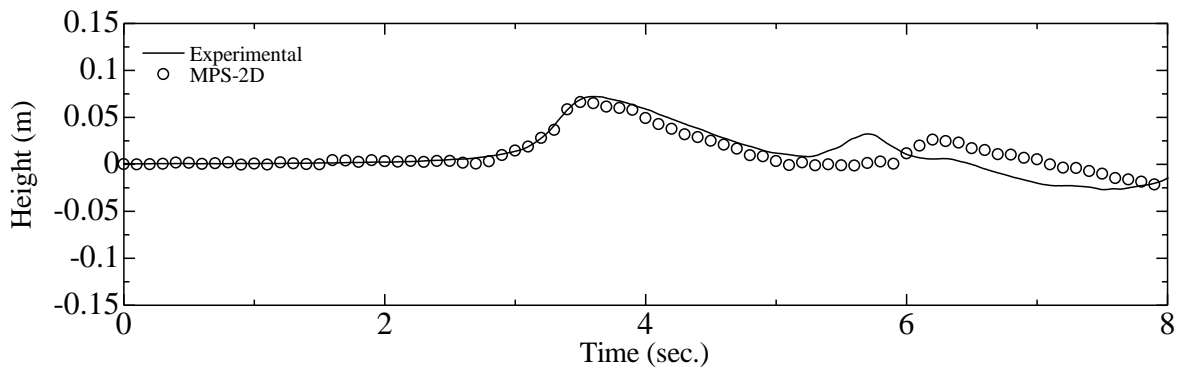


Fig. 4-14 Comparison of wave height ( $H=0.07\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

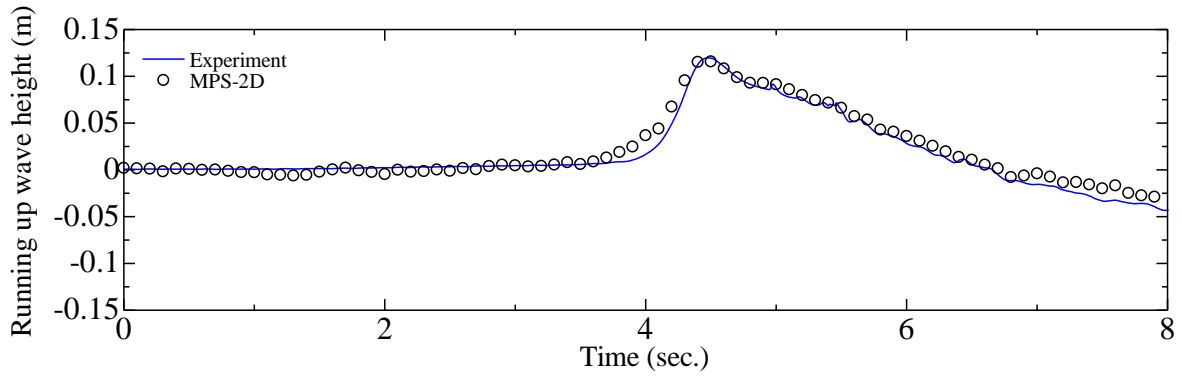


Fig. 4-15 Comparison of running up wave height ( $H=0.07\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

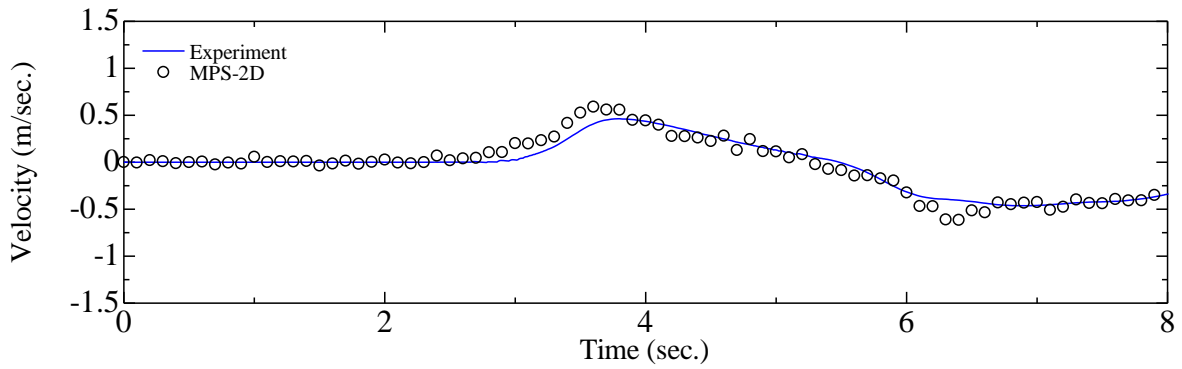


Fig. 4-16 Comparison of velocity ( $H=0.07\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

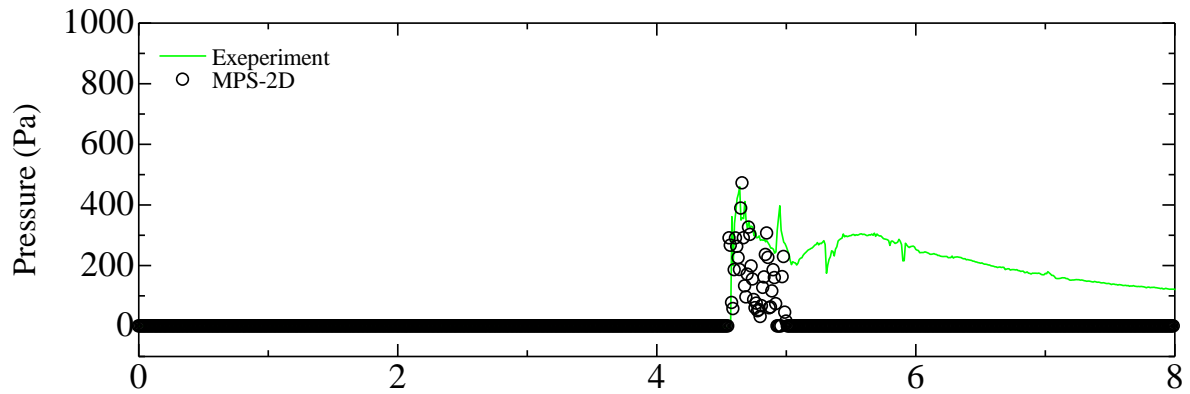


Fig. 4-17 Comparison of pressure at front surface ( $H=0.07\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

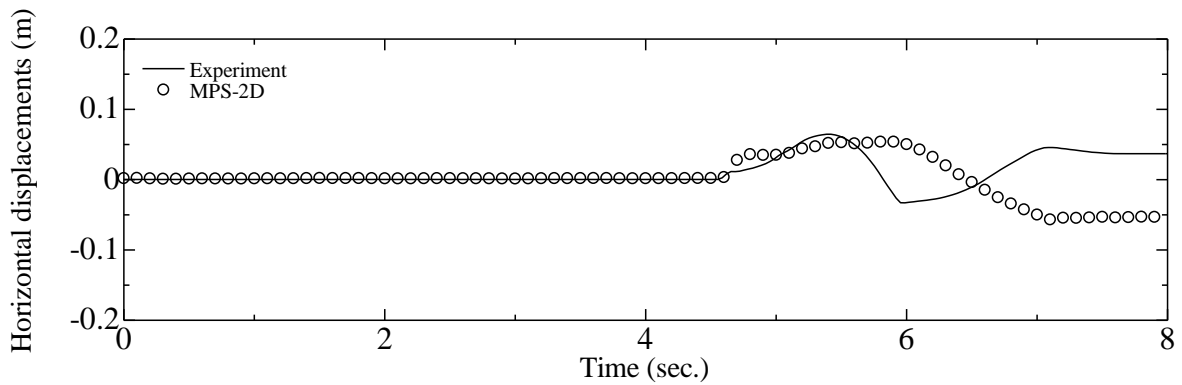


Fig. 4-18 Comparison of horizontal displacements ( $H=0.07\text{m}, 2\text{D}, \text{Non-mooring}$ )

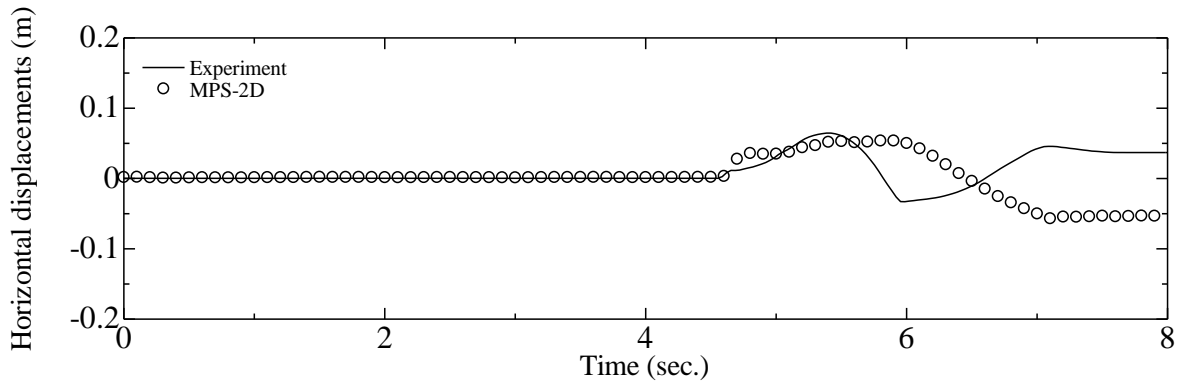


Fig. 4-19 Comparison of elevation ( $H=0.07\text{m}, 2D$ , Non-mooring)

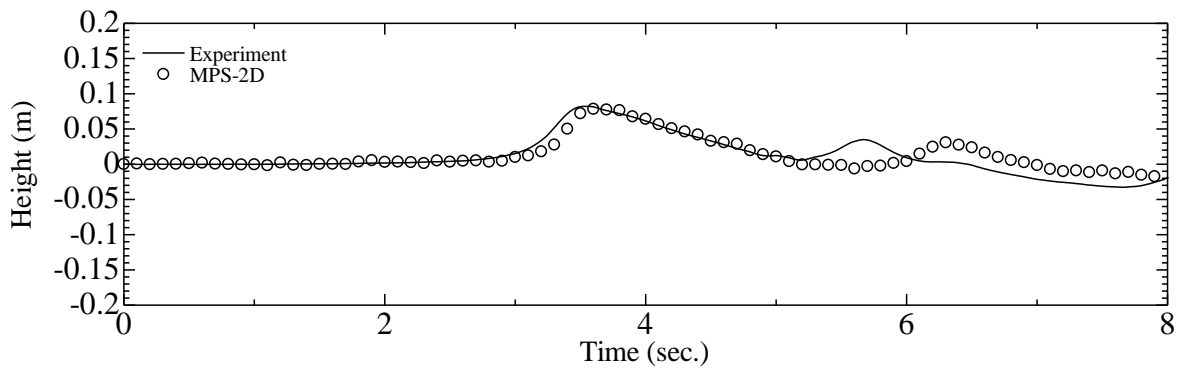


Fig. 4-20 Comparison of wave height ( $H=0.08\text{m}, 2D$ , Non-mooring)

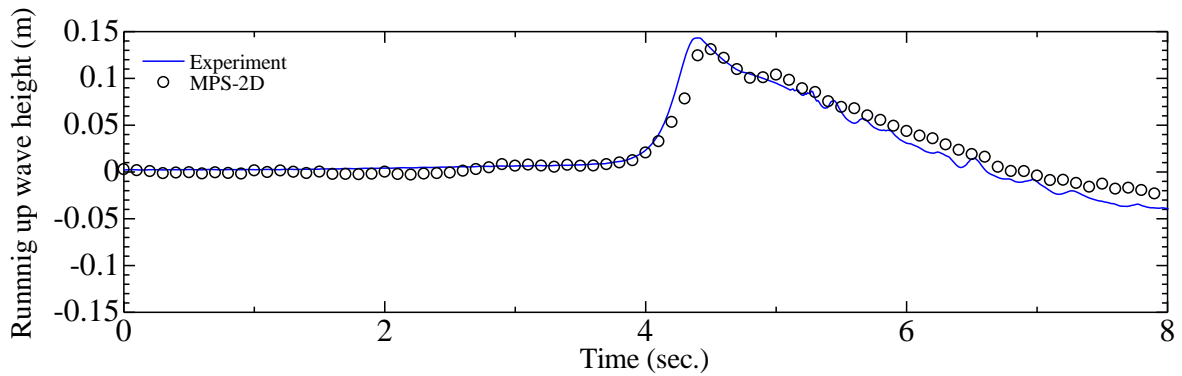


Fig. 4-21 Comparison of running up wave height ( $H=0.08\text{m}, 2D$ , Non-mooring)

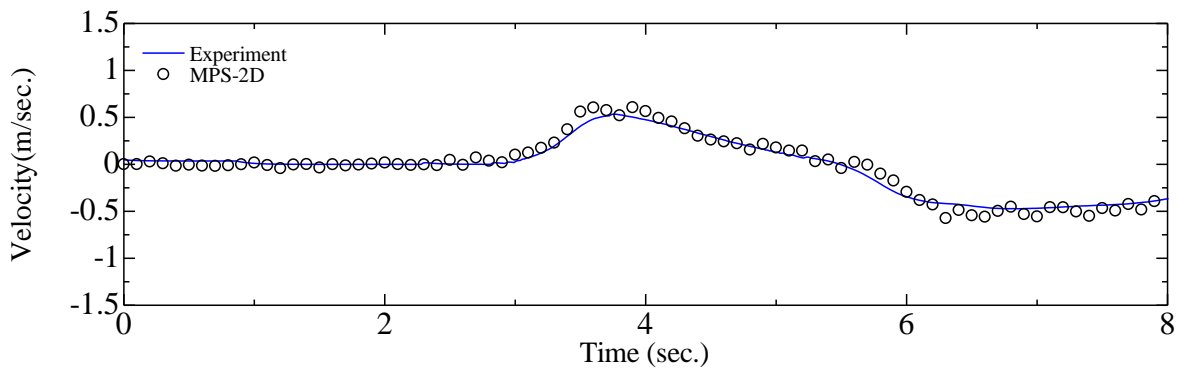


Fig. 4-22 Comparison of velocity ( $H=0.08\text{m}, 2D$ , Non-mooring)

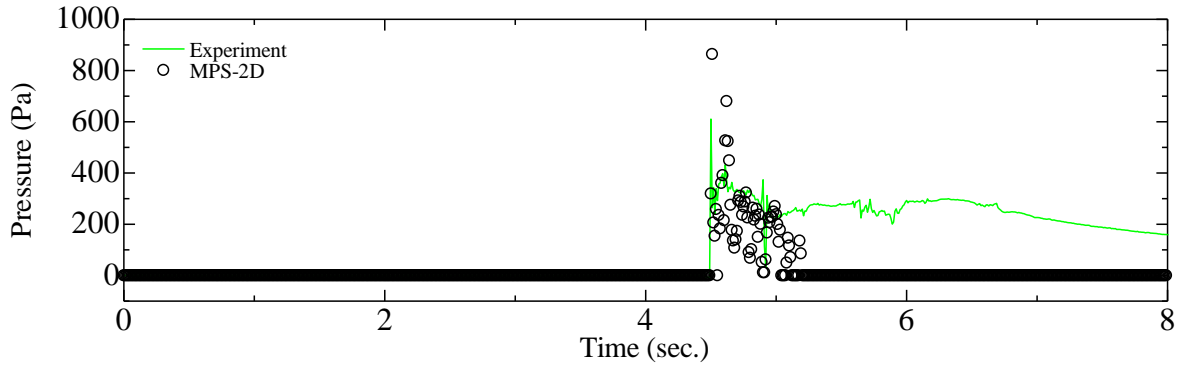


Fig. 4-23 Comparison of pressure at front surface ( $H=0.08\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

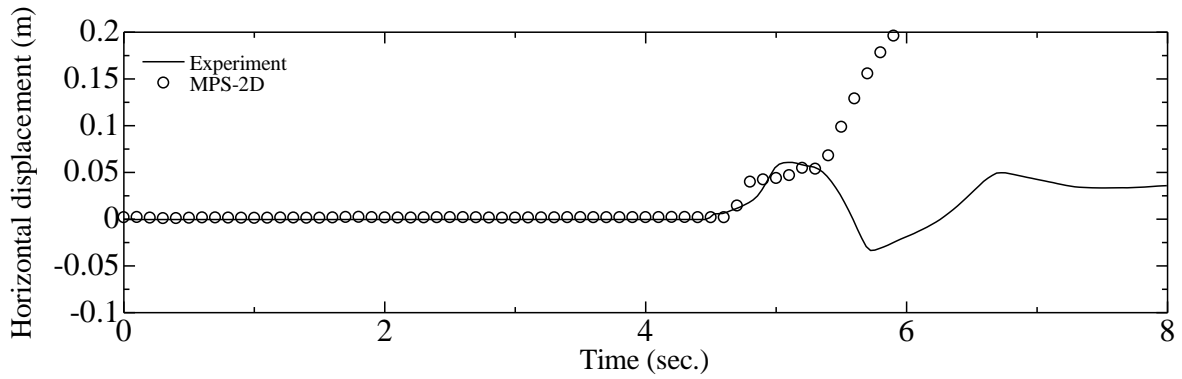


Fig. 4-24 Comparison of horizontal displacements ( $H=0.08\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

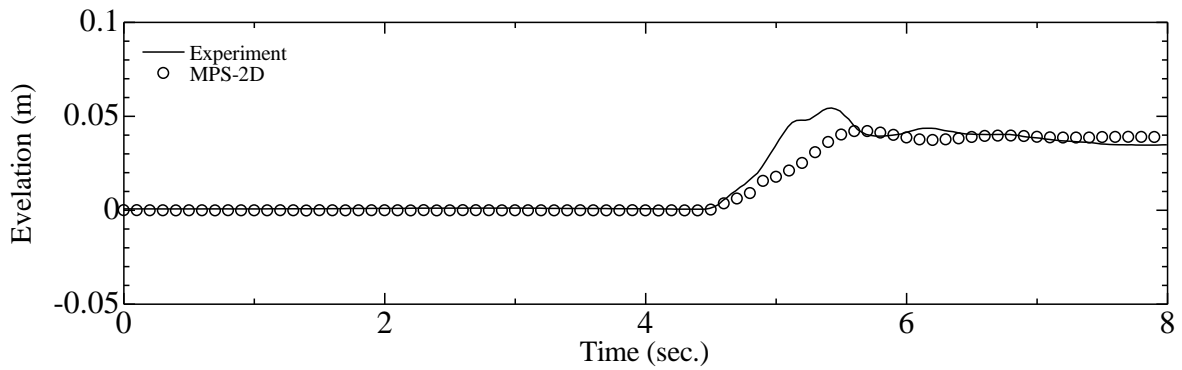


Fig. 4-25 Comparison of elevation ( $H=0.08\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

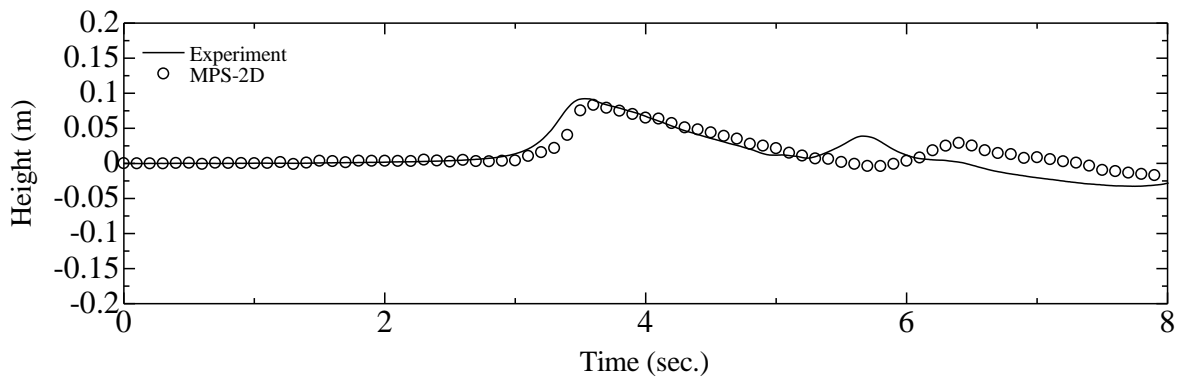


Fig. 4-26 Comparison of wave height ( $H=0.09\text{m}$ , 2D, Non-mooring)

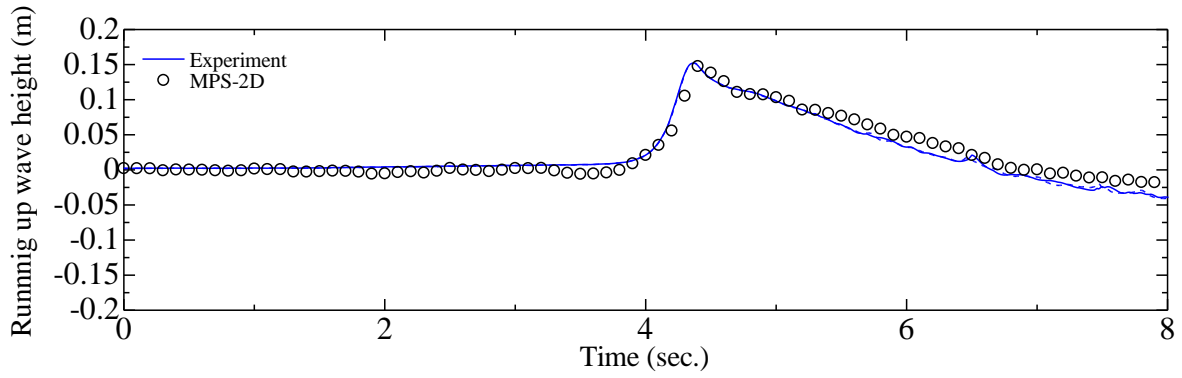


Fig. 4-27 Comparison of running up wave height (H=0.09m,2D, Non-mooring)

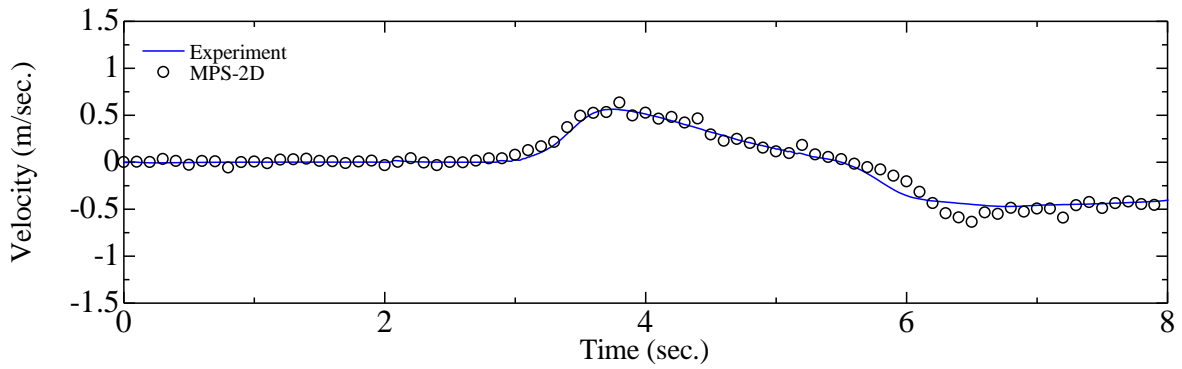


Fig. 4-28 Comparison of velocity (H=0.09m,2D, Non-mooring)

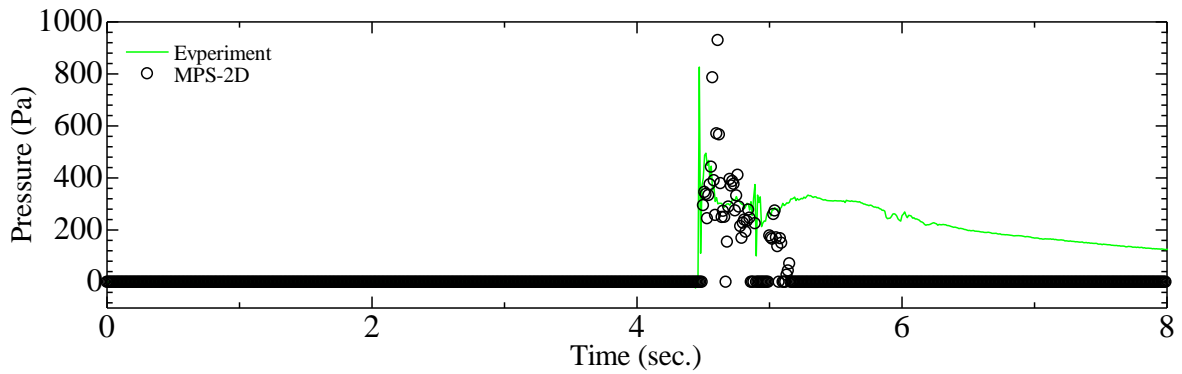


Fig. 4-29 Comparison of the pressure at front surface (H:0.09m,2D, Non-mooring)

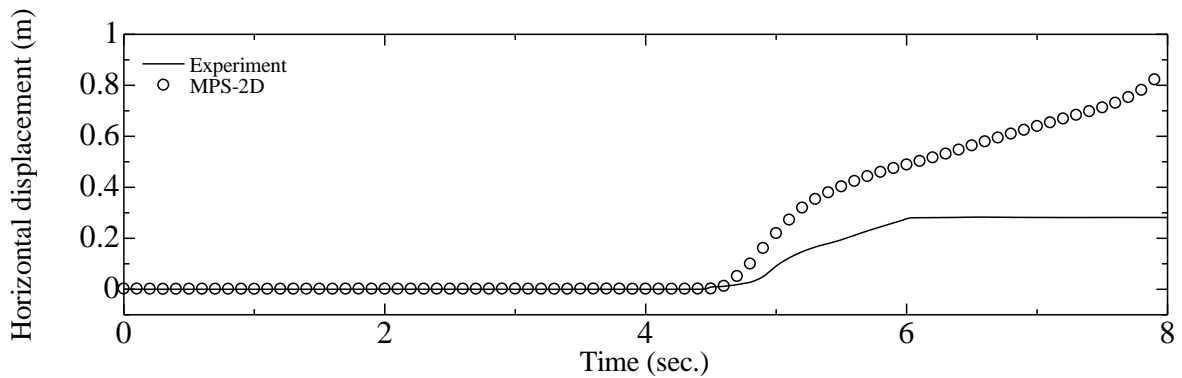


Fig. 4-30 Comparison of horizontal displacements (H:0.09m,2D, Non-mooring)

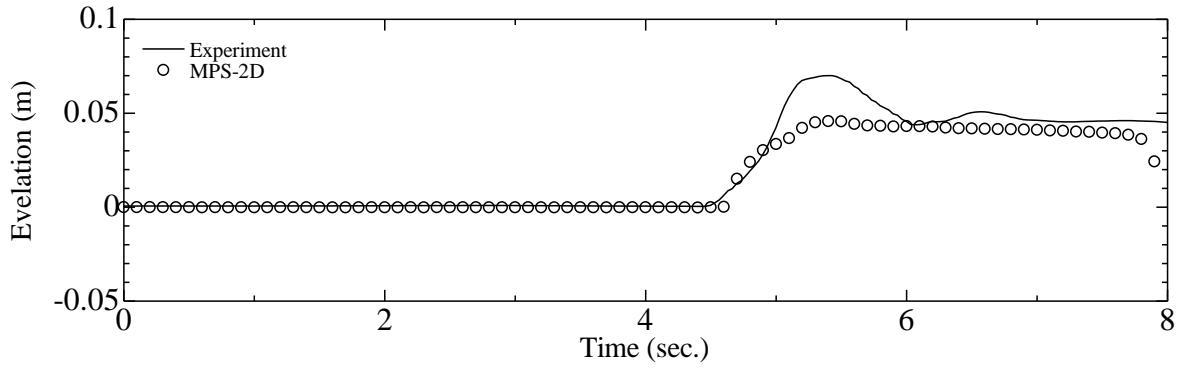


Fig. 4-31 Comparison of elevation (H:0.09m,2D, Non-mooring)

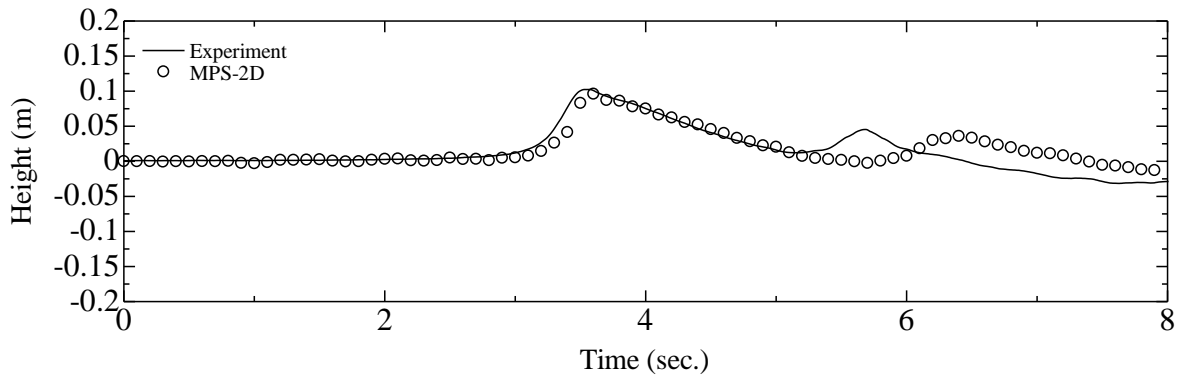


Fig. 4-32 Comparison of wave height (H:0.10m,2D, Non-mooring)

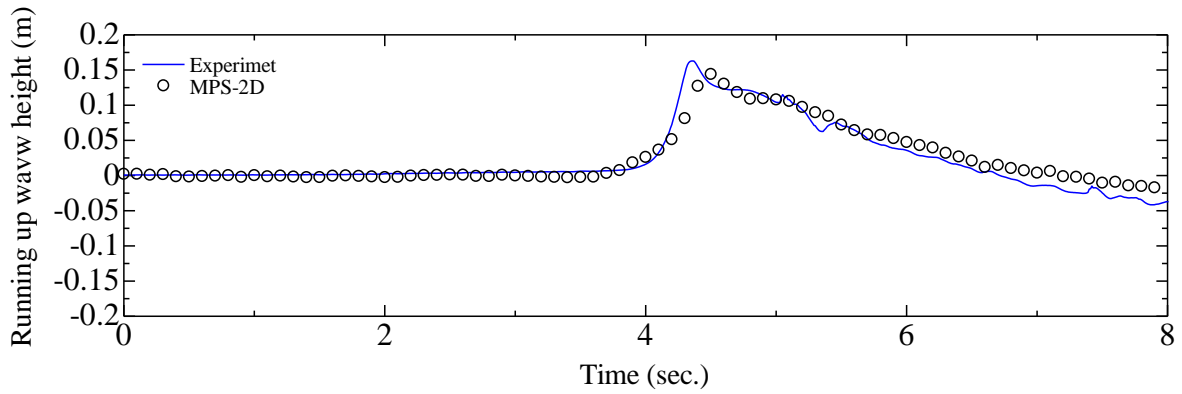


Fig. 4-33 Comparison of running up wave height (H=0.10m,2D, Non-mooring)

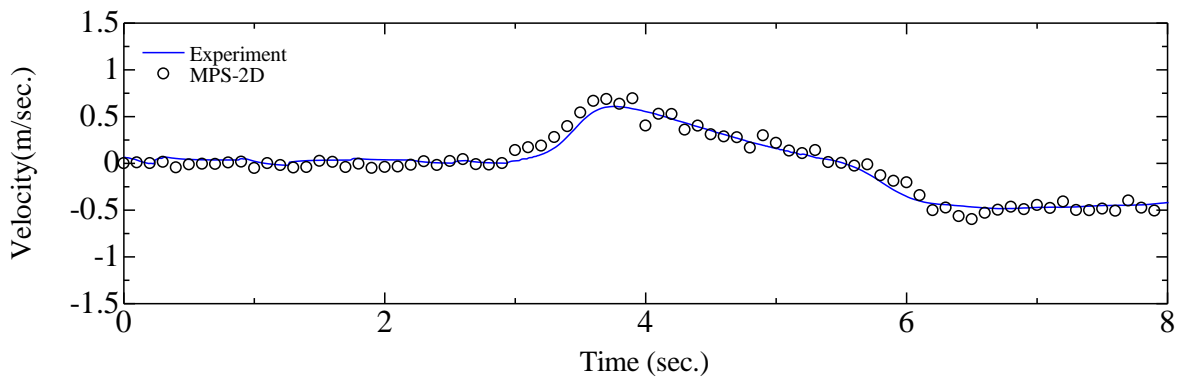


Fig. 4-34 Comparison of velocity (H=0.10m,2D, Non-mooring)

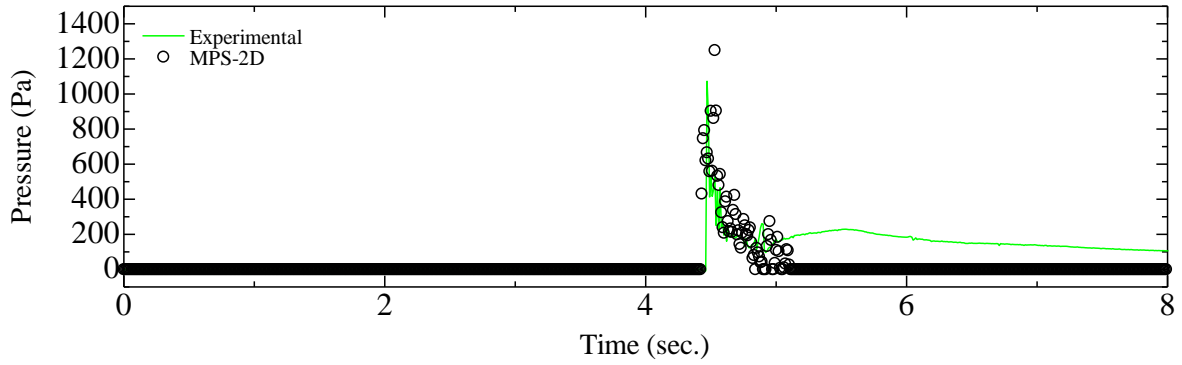


Fig. 4-35 Comparison of pressure at front surface (H=0.10m, 2D, Non-mooring)

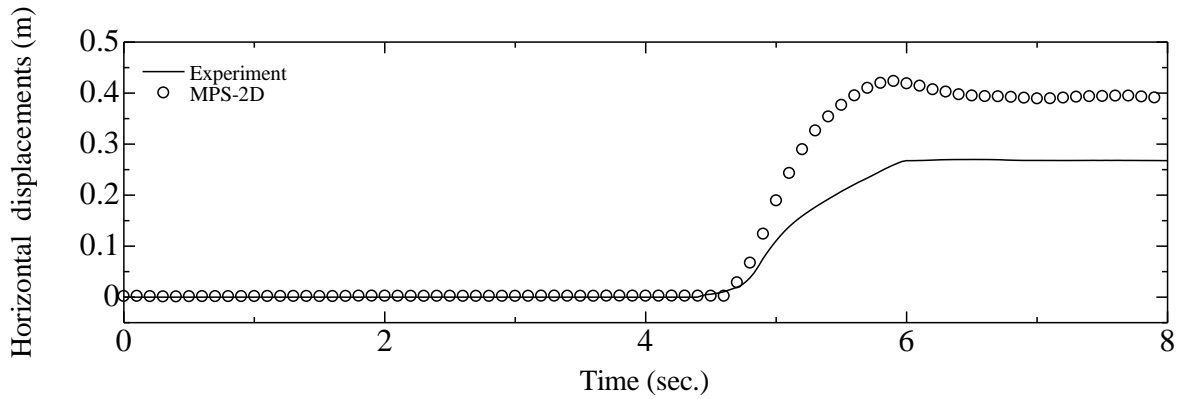


Fig. 4-36 Comparison of horizontal displacements (H=0.10m, 2D, Non-mooring)

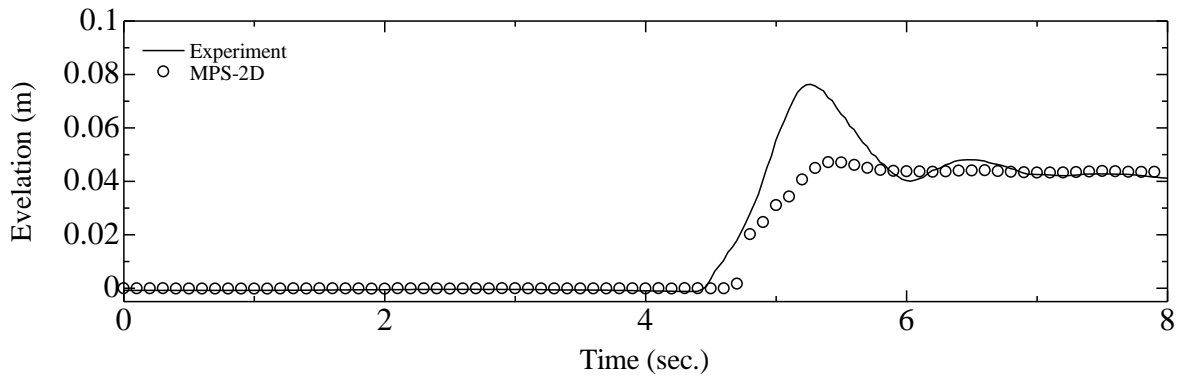


Fig. 4-37 Comparison of elevation (H=0.10m, 2D, Non-mooring)

### 4-2-3 3次元数値シミュレーションによる比較結果

次に3次元MPS法における実験の再現を行う。計算モデルの諸元はTable4-2に示す。計算結果をFig. 4-39~Fig. 4-56に示す。上述した結果から、0.01mごとの結果はほぼ波高の上昇とともに現れることが明らかになったため、0.06m、0.08m、0.10mの基準入射波高にて検討を行う。波高ごとの、波高・流速・浮体断面中心点の軌跡を示す。Fig. 4-39、Fig. 4-40、Fig. 4-45、Fig. 4-46、Fig. 4-51、Fig. 4-52に示す通り、波高、流速においては2次元での計算結果と同じ結果となった。これは、流入流出境界に造波が3次元においても拡張が行えていることを表している。浮体の運動につい

ては、円筒と直方体のそれぞれで考察していく。まず、入射波高 0.06m 時での評価である。まず、円筒型のほうが波入射後の運動応答が速い点について、MPS 法数値シミュレーションでもこれが確認できる。Fig. 4-43、Fig. 4-44 の 5 秒付近に円筒形状の軌跡の立ち上がりが大きいたとこが確認できる。また、円筒型のほうが挙動が大きいたとも明らかである。次に、入射波高 0.08m 時の評価である。水平方向の運動は堀衝突までの挙動は、変化の傾きが実験時により近い状態であり、これは 2 次元での結果よりもよいが、最終的には堀の外側に浮体が漂流する結果となった。しかし一方で、堀の外側に漂流後、振動するような運動となっている。これは、水の上に浮体に乗ってしまい、その後関係のない Yaw 方向への運動となってしまったものと考えられる。ただし、この運動は数値計算には 0.08m の時点では関与してないため、結果への影響性は少ないと考えられる。鉛直方向の運動は 0.06m 時と同様の傾向で、円筒型浮体の方が大きな運動となった。最後に入射波高 0.1m 時の挙動について評価である。特に特筆する点は、直方体浮体の挙動がよく一致している点である。これは、その他の波高に比べて、水位上昇が大きいたため、波の入射による浮体単独の運動よりも、波の上で浮上する運動が支配的になることにより、衝突の影響性が小さくなり、挙動がよくなったと考えられる。

Table 4-2 Conditions of calculation(3D-MPS)

Particle Number	(BOX) 557858 (Cylinder) 562604	coefficient of kinematic viscosity [Pa · sec]	0.89*10 <sup>-6</sup>
Distance between particles [m]	0.01	Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	9.80665
Simulation time[sec]	10	Time step [sec]	5.0*10 <sup>-4</sup> (Fix)



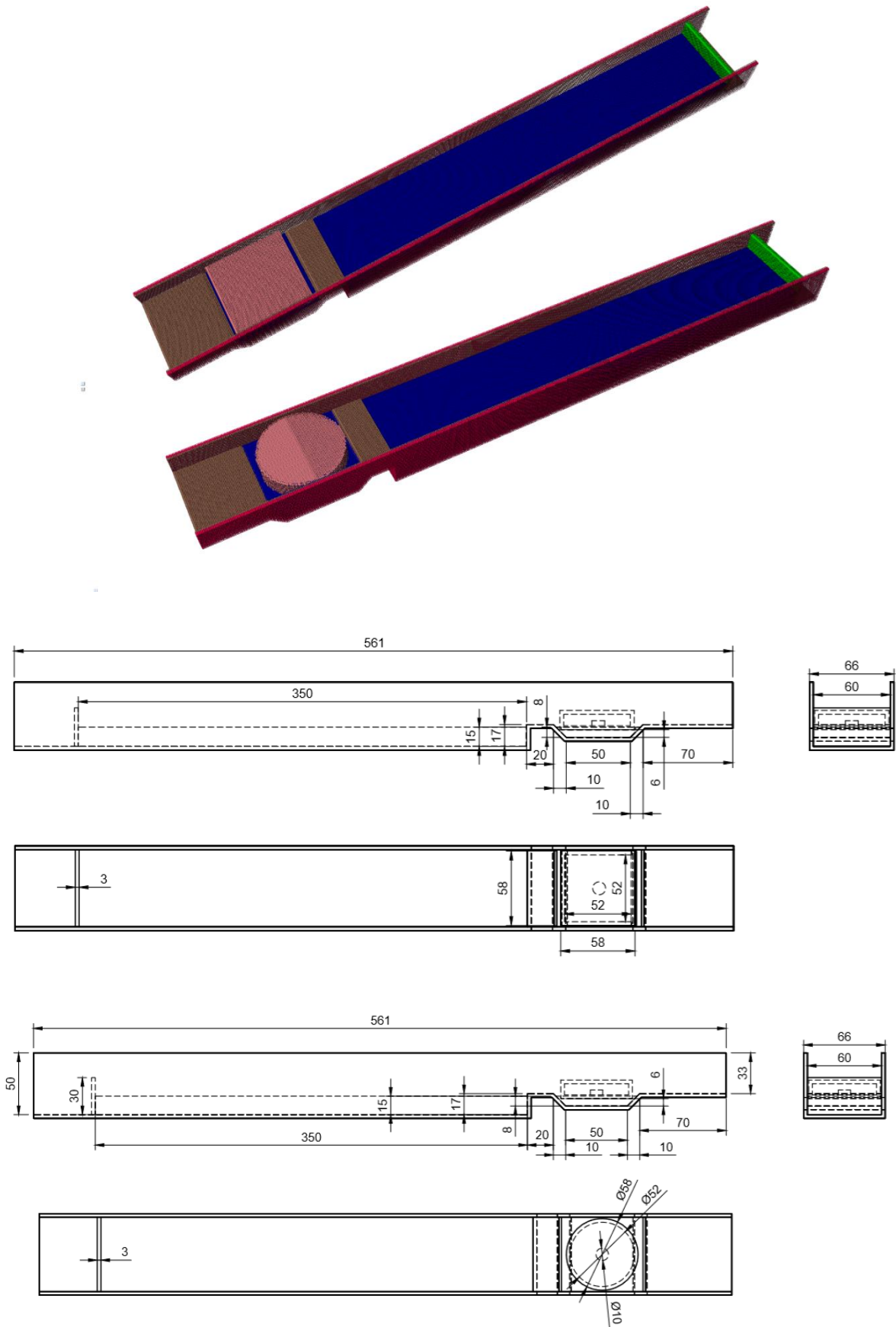


Fig. 4-38 Conditions of calculation area (3D)

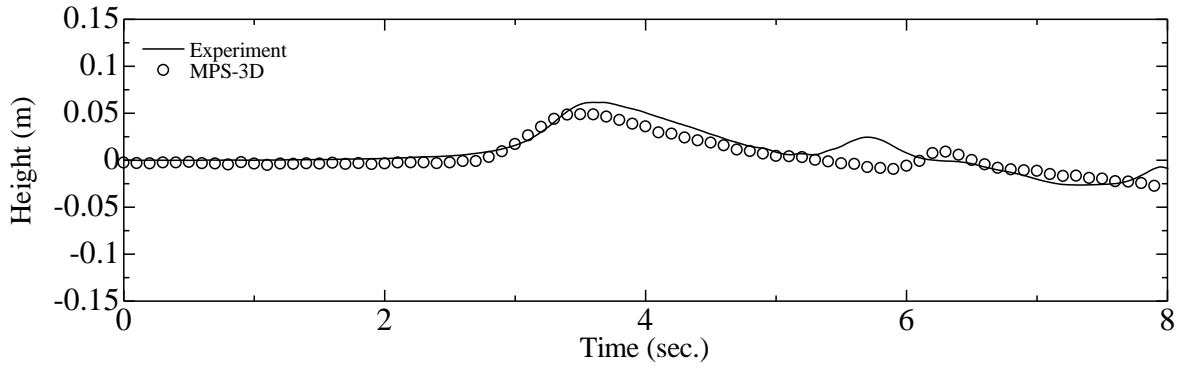


Fig. 4-39 Comparison of wave height ( $H=0.06\text{m}$ , 3D, Non-mooring)

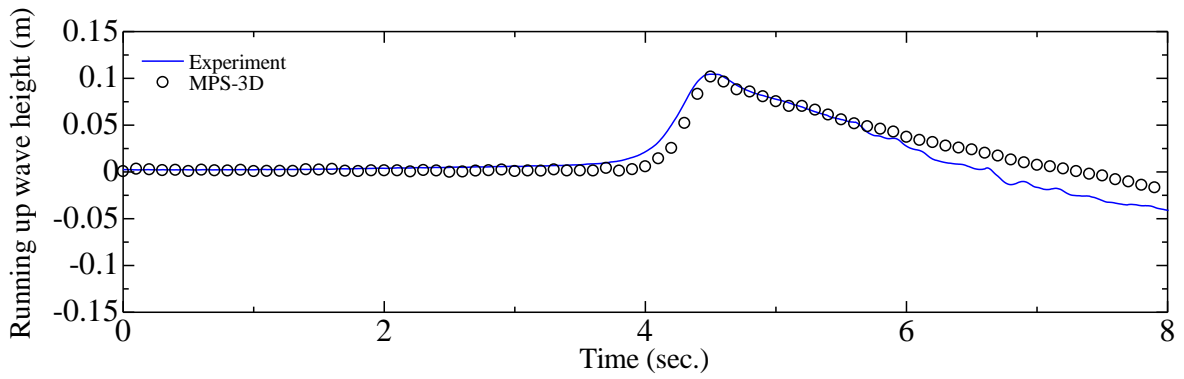


Fig. 4-40 Comparison of running up wave height ( $H=0.06\text{m}$ , 3D, Non-mooring)

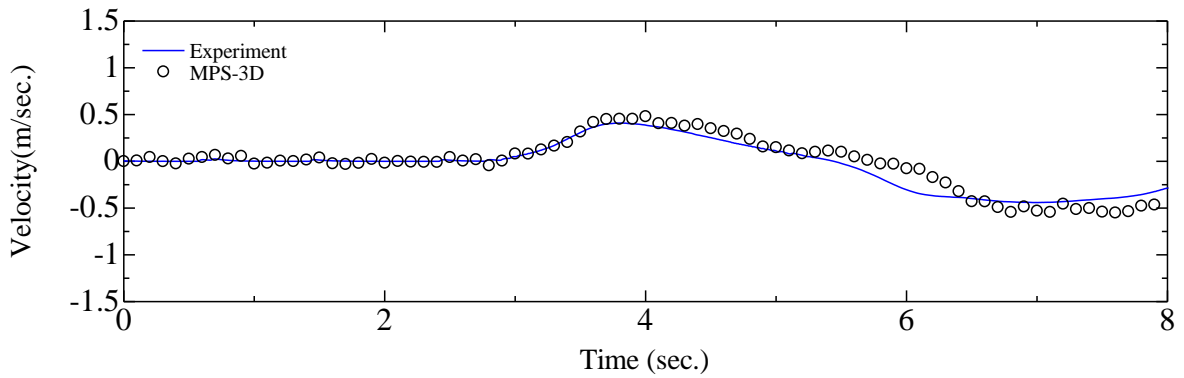


Fig. 4-41 Comparison of velocity ( $H=0.06\text{m}$ , 3D, Non-mooring)

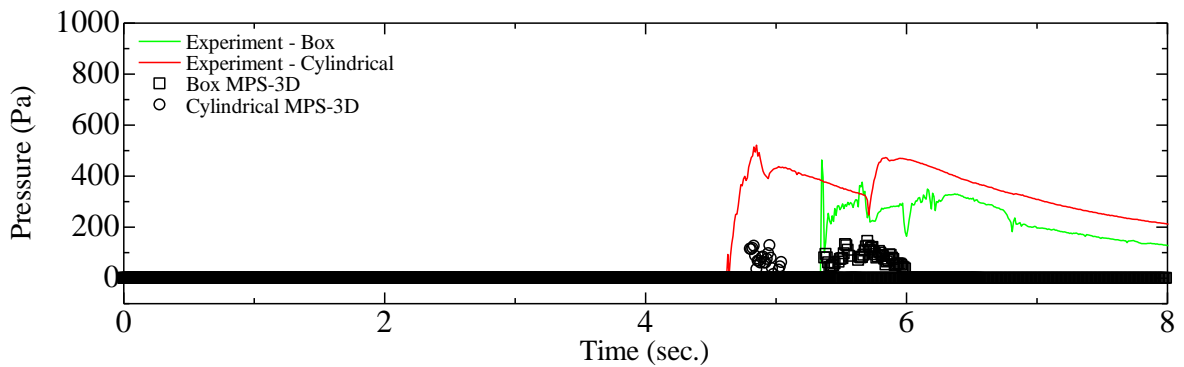


Fig. 4-42 Comparison of pressure at front surface ( $H=0.06\text{m}$ , 3D, Non-mooring)

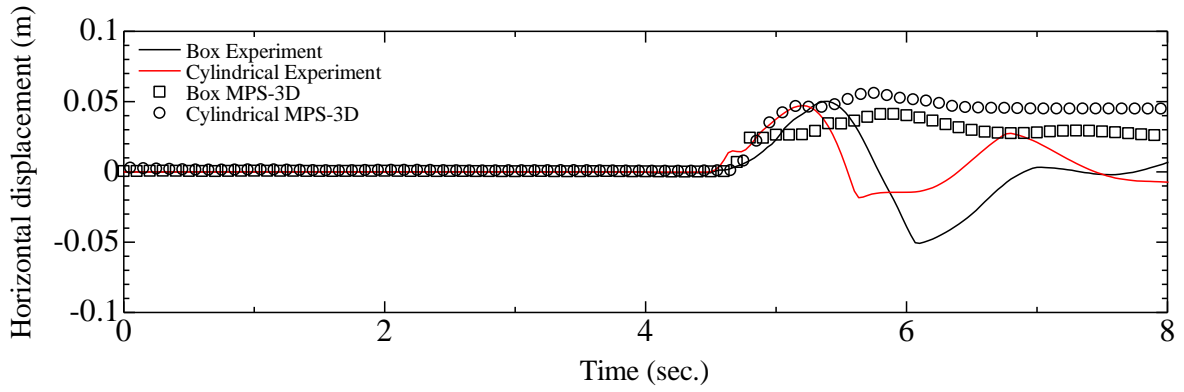


Fig. 4-43 Comparison of horizontal displacements ( $H=0.06\text{m}, 3\text{D}$ , Non-mooring)

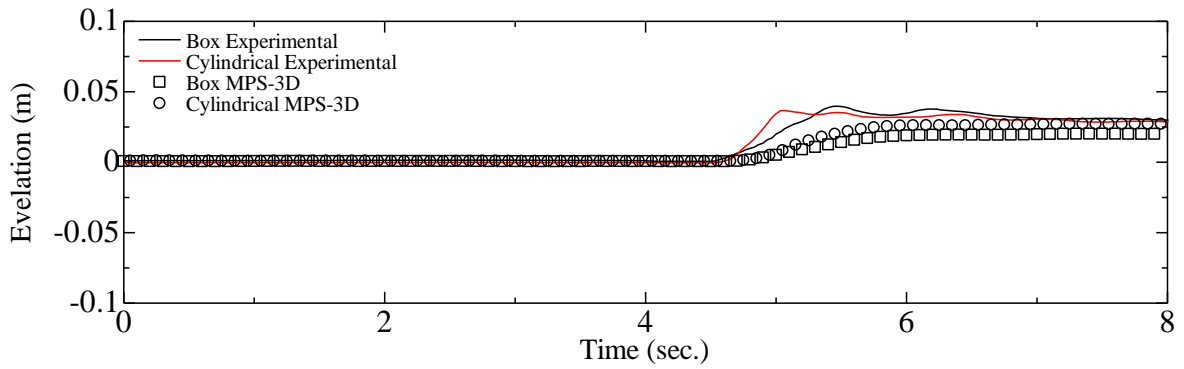


Fig. 4-44 Comparison of elevation ( $H=0.06\text{m}, 3\text{D}$ , Non-mooring)

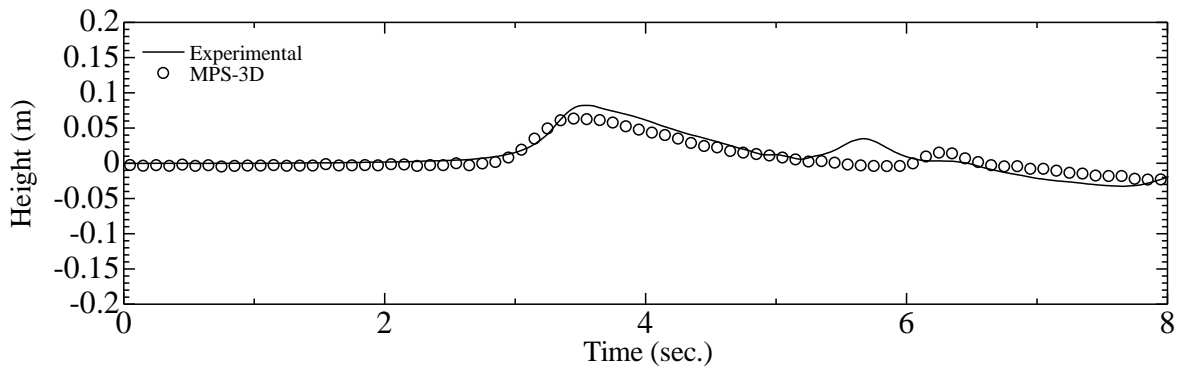


Fig. 4-45 Comparison of wave height ( $H=0.08\text{m}, 3\text{D}$ , Non-mooring)

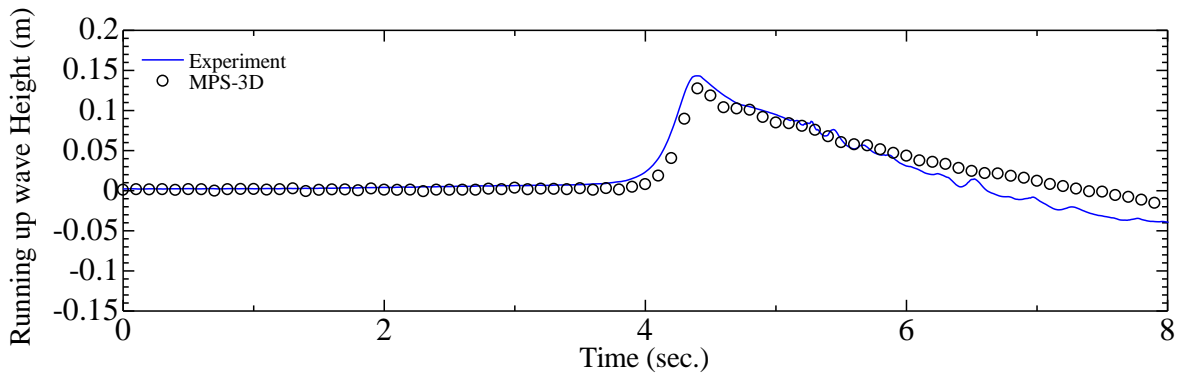


Fig. 4-46 Comparison of running up wave height ( $H=0.08\text{m}, 3\text{D}$ , Non-mooring)

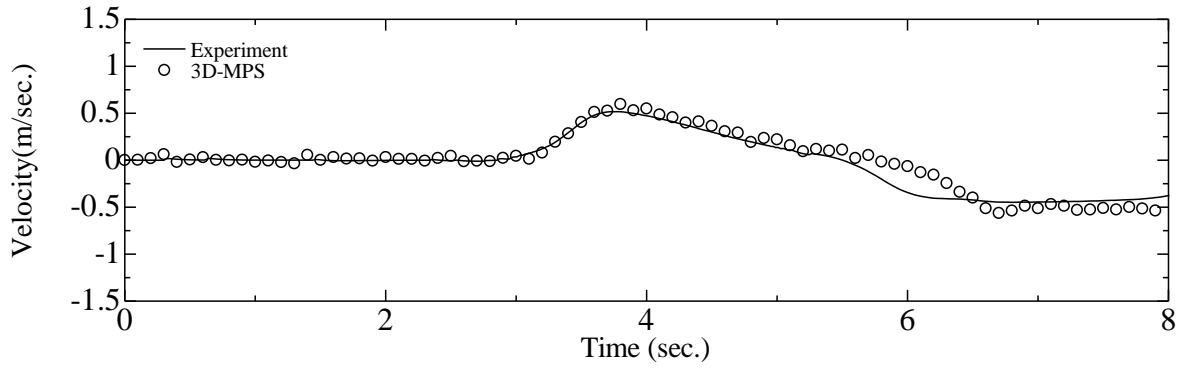


Fig. 4-47 Comparison of velocity (H=0.08m,3D, Non-mooring)

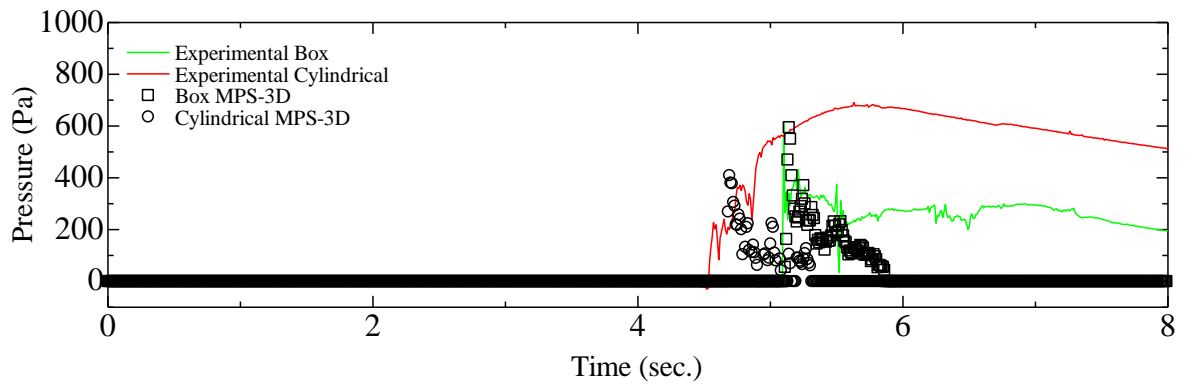


Fig. 4-48 Comparison of pressure at front surface (H=0.08m,3D, Non-mooring)

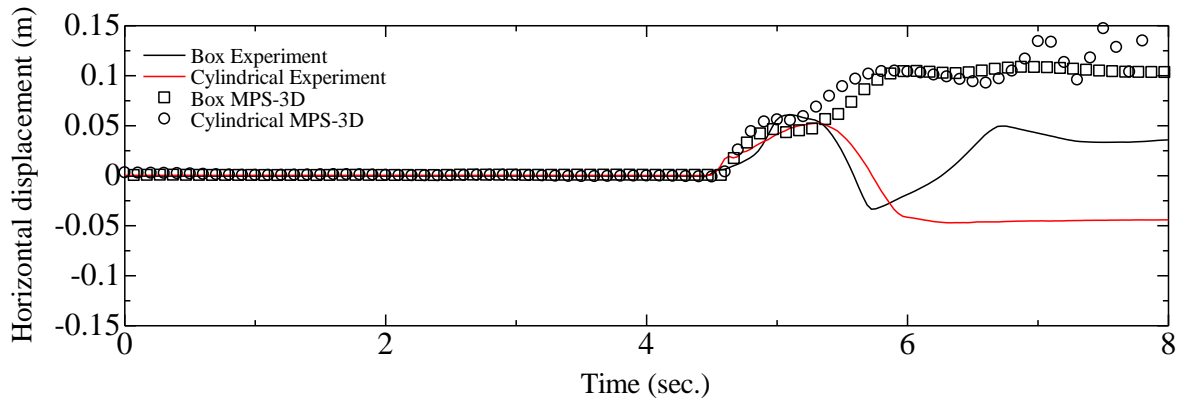


Fig. 4-49 Comparison of horizontal displacements (H=0.08m,3D, Non-mooring)

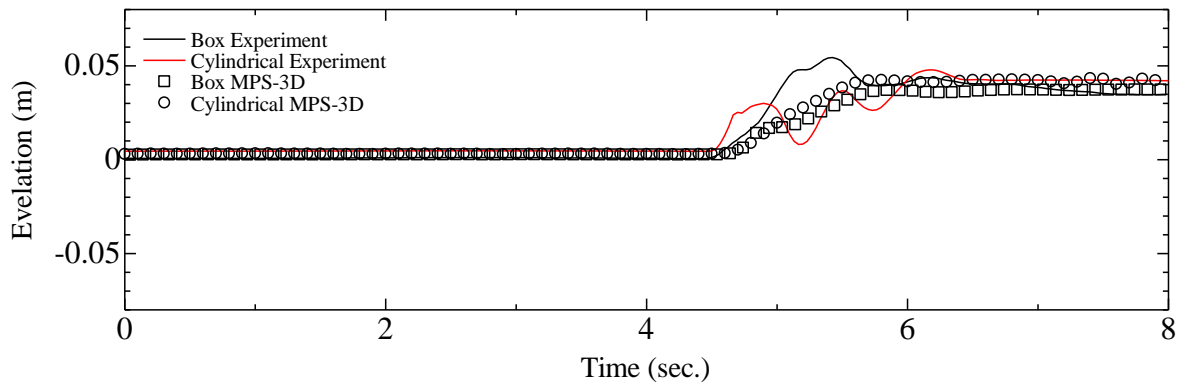


Fig. 4-50 Comparison of elevation (H=0.08m,3D, Non-mooring)

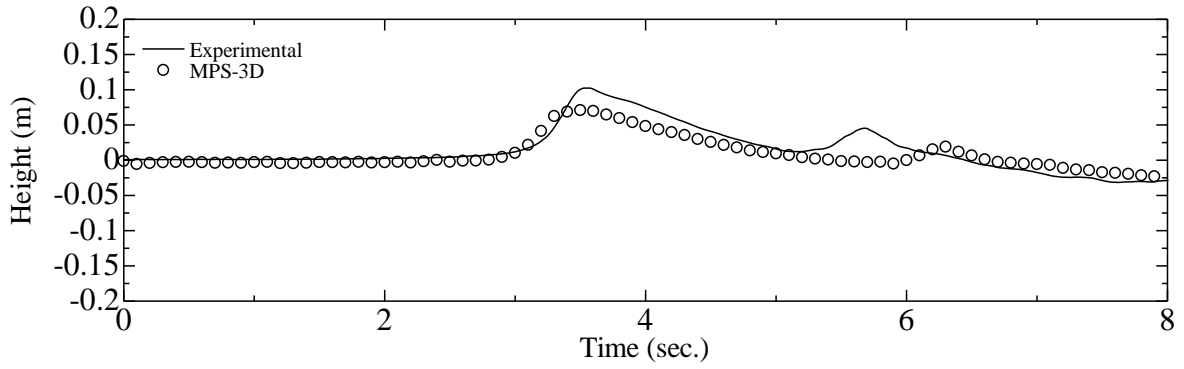


Fig. 4-51 Comparison of wave height (H=0.10m,3D, Non-mooring)

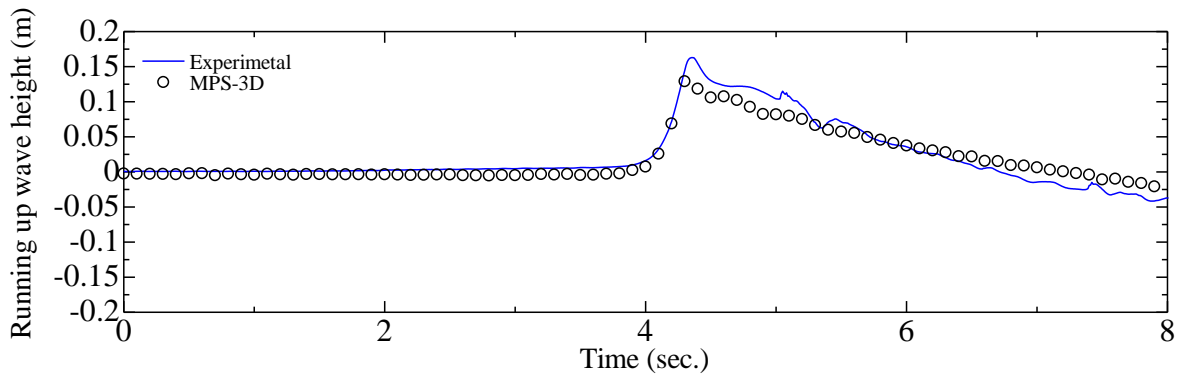


Fig. 4-52 Comparison of running up wave height (H=0.10m,3D, Non-mooring)

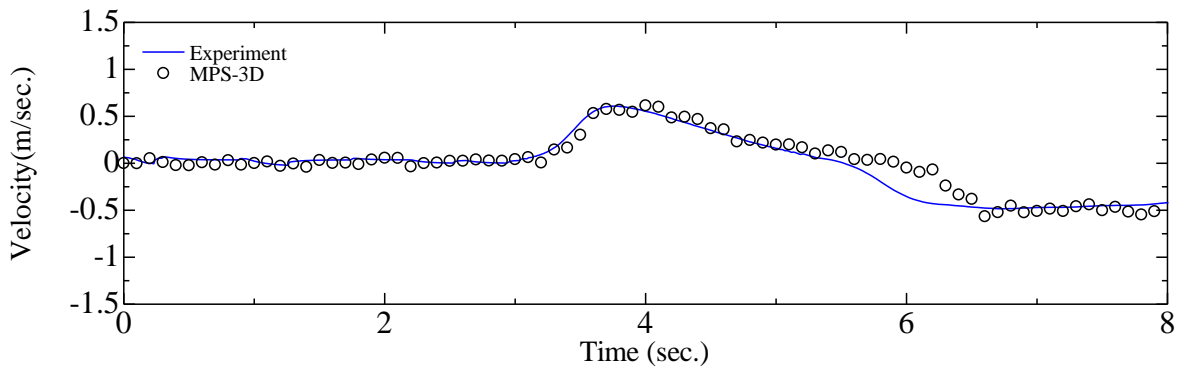


Fig. 4-53 Comparison of velocity (H=0.10m,3D, Non-mooring)

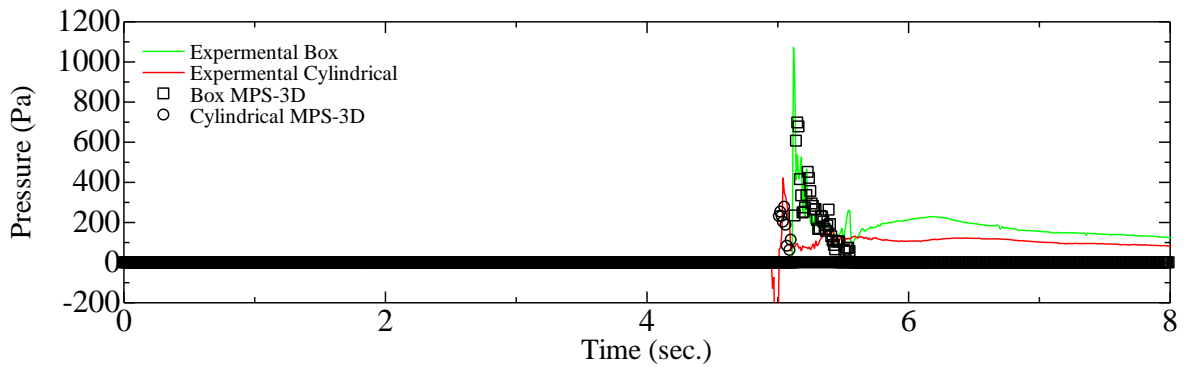


Fig. 4-54 Comparison of pressure at front surface (H=0.10m,3D, Non-mooring)

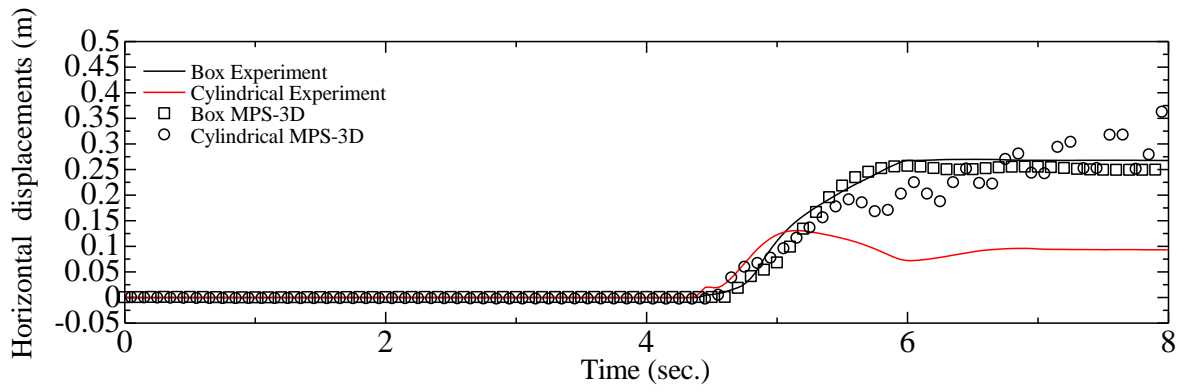


Fig. 4-55 Comparison of horizontal displacements (H=0.10m,3D, Non-mooring)

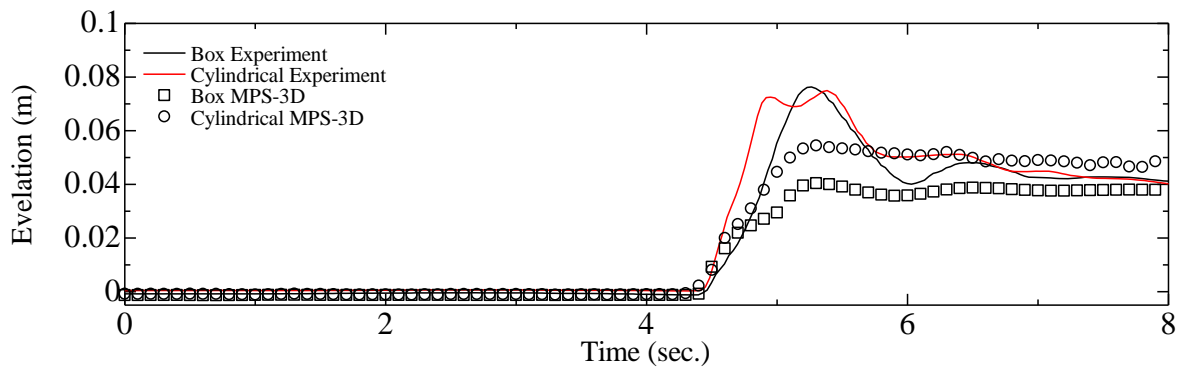


Fig. 4-56 Comparison of elevation (H=0.10m,3D, Non-mooring)

## 4-3 ドルフィン係留時の浮体の津波流体中における挙動に対する MPS 法による数値シミュレーションの適用性の検討

### 4-3-1 計算条件

円筒型浮体におけるドルフィン係留を行った際の浮体運動について MPS 法シミュレーションを行った。前節と同じ計算条件に、係留柱を壁境界条件として挿入したシミュレーションである。計算条件を Table4-3 に示し、初期粒子配置を Fig. 4-57 に示す。圧力の計測は中心に係留柱があるため、水面より 0.07m 地点、中心から 0.14m 離れた地点で計測した圧力と同様の位置である計算点での結果を示す。参考までに、各グラフに適用性が検討されている箱型浮体<sup>(1-2)</sup>における実験結果も掲載する。

Table 4-3 Conditions of calculation(3D-mooring MPS)

Particle Number	(Box) 560875 (Cylindrical) 557858	coefficient of kinematic viscosity [Pa · sec]	0.89*10 <sup>-6</sup>
Distance between particles [m]	0.01	Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	9.80665
Simulation time[sec]	8	Time step [sec]	5.0*10 <sup>-4</sup> (Fix)

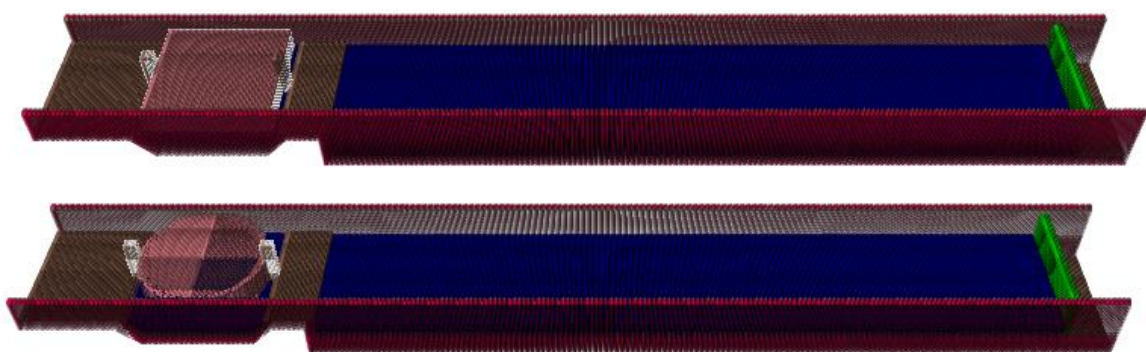


Fig. 4-57 Overview Grid of tank test

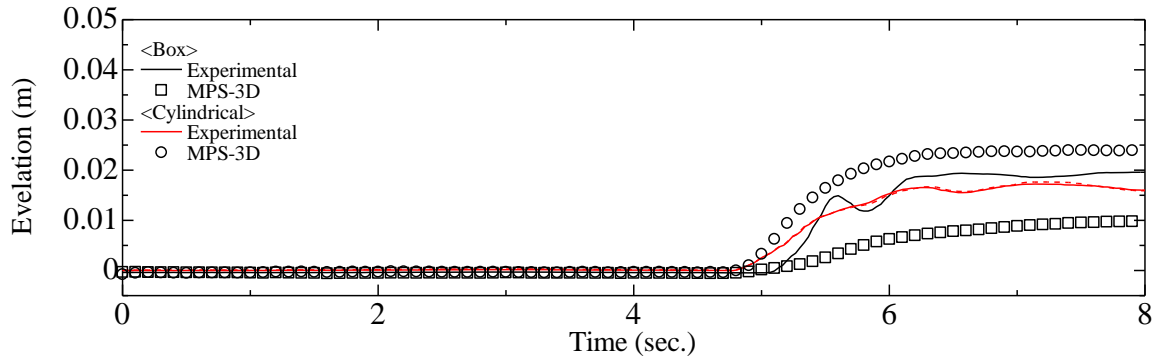


Fig. 4-58 Comparison of elevation (H=0.06m,3D, mooring)

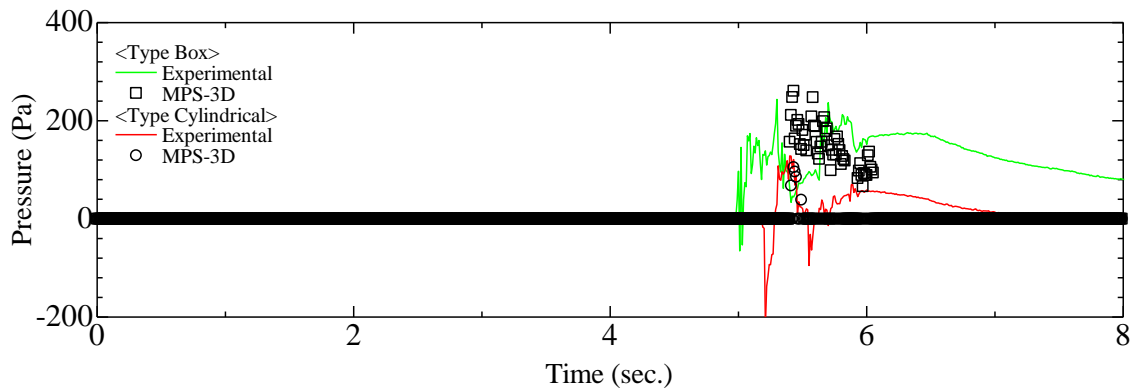


Fig. 4-59 Comparison of pressure at front surface (H=0.06m,3D, mooring)

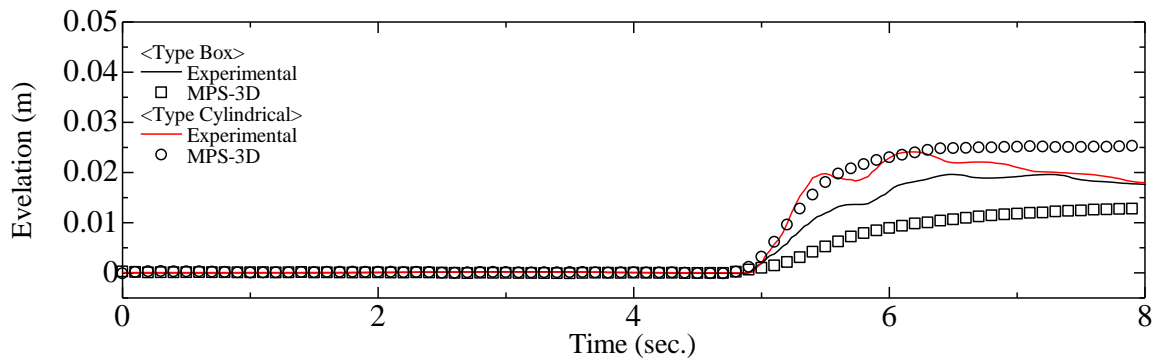


Fig. 4-60 Comparison of elevation (H=0.08m,3D, mooring)

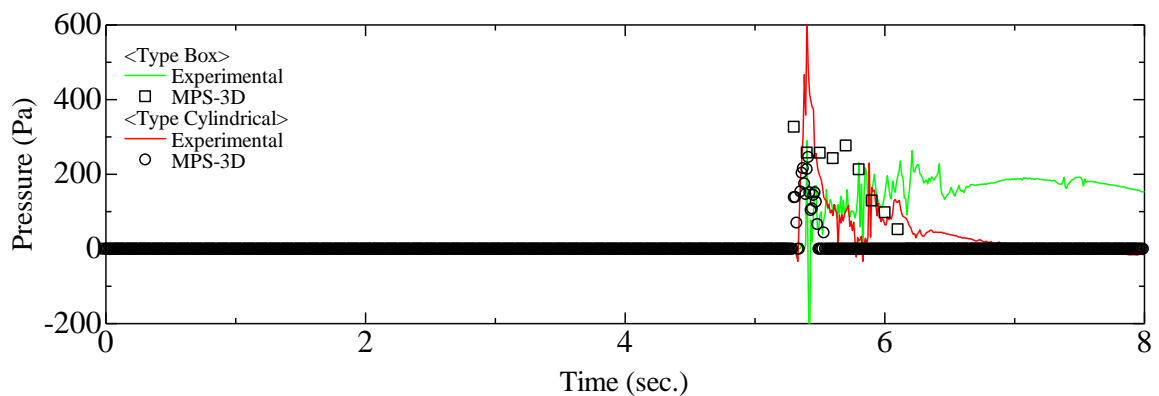


Fig. 4-61 Comparison of pressure at front surface (H=0.08m,3D, mooring)



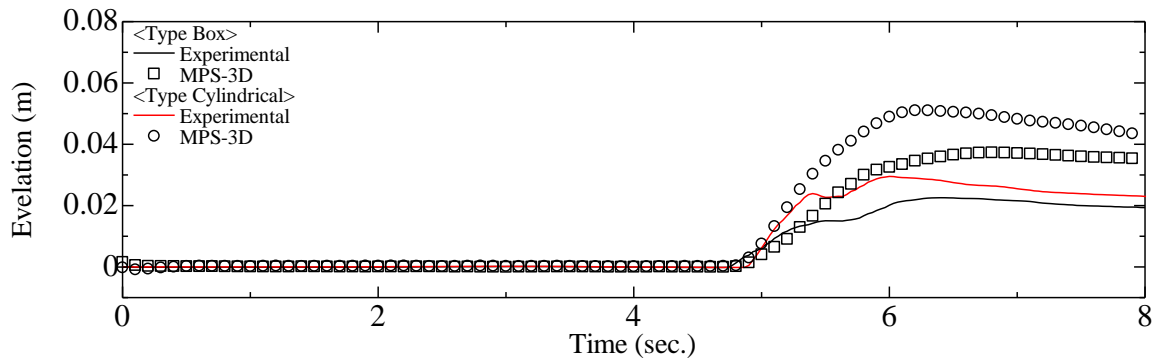


Fig.4-62 Comparison of elevation (H=0.10m,3D, mooring)

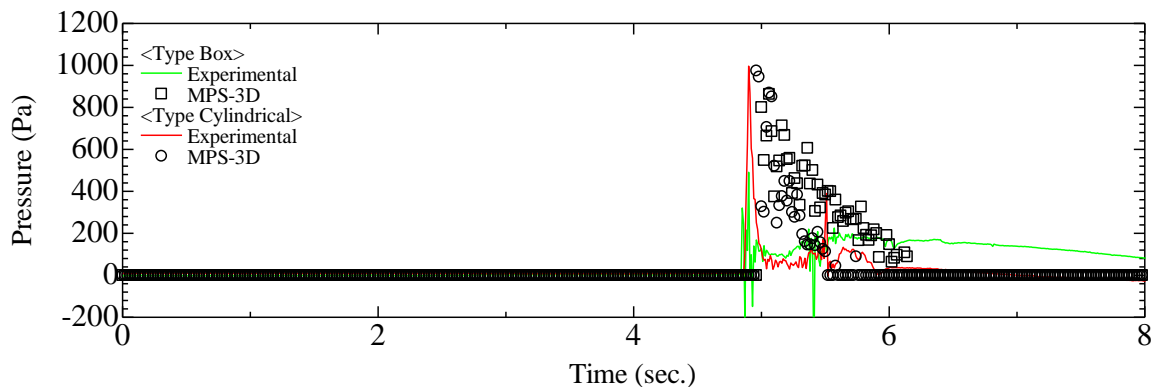


Fig.4-63 Comparison of pressure at front surface (H=0.10m,3D, mooring)

Fig. 4-58, Fig. 4-60, Fig. 4-62 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. 4-59, Fig. 4-61, Fig. 4-63 は浮体へ作用する圧力を示しており、前節の検討と同じく、水面から 0.07m 付近に取り付けてある点で、シミュレーション結果とも比較している。縦軸が浮体への作用圧力、横軸が時間を示している。Fig. 4-58～Fig. 4-63 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。次にシミュレーションの適用性について検討を行う。実験値とシミュレーションの値を比較すると、鉛直方向については Fig. 4-58, Fig. 4-60, Fig. 4-62 が示すように、シミュレーション結果がより浮上する傾向が明らかになった。この違いも係留なしの状態と同じく摩擦力を本シミュレーションに考慮していないため、前述した入射波の問題、さらに係留柱と浮体間の摩擦の影響がシミュレーションできていないことによる違いと考えられる。特徴としては、波高が大きくなるごとに違いが大きいことを考えると、強い水平津波力を受けた浮体が波下側の係留柱に作用し、その鉛直抗力による摩擦力が実験時は作用したと考えられる。また、圧力の検討を行う。Fig. 4-59, Fig.4-61, Fig.4-63 に示すように、衝撃波圧力は円筒型においてほぼ一致したと考えられる。0.08m の結果では、瞬時値が計算出力ステップで出力できていない可能性があるが、ほかの傾向はほぼ実験結果の傾向を示しているといえる。また非係留時よりも、浮体運動においての差がないため、衝撃後の浮体への作用する圧力差は小さいことも昭々とした。全体を通して、この結果は浮上しやすい結果となるため、建築物の動揺が大きくなる結果となり、結果としては安全側であると考えられる。この結果は、適用性が検討された箱型浮

体の傾向と合致する。<sup>(1-2)</sup>本研究ではただし、基本的な検討として、次章の検討においては、このうち適用性の高い 6~8m の波高の範囲で算定を行う。今後は、より高い波高に対応するために、これらの摩擦の導入等により改善が必要であると考えられる。

### 4-3 結言

本章では、第一に前章に示した、堀を有する岸壁模型に設置された浮体式大型津波シェルター模型の挙動に関する水理実験同様の計算条件における MPS 法による数値シミュレーション結果と実験結果を比較検討し、その適用性について検討を行った。水平方向への運動は、2次元、3次元のシミュレーションともに回転方向への運動が数値シミュレーションでは表れにくい傾向があり、これは堀の衝突に起因するものであると推定される。さらにその運動の分、水平方向へ浮体が漂流する形となり、実験結果と異なり、堀の外側に浮体が出てしまうケースがある。しかし、そこまでの水平方向への挙動は実験とほぼ同様の運動にあること、円筒形状が直方体形状よりも早い応答を示していること、さらに鉛直運動については円筒型浮体の運動が大きく変化する点が、前章の実験結果の傾向と同じとなる。また、3次元の数値シミュレーションのほうが挙動の改善がある点を見ると3次元性は無視できず、運動の傾向自体は MPS 法数値シミュレーションで明らかにすることができることを示していると考えられる。

第2に、前章に示した、堀を有し、ドルフィン係留柱が付された岸壁模型に設置された浮体式大型津波シェルター模型の挙動に関する水理実験を実施する。同様の計算条件における MPS 法による数値シミュレーション結果と、実験結果の比較検討を行い、その適用性について検討した。実験値とシミュレーションの値を比較すると、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シミュレーション結果がより浮上する傾向が明らかになった。この違いも係留なしの状態と同じく摩擦力を本シミュレーションに考慮していないため、前述した入射波の問題、さらに係留柱と浮体間の摩擦の影響がシミュレーションできていないことによる違いと考えられる。特徴としては、波高が大きくなるごとに違いが大きくなることを考えると、強い水平津波力を受けた浮体が波下側の係留柱に作用し、その鉛直抗力による摩擦力が実験時は作用したと考えられる。

# 第5章 MPS法による浮体式大型津波シェルターへの設計への適用に関する検討

## 5-1 緒言

浮体式大型津波シェルターの実現のために、浮体式大型津波シェルターが津波避難施設として有益であり、効果的な施設であることを明らかにしなければならない。津波は頻度の低い現象であるがゆえに、実際の状況下での検証は困難であること、またその代わりとして一般的な長水路により水理実験でも、波長の問題等により検証しきれない課題があることを前章で述べた。また、無限波長を生成できる、数値シミュレーションが有益であるであろうとも述べた。また別の視点で、現状、一般的に津波の建築物への作用に関する検討で建築物へ孤立波を入射することによる検討例が多いが、孤立波自身は遡上した津波流を十分に再現できた波ではないため、本対象において十分な検討を実施できないと考えられる。そこで本章では、検討に使用頻度の高い既存の手法を応用し、波の形状、流速、波高をもつ波を数値シミュレーションで再現する手法についての検討を行う必要があると考えた。また、浮体式構造物へその波が入射した際の挙動（前章で述べた、「津波から構造物へ作用する波圧算定」に該当する）や壁面に作用する圧力（「構造物が津波中における浮力の算定」）の解析を実施しする必要がある。この結果をもとに、前章で述べた、現状の津波避難構造物の構造上の要件を定めるガイドライン<sup>(1-7)</sup>に従う条件を満たし、その機能が想定される実津波中において発揮できるか、構造物が安全に津波をやり過ごすことができるのか検討を本章で実施する。

## 5-2 浮体式大型津波シェルターの設計スキームの検討

### 5-2-1 設計図面の数値シミュレーションの初期空間配置データへの変換

第一章にて、現状の津波避難構造物の構造上の要件を定めるガイドラインに定める設計手法に準じた、MPS法数値シミュレーションを用いた設計スキームの提案を行った。その中で、構造物の設計の基本は、設計図面の制作にあり、この図面から数値シミュレーションを実施できないならない。構造物の設計に現在、CAD (computer aided draught) が多く使用されている。これは、設計データをもとに、数値シミュレーションを実施するために必要なモデルを制作することが可能であることを確認する必要がある。現在は、設計データを条件の設定だけで簡単に構造計算等へ直接使用することが可能であるあることが大きい。この技術を CAE (computer aided engineering) と呼び、機械設計から構造物設計だけの分野にとどまらず、電気設計と構造設計を兼ねることができるなど、マルチフィジックスを扱うような分野まで適用可能となってきた。

対象となる本事例において、流体中での構造物に作用する津波流体中における「浮体構造物の挙動」・「津波波圧の算定」が必要である。そこで本研究では、CAD データをもとに、構造計算において汎用的な三角格子メッシュデータに変換し、それを MPS 法シミュレーション用の初期配置データへ変換したグリッドデータを使用することとした。以下の 4 つの工程を経て作成を実施する。その作業の工程を Fig.5-1 ~Fig.5-4 に示す。本章での検討は、Autodesk 社の開発した Fusion 360 (3DCAD ソフト) を第一の工程で使用し、設計を行った。このソフトは、実際の建築現場でも使用されている形式を読むことが可能であるため (もしくは使用している)、汎用性が高いと考えられる。

- ①メッシュ化 CAD データを CAE データとするために三角メッシュ化を実施する。このデータは、境界要素法等のメッシュにて数値計算を行う手法に使用することができる。
- ②点群化 メッシュとなったデータは位置情報と節点を接続するためのベクトル情報が含まれている。そこで、位置情報データを抽出し、点群化する。
- ③グリッド用データへのクリーニング 点群化したデータを解像度 (粒子間距離) に応じた等間隔に粒子を配置、重複している粒子を削除する作業。原則、粒子番号において、メッシュと整合性を持たせるようにクリーニングを行う。

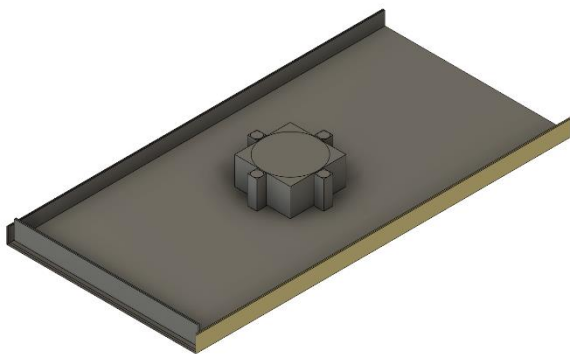


Fig. 5-1 Solid model for calculation 3DCAD data

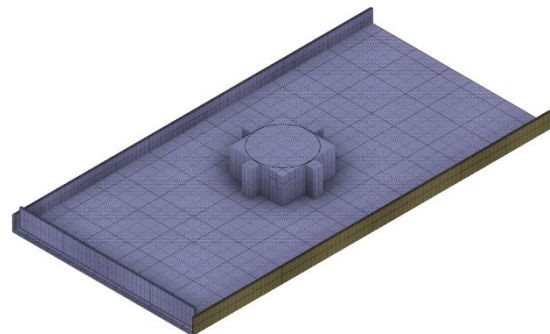


Fig. 5-2 Mesh model for calculation 3DCAD data

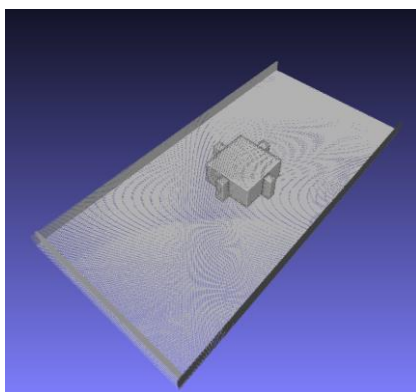


Fig. 5-3 Points model for calculation 3DCAD data

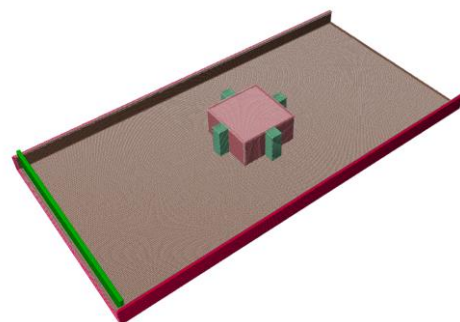


Fig. 5-4 Grid model for calculation 3D-MPS data

## 5-2-2 MPS 数値シミュレーションを実施するために必要な諸条件の設定の検討

MPS 法数値シミュレーションを実施するにあたり、(α)入射波条件・(β)主要諸元と構造物の重量条件・(γ)係留条件についてその設定方法を以下に検討した。

### (α)入射波条件

今回の数値シミュレーションにおいて最も重要な初期条件が、入射する波の設定である。前述したが、実津波の再現は、その実態が解明されにくいことや対象物のスケールに対して非常に長い波長を要するため難しく、また前述のガイドラインに従った条件を満たすことができず、評価が不十分となる場合がある。そこで、津波避難ビル等の構造上の要件を定める、東日本大震災後の大幅改訂のあった、新ガイドライン「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定方針」<sup>(1-7)</sup>を満たす、実津波の準じた浮体式大型津波シェルターへの入射波を設定する必要がある。

まず、波高の設定の検討である。津波避難構造物を使用されるべき場所に対して想定される波高を基準とすることが妥当であると考えられる。そこで、津波防災地域づくりに関する法律（平成 23 年法律第 123 号）に注目をする。この法律は、将来おこりうる津波災害の防止・軽減のため、全国で活用可能な一般的な制度を創設し、ハード・ソフトの施策を組み合わせた「多重防御」による「津波防災地域づくり」を推進する法律である。この法律の中に、

- ① 【津波防護施設の管理等】 都道府県知事又は市町村長は、盛土構造物、閘門等の津波防護施設の新設、改良その他の管理を行う。
- ② 【津波災害警戒区域及び津波災害特別警戒区域の指定】 都道府県知事は、警戒避難体制を特に整備すべき土地の区域を、**津波災害警戒区域**として指定することができる。都道府県知事は、警戒区域のうち、津波災害から住民の生命及び身体を保護するために一定の開発行為及び建築を制限すべき土地の区域を、**津波災害特別警戒区域**として指定することができる。

と示されている。当該地域の津波防護施設として、浮体式大型津波シェルター構造物は第 1 章で述べたと通り、適切であると考えられる。将来は、浮体式大型津波シェルターが十分な安全性を確認することができ、合理的な建築物と評価された場合、地域に建築の制限を設ける必要がなくなるため、土地の利用価値が向上、経済的な利点ともなりうる。

よって当該地域の設定の際に、都道府県は津波浸水想定を行う必要があるため、閾値の設定が行われている。これは沿岸地域の地域特性を反映するために、あえて画一的な閾値の設定がなされていないようである。本法律が公布施行後現状間もないため、その推進計画や地域の設定をしている都道府県は少ない。そこで本研究では、先駆けてこの施策に対して誠意的に取り組んでいる徳島県の事例をもとに行う。2017 年現在、静岡県も徳島県の方法を踏襲する形で設定がなされているため、ケーススタディーとして適切であると考えられる。<sup>(1-1)</sup>

徳島県は、津波浸水想定を行う際に、避難すべき高さに明確な指標を設けるために、波の砕波等の影響等を考慮し求めた「基準水位」という独自の指標を浸水深に追記をしている。これは、宅地や企業用地の造成時の「土地かさ上げ」の目安、家発電機などを「高い所に移設」する際の目安、屋上が安全であるかどうかを確認するために分かりやすい指標となっている。この中で、

想定される最大津波浸水深（5~10m）の基準水位を 6.5m としている。このレベルの浸水が発生する場合は、避難防護施設への避難レベルであるということがハザードマップ等に明記されている。そこで、最低基準として 6.5m とする。6.5m、10m の 2 つの浸水深さにおけるシミュレーションを実施、その安全性を検討することとする。

次に流速の設定の検討である。陸上に遡上した津波の流速の想定は数値シミュレーションデータや災害時の衛星写真や現地調査によるところが多く、その具体的な確定手法は著者が知るところない。流速は、構造物への作用波圧力に関与していると考えられることが一般的である。今回 2 つの手段においてこの検討を実施する。

$$u = 2.60h_f^{0.70} \quad \text{式(4-1)}$$

$$\alpha = 1.0 + 1.4F_r \quad (0.0 \leq F_r \leq 2.0) \quad \text{式(4-2)}$$

まず、現地調査をベースとした式（4-1）に示す、松富ら<sup>(5-1)</sup>による流速の設定方法である。 $h_f$ は建物前面浸水深(m)である。この設定は、様々な構造計算等に使用されている手法である。既往の津波被害に関する諸検討の結果が最大浸水深と関係づけられており、浸水深の流速の換算式として有効である。次に、実験と数値計算の結果をベースにした式（4-2）に示す、榊山<sup>(5-2)</sup>による流速の設定方法である。この式は、津波避難ビルの設計波圧の算定式に使用されている、浸水深のみを考慮して算定する、第一章に示した、朝倉ら<sup>(1-5)</sup>の波圧算定式の検討が、2次元3次元構造物を混在したデータをもとにしていることを明らかにし、浸水深のみではなく、流速の影響を考慮した式である。設計条件である $\alpha$ 値を設定することにより、流速を求めることも可能である。 $F_r$ はフルード数であり、 $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ で定義される。 $v$ は流速、 $h$ は浸水深である。それぞれ、流速の決定方法としては立場が異なる。本検討では、松富らの算定式にて入射波高を決定し、浮体に流入する波について、榊山の手法にて評価を行う。

### (β) 主要諸元と構造物の重量条件

津波災害警戒地域に該当する市街地の中心の中規模病院を想定し、規模の決定を行う。主要諸元を以下の表にまとめる。主要諸元の決定には著者ら<sup>(1-2)</sup>の検討等を反映した。

Table 5-1 Main specifications of FLTS Hospital

延床面積	(箱型浮体) 18000m <sup>2</sup> (円筒型浮体) 14000 m <sup>2</sup>
横幅×縦幅×高	(箱型浮体) 60m×60m×20m (円筒型浮体) φ 60m×20m
階層	地上 5 階もしくは地上 3 階 2 階 (病院部は 4 階)
最大収容人数	(箱型浮体) 750 名程度、(円筒型浮体) 700 名程度
飲料水等の備蓄物資・発電機等のプラント	約 2500ton
病床数	125 床～160 床

病床数の計算は同規模の病院として、宮城県立こども病院を参考にした。<sup>(5-4)</sup>海洋構造物として設置をする想定である。よって、構造物内は自己完結型の施設である。入り口付近は隔壁となっており、浸水を最小限とするべきであろう。本研究でのシミュレーションでは、開口部について評価しない。(ないものとシミュレーションを実施する。)

主要諸元から必要とされる構造物の重量は、浮体構造物において喫水で評価することができる。喫水の条件設定は、消防庁方針<sup>(5-4)</sup>で定めている、避難所の設置基準として、「浸水+2階」を採用する。ここで一階高さを3mから4mとし、階間の床構造部の高さを建築基準法に則り、0.5mと設定する。高さ20mとした場合、5階建て（地上5階または地上3階、地下2階）と考えることができる。箱型浮体の場合、延床面積は18000m<sup>2</sup>の時、建築構造設計基準の資料（国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課発行）<sup>(5-5)</sup>を参考に1m<sup>2</sup>あたり1.2tonで算定する。21600tonと推定できる。構造物以外の重量は、5820tonと試算した。これは、建築構造設計基準の資料の床における積載荷重を参考に、3階部分を2900N/m<sup>2</sup>、2階部分を倉庫利用するものとし、11800N/m<sup>2</sup>と設定、安全率を2とした。合計重量は27500ton。2階部分（床面積3600m<sup>2</sup>、高さ8m）が浸水すると考えるとき、28800tonの浮力が発生させることができる。本計算より、1380tonの余剰浮力と試算できる。

円筒形浮体の場合も同様に算定すると、合計重量は19000tonとなり、2階分の浮力は22000tonから、約3000tonの余剰浮力と試算できる。今回は性能評価のため、この余剰浮力分、施設が積載していると考え、喫水は2階分とした。

MPS法におけるMPS法数値シミュレーションで使用する計算点の密度を2階分の喫水となるよう（箱型浮体28800ton、円筒型浮体22000ton）に設定する必要がある。

### (γ) 係留条件・対象とする大型津波シェルターの概要図

四方中心部を係留用構造物で取り囲む、ドルフィン係留とする。係留用構造物は津波避難タワーとして、らせん状の坂または階段で上層へ避難できる仕組みとする。設置された大型津波シェルターの概要図をFig. 5-5に示す。Fig. 5-5に示した、赤色の4本の四角柱が係留柱兼緊急避難用の津波避難タワーである。浮上式（浮体式大型津波シェルター）の場合は、建築物の側面に地下8mの堀を設置し、浮上を促進する。実際の建築物としてこの堀は、駐車スペースや緊急車両等のプール用の道路等に使用することが可能であると考えられる。固定式の場合はこの堀を設けない。避難施設として、当該病院の入院患者や、津波来襲時に周辺域にいる避難対象者を収容する。また、緊急時には、係留柱となっている津波避難タワーに避難し、屋上からシェルターに移乗することも可能である設計とするべきである。今回の検討は、計算領域において凸凹面がない、平地として考える。



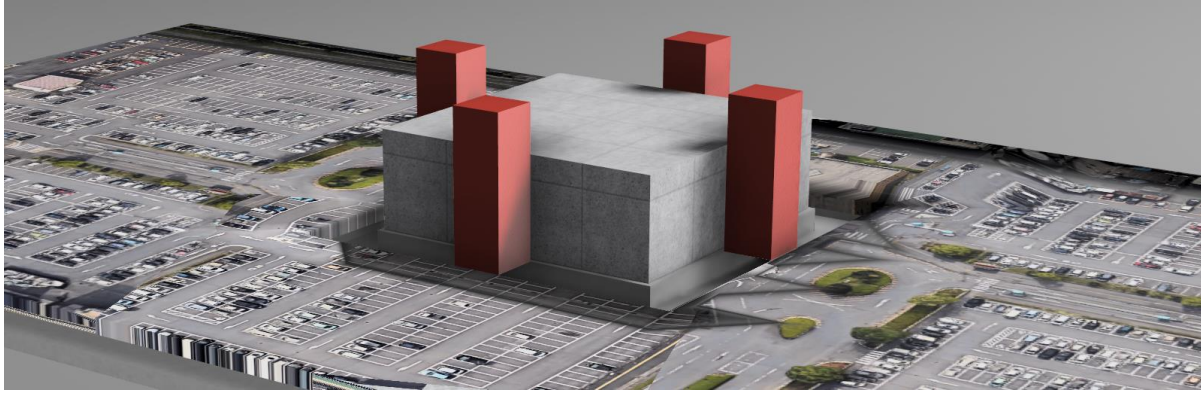


Fig. 5-5 Setting plan for FLTS model at city

## 5-3 浮体式津波シェルターにおける津波中挙動に関する検討

### 5-3-1 計算条件

次に実際の設計を想定した、浮体式大型津波シェルターの諸元によりシミュレーションを実施する。実施にあたり、第一章で述べた設計スキームに従いシミュレーションを実施する。主要目は、Table 5-4 に示す。また、Fig. 5-6 に設計図を示す。浮上のため、堀を設ける。堀は3階分相当の12mとした。重量は前述した想定に従い、箱型浮体 28800ton、円筒型浮体 22000ton とした。初期粒子数が円筒形のほうが多い理由は、計算の安定化のため、円筒形粒子は浮体内に粒子が充填しており、総重量からその粒子数分を配分して、密度を求めている。一方箱型浮体のほうは、3層分のみで構成している。係留柱は、10m×10m で高さは36mである。この想定は、シミュレーションに係留柱に大きな負荷がかかり、現在のシミュレーションで想定されていない現象(破断等)を引き起こさないように、十分に堅牢な構造としている。よって、今後は最適な諸元にする必要がある。係留柱は、壁境界粒子として設定をしている。

次にスキームに従い、環境条件ならびに入射波の諸元について定める。入射波の諸元は前節の波高 6.5m の想定で入射する。ただし、流速については、松富の式を使用し、3.8m/sec とした。一様に波幅が広いと考えるため、波の進行方向における幅方向については水路として仮定し、計算を実施した。計算解像度にあたる粒子間距離は 1m とした。



Table 5-2 Conditions of calculation (FLTS-Box type)

Initial Particle Number	351005
Size (Structure)	L:60(m)×B:60(m)×H:20(m) Draft:8(m)
Size (Pillar)	L:10(m)×B:10(m)×H:29(m) Draft:12(m)
Mooring statement	Floating (under bottom clearance:4m)
Total mass [ton]	28800
Distance between particles [m]	1.0
Time step [sec]	$5.0 \times 10^{-3}$ (Fix)
Simulation time [sec]	80
Coefficient of kinematic viscosity [Pa · sec]	$0.89 \times 10^{-6}$
Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	9.80665

Table 5-3 Conditions of calculation (FLTS-Cylinder type)

Initial Particle Number	353809
Size (Structure)	$\phi$ 60(m)×H:20(m) Draft:8(m)
Size (Pillar)	L:10(m)×B:10(m)×H:15(m) Draft:12(m)
Mooring statement	Floating (under bottom clearance:4m)
Total mass [ton]	22000
Distance between particles [m]	1.0
Time step [sec]	$5.0 \times 10^{-3}$ (Fix)
Simulation time [sec]	80
Coefficient of kinematic viscosity [Pa · sec]	$0.89 \times 10^{-6}$
Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	9.80665

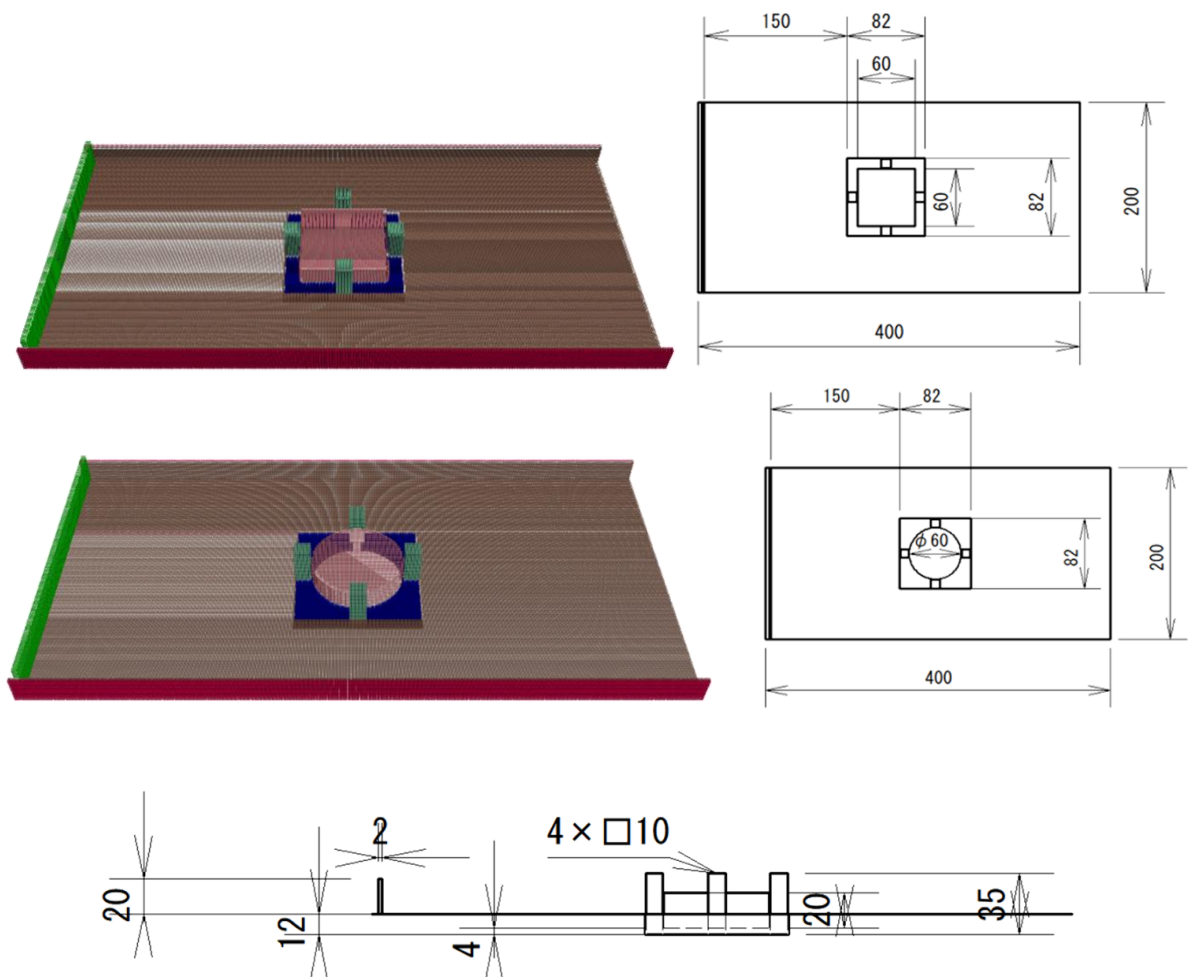


Fig. 5-6 Set up calculation model

### 5-3-2 シミュレーションの結果

本検討の重要な点は、浮体構造物・係留構造物への波からの影響（波圧）、浮体の挙動と動揺に対する安全性である。特に、実際の状況においての浮体が浮上し、その機能性を保つことができるか検討する必要がある。まず、波の特性について検討する。波高 6.5m に対し、松富らの提案式により導出された流速は 3.8m/sec であったためこれを入射した。これに対し、浮体の前面（波上側）1m の地点での波高、そして浮体中心部付近から 1m 離れた地点での波高を示したのが Fig.5-7 である。結果から、まず前面部の波高については 6.5m 程度の波（最大波高 7m）が時間かけて水位が高くなる結果となった。ここでの波の高さは前面部の浸水高さとはほぼ同様であった。よって、基準高さ 6.5m の要件を満たしているシミュレーションと言える。次に Fig.5-8 に流速を示した。流速の最大流速は 5.8m/sec であった。これを榊山の提案式で評価すると、 $\alpha$  値（安全率）が 2 の時（市街地での建築基準の標準）、 $v=5.59\text{m/sec}$  と算出できる。よって、本シミュレーションは、既定の安全率以上の波高流速をもとに算定できていると考えられる。よって、本計算条件で松富らの式で波高をもとに流速を算出し、シミュレーションの流入境界条件として、波高と流速を設定し、入射した時、既存の算定手法での安全率と合致することが明らかとなった。よって、本津波

流は、構造設計の評価として想定される津波流として考えるのは妥当であると考え。また、波高・流速の傾向について、箱型・円筒形とも結果に大きな違いがみられなかった。

次に、浮体式大型津波シェルターに作用する圧力に関する検討である。Fig. 5-9 は浮体前面最下部（1m）の圧力の値である。最大圧力は衝撃波に対する応答ではなく、浮体式大型津波シェルターが完全に浮上するまでの間に襲来する波の途中であることが確認できる。孤立波の検討でみられる衝撃波圧がみられないのは、流れとして津波が射流に変形後、層流に近い状態に変形したためと考えられ、これが前述した検討と合致すると考えた場合、この結果は妥当であると考えられる。また、浮体が完全に浮上しない間大きな圧力がかかることが明らかになり、これは第 3 章の実験結果からも明らかである。この間の浮体運動の制御が重要であることを示す結果ともいえる。また、浮上後は作用する圧力がほとんど小さくなることから、浮体部分への浸水が浮上後はなく、安定して浮上していると考えられる。作用している圧力も、算定式上では $\alpha=2$  のとき、1200Pa 程度であるが、本検討ではその 1/3 を示していることから、十分作用圧力を低減できていると考えられる。さらに、浮体式大型津波シェルターの浮上に関する検討を行う。Fig. 5-10 は浮体の波の進行方向と浮上方向における面における中心位置（地上高 6m）の浮上変位を示したものである。波の襲来とともに緩やかに浮上していることが明らかである。これは、浮体が波に対して、どれだけ浮上沈下しているかを示すグラフである。結果より、浮上するまでの間は波に浸水し、浮体の周囲に波が透過することによって、浮上運動が起きていることがわかる。また、波の進行速度に比べ、Fig. 5-9 と Fig. 5-10 の結果からも浮体は波の進行速度よりも遅く浮上し、最終的に波面と浮体が波の来襲前と同じになることが明らかとなった。浮上が緩やかに行われているか確認をするため、浮体中心付近の鉛直加速度を重力加速度で表したものが Fig. 5-11 である。グラフ内の 1 秒未満に出る重力加速度は、これは MPS 独自の数値振動によるものであるため、評価しない。単位は重力加速度  $G(1G=9.8(m/s^2))$  とする。結果より、最大でも 0.2G ほどである。これはエレベータの上昇下降の加速度よりも小さい。係留柱は今回摩擦の影響を検討していないため、これよりも鉛直方向への運動は抑制される可能性が高いため、十分、安全な動揺と考えられる。Fig. 5-12 から Fig. 5-41 までシミュレーションのスナップショットを示す。また、Fig. 5-42 に 60 秒時の水粒子、浮体の位置に関する MPS の結果をコンピュータグラフィック化し、実際の状況に近い状態での再現図を示す。スナップショットから 40 秒から 60 秒にかけて、浮体が波の透過により傾斜していることが明らかである。

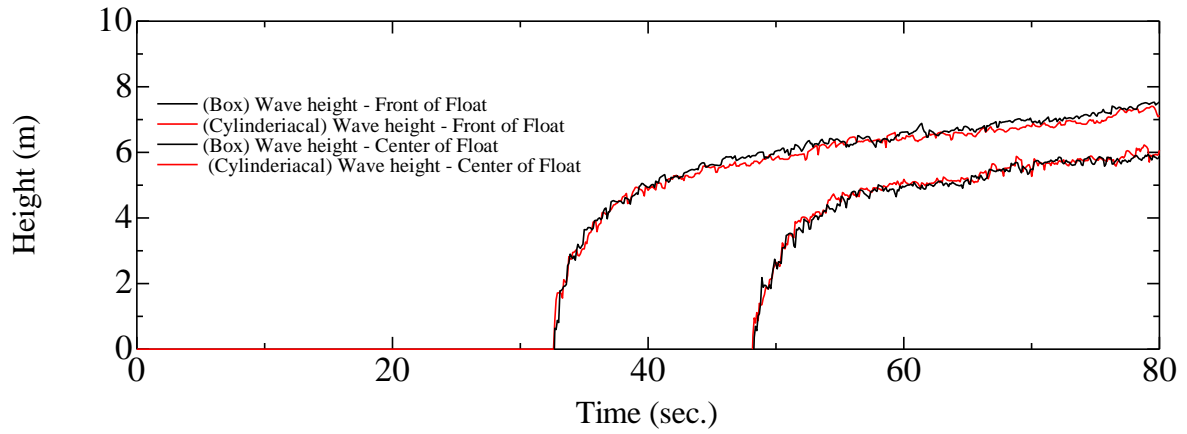


Fig.5-7 Comparison of wave height at the front and center of FLTS and initial wave height

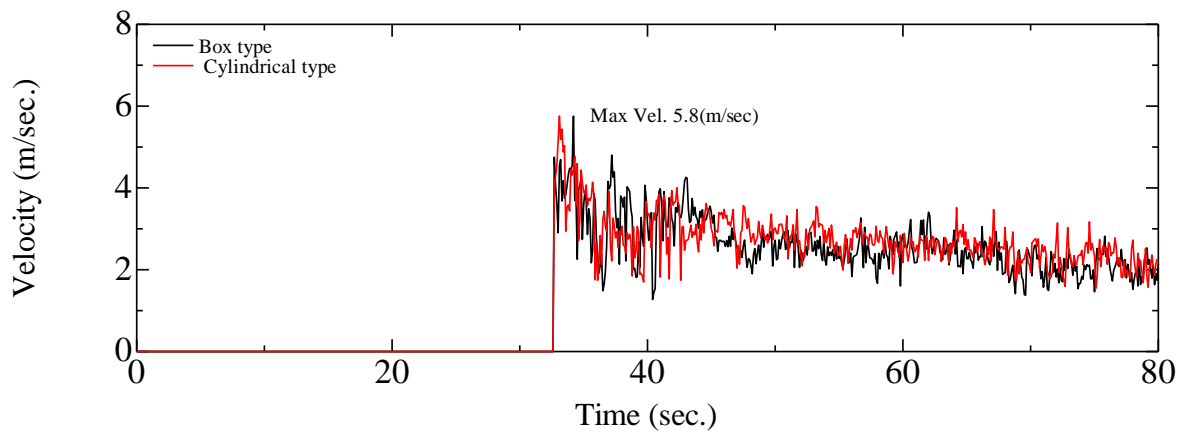


Fig.5-8 Comparison of velocity at the front of FLTS

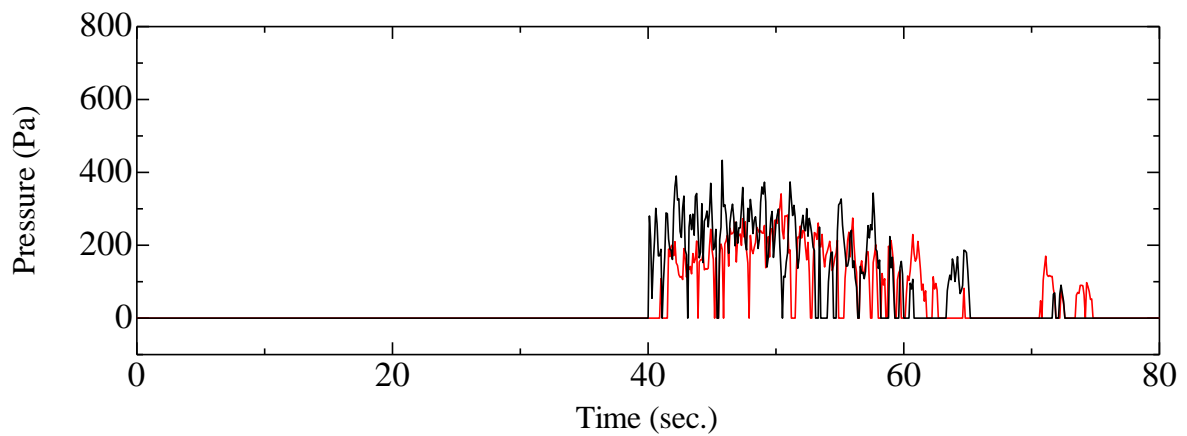


Fig.5-9 Comparison of pressure on the front of FLTS

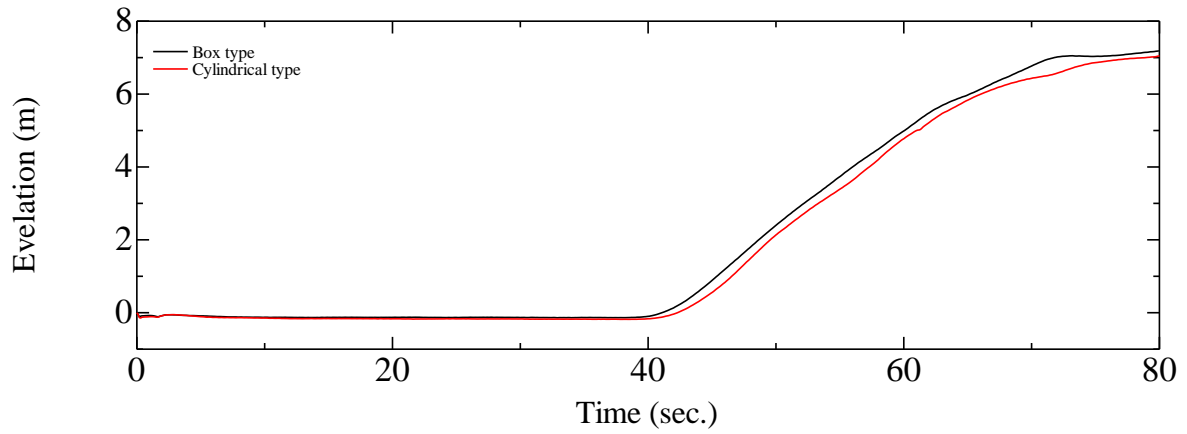


Fig.5-10 Comparison of elevation of FLTS of time history

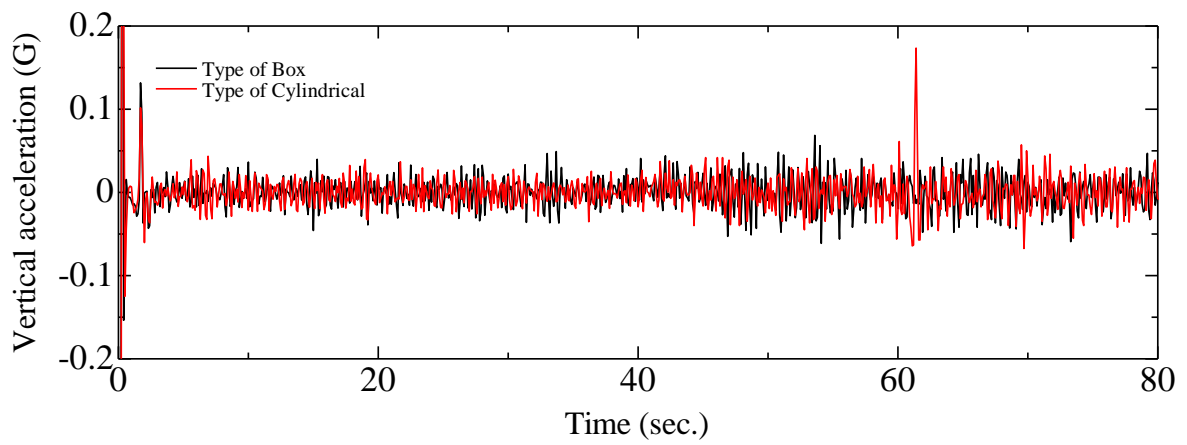


Fig.5-11 FLTS of time history of vertical acceleration

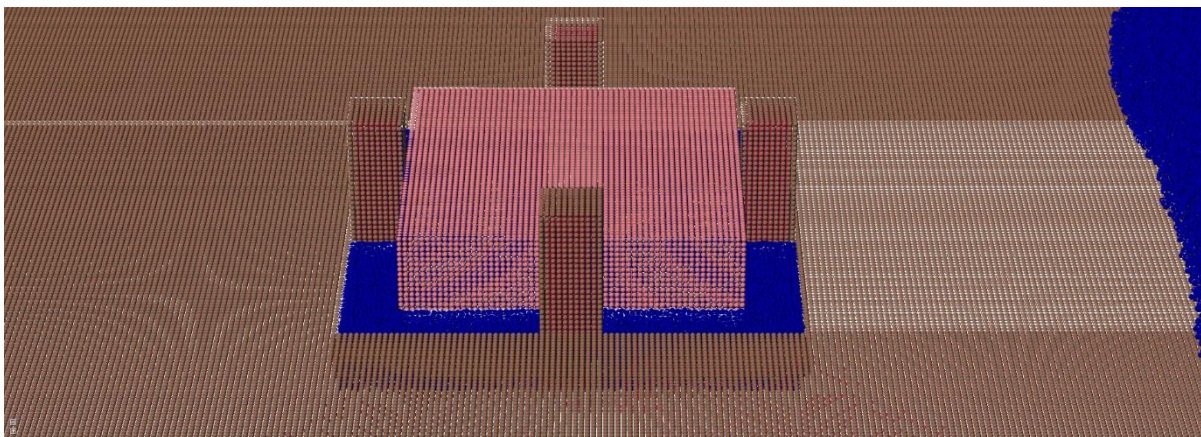


Fig. 5-12 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 20 sec.)



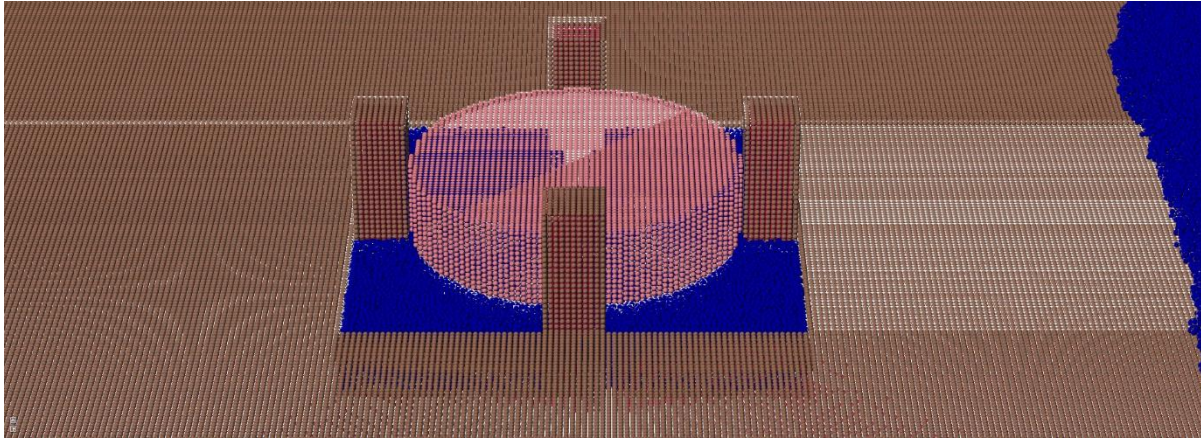


Fig. 5-13 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 20 sec.)

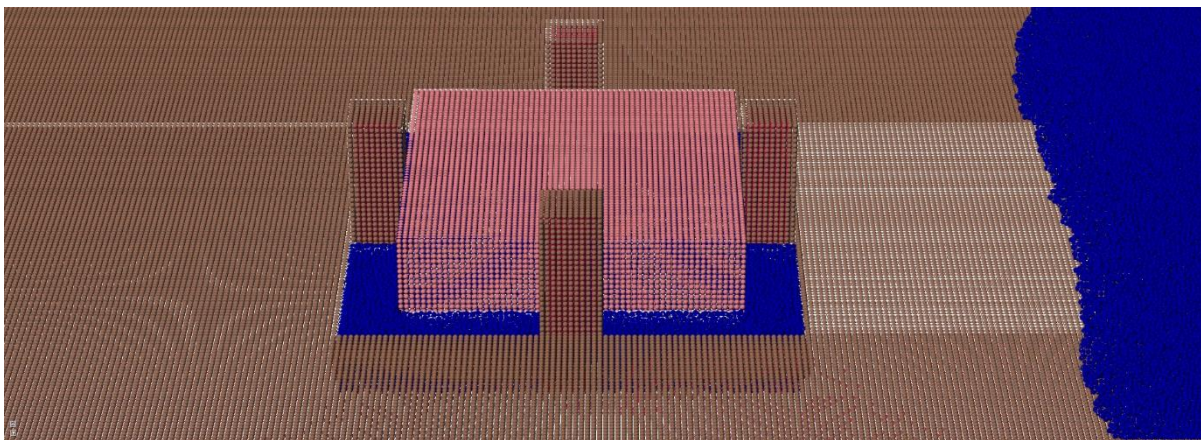


Fig. 5-14 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 25 sec.)

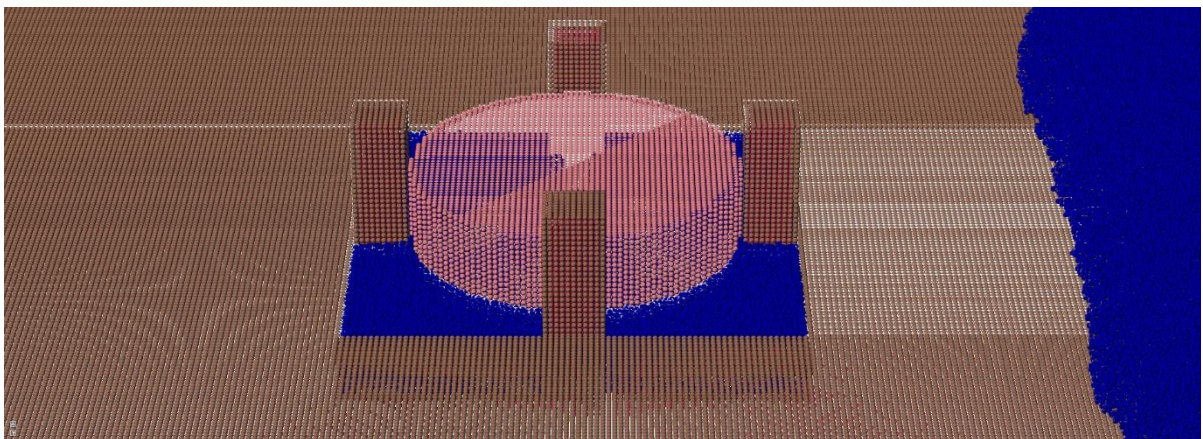


Fig. 5-15 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 25 sec.)



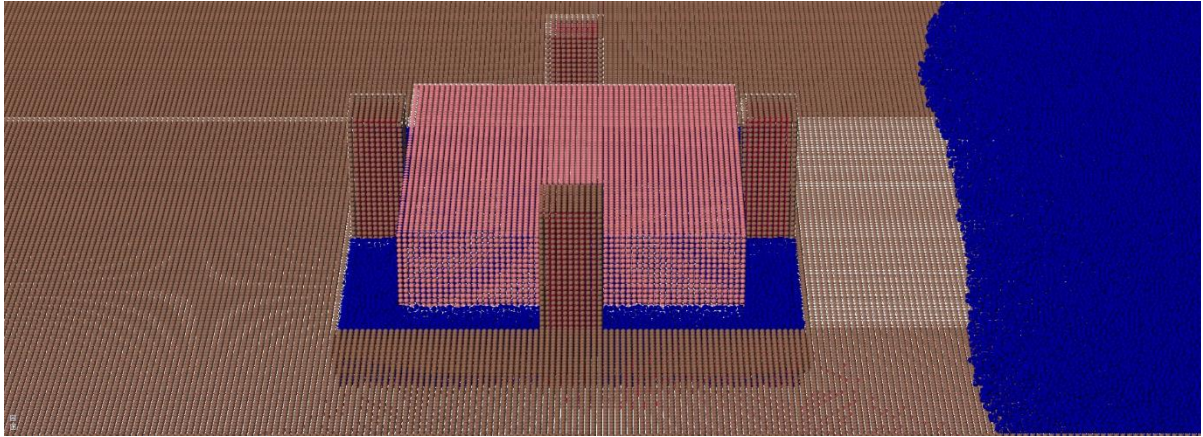


Fig. 5-16 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 30 sec.)

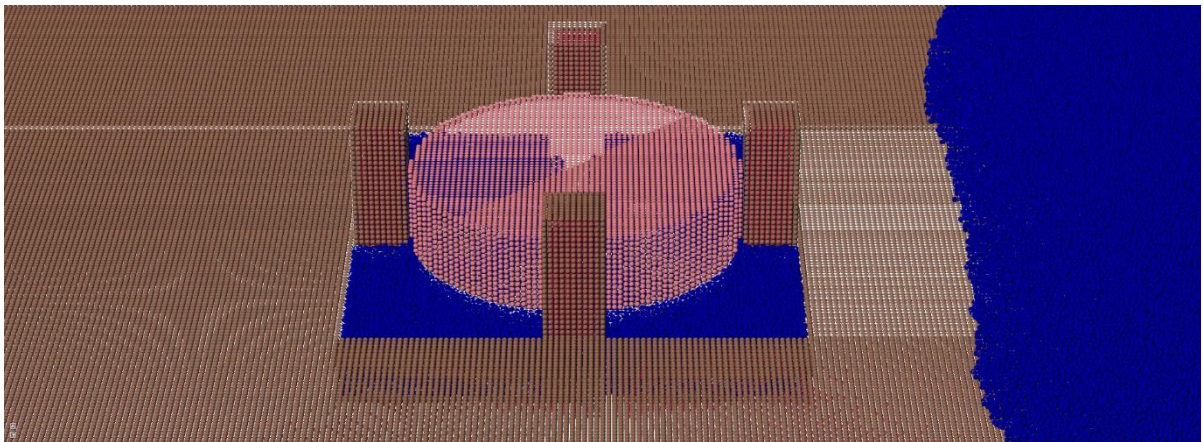


Fig. 5-17 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 30 sec.)

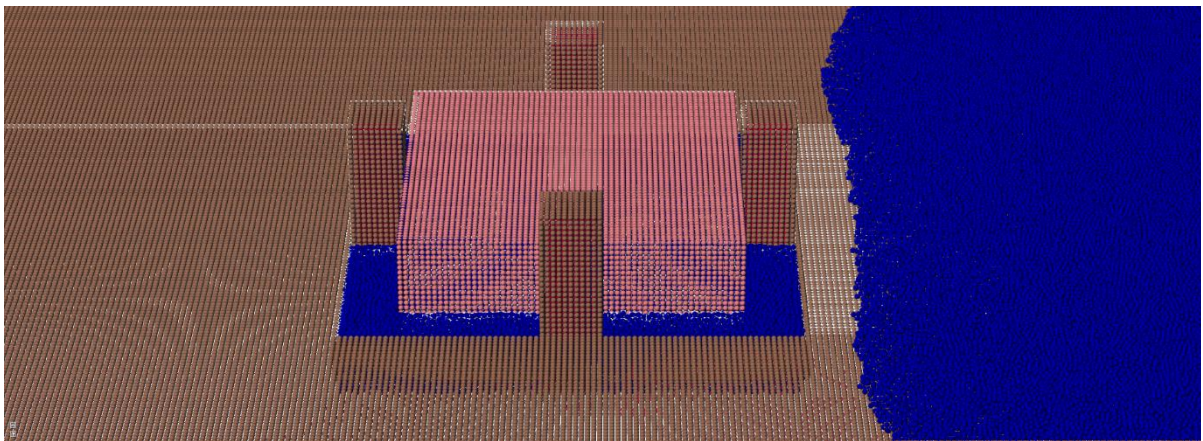


Fig. 5-18 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 35 sec.)



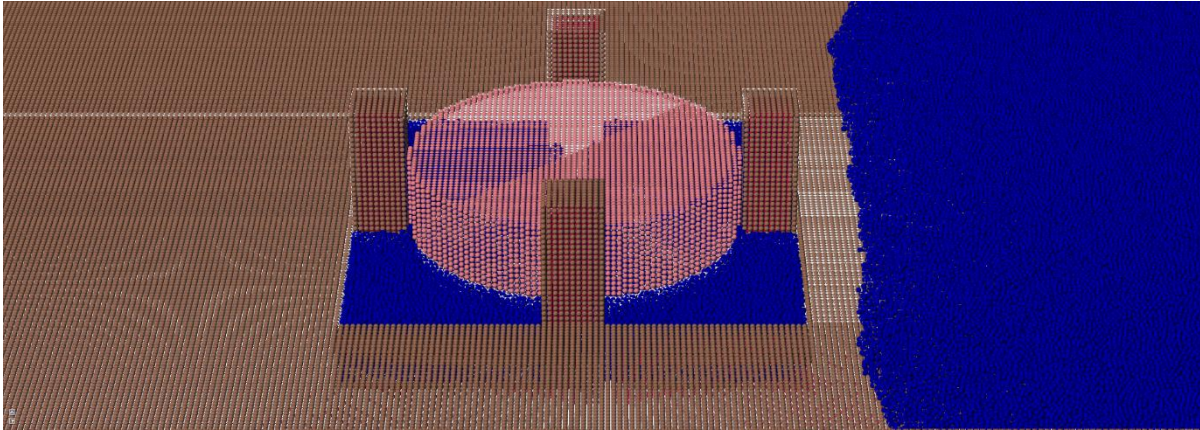


Fig. 5-19 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 35 sec.)

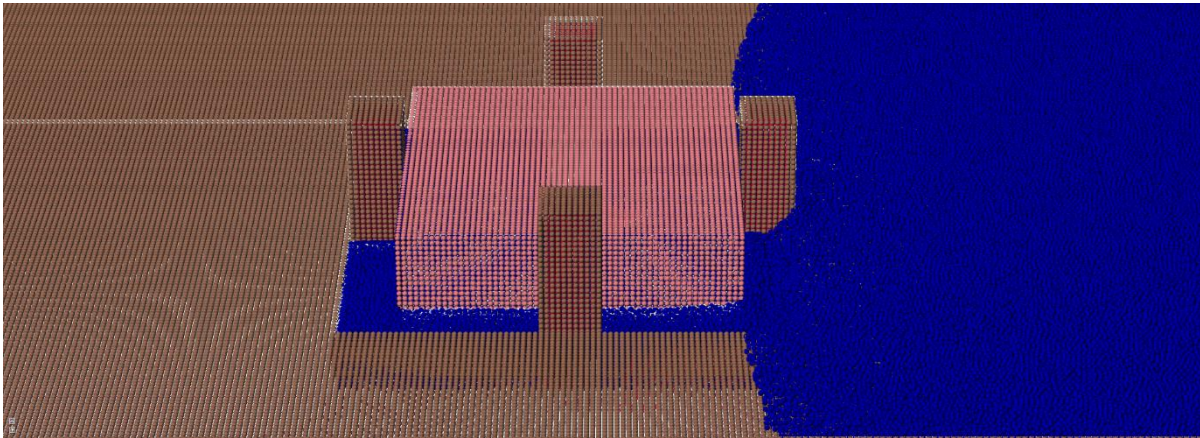


Fig. 5-20 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 40 sec.)

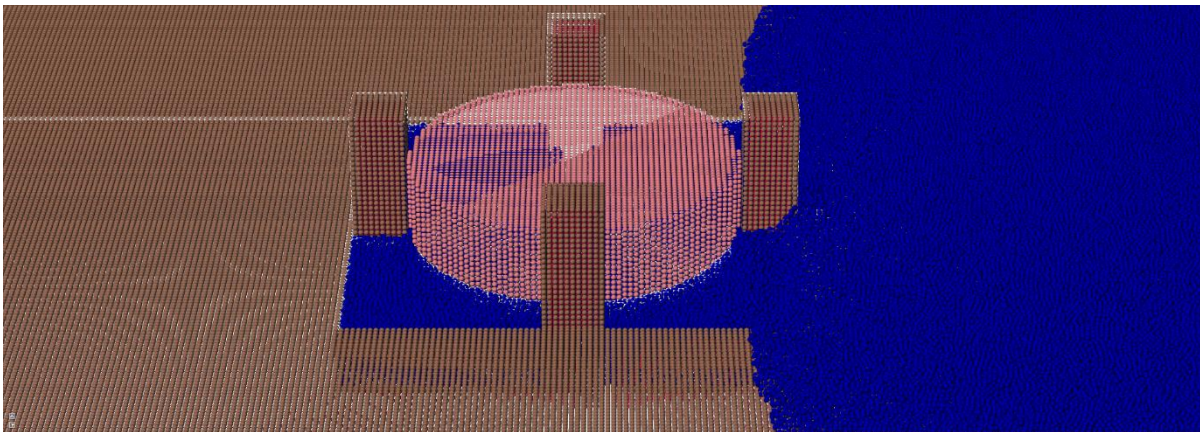


Fig. 5-21 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 40 sec.)



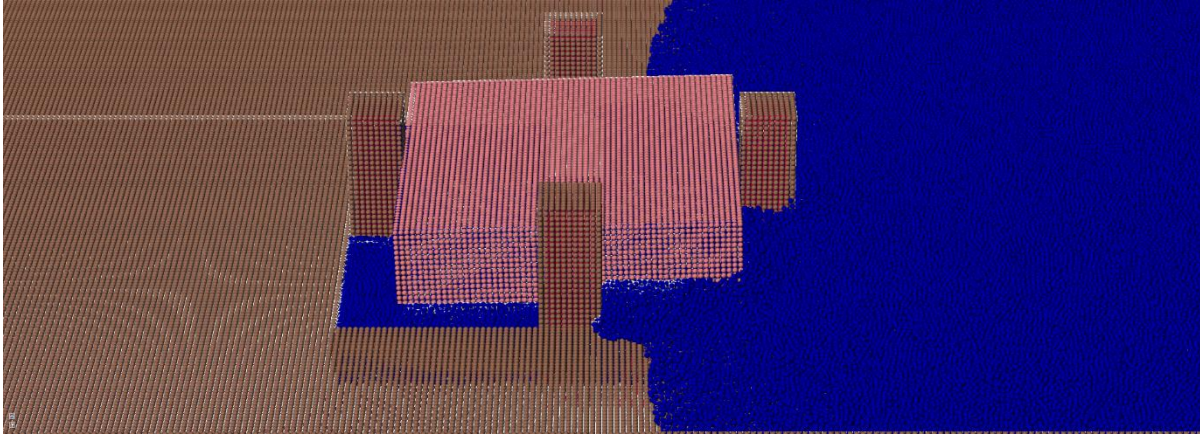


Fig. 5-22 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 45 sec.)

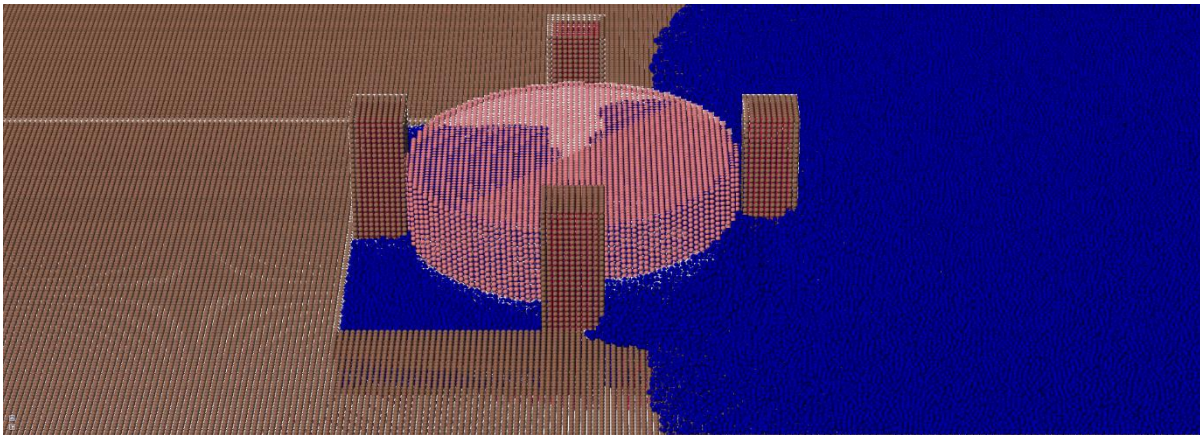


Fig. 5-23 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 45 sec.)

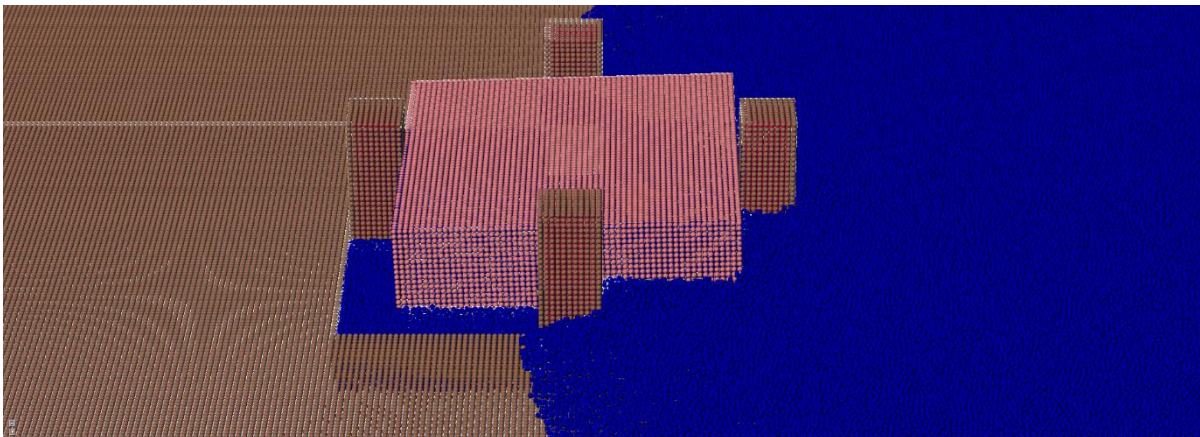


Fig. 5-24 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 50 sec.)



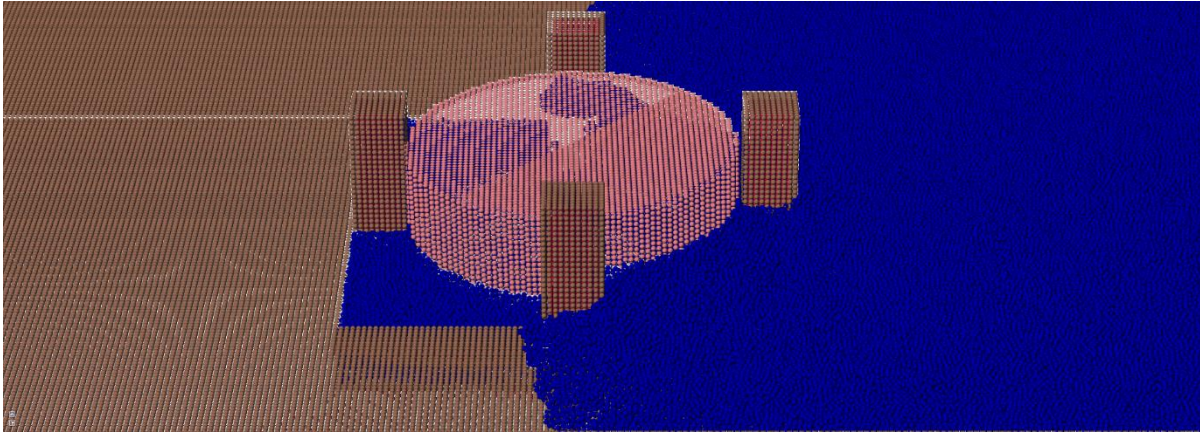


Fig. 5-25 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 50 sec.)

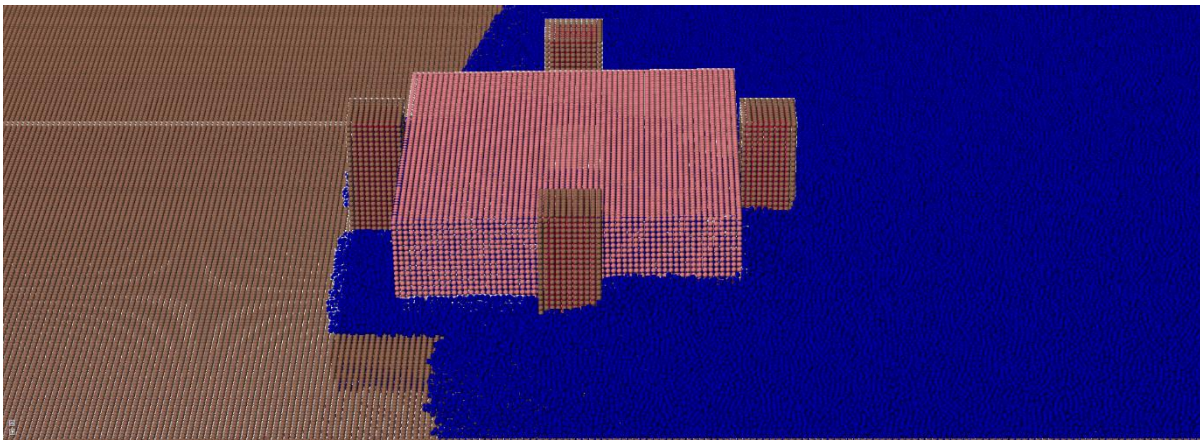


Fig. 5-26 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 55 sec.)

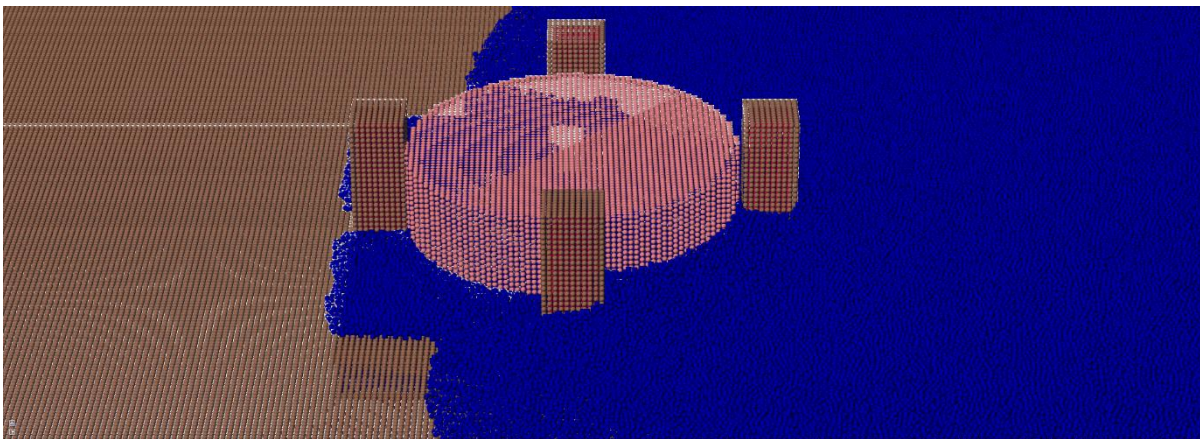


Fig. 5-27 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 55 sec.)



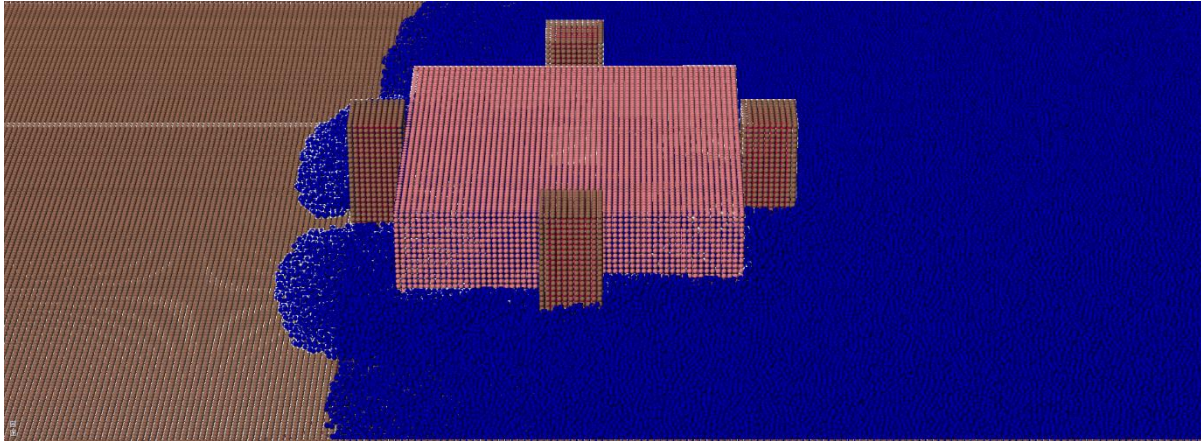


Fig. 5-28 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 60 sec.)

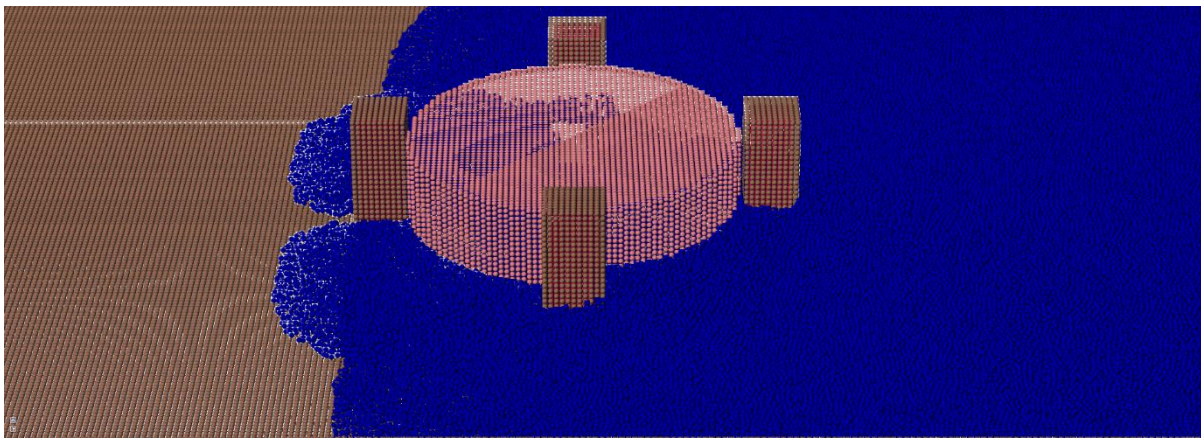


Fig. 5-29 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 60 sec.)

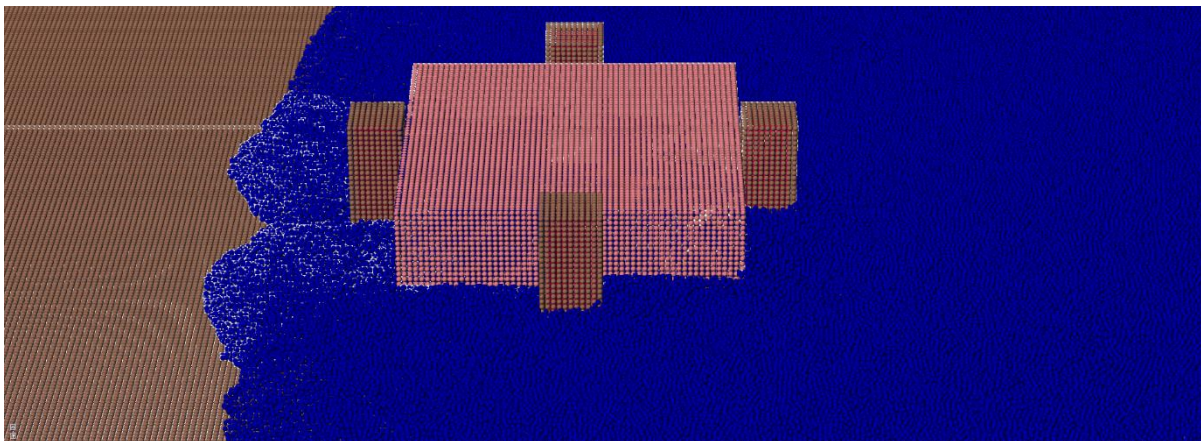


Fig. 5-30 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 65 sec.)



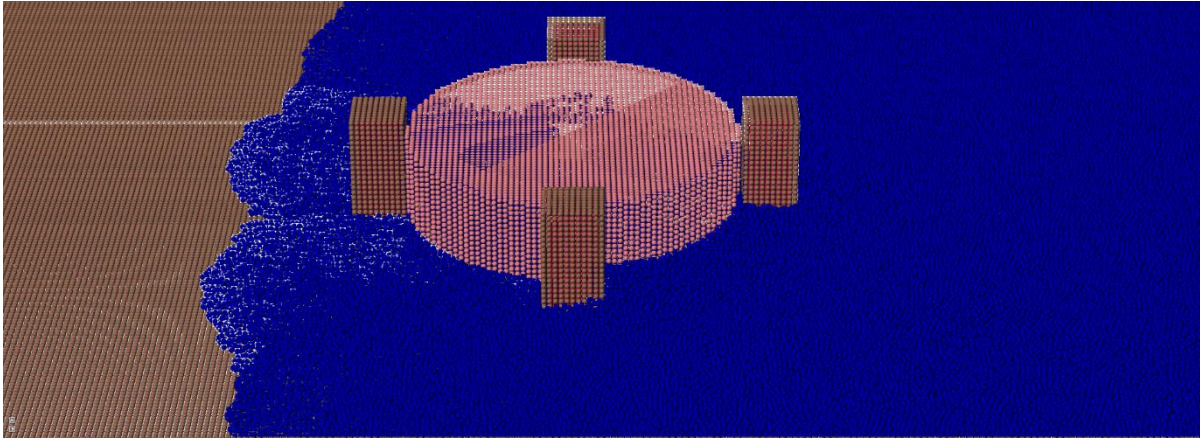


Fig. 5-31 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 65 sec.)

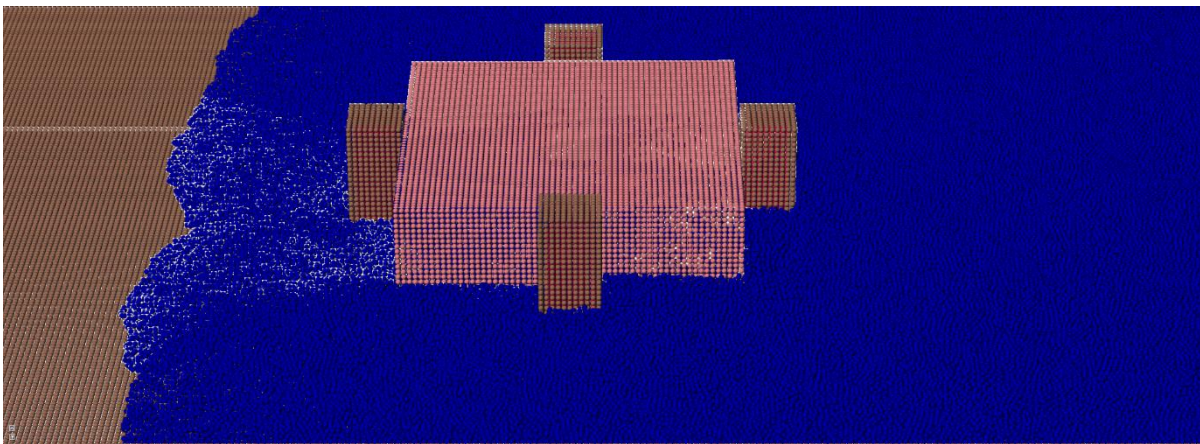


Fig. 5-32 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 70 sec.)

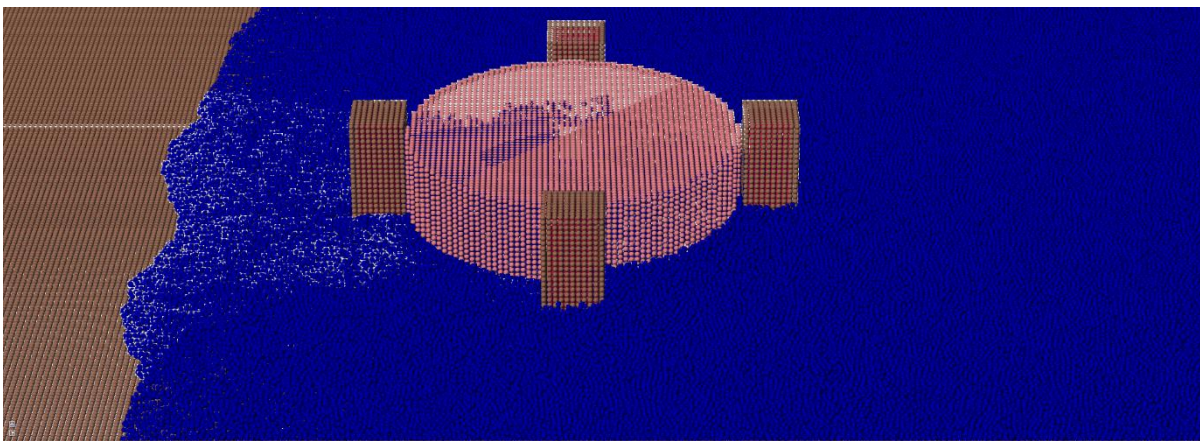


Fig. 5-33 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 70 sec.)



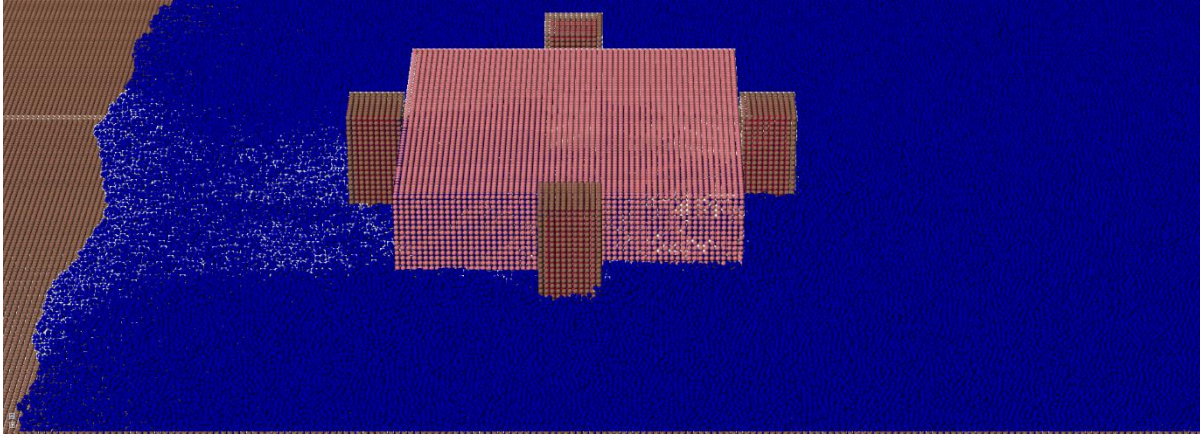


Fig. 5-34 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 75 sec.)

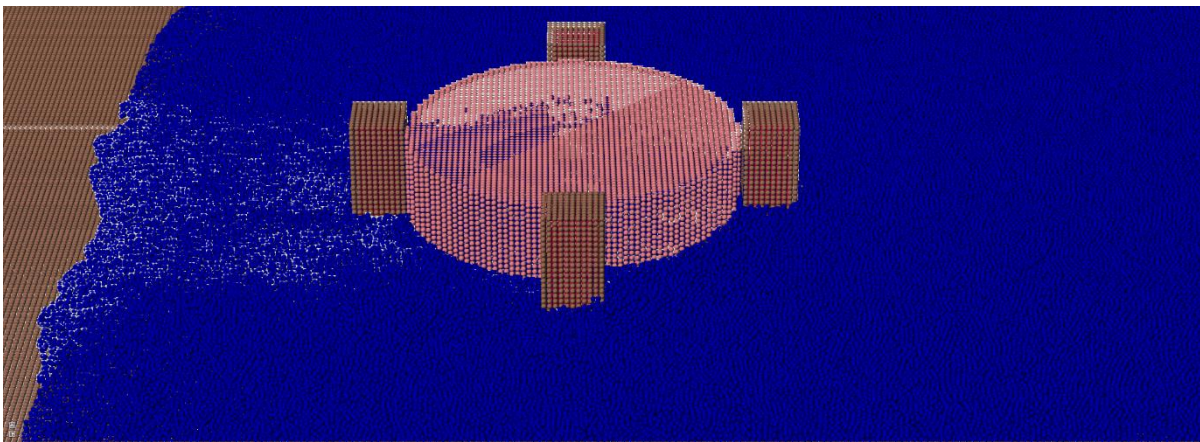


Fig. 5-35 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 75 sec.)

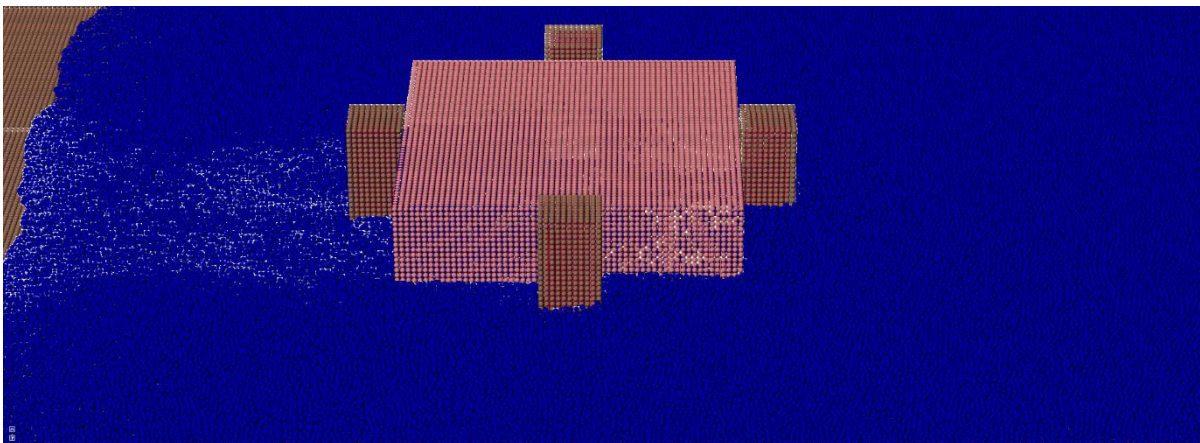


Fig. 5-36 Snapshot FLTS (Box type) (Time for 80 sec.)



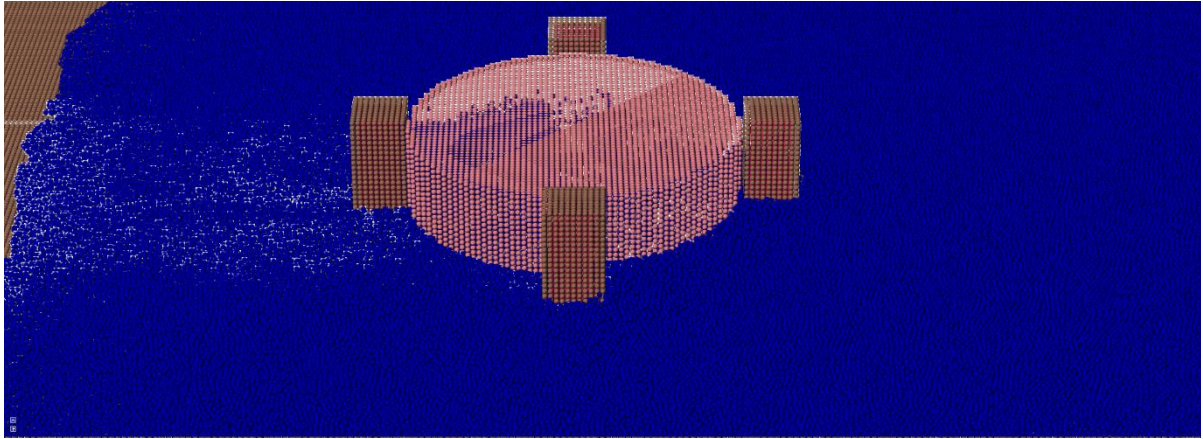


Fig. 5-37 Snapshot FLTS (Cylindrical type) (Time for 80 sec.)

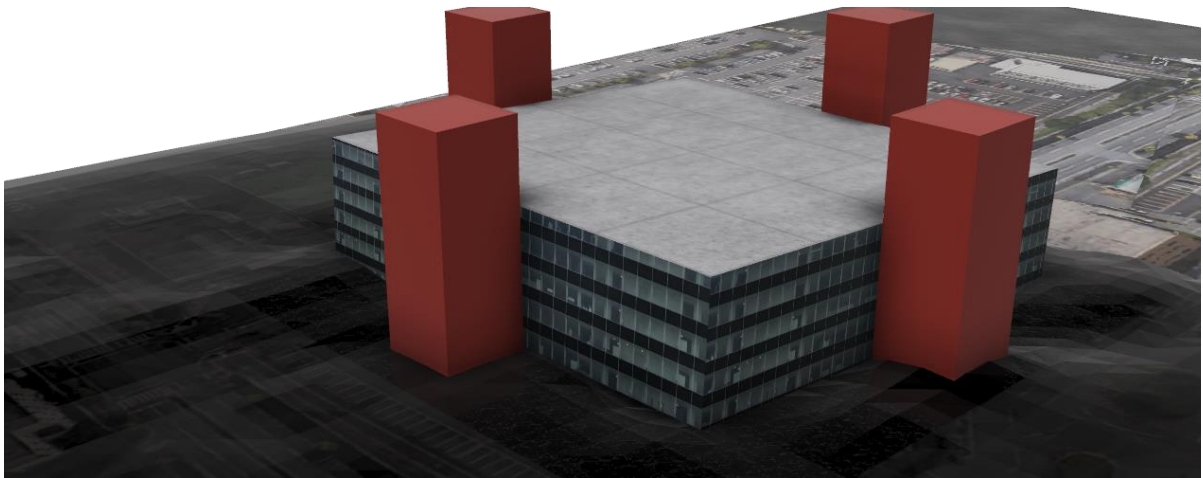


Fig. 5-38 Computer Graphic image using MPS simulation result (Time for 60 sec.)

## 5-4 結言

本章では、陸上設置型の浮体式津波避難施設である「浮体式大型津波シェルター」の津波避難施設の設計に必要な項目の算定を、提案する MPS 法数値シミュレーションを使用した設計スキームを用いることによって算定が可能であることを明らかにすること、津波中の浮体式大型津波シェルターの動揺に問題がなく、構造物内の避難した人間や備蓄物資を保護するなどの浮体式大型津波シェルターがもつ機能を発揮することができるか明らかとし、他の津波避難施設との優位性を示すことを目的とした。まず設計スキームに従い浮体式大型津波シェルターを設計に必要な主要目、入射波高の設定等を実施し、シミュレーションを実施した。その結果、浮体式大型津波シェルターは波高 7m の波に対し浮上した。この浮上により圧力が固定式に比べ低減し、また継続的に作用しないことも明らかとなった。また 0.2G 程度の動揺で浮上を確認することができた。さらに、浮上までの間に地上階部分に対して波が作用することが明らかであった。しかし、これはガイドラインに定める圧力より小さく、ガイドラインに従うことで安全な設計が可能であることが明らかになった。一方で想定される波高内での浸水は考慮しなければならないことも明らかとなった。しかし、一方で固定式に比べ、浮上により漂流物との衝突による被害や、津波の浸水に

よる空白域の改善を期待できる。

浮体式大型津波シェルターが現状の構造に対して、また現行の規制等に対して適した範囲内で、避難する人身と備蓄物資、生活に関する衛生設備を保護することが可能であることが明らかになった。

## 第6章 結 論

本研究は、東日本大震災以後の次世代に向けた浮上式津波避難施設の創出を目標に、浮体式大型津波シェルターの設計手法について検討を行った。既存の津波避難ビルの安全設計手法をベースに、粒子法である MPS 法による数値シミュレーションを採用した手法を提案した。そのために、対象となる浮体式大型津波シェルターの挙動、作用する波圧、波力の解析に対する適用性の検討、本数値シミュレーションから得られた成果について総括を行う。本論文より、以下の知見を得ることができた。

1. MPS 法数値シミュレーションを使用した設計スキームを提案した。それにより、浮体式大型津波シェルターの設計を行う場合には、既存の津波避難施設の構造計算手法では十分でないことを明らかにした。
2. 本問題に MPS 法数値シミュレーションを適用するために、砕波や射流といった非線形流体と浮体の連成運動モデルおよび水流の流入流出境界モデルを導入し、その実用性を示した。
3. 浮体式大型津波シェルターの津波に対する運動特性を明らかにするための水理模型実験を実施した。それにより、津波流からの抗力を低減するために形状を円筒形とした浮体と既存研究で用いられた箱型の浮体で比較検討した結果、本研究で提案する円筒形浮体は抗力が小さいため津波の水平方向の流れに漂流しやすくなるものの、作用する津波波圧を箱型浮体に比べて小さくできることを明らかにした。
4. 浮体式大型津波シェルターの係留方法について検討を行った。係留柱によるドルフィン係留を行った場合、円筒形のほうが箱型に比べ、浮上しやすく、その浮上により全体的な波の作用圧力は小さくなることを明らかにした。ただし、作用する津波圧力は入射直後のみ、浮体と堀の斜面壁との相対位置の関係で流勢が強くなる影響で、衝撃波圧は円筒形のほうが大きくなる可能性があることを示した。
5. 箱型の浮体式大型津波シェルターの津波中応答シミュレーションに対する MPS 法の本問題への適用性について実験結果との比較・検討を行った。それによって、非係留時においては堀壁への衝突があるまでの浮上時の挙動および、作用圧力について適用性が高いことを示した。
6. 円筒形の浮体式大型津波シェルターの津波中応答シミュレーションに対する MPS 法の本問題への適用性について実験結果との比較・検討を行った。それにより、波高に対して、MPS 法の結果が浮上しやすい結果となることが明らかになり、既存研究と合致する結果となった。
7. 本研究により、MPS 法数値シミュレーションを用いた津波流中の浮体運動シミュレーションが、浮体式大型津波シェルターの設計に必要な浮上性能・加速度等をシミュレーション可能であることを示した。

浮体式大型津波シェルターの設計において重要となる津波流体中における浮上と浮体構造物へ作用する津波波圧の算定を本論で示すことができた。



今後の課題として、MPS 法数値シミュレーションの精度の向上にむけた、摩擦衝突問題の改善が必要である。特に、密度の大きく異なる粒子間の衝突について改善すべきである。さらに、本シミュレーションには取り入れることができなかった、係留の機械的特性（ドルフィン係留のフェンダー滑車機構等）が、大きな影響を与える可能性は高く、今後導入を必要とする。これらの MPS 法数値シミュレーションにおける改善を図ることにより、より信頼性の高いシミュレーション結果をもとに検討が実施できる。

浮体式大型津波シェルターの研究開発は、今後次世代の避難施設を創出するにあたり、その研究価値が高いことを本研究で示せたと考えるが、今後さらに以下の事項における検討を進めるべきであると考えられる。

1. 浮体式大型津波シェルターの係留系について、本研究ではドルフィン係留を採用した。しかし、係留柱はその規模からコストが増大する可能性が高い。津波に耐えうる等の基準としての最適な諸元を明らかにし、そのほかの係留手法との比較を今後実施すべきである。コスト面、運用面からも検討が必要と考える。
2. 堀の必要性について、堀は浮上性能や浮体に作用する圧力低減について等に大きな影響を及ぼすことが本研究で明らかとなったが、これもコスト面で増大する可能性がある。今後、堀の形状や必要性について詳しく検討する必要がある。
3. 実際の建築物のモデルを用いて、破断や損傷等を考慮する必要がある。特に津波流中にある漂流物との衝突や引き波後の衝突物による浮体式大型津波シェルターの不時着等が考えられる。これらにおいて、堀は大きな役割を果たすと考えられるが、検討が必要である。

## 参考文献

- (1-1) 国土交通省：「津波防災地域づくりに関する法律」パンフレット， p.1-p.14， 2014.3
- (1-2) 岸拓真・南清和・増田光弘: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－、日本船舶海洋工学会論文集， Vol. 24 (2017)， p. 147-156， 2017.1， <http://doi.org/10.2534/jjasnaoe.23.147>
- (1-3) 総務省消防庁：東日本大震災記録集， pp.83-86， 2013
- (1-4) 高野剛志，戸川卓哉，三室 碧人，加藤博和，林 良嗣：被災者の QOL 水準に基づく小地区単位の災害影響時系列評価システム，土木計画学研究，講演集， Vol.45， CD-ROM(27)， 2012.6
- (1-5) 国土技術政策総合研究所基準認証システム研究室：津波避難ビル等の構造上の要件の解説，国土技術政策総合研究所資料，第 673 号， pp. I -1-pp. I -37， 2012.3
- (1-6) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン，<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/guideline.pdf>， 2005.6， 平成 26 年 6 月確認
- (1-7) 国土交通省住宅局長：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について（技術的助言）：国住指 2570 号， 2011.11
- (1-8) 増田光弘：津波中の浮体挙動解析への粒子法の適用性に関する研究，日本大学博士論文， 2010
- (1-9) 有川太郎・山田文則・秋山実: 3次元数値波動水槽における津波波力に対する適用性の検討,第 52 回土木学会海洋工学講演会論文集,pp.46-50.
- (1-10) P. A. Cundall, O. D. L. Strack : A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29 pp.47-pp.65, 1979
- (1-11) 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
- (1-12) 陸田秀実，藤井俊輔，鎌田正也，土井康明，福原卓三：津波作用下における浮沈式大型津波シェルターの運動と流体力に関する研究，土木学会論文集，B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，I\_1011-I\_1015， 2013.11
- (2-1) 越塚誠一・柴田和也・室谷浩平：粒子法入門 流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで，丸善出版， 2014.9
- (2-2) 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.
- (2-3) 五十里洋行：粒子法による自由表面流の数値解析とその水工学への応用に関する研究，京都大学博士後期課程論文， 2007.3
- (2-4) 増田光一・村田一城・居駒知樹・増田光弘・大野正人:津波波高および入射角度影響を考慮した浮棧橋による船舶の津波防災・減災対策に関する基礎的研究，土木学会論文集 B3（海洋開

発), 第 70 卷, No.2, pp.I\_978-pp.I\_983, 2014

(2-5) 大地雅俊・越塚誠一・酒井幹夫:自由表面流れ解析のための MPS 陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, 第 2010 卷, p. 20100013, 2010.9

(2-6) 柴田和也, 越塚誠一, 酒井幹夫, 谷澤克治, 辻本勝: MPS 法による水波の透過境界条件の検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 10 号, 2010

(2-7) 末吉誠・内藤林: 粒子法の圧力計算法の改善, 関西造船協会論文集, 2004, 242, pp.53-pp.60, 2004

(2-8) 田中正幸・益永孝幸: 疑似圧縮性効果による MPS 法の安定化と圧力の平滑化, 日本計算工学論文集, Vol. 2008, pp.2008-0025, 2008

(2-9) 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, Vol. 12, pp.445-448, 2011

(2-10) 入部綱清・仲座栄三: MPS 法における勾配計算の高精度化とその応用: 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp.46-50, 2010

(3-1) 岸拓真: 粒子法を用いた浮体式大型津波シェルターの性能解析に関する研究, 東京海洋大学大学院修士論文, pp.35-pp.41, 2014.9

(5-1) 松富英夫・飯塚秀則: 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, No.45, pp. 361-365, 1998.

(5-2) 榊山勉: 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I\_771-I\_775, 2012.

(5-3) 消防庁国民保護防災部防災課: 津波避難対策推進マニュアル検討会報告書, p.12-p.26, 2012.3

(5-4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課: 建築構造設計基準の資料, 国営整第 288 号, p.9-p.22, 2015.4

## 謝 辞

本論文を執筆するにあたり、ご指導とご協力を多くの方々より頂いたことに深謝の意を表します。特に、社会人として生活をしながら博士論文を執筆することに多くの困難を抱えておりましたが、各位の協力をいただき完遂することができました。

主指導教員であります、南清和先生には、学部からの10年以上、親身に、ご指導とご協力をいただき深謝いたします。遠地ながらスケジュールや都合がかみ合わず、様々なお迷惑をおかけいたしました。南先生なしではこの論文を完遂することが出来ませんでした。特に研究において、先生からの提案から始まった「浮体式大型津波シェルター」をここまで検討する事ができたのは、コンセプトをきちんと明確にし、検討をさせて頂いたことによるものだと思います。今後は、より自身の持つ能力を磨き、鼓舞をし、学会等の現在の職場以外で刺激をもらいに行きながら、自分にしかできない仕事や研究を実現していきたいと考えております。

副指導教員であります、井関俊夫先生には、ご多用の中、本論文への審査、様々な提言をいただき、大変感謝しております。学部時代より、大変お世話になりました。

副指導教員であります、増田光弘先生には、出会ってから6年以上、最も私に近い立場で多くのことに理解を頂き、ご指導を頂きました。特に社会人として博士後期課程を卒業することに多くの困難があり、様々な支援と助言をいただきことに大変感謝しております。また研究についても、本研究分野の第一人者として、多くの議論と検討をいただきました。このような形で修了できるのは増田先生の厳しい眼差しを常に向けてくれていながら非常に優しくしていただいたおかげであると感じております。今後も、引き続き様々な場所でお世話になるかとは思いますが、本研究に際し、深く深く関わって頂いたこと、精神的な支えをいただいたことに深謝いたします。

東京海洋大学海洋工学系海事システム工学部技術職員宮川理氏、前任の三田重雄氏には学部の時代より本研究につきまして、実験の準備の相談をさせて頂き、大変感謝しております。寛容なまでに様々なことをお許し頂き、今となつては大変貴重な経験をさせて頂いたことを感謝しております。

日本大学理工学部海洋建築学科、増田光一先生、居駒知樹先生、そして恵藤浩朗先生には、寛大な理解をして頂き、模型実験を許可して下さっただけでなく、学会内のセッションにお招きいただいたことを大変感謝しております。研究に対しまして様々な議論を頂き、今後の方針に生かしていきたいと考えております。ご指摘とご指導大変感謝しております。今後とも引き続きお世話になるかと思いますが、何卒よろしく願いいたします。

また、笹原裕太郎様には本研究の遂行、特にコンセプトや MPS 法の研究開発等、多方面において貴重なご助言、また支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。笹原様との研究の日々なくして、現在はないと思っております。

日本大学理工学部海洋建築学科増田研究室メンバーであります相田康洋様、村田一城様両名には大変お世話になりました。研究において、他校にもかかわらず喧々諤々と様々な議論をさせていただいたことは研究を深く考えるうえで重要でした。今後もどこかでお世話になるときがあるかもしれませんが、よろしく願いいたします。居駒・恵藤・小林研究室メンバー一同に対しまして、その寛容な姿勢等も含めまして感謝の意を示します。

広島商船高等専門学校教職員の皆様には、入構してから3年半の期間、大変ご負担をおかけし、また研究に関するご助言、ご助力を頂きました。支えなしではこうして博士論文を完成することができませんでした。感謝の意を示したいと思います。また、学生の皆様に、特に商船学科高学年、河村・岸研究室のメンバーには心理的な部分で大きな支えになってもらいました。皆様に心配を頂きながらこうして博士論文を完成することができたことに感謝いたします。

広島商船高等専門学校専攻科海事システム工学専攻岩瀬彩香様には研究に関する様々な助力を頂きました。特に、CAD の編集や MPS 法への応用等、新たな挑戦にむけての研究について大きな支えを頂いたことに感謝いたします。ありがとうございます。広島商船高等専門学校専攻科海事システム工学専攻吉井啓晃には研究室の業務遂行、研究に関する助言をいただきことに大変感謝いたします。

最後に、10年間にわたり大学生生活を支えてくださった両親、弟に深謝いたします。

