

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

岸壁係留船舶のための津波被害予測・防災対策データベース構築に関する研究

|       |                                                                                                    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2021-11-30<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 筒井, 千暁<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2262">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2262</a>  |

# 修士学位論文

## 岸壁係留船舶のための津波被害予測 ・防災対策データベース構築に関する研究

2021 年度  
(2021 年 9 月)

東京海洋大学大学院  
海洋科学技術研究科  
海運ロジスティクス専攻

筒井 千暁



# **A study on the Configuration of the Tsunami Hazard and Tsunami Disaster Prevention Database for Vessels Moored on Wharves**

Tsunami disaster prevention and mitigation measures for vessels have been required since the huge tsunami occurred after the Great East Japan Earthquake caused extensive damage to ships moored at the wharf. Authors have been proposing and studying “the tsunami hazard database” to evaluate tsunami damage in ports and harbors throughout Japan in certain standards. The database was developed last year using the MPS method as a numerical simulation method, but the simulated tsunami was a steep solitary wave, and the simple linear spring model was used for mooring lines. Therefore, in this study, the MPS method program code applies “the tsunami generation boundary” that can generate a simulated tsunami with a long wavelength closer to the actual tsunami waveform, and “the nonlinear mooring model” that simulates the nonlinear characteristics of mooring lines. Then, tsunami damage prediction simulations for a ship moored at a wharf were carried out using the 3D MPS method, and the damage criteria of the tsunami hazard database were updated. In addition, the usefulness of the improved simulation model was demonstrated by comparing the results with those of the conventional model. Moreover, simulations of tsunami disaster prevention measures for ships moored at wharves were carried out using this improved 3D MPS method in order to construct “the tsunami disaster prevention database” which summarizes the tsunami prevention methods and their effectiveness for vessels. As a result, “the tsunami countermeasure mooring line list” which shows the necessary mooring conditions to prevent the breakage of mooring lines by tsunami was created, and the disaster prevention effects of the floating tsunami protection wharf (FTPW), deep-draft type floating tsunami protection wharf (DFTPW) and to strengthen mooring force were shown.

# 目次

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 第 1 章 序論                               | 1  |
| 1.1 研究背景                               | 1  |
| 1.1.1 東北地方太平洋沖地震津波における船舶の津波被害          | 1  |
| 1.1.2 日本全国の港湾における船舶津波防災の必要性            | 3  |
| 1.2 先行研究                               | 5  |
| 1.3 津波被害予測データベース(2020 年度作成)の課題点        | 6  |
| 1.4 研究目的                               | 7  |
| 1.5 研究手法                               | 7  |
| 1.6 本論文の構成                             | 8  |
| 第 2 章 MPS(Moving Particle Simulation)法 | 9  |
| 2.1 MPS 法の概要                           | 9  |
| 2.2 支配方程式                              | 9  |
| 2.3 粒子間相互作用モデル                         | 10 |
| 2.3.1 重み関数                             | 10 |
| 2.3.2 粒子数密度                            | 11 |
| 2.3.3 勾配モデル(グラディエントモデル)                | 11 |
| 2.3.4 発散モデル(ダイバージェンスモデル)               | 12 |
| 2.3.5 ラプラシアンモデル                        | 13 |
| 2.4 非圧縮性流れの計算アルゴリズム                    | 14 |
| 2.4.1 半陰的アルゴリズム                        | 14 |
| 2.4.2 影響半径の設定                          | 17 |
| 2.4.3 時間刻み幅の設定                         | 18 |
| 2.5 境界条件                               | 18 |
| 2.5.1 自由表面条件                           | 18 |
| 2.5.2 壁境界条件                            | 19 |
| 2.6 剛体運動                               | 20 |
| 2.7 本研究室 MPS 法プログラムの改良点                | 24 |
| 2.7.1 数値計算の高速化                         | 24 |
| 2.7.2 造波境界                             | 25 |
| 2.7.3 係留モデル                            | 27 |
| 2.7.4 圧力振動低減モデル                        | 29 |
| 2.7.5 進行波波高減衰低減モデル                     | 29 |
| 2.8 本研究におけるプログラムコード改良点                 | 30 |
| 2.8.1 津波造波境界(流入・流出境界)                  | 30 |
| 2.8.2 非線形係留モデル                         | 31 |
| 2.8.3 係留モデル検証計算                        | 32 |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 第3章 津波被害予測データベースの改訂 .....              | 36 |
| 3.1 概要 .....                           | 36 |
| 3.2 造波目標波形 .....                       | 36 |
| 3.3 計算ケース名の意味 .....                    | 37 |
| 3.4 船舶条件 .....                         | 38 |
| 3.5 係留条件 .....                         | 40 |
| 3.5.1 係留索配置 .....                      | 40 |
| 3.5.2 係留索特性曲線 .....                    | 42 |
| 3.6 0度入射シミュレーション条件 .....               | 43 |
| 3.6.1 計算領域の諸元 .....                    | 43 |
| 3.6.2 入射波条件 .....                      | 44 |
| 3.6.3 計算ケース .....                      | 46 |
| 3.7 90度入射シミュレーション条件 .....              | 46 |
| 3.7.1 計算領域の諸元 .....                    | 46 |
| 3.7.2 入射波条件 .....                      | 48 |
| 3.7.3 計算ケース .....                      | 49 |
| 3.8 結果および考察 .....                      | 49 |
| 3.8.1 0度入射 .....                       | 49 |
| 3.8.2 90度入射 .....                      | 60 |
| 3.9 津波被害予測データベースにおける係留索破断判定基準の更新 ..... | 72 |
| 3.10 結語 .....                          | 72 |
| 第4章 津波防災対策データベースの作成 .....              | 74 |
| 4.1 概要 .....                           | 74 |
| 4.2 計算ケース名の意味 .....                    | 74 |
| 4.3 最大係留力計測シミュレーション(0度入射) .....        | 75 |
| 4.3.1 計算条件 .....                       | 75 |
| 4.3.2 入射波条件 .....                      | 77 |
| 4.3.3 計算ケース .....                      | 79 |
| 4.3.4 結果および考察 .....                    | 80 |
| 4.3.5 計算コスト .....                      | 81 |
| 4.4 最大係留力算定(0度入射) .....                | 82 |
| 4.4.1 係留索条件 .....                      | 82 |
| 4.4.2 係留力算定方法 .....                    | 84 |
| 4.5 津波対策係留索リストの作成 .....                | 86 |
| 4.6 浮体式津波対策用岸壁シミュレーション(90度入射) .....    | 90 |
| 4.6.1 計算条件 .....                       | 90 |
| 4.6.2 入射波条件 .....                      | 93 |
| 4.6.3 計算ケース .....                      | 96 |
| 4.6.4 結果および考察 .....                    | 96 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 4.6.5 計算コスト .....                        | 101 |
| 4.7 深喫水型浮体式津波対策用岸壁シミュレーション(90 度入射) ..... | 102 |
| 4.7.1 計算条件 .....                         | 102 |
| 4.7.2 計算ケース .....                        | 103 |
| 4.7.3 結果および考察 .....                      | 103 |
| 4.8 水柱崩壊による引き波津波シミュレーション .....           | 107 |
| 4.8.1 計算条件 .....                         | 107 |
| 4.8.2 計算ケース .....                        | 107 |
| 4.8.3 結果および考察 .....                      | 108 |
| 4.9 津波条件に対する各対策手法の有効性 .....              | 112 |
| 4.10 結語 .....                            | 112 |
| 第 5 章 結論 .....                           | 114 |
| 5.1 MPS 法プログラムコードの改良 .....               | 114 |
| 5.2 津波被害予測データベースの改訂と従来モデルとの比較 .....      | 114 |
| 5.3 津波防災対策データベースの構築 .....                | 115 |
| 5.4 今後の課題 .....                          | 116 |
| 謝辞 .....                                 | 117 |
| 参考文献 .....                               | 118 |
| Appendix 津波対策係留索リスト .....                | 121 |

## 図表一覧

| List of figures                                                                                                       | pp. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 1.1.1 ASIA SYMPHONY at the Port of Kamaishi (Tsunami height : 8.1m)                                              | 2   |
| Fig. 1.1.2 SIDER JOY at the Port of Ishinomaki (Tsunami height : 5.0m)                                                | 2   |
| Fig. 1.1.3 KURIKOMA at the Port of Shiogama (Tsunami height : 4.2m)                                                   | 2   |
| Fig. 1.1.4 SHIRAMIZU at the Port of Soma (Tsunami height : 10.4m)                                                     | 2   |
| Fig. 1.1.5 PINE WAVE at the Port of Soma (Tsunami height : 10.4m)                                                     | 3   |
| Fig. 1.1.6 Long-term evaluations of megathrust earthquake around Japan (2021)                                         | 4   |
| Fig. 1.3.1 Incident wave form (Masuda's research)                                                                     | 6   |
| Fig. 2.3.1 Interaction between particles                                                                              | 10  |
| Fig. 2.3.2 Concept of gradient model                                                                                  | 12  |
| Fig. 2.3.3 Concept of divergence model                                                                                | 13  |
| Fig. 2.3.4 Concept of laplacian model                                                                                 | 14  |
| Fig. 2.4.1 Calculation algorithm of MPS method (Semi-implicit)                                                        | 17  |
| Fig. 2.5.1 Free surface boundary                                                                                      | 19  |
| Fig. 2.5.2 Wall boundary                                                                                              | 19  |
| Fig. 2.6.1 Concept of solid calculation                                                                               | 21  |
| Fig. 2.6.2 Concept of quaternion                                                                                      | 23  |
| Fig. 2.7.1 Schematic diagram of domain decomposition                                                                  | 24  |
| Fig. 2.7.2 Inflow boundary                                                                                            | 26  |
| Fig. 2.7.3 Outflow boundary                                                                                           | 26  |
| Fig. 2.7.4 Mooring lines model of three dimensions                                                                    | 28  |
| Fig. 2.8.1 Horizontal velocity for inflow boundary                                                                    | 31  |
| Fig. 2.8.2 Mooring characteristic curve ( $\phi 60\text{mm}$ , Nylon, eight strand rope)                              | 32  |
| Fig. 2.8.3 Verification model of linear spring model                                                                  | 33  |
| Fig. 2.8.4 Rigid body model                                                                                           | 33  |
| Fig. 2.8.5 Comparison of numerical solution(MPS) and analytical solution                                              | 34  |
| Fig. 2.8.6 Comparison of numerical solution(MPS) and input mooring characteristic curve data                          | 35  |
| Fig. 3.2.1 Period characteristics of the Tohoku earthquake tsunami (Sato's research)                                  | 37  |
| Fig. 3.3.1 Meaning of the calculation case name                                                                       | 38  |
| Fig. 3.4.1 Snapshot of vessel (left : 3,000DWT, right : 10,000DWT)                                                    | 39  |
| Fig. 3.5.1 Mooring arrangement (3,000DWT)                                                                             | 41  |
| Fig. 3.5.2 Mooring arrangement (10,000DWT)                                                                            | 41  |
| Fig. 3.5.3 Mooring characteristic curve ( $\phi 45\text{mm}$ , $\phi 60\text{mm}$ , Polypropylene, eight strand rope) | 43  |
| Fig. 3.6.1 Simulation setup system in 0 degrees (Schematic diagram)                                                   | 44  |
| Fig. 3.6.2 Simulation setup system in 0 degrees for 3,000DWT (Visualization image)                                    | 44  |
| Fig. 3.6.3 Simulation setup system in 0 degrees for 10,000DWT (Visualization image)                                   | 44  |
| Fig. 3.6.4 Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:10m)                                                    | 45  |

|             |                                                                                   |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.6.5  | Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:12m)                           | 45 |
| Fig. 3.7.1  | Simulation setup system in 90 degrees (Schematic diagram)                         | 47 |
| Fig. 3.7.2  | Simulation setup system in 90 degrees for 3,000DWT (Visualization image)          | 47 |
| Fig. 3.7.3  | Simulation setup system in 90 degrees for 10,000DWT (Visualization image)         | 47 |
| Fig. 3.7.4  | Wave heights in 90 degrees (depth:10m)                                            | 48 |
| Fig. 3.7.5  | Wave heights in 90 degrees (depth:12m)                                            | 48 |
| Fig. 3.8.1  | Surge (0F1.5-3000NH)                                                              | 53 |
| Fig. 3.8.2  | Mooring force (0F1.5-3000NH)                                                      | 53 |
| Fig. 3.8.3  | Surge (0F2.2-3000NH)                                                              | 53 |
| Fig. 3.8.4  | Mooring force (0F2.2-3000NH)                                                      | 53 |
| Fig. 3.8.5  | Snapshots of simulation result (0F2.2-3000NH)                                     | 54 |
| Fig. 3.8.6  | Surge (0F1.6-10000NH)                                                             | 55 |
| Fig. 3.8.7  | Mooring force (0F1.6-10000NH)                                                     | 55 |
| Fig. 3.8.8  | Surge (0F2.3-10000NH)                                                             | 55 |
| Fig. 3.8.9  | Mooring force (0F2.3-10000NH)                                                     | 55 |
| Fig. 3.8.10 | Snapshots of simulation result (0F2.3-10000NH)                                    | 56 |
| Fig. 3.8.11 | Comparison of number of broken lines (0degrees, 3,000DWT)                         | 57 |
| Fig. 3.8.12 | Comparison of number of broken lines (0degrees, 10,000DWT)                        | 57 |
| Fig. 3.8.13 | Comparison of surge <sub>max</sub> (0degrees, 3,000DWT)                           | 58 |
| Fig. 3.8.14 | Comparison of heave <sub>max</sub> (0degrees, 3,000DWT)                           | 58 |
| Fig. 3.8.15 | Comparison of pitch <sub>max</sub> (0degrees, 3,000DWT)                           | 58 |
| Fig. 3.8.16 | Comparison of surge <sub>max</sub> (0degrees, 10,000DWT)                          | 59 |
| Fig. 3.8.17 | Comparison of heave <sub>max</sub> (0degrees, 10,000DWT)                          | 59 |
| Fig. 3.8.18 | Comparison of pitch <sub>max</sub> (0degrees, 10,000DWT)                          | 59 |
| Fig. 3.8.19 | Snapshots of simulation result (90F5.0-3000NH)                                    | 64 |
| Fig. 3.8.20 | Snapshots of simulation result (90F5.4-10000NH)                                   | 65 |
| Fig. 3.8.21 | Snapshots of simulation result (90S5.1-3000NH, Time = 100.0sec)                   | 66 |
| Fig. 3.8.22 | Snapshots of simulation result (90S6.6-10000NH, Time = 43.9sec)                   | 66 |
| Fig. 3.8.23 | Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h10m)                            | 67 |
| Fig. 3.8.24 | The Froude number near the wharf (h10m)                                           | 67 |
| Fig. 3.8.25 | Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h12m)                            | 68 |
| Fig. 3.8.26 | The Froude number near the wharf (h12m)                                           | 68 |
| Fig. 3.8.27 | Flow velocity vectors and contours around bow (90F5.4-10000NH, Time = 213.4sec)   | 69 |
| Fig. 3.8.28 | Vertical flow velocity at Point A and Point B around bow (90F5.4-10000NH)         | 69 |
| Fig. 3.8.29 | Flow velocity vectors and contours around stern (90F5.4-10000NH, Time = 213.4sec) | 70 |
| Fig. 3.8.30 | Vertical flow velocity at Point C and Point D around stern (90F5.4-10000NH)       | 70 |
| Fig. 3.8.31 | Comparison of number of broken lines (90degrees, 3,000DWT)                        | 71 |
| Fig. 3.8.32 | Comparison of number of broken lines (90degrees, 10,000DWT)                       | 71 |

|             |                                                                                          |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 4.2.1  | Meaning of the calculation case name                                                     | 75  |
| Fig. 4.3.1  | Simulation setup system in 0 degrees (Schematic diagram)                                 | 76  |
| Fig. 4.3.2  | Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:10m)                                  | 77  |
| Fig. 4.3.3  | Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:12m)                                  | 78  |
| Fig. 4.3.4  | Maximum mooring fore (3,000DWT and 10,000DWT)                                            | 81  |
| Fig. 4.3.5  | Computation times (day)                                                                  | 82  |
| Fig. 4.4.1  | Mooring characteristic curve ( $\phi 45$ mm, polypropylene and HMPE)                     | 83  |
| Fig. 4.4.2  | Flowchart for calculation mooring force in surge                                         | 85  |
| Fig. 4.4.3  | Schematic diagram of calculation mooring force in surge                                  | 86  |
| Fig. 4.5.1  | Tsunami countermeasures mooring line chart (3,000DWT, PP)                                | 88  |
| Fig. 4.5.2  | Tsunami countermeasures mooring line chart (3,000DWT, HMPE)                              | 88  |
| Fig. 4.5.3  | Tsunami countermeasures mooring line chart (10,000DWT, PP)                               | 89  |
| Fig. 4.5.4  | Tsunami countermeasures mooring line chart (10,000DWT, HMPE)                             | 89  |
| Fig. 4.6.1  | Simulation setup system in 90 degrees for vessel moored to FTPW (Schematic diagram)      | 91  |
| Fig. 4.6.2  | Simulation setup system in 90 degrees for 3,000DWT moored to FTPW (Visualization image)  | 91  |
| Fig. 4.6.3  | Simulation setup system in 90 degrees for 10,000DWT moored to FTPW (Visualization image) | 91  |
| Fig. 4.6.4  | Floating tsunami protection wharf (Visualization image)                                  | 92  |
| Fig. 4.6.5  | Wave height in 0 degrees (depth:10m)                                                     | 93  |
| Fig. 4.6.6  | Wave heights in 90 degrees (depth:12m)                                                   | 93  |
| Fig. 4.6.7  | Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h10m)                                   | 94  |
| Fig. 4.6.8  | The Froude number near the wharf (h10m)                                                  | 94  |
| Fig. 4.6.9  | Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h12m)                                   | 95  |
| Fig. 4.6.10 | The Froude number near the wharf (h12m)                                                  | 95  |
| Fig. 4.6.11 | Snapshots of simulation result (90F8.6-3000NH-FTPW)                                      | 98  |
| Fig. 4.6.12 | Snapshots of simulation result (90F9.4-10000NH-FTPW)                                     | 99  |
| Fig. 4.6.13 | Comparison of Z-displacement (90F8.6-3000NH-FTPW)                                        | 100 |
| Fig. 4.6.14 | Comparison of Z-displacement (90F9.4-10000NH-FTPW)                                       | 100 |
| Fig. 4.6.15 | Computation times (day)                                                                  | 101 |
| Fig. 4.7.1  | Deep-draft type floating tsunami protection wharf (Visualization image)                  | 102 |
| Fig. 4.7.2  | Snapshots of simulation result (90F8.6-3000NH-DFTPW)                                     | 104 |
| Fig. 4.7.3  | Snapshots of simulation result (90F9.4-10000NH-DFTPW)                                    | 105 |
| Fig. 4.7.4  | Comparison of Z-displacement (90F8.6-3000NH-DFTPW)                                       | 106 |
| Fig. 4.7.5  | Comparison of Z-displacement (90F9.4-10000NH-DFTPW)                                      | 106 |
| Fig. 4.8.1  | Water level of backwash (90 degrees)                                                     | 107 |
| Fig. 4.8.2  | Comparison of flow velocity due to backwash                                              | 109 |
| Fig. 4.8.3  | Comparison of ship motion                                                                | 109 |

|            |                                                        |     |
|------------|--------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 4.8.4 | Snapshots of simulation result (90B-3000NH-FTPW-PP+0)  | 110 |
| Fig. 4.8.5 | Snapshots of simulation result (90B-3000NH-DFTPW-PP+6) | 111 |

### List of tables

|             |                                                                                                 |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Table 1.2.1 | Previous research regarding vessels and tsunami by numerical calculation                        | 5   |
| Table 2.8.1 | Condition of calculation                                                                        | 34  |
| Table 3.4.1 | Calculation conditions of vessel                                                                | 38  |
| Table 3.5.1 | The breakdown of mooring lines (3,000DWT)                                                       | 41  |
| Table 3.5.2 | The breakdown of mooring lines (10,000DWT)                                                      | 41  |
| Table 3.5.3 | Mooring conditions                                                                              | 42  |
| Table 3.6.1 | Calculation cases in 0 degrees                                                                  | 46  |
| Table 3.7.1 | Calculation cases in 90 degrees                                                                 | 49  |
| Table 3.8.1 | Comparison of breakage existence (3,000DWT)                                                     | 52  |
| Table 3.8.2 | Comparison of breakage existence (10,000DWT)                                                    | 54  |
| Table 3.8.3 | Comparison of grounding existence (90degrees, 3,000DWT)                                         | 63  |
| Table 3.8.4 | Comparison of grounding existence (90degrees, 10,000DWT)                                        | 63  |
| Table 4.3.1 | Calculation condition of vessel                                                                 | 76  |
| Table 4.3.2 | Calculation condition                                                                           | 77  |
| Table 4.3.3 | Calculation cases in 0 degrees                                                                  | 79  |
| Table 4.3.4 | Maximum mooring force (3,000DWT)                                                                | 80  |
| Table 4.3.5 | Maximum mooring force (10,000DWT)                                                               | 81  |
| Table 4.3.6 | PC spec                                                                                         | 82  |
| Table 4.4.1 | Minimum breaking loads of polypropylene type                                                    | 83  |
| Table 4.4.2 | Minimum breaking loads of HMPE type                                                             | 83  |
| Table 4.5.1 | Category of the tsunami countermeasures mooring line list                                       | 87  |
| Table 4.5.2 | Tsunami countermeasures mooring line list when tsunami height is 5.0m (3,000DWT, Polypropylene) | 90  |
| Table 4.5.3 | Tsunami countermeasures mooring line list when tsunami height is 5.0m (3,000DWT, HMPE)          | 90  |
| Table 4.6.1 | Calculation condition of FTPW                                                                   | 92  |
| Table 4.6.2 | Calculation condition                                                                           | 92  |
| Table 4.6.3 | Calculation cases in 90 degrees (Moored to FTPW)                                                | 96  |
| Table 4.6.4 | Grounding existence (90 degrees, 3,000DWT)                                                      | 97  |
| Table 4.6.5 | Grounding existence (90 degrees, 10,000DWT)                                                     | 97  |
| Table 4.6.6 | PC spec                                                                                         | 101 |
| Table 4.7.1 | Calculation condition of DFTPW                                                                  | 102 |
| Table 4.7.2 | Calculation cases in 90 degrees (Moored to DFTPW)                                               | 103 |
| Table 4.8.1 | Calculation cases in backwash simulations                                                       | 107 |
| Table 4.9.1 | Effectiveness of each countermeasure method against tsunami conditions                          | 112 |

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 東北地方太平洋沖地震津波における船舶の津波被害

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震にともなう巨大津波により、東日本の太平洋沿岸の港湾では、漁船・プレジャーボートのような小型船だけでなく、外航船のような大型船舶まで、特に岸壁に係留されている船舶が多く被災した。<sup>(1)</sup>係留船舶が津波に圧流されると、係留索は大きな力を受けて破断し、船舶は漂流する。その結果、浅瀬への座礁、岸壁や防波堤といった構造物との接触や衝突、岸壁への乗り揚げなどに至り、船舶は甚大な被害を受けたのである。

係留船舶の被災事例の一例を紹介する。Fig. 1.1.1~ Fig. 1.1.5 に示す被災船舶の諸元は Marine traffic<sup>(2)</sup>から取得した値である。岩手県釜石港（津波高 8.1m<sup>(3)</sup>）で荷役係留中であった 6,175 DWT の貨物船「ASIA SYMPHONY」（Fig. 1.1.1）は、地震による停電により荷役クレーンを揚げることができず、緊急離棧を断念し、船員は陸上へ避難した。その結果、津波により係留索が破断し、港内を流出後、最終的には岸壁に乗り揚げた。<sup>(4)</sup>なお「ASIA SYMPHONY」が釜石港内で被災する様子は海上保安庁撮影の動画に収められており、くり返される強烈な津波の押し波と引き波により、港内を漂流、着底する様子が確認できる。<sup>(4)</sup>また、宮城県石巻港（津波高 5.0m<sup>(3)</sup>）の造船所で艀装中であった 26,307 DWT の「SIDER JOY」（Fig. 1.1.2）は造船所作業員を乗せたまま、津波に圧流されて浅瀬に乗り揚げた。<sup>(1)</sup>そして、宮城県仙台塩釜港塩釜区（津波高 4.2m<sup>(3)</sup>）で係留中であった 1,362 GT の宮城海上保安部巡視船「くりこま」（Fig. 1.1.3）は津波到達時間から緊急離棧は困難であると判断し総員退船させたところ、津波に圧流されて係留索が破断し、港内を漂流後、松島湾内で座礁した。このとき、船底部の損傷により機関室に浸水被害が生じている。<sup>(5)</sup>その他、相馬港（津波高 10.4m<sup>(3)</sup>）で、隣接して荷役係留中であった 2 隻の大型石炭船 91,439 DWT の「SHIRAMIZU」（Fig. 1.1.4）、88,279 DWT の「PINE WAVE」（Fig. 1.1.5）も津波に圧流されて係留索が破断し、港内を漂流後、座礁した。<sup>(6)</sup>

このような津波被害を受けて、国土交通省は「船舶津波避難マニュアル」<sup>(7)</sup>を作成しており、津波対応行動として「港外退避」、「係留強化」、「総員退避」が示されている。この港外退避について、東北地方太平洋沖地震では、沖だしにより被災を免れた事例が数多く報告されていることから<sup>(8)</sup>、港外退避は港湾内船舶の津波対策として非常に有効である。しかし津波到達時間、船員の在船状況、陸上電源の喪失、荷役機器の損傷、タグボード、水先人、ラインマンによる離岸出港時の操船支援の有無、航路内の輻輳状況、船舶の操縦性能などから、沖だしができない、あるいは適当でない場合も考えられる。被災事例でも紹介したように、実際には多くの船舶が岸壁に係留された状態で被災していることから、すべての港湾内船舶が地震発生後に沖だしを行い、港外の安全な水域まで避難することは困難である。

以上から、港湾内のあらゆる大きさの様々な船種の船舶を対象として、港外退避によらない、岸壁に係留された状態での、津波防災・減災対策も検討する必要がある。



|                 |               |
|-----------------|---------------|
| Name            | ASIA SYMPHONY |
| Vessel type     | General cargo |
| DWT             | 6,175t        |
| Length overall  | 96.7m         |
| Breadth extreme | 17.4m         |

Fig. 1.1.1 ASIA SYMPHONY<sup>(1)</sup> at the Port of Kamaishi (Tsunami height : 8.1m).



|                 |               |
|-----------------|---------------|
| Name            | SIDER JOY     |
| Vessel type     | General cargo |
| DWT             | 26,307t       |
| Length overall  | 157.2m        |
| Breadth extreme | 26.8m         |

Fig. 1.1.2 SIDER JOY<sup>(1)</sup> at the Port of Ishinomaki (Tsunami height : 5.0m).



|                 |               |
|-----------------|---------------|
| Name            | KURIKOMA      |
| Vessel type     | Patrol vessel |
| GT              | 1,362         |
| Length overall  | 91.4m         |
| Breadth extreme | 11.5m         |

Fig. 1.1.3 KURIKOMA<sup>(5)</sup> at the Port of Shiogama (Tsunami height : 4.2m).



|                 |              |
|-----------------|--------------|
| Name            | SHIRAMIZU    |
| Vessel type     | Bulk carrier |
| DWT             | 91,439t      |
| Length overall  | 235.0m       |
| Breadth extreme | 43.0m        |

Fig. 1.1.4 SHIRAMIZU at the Port of Soma<sup>(6)</sup> (Tsunami height : 10.4m).



|                 |              |
|-----------------|--------------|
| Name            | PINE WAVE    |
| Vessel type     | Bulk carrier |
| DWT             | 88,279t      |
| Length overall  | 229.9m       |
| Breadth extreme | 38.0m        |

Fig. 1.1.5 PINE WAVE at the Port of Soma<sup>(6)</sup> (Tsunami height : 10.4m).

## 1.1.2 日本全国の港湾における船舶津波防災の必要性

津波には、日本沿岸を震源とする地震によって発生する近地津波と遠方を震源とする地震によって発生し沿岸まで伝播してくる遠地津波があるが、近地津波の場合、津波到達時間ははるかに短いため、前項で述べた係留船舶の沖だしによる津波対策はより困難となる。そこで岸壁係留船舶の津波被害予測・防災対策を考える場合、より時間的余裕が少ない近地津波をまずは想定すべきであると考えられる。

将来的に日本沿岸で発生するとされる近地津波として、2021年1月13日に政府の地震調査研究推進本部により公表されている、海溝型地震の長期評価結果<sup>(9)</sup>を Fig. 1.1.6 に示す。この地図には、津波をともし海溝型地震の発生可能評価領域が、ランクごとに4つに色分けされており、発生確率が高い方から、Ⅲランク、Ⅱランク、Ⅰランク、Ⅹランクとなっている。紫のⅢランクは発生確率が高いとされ、30年以内の地震発生確率が26%以上となるランクである。次に赤のⅡランクは発生確率がやや高いとされ、30年以内の地震発生確率が3~26%未満となるランクである。そして、黄のⅠランクは30年以内の地震発生確率が3%未満となるランクである。過去の地震データが少なく、確率の評価が困難となる領域は、灰色のⅩランクとなり、地震発生確率が不明とされる。なおⅢランク、Ⅱランク、Ⅰランク、Ⅹランクのいずれも、すぐに地震が起こることが否定できないとされている点に注意が必要である。

北海道～東北～関東の太平洋側にある千島海溝、日本海溝、相模トラフで、また東海～四国～九州の太平洋側にある南海トラフで、発生の可能性が最も高い紫のⅢランクとなっている。これら海洋プレートが大陸プレートに沈み込んでいる海溝付近では、過去いくつにわたって津波をともし地震が発生してきており、例えば、近代以降だけでも、日本海溝では M9.0 の東北地方太平洋沖地震（2011）、M8.1 の昭和三陸地震（1933）、M8.2 の明治三陸地震（1896）、千島海溝では M8.0 の十勝沖地震（2003）、相模トラフでは M7.9 の大正関東地震（1923）、南海トラフでは、M8.0 の昭和南海地震（1946）、M7.9 の昭和東南海地震（1944）などが挙げられる<sup>(10)(11)</sup>。前項で述べた船舶の津波被害からも、将来的に巨大津波が襲来する可能性が極めて高い太平洋側の港湾において、船舶の津波防災は喫緊の課題であるといえる。

またランクとしては下がるものの、日本海東縁部の大陸プレートが衝突するひずみ集中帯でも地震発生の可能性が黄のⅠランク、赤のⅡランクとして評価されている。ここでは、M7.8 の北海

道南西沖地震（1993）, M7.7 の日本海中部地震（1983）によって津波が発生している<sup>(10)(11)</sup>ことから、太平洋側だけでなく、日本海側の港湾に対しても船舶の津波防災を検討する必要がある。

以上から、船舶の津波防災、減災対策は、日本全国の港湾に対して広く検討されるべきである。

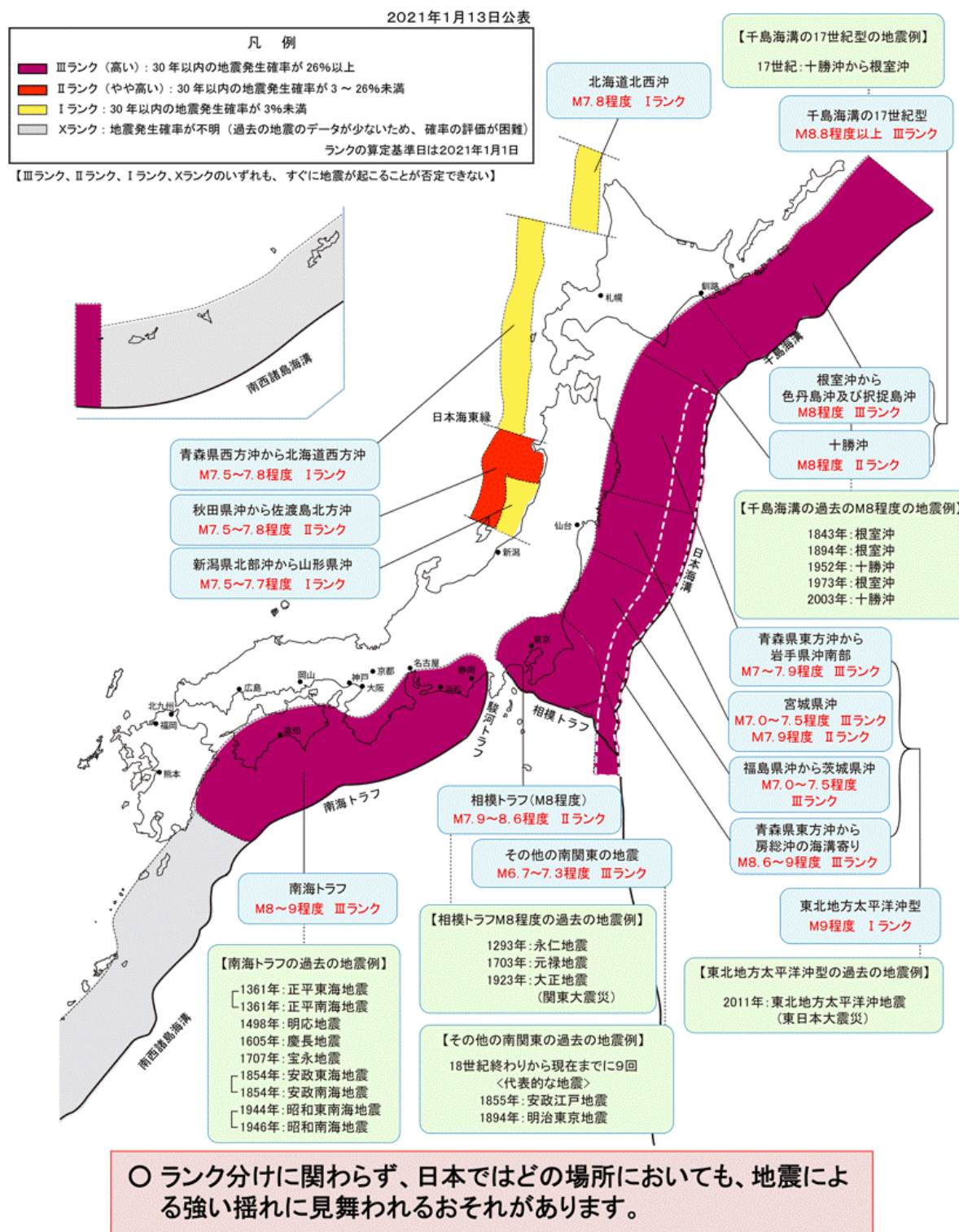


Fig. 1.1.6 Long-term evaluations of megathrust earthquake around Japan<sup>(9)</sup> (2021).

## 1.2 先行研究

Table 1.2.1 に、数値計算を評価手法とした船舶の津波問題に関する先行研究の一部を示す。津波被害予測および津波対策手法の提案に関する検討は、様々な教育機関、研究機関で行われているが、清水港や東京湾、大阪湾、東日本大震災で被災した港湾など、特定の地域、港湾に着目した研究が多い。これらは港湾ごとに特化した評価手法であり、当該研究から日本全体の港湾の津波被害を統一的に評価することは難しいといえる。先行研究で対象から外れている港湾を含めて評価するためにも、日本全体の港湾に広く適用でき、汎用性のある手法も必要である。また日本全国の港湾を広く対象とした検討として、海上保安庁海洋情報部は津波防災情報図<sup>(20)</sup>を作成しており、各海域、港湾内における水位変動および流速といった有用な情報を当該図から取得できるが、具体的に船舶に発生しうる津波被害や津波対策手法は示されていない。以上から、日本の各港湾における船舶の津波被害予測やそれに対してとりうるべき津波対策を示した十分な先行研究はないといえる。

そこで本造船学研究では日本全国における港湾の津波被害を統一的に評価するための手法として津波被害予測データベース<sup>(21)(22)</sup>を提案し、東日本大震災により被災した東日本側の 6 港湾と関東から西日本にかけての 17 港湾の計 23 港湾を対象として、岸壁係留船舶の係留索破断と岸壁への乗り揚げ被害について、統一した基準で定量的に評価した。そして、港湾ごとに評価された被害状況をまとめ、津波被害予測データベースを構築してきた。

Table 1.2.1 Previous research regarding vessels and tsunami by numerical calculation.

| 氏名                       | 所属   | 研究内容                       | 対象地域       | 主な評価手法                 |
|--------------------------|------|----------------------------|------------|------------------------|
| 増田・居駒ら <sup>(12)</sup>   | 日本大  | 海域津波ハザードマップの開発             | 清水港        | 津波伝播計算<br>個別要素法 (DEM)  |
| 日本海難防止協会 <sup>(13)</sup> |      | 係留・係駐限界の検討<br>緊急離散の検討      | 清水港        | 津波伝播計算<br>船体動揺シミュレーション |
| 米山ら <sup>(14)</sup>      | 港湾技研 | 津波が係留船舶、係留施設に与える影響を評価      | 清水港        | 津波伝播計算<br>船体動揺シミュレーション |
| 鳴原ら <sup>(15)</sup>      | 防衛大  | 船舶リスクマップの提案                | 東京湾        | 津波伝播計算<br>超過確率分布計算     |
| 増田ら <sup>(16)(17)</sup>  | 海洋大  | 増しもやい・浮体式津波対策用岸壁による防災対策の検討 | 特定しない      | 粒子法 (MPS 法)            |
| 榊原ら <sup>(18)</sup>      | 東海大  | 被災した係留船舶の挙動再現、定量的な被災状況の把握  | 東日本大震災被災港湾 | 津波伝播計算<br>船体動揺シミュレーション |
| 林・中田ら <sup>(19)</sup>    | 神戸大  | 津波マリンハザードとして津波渦の危険性を指摘     | 大阪湾        | 津波伝播計算                 |
| 海上保安庁 <sup>(20)</sup>    |      | 津波防災情報図の作成                 | 全国の港湾      | 津波伝播計算                 |

### 1.3 津波被害予測データベース(2020 年度作成)の課題点

前節でのべた津波被害予想データベース(2020 年度作成)の課題点を述べる。まず係留索の破断について、増田らにより提案された係留索破断チャート<sup>(23)</sup>をもとに判定している。このチャートは 3 次元 MPS 法によるシミュレーション結果から作成されているが、この検討における模擬津波は Fig. 1.3.1 に示すように、10 秒程度でピークを迎えて水位が下がるような非常に急峻な波形である。しかし、実際の津波波長は数 km~数百 km におよび、非常に周期の長い波である<sup>(10)</sup>ことから、その波形勾配はゆるやかであり、船体に津波が入射する時間はより長いと考えられる。津波被害予測データベース作成で実施された 2 次元 MPS 法による検討でも、同様に急峻な孤立波を模擬津波として採用しており、その結果、船体が一部岸壁に乗り揚げ後水域に落下する、おおきな Roll 回転運動が発生するなど、この急峻な波形に起因する現象が発生している。<sup>(21)(22)</sup>

またチャート作成時の 3 次元 MPS 法によるシミュレーションでは、係留索の条件に関して、簡易な線形ばねでモデル化している。常用荷重(破断荷重の 10~30%程度)の範囲内であれば、線形ばねとして見なすことができるが<sup>(24)</sup>、津波中のように破断をとまなう検討の場合、係留索の非線形特性を考慮してモデル化する必要がある。さらに一般的な合成繊維索としては破断時の伸び率と破断荷重が大きいナイロン索を想定し、その索径も 3,000DWT では 60mm, 10,000DWT では 100mm と実際よりも太い係留索で設定しているため、危険側の検討となっている可能性がある。

さらに、津波被害予測データベースには、各港湾で定量的に示された被害予測に対して、具体的にどういった対策をとればよいかという点に関しては検討されていない。この予測された津波被害をできる限り軽減し、港湾内における貴重な人命と財産を保護するために有効な対策案を具体的に提示するべきである。

以上の先行研究の課題点から、造波条件と係留条件に関して、より実現象に近いモデルで再検討した結果を津波被害予測データベースに反映するとともに、有効な津波対策についてもデータベースとしてまとめる必要がある。

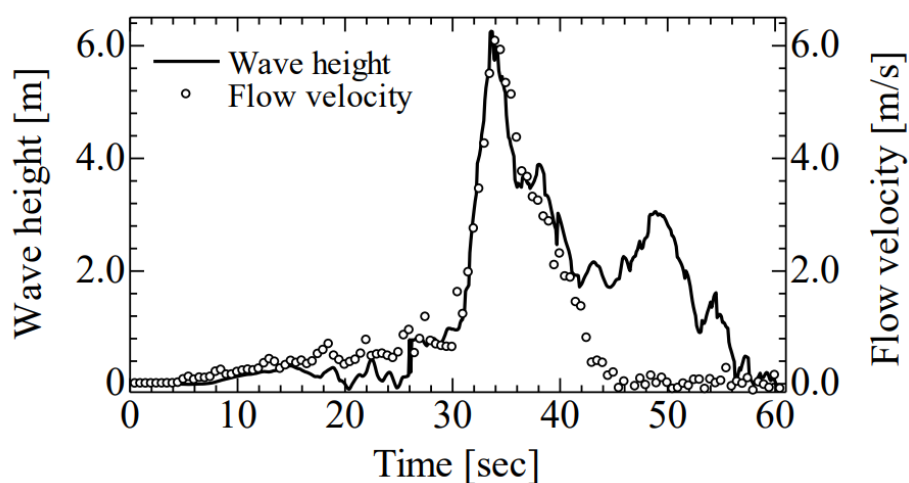


Fig. 1.3.1 Incident wave form (Masuda's research) <sup>(23)</sup>.

## 1.4 研究目的

前節で示した課題点から、本研究では、MPS 法プログラムにおける造波境界と係留モデルの改良を行い、当該改良モデルによる 3 次元 MPS 法津波シミュレーションから、先行研究で作成された岸壁係留船舶の津波被害予測データベースを改訂し、さらに、港湾・海運関係者が津波対策を検討する際に指針となる情報をとりまとめた津波防災対策データベースを構築することを研究目的とした。

以下に研究目的を達成するための 3 つの課題を示す。

- 【課題 1】 本造船学研究室所有の MPS 法プログラムを改良し、より津波実波形に近い模擬津波として流れを検討できる津波造波境界、および非線形な変位復元力特性を考慮可能な非線形係留モデルの開発を行う。
- 【課題 2】 【課題 1】で改良したモデル（以下改良モデル）による、岸壁係留船舶を対象とした津波シミュレーションの結果から、津波被害予測データベースを更新する。また従来の孤立波および線形ばねモデル（以下従来モデル）でも検討し、被害結果の差異を明らかにする。
- 【課題 3】 【課題 2】の結果をふまえて、具体的な津波対策を検討し、その有効性をとりまとめた津波防災対策データベースを作成する。

## 1.5 研究手法

津波被害予測データベースを作成した先行研究<sup>(21)(22)</sup>に引き続き、本研究でも MPS 法による数値シミュレーションによって検討を行う。MPS 法のような粒子法による流体解析は格子法に比べ比較的新しい計算手法であるが、非線形性の強い大変形を伴う問題に対して特にその効果を発揮し、商用コードによる実用的な解析<sup>(25)</sup>を含めて、すでに様々な分野で幅広く利用されている。船舶海洋工学の分野でも、船舶の津波問題<sup>(16)(17)</sup>だけでなく、海水の甲板上への打ち込み<sup>(26)</sup>、タンク内のスロッシング問題<sup>(27)</sup>など適用事例は多い。また本造船学研究室の MPS 法プログラムは増田らによって水槽実験や理論解との比較により計算精度の検証が行われており、その適用性は確認されている。従って既存の精度検証を終えたプログラムコードをベースに検討を進めることで、他の流体解析手法を新たに開発、適用する場合と比較してその妥当性確認に要する時間を大幅に短縮することができ、データベース構築に関する検討により注力することが可能となる。以上の理由から、本研究では MPS 法による数値シミュレーションを研究手法として採用した。MPS 法の詳細な説明は第 2 章で行う。

## 1.6 本論文の構成

本論文は、以下に示す全 5 章から構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、研究背景として、係留船舶の津波被災事例と将来的に発生するとされる海溝型地震の長期評価結果から、日本全体の港湾に係留されている船舶に対して津波防災・減災対策が必要であることを示した。そして近年の港湾内船舶の津波問題に関する先行研究、本造船学研究室で提案されている津波被害予測データベースについて述べ、その課題点を整理した。以上の研究背景、先行研究の課題点を踏まえて、本研究における目的を決定した。

第 2 章では、本研究手法である MPS 法の概要と、本研究室所有の MPS 法プログラムコードに対して実装されてきた改良点、【課題 1】に対して著者が整備した津波造波境界および非線形係留モデルについて説明した。

第 3 章では、【課題 2】に対して、改良モデルによる 3 次元 MPS 法による津波被害予測シミュレーションを岸壁係留船舶に対して実施し、この結果から、津波被害予測データベースの被害判定基準を更新した。また従来モデルによる検討も行い、モデルの違いが係留索破断と乗り揚げ被害結果に与える影響について考察した。

第 4 章では、【課題 3】に対して、第 3 章の検討結果をふまえて、具体的な津波対策として係留強化と浮体式津波対策用岸壁および深喫水型浮体式津波対策用岸壁について検討し、津波防災対策データベースとしてまとめた。

第 5 章では、本研究で得られた結論についてまとめ、今後の課題について述べた。

以上より、先行研究で作成された津波被害予測データベースを改訂するとともに、津波防災対策データベースについて提案・構築した。

## 第 2 章 MPS(Moving Particle Simulation)法

### 2.1 MPS 法の概要

本研究で用いた数値シミュレーション手法のひとつである MPS(Moving Particle Simulation)法<sup>(28)</sup><sup>(29)</sup>について概説する。東京大学の越塚らによって開発された MPS 法は、連続体を有限個の粒子によって表現し、連続体の挙動を粒子の運動によって計算する粒子法の一つである。粒子法には MPS 以外に、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法や格子ボルツマン法(LBM)があり、また広義には個別要素法(DEM)も含まれるとされる。粒子法は有限差分法、有限要素法、有限体積法などの格子法とは異なり、計算格子(メッシュ)を用いずに計算する手法であるため、格子法では計算が困難な大変形をとともう強非線形問題の解析を得意としている。

本章では、著者が実施したプログラムコード改良点だけでなく、改良点を説明するために必要な MPS 法の基礎理論についても述べていく。まず越塚によって公開された有償ソースコード<sup>(28)</sup>における離散化手法や計算アルゴリズムなどの MPS 法の基礎理論について 2.1~2.6 節にかけて述べ、次に本造船学研究室の MPS 法プログラムに対して実装されてきた改良点を 2.7 節で示す。そして最後に本研究で著者が改良した点について 2.8 節で説明する。

#### <MPS 法の名称について>

MPS 法は非圧縮性流体を対象とした半陰解法、SPH 法は圧縮性流体を対象とした陽解法として開発され、MPS 法の名称は半陰的アルゴリズムであることを意味して、Moving Particle Semi-implicit と表記されてきた。しかしながら、近年では半陰解法に基づく ISPH 法や GPU 高速並列計算に適合性が高い陽解法型の MPS 法も提案されているなど、両者の手法に陽解法、半陰解法の区別はなくなりつつあり、開発者の越塚は MPS 法を Moving Particle Simulation<sup>(30)</sup>と再定義している。本論文の記述もこの再定義後の表記に従っている。

### 2.2 支配方程式

非圧縮性流れの支配方程式は質量保存則である連続の式(2.2.1)と運動量保存則であるナビエ-ストークス方程式(2.2.2)である。粒子法では、他の流体シミュレーションと同様に、この 2 つの保存則に従って、粒子を移動させて流体シミュレーションを行う。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.2.1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2.2.2)$$

ここで、 $\rho$  は流体密度、 $t$  は時間、 $\mathbf{u}$  は速度ベクトル、 $P$  は圧力、 $\mathbf{g}$  は重力ベクトル、 $\nu$  は動粘性係数を表している。連続の式(2.2.1)はある単位体積の領域から流体が流出(または流入)すると、その領域内の流体の密度がどのように変化するかを意味している。MPS 法では、後述の圧力計算の際

にこの式を用いる。またナビエ-ストークス方程式(2.2.2)の左辺は速度ベクトルに対するラグランジュ微分で、流体とともに移動する視点からの時間微分、すなわち加速度ベクトルである。粒子法はラグランジュ法であり、ラグランジュ微分が時間微分項と移流項に分離されないため、移流項を計算する必要はない。右辺は第一項が圧力勾配項、第2項が粘性項、第3項が重力項である。これら3つの項から粒子の加速度ベクトルが求まり、粒子を移動させることができる。

## 2.3 粒子間相互作用モデル

前節の支配方程式には、ナブラ $\nabla$ やラプラシアン $\nabla^2$ という偏微分の演算子を含んでいる。従って計算機を用いて計算するためには、このような微分演算子に対して離散化が必要である。MPS法では、勾配、発散、ラプラシアンといったベクトル解析の微分演算子に対して、重み関数を利用した粒子間相互作用モデルを用意して、支配方程式を離散化する。

### 2.3.1 重み関数

重み関数 $w$ は式(2.3.1)のように計算される。ここで、 $r$ は粒子間距離、 $r_e$ は重み関数の影響半径であり、Fig. 2.3.1のように、他の粒子との距離が影響半径 $r_e$ より短い場合のみ粒子間で相互作用することになる。影響半径 $r_e$ は小さいほど相互作用する粒子の数が減るので計算時間が短くなるが、小さすぎると計算が不安定となる。越塚によれば、計算時間と計算の安定性から影響半径は粒子間距離の2~4倍とされる。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (2.3.1)$$

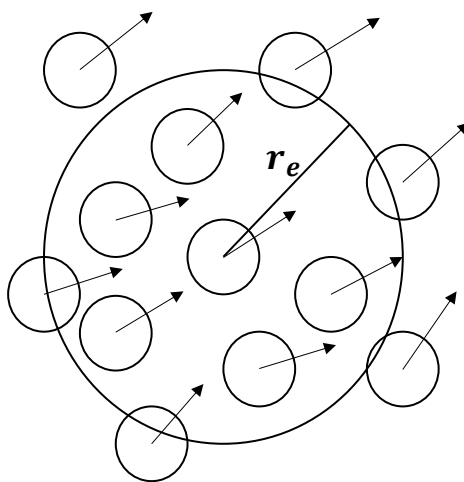


Fig. 2.3.1 Interaction between particles.

## 2.3.2 粒子数密度

粒子法では、流体密度の評価方法として粒子数密度が用いられる。粒子 $i$ およびその近傍粒子 $j$ の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ とすると、式(2.3.2)のように粒子 $i$ の位置における重み関数の和から粒子数密度は計算される。

非圧縮性流れでは、流体の密度は一定であるため、この粒子数密度も一定でなければならない。この一定となる粒子数密度の基準値 $n^0$ は、粒子が等間隔に配置されている初期粒子配置において十分内部にある粒子の粒子数密度を計算することで求め、解析中はこれを使い続ける。この時、自由表面近くの粒子の粒子数密度を基準値 $n^0$ とすると、表面近傍の粒子は外側に粒子がなく、粒子数密度が小さく計算されるため、正しくシミュレーションをすることができないことに注意が必要である。

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (2.3.2)$$

## 2.3.3 勾配モデル(グラディエントモデル)

粒子法では、任意の量 $\phi$ の勾配ベクトルを式(2.3.3)のように近似する。任意の量 $\phi$ として圧力 $P$ を適用し、式(2.3.3)の右辺の分母にある2乗の項をわけてかくと式(2.3.4)のようになる。右辺の総和記号の中の最初の係数である $(P_j - P_i)/|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|$ は、粒子 $i$ とその近傍粒子 $j$ の圧力の差 $(P_j - P_i)$ をその距離 $|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|$ で割った値であり、粒子 $i$ から近傍粒子 $j$ へ向かう方向における圧力の勾配をあらわす。2番目の係数 $(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)/|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|$ は相対位置ベクトルをその大きさを割ったものであり、粒子 $i$ から近傍粒子 $j$ へ向かう単位ベクトル(大きさ1の方向ベクトル)をあらわす。3番目の係数 $w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$ は重み関数である。

これらを理解したうえで、式(2.3.4)をみると、粒子法の勾配モデルは、粒子 $i$ の圧力をその近くの近傍粒子 $j$ の圧力と差分をとることで勾配ベクトルを求め、その勾配ベクトルを重み関数により平均(重み平均)するものであることがわかる。なお総和記号の手前の $d$ は空間の次元数である。粒子配置が直交する仮定のもと、重み平均を単純にとると、傾きが正しい値の $1/d$ となってしまうため次元数 $d$ をかける必要がある。実際の流体計算では粒子の位置は移動し、直交した粒子配置には必ずしもならないため、この粒子配置に起因する誤差が生じる。この誤差を改善する手法については2.7.5項で述べる。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (2.3.3)$$

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{(P_j - P_i)(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (2.3.4)$$

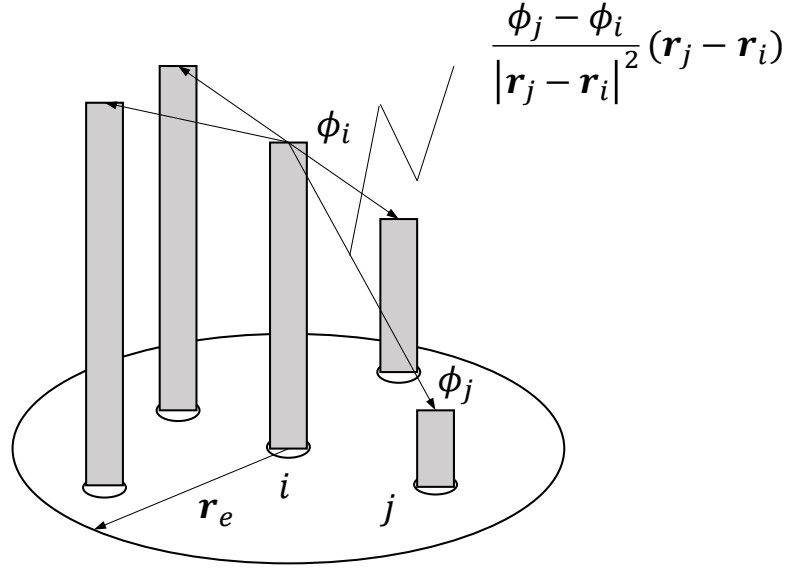


Fig. 2.3.2 Concept of gradient model.

## 2.3.4 発散モデル(ダイバージェンスモデル)

粒子法では、発散を式(2.3.5), のように近似する。(Fig. 2.3.3) 支配方程式である連続の式には流速の発散 $\nabla \cdot \mathbf{u}$ がふくまれているため、このモデルを適用する。このモデルを用いることで、圧力のポアソン方程式のソース項を求めることができる。

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{u} \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (2.3.5)$$

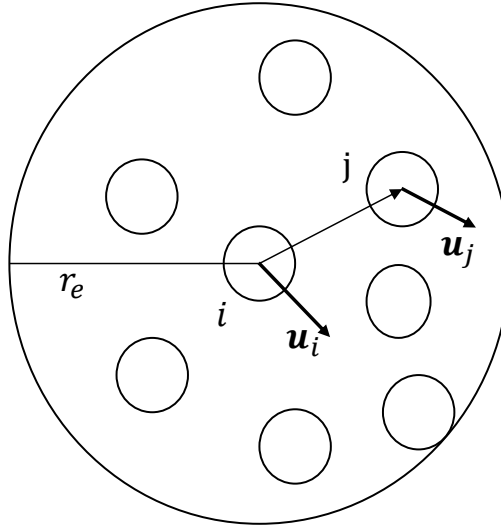


Fig. 2.3.3 Concept of divergence model.

### 2.3.5 ラプラスアンモデル

粒子法ではラプラスアンを式(2.3.6)のように近似する。これは Fig. 2.3.4 に示すように、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、式(2.3.7)に示すように、統計的な分散の増加を解析解と一致させるために係数 $\lambda$ を導入している。係数 $\lambda$ を具体的に求めるには、初期粒子配置で十分内部の粒子において計算したものを用い、解析中はこれを使いつづける。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)] \quad (2.3.6)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2 w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)}{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (2.3.7)$$

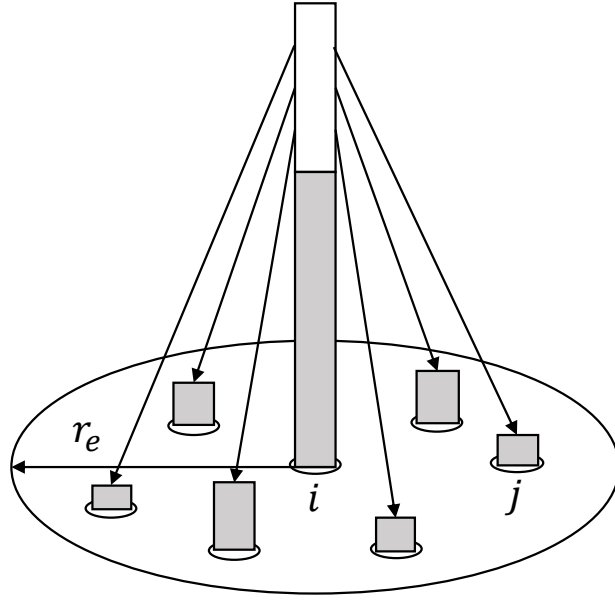


Fig. 2.3.4 Concept of laplacian model.

## 2.4 非圧縮性流れの計算アルゴリズム

### 2.4.1 半陰的アルゴリズム

アルゴリズムは全体として、時間進行の計算をくり返しなが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、時刻 $k$ における各粒子の位置、速度、圧力 $\mathbf{r}_i^k, \mathbf{u}_i^k, p_i^k$ がわかっているとして、新しい時刻 $k+1$ の値 $\mathbf{r}_i^{k+1}, \mathbf{u}_i^{k+1}, p_i^{k+1}$ 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。支配方程式では、連続の式とナビエ-ストークス方程式の圧力勾配項を陰に(時刻 $k+1$ の値で)、粘性項と重力項を陽に(時刻 $k$ の値で)計算する。

$$\left[ \frac{D\rho}{Dt} \right]^{k+1} = 0 \quad (2.4.1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = - \left[ \frac{1}{\rho} \nabla P \right]^{k+1} + [\nu \nabla^2 \mathbf{u}]^k + [\mathbf{g}]^k \quad (2.4.2)$$

式(2.4.1)と式(2.4.2)を次の手順で計算する。まず、陽的な部分から計算する。式(2.4.2)の粘性項と重力項を陽的に計算し、粒子の仮の速度 $\mathbf{u}^*$ と位置 $\mathbf{r}^*$ を得る。

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^k + \Delta t [\nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g}]^k \quad (2.4.3)$$

$$\mathbf{r}^* = \mathbf{r}^k + \Delta t \mathbf{u}^* \quad (2.4.4)$$

式(2.4.3)の右辺には時刻 $k$ の値しか用いられないため、代入するだけで仮の速度が求められる。  
 式(2.4.4)の右辺における仮の速度 $\mathbf{u}^*$ は式(2.4.3)ですでに得られているので、やはり代入するだけで  
 仮の位置 $\mathbf{r}^*$ が求められる。式(2.4.3)の右辺の粘性項にはラプラシアンが含まれており、ここに 2.3.5  
 項で示したラプラシアンモデル(式(2.3.6))を適用する。

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\mathbf{u}_j^k - \mathbf{u}_i^k) w(|\mathbf{r}_j^k - \mathbf{r}_i^k|)] \quad (2.4.5)$$

2.3.1 項に示したように、流体の密度は粒子数密度に比例している。そこで、連続の式(2.4.1)の密度  
 一定条件(密度の一定値 $\rho_0$ )は、粒子数密度一定条件といいかえてもよい。この一定にすべき粒子数  
 密度を $n^0$ とする。

陽的な部分の計算が終了した段階での粒子数密度を $n^*$ とすると、これは $n^0$ になっていない。そ  
 こで、次の陰的な部分で粒子数密度を $n^0$ にもどすことを考える。このとき、粒子の位置、速度、圧  
 力も修正され、その結果として新しい時刻 $k+1$ の値が確定するものとする。

$$n^0 = n^{k+1} = n^* + n' \quad (2.4.6)$$

$$\mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^* + \mathbf{u}' \quad (2.4.7)$$

$$\mathbf{r}^{k+1} = \mathbf{r}^* + \Delta t \mathbf{u}' \quad (2.4.8)$$

ここで、 $n'$ は粒子数密度の修正量、 $\mathbf{u}'$ は速度の修正量である。 $\mathbf{u}'$ は陰的な圧力勾配項によって生じ  
 るとする。

$$\mathbf{u}' = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \nabla P^{k+1} \quad (2.4.9)$$

速度の修正量と粒子数密度の修正量は、圧縮性流れの質量保存則

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.4.10)$$

で、左辺 2 項の $\rho$ を一定値 $\rho_0$ で近似すると

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.4.11)$$

流体の密度は粒子数密度に比例しているので、次のように書きかえられる。

$$\frac{1}{n^0} \frac{Dn}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.4.12)$$

ここで、粒子数密度の修正量 $n'$ は速度の修正量 $\mathbf{u}'$ によって生じるとする。同時に時間に対して離散化する。

$$\frac{n'}{n^0 \Delta t} + \nabla \cdot \mathbf{u}' = 0 \quad (2.4.13)$$

式(2.4.9)の発散をとり、式(2.4.13)に代入すると、次の圧力のポアソン方程式が得られる。

$$\nabla^2 P^{k+1} = -\frac{\rho_0}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \quad (2.4.14)$$

式(2.4.14)の左辺を各粒子位置においてラプラシアンモデル(式(2.3.6))で離散化すると

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{k+1} = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(P_j^{k+1} - P_i^{k+1}) w(|\mathbf{r}_j^* - \mathbf{r}_i^*|)] \quad (2.4.15)$$

となり、未知数 $P_i^{k+1}$ に対する連立 1 次方程式が得られる。ただし、重み関数の計算に必要な粒子の座標には、陽的な段階が終了した時点での値(\*)を用いる。この連立 1 次方程式を解けば、新しい時刻 $k+1$ の圧力が求まる。連立 1 次方程式の解法として、ここでは CG(Conjugate Gradient)法あるいは ICCG(Incomplete Cholesky Decomposition Gradient)法を使うことができる。この圧力を式(2.4.9)に代入すると速度の修正量が得られ、さらにその結果を式(2.4.7)と式(2.4.8)に代入すると、新しい時刻における粒子の速度および位置が確定する。

式(2.4.9)の圧力勾配項の計算では右辺に勾配演算子があり、ここに 2.3.3 項で説明した勾配モデルを用いるが、数値安定性のため、式(2.3.3)を少し修正した次の式を使う。

$$\langle \nabla P \rangle_i^{k+1} = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{P_j^{k+1} - \hat{P}_i^{k+1}}{|\mathbf{r}_j^* - \mathbf{r}_i^*|^2} (\mathbf{r}_j^* - \mathbf{r}_i^*) w(|\mathbf{r}_j^* - \mathbf{r}_i^*|) \right] \quad (2.4.16)$$

ここで、 $\hat{P}_i$ は粒子 $i$ の圧力 $P_i$ と、その近傍の複数の粒子 $j$ における圧力 $P_j$ の中の最低値とする。

$$\hat{P}_i = \min_{j \in J} (P_i, P_j), \quad J = \{j: w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \neq 0\} \quad (2.4.17)$$

式(2.4.16)は次に式が満たされていれば、式(2.3.3)と等しくなる。

$$\mathbf{0} = \sum_{j \neq i} \left[ \frac{1}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (2.4.18)$$

これは、粒子 $i$ の近傍で他の粒子が均等に配置されている場合に成立する。

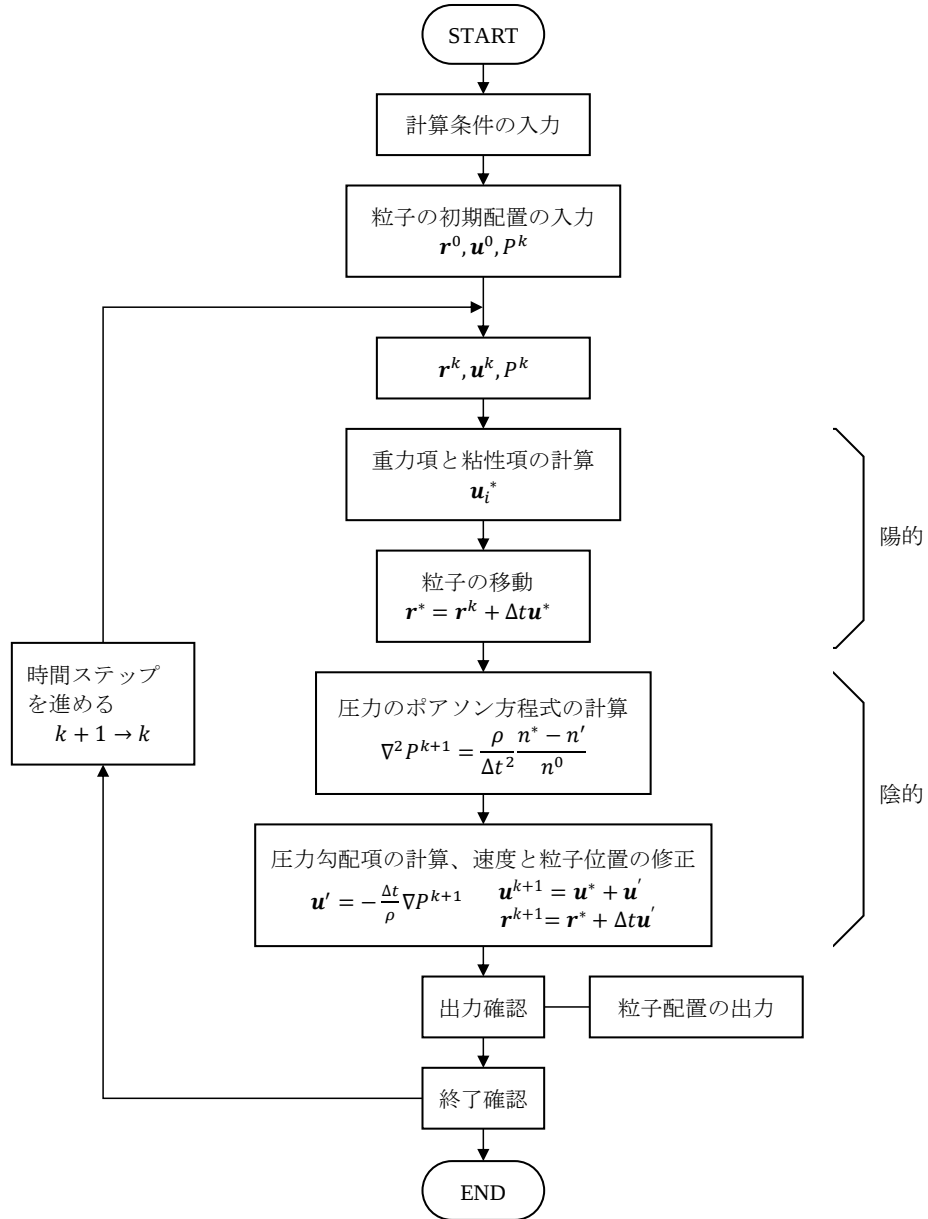


Fig. 2.4.1 Calculation algorithm of MPS method (Semi-implicit).

## 2.4.2 影響半径の設定

重み関数の非ゼロ領域の半径を与えるパラメータ $r_e$ の設定については、越塚らは  $2.1l_0 \sim 4.1l_0$  程度の値を推奨しており、粒子数密度および勾配モデルの計算では  $2.1l_0$ 、ラプラシアンモデルでは

3.1 $l_0$ をよく用いている。ここで $l_0$ は初期粒子間距離（粒子径）である。大きめの影響半径とすることで計算の安定性が向上するが、特に 3 次元計算の場合、大きすぎる影響半径を用いると計算量が大幅に増えるため、計算時間の増大につながる。越塚らは、3 次元計算では近傍粒子の数が多くなるため 2 次元計算より小さな影響半径を用いても安定して計算できる場合が多いと述べている。

本研究における 3 次元計算では、これらの理由を考慮して影響半径の設定は、粒子数密度、勾配モデル、ラプラシアンモデルいずれも 2.1 $l_0$ とした。

## 2.4.3 時間刻み幅の設定

数値安定性を保つため、時間刻み幅 $\Delta t$ はクーラン数の制限として式(2.4.19)を満たすように十分小さな値を設定する。ここで $l_0$ は初期粒子間距離、 $u_{max}$ は速度の最大値、 $C_{max}$ はクーラン数の上限値であり、経験的に 0.2 が用いられる。

本研究室のプログラムコードでは、時間ステップごとに式(2.4.19)を計算して、時間刻み幅 $\Delta t$ を自動的に設定するか、または任意の時間刻み幅 $\Delta t$ を固定して設定する。本研究の粒子間距離 1m（実スケール）の検討では、時間刻み幅 $\Delta t$ を $5.0 \times 10^{-3}$ とし、固定して設定した。この場合、式(2.4.19)から $u_{max}$ は 40m/s となるため、津波問題に対して十分な数値安定性を確保した設定となっている。

$$\Delta t = \frac{l_0 C_{max}}{u_{max}} \quad (2.4.19)$$

## 2.5 境界条件

### 2.5.1 自由表面条件

MPS 法では自由表面の判定条件にも粒子数密度を用いる。自由表面の外側には粒子が配置されていないので、自由表面上の粒子は粒子密度が低下する(Fig. 2.5.1)。そこで、半陰的アルゴリズムにおいて陽的な計算が終了時点で式(2.5.1)を満たす粒子は自由表面上に存在すると判定する。ここで、 $\beta$ には 1.0 未満の値を用いる。自由表面上に存在すると判定された粒子では、圧力のポアソン方程式を解く際に $P_i^{k+1} = 0$ と値を固定する。これはディリクレ境界条件と呼ばれる境界条件を設定したことになる。越塚らの研究から、 $\beta = 0.95$  あるいは 0.97 程度の値がよい。

$$n_i^* < \beta n^0 \quad (2.5.1)$$

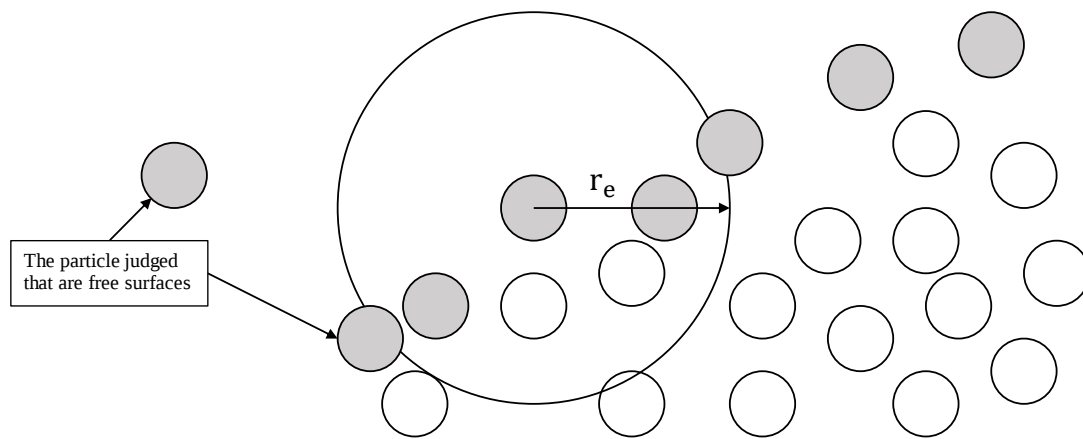


Fig. 2.5.1 Free surface boundary.

## 2.5.2 壁境界条件

壁境界には座標を固定した壁粒子を配置する(Fig. 2.5.2)。壁粒子には 2 種類を用意し、流体粒子と接する最内側では圧力を計算し、外側では圧力を計算しないようにする。最内側で圧力を計算する壁粒子では、流体粒子とまったく同じように粒子密度を計算する。そのため、もし、その外側にも壁粒子が存在しないと、粒子密度が低下し、2.5.1 項で説明した条件により自由表面と判定されてしまう。そこで、圧力を計算する内側の壁粒子における重み関数の広がり範囲まで、さらに外側にも壁粒子を配置しなければならない。これによって、壁粒子に何層必要かが決まる。重み関数の半径  $r_e$  を粒子間距離  $l_0$  の 2.1 倍とすると、圧力を計算しない外側の壁粒子には 2 層が必要になる。

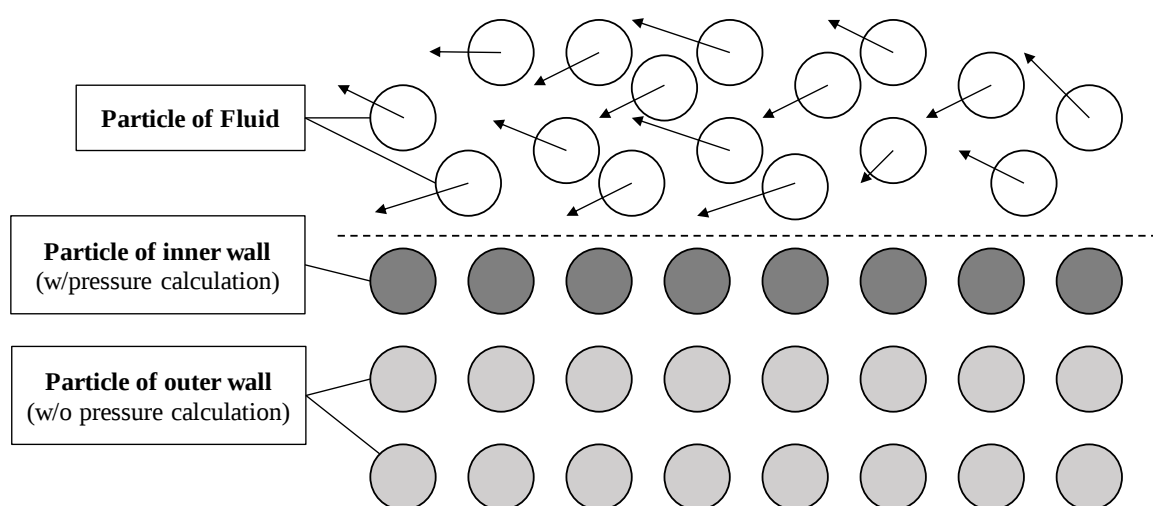


Fig. 2.5.2 Wall boundary.

## 2.6 剛体運動

1 個の固体を複数の粒子で表現し、流体と相互作用させつつ剛体として運動させる。剛体は変形しない固体のことであり、1 個の物体として並進運動と回転運動のみが許される。2 次元では、1 個の剛体は並進運動に 2 自由度、回転運動に 1 自由度をもつ。MPS 法では流体と剛体の相互作用として 2 次元空間で次のようにモデル化する。

$N$  個の粒子で表された剛体の重心の座標を  $\mathbf{r}_g$ 、慣性モーメントを  $I$  として式(2.6.1)、式(2.6.2)のように計算する。

$$\mathbf{r}_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \quad (2.6.1)$$

$$I = \sum_{i=1}^N m |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g|^2 \quad (2.6.2)$$

ただし、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。

流体の中に 1 個の剛体があり、流れと相互作用することを想定する。相互作用の強さはあまり大きくないと仮定し、非圧縮性流れの半陰的計算アルゴリズムの中で陽的に相互作用させるものとする。これは弱連成と呼ばれる。まず第 1 に、各時間ステップにおいて、流体粒子も剛体粒子も区別することなく非圧縮性流れの計算をおこない、新しい時刻  $k+1$  の速度  $\mathbf{u}_i^{k+1}$  と座標  $\mathbf{r}_i^{k+1}$  を求める。こうすると、剛体粒子も流体粒子と同様に運動するので、剛体粒子の相対的な位置関係が変化してしまう。ただし、Fig. 2.6.1(a)に示すように、クーラン条件より時間刻み幅をあまり大きくとってないので、変化は余り大きくない。

次に、Fig. 2.6.1(b)のように、剛体粒子間の相対位置をもとの形状のものにもどす。ただし、剛体の重心の座標変化量  $\mathbf{r}_g'$  と、回転角変化量（時計回り） $\theta'$  は保たれるようにする。すなわち、

$$\hat{\mathbf{r}}_i' = \hat{\mathbf{r}}_i^{k+1} - \mathbf{r}_i^k \quad (2.6.3)$$

$$\mathbf{r}_g^{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{r}}_i^{k+1} \quad (2.6.4)$$

$$\mathbf{r}_g' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{r}}_i' \quad (2.6.5)$$

$$\theta' = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m \mathbf{r}_i' \times (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_g^{k+1}) \quad (2.6.6)$$

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}'_g + \begin{bmatrix} \cos\theta' - 1 & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' - 1 \end{bmatrix} (\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_g^{k+1}) \quad (2.6.7)$$

$$\mathbf{u}_i^{k+1} = \frac{\mathbf{r}_i^k}{\Delta t} \quad (2.6.8)$$

$$\mathbf{r}_i^{k+1} = \mathbf{r}_i^k + \mathbf{r}'_i \quad (2.6.9)$$

とする。剛体粒子の位置の修正が終了したら次の時間ステップに進む。

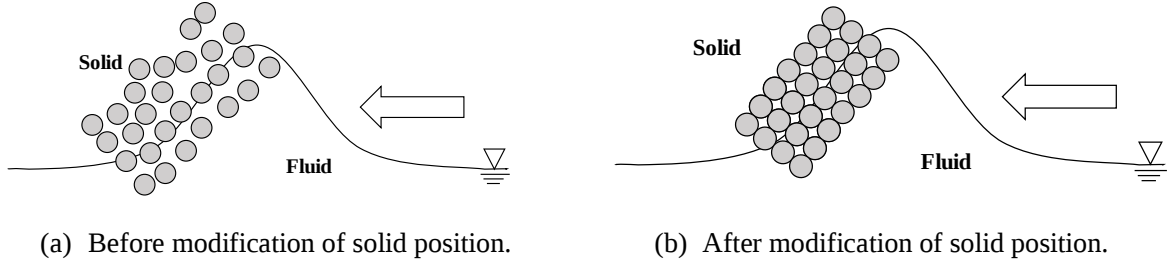


Fig. 2.6.1 Concept of solid calculation.

2次元では回転角と角速度の自由度が1であったものが、3次元では自由度が3になる。しかも回転角は非線形で、その記述方法にはオイラー角、クォータニオン(オイラーパラメータ)、回転行列の3種類がある。本MPSプログラムでは、クォータニオンにより3次元運動を表現している。

クォータニオンは4つの要素からなるベクトルであり、

$$\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z, s) \quad (2.6.10)$$

と記される。3次元の回転は回転軸 $(v_x, v_y, v_z)$ によって反時計回りに $\theta$ 回転することで一般的に表現することができ、クォータニオンとは次の関係になる。(Fig. 2.6.2)

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= (q_x, q_y, q_z, s) \\ &= \left( v_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), v_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), v_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \end{aligned} \quad (2.6.11)$$

回転ベクトルは単位ベクトルであるとして、

$$1 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (2.6.12)$$

の条件を付加する。これは、

$$1 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 + s^2 \quad (2.6.13)$$

と書いても同じである。クォータニオンは4つの値をもつが、式(2.6.12)あるいは式(2.6.13)の条件

がつくことにより，自由度は3になる。

2次元における回転行列では，

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ij} & -\sin \theta_{ij} \\ \sin \theta_{ij} & \cos \theta_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.6.14)$$

を用いるが，3次元における回転行列とクォータニオンの関係は次のようになる。

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2q_y^2 - 2q_z^2 & 2q_xq_y - 2sq_z & 2q_xq_z + 2sq_y \\ 2q_xq_y + 2sq_z & 1 - 2q_x^2 - 2q_z^2 & 2q_yq_z - 2sq_x \\ 2q_xq_z - 2sq_y & 2q_yq_z + 2sq_x & 1 - 2q_x^2 - 2q_y^2 \end{bmatrix} \quad (2.6.15)$$

ここで問題となるのは，運動量保存則を満たすために，粒子 $ij$ 間の相対変位を粒子 $i$ と粒子 $j$ に対して対象にしなければならないことである。2次元では

$$\theta_{ij} = \frac{\theta_i + \theta_j}{2} \quad (2.6.16)$$

のように粒子 $i$ と $j$ の角度を平均してそれを回転行列の計算に用いればよいが，クォータニオンでは各成分を単純に平均すると式(2.6.12)が満たされなくなってしまう。そこで，相対変位を求める。

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{r}_{ij} - R\mathbf{r}_{ij}^0 \quad (2.6.17)$$

式(2.6.17)の計算を粒子 $i$ のクォータニオン $\mathbf{q}_i$ と粒子 $j$ のクォータニオン $\mathbf{q}_j$ に対してそれぞれおこなった後，得られた相対変位を平均する。

$$\mathbf{u}_{ij} = \frac{1}{2}[(\mathbf{r}_{ij} - R(\mathbf{q}_i)\mathbf{r}_{ij}^0) + (\mathbf{r}_{ij} - R(\mathbf{q}_j)\mathbf{r}_{ij}^0)] \quad (2.6.18)$$

次に 3 次元における回転角の更新について考える。時刻 $k$ から $k+1$ までにおける角速度 $\omega$ と回転角 $q$ を求めると次の式(2.6.19)と式(2.6.20)が得られる。

$$\omega_i^{k+1} = \omega_i^k + \Delta t \left[ \frac{\partial \omega_i}{\partial t} \right]^k \quad (2.6.19)$$

$$q_i^{k+1} = q(q_i^k, \Delta t \omega_i^{k+1}) \quad (2.6.20)$$

これら式(2.6.19), (2.6.20)から得られる角速度ベクトルから回転軸ベクトルと回転角度を計算する。

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = (v_x^{k+1}, v_y^{k+1}, v_z^{k+1})_i \quad (2.6.21)$$

$$= \frac{1}{|\boldsymbol{\omega}_i^{k+1}|} (\omega_x^{k+1}, \omega_y^{k+1}, \omega_z^{k+1})_i$$

$$\theta_i^{k+1} = \Delta t |\boldsymbol{\omega}_i^{k+1}| \quad (2.6.22)$$

これらを用いてクォータニオンの変化 $\mathbf{q}'$ を計算する。以下、下添字 $i$ を省略する。

$$\dot{\mathbf{q}} = (\dot{q}_x, \dot{q}_y, \dot{q}_z, \dot{s})$$

$$= \left( v_x^{k+1} \sin\left(\frac{\theta^{k+1}}{2}\right), v_y^{k+1} \sin\left(\frac{\theta^{k+1}}{2}\right), v_z^{k+1} \sin\left(\frac{\theta^{k+1}}{2}\right), \cos\left(\frac{\theta^{k+1}}{2}\right) \right) \quad (2.6.23)$$

これを式(2.6.20)に当てはめると次の式(2.6.24)となる。

$$\mathbf{q}^{k+1} = \begin{pmatrix} q_x^{k+1} \\ q_y^{k+1} \\ q_z^{k+1} \\ s^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{s}q_x^k + \dot{q}_xs^k + \dot{q}_yq_z^k - \dot{q}_zq_y^k \\ \dot{s}q_y^k + \dot{q}_ys^k + \dot{q}_zq_x^k - \dot{q}_xq_z^k \\ \dot{s}q_z^k + \dot{q}_zs^k + \dot{q}_xq_y^k - \dot{q}_yq_x^k \\ \dot{s}s^k - \dot{q}_xq_x^k - \dot{q}_yq_y^k - \dot{q}_zq_z^k \end{pmatrix} \quad (2.6.24)$$

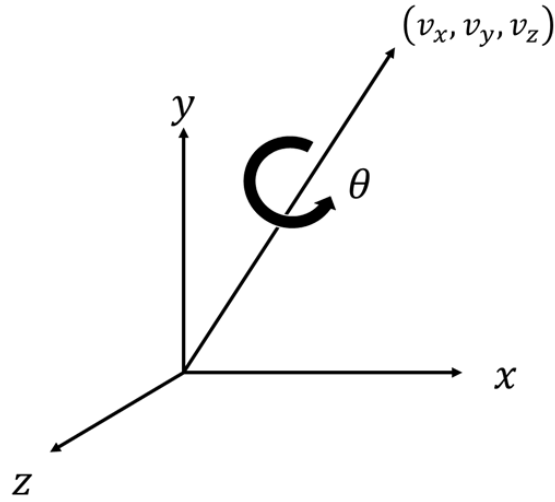


Fig. 2.6.2 Concept of quaternion.

## 2.7 本研究室 MPS 法プログラムの改良点

本研究で用いた造船学研究室所有の MPS プログラムは、前述の MPS 法の基本的なアルゴリズムをベースとして、増田が浮体の挙動解析に適用できるよう独自に開発したものである。さらに本研究室において様々な改良がなされている。以下に主な改良点を述べる。

### 2.7.1 数値計算の高速化

MPS 法では、各粒子の位置が更新されるごとに、影響半径内の近傍粒子との相互作用を計算する必要がある。近傍粒子を探索する場合、お互いの粒子間の距離を計算して、影響半径 $r_e$ よりも小さければ、影響半径 $r_e$ 内であると判定する。このとき、各粒子が解析領域内すべての粒子との距離を計算すると、その計算量は総粒子数 $N$ に対して、 $N^2$ に比例して大きくなるため、粒子数が増えるとその計算時間は爆発的に大きくなる。そこで、本研究室のプログラムコードはセル分割法による高速化処理が加えられ、3次元の大規模計算を可能としている。

Fig. 2.7.1 に示すように計算領域を格子状の計算領域（セル）に分割して、各粒子がどのセルに入っているかあらかじめ登録することで、ある粒子 $i$ の近傍粒子を探索する場合、2次元計算の場合は、その粒子 $i$ を含むセルとそのセルの周囲8セルの計9セルに含まれる粒子、3次元の場合は粒子 $i$ を含むセルとそのセルの周囲26セルの計27セルに含まれる粒子とだけ距離計算を行えばよく、探索する近傍粒子数を限定できる。これにより、大幅な計算時間の短縮を実現している。

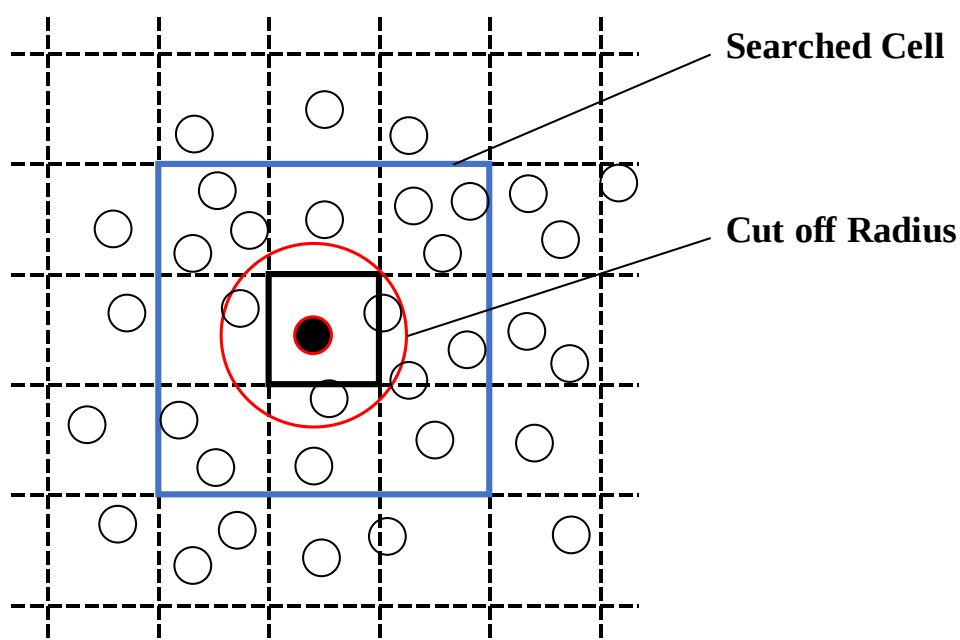


Fig. 2.7.1 Schematic diagram of domain decomposition.

## 2.7.2 造波境界

本 MPS 法プログラムでは、造波境界として造波板を再現し、ピストン式造波板のように動作するピストン式造波境界と、流入流出機能を持つ流入・流出境界の 2 種類がある。造波境界の粒子（以下造波板粒子）は壁粒子に移動させる処理を加えたもので、半陰的なアルゴリズムにおいて、陽的な計算の際に速度が与えられる。これにより造波板粒子の周囲にある水粒子に圧力勾配項の計算が反映されて、水粒子は押し出されることになる。この速度の与え方により、規則波や孤立波を造波することができる。壁境界、ダミー壁境界と同様に、造波境界の外側に粒子を十分配置しないと、粒子数密度が低下して自由表面の判定とされ、水粒子を跳ね返すことができなくなる。本研究では、影響半径を粒子間距離の 2.1 倍としているため、造波境界は 3 層以上必要である。

流入・流出境界は前述の造波板粒子に以下の処理を加えることで再現している。流入境界の場合、Fig. 2.7.2 に示すように、まず(1)流入境界粒子に水平方向速度 $V_x$ を与えて、初期位置から毎ステップごとに $V_x \times \Delta t$ だけ、水粒子側に進行させていく。(2)流入境界粒子の進行距離が 1 粒子(初期粒子間距離 $l_0$ )以上となると、任意の高さまでの、流体粒子側一層の流入境界粒子の位置（赤枠）に新しく水粒子を発生させ、(3) それと同時に造波板粒子を初期位置に戻す。これを繰り返すことで水粒子を流入させている。水粒子を発生させるときは、赤枠の粒子をコピーして、粒子の種類番号を造波板粒子から水粒子の番号に変え、粒子を格納している配列に加えればよい。この配列のメモリは流入粒子数を考慮して、初期の総粒子数よりも多く動的に確保しておく必要がある。

流出境界の場合は、Fig. 2.7.3 に示すように、流出境界から $\gamma \times l_0$ の距離内にある粒子を GHOST 粒子（計算に関与しない粒子）とすることで、水粒子を流出させている。なお流出境界は移動せず、固定としている。チューニングパラメータ $\gamma$ により流出の速度を調整する。 $\gamma$ が小さすぎるとスムーズに流出していかず、流出境界から反射波が発生してしまう。また $\gamma$ が大きすぎると、流出に対して流入が追い付かず、水柱崩壊が発生してしまう。計算領域の長さや流入速度から、 $\gamma$ は適切に設定する必要がある。本研究では、 $\gamma$ は 0.95 としている。

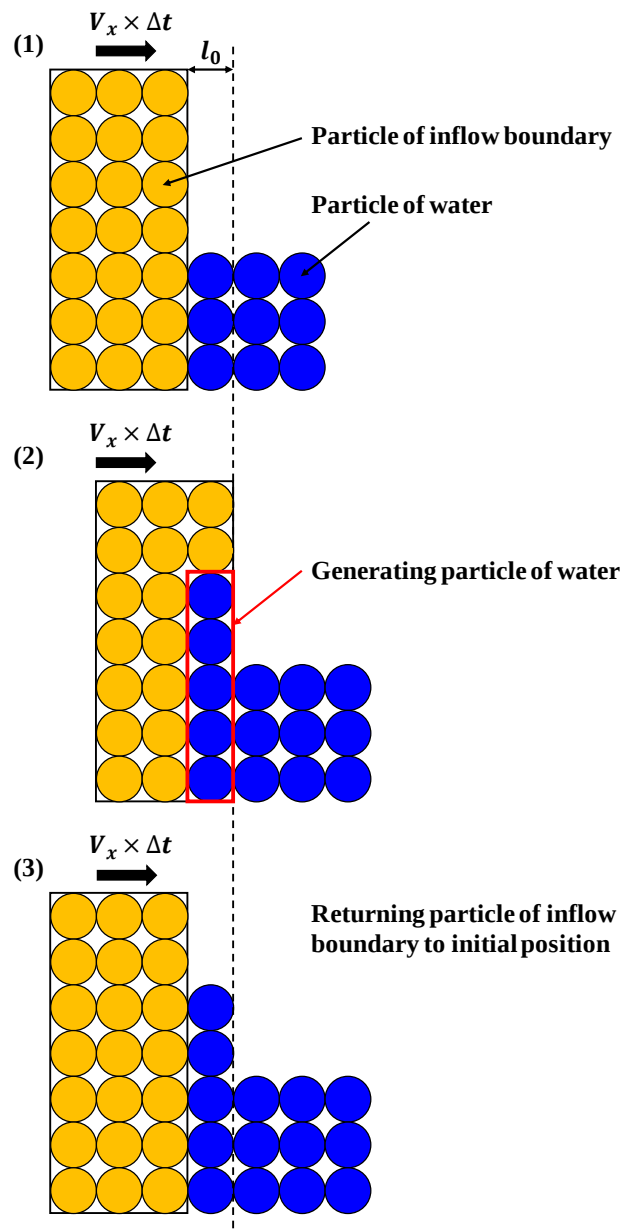


Fig. 2.7.2 Inflow boundary.

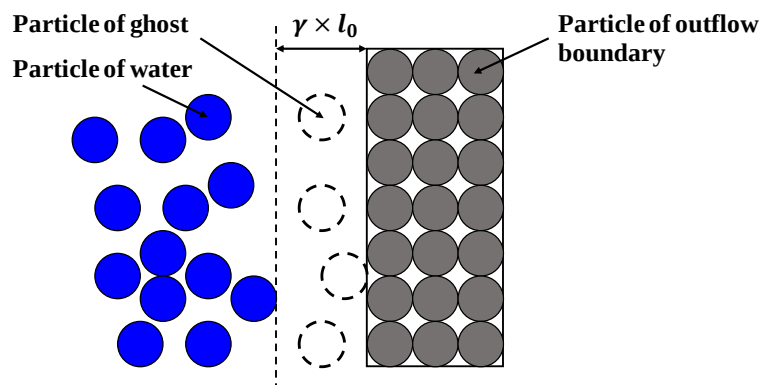


Fig. 2.7.3 Outflow boundary.

### 2.7.3 係留モデル

係留モデルは、係留索を模擬した拘束条件を 2 点間に作用させる線形ばね条件として表現している。Fig. 2.7.4 に示すように、船体フェアリーダー $F(x_f, y_f, z_f)$ と岸壁ビット $B(x_b, y_b, z_b)$ 間に作用する係留力 $\mathbf{T}$ は式(2.7.1), 式(2.7.2)のように、係留索のばね定数 $k$ , 自然長を $L_0$ , 2 点間距離 $L$ によって計算される。そして、式(2.7.3)に示すように、MPS 法の半陰的なアルゴリズムにおける新しい時刻 $n + 1$ における陰的な圧力勾配項 $\nabla P^{k+1}$ によって生じる速度修正量 $\mathbf{u}$ を計算する運動方程式にこの係留力 $\mathbf{T}$ を付加することで係留状態をモデル化している。 $m_i$ は係留する物体を構成する一つの粒子 $i$ の質量であり、 $\rho_0$ は一定値の密度である。

3次元計算の場合、プログラム上では、船体フェアリーダーに作用する係留力 $\mathbf{T}$ は、式(2.7.4)のように係留点間座標から xyz 方向に分力して、方向成分ごとに速度修正量を計算している。ここで、 $\theta$ はビットからフェアリーダーをみあげた仰角、 $\phi$ は係留索と岸壁法線 (x 軸方向) のなす角度である。なお $\sin \theta, \cos \theta, \sin \phi, \cos \phi$ と係留点座標との関係は Fig. 2.7.4 から幾何学的に式(2.7.5)のようになる。

$$|\mathbf{T}| = k(L - L_0) \quad (2.7.1)$$

$$L = \sqrt{(x_b - x_f)^2 + (y_b - y_f)^2 + (z_b - z_f)^2} \quad (2.7.2)$$

$$\mathbf{u}_i = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \nabla P_i^{k+1} + \frac{\Delta t}{m_i} \mathbf{T} \quad (2.7.3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} |\mathbf{T}| \cos \theta \cos \phi \\ |\mathbf{T}| \cos \theta \sin \phi \\ |\mathbf{T}| \sin \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} |\mathbf{T}| \frac{x_b - x_f}{L} \\ |\mathbf{T}| \frac{y_b - y_f}{L} \\ |\mathbf{T}| \frac{z_b - z_f}{L} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.7.4)$$

$$\begin{aligned}
\sin \theta &= \frac{z_b - z_f}{L} \\
\cos \theta &= \frac{\sqrt{(x_b - x_f)^2 + (y_b - y_f)^2}}{L} \\
\sin \phi &= \frac{y_b - y_f}{\sqrt{(x_b - x_f)^2 + (y_b - y_f)^2}} \\
\cos \phi &= \frac{x_b - x_f}{\sqrt{(x_b - x_f)^2 + (y_b - y_f)^2}}
\end{aligned} \tag{2.7.5}$$

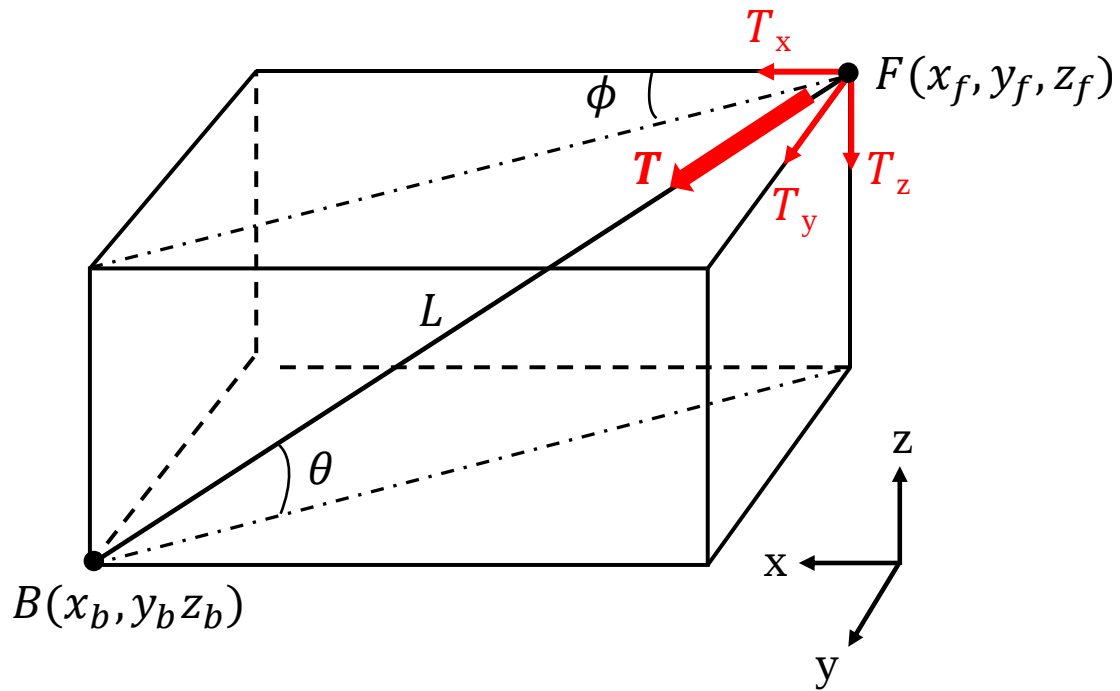


Fig. 2.7.4 Mooring lines model of three dimensions.

## 2.7.4 圧力振動低減モデル

前述のように、MPS 法では、圧力のポアソン方程式から未知数 $P_i^{k+1}$ に対する連立 1 次方程式を解くことで圧力を求めている。式に示すポアソン方程式では、その右辺が、粒子配置が不規則になることで時間的および空間的に大きく振動する、圧力振動の問題があった。そこで、笹原ら<sup>(31)</sup>により式(2.7.6)に示す、新井の<sup>(32)</sup>非圧縮条件に粒子数密度一定と速度の発散がゼロの条件を組み合わせた、圧力振動低減モデルが導入されている。

ここで、 $n^*$ および $\mathbf{u}_i^*$ は陽的計算後の仮の粒子数密度および粒子速度ベクトルである。また $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ は安定化のための係数であり、笹原らの検討から 0.2 を用いる。

$$\nabla^2 P_i = \alpha \left( \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^0 - n_i^*}{n^0} \right) + (1 - \alpha) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \quad (2.7.6)$$

## 2.7.5 進行波波高減衰低減モデル

前述の MPS 法の勾配モデルは、任意の時刻において近傍の粒子が均等に、直交した配置であることを仮定している。しかし、実際の流体計算では粒子の位置は移動し、必ずしも均等な配置になるとは限らない。この粒子配置に起因する誤差により進行波の波高が減衰する問題があった。そこで、笹原ら<sup>(31)</sup>は式(2.7.7)に示す、入部ら<sup>(33)</sup>の提案した近傍の粒子配置に依存しない高精度勾配モデルを導入している。

ここで、 $\otimes$ はテンソル積をあらわす。なお式(2.7.7)の右辺の逆行列は、近傍粒子が均等に、直交した配置である場合は、行列式がゼロとなる。それを防ぐために従来の手法と同じく次元数 $d$ を与える。

$$\begin{aligned} \langle \nabla \phi \rangle_i &= \left[ \frac{1}{n^0} \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} \otimes \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} \right]^{-1} \\ &\quad \left[ \frac{1}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \end{aligned} \quad (2.7.7)$$

## 2.8 本研究におけるプログラムコード改良点

より高精度な係留船舶の津波シミュレーションを実施するため、津波造波境界（流入・流出境界）と非線形係留モデルを導入するためプログラムコードの改良を行った。以下に述べる改良によって、より津波波形に近い模擬津波として流れを 3 次元で長時間にわたり解析できるようになり、また係留索の非線形な変位復元力特性を考慮できるようになった。

### 2.8.1 津波造波境界(流入・流出境界)

2.7.2 項で示したように流入境界は水粒子を生成するたびに新しくメモリを使用するため、計算開始時に流入粒子数分の増加を考慮した総粒子数を malloc 関数により動的に確保しておく必要がある。このとき、3 次元計算で解析時間が長いシミュレーションの場合、使用メモリが大幅に増大していき、計算コストが膨大となる。そこで流入させる際は、流出したゴースト粒子を再利用するようにプログラムコードを改良した。具体的には、時間ステップごとにあらかじめゴースト粒子を探索してその粒子番号（グリッドファイルの粒子データで、上から 0 スタートで番号をつけたときの順番）を配列に格納しておく。そして流入させるときは、まずは探索しておいたゴースト粒子を粒子番号の若い順に再利用していき、ゴースト粒子を使いきると動的に確保しているメモリを使用するように処理を加えている。この改良により使用メモリの増大が抑制され、長時間の計算が可能となった。なおゴースト粒子を係留点として指定した場合は、流入粒子として再利用しないようにしている。

流出境界では、近傍の粒子をゴースト化することで水粒子を流出している。このとき、流入境界に与える流速データが小さい場合、流入に対して流出が大きくなるため、入射波が船体に到達する前に、計算領域全体の水位が低下してしまう。これを防ぐため、流出境界から 10 粒子の位置で時間ステップごとに水位を計測し、初期状態での水位を上回った場合のみ、流出境界近傍の水粒子を流出させるように判定を加えた。この改良により入射波が流出境界に到達するまでは、流出が生じないため、計算領域の水位を維持することができるようになった。

以上の流入・流出境界の改良により、模擬津波として流れを造波し、3 次元での大規模計算を長時間にわたってシミュレーション可能な津波再現数値水槽を整備することができた。

#### <流入境界の水平速度データの与え方>

本研究では、式(2.8.1)および式(2.8.2)に示すように、ハイパボリックタンジェントの関数を微分して、時間刻み幅 $\Delta t$ ごとの水平流速データ $V_x(t)$ を作成し、これを流入境界に与えて造波している。この式は安藤ら<sup>(34)</sup>の水理模型実験で孤立波を造波する場合の造波板制御に用いられたものであり、 $X(t)$ は造波板の水平方向変位、 $ST$ は造波板のストローク長さ、 $T$ は造波板が動き始めてから止まるまでの時間である。この $ST$ および $T$ に任意の値をいれることで様々な波を造波できる。例えば、波高を大きくしたい場合は $ST$ を大きくし、波形の立ち上がりをゆるやかにしたい場合は $T$ を大きくすればよい。一例として、Fig. 2.8.1 に $ST = 250, T = 300$ の場合の水平流速 $V_x(t)$ の時系列データを示す。

$$X(t) = \frac{ST}{2} \left( \tanh \left( \left( \frac{t}{T} - 0.5 \right) 2\pi \right) + 1 \right) \quad (2.8.1)$$

$$V_x(t) = \frac{d}{dt} X(t) \quad (2.8.2)$$

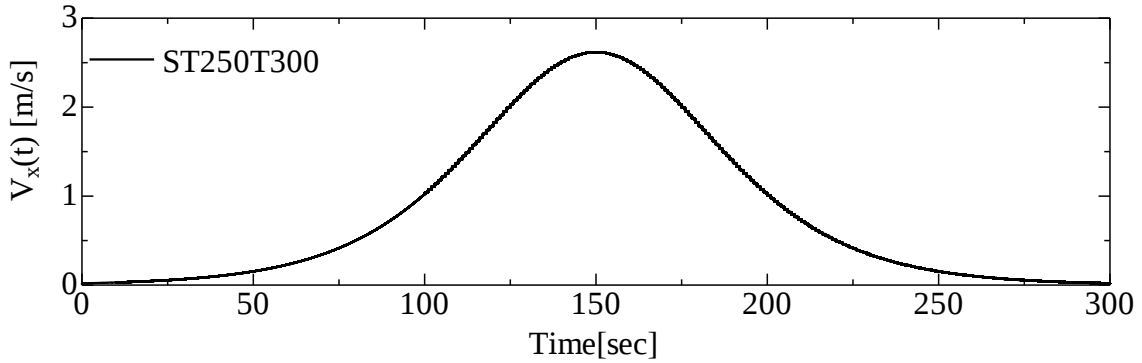


Fig. 2.8.1 Horizontal velocity for inflow boundary.

## 2.8.2 非線形係留モデル

係留索の非線形な変位復元力特性を考慮するため、上田の手法<sup>(35)</sup>を参考に係留モデルの改良を行い、非線形係留モデルを整備した。2.7.3 項で述べたように、線形ばね条件では、計算した係留力  $T$  を速度修正量  $u$  に付加することで係留を再現しているが、この係留力  $T$  を Fig. 2.8.2 に示すような係留索特性曲線（グラフは索径 60mm, ナイロンエイトロープの特性曲線である）から与えるようにした。特性曲線は 15~30 点程度まで分割して、各分割点における伸び率と係留力を配列として入力し、伸び率に対する係留力  $T$  を決定する。このとき、各分割点間の伸び率に対して、線形補間から係留力  $T$  を求める。

この非線形係留モデルによって、より実現に近い係留条件を設定できるようになった。特性曲線を作成するためには、係留索の材質、索径、打ち方を決め、係留索を製造している企業のカタログなどから、その索径に対する破断荷重、破断時の伸び率と任意の索径における特性曲線を取得する必要がある。このとき、設定する索径の特性曲線でない場合でも、索径に対して破断時の伸び率は変わらないため、設定する索径の破断荷重と対応するように、特性曲線の各分割点での係留力を比例計算すれば、設定する索径での特性曲線が得られる。

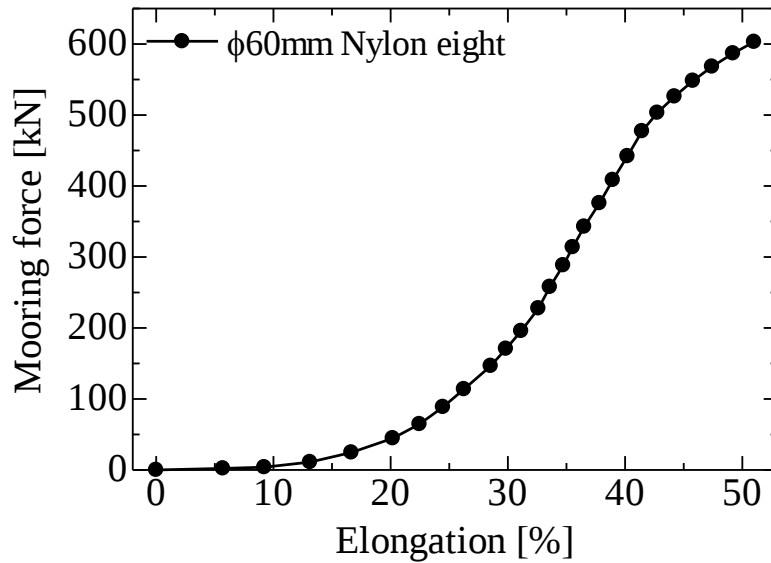


Fig. 2.8.2 Mooring characteristic curve ( $\phi 60\text{mm}$ , Nylon, eight strand rope).

### 2.8.3 係留モデル検証計算

線形ばね条件による係留モデルの適用性は増田ら<sup>(36)</sup>によりすでに確認されている。しかし本研究では係留索特性曲線から係留力を計算する非線形係留モデルを追加したことから、改めてコーディングの妥当性を含め、係留モデル適用性の検証計算を3次元で実施した。

<減衰のない自由振動による線形ばね係留モデルの検証>

Fig. 2.8.3 に示すように、剛体を線形ばねにつるして自由振動させる計算を行い、MPS 法による数値解と運動方程式を解いた解析解を比較することで、検証を行う。計算条件を Table 2.8.1 に示す。初期粒子間距離 $l_0$ は1mとし、係留条件は1辺3m、27個の粒子からなる剛体(Fig. 2.8.4)とゴースト粒子（固定）の間に設定する。粒子1つあたりの質量 $m_i$ は剛体の粒子数密度 $\rho_s$ と初期粒子間距離 $l_0$ は式 2.8.3 に示すように求まることから、剛体の粒子数密度 $\rho_s$ を  $500\text{kg/m}^3$ として、剛体全体の質量 $m$ は  $13,500\text{kg}$ となる。ばねの自然長は10m、ばね定数 $k$ は  $13,230\text{N/m}$ とし、自然長の状態から計算を開始して30秒間実施し、減衰のない1自由度系の自由振動を再現する。

減衰のない1自由度系の自由振動の解析解<sup>(37)</sup>を導出する。運動方程式は式(2.8.4)のように慣性項と復元力項のみで構成される。ここで $x$ は平衡位置（おもりをつるしてばねと釣り合った位置）を原点とした変位であり、ここでは上向きを正としている。固有円振動数 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ としてこの運動方程式の一般解を求めると式(2.8.5)となる。（ $A, B$ は任意定数）一般式を解くためには初期条件が必要であり、それは数値計算の初期設定から与えられる。本検討では剛体は静止し、伸び量0の自然長の状態から計算が始まるため、初期状態での剛体の位置を $x_0$ とすると、 $x_0 = mg/k$ であり、初期条件は、 $t = 0$ のとき、 $x = x_0, \dot{x} = 0$ となる。これから $A = x_0, B = 0$ となり、式(2.8.6)のように解析解が求まり、剛体の運動が一義的に決まる。式(2.8.6)から剛体の運動は正弦的で一定の振幅

が続く自由振動となることが確認できる。なお釣り合いの位置 $x_0 = 0$ の位置を初期条件とすると、 $x = 0$ となり、剛体の重力とばねの復元力が釣り合い、剛体は静止し続ける。

MPS 法による数値解と解析解それぞれの剛体の変位 $x$ を初期変位 $x_0$ で無次元化した時系列データを Fig. 2.8.5 に示す。MPS 法による数値解は式(2.8.6)の解析解とよく一致しており、線形ばね条件での係留モデルの適用性を確認できた。

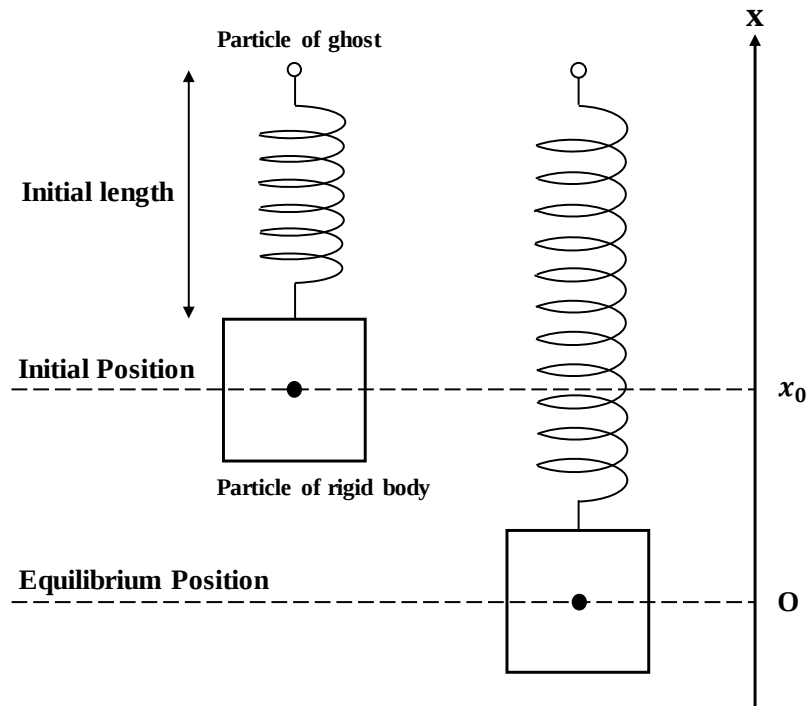


Fig. 2.8.3 Verification model of linear spring model.



Fig. 2.8.4 Rigid body model.

Table 2.8.1 Condition of calculation.

|                                                              |                      |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|
| Distance between particles ( $l_0$ ) [m]                     | 1.0                  |
| Density of solid's particle( $\rho_s$ ) [kg/m <sup>3</sup> ] | 500.0                |
| Rigid body mass( $m$ ) [kg]                                  | 13,500               |
| Initial length [m]                                           | 10.0                 |
| Spring constant( $k$ ) [N/m]                                 | 13,230               |
| Simulation time [sec]                                        | 30.0                 |
| $\Delta t$ [sec]                                             | $5.0 \times 10^{-3}$ |

$$m_i = \rho_s l_0^3 \quad (2.8.3)$$

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.8.4)$$

$$x = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \quad (2.8.5)$$

$$x = x_0 \cos \omega_n t \quad (2.8.6)$$

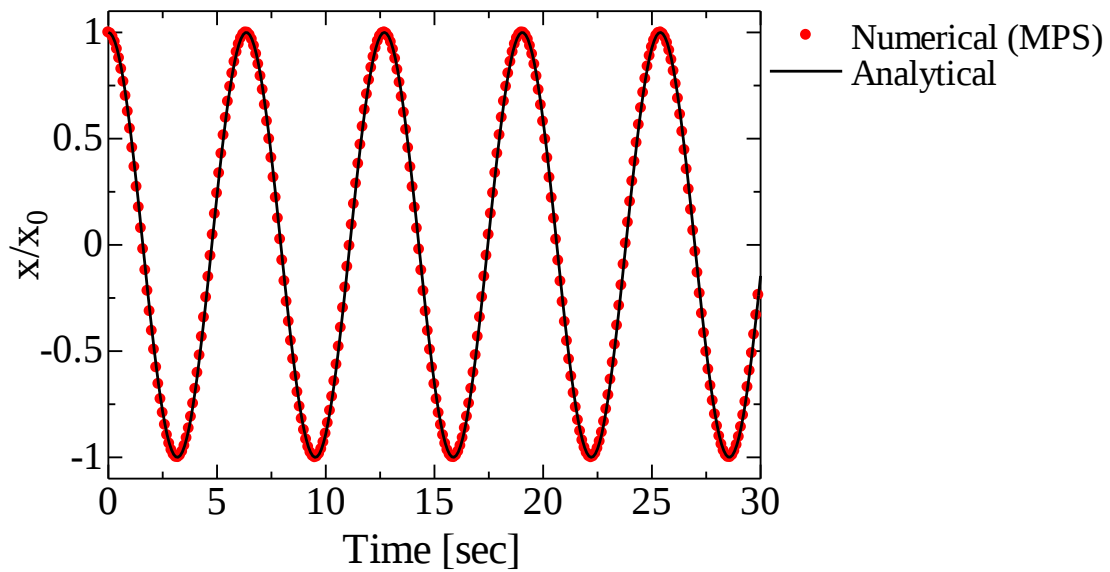


Fig. 2.8.5 Comparison of numerical solution(MPS) and analytical solution.

#### <非線形係留モデルの検証>

線形ばね条件ではばね定数と伸び量から復元力を計算し、特性曲線から復元力を計算する非線形係留モデルでは、離散化された特性曲線から線形補間を用いて伸び率に対する復元力を計算している。両者の違いはこの復元力の計算にあり、その後の復元力を剛体に付加する処理は共通である。前述の線形ばね条件の検証結果から、剛体に復元力が適切に付加されていることは検証できている。従って設定した特性曲線どおりに復元力が計算されていることを確認すれば、非線形

係留モデルの検証を行ったことになる。

前述の線形ばね検証計算の計算条件のうち、ばね定数の設定のみを変更し、Fig. 2.8.2 で一例として示した、索径 60mm のナイロンエイトロープの特性曲線（破断荷重 603kN、破断時の伸び 51%）を入力して同様の計算を行った。その結果、最大係留力は破断荷重を超えることなく、剛体は振動した。この時の時々刻々の伸び率と係留力を出力し、入力した特性曲線と重ねた結果を Fig. 2.8.6 に示す。MPS 法で計算されている伸び率に対する係留力のプロット（赤）はよく特性曲線と一致していることから、入力した特性曲線どおりに係留力が計算されていることが確認できた。

以上の検証計算から、本研究で新しく整備した非線形係留モデルについて、コーディングの妥当性を含め検証することができたといえる。

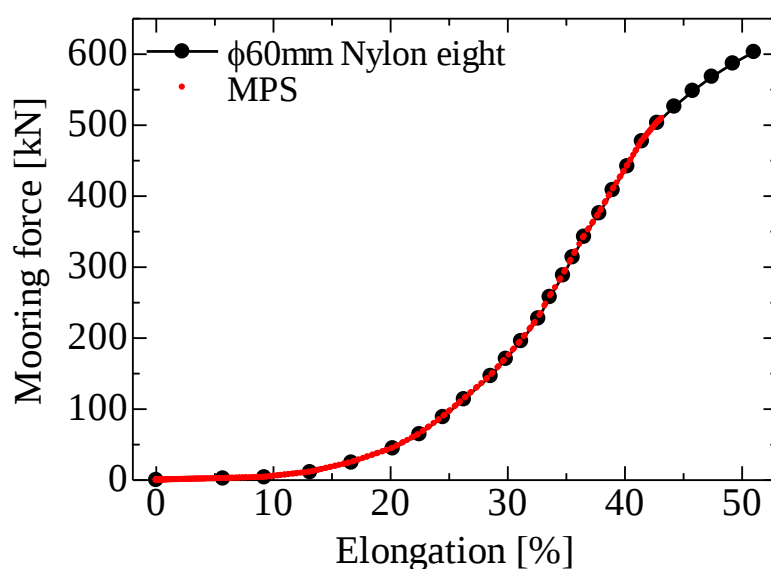


Fig. 2.8.6 Comparison of numerical solution(MPS) and input mooring characteristic curve data.

## 第3章 津波被害予測データベースの改訂

### 3.1 概要

前章で示した改良後の MPS 法プログラムにより、模擬津波として流れを入射させ、非線形な変位復元力特性を考慮した非線形係留モデルによる津波シミュレーションを 1/1 実スケール、初期粒子間距離 1m、時間刻み幅 $\Delta t$ を $5.0 \times 10^{-3}$ 秒固定、3次元で実施する。この検討から、0度入射（追い波）、90度入射（横波）の場合における押し波中の岸壁係留船舶の津波被害を明らかにし、この結果をもとに津波被害予測データベースにおける被害判定の高精度化を試みる。さらに、本検討では増田らの検討で採用されてきた孤立波・線形ばねによる係留モデルでも検討を行い、入射波形および係留モデルの違いが津波中の岸壁係留船舶の船体運動・係留索の破断に与える影響を調べ、その被害結果の相違についても考察を行う。

### 3.2 造波目標波形

流入境界に与える速度データにより、任意の波形勾配を有する流れを造波することができる。そのため、押し波造波目標として波高以外に、波形の立ち上がりには要する時間を決定する必要がある。本検討では、Fig. 3.2.1 に示す九州工業大学の佐藤の研究<sup>(38)</sup>による、東北地方太平洋沖地震津波の周期特性の調査結果を参考にした。Fig. 3.2.1 から GPS 波浪計（海岸から 10km~20km、水深 100m~300m）で観測された短周期成分の津波周期は 10 分~20 分程度、沿岸波浪計（海岸からおおよそ 3km 以内、水深 30m~50m）で観測された津波周期は最も短周期で 8 分程度、潮位計（海岸線の岸壁等、Fig. 3.2.1 では水深 0m とされる）で観測された海岸線での津波周期は最も短周期で 20 分程度であり、同じ地震で発生した津波でも、津波周期特性は観測地点により大きく異なることがわかる。本研究では岸壁係留船舶を対象とするため、岸壁に最も近い位置にある潮位計の観測記録を参考にすることが妥当である。また短周期な波形の方が、船体にはより衝撃的な力が作用すると考えられるため、安全側に検討するためには、現実には発生しうる範囲で、短周期な波形で津波を模擬した方がよく、その場合八戸の潮位計で観測された周期 20 分が最も短周期である。しかし、一般的に潮位計はフロートを用いて水位を計測するため、津波のような急激な水位の変化に追従できないことがあり、短周期成分を観測できていない可能性を佐藤は指摘している。そこで、潮位計が津波波形を明確にとらえていない可能性があること、また Fig. 3.2.1 から波状段波が発生した<sup>(39)</sup>久慈港における沿岸波浪計で観測された津波周期 8 分を考慮して、津波周期 10 分を造波目標とする。本検討では、1 周期のうち初期の押し波部を模擬するため、造波する模擬津波（流れ）の波形の立ち上がりには要する時間は 150 秒が目標となる。

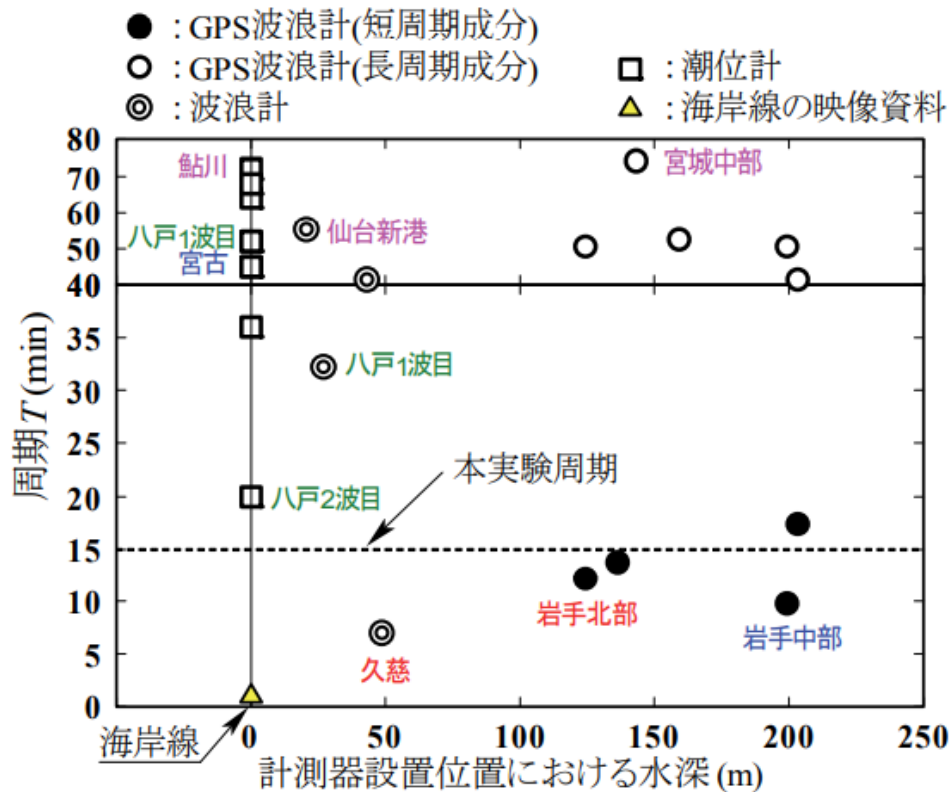


Fig. 3.2.1 Period characteristics of the Tohoku earthquake tsunami (Sato's research<sup>(38)</sup>).

### 3.3 計算ケース名の意味

本検討では、入射方向 2 ケース (0 度, 90 度), 船体 2 ケース (3,000DWT, 10,000DWT), 津波波形 2 ケース (流れ, 孤立波), 係留モデル 2 ケース (非線形係留モデル, 線形ばねモデル) と計算条件が多岐にわたる。そこで、各ケース名から計算条件が識別できるように計算ケース名を設定した。Fig. 3.3.1 に示すように、最初の 3 つの英数字が入射波条件を、その後ハイフンを挟んで船体、係留条件を意味している。最初の数字が入射方向を意味し、0 または 90 となる。2 番目のアルファベットは波形の種類を示しており、流れの場合は F, 孤立波の場合は S となる。3 番目が波高である。例えば 0F1.5 は 0 度入射、流れの場合で最も波高 1.5m のケースを表している。そしてハイフンの次の 4 桁の数字が載貨重量トン数であり、本検討では 3000 または 10000 となる。この次のアルファベットは係留モデルであり、非線形係留モデルは N, 線形ばねモデルは L が入る。最後のアルファベットは載貨状態を意味し、満載状態が F, 半載状態が H, 空載状態が B である。本章での検討は半載状態のみの検討であるため、船体条件の最後はすべて H となるが、次章では満載、空載状態でも検討しているため、積載状態の違いにより識別できるようにしている。なお本検討では、3,000DWT では水深 10m, 10,000DWT では水深 12m と、船体によって水深が異なるため、船体を配置しない入射波条件での計算ケースについては 0F1.5(h10m), 0F1.6(h12m) ようにかっこ書きで水深を付記することで識別する。

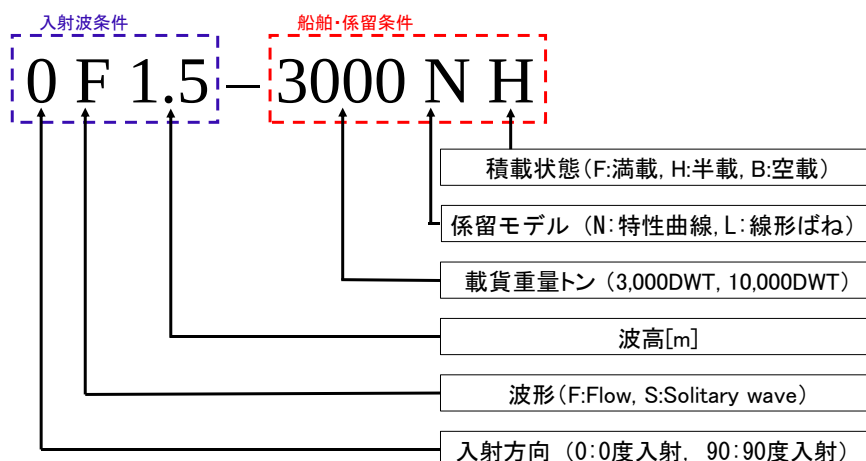


Fig. 3.3.1 Meaning of the calculation case name.

### 3.4 船舶条件

高畑の Marine traffic(AIS データ)を使用した船舶データの収集<sup>(21)</sup>から、日本の港湾には 10,000DWT 以下の小型～中型の船舶が多数停泊している傾向がわかっている。この結果をふまえて、本検討では 3,000DWT および 10,000DWT を対象船舶とする。Table 3.4.1 に船舶の諸元、計算条件を、Fig. 3.4.1 に船舶グリッドデータのスナップショット示す。3,000DWT の場合は全長 93.0m, 型幅 15.0m, 型深さ 8.0m であり, 10,000DWT の場合は全長 132.0m, 型幅 21.0m, 型深さ 11.0m である。これら船舶の諸元は、載貨重量トン数 DWT から各諸元を算定する回帰式（カバー率 75%）を使って算定し、粒子径 1m にあわせて決定している。全長  $Loa$  と型幅  $B$  は高橋ら<sup>(40)</sup>の提案している貨物船の回帰式(3.4.1)と(3.4.2)から算定する。また本検討では積載状態として半載状態を考えるが、高橋ら<sup>(40)</sup>の回帰式(3.4.3)から満載喫水  $d_{full}$  を、寺内ら<sup>(41)</sup>の回帰式(3.4.4)から空載喫水  $d_{ballast}$  を求め、この平均値として式(3.4.5)から半載喫水  $d_{half}$  を算定した。なお型深さ  $D$  に関しては、日本港湾協会発行の 1989 年版技術基準の貨物船の標準船型<sup>(40)</sup>から決定している。回帰式の係数値やカバー率などの詳細な内容については高橋ら<sup>(40)</sup>、寺内ら<sup>(41)</sup>の論文に詳述されているため割愛する。

Table 3.4.1 Calculation conditions of vessel.

|                                                                      | DWT    |        |
|----------------------------------------------------------------------|--------|--------|
|                                                                      | 3,000  | 10,000 |
| Length overall ( $Loa$ ) [m]                                         | 93.0   | 132.0  |
| Molded breadth ( $B$ ) [m]                                           | 15.0   | 21.0   |
| Molded depth ( $D$ ) [m]                                             | 8.0    | 11.0   |
| Draft ( $d_{half}$ ) [m]                                             | 4.0    | 6.0    |
| Particle number of vessel ( $N_{vessel}$ )                           | 8,954  | 25,222 |
| Particle number of submerged part ( $N_{half}$ )                     | 4,280  | 13,176 |
| Particle number of bottom ( $N_{bottom}$ )                           | 1,096  | 2,216  |
| Density of vessel's particle ( $\rho_{vessel}$ )[kg/m <sup>3</sup> ] | 433.47 | 497.61 |

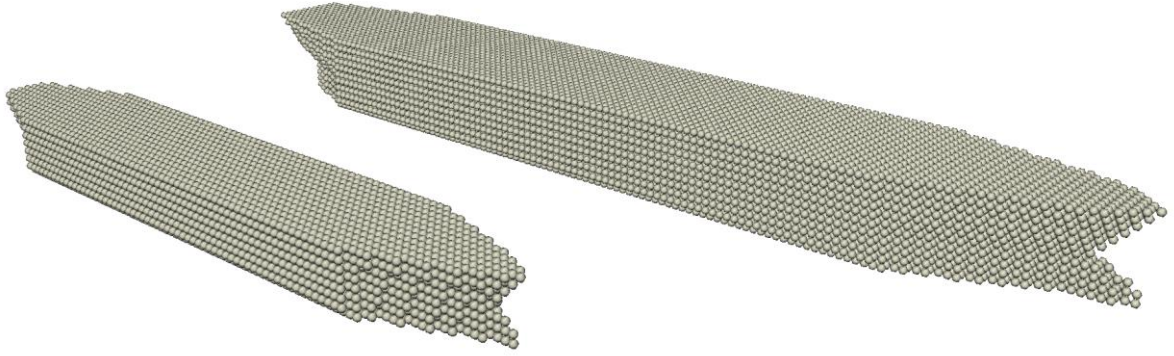


Fig. 3.4.1 Snapshot of vessel (left : 3,000DWT, right : 10,000DWT).

$$Loa = 8.734DWT^{0.295} \quad (3.4.1)$$

$$B = 1.497DWT^{0.285} \quad (3.4.2)$$

$$d_{full} = 0.394DWT^{0.328} \quad (3.4.3)$$

$$d_{ballast} = 0.352d_{full}10^{0.042} \quad (3.4.4)$$

$$d_{half} = \frac{(d_{full} + d_{ballast})}{2} \quad (3.4.5)$$

半載時における船体の粒子数密度 $\rho_{vessel}$ は式(3.4.6)のように、水粒子密度 $\rho_{water}$  (1040kg/m<sup>3</sup>), 船舶粒子数  $N_{vessel}$ , 半載喫水での没水粒子数  $N_{half}$  から算定できる。しかし, MPS 法では剛体を粒子で表現するため, 船底粒子数  $N_{bottom}$  の半分だけ計算上, 没水容積は小さくなる。従って, 式(3.4.6)の算定した値で船舶の粒子数密度を設定すると, 計算開始とともに半粒子分 (0.5m) 船体は沈下する。そこで, 式(3.4.7)のように没水粒子数から船底粒子数の半分引いて船体の粒子数密度を算定している。

$$\rho_{vessel} = \rho_{water} \cdot \frac{N_{half}}{N_{vessel}} \quad (3.4.6)$$

$$\rho_{vessel} = \rho_{water} \cdot \frac{N_{half} - 0.5N_{bottom}}{N_{vessel}} \quad (3.4.7)$$

## 3.5 係留条件

### 3.5.1 係留索配置

係留索の本数, 船体のフェアリーダー座標, 岸壁のボラード座標を設定し, 係留索の配置を決定する。船体のフェアリーダー座標は, 海難防止協会の 3,000DWT, 10,000DWT を対象とした検討<sup>(13)</sup>における係留配置を参考に MPS 法の粒子径 1m にあわせて設定する。また岸壁端部に設置されるボラードの座標については, 岸壁天端高と曲柱間隔から決定する。

高畑の研究<sup>(21)</sup>で作成された津波被害予測データベースは日本港湾協会の技術基準と気象庁の潮差データから岸壁天端高は 1m~4m で設計されている。そこで本シミュレーションではその中間値として岸壁天端高を 2m とする。そして曲柱の間隔については, 日本港湾協会の技術基準<sup>(42)</sup>で各総トン数に対する曲柱の最大間隔が決められており, 3,000DWT クラスでは 10m~15m, 10,000DWT クラスでは 25m となる。この基準から, 3,000DWT, 10,000DWT とともに曲柱の間隔は 15m で設定する。次項でも述べるが, 本シミュレーションでは各係留索に対して一律に初期張力を与える。この時前後方向の Surge 係留力成分が釣り合う位置となるとところで最終的な船体と岸壁との位置関係を決めることができる。以下に 3,000DWT・10,000DWT の係留索配置を示す。なお本検討では甲板上のウインチ~フェアリーダーまでの係留索および防舷材については考慮していない。

#### (1) 3,000DWT

3,000DWT の係留索配置, 内訳は, Table 3.5.1, Fig. 3.5.1 に示すとおり合計 6 本で設定する。L は計算開始時, 初期張力が作用しているときの, 船体のフェアリーダーから岸壁の曲柱までの直線距離であり,  $L_x, L_y, L_z$  はそれぞれ L の x, y, z 成分の距離である。(以下 10,000DWT の場合も同様である。)

#### (2) 10,000DWT

10,000DWT の係留索配置, 内訳は, Table 3.5.2, Fig. 3.5.2 に示すとおり合計 8 本で設定する。なお 2 本ある Head line, Stern line については, 船体の右舷側からとっているものを Head line1, Stern line1 とし, 左舷側からとっているものを Head line2, Stern line2 としている。

Table 3.5.1 The breakdown of mooring lines (3,000DWT).

| Mooring lines |   |                     | L [m] | L <sub>x</sub> [m] | L <sub>y</sub> [m] | L <sub>z</sub> [m] |
|---------------|---|---------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Bow           | ① | Head line           | 43.4  | 41.0               | 14.0               | 2.0                |
|               | ② | Forward breast line | 11.9  | 11.0               | 4.0                | 2.0                |
|               | ③ | Forward spring      | 16.4  | 16.0               | 3.0                | 2.0                |
| Stern         | ④ | Aft spring          | 21.3  | 21.0               | 3.0                | 2.0                |
|               | ⑤ | Aft breast line     | 16.3  | 15.0               | 6.0                | 2.0                |
|               | ⑥ | Stern line          | 46.6  | 45.0               | 12.0               | 2.0                |

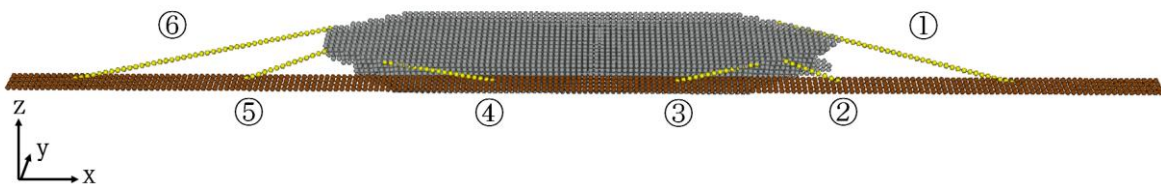


Fig. 3.5.1 Mooring arrangement (3,000DWT).

Table 3.5.2 The breakdown of mooring lines (10,000DWT).

| Mooring lines |   |                     | L [m] | L <sub>x</sub> [m] | L <sub>y</sub> [m] | L <sub>z</sub> [m] |
|---------------|---|---------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Bow           | ① | Head line1          | 38.4  | 38.0               | 5.0                | 3.0                |
|               | ② | Head line2          | 42.6  | 38.0               | 19.0               | 3.0                |
|               | ③ | Forward breast line | 9.9   | 8.0                | 5.0                | 3.0                |
|               | ④ | Forward spring      | 18.7  | 18.0               | 4.0                | 3.0                |
| Stern         | ⑤ | Aft spring          | 19.2  | 18.0               | 6.0                | 3.0                |
|               | ⑥ | Aft breast line     | 11.8  | 9.0                | 7.0                | 3.0                |
|               | ⑦ | Stern line1         | 39.7  | 39.0               | 7.0                | 3.0                |
|               | ⑧ | Stern line2         | 42.6  | 39.0               | 17.0               | 3.0                |

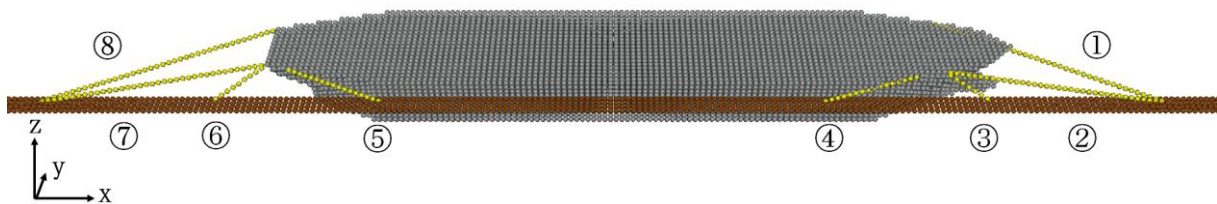


Fig. 3.5.2 Mooring arrangement (10,000DWT).

### 3.5.2 係留索特性曲線

Table 3.5.3 に係留索条件の詳細を示す。係留索の非線形な変位復元力特性を再現するため、特性曲線から係留力を計算するが、特性曲線を作成するためには係留索の材質・索径・打ち方（編み方）を決定する必要がある。係留索の材質としてナイロンで設定をしている先行研究<sup>(16)(17) (43) (44) (45)</sup>が散見されるが、福田らの調査<sup>(46)</sup>から 3,000DWT, 10,000DWT の船舶に一般的に多く使用されているポリプロピレン系を採用する。またその索径は日本海難防止協会の検討<sup>(13)</sup>と同等の 3,000DWT では 45mm, 10,000DWT では 60mm とし、打ち方はエイトロープとする。この設定条件をもとに東京製綱繊維ロープ株式会社の総合カタログ<sup>(47)</sup>（ポリプロピレン系の合成繊維としてマリンタフを使用）から破断荷重、破断時の伸び率、特性曲線を決定し、Fig. 3.5.3 に示す特性曲線を作成することができる。係留索の初期張力は、先行研究から<sup>(14)(48)(49)(50)</sup>破断荷重の 7%とし、各係留索に対し一律に設定する。なおウインチのブレーキ力、係留索のヒステリシス特性については考慮していない。

線形ばねモデルでシミュレーションをする場合は、特性曲線から求めた初期張力に対する伸び率をフェアリーダー、ボラードの座標データから伸び量とし、初期張力をこの伸び量で除した値をばね定数として計算する。線形ばねモデルの場合での伸び率に対応する係留力は Fig. 3.5.3 に破線で示している。Table 3.5.3 に線形ばねで計算する場合の破断荷重をかつこ内に示しているが、非線形係留モデルと同様に、伸び率が 35%以上となった場合に破断と判定するため、特性曲線の場合と比較して破断荷重は大幅に小さくなっている。

Table 3.5.3 Mooring conditions.

|                         | DWT                        |                            |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                         | 3,000                      | 10,000                     |
| Diameter [mm]           | 45.0                       | 60.0                       |
| Type                    | Polypropylene              | Polypropylene              |
| Construction            | Eight strand rope          | Eight strand rope          |
| Breaking Load [kN]      | 259.0 (90.8) <sup>*1</sup> | 443.0(155.3) <sup>*1</sup> |
| Elongation at break [%] | 35.0                       | 35.0                       |
| Initial tension [kN]    | 18.13                      | 31.01                      |

\*1: Breaking load in the case of linear spring model

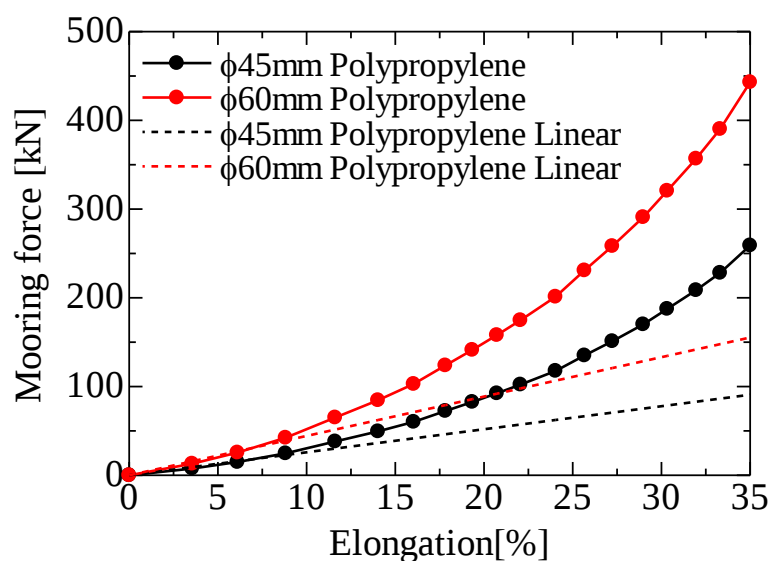


Fig. 3.5.3 Mooring characteristic curve ( $\phi 45\text{mm}$ ,  $\phi 60\text{mm}$ , Polypropylene, eight strand rope).

## 3.6 0 度入射シミュレーション条件

### 3.6.1 計算領域の諸元

Fig. 3.6.1 に 0 度入射の場合の計算概略図（上面，断面図）を，Fig. 3.6.2, Fig. 3.6.3 にそれぞれ 3,000DWT, 10,000DWT での初期粒子配置での可視化結果を示す。流入境界から 100m の位置に船体を入船右舷付け状態で配置し，船体から 200m の位置に流出境界を配置する。水槽幅は 50m とし，水深  $h$  は 3000DWT の場合は 10m, 10,000DWT の場合は 12m とする。船体を配置した際の初期総粒子数は 3,000DWT で，421,082, 10,000DWT で 502,758 である。岸壁は再現せず，水槽側面  $y$  方向には十分な高さ 30m の壁境界と接しており，水粒子が  $y$  方向に流れることがないようにしている。なお孤立波で検討する場合は，流入境界と船体との反射を考慮し流入境界から船体までの距離は 300m としている。この場合の船体を配置した際の初期粒子数は 3,000DWT で，528,866, 10,000DWT で 70,5158 である。

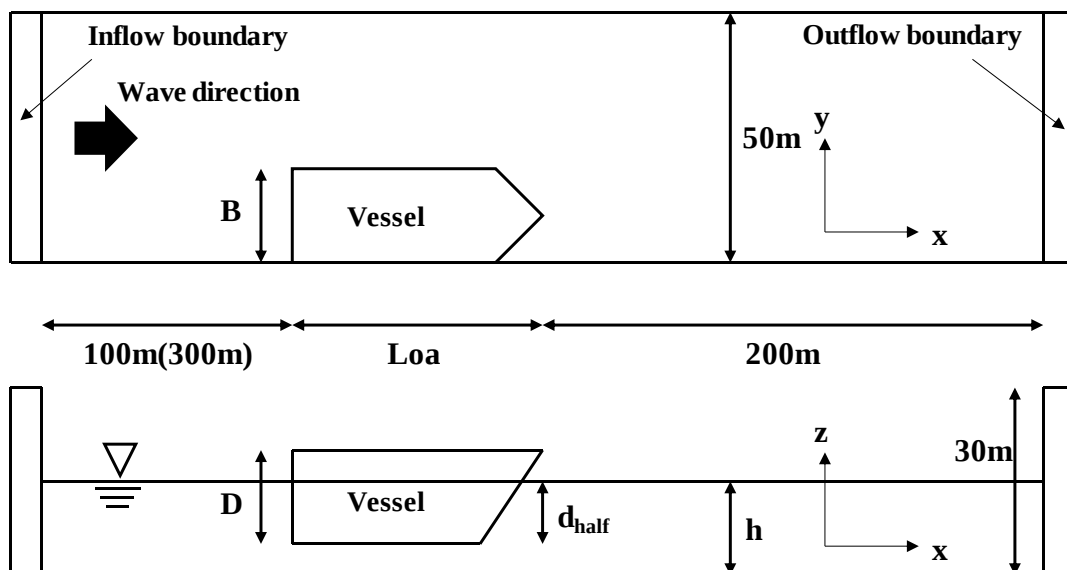


Fig. 3.6.1 Simulation setup system in 0 degrees (Schematic diagram).

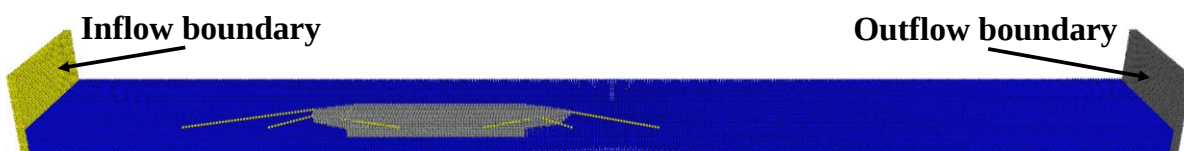


Fig. 3.6.2 Simulation setup system in 0 degrees for 3,000DWT (Visualization image).

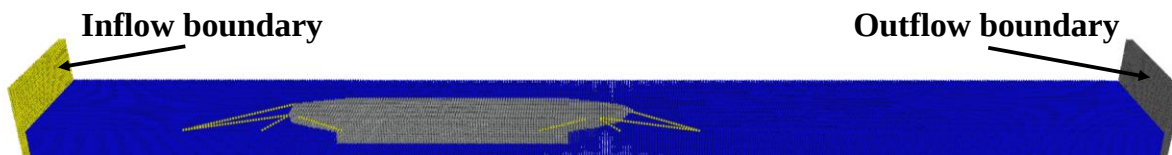


Fig. 3.6.3 Simulation setup system in 0 degrees for 10,000DWT (Visualization image).

### 3.6.2 入射波条件

波形勾配の小さい流れと急峻な孤立波の2種類の波形で検討を行う。波高は1.5m, 2.2m, 3.0mの3ケースとする。Fig. 3.6.4に水深10mの場合の, Fig. 3.6.5に水深12mの場合の, 流れ, 孤立波それぞれの波高および水平流速(x方向)の時系列波形を示す。これらの波形は, 船体を配置していない条件で, 流入境界から90mの位置(船体配置時の船尾から10m後方の位置)で計測した結果である。流れの場合は2.0秒間(21データ), 孤立波の場合は0.5秒間(6データ)移動平均をかけ, 平滑化処理を施している。また解析時間は, 流れの場合は300秒, 孤立波の場合は100秒としている。なお次項のTable 3.6.1に記載しているとおり, 流れと孤立波での各波高の誤差はそれぞれ0.1m以内である。

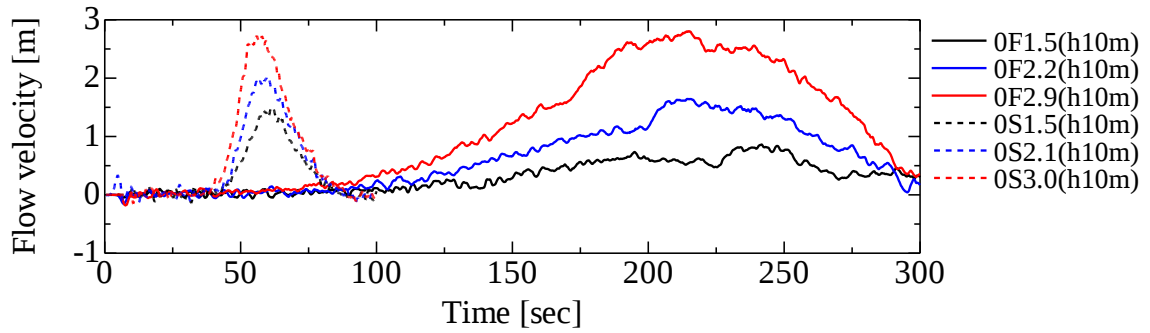
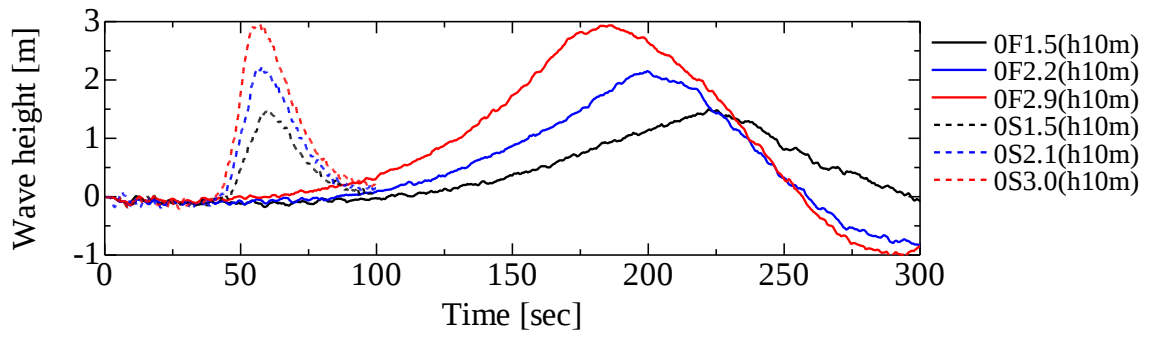


Fig. 3.6.4 Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:10m).

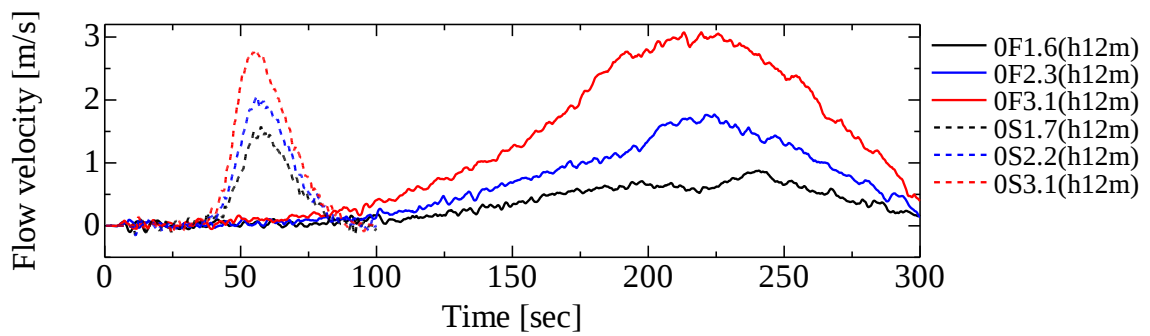
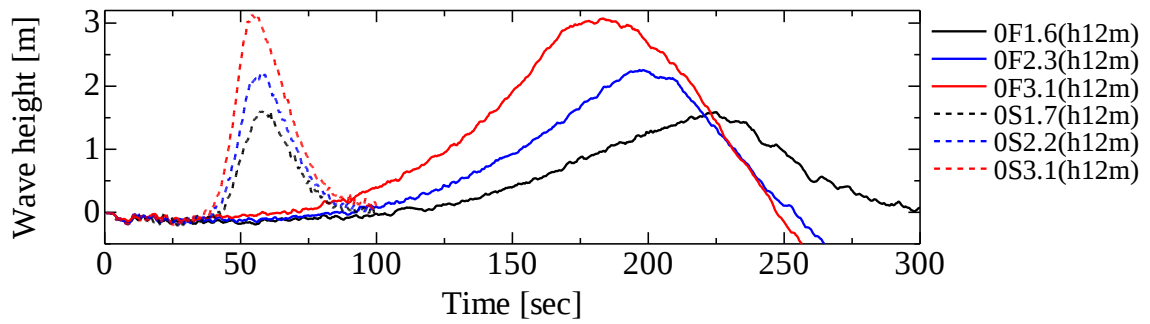


Fig. 3.6.5 Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:12m).

### 3.6.3 計算ケース

Table 3.6.1 に示すように、船体 2 ケース (3,000DWT, 10,000DWT) , 波高 3 ケース, 波形 2 ケース (孤立波, 流れ) , 係留モデル 2 ケース (非線形係留モデル, 線形ばねモデル) の計 24 ケースである。ケース名の見方については、3.3 節を参照されたい。Table 3.6.1 に記載の波高および最大流速は、3.6.2 項で述べた入射波条件での計測値である。

Table 3.6.1 Calculation cases in 0 degrees.

| Case         | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT   | Draft[m] | Mooring characteristic |
|--------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|-------|----------|------------------------|
| 0F1.5-3000NH | 0          | Flow      | 1.5            | 0.9                | 10.0     | 3,000 | 4m(half) | Nonlinear              |
| 0F1.5-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 0S1.5-3000NH |            | Solitary  | 1.5            | Nonlinear          |          |       |          |                        |
| 0S1.5-3000LH |            |           |                | Linear             |          |       |          |                        |
| 0F2.2-3000NH |            | Flow      | 2.2            | Nonlinear          |          |       |          |                        |
| 0F2.2-3000LH |            |           |                | Linear             |          |       |          |                        |
| 0S2.1-3000NH |            | Solitary  | 2.1            | Nonlinear          |          |       |          |                        |
| 0S2.1-3000LH |            |           |                | Linear             |          |       |          |                        |
| 0F2.9-3000NH |            | Flow      | 2.9            | Nonlinear          |          |       |          |                        |
| 0F2.9-3000LH |            |           |                | Linear             |          |       |          |                        |
| 0S3.0-3000NH |            | Solitary  | 3.0            | Nonlinear          |          |       |          |                        |
| 0S3.0-3000LH |            |           |                | Linear             |          |       |          |                        |

| Case          | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT    | Draft[m] | Mooring characteristic |
|---------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|--------|----------|------------------------|
| 0F1.6-10000NH | 0          | Flow      | 1.6            | 0.9                | 12.0     | 10,000 | 6m(half) | Nonlinear              |
| 0F1.6-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 0S1.7-10000NH |            | Solitary  | 1.7            | Nonlinear          |          |        |          |                        |
| 0S1.7-10000LH |            |           |                | Linear             |          |        |          |                        |
| 0F2.3-10000NH |            | Flow      | 2.3            | Nonlinear          |          |        |          |                        |
| 0F2.3-10000LH |            |           |                | Linear             |          |        |          |                        |
| 0S2.2-10000NH |            | Solitary  | 2.2            | Nonlinear          |          |        |          |                        |
| 0S2.2-10000LH |            |           |                | Linear             |          |        |          |                        |
| 0F3.1-10000NH |            | Flow      | 3.1            | Nonlinear          |          |        |          |                        |
| 0F3.1-10000LH |            |           |                | Linear             |          |        |          |                        |
| 0S3.1-10000NH |            | Solitary  | 3.1            | Nonlinear          |          |        |          |                        |
| 0S3.1-10000LH |            |           |                | Linear             |          |        |          |                        |

## 3.7 90 度入射シミュレーション条件

### 3.7.1 計算領域の諸元

Fig. 3.7.1 に 90 度入射の場合の計算概略図 (上面, 断面図) を, Fig. 3.7.2, Fig. 3.7.3 にそれぞれ 3,000DWT, 10,000DWT での初期粒子配置での可視化結果を示す。水領域の幅は 200m とし、水深  $h$  は 3,000DWT の場合は 10m, 10,000DWT の場合は 12m とする。流入境界から 100m の位置に船体を右舷付けで岸壁と接した状態で配置する。90 度入射の場合は岸壁を壁粒子で再現し、その長さ 100m, 幅は 200m, 天端高 2m とする。水領域および岸壁領域の側面には十分な高さ 30m の壁粒子が配置されており、 $x$  方向に水粒子が漏れ出さないようにしている。流出境界は配置せず、岸壁を越流した水粒子は岸壁上を 100m 進むと計算領域の外に出て、ゴースト粒子 (計算に関与しない粒子) となる。船体を配置した際の初期粒子数は 3,000DWT で 491,042, 10,000DWT で 565,310 である。

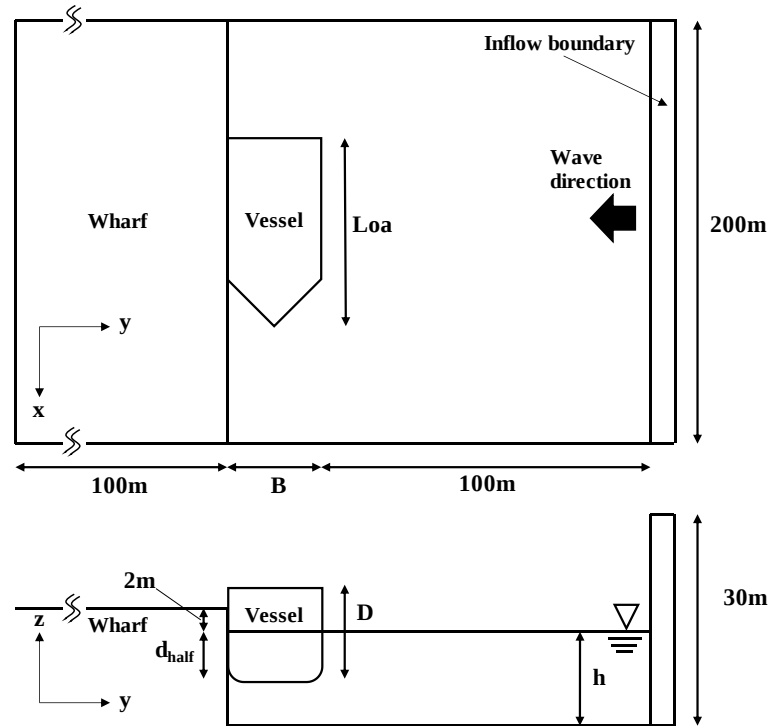


Fig. 3.7.1 Simulation setup system in 90 degrees (Schematic diagram).

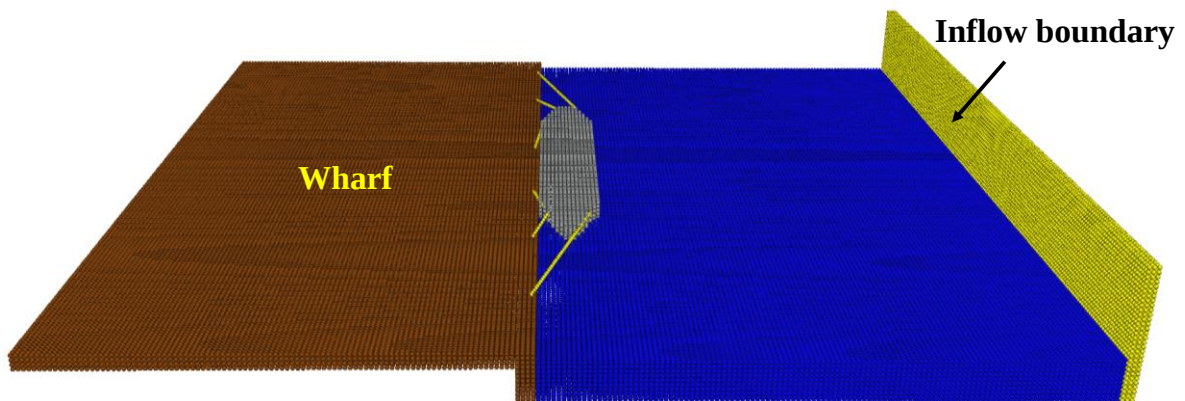


Fig. 3.7.2 Simulation setup system in 90 degrees for 3,000DWT (Visualization image).

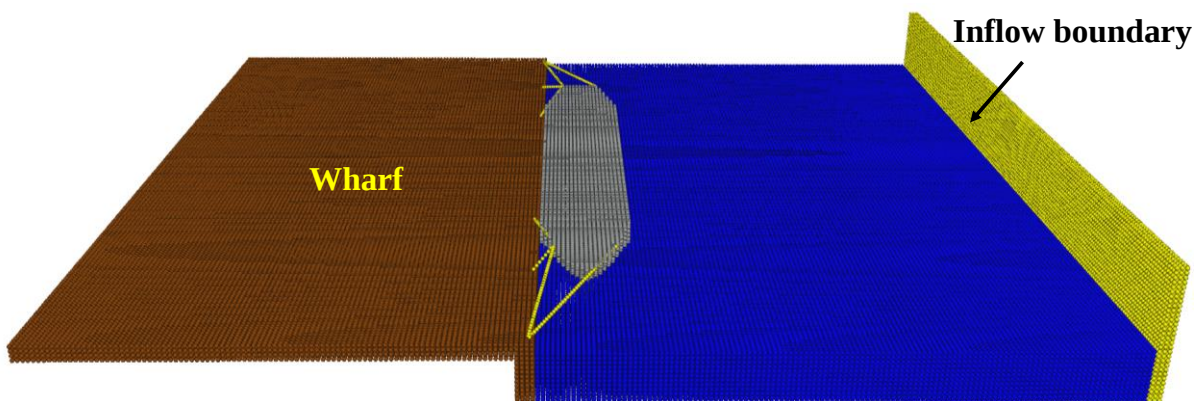


Fig. 3.7.3 Simulation setup system in 90 degrees for 10,000DWT (Visualization image).

### 3.7.2 入射波条件

波形勾配の小さい流れと急峻な孤立波の2種類の波形で検討を行う。入射波高は3,000DWTの場合は、4.4m, 5.0m, 6.1m, 10,000DWTの場合は、4.7m, 5.4m, 6.6mの各3ケースである。Fig. 3.7.4に水深10mの場合の、Fig. 3.7.5に水深12mの場合の、流れ、孤立波それぞれの波高の時系列波形を示す。これらの波形は、船体を配置していない条件で、流入境界から90mの位置（初期船体配置時の左舷から10mの位置）で計測した結果である。0度入射と同様に、流れの場合は2.0秒間（21データ）、孤立波の場合は0.5秒間（6データ）移動平均をかけ、平滑化処理を施している。次項のTable 3.7.1に記載しているとおり、流れと孤立波での各波高の誤差はそれぞれ0.1m以内である。

0度入射の場合、孤立波の検討では流入境界と船体間の反射を考慮して、流入境界から船体まで300mとしたが、90度入射の場合は水槽幅が200mと大きいため、流入境界から船体までの距離を延長すると粒子数が膨大となり計算コストが大きくなる。そこで、90度入射の孤立波による検討では、計算途中で流入境界をゴースト化させて、反射波が船体に入射しないようにしている。そのため、波高が急激に低下し引き波が発生しているが、本検討では押し波の部分のみを解析対象としている。

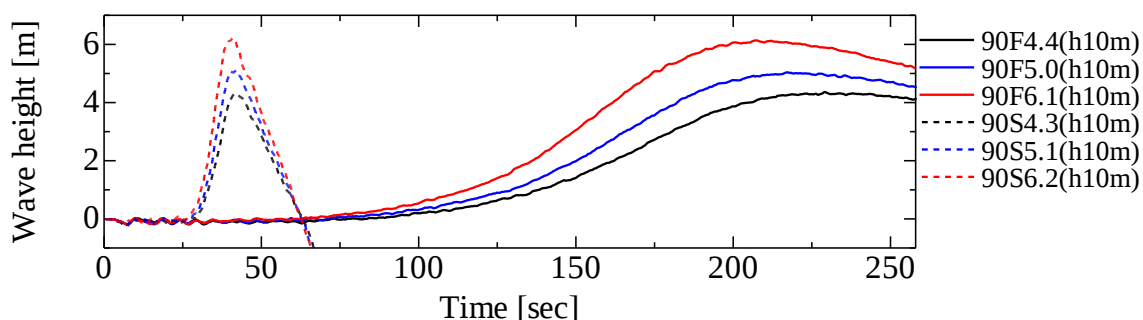


Fig. 3.7.4 Wave heights in 90 degrees (depth:10m).

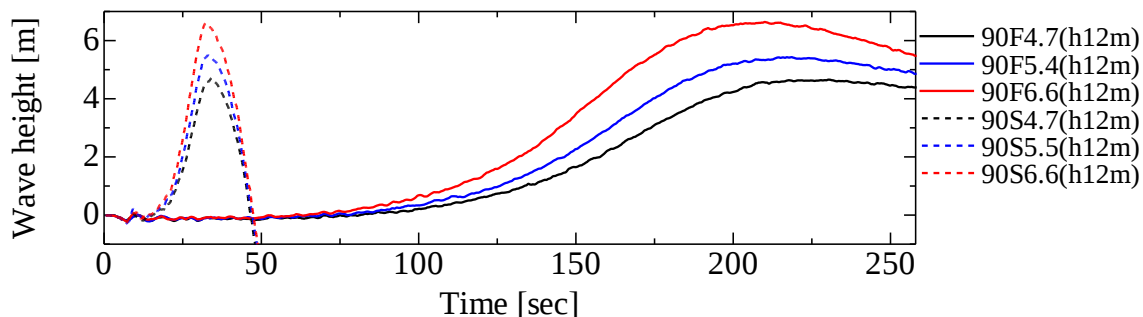


Fig. 3.7.5 Wave heights in 90 degrees (depth:12m).

### 3.7.3 計算ケース

Table 3.7.1 に示すように、船体 2 ケース (3,000DWT, 10,000DWT)、波高 3 ケース、波形 2 ケース (孤立波, 流れ)、係留モデル 3 ケース (非線形係留モデル, 線形ばねモデル, 無係留) の計 36 ケースである。ケース名の見方については、3.3 節を参照されたい。Table 3.7.1 に記載の波高および最大流速は、3.7.2 項で述べた入射波条件での計測値である。

Table 3.7.1 Calculation cases in 90 degrees.

| Case          | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT   | Draft[m] | Mooring characteristic |
|---------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|-------|----------|------------------------|
| 90F4.4-3000NH | 90         | Flow      | 4.4            | 0.3                | 10.0     | 3,000 | 4m(half) | Nonlinear              |
| 90F4.4-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 90F4.4-3000UH |            |           |                |                    |          |       |          | Unmooring              |
| 90S4.3-3000NH |            | Solitary  | 4.3            | 1.2                |          |       |          | Nonlinear              |
| 90S4.3-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 90S4.3-3000UH |            |           |                |                    |          |       |          | Unmooring              |
| 90F5.0-3000NH |            | Flow      | 5.0            | 0.5                |          |       |          | Nonlinear              |
| 90F5.0-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 90F5.0-3000UH |            |           |                |                    |          |       |          | Unmooring              |
| 90S5.1-3000NH |            | Solitary  | 5.1            | 1.5                |          |       |          | Nonlinear              |
| 90S5.1-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 90S5.1-3000UH |            |           |                |                    |          |       |          | Unmooring              |
| 90F6.1-3000NH |            | Flow      | 6.1            | 0.6                |          |       |          | Nonlinear              |
| 90F6.1-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 90F6.1-3000UH |            |           |                |                    |          |       |          | Unmooring              |
| 90S6.2-3000NH |            | Solitary  | 6.2            | 1.9                |          |       |          | Nonlinear              |
| 90S6.2-3000LH |            |           |                |                    |          |       |          | Linear                 |
| 90S6.2-3000UH |            |           |                |                    |          |       |          | Unmooring              |

| Case           | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT    | Draft[m] | Mooring characteristic |
|----------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|--------|----------|------------------------|
| 90F4.7-10000NH | 90         | Flow      | 4.7            | 0.3                | 12.0     | 10,000 | 6m(half) | Nonlinear              |
| 90F4.7-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 90F4.7-10000UH |            |           |                |                    |          |        |          | Unmooring              |
| 90S4.7-10000NH |            | Solitary  | 4.7            | 1.3                |          |        |          | Nonlinear              |
| 90S4.7-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 90S4.7-10000UH |            |           |                |                    |          |        |          | Unmooring              |
| 90F5.4-10000NH |            | Flow      | 5.4            | 0.4                |          |        |          | Nonlinear              |
| 90F5.4-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 90F5.4-10000UH |            |           |                |                    |          |        |          | Unmooring              |
| 90S5.5-10000NH |            | Solitary  | 5.5            | 1.5                |          |        |          | Nonlinear              |
| 90S5.5-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 90S5.5-10000UH |            |           |                |                    |          |        |          | Unmooring              |
| 90F6.6-10000NH |            | Flow      | 6.6            | 0.7                |          |        |          | Nonlinear              |
| 90F6.6-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 90F6.6-10000UH |            |           |                |                    |          |        |          | Unmooring              |
| 90S6.6-10000NH |            | Solitary  | 6.6            | 1.7                |          |        |          | Nonlinear              |
| 90S6.6-10000LH |            |           |                |                    |          |        |          | Linear                 |
| 90S6.6-10000UH |            |           |                |                    |          |        |          | Unmooring              |

## 3.8 結果および考察

### 3.8.1 0 度入射

<流れ・非線形係留モデルの計算結果>

まず流れ、非線形係留曲線モデルの場合の結果を示す。Table 3.8.1 に 0F1.5-3000NH、0F2.2-3000NH、0F2.9-3000NH の 3,000DWT の、Table 3.8.2 に 0F1.6-10000NH、0F2.3-10000NH、0F3.1-

10000NH の 10,000DWT の各係留索の破断の結果をまとめている。破断が発生した場合は Breakage とし、発生しなかった場合は最大係留力の破断荷重に対する割合を記載している。 3,000DWT の場合、0F1.5-3000NH の波高 1.5m では、破断が発生しなかったが、0F2.2-3000NH の波高 2.2m では Head line を 1 本残して残りはすべて破断し、0F2.9-3000NH の波高 2.9m では、すべての係留索が破断した。また 10,000DWT の場合、0F1.6-10000NH の波高 1.6m では、一部の係留索が破断したものの、6 本残り、0F2.3-10000NH の波高 2.3m、0F3.1-10000NH の波高 3.1m ではすべての係留索が破断した。以下に結果の一部について、係留力と船体運動の時系列データを示しつつ、破断の状況を説明する。

3,000DWT のケースについて、Fig. 3.8.1~Fig. 3.8.4 に 0F1.5-3000NH および 0F2.2-3000NH の船体の Surge の運動と係留力の時系列データを示す。破断が発生しなかった 0F1.5-3000NH では、Fig. 3.8.1 より最大約 4m 近くまで Surge の運動がみられ、Fig. 3.8.2 より Forward spring, Aft breast, Stern line がその前進運動にともない係留力を発揮して、船体は引き戻されている。船体の前進運動にともない、船尾方向に繰り出し、かつ索長の短い Forward spring, Aft breast line に荷重が集中しており、逆に Head line のような船首方向に繰り出している係留索は岸壁側のボラードに接近したことで、係留力がほぼゼロとなっている。同質、同径の係留索であっても、その索長と配置する方向により、作用する係留力は大きく異なることがわかる。次に 1 本を残してほとんど破断した 0F2.2-3000NH では、Fig. 3.8.3, Fig. 3.8.4 から、計算開始からおよそ 200 秒付近の Forward spring と Aft breast line が破断したあたりから船体の Surge の運動が急激におおきくなり、残りの係留索も次々と破断している。Fig. 3.8.5 はこのケースでの 60 秒間のスナップショットであり、破断後は係留索粒子(黄色)は表示しないようにして破断を表現している。(以後のスナップショットも同様である。)係留索粒子はフェアリーダーとボラード間を直線的に明示するものであり、船体との摩擦や干渉などは再現していない。これにより、船体の前進運動(Surge)にともない次々と係留索が破断していく様子がわかる。船体はおよそ 80m 漂流したのち、流出境界からの反射波により引き戻され始めたところで計算は終了している。係留索の破断は、船尾方向に繰り出している短い索から順次破断しており、係留索を配置した方向と索長に近い Forward spring と Aft breast line の 2 本が同時にはっていき、最も大きな係留力を発揮している。それ以外の係留索における係留力の立ち上がりには時間差があるため、係留力が分散し、実質 1 本で負担している。従って係留力を集中的に発揮させ、効果的な係留とするためには、増しもやいのように同質、同径の係留索を同じ方向に、同じ長さ配置することが重要である。また本検討では、すべての係留索に対して一律に初期張力を与えたが、Breast line のようなあそびの少ない短い係留索に関しては長い係留索よりも初期張力を小さくして、Surge 変位に対する係留力立ち上がりのタイミングを近くした方が、より効果的な係留であると考えられる。

10,000DWT のケースも同様に、Fig. 3.8.6~Fig. 3.8.9 に 0F1.6-10000NH および 0F2.3-10000NH の船体の Surge の運動と係留力の時系列データを示す。波高 1.6m の 0F1.6-10000NH では、Fig. 3.8.6, Fig. 3.8.7 から、最大約 10m 近くまで Surge の運動がみられたが、Forward spring と Aft breast line の破断後、2 本の Stern line の係留力により船体は引き戻され、漂流には至らなかった。これは索長および張っている方向に近い 2 本の Stern line によって得られた係留力によるものである。ただし、右舷船尾からとっている Stern line1 は破断荷重の 98.2%に達しており、破断寸前であったことは留意する必要がある。次に波高 2.3m の 0F2.3-10000NH では、Fig. 3.8.8, Fig. 3.8.9 からまた Fig. 3.8.10 の

90 秒間のスナップショットに示すように、計算開始からおよそ 175 秒付近で Aft breast が破断後、Surge の運動が急激におおきくなり、船尾方向にとり、索長の短い係留索から順次破断していき、最終的にはすべての係留索が破断した。3,000DWT の場合と同様に、係留力の立ち上がりは時間的に異なり、係留力が分散していることがわかる。

以上の結果から、本計算の条件では、0 度入射の場合、3,000DWT、10,000DWT ともにおよそ波高 2m で、ほぼすべての係留索が破断し、漂流に至った。

#### < 従来のモデルとの比較（破断本数） >

従来の孤立波や線形ばねモデルの場合の結果と比較する。まず係留索破断の本数について Fig. 3.8.11 および Fig. 3.8.12 にそれぞれ 3,000DWT、10,000DWT の結果を示す。流れ(Flow)の場合は実線の丸で、孤立波(Solitary)の場合は破線の三角とし、また非線形係留モデル(Nonlinear)の場合は黒色で、線形ばねモデル(Linear)の場合は赤色としている。横軸は入射波高であり、流れと孤立波で 0.1m の誤差がある場合は、大きい方の波高で統一している。また Fig. 3.8.11 の孤立波、非線形係留モデルおよび孤立波、線形ばねモデルのように各波高に対して破断本数がまったく同じである場合は、グラフ上で重なってしまうため、一方のプロットの記号を大きくして表示している。

流れでの係留モデルの違いに着目すると（黒丸実線 vs 赤丸実線）、3,000DWT、10,000DWT ともに波高が最も低いケースでは破断した本数に大きな差があり、線形ばねは非線形係留モデルよりも多く破断が発生している。これはモデルによる破断荷重の違いが効いているためであり、破断荷重の小さい線形ばねの方が破断しやすいためである。一方で波高が大きくなると、破断荷重の違いに対して流れから受ける力が相対的に大きくなるため、両者の破断本数に違いはみられなくなる。従って、破断荷重の差が影響するような小さい波高の流れによる検討では、線形ばねモデルの場合は過大な評価となる可能性がある。

孤立波での係留モデルの違いに着目すると（黒三角破線 vs 赤三角破線）、3,000DWT、10,000DWT ともに 3 ケースの波高に対して破断本数にちがいはみられなかった。これは、波高が一番小さいケースの非線形係留モデルですでに半分以上破断していることから、このケースですでに発揮できる係留力に対して孤立波から受ける力が大きかったためである。孤立波の場合は、流れと比較して係留モデルの違いはあらわれにくいといえる。

非線形係留モデルでの波形の違いに着目すると（黒丸実線 vs 黒三角破線）、3,000DWT、10,000DWT ともに波高が最も低いケースでは、流れより孤立波の方が多く破断している。これは Fig.3.6.4, Fig. 3.6.5 から水平流速が流れより孤立波の方が大きいためであると考えられる。一方で、波高がそれより高くなると流れの方が多く破断している。これは流れの場合は孤立波と比較して船体に入射する時間が長いため、係留索破断発生後は Surge の運動が大きくなり（後述 Fig. 3.8.13, Fig. 3.8.16 ）、多く破断したためと考えられる。従って破断が発生するような大きい波高での孤立波による検討では、破断の本数に関して過小評価となる可能性があるため、より実現現象にそくした流れから計算した方がよいといえる。

線形ばねモデルでの波形の違いに着目すると（赤丸実線 vs 赤三角破線）、3,000DWT、10,000DWT ともにすべてのケースで、孤立波より流れの方が破断の本数が多くなっている。これは前述したように流れの方がより船体に作用する時間が長いため、係留索破断発生後は Surge の運動が大きくなり多く破断したためである。

<従来のモデルとの比較（船体運動）>

船体運動について、従来の孤立波、線形ばねのモデルの結果と比較する。Fig. 3.8.13~Fig. 3.8.18 に各波高における Surge, Heave, Pitch の各運動成分の最大値を示す。各プロットの線と記号の意味は Fig. 3.8.11 および Fig. 3.8.12 と同様であり、波高は流れと孤立波で 0.1m の誤差がある場合は、大きい方の波高で統一している。Surge は船体から流出境界までの距離 $L_a$ (200m) により無次元化しており、漂流後、流出境界に衝突すると 1 になる。また Heave は各ケースにおける入射波条件での波高により無次元化している。

Fig. 3.8.13, Fig. 3.8.16 から Surge の運動は流れの方が孤立波より大きくなることがわかる。前述したように、流れの方が孤立波の場合より入射時間が長いため、係留索破断後はより大きく漂流するためである。従って破断後の船舶の漂流を評価する場合は、流れのように津波周期を考慮した模擬津波で検討する必要がある。また流れでの係留モデルの違いは（黒丸実線 vs 赤丸実線）波高が低いケースでは、破断荷重の大きい非線形係留モデルの方が Surge の運動が抑えられており、線形ばねの場合と差が生じている。一方で、孤立波での係留モデルの違いは（黒三角破線 vs 赤三角破線）すべてのケースでみられなかった。このことから、非線形係留モデルのより実現象に近い係留索の設定は、波高が低く、特に周期の長い波に対して意味があるといえる。

Fig. 3.8.14, Fig. 3.8.17 から、すべてのケースにおいて、Heave の各入射波高に対する無次元値が 1 に近いことから、Heave はよく水位変動に連動しており、波形や係留モデルの違いによる影響はほとんどなかった。従って、入射波形の周期や係留モデルに関係なく、津波中の船体の浮上量は波高から推定できると考えられる。

Fig. 3.8.15, Fig. 3.8.18 から、流れの場合は、Pitch の回転運動はほとんどでないが、孤立波の場合は波高が大きくなるにつれ Pitch が大きくなっている。本検討では、波高およそ 3m までの検討であるため、孤立波により生じた最大 Pitch は 2 度を超えないが、波高が大きいケースの場合はより大きな回転運動が発生することが考えられる。特に、遠浅の海岸や河川を遡上する津波は、段波状の短周期な成分をもつため、大きな回転運動が発生し、係留索の破断に影響を与える可能性があることを考慮する必要がある。

Table 3.8.1 Comparison of breakage existence (3,000DWT).

|              | ①         | ②              | ③              | ④          | ⑤          | ⑥          |
|--------------|-----------|----------------|----------------|------------|------------|------------|
|              | Head line | Forward breast | Forward spring | Aft spring | Aft breast | Stern line |
| 0F1.5-3000NH | 7.4%      | 8.4%           | 79.6%          | 7.6%       | 74.1%      | 21.8%      |
| 0F2.2-3000NH | 20.8%     | Breakage       | Breakage       | Breakage   | Breakage   | Breakage   |
| 0F2.9-3000NH | Breakage  | Breakage       | Breakage       | Breakage   | Breakage   | Breakage   |

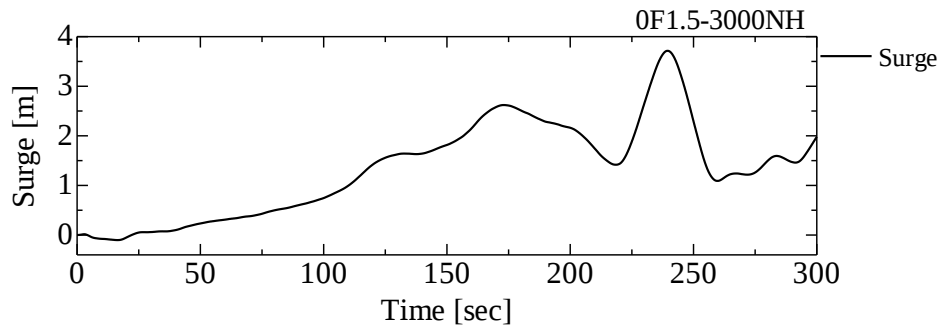


Fig. 3.8.1 Surge (0F1.5-3000NH).

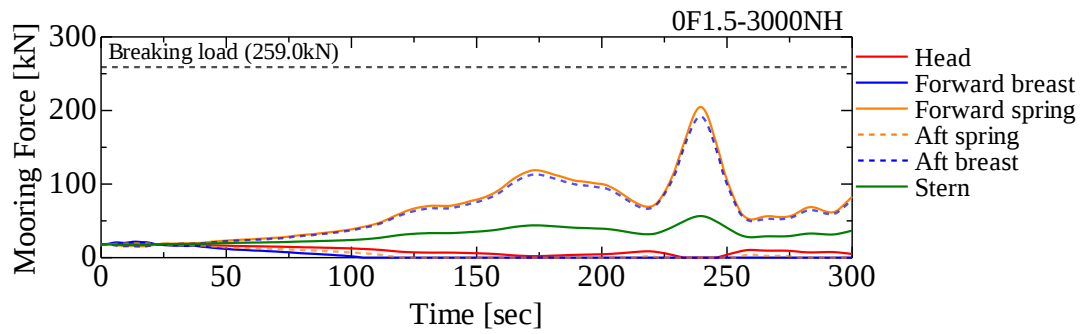


Fig. 3.8.2 Mooring force (0F1.5-3000NH).

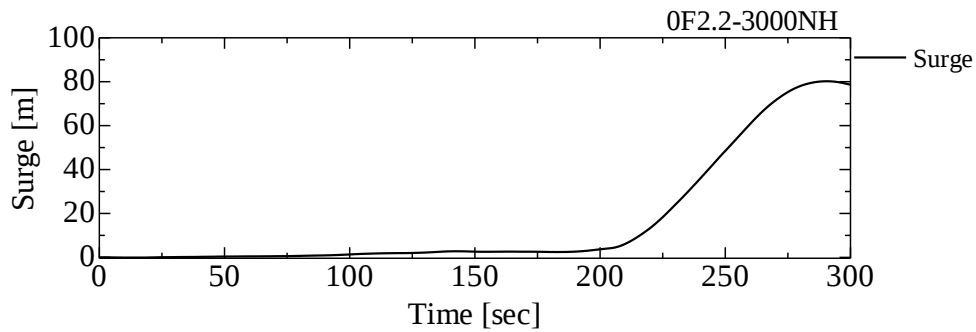


Fig. 3.8.3 Surge (0F2.2-3000NH).

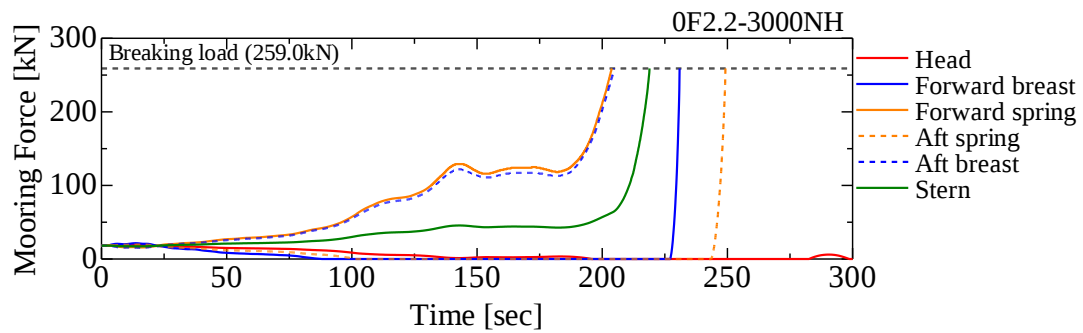


Fig. 3.8.4 Mooring force (0F2.2-3000NH).

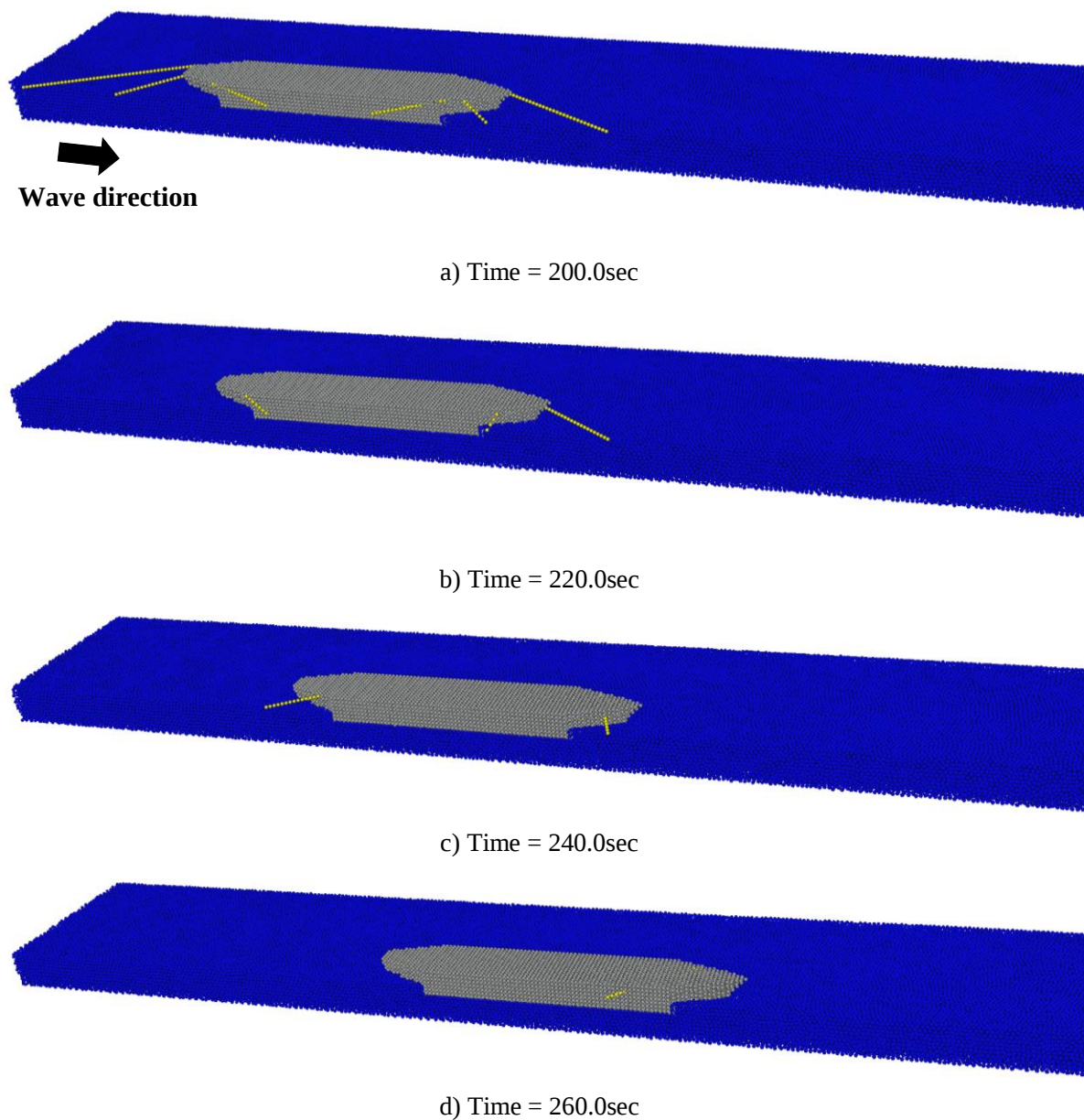


Fig. 3.8.5 Snapshots of simulation result (0F2.2-3000NH).

Table 3.8.2 Comparison of breakage existence (10,000DWT).

|               | ①             | ②             | ③                 | ④                 | ⑤             | ⑥             | ⑦              | ⑧              |
|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
|               | Head<br>line1 | Head<br>line2 | Forward<br>breast | Forward<br>spring | Aft<br>spring | Aft<br>breast | Stern<br>line1 | Stern<br>line2 |
| 0F1.6-10000NH | 7.2%          | 7.2%          | 7.8%              | Breakage          | 7.2%          | Breakage      | 98.2%          | 77.8%          |
| 0F2.3-10000NH | Breakage      | Breakage      | Breakage          | Breakage          | Breakage      | Breakage      | Breakage       | Breakage       |
| 0F3.1-10000NH | Breakage      | Breakage      | Breakage          | Breakage          | Breakage      | Breakage      | Breakage       | Breakage       |

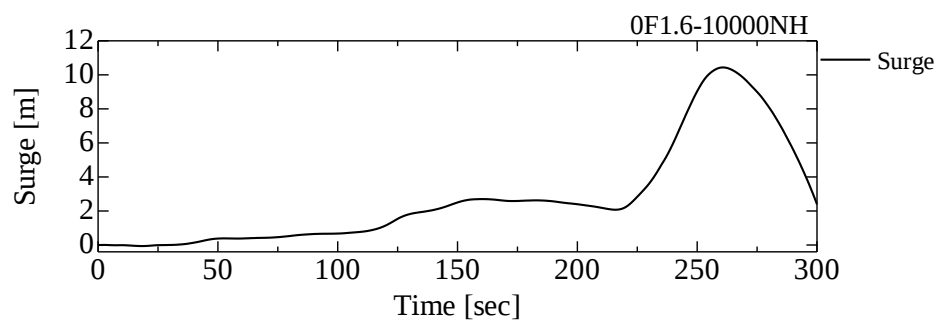


Fig. 3.8.6 Surge (0F1.6-10000NH).

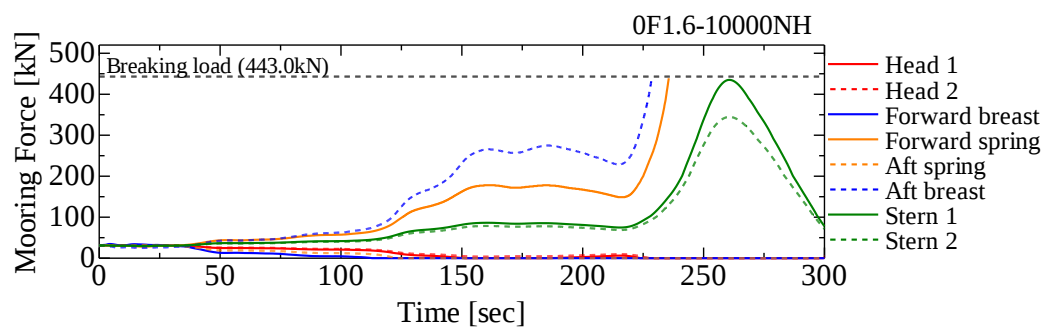


Fig. 3.8.7 Mooring force (0F1.6-10000NH).

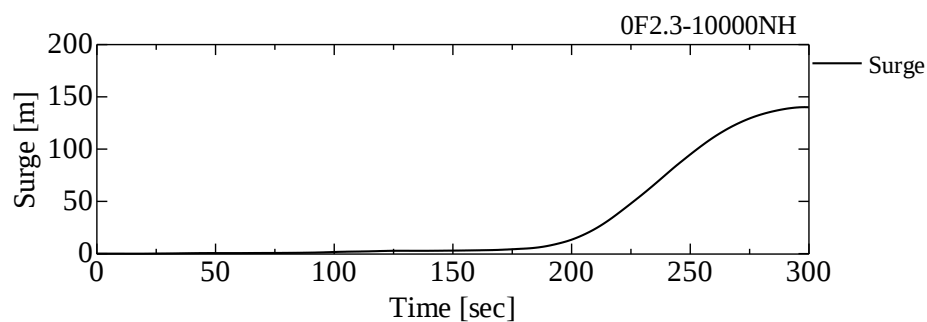


Fig. 3.8.8 Surge (0F2.3-10000NH).

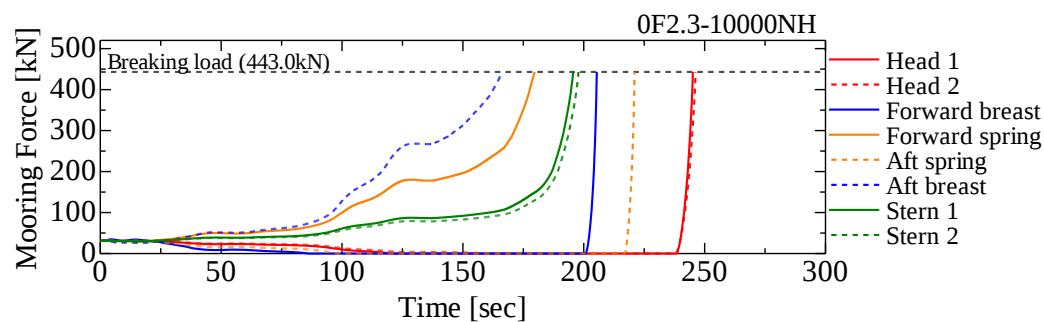
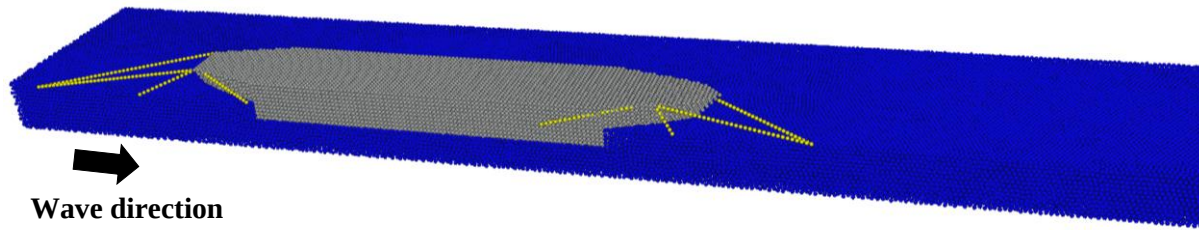
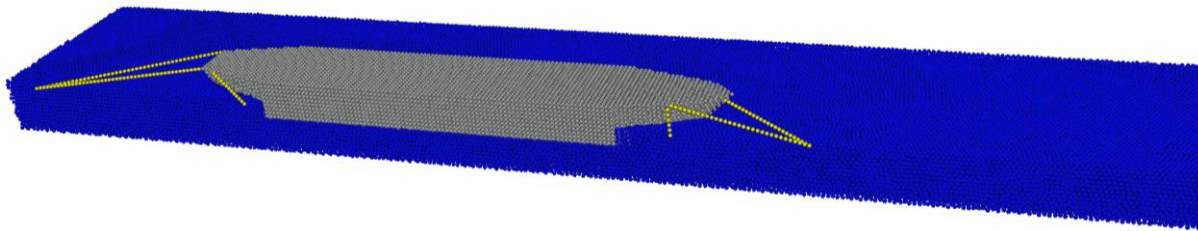


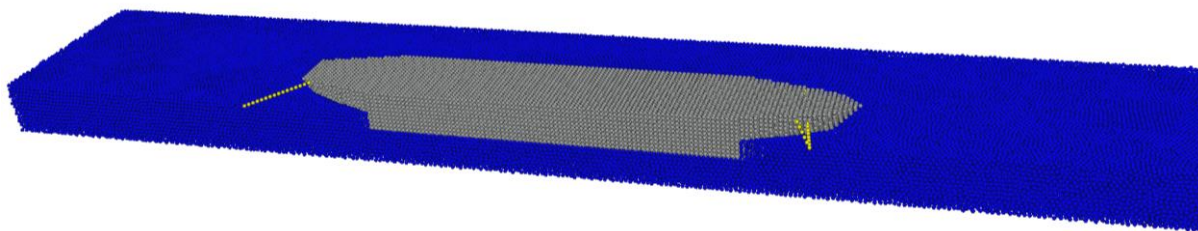
Fig. 3.8.9 Mooring force (0F2.3-10000NH).



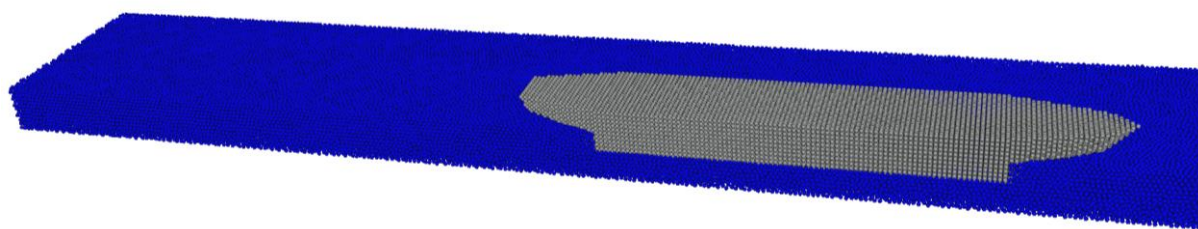
a) Time = 157.0sec



b) Time = 187.0sec



c) Time = 217.0sec



c) Time = 247.0sec

Fig. 3.8.10 Snapshots of simulation result (0F2.3-10000NH).

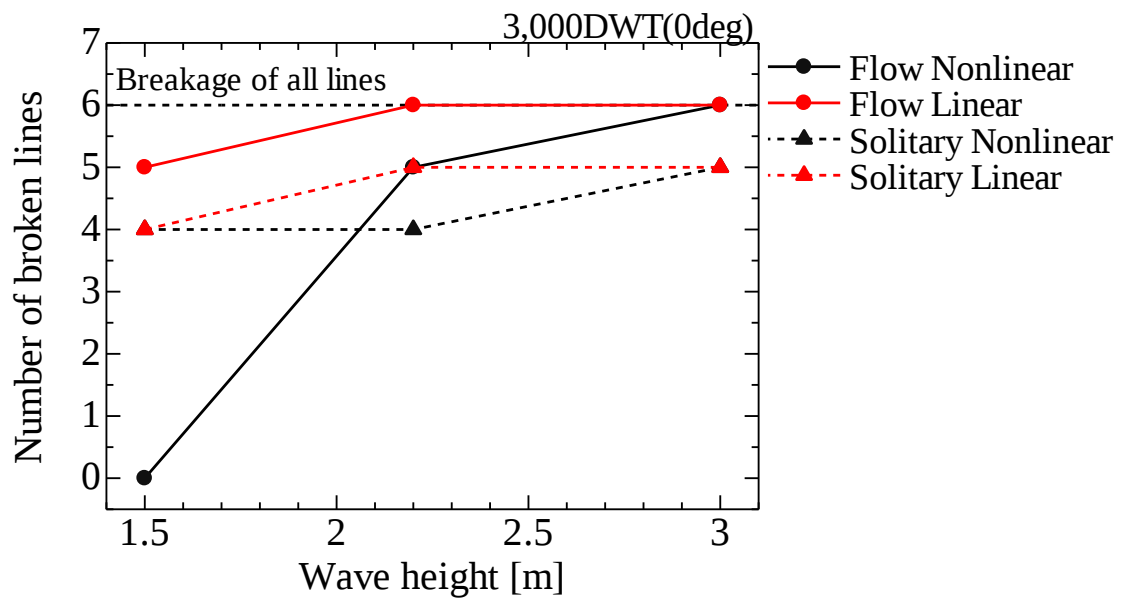


Fig. 3.8.11 Comparison of number of broken lines (0degrees, 3,000DWT).

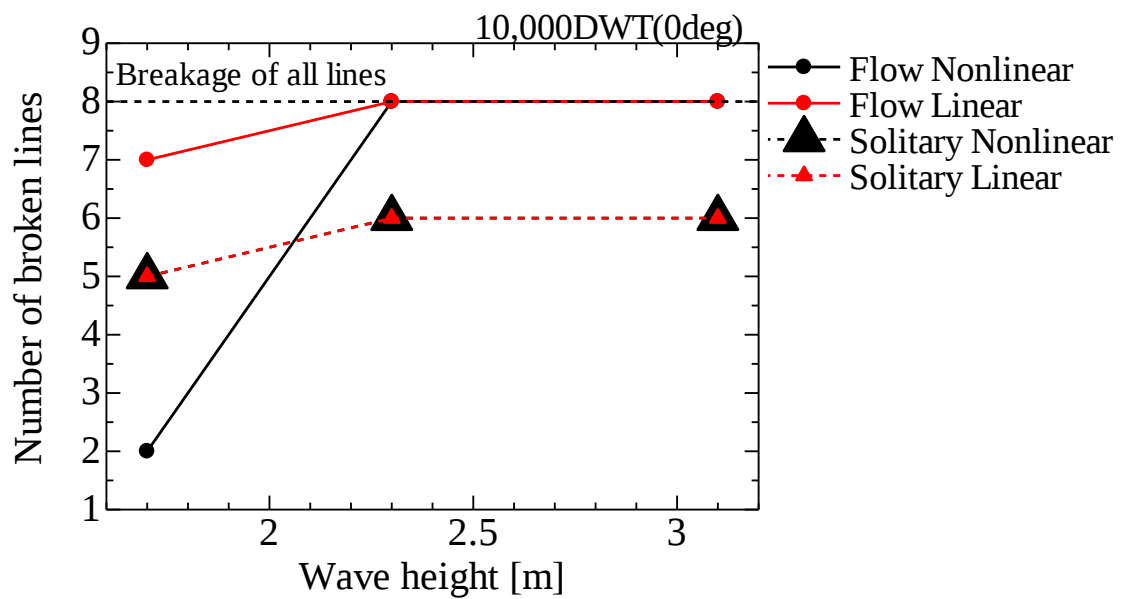


Fig. 3.8.12 Comparison of number of broken lines (0degrees, 10,000DWT).

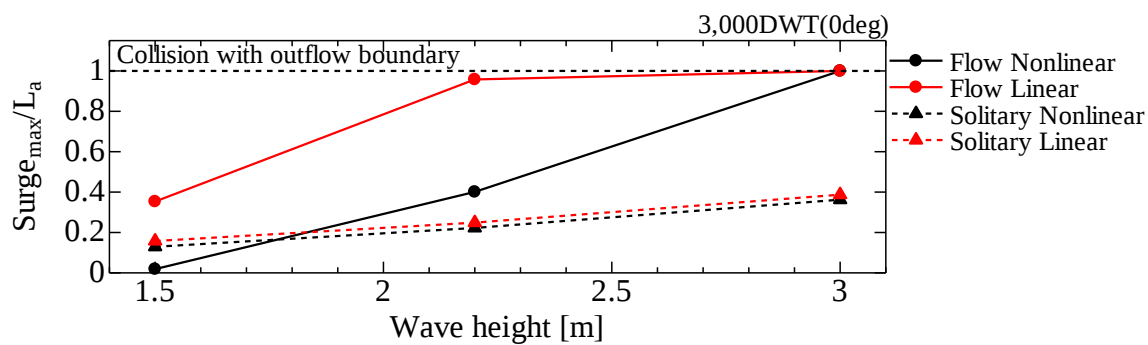


Fig. 3.8.13 Comparison of surge<sub>max</sub> (0degrees, 3,000DWT).

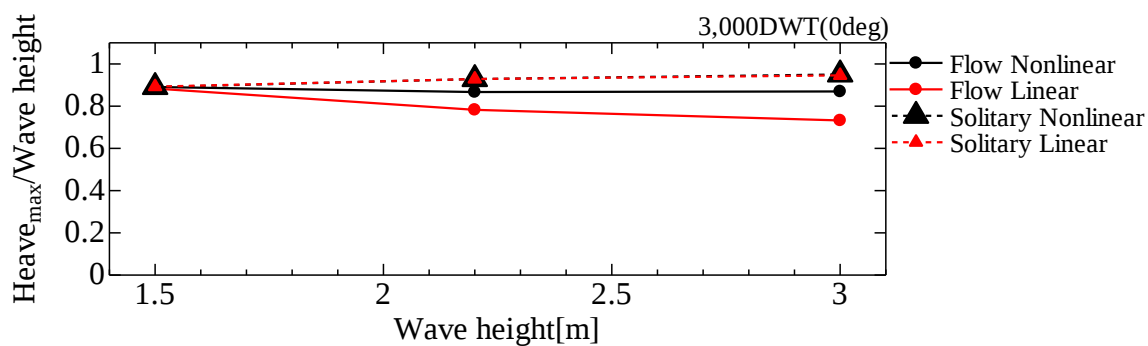


Fig. 3.8.14 Comparison of heave<sub>max</sub> (0degrees, 3,000DWT).

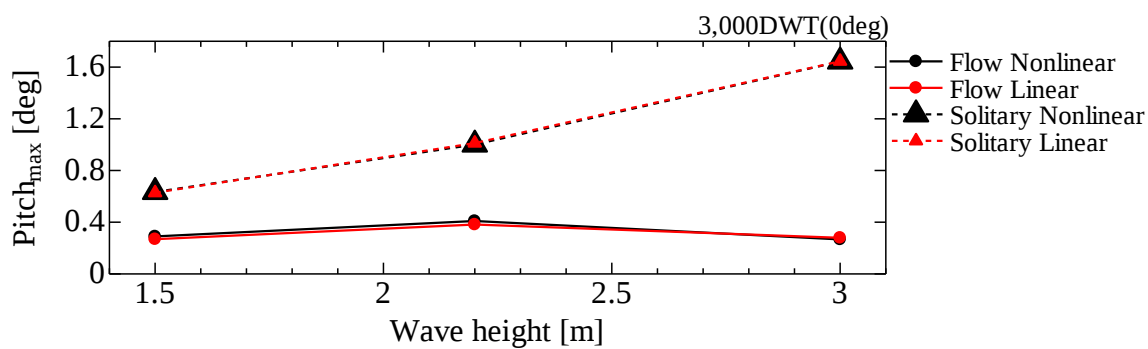


Fig. 3.8.15 Comparison of pitch<sub>max</sub> (0degrees, 3,000DWT).

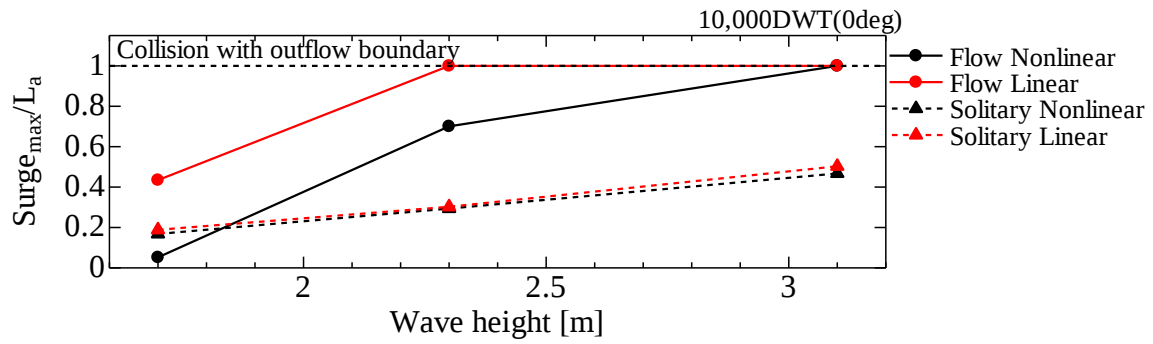


Fig. 3.8.16 Comparison of surge<sub>max</sub> (0degrees, 10,000DWT).

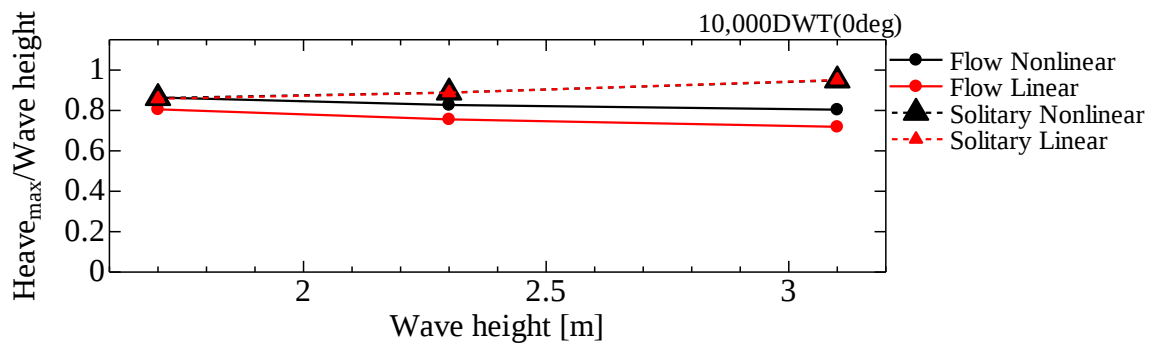


Fig. 3.8.17 Comparison of heave<sub>max</sub> (0degrees, 10,000DWT).

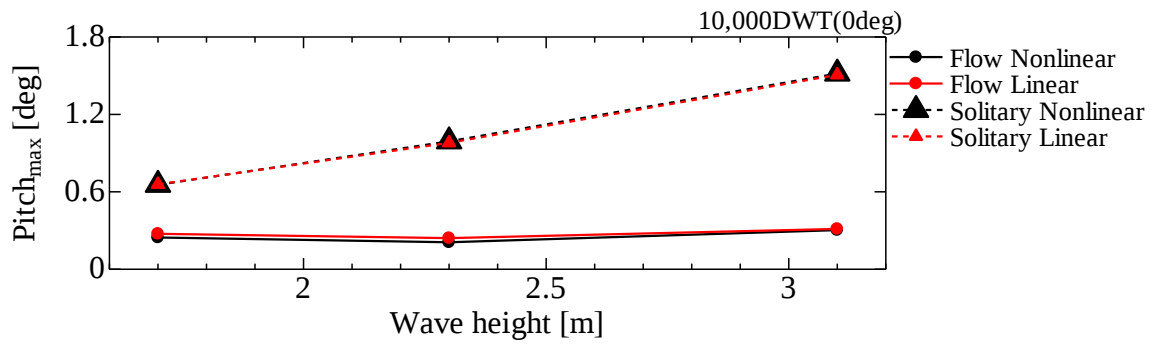


Fig. 3.8.18 Comparison of pitch<sub>max</sub> (0degrees, 10,000DWT).

### 3.8.2 90 度入射

Table 3.8.3 および Table 3.8.4 に 3,000DWT および 10,000DWT の各入射波高（流れと孤立波で誤差 0.1m ある場合は大きい方で統一）に対する乗り揚げ発生の結果、計 36 ケースをまとめている。乗り揚げが発生した場合は **Grounding**、乗り揚げが発生しなかった場合は **Safe** としている。乗り揚げ発生の判定は、船底粒子が岸壁上面に接触したかで決定する。2 文字のアルファベットの 1 文字目は入射波形を意味し、流れの場合は **F**、孤立波の場合は **S** としている。また 2 文字目は係留の設定を意味し、非線形係留モデルの場合は **N**、線形ばねモデルの場合は **L**、無係留では **U** としている。また Table 3.8.3 の淡紅色は、久保の乗り揚げ算定式<sup>(51)</sup>で乗り揚げ判定となるケースである。乗り揚げ算定式は、式(3.8.1)であらわされ、波高 $\eta$ が船舶の喫水 $d$ と天端高 $a$ の合計値以上となり、船底が岸壁高さを超えると、船舶の乗り揚げが発生すると判定する。本計算条件では、3,000DWT の場合は喫水 4m、天端高 2m であるため波高 6m 以上で、10,000DWT の場合は喫水 6m、天端高は同じく 2m であるため波高 8m 以上で算定式上は乗り揚げ判定となる。Table 3.8.3, Table 3.8.4 より、3,000DWT、10,000DWT とともに入射波形や係留モデル、係留の有無で、乗り揚げ発生の結果は、ほとんどのケースで変わらないことから、押し波による船舶の乗り揚げ現象に関して、係留索や入射波の周期特性の影響はすくないと考えられる。

$$\eta \geq a + d \quad (3.8.1)$$

乗り揚げが発生した流れ、非線形係留モデルケースでの一例として、Fig. 3.8.19 に 90F5.0-3000NH の、Fig. 3.8.20 に 90F5.4-10000NH のスナップショットを示す。3,000DWT、10,000DWT とともに入射方向側に傾斜しながら、岸壁をはいあがるように乗り揚げ、その後係留索が破断しながら、急速に岸壁上を押し流されて、計算領域外にでた。一方で、同じ波高の孤立波の場合、Fig. 3.8.21 に示すように、90S5.1-3000NH では船体が乗り揚げ後、岸壁上に留まったケースや、Fig. 3.8.22 に示すように、90S6.6-10000NH では、船体の一部が岸壁に乗り揚げた直後に、大きく傾斜しながら水域に戻ったケースがみられた。これは孤立波の水位の持続時間が短いために生じた現象である。より津波波形に近い流れを模擬津波として採用することで、乗り揚げ後の陸域への流出も再現できるようになったといえる。ただし、本シミュレーションでは船体と岸壁間の摩擦を考慮していない。船体と岸壁間の摩擦により、津波中の船体は岸壁上で停止する可能性もあることから、今後は、両間の摩擦を考慮し、より実現象に近い乗り揚げ挙動および乗り揚げ後の、着底中の挙動を再現していく必要がある。

シミュレーション可視化結果から、流れの場合、岸壁越流後の水粒子の流速は増幅していることがわかった。そこで Fig. 3.8.23（水深 10m）、Fig. 3.8.25（水深 12m）に示すように、船体を配置しない入射波条件のケースで、岸壁先端から前後 30m、5m 間隔の位置で自由表面水平流速を計測し、その最大値をプロットして、岸壁先端近傍における Y 方向最大水平流速 $u_{max}$ の空間変化を確認した。グラフの横軸は、岸壁先端をゼロとし、Fig. 3.7.1 の座標系にあわせて、流入境界側（Y 方向）をプラスとしている。Fig. 3.8.23, Fig. 3.8.25 から岸壁前面の領域では流入境界からの流れは固定岸壁の影響により流速は 1.0~1.5m/s と小さいが、越流後は水深が急激に小さくなるため、流速は 3~5m/s と 3 倍以上に増幅している。またこの最大水平流速 $u_{max}$ 、そのときの水深を $h'$ として式

(3.8.2)に示すフルード数 $F_r$ に無次元化したものが Fig. 3.8.24（水深 10m）, Fig. 3.8.26（水深 12m）である。Fig. 3.8.24, Fig. 3.8.26 から岸壁越流前はフルード数は 0.1 程度であるが、越流後は 1 にせまっていることから、常流から射流に近い流れとなり、その性状が変わったといえる。実際の現象でも、岸壁に乗り揚げた船舶は、越流後の増幅した流速の影響を受けて、急激に陸域に押し流される可能性があるといえる。

$$F_r = \sqrt{\frac{u_{max}}{gh'}} \quad (3.8.2)$$

船体および岸壁近傍の流速変化についてより詳細に検討するため、2次元断面での流速ベクトルの空間分布図を作成した。一例として、90F5.4-10000NH のケースにおける、計算開始から 213.4 秒での流速ベクトルの空間分布図を Fig. 3.8.27 および Fig. 3.8.29 に示す。Fig. 3.8.27 は船首から x 方向に-15m の船首付近における、Fig. 3.8.29 は船尾から x 方向に+8m の船尾付近における断面図である。水粒子の位置ベクトルおよび速度ベクトルは、周囲の粒子と平均化して速度ベクトルで表現し、船体である剛体粒子および壁粒子は粒子で表現している。ベクトルで表現された水粒子は、前述したように、岸壁越流部および岸壁上で流速が増幅していることがわかる。また船体近傍に着目すると岸壁側（右舷）と流入境界側（左舷）で周囲の水粒子の流速に違いがみられ、船体と岸壁により流路が狭くなって、流速が増大している。船首付近における Fig. 3.8.27 の Point A および Point B での鉛直流速の時系列データを Fig. 3.8.28 に、船尾付近における Fig. 3.8.29 の Point C および Point D での鉛直流速の時系列データを Fig. 3.8.30 にそれぞれ示す。鉛直流速の波形は 10 秒間（101 データ）移動平均により平滑化処理をしている。Fig. 3.8.28, Fig. 3.8.30 とともに 230 秒あたりから岸壁側（右舷側）の流速が急激に小さくなっているが、これは船体の乗り揚げにともない計測点の座標に船体が重なった影響である。これらから、岸壁側（右舷側）の鉛直流速は流入境界側（左舷）と比べて最大 1.5m/s 程度大きいことがわかる。この船幅方向の鉛直流速の差により、岸壁側の船体が持ち上がり、Fig. 3.8.19 および Fig. 3.8.20 の 1 枚目にみられるような、流入境界側への傾斜が生じたと考えられる。この傾斜と、船体と岸壁間で摩擦や防舷材を考慮していないことから、船底が岸壁高さを超えなくても、滑りあがるように乗り揚げが発生したため、算定式の乗り揚げ判定と一致しないケースがあると考えられる。岸壁近傍の船体の挙動は、船体と岸壁（防舷材）、また入射波と岸壁との相互影響など現象として複雑であり、その再現にはさらなる検討を要するが、本計算結果から、算定式のみでの判定では危険側になる可能性があることから、簡便な算定式に加えて、数値シミュレーションや水槽実験などの結果をデータベースに反映する必要がある。特に MPS 法のような CFD を活用することで、Fig. 3.8.27 や Fig. 3.8.29 のように、場全体の情報を解析できるため、CFD は複雑な現象に対して有用なツールのひとつであるといえる。

各入射波高（流れと孤立波で誤差 0.1m ある場合は大きい方で統一）に対する、係留索の破断総本数について入射波形、係留モデル別に、3,000DWT のケースは Fig. 3.8.31 に、10,000DWT のケースは Fig. 3.8.32 にまとめている。各凡例は、流れの場合は F（実線丸）、孤立波の場合は S（破線三角）、非線形係留モデルの場合は N（黒）、線形ばねモデルの場合は L（赤）としている。乗り揚げが発生しなかった波高 4.4m、4.7m のケースでは、3,000DWT では破断が発生せず、10,000DWT

では破断が発生しないか、孤立波の場合の、1本のみの破断だけである。これは船体の浮上にもなって、あそびのすくない **breast line** の破断である。次に波高 5.1m, 5.5m の場合、3,000DWT, 10,000DWT とともに、流れの場合で乗り揚げが発生した場合は全係留索が破断している。一方で、孤立波では、Fig. 3.8.21, Fig. 3.8.22 に示したように、一部乗り揚げ後、岸壁にとどまったあるいは落水したケースがあり、この場合は乗り揚げが発生しても **Head line**, **Stern line** が破断しないため、一部係留索が残っている。波高が最も高い 6.2m, 6.6m となると入射波形、係留モデルに関係なく、船体は乗り揚げ後、陸域に押し流されたため、全係留索の破断が発生した。以上の結果から、係留索の破断は水位上昇のみではほとんど発生せず、乗り揚げ発生後に、係留索は破断していくと考えられる。また孤立波の場合は、陸域への流出が発生せず、破断の本数が少なく評価される場合もあることから、津波周期を考慮した流れで検討した方がよいといえる。

Table 3.8.3 Comparison of grounding existence (90degrees, 3,000DWT).

3,000DWT

|           | Wave height[m] |           |           |
|-----------|----------------|-----------|-----------|
|           | 4.4            | 5.1       | 6.2       |
| <b>FN</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>FL</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>FU</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>SN</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>SL</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>SU</b> | Safe           | Grounding | Grounding |

F : Flow S : Solitary wave

N : Nonliner L : Linear U : Unmooring

Table 3.8.4 Comparison of grounding existence (90degrees, 10,000DWT).

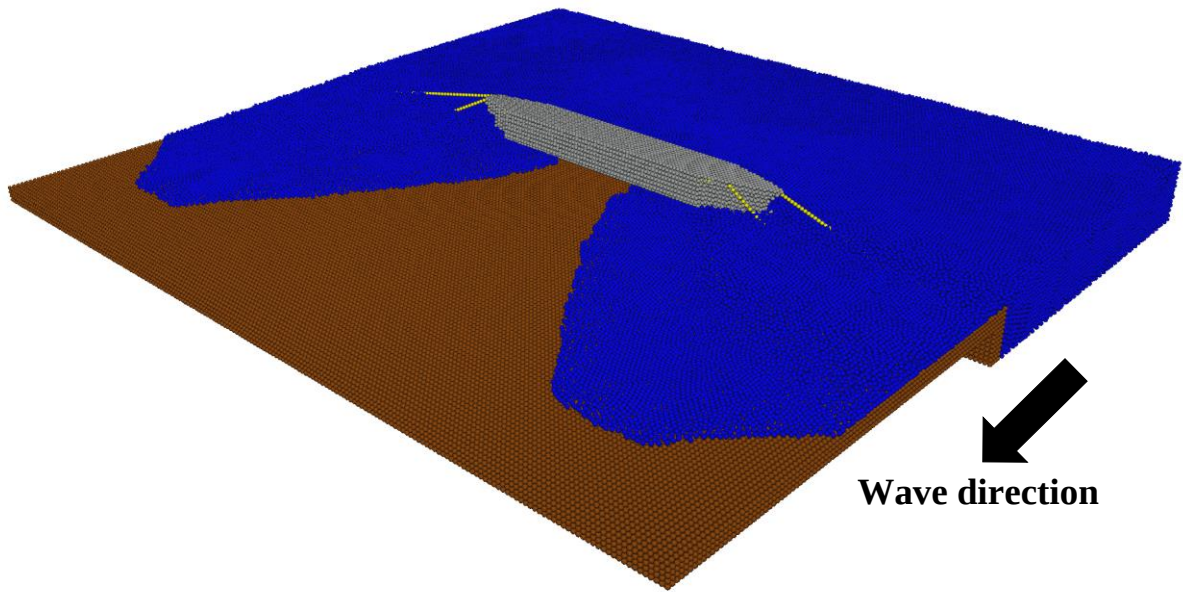
10,000DWT

|           | Wave height[m] |           |           |
|-----------|----------------|-----------|-----------|
|           | 4.7            | 5.5       | 6.6       |
| <b>FN</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>FL</b> | Safe           | Safe      | Grounding |
| <b>FU</b> | Safe           | Safe      | Grounding |
| <b>SN</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>SL</b> | Safe           | Grounding | Grounding |
| <b>SU</b> | Safe           | Grounding | Grounding |

F : Flow S : Solitary wave

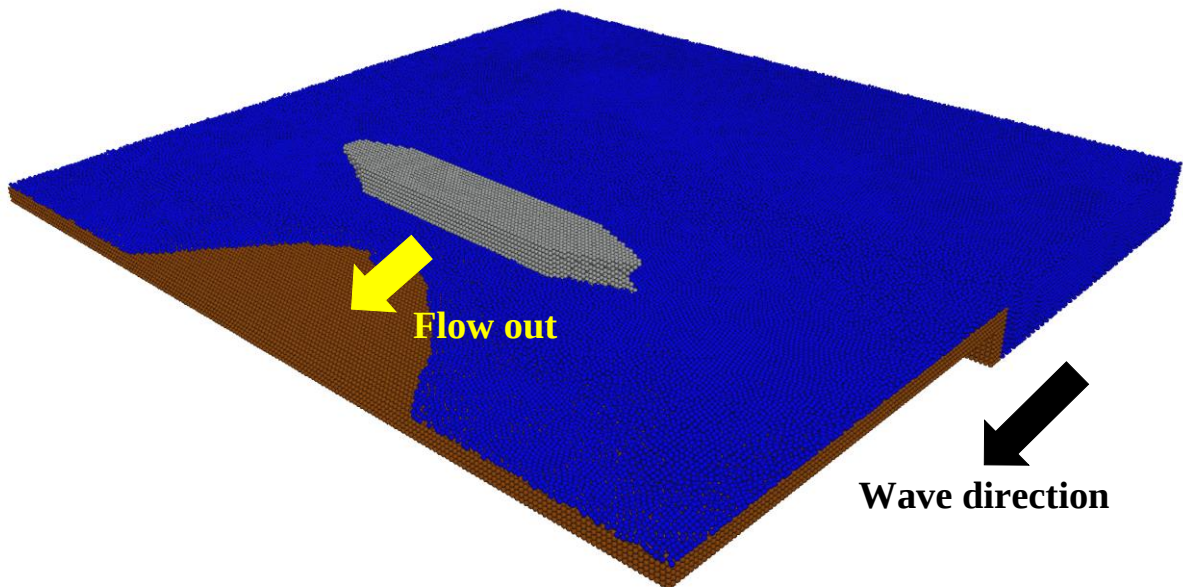
N : Nonliner L : Linear U : Unmooring

t = 202.205002



a) Time = 202.2sec

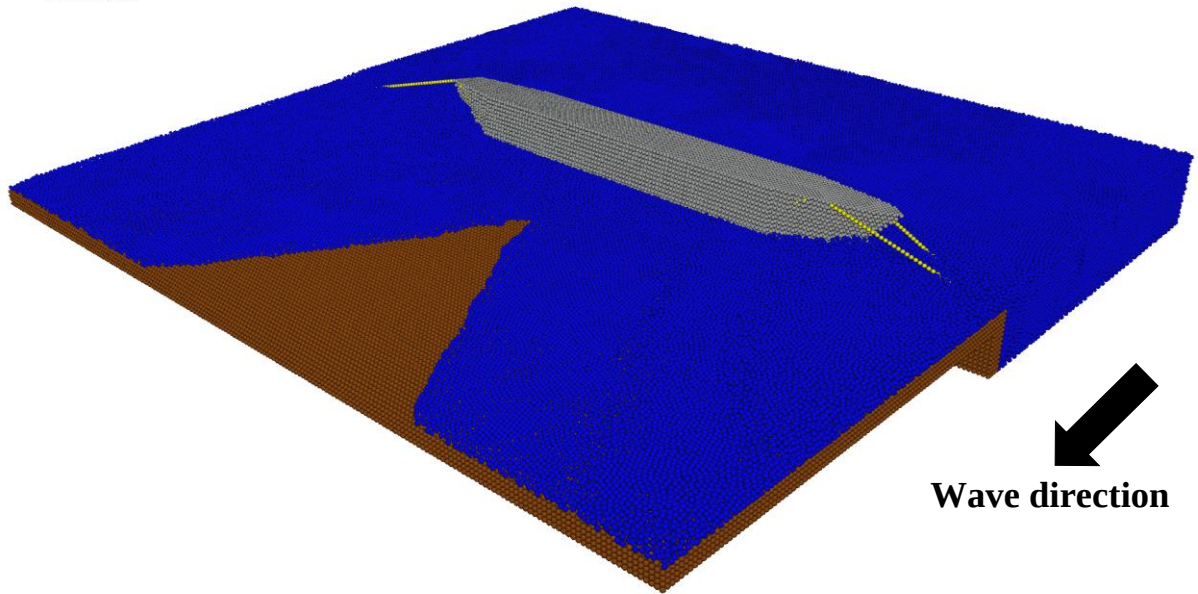
t = 220.505005



b) Time = 220.5sec

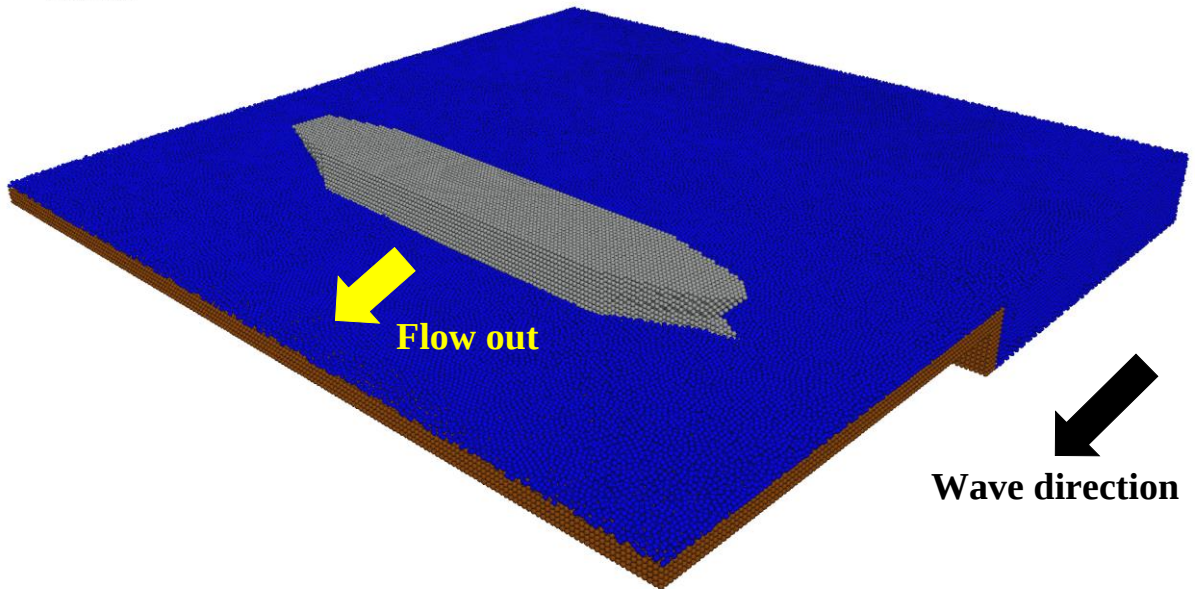
Fig. 3.8.19 Snapshots of simulation result (90F5.0-3000NH).

t = 219.505005



a) Time = 219.5sec

t = 251.304993



a) Time = 251.3sec

Fig. 3.8.20 Snapshots of simulation result (90F5.4-10000NH).

t = 100.004997

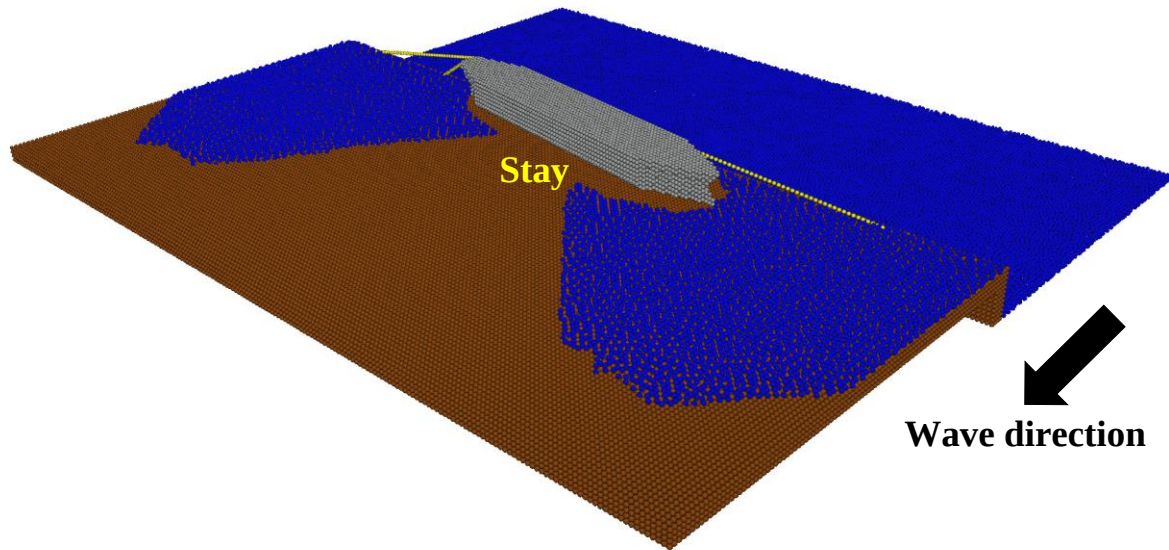


Fig. 3.8.21 Snapshots of simulation result (90S5.1-3000NH, Time = 100.0sec).

t = 43.900002

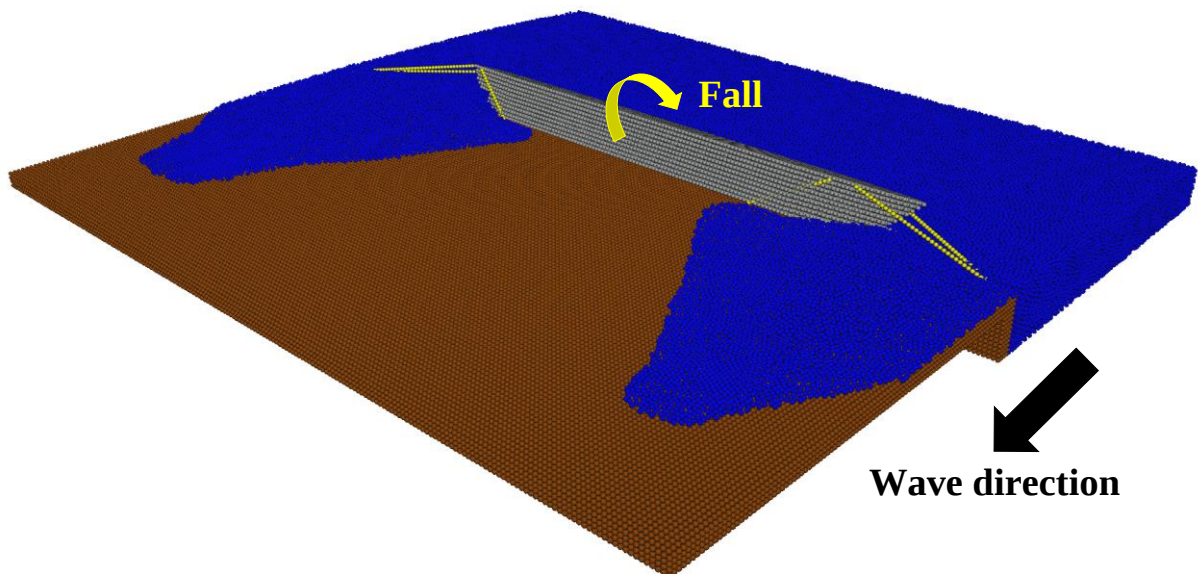


Fig. 3.8.22 Snapshots of simulation result (90S6.6-10000NH, Time = 43.9sec).

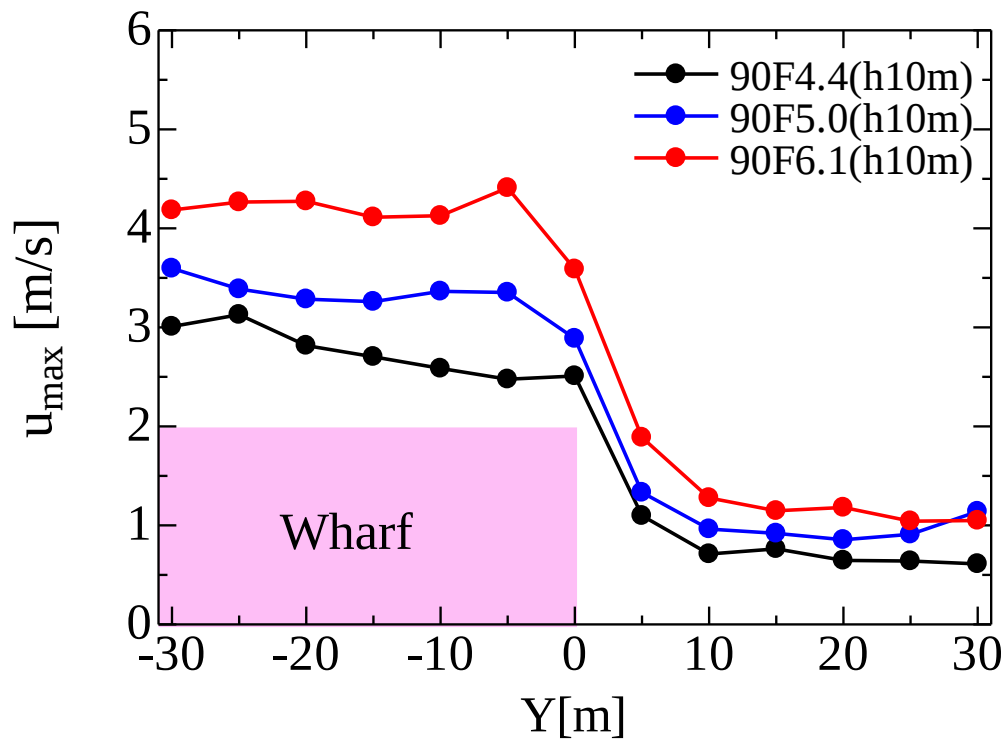


Fig. 3.8.23 Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h10m).

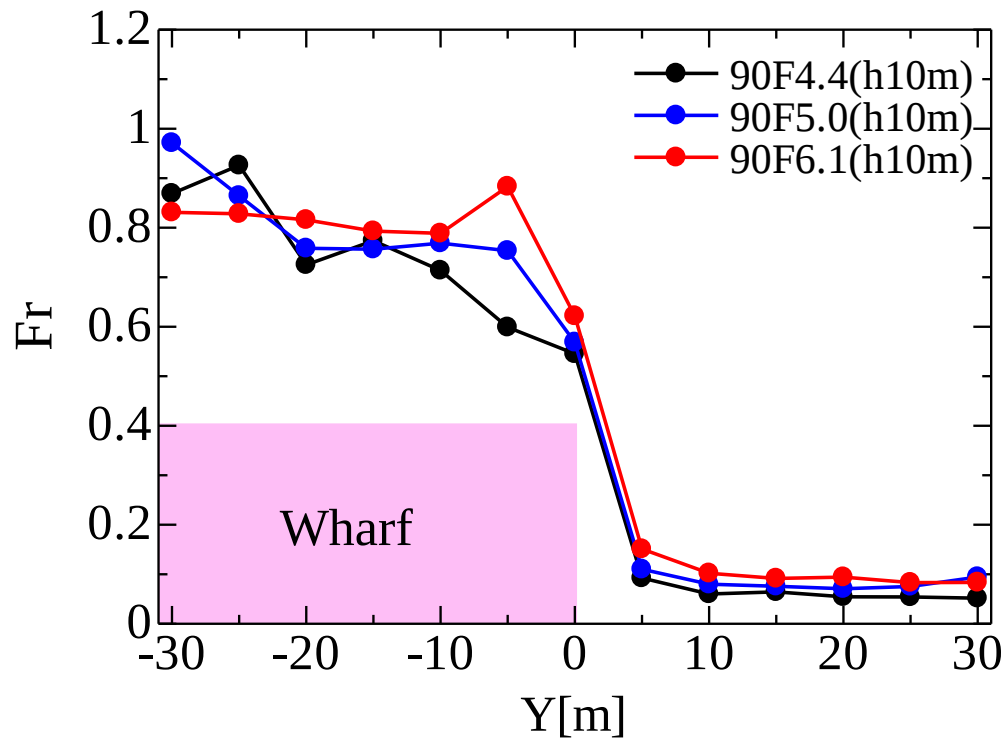


Fig. 3.8.24 The Froude number near the wharf (h10m).

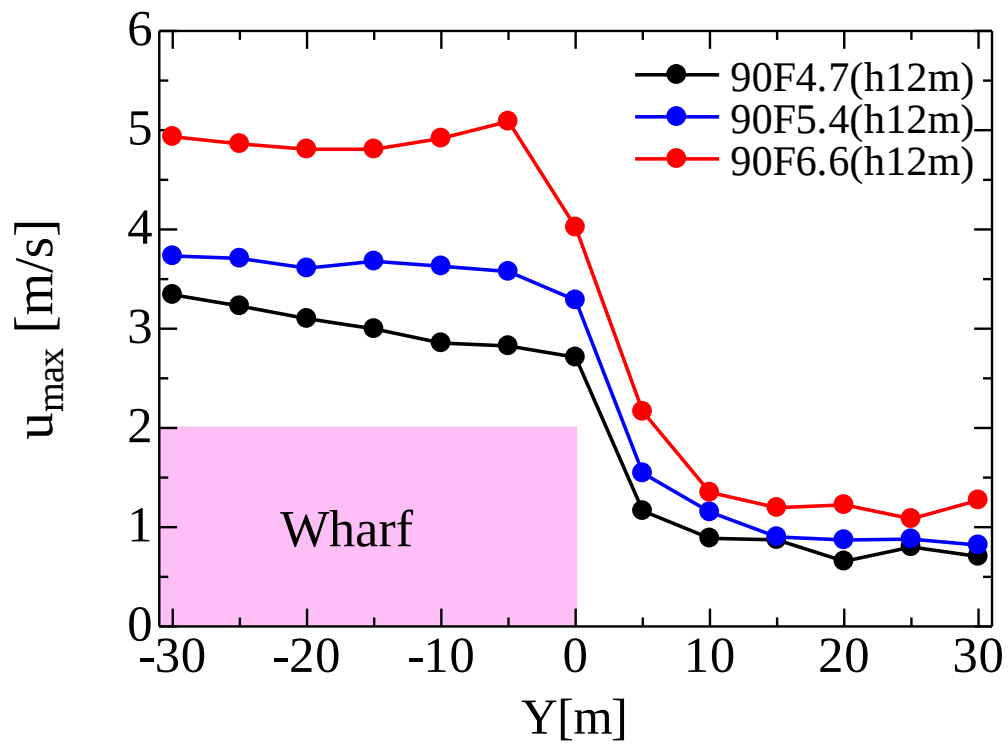


Fig. 3.8.25 Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h12m).

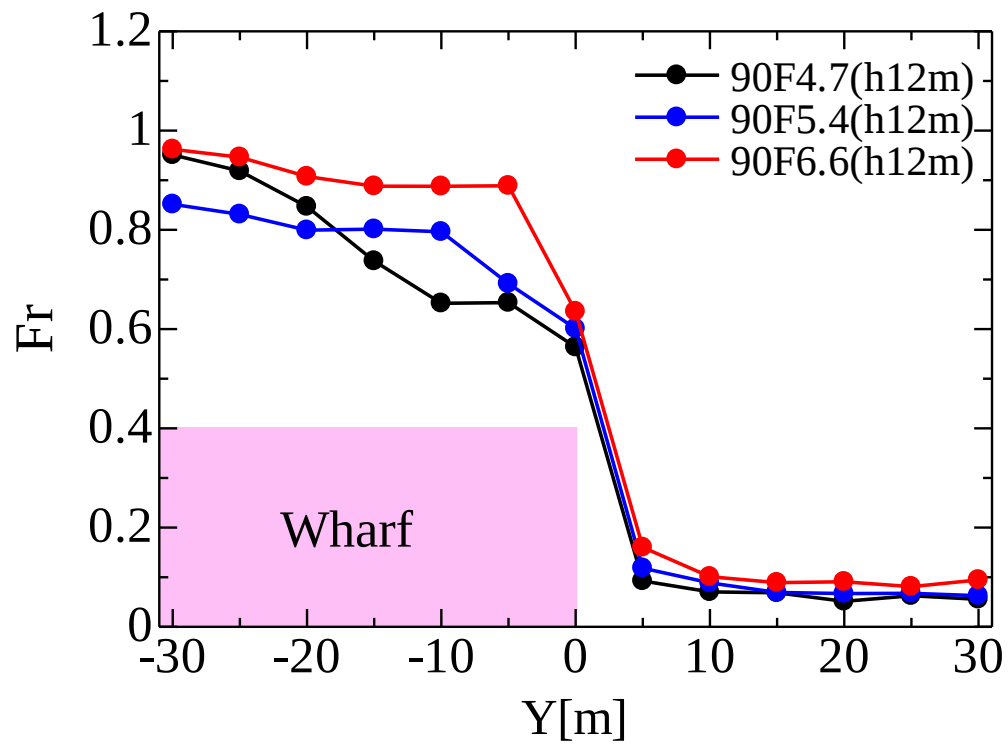


Fig. 3.8.26 The Froude number near the wharf (h12m).

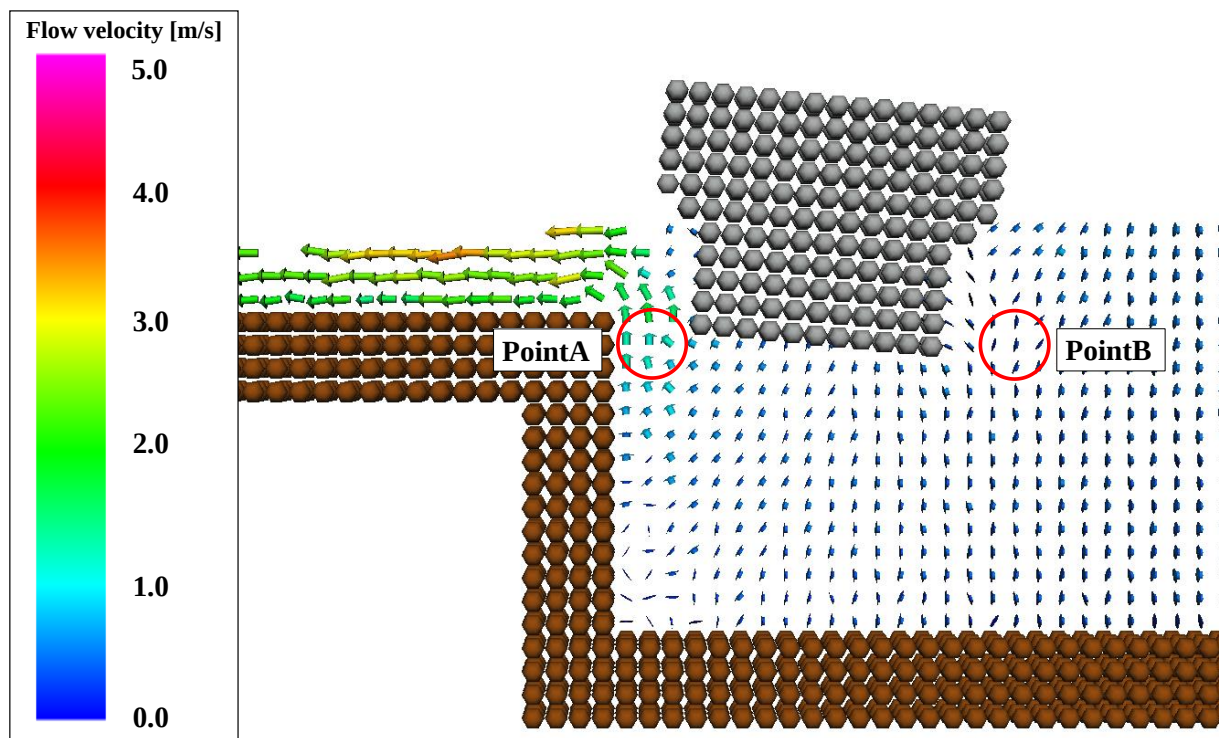


Fig. 3.8.27 Flow velocity vectors and contours around bow (90F5.4-10000NH, Time = 213.4sec).

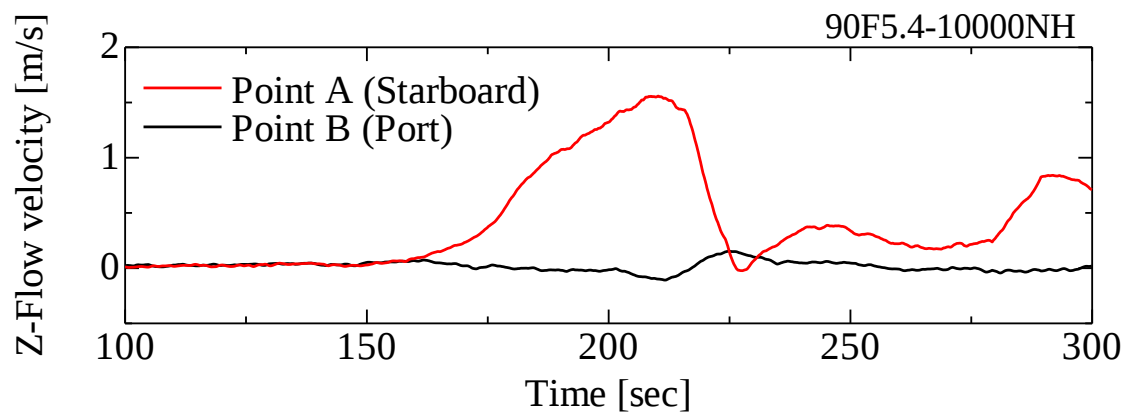


Fig. 3.8.28 Vertical flow velocity at Point A and Point B around bow (90F5.4-10000NH).

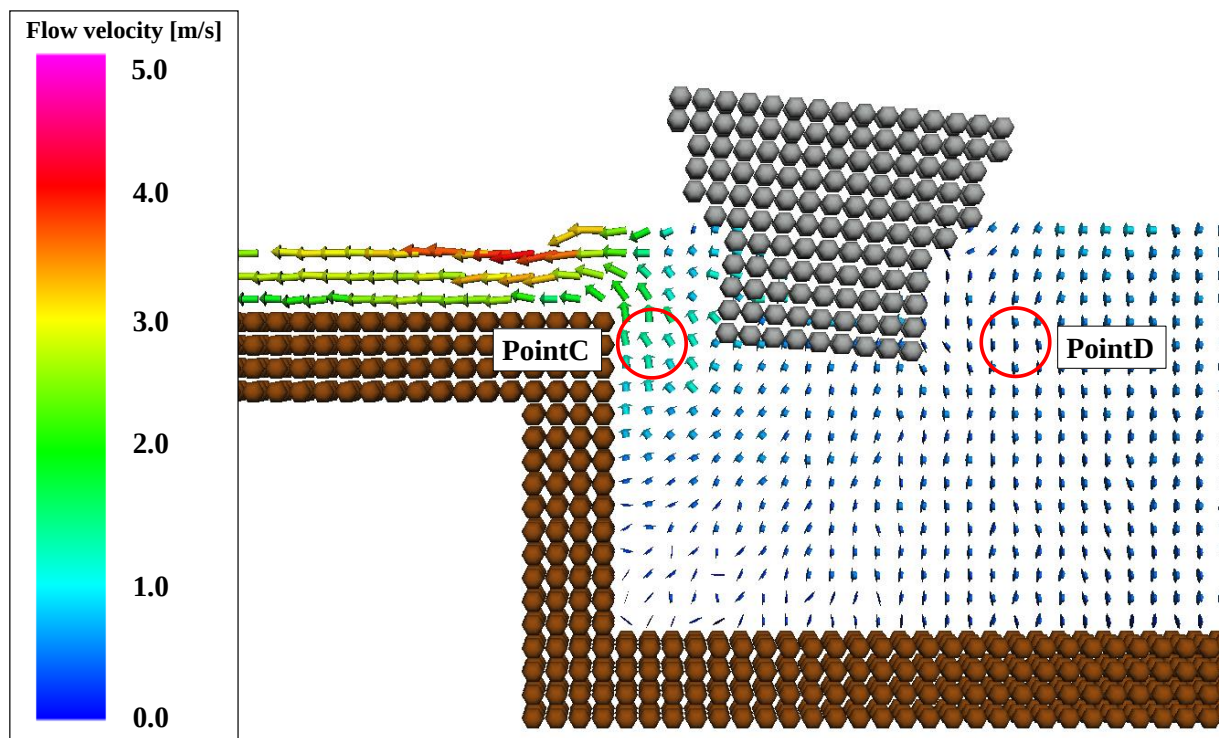


Fig. 3.8.29 Flow velocity vectors and contours around stern (90F5.4-10000NH, Time = 213.4sec).

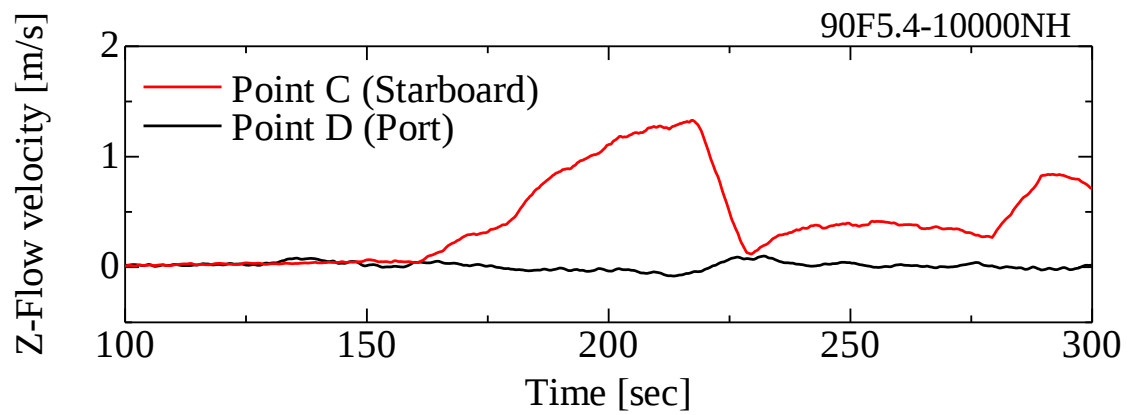


Fig. 3.8.30 Vertical flow velocity at Point C and Point D around stern (90F5.4-10000NH).

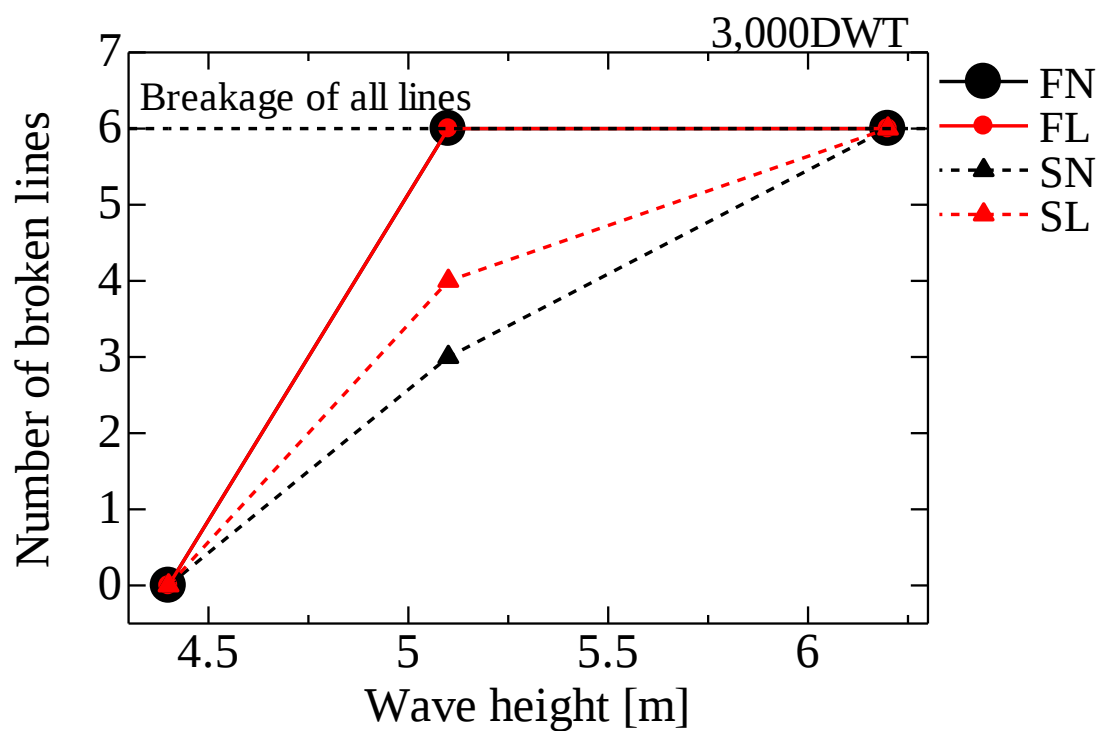


Fig. 3.8.31 Comparison of number of broken lines (90degrees, 3,000DWT).

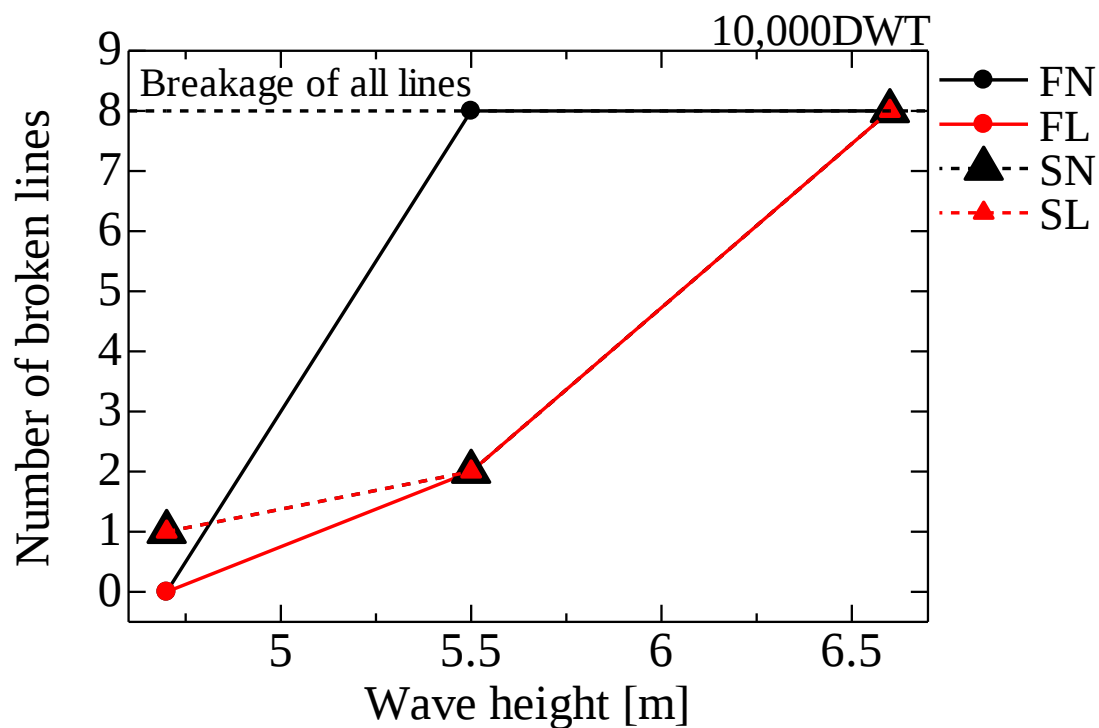


Fig. 3.8.32 Comparison of number of broken lines (90degrees, 10,000DWT).

### 3.9 津波被害予測データベースにおける係留索破断判定基準の更新

前節までの、流れ、非線形係留モデルによる 0 度入射および 90 度入射の検討から、被害判定基準を更新する。0 度入射では、3,000DWT, 10,000DWT とともに波高 2m でほとんどの係留索が破断し、漂流に至った。一方で、90 度入射では、3,000DWT, 10,000DWT とともに乗り揚げが発生するまでは一部の短い係留索を除いて破断は発生せず、乗り揚げが発生すれば、陸域へ押し流されてすべての係留索が破断した。これらの結果から、津波被害予測データベースに入力するパラメータとして入射方向を新たに加え、0 度入射の場合は津波高 2m で 10,000DWT 以下の船舶に破断が発生し、90 度入射の場合は算定式から乗り揚げが発生すれば、10,000DWT 以下の船舶に破断が発生と判定するように基準を更新する。

先行研究のデータベースでは、増田らにより作成された係留索破断チャート<sup>(19)</sup>から、3,000DWT 以下の船舶は津波高 5m 以上で、10,000DWT 以下の船舶は津波高 9m 以上で破断発生と判定しており、それらと比較して更新後の破断判定基準はより厳しくなっている。すなわち従来の基準は危険側の判定であったといえる。これは、増田らの検討によるチャート作成時の 3 次元 MPS 法における検討の場合、係留索の設定が合成繊維索の中では破断荷重が大きいナイロン索であり、またその索径が 3,000DWT の場合は 60mm, 10,000DWT の場合は 100mm と太いため、本検討と比較して強い係留力を発揮していたためと考えられる。従って、本検討の実状により近い設定により係留索破断の判定をより高精度化できたといえる。ただし、模擬津波の周期は 10 分のみであり、斜め入射時や 10,000DWT 以上の船舶に対して破断の判定、また引き波による被害判定は検討できていない。今後は、これらの項目についてさらなる検討を行い、津波被害予測データベースを拡充していく必要がある。

### 3.10 結語

津波造波境界、非線形係留モデルを整備し、0 度（追い波）および 90 度（横波）の 2 方向の入射波条件で、半載状態の 3,000DWT, 10,000DWT の船舶を対象とした津波シミュレーションを実施し、津波被害予測データベースの被害判定基準を更新した。さらに、従来モデル（孤立波、線形ばね）でも検討し、モデルの違いが船舶の津波被害結果に与える影響について考察した。その結果以下のような知見を得ることができた。

<流れ・非線形係留モデル>

- ① 0 度入射では、3,000DWT および 10,000DWT とともに波高 2m でほぼ、すべての係留索が破断し、漂流が発生した。このとき、Surge 変位に対して各係留力は分散して発生し、実質 1~2 本で負担していたため、船尾方向にとり、索長の短い係留索から次々と破断が発生していった。従って、津波に対して効果的な係留とするためには、増しもやいのように、同一の係留索を同じ方向に、同じ長さ配置して、集中的に係留力を発揮することが重要である。
- ② 90 度入射では、3,000DWT では波高 5.1m から、10,000DWT では波高 5.5m から、津波造波境界

側への傾斜をとめないながら、岸壁を這い上がるように乗り揚げが発生し、算定式の結果と一致しないケースが多くみられた。これは、船体と岸壁に挟まれた領域で、水粒子の鉛直流速が増大することにより生じた、船幅方向の鉛直流速の差に起因する津波造波境界側への傾斜と船体および岸壁間の摩擦を考慮していないことにより乗り揚げが生じやすくなったためと考えられる。本計算結果から、算定式のみでの判定では危険側になる可能性があるため、今後は、防舷材や摩擦を考慮したモデルを導入し、複雑な岸壁近傍の津波中船体挙動を数値シミュレーションや水槽実験で再現し、データベースに反映していく必要がある。

- ③ 90 度入射では、乗り揚げ前の船体の浮上のみでは、係留索の破断は **Breast line** のような短い索を除いて発生せず、乗り揚げ後に陸域に押し流されることによって、全係留索が破断した。従って岸壁への乗り揚げが発生すると、係留索の破断が生じる可能性が高いといえる。
- ④ ①～③の結果から、入射方向により係留索破断の結果は大きく異なることがわかった。そこで、入射方向を新しいパラメータとして加え、0 度入射の場合は津波高 2m で 10,000DWT 以下の船舶に破断が発生し、90 度入射の場合は算定式から乗り揚げが発生すれば、10,000DWT 以下の船舶に破断が発生と、津波被害予測データベースにおける破断判定の基準を更新した。

#### <従来モデルとの比較>

- ⑤ 0 度入射での、係留モデルの違いについて、流れの場合、破断荷重の差が影響するような波高が小さいケースでは、線形ばねモデルでは破断が発生しやすくなるため、過大な評価となる可能性がある。また波形の違いについて、流れの方が船体に入射する時間が長いため、両係留モデルで破断発生後は、船体は漂流して **Surge** の運動が大きくなり、破断本数も多くなる。
- ⑥ 90 度入射では、入射波形や係留モデルの違い、また係留の有無で、乗り揚げ発生の結果はほとんどのケースで変わらないため、押し波による岸壁への乗り揚げ現象に関して、係留索や入射波の周期特性の影響はすくないと考えられる。一方で、乗り揚げ発生後の挙動は、入射波形により差異が認められ、流れの場合は乗り揚げ後は陸域に押し流されるのに対して、孤立波の場合は乗り揚げ後、岸壁上で停止する、あるいは水域に戻るケースがあった。より実現に近い流れの方が、乗り揚げ発生後の挙動を再現できているといえる。しかし、防舷材や岸壁との摩擦を考慮していないことから、乗り揚げ発生後の挙動の再現については、さらなる検討を要する。
- ⑦ 90 度入射の流れの検討から、水粒子の岸壁越流後は、水深が急激に小さくなるため、表層の水平最大流速がおよそ 3 倍以上増大し、フルード数による比較から、流れの性質が越流前後で大きく変わっていることがわかった。また、2 次元断面の流速ベクトルの空間分布図を作成することで、越流後に流速が増大するようすだけでなく、船体と岸壁間の流速が増大するようすも確認することができた。MPS 法のような CFD は、容易に場全体の情報を解析できる点で、有用なツールのひとつであるといえる。

## 第4章 津波防災対策データベースの作成

### 4.1 概要

前章の津波シミュレーションの結果をふまえて、岸壁係留船舶に対して津波防災対策を検討し、その有効性についてまとめるとともに、実施すべき津波対策を提示し、その被害低減効果をまとめた津波防災対策データベースを作成する。

0度入射に関しては、係留強化による対策を中心に検討する。まず波高 2~8m 程度までの押し波津波シミュレーションを実施し、各波高での最大係留力を計測する。この最大係留力を上回るために必要な係留索の材質、索径、本数を算定することで、津波高に対して装備すべき係留条件を示した津波対策係留索リストを作成する。

90度入射に関しては、本研究室で提案されてきた、浮体式津波対策用岸壁<sup>(17)</sup> (Floating Tsunami Protection Wharf 以下 FTPW) と深喫水型浮体式津波対策用岸壁<sup>(52)</sup> (Deep-draft type Floating Tsunami Protection Wharf 以下 DFTPW) による対策を中心に防災対策データベースにまとめる。FTPW および DFTPW の有効性はすでに示されてきた<sup>(17)(52)</sup>が、津波造波境界および非線形係留モデルを導入した津波防災対策シミュレーションによって FTPW および DFTPW の防災性能を再検討する。さらに先行研究<sup>(52)</sup>で FTPW は押し波に対しては強い防災性能を発揮するものの、引き波に対しては FTPW 下部の水領域の存在によってその防災性能が低下することが指摘されていることから、押し波だけでなく引き波時での津波対策も検討し、データベースに結果を蓄積していく。

### 4.2 計算ケース名の意味

前章と同様に、各ケース名から計算条件が識別できるように計算ケース名を設定した。Fig. 4.2.1 に示すように、最初の 3 つの英数字が入射波条件を、その後ハイフンを挟んで船体、係留条件を意味している。最初の数字が入射方向を意味し、0 または 90 となる。2 番目のアルファベットは波形の種類を示しており、流れの場合は F、引き波の場合は B となる。3 番目が波高である。そしてハイフンの次の 4 桁の数字が載貨重量トン数であり、本検討では 3000 または 10000 となる。この次のアルファベットは係留モデルであり、非線形係留モデルは N、係留力計測用の破断を考慮しない線形ばねは M が入る。最後のアルファベットは載貨状態を意味し、満載状態が F、半載状態が H、空載状態が B である。90度入射の検討で、FTPW あるいは DFTPW に係留する場合は最後に FTPW あるいは DFTPW を追記する。その他引き波の場合は波高は記載せず、また増しもやいや係留索の材質を変更しているため、必要に応じて条件を追記している。なお船体を配置しない入射波条件での計算ケースについても前章と同様に 0F1.5(h10m), 0F1.6(h12m) ようにかっこ書きで水深を付記することで識別する。

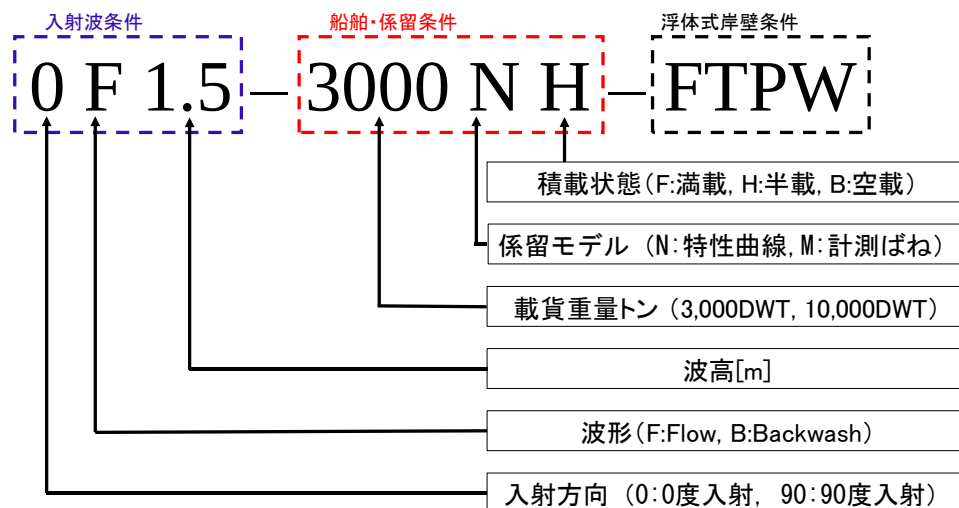


Fig. 4.2.1 Meaning of the calculation case name.

## 4.3 最大係留力計測シミュレーション(0 度入射)

### 4.3.1 計算条件

計算領域は、前章の 0 度入射シミュレーション条件と同様である。前章では、実際の係留索を模擬した係留条件であるが、本検討では係留強化に必要な Surge 方向の最大係留力を計測するため、Fig. 4.3.1 に示すように船尾中央甲板上から 60m 後方の直線上にあるゴースト粒子と係留し、破断を考慮しない線形ばねで検討する。線形ばねのばね定数は、Table 4.3.3 に示すように、入射波高に対して順次大きくしていき、波高によって Surge 変位が大きく変わらないようにした。

船舶条件は前章と同様の 3,000DWT, 10,000DWT とし、半載状態 (Half) に加えて、積載状態の変化を考慮し、満載 (Full) および空載状態 (Ballast) でも検討を行う。水深  $h$  は 3,000DWT の場合は 10m, 10,000DWT の場合は 12m である。Table 4.3.1 に 3,000DWT および 10,000DWT の船舶の計算条件を示す。満載喫水および空載喫水は前章 3.4 節で示した回帰式から算定し、各積載状態における船体の粒子数密度も前章と同様の手法で算定して、計算開始時に半粒子分 (0.5m) 沈下しないようにした。なお水の粒子数密度は前章と同様に  $1040 \text{ kg/m}^3$  である。

計算初期の総粒子数は Table 4.3.2 に示すとおり 419,938~507,257 であり、解析時間を 300 秒、時間刻み幅  $\Delta t$  を  $5.0 \times 10^{-3}$  秒固定、粒子間距離 1m でシミュレーションを実施した。

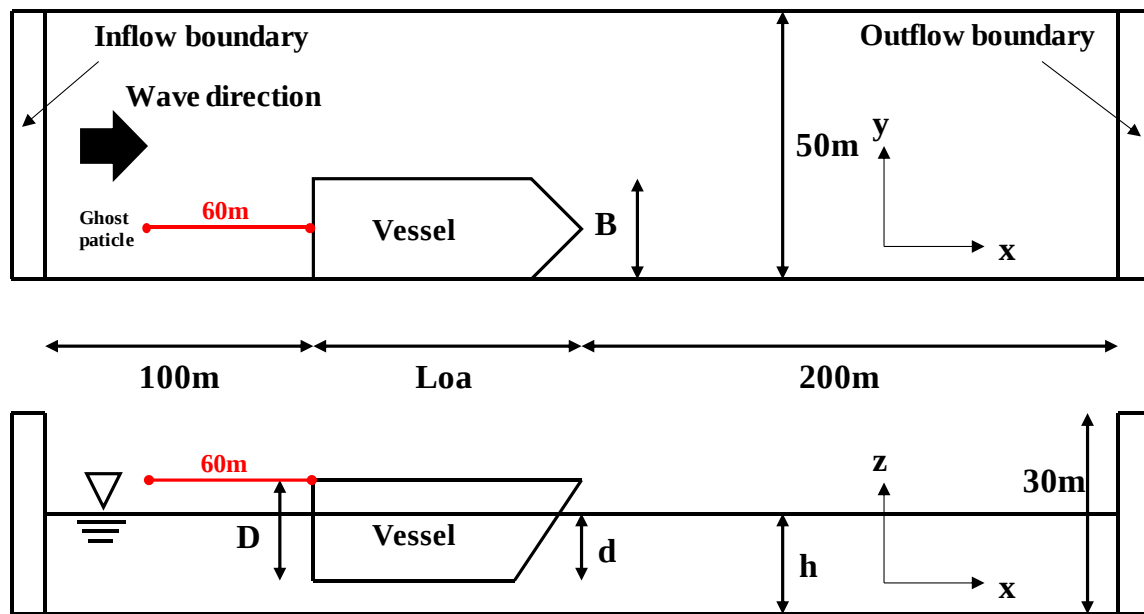


Fig. 4.3.1 Simulation setup system in 0 degrees (Schematic diagram).

Table 4.3.1 Calculation condition of vessel.

|                                                   |         | DWT    |        |
|---------------------------------------------------|---------|--------|--------|
|                                                   |         | 3,000  | 10,000 |
| Length overall (Loa) [m]                          |         | 93.0   | 132.0  |
| Molded breadth (B) [m]                            |         | 15.0   | 21.0   |
| Molded depth (D) [m]                              |         | 8.0    | 11.0   |
| Draft(d) [m]                                      | Ballast | 3.0    | 4.0    |
|                                                   | Half    | 4.0    | 6.0    |
|                                                   | Full    | 5.0    | 8.0    |
| Particle number of vessel                         |         | 8,954  | 25,222 |
| Particle number of submerged part                 | Ballast | 3,175  | 8,678  |
|                                                   | Half    | 4,280  | 13,176 |
|                                                   | Full    | 5,425  | 17,917 |
| Particle number of bottom                         |         | 1,096  | 2,216  |
| Density of vessel's particle [kg/m <sup>3</sup> ] | Ballast | 305.12 | 312.14 |
|                                                   | Half    | 433.47 | 497.61 |
|                                                   | Full    | 566.46 | 693.10 |

Table 4.3.2 Calculation condition.

|                               |       |         | DWT                  |         |
|-------------------------------|-------|---------|----------------------|---------|
|                               |       |         | 3,000                | 10,000  |
| Initial number of particles   | Draft | Full    | 419,938              | 498,018 |
|                               |       | Half    | 421,083              | 502,759 |
|                               |       | Ballast | 422,188              | 507,257 |
| Initial particle distance [m] |       |         | 1.0                  |         |
| Simulation time [sec]         |       |         | 300.0                |         |
| $\Delta t [sec]$              |       |         | $5.0 \times 10^{-3}$ |         |

### 4.3.2 入射波条件

3.2 節で示したように、波形の立ち上がりには要する時間として 150 秒を目標として、波高およそ 2~8m の各 8 ケース流れを造波した。Fig. 4.3.2 に水深 10m の場合の、Fig. 4.3.3 に水深 12m の場合の、波高および水平流速（x 方向）の時系列波形を示す。これらの波形は、船体を配置していない条件で、流入境界から 90m の位置（船体配置時の船尾から 10m 後方の位置）で計測した結果であり、2.0 秒間（21 データ）単純移動平均による平滑化処理を施している。

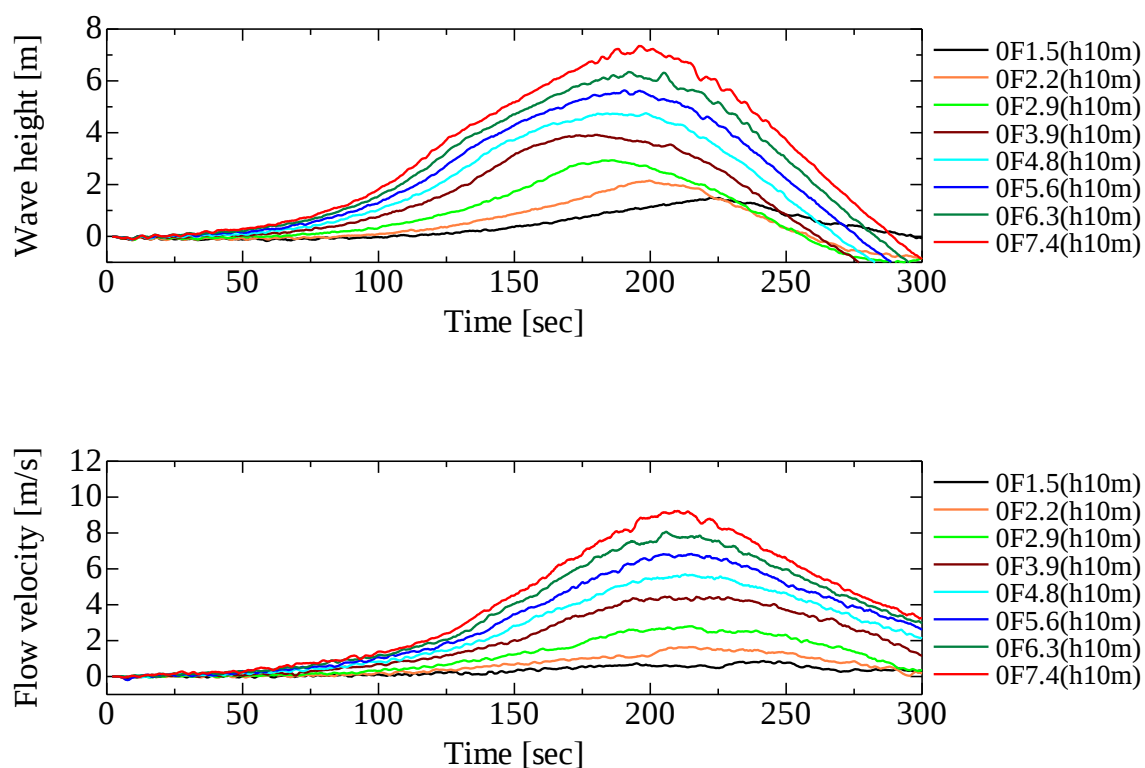


Fig. 4.3.2 Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:10m).

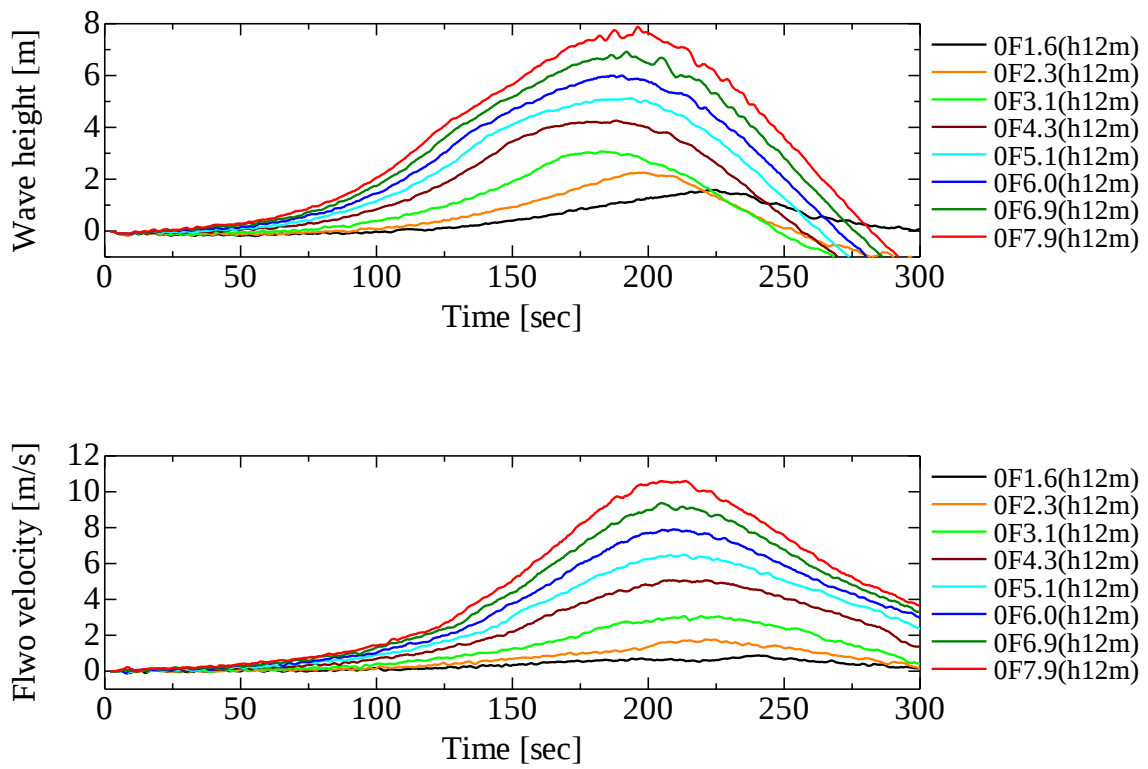


Fig. 4.3.3 Wave heights and flow velocity in 0 degrees (depth:12m).

### 4.3.3 計算ケース

Table 4.3.3 に示すように、船体 2 ケース (3,000DWT, 10,000DWT)，喫水 3 ケース (満載・半載・空載)，波高 8 ケースの計 48 ケースである。ケース名の見方については、4.2 節を参照されたい。Table 4.3.3 に記載の波高および最大流速は、4.3.2 項で述べた入射波条件での計測値である。

Table 4.3.3 Calculation cases in 0 degrees.

| Case         | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT   | Draft[m]    | Mooring characteristic<br>Spring constant |
|--------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|-------|-------------|-------------------------------------------|
| 0F1.5-3000MB | 0          | Flow      | 1.5            | 0.9                | 10.0     | 3,000 | 3m(ballast) | Linear<br>17.1[kN/m]                      |
| 0F1.5-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F1.5-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F2.2-3000MB |            |           | 2.2            | 1.6                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>29.2[kN/m]                      |
| 0F2.2-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F2.2-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F2.9-3000MB |            |           | 2.9            | 2.8                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>54.9[kN/m]                      |
| 0F2.9-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F2.9-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F3.9-3000MB |            |           | 3.9            | 4.5                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>103.1[kN/m]                     |
| 0F3.9-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F3.9-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F4.8-3000MB |            |           | 4.8            | 5.7                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>145.8[kN/m]                     |
| 0F4.8-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F4.8-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F5.6-3000MB |            |           | 5.6            | 6.8                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>171.5[kN/m]                     |
| 0F5.6-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F5.6-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F6.3-3000MB |            |           | 6.3            | 8.0                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>202.3[kN/m]                     |
| 0F6.3-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F6.3-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |
| 0F7.4-3000MB |            |           | 7.4            | 9.2                |          |       | 3m(ballast) | Linear<br>211.1[kN/m]                     |
| 0F7.4-3000MH |            |           |                |                    |          |       | 4m(half)    |                                           |
| 0F7.4-3000MF |            |           |                |                    |          |       | 5m(full)    |                                           |

| Case          | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT    | Draft[m]    | Mooring characteristic<br>Spring constant |
|---------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|--------|-------------|-------------------------------------------|
| 0F1.6-10000MB | 0          | Flow      | 1.6            | 0.9                | 12.0     | 10,000 | 4m(ballast) | Linear<br>17.1[kN/m]                      |
| 0F1.6-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F1.6-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F2.3-10000MB |            |           | 2.3            | 1.8                |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>29.2[kN/m]                      |
| 0F2.3-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F2.3-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F3.1-10000MB |            |           | 3.1            | 3.1                |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>54.9[kN/m]                      |
| 0F3.1-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F3.1-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F4.3-10000MB |            |           | 4.3            | 5.0                |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>103.1[kN/m]                     |
| 0F4.3-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F4.3-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F5.1-10000MB |            |           | 5.1            | 6.5                |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>145.8[kN/m]                     |
| 0F5.1-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F5.1-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F6.0-10000MB |            |           | 6.0            | 7.9                |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>171.5[kN/m]                     |
| 0F6.0-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F6.0-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F6.9-10000MB |            |           | 6.9            | 9.4                |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>202.3[kN/m]                     |
| 0F6.9-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F6.9-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |
| 0F7.9-10000MB |            |           | 7.9            | 10.6               |          |        | 4m(ballast) | Linear<br>211.1[kN/m]                     |
| 0F7.9-10000MH |            |           |                |                    |          |        | 6m(half)    |                                           |
| 0F7.9-10000MF |            |           |                |                    |          |        | 8m(full)    |                                           |

#### 4.3.4 結果および考察

計測した 48 ケースの各入射波高に対する最大係留力を $T_{mps}$ として、3,000DWT の場合を Table 4.3.4 に、10,000DWT の場合を Table 4.3.5 に示し、これらの最大係留力 $T_{mps}$ を Fig. 4.3.4 にプロットしてまとめた。Fig. 4.3.4 では、3,000DWT は破線の丸、10,000DWT は実線の三角とし、空載状態は黒、半載状態は青、満載状態は赤で表している。

同じ載貨重量トン数でみると、3,000DWT、10,000DWT とともに、波高が高く、喫水が深いほど、最大係留力は大きくなっており、満載時は空載時のおよそ 1.5~2.6 倍となる。また 3,000DWT と 10,000DWT で比較すると、同程度の波高に対して 10,000DWT は 3,000DWT の場合よりも最大係留力 $T_{mps}$ が大きくなっており、特に波高 4m 程度以上の満載時は、その差が顕著になる。これらから、喫水が深く、また載貨重量トン数が大きいと水面下の投影面積が大きくなり、より流れから受ける流圧力が大きくなるためと考えられる。また、10,000DWT の方が、3,000DWT よりも積載状態によって発生する最大係留力におおきな差があるが、これは、前章で示した回帰式からもわかるように、トン数がおおきくなるほど、積載状態による喫水の変化量が大きくなるためである。

以上から、0 度入射の場合、同じ波高に対して、満載状態で喫水が深く、載貨重量トン数の大きい船舶の方が、係留索の破断は発生しやすいことがわかる。さらに、前章の 90 度入射のシミュレーションから、船舶の乗り揚げ被害を防止するためには、喫水を深くすることが適当であると考えられるが、一方で入射方向によっては、流れから受ける流体力は大きくなる可能性があることに留意する必要があるといえる。

本シミュレーションから積載状態を考慮した 0 度入射における、各波高の最大係留力 $T_{mps}$ を把握することができた。これを上回る係留力を Surge 方向に対して発揮できるように係留索を配置すれば、津波中でも安全に係留することができると考えられる。

Table 4.3.4 Maximum mooring force (3,000DWT).

| 3,000DWT        |                |        |        |
|-----------------|----------------|--------|--------|
| Wave height [m] | $T_{mps}$ [kN] |        |        |
|                 | Ballast        | Half   | Full   |
| 1.5             | 212.5          | 313.9  | 324.7  |
| 2.2             | 449.2          | 600.9  | 719.3  |
| 2.9             | 865.4          | 1126.6 | 1405.0 |
| 3.9             | 1972.3         | 2137.9 | 2821.1 |
| 4.8             | 2440.9         | 3171.6 | 3786.2 |
| 5.6             | 2867.3         | 3965.2 | 4743.2 |
| 6.3             | 3340.8         | 4693.1 | 5420.9 |
| 7.4             | 3724.7         | 5210.2 | 6122.3 |

Table 4.3.5 Maximum mooring force (10,000DWT).

| Wave height [m] | 10,000DWT      |         |         |
|-----------------|----------------|---------|---------|
|                 | $T_{mps}$ [kN] |         |         |
|                 | Ballast        | Half    | Full    |
| 1.6             | 518.7          | 702.3   | 843.1   |
| 2.3             | 919.7          | 1464.4  | 1989.2  |
| 3.1             | 1928.7         | 3140.0  | 4701.6  |
| 3.9             | 4003.6         | 6072.2  | 9181.9  |
| 5.1             | 5112.0         | 8708.2  | 13233.5 |
| 6.0             | 6138.4         | 10304.2 | 16080.1 |
| 6.9             | 7050.4         | 12062.2 | 18626.2 |
| 7.9             | 8011.2         | 13576.4 | 21276.9 |

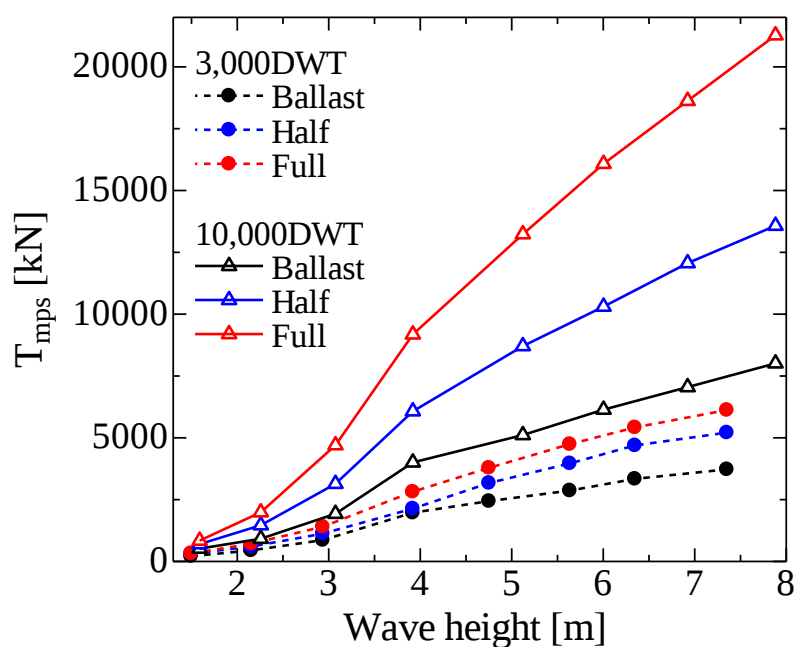


Fig. 4.3.4 Maximum mooring fore (3,000DWT and 10,000DWT).

### 4.3.5 計算コスト

船体を配置した半載時でのシミュレーションにおける、各入射波高 8 ケースに対する計算時間を Fig. 4.3.5 に、使用した計算機の仕様を Table 4.3.6 にそれぞれ示す。Table 4.3.2 で示したように、解析時間は 300 秒、時間刻み幅 $\Delta t$ は $5.0 \times 10^{-3}$ 秒固定であり、初期粒子数は 3,000DWT の場合は 421,083、10,000DWT の場合は 502,759 である。Fig. 4.3.5 から、計算時間は最も波高が低い 3,000DWT のケース(0F1.5-3000MH)で約 8 日であり、最も波高が大きい 10,000DWT のケース(0F7.9-10000MH)で約 17 日である。10,000DWT の初期総粒子数は 3,000DWT の場合よりおよそ 8 万程度多く、これによりおよそ 2~5 日程度計算時間が長くなっている。今後は 10,000DWT 以上の船舶についても検

討する必要があるが、その場合船体が大きくなるだけでなく、水深もさらに深くなるため、計算コストは非常に膨大になることが予想される。従って、陽解法による並列処理の実装など、大規模計算をより高速に行う手法について検討する必要がある。また本検討では、時間刻み幅 $\Delta t$ を $5.0 \times 10^{-3}$ 秒固定とし、2.4.3 項のクーラン数の制限から最大流速 40m/s まで数値安定性を確保したが、Fig. 4.3.2 および Fig. 4.3.3 の入射波条件における流速の時系列データから最大流速は 11m/s 程度であった。今後は現象にあわせて $\Delta t$ を大きくし、精度検証も行いつつ、効率的な $\Delta t$ の設定について検討する必要がある。

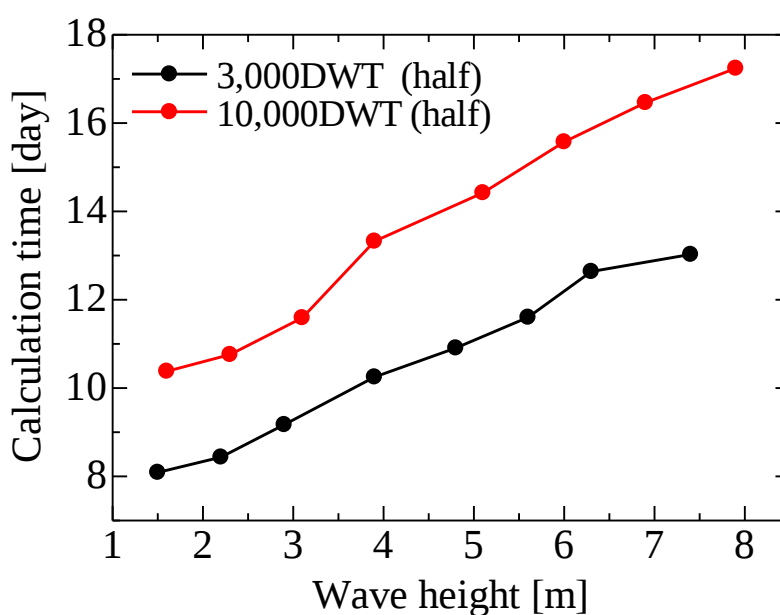


Fig. 4.3.5 Computation times (day).

Table 4.3.6 PC spec.

|        |                                   |
|--------|-----------------------------------|
| CPU    | Intel (R) Xeon (R) W-2295 3.00GHz |
| OS     | Windows 10Pro                     |
| Memory | 32.0GB                            |

## 4.4 最大係留力算定(0 度入射)

### 4.4.1 係留索条件

船体フェアリーダーおよび岸壁ボラードの係留点座標は、前章のシミュレーションにおける設定と同一とし、係留索の本数は、3,000DWT は 6 本、10,000DWT は 8 本を通常係留とする。これに加えて増しもやいとして、係留索の総本数が 20 本となるまで、船首と船尾の Head line と Stern line を 1 本ずつ、計 2 本ごとに本数を増やしていく。

選定する係留索の材質については、前章で採用したポリプロピレン系（以下 PP）のエイトロープに加えて、できる限り小さい索径、少ない本数で対策を講じるため、より高機能な係留索として超高分子量ポリエチレン（以下 HMPE）系イザナスのトエルロープも選定した。Fig. 4.4.1 に索径 45mm の場合の PP 系と HMPE 系の特性曲線を、また Table 4.4.1 と Table 4.4.2 に設定する 12 ケースの各索径に対する最小破断荷重（MBL）を示す。これらは、東京製綱繊維ロープ株式会社が公開しているカタログ値から作成しており、PP 系エイトロープはマリインタフ<sup>(47)</sup>、HMPE 系はエースライン SUHD026B<sup>(53)</sup>から採用している。Fig. 4.4.1 より、PP 系ロープの破断時伸びが 35%であるのに対し、HMPE 系ロープは 5%と、ワイヤーロープなみの伸び率であり、ほとんど伸びないため線形的に設定する。Table 4.4.1 と Table 4.4.2 から、同じ索径のポリプロピレン系ロープに対して、HMPE 系ロープの破断荷重は非常に大きいことがわかる。

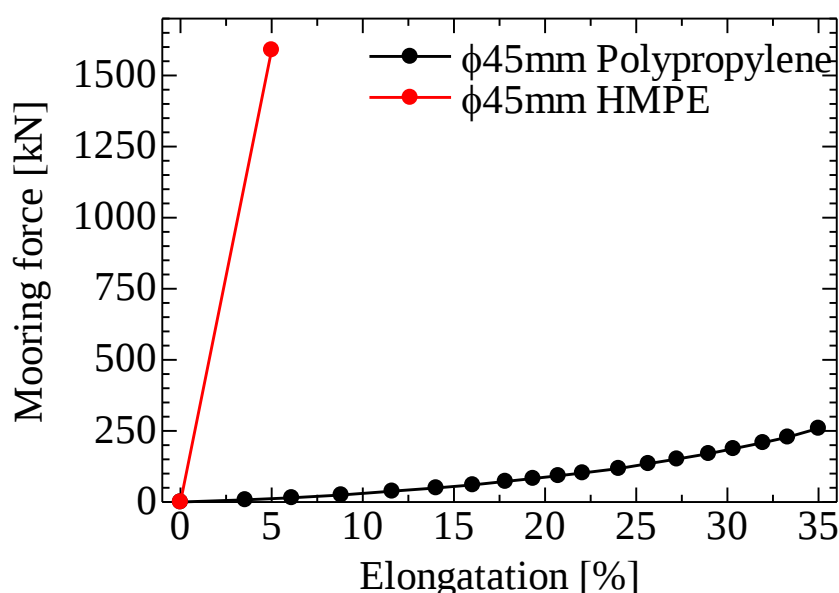


Fig. 4.4.1 Mooring characteristic curve ( $\phi$ 45mm, polypropylene and HMPE).

Table 4.4.1 Minimum breaking loads of polypropylene type.

| Polypropylene | Diameter [mm] |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |
|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
|               | $\phi$ 45     | $\phi$ 50 | $\phi$ 55 | $\phi$ 60 | $\phi$ 65 | $\phi$ 70 | $\phi$ 75 | $\phi$ 80 | $\phi$ 85 | $\phi$ 90 | $\phi$ 95 | $\phi$ 100 |
| MBL [kN]      | 259           | 328       | 376       | 443       | 520       | 587       | 669       | 756       | 844       | 938       | 1,040     | 1,138      |

Table 4.4.2 Minimum breaking loads of HMPE type.

| HMPE     | Diameter [mm] |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|----------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|          | $\phi$ 24     | $\phi$ 30 | $\phi$ 34 | $\phi$ 40 | $\phi$ 45 | $\phi$ 50 | $\phi$ 55 | $\phi$ 60 | $\phi$ 65 | $\phi$ 70 | $\phi$ 75 | $\phi$ 80 |
| MBL [kN] | 530           | 790       | 970       | 1,300     | 1,590     | 1,920     | 2,300     | 2,730     | 3,150     | 3,560     | 4,020     | 4,530     |

## 4.4.2 係留力算定方法

設定した係留条件から、発揮できる最大係留力を算定する。前章の津波シミュレーションおよび前節のシミュレーションから 0 度入射の場合 Surge が卓越することがわかっている。そこで、Surge 変位量に対して各係留索が発揮できる係留力の $x$ 成分（船首尾方向成分）を幾何学的に算定し、前後方向別にその総和を求める。例えば Fig. 4.4.3 では係留索の総本数は 4 本であり、Surge 変位量に対して、船首方向にはっているプラス方向の $x$ 成分係留力 $T_{x1}, T_{x2}$ の和と船尾方向にはっているマイナス方向の $x$ 成分係留力 $T_{x3}, T_{x4}$ の和ごとに求める。そしてそれらの最大値を $T_{cal}$ として $x$ 方向に対して発揮できる最大係留力を算定する。

以下の、Fig. 4.4.2 に示すフローチャートに従い、 $T_{cal}$ の算定方法を詳細に説明する。

- ① 係留点座標、係留力特性曲線、初期張力を入力し、初期伸び率を計算する。初期の係留点座標として船体フェアリーダーの座標 $F_{i0}(x_{fio}, y_{fio}, z_{fio})$ 、岸壁ボラードの座標 $B_{i0}(x_{bio}, y_{bio}, z_{bio})$ 、係留力特性曲線として各伸び率 $\varepsilon_i$ とそれに対応する係留力 $T_i$ の配列、そして各係留索の初期張力 $T_{i0}$ を入力する。特性曲線の配列の一番下を破断時伸び率、破断荷重として破断を判定する。添え字 $i$ はどの係留索であるかを表す番号であり、初期状態の場合は 0 を追記している。初期張力 $T_{i0}$ はすべての係留索に対して一律に破断荷重の 7% とし、特性曲線からこの初期張力 $T_{i0}$ における初期伸び率 $\varepsilon_{i0}$ を線形補間により求める。
- ② 各係留索の自然長 $L_{i0}$ を計算する。入力した座標データから初期状態での各係留索の直線距離 $l_{i0}$ を求め、初期伸び率 $\varepsilon_{i0}$ から各係留索の自然長 $L_{i0}$ を計算する。なお初期張力 $T_{i0}$ をゼロとして入力すると、初期伸び率 $\varepsilon_{i0}$ もゼロとなるため、初期係留索の直線距離 $l_{i0}$ が自然長 $L_{i0}$ となる。
- ③ フェアリーダーの $x$ 座標に変位量 $\Delta x$ を与えて更新し、船体を $x$ 方向に移動させる。本検討では、 $\Delta x$ を 0.05m とし船体を前進させている。
- ④  $\Delta x$ 移動後の各係留索の直線距離 $l_i$ を計算する。
- ⑤ ②で計算した自然長 $L_{i0}$ と④で計算した直線距離 $l_i$ から各係留索の伸び率 $\varepsilon_i$ を計算する。破断時の伸び率を超えた場合は破断の判定を与え、以後係留力は計算されない。
- ⑥ 特性曲線から⑤で計算した各伸び率 $\varepsilon_i$ に対する係留力 $|T_i|$ を線形補間により計算する。
- ⑦ ⑥で計算した係留力 $|T_i|$ の $x$ 成分 $T_{xi}$ を計算する。ここで、座標系に対する正負の符号が与えられる。
- ⑧ ⑦で計算した Surge 成分係留力 $T_{xi}$ を前後方向別（正負別に）足し合わせて、合計値 $\sum_{i=1}^n T_{xi}$ （ $n$ は係留索の総本数）を計算し、ファイルに出力する。ファイルには 3 列出力され、左から、Surge、 $x$ 正方向の係留力合計値、 $x$ 負方向の係留力合計値である。

これら③から⑧までの処理を、すべての係留索が破断するまでくり返し行っていく。これによって Surge 変位に対する $x$ 成分係留力が前後方向別に算定され、それらの最大値 $T_{cal}$ を求めることができる。

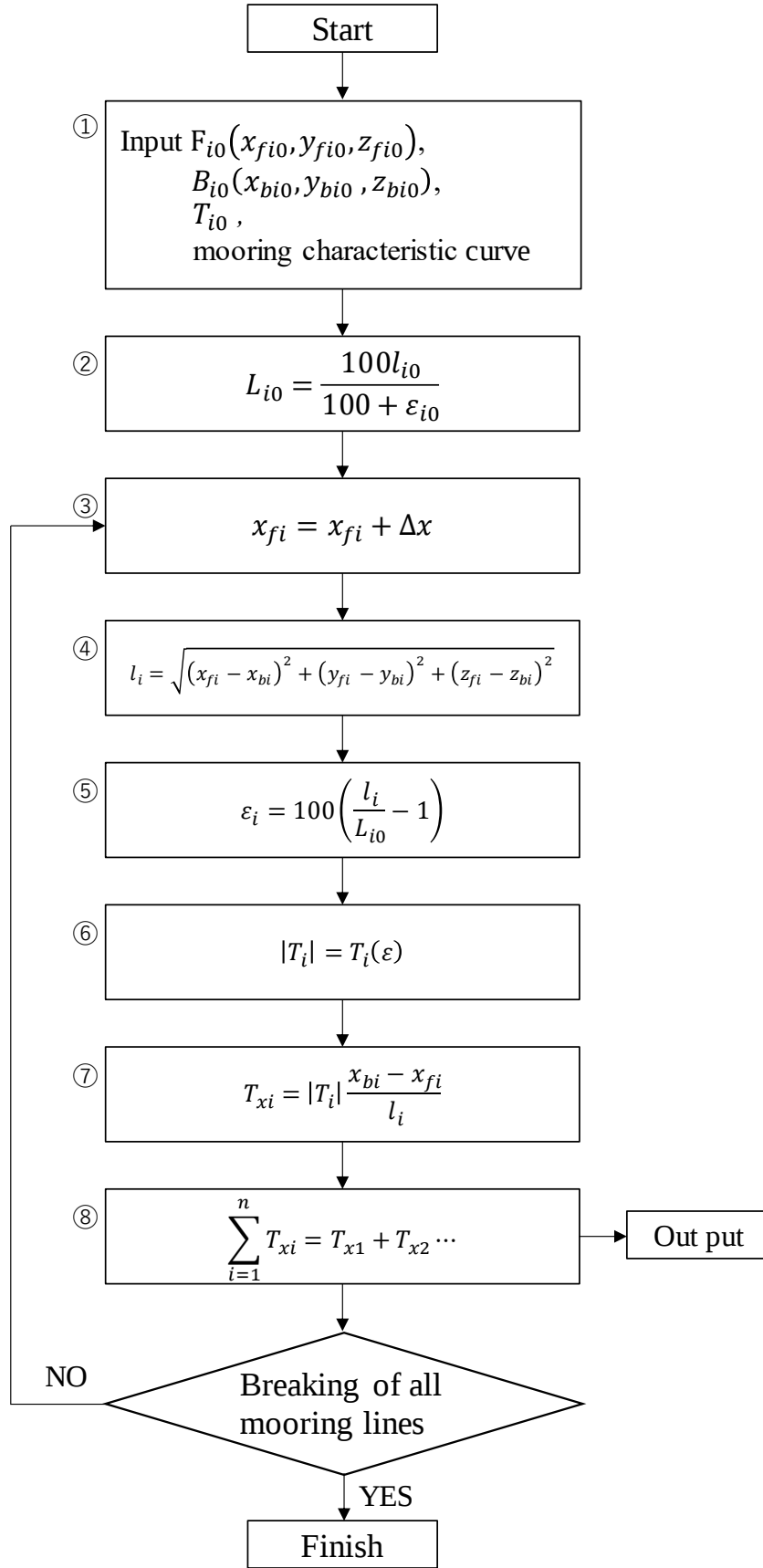


Fig. 4.4.2 Flowchart for calculation mooring force in surge.

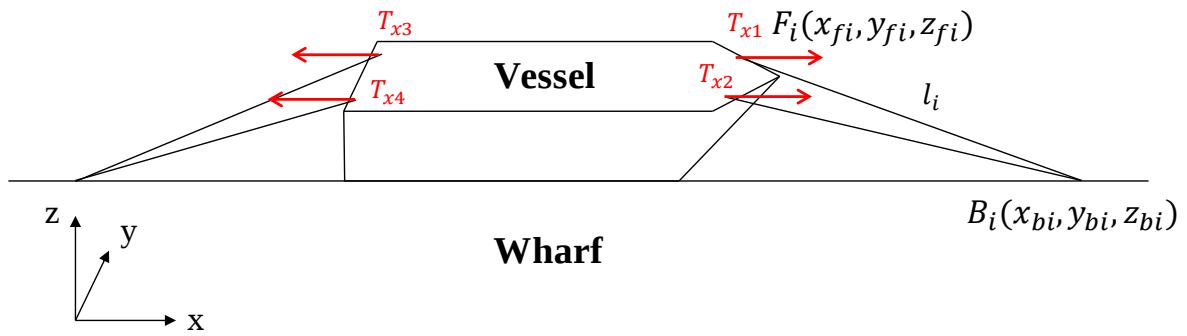


Fig. 4.4.3 Schematic diagram of calculation mooring force in surge.

## 4.5 津波対策係留索リストの作成

4.3 節, 4.4 節の検討から得られた  $T_{mps}$ ,  $T_{cal}$  を比較して, 各津波高に対して必要な係留条件を示した津波対策係留索リストを作成する。4.3 節の津波シミュレーションの結果から喫水の深い船舶の方がより大きな流体力を受けるため,  $T_{mps}$ ,  $T_{cal}$  は満載状態の計算結果を用いる。榊原らの検討<sup>(54)</sup>では, 津波によって係留索の巻き出しの可能性が指摘されていることから, リストでの判定結果にはウインチブレーキ力も考慮して, Table 4.5.1 のように 3 つに区分する。OCIMOF のガイドライン<sup>(55)</sup>では, ウインチブレーキ力は最小破断荷重の 60% が推奨されていることから,  $T_{cal}$  の 60% を安全率として設定している。各区分で想定される状況を説明する。まず  $T_{cal}$  が  $T_{mps}$  を下回る **Drifting** に該当する場合は, 設定した係留力が十分ではないため, すべての係留索が破断して漂流に至り, 大きな被害が発生する。次に安全率 60% を考慮しなければ,  $T_{cal}$  が  $T_{mps}$  を上回るが, 安全率 60% を考慮すると,  $T_{cal}$  が下回る **Danger** に該当する場合は, **Stern line** が巻き出されていくため, 岸壁近傍で大きな船体運動が発生し, 危険な状態となる。またこのとき **Breast line** のような短い索は破断する可能性が高い。そして安全率 60% を考慮しても  $T_{cal}$  が  $T_{mps}$  を上回る **Safety** に該当する場合は, **Stern line** は破断せず, またウインチブレーキ力も超えないため, 船体運動が抑えられ, 安全に係留できる。津波発生時に, 港外退避をせず, 岸壁に係留した状態で凌ぐ場合は, この判定となるように係留索を配置することが望ましいと考えられる。

各津波高に対して, 安全に係留する (**Safety** に該当する) ために必要な, 係留索の材質, 索径, 本数を把握できる早見表として, Fig. 4.5.1~Fig. 4.5.4 に, 3,000DWT および 10,000DWT を対象とした, 津波対策係留索リストのチャート版を示す。チャートの横軸は係留索の総本数, 縦軸は最大係留力である。色付きの破線は, Table 4.3.4, Table 4.3.5 の各波高を小数点第一位で四捨五入して津波高 TH とし, その時の満載時 (Full) の  $T_{mps}$  を安全率 0.6 で除した値である。四捨五入して, 数字を丸めた結果, 津波高 TH が同じになる場合は, 大きい方の  $T_{mps}$  を採用している。黒の実線で結ばれた黒丸のプロットは, 4.4 節で算定した  $T_{cal}$  である。各津波高 TH の破線より上にプロットされた索径と総本数を選択すれば, その津波高に対して **Safety** に該当する係留条件となる。Fig. 4.5.1 から 3,000DWT の船舶に PP 系の係留索を使用した場合, 通常の 6 本係留ではその索径を 100mm まで太くしても, 津波高 3m までしか安全に係留することができず, また津波高 5m に対応するためには, 索径を 90mm にしてかつ係留索の総本数が 18 本, つまり **Head line**, **Stern line** を 6 本ずつ, 計

12本の増しもやいが必要になることがわかる。これに対し、Fig. 4.5.2に示すように、3,000DWTの船舶にHMPE系の高機能な係留索を装備した場合、増しもやいをしなくても、その索径を65mmとすれば津波高5mでも安全に係留することができる。現実的な運用面を考慮すれば、地震発生後に津波の襲来が迫っている中、多数の増しもやいをとることは困難であり、また津波対策のために索径が100mmのような非常に太い係留索を選定し、日常的に使用することは取り回しの観点から適当ではない。しかしHMPEのような高機能なホーサーを使用すれば、Fig. 4.5.1, Fig. 4.5.2から、索径と本数を大きく変えずに対策が可能となることがわかる。一方で、Fig. 4.5.3から、10,000DWTの船舶にポリプロピレン系の係留索を使用した場合、通常の8本係留ではその索径を100mmまで太くしても、津波高2mでさえ、安全に係留することができず、その索径を100mmにし、係留索の総本数を20本としても、津波高3mまでしか対応できない。Fig. 4.5.4から、10,000DWTの船舶にHMPE系の高機能な係留索を装備した場合は、津波高5mで安全に係留するためには、索径を80mm、4本の増しもやいをとる必要があり、総本数は12本となる。載貨重量トン数が大きくなると、装備する係留索の索径は太くなりまたその本数は多くなるため、発揮できる係留力は大きくなるが、Fig. 4.3.4から、それ以上に流れから受ける流体力が大きくなるため、3,000DWTよりも10,000DWTの方がより強い係留索による対策が必要である。Table 4.5.2, Table 4.5.3に津波対策係留索チャートの内容を、津波高ごとにより詳細に記述した津波対策係留索リストの一例を示す。Table 4.5.2は、PP系の係留索を装備した、Table 4.5.3はHMPE系の係留索を装備した、3,000DWTの船舶を対象としており、いずれも津波高5mの場合のリストである。Table 4.5.1で示した3つの区分ごとに色分けしており、索径と係留索の総本数から $T_{cal}$ の大きさと、どの区分で判定されるのかを調べることができる。この津波高での $T_{mps}$ の大きさは表の左下に記述している。

以上の作成した津波対策係留索リストから、各津波高に対して、装備すべき係留条件と予想される状況を把握することができる。今後これらリストの対象船舶、係留索の種類を充実させていくことで、港湾・海運関係者による係留索の選定や、津波発生時における、現場乗組員の港外退避あるいは係留避泊、増しもやいの実施などの判断の一助になりうると考えられる。なお本リストでは、岸壁側ボラードの強度については考慮していない。高性能な係留索、増しもやいにあわせて、ボラードの設計強度も向上させる必要がある。

作成した津波対策係留索リストは Appendix にまとめている。チャート版および全てのリストはこちらを参照されたい。

Table 4.5.1 Category of the tsunami countermeasures mooring line list.

| Results  | Criterion                          | Expected condition                                                                                                                      |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Drifting | $T_{mps} > T_{cal}$                | All mooring lines may break, and the vessel may drift.                                                                                  |
| Danger   | $T_{mps}/60\% > T_{cal} > T_{mps}$ | Stern lines or head lines may go out because line tensions exceed winch brake force. Thus, large ship motions may occur near the wharf. |
| Safety   | $T_{cal} > T_{mps}/60\%$           | The vessel may be moored safely.                                                                                                        |

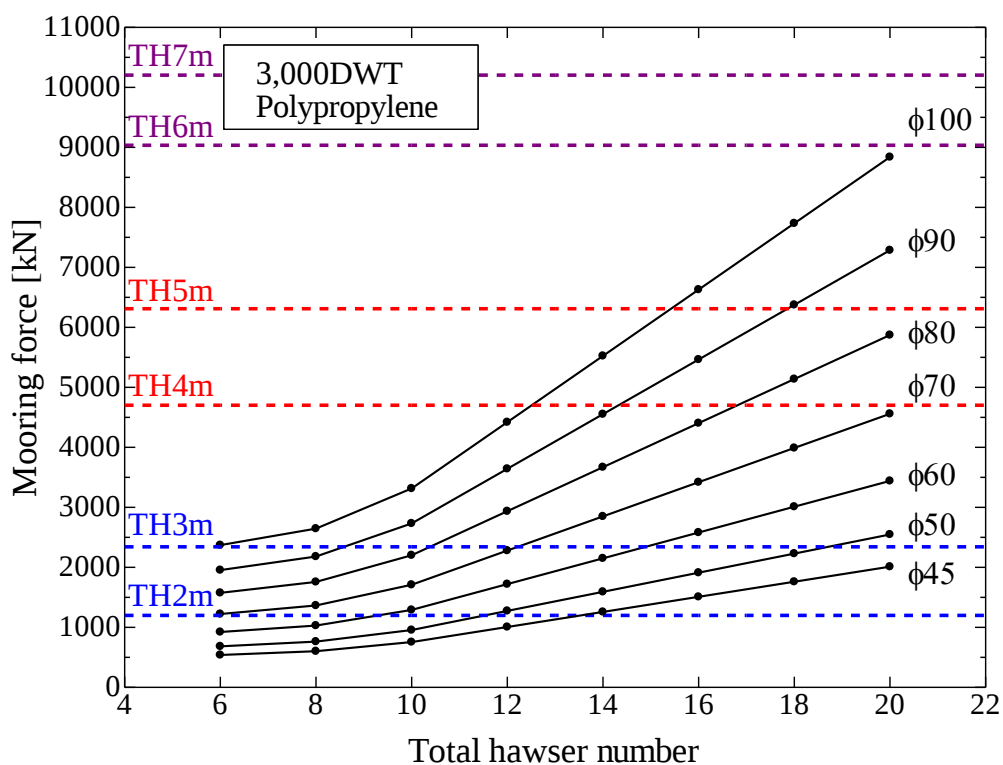


Fig. 4.5.1 Tsunami countermeasures mooring line chart (3,000DWT, PP).

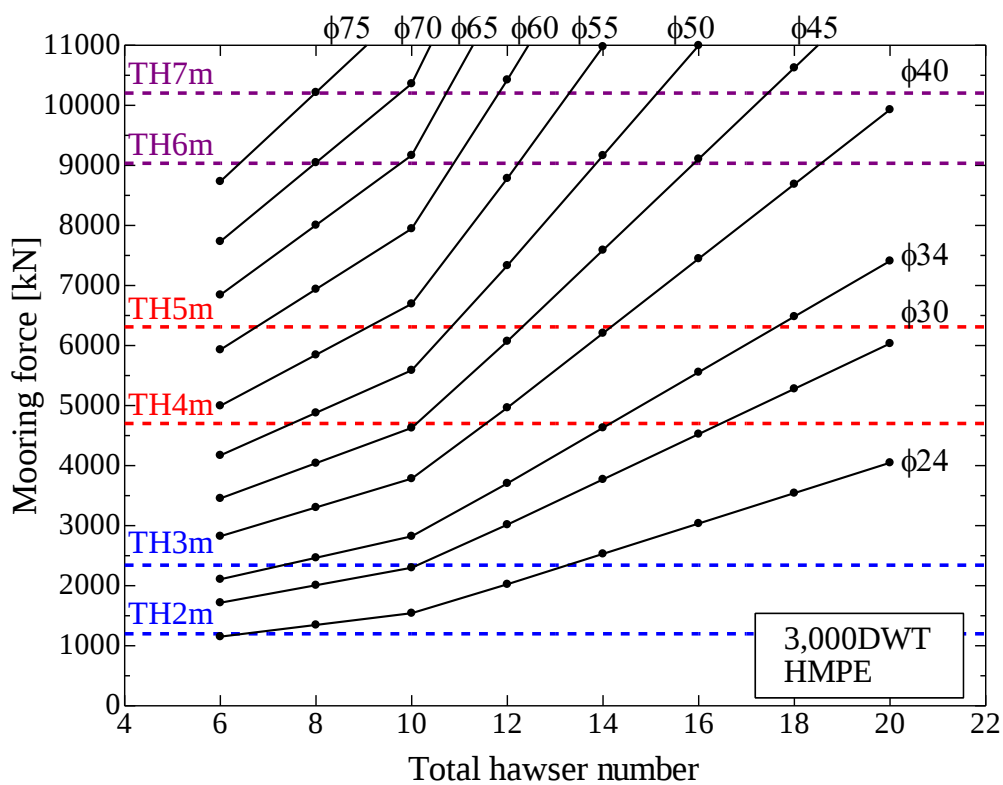


Fig. 4.5.2 Tsunami countermeasures mooring line chart (3,000DWT, HMPE).

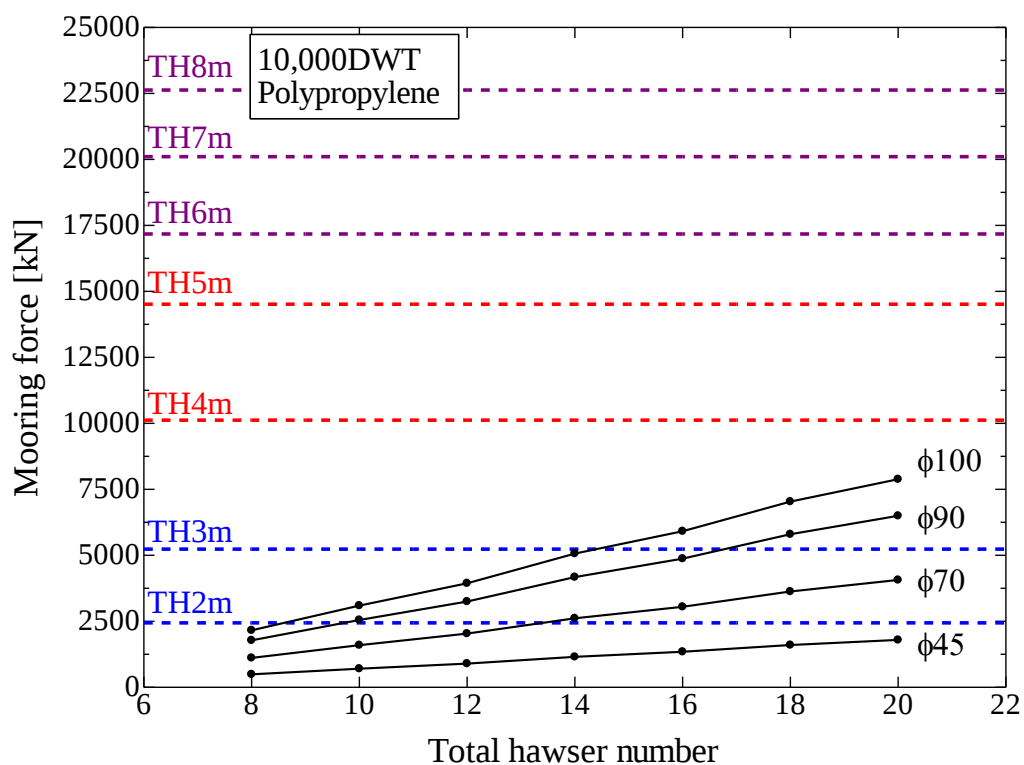


Fig. 4.5.3 Tsunami countermeasures mooring line chart (10,000DWT, PP).

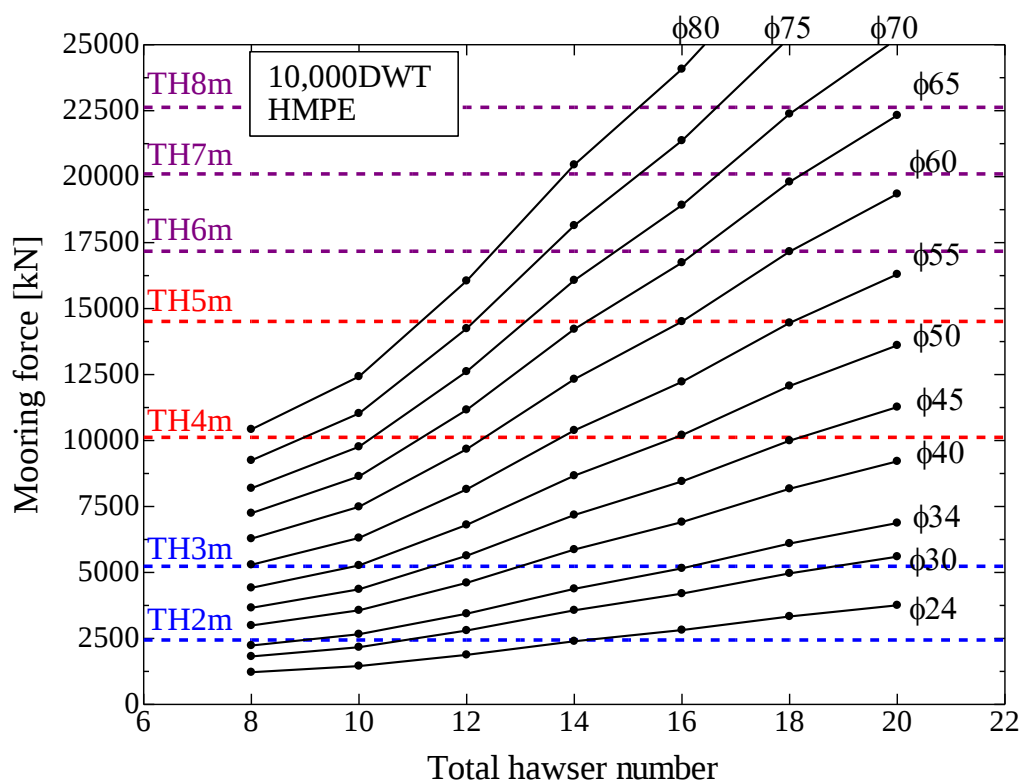


Fig. 4.5.4 Tsunami countermeasures mooring line chart (10,000DWT, HMPE).

Table 4.5.2 Tsunami countermeasures mooring line list when tsunami height is 5.0m (3,000DWT, Polypropylene).

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |                                   |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85                               | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |                                   |        |        |        |
| Tsunami<br>height<br>5.0m | 6               | 0                | 0             | 539.5         | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7 | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0                            | 1953.8 | 2166.3 | 2370.4 |
|                           | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8                            | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2                            | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6                            | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0                            | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4                            | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8                            | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3                            | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |
| *Tmps : 3786.2kN          |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Drifting : Tmps > Tcal            |        |        |        |
| *Tmps / 60% : 6310.3kN    |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps |        |        |        |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Safety : Tcal > Tmps / 60%        |        |        |        |

Table 4.5.3 Tsunami countermeasures mooring line list when tsunami height is 5.0m (3,000DWT, HMPE).

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |                                   |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65                               | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |         |         |         |         |                                   |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>5.0m | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9 | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4                            | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1  |
|                           | 8               | +1               | +1            | 1346.9        | 2007.6 | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0                            | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 1542.5        | 2299.2 | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5                            | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 2023.8        | 3016.6 | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3                           | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 2529.8        | 3770.8 | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4                           | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 3035.7        | 4524.9 | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5                           | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 3541.7        | 5279.1 | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6                           | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 4047.6        | 6033.3 | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6                           | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |
| *Tmps : 3786.2kN          |                 |                  |               |               |        |        |        |         |         |         |         | Drifting : Tmps > Tcal            |         |         |         |
| *Tmps / 60% : 6310.3kN    |                 |                  |               |               |        |        |        |         |         |         |         | Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps |         |         |         |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |         |         |         |         | Safety : Tcal > Tmps / 60%        |         |         |         |

## 4.6 浮体式津波対策用岸壁シミュレーション(90 度入射)

### 4.6.1 計算条件

計算領域は, Fig. 4.6.1 の概略図および Fig. 4.6.2, Fig. 4.6.3 の初期配置の可視化結果に示すように, 前章の 90 度入射のシミュレーション条件に, 長さ 200m, 幅 20m, 深さ 3m, 喫水 1m のポンツーン型の FTPW (Fig. 4.5.4) を配置し, FTPW の幅 20m 分, 流入境界側に船体はシフトしている。FTPW はドルフィンを用いた杭係留方式であり, ドルフィンの諸元は 6m×6m×30m として FTPW の両側に 2 本配置している。Table 4.6.1 に FTPW の計算条件を示す。FTPW の粒子数密度も, 前章と同様に半粒子分 (0.5m) 沈下しないように設定する。船体条件, 係留条件は前章の 90 度入射と同一であり, 半載状態の 3,000DWT および 10,000DWT を対象として, 流れ (押し波), 非線形係留モデルにより検討を行う。天端高は 2m, 水深 $h$ は 3,000DWT の場合は 10m, 10,000DWT の場合は 12m である。これら船舶および係留に関する計算条件は前章と同一であるためここでは割愛する。なお水の粒子数密度も前章と同様に 1040 kg/m<sup>3</sup> である。

計算初期の総粒子数は Table 4.6.2 に示すとおり 500,338, 574,462 であり, 解析時間は 300 秒, 時間刻み幅 $\Delta t$ を  $5.0 \times 10^{-3}$ 秒固定, 粒子間距離 1m でシミュレーションを実施した。

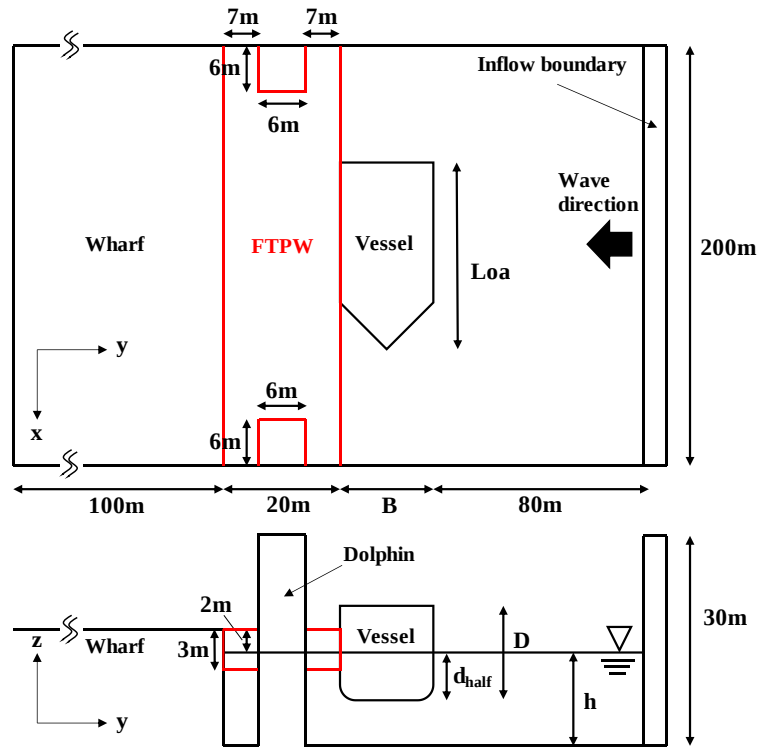


Fig. 4.6.1 Simulation setup system in 90 degrees for vessel moored to FTPW (Schematic diagram).

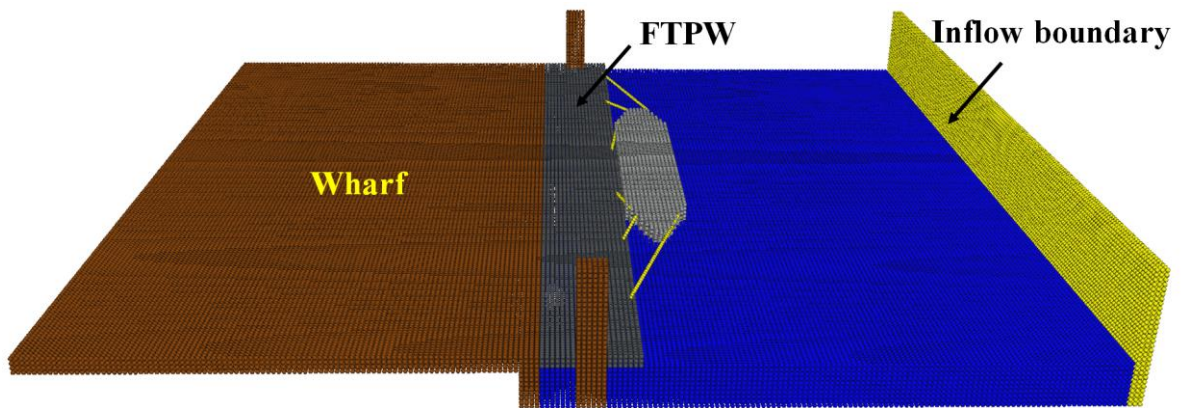


Fig. 4.6.2 Simulation setup system in 90 degrees for 3,000DWT moored to FTPW (Visualization image).

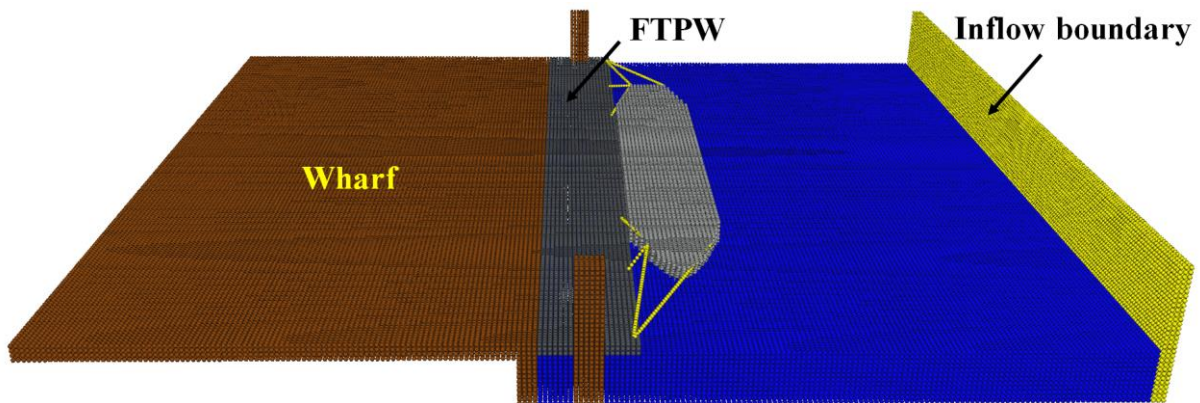


Fig. 4.6.3 Simulation setup system in 90 degrees for 10,000DWT moored to FTPW (Visualization image).

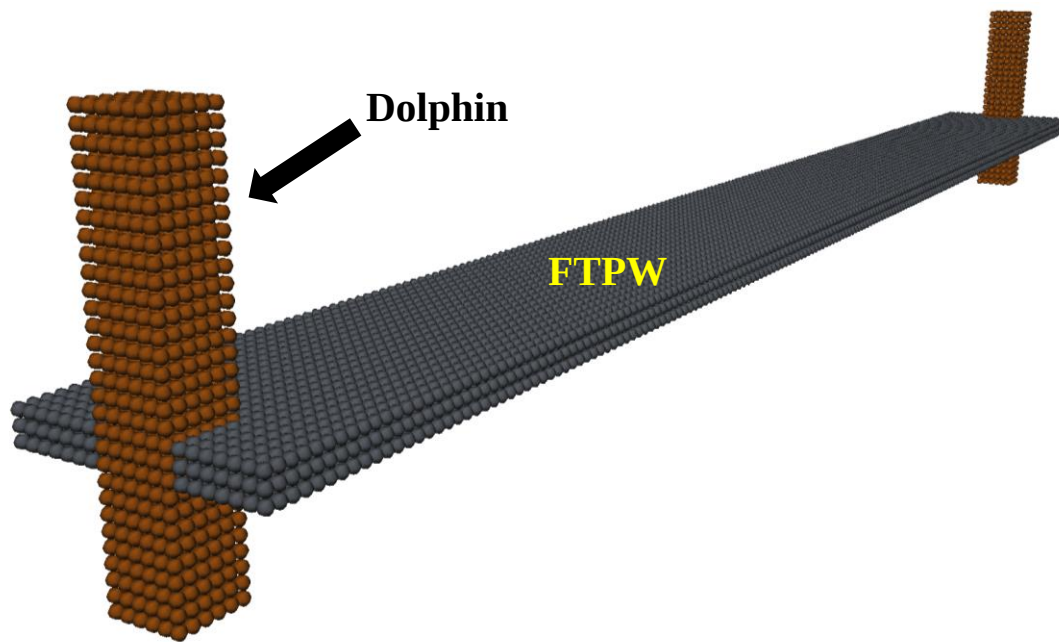


Fig. 4.6.4 Floating tsunami protection wharf (Visualization image).

Table 4.6.1 Calculation condition of FTPW.

|                                                 | FTPW   |
|-------------------------------------------------|--------|
| Length overall of FTPW[m]                       | 200.0  |
| Molded breadth of FTPW [m]                      | 20.0   |
| Molded depth of FTPW [m]                        | 3.0    |
| Draft of FTPW [m]                               | 1.0    |
| Particle number of FTPW                         | 11,520 |
| Particle number of submerged FTPW               | 3,840  |
| Particle number of FTPW bottom                  | 3,840  |
| Density of FTPW's particle [kg/m <sup>3</sup> ] | 173.3  |

Table 4.6.2 Calculation condition.

|                               | DWT                  |              |
|-------------------------------|----------------------|--------------|
|                               | 3,000(Half )         | 10,000(Half) |
| Initial number of particles   | 500,338              | 574,462      |
| Initial particle distance [m] | 1.0                  |              |
| Simulation time [sec]         | 300.0                |              |
| $\Delta t[sec]$               | $5.0 \times 10^{-3}$ |              |

## 4.6.2 入射波条件

前章の3.2節で決定したように、波形の立ち上がりに要する時間として150秒を目標とし、波高およそ5m~9mの各5ケース流れを造波した。これは、前章の90度入射における検討で、乗り揚げが発生した波高から検討している。Fig. 4.6.5に水深10mの場合の、Fig. 4.6.6に水深12mの場合の波高を示す。これらの波形は、船体を配置していない条件で、流入境界から70mの位置（船体配置時の左舷から10mの位置）で計測した結果であり、2.0秒間（21データ）単純移動平均をかけ、平滑化処理を施している。

前章で示した手法と同様に、船体およびFTPWを配置していない入射波条件で、Fig. 4.6.7（水深10m）、Fig. 4.6.9（水深12m）に示すように、岸壁先端近傍における表層のY方向最大水平流速 $u_{max}$ のプロット図を作成した。Fig. 4.6.7, Fig. 4.6.9から、越流前は1.5~2.0m/s程度であるが、岸壁越流後、4.0~7.0m/sと3倍程度まで流速が急激に増大していることがわかる。またこの最大水平流速を $u_{max}$ 、そのときの水深を $h'$ とし式(3.8.2)に従って、フルード数 $F_r$ に無次元化した結果が、Fig. 4.6.8, Fig. 4.6.10である。岸壁越流後はフルード数 $F_r$ が1をこえ射流となっているケースもあり、流れの性質が越流前後で大きく変わったことがわかる。

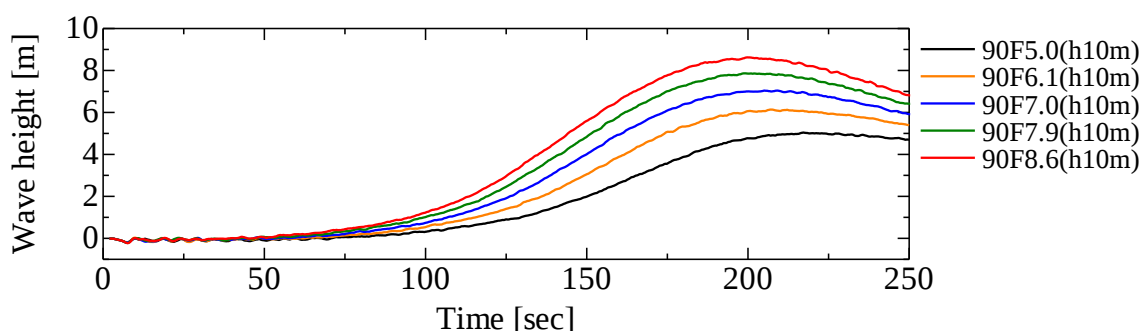


Fig. 4.6.5 Wave height in 0 degrees (depth:10m).

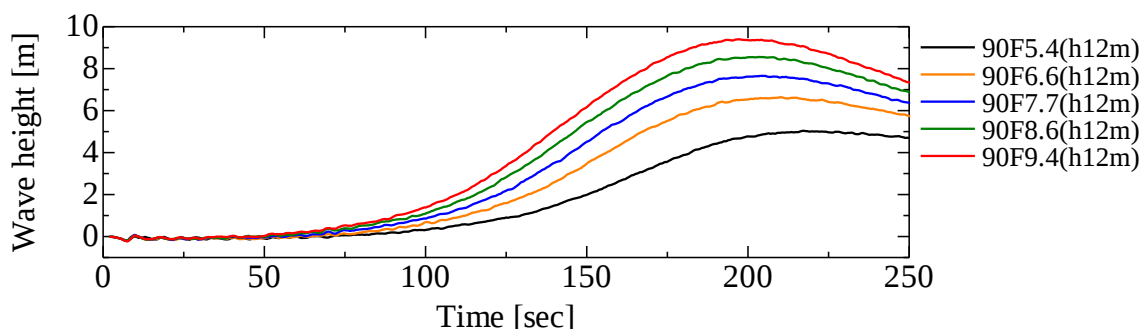


Fig. 4.6.6 Wave heights in 90 degrees (depth:12m).

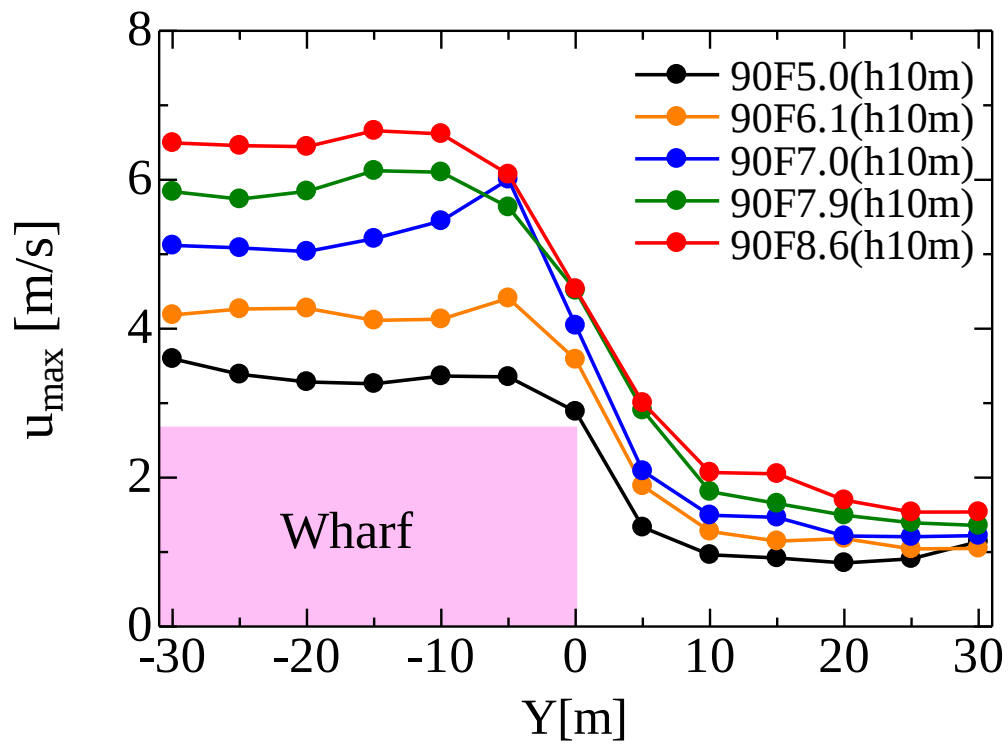


Fig. 4.6.7 Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h10m).

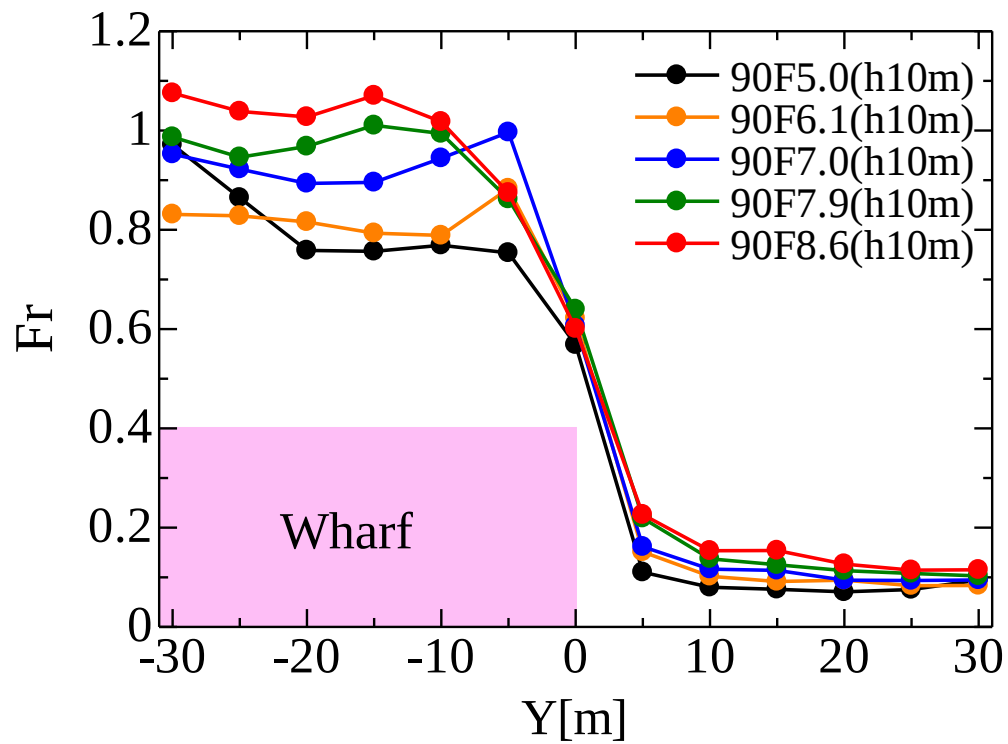


Fig. 4.6.8 The Froude number near the wharf (h10m).

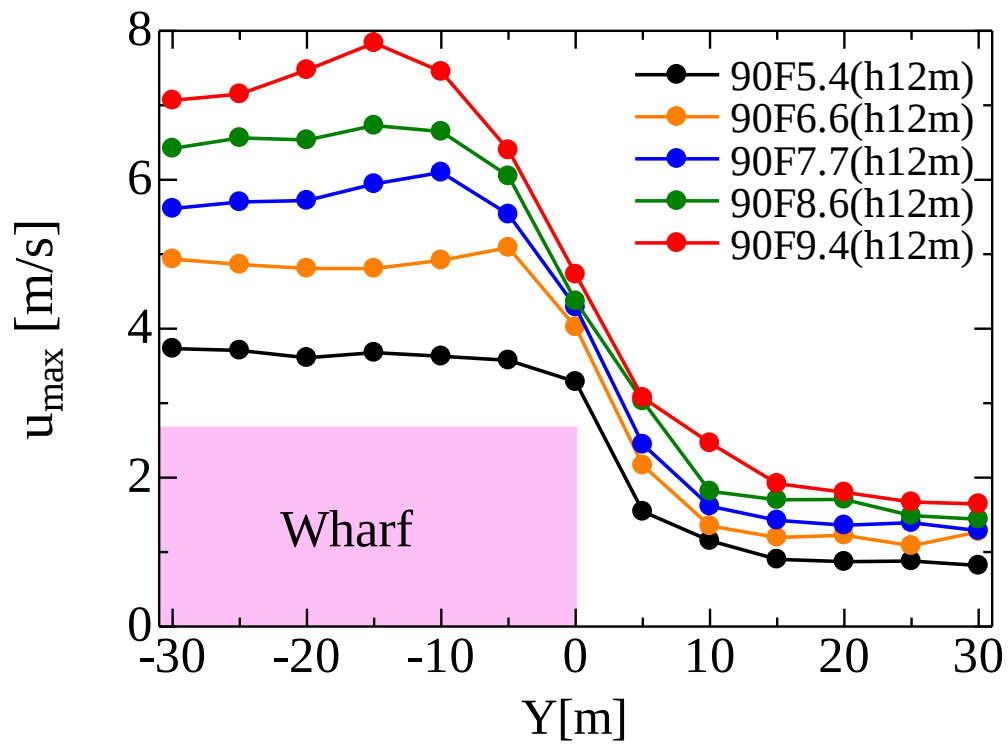


Fig. 4.6.9 Maximum horizontal flow velocity near the wharf (h12m).

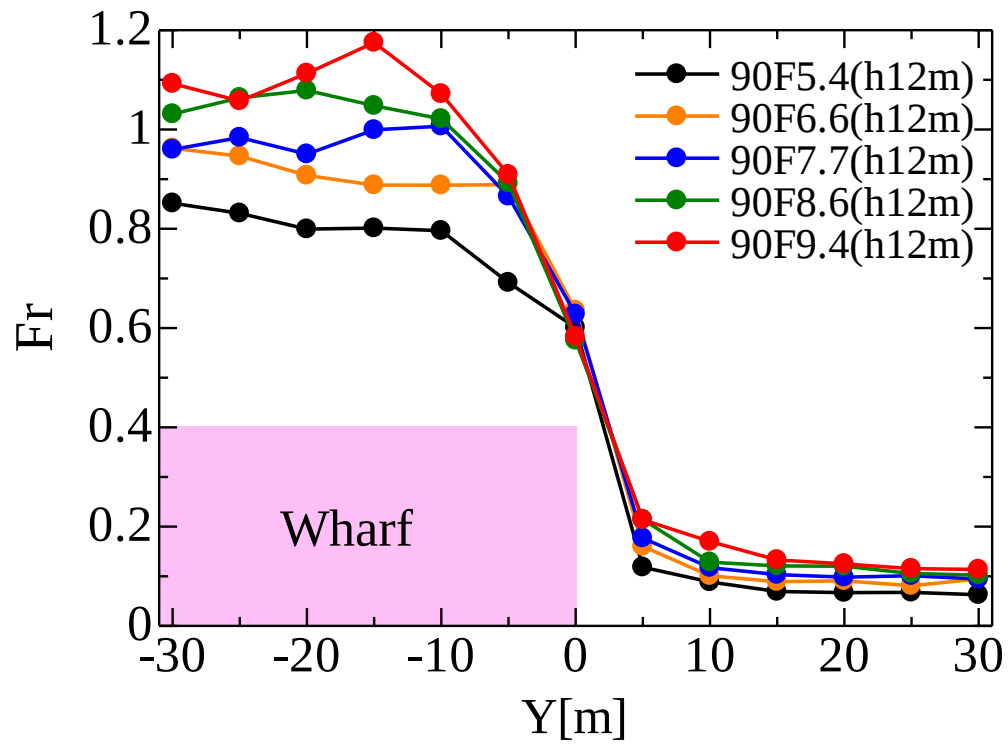


Fig. 4.6.10 The Froude number near the wharf (h12m).

### 4.6.3 計算ケース

Table 4.6.3 に示すように、船体 2 ケース（3,000DWT, 10,000DWT）、波高 5 ケースの計 10 ケースの検討である。Table 4.6.3 に記載の波高および最大流速は 4.6.2 項で述べた入射波条件での計測値である。なおケース名として FTPW と係留した場合は-FTPW を追記している。

Table 4.6.3 Calculation cases in 90 degrees (Moored to FTPW).

| Case               | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT   | Draft[m] | Mooring characteristic |
|--------------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|-------|----------|------------------------|
| 90F5.0-3000NH-FTPW | 90         | Flow      | 5.0            | 0.5                | 10.0     | 3,000 | 4m(half) | Nonlinear              |
| 90F6.1-3000NH-FTPW |            |           | 6.1            | 0.6                |          |       |          |                        |
| 90F7.0-3000NH-FTPW |            |           | 7.0            | 0.9                |          |       |          |                        |
| 90F7.9-3000NH-FTPW |            |           | 7.9            | 1.1                |          |       |          |                        |
| 90F8.6-3000NH-FTPW |            |           | 8.6            | 1.3                |          |       |          |                        |

| Case                | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT    | Draft[m] | Mooring characteristic |
|---------------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|--------|----------|------------------------|
| 90F5.4-10000NH-FTPW | 90         | Flow      | 5.4            | 0.5                | 12.0     | 10,000 | 6m(half) | Nonlinear              |
| 90F6.6-10000NH-FTPW |            |           | 6.6            | 0.7                |          |        |          |                        |
| 90F7.7-10000NH-FTPW |            |           | 7.7            | 0.9                |          |        |          |                        |
| 90F8.6-10000NH-FTPW |            |           | 8.6            | 1.2                |          |        |          |                        |
| 90F9.4-10000NH-FTPW |            |           | 9.4            | 1.3                |          |        |          |                        |

### 4.6.4 結果および考察

計 10 ケースの、FTPW と係留した 3,000DWT および 10,000DWT の乗り揚げ発生の結果を Table 4.6.4 および Table 4.6.5 に示す。式(3.8.1)の乗り揚げ算定式で乗り揚げが発生する判定の場合は、淡紅色としており、前章の 90 度入射の検討と同様に、3,000DWT の場合は波高 6m 以上、10,000DWT の場合は波高 8m 以上で乗り揚げ判定となる。Table 4.6.4, Table 4.6.5 に示すように、3,000DWT, 10,000DWT とともに、算定式では乗り揚げ判定となるケースを含めて、すべてのケースで乗り揚げや係留索の破断は発生しなかった。

入射波高約 9m の波高が最も高いケースとして、Fig. 4.6.11 に 90F8.6-3000NH-FTPW の、Fig. 4.6.12 に 90F9.4-10000NH-FTPW の初期時刻と 200 秒後のスナップショットを示す。Fig. 4.6.5, Fig. 4.6.6 の波高の時系列データから、計算開始から 200 秒付近は最も船体周りの水位が高くなる時刻であるが、この時水粒子は FTPW の下方から岸壁部に勢いよく越流して流れているが、船体と FTPW は水位の上昇とともに浮上し、津波中でも安定した係留状態を保っていた。このケースでの、船体近傍の 10 粒子の位置での水位変動と船体および FTPW の鉛直変位（Heave）の時系列データを重ねたグラフが Fig. 4.6.13（90F8.6-3000NH-FTPW）、Fig. 4.6.14（90F9.4-10000NH-FTPW）である。船体と FTPW は水位変動とよく連動し、相対的な位置関係がほとんど変わっていないことがわかる。

前章の 90 度入射における検討では、乗り揚げ発生時に、船幅方向の鉛直流速の差によって流入境界側への傾斜が発生したが、FTPW に係留した場合、Roll の回転運動はほぼ発生しなかった。これは Fig. 4.6.7, Fig. 4.6.9 からわかるように、FTPW と係留することで、FTPW の幅 20m 分、岸壁越流部近傍の水粒子の流速が増大する領域から距離をとれたためであると考えられる。

先行研究の増田ら<sup>(17)</sup>や中山ら<sup>(52)</sup>の FTPW の検討では、特に波高が大きくなると、船体と FTPW の浮上速度の違いによる防災性能の低下や、それにとまなう FTPW の甲板上への海水の打ち込み

が指摘されている。しかしながら、本検討では、Fig. 4.6.13, Fig. 4.6.14 から船体と FTPW の浮上速度はよく一致しており、また Fig. 4.6.11, Fig. 4.6.12 のスナップショットからもわかるように、FTPW への海水の打ち込みは発生していない。これは増田ら、中山らの検討は、水位が急激に上昇する、波形勾配の大きい孤立波、あるいは段波を模擬津波としていることが原因であると考えられる。

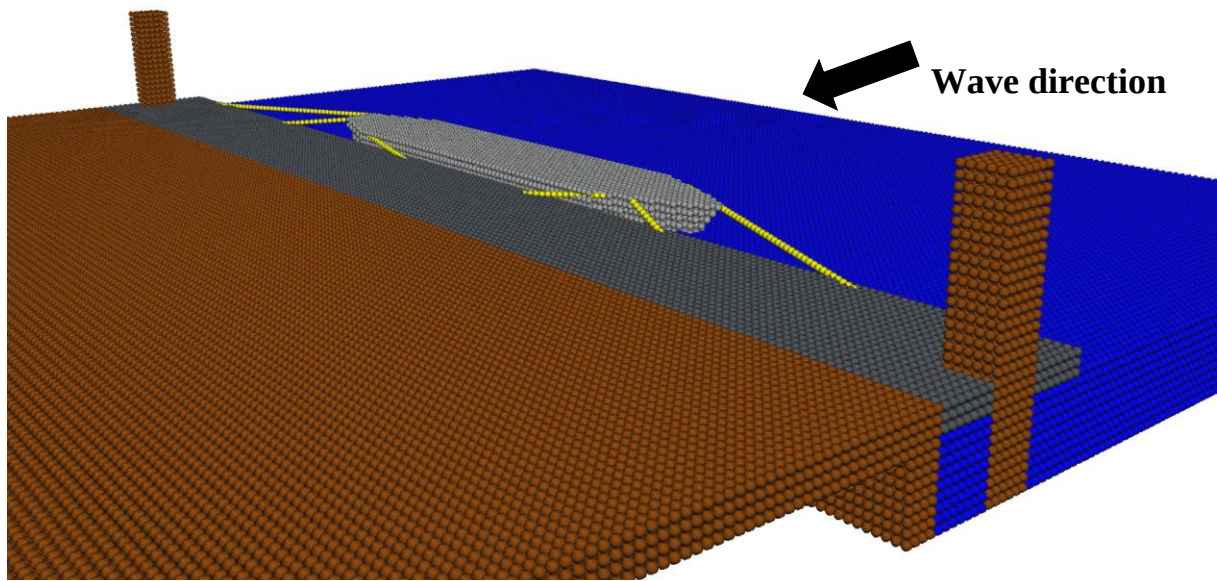
以上の結果から、本検討で採用したポンツーン型の FTPW は、実際の津波波形のような長周期の押し波に対して強い防災性能を発揮することができると考えられる。また波高およそ 9m でも FTPW 甲板への海水の打ち込みがみられなかったことは、先行研究の FTPW 内部あるいは甲板上に物資を備蓄できるという提案を支持できる結果である。

Table 4.6.4 Grounding existence (90 degrees, 3,000DWT).

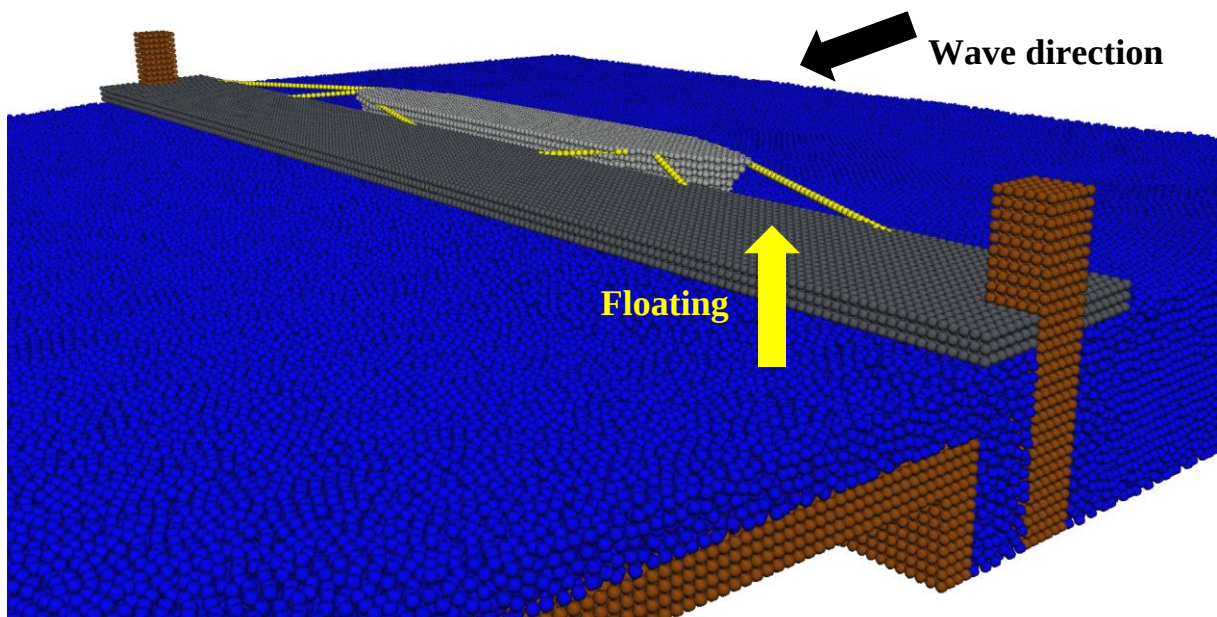
|          | Wave height[m] |      |      |      |      |
|----------|----------------|------|------|------|------|
|          | 5.0            | 6.1  | 7.0  | 7.9  | 8.6  |
| 3000FTPW | Safe           | Safe | Safe | Safe | Safe |

Table 4.6.5 Grounding existence (90 degrees, 10,000DWT).

|           | Wave height[m] |      |      |      |      |
|-----------|----------------|------|------|------|------|
|           | 5.4            | 6.6  | 7.7  | 8.6  | 9.4  |
| 10000FTPW | Safe           | Safe | Safe | Safe | Safe |

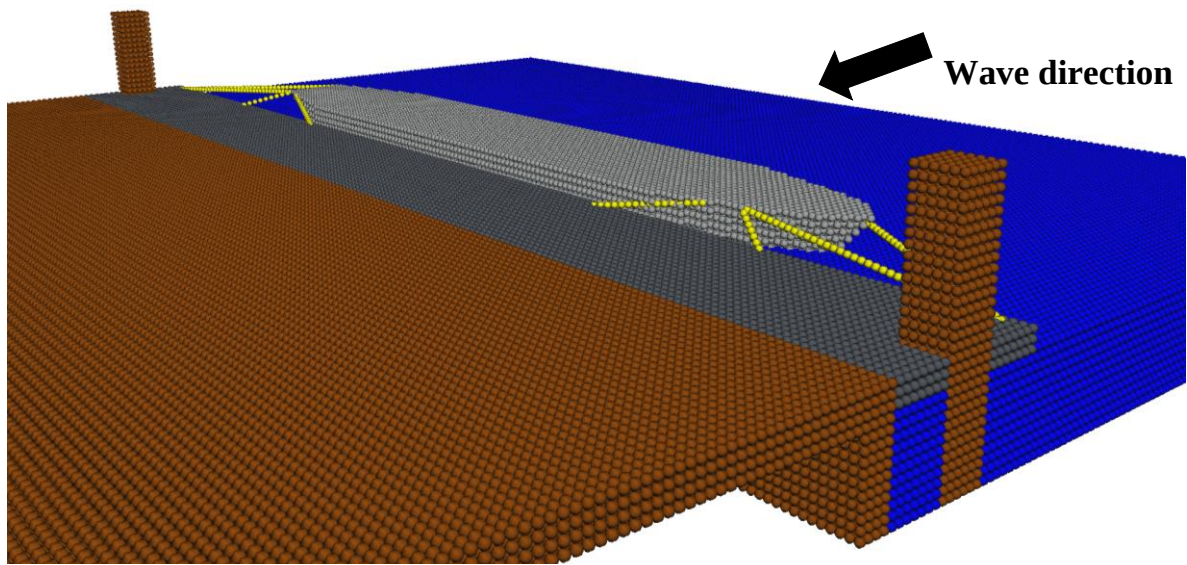


a) Time = 0.0sec

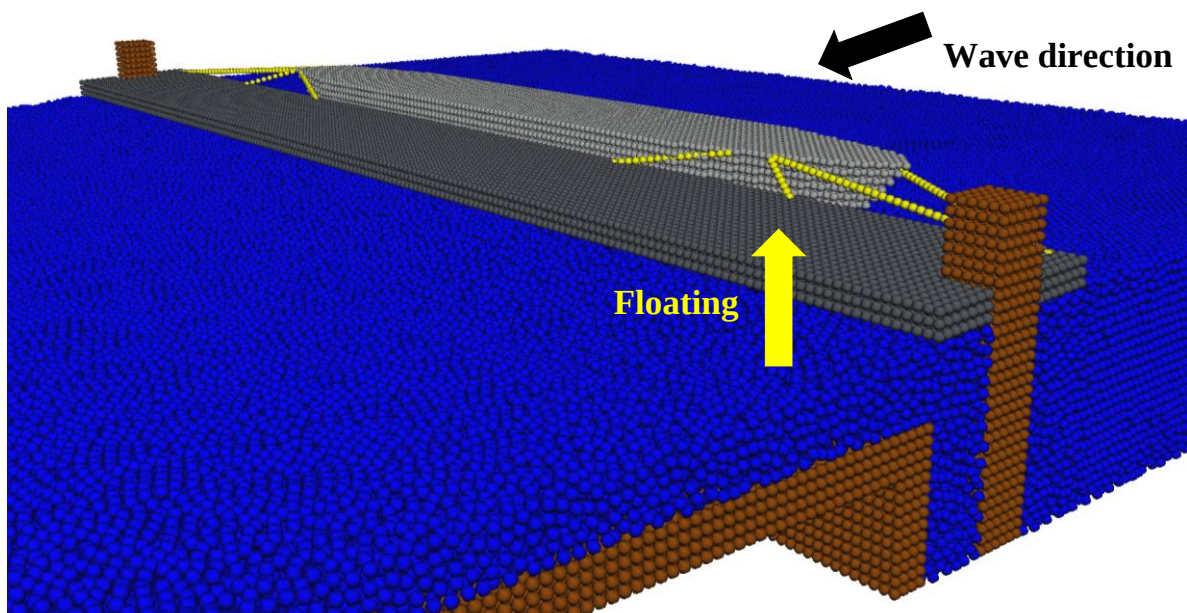


b) Time = 200.0sec

Fig. 4.6.11 Snapshots of simulation result (90F8.6-3000NH-FTPW).



a) Time = 0.0sec



b) Time = 200.0sec

Fig. 4.6.12 Snapshots of simulation result (90F9.4-10000NH-FTPW).

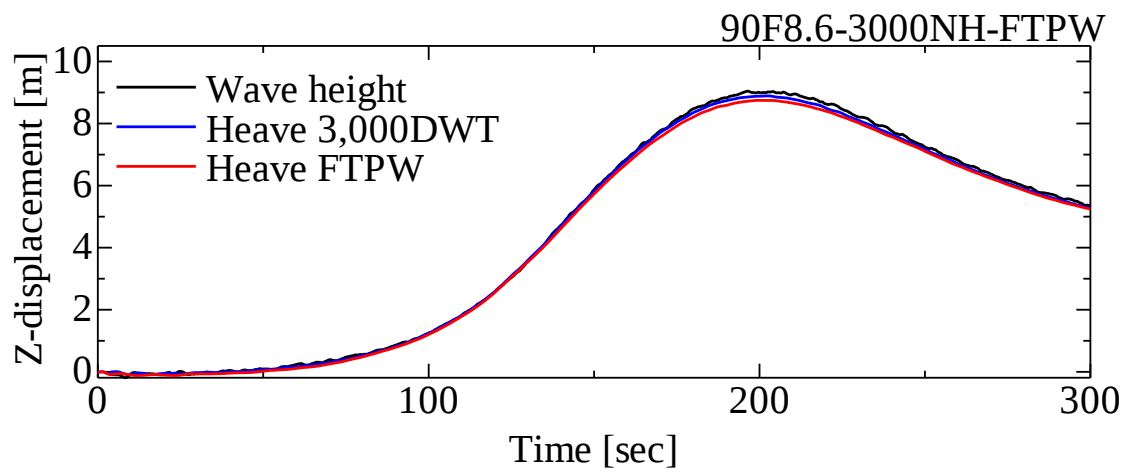


Fig. 4.6.13 Comparison of Z-displacement (90F8.6-3000NH-FTPW).

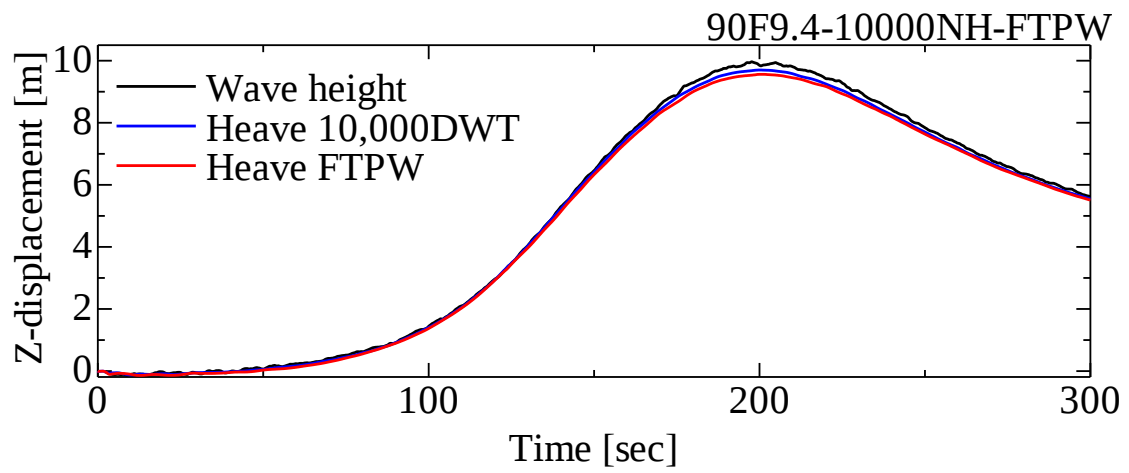


Fig. 4.6.14 Comparison of Z-displacement (90F9.4-10000NH-FTPW).

## 4.6.5 計算コスト

本節での FTPW に係留された 3,000DWT, 10,000DWT を対象とした津波シミュレーション計 10 ケースの計算時間を Fig. 4.6.15 に、使用した計算機の仕様を Table 4.6.6 に示す。Table 4.6.6 の計算機は、Table 4.3.6 で使用した計算機とは別のものである。計算条件は、Table 4.6.2 で示したように、解析時間は 300 秒、時間刻み幅 $\Delta t$ は $5.0 \times 10^{-3}$ 秒固定であり、初期粒子数は 3,000DWT の場合は 500,338, 10,000DWT の場合は 574,462 である。Fig. 4.6.14 から、計算時間は最も波高が低い 3,000DWT のケース(90F5.0-3000NH-FTPW)でおよそ 12 日、波高が最も高い 10,000DWT のケース(90F9.4-10000NH-FTPW)ではおよそ 19 日である。本研究で実施したシミュレーションの中でも、特に計算負荷の高い検討となった。4.3.5 節でもすでに述べたが、今後より大型の船舶を検討する場合や水域を大きくしたい場合、より長周期な波形で検討したい場合に、計算コストは非常に膨大となり、計算時間が 1 ヶ月をゆうに超えることが予想される。陽解法による CPU, GPU を使用した並列処理や適当な時間刻み幅 $\Delta t$ の設定など、計算の高速化手法についても検討していく必要がある。

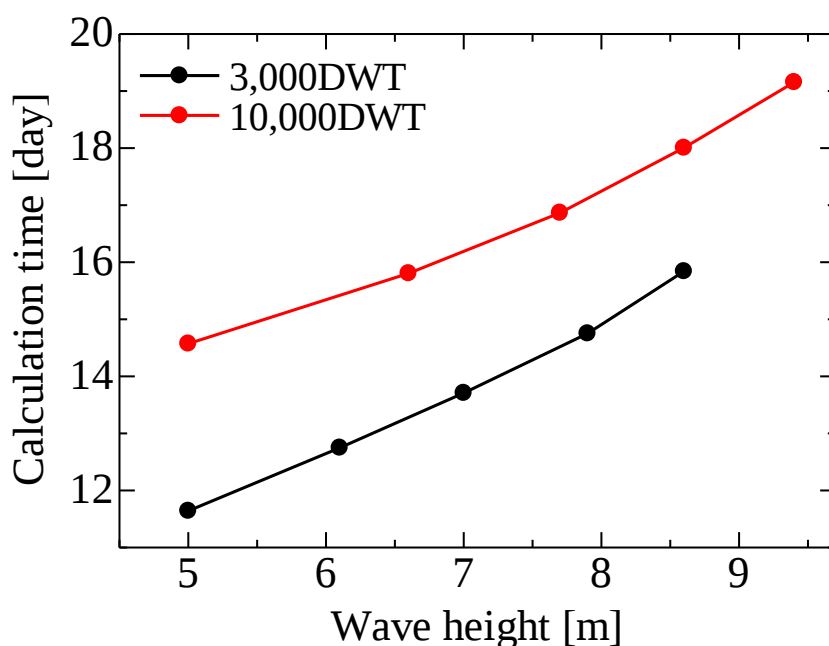


Fig. 4.6.15 Computation times (day).

Table 4.6.6 PC spec.

|        |                                   |
|--------|-----------------------------------|
| CPU    | Intel (R) Xeon (R) W-2155 3.30GHz |
| OS     | Windows 10Pro                     |
| Memory | 256.0GB                           |

## 4.7 深喫水型浮体式津波対策用岸壁シミュレーション(90 度入射)

### 4.7.1 計算条件

DFTPW は Fig. 4.7.1 に示すように、前節の FTPW の深さを 3 倍した深さ 9m、喫水 7m で設定する。DFTPW の深さおよび喫水以外の計算条件は前節の設定と同一であり、3,000DWT、10,000DWT の船舶（半載喫水）に押し波として流れを入射させる。Table 4.7.1 に DFTPW の計算条件を示す。これまでの設定と同様に、DFTPW の粒子数密度の設定も式(3.4.7)に従って半粒子分（0.5m）沈下しないように設定する。なお水の粒子数密度も前章と同様に  $1040 \text{ kg/m}^3$  である。

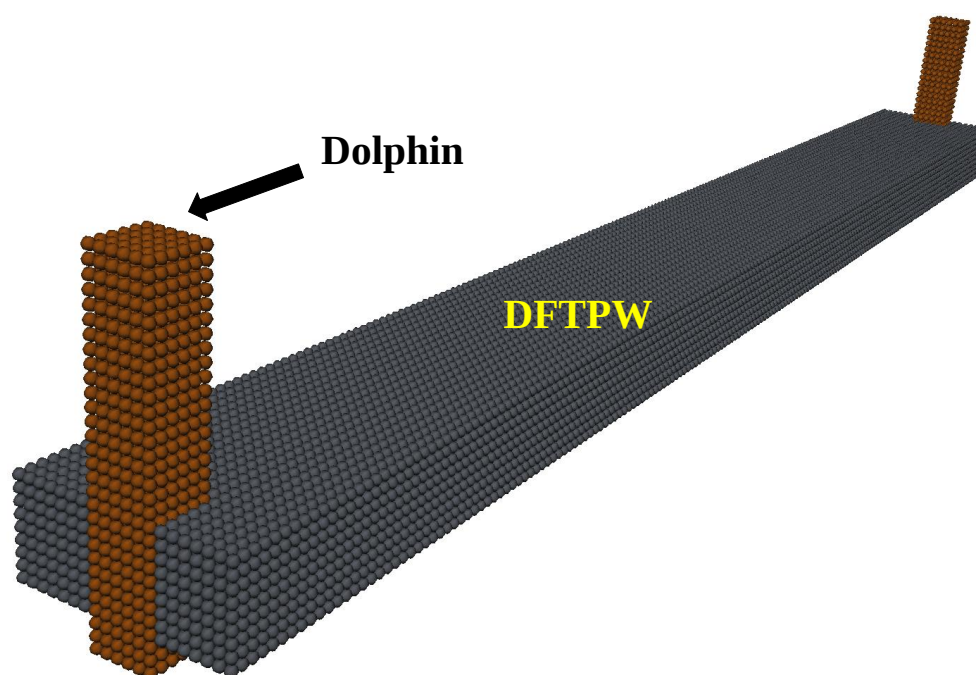


Fig. 4.7.1 Deep-draft type floating tsunami protection wharf (Visualization image).

Table 4.7.1 Calculation condition of DFTPW.

|                                                 | FTPW   |
|-------------------------------------------------|--------|
| Length overall of DFTPW[m]                      | 200.0  |
| Molded breadth of DFTPW [m]                     | 20.0   |
| Molded depth of DFTPW [m]                       | 9.0    |
| Draft of DFTPW [m]                              | 7.0    |
| Particle number of DFTPW                        | 34,560 |
| Particle number of submerged DFTPW              | 26,880 |
| Particle number of DFTPW bottom                 | 3,840  |
| Density of DFTPW's particle [ $\text{kg/m}^3$ ] | 751.1  |

## 4.7.2 計算ケース

Table 4.7.2 に示すように、船体 2 ケース（3,000DWT, 10,000DWT）、波高 1 ケースの計 2 ケースの検討である。入射波は前章の条件において最も波高が高い 9m のケースを採用している。Table 4.7.2 に記載の波高および最大流速は 4.6.2 項で述べた入射波条件での計測値である。なおケース名として DFTPW と係留した場合は-DFTPW を追記している。

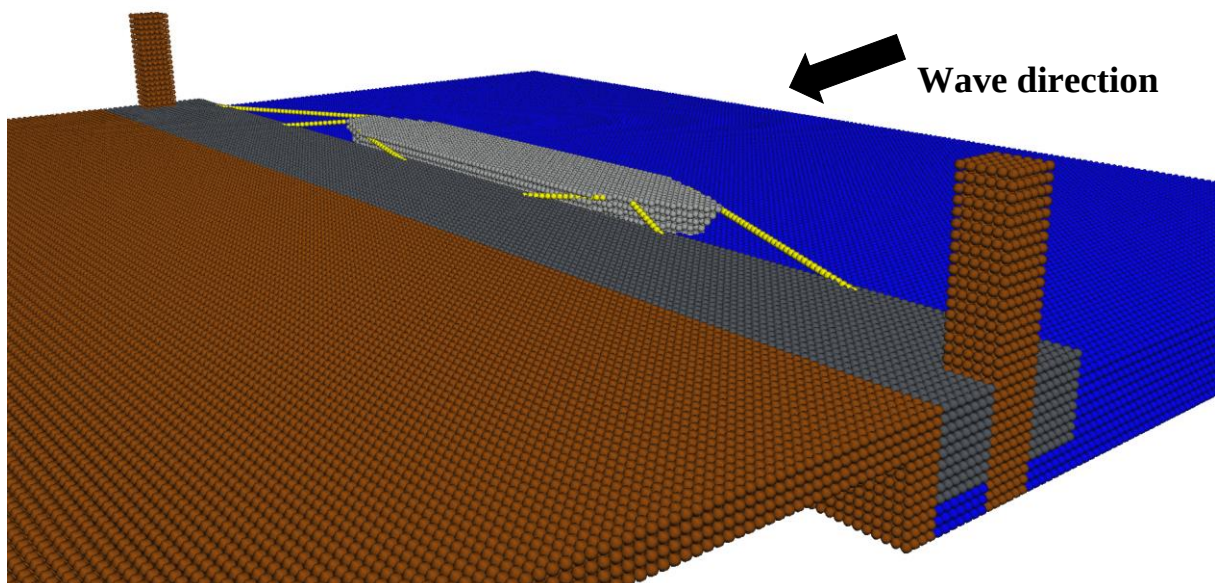
Table 4.7.2 Calculation cases in 90 degrees (Moored to DFTPW).

| Case                 | Angle[deg] | Wave form | Wave height[m] | Flow velocity[m/s] | Depth[m] | DWT    | Draft[m] | Mooring characteristic |
|----------------------|------------|-----------|----------------|--------------------|----------|--------|----------|------------------------|
| 90F8.6-3000NH-DFTPW  | 90         | Flow      | 8.6            | 1.3                | 10       | 3,000  | 4m(half) | Nonlinear              |
| 90F9.4-10000NH-DFTPW |            |           | 9.4            | 1.3                | 12       | 10,000 | 6m(half) |                        |

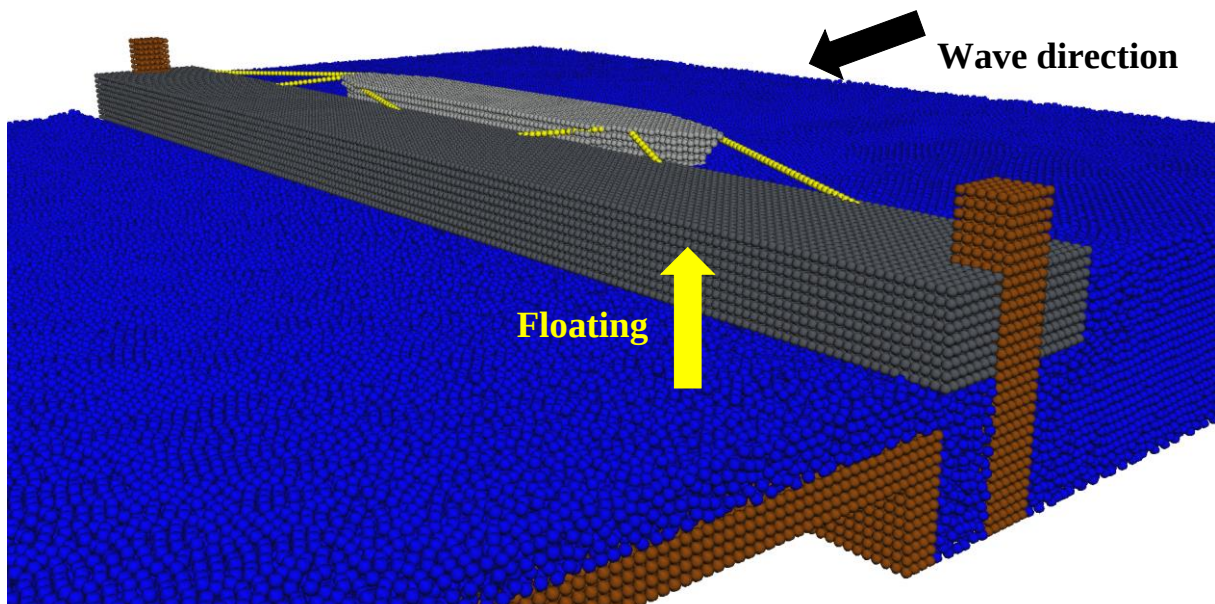
## 4.7.3 結果および考察

Fig. 4.7.2 に 90F8.6-3000NH-DFTPW, Fig. 4.7.3 に 90F9.4-10000NH-DFTPW の初期時刻と 200 秒後のスナップショットを示し, Fig. 4.7.4（90F8.6-3000NH-DFTPW）, Fig. 4.7.5（90F9.4-10000NH-DFTPW）に船体近傍の 10 粒子の位置での水位変動と船体および FTPW の鉛直変位（Heave）の時系列データを重ねたグラフを示す。前節の FTPW の検討と同様に, Fig. 4.7.2 および Fig. 4.7.3 の入射波高が最も高くなる時刻付近である b) のスナップショットから, 波高 9m のような巨大津波でも, 船体と DFTPW がともに浮上することで安定した係留状態を維持できていることがわかる。Fig. 4.7.4, Fig. 4.7.5 から船体と DFTPW の鉛直方向の運動は水位変動によく連動して浮上しているが, 入射波高およそ 9m に対して DFTPW の場合は船体近傍の最大波高がおよそ 12m となっており, Fig. 4.6.13, Fig. 4.6.14 の FTPW の場合と比較して高くなっている。これは浮体部の浮上時に FTPW の場合より DFTPW の方が浮体部と岸壁との間の距離が狭くなること, また本計算領域の設定上水粒子が DFTPW の側面に回り込むことができないことに起因するものであり, 実現象では防災性能上大きな問題にはならないと考えられる。前節の検討結果とあわせて, FTPW・DFTPW はともに流れによる押し波に対しては強い防災性能を有しており, 本検討のような係留杭を用いる場合, 津波水位が係留杭の高さを超え浮体部が脱落しない限り, 船舶を安全に係留することができると考えられる。

今後の検討としては, FTPW あるいは DFTPW と船体の間に防舷材を導入し, より詳細なシミュレーションを実施することで, 船体の浮上速度に与える影響について明らかにする必要がある。また本検討で採用した FTPW・DFTPW の長さは 200m と長大であり, 巨大な係留杭を必要としている。実際の港湾で運用するためには, 非常に広い水域を占有することになり, また一般商船の円滑な荷役の妨げとなる可能性がある。今後はより実現性の高い形状を検討する必要がある。

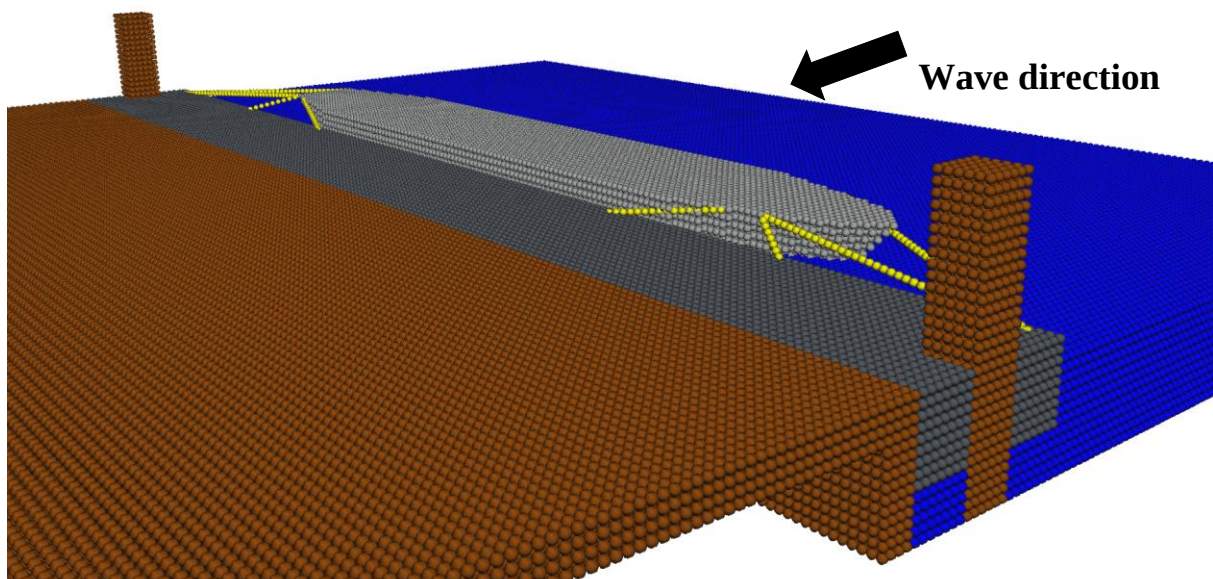


a) Time = 0.0sec

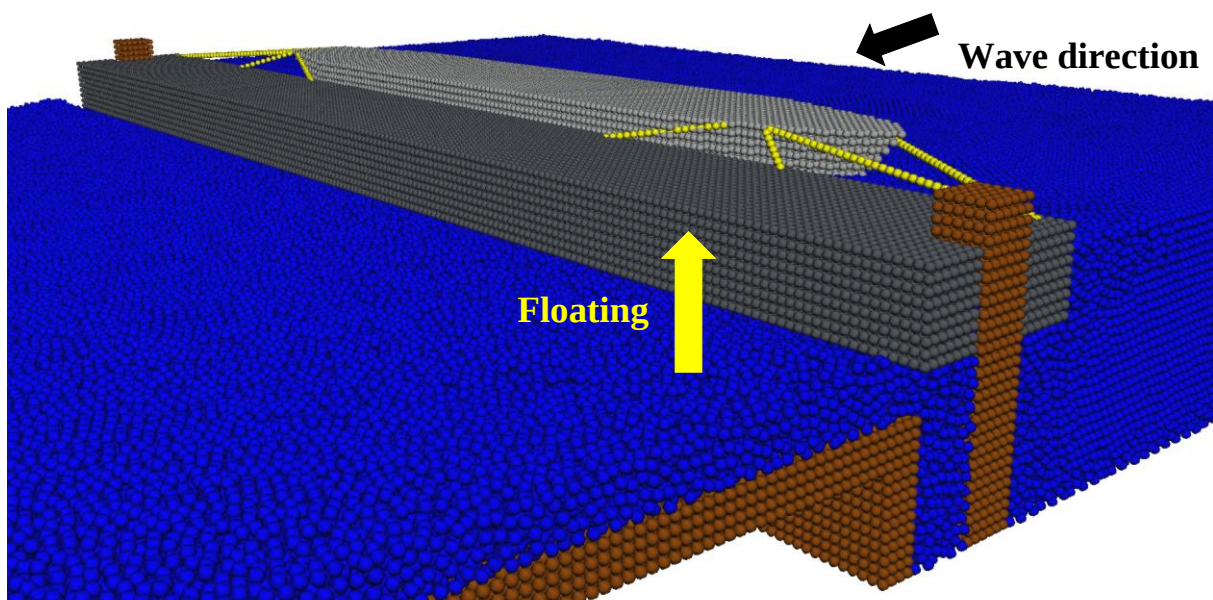


b) Time = 200.0sec

Fig. 4.7.2 Snapshots of simulation result (90F8.6-3000NH-DFTPW).



a) Time = 0.0sec



b) Time = 200.0sec

Fig. 4.7.3 Snapshots of simulation result (90F9.4-10000NH-DFTPW).

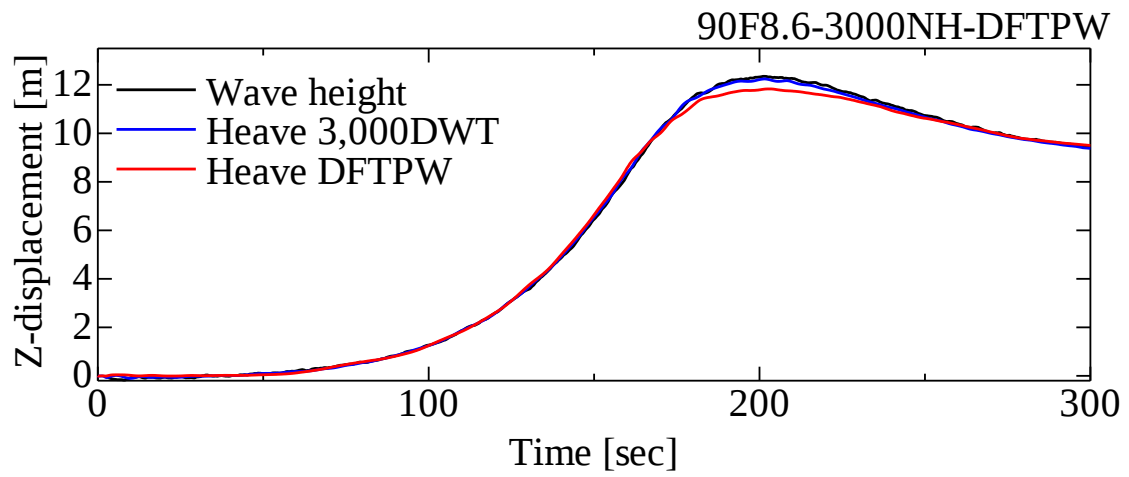


Fig. 4.7.4 Comparison of Z-displacement (90F8.6-3000NH-DFTPW).

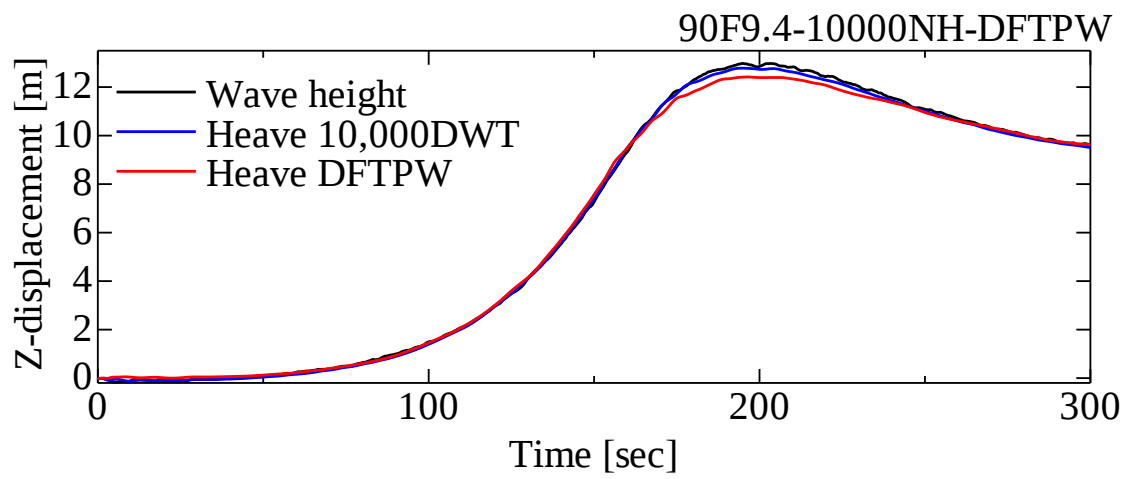


Fig. 4.7.5 Comparison of Z-displacement (90F9.4-10000NH-DFTPW).

## 4.8 水柱崩壊による引き波津波シミュレーション

### 4.8.1 計算条件

FTPW および DFTPW の引き波に対する防災性能について検討する。引き波は長瀬ら<sup>(56)</sup>や増田ら<sup>(57)</sup>の検討と同様に水柱崩壊（ダムブレイク）によって再現する。計算領域は、4.6 節および 4.7 節のものと同様であり、流入境界粒子（Fig. 4.6.1, Fig. 4.6.2, Fig. 4.6.3 の右側に配置）を配置しないことで計算開始とともに水柱崩壊を発生させる。対象船舶は 3,000DWT であり、初期水深は 10m である。FTPW, DFTPW, 船体を配置していない条件で、流入境界から 70m の位置（船体配置時の左舷から 10m の位置）で計測した水位の時系列データを Fig. 4.8.1 に示す。計算開始とともにおよそ 60 秒間かけて水位を低下させて引き波時の模擬津波を再現している。

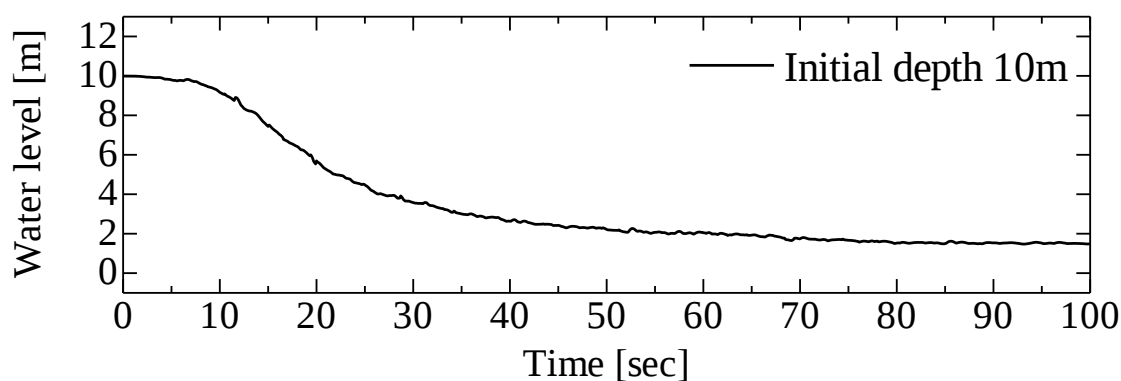


Fig. 4.8.1 Water level of backwash (90 degrees).

### 4.8.2 計算ケース

船体条件および FTPW, DFTPW の条件は前節までと同様であるが、係留条件は前節までに使用した索径 45mm, PP 索 6 本係留だけでなく、PP 索の増しもやいや Fig. 4.4.1 に示す索径 45mm の高性能な HMPE 索に変更することで係留強化による対策の有効性についても検討する。計算ケースは 3 ケースであり、FTPW に PP 索を通常係留として 6 本とるケース（90B-3000NH-FTPW-PP+0）、DFTPW に PP 索を通常係留に加えて 6 本増し取りしたケース（90B-3000NH-DFTPW-PP+6）、DFTPW に HMPE 索を通常係留として 6 本とるケース（90B-3000NH-DFTPW-HMPE+0）とする。計算ケース名のつけ方については 4.2 節を参照されたい。なお増しもやいは津波対策係留索リストでの検討と同様に、Head line および Stern line の係留索を各 3 本、計 6 本増し取りした。

Table 4.8.1 Calculation cases in backwash simulations.

| Case                    | Angle[deg] | Wave form | Depth[m] | DWT   | Draft[m] | Type | Preventer hawser |
|-------------------------|------------|-----------|----------|-------|----------|------|------------------|
| 90B-3000NH-FTPW-PP+0    | 90         | Backwash  | 10       | 3,000 | 4m(Half) | PP   | +0               |
| 90B-3000NH-DFTPW-PP+6   |            |           |          |       |          | PP   | +6               |
| 90B-3000NH-DFTPW-HMPE+0 |            |           |          |       |          | HMPE | +0               |

### 4.8.3 結果および考察

Fig. 4.8.2 に各ケースにおける船体から船体近傍の位置における流速の時系列データを示す。なお流速値は船体から Y 方向流入境界側 10m の位置における X-Z 面で平均した値である。（座標系は Fig. 4.6.1 に記載）黒線の FTPW と係留した場合と比較して青および赤線の DFTPW と係留した方がおよそ 1.0m/s 程度流速が低減している。これは先行研究<sup>(52)</sup>でも述べられているとおり、DFTPW は FTPW よりも浮体下部に存在する水領域が少ないためであり、DFTPW は引き波に対して有効であることが確認できる。

Fig. 4.8.3 に各ケースにおける船体運動として Sway (Y 方向) および Heave (Z 方向) の軌跡を、また Fig. 4.8.4 に 90B-3000NH-FTPW-PP+0 の、Fig. 4.8.5 に 90B-3000NH-DFTPW-PP+6 の初期時刻から 40 秒後までのスナップショットを示す。本計算条件での 3,000DWT の船舶の余裕水深(UKC) は 6m であるため、Fig. 4.8.3 で Heave が -6m となったところで船体は着底している。Fig. 4.8.3 および Fig. 4.8.4 より FTPW に通常係留をしていた 90B-3000NH-FTPW-PP+0 のケースでは、係留索は全て破断し船体は流出したため Sway が大きくなっている。一方で、Fig. 4.8.3 および Fig. 4.8.4 より FTPW を DFTPW とし PP 索の増し取りをした 90B-3000NH-DFTPW-PP+6 や HMPE 索を通常係留していた 90B-3000NH-DFTPW-HMPE+0 の場合は係留索が一部残り船体は岸壁近傍で着底して流出が抑えられている。これらの結果から、FTPW の場合、引き波時の防災効果は不十分であるが DFTPW と増しもやいや高機能な係留索などの係留強化を組み合わせた複合的な津波対策とすることで、引き波に対しても防災効果を発揮できると考えられる。また Fig. 4.8.3 から HMPE を使用したケースでは、増し取りをしなくても船体の流出を抑えられることから、高機能な係留索を使用した方がより安全に係留避泊を実施できるといえる。

なお Fig. 4.8.1 に示すように、本検討での水柱崩壊による引き波は実現象と比較して急激に水位が低下していると考えられる。引き波の再現についてはさらなる検討を要する。また Fig. 4.8.3 で特に 90B-3000NH-DFTPW-PP+6 の場合（青線）、Sway 方向におよそ 20m 流出後数メートル岸壁側に戻っているが、これは船体と海底との摩擦を考慮していないため、残存した係留索によって引き戻されたためである。さらに 90B-3000NH-FTPW-PP+0 の場合も同様の理由で、着底後船体は海底上を滑っていき Sway の運動が止まっていない。今後は、摩擦もシミュレーションで評価し、着底後の運動もより詳細に再現する必要がある。

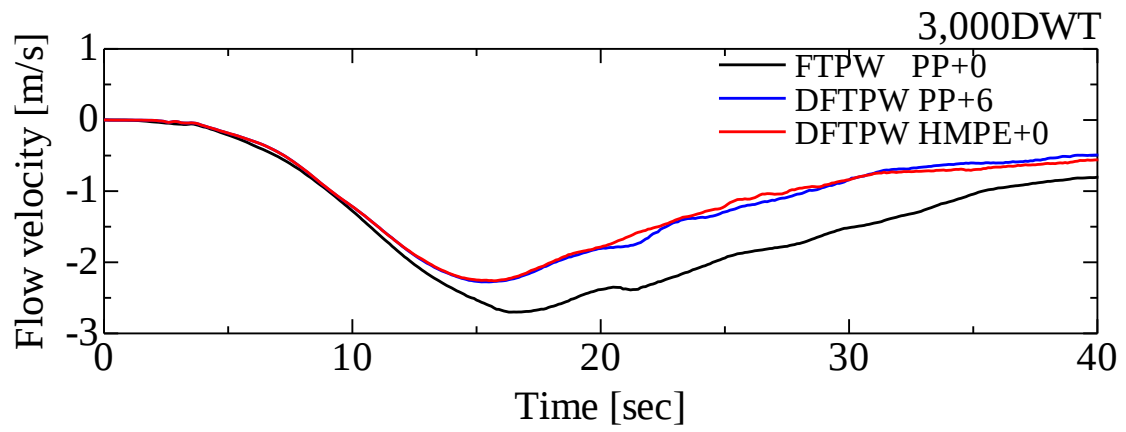


Fig. 4.8.2 Comparison of flow velocity due to backwash.

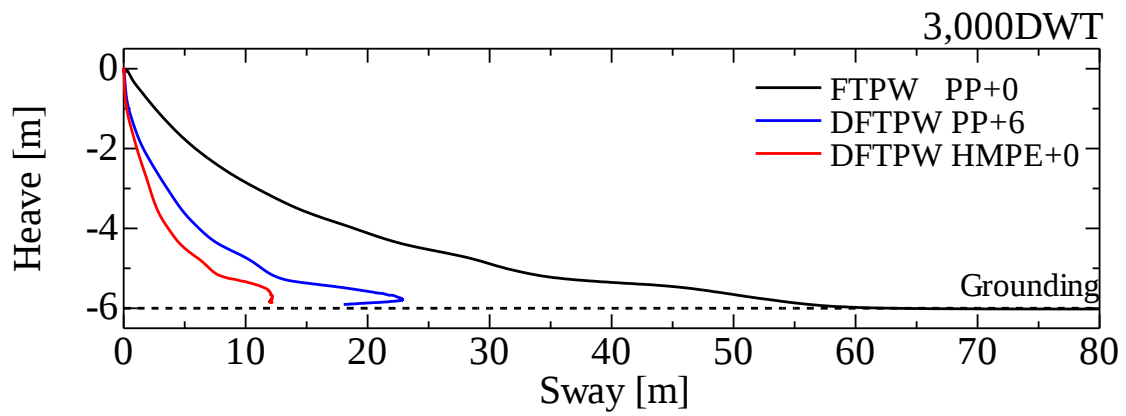
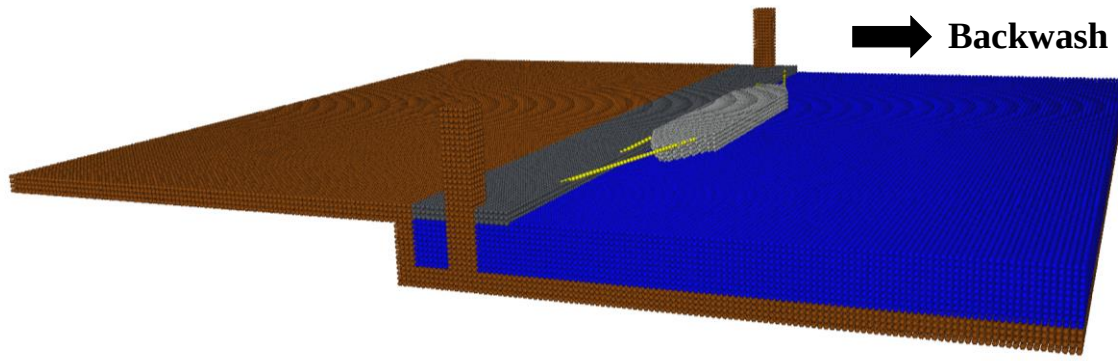
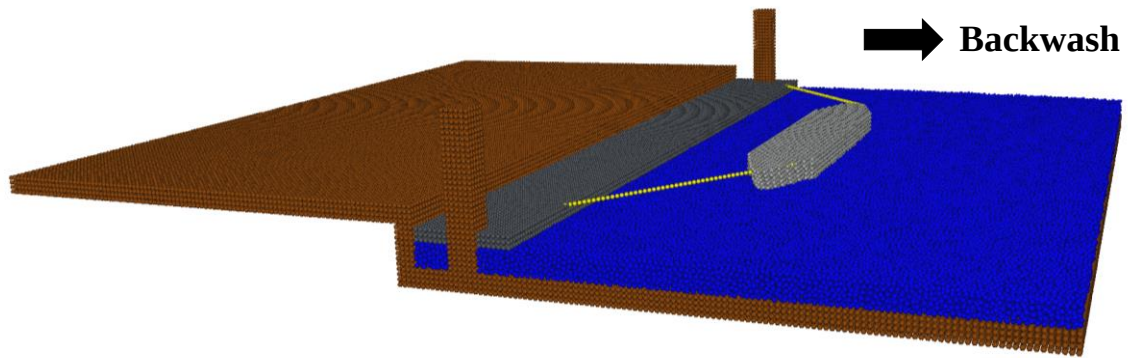


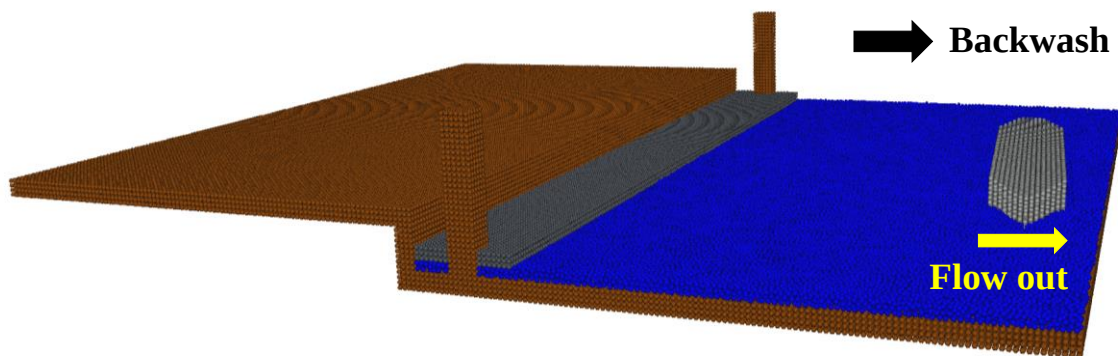
Fig. 4.8.3 Comparison of ship motion.



a) Time = 0.0sec

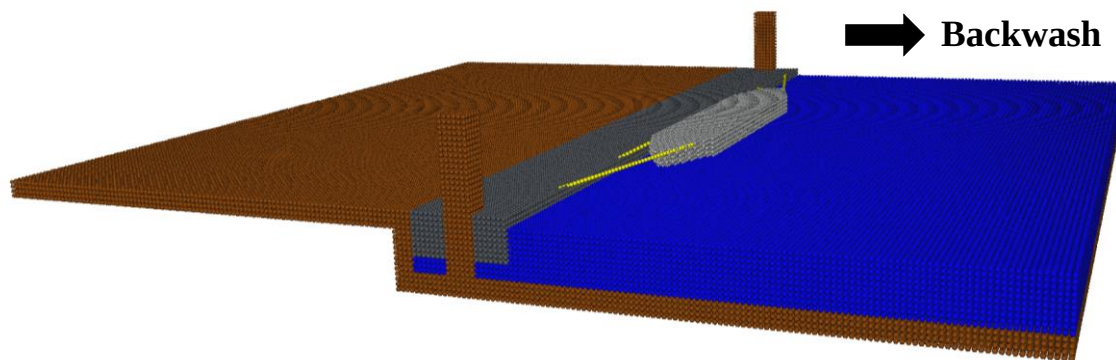


b) Time = 20.0sec

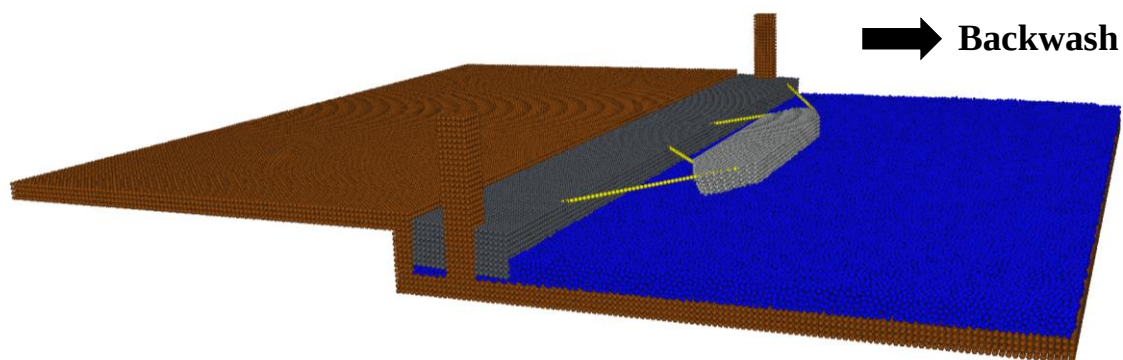


c) Time = 40.0sec

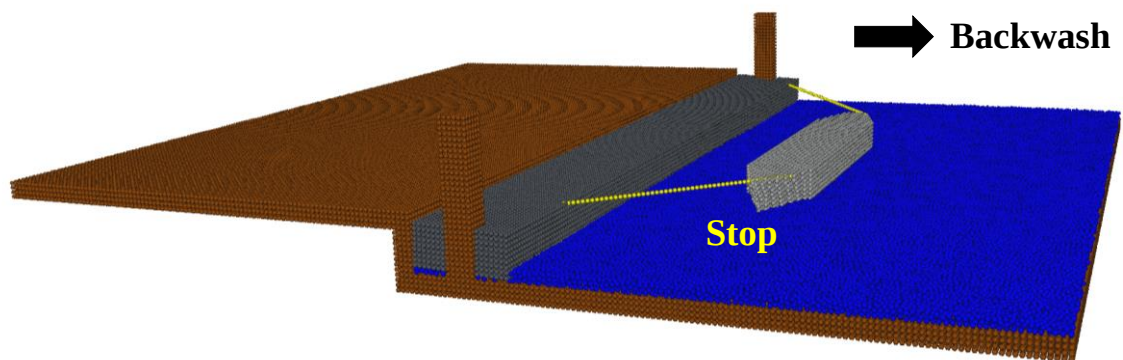
Fig. 4.8.4 Snapshots of simulation result (90B-3000NH-FTPW-PP+0).



a) Time = 0.0sec



a) Time = 20.0sec



c) Time = 40.0sec

Fig. 4.8.5 Snapshots of simulation result (90B-3000NH-DFTPW-PP+6).

## 4.9 津波条件に対する各対策手法の有効性

先行研究と本研究のこれまでの検討結果から、津波の入射方向、押し波、引き波といった津波条件に対して各対策手法の有効性を Table 4.9.1 にまとめた。まず縦波の押し波時では、4.3 節の津波シミュレーションから増しもやいや高機能な係留索などによる係留強化によって津波高に対して十分な係留力を発揮できれば係留索の破断や港内への流出を防ぎ、防災あるいは減災効果が期待できると考えられる。縦波の引き波時の場合は、本研究では検討できていないが、押し波と同様に流速が船体の水平方向の運動に大きな影響を与えると考えられることから、係留強化が有効である。一方で FTPW および DFTPW のような浮体式岸壁は増田らの検討から<sup>(17)</sup>縦波の場合、船体は水平方向に押し流され十分な防災効果は得られないことが明らかとなっている。また横波の押し波時の場合は、4.6 節、4.7 節の検討から FTPW および DFTPW は非常に強い防災性能を発揮できる。しかし前章 3.8.2 項の検討から横波の押し波時では、係留索の有無は乗り揚げ被害に大きな影響を与えないことから、この場合係留強化は効果がないと考えられる。そして横波の引き波時では、先行研究<sup>(52)</sup>および 4.8 節の検討から FTPW はその下部に存在する水領域によって防災性能が低下する。一方でこの場合は DFTPW と係留強化の併用が有効である。

以上の検討結果をまとめると、くり返される押し引き両方の津波に対応するためには、縦波の場合は係留強化が、横波の場合は DFTPW と係留強化の併用が有効な津波対策手法となる。津波の入射方向つまり係留する岸壁の配置や押し波、引き波によって津波対策の有効性は異なるため、これらを考慮して適切な対策手法を選択あるいは併用することが重要である。

Table 4.9.1 Effectiveness of each countermeasure method against tsunami conditions.

|      |       | 縦波  |     | 横波  |     |
|------|-------|-----|-----|-----|-----|
|      |       | 押し波 | 引き波 | 押し波 | 引き波 |
| 津波対策 | 係留強化  | ○   | ○   | ×   | ○   |
|      | FTPW  | ×   | ×   | ◎   | ×   |
|      | DFTPW | ×   | ×   | ◎   | ○   |

◎：効果が期待できる ○：条件付きで効果が期待できる ×：効果なし

## 4.10 結語

本章では、予想される津波被害に対して、対策を検討する際の指針となる情報をとりまとめた、津波防災対策データベースを提案し、0 度入射の場合は係留強化として、各津波高に対して安全に係留するために必要な係留条件をまとめた津波対策係留索リストを作成した。また 90 度入射の場合は、浮体式津波対策用岸壁（FTPW）と深喫水型浮体式津波対策用岸壁（DFTPW）による対策を中心に押し波および引き波で検討し、津波対策効果をまとめた。得られた結果は以下のとおりである。

- ① MPS 法による津波シミュレーションから、各津波高での最大係留力を計測し、係留索の特性曲線と係留点座標から算定した最大係留力と比較することで、3,000DWT, 10,000DWT を対象とした、縦波に対する津波対策係留索リストを作成することができた。本リストの判定から、各津波高に対して、選定すべき係留条件を把握することができる。
- ② 最大係留力を計測したシミュレーションから、喫水が深く、また載貨重量トン数が大きい船舶の方が、水面下の投影面積が大きくなり、津波から受ける流圧力が大きくなることがわかった。従って、津波に対して安全に係留するためには、喫水の深い大型船舶の方が、より強い係留条件とする必要があることがわかった。
- ③ 作成した津波対策係留索リストから、超高分子量ポリエチレン系 (HMPE) の高機能なホーサーにすると、一般的に使用されているポリプロピレン系 (PP) のホーサーと比べて、細い索径と少ない本数で対策できるため、HMPE 系のホーサーは係留強化として、有効な津波対策となることがわかった。
- ④ FTPW または DFTPW に係留された 3,000DWT, 10,000DWT の船舶に対して、横波時の押し波を入射した結果、船体と FTPW または DFTPW の浮上速度はよく一致し、波高およそ 9m の場合でも安全に係留でき、FTPW あるいは DFTPW 甲板への打ち込みも発生しなかった。津波造波境界を導入した津波シミュレーションから FTPW および DFTPW は強い防災性能を有していることを示すことができた。また横波の引き波時は DFTPW と係留強化を併用することが船体の流出防止対策として有効である。
- ⑤ 本シミュレーションの一部のケースについて、使用する計算機を統一し、解析時間 300 秒間での計算時間を調査した。その結果、FTPW に係留した 10,000DWT の船舶に波高およそ 9m の流れを入射させたケース(90F9.4-10000NH-FTPW)で、最長およそ 19 日間となった。今後は、陽解法による並列処理計算の実装など、演算の高速化手法について検討する必要がある。

## 第 5 章 結論

本研究では、造船学研究室所有の MPS 法プログラムコードの改良、当該改良プログラムを使用した津波シミュレーションから、岸壁係留船舶のための津波被害予測データベースの改訂と対策を検討する際の指針となる津波防災対策データベースの構築を行った。今後さらに当該データベースを発展させ、予測される各港湾の津波被害や具体的な津波対策手法とその有効性を示すことで、港湾・海運関係者があらかじめ津波対策を検討する場合や現場運用者が津波発生時に港外退避、係留避泊などを判断する場合などに、本データベースは有用な情報源となると考えられる。以下に本研究で得られた結論をまとめる。

### 5.1 MPS 法プログラムコードの改良

以下に述べる改良によって、従来よりも高精度に岸壁係留船舶の津波シミュレーションを行うことができるプログラムコードとなった。

- ① 津波造波境界として、流入・流出境界を整備した。流入境界には、流出したゴースト粒子を再利用する処理を加えることにより、使用メモリを大幅に節約し、3 次元の大規模計算を長時間にわたってシミュレーションできるようになった。また流出境界には、流出境界近傍の粒子が初期水位を上回った場合のみ粒子を流出させる処理を加えることにより、入射波が流出境界に到達するまで、計算領域の水位を維持できるようになった。以上の津波造波境界の整備によって、より津波実波形に近い流れを造波し、3 次元による大規模計算を長時間にわたって解析可能な津波再現数値水槽を整備することができた。
- ② 線形ばね係留モデルを改良し、離散化した係留索特性曲線から線形補間により伸び率に対応する係留力を拘束条件として与える非線形係留モデルを整備した。この改良により、係留索の材質、索径、打ち方を考慮した、非線形な変位復元力特性を再現できるようになった。

### 5.2 津波被害予測データベースの改訂と従来モデルとの比較

3,000DWT, 10,000DWT の岸壁係留船舶を対象として、本研究で整備した改良モデルによる津波シミュレーションを 0 度入射, 90 度入射で行い、この結果をもとに津波被害予測データベースにおける被害判定基準を更新した。また、津波波形、係留モデルの違いが船舶の津波被害結果に与える影響を明らかにするために、従来モデルによるシミュレーションも行い、以下のような結論を得た。

- ① 改良モデルによるシミュレーション結果から、係留索破断判定のパラメータとして入射方向を加え、0 度入射の場合は津波高 2m で 10,000DWT 以下の船舶に係留索破断が発生し、90 度入射の場合は算定式から乗り揚げが発生すれば、10,000DWT 以下の船舶に係留索破断が発生と判定するように、津波被害予測データベースにおける破断判定の基準を更新した。

- ② 90 度入射の流れの検討から、水粒子の岸壁越流後は、水深が急激に小さくなるため、表層の水平最大流速がおよそ 3 倍以上増大し、フルード数による比較から、流れの性質が越流前後で大きく変わっていることがわかった。また、2 次元断面の流速ベクトルの空間分布図を作成し、場全体の流速を解析した結果、船体と岸壁間の鉛直流速が増大することがわかった。
- ③ 津波造波境界を適用したことによって、90 度入射時における岸壁への乗り揚げ後の陸域への漂流を再現できるようになった。このとき、乗り揚げ発生には波形勾配や係留索の有無、係留モデルの違いはほとんど影響しないことがわかった。0 度入射時は波高が小さい場合、線形ばねによるモデル化では破断が発生しやすく、係留索破断の被害を過大評価してしまうことがわかった。

### 5.3 津波防災対策データベースの構築

岸壁係留船舶に対して津波防災対策を検討し、その有効性についてとりまとめ、実施すべき対策を具体的に提示する津波防災対策データベースを作成した。本研究では、0 度入射に関しては係留強化、90 度入射に関しては浮体式津波対策用岸壁（FTPW）、深喫水型浮体式津波対策用岸壁（DFTPW）、係留強化による対策を検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- ① MPS 法による津波シミュレーションから、各津波高での最大係留力を計測し、係留索の特性曲線と係留点座標から算定した最大係留力と比較することで、3,000DWT、10,000DWT を対象とした、縦波に対する津波対策係留索リストを作成することができた。本リストの判定から、各津波高に対して、選定すべき係留条件を調べることができる。
- ② 最大係留力を計測したシミュレーションから、喫水が深く、また載貨重量トン数が大きい船舶の方が、水面下の投影面積が大きくなり、津波から受ける流圧力が大きくなることがわかった。従って、津波来襲時に安全な係留状態を維持するためには、喫水の深い大型船舶の方がより係留力が必要となることがわかった。
- ③ 作成した津波対策係留索リストから、超高分子量ポリエチレン系（HMPE）の高機能なホーサーの場合、一般的に使用されているポリプロピレン系（PP）のホーサーと比べて、細い索径、少ない本数で対策できるため、HMPE 系のホーサーは係留強化として、有効な津波対策となることがわかった。
- ④ 津波条件に対する各津波対策手法の有効性をまとめた結果、縦波の場合は係留強化が、横波の場合は DFTPW と係留強化の併用が有効な津波対策手法となることがわかった。

## 5.4 今後の課題

以下に、今後の課題点について列挙していく。

- ① 本検討における研究手法は、数値シミュレーションのみである。従って改良した **MPS** 法プログラムコードについて水槽実験と比較することで、その精度検証を行う必要がある。
- ② 剛体と岸壁間の摩擦および防舷材をモデル化する必要がある。特に摩擦や防舷材は船体の岸壁への乗り揚げ挙動や、乗り揚げ後の着底した状態での挙動、船体と **FTPW** の浮上速度などに影響すると考えられる。また今後、引き波にともなう海底への着底を考慮する際にも重要なモデルになる。
- ③ 本検討では、周期 10 分の初期押し波波形として、波形の立ち上がりに要する時間がおおよそ 150 秒の流れを造波した。今後はさらに長周期な押し波でも検討する必要がある。また引き波時の評価結果も津波被害予測、津波防災対策データベースにさらに反映するとともに、各港湾で津波伝播計算を実施してより実津波波形に近い模擬津波で評価する必要がある。
- ④ 本検討では岸壁係留船舶を対象としたが、今後は錨泊船、港内航行船舶などにも対象を広げ、走錨、漂流、座礁など被害項目を拡充していき、より充実した津波被害予測・津波防災対策データベースとする必要がある。
- ⑤ 本検討の **FTPW**・**DFTPW** は 10,000DWT の船舶が係留できるよう、浮体長さを 200m としたが、実際に港湾に配置して運用すると広い水域を占有することになる。また、船舶が大型化するほど、この浮体長さを長くとる必要がある。これらの問題を解決したより実現性の高い形状を検討する必要がある。
- ⑥ 計算時間について、本研究では最長でおよそ 19 日間となった。今後より大型の船舶を対象とする場合や、複数の船舶を対象とする場合、より広い水域で検討する場合など、さらに計算コストが増大することが予想される。そのため、ソルバーを並列計算と相性のよい陽解法とし、**OpenMP** による CPU を用いた並列計算、**CUDA** による GPU を用いた並列計算など、並列化処理による計算の高速化について検討する必要がある。
- ⑦ 本研究における 3 次元 **MPS** 法シミュレーションでは、計算コストの関係から初期粒子間距離 1m としたため、詳細な船体形状の再現はできていない。今後は⑥で述べた高速化手法以外に可変解像度手法を導入し船体とその周辺粒子を高解像度にしてより詳細な解析を行う必要がある。
- ⑧ 作成したデータベースを誰でも利用できるように、わかりやすい形で広く一般公開できる手法を検討する必要がある。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

東京海洋大学学術研究院海事システム工学部門准教授 増田光弘先生には、外部進学生である私を快く研究室に受け入れていただき、博士前期課程の2年間にわたり丁寧かつ熱心なご指導を直接賜りました。未曾有のコロナ禍での研究活動となりましたが、zoomによるミーティングを通して、研究の着想から、学会発表、学術論文執筆まで多くのご助言をいただくことができ非常に充実した研究生活を送ることができました。本当にありがとうございました。また本研究に限らず、練習船汐路丸や電池推進船らいちょうIを使用した実海域錨曳引実験に参加させていただき、貴重な経験を積むことができました。汐路丸では私の拙い揚投錨指揮により先生だけでなく、鹿島英之船長をはじめ汐路丸乗組員の方々に大変ご迷惑をおかけいたしました。この場をお借りしてお詫び申し上げます。不肖の弟子ではございますが、今後とも精進してまいりますのでよろしくお願いいたします。

東京海洋大学学術研究院海事システム工学部門教授 南清和先生には、お忙しいところ本論文の審査をしていただきました。また本研究を進めるにあたり様々なご助言をいただきました。心より感謝いたします。今後は造船学研究室の部屋頭として円滑な研究室の運営に努めたいと思いますので今後ともよろしくお願いいたします。

東京海洋大学学術研究院海事システム工学部門教授 田丸人意先生には、ご多忙にもかかわらず本論文の審査をしていただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

東京海洋大学学術研究院海事システム工学部門助教 笹原裕太郎先生には、MPS 法について貴重なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。今後もお世話になることが多々あるかと思います。不出来な後輩ではございますが、今後ともよろしくお願いいたします。

修士2年の中山恵介君からは研究に関して多くのアドバイス、刺激、示唆を得ることができました。また可視化プログラム Particle view について中山君が改良した機能を使わせていただきました。ありがとうございました。今後ともに研究をがんばっていきましょう。

学部4年の渡邊達哉君には、膨大なデータの整理など積極的かつ意欲的に私の研究に力を貸していただきました。渡邊君の熱心な手伝いがなければ期日までに論文を提出することは困難だったと思います。心より感謝いたします。卒業研究と乗船実習もがんばってください。

最後に、私の博士後期課程進学を応援し、愛情深く見守ってくれる両親そして祖父母に対して深い感謝の意を表して謝辞といたします。

## 参考文献

- (1) 日本海難防止協会：特集 3.11 巨大地震と大津波の教訓を伝える 海と安全, No552, 2012.
- (2) Marine Traffic: Global Ship Tracking Intelligence (参照 2019-12-5)  
<https://www.marinetraffic.com/>
- (3) 茂田 厚・村上修司・木村信介・藤田雅之・鈴木充広・新崎泰弘・石山統進・一松篤郎・南和明・高橋信介・関由貴子・濱崎翔五: 港湾の被災状況, 海洋情報部研究報告 第 49 号.
- (4) 釜石海上保安部撮影：釜石港を襲う津波映像.(参照 2021-8-1)  
釜石海上保安部撮影 釜石港を襲う津波映像 - YouTube
- (5) 第二管区海上保安本部：東日本大震災への対応~第二管区 5 年間の対応, あの日を忘れないために~, 平成 28 年 3 月.
- (6) 特集 東日本大震災 -海上保安庁の対応と今後の対策- 座礁船「シラミズ」号・「パインウェーブ」号乗組員の救助, 海上保安レポート 2012. (参照 2021-8-1)  
海上保安レポート 2012 年版 / 特集 東日本大震災 > II 大震災に立ち向かう > 1. 捜索救助等 (mlit.go.jp)
- (7) 国土交通省：船舶における津波避難対策について. (参照 2021-8-1)  
海事：船舶における津波避難対策 - 国土交通省 (mlit.go.jp)
- (8) 近畿運輸局：津波に遭遇した船の行動事例集 ～東日本大震災で津波に遭遇した船のその時の行動に学ぶ～, 2011.
- (9) 海溝型地震の長期評価, 政府 地震調査研究推進本部. (参照 2021-8-1)  
海溝型地震の長期評価 | 地震本部 (jishin.go.jp)
- (10) 首藤信夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫：津波の辞典(縮刷版), 朝倉書店, pp20-38, 2013.
- (11) 山賀進：科学の目で見る 日本列島の地震・津波・噴火の歴史, ベレ出版, 2016.
- (12) 増田光一・居駒知樹・小泉佐和子・増田光弘：港湾物流機能維持のための海域津波ハザードマップ開発に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発) Vol.67, No.2, 2011.
- (13) 日本海難防止協会：大地震及び大津波来襲時の航行安全対策に関する調査研究, 2014.
- (14) 米山治男・大垣圭一：清水港を対象とした数値計算による係留船舶への津波影響の評価, 港湾空港技術研究所資料, No1190, 2009.
- (15) 鳴原良典・北隆範・多田毅・八木宏：津波来襲時における船舶避難リスクマップの提案と東京湾への適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol.73 No.2, I\_415-I\_420, 2017.
- (16) 増田光弘・南清和・増田光一・居駒知樹：増しもやいによる岸壁係留船舶の津波防災対策に関する研究(その2), 日本船舶海洋工学会論文集 25(0), 183-190, 2017.
- (17) 増田光弘・南清和・増田光一：津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に関する研究(その3)-浮体式津波対策用岸壁の提案-, 日本航海学会論文集 第 131 巻, pp.131-138, 2014.
- (18) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について, 日本航海学会論文集, 第 127 号, pp.57-68, 2012.

- (19) Mitsuru HAYASHI, Satoshi NAKADA, Taketo ABE and Ei-ichi KOBAYASHI: Influence of Eddy to the Vessel Evacuation from Tsunami, Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, pp.801-806, 2016.7.
- (20) 海上保安庁海洋情報部：津波防災情報. (参照 2021-8-1)  
津波防災情報 | 海上保安庁 海洋情報部 (mlit.go.jp)
- (21) 高畑航：港湾内船舶の津波被害予測データベースの構築に関する研究，東京海洋大学大学院修士学位論文，2020.
- (22) 筒井千暁・増田光弘・南清和・高畑航：港湾内船舶の津波被害予測データベース構築に関する研究-岸壁係留船舶の津波被害予測 1-，日本航海学会論文集，第 144 巻，pp50-57，2021.
- (23) 増田光弘・南清和・増田光一・居駒知樹：岸壁近傍に係留された船舶の津波防災・減災対策について，日本船舶海洋工学会論文集，2013.
- (24) 飯島一博・井上俊司・岡田真三・尾崎雅彦・神田雅光・鈴木英之・高木健・前田克弥・正信聡太郎・松浦正巳：船舶海洋工学シリーズ⑫ 海洋構造物，成山堂書店，pp203 2013.
- (25) プロメテック・ソフトウェア株式会社. (参照 2021-8-1)  
プロメテック・ソフトウェア株式会社 (prometech.co.jp)
- (26) 柴田和也・越塚誠一・岡芳明・谷澤克治：粒子法による 3 次元甲板冠水解析コードの開発，日本造船学会講演会論文集(2)，神戸，November 13-14, 2003, p.59-60.
- (27) 近澤佳隆・越塚誠一・岡芳明：MPS 法を用いた液面と構造物の大変形を伴うスロッシングの数値解析，日本機械学会論文集 B 編，65 巻 637 号，1999.
- (28) 越塚誠一：計算力学レクチャーシリーズ⑤粒子法，丸善出版，2007.
- (29) 越塚誠一・柴田和也・室谷浩平：粒子法入門，丸善出版，2014.
- (30) 後藤仁志：粒子法 連続体・混相流・粒状体のための計算科学，森北出版，pp まえがきii，2018.
- (31) 笹原裕太郎・増田光弘・南清和・増田光一：係留浮体の波浪中応答解析に対する MPS 法の適用性に関する研究（第二報），日本航海学会論文集，第 129 巻，pp31-37，2013.
- (32) 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, 2011S-G5-24, 2011.5.
- (33) 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.
- (34) 安藤圭・鈴木高二郎：孤立波が直立壁に作用した際の飛沫の打ち上げ高さについて，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 73 No.2, I\_246-I251, 2017.
- (35) 上田茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究 港湾技術研究所資料，No504, p372.
- (36) 増田光弘・笹原裕太郎・南清和・増田光一：係留浮体の波浪中応答解析に対する MPS 法の適用性に関する研究，日本航海学会論文集，Vol.127, pp51~56, 2012.9.
- (37) 藤田勝久：振動工学 新装版 振動の基礎から実用解析入門まで，森北出版，2017.
- (38) 佐藤崇：津波による橋梁への作用力に関する実験的研究，九州工業大学大学院博士論文，2017.
- (39) 中城拓也・幸左賢二・佐藤崇：久慈港における津波特性の評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 72, No.2, I\_1033-I\_1038, 2016.
- (40) 高橋宏直・後藤文子・安部智久：統計解析による船舶諸元に関する研究 -船舶の主要諸元の計画基準(案)-，国土技術政策総合研究所研究報告，No.28, 125p, 2006.

- (41) 寺内潔・吉田行秀：船舶の主要寸法と力学的諸量の関係，港湾技研資料，No348，115p，1980.
- (42) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（中巻）1258p，2018.
- (43) 津田宗男・大木泰憲・高山知司・東野洋司・林秀和：津波による係留船舶の動揺特性および係留施設への衝突力に関する模型実験，海洋開発論文集，第 22 巻，2006.
- (44) 中屋行雄・津田宗男・青野利夫・杉浦秀之・本多将人：港湾内に進行する津波の推定と係留船舶への影響評価の試み，海洋開発論文集，第 21 巻，2005.
- (45) 米山治男・大垣圭一・津田宗男・栗原明夫・平石哲也・青野利夫：津波が係留船舶に及ぼす影響に関する模型実験と数値計算，港湾空港技術研究所資料，No.1213，2010.
- (46) 福田功・柳生忠彦：係船柱にかかるけん引力について，港湾空港技術研究所資料，No.427，1982.
- (47) 東京製綱繊維ロープ株式会社 合成繊維ロープ-総合カタログ- (参照 2021-8-1)  
製品を探す | 東京製綱繊維ロープ株式会社 (fiber-tokyorope.jp)
- (48) 田端竹千穂・田所篤博・山口豊・高橋伸一・白石悟・石見剛・永松宏一：長周期波共存場における船舶動揺の軽減に資する係留対策，海洋開発論文集，Vol. 12，1996.
- (49) 白石悟：動揺計算による係留船舶の長周期波荷役限界波高の評価，土木学会北海道支部 論文報告集 第 64 号，2007.
- (50) 米山治男：係船柱に作用する船舶の牽引力に関する検討，港湾空港技術研究所資料，No.1341，2018.
- (51) 久保雅義・小林英一・水井真治・榊原繁樹：大規模津波発生時に津波が係留船舶へ及ぼす影響について，地域安全学会，第 14 回，2004.
- (52) 中山恵介・増田光弘・南清和：深喫水型浮体式津波対策用岸壁の形状が 防災性能に与える影響に関する基礎的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 32 号，2021.
- (53) 東京製綱繊維ロープ株式会社 エースライン SUHD026B. (参照 2021-8-1)  
製品を探す | 東京製綱繊維ロープ株式会社 (fiber-tokyorope.jp)
- (54) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について，日本航海学会論文集，第 127 号，pp.57-68，2012.
- (55) 日本タンカー協会：オイルタンカーとターミナルに関する国際安全指針第 4 版，21p 1997.
- (56) 長瀬貴洋・増田光弘・南清和・高畑航：津波の引き波が岸壁係留船舶に与える影響に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，第 140 巻，pp.118-123，2019.
- (57) Mitsuhiro Masuda, Kiyokazu Minami and Koichi Masuda : A Fundamental Study on Tsunami Protection Measures for a Vessel Moored at a Wharf Considering the Backwash Influence, Proc. of OMAE'19, ASME, 96159, 2019.

# Appendix 津波対策係留索リスト

## 1 概要

本論文第 4 章で作成した，縦波の津波に対して装備すべき係留条件をまとめた津波対策係留索リストを以下に示す。対象船舶は 3,000DWT および 10,000DWT とし，係留索はポリプロピレン索（PP 索）と超高分子量ポリエチレン高機能係留索（HMPE 索）の 2 種類を採用する。また係留索の本数として，3,000DWT では 6 本，10,000DWT では 8 本を通常係留とし，増しもやいとして総本数が 20 本となるまで Head line と Stern line を各 1 本，計 2 本ずつ増し取りした本数でも設定する。本リストでは，係留条件から算定した最大係留力 $T_{cal}$ と MPS 法による津波シミュレーションから計測した最大係留力 $T_{mps}$ を比較することで安全な係留条件であるかを判定し，Table 1 に示す Drifting, Danger, Safety の 3 つの結果に区分する。ここでウインチブレーキ力を考慮して安全率は 60%とする。なお本論での津波シミュレーションの結果から喫水の深い船舶の方がより大きな流体力を受けるため，満載状態の設定で当該リストは作成している。リスト作成の詳細は本論 4.3~4.5 節を参照されたい。

Table 1 津波対策係留索リストの判定結果

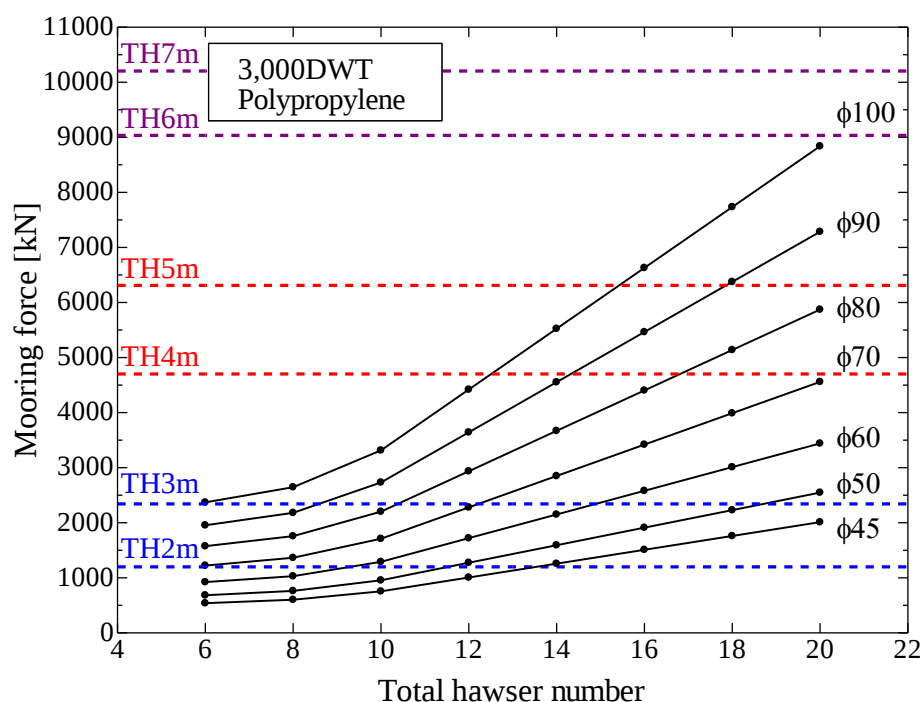
| 判定結果     | 判定基準                               | 想定される状況                                                                  |
|----------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Drifting | $T_{mps} > T_{cal}$                | 全ての係留索が破断し，港内を流出する。                                                      |
| Danger   | $T_{mps}/60\% > T_{cal} > T_{mps}$ | ウインチブレーキ力を超える係留力により，係留索の巻き出しが発生する。その結果，岸壁近傍で船体は大きく運動するため岸壁や他船と接触する危険がある。 |
| Safety   | $T_{cal} > T_{mps}/60\%$           | 船舶を安全に係留することができる。                                                        |

## 2 リストの見方について

当該リストから各津波高に対して必要な係留条件を調べることができる。各津波高に対して，安全に係留する（Safety に該当する）ために必要な，係留索の材質，索径，本数を把握できる早見表としてチャートと津波高ごとの詳細な判定結果をまとめたリストを作成した。チャートは横軸が係留索の総本数，縦軸が係留力である。各津波高(TH)における色付きの破線は $T_{mps}$ を安全率 60%で除した値，黒丸の実線が $T_{cal}$ である。この破線より上になるように，索径と本数を選択することで各津波高に対して装備すべき係留条件を把握することができる。例えば次ページの 3,000DWT・PP 索の場合，津波高 5m に対して必要な係留条件は索径 100mm，総本数 16 本以上（増しもやい 10 本以上）あるいは索径 90mm，総本数 18 本以上（増しやい 12 本以上）となる。またリストは各索径と総本数における $T_{cal}$ を色分けして記載し，各津波高に対してどの判定結果に該当するのか調べることができ，必要な係留条件を把握することができる。

### 3 津波対策係留索リスト

#### 3,000DWT・PP 索



|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Tsunami<br>height<br>2.0m | 6               | 0                | 0             | 539.5         | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7 | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0 | 1953.8 | 2166.3 | 2370.4 |
|                           | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8 | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2 | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6 | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0 | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4 | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8 | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3 | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |

\*Tmps : 719.3kN

\*Tmps / 60% : 1198.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           | 6               | 0                | 0             | 539.5         | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7 | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0 | 1953.8 | 2166.3 | 2370.4 |
| Tsunami<br>height<br>3.0m | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8 | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2 | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6 | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0 | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4 | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8 | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3 | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |

\*Tmps : 1405.0kN

\*Tmps / 60% : 2341.7kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

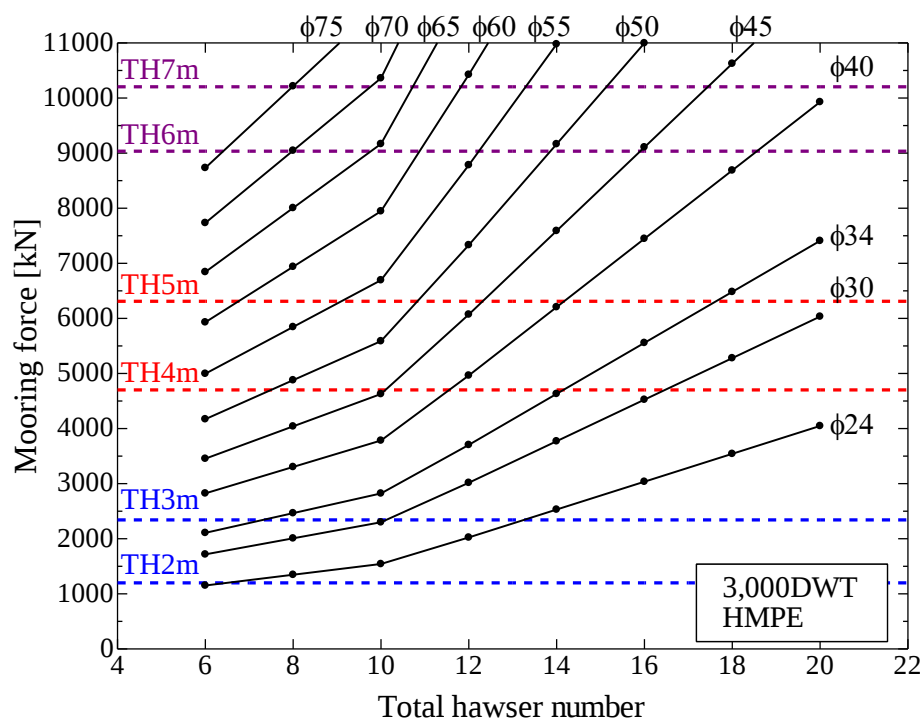
|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85                              | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |
|                           |                 |                  |               | 6             | 0      | 0      | 539.5  | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7                           | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0 |
| Tsunami<br>height<br>4.0m | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8                           | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2                           | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6                           | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0                           | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4                           | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8                           | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3                           | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |
| *Tmps : 2821.1kN          |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Drifting : Tmps > Tcal           |        |        |        |
| *Tmps / 60% : 4701.8kN    |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Danger : Tmps / 60% > Tcal >Tmps |        |        |        |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Safety : Tcal> Tmps / 60%        |        |        |        |

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85                              | Φ90    | Φ95    | Φ100   |        |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |        |
|                           |                 |                  |               | 6             | 0      | 0      | 539.5  | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7                           | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0 | 1953.8 |
| Tsunami<br>height<br>5.0m | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8                           | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |        |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2                           | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |        |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6                           | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |        |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0                           | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |        |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4                           | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |        |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8                           | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |        |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3                           | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |        |
| *Tmps : 3786.2kN          |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Drifting : Tmps > Tcal           |        |        |        |        |
| *Tmps / 60% : 6310.3kN    |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Danger : Tmps / 60% > Tcal >Tmps |        |        |        |        |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Safety : Tcal > Tmps / 60%       |        |        |        |        |

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85                              | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |
|                           | 6               | 0                | 0             | 539.5         | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7 | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0                           | 1953.8 | 2166.3 | 2370.4 |
| Tsunami<br>height<br>6.0m | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8                           | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2                           | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6                           | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0                           | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4                           | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8                           | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3                           | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |
| *Tmps : 5420.9kN          |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Drifting : Tmps > Tcal           |        |        |        |
| *Tmps / 60% : 9034.8kN    |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Danger : Tmps / 60% > Tcal >Tmps |        |        |        |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Safety : Tcal > Tmps / 60%       |        |        |        |

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85                              | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |                                  |        |        |        |
|                           | 6               | 0                | 0             | 539.5         | 683.2  | 783.2  | 922.8  | 1083.1 | 1222.7 | 1393.5 | 1574.7 | 1758.0                           | 1953.8 | 2166.3 | 2370.4 |
| Tsunami<br>height<br>7.0m | 8               | +1               | +1            | 602.0         | 762.4  | 874.0  | 1029.7 | 1208.7 | 1364.5 | 1555.1 | 1757.3 | 1961.8                           | 2180.3 | 2417.4 | 2645.2 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 754.4         | 955.3  | 1095.1 | 1290.3 | 1514.5 | 1709.7 | 1948.5 | 2201.9 | 2458.2                           | 2732.0 | 3029.1 | 3314.5 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 1005.8        | 1273.8 | 1460.2 | 1720.4 | 2019.4 | 2279.6 | 2598.0 | 2935.9 | 3277.6                           | 3642.7 | 4038.8 | 4419.4 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 1257.3        | 1592.2 | 1825.2 | 2150.5 | 2524.2 | 2849.5 | 3247.5 | 3669.9 | 4097.0                           | 4553.3 | 5048.5 | 5524.2 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 1508.7        | 1910.7 | 2190.3 | 2580.6 | 3029.1 | 3419.4 | 3897.0 | 4403.8 | 4916.4                           | 5464.0 | 6058.2 | 6629.0 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 1760.2        | 2229.1 | 2555.3 | 3010.6 | 3533.9 | 3989.3 | 4546.5 | 5137.8 | 5735.8                           | 6374.7 | 7067.9 | 7733.9 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 2011.6        | 2547.5 | 2920.4 | 3440.7 | 4038.8 | 4559.2 | 5196.1 | 5871.8 | 6555.3                           | 7285.3 | 8077.6 | 8838.7 |
| *Tmps : 6122.3kN          |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Drifting : Tmps > Tcal           |        |        |        |
| *Tmps / 60% : 10203.8kN   |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Danger : Tmps / 60% > Tcal >Tmps |        |        |        |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |        |        |        |        | Safety : Tcal > Tmps / 60%       |        |        |        |

### 3,000DWT・HMPE 索



|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>2.0m | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9 | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4  | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1  |
|                           | 8               | +1               | +1            | 1346.9        | 2007.6 | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0  | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 1542.5        | 2299.2 | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5  | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 2023.8        | 3016.6 | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3 | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 2529.8        | 3770.8 | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4 | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 3035.7        | 4524.9 | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5 | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 3541.7        | 5279.1 | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6 | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 4047.6        | 6033.3 | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6 | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |

\*Tmps : 719.3kN

\*Tmps / 60% : 1198.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>3.0m | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9 | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4  | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1  |
|                           | 8               | +1               | +1            | 1346.9        | 2007.6 | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0  | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 1542.5        | 2299.2 | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5  | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 2023.8        | 3016.6 | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3 | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 2529.8        | 3770.8 | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4 | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 3035.7        | 4524.9 | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5 | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 3541.7        | 5279.1 | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6 | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 4047.6        | 6033.3 | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6 | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |

\*Tmps : 1405.0kN

\*Tmps / 60% : 2341.7kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>4.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40     | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80    |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|                           | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9  | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4  | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1 |
| 8                         | +1              | +1               | 1346.9        | 2007.6        | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0  | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |        |
| 10                        | +2              | +2               | 1542.5        | 2299.2        | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5  | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |        |
| 12                        | +3              | +3               | 2023.8        | 3016.6        | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3 | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |        |
| 14                        | +4              | +4               | 2529.8        | 3770.8        | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4 | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |        |
| 16                        | +5              | +5               | 3035.7        | 4524.9        | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5 | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |        |
| 18                        | +6              | +6               | 3541.7        | 5279.1        | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6 | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |        |
| 20                        | +7              | +7               | 4047.6        | 6033.3        | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6 | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |        |

\*Tmps : 2821.1kN

\*Tmps / 60% : 4701.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>5.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40     | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80    |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|                           | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9  | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4  | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1 |
| 8                         | +1              | +1               | 1346.9        | 2007.6        | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0  | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |        |
| 10                        | +2              | +2               | 1542.5        | 2299.2        | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5  | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |        |
| 12                        | +3              | +3               | 2023.8        | 3016.6        | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3 | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |        |
| 14                        | +4              | +4               | 2529.8        | 3770.8        | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4 | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |        |
| 16                        | +5              | +5               | 3035.7        | 4524.9        | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5 | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |        |
| 18                        | +6              | +6               | 3541.7        | 5279.1        | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6 | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |        |
| 20                        | +7              | +7               | 4047.6        | 6033.3        | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6 | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |        |

\*Tmps : 3786.2kN

\*Tmps / 60% : 6310.3kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 |                  |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>6.0m | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9 | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4  | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1  |
|                           | 8               | +1               | +1            | 1346.9        | 2007.6 | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0  | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 1542.5        | 2299.2 | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5  | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 2023.8        | 3016.6 | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3 | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 2529.8        | 3770.8 | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4 | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 3035.7        | 4524.9 | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5 | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 3541.7        | 5279.1 | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6 | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 4047.6        | 6033.3 | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6 | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |

\*Tmps : 5420.9kN

\*Tmps / 60% : 9034.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>7.0m | 6               | 0                | 0             | 1151.3        | 1716.0 | 2107.0 | 2823.9 | 3453.8  | 4170.6  | 4996.1  | 5930.1  | 6842.4  | 7733.0  | 8732.2  | 9840.1  |
|                           | 8               | +1               | +1            | 1346.9        | 2007.6 | 2465.0 | 3303.6 | 4040.6  | 4879.2  | 5844.9  | 6937.7  | 8005.0  | 9046.9  | 10215.9 | 11511.9 |
|                           | 10              | +2               | +2            | 1542.5        | 2299.2 | 2823.0 | 3783.4 | 4627.4  | 5587.8  | 6693.8  | 7945.2  | 9167.5  | 10360.8 | 11699.5 | 13183.8 |
|                           | 12              | +3               | +3            | 2023.8        | 3016.6 | 3704.0 | 4964.1 | 6071.4  | 7331.5  | 8782.6  | 10424.5 | 12028.3 | 13593.9 | 15350.4 | 17297.9 |
|                           | 14              | +4               | +4            | 2529.8        | 3770.8 | 4629.9 | 6205.1 | 7589.3  | 9164.4  | 10978.2 | 13030.7 | 15035.4 | 16992.4 | 19188.0 | 21622.3 |
|                           | 16              | +5               | +5            | 3035.7        | 4524.9 | 5555.9 | 7446.1 | 9107.2  | 10997.3 | 13173.9 | 15636.8 | 18042.5 | 20390.9 | 23025.6 | 25946.8 |
|                           | 18              | +6               | +6            | 3541.7        | 5279.1 | 6481.9 | 8687.1 | 10625.0 | 12830.2 | 15369.5 | 18243.0 | 21049.6 | 23789.3 | 26863.2 | 30271.3 |
|                           | 20              | +7               | +7            | 4047.6        | 6033.3 | 7407.9 | 9928.1 | 12142.9 | 14663.1 | 17565.2 | 20849.1 | 24056.6 | 27187.8 | 30700.9 | 34595.7 |

\*Tmps : 6122.3kN

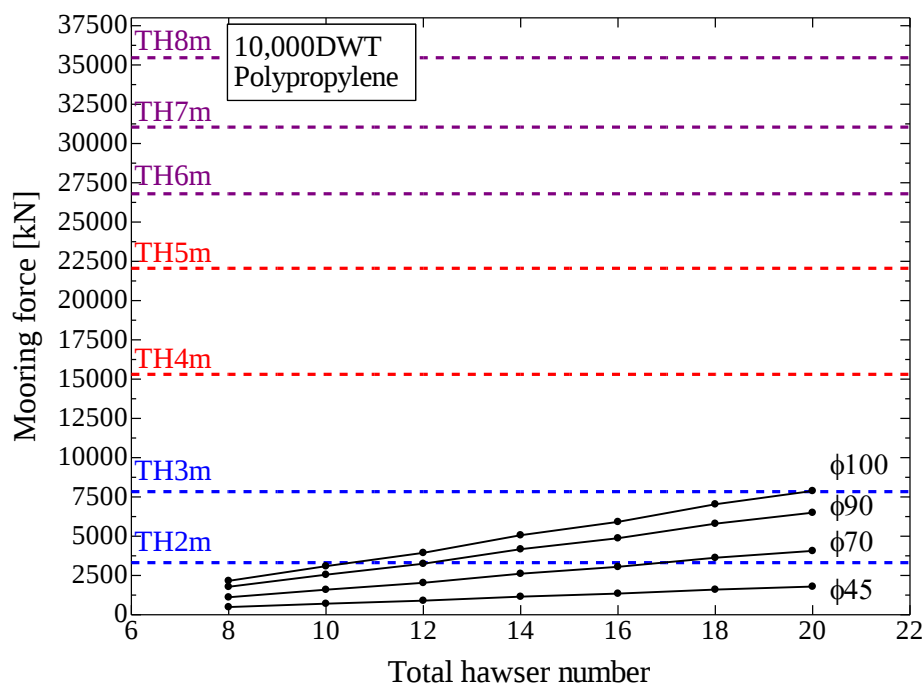
\*Tmps / 60% : 10203.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

# 10,000DWT・PP 索



| Tsunami height 2.0m | Total hawser | Preventer hawser |            | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------|--------------|------------------|------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     |              | Head line        | Stern line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                     |              |                  |            | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                     | 8            | 0                | 0          | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
|                     | 10           | +1               | +1         | 704.1         | 891.7  | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |
|                     | 12           | +2               | +2         | 897.0         | 1136.0 | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |
|                     | 14           | +3               | +3         | 1152.6        | 1459.7 | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |
|                     | 16           | +4               | +4         | 1345.6        | 1704.0 | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |
|                     | 18           | +5               | +5         | 1601.1        | 2027.7 | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |
|                     | 20           | +6               | +6         | 1794.1        | 2272.0 | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |

\*Tmps : 1989.2kN

\*Tmps / 60% : 3315.3kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami height 3.0m | Total hawser | Preventer hawser |            | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------|--------------|------------------|------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     |              | Head line        | Stern line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                     |              |                  |            | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                     | 8            | 0                | 0          | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
|                     | 10           | +1               | +1         | 704.1         | 891.7  | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |
|                     | 12           | +2               | +2         | 897.0         | 1136.0 | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |
|                     | 14           | +3               | +3         | 1152.6        | 1459.7 | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |
|                     | 16           | +4               | +4         | 1345.6        | 1704.0 | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |
|                     | 18           | +5               | +5         | 1601.1        | 2027.7 | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |
|                     | 20           | +6               | +6         | 1794.1        | 2272.0 | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |

\*Tmps : 4701.6kN

\*Tmps / 60% : 7836.0kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>4.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           | 8               | 0                | 0             | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
| 10                        | +1              | +1               | 704.1         | 891.7         | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |        |
| 12                        | +2              | +2               | 897.0         | 1136.0        | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |        |
| 14                        | +3              | +3               | 1152.6        | 1459.7        | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |        |
| 16                        | +4              | +4               | 1345.6        | 1704.0        | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |        |
| 18                        | +5              | +5               | 1601.1        | 2027.7        | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |        |
| 20                        | +6              | +6               | 1794.1        | 2272.0        | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |        |

\*Tmps : 9181.9kN

\*Tmps / 60% : 15303.2kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>5.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           | 8               | 0                | 0             | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
|                           | 10              | +1               | +1            | 704.1         | 891.7  | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |
| 12                        | +2              | +2               | 897.0         | 1136.0        | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |        |
| 14                        | +3              | +3               | 1152.6        | 1459.7        | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |        |
| 16                        | +4              | +4               | 1345.6        | 1704.0        | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |        |
| 18                        | +5              | +5               | 1601.1        | 2027.7        | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |        |
| 20                        | +6              | +6               | 1794.1        | 2272.0        | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |        |

\*Tmps : 13233.5kN

\*Tmps / 60% : 22055.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>6.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           | 8               | 0                | 0             | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
| 10                        | +1              | +1               | 704.1         | 891.7         | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |        |
| 12                        | +2              | +2               | 897.0         | 1136.0        | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |        |
| 14                        | +3              | +3               | 1152.6        | 1459.7        | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |        |
| 16                        | +4              | +4               | 1345.6        | 1704.0        | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |        |
| 18                        | +5              | +5               | 1601.1        | 2027.7        | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |        |
| 20                        | +6              | +6               | 1794.1        | 2272.0        | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |        |

\*Tmps : 16080.1kN

\*Tmps / 60% : 26800.2kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>7.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           | 8               | 0                | 0             | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
| 10                        | +1              | +1               | 704.1         | 891.7         | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |        |
| 12                        | +2              | +2               | 897.0         | 1136.0        | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |        |
| 14                        | +3              | +3               | 1152.6        | 1459.7        | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |        |
| 16                        | +4              | +4               | 1345.6        | 1704.0        | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |        |
| 18                        | +5              | +5               | 1601.1        | 2027.7        | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |        |
| 20                        | +6              | +6               | 1794.1        | 2272.0        | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |        |

\*Tmps : 18626.2kN

\*Tmps / 60% : 31043.7kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>8.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ45           | Φ50    | Φ55    | Φ60    | Φ65    | Φ70    | Φ75    | Φ80    | Φ85    | Φ90    | Φ95    | Φ100   |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                           | 8               | 0                | 0             | 491.2         | 622.0  | 713.0  | 840.1  | 986.1  | 1113.2 | 1268.7 | 1433.6 | 1600.5 | 1778.8 | 1972.2 | 2158.0 |
| 10                        | +1              | +1               | 704.1         | 891.7         | 1022.2 | 1204.3 | 1413.6 | 1595.8 | 1818.7 | 2055.2 | 2294.5 | 2550.0 | 2827.3 | 3093.7 |        |
| 12                        | +2              | +2               | 897.0         | 1136.0        | 1302.3 | 1534.3 | 1801.0 | 2033.1 | 2317.1 | 2618.4 | 2923.2 | 3248.7 | 3602.0 | 3941.4 |        |
| 14                        | +3              | +3               | 1152.6        | 1459.7        | 1673.3 | 1971.5 | 2314.1 | 2612.3 | 2977.2 | 3364.4 | 3756.0 | 4174.4 | 4628.3 | 5064.4 |        |
| 16                        | +4              | +4               | 1345.6        | 1704.0        | 1953.4 | 2301.5 | 2701.5 | 3049.6 | 3475.6 | 3927.6 | 4384.8 | 4873.1 | 5403.0 | 5912.2 |        |
| 18                        | +5              | +5               | 1601.1        | 2027.7        | 2324.4 | 2738.6 | 3214.7 | 3628.8 | 4135.8 | 4673.6 | 5217.6 | 5798.7 | 6429.3 | 7035.1 |        |
| 20                        | +6              | +6               | 1794.1        | 2272.0        | 2604.5 | 3068.6 | 3602.0 | 4066.1 | 4634.1 | 5236.8 | 5846.3 | 6497.5 | 7204.0 | 7882.9 |        |

\*Tmps : 21276.9kN

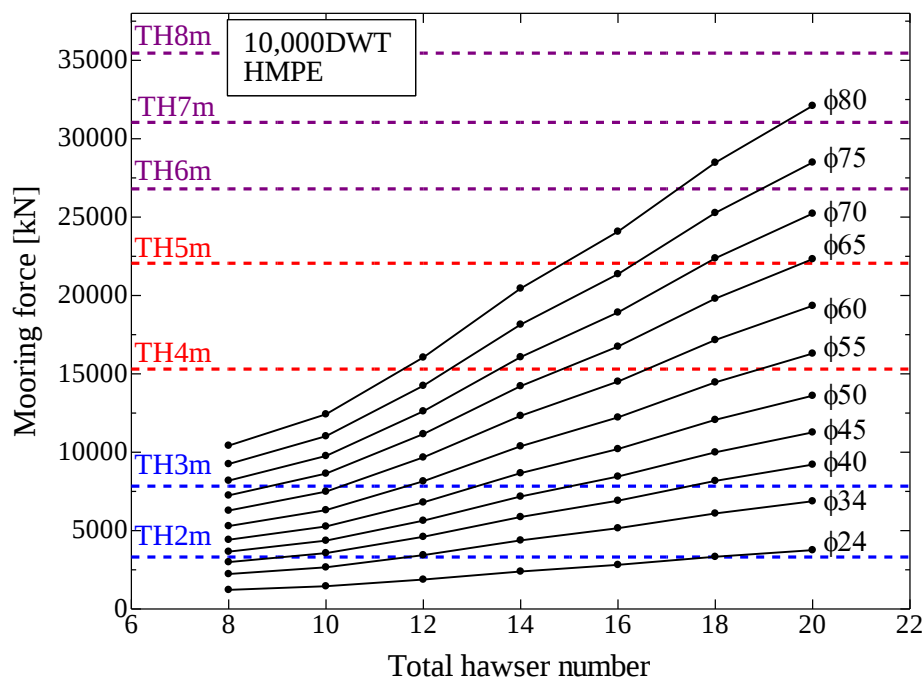
\*Tmps / 60% : 35461.5kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

# 10,000DWT・HMPE 索



| Tsunami<br>height<br>2.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40     | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                           | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9  | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
| 10                        | +1              | +1               | 1453.6        | 2166.7        | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |         |
| 12                        | +2              | +2               | 1877.9        | 2799.1        | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |         |
| 14                        | +3              | +3               | 2392.6        | 3566.3        | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |         |
| 16                        | +4              | +4               | 2816.8        | 4198.7        | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |         |
| 18                        | +5              | +5               | 3331.5        | 4965.9        | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |         |
| 20                        | +6              | +6               | 3755.8        | 5598.3        | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |         |

\*Tmps : 1989.2kN

\*Tmps / 60% : 3315.3kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

| Tsunami<br>height<br>3.0m | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40     | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 |                  |               | Tcal [kN]     |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                           | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9  | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
| 10                        | +1              | +1               | 1453.6        | 2166.7        | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |         |
| 12                        | +2              | +2               | 1877.9        | 2799.1        | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |         |
| 14                        | +3              | +3               | 2392.6        | 3566.3        | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |         |
| 16                        | +4              | +4               | 2816.8        | 4198.7        | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |         |
| 18                        | +5              | +5               | 3331.5        | 4965.9        | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |         |
| 20                        | +6              | +6               | 3755.8        | 5598.3        | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |         |

\*Tmps : 4701.6kN

\*Tmps / 60% : 7836.0kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>4.0m | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9 | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
|                           | 10              | +1               | +1            | 1453.6        | 2166.7 | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |
|                           | 12              | +2               | +2            | 1877.9        | 2799.1 | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |
|                           | 14              | +3               | +3            | 2392.6        | 3566.3 | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |
|                           | 16              | +4               | +4            | 2816.8        | 4198.7 | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |
|                           | 18              | +5               | +5            | 3331.5        | 4965.9 | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |
|                           | 20              | +6               | +6            | 3755.8        | 5598.3 | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |

\*Tmps : 9181.9kN

\*Tmps / 60% : 15303.2kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>5.0m | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9 | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
|                           | 10              | +1               | +1            | 1453.6        | 2166.7 | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |
|                           | 12              | +2               | +2            | 1877.9        | 2799.1 | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |
|                           | 14              | +3               | +3            | 2392.6        | 3566.3 | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |
|                           | 16              | +4               | +4            | 2816.8        | 4198.7 | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |
|                           | 18              | +5               | +5            | 3331.5        | 4965.9 | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |
|                           | 20              | +6               | +6            | 3755.8        | 5598.3 | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |

\*Tmps : 13233.5kN

\*Tmps / 60% : 22055.8kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>6.0m | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9 | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
|                           | 10              | +1               | +1            | 1453.6        | 2166.7 | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |
|                           | 12              | +2               | +2            | 1877.9        | 2799.1 | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |
|                           | 14              | +3               | +3            | 2392.6        | 3566.3 | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |
|                           | 16              | +4               | +4            | 2816.8        | 4198.7 | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |
|                           | 18              | +5               | +5            | 3331.5        | 4965.9 | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |
|                           | 20              | +6               | +6            | 3755.8        | 5598.3 | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |

\*Tmps : 16080.1kN

\*Tmps / 60% : 26800.2kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>7.0m | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9 | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
|                           | 10              | +1               | +1            | 1453.6        | 2166.7 | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |
|                           | 12              | +2               | +2            | 1877.9        | 2799.1 | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |
|                           | 14              | +3               | +3            | 2392.6        | 3566.3 | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |
|                           | 16              | +4               | +4            | 2816.8        | 4198.7 | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |
|                           | 18              | +5               | +5            | 3331.5        | 4965.9 | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |
|                           | 20              | +6               | +6            | 3755.8        | 5598.3 | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |

\*Tmps : 18626.2kN

\*Tmps / 60% : 31043.7kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%

|                           | Total<br>hawser | Preventer hawser |               | Diameter [mm] |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |                 | Head<br>line     | Stern<br>line | Φ24           | Φ30    | Φ34    | Φ40    | Φ45     | Φ50     | Φ55     | Φ60     | Φ65     | Φ70     | Φ75     | Φ80     |
|                           |                 | Tcal [kN]        |               |               |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Tsunami<br>height<br>8.0m | 8               | 0                | 0             | 1219.4        | 1817.5 | 2231.6 | 2990.9 | 3658.1  | 4417.3  | 5291.5  | 6280.8  | 7247.1  | 8190.4  | 9248.7  | 10422.0 |
|                           | 10              | +1               | +1            | 1453.6        | 2166.7 | 2660.4 | 3565.5 | 4360.9  | 5266.0  | 6308.2  | 7487.6  | 8639.5  | 9764.0  | 11025.7 | 12424.4 |
|                           | 12              | +2               | +2            | 1877.9        | 2799.1 | 3436.9 | 4606.2 | 5633.7  | 6803.0  | 8149.4  | 9672.9  | 11161.1 | 12613.8 | 14243.7 | 16050.7 |
|                           | 14              | +3               | +3            | 2392.6        | 3566.3 | 4378.9 | 5868.6 | 7177.7  | 8667.5  | 10382.9 | 12324.1 | 14220.1 | 16070.9 | 18147.5 | 20449.8 |
|                           | 16              | +4               | +4            | 2816.8        | 4198.7 | 5155.4 | 6909.2 | 8450.5  | 10204.4 | 12224.1 | 14509.4 | 16741.6 | 18920.7 | 21365.5 | 24076.1 |
|                           | 18              | +5               | +5            | 3331.5        | 4965.9 | 6097.3 | 8171.7 | 9994.6  | 12068.9 | 14457.6 | 17160.5 | 19800.6 | 22377.8 | 25269.3 | 28475.2 |
|                           | 20              | +6               | +6            | 3755.8        | 5598.3 | 6873.8 | 9212.3 | 11267.4 | 13605.9 | 16298.7 | 19345.9 | 22322.2 | 25227.6 | 28487.4 | 32101.4 |

\*Tmps : 21276.9kN

\*Tmps / 60% : 35461.5kN

Drifting : Tmps > Tcal

Danger : Tmps / 60% > Tcal > Tmps

Safety : Tcal > Tmps / 60%