

短波頂不規則波中での時間領域船体運動計算

黒田 貴子*

Time-domain Simulation for Ship Motions in Short-crested Irregular Waves

by

KURODA Takako

Abstract

Simulations in a time-domain are necessary for evaluating the nonlinear phenomena of ship motions in irregular waves. In this study, a time-domain simulation and a model test for ship motions in short-crested irregular waves were carried out for 3 hours in full scale. In this simulation, the ship motion is in 6 degrees of freedom, and hydrodynamic force is calculated using a 3-dimensional source distribution method considering memory effect. A container ship was used to simulate ship motions without ship speed in short-crested irregular waves where the principal direction is the beam wave. The model test was carried out in the Actual Sea Model Basin at the National Maritime Research Institute to validate the simulation method. The comparison between the simulation results and the model tests indicated that the time-domain simulation accurately simulated roll motion of the ship without ship speed in short-crested irregular beam waves.

* 流体性能評価系耐航性能研究グループ

原稿受付 令和2年4月20日

審査日 令和2年7月 1日

目次

1. まえがき.....	24
2. 時間領域での短波頂不規則波中船体運動計算法.....	24
2.1 時間領域船体運動計算法の概要.....	25
2.2 供試船.....	27
2.3 波条件と計算条件.....	27
2.3.1 波条件.....	27
2.3.2 計算時間.....	27
2.3.3 波周波数分割数.....	28
3. 模型実験.....	28
3.1 模型実験概要.....	28
3.2 自由横揺れ試験.....	29
4. 時間領域計算結果と実験結果の比較.....	29
5. まとめ.....	30
参考文献.....	31

1. まえがき

船舶の海難事故を再現し、原因解明をするには、現場海域の波浪場を表現した短波頂不規則波を用いて非線形項を考慮した時間領域での計算を行い、現象の解析を行う必要がある。また、IMO では第二世代非損傷時復原性基準¹⁾として停止時横波中での危険事象である「デッドシップ状態」と「過大加速度」、航走時に発生する「復原力喪失」、「パラメトリック横揺れ」、「ブローチング」の5つの危険事象を三段階で評価する暫定ガイドラインを最終化した²⁾。この基準には時間領域での長時間の不規則波中船体運動計算と模型実験による評価も含まれており、時間領域での短波頂不規則波中船体運動計算法の必要性が高まっている。時間領域計算では運動によって与えられた攪乱が時空間を伝搬する影響を考慮する必要があり、計算時間が長くなるとその影響が大きくなるため、メモリー影響を考慮する必要がある。また、短波頂不規則波中の横運動を扱った時間領域計算と模型実験に関する研究は少なく、精度が検証された計算法を示す必要がある。

本研究はメモリー影響を考慮した短波頂不規則波中での時間領域船体運動計算法を構築してコンテナ船を対象に計算し、模型実験と比較して計算精度を確認した^{2),3)}。本計算法での流体力は3次元特異点分布法で求め、横揺れ減衰力は模型での自由横揺れ試験で求めた横揺れ減衰係数を用いた。計算条件として短い計算時間で安定した解を得るために、波周波数分割数を抑え、必要な計算時間を検討した。コンテナ船を供試船として横波を主方向とする短波頂不規則波中前進速度無しの状態での3時間相当の船体運動計算を、波の初期位相と方位角初期値を変えて繰り返し実施した。計算結果と比較のために、計算条件と同じ状態での模型実験を海上技術安全研究の実海域再現水槽で実施して計算結果と比較した結果、計算と実験での横揺れの1/3最大平均値の95%信頼区間が重なっており、本計算法の精度が十分であることを確認した。

2. 時間領域での短波頂不規則波中船体運動計算法

短波頂不規則波中前進速度無しの状態での時間領域船体運動計算を実施した。以下に計算法の概要と計算条件について述べる。

2.1 時間領域船体運動計算法の概要

本計算法の座標系を図1に示す。扱う運動軸は6自由度、流体力は3次元特異点分布法⁴⁾で解いており、メモリー影響を考慮している。横揺れ減衰力は模型実験での自由横揺れ試験で得られた横揺れ減衰係数を使用した。船の前後左右に与えるばね定数は実験時と同等の値を設定した。

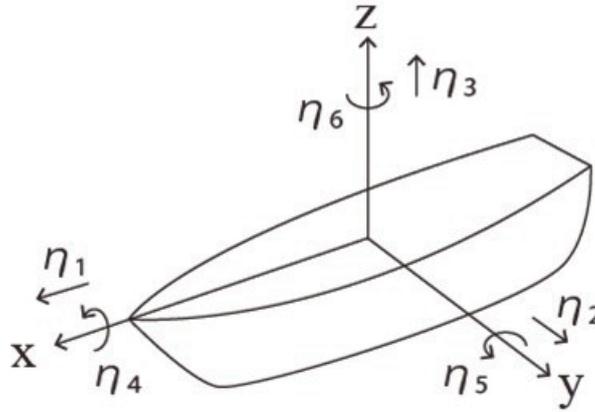


図1 時間領域計算での船体運動の座標系

時間領域における運動方程式はインパルス応答に対するポテンシャルより次の形で求められる。

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + m_{kj}) \ddot{\eta}_j + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{\eta}_j(\tau) d\tau + f_{kj} \right\} = E_k(t) \tag{1}$$

$k = 1 \sim 6$

ここで η_i は各運動モードの動揺、 τ は計算刻みであり、 $M_{kj}, m_{kj}, K_{kj}, f_{kj}, E_k(t)$ は以下のとおりである。

- M_{kj} : 質量
- m_{kj} : 時間領域における付加質量
- K_{kj} : メモリー影響関数
- f_{kj} : 静水圧による復原力
- $E_k(t)$: 外力 (波強制力, 漂流力)

(1) 式は慣性項を左辺に、非慣性項を右辺に整理することにより、次式のように一般の運動方程式で表される。

$$\sum_{j=1}^6 (M_{kj} + m_{kj}) \ddot{\eta}_j = F_k(t) \tag{3}$$

$$F_k(t) = F_k^R(t) + F_k^D(t) + F_k^{F-K}(t) + F_k^{REST}(t) \tag{4}$$

(3) 式の右辺の項は、(4) 式のように radiation 流体力 $F_k^R(t)$, diffraction 流体力 $F_k^D(t)$, Froude-Krylov 力 $F_k^{F-K}(t)$, 復原力 $F_k^{REST}(t)$ のそれぞれの項の和である。

(1) 式を時間領域で解くために、Newmark- β 法⁵⁾を用いる。Newmark- β 法によれば、ある時刻における j モードの変位を η_j^n とおくと、次のステップの変位、速度は次式で表される。

$$\eta_j^{n+1} = \eta_j^n + \Delta t \dot{\eta}_j^n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\eta}_j^n + \beta \Delta t^2 (\ddot{\eta}_j^{n+1} - \ddot{\eta}_j^n) \quad (5)$$

$$\dot{\eta}_j^{n+1} = \dot{\eta}_j^n + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\eta}_j^{n+1} + \ddot{\eta}_j^n) \quad (6)$$

(3) 式に対して、(5) 式、(6) 式を用いて η_j^{n+1} に対する収束計算を行うことにより、時刻 t における値から時刻 $t + \Delta t$ における値を求めることができ、(3)式は時間領域で解ける。なお、 β は無条件安定の $\beta = 1/4$ を用いる。

また、収束判定は繰り返し計算中の加速度を $\ddot{\eta}_i^{n+1}$ に対して、以下の条件で行っている。

$$\frac{|\ddot{\eta}_j^{n+1} - \ddot{\eta}_j^n|}{|\ddot{\eta}_j^{n+1}|} \leq \frac{1}{100} \quad (7)$$

流体力のメモリー影響を考慮した各運動モードの radiation 流体力 $F_k^R(t)$ は、運動を η_i とすると以下の式より得られる。

$$F_k^R(t) = \sum_{j=1}^6 \left\{ -m_{kj}(\infty) \ddot{\eta}_j - \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{\eta}_j(\tau) d\tau \right\} \quad (8)$$

ただし、横揺れ $k = 4$ の場合は横揺れ減衰力を自由横揺れ試験結果で得られた値を用いるため次式とした。

$$\begin{aligned} F_4^R(t) = & \sum_{j=1}^6 \left\{ -m_{kj}(\infty) \ddot{\eta}_j \right\} - \int_{-\infty}^t K_{42}(t-\tau) \dot{\eta}_2(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^t K_{43}(t-\tau) \dot{\eta}_3(\tau) d\tau \\ & - \int_{-\infty}^t K_{45}(t-\tau) \dot{\eta}_5(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^t K_{46}(t-\tau) \dot{\eta}_6(\tau) d\tau \\ & - \{B_E(\dot{\eta}_4) - B_{44}(\dot{\eta}_4) \dot{\eta}_4\} - \int_{-\infty}^t K_{44}(t-\tau) \dot{\eta}_4(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (9)$$

ここで用いる付加質量 m_{kj} 、造波減衰力係数 b_{kj} は、線形理論に基づき計算しメモリー影響関数 $K_{kj}(t)$ は次式で定義する⁶⁾。

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (10)$$

(9) 式の横揺れ減衰力項については、自由横揺れ試験から求めた $B_E(\dot{\eta}_4)$ を用いた。

$$B_E(\dot{\eta}_4) = 2\mu\dot{\eta}_4 + \beta\dot{\eta}_4|\dot{\eta}_4| \quad (11)$$

(9) 式の右辺第 6 項で $B_E(\dot{\eta}_4)$ から横揺れ造波減衰力を差し引き、さらに第 7 項で流体力のメモリー影響を考慮した造波減衰力を与えている。

2.2 供試船

本実験の対象船は全長 $L_{OA}336.19\text{m}$ のコンテナ船である。図2に一般配置図を、表1に主要目と計算状態を示す。模型船による自由横揺れ試験の結果は3.2節の表2に示す。

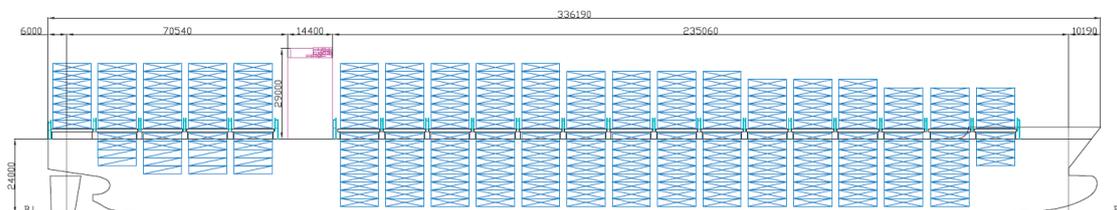


図2 供試船一般配置図

表1 供試船の主要目と計算状態

Length overall: L_{OA}	336.190 m
Length between perpendiculars: L_{pp}	320.000 m
Breadth: B	42.800 m
Draught at A.P.	9.073 m
Draught at midship	8.078 m
Draught at F.P.	7.083 m
Metacentric height: GM	8.540 m
Breadth of bilge keel	0.600 m
Length of bilge keel	96.000 m
Longitudinal distance of bridge from A.P.	77.700 m
Height of bridge deck above base line	50.000 m

2.3 波条件と計算条件

2.3.1 波条件

時間領域での船体運動計算で扱う波は短波頂不規則波とし、周波数スペクトルは(13)式に示す ITTC 型⁷⁾を、方向スペクトルは横波 90deg. を主方向とした COS^4 分布で与えた。有義波高 $H_{1/3}$ は 5.5m 、平均波周期 T_{01} は 9.5s とした。波形表現はシングルサンメンション法 (SS 方式) とし、初期位相と方向角初期値は乱数を与えて設定した。周波数スペクトルによる周波数 ($f = 0.0\sim 3.0\text{Hz}$) の分割はエネルギー等分割を行い、周波数分割数は計算時間を抑えるために安定した統計値が得られる最小分割数とした。波周波数分割数を検討するため 50, 150, 250, 350 分割で試算を行った。検討結果は2.3.3節に示す。

$$S(\omega) = \frac{0.11}{2\pi} H_{1/3}^2 T_{01} \left(\frac{T_{01}}{2\pi} \omega \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_{01}}{2\pi} \omega \right)^{-4} \right\} \quad (12)$$

2.3.2 計算時間

必要な計算時間 (総ステップ数) を検討するために、計算時間による統計解析結果の相対誤差を調べた。波周波数 150 分割 SS 方式で計算刻み 0.01sec. で計算ステップ数 1,000,000 ステップ (10,000 秒 \Rightarrow 約 2.8 時間) まで計算した。横揺れの $1/3$ 最大平均値と標準偏差の計算結果を 100,000 ステップ (1,000 秒 \Rightarrow 約 17 分) ずつ増やして統計解析した結果を最も長い計算時間の 1,000,000 ステップでの場合と比較し、その比を相対誤差として図3に示す。

横揺れと横加速度の統計値の相対誤差は 300,000 ステップ以上で 2%以内, 700,000 ステップ (1.94 時間) 以上計算すれば相対誤差 1%以内に入る。よって, 今回の時間領域計算は 3 時間分の計算を基準とする。

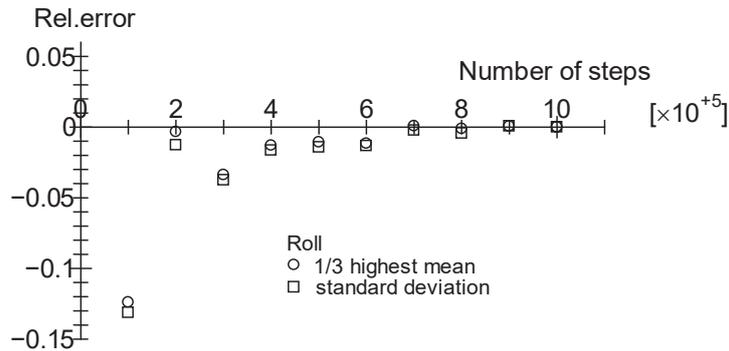


図3 計算時間に伴う横揺れの 1/3 最大平均値と標準偏差の相対誤差の変化

2.3.3 波周波数分割数

波周波数の分割数を 50, 150, 250, 350 と変化させて刻み 0.01sec., 1,000,000 ステップ (約 3 時間相当) の計算を行った。周波数分割数に対する横揺れの両振幅分布統計値と極大値・極小値分布統計値を図 4 に示す。波周波数分割数 50 での横揺れの標準偏差は平均値と比べると差が大きいが, 波周波数分割数 150 以降はばらつきが比較的小さい。この結果から今回の時間領域計算では波周波数の分割数を 150 分割とする。

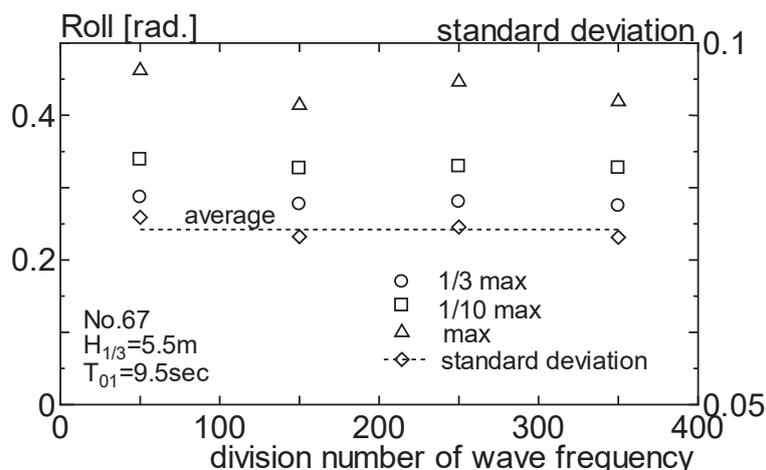


図4 波周波数分割数に伴う横揺れ両振幅分布統計値の変化

3. 模型実験

時間領域での短波頂不規則波中船体運動の計算結果と比較するために, 海上技術安全研究所の実海域再現水槽で模型実験を実施した。以下に模型実験概要と実験条件について述べる。

3.1 模型実験概要

横波を主方向とする短波頂不規則波中前進速度無しの状態での船体運動と横加速度の計測と自由横揺れ試験を ITTC 7.5-02-07-04⁸⁾に基づいて実施した。模型船の全長 L_{OA} は 3.5m, 縮尺 1/96.054 である (写真 1)。模型船の状態は計算時と同じ状態とした。縦慣動半径は 0.25L である。船体運動は 6 軸を自由とし, 前後揺れ, 左右揺れ, 船首揺れには模型船の計測位置を保持するために変位に比例する復原力をばね定数 (模型スケールでのばね定: 前後揺れ=402 N/m, 左右揺れ=549 N/m, 船首揺れ=0.467 N·m/deg) で与えた。

使用した波の有義波高と波周期は計算時と同様とし、有義波高 H_s は5.5m相当、平均波周期 T_{01} は9.5s相当である。不規則波の周波数スペクトルはITTC型を、方向スペクトルは横波90deg.を主方向とした COS^4 分布で与えた。波形表現はシングルサンメーション法とし、初期位相と方向角初期値は乱数で設定した。周波数分割数は150分割である。計測時間は実船時間で3時間相当の20分とした。なお、模型実験前に短波頂不規則波の波検定を実施し、設定した波条件に則した波浪場が計測時間の間保たれていることを確認した⁹⁾。

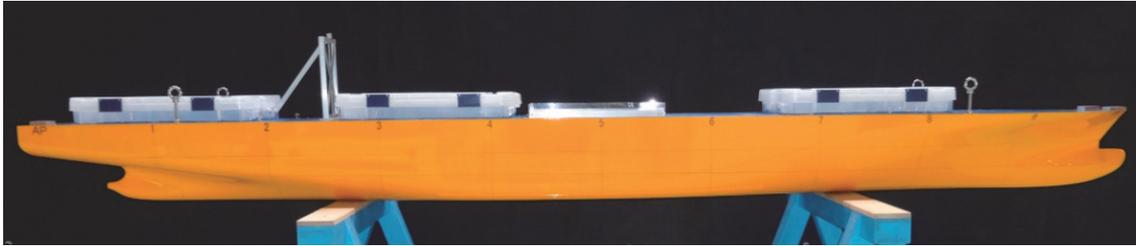


写真1 供試模型船 (コンテナ船模型)

3.2 自由横揺れ試験

前進速度無し状態で自由横揺れ試験を実施し、 $\Delta\phi_n = a\phi_m + b\phi_m^2$ で表す減減係数 a 係数 (線形)、b 係数 (非線形) と、 $\ddot{\phi} + 2\mu\dot{\phi} + \beta\phi|\phi| + \omega_n^2\phi = M_\phi(\omega t)$ で表す減衰係数 μ 、 β を求めた結果を表2に示す。なお、自由横揺れ試験は初期傾斜右舷4回、左舷4回の合計8回実施しており、8回の平均横揺れ固有周期は1.112sec.、実船スケールで10.89sec.である。

表2 供試船の自由横揺れ試験結果

a 係数 (線形)	0.067
b 係数 (非線形)	0.0121
$\mu (= 2a/T_\phi)$	0.0123
$\beta \left(= \frac{3}{4} \frac{180}{\pi} b \right)$	0.5208
横揺れ固有周期 (模型船)	10.89sec (1.112sec)

4. 時間領域計算結果と実験結果の比較

時間領域での横波を主方向とする短波頂不規則波中前進速度無しでのコンテナ船の船体運動計算を実施した。模型実験で使用した波と同じ5ケースの波を用いた計算を1,080,000ステップ (0.01秒刻み3時間) 実行し、95%信頼区間を模型実験と比較した。波条件は有義波高 $H_s=5.5\text{m}$ 、ゼロアップクロス平均波周期 $T_z=9.5\text{sec}$.とし、波周波数分割数は150である。

試行5回の時間領域計算による横揺れの標準偏差と両振幅分布の1/3最大平均値/2を図5に示す。図中、試行5回の平均値を破線で示す。試行ごとの統計値は5回の試行回数の平均値に近いことが分かる。

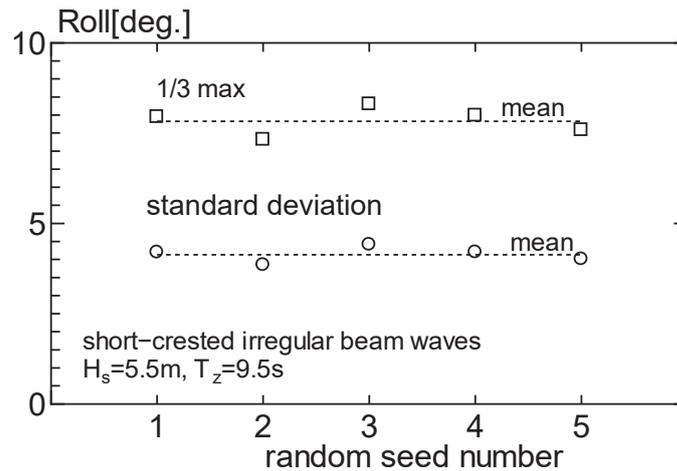


図5 波にランダム位相・方向を与えた時間領域計算による横揺れの統計値結果
($H_s=5.5\text{m}$, $T_z=9.5\text{s}$)

模型実験（試行回数7回）と時間領域計算（試行回数5回）での横揺れの両振幅分布の1/3最大平均値の半分の平均値と95%信頼区間（Confidence Interval; C.I.）を図6に比較して示す。横揺れの模型実験結果と時間領域計算の95%信頼区間は重なっており、本時間領域計算法は十分な精度であることが分かる。

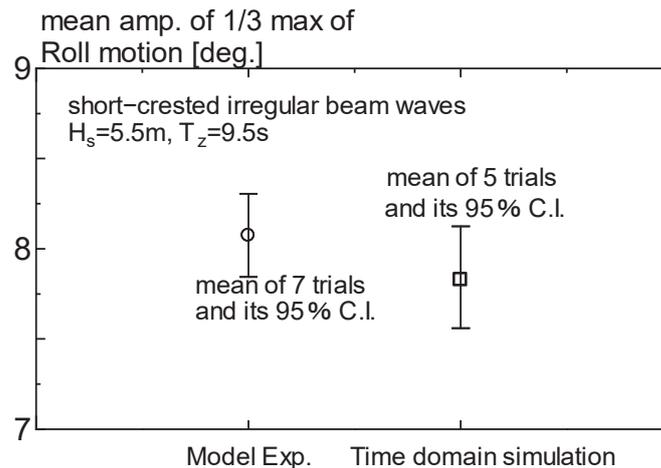


図6 模型実験と時間領域計算の横揺れの平均値と信頼区間 ($H_s=5.5\text{m}$, $T_z=9.5\text{s}$)

5. まとめ

メモリー影響を考慮した短波頂不規則波中での時間領域船体運動計算法を構築し、安定した解が得られる最小限の波周波数分割数と計算時間を検討した。検討した計算条件で横波を主方向とする短波頂不規則波中の前進速度無しのコテナ船の船体運動を計算した。さらに、本計算法の精度を確認するために、計算時と同じ状態で模型実験を実施して計算結果と比較した。その結果、計算と実験での横揺れの1/3最大値の95%信頼区間は重なっており、本計算法の精度は十分であることを確認した。

謝 辞

本研究で実施した模型実験及びコテナ船の試計算は、日本財団助成事業の一環として一般財団法人日本船舶技術研究協会からの平成29年度委託研究「目的指向型復原性基準に関する研究（目標指向型復原性基準プロジェ

クト) 一過大加速度の直接復原性評価に関する調査研究」で実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Finalization of second generation intact stability criteria, SDC 7/WP.6 (2020)
- 2) 目標指向型復原性基準に関する調査研究(目標指向型復原性基準プロジェクト-過大加速度の直接復原性評価に関する調査研究-報告書, 平成 29 年度日本船舶技術研究協会委託調査研究報告書, 海上技術安全研究所 (2018)
- 3) Kuroda, T., Hara, H., Houtani, H., and Ota, D., Direct Stability Assessment for excessive acceleration failure mode and validation by model test, *Journal of Ocean Engineering*, 187(2019), 106137.
- 4) Faltinsen, O.M. and Michelsen, F.C., Motions of large structures in waves at zero Froude numbers, *International symposium on the dynamic of marine vehicles and structures in waves* (1974)
- 5) N.M. Newmark, A method of computation for structural dynamics, *Proceedings of A.S.C.E.*, Vol. EM3, p.67-74 (1959)
- 6) 高木幹雄, 許平, 津村信一, 自由動揺に対する水面上形状の影響とメモリー影響関数, *西部造船会々報*, 第 80 号, p.117-130 (1990)
- 7) Report of Seakeeping Committee, 15th ITTC (1978)
- 8) ITTC recommended procedure 7.5-02-07, Testing and extrapolation methods loads and responses, *Stability model tests on intact stability*, *International Towing Tank Conference* (2008)
- 9) Ota, D., Kuroda, T., and Houani, H., Quantitative evaluation of temporal variation for the short-crested irregular wave generated in experimental wave basin, *Proceedings of 11th International workshop on ship and marine hydrodynamics* (2019)