津波による船体動揺シミュレーションの精度向上 -流速評価の精度向上-

久保 雅義*・竹田 昇史**・岩本 雄二***・榊原 繁樹****

Improvement of Accuracy on Numerical Simulation of Moored Ship Motions induced by Tsunami

Masayoshi KUBO, Shoji TAKEDA, Yuji IWAMOTO

and Shigeki SAKAKIBARA

Abstract

In our previous study, we proposed the numerical simulation procedure of moored ship motions induced by tsunami, and investigated the effects on ship motions and mooring loads, considering berth location, ship's dimension and mooring system. In some cases, large ship movements beyond the safe mooring conditions were induced by the surface elevation, the currents and a resonance effect with natural periods of sway or surge of the moored ships. In the proposed method, the calculated horizontal currents were not able to be reproduced well, compared with those by the tsunami simulation directly. In this paper, we investigate the difference of the currents, and improve the accuracy of the connection between the tsunami simulation and the simulation of the moored ship motions.

Keywords : *Tsunami, Simulation, Moored ship motions, Mooring load, Mooring system*

キーワード: 津波, 動揺シミュレーション, 船体運動, 係留力, 係留システム

1. 緒言

著者らは地震津波による係留船舶の動揺シミュレーション手法を提案し、当該シミュレーションを活用して、津波到達前から津波に含まれる長周期波成分との共振や流れによる自由振動により長周期船体運動である Sway, Surge に大きな動揺が発生し始め、係留索の破断や防舷材の過圧縮の危険性のあることを指摘した。また港内に係留された様々な船型およびバース位置の違いにより、係留船舶の船体運動特性がかなり異なることなどを明らかにした⁽¹⁾⁽²⁾。

当該シミュレーション手法において船体に作用する波浪強制力は、長波理論により求めた津波の水位変動と流速の時系列データを用いて、船体周りの速度ポテンシャルを設定して算出していた。これにより水位変動は忠実に再現され船体運動の Heave は

水位変動と一致する時系列結果となったが、波向きを流速のリサージュ図形などを作成して卓越波向きとして与えていたことから、津波計算から得られる流速データと当該速度ポテンシャルから算出される流速には違いがみられ、過大評価されていた。

そこで本研究では、長波理論から直接得られる流速と設定した速度ポテンシャルから算出した流速の違いについて原因究明を行なうと共に、補正方法を見出して精度の向上を行なう。そして船体動揺シミュレーション結果への影響について検討を行なう。

2. 速度ポテンシャル設定における問題点

2.1 津波シミュレーションの概要

津波シミュレーションでは、長波理論に基づき水平方向(x-y 平面)の流速(u_s, v_s)が水深方向に一様とし

* 正会員 大島商船高等専門学校 (〒742-2193 山口県大島町周防大島町大字小松 1091-1)

** 非会員 今治造船株式会社 丸亀工場 (〒763-8511 香川県丸亀市昭和町 30)

*** 正会員 神戸大学大学院 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

**** 正会員 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-8601 神奈川県平塚市 2-1)

て式(1),(2)に示す方程式を数値的に解くことで任意地点(x,y)における水位変動 η_s と流速 u_s, v_s が算出される⁽³⁾。

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{M^2}{D} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{MN}{D} + gD \frac{\partial \eta_s}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0,$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{MN}{D} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{N^2}{D} + gD \frac{\partial \eta_s}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (1)$$

$$M = \int_{-h}^{\eta_s} u_s dz, N = \int_{-h}^{\eta_s} v_s dz, D = h + \eta \quad (2)$$

ここに g は重力加速度、 η_s , M , N は静水面からの水位変動と x 方向および y 方向の流量フラックス、 ρ は海水密度、 τ_x , τ_y は x 方向および y 方向の海底摩擦、 h は水深、 t は時刻である。

2.2 船体周りの速度ポテンシャル設定

Fig.1 に示すように従来の船体周りの速度ポテンシャルの設定方法は、静止時の船体重心回りの座標系 o -xyz (船体座標系) において卓越入射角 ω で津波が進入する場合を考えていた。このとき津波の水位変動 η とこれによる速度ポテンシャル Φ および水平流速 u, v は式(3),(4),(5),(6),(7)のように表されるものとした。

$$\eta = \sum_{i=1}^{Ne} \eta_i(x, y, t)$$

$$= \eta_s = \sum_{i=1}^{Ne} \eta_{si}(x, y, t) = \sum_{i=1}^{Ne} \eta_{soi} \cdot \sin(\sigma_i t + \beta_{\eta si}) \quad (3)$$

$$u = \sum_{i=1}^{Ne} u_i(x, y, 0, t), \quad v = \sum_{i=1}^{Ne} v_i(x, y, 0, t). \quad (4)$$

$$\Phi_i = \Phi_{si}(x, y, z, t) = \frac{g \eta_{soi}}{i \sigma_i} \cdot \frac{\cosh k_i(z+h)}{\cosh k_i h} f_i(x, y) e^{-i \sigma_i t}$$

$$f_i(x, y) = \exp\{-ik_i(x \cos \omega + y \sin \omega)\}. \quad (5)$$

$$\eta_i = \eta_{si}(x, y, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} \text{ at } Z=0$$

$$= \eta_{soi} \cdot f_i(x, y) e^{-i \sigma_i t} \quad (6)$$

$$u_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} \Big|_{z=0}$$

$$= \eta_{soi} \cdot \left\{ -\frac{k_i g}{\sigma_i} \cos \omega \right\} \cdot f_i(x, y) e^{-i \sigma_i t} \quad (7a)$$

$$v_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} \Big|_{z=0}$$

$$= \eta_{soi} \cdot \left\{ -\frac{k_i g}{\sigma_i} \sin \omega \right\} \cdot f_i(x, y) e^{-i \sigma_i t} \quad (7b)$$

Fig. 1 Coordinate System for Velocity Potentials derived from Tsunami

ここに η_{soi} , σ_i , $\beta_{\eta si}$ は津波シミュレーション結果から抽出した水位変動の成分波振幅、角周波数および位相、 k_i は波数、 ω は水平流速データをプロットして設定した卓越波向き、 Ne は成分波の個数である。Fig.2 に従来の津波シミュレーションから船体周り速度ポテンシャルの設定方法および水平流速、波浪強制力の算出手順をまとめる。

Fig. 2 Flowchart on Potential Establishment

2.3 速度ポテンシャルから流速の再現性

(1) 時系列データ

Fig.3 に津波シミュレーションから得られた水位変動と水平流速の時系列および卓越波向き設定で使った水平流速データのプロット図を示す⁽¹⁾。卓越波向き ω は Fig.3(b)より $\omega = -18\text{deg}$ と設定した。

(a) Surface Elevation and Currents

(b) Predominant Wave Direction by Currents

Fig. 3 Tsunami Profile by Tsunami Simulation

(a) Surface Elevation and Currents

(b) Wave Direction by Currents

Fig. 5 Reproduced Tsunami Profile by Potential

Fig. 4 Tsunami Profile by Tsunami Simulation (Ne=21)

また閾値波振幅を 5cm とした場合の水位変動および水平流速の時系列を Fig.4 に示す⁽¹⁾。このとき成分波個数は Ne=21 となるが Fig.3(a)をほぼ再現していることから、Fig.4 の時系列データを原波形として、水平流速や速度ポテンシャル設定における問題点抽出や対策検討に用いる。

(2) 流速の再現

Fig.4 の津波シミュレーションから得られた水位変動と水平流速の時系列に対して、式(6),(7)から算出した水位変動および水平流速の時系列を Fig.5 に示す。水位変動や流速 u , v の位相関係は一致するが、流速の大きさの再現性が良くなく過大評価されていることがわかる。

(3) 単一成分波

詳細に水平流速の違いを調べるため、卓越周期で

(a) Surface Elevation and Currents

(b) Wave Direction by Currents

Fig. 6 Tsunami Component by Tsunami Simulation (T=2560s)

ある周期 2560 秒の成分波について、水位変動および流速を比較した。Fig.6 は津波シミュレーションから算出した時系列であり、Fig.7 が速度ポテンシャル

(a) Surface Elevation and Currents

(b) Wave Direction by Currents

Fig. 7 Tsunami Component by Potential (T=2560s)

から算出した時系列である。Fig.4 と Fig.5(a)の関係と同じように水位変動や流速 u , v の位相関係は一致するが流速の大きさが過大評価され、リサージュ図形が楕円形でなく直線となっていることがわかる。

3. 船体周り速度ポテンシャルの修正方法

3.1 反射波を考慮した修正方法

2.2 の船体周りの速度ポテンシャルの設定方法では、Fig.5(b)および Fig.7(b)に示されるように津波は一方向から来る進行波のみと扱っていた。本来卓越波向きとして一方向で代表させるのではなく、流速についても FFT を行ない、成分流速ごとにリサージュ図形を作成して波向き $\omega = \omega_i (i=1, 2, \dots, Ne)$ を設定すべきである。さらには、式(1),(2)に示す津波シミュレーションでは震源地から陸岸までの地形データが考慮されることから、任意地点には陸岸からの反射波など様々な方向からの進行波が重ね合わされている。そこで流速のリサージュ図形が楕円形を描くことに着目して、反射波や陸岸までの距離などに関連させた修正方法を検討する。

(1) 反射波を考慮した速度ポテンシャル

Fig.8 に示すように座標系 $0-x'y'z'$ (陸岸座標系と呼ぶ) を設定して、任意地点 (x', y') における入射波 f_i と反射波 f_r によるポテンシャルを与える。そして流速のリサージュ図形が楕円形になるかどうかを検討

する。なお以降成分波 ($i=1, 2, \dots, Ne$) の添字は外して表示するが、式(3),(4),(5),(6),(7)に対応して成分波ごとに式が与えられ、入射角 α や陸岸座標系も成分波ごとに設定されることになる。

Fig. 8 Coordinate Systems for Velocity Potentials by Quay Walls

$$\begin{aligned}\Phi(x', y', z', t) &= \frac{g\eta_0}{i\sigma} \cdot \frac{\cosh k(z'+h)}{\cosh kh} f_1(x', y') e^{-i\sigma t}, \\ f_1(x', y') &= f_i + f_r, \\ f_i(x', y') &= \frac{1}{2} \exp\{-ik(x' \cos \alpha + y' \sin \alpha)\}, \\ f_r(x', y') &= \frac{1}{2} \exp\{-ik_i(x' \cos \alpha - y' \sin \alpha)\}. \quad (8)\end{aligned}$$

$$\eta(x', y', t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{at } Z=0$$

$$= \eta_0 \cdot f_1(x', y') e^{-i\sigma t},$$

$$= \frac{\eta_0}{2} \sqrt{4 \cos^2(ky' \sin \alpha)}$$

$$\cdot \sin \left[\alpha + \arccos \left[\frac{-\sin\{k(x' \cos \alpha + y' \sin \alpha)\} - \sin\{k(x' \cos \alpha - y' \sin \alpha)\}}{\sqrt{4 \cos^2(ky' \sin \alpha)}} \right] \right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned}U &= \frac{\partial \Phi}{\partial x'} \bigg|_{z=0} \\ &= \frac{-\eta_0 g k \cos \alpha}{\sigma} \sqrt{4 \cos^2(ky' \sin \alpha)} \\ &\cdot \sin \left[\alpha + \arccos \left[\frac{-\sin\{k(x' \cos \alpha + y' \sin \alpha)\} - \sin\{k(x' \cos \alpha - y' \sin \alpha)\}}{\sqrt{4 \cos^2(ky' \sin \alpha)}} \right] \right] \quad (10a)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V &= \frac{\partial \Phi}{\partial y'} \bigg|_{z=0} \\ &= \frac{-\eta_0 g k \sin \alpha}{\sigma} \sqrt{4 \sin^2(ky' \sin \alpha)} \\ &\cdot \sin \left[\alpha + \arccos \left[\frac{-\sin\{k(x' \cos \alpha + y' \sin \alpha)\} + \sin\{k(x' \cos \alpha - y' \sin \alpha)\}}{\sqrt{4 \cos^2(ky' \sin \alpha)}} \right] \right] \quad (10b)\end{aligned}$$

Fig. 9 Lissajous Figures for Currents
($\eta_0=1\text{m}$, $T=20\text{s}$, $h=10\text{m}$ at $x'=0\text{m}$, $\alpha=60\text{deg}$)

一例として式(10)を用いて振幅 1m、周期 20 秒の波が $\alpha=60\text{deg}$ で陸岸に入射する場合の陸岸からの距離 y' による流速のリサージュ図形の変化を Fig.9 に示す (λ :波長)。ここに水深 10m とし $x'=0\text{m}$ とした。反射波および陸岸からの距離を考慮することにより、直線だけでなく楕円形になることがわかった。

(2) 船体と陸岸との角度を考慮した修正

Fig.9 以外にも $x'=0\text{m}$ における様々な入射角および陸岸からの距離 y' についてのリサージュ図形を作成して形状の変化を調べた。すると楕円形にはなるが Fig.6(b)のように陸岸座標軸 $0-x'y'$ に対して傾斜した楕円形にはならないことがわかった。そこで陸岸座標系 $0-x'y'z'$ と船体座標系 $0-xyz$ 間における座標変換により対処する方法を考える。

Fig.10 に示すようにリサージュ図形と船体とを合わせ、楕円形の長軸方向に陸岸座標系の y' 軸をとって船体座標系と陸岸座標系との成す角度を θ (x' 軸から x 軸を正) とする。陸岸は船体の左舷側に設定するが、この陸岸は計算上の仮想岸壁であると共に成分波ごと陸岸座標系を設定することになる。すると Fig.1 と Fig.10 から船体座標系における入射波の波向き ω と座標変換角 θ には以下の関係が成り立つ。

$$\theta = \pi/2 - \omega \quad (11)$$

したがって陸岸座標系での流速 U, V は、式(12)に示す既知量である船体座標系での流速 u, v (津波シミュレーションから算出) により式(13)のように表される。

(a) Outline of Coordinate Systems for Ship and Quay Wall

(b) Angle ω and θ

Fig. 10 Transformation of Two Coordinate Systems

$$\begin{aligned} u &= u_s = u_{s0} \sin(\sigma + \beta_{us}), \\ v &= v_s = v_{s0} \sin(\sigma + \beta_{vs}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} U &= u \cos \theta - v \sin \theta, \\ V &= u \sin \theta + v \cos \theta \end{aligned} \quad (13)$$

さらに式(12)を式(13)へ代入して整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{C^2 + D^2} \cdot \sin \left\{ \sigma \pm \arccos \left(\frac{C}{\sqrt{C^2 + D^2}} \right) \right\} \\ &= A_U \cdot \sin \left\{ \sigma \pm \arccos \left(\frac{C}{\sqrt{C^2 + D^2}} \right) \right\} \\ &= A_U \cdot \sin(\sigma + \beta_U), \\ C &= u_{s0} \cos \theta \cdot \cos \beta_{us} - v_{s0} \sin \theta \cdot \cos \beta_{vs}, \\ D &= u_{s0} \cos \theta \cdot \sin \beta_{us} - v_{s0} \sin \theta \cdot \sin \beta_{vs}. \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{C'^2 + D'^2} \cdot \sin \left\{ \sigma \pm \arccos \left(\frac{C'}{\sqrt{C'^2 + D'^2}} \right) \right\} \\ &= A_V \cdot \sin \left\{ \sigma \pm \arccos \left(\frac{C'}{\sqrt{C'^2 + D'^2}} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$= A_V \cdot \sin(\alpha + \beta_V),$$

$$C' = u_{s0} \sin \theta \cdot \cos \beta_{us} + v_{s0} \cos \theta \cdot \cos \beta_{vs},$$

$$D' = u_{s0} \sin \theta \cdot \sin \beta_{us} + v_{s0} \cos \theta \cdot \sin \beta_{vs}. \quad (14b)$$

そして式(9)および式(10),(14)から水位変動および水平流速の振幅に関する関係式として次式を得る。

$$\eta_s = \eta_0 \cdot |\cos(ky' \sin \alpha)|,$$

$$A_U = -\frac{2\eta_0 g k \cos \alpha}{\sigma} \cdot |\cos(ky' \sin \alpha)|,$$

$$A_V = -\frac{2\eta_0 g k \sin \alpha}{\sigma} \cdot |\sin(ky' \sin \alpha)|. \quad (15)$$

ここに η_s , A_U , A_V は津波シミュレーションから算出される水位変動および水平流速を用いて求められる既知量である。したがって未知量 α , y' , η_0 は式(15)の連立方程式を解くことにより次式のように求められる。

$$\alpha = \arccos\left(\frac{A_U \cdot \sigma}{-2\eta_s g k}\right),$$

$$y' = \frac{\arctan\left(\frac{A_V \cdot \sigma}{-2\eta_s g k \sin \alpha}\right)}{k \sin \alpha},$$

$$\eta_0 = \frac{\eta_s}{|\cos(ky' \sin \alpha)|}. \quad (16)$$

以上より、式(9),(10)の陸岸座標系での水位変動 η および水平流速 U, V が求められたことになる。

さらに式(17)を用いて陸岸座標系での流速 U, V を逆変換して整理すると、船体座標系での水平流速 Ru, Rv として式(18)に得る。

$$Ru = U \cos \theta + V \sin \theta,$$

$$Rv = -U \sin \theta + V \cos \theta \quad (17)$$

$$Ru = \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \sin\left[\alpha \pm \arccos\left(\frac{c}{\sqrt{c^2 + d^2}}\right)\right]$$

$$c = A_U \cos \theta \cdot \cos \beta_U + A_V \sin \theta \cdot \cos \beta_V,$$

$$d = A_U \cos \theta \cdot \sin \beta_U + A_V \sin \theta \cdot \sin \beta_V. \quad (18a)$$

$$Rv = \sqrt{c'^2 + d'^2} \cdot \sin\left[\alpha \pm \arccos\left(\frac{c'}{\sqrt{c'^2 + d'^2}}\right)\right]$$

$$c' = -A_U \sin \theta \cdot \cos \beta_U + A_V \cos \theta \cdot \cos \beta_V,$$

$$d' = -A_U \sin \theta \cdot \sin \beta_U + A_V \cos \theta \cdot \sin \beta_V. \quad (18b)$$

式(18)を用いて Fig.11 に Fig.6,7 に対応した周期 2560 秒の成分波についての水位変動および流速の計算結果を示す。水位変動だけでなく水平流速の時

系列が一致し、流速のリサージュ図形も楕円形となり一致した。さらに Fig.4 に対応して Fig.12 に成分波全てについて修正を行ない重ね合わせた結果を示すが、合成波においてもよい一致が確認された。

(a) Surface Elevation and Currents

(b) Wave Direction by Currents

Fig.11 Tsunami Component by Revised Potential (T=2560s)

Fig. 12 Reproduced Tsunami Profile by Revised Potentials (Ne=21)

3.2 波浪強制力の算出方法

船体に作用する波浪強制力は、式(9)の成分波ごとに別途定常解析⁽⁴⁾により単位波振幅当りの波浪強制力 f^* を算出する。そして式(9)の波振幅と合わせて式(19)のように与える。

$$F_{ex} = \sum_{i=1}^{Ne} \eta'_{0i} \cdot f_i^* \cdot \exp(i\sigma t) \quad (19)$$

ただし入射波と反射波を考慮することや成分波ごとに陸岸座標系での入射角 α および座標変換角 θ を考慮して船体座標系における入射角 ω を設定する必要がある。当該単位振幅当りの波浪強制力は岸壁を直接考慮して算定することもできるが、ここでは開水域において入射波に加えて反射波を重ね合わせる方法で対処する。

(1) 入射角 ω の設定

Fig.13 に示すように、船体座標系での入射角 ω は陸岸座標系での入射角 α および座標変換角 θ を考慮して次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\omega_I &= \alpha - \theta, \\ \omega_R &= -\alpha - \theta.\end{aligned}\quad (20)$$

ここに ω_I, ω_R は入射波成分および反射波成分の入射角である。

Fig. 13 Wave Directions for Incident and Reflected Waves on Ship Coordinate System

(2) 位相差の設定

式(9)で求めた入射波の位相 β は陸岸到達点を原点としていた。波浪強制力を算出する定常解析は船体座標系で行なっているため、当該船体座標系の原点

への位相の修正が必要となる。この位相差は、波の陸岸到達点から船体座標系の原点（船体中心点）までの距離 y' と波長 λ および入射角 α を用いて、式(21)のように入射波および反射波それぞれについて位相差 β_I, β_R として与えられる。

$$\beta_I = \beta - \left| \frac{y'}{\sin \alpha} \right| \cdot \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \beta_R = \beta + \left| \frac{y'}{\sin \alpha} \right| \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$

以上より、水平流速の修正や船体周りの速度ポテンシャルの修正が完了したことになるが、これまでの流れを Fig.14 にまとめる。

Fig. 14 Flowchart on Revision of Potential Establishment

4. 船体動揺シミュレーションへの影響

4.1 対象船舶および外力条件

対象船舶は Fig.15 に示すように前報⁽¹⁾と同じシーバースに係留された 135,000m³LNG 船とし、当該係留システムも同様とした。津波の外力条件についても同様とし、津波シミュレーションから算出した Fig.4 の水位変動および水平流速データとした。そし

て 2.2 の従来の方法で流速および波浪強制力を与える場合と、今回提案する 3.1 の水位変動や水平流速および 3.2 に示した波浪強制力の算定方法を用いる場合での船体動揺シミュレーションを実施して比較した。なお当該係留船舶の Sway および Surge 固有周期は 61s と 136s である。

Fig.15 Mooring Arrangement of 135,000m³ LNG-carrier

4.2 船体動揺シミュレーション結果

Fig.16 および Fig.17 に従来の船体周りの速度ポテンシャル設定方法および今回提案した速度ポテンシャル設定による動揺シミュレーション結果を示す。

(1) 船体運動

Heave に関してはどちらも津波の水位変動に一致した動きとなったが、Sway, Surge および Roll においては違いがみられた。Fig.16 の従来の船体周りの速度ポテンシャル設定方法の場合、Sway の沖側への動揺量が約 5m に及び、Sway との連成に伴い Roll にも大きな変位角が生じている。Surge については、津波到達前から自由振動を生じながら船尾方向へシフトし、その後最低潮位になるまでの間に逆に船首方向にシフトしている。一方 Fig.17 の今回提案する速度ポテンシャル設定方法の場合、Sway の沖側への動揺量は 2.5m に減少し、Sway との連成に伴い Roll も減少している。Surge については、同様に津波到達前から顕著に自由振動を生じ若干大きめになっている。Pitch, Yaw についてはどちらも微小な動揺を生じているのみであった。以上より、速度ポテンシャルの設定の違いによる波浪強制力の違いや水平流速の精度向上により、水位変動だけでなく流速変動に即した船体動揺が再現される結果を得た。

(2) 係留力

Fig.16,17 には係留索 L1(bow line), L8(bow spring

line), L14(stern line)の張力および防舷材 F1(stern side)の反力時系列結果を示す。Fig.16 の従来の船体周りの速度ポテンシャル設定方法の場合、係留索には破断荷重に達する程の 1000kN を超える張力が生じ、防舷材についても許容範囲内ではあるが反力が 3000kN に至る大きな圧縮変形となった。一方 Fig.17 の今回提案する速度ポテンシャル設定方法の場合、船体動揺の変化に対応して違いがみられ、係留索張力は顕著に減少する結果を得た。

5. 結語

本研究では津波による船体動揺シミュレーションの精度向上に関連して、津波シミュレーションから直接得られる流速と設定した速度ポテンシャルから算出した流速の違いについて原因究明を行なうと共に、補正方法を見出して精度の向上を行った。そして船体動揺シミュレーション結果への影響について検討を行なった。得られた結論を要約すると次のようになる。

- ① 津波を想定岸壁へ斜め入射させて反射波を考慮し、波向き、位置および振幅に関する連立方程式を構築して流速のリサージュ図形が楕円形となるように水位変動および流速を補正する方法を見出した。
- ② 長波理論に基づく津波シミュレーションと船体運動に関連する速度ポテンシャルとの接続を水位変動だけでなく流速レベルにおいても精度よく行えた。
- ③ 船体運動についても、流速の精度向上に伴い水位変動だけでなく流速変動に即した船体動揺が再現される結果を得た。

震源地から広範囲の計算領域を扱う津波シミュレーションでは、その計算メッシュ（地形メッシュ）は数千m～数百mである。一方船体に作用する波浪強制力や造波抵抗力を算出する定常解析での計算メッシュ（船体表面メッシュ）は数m程度である。2つのシミュレーション手法における計算メッシュの大きな違いなどを鑑み、両者を同時に解くのではなく、速度ポテンシャルを介して精度よく連結させる実用的な津波来襲時の船体動揺シミュレーション手法を見出すことが本研究の主旨である。本研究が津波作用下における係留船舶の動揺特性評価や安全な係留システムの検討、さらには港湾およびバースの防災・減災に関する検討への一助となれば幸いである。

Fig. 16 Calculation Results of Moored Ship Motions and Mooring Loads by Previous Method (Ne=21)

Fig. 17 Calculation Results of Moored Ship Motions and Mooring Loads by Revised Method (Ne=21)

謝辞

本研究を実施するに当たり、津波シミュレーションに関する貴重な意見を頂いた神戸大学大学院海事科学研究科小林英一教授および人と防災未来センター原田賢治氏に感謝致します。また本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究(B):係留船の津波対策による港湾災害削減効果について(神戸大学大学院海事科学研究科久保雅義教授代表)によったことを付記して謝意を表する。

より船体に作用する流圧力だけでなく波浪強制力も等価な値として評価できることになります。これは著者らが以前を行なった斜面前面における係留船の船体運動特性検討において、離岸距離を適切に設定することで鉛直壁前面の船体運動に等価に置き換えられる現象⁽⁶⁾に類似しているともいえます。

参考文献

- (1) 榊原繁樹・久保雅義・小林英一・越村俊一：津波の初期波形による係留船舶の動揺への影響について, 日本航海学会論文集, 第 112 号, pp.125-132, 2005.
- (2) 榊原繁樹・久保雅義・小林英一・大竹祐一郎・原田賢治：津波来襲時の港内係留船の船体運動の違いについて, 日本航海学会論文集, 第 118 号, pp.159-168, 2008.
- (3) Imamura, F.: Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method, Long-wave Run-up Models, World Scientific, River Edge, NJ, pp.25-42, 1996.
- (4) 榎木亨・久保雅義：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究, 直線岸壁および Slip 内係留船の運動特性, 海岸工学論文集, 第 27 巻, pp.307-311, 1980.
- (5) 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹：斜面前面における係留船の船体運動について, 日本航海学会論文集, 第 78 号, pp.73-81, 1988.

質疑応答

井関俊夫(東京海洋大学)：

連立方程式を解いて得られた陸岸の方向と距離は実際の陸岸とどのような関係になるのでしょうか。

榊原繁樹：

今回の津波シミュレーションで設定した陸岸は、単純な一様直線形状ではなく半島や岬など具体的な実際の海岸形状を扱っています。海上のシーバースに係留された船体中心位置では、津波は外洋からの入射波成分だけでなく陸岸からの様々な反射波により構成されているといえます。当該連立方程式(15)を解くことは、津波シミュレーションから得られた当該位置における水位変動と水平流速を等価な仮想の一様直線陸岸前面での水位変動や流速に代替させることであると共に、等価な速度ポテンシャルを設定するとの意味です。これに