

# 港内係留船舶の津波応答特性に関する模型実験と数値計算

## Model Experiment and Numerical Simulation on Tsunami Response Characteristics of a Moored Ship in a Port

大垣圭一<sup>1</sup>・米山治男<sup>2</sup>・津田宗男<sup>3</sup>・栗原明夫<sup>4</sup>・平石哲也<sup>5</sup>・青野利夫<sup>6</sup>

Keiichi OHGAKI, Haruo YONEYAMA, Muneo TSUDA, Akio KURIHARA  
Tetsuya HIRAISHI and Toshio AONO

It is advisable for moored ships in ports to be evacuated outside ports in case of a major tsunami. However, all the ships can not always evacuate rapidly because the waterway is crowded with evacuating ships. Then, ships may be damaged by the tsunami. Although the tsunami impact on the moored ship has been well studied, the influence of the tsunami incident angle has not been studied so far. In this study, we conducted the model experiment which is considered the incident angle of tsunamis, in order to study the characteristics of the ship motion and the tsunami impact on the mooring facilities. And moreover, we performed simulation of the ship motion to compare the results of experiments. Consequently, it was able to confirm the validity of the evaluation method for tsunami force.

### 1. はじめに

日本では、過去にプレート境界型の巨大地震によって発生した巨大津波が沿岸に襲来し、大規模な災害を引き起こしてきた。例えば、東南海・南海地震は、100～150年の間隔で発生しており、近い将来、再度、その地震による巨大津波が太平洋沿岸地域を襲うことが予測されている。津波来襲時の大型船舶の対応について、「海上保安庁の津波対策等について」(海上保安庁, 2005)には、津波高さ3m以上を大津波とし、港外退避を原則とすることが示されている。しかし、荷役作業中であつたり、船員が不在であつたりすると、出港準備に時間がかかり、また、補助船数にも制約があることなどから、津波が港湾へ到達する前に港湾内の全ての船舶が港外へ避難することは不可能であると考えられる。日本国内では、過去に大型船舶が津波により被災した事例は報告されていないが、スマトラ沖地震津波において大型の発電バージ船が内陸に打ち上げられた事例(富田ら, 2005)もあるように、津波の外力是非常に大きい。大垣ら(2008)によると、係留船舶に津波が襲来したときには、係留索が破断したり、防舷材に激しく衝突して船舶や岸壁などが損傷したりする可能性があることが分かっている。港湾域には危険物貯留施設などもあるため、それらが被災してしまうと被害の大きさは計り知れないものとなる。

津波来襲時の大型船舶について、中屋ら(2005)や榊

原ら(2007)は、数値計算によりその安全性を評価している。しかし、津波外力について、津波の入射方向による影響など、これまで十分な検討が加えられているとは言えない。一方、津田ら(2006)は模型実験により、係留索の張力や防舷材への衝突力などを評価するとともに、数値計算によって実験結果との比較を行っている。しかし、この実験では係留船舶の船側方向から津波を作用させており、津波の入射方向は考慮されていない。

本研究では、まず、船体動揺の模型実験を行い、津波の入射方向を考慮した係留船舶の動揺特性や係留設備へ及ぼす影響について検討した。実験では津波を往復流で再現した。次に、津波外力を流れとして考慮した船体動揺計算を行い、実験結果と比較・検討することで数値計算精度の確認を行った。

### 2. 模型実験

#### (1) 実験模型

独立行政法人港湾空港技術研究所の環境インテリジェント水槽に模型を設置して実験を行った。実験の縮尺は1/50であり、フルード数が一致するように模型の寸法や特性を調整した。なお、本文中では、実験結果や計算結果は全て現地量で表記する。津波の水位変動に伴って、船舶の岸壁への乗り上げや着底などの被害が発生する場合もあると考えられる。しかし、模型実験において津波を造波機で再現すると、流速が大きく、周期の長い津波を再現することが難しかった。そこで、本研究では、津波は水槽内に設置した水路を流れる往復流で再現した。往復流は、水槽の両端に設置されたポンプによって流入・流出量を制御し、正弦波を想定して時間変化させた。

表-1には実験に使用した船舶模型の諸元を示す。船舶

|       |      |                     |
|-------|------|---------------------|
| 1 正会員 | 修(工) | 東亜建設工業(株)技術研究開発センター |
| 2 正会員 | 博(工) | (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 |
| 3 正会員 | 博(工) | 東亜建設工業(株)技術研究開発センター |
| 4 正会員 | 修(工) | 東亜建設工業(株)土木事業本部設計部  |
| 5 正会員 | 工博   | (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 |
| 6 正会員 | 工博   | 東亜建設工業(株)土木事業本部設計部  |

模型は50,000DWTコンテナ船を想定しており、積載条件は満載と半載とした。係留施設については、様々な入射方向から津波を船舶に作用させて実験を行うために、往復流の遮蔽面積が小さい栈橋形式とした。防舷材や係留索については、技術基準に従って算定される一般的な外力（日本港湾協会，2007）と比較して、津波による外力が大きいと予想されたため、船舶の大きさに対して標準的な防舷材や係留索よりも強度が大きい係留索と防舷材を選定した。防舷材は上田（1984）の方法に従って定反力型の反力特性をモデル化し、コイルバネ等を組み合わせて反力特性を再現し、栈橋模型に4基配置した。係留索はナイロンエイトロープφ100mmを選定し、ナイロン製の靴下をより合わせて、張力－伸び特性を再現した。

## (2) 模型配置

図-1は係留設備の配置を示しており、8本の係留索、4基の防舷材、6箇所の係船柱で係留系を構成している。

表-1 船舶模型の諸元

| 積載量       | 現地      |         | 模型 (1/50) |      |
|-----------|---------|---------|-----------|------|
|           | 満載      | 半載      | 満載        | 半載   |
| 排水重量 (kN) | 470,400 | 274,400 | 3.76      | 2.20 |
| 垂線間長 (m)  | 193.5   | 187.5   | 3.87      | 3.75 |
| 船幅 (m)    | 31.5    | 31.5    | 0.63      | 0.63 |
| 喫水 (m)    | 11.0    | 7.5     | 0.22      | 0.15 |

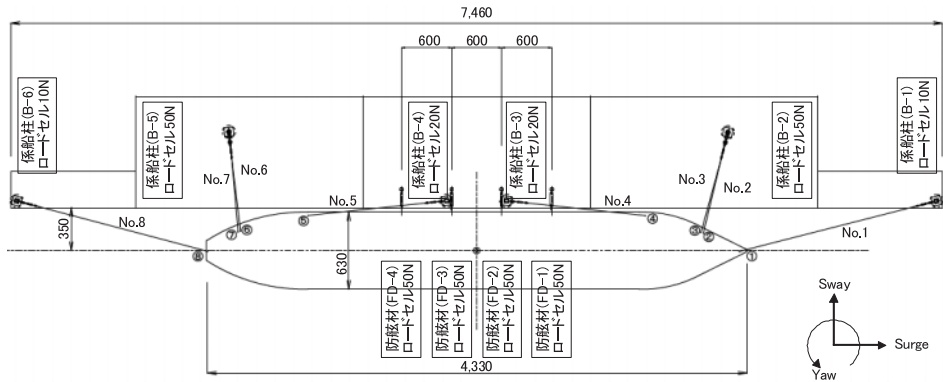


図-1 係留設備の配置

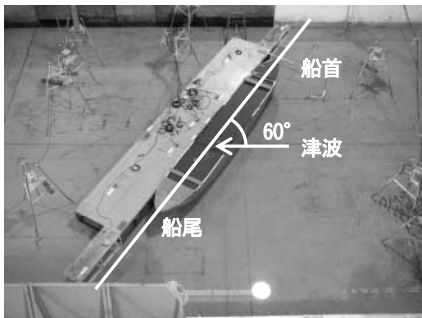


写真-1 模型の配置状況（入射方向60°）

係留索模型は係船柱B-1～B-6に繋がれている。船首側からB-1にはバウライン、B-2にはプレストライン2本、B-3、B-4にはスプリングライン、B-5にはプレストライン2本、B-6にはスターンラインが繋がれている。防舷材は船首側から順にFD-1～FD-4の4基が配置されている。動揺6成分は図-1に示すように定義する。

## (3) 計測項目

船舶の動揺6成分は、画像解析により算定した。船舶模型上に取り付けた4点の発光ダイオードを2方向から0.10s間隔でビデオ撮影し、その画像を粒子追跡法（PTV法）で解析し、4点の3次元座標を取得した。そして、この座標値を、船体の重心を原点とする3成分の変位と重心を中心とする回転の動揺3成分に変換した。

係留索張力は係船柱に取り付けたロードセル、防舷材反力は防舷材模型に取り付けたロードセルによって、0.03s間隔で測定した。

写真-1には入射方向60°における模型の配置状況を示す。入射方向は船軸と津波流向のなす角と定義する。水路内には容量式波高計2基と電磁流速計4基を配置し、水位変動および流速を0.03s間隔で測定している。

## (4) 実験結果

積載量満載の船舶に入射方向60°、最大流速1.80m/s、周期10min、引き波の初期変動の津波を作用させた実験の状況を写真-2に示す。この最大流速は、4.5mの津波波高に

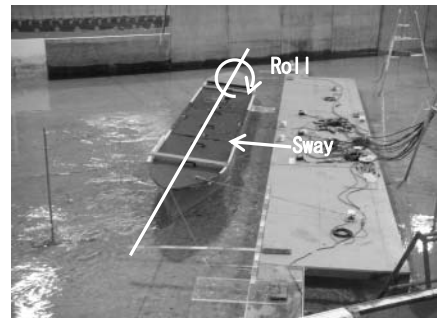


写真-2 引き波による船舶の動揺

相当する。引き波時にはその強い流れによって、船舶が栈橋から大きく引き離されており、プレストラインの係留索の伸びも大きいことがわかる。このとき、甲板部に繋がれた係留索によって船舶の水平変位が制限されており、係留索には大きな張力が作用する。そのため、重心まわりのRollのモーメントが大きくなり、船舶の上面は栈橋方向にやや傾いている。

表-2には各実験条件におけるSurgeとSwayの最大値を示す。入射方向が30, 60, 90°のケースでは、Swayは-10m以上になることが多いことが分かる。それらのケースでは船側方向から受ける津波の影響でSwayが大きくなっている。入射方向が90°のCASE21ではSwayの最大値が-18.2mであり、全ケースの中で最大であった。一方、Surgeは入射方向が0°のCASE3で最大となった。SurgeはCASE8やCASE11でも大きい値を示している。それらのケースでは船首尾方向から受ける津波の影響でSurgeが大きくなった。SurgeとSwayに関するこれらの結果から、船舶の動揺特性は津波の入射方向によって大きく変わることが分かった。また、入射方向が同じ場合については、積載量、周期、最大流速によって動揺の大きさが変化していた。津波周期は短いとき、最大流速は大きいとき、積載量は満載のときにSurgeやSwayが大きくなる傾向があった。

#### (5) 安全性評価

50,000DWTコンテナ船に対して、標準的な設計手法で係留系を選定すると、例えば、ナイロンエイトロープφ55mmとV型防舷材800Hが選定される。ここでは、通常の係留条件にある船舶を想定し、これらの係留索と防舷材の強度から係留船舶と係留設備の安全性を評価する。係留索の破断荷重はB-1, B-3, B-4, B-6で692kN, B-2, B-5には2本の係留索が繋がれており1384kNである。防舷材

の圧縮限界荷重は、FD-1～FD-4では3088kN, 吸収エネルギーは236kN・mである。これらの値と実験値を比較して安全性を評価した結果を表-2に示す。

入射方向0°のケースでは積載量、周期、最大流速の条件に関わらず、係留船舶は安全と評価された。波高4.5mに相当する流速1.80m/sの津波が作用しても係留船舶の安全性に問題は生じないということになる。船舶は流線形であるために、船首尾方向の津波の流れに対し、抗力がほとんど作用しないためである。

入射方向30, 60, 90°のケースでは、波高1.70mに相当する一番小さい流速0.70m/sのケースを除いて、係留索や防舷材にその限界荷重を超える力が作用しており、係留船舶は危険と評価された。船側から作用する津波の流れによって、大きな外力が船舶に作用し、係留索張力や防舷材反力は限界荷重を超える荷重になった。特に、CASE21では、全ケースの中でSwayが最も大きく、係留索や防舷材にも大きな荷重が作用していたことから、周期が短く、流速が大きい津波が船側方向から来襲した場合に係留船舶は最も危険な状態となると考えられる。なお、今回の係留条件では、Swayが-9.4m以上になったケースで係留船舶は危険と判定されている。

### 3. 数値計算と実験との比較

#### (1) 数値計算法

実験と同じ条件で船体動揺計算を行い、計算の妥当性を検討する。船体動揺計算では、まず、2次元断面の流体力を特異点分布法で求め、船長方向にストリップ法で積分して3次元の流体力を求めた。そして、時系列計算は(1)式に示す遅延関数型の支配方程式を用いた。

表-2 実験結果と係留船舶および係留設備の安全性評価

| CASE | 入射方向<br>(°) | 積載量 | 周期<br>(min) | 最大流速<br>(m/s) | 最大動揺量(m) |       | 安全性 | CASE | 入射方向<br>(°) | 積載量 | 周期<br>(min) | 最大流速<br>(m/s) | 最大動揺量(m) |       | 安全性 |
|------|-------------|-----|-------------|---------------|----------|-------|-----|------|-------------|-----|-------------|---------------|----------|-------|-----|
|      |             |     |             |               | Surge    | Sway  |     |      |             |     |             |               | Surge    | Sway  |     |
| 1    | 0           | 満載  | 10          | 0.70          | 2.1      | -0.0  | ○   | 14   | 60          | 満載  | 10          | 0.70          | 1.3      | -6.5  | ○   |
| 2    | 0           | 満載  | 10          | 1.07          | 4.9      | -0.1  | ○   | 15   | 60          | 満載  | 10          | 1.07          | 2.7      | -11.0 | ×   |
| 3    | 0           | 満載  | 10          | 1.80          | 9.3      | -0.5  | ○   | 16   | 60          | 満載  | 10          | 1.80          | 3.0      | -14.3 | ×   |
| 4    | 0           | 満載  | 20          | 0.70          | 0.6      | -0.0  | ○   | 17   | 60          | 満載  | 20          | 0.70          | 0.6      | -5.0  | ○   |
| 5    | 0           | 満載  | 20          | 1.07          | 1.0      | -0.1  | ○   | 18   | 60          | 満載  | 20          | 1.07          | -0.9     | -9.4  | ×   |
| 6    | 0           | 満載  | 20          | 1.80          | 2.9      | -0.5  | ○   | 19   | 60          | 満載  | 20          | 1.80          | 1.4      | -11.7 | ×   |
| 7    | 0           | 満載  | 30          | 1.80          | 2.3      | -1.9  | ○   | 20   | 60          | 満載  | 30          | 1.80          | 1.6      | -13.1 | ×   |
| 8    | 0           | 半載  | 10          | 1.80          | 4.9      | -0.2  | ○   | 21   | 90          | 満載  | 10          | 1.80          | 1.7      | -18.2 | ×   |
| 9    | 0           | 半載  | 20          | 1.80          | 1.2      | -0.2  | ○   | 22   | 90          | 満載  | 20          | 1.80          | 1.6      | -15.6 | ×   |
| 10   | 0           | 半載  | 30          | 1.80          | 1.0      | -0.3  | ○   | 23   | 90          | 満載  | 30          | 1.80          | 1.3      | -15.6 | ×   |
| 11   | 30          | 満載  | 10          | 1.80          | 8.1      | -9.9  | ×   | 24   | 90          | 半載  | 10          | 1.80          | 1.8      | -11.6 | ×   |
| 12   | 30          | 満載  | 20          | 1.80          | 3.8      | -10.0 | ×   | 25   | 90          | 半載  | 20          | 1.80          | 1.8      | -11.3 | ×   |
| 13   | 30          | 満載  | 30          | 1.80          | 2.5      | -9.6  | ×   | 26   | 90          | 半載  | 30          | 1.80          | 1.6      | -11.6 | ×   |

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ij} + m_{ij}(\infty)) \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \left\{ \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{x}_i(\tau) d\tau + D_{ij} \dot{x}_i \right\} + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_i(t) = F_j(t) \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad \cdots (1)$$

ここで、 $t$ は時間、 $x$ は変位、 $M_{ij}$ は質量または慣性モーメント、 $m_{ij}$ は付加質量または付加慣性モーメント、 $L_{ij}$ は遅延関数、 $D_{ij}$ は粘性減衰係数、 $C_{ij}$ は静水圧の復元力係数、 $G_{ij}$ は係留力係数、 $F_j$ は津波外力である。津波外力は(2)式に示すモリソン式を用いる。

$$F_j(t) = \frac{1}{2} C_{Dj} \rho u_j^2(t) S_j + C_{Mj} \rho \frac{\partial u_j(t)}{\partial t} V \quad (j=1, 2) \quad \cdots (2)$$

ここで、 $C_{Dj}$ は抗力係数、 $u_j(t)$ は流速、 $S_j$ は流れ方向の投影面積、 $C_{Mj}$ は慣性力係数、 $V$ は排水重量を表す。

## (2) 模型実験と実験結果の時系列の比較

図-2、図-3では、表-2のCASE3とCASE21の条件で行った船体動揺計算の時系列と実験の時系列を比較している。入射方向 $0^\circ$ のCASE3の結果を比較すると、Surgeの応答特性は良く一致していることが分かる。実験では-4m、+2m付近で動揺量が一定となる時間帯があるのは、防舷材と船体が接触するときにせん断力が作用しているためである。SwayやYawについては、実験と同じく動揺が小さい。B-1とB-3の係留索張力については、Surge時系列に多少の違いがあるために、張力の時系列も少し違っている

が、最大値は良く一致している。FD-1の防舷材反力については、実験では防舷材と船舶の接触によって1000kNを超えるせん断抵抗がパルスのように測定されている点を計算では再現できていない。

入射方向 $90^\circ$ のCASE21では、Swayが大きく、計算では実験を精度良く再現している。SurgeやYawの計算結果の最大値は実験よりも少し小さくなっているが、時間変化の傾向は一致していた。係留索張力は、特に張力が大きくなったB-2とB-5の結果を示すが、精度良く実験結果を再現できていることが分かる。張力が下がっていく過程における時系列が一致しないのは、係留索模型にはヒステリシス特性があるが、計算ではそれを表現していないことが原因と考えられる。防舷材反力FD-1の結果は、(1)引き波により栈橋から離されていた船舶が防舷材に衝突するとき、(2)押し波により栈橋に押し付けられるときの2度反力が発生している。計算と実験を比較すると、瞬間的な作用である前者は過大評価されていたが、準静的な作用である後者は計算と実験が非常によく一致していた。

## (3) 模型実験と実験結果の最大値の比較

表-2に示す全26ケースで実験の再現計算を行い、Surge、Sway、係留索張力、防舷材反力の最大値を実験の最大値と比較した結果を図-4に示す。Surgeは計算値が5mを超えたケースで実験結果が少し大きくなっているが、全体と

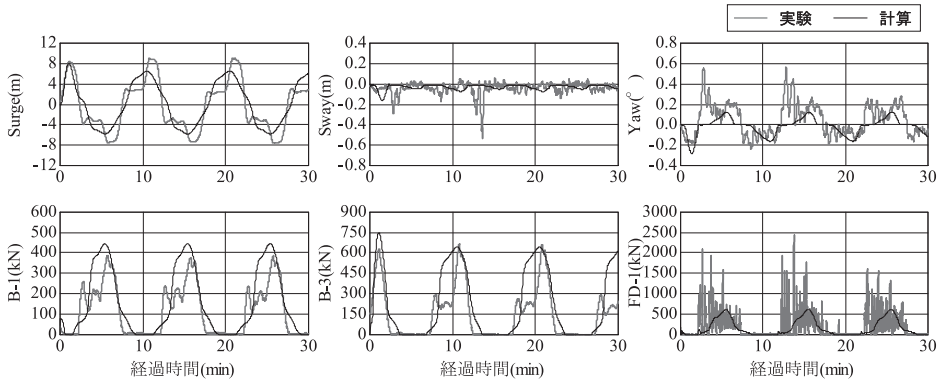


図-2 実験と計算の船体動揺時系列 (CASE3)

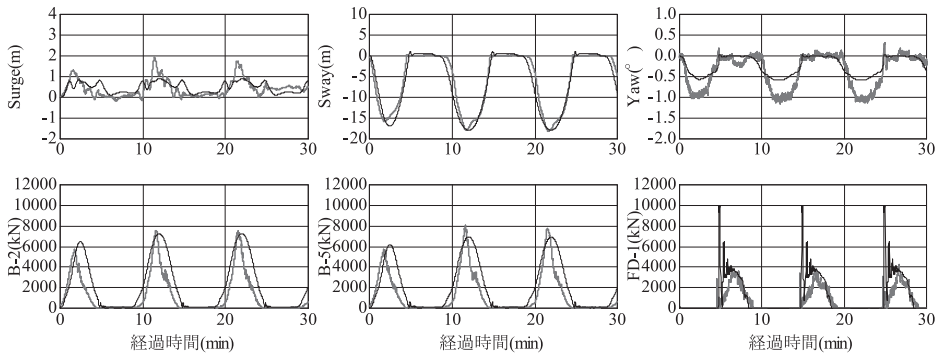


図-3 実験と計算の船体動揺時系列 (CASE21)

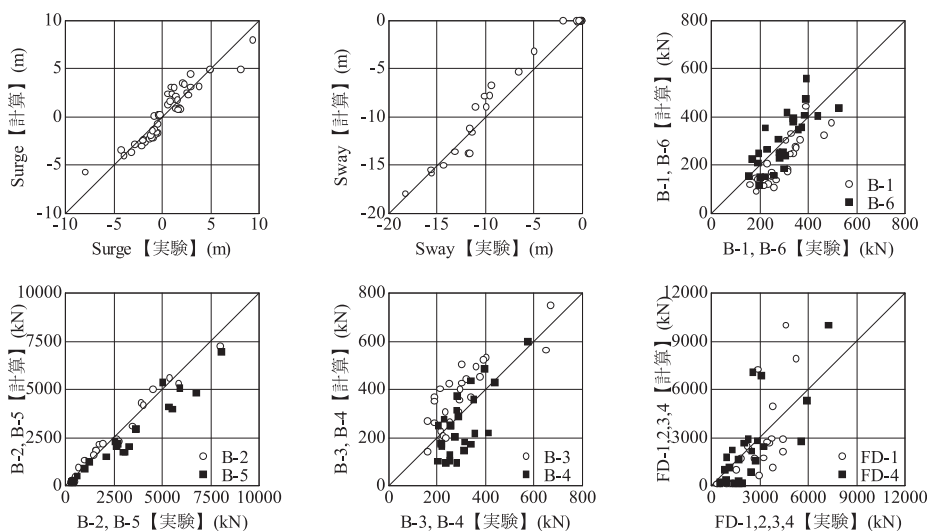


図-4 実験と計算の船体動揺最大値

しては良く一致している。Swayについては、動揺量が小さいケースでは実験値がやや大きくなっているが、動揺量が多いケースでは計算と実験が良く一致している。図-3のCASE3のように入射方向 $0^\circ$ の実験では、流れにわずかな乱れが生じてSwayが大きくなることがある。一方、計算では、常に入射方向 $0^\circ$ の理想的な状態であるために、Swayは非常に小さい。このような違いから実験と計算のSwayに相違が出たものと考えられる。

係留索張力B-2、B-5は張力の最大値が非常に大きく、計算結果の再現精度が高い。一方、B-1、B-3、B-4、B-6については、多少ばらつきがあるが実験と計算の結果はある程度一致している。防舷材反力はFD-1とFD-4の結果を比較する。周期20分と30分のケースでは、実験の方がやや大きい傾向があった。一方、周期10分のケースでは、図-3にも示されているように、引き波によって棧橋から引き離されていた船舶が防舷材に衝突するときに、瞬間的に非常に大きな反力が計算されており、計算と実験結果の相違が大きく、課題として残された。ただし、周期10分以外のケースでは、準静的な荷重が瞬間的な荷重よりも大きくなっていった。この準静的な荷重は計算でも再現出来ており、実務上問題はないと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、模型実験により係留船舶に往復流を作用させることで、津波時の係留船舶の動揺特性と係留施設の安全性を評価した。次に、船体動揺シミュレーションと実験結果を比較検討することで、その再現精度を確認した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ・ 模型実験の結果から、津波の周期が短いとき、津波の流速が大きいとき、船舶の積載量が大きいときほど、

船舶の動揺量が大きくなることが分かった。

- ・ 津波の入射方向によって船舶の動揺特性は大きく異なり、船舶の斜め方向、もしくは船側方向から津波が作用したとき、係留索や防舷材が損傷する可能性が高くなることが分かった。
- ・ 船体動揺の実験結果と計算結果は精度良く一致していたことから、数値計算により実港湾における船舶や係留設備の安全性を予測することが可能となった。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり、高山司京都大学名誉教授には実験条件や実験方法について有益なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 上田 茂 (1984)：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究，港湾技研資料，No.504，pp.337-342。
- 大垣圭一，米山治男，鈴木貴志 (2008)：港内係留船舶の津波影響に関する数値計算，海洋開発論文集，第24巻，pp.99-104。
- 海上保安庁 (2005)：海上保安庁の津波対策等について，15p。
- 榎原繁樹，久保雅義，小林英一，大竹祐一郎，原田賢治 (2007)：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，117号，pp.159-168。
- 津田宗男，青野利夫，栗原明夫，中屋行雄，大木泰憲，高山知司 (2006)：津波による大型係留船舶の動揺特性と係留施設への影響，海岸工学論文集，第53巻，pp.816-820。
- 富田孝史，本多和彦，菅野高弘，有川太郎 (2005)：インド洋津波によるスリランカ，モルディブ，インドネシアの被害現地調査報告と数値解析，港湾空港技術研究所資料，No.1110，pp.31-36。
- 中屋行雄，津田宗男，青野利夫，杉浦秀之，本多将人 (2005)：港湾内に振興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，pp.133-138。
- 日本港湾協会 (2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.399-412。