

## 津波によって漂流する複数の船舶に関する水理実験と数値計算

防衛大学校 学生会員 ○ホ ソン  
 防衛大学校 正会員 嶋原良典  
 防衛大学校 正会員 多田 毅  
 防衛大学校 正会員 林建二郎

### 1. 背景と目的

2011年東北地方太平洋沖地震津波では東日本において死者・行方不明者2万人以上、被害額16兆円以上という莫大な被害をもたらしたが、その被害は、津波そのものによること以外にも強い流れによって船舶・車両・コンテナ等が漂流することで拡大したと考えられる。これまで、津波による木材や船舶等の漂流モデルが提案されており、一部のモデルは、津波被害想定への使用を検討した例がある<sup>2)</sup>。しかしながら、モデルの精度検証は未だ不十分であり、効果的な手法は確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、港湾内において多数の船舶が漂流する津波の水理模型実験を行い、漂流現象に影響を及ぼすメカニズムについて調べるとともに、漂流物の回転・衝突を考慮した剛体モデルに基づく数値モデルについて、実験の再現計算から数値モデルの精度について検証を行った。

### 2. 水理実験

#### (1) 実験方法

実験装置である平面水槽を図-1に示す。水槽は長さ11m、幅7mで造波装置と堤防の模型を設置し、港の幅を岸側に向かうにしたがって徐々に狭くしてある。本実験ではCASE-1として岸側の水深を4.5cmに設定して座礁の可能性が存在しない場合を、CASE-2として岸側の水深を0cmに設定して座礁の可能性が存在する場合を想定した。津波は図-1中の左端の造波装置から周期20秒、波高3cmの正弦波を造波して容量式波高計で水位を、電磁流速計で流速を計測した。実スケールは1/100で実際の周期3.5分、波高3mに相当する。

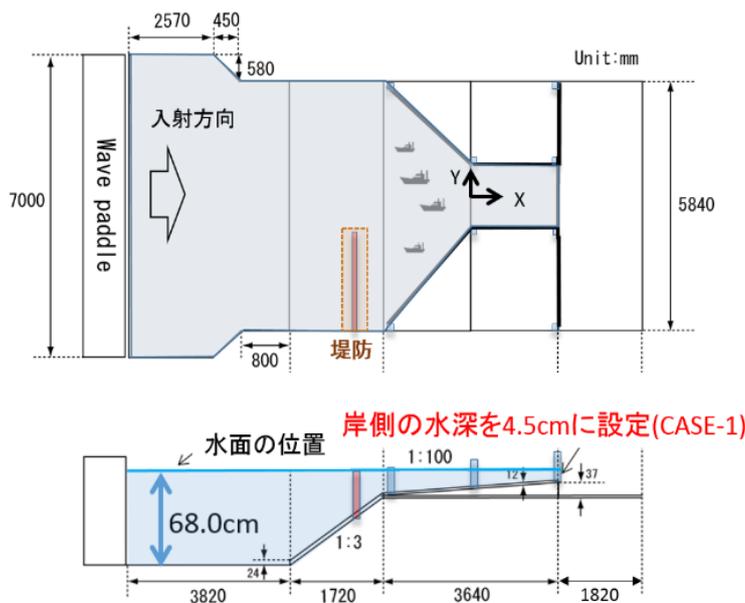


図-1 実験水槽の概要

No	Type	Mass (g)	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Draft (mm)
1	タグボート	162.4	280	99	40	10
2	漁船	71.6	246	53	30	10
3		71.3	246	53	30	10
4	プレジャーボート(大)	60.3	195	75	40	15
5		61.9	195	75	40	15
6		60.0	195	75	40	15
7	プレジャーボート(小)	20.3	145	57	30	10
8		20.5	145	57	30	10
9		19.3	145	57	30	10

表-1 船舶模型の諸元

キーワード 津波, 船舶, 漂流, 剛体回転モデル

連絡先 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL. 046-841-3810 E-mail: seira0817@hanmail.net

実験は図-2 のように水槽の中に9隻の船舶模型をランダムに配置して造波措置から津波を発生させ、ビデオカメラと追跡プログラムで船舶の漂流様子および軌跡を取り、これらを座標系の上に現した。

実験は各ケース 30 回、船舶はのべ 270 隻を対象に実施した。漂流物の船舶模型の諸元を表-1 に示す。船はタグボート、漁船などの4種類9隻を使った。ボートは3Dプリンタで漁船はプラモデルで製作して追跡のために船首・船尾にマーキングした。

(2) 実験結果と考察

実験結果として CASE-1 の一部を図-3 に示す。この図から、堤防の存在と流況から判断して分割した領域 A, B, C から出発した船舶について、初期位置とその漂流軌跡に関係性がありそうである。しかしながら、特に各領域の境界付近から出発した船舶の軌跡は、明確に区別することが難しい。そこで、A, B, C の領域毎について、半径 30cm (最も大きい船舶模型の長さに相当) の領域に範囲を狭めた S1, S2, S3 について各領域での漂流挙動について調べた。図-4 は上記の範囲から出発した船舶の軌跡である。これにより、船舶の軌跡が異なる主原因は初期位置に大きく依存し、特に堤防の存在によって漂流パターンが分けることが確認された。

ここで、各領域での船舶の動きが大きく異なる場合が存在したが、以下にその原因に示す。一つ目としては、局所的な強い流れの中の船舶の存在の有無である。同じような位置にあったとしてもその時の位置の小さな差で以降の漂流が全く異なるケースが現れる。二つ目の原因は周辺の物体の影響であり、船舶同士の衝突によって方向が急に変わったケースが存在した。



図-2 船舶模型の初期配置例

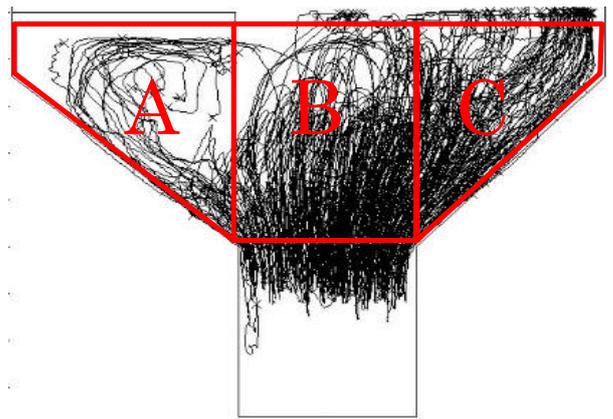


図-3 実験結果 (赤箱：初期領域, 黒：軌跡)

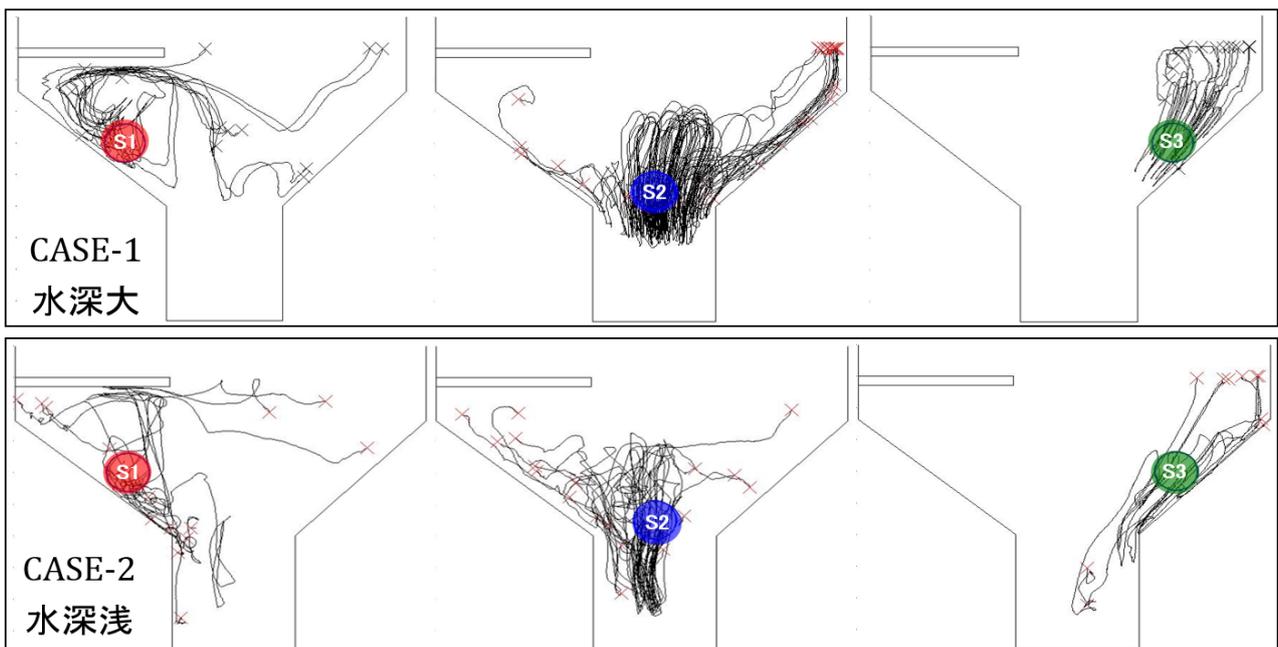


図-4 分析した船舶の初期位置と軌跡

三つ目は船舶自体の慣性力である。図-5は  $t=31s$  における流れの方向とそれに対する船舶の軌跡と対応する加速度の変化である。ここで漂流している船舶の加速度が大きい場合は波からの影響を受けにくくなることが分かる。また、加速度が小さくても船舶2隻が接触し一体になって漂流することで軌跡に影響を及ぼすケースもあった。図-6は船舶2隻が接触している様子とその後、一緒に漂流する船舶の重心位置の座標の変化である。このように質量増加の効果が発生されて慣性力が大きくなる。四つ目の原因は船舶に流体力が作用する角度である。波の流れの方向と船舶の長さ方向の角度が直角に近いほど船舶は流れ方向に漂流する傾向が大きくなる現象が確認された。

### 3. 数値計算

ここでは、水理実験から得られた船舶漂流の挙動について、数値モデルにより再現計算を行うことでモデルの再現性について検討する。CASE-1 および CASE-2 の全 60 ケースの試行について、船舶の初期条件を入力条件として計算を行った。

#### (1) 計算方法

計算の概要としては、まず、水槽内の津波の水位と流速を求めて、モリソン式に基づく流体力から船舶の運動方程式を解くことにより、船舶の位置、速度を計算した。ここで、津波は非線形長波理論を支配方程式として Leap-frog 差分法<sup>3)</sup>により計算し、船舶の漂流運動と作用する津波波力には池谷ら(2005)の式<sup>4)</sup>を採用し Runge-Kutta 法により計算した。計算条件として空間格子間隔 2cm、時間ステップは 0.0005 秒、実験の再現時間は 60 秒とした。

壁面や堤防などの構造物への衝突や、船舶同士の衝突のモデル化には本多ら(2009)の漂流物の衝突評価モデル<sup>5)</sup>を採用し、衝突の際には並進運動の運動量保存式と角運動量保存式を利用した。また、水位の低下によって船舶が地面に乗り上げた場合は水平・鉛直方向の運動が停止する条件とした。

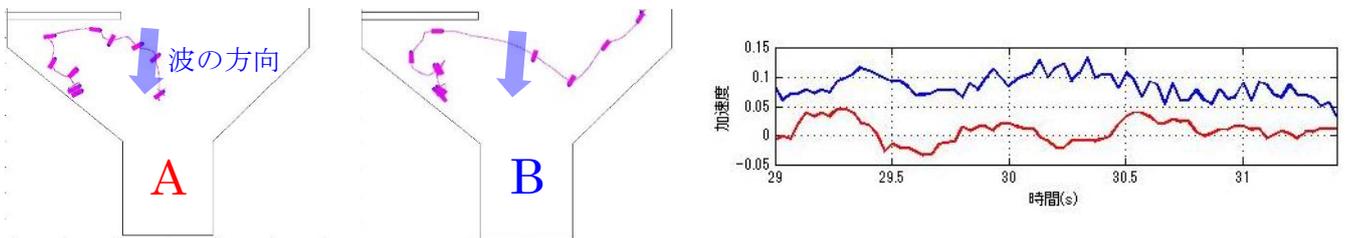


図-5 船舶の軌跡と加速度変化(赤：A, 青：B)

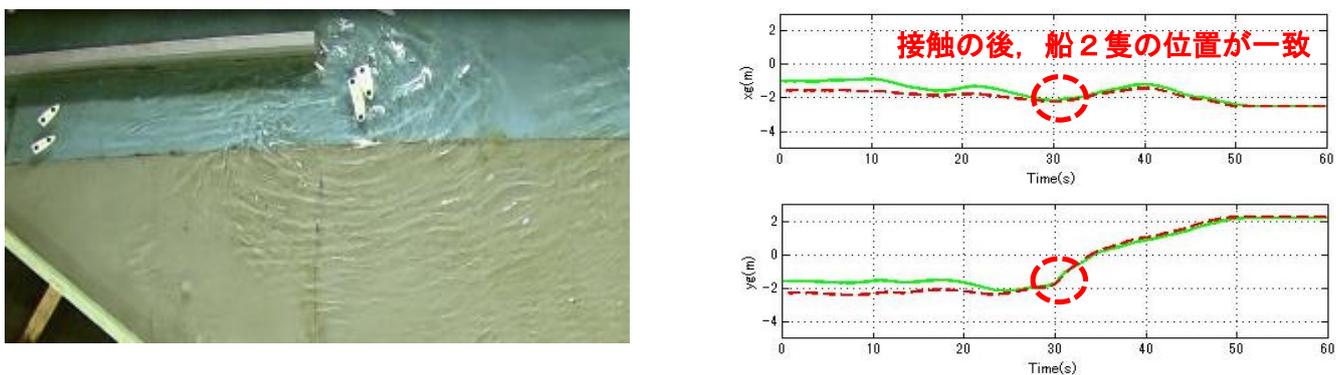


図-6 船舶2隻の接触と重心位置の座標の変化

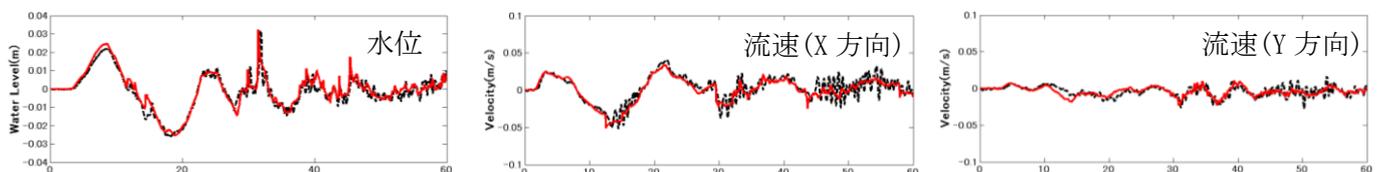


図-7 津波水位と流速の時系列(黒：実験, 赤：計算)

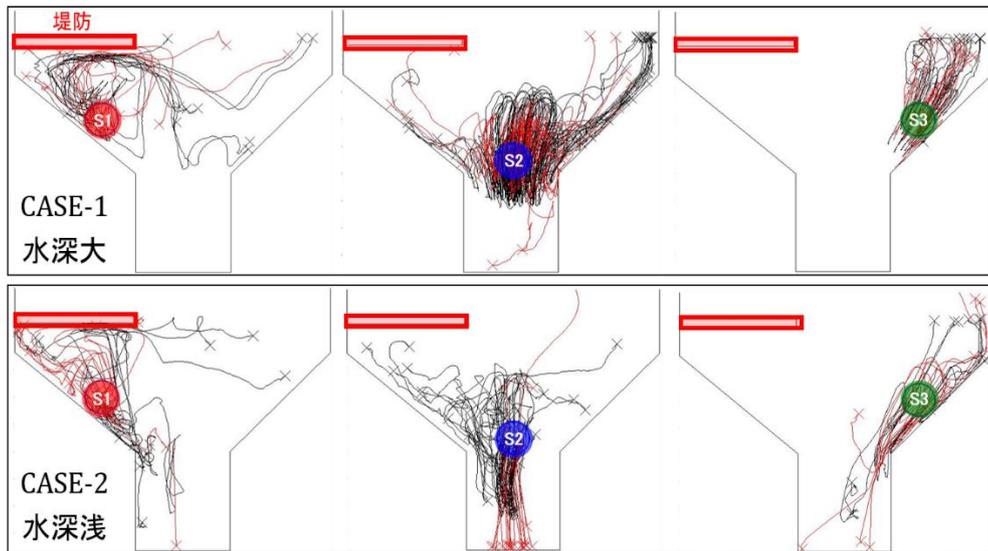


図-8 船の軌跡の比較(黒：実験，赤：計算)

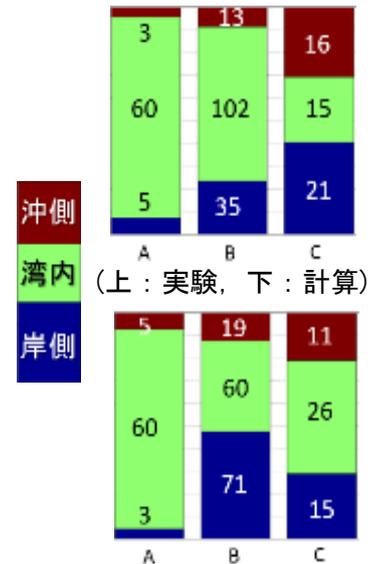


図-9 到着領域(CASE-2)

(2) 計算結果と考察

図-7 は堤防付近における実験と計算の水位および X, Y 方向の流速の時系列の比較で計算の結果が実験の様子を精度よく再現していることがわかる. 図-8 は S1, S2, S3 の各位置から出発した船舶の漂流軌跡の水理実験と計算の比較を示し, 図-9 は最初に堤防と流況の影響を考慮して大きく分けた A, B, C の各最初位置の到着領域の船舶の隻数と比率を比較したグラフである. ここでわかるように計算は水理実験の漂流傾向をよく再現している. しかしながらケース両ともに計算が実験に比べて湾内に座礁して停止するケースが多かった. これは船舶が一旦, 乗り上げたら停止する計算条件のためであると考えられる.

4. 結論と今後の課題

本研究では, 津波による多数の船舶漂流に関する水理実験と数値計算を実施した. その結果, 漂流のパターンには船舶の初期位置が大きく依存することがわかった. また, 軌跡が大きく異なるケースについて原因を示した. 数値解析では, 座礁するケース以外についてはおおむね剛体モデルで再現できることを示した. 今後の課題としては, 確実な漂流メカニズムの分析のために, 実験結果の定量的な評価が必要である. 数値モデルに関しては, 船舶の回転や停止条件および流速の空間分布などを考慮した剛体モデルの改良と, モンテカルロ法などの確率論的方法による漂流パターンの再現を通じて, 多様な初期条件と漂流軌跡の相関関係を確認する必要がある.

5. 参考文献

- 1) 内閣府：月例経済報告等に関する関係閣僚会議 震災対応特別会合資料, pp.2, 2011
- 2) 野島和也, 桜庭雅明, 小園裕司：水没を考慮した実務的な津波漂流物による被害リスク算定, 土木学会論文 文集 B2 (海岸工学), Vol.70, NO.2, 2014, I\_261-I\_265, 2014
- 3) IUGG/IOC TIME Project：Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, Int. Oceanogr. Commission Manual Guides, Vol.35 pp.126, 1997
- 4) 池谷毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・武田智吉・柳沢賢：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文 文集, Vol.52, pp.761-765, 2005
- 5) 本多和彦・富田孝史・西村大司・坂口章：多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発, 海洋開発論文 集, Vol. 25, pp. 39 -44, 2009