

港湾における津波漂流物の数値解析

藤井直樹* ・ 大森政則* ・ 池谷 毅**
朝倉良介*** ・ 武田智吉**** ・ 柳沢 賢****

津波時の漂流物の移動モデルを構築することを目的に、港湾を対象とした複雑な場における漂流実験およびその再現計算を実施した。本研究で構築した漂流モデルは、従来の浅水理論による平面2次元津波計算と個別要素法 (DEM) を基にした漂流シミュレーションモデルである。実験との比較検討から、提案する漂流モデルは船舶の陸上への乗り上げや防波堤の乗り越えが再現可能であることを示した。また、港内に生成される複雑な渦と共に、船舶は回転しながら漂流する現象が再現可能であることを確認できた。

1. はじめに

切迫する東南海・南海あるいは想定東海地震が発生した場合、それに伴う津波によって沿岸域では、甚大な被害を受けることが予想されている。その中で、津波が港湾に襲った場合、船舶や木材等の漂流物による海域構造物への衝突による被害の発生、昨年12月のインド洋大津波で見られたように漂流物が津波とともに陸上域を漂流し、津波波力に漂流物による衝突力が加わり作用波力が増大することにより、陸上施設や建物を破壊する被害の発生が懸念されている。このような漂流物による被害を予測することは、津波防災対策を策定する上で極めて重要な課題である。

津波漂流物に関する研究としては、流木を対象とした衝突力の検討や木材漂流シミュレーション例 (たとえば、松富, 1999; 後藤ら, 1982) がある。しかし、漂流物が津波と共に移動し陸上へ乗り上げる場合に対する検討例はほとんどない。著者らはこのような問題に対し、単純な流れ場における漂流実験を実施し、漂流モデルについて提案した (藤井ら, 2005)。引き続き、津波漂流物の移動モデルを構築することを目的に、港湾を対象とした複雑な流れ場における漂流実験およびその再現解析を実施し、漂流モデルの適用性について検討したので、今回報告する。

2. 津波漂流実験

(1) 実験装置と実験条件

港湾における津波漂流物の挙動を把握することを目的に、図-1に示す平面水槽 (長さ58 m, 幅20 m, 深さ1.6 m) 内に港湾を模擬した防波堤と護岸を設置した水理実験を行った。実験では、平面水槽内に1/100海底勾配を模擬した斜面を設置し、防波堤を設置した場合と設置し

ない場合に対して8種類の長周期波を津波発生装置により造波した。実験縮尺は、フルード則に従い1/100として実施した。

(2) 船舶模型

津波漂流物の模型としては、タンカー船を参考に、形状を単純化した船首尾方向に対称な箱型浮体形状とした (写真-1)。船舶模型の寸法は、長さ0.544 m, 幅0.115 m, 高さ0.054 mであり、重量は船舶模型に重錘を載せることにより、吃水を軽荷時0.022 mと満載時0.04 mの2種類とした。

船舶模型の初期設置位置は、船舶が、①港内中央付近に形成される渦とともに漂流する場合、②津波とともに護岸を乗り上げる場合、③防波堤を乗り越えて港外から港内へ漂流する場合、の3ケースを想定し、図-1に示す平面水槽内の港湾内外3点 (A, B, C) に設置した。船舶の初期の設置方向は、船首尾方向が波向に対し、直角となる角度とした。

(3) 漂流計測実験

船舶模型の漂流挙動は、前報 (藤井ら, 2005) と同様に、船舶の6自由度の変位を非接触3次元動的変位計測が可能であるステレオビデオトラッカーシステムにより計測した。また、併せて実験では、6分力計により船舶に作用する津波力とその外力である津波の流速について

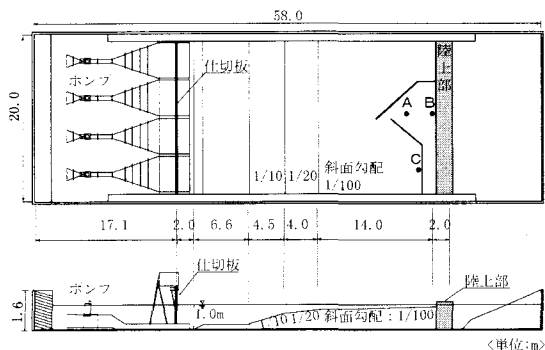


図-1 港湾模型を設置した平面実験水槽
(A, B, C地点: 船舶の初期設置位置)

* 正会員	東電設計 (株)	港湾・海岸部
** フェロー	工博 鹿島建設 (株)	技術研究所
*** 正会員	工修 鹿島建設 (株)	技術研究所
**** 正会員	工修 東京電力 (株)	原子力技術・品質安全部

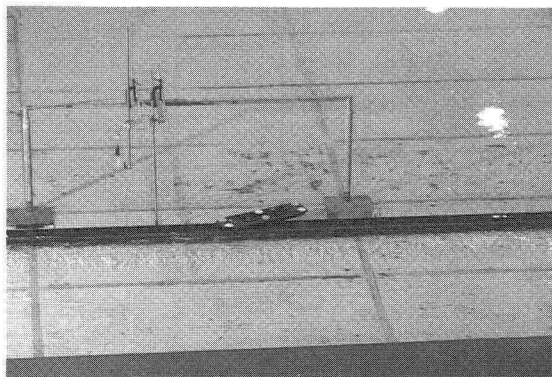


写真-1 船舶模型と実験状況

も計測した。船舶に作用する津波力の計測方法については、池谷ら（2005）を参照されたい。

写真-1 に実験状況を示す。

3. 漂流計算の概要

（1）漂流物のモデル化

津波漂流物の挙動を再現するためには、①海域を漂流する場合、②護岸等の陸上への乗り上げおよびその後陸域を漂流する場合、③防波堤を乗り越えて港外から港内へ漂流する場合、④漂流物と海域・陸上構造物が衝突する場合を表現する必要がある。また、港湾内に渦が発生し、漁船等が回転しながらそれに巻き込まれる様子が映像や今回の実験でも観察されている。船舶挙動を扱うためには、回転も重要な要素であると考え、漂流計算では、このような様々な挙動に対し適用可能な方法を採用する必要がある。

そこで、漂流物と構造物との接触判定が容易に考慮可能とするため、衝突問題に適用できる個別要素法（DEM）によりモデル化する方法を採用した。個別要素法では、流体力を考慮した移動を取り扱うことが可能であるため、漂流現象の検討にも適用可能である。ただし、一般的に個別要素法は、3次元の場合、球形要素を使用することが多い。球形要素では、船舶のような形状をモデル化できないため、目黒ら（1998）の間隙パネによるモデル化方法を用いた。間隙パネは、複数の要素を引張力に抵抗できるパネで連結したものであり、これにより任意形状のモデル化ができる。間隙パネで連結された複数の要素は、一つの集合体として剛体的に運動することが可能となる。

図-2 は、間隙パネで連結した要素でモデル化した船舶である。要素をさらに小さくすることにより、より詳細な形状を模擬可能であるが、計算時間が増大するため、今回の計算では、船舶モデルに使用する要素数を200個とした。

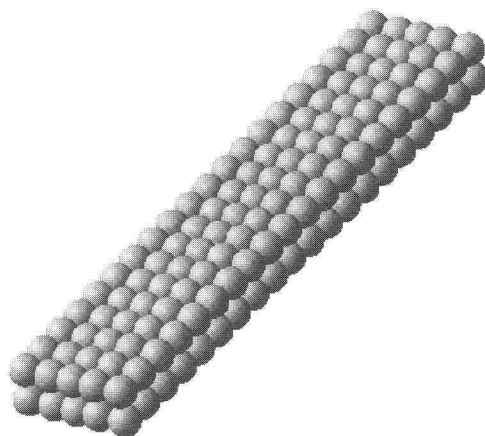


図-2 DEMによる船舶モデル

（2）漂流計算方法

a) 津波計算

漂流計算の外力となる津波数値計算法としては、港湾を対象とした現地計算への適用も踏まえ、実用的でかつ水位に関してある程度精度が確認されている、浅水理論式をスタaggerド・リープフロッグ法により差分化して解く平面2次元計算方法を採用した。

津波計算の出力結果として、水位と水平流速2成分の時刻歴波形が、漂流計算に必要な入力条件となる。なお、津波は、漂流物がない状態で計算したものであり、漂流物移動に伴う場の変化は考慮していない。

b) 漂流計算

漂流計算を実施するためには、先に挙げた乗り上げや乗り越える現象を再現することが重要であり、鉛直方向の運動を表現する必要がある。さらに、港内の循環渦によって船舶が回転する現象の再現も必要である。そこで、DEMによる船舶の漂流挙動は、並進および回転に関する6自由度の運動方程式により求めることとした。X方向の運動方程式は、式（1）のように示される。

$$m\ddot{X} = F_F + F_G + F_C \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m は質量、 $\ddot{X}$ は加速度、 F_F は流体力、 F_G は重力、 F_C は接触力を表す。

津波から受ける力、重力、構造物との接触力を考慮し要素一つ一つについて運動方程式をたて、数値積分により速度、変位を求める。この変位量は、漂流物の移動量を表すこととなる。

船舶の漂流計算に必要な流体力は、水平流速成分からX方向を例として、次式のモリソン式を適用する。

$$F_x = C_M \rho V \frac{\partial u}{\partial t} + C_D \frac{\rho u^2}{2} A_x \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 V は水中部分の体積、 u はX方向相対流速、 A_x は流れ方向の投影面積、 C_M と、 C_D

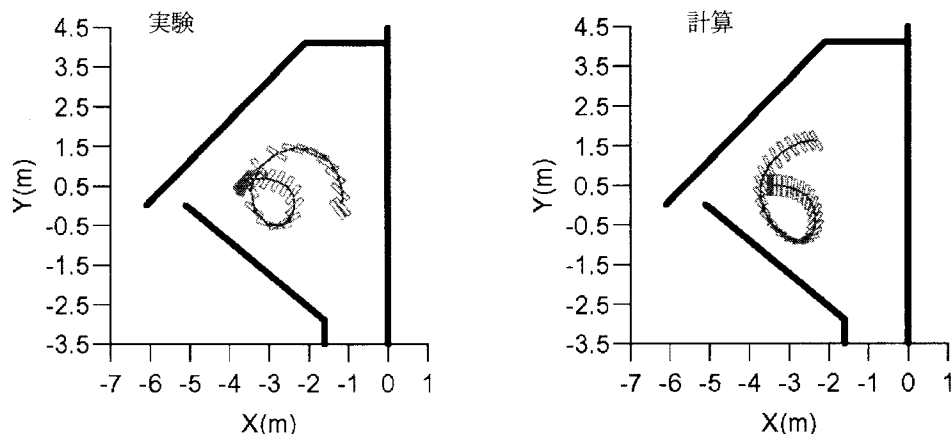


図-3 漂流軌跡 (A地点: 波高10 cm, 周期90秒, 軽荷時)

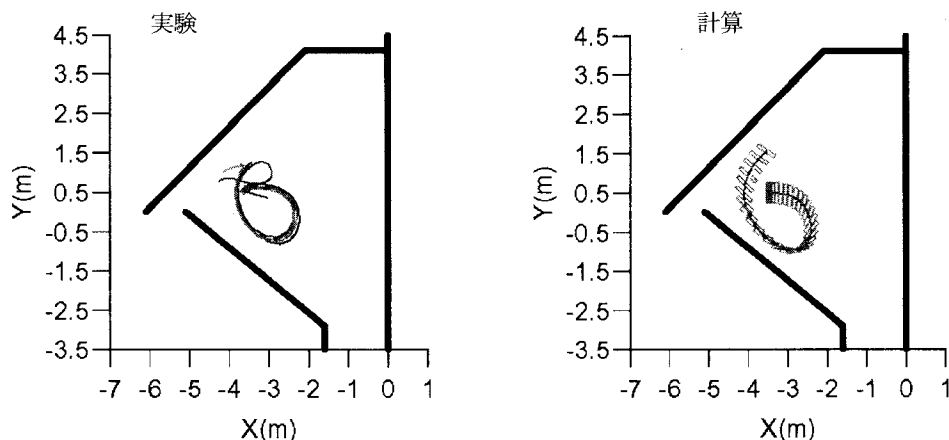


図-4 漂流軌跡 (A地点: 波高7.5 cm, 周期90秒, 軽荷時)

はそれぞれ付加質量係数, 抗力係数を表す。

DEM による漂流計算では, 波の作用する面を構成する船舶模擬要素に対し, モリソン式による流体力を作用させて水平面内の運動を計算する。ただし, 津波計算では鉛直流速を解いていないため, 鉛直方向運動の流体力は, 水位変動に伴う浮力の変化および抗力を用いた。

要素により作用する流体力が異なるため, 船首と船尾で流速場が異なる場合は, 作用する流体力の差により回転が生じる。要素を連結した DEM では, このような回転現象を表現できる特徴がある。

今回の検討では C_M , C_D もとも 1.0 で一定とした。また, 回転に関しては, 付加慣性モーメントは考慮しなかった。

4. 漂流計算結果と実験結果の比較

漂流実験では, 港内で渦が形成され, 渦の中心が時間の経過に従い変化する, 複雑な流れ場に対する再現計算を実施した。船舶初期位置を護岸から 3.5 m 離れた A 地点とした場合の比較結果を図-3 に示す。津波条件は,

波高 10 cm, 周期 90 秒の場合である。実験と計算結果とも時計回りに船舶が移動し, 船舶が回転している様子が確認できる。計算結果の移動半径が僅かに大きい, 港内の渦とともに漂流する様子を良く再現できていると言える。

図-4 は, 波高 7.5 cm, 周期 90 秒の場合の比較結果であり, 実験は 5 回実施しているため, 重心位置の軌跡のみを重ね描いている。実験の再現性は良好であり, 計算は実験の軌跡を良く再現している。

図-5 は, 護岸前面 B 地点を初期設置位置とした場合の実験と計算の漂流軌跡である。実験と計算とも, 循環渦により護岸沿いに移動し, 陸上へ乗り上げた後もさらに移動していく様子が一致している。しかし, 実験は乗り上げるとき, 船底部が接触し回転したが, 計算では接触しなかった。実験と計算の越流と乗り上げのタイミングについてさらに検討していく必要がある。

図-6 は, C 地点を初期設置位置とした場合の防波堤の乗り越えに対する実験と計算の漂流軌跡である。船舶

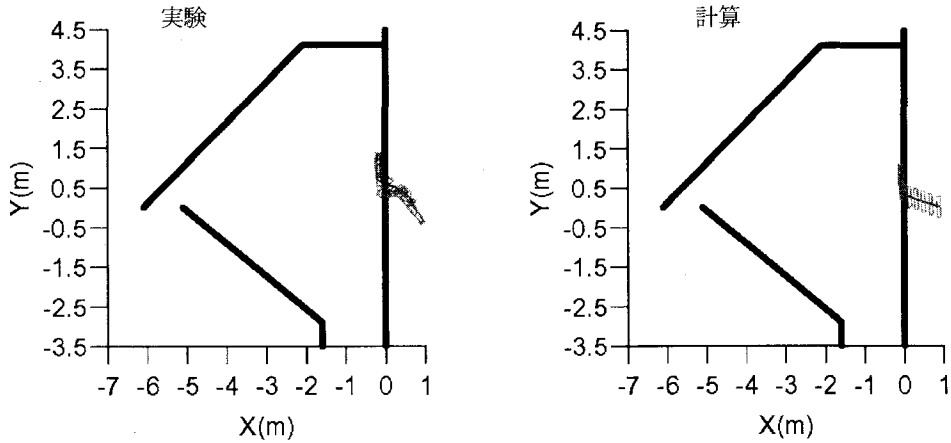


図-5 漂流軌跡 (B地点, 軽荷時)

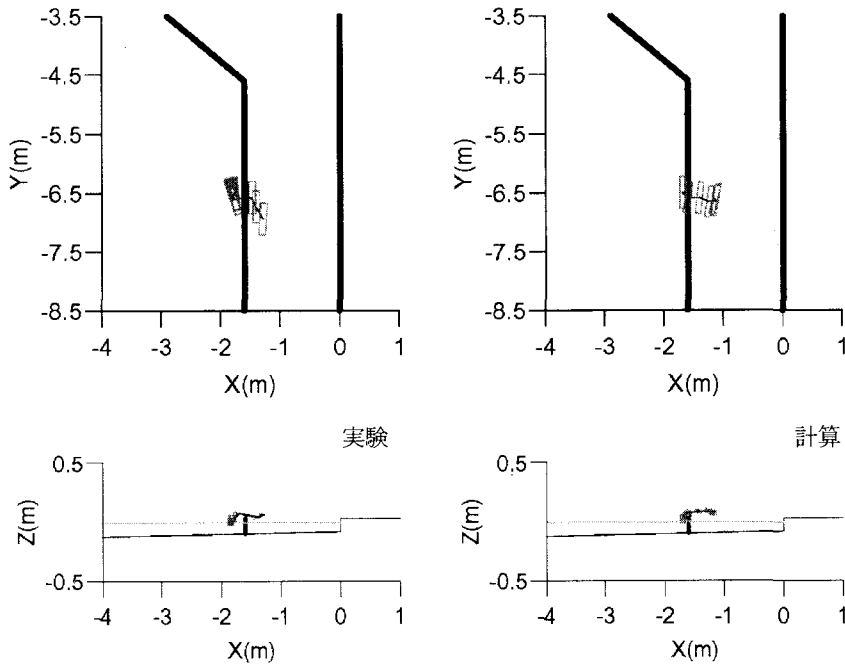


図-6 漂流軌跡 (C地点: 波高10 cm, 周期90秒, 軽荷時)

は軽荷時（喫水0.022 m）であり，越流水深（0.043 m）の方が大きい場合の結果である．津波の水位上昇・越流に伴い徐々に船舶も上昇し港内へ移動する様子が計算でも再現できている．図-7は，船舶が満載時であり，越流水深（0.026 m）が船舶の喫水よりも僅かに大きい場合の結果である．船舶は，防波堤からの反射波により防波堤を乗り越えなかったケースであり，計算でも同様に乗り越えなかった．しかし，計算の場合は，船舶が防波堤に接触したため船舶が回転した．一方，実験では，防波堤との接触が生じていない．船舶の接触・回転は，B地点の実験において見られた現象であり，漂流計算にお

いて接触問題は，重要であると考えられる．この点について今後検討を進めていきたい．

漂流計算の外力である津波計算の再現性を把握するため，実験による流体力と流速の比較を行った．図-8は，A地点における波高7.5 cm，周期90秒の津波条件により得られた流速および流体力の時間波形を比較したものである．流速と流体力は，防波堤を設置しない場合に計測した結果であり，波の入射波方向と船首尾方向が一致しているときに対する計測結果である．流体力は式（2）のモリソン式から計算し，式中の C_M と C_D は，最小二乗法により，それぞれ0.41，0.74と算出した．

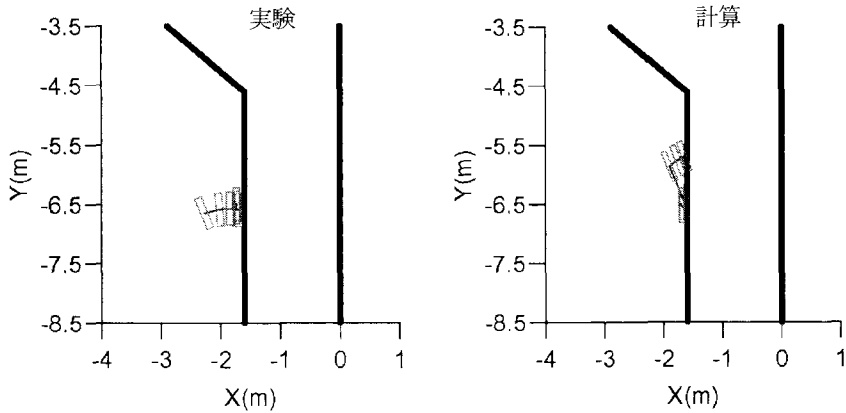


図-7 漂流軌跡 (C地点：波高7.5 cm, 周期90秒, 満載時)

流速計算結果は、実験結果と非常に良く一致している。この計算の流速値を用いてモリソン式により求めた流体力は、実験と比較してピーク値と位相に差異が生じているものの、傾向は再現できている。実験と計算の違いは、モリソン式あるいは流体力係数に起因するものと考えられ、今後検討する必要がある。

5. おわりに

津波時の漂流物の移動モデルを構築することを目的に、港湾を対象とした複雑な流れ場における漂流実験およびその再現計算を実施した。本研究で構築した漂流モデルは、実務での利用を考え、従来の浅水理論による平面2次元津波計算と個別要素法 (DEM) を基にした船舶漂流シミュレーションモデルである。実験との比較検討から、本漂流モデルは船舶の陸上への乗り上げや防波堤の乗り越え、港内に生成される渦と共に船舶が回転しながら漂流する現象を再現可能であることを確認できた。構築した漂流モデルは、間隙パネによる連結要素でモデル化するため、船舶に限らず他の漂流物へも容易に適用可能である。

今後は、モリソン式に代わり、池谷ら (2005) が提案している複雑な流れ場にも適用可能な浮体に作用する津波波力評価方法の導入が考えられる。また、構築した漂流モデルは、漂流物移動に伴う場の変化を考慮したものではないため、その相互作用が結果に及ぼす影響について確認する必要がある。

謝辞：本論文を取りまとめるにあたり、東北大学大学院今村文彦教授から、大変有益な議論をいただきました。ここに記し謝意を表します。

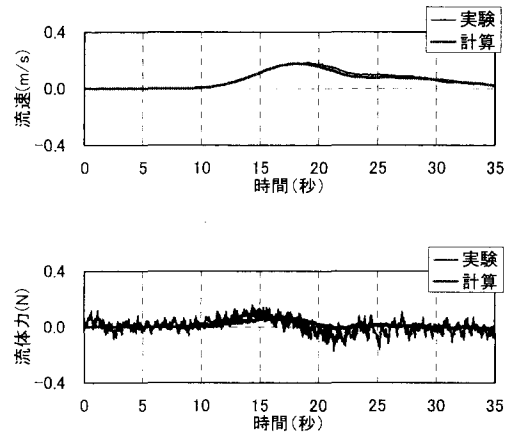


図-8 流速と流体力の時間波形の比較

参考文献

- 池谷 毅・朝倉 良介・藤井 直樹・大森 政則・武田 智吉・柳 沢 賢 (2005)：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第52巻，pp. 761-765.
- 後藤 智明・佐々木 順次・首藤 伸夫 (1982)：津波による木材の流動，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 491-495.
- 藤井 直樹・大森 政則・池谷 毅・朝倉 良介・入谷 剛・柳 沢 賢 (2005)：津波による漂流物の移動に関する基礎的研究，海洋開発論文集，Vol. 21，pp. 127-132.
- 松富 英夫 (1999)：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No.621/Ⅱ-47，pp. 111-127.
- 目黒 公郎 (1988)：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造物の破壊解析，地震研究所彙報，Vol. 63，pp. 409-468.