

津波による漂流物の移動に関する 基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF DRIFTING BODIES DUE TO TSUNAMI

藤井直樹¹・大森政則¹・池谷毅²・朝倉良介³・入谷剛⁴・柳沢賢⁵

Naoki FUJII, Masanori OHMORI, Tsuyoshi IKEYA, Ryosuke ASAKURA,

Takeshi IRIYA and Ken YANAGISAWA

¹正会員 東電設計株式会社 港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

²フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁴工修 東京電力株式会社原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

⁵正会員 工修 東京電力株式会社原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

The damage of the structures is classified into two types. The one is caused by the direct action of tsunami, and floating bodies such as destroyed facilities and drifting ships and cars cause the other one. The purpose of the present study is to investigate the damage on structures due to the drifting bodies with tsunami. In order to perform the investigation focused on a drifting body, experimental tests are carried out, and a combination method of non-linear long wave theory and DEM is suggested for drifting numerical models. The models are applied to reproduce the experimental tests. As a result, it is confirmed that suggesting method can predict the behavior of drifting bodies due to tsunami.

Key Words : *Tsunami, drifting body, tsunami run-up, tsunami numerical simulation, DEM, Morison's equation, ships*

1. はじめに

津波による災害には、津波の波力による家屋や構造物の損傷・流出被害、人的被害など様々な被害がある。これら被害の一つとして、船舶や車等の漂流物による構造物への衝突被害の危険性が以前から指摘されている。昨年12月のインド洋大津波では、津波と共に陸上を遡上する漂流物により、構造物が破壊される様子が多くの映像により映し出され、その危険性が改めて認識された。

漂流物に関する研究としては、流木を対象とした衝突力に関する検討^{1), 2), 3), 4)}、木材の拡散実験および漂流シミュレーションによる津波時^{5), 6)}あるいは洪水時^{7), 8)}における挙動の検討、船舶等の漂流物の港湾開口部における拡散および挙動に関する実験^{9), 10)}、エプロン上におけるコンテナの漂流特性と衝突力に関する実験¹¹⁾、船舶の漂流シミュレーションの検討¹²⁾がある。しかしながら、船舶等の漂流物が漂流し、津波とともに陸上に乗り上げた

場合に対する検討例はない。

そこで本研究では、津波により海域を漂流し陸上に乗り上げる漂流物挙動に対するモデル構築を目的に、実験および計算による基礎的検討を行った。

2. 漂流実験

(1) 実験装置

津波による船舶の漂流挙動を把握する目的で、平面水槽を用いた水理模型実験を実施した。図-1に示す実験水槽内に海底部、護岸、陸上部の模型を設置し、護岸周辺に船舶模型を浮かべ、これに津波実験装置¹³⁾により造波された長周期波を作用させることにより、漂流現象を模擬した。実験は、フルード則に従い縮尺を1/100として実施した。

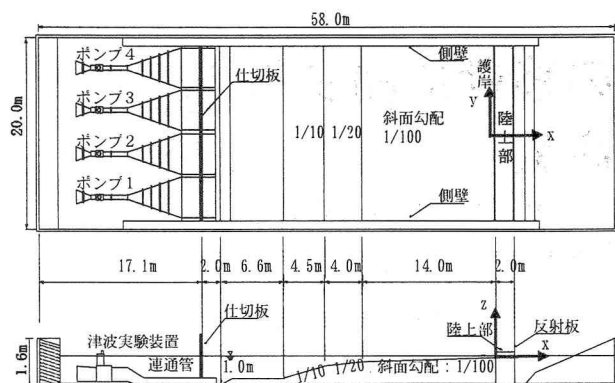


図-1 平面実験水槽と造波装置

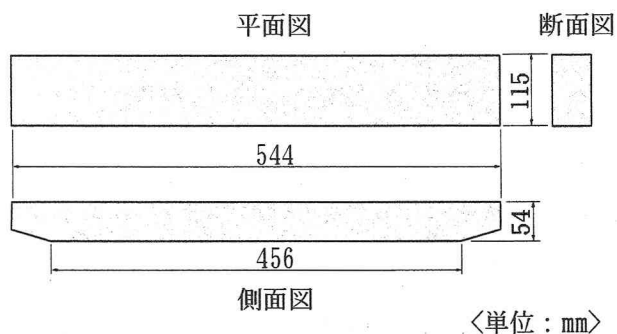


図-2 船舶模型形状

(2) 船舶模型

船舶模型は、タンカー船を参考に形状を単純化し、図-2に示すように船首尾方向に対称な箱型浮体形状とした。船舶模型の諸元を表-1に示す。船舶模型は重錘を載せることにより、吃水を軽荷時と満載時の2種類設定した。船舶模型の外観を写真-1に示す。

(3) 漂流挙動計測と実験条件

船舶漂流挙動は、船舶の6自由度の変位を非接触3次元動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。ステレオビデオトラッカーは、2台のCCDカメラで空間内の点を視準し、その時々刻々の画像データから、漂流物に取り付けたマーカの動揺量3成分を計測することにより対象とする漂流物の動揺量を求めることのできる計測機器である。船舶の動揺量は、このシステムより得られる軸方向変位データの時系列に対し池谷ら(1988)¹⁴⁾の方法を参考に重心回り6成分について求めた。

船舶初期設置位置は陸上部護岸から2m離れた地点とした。実験は、船首尾方向が波向きに対して0、45、90度の3通りを対象とし、異なる津波に対する漂流挙動を計測した。

津波条件としては、wave1(波高7.5cm, 周期30秒)とwave2(波高10cm, 周期90秒)の2波を対象とし、船舶初期位置周辺の水位変動と流速変動(水平2成分)を計測した。

表-1 船舶模型の諸元

寸法	項目	軽荷時	満載時
	長さ(cm)	54.4	
	幅(cm)	11.5	
	高さ(cm)	5.4	
	喫水(cm)	2.2	4.0
	気中重量(kg)	1.28	2.41

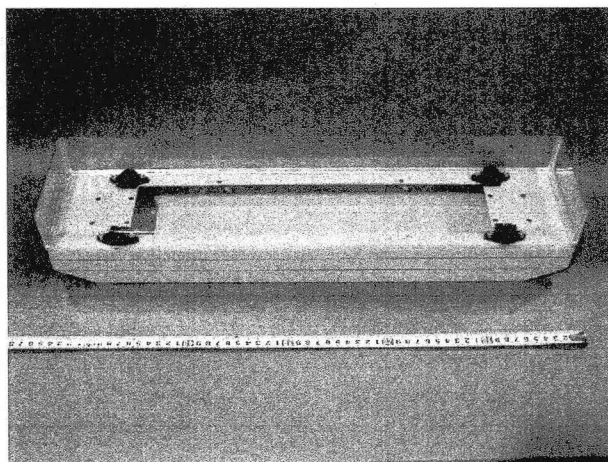


写真-1 船舶模型

(4) 漂流実験結果

図-3は、陸上部護岸から3.5m離れた地点における水位と流速変動の時刻歴波形の第一波押し波部分である。津波波形はwave2の場合であり、同一地点において7回計測した結果である。実験波形はほとんど一致し、再現性は良好である。最大値と比較した場合、水位は±1%、流速は±5%の差である。

漂流実験状況として、波向に対し船舶の初期設置角度が45度の場合における3秒毎の定点観測写真を写真-2に示す。船舶は初期設置角45度を保ち、護岸に向かって漂流し陸上へ乗り上げていることが確認できる。船舶が陸上へ乗り上げる15sの写真では、時計回りに僅かに回

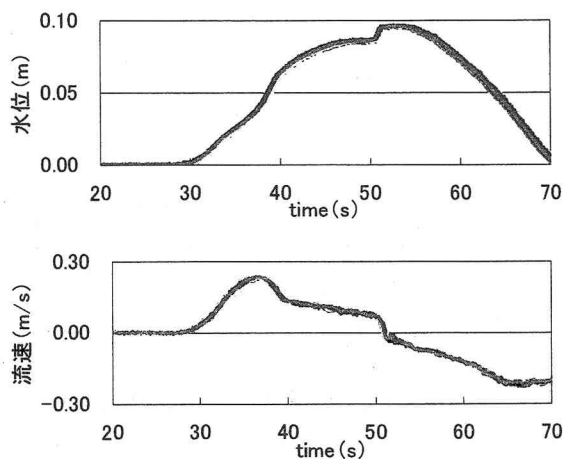


図-3 水位・流速時刻歴波形

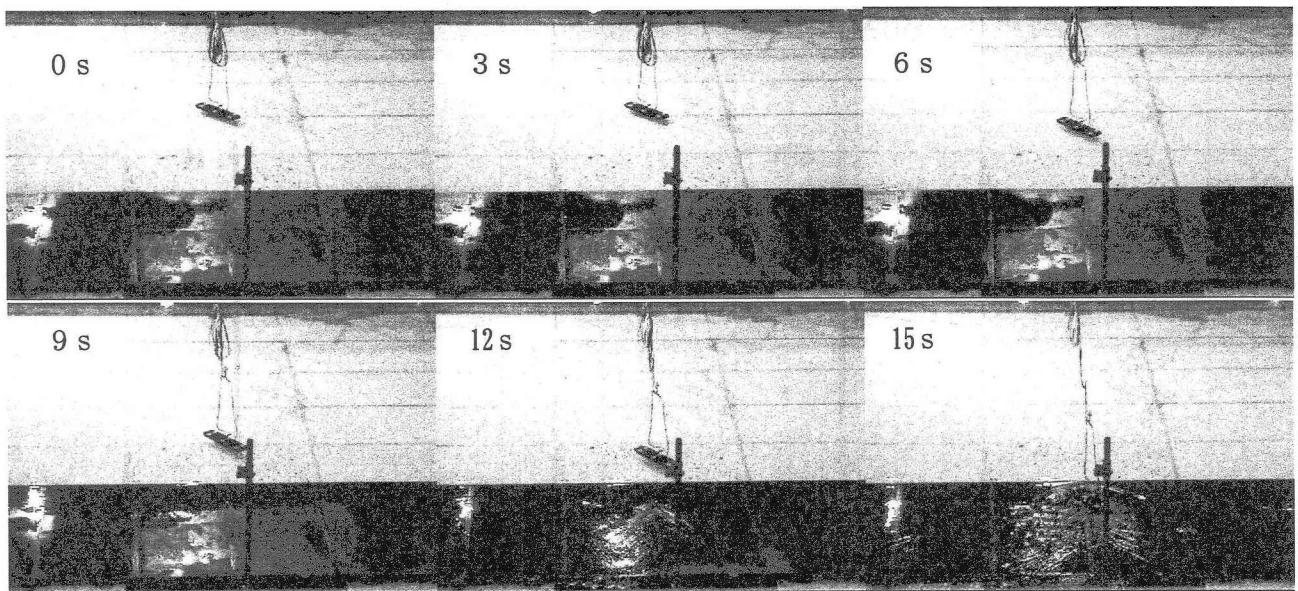


写真-2 船舶の漂流状況 (初期設置角度45度の場合)

転している状況が確認できる。また、陸上部における水の濡れ状況から、津波は9 sの時点で既に遡上しているが、船舶はそれより遅れて護岸に乗り上げる様子が良く理解できる。

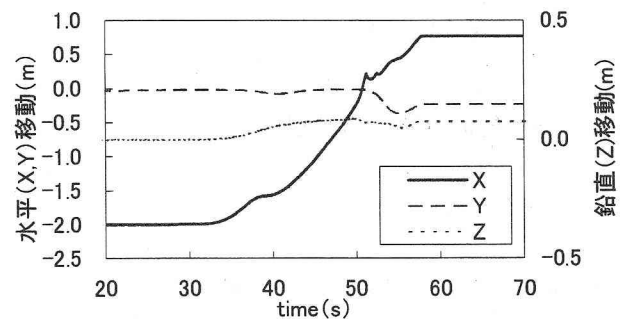
図-4に船舶の波向きに対する初期設置角度0, 45, 90度, wave2, 軽荷時のときの船舶移動量を示す。空間座標X軸は岸向きを正とし護岸位置を原点, Y軸は沖側から見て左手(図-1上向き)を正とし水槽の中央を原点, Z軸は鉛直上向きを正とし静水面を原点としている。

0度の場合のX方向は32秒付近から船舶が移動を開始し, 58秒付近で移動が停止していることが確認できる。Z方向はその時間帯に対応して, Z軸正方向に移動している。津波の水位上昇に対応していると考えられる。45度の場合のX方向は32秒付近から船舶が移動を開始し, 52秒付近で移動が停止している。Y方向は写真-2でもわかるがほとんど変位していない。Z方向はその時間帯に対応してZ軸正方向に移動している。90度の場合のX方向は32秒付近から船舶が移動を開始し, 他の角度よりも早く48秒付近で移動が停止する。Y, Z方向は, 45度の場合と同様の傾向である。

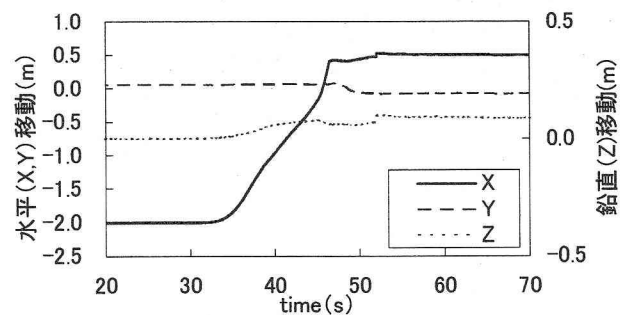
0度の場合にはX方向移動の傾きが他の角度より緩やかであり, 津波が作用する面積, すなわち流体力の大きさが異なるため移動速度に違いが生じたと考えられる。

図-5は0度, wave2の場合における船舶の水平方向移動に対する軌跡であり, 実験は軽荷時3回と満載時4回実施した。軽荷時は3回とも陸上へ乗り上げるが, 満載時は4回とも乗り上げず引き波により沖側に漂流する結果となった。満載時の場合は重量が重いため移動速度が遅く, 護岸からの反射により護岸に到達せず沖側へ漂流したと考えられる。

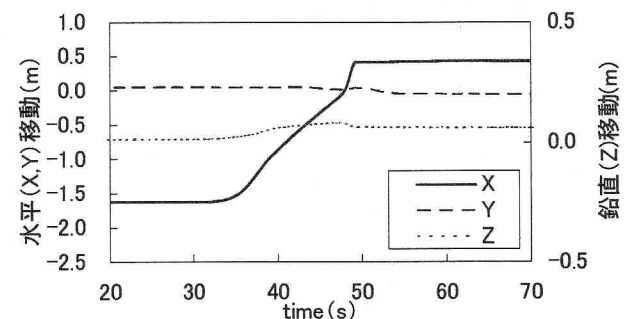
実験のばらつきは試行が回数少ないため評価できないが, 図-5に示すように, 軽荷時はほぼ直進する傾向があり, 満載時は反射波や引き波の影響によりばらつきが大きくなる傾向が見られる。ばらつきは流況場と関係し



(a) 0度

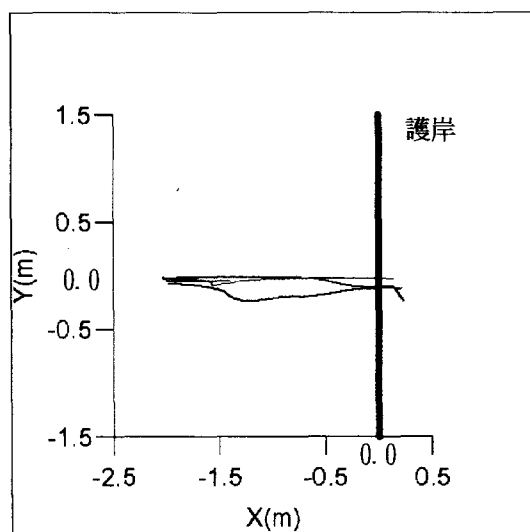


(b) 45度

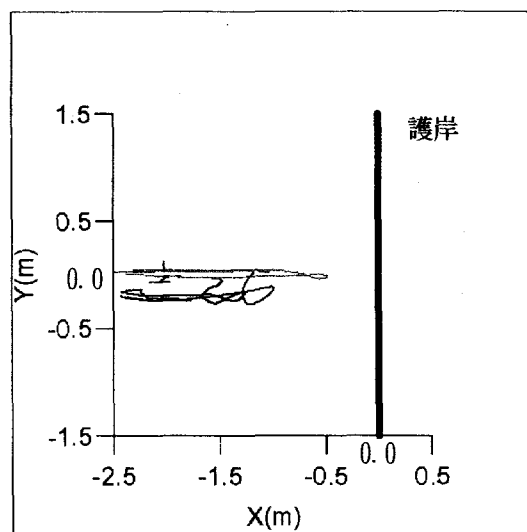


(c) 90度

図-4 船舶移動の変化



(a) 軽荷時



(b) 満載時

図-5 XY平面における漂流の軌跡

ており、今後の検討課題である。

3. 津波数値計算の再現性

(1) 津波計算方法

漂流物の外力となる津波の計算方法としては、現地計算へ適用することも踏まえ、計算負荷の大きい手法ではなく、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方法を採用した。すなわち、浅水理論に基づく平面2次元計算とした。計算は、スタグガード・リーブフロッグ法により差分化して解く一般的な手法を用いた。計算格子間隔は2.5cm、計算時間間隔は0.005秒として計算を行った。

沖側境界からの入力波は、図-1の1/100斜面勾配の開始位置で計測された水位と流速波形を用い、線流量として入射した。

(2) 津波計算結果

浅水理論による計算の精度を確認するため、実験の再現計算を実施した。水位変動と流速変動に対する実験と計算の比較結果を図-6に示す。津波条件は、wave2（波高10cm、周期90秒）の場合である。また、波形の比較位置は、船舶の初期設置位置であり、護岸から沖側に2m離れた地点である。

水位に関して、実験と計算は良く一致している。流速の場合も両者は概ね一致しているが、引き波後から第2波に至る80～90秒付近の時間帯で計算の方が小さい結果となった。第2波は第1波と比べると水深が浅くなり引き波による逆流状態で伝播するため、波は前傾化する。このような条件に対しては、分散項を考慮した計算等の検討が必要であるが、本研究は陸上に乗り上げる漂流物の検討が主な目的であるため、60s前後までの精度がより重要となる。80～90秒付近の現象については、今後の

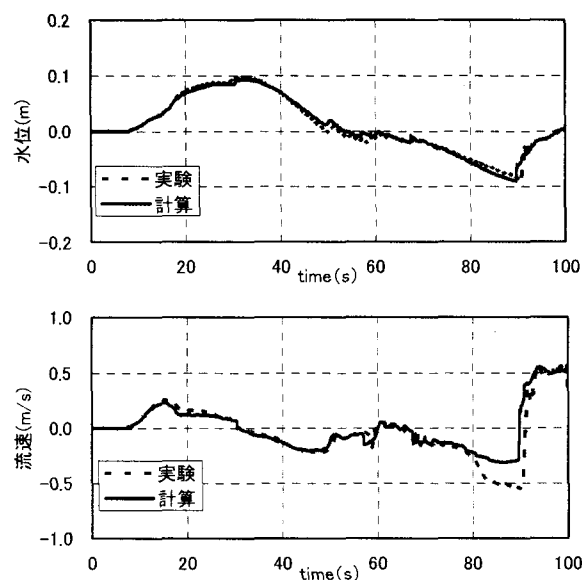


図-6 津波数値計算による水位・流速波形

課題としたい。

4. 漂流計算の適用性

(1) 漂流計算方法

船舶の漂流計算においては、漂流挙動だけではなく船舶と港湾・海岸構造物との衝突も生じる。また、船舶等の漂流物が港外から防波堤を乗り越え港内に侵入する場合や港湾内から護岸上へ乗り上げる場合も、被害程度が甚大であるため、精度よく再現される必要がある。さらに、先の実験でも観察されたように、船舶の回転も重要な要素である。漂流計算では、このような様々な挙動に対しても適用可能な方法を適用する必要がある。

そこで、漂流物と構造物との接触判定を容易に考慮で

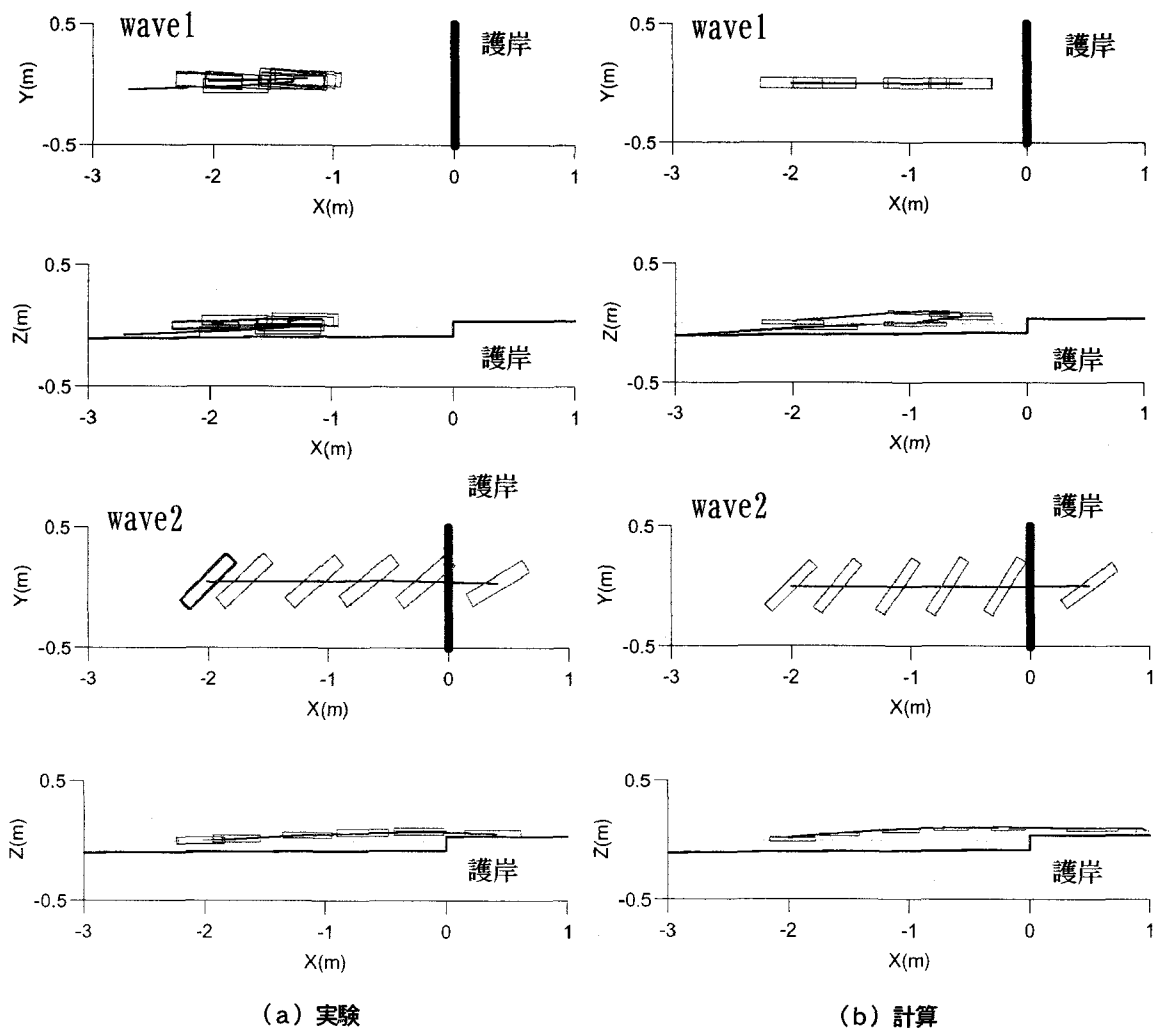


図-7 船舶の漂流移動の比較

き、消波ブロックの3次元的な挙動^{15), 16)}や波浪場における防波堤の挙動計算^{17), 18)}に適用されている個別要素法

(DEM) による計算を行った。通常の個別要素法は、円(球)形要素であるため、船舶を含め各種漂流物をモデル化することが困難である。そこで漂流物は、複数の要素を引張力に抵抗できるバネ(間隙バネ)で連結し、自由な要素形状を表す目黒ら(1998)¹⁹⁾の手法によりモデル化した。間隙バネで連結された複数の要素は、一つの要素として剛体的に運動する。船舶の模擬に要した要素数は、200個である。船舶漂流計算に必要な外力場は、先の浅水理論による平面2次元津波計算法による水位と水平流速2成分の出力結果を用いる。津波による船舶への作用力(x方向)には、次式の本・モリソン式を適用する。

$$F_x = C_M \rho V \frac{\partial u}{\partial t} + C_D \frac{\rho u^2}{2} A_x \quad (1)$$

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(断面積)、 C_M と C_D はそれぞれ付加質量係数(慣性力係数)、抗力係数を表す。

DEMによる漂流計算では、水平流速値からモリソン式により波の作用する面の船舶模擬要素に対し、流体力

を作用させて水平面内の運動を計算する。鉛直方向の運動は、津波計算結果である水位変動に伴う浮力の変化、重力および抗力を要素への作用力として計算した。

C_D 、 C_M は流向により変化させる方法があるが、本検討では、流向によらず C_D 、 C_M とも1.0で一定とした。係数を2.0等に設定した計算も実施したが、漂流計算結果に大差はなかった。

また、回転の運動方程式も計算しているが、付加慣性モーメントは考慮していない。

(2) 漂流計算結果

津波の陸上遡上に伴い海域に位置する船舶が護岸へ乗り上げる場合における漂流挙動の再現性を確認するため、漂流実験の再現計算を実施した。図-7に漂流実験と計算結果を示す。wave1は波高が小さく周期が短いため陸上への越流量が少ない場合である。実験と計算とも波の方が速く伝播するため、船舶は反射波により護岸に衝突せず引き波により沖側へ移動した。また、船舶は津波の一方流れによりほぼ直進した。その傾向は実験の方が顕著である。一方wave2では、波高が大きく周期が長いいため越流量も多く、船舶は容易に護岸に乗り上げた。この傾向は初期角度によらず同様であった。実験と計算両

方とも護岸に乗り上げるときに多少回転する傾向が確認でき、計算は実験を良く再現できている。護岸に乗り上げるときに回転する理由としては、護岸を越流すると流速が速くなり、船首と船尾で作用する流体力が異なるためと考えられる。

5. まとめ

本研究で明らかとなった結果を以下にまとめる。

- 1) 水理実験より船舶運動と水位変動との間には時間遅れがあること、船舶の鉛直方向運動は津波水位変動に、平面内運動は流況場に対応した運動となることがわかった。
- 2) 船舶の挙動は、船舶の波向きに対する初期の設置角度により大きく異なり、作用する流体力が大きくなる角度ほど漂流速度が速い。
- 3) 浅水理論による平面2次元津波計算とDEMを基にした船舶漂流シミュレーションモデルを構築した。
- 4) 構築した漂流モデルは船舶の陸上への乗り上げが再現可能である。
- 5) 構築した漂流モデルは、連結要素でモデル化するため、車両等の他の漂流物へも容易に適用可能である。

今後の課題は以下のとおりである。

- 1) 実験で確認されたばらつきに関する検討が課題である。
- 2) モリソン式及びその係数の設定に対する検討が課題である。

今後は、複雑な流れ場として港湾内における漂流について、上記課題も含めて検討する予定である。また、船舶以外の漂流物への適用性に関する検討も実施したいと考えている。

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。

参考文献

- 1) 佐藤慎司・堀川清司：津波による漂流物の橋脚への衝突力，第36回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，pp. 789-790，1981。
- 2) 入江靖・三村信男・堀川清司：砕波した津波による漂流物の衝突力，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，pp. 235-236，1983。
- 3) 松富英夫：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. 111-127，1999。
- 4) 池野正明・田中寛好：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第50巻，pp. 721-725，2003。
- 5) 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫：津波による木材の流動，海岸工学論文集，第29巻，pp. 491-495，1982。
- 6) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算，海岸工学論文集，第30巻，vol. 30，pp. 594-597，1983。
- 7) 中川一・高橋保・池口正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究，水工学論文集，第37巻，pp. 379-384，1993。
- 8) 中川一・高橋保：大野川から別府湾に流出した流木群の挙動解析，水工学論文集，第45巻，pp. 931-936，2001。
- 9) 高野英之・藤間功司・長屋昌弘・嶋原良典：2次元波動場における漂流物の拡散現象に関する水理実験，第32回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集第2部，2005。
- 10) 長屋昌弘・嶋原良典・藤間 功司：津波による湾内における漂流物の挙動に関する実験的研究，第32回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集第2部，2005。
- 11) 水谷法美・山口聡・宮島正悟・富田孝史：津波によるエプロン上のコンテナの漂流特性とその衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp. 736-740，2004。
- 12) 小林英一・越村俊一・久保雅義：津波による船舶の漂流に関する基礎研究，秋季造船三学会連合大会関西造船協会講演概要集，pp. 9-12，2004。
- 13) 岩瀬浩二・朝倉良介・池谷毅・金戸俊道・藤井直樹：ポンプ式津波造波装置の開発，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，第56巻，pp. 564-565，2001。
- 14) 池谷毅・今井貫爾・上野弘道・吉田孝男：写真測量を応用した浮体動揺計測システム，日本写真測量学会，A-3，pp. 11-14，1988。
- 15) 中瀬仁・藤谷昌弘・石川博之・茂木寛之：拡張個別要素法による三次元消波工モデルを用いた地震応答シミュレーション，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(B)，pp. 650-651，1996。
- 16) 中瀬仁・東均・武田智吉・嶋田昌義・志村聡：DEM-FEMハイブリッド解析アルゴリズムの提案，地震工学研究発表会講演論文集，Vol25-1，pp. 457-460，1999。
- 17) 藤井直樹・興野俊也・安田勝則・大熊義夫：個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算，海岸工学論文集，第48巻，pp. 801-805，2001。
- 18) 藤井直樹・興野俊也・安田勝則：個別要素法による消波ブロック被覆堤の変形計算，海岸工学論文集，第49巻，pp. 761-765，2002。
- 19) 目黒公郎：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析，地震研究所彙報，Vol. 63，pp. 409-468，1988。