MPS法による船舶の岸壁への乗り揚がり挙動に関する研究

A STUDY ON BEHAVIOR OF GROUNDING ON A WHARF OF VESSELS USING THE MPS METHOD

増田光弘[1]・増田光一[2]・居駒知樹[3]・鈴木雄太[1]・大塚文和[4]
Mitsuhiro MASUDA, Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA,
Yuta SUZUKI and Humikazu OTSUKA

[1]大学院生　日本大学大学院　理工学研究科海洋建築工学専攻
（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）
[2]工博　日本大学教授　理工学部海洋建築工学科
[3]博士（工学）　日本大学専任講師　理工学部海洋建築工学科
[4]正会員　工博　日本大学助教　短期大学部建設学科

It is extremely important to estimate damage when tsunami disaster for vessels in order to prevent or reduce damage of vessels. Overthrow of vessels and grounding on a wharf concern on when vessels are moored in harbors. This paper reproduces behaviors of vessels moored near wharfs due to tsunamis by using the moving particle semi-implicit method (MPS). The two dimensional MPS method program code has been developed and the validity of the program is proven by comparing with model test.

Solitary waves have been applied to simulated tsunamis and the model experiments. A box like model is used to a floating structure in numerical simulations using the two dimensional MPS method. The present numerical results are compared with the experimental results and the applicability of the MPS method is discussed. In addition, the mooring force was considered. The behavior of grounding on a wharf of moored vessel is examined. As a result, the usefulness of this numerical technique is confirmed.

Key Words : *Tsunami, Large wave, Vessel, Grounding on a wharf, MPS method, Mooring force, Water tank experiment*

1．緒言

津波や高潮のような大波高の大波が港湾内に浸入してきた場合，岸壁付近に係留された船舶は係留索の破断や岸壁への乗り揚がり，転覆といった事態が起り得る．これらの現象は，船舶被害のみならず，陸上の建造物やそこに暮らす人々に対して大きな影響を及ぼすものである．そのため，大波による岸壁近傍の船舶の挙動予測をより正確に行なうことは，防災，あるいは減災の観点から極めて重要であるといえる．しかし，船舶の岸壁への乗り揚がり現象は，極めて非線形性の強い現象であり，実験的にも数値計算的にもその挙動の予測が容易ではない．

本研究ではラグランジュ的な手法であり，界面の大変形のような強非線形な現象を解析することのできる数値計算法であるMPS法を，船舶の岸壁への乗り揚がり挙動解析へ適用することを試みる．MPS法は船舶の岸壁への乗り揚がりといった現象を比較的容易に解析することができる．例えば，後藤ら[3]はMPS法を用いて，浮体群を伴った津波氾濫流と構造物の衝突過程のシミュレーションを行なっている．また，五十里ら[4]津波氾濫による桁橋の被災過程に関してのシミュレーションも行なっている．これらの研究からMPS法が大波中の船舶挙動を解析できるということが確認できる．そこで本研究では浮体運動を解析可能な2次元MPS法プログラムコードを開発する．そして，浮体乗り揚がりの水槽実験を実施し，本数値シミュレーション法の妥当性を検証する．これまで浮体の乗り揚がり挙動に関して，MPS法と水槽実験を比較・検討した研究は行なわれていない．また，係留力を考慮した2次元問題における岸壁係留船舶の挙動（津波などの大波中）に関する考察も行う．

2．MPS法

MPS法は，越塚ら[1]によって開発された数値解析

法であり，勾配や発散といった微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用意し，これらを微分方程式中の微分演算子に適用することによって離散化する．離散化には粒子間距離を変数とした重み関数を用いる．また，圧力を陰的に解き，他の物理量を陽的に解く半陰的解法である．MPS法の計算アルゴリズムは各時間ステップの仮の時刻kの位置$\vec{r}_i^{\,k}$，速度$\vec{u}_i^{\,k}$，圧力P_i^kが分かっているとして新しい時刻k+1の位置$\vec{r}_i^{\,k+1}$，速度$\vec{u}_i^{\,k+1}$，圧力P_i^{k+1}を計算する．

MPS法の支配方程式は以下の連続の式とナビエ－ストークス方程式である．

$$\frac{D\rho}{Dt}=0 \tag{1}$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt}=-\frac{1}{\rho}\nabla P+\upsilon\nabla^2\vec{u}+g \tag{2}$$

MPS法は非圧縮性流れである．(1)の連続の式は時間に対して密度が一定であることを表している．式(2)のナビエ－ストークス方程式の左辺は速度ベクトルに対するラグランジュ微分であり，右辺第一項は圧力勾配項，第二項は粘性項，第三項は重力項である．υは動粘性係数である．以降の離散化及びモデル化は越塚ら[1]の論文に詳細が記載されているため，ここでは割愛する．

3．浮体運動のモデル化

本研究では浮体モデルを粒子の連続体として表現し，流体と相互作用させつつ，剛体として運動させる．

まず，N 個の粒子で表された浮体モデルの初期位置での浮体形状，重心の座標 r_g，慣性モーメント I を求める．

$$r_g=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}r_i \tag{3}$$

$$I=\sum_{i=1}^{N}m\left|r_i-r_g\right|^2 \tag{4}$$

この時，粒子 i の座標を r_i，粒子 1 個の質量を m とする．慣性モーメントは時刻ゼロで計算し，以降は同じ値を用いる．

剛体モデルと流体との相互作用はあまり大きくないと仮定し，非圧縮流れの半陰的アルゴリズムの中で陽的に相互作用させる．第一段階として，各時間ステップにおいて流体粒子と剛体粒子を区別することなく，非圧縮性流れの計算を行ない，新しい時刻k+1 での速度$\vec{u}_i^{\,k+1}$と位置$\vec{r}_i^{\,k+1}$を求める．ここで，非圧縮性流れの計算によって各剛体粒子は加速度$\vec{a}_i^{\,k}$を受けて(5)，(6)式のように流体として運動する．

$$\vec{u}_i^{\,k+1}=u_i^k+\Delta t\vec{a}_i^{\,k} \tag{5}$$

$$\vec{r}_i^{\,k+1}=r_i^k+\Delta t\vec{u}_i^{\,k+1} \tag{6}$$

この時，剛体粒子も流体粒子と同様に運動するため剛体粒子の相対的な位置関係が変化してしまう．しかし，クーラン条件により時間刻み幅は大きくないため，変化はあまり大きくない．また，加速度$\vec{a}_i^{\,k}$は浮体モデルの重心の加速度であり，(7)式のように各剛体粒子が受ける加速度の平均値である．

$$a_g^k=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\vec{a}_i^{\,k} \tag{7}$$

次に剛体粒子間の相対位置関係を元に戻す．この時，浮体モデルの重心の座標変化量 $r_g^{'}$と回転角の変化量$\theta^{'}$を保たれるようにする．そして剛体粒子の位置の修正が終了したら次の時間ステップに進む．尚，浮体モデルを弾性体として扱うことによって，浮体の破壊や変形を取り扱うことができるが本研究での浮体モデルは浮体の乗り揚がり挙動を評価するという目的から剛体とした．

$$\vec{r}_i^{\,'}=\vec{r}_i^{\,k+1}-r_i^k \tag{8}$$

$$r_g^{k+1}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\hat{r}_i^{k+1} \tag{9}$$

$$r_g^{'}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\hat{r}_i^{'} \tag{10}$$

$$\theta^{'}=\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{N}mr_i^{'}\times\left(r_i^k-r_g^{k+1}\right) \tag{11}$$

$$r_i^{'}=r_g^{'}+\begin{bmatrix}\cos\theta^{'}-1 & \sin\theta^{'}\\ -\sin\theta^{'} & \cos\theta^{'}-1\end{bmatrix}\left(r_i^k-r_g^{k+1}\right) \tag{12}$$

$$u_i^{k+1}=\frac{r_i^{'}}{\Delta t} \tag{13}$$

$$r_i^{k+1}=r_i^k+r_i^{'} \tag{14}$$

4．浮体運動の検証

(1) 水槽実験

日本大学理工学部が有する2次元水槽にて浮体模型の岸壁への乗り上げ実験を実施した．水槽長さは30m，幅0.6mで造波位置の水深は0.67mで岸壁及び浮体模型が設置される水深は0.17mとした．使用した模擬津波には孤立波を採用した．造波した孤立波は水槽内の斜面を駆け上がることにより，浮体に入射する以前に変形する．ただし分散性はほとんどないため，細かく波が分かれることはなく，形状を保ったまま進行する．

水槽実験の配置図は**図-1**のようになっている．波

高計H1及び流速計V1は岸壁手前0.3mの位置に設置し，H2，V2は岸壁後方0.25mの位置に設置した．H3，V3は岸壁前方3.0mの位置に設置した．浮体模型は幅23cmで，奥行きは47cmであり，2次元とはいいつつも浮体と水槽両側面の間に6cm程度のクリアランスがある．水面から岸壁上端部までの高さは0.1mである．また，浮体模型は発泡スチロール製ブロック内部に錘が乗せられており，模型質量は2.5kgである．浮体模型の喫水は2.5cmである．

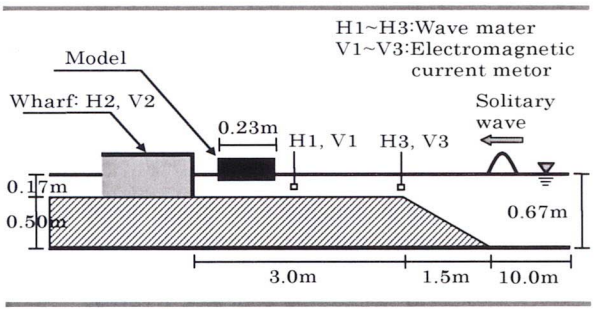


図-1 実験装置

(2) 数値計算

前述した2次元MPS法による数値計算を行なった．計算対象は，前述した2次元水槽実験による浮体模型の岸壁乗り揚げであり，実験の再現を行った．計算モデルの諸元は，図-1と同様である．本計算での粒子間距離は5mmであり，計算に要した総粒子数は24,100個である．造波境界にはピストン式を採用した．そのため，水槽実験と同様の模擬津波を造波するにあたり，実験時に図-1のV3の位置で計測した水平流速データを時間積分してピストン面の水平変位として入力した．

(3) 結果及び考察

実験結果と計算結果の浮体運動に関して比較・検証を行なった．造波境界の性質上，造波特性が影響するため，岸壁手前の水位が実験値に近くなるように計算時のV3の位置に設置したピストンのストロークは調節されている．ここでは孤立波のH3の位置での波高が0.04m，0.06mの場合での比較・検討を行なった．

本計算の諸元は図-2のようになっており，浮体模型の中心Pの軌跡を比較した．グラフの横軸のゼロの位置が岸壁端と浮体中心から引いた横軸の交点となっている．図-3は浮体の中心点Pから岸壁までの離岸距離bを0.115mとした浮体モデルに波高0.04mの孤立波を入射させたケースについて実験とMPS法による数値計算を比較したグラフであり，図-4は離岸距離が0.23m，波高が0.04mであり，図-5は離岸距離が0.115m，波高が0.06m，図-6は離岸距離が0.23m，波高が0.06mの場合のグラフである．

これらの比較からどのケースも岸壁に乗り上がる際の浮体の軌跡がよい一致を示していることが確認できる．特に岸壁に乗り揚がるまでの軌跡に関しては全ケースで非常に良い一致を示している．図-3，図-5，図-6の岸壁に乗り揚がってからの軌跡を水槽実験とMPS法で比較してみるとMPS法の軌跡は実験の軌跡と比較すると0.01mほど高く評価される傾向にあることが確認できる．これはMPS法では完全な2次元であるのに対して，水槽実験では浮体と水槽側面両側に0.06m程の隙間が存在するため，浮体の両サイドに水が逃げる余裕があり，その結果，実験での鉛直変位が下がったものと考えられる．図-4は岸壁に乗り揚がらず，浮体底面を岸壁に引っ掛けて元の位置に戻っていくケースである．この時，MPS法の結果の方が滑らかに岸壁から落ちていっている．これはMPS法では摩擦を考慮していないためである．これらのことから本計算法は浮体の乗り揚がりの軌跡を精度よく解析することができるといえる．

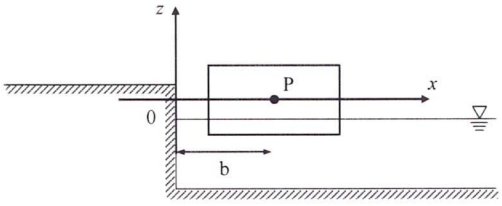


図-2 浮体モデルの配置

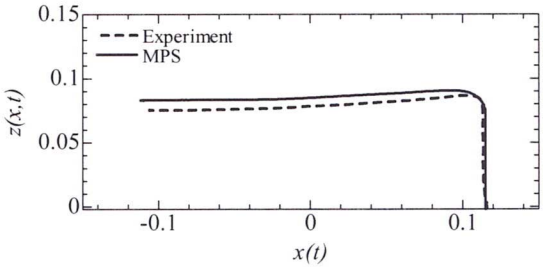


図-3 乗り揚がりの軌跡 (H=0.04m, b=0.115m)

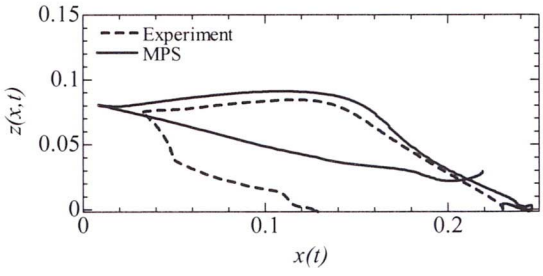


図-4 乗り揚がりの軌跡 (H=0.04m, b=0.23m)

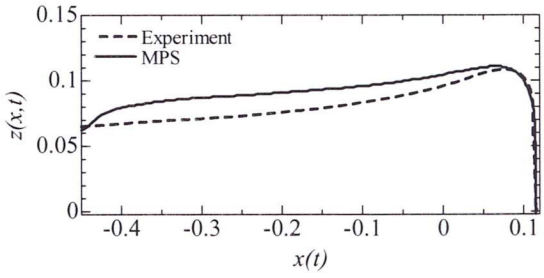


図-5 乗り揚がりの軌跡 (H=0.06m, b=0.115m)

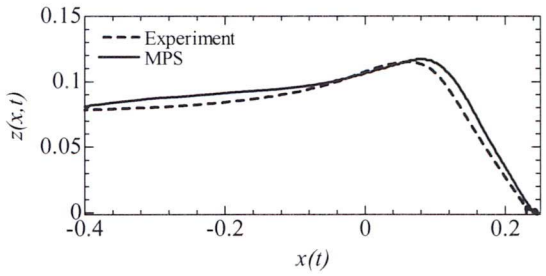


図-6 乗り揚がりの軌跡 (H=0.06m, b=0.23m)

5．係留力のモデル化

岸壁に係留された船舶の津波による乗り揚がり挙動を解析するため，係留力のモデル化を行なう．

MPS法は粒子の運動方程式を解き，粒子そのものが移動するラグランジュ的な数値計算法である．よって，係留力を考慮した運動方程式を別途解かなくても粒子の運動を拘束することで係留されている状態を表現することができると考えられる．

そこで本研究では**図-7**示すように，係留索を模擬した拘束条件を浮体モデルの係留点と係留索の基点となる係留点との2点間に作用する線形ばねとして導入することで表現した．線形ばねは，(15)式のように係留索張力F_rをばね定数k及び係留点間の距離rによって表すことができる．そして，(16)式のようにMPS法の半陰的なアルゴリズムにおける陰的な圧力勾配項∇P^{k+1}によって生じる速度の修正量u'である運動方程式に係留索張力F_rを付加することで係留力をモデル化する．本係留力は係留点とした浮体モデルの任意の粒子iのみに付加する．

$$F_r = kr = k \cdot \sqrt{x_r^{\,2} + z_r^{\,2}} \tag{15}$$

$$\vec{u}_i' = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \nabla P_i^{k+1} + F_r \tag{16}$$

係留索張力は(17)，(18)式のようにx方向，z方向成分に分解したものをそれぞれ運動方程式に導入する．よって，(16)式は各方向成分の速度の修正値となるので，(19)，(20)式のようになる．

$$F_x = F_r \cos\theta \tag{17}$$

$$F_z = F_r \sin\theta \tag{18}$$

$$\rho_0 \frac{du_i'}{dt} = \frac{dP_i^{k+1}}{dx} - F_x \tag{19}$$

$$\rho_0 \frac{du_i'}{dt} = \frac{dP_i^{k+1}}{dz} - F_z \tag{20}$$

上記のモデル化によって，別途運動方程式を解かなくても係留条件を付加することができる．本手法を用いれば，カテナリー係留のような非線形な係留索も運動方程式に付加する係留力のモデル化さえできれば比較的容易に表現することができる．

また，本モデル化における係留索の破断は，線形ばねによる荷重が想定される破断荷重を超えた時刻以降は係留索が破断したとし，その時刻以降の浮体モデルの計算に係留条件が作用しないものとすることで表現した．

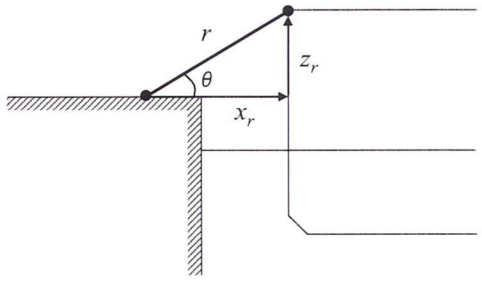


図-7 係留の状態

8．岸壁近傍の係留船舶の挙動解析

(1) 緒言

大型船舶を対象として岸壁に係留された船舶の津波中応答の解析を行った．計算モデルの諸元は**図-8**，**表-1**のようになっている．本研究での船舶モデルは船型500 DWTの小型貨物船及び3,000 DWTの中型船舶モデル，10,000 DWTの大型貨物船を対象とした．造波境界には前節までと同様のピストン式を導入し，使用した模擬津波はソリトン的性質を有する孤立波とした．平均粒子間距離は0.5mとした．

また，実際の係留索は**図-7**のように係留点間で直線的に張られているわけではなく，**図-8**のように弛んだ状態で張られている．そこで本研究では，係留索の弛みを表現するために，係留点間の距離が係留索長さ以上になるまで係留索張力は作用しないとして係留索を設定した．

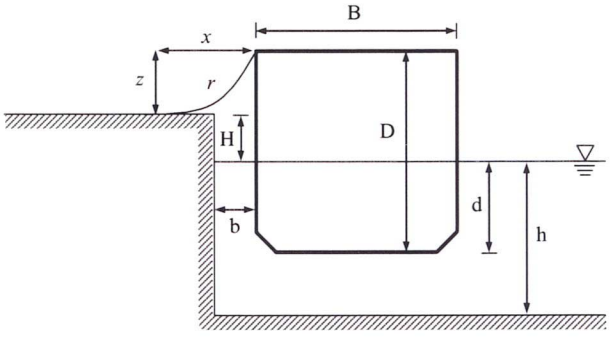


図-8 浮体モデル及び係留索の配置

表-1 計算条件

DWT	500 [t]	3,000 [t]	10,000 [t]
Particle numbers	14,573	14,799	15,087
Particle numbers of structure	180	582	1,096
Density of structure's particles	567.6 [kg/m^3]	474.5 [kg/m^3]	397.5 [kg/m^3]
Structure breadth [B]	7.0 [m]	13.0 [m]	18.0 [m]
Structure depth [D]	6.5 [m]	11.0[m]	15.5 [m]
Structure draft [d]	3.0 [m]	5.0 [m]	7.0 [m]
Water depth [h]	11.0 [m]	11.0 [m]	11.0 [m]
Crown height [H]	1.5 [m]	1.5 [m]	1.5 [m]
Clearance [b]	0.5 [m]	1.0 [m]	1.0 [m]
Horizontal distance [x]	2.5 [m]	3.5 [m]	5.0 [m]
Vertical distance [z]	2.5 [m]	4.5 [m]	6.0 [m]
Mooring tether [r]	4.74 [m]	8.44 [m]	11.56 [m]
Spring constant	2.16×10^4 [N/m]	3.43×10^4 [N/m]	4.41×10^4 [N/m]
Breaking force	69.1 [N]	161.7 [N]	258.7 [N]

(2) 計算結果

本計算での模擬津波の岸壁手前20mの位置での水面最大上昇量は6.96m，流速は9.7m/secであり，岸壁遡上後20mの位置での水位は4.5m，流速は11.3m/secである．**図-9**，**図-11**，**図-13**は500 DWT，3,000 DWT，10,000 DWTそれぞれの船舶モデルの係留点間に作用する係留索張力を時系列でグラフ化したものである．**図-10**，**図-12**，**図-14**はそれぞれの船舶モデルのスナップショットを時刻毎に並べたものである．

500 DWTの小型船舶モデルは**図-9**を見てみると，係留索張力が33.3Paに到達した4.34秒後に係留索が伸びきり，4.4秒付近で係留索によって僅かに引き戻されるものの，すぐに係留索が破断し，4.54秒後に係留索張力が破断荷重を超え，係留索が破断している．**図-10**のスナップショットを見てもわかるように，津波によって押し上げられ岸壁に乗り揚がった船舶モデルは，陸上に遡上した津波によって陸域側に横倒しの状態で押し流される．このような現象が実際に起こった場合，500 DWTの船舶の全長は40m以上あることから，陸域に押し流される際に船体が大きく損傷するだけでなく，陸域の人々や建築物などに甚大な被害をもたらすと考えられる．

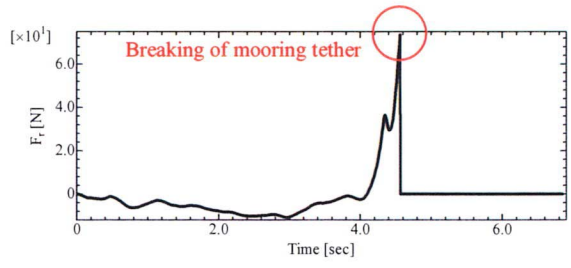
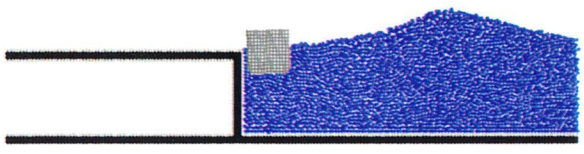
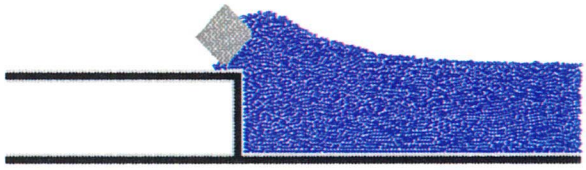


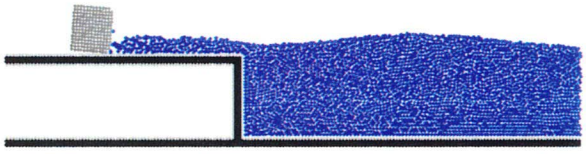
図-9 係留索張力 [DWT:500 t]



a) Time=4.20 [sec]



b) Time=4.60 [sec]



c) Time=5.00 [sec]

図-10 計算結果のスナップショット [DWT:500 t]

3,000 DWTの中型船舶モデルの場合，**図-11**を見てみると，係留索張力が122.7Paに到達した4.48秒後に係留索が伸びきり，そのまま伸びていった係留索は4.54秒後に破断している．**図-12**のスナップショットを見ると，係留索が破断し，岸壁上に押し上げられた船舶モデルは岸壁に乗り揚がった後，そのままの位置に留まる．実際にこのような現象が起こった場合，船舶が陸域に押し流されないため，陸域への被害は少ないと考えられるが，船底の損傷や岸壁付近の建築物への被害が考えられる．

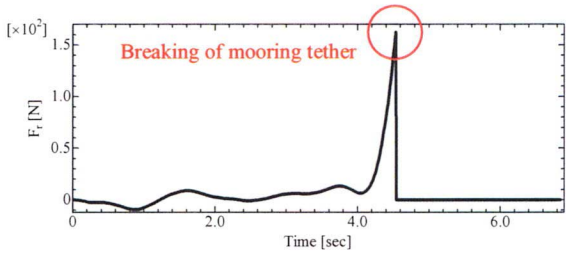
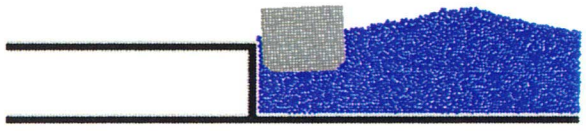
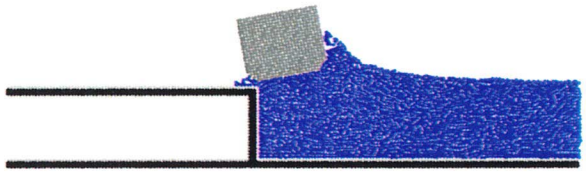


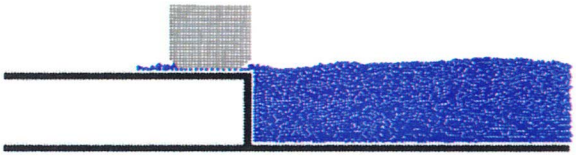
図-11 係留索張力 [DWT:3,000 t]



a) Time=4.20 [sec]



b) Time=4.60 [sec]



c) Time=5.10 [sec]

図-12 計算結果のスナップショット [DWT:3,000 t]

10,000 DWTの大型船舶モデルに関しても図-13を見てもわかるように係留索張力が130.3Paに到達した4.45秒後に係留索が伸びきり，4.62秒後に係留索が破断している．図-14のように係留索が破断した船舶モデルは岸壁角に落下した後，船底を岸壁に引っ掛けながら海面に落下していく．実際にこのような現象が起きた場合，船舶モデルが海面に落下するため，船舶が岸壁に乗り揚がることによる陸域の被害は少ないと考えられるが，岸壁及び船体への被害は大きいと考えられる．本研究からMPS法がこのような現象を詳細に解析できることが確認できた．

しかし，実際の船舶を想定した場合，破壊や変形を考慮する必要がある．また，実際の係留船舶の大波中の挙動を解析するためには前後に複数本張られた係留索の影響を考慮できるよう，3次元的な解析を行なう必要がある．これらのことから，今後さらなる検討を行なう必要がある．

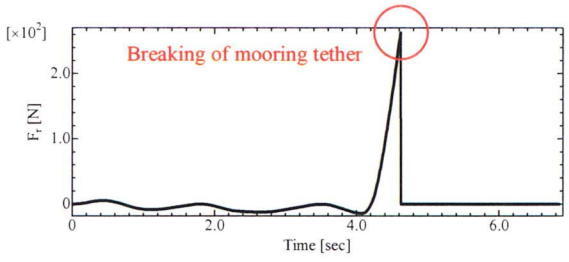
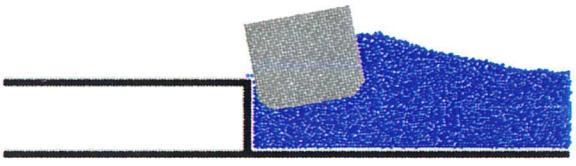
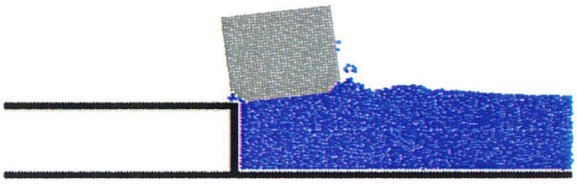


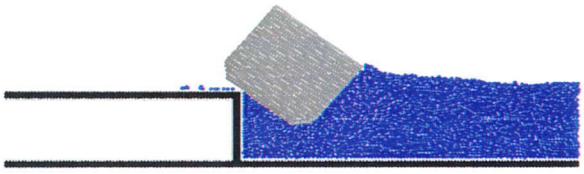
図-13 係留索張力 [DWT:10,000 t]



a) Time=4.30 [sec]



b) Time=4.65 [sec]



c) Time=5.20 [sec]

図-14 計算結果のスナップショット [DWT:10,000 t]

9．結言

本研究では大波による船舶の岸壁への乗り揚がりを解析することができる2次元MPS法プログラムコードを開発し，以下のような知見を得た．

1) 岸壁近傍での浮体の乗り揚がり挙動に関してMPS法と水槽実験とで比較を行った．その結果，両結果は非常によい一致を示した．
2) 岸壁に係留された船舶の津波中応答解析を行った．そして大波来襲時に起こる係留索の破断の有無や岸壁への衝突，岸壁への乗り上がりといった船舶の大波中挙動を解析し，船型の違いによる挙動の違いを検討すること可能とした．

本研究によって浮体の乗り揚がり挙動がMPS法と水槽実験でよい一致を示したことから，MPS法は大波による船舶の遡上問題に対して，有用な数値計算法であるといえる．

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究B及び笹川科学研究助成によって行われたことを付記いたします。

参考文献

1) S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid," Nucl. Sci. Eng., 123, pp.421-434, 1996
2) H. Maeda and T. Asanuma and K. Nishimoto and M. M. Tsukamoto and K. Masuda and T. Ikoma, "Numerical Analysis for Hydrodynamic Motions of Floating Structure Using MPS Method," *Proc. of OMAE'04,* 51435, 2004
3) 後藤仁志，五十里洋行，酒井哲郎，奥謙介；「浮体群を伴う津波氾濫流の3Dシミュレーション」，海岸工学論文集，第53巻，pp. 196-200，2006
4) 五十里洋行，後藤仁志；「津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション」，海岸工学論文集，第54巻，pp. 211-215，2007
5) （社）日本海難防止協会；海難防止の調査研究事業報告書 －地震に伴う津波に対する安全防災対策の調査研究－，1981