

## 論文の内容の要旨

氏名：村 田 一 城

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：MPS 法による津波中の浮体挙動および衝突力の推定に関する研究

2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した津波（ここでは 2011 年東北太平洋地震津波と呼ぶ）は、地震発生から約 30 分後に東北地方太平洋沿岸に襲来し、甚大な被害をもたらした。国土交通省や警察庁などの公的機関による報告を分析すると、津波がライフラインや社会基盤に及ぼした被害は、① 陸上構造物の倒壊、② 原油貯蓄施設からの燃料漏えいと火災の発生、③ 船舶乗り上がりによる座礁と港湾機能の損失、④ 漂流物による陸海の物流路の閉塞による復旧や経済活動の停滞に分けることができる。これらの①～④の被害の主な要因は、沿岸域に存在する船舶、コンテナ、家屋、車両等の漂流および衝突であり、沿岸域の津波被害の拡大は、漂流物の衝突によって生じていた。したがって、津波防災あるいは減災の対策を講じる上では、物体の漂流挙動や衝突現象を推定することが必要である。

物体間の衝突問題は、自動車や航空機などの衝撃設計を扱う分野では既に研究が進められている。一方で土木工学や船舶海洋工学分野における物体間での衝突問題への取り組みは、構造物に対するコンテナや木材等の衝突力推定に関する取り組みがなされているものの、大質量の船舶に関する詳細な衝突現象を扱った研究はほとんどない。この問題の解決策の一つとして模型実験が考えられるが、実機を用いた実験はもとより、妥当な現象再現が可能な縮尺模型実験であっても大規模となり、さらに船種や地形の考慮を検討するためには費用が膨大となる。

以上の問題に対して、浮体の漂流および衝突現象を予測する有力な手法として数値シミュレーションが挙げられる。特に、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は越塚らによって開発された非圧縮性流体のための数値解析手法であり、大変形した自由表面処理が格子法よりも容易な方法である。また、浮体一流体間に特別な境界条件を与えず波浪中浮体運動が解けることから津波中浮体挙動問題についても適用させやすい。したがって、建築物からの反射流の影響を無視できる柱やガントリークレーンのような形状の構造物と船舶の衝突現象を対象とした研究は既にある。しかし、大型船舶のような浮体と建築物の衝突現象には流体による相互作用が存在し、衝突する物体間の摩擦は浮体の運動に影響を及ぼすことから、これらを考慮していない既存の手法は衝突現象を予測するには十分とはいえない。

そこで本研究では、津波による浮体の漂流挙動および構造物との摩擦を考慮した衝突現象が予測可能な、流体-構造物の相互連成数値シミュレーション手法を MPS 法を用いて開発し、水槽実験や解析解との比較によりその妥当性を確認すると共に、陸上漂流中の浮体の基本的な漂流および衝突挙動特性を明らかにすることを目的とする。

本論の構成は次の通りである。

第 1 章は「序論」であり、研究背景、取り組むべき課題、研究目的を示した。

第 2 章は、「MPS 法による津波漂流物の挙動と衝突力予測モデルの開発」について、MPS 法の理論および離散化式について示した。本章は 7 つの節によって構成されており、第 1 節では基本的な MPS 法に関する粒子間相互作用モデルや支配方程式について、第 2 節では前節の MPS 法の支配方程式から導出された関係式のアルゴリズムを詳細に示した。第 3 節は、従来の MPS 法で問題となっていた長距離伝播時の波形の保存性が悪くなる点について、既存研究の取り組みからこれを改善した入部ら（2010 年、2011 年）の勾配計算高精度化手法の導入を示した。第 4 節は MPS 法における境界条件、すなわち自由表面境界、壁境界、流入境界について示した。第 5 節は MPS 法上の浮体の取り扱い、すなわち剛体および弾性体モデルに関するそれぞれのモデル化を示した。第 6 節は物体表面摩擦の取り扱いに関する手法の提案と、剛体および弾性体モデルへの適用方法を述べた。最後に第 7 節は数値シミュレーションの高速化手法について述べており、本モデル上での粒子探索法と圧力のポアソン方程式の解法、並列処理を示した。

第 3 章は、「水槽実験および解析解による本手法の妥当性に関する評価」として、本論によって提案した数値シミュレーション手法の妥当性と実用計算上の有用性を、水槽実験結果と解析解との比較から示した。

本章は3つの節によって構成されており、第1節では流体と建築物の衝撃波圧の再現の妥当性に関する結果をまとめた。本節ではMPS法における勾配計算の高精度化モデルの実現象との再現性について考察した。第2節では弾性体モデルの変形に対する応力と運動量に関する妥当性の評価を示した。本節では弾性体に強制変位を与えた際の解析解との比較や、弾性体の時系列の運動量の比較に関する検討結果をまとめた。加えて、本節では剛体モデルと弾性体モデルの計算時間刻みへの依存性に関して、任意の物体と壁の衝突シミュレーションを実施し、MPS法における衝突力解析を行う上での弾性体モデルの優位性を示した。第3節では、物体表面摩擦モデルに関する滑動試験を、解析解と比較し妥当性を示した。

第4章は、「建築物からの反射流の影響がない場合の浮体の漂流挙動特性」について、本論によって開発した剛体摩擦モデルを用いて数値シミュレーションを行った。本章は3つの節によって構成されており、第1節では津波規模と漂流挙動の関係について検討した。本検討は静岡県清水港新興津第1号岸壁の係留浮体を想定し、清水港において内閣府が予測する津波規模と同等の2ケースとそれらを上回る規模の津波を設定した。浮体は平均喫水を採用し、津波規模における最大漂流速度とその移動距離の関係性を考察した。第2節では前節の系統計算として、浮体重量による漂流挙動特性の変化を検討した。また浮体重量は喫水を変化させることで最大漂流速度の傾向を考察した。最後に第3節では、遡上時の津波先端部と浮体の乗り上がり位置の違いによる漂流挙動の関係について軽荷と満載喫水時に焦点を当てて検討した。遡上時の津波先端部との位置関係を考察するため、本検討では浮体と岸壁との離岸距離を変化させることで挙動の傾向を調べた。

第5章は、「建築物からの反射流がある場合の浮体の漂流および衝突特性」について、本研究によって開発した弾性体摩擦モデルを用いて数値シミュレーションを行った。本章は2つの節によって構成されており、第1節では、数値シミュレーション概要を示した。計算条件は第4章第3節と同様の津波規模、離岸距離の状況を想定し、本節では浮体重量を軽荷喫水時について着目し、喫水、建築物の設置位置や、弾性体摩擦モデルにおける浮体の剛性の取り扱いを示した。第2節は、数値シミュレーションの結果に対して、浮体が及ぼす建築物への流体力を含んだ力積、衝突力、衝突加速度と、先行する津波の流量と建築物からの反射流との関係について考察した。

第6章は、本研究の全体をまとめて示し、得られた結論をまとめた。

本研究における主な結論は以下のとおりである。

- 1) MPS法において、従来検討することが困難であった浮体の津波中における衝突問題に対して、弾性体摩擦モデルを提案した。本手法による数値計算結果を水槽実験結果や解析解と比較することで、衝突問題を取り扱う際の数値計算精度の妥当性と実用計算上の有用性が確認された。
- 2) 岸壁近傍に存在する船舶の陸域への漂流速度は津波規模、船舶の重量によって大きく異なることを示した。津波の遡上流速が増加するに従って、船舶の漂流速度は増加する。船舶の重量変化に対しては軽荷喫水時の場合、漂流速度の増加が顕著に見受けられる。
- 3) 接岸された船舶に横波で津波が来襲する場合、船舶の漂流速度は岸壁への乗り上がり状態に依存する。即ち、遡上津波の先端部に船舶が位置する場合、漂流速度は最も増加する傾向を示し、遡上津波の先端部より後方に船舶が位置する場合、漂流速度は小さい傾向を示す。
- 4) 遡上津波の建築物からの反射流の影響は、漂流する船舶の長さや建築物の長さの比に大きく関係し、船舶長さに対して同程度の建築物規模の場合では、その漂流速度は低減される傾向が顕著に見られる。特に反射流量が多くなる程、船舶の衝突直前の挙動特性は変化し、やがて建築物との衝突がなくなる。
- 5) 遡上津波が建築物によって多く反射する場合、浮体長さに対して建築物規模が1.0倍においては、浮体の衝突による複合力積は波力の力積と同じ程度となる。
- 6) 5) に対し、漂流速度の増大により衝突力は大きく変化し、波力だけの力積と船舶の衝突力を含んだ複合外力の力積の関係から、船舶長さに対して0.3倍の建築物規模の場合において4倍程度複合外力による力積が増加することが示された。