

# PS-17 粒子法数値解析に基づく HMD 型デジタルツイン シミュレータの開発

構造・産業システム系 \*馬 沖, 小森山 祐輔, 岡 正義

## 1. はじめに

荒天時の海難事故を減らすには、適切な操船判断を取ることが重要になる。操船訓練を行なうためのシミュレータは、波浪中船体応答計算の精度と計算コスト、装置の可動性能に課題があり、波浪中の機能が十分整備されていない。本研究では、最先端の数値シミュレーション技術とバーチャルリアリティ（VR）再現技術を複合的に利用した没入型マルチメディアとして、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）型のデジタルツインシミュレータを開発し、陸上で容易に波浪中での船体運動を体験可能なシステムの実用化を図る。

## 2. 研究紹介

「人為的要因」に起因した船舶海難事故は70%以上であると報告されている<sup>1)</sup>。操船訓練の一環として、操船シミュレータが使用されているが、据置型の大型フルミッション操船シミュレータは設備コストが高く、更新に時間がかかるため、十分なインフラを維持・提供する負担が大きい。また、被験者がその場所に出向かなければならないという課題もある。操船シミュレータは輻輳海域での衝突防止を目的に開発されたため、波浪中の機能は求められていなかったが、波浪中での事故（例えば<sup>2)</sup>）も発生しているため、波浪中の操船訓練の必要性も高まっている。適切な操船によって回避できる波浪中での事故も多くあると考えられ、荒天下での船の揺れや船体強度上の危険度を操船者に正確に認識させることが重要である。

現在の据置型の大型操船シミュレータでは、可動性能に限界があり、大波高下での船内環境を再現することができないため、VR技術を活用してHMD型デジタルツインシミュレータを利用する。波浪中での環境を再現するため、数値シミュレーション技術を活用する。

## 3. 数値シミュレーション

本研究では、荒天時の船舶事故の防止を目的として、波浪中HMD型デジタルツインシミュレータの開発及び実用化を目指す。荒天時大波浪中船体運動を厳密に予測するため、スラミングなど非線形荷重を考慮できる高度なシミュレーションツールが必要である。本研究では、3次元粒子法（SPH）Open-Source ソフト DualSPHysics<sup>3)</sup>を用いて、船体運動の数値計算を行った。

SPHの基本流体支配方程式は式(1) - (4)であり、 $\mathbf{v}$ は粒子の速度、 $P$ は粒子の圧力、 $\rho$ は粒子の密度、 $\mathbf{r}$ は粒子の座標、

$B$ は音速に関する関数である。

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{g} \quad \text{運動量方程式} \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho\nabla\cdot\mathbf{v} \quad \text{連続方程式} \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v} \quad \text{軌道方程式} \quad (3)$$

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma} - 1 \right] \quad \text{状態方程式} \quad (4)$$

また、空間積分補間式(5)に基づき、任意粒子の物理量 $A$ を離散化する。 $W_{ab}$ はカーネルであり、本研究では、(6)式に示したWendlandカーネルを使用した。 $a$ と $b$ は粒子の番号、 $m$ は粒子質量、 $h$ はカーネルの影響距離である。

$$A_a = \sum m_b \frac{A_b}{\rho_b} W_{ab} \quad (5)$$

$$W(r, h) = \alpha \left( 1 - \frac{q}{2} \right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{21}{16\pi h^3} \quad q = \frac{r}{h} \quad (7)$$

SPHに関する詳しい紹介と境界条件の改良について、論文<sup>4)</sup>に記載している。

## 4. システム構成

SPHで得られた結果をより現実に再現するため、本研究ではParaViewとBlenderという3Dモデリングソフトを基に、粒子の座標情報(図-1)から3D動画(図-2)への自動変換スクリプトを作成した。さらに、Unity3Dというレンダリングゲームエンジンを使用して、HMDを使った360度のバーチャル環境を再現できる専用アプリを開発した。この専用アプリを使用することで、3Dモデリングされた船舶をバーチャル環境で再現するだけでなく、ユーザーは立ち位置と視線をバーチャル環境内で変更することもできる(図-3)。具体的な解析のフローチャートを図-4に示す。

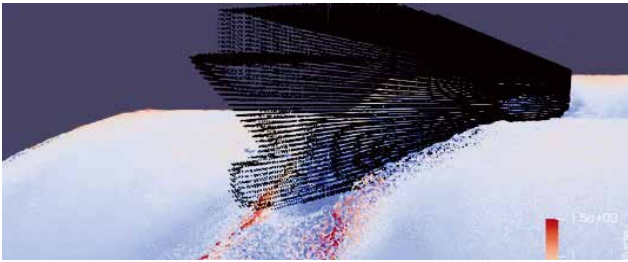


図-1 粒子法波浪中シミュレーション



図-2 3D モデリングした粒子法の計算結果



図-3 360度バーチャル環境

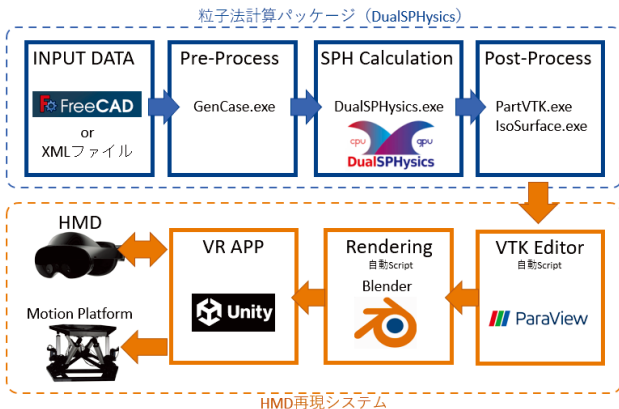


図-4 HMD型デジタルツインシミュレータのフローチャート

### 5. HMD 再現結果

本研究で使用したハードウェアを表-1にまとめる。

表-1 ハードウェア一覧

計算用 PC	NotePC (i7+RTX2080)
HMD	Oculus Pro
モーションプラットフォーム	2自由度 (Pitch+Roll)
モニター	65inch Display

ハードウェア構成図を図-5に示す。被験者による HMD システムの再現状況を図-6に示す。モーションプラットフォームと連携させることにより、波浪中での視覚情報だけでなく、船の揺れをユーザーに与えることでリアリティーを向上させた。本研究では、SPHにより実海域を模擬した短波頂不

規則波中の応答を再現し体感することを可能にしている。体感の結果に基づいて SPH の精度向上を図るといった利用法も想定される。

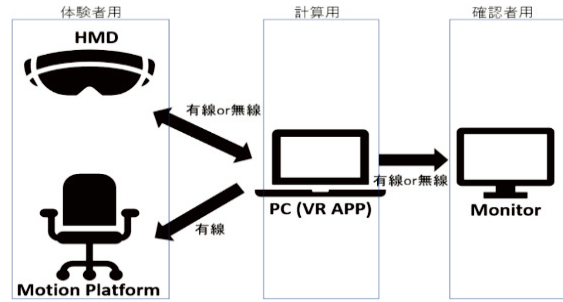


図-5 HMD システムハードウェア構成図



図-6 HMD システムの再現状況 (短波長不規則波)

### 6. まとめ

荒天時の船舶事故の防止を目的として、粒子法(SPH)による数値シミュレーションと VR 技術を複合して用いることにより、実海域環境を視覚的・物理的に再現できる HMD 型デジタルツインシミュレータ(プロトタイプ)を開発・検証した。これから実用化に向けて、リアルタイム操船機能の追加等の機能拡張や数値シミュレーションの精度及び計算速度の向上を図り、システムをブラッシュアップする予定である。

### 謝辞

本研究は防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 海難の現況と対策, 海上保安庁 (2019).
- 2) コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書, 国土交通省コンテナ運搬船安全対策検討委員会 (2015).
- 3) Crespo, AJC, Dominguez, JM et al.: DualSPHysics: Open-source Parallel CFD Solver Based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Comput Phys Commun, 187 (2015), pp. 204-216.
- 4) Ma, C., Oka, M.: Numerical Research On The Nonlinear Response of The Ship in Severe Waves Based On SPH, Proceedings of the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference (2023).