

## 第II部門

## 砕波現象を対象とした DualSPHysics 気液二相モデルの適用性評価

関西大学大学院 理工学研究科 学生員 ○上田 伊吹  
 関西大学 環境都市工学部 正会員 安田 誠宏  
 元関西大学大学院 理工学研究科 福井 雅人  
 ニュージェック 港湾・海岸グループ 山田 康介

## 1. はじめに

砕波帯で発生する巻き波砕波は波頭転覆時に大量の空気を巻き込み気液二相流になることが知られている。巻き込んだ空気は、波内部の流れを乱すことで、海面の局所的変形、堆積物の拡散を誘発する。さらに、巻き波砕波が海岸構造物に衝突した際には、衝撃砕波圧が瞬間的に生じ、構造物に大きな損傷を与える可能性が指摘されている。したがって、砕波時の空気巻き込みにより発生する気液二相流は、海岸工学分野において重要な課題である。このような現象の解明に対して、時間的コスト、空気相の可視化、砕波時における流体の変形、分離や衝突などを考慮すれば、数値解析によるアプローチ、その中でも粒子法は非常に有用と考えられる。粒子法の中でもWCSPH法に基づくオープンソースの流体解析コードであるDualSPHysicsは、GPUを活用した並列計算によって数百万個の粒子の挙動を扱うことが可能である<sup>1)</sup>。さらに、Liquid-gas model<sup>2)</sup>が搭載されているため、気液二相流を取り扱うことができる。本研究では、鷺見ら<sup>3)4)</sup>が実施した砕波時の気相における速度場と圧力構造に関する実験をDualSPHysics Liquid-gas modelを用いて再現解析し、実験結果との比較を通じてモデルの適用性を評価する。加えて、気液二相と液単相の解析結果の違いについて考察し、気液二相を考慮した解析の必要性を示す。

## 2. 解析条件

図-1に数値波動水槽の概要図を示す。長さ8m、高さ1mの水槽で、水槽左端部から1mの位置に設置したピストンにより造波した。そのピストンから1.5mの位置に長さ5.5mの1/10海底勾配を設置した。静水深は0.4mで、静水面から高さ0.4mの気相を設けた。実験結果から抽出した砕波波高を砕波指標に代入することで推定した値 $h_b = 4.8\text{ cm}$ と解析結果が一致していたため、その水深を砕波水深とし、この砕波点で波高、水平流速と気圧の計測を実施した。砕波点の静水面から鉛直上向きに、水平流速は6.0 cm, 7.2 cm, 8.4 cm, 気圧は5.0 cmの位置でそれぞれ計測した。紙面の都合上、気相の水平流速は7.2 cmのみの結果を示し、気圧の結果は省略する。

## 3. 解析結果

砕波点の波形を図-2に示す。縦軸は水位 $\eta$ を入射波高 $H$ で除した無次元水位 $\eta/H$ 、横軸は時刻 $t$ を入射波の周期 $T$ で除した無次元時刻 $t/T$ である。黒色の破線は鷺見ら<sup>3)</sup>の実験結果、緑色の破線は鷺見ら<sup>3)</sup>が実施したMARS法による解析結果、青色の実線は気液二相を考慮した本実験結果、赤色の実線は液単相のみを考慮した本実験結果である。図-2より、実験と比較し、気液二相の解析結果は波後方域、波頂および波前面を良好に再現できた。しかし、波後方域および波前面の一部において、若干の過大評価および過小評価がみられた。一方で、液単相のみの解析結果は、波後方域を大幅に過大評価し、浅水変形時に現れる波の非線形性も、気液二相の場合と比べて非常に弱くなる結果となった。この結果は、気海間の相互作用が浅水変形の過程に影響を及ぼすことを示しており、気液二相を考慮することで、実験結果に近い解析が可能であることを明らかにした。

砕波時の静水面から7.2 cmにおける気相の水平流速を図-3に示す。縦軸は気相の水平流速 $u$ で、横軸および線種は図-2と同様である。この検討は液単相では実施できないため、気液二相を考慮した解析結果のみを示す。図-3より極小値およびその前後を良好に再現できており、鷺見ら<sup>3)</sup>が実施したMARS法による解析結果よりもかなり高精度な結果を得ることができた。鷺見ら<sup>3)</sup>が実施したMARS法では気体の圧縮性を考慮せず、気液両相を同じ運動方程式で解いている。一方、DualSPHysics Liquid-gas modelは気体の凝集力と圧縮性を考慮しているため、

Ibuki UEDA, Tomohiro YASUDA, Masato FUKUI, Kosuke YAMADA

k615650@kansai-u.ac.jp

実験結果に非常に近い結果を得ることができた。

図-4 に (a) Secondary jet および (b) Bore region における気液二相、液単相の渦度をそれぞれ示す。図-4 (a)より、気液二相の結果は、水平渦<sup>5)</sup>を良好に再現した。一方、液単相の結果では、渦の存在範囲が気液二相に比べて非常に狭く、特に前方ローラー周辺における渦度が著しく小さい。図-4 (b)より、気液二相の結果では、表層付近に帯状の渦度が現れていた。一方、液単相の結果では、渦が点在し、局所的に渦度が強くなる箇所が複数みられた。Nadaoka et al.<sup>5)</sup>は、巻き波砕波の観察結果から、砕波時には流体内部に共回転の水平渦が存在し、その影響で流体が斜め方向に歪むことを示している。したがって、気液二相解析結果のように帯状の渦度が現れることは、観察結果と一致し、液単相解析よりも優れていると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、DualSPHysics Liquid-gas model を用いて、鷲見ら<sup>3)4)</sup>が実施した砕波時の気相における速度場および圧力構造の再現を試みた。砕波時の波形および渦構造について気液二相と液単相の比較を行った結果、気液二相の解析結果は、実験結果や観測結果に非常に近い傾向を示した。また、気相の水平流速についても、MARS 法よりも高い精度で再現可能であることが明らかになった。これらの結果は、砕波現象における気液間相互作用の重要性を示すものであり、今後の解析において、気液二相を考慮することの有効性および必要性を示唆している。

#### 参考文献

- 1) Domínguez JM, Fourtakas G, Altomare C, Canelas RB, Tafuni A, García-Feal O, Martínez-Estévez I, Mokos A, Vacondio R, Crespo AJC, Rogers BD, Stansby PK, Gómez-Gesteira M.: DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), pp.867-895, doi: 10.1007/s40571-021-00404-2, 2021.
- 2) Mokos, A., B.D. Rogers, P.K. Stansby, J.M. Domínguez: Multi-phase SPH modelling of violent hydrodynamics on GPUs. *Computer Physics Communications*, 196, pp.304-316, doi: 10.1016/j.cpc.2015.06.020, 2015.
- 3) 鷲見浩一・兼藤 剛・植松達也：気液 2 相流における砕波時の流速場と渦構造に関する研究，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.76-80，2006.
- 4) 鷲見浩一・植松達也・板垣健吾：砕波形式の相違による気体の圧力分布に関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.61-65，2007.
- 5) Nadaoka Kazuo, Hino Mikio, Koyano Yoshiji: Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 209, pp.359-387, doi: 10.1017/S0022112089001783, 1989

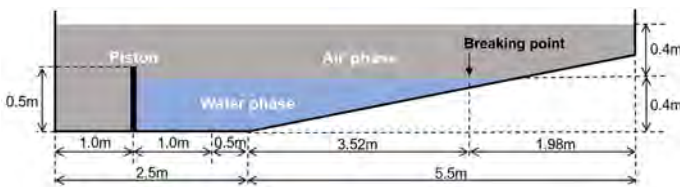


図-1 数値波動水槽の概要図

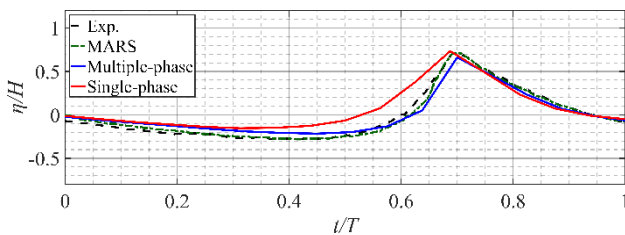


図-2 砕波点における波形

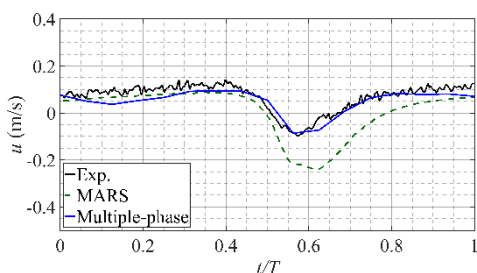
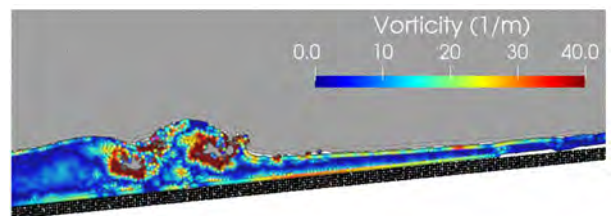
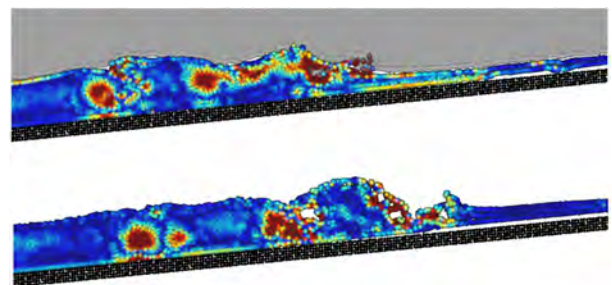


図-3 砕波点における気相の水平流速



(a) Secondary jet (上：気液二相，下：液単相)



(b) Bore region (上：気液二相，下：液単相)

図-4 気液二相、液単相における砕波時の渦度