

## 高速水中突入現象の解明(第2報)

○森川大地, 矢田兼章, 菊池崇将(日本大学理工学部航空宇宙工学科)

[csda14106@g.nihon-u.ac.jp](mailto:csda14106@g.nihon-u.ac.jp)

### 1. 緒言

高速水中突入現象は水上液滴, 水中衝撃波, 水中移動物体, 水中空洞の非定常, 固気液三相が混在した複雑な流れである。物体が高速で水へ突入するとき, 水面が大変形して水上では液滴が物体の突入速度とほぼ等しい速さで液滴が飛散し[1], 水中には駆動された水中衝撃波が水中音速(1500m/s)よりも速く伝播する[2]。水中移動物体は減速しながら水中を移動し, 水中空洞は膨張後, 収縮し数十 ms で崩壊する[3]。このように, 高速水中突入現象を構成する素現象は, 速度と持続時間が異なっている。加えて, これらの時間スケールの異なった現象は, 相互に干渉しあっている。水上液滴は, 中心軸に空洞を持った水柱へ成長する。そして, 水柱内部の圧力はベルヌーイ効果で水柱外部に比べて低圧になり, 水柱は中心軸へ向かって閉鎖する[4]。この水上の閉鎖現象は **Surface closure** と呼ばれている。水中空洞は物体を頂点として水中を膨張しながら移動し, ある時刻で水面から離脱する。この水面からの離脱現象は **Pull-away** と呼ばれている。その後, 水中空洞は収縮し, 或る深度で閉鎖して分裂する。この水中の閉鎖現象は **Deep closure** と呼ばれている。**Surface closure** は **Deep closure** に影響を及ぼしている[5]。これらは, 閉鎖時刻や発生深度等に物体の突入速度と雰囲気大気密度との相関が確認されている。これらの相互関係を含めた水中突入現象を明らかにするためには, 時間スケールの異なる現象を全て同時可視化することが必要である。

本研究では, 実験計測による高速での水中突入現象の解明を目的とする。プラスチック球を高速で水へ突入させ, 2 台の高速度カメラを用いて撮影することで, 時間スケールの異なる現象を全て同時可視化した。可視化結果と解析結果を示す。

### 2. 実験概要

実験概要を図 1 に示す。縦型弾道飛行装置の試験チャンバー内に小型の縦型一段式軽ガス銃と可視化窓を備えた金属水槽を設置した。2 台の高速度カメラ(Shimadzu HPV-X, Vision research Phantom V2511)を水上と水中を観測できる位置に設置した。半導体レーザーから射出したレーザー光を飛行体の弾道を横切るように通し, フォトディテクタに受信させることで, 飛行体がレーザー光を遮った瞬間の遮断信号を検出した。遮断信号を高速度カメラのカメラとして利用し, 水上と水中の現象に同期させた。高速度カメラの反対側に設置した水上撮影用の光源と水中撮影用の光源の光をすりガラスで散乱させ, 背面光として利用した。また, 縦型一段式軽ガス銃の砲口と水槽の間に, 複数の円盤形状邪魔板を配置し, 飛行体射出時に砲口から発生する高圧空気噴流と先駆衝撃波を強制減衰させた。突入速度と雰囲気大気圧を変えることで, 現象の突入速度依存性と雰囲気大気密度の影響を取得した。

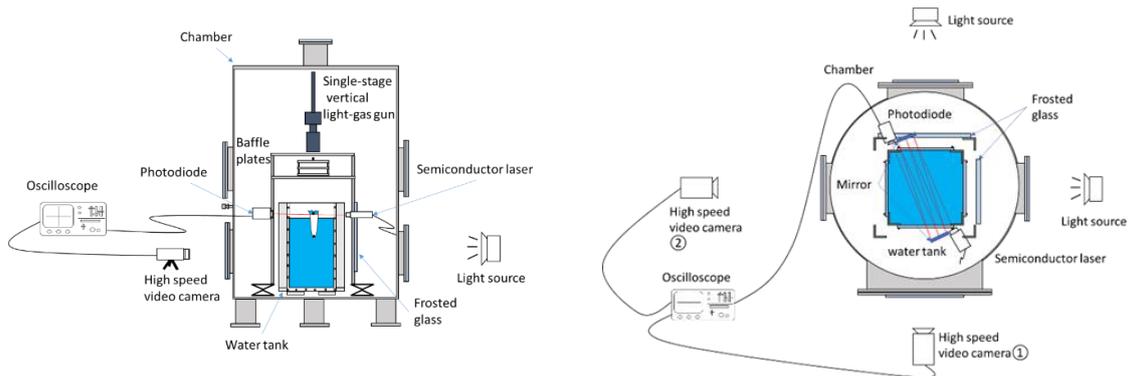


図 1 実験概要

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 可視化結果

得られた水上と水中の可視化結果を図 2, 図 3 に示す。時間スケールの異なるすべての現象、各閉鎖現象、離脱現象の同時計測に成功した。

#### 3.2 解析結果

図 4 に突入速度  $V_i$  と Surface closure の起きる時刻  $T_s$  の関係性を示す。突入速度が速くなる、または雰囲気大気圧を低くすると  $T_s$  は増加した。大気圧条件下での高速突入において、この傾向は数値計算によって予測されており [4], 実験的に確認できた。図 5 に各雰囲気大気圧における  $V_i$  vs  $T_s$  の線形関数の勾配を示す。 $V_i$  vs  $T_s$  の線形関数の勾配は、雰囲気大気圧によらず一定であった。図 6 に突入速度  $V_i$  と Deep closure の起きる時刻  $T_d$  の関係性を示す。 $T_d$  は突入速度が速くなると減少し、雰囲気大気圧を低くすると増加した。大気圧条件下での高速突入において、この傾向は数値計算によって予測されており [4], 実験的に確認できた。図 7 に各雰囲気大気圧における  $V_i$  vs  $T_d$  の線形関数の勾配を示す。 $V_i$  vs  $T_d$  の線形関数の勾配は、雰囲気大気圧を低くすると減少した。また、Surface closure の起きていない 0.125atm. での勾配の傾向は、1, 0.5, 0.25atm. での勾配の傾向と異なっており、Surface closure が Deep closure に影響を及ぼしていると考えられる。図 4 と図 6 より、 $T_s$  と  $T_d$  の関係性は各突入速度、各雰囲気大気圧において  $T_s < T_d$  となっている。これは数値計算による報告 [4] の通りであり、実験的に確認することができた。図 8 に突入速度  $V_i$  と Pull-away の起きる時刻  $T_p$  の関係性を示す。突入速度が速くなる、または雰囲気大気圧を低くすると  $T_p$  は増加した。図 9 に各雰囲気大気圧における  $V_i$  vs  $T_p$  の線形関数の勾配を示す。 $V_i$  vs  $T_p$  の線形関数の勾配は、雰囲気大気圧を低くすると増加した。

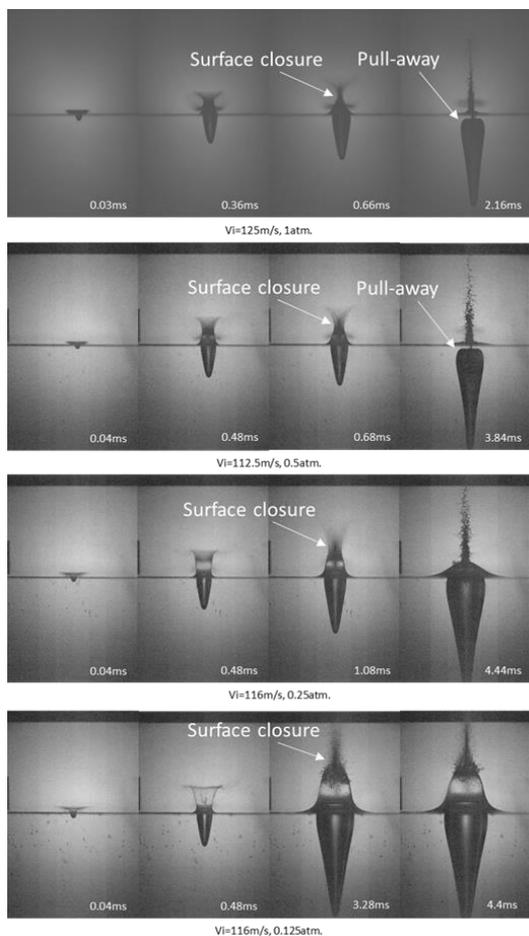


図 2 各雰囲気大気圧での水上の現象

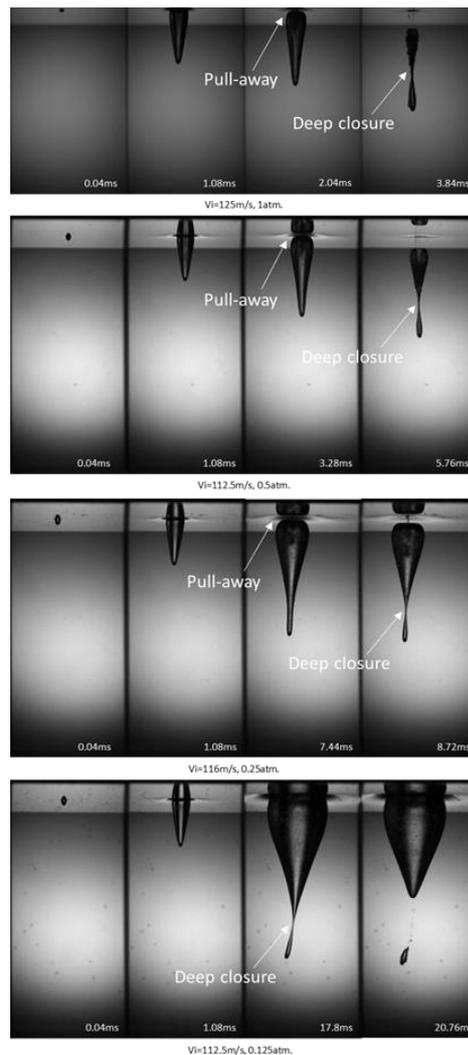


図 3 各雰囲気大気圧での水中の現象

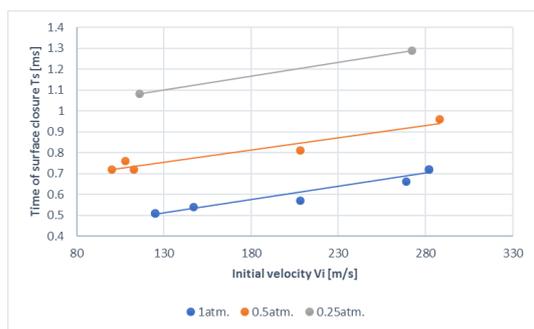


図 4  $V_i$  vs  $T_s$

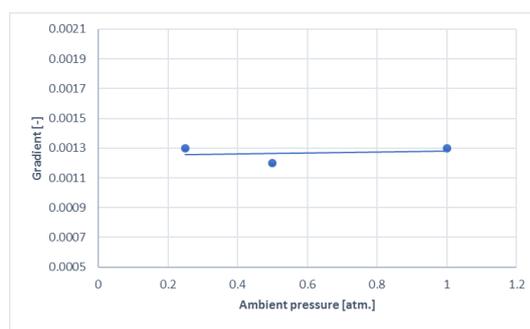


図 5 各雰囲気大気圧における  $V_i$  vs  $T_s$  の線形関数の勾配

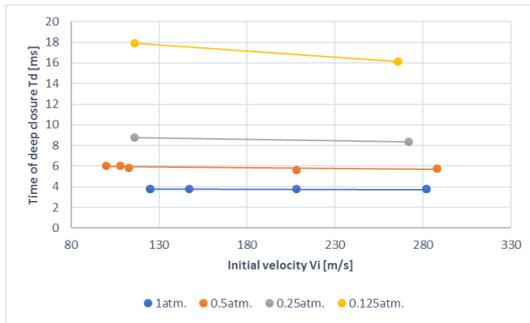


図 6 Vi vs Td

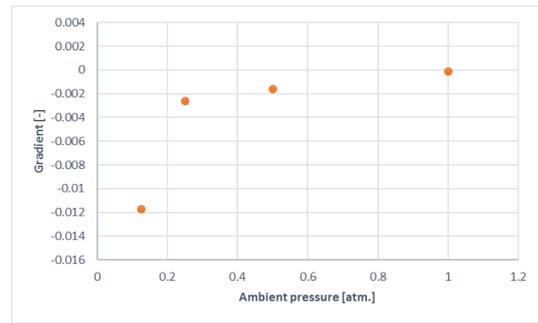


図 7 各雰囲気大気圧における Vi vs Td の線形関数の勾配

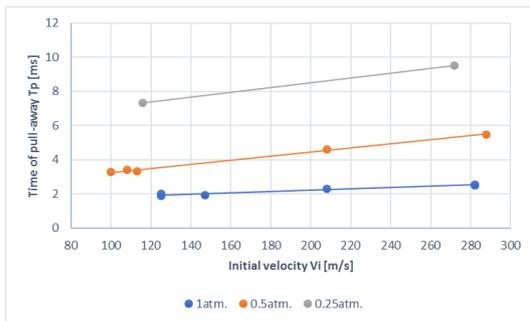


図 8 Vi vs Tp

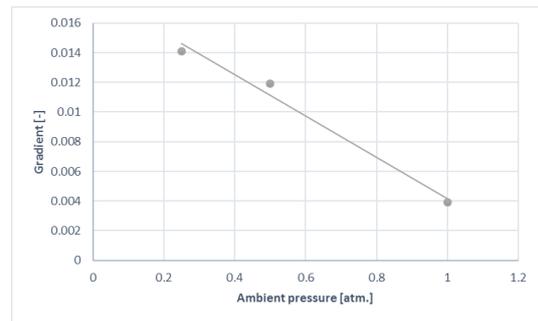


図 9 各雰囲気大気圧における Vi vs Tp の線形関数の勾配

#### 4. 結論

高速水中突入現象に伴う時間スケールの異なる現象を全て同時可視化した。可視化結果を用いて、各閉鎖現象と離脱現象について定量的な解析を行い、突入速度と各閉鎖現象と離脱現象の起きる時刻の線形関数の勾配は、雰囲気大気圧に相関があることが確認できた。

#### 謝辞

実験準備・実施において多大なるご協力を頂いた宇宙航空研究開発機構-宇宙科学研究所の長谷川直研究員に篤く感謝の意を表します。

#### 参考文献：

- [1] Takamasa Kikuchi, Kazuyoshi Takayama: The influence of the entry speed to flow field above water surface on the water entry phenomenon. International Journal of scientific and technical research in engineering, Vol 2, Issue 12, 2017.
- [2] Shi Honghui, Takuya Takami: HYDRODYNAMIC BEHAVIOR OD AN UNDERWATER MOVING BODY AFTER WATER ENTRY. ACTA MECHANICA SINICA, Vol.17, No.1, 2001, pp35-44.
- [3] H.H.Shi, M.Itoh, T.Takami: Optical Observation of the Supercavitation Induced by High-Speed Water Entry. ASME, Vol.122, December, 2000, pp806-810.
- [4] M. Lee, R. G. Longoria, and D. E. Wilson: Cavity dynamics in high-speed water entry. Physics of Fluids, Vol.9, No.3, 1997, pp540-550.