

高速水中突入現象の解明(第3報)

○森川大地(日本大学大学院理工学研究科), 菊池崇将, 村松旦典(日本大学理工学部)

takamasa.kikuchi@gmail.com

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。水上液滴は, 中心軸に空洞を持った水柱へ成長し, ある時刻で閉鎖する。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。その後, 水中空洞は収縮し, 或る深度で閉鎖して分裂, 崩壊する。水面からの離脱現象, 水中の閉鎖現象は, それぞれ **Pull-away**, **Deep closure** と呼ばれ, **Surface closure** の影響を強く受ける。突入速度が気中音速を超えた場合, 突入物体が衝撃波を伴うことに加え, 水柱内がチョークすることで, 物体の突入速度が音速未満の現象とは異なる現象の傾向を示すと予想している。高速水中突入現象を明らかにするためには, 水上と水中の全ての現象を同時に実験計測し, 突入速度と雰囲気大気密度の影響, 各現象の相互作用の有無を明らかにすること, 相似則の構築が必要である。本研究では昨年度までに, 突入速度が 100–288 m/s, 雰囲気大気圧が 1–0.125 atm. の高速水中突入現象に伴うこれらの現象をすべて実験計測し, 各閉鎖・離脱現象の閉鎖時刻と発生深度に物体の突入速度と雰囲気大気密度との相関があることを確認した[1]。本実験では, 物体の突入速度(気中音速以上)と雰囲気大気圧を変えることで, 突入速度が気中音速を超えた高速水中突入現象の突入速度依存性と雰囲気大気密度の影響を取得することを目的とした。

2. 実験概要

実験概要を Fig. 1 に示す。宇宙航空研究開発機構に設置された縦型弾道飛行装置の試験チャンバ内に可視化窓を備えた金属水槽を設置した。2 台の高速度ビデオカメラ(Shimadzu HPV-X, Vision research Phantom V2511)を水上と水中を観測できる位置に直交させて設置した。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トリガとして利用し, 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, 縦型二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。縦型二段式軽ガス銃から球体の物体を水槽内の水に打ち込み, その際に生じる高速水中突入現象を実験計測した。飛行体はポリカーボネイト製の直径 4.67 mm, 質量 0.639g の球を用いた。突入速度は 359–815 m/s, 雰囲気大気圧は 1–0.125 atm. である。

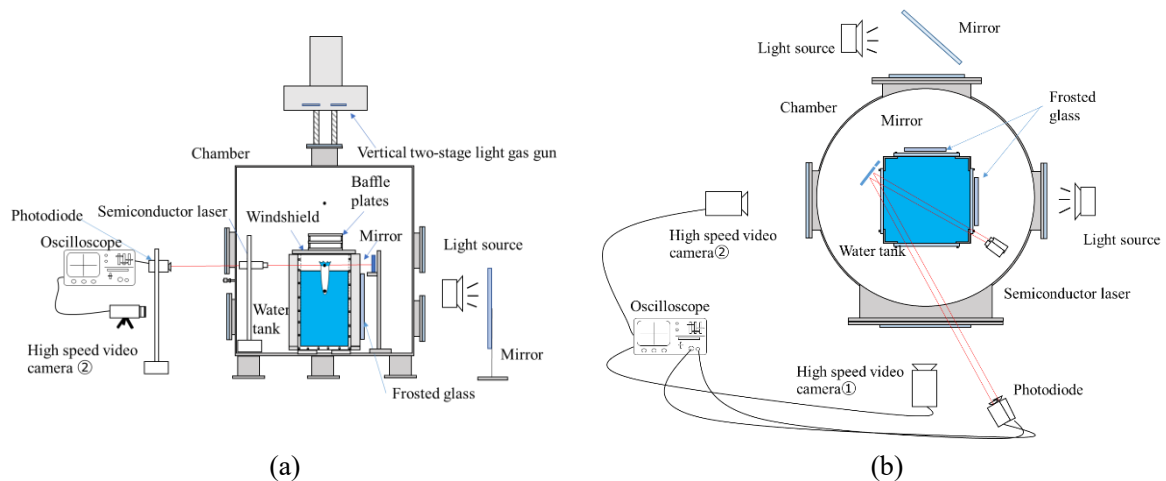


Fig. 1 Experimental outlines. ((a): Front view, (b): Plane view)

3. 結果及び考察

3.1 可視化結果

Fig. 2 に可視化結果を示す。物体が水中に突入した時刻を 0.00 ms とした。物体が水に突入した後、Surface closure, Pull-away, Deep closure を観測した。Fig. 3 に昨年度取得した水中空洞と今年度取得した水中空洞の比較を示す。昨年度までの水中空洞は円錐形をしていたのに対して、今年度は突入速度が増加するに従って、半径方向へ急激に膨張して半球状になった。また、回収物体は、突入時の衝撃負荷により変形していた。水中空洞は、物体が水の抗力により減速し、物体の運動エネルギーが水へ移ることで生成される。水中空洞形状の違いは、突入速度の高速化、雰囲気大気圧の減圧の影響が考えられる。本実験では、加速管射出から突入までの自由飛行過程で物体が減速するため、同一の射出条件でも雰囲気大気圧により突入速度が大きく異なってしまった。このため、突入速度を一定にすることで、チャンバ内の雰囲気大気圧条件のみ変化させる実験条件を達成できていないため、突入速度と雰囲気大気圧のどちらが強く影響しているか分離できていない。また、突入物体が変形した場合、物体の受圧面積と抗力が増加し、空洞へ移動する運動エネルギーが増加する。突入初期に多くの運動エネルギーが水へ移動したことにより、水中空洞形状に違いが出た可能性も高いと考えている。過去の研究例、目標とする相似則では、物体は無変形を前提としている。物体が変形すると、物体の受圧面積と抗力係数が非定常に変化するため、相似則を構築する際のパラメータとして相応しくなくなる。Fig. 4 に各突入速度での回収された物体の外観、Fig. 5 に突入物体の変形量の定義、Fig. 6 に各突入速度での変形量を示す。突入物体の変形量が突入速度に対して線形関係を持つと仮定した場合、物体が変形しない最大の突入速度は 558 m/s であった。

Fig. 7 に水中空洞壁にできた螺旋状の筋、Fig. 8 に Deep closure 発生時刻付近に物体の回転によって水中空洞に生じた影響を連続写真で示す。物体が中心軸を中心に回転をすることで、Deep closure 発生時刻付近で水中空洞壁が螺旋形状になることで、水中空洞の閉鎖に影響を及ぼした。

これらの理由により、今年度の実験データは相似則構築には不適合と判断した。今後は、同一突入速度、気中音速以上、雰囲気大気圧可変、無回転の条件達成のために、軽ガス銃を製作し、実験を行う必要がある。

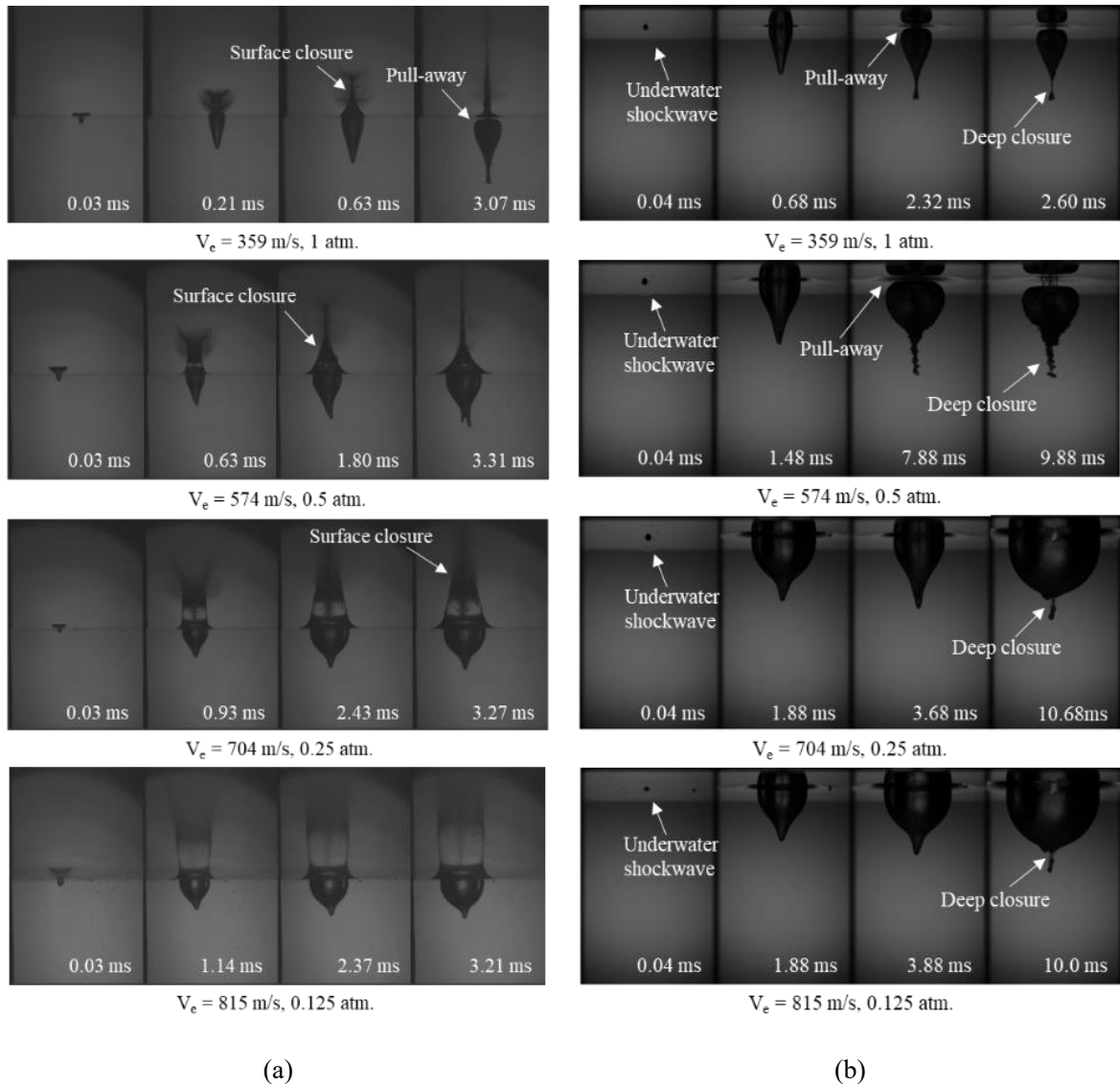


Fig. 2 Visualization images. ((a): Near the water surface, (b): Underwater)

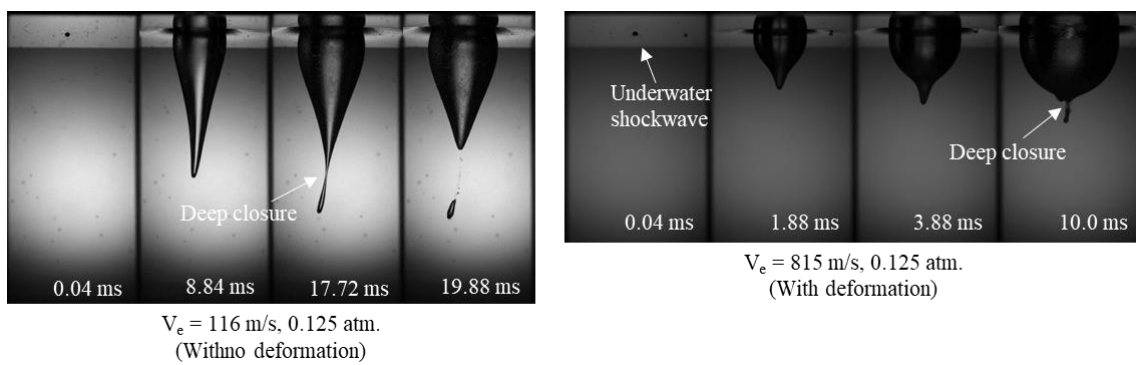


Fig. 3 Comparison of underwater cavity.

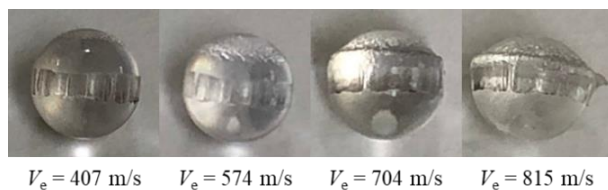


Fig. 4 Salvaged sphere.

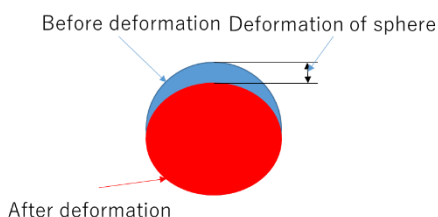


Fig. 5 Definition of deforming of sphere.

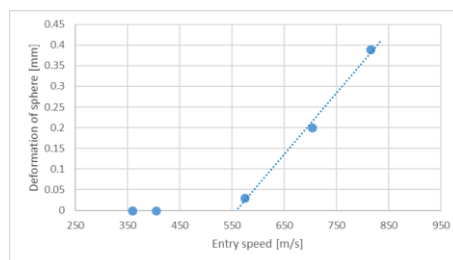


Fig. 6 Deformation of sphere vs Entry speed.

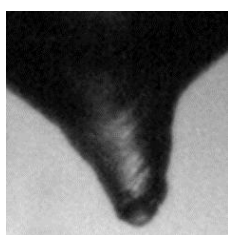


Fig. 7 Rotation of sphere.

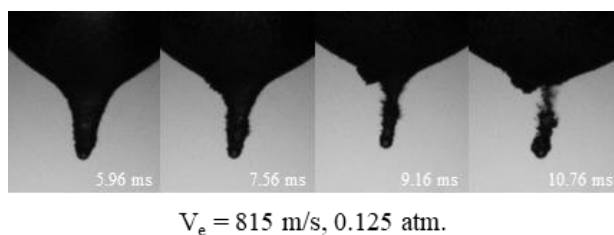


Fig. 8 Effect of rotation of sphere.

4. 結論

高速水中突入現象を明らかにするために、Surface closure, Pull-away, Deep closure が起きる時刻、深度等に注目して、水上と水中を同時に実験計測した。しかし、取得したデータは、物体が変形、物体が回転して現象に影響を及ぼしており、相似則を構築するためのデータとして不適合であった。今後は、物体を無回転で、気中音速以上の速度で射出可能な軽ガス銃を製作し、実験を行う。

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、日本大学理工学部の坂本孝仁君、村上亨平君に篤く感謝の意を表します。

参考文献：

- [1] Morikawa, D. and Kikuchi, T. Simultaneous visualization of phenomena above the water surface and underwater accompanying high-speed water entry. Proceedings of the 18th International Symposium on Flow Visualization (ISFV18) (2018), (online), available from <<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000279165>>, (accessed on 23 January, 2019).