

# 高速水中突入現象の解明

○菊池 崇将, 河上 恒次郎, 森川 大地, 國分 智春(日大理工)

Takamasa.kikuchi@gmail.com

## 1. 緒言

物体が高速で水へ突入するとき、水面が大変形し水上では液滴が散乱し、水中には衝撃波が発生・伝播する。物体は、空洞を伴いながら水中を移動する。このため、水中突入は水上液滴、水中衝撃波、水中移動物体、水中空洞の非定常、固気液三相、時間スケールの異なる現象が混在した複雑な流れである。水中突入現象は軍事目的で水中弾道学と関連して研究され、水中移動物体の運動はフルード数とレイノルズ数に依存していることが確認されている<sup>1)</sup>。突入初期、空洞は物体を頂点として円錐形状をしている。時間の進行と共に空洞は膨張収縮し、或る深度で空洞の完全閉鎖と分裂が起きる。水中での完全閉鎖は **Deep closure** と呼ばれ、発生する深度と突入速度と相関関係があると考えられている<sup>2)</sup>。これらの研究の多くは、100m/s 以下の比較的低速突入を対象としている。高速の水中突入の実験報告に、Shi らの報告がある。ライフルで鉛の弾丸を、突入速度 340m/s で水中に撃ち込み、拡散光源で可視化し、それぞれの深度で圧力計測した<sup>3)</sup>。エラー!参照元が見つかりません。また菊池らは、ステンレス製球を突入速度 1100m/s で水中に突入させ、水面付近での気中と水中の流れ場の可視化計測に成功している<sup>4)</sup>。しかし、**Deep closure** を含んだ水中の現象は計測されておらず、水中突入現象の各現象の相互作用は解明されていない。流れ場の詳細な相互作用、突入速度依存性の検証し、高速水中突入現象を解明するためには、水中突入現象の全ての現象を、同時に実験計測することが必須である。

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つ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観測した。観測結果と初歩的な解析結果を示す。

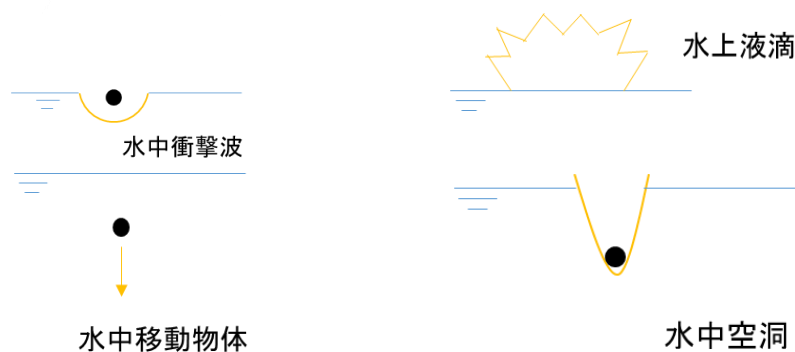


図1 水中突入現象を構成する時間スケールの異なる4つの現象

## 2. 実験概要

実験の概要を図2に示す。ISASの縦型ガンの試験チャンバ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製の水槽を設置する。2台の高速度カメラ(Shimadzu HPV-X, Vision research PhantomV2511)を水中と水面を観測できる位

置に設置する。レーザー光を水面付近に弾道を横切るように通し、フォトダイオードで受信する。それぞれの高速カメラの反対側に設置した高輝度 LED 光源の光を擦りガラスで散乱させ、背面光として利用する。軽ガス銃から射出されたプラスチック球が水中に突入する際、球もしくは発生した水上液滴がレーザー光を遮断する遮断信号をトリガとして、高速度カメラを起動する。

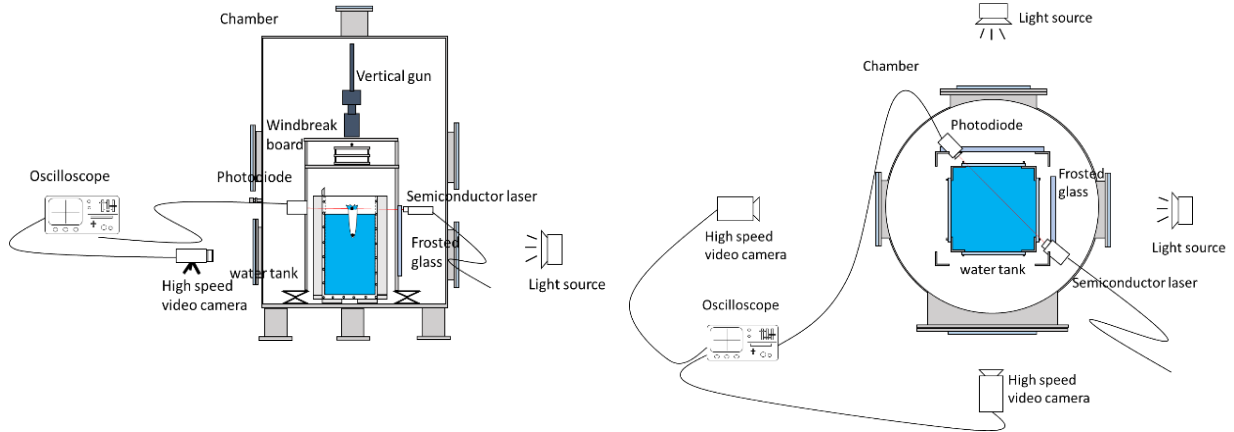


図2 実験概要

### 3. 結果および考察

#### 3.1. 可視化結果

得られた水面と水中の連続写真を図3、図4にそれぞれ示す。Deep Closure を含めた水中突入を構成する4つの現象の同時計測に成功した。

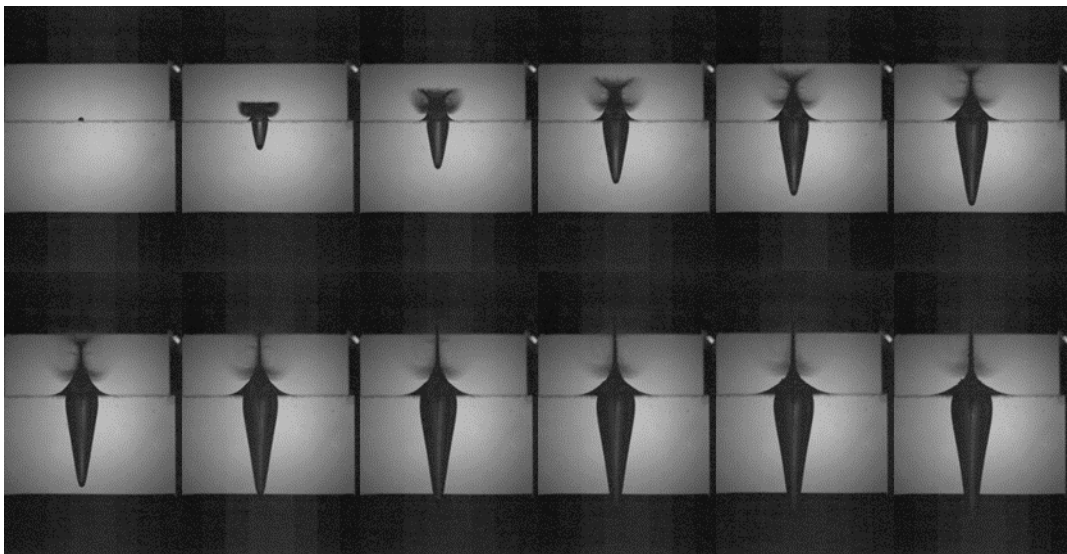


図3 可視化結果(水面)

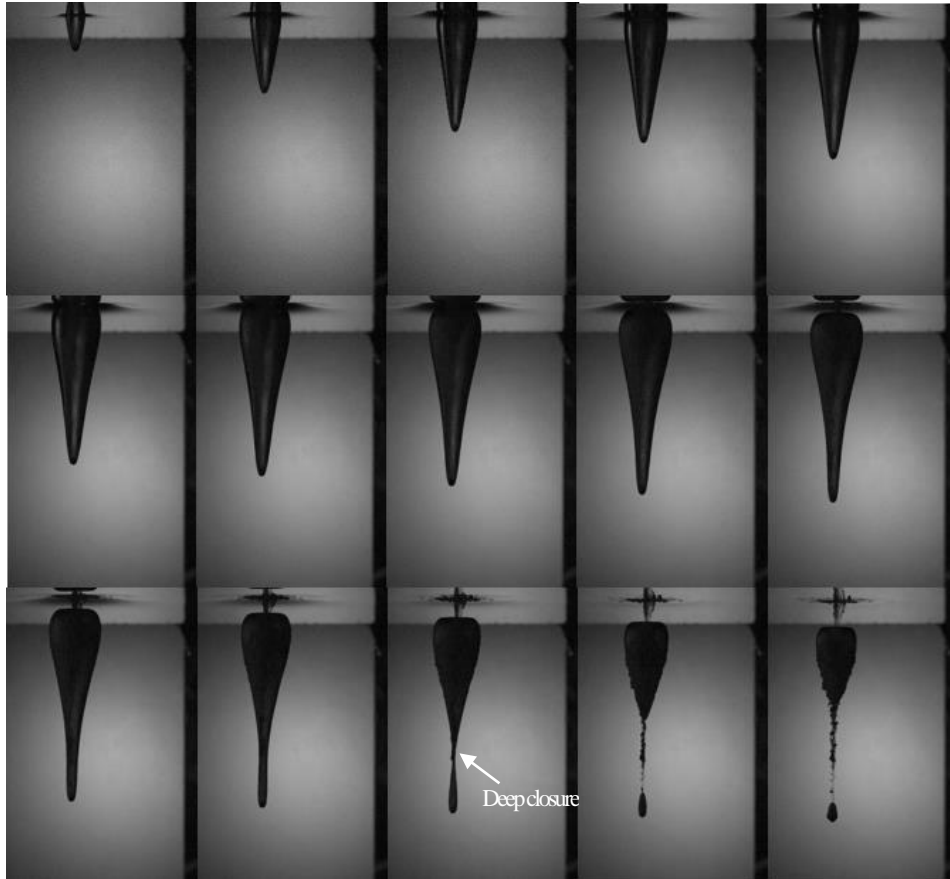


図4 可視化結果(水中)

### 3.2. 水中移動物体の運動

一般に、抗力を受けて減速する物体の運動方程式は、以下の式で与えられる。ここで  $m, v, \rho, C_d, S, g$  は、それぞれ物体質量、速度、水密度、抗力係数、投影断面積、重力加速度である。抗力係数一定の条件で、式をモデル関数とにおいて実験結果と比較した結果を図 Q に示す。最小二乗法で、抗力係数を求めた結果  $C_d=0.3$  を得た、これはレイノルズ数から求められる抗力係数  $C_d=0.56$  と異なるため、球表面周りの流れは空洞の影響を受けていると考えられる。

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} \rho v^2 C_d S + mg$$

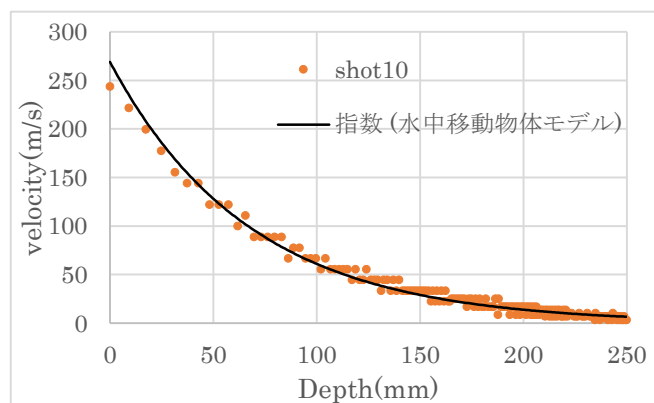


図5 水中移動物体の運動

### 3.3. 空洞の閉塞

Deep closure の発生水深と突入速度との関係を図 6 に示す。Deep closure 発生時の水深の違いは、最大で 4mm 程度であった。突入速度の再現性が高いことから、高速の水中突入においても、Deep closure の発生水深と突入速度には相関関係を確認できた。

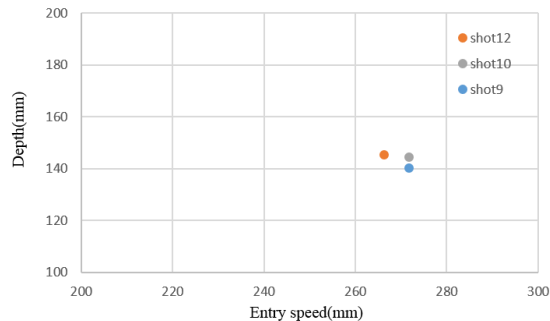


図 6 Deep closure 発生水深と突入速度の関係

## 4. 結論

プラスチック球を高速で水へ突入させ、2つ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の観測に成功した。移動物体の運動モデルと実験値を比較し、最小 2 乗法適用すること得られた抗力係数は 0.3 であり、レイノルズ数から得られる抗力係数と異なった。高速水中突入においても、Deep closure と突入速度に相関関係が認められた。

## 謝辞

実験準備・実施において、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と鈴木絢子研究員に支援を頂いたここに付記し篤く謝意を表します。

## 参考文献：

- [1] Albert May, Jean C. Woodhull: Drag Coefficients of Steel Spheres Entering Water Vertically. Journal of Applied Physics 19, 1109-1121 (1948)
- [2] Albert May: Vertical Entry of Missiles into Water. Journal of Applied Physics 23, 1362-1372 (1952)
- [3] H.H. Shi, M. Itoh, T. Takami: Optical Observation of the supercavitation induced by high-speed water entry, Vol. 122, December, (2000)
- [4] 菊池崇将、沼田大樹、高山和喜：直接撮影と影写真法を用いた高速水中突入の可視化、平成 23 年度衝撃波シンポジウム, pp145-148, (2011)