

## カエルの飛び込みに学ぶスプラッシュの形成 Splash Formation Caused by a Frog Diving into Water

窪田佳寛\*

### 1. はじめに

物体が液面に衝突した際に形成されるスプラッシュ(水飛沫)は広く知られている。自然界においてはカワセミなどに代表されるように、生物は捕食対象を捉えるために水面へと飛び込む。また一方でカエルなどは敵から逃れる場合などに逃避行動として水面に飛び込む場合がある。このときには、大きなスプラッシュを形成しては生き残ることを考えた場合には不利になることが考えられる。よって、カエルは水面に飛び込む事に関して有利な、生物としての特徴を有しているのではないかと推察することが出来る。著者らはこれまでに、球形の物体が水面に衝突した際に形成されるスプラッシュについて衝突速度、物体形状に着目した研究を報告している<sup>1)2)</sup>。衝突速度の違いによりスプラッシュの形成過程が変化することを報告している<sup>1)</sup>。この形成過程に大きく関与しているのは、物体が水面衝突直後に形成される液膜流れである。また物体形状では、先頭形状が液膜の形成に影響を及ぼし、後部の形状が形成された液膜の運動に影響を及ぼすことを報告している<sup>2)3)</sup>。

このスプラッシュ形成の現象は古くから知られており19世紀にはWorthingtonによりスプラッシュ形成に関する研究成果が発表されている<sup>4)</sup>。Worthingtonは物体の衝突速度によりスプラッシュの形成様式が変化することに言及している。しかし定性的な物であり形成の詳細なメカニズムについて十分な議論がなされていない。20世紀になると航空工学の分野で偉大な足跡を残し、カルマン渦の名の由来にも成っているvon Karmanが水上飛行機の着水を想定した錐型物体の液面衝突について1929年に報告している<sup>5)</sup>。von Karmanは水上飛行機の滑空角度、着水速度、そして降下速度の関係について明らかにした。しかしながら形成過程の詳細については報告されていない。そして21世紀にはDuezらが

2008年に親水性・疎水性それぞれの物体について衝突速度5 m/sで球形モデルが水面に衝突した際に形成されるスプラッシュの観察をおこなった<sup>6)</sup>。彼らは水中に空洞(キャビティ)を伴うスプラッシュの形成が従来は衝突速度が速いときに観察される物であるが、疎水性の表面において低衝突速度で起こることを見いだしている。またスプラッシュによる音の発生は、キャビティの形成と関係があることを報告している。3世紀にわたり研究が進められているスプラッシュの形成だが、その形成メカニズムに言及されていない。さらにはこれの抑制を主眼とした研究は進められていない。

ここで工学的な観点からスプラッシュ抑制の必要性について示す。スプラッシュの形成を理解する上で非常に重要な要素として、突入する物体の慣性力とそれに作用する表面張力が挙げられる。この2つを理解するために非常に有用な無次元数がある。無次元数は現象の特徴を理解するために頻繁に用いられる。スプラッシュの形成を理解するために、ウェーバー数が用いられる。ウェーバー数は慣性力と表面張力の比で表される(Weber number,  $We = \text{慣性力}/\text{表面張力}$ )。ウェーバー数が大きい場合には慣性力が支配的になり、小さい場合には表面張力が支配的になる。このウェーバー数により物体衝突を分類した例をFig. 1に示す。横軸にウェーバー数を示している。物体の衝突は固体が固体に衝突、液体が固体に衝突、固体が液体に衝突、液体が液体に衝突する場合の4種類がある。Figure 1において水色は固体が液体に衝突する例を示している。例として、生物の水面への飛び込み、海上ヘブイの投下、潜水艦からミサイルを発射などがある。橙色で覆っている領域は、液体が固体に衝突した場合を示し、インクジェットプリンターによる印字などがある。黄色で示す領域は液体と液体の衝突では代表的なものとして、ミルククラウンの形成がある。渡

\*理工学部

ら(2007)及び戸谷ら(2008)の研究によって、ウェーバー数が5以上6300以下の環境下において液滴が水面に衝突することによってミルククラウンが形成されることが明らかになっている<sup>7)8)</sup>。緑色の領域は固体と固体の衝突を示し、例として直径30kmほどの大きな隕石が15km/sほどで衝突する場合にできるクレーター形成過程について報告されている<sup>6)</sup>。このように物体の衝突に関する問題は自然界に数多くある。そしてスプラッシュの抑制が可能になれば流体抵抗の低減のように既存の技術に対して新たな価値を見出すことが可能である。そこで本稿では、カエルの飛び込みによって形成されるスプラッシュをハイスピードカメラを用いて可視化し、カエルの飛び込みの特徴についてモデルを用いた実験から考察する。モデル実験では、形状および表面性状の観点から行った。表面性状では、生体を模擬した親水性物体としてハイドロゲルを用いた。

ことにより撮影した。フレームレートを1000fpsとして撮影した。撮影時の光源としてスリット光を用いた。カエルが自然に近い環境で飛び込みを行わせるために、撮影時には飛び込み台にカエルを乗せた後は、刺激を与えずに実験を行った。

カエルの飛び込みと比較するためのモデル実験は300x300x400 mm<sup>3</sup>の水槽に340mmの高さまで水を満たし、そこに3種類のモデルを自由落下させることにより行った。モデルの形状及び表面性状によるスプラッシュ形成への影響を調べた。形状による影響は後部形状の違いによる影響に着目した。先頭形状を直径D=20mmの半球、後部形状を円錐(Cone-tail)、円柱(Cylinder-tail)、翼型断面の軸対称モデル(NACA0012)について調べた。表面性状については形状をD=2R=20mmの球体としてハイドロゲルのモデルを実験に用いた。ハイドロゲルは寒天ゲルを用いた。モデルの初期高さは15Dとし、衝突速度を2.4 m/sとした。これはカエルの飛び込みにおける衝突速度と同等である。モデル衝突速度は抵抗などの影響は考慮せず、エネルギー保存則の関係から  $V_i = (2gh)^{0.5}$  として求めた。ここでgは重力加速度、hは水面からモデルまでの距離とした。モデルは実験前に表面に付着した油やホコリ等を拭き去ることにより実験条件を均一にした。さらにモデルを回転などさせずに水面へと落下させるため、吸引ポンプを用いて初期高さで保持し落下させた。モデルが水面に衝

## 2. 実験方法

カエルの飛び込み実験は600x300x360mm<sup>3</sup>の水槽に120mmの高さまで水を満たし、空気中から水中へと飛び込む様子を観察した。カエルは体長30mmのトウキョウダルマガエルを使用した。水面から30mmの高さに飛び込み台を設置した。カエルが水面に衝突した際に形成されるスプラッシュはハイスピードカメラ(Phantom Miro eX4, Vision Research Inc.)を使用する

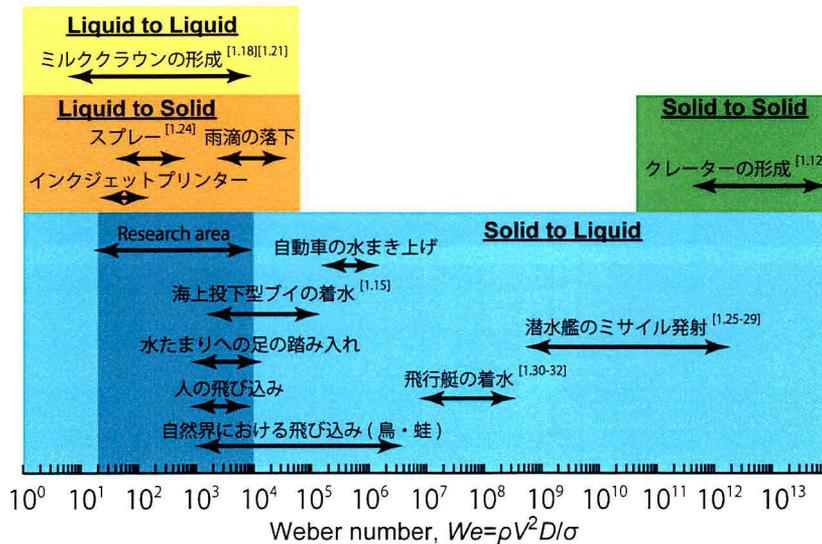


Fig. 1 Classification of impacting phenomena.

突した際に形成されるスプラッシュはハイスピードカメラ(Phantom V7.1, Vision Research Inc.)を使用することにより撮影した。フレームレートを 4000fps とし て撮影した。撮影時の光源として 500W のハロゲンランプを用いた。

### 3. 実験結果

Figure 2 にカエルが水面に飛び込んだ際に形成されるスプラッシュの様子を時系列に示す。時間は図の左上から右下に向かって進む。カエルの飛び込み時の姿勢から、前肢を体に沿わせている。後肢は揃えることなく前後に開いたような姿勢を取っていることがわかる。スプラッシュの形成に関して、カエルが水面に接触した直後に液膜が形成されていることが観察された。この液膜はカエルの体が水面下に沈むと、背部付近から剥がれ低い王冠状のスプラッシュとなっている。その後、脚と体の接続部分付近から水面下にキャビティが形成され始める。形成されたキャビティは、脚も水面下に沈んだあたりから小さな気泡形成をともないながら崩壊を始めた。最終的に形成されるスプラッシュは小さいものであった。このことからカエルは飛び込む際に前肢をたたんでいることから、形状としては水面に対しての投影面積を小さくしていることが考えられる。モデルを用いた実験により、カエルの飛び込みによって形成されるスプラッシュが小さい理由について考察を進める。

物体形状による影響を調べた結果を Fig. 3 に示す。物体形状は先頭形状が半球、後部形状が円錐(Cone-tail)、円柱(Cylinder-tail)、NACA0012 翼型断面の軸対称モデルについて実験を行った。Cone-tail 及び Cylinder-tail ではモデルが水面に衝突した直後に形成された液膜が剥がれ水面下にキャビティが形成されている。この液膜の剥がれた位置は形状が急激に変化する先頭部と後部の接続部分(Cone-tail)及び後部の終端(Cylinder-tail)であった。さらに剥がれた液膜が衝突することによってスプラッシュが形成された。Cone-tail ではキャビティ内部にスプラッシュが形成されている。これはスプラッシュ形成時の液膜接触角度が後部形状によって変わるためである。NACA0012 モデルで形成されるスプラッシュが最も小さくなった。このことより形状の急激な変化は液膜のはく離を引き起こし、その後液膜衝突による新たなスプラッシュの形成が起きることがわかった。このことからカエルが前肢を体表面に沿わせて飛び込む事は、滑らかな形状を作り、前肢からの液膜のはく離を抑制するためだと言うことがわかる。

物体表面性状の影響について Fig. 4 に示す。実験には親水性の強さによる影響を考慮するためアクリル製のモデルと生体表面を模擬したハイドロゲルによるモデルにより比較した。アクリルモデルでは衝突によって形成された液膜は剥がれずキャビティは形成されていない。ハイドロゲルモデルでは液膜は剥がれ水面下にキ

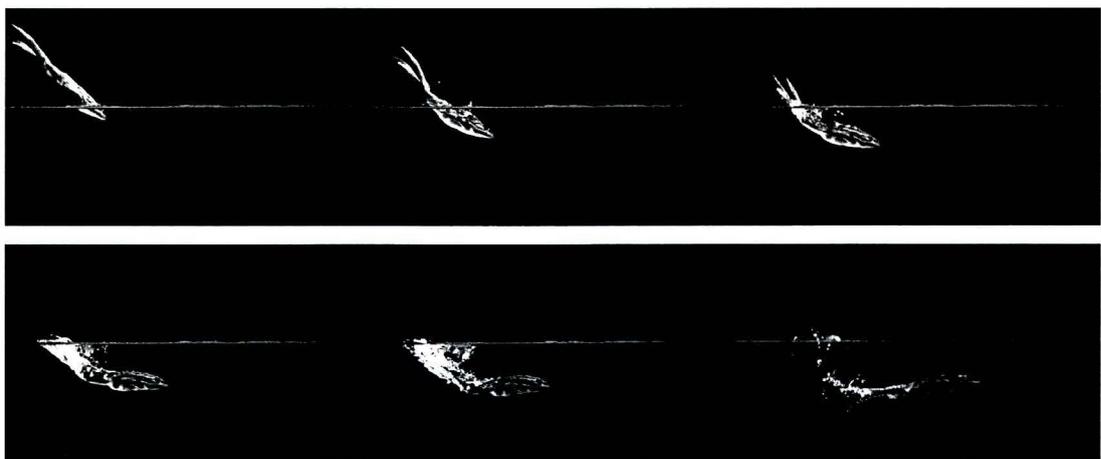


Fig. 2 Sequence of frog diving into water

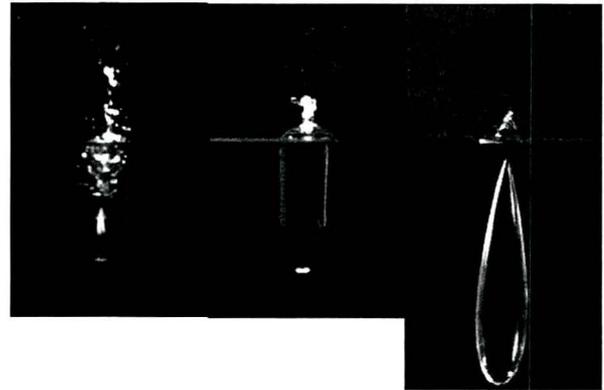
キャビティが形成された。これは、親水性の程度が強くなるのに伴い液膜の移動速度が増加したためである<sup>9)</sup>。以上のことよりカエルが前肢をたたみ形状を滑らかにしたにもかかわらず液膜がはく離したのは、体表面が hidroゲルのように親水性の程度が強いためである。

#### 4. まとめ

カエルが水面に飛び込みにより形成されるスプラッシュについて調べた。カエルの飛び込みの特徴を形状、表面性状の観点からモデルを用いた実験により明らかにした。カエルは前肢を体表面に沿わせて形状を滑らかにしキャビティの形成を抑制している。しかしながら体表面性状の親水性の程度が強いため衝突によって形成される液膜の移動速度が速くなりはく離した。

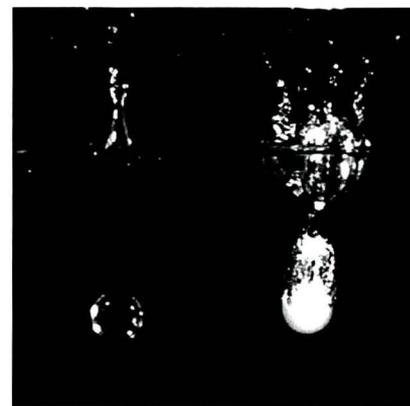
#### 参考文献

- 1) Y. Kubota, O. Mochizuki, Splash Formation by a Spherical Body Plunging into Water, *J. Visualization*, Vol.12, (2009) pp. 339-345.
- 2) Y. Kubota, and O. Mochizuki, Elemental Structure of a Splash generated by a Plunging Solid Body, *J. Flow Visualization and Image Processing*, 17, (2010) pp. 359-369.
- 3) Y. Kubota, O. Mochizuki, Influence of Head Shape of Solid Body Plunging into Water on Splash Formation, *J. Visualization*, Vol.14(2011), pp. 111-119.
- 4) Worthington, A. M., On Impact with a Liquid Surface, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 34 (1882-1883), pp. 217-230.
- 5) von Karman, The impact on seaplane floats during landing, *National Advisory Committee for Aeronautics Technical Note*, 321 (1929).
- 6) Duez, C. Y., Clanet, C. and Bocquet L., Making a splash with water repellency, *Nature Physics*, 3 (2007), pp. 180-183.
- 7) 戸谷剛, 南部航太, 川上哲人, 由利泰史, 永田晴紀, 高 Ohnesorge 数領域における液滴流の捕集と飛散を分ける閾値, *Space Utiliz. Res.*, 24 (2008), pp. 117-120.



(a) cone-tail (b) cylinder-tail (c) NACA0012

Fig. 3 Influence of model shape.



(a) Acrylic body (b) hydrogel

Fig. 4 Influence of hydrophilicity of body surface.

- 8) 渡健介, 白鳥英, 小澤俊平, 日比谷孟俊, ミルククラウン形成過程における重力加速度の影響について, *Space Utiliz. Res.*, 23 (2007), pp. 72-75.
- 9) Y. Kubota, and O. Mochizuki, Influence of Water Splash Formation by a Hydrophilic Body Plunging into Water, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011*.