

水滴の水面衝突に伴うミルク冠、気泡、水柱の形成・発達と衝突音の解析

有岡和奏*¹・橋本龍朋*²・大久保朱理*³・小松 颯*²・
西森光亮*³・横山有太*⁴・高田 拓*⁴

Relationship between milk crown formation, bubble, water column, and sound of waterdrop impact

Wakana ARIOKA, Ryuto HASHIMOTO, Akari OKUBO, Soh KOMATSU,
Kosuke NISHIMORI, Yuta YOKOYAMA and Taku TAKADA

Summary

Various structures can be observed when a water drop falls onto water surface. “Milk Crown” is a typical example of such structures. The sound of water is produced according to a series of processes occurring from the formation of a milk crown to its collapse. In this study, we developed a measurement system to investigate the relation between the milk crown structure, bubble, water column, and the sound of water. Consequently, we found that a sound of 3-4 kHz was generated and that the crown formed from the collision of the water drop with the water surface. Moreover, the milk crown formation and the water surface were dependent on the altitude of the water drop; however, they were independent of the water depth of regions more than 30 mm deep. Furthermore, the generation ratio of the collision sound tended to be high at water depths under 50 mm. These results suggest that both the fall altitude and the depth of water influence the milk crown formation and generate the accompanying collision sound.

1. 序 論

水滴が水面に衝突する時、水滴の跳ね返りとともに、ミルク冠と呼ばれる構造などが瞬間的に形成されることが知られている¹⁾。ミルク冠と呼ばれる所以は、形状が王冠に似ていることに加えて、ミルクに液滴を落とした際に典型的に見られるためである。図1にその形成過程の模式図を示す。水滴が水面に衝突すると、水滴を中心として円環状に水が跳ね上がり、押しのけられた水が冠状の構造を形成する。その後、ミルク冠の先端からジェットとして微小水滴が空中に飛散し、ミルク冠の大部分は潰れるように崩れ落ちる。また、液体の種類や条件にもよるが、ミルク冠の崩壊と前後して水滴が水中から跳ね返る。これらの現象は、異なる液体同士の混合などの観点から注目されており、研究が進んできた。

一方、水滴が水面と衝突する際には水音が発生する。水滴一滴の滴下による水音には特徴的な周波数成分が含まれていることが知られている²⁾。また、水滴の跳ね返りを伴う水滴衝突と音の関係については、乾いた剛球を水面に落下させた場合には、まず初めに振幅の大きな（音の）波が現れ

*1 高知工業高等専門学校 物質工学科 3年生

*2 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 3年生

*3 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 3年生

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

る。そして再度大きな波が現れ、最後に比較的振幅の小さな波が現れることが報告されている³⁾。この音の変化を整理すると、水滴が水面に衝突した瞬間に、振幅の大きな圧力波が発生し、一定時間音が発生せず、その後は気柱や気泡による音が発生する。ただし、ミルク冠が形成される場合の水滴の衝突と水音の関係についての報告はない。

本実験では、ミルク冠形成時の水面の変化と水音の関係を調べるため、ハイスピードカメラによる水滴衝突過程の撮像を行うと同時に、衝突音をマイクで集音し、音の波形を解析した。水滴を落とす水面の水深や水滴の落下高度を変化させることで、水滴衝突時の水面形状の時系列変化と、発生する水音の関係を調べた。さらに、水音を構成する様々な周波数成分と衝突時の水面形状の関係について考察を行った。以下で、その結果を報告する。

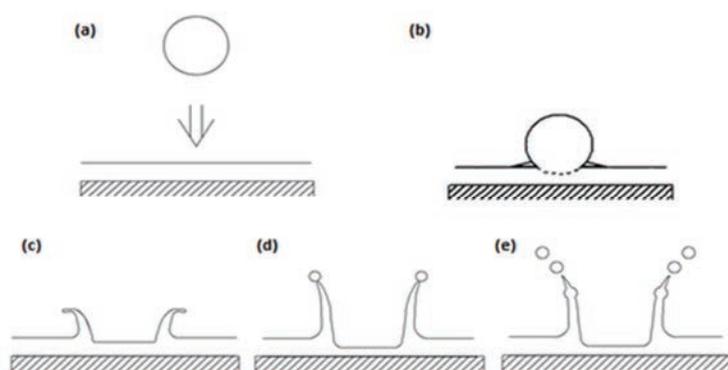


図1 ミルク冠形成の様子

(a)液滴落下 (b)衝突直後 (c)ミルク冠形成前 (d)ミルク冠形成 (e)微小液滴の飛散

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

本実験で使用した装置の外観を図2に示す。水を張った水槽(W315×D185×H245mm)に、ある高さからスポイトにより水滴を滴下する。水面での衝突の様子はハイスピードカメラで撮像し、衝突音はノートPCに接続したマイクで集音する。ハイスピードカメラの撮像素子は13.2×8.8mmサイズCMOSセンサー、記録画素数は640×240ピクセル(400fps)である。マイク形式はコンデンサータンタイプ、周波数特性は70~15000Hzであり、インピーダンスは2.2kΩ、感度は-35dB±3dB(0dB=1V/Pa, 1kHz)となっている。今回は、人が聞く水音に近い音を収集するため、水面から上方にマイクを設置した。水に濡れないように水面から少し距離を保っているが、十分に音の波形を得ることができた。表1に、実験に使用した各器具を示す。マイクによる録音や音の解析に関しては、フリーソフトであるWaveSpectra Ver.1.51を使用した⁴⁾。

2.2 実験方法

水滴の衝突による水面形状の変化と衝突音の関係を調べるため、図2の装置を用い、水深と水滴落下高度(水滴落下速度)を変化させて実験を行った。水滴の滴下には穴径2.1mmのスポイトを用い、一滴ずつ滴下した。水深変化実験では水滴の落下高度を90cmに固定し、水槽の水深を20mm、30mm、50mm、100mmに変化させ、それぞれの水深での水滴衝突時の水面形状の変化をハイスピードカメラで撮影するとともに、衝突音をマイクで集音した。落下高度変化実験では水深を100mmに固定し、水滴の落下高度を24cm、90cm、150cmに変化させた。

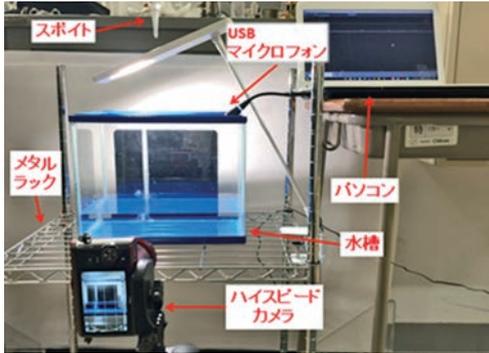


図2 実験装置の概要

表1 実験器具の型番

名称	メーカー	型番
水槽	NISSO社	
USBマイク	SANWA社	MM-MCU02BK
三脚	SLIK社	KS-505S
カメラ	Nikon社	1 J3
	Casio社	zr-800
メタルラック	IRIS OHYAMA社	SEM-5508

3. 実験結果および考察

3.1 水滴衝突による水面形状と衝突音の時系列変化

初めに、水滴衝突におけるミルク冠形成過程と衝突音の代表的な時系列変化を示す。図3は、水深50mm、落下高度90cmの場合の衝突音の波形と水面形状の変化である。水滴の滴下後、(a)水滴が水面に衝突し、(b), (c) 水滴を中心として水が跳ね上がってミルク冠が形成されると同時に、水中には落下の衝撃により気泡が発生する様子が観察された。その後、(d) ミルク冠は潰れるように崩れ落ち、(e), (f) 跳ね返った水滴が水柱を形成し、衝突からおよそ1.4s後には (g) 水柱が崩壊する様子が観察された。各段階での波形を見ると、水滴が衝突した瞬間に、振幅が大きく、非常に周期の短い波形が現れた。その後ミルク冠の形成に伴って振幅は徐々に小さくなるが、非常に周期の短い波形が衝突後50ms程度続く。一方、(c) のミルク冠の形成以降の各段階では特徴的な波形は現れず、背景音との見分けはつかなかった。この傾向は、他の水深・落下高度で行った実験に概ね共通している。このことから、水滴落下時に聞こえる音は、主に水滴が水面に衝突し、ミルク冠が形成されるまでに発生している音であると考えられる。

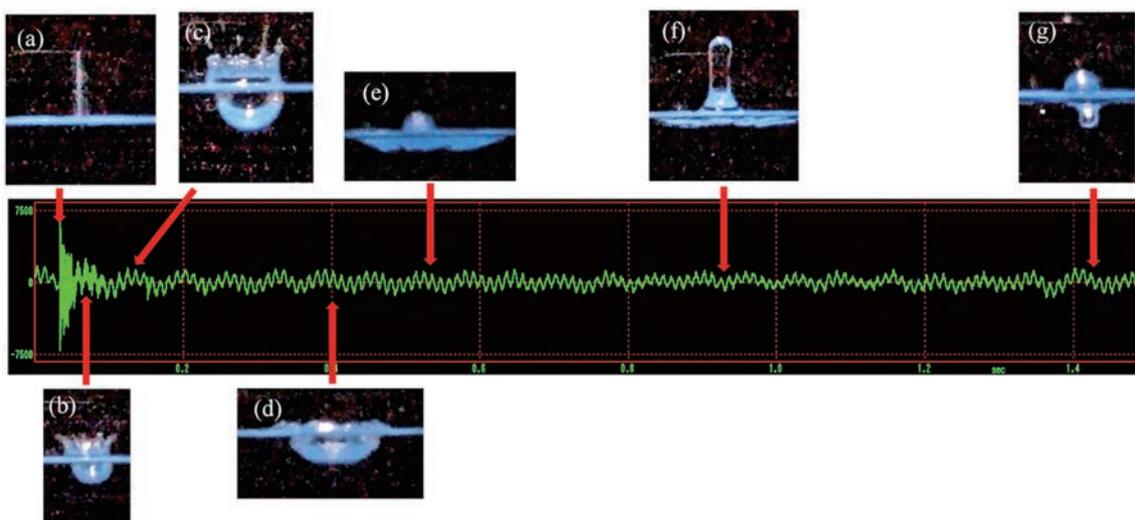


図3 水滴衝突によるミルク冠形成過程と衝突音の時系列変化（水深：50mm、落下高度：90cm）
 (a) 衝突直前、(b) 衝突直後、(c) ミルク冠形成、(d) ミルク冠崩壊、(e) 水柱の立ち上がり、
 (f) 水柱の高さ最大、(g) 水柱崩壊

図4に、水滴衝突前後の370ms区間の波形を拡大したものを示す。ミルク冠形成中の波形は、振幅は徐々に小さくなるが、その周期はほぼ一定である。ミルク冠がある程度形成されると波形はほとんど背景音と同様になるが、ミルク冠完成後から崩壊に向かう過程で、図中に丸で示したように非常に周期の短い波形が現れている。これは、ミルク冠形成過程で冠先端から飛び散った微小水滴による衝突音ではないかと考えられる。ただし、振幅は非常に小さいため、音としては聞こえない。また、ミルク冠が崩壊する音も聞こえなかった。

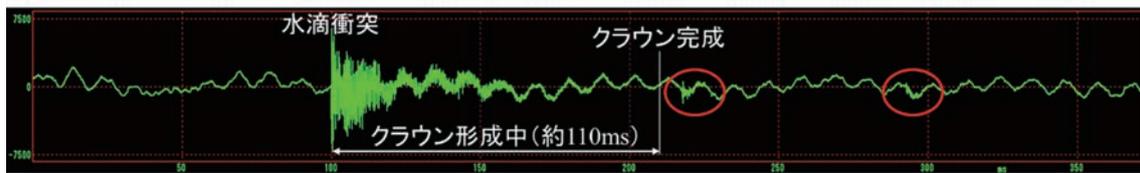


図4 水滴衝突前後の370ms区間の衝突音の波形（水深：50mm、落下高度：90cm）

3.2 水深による衝突時波面への影響

次に、一定高度（90cm）から水滴を滴下したときの水深による水面形状の変化を示す。水面形状の変化を表す指標として、ミルク冠の最大高さ、水中に生じる気泡の深さ、跳ね返った水が作る水柱の高さの3つに着目した。図5に、各水深における水面形状変化の代表的な画像を、図6に、これらの統計を取ったものを示す。図6のグラフは、水深1.0mmで1回、20mmで2回、30mmで4回、50mmで4回、100mmで6回ずつ測定したデータの平均値（図6（d））である。グラフのエラーバーは各データの平均値からのズレを表している。図6（a）のミルク冠の高さは、水深1.0mmで最大値をとり、水深20mmで最小値をとるが、誤差を考慮すると水深に依らずほぼ一定であるように見える。一方、図6（b）の気泡の深さと（c）の水柱の高さは似た傾向を示す。気泡の深さは水深20mmで最小値をとり、水深30mmで最大値となる。水深30mm以降は水深が深くなるにつれて値は徐々に減少していくが、大きな変化とは言えない。ただし、水深1.0mmでの気泡の深さは測定できていない。水柱の高さは、水深1.0mmで最小値、水深30mmで最大値をとり、以降は水深が深くなるにつれて徐々に減少する。

一般に、水滴サイズが同じであれば、落下の衝撃で形成される気泡のサイズおよび水滴の跳ね返りに伴い形成される水柱の高さは、水滴の落下高度（落下速度）に依存すると考えられる。この実験では落下高度は一定であるため、図6の違いは水深の違いによる影響を示している。水深が浅い場合、衝突によるエネルギーが水槽の底面に沿って横方向に分散してしまい、水が受ける衝撃は小さくなる。しかし、ある程度の水深があると、落下の衝撃を水が全て受け止め、それに応じた気泡や跳ね返りが発生すると考えられる。一方、ミルク冠の高さは水深による影響がそれほど大きくはない。一般に、ミルク冠の形成には衝突速度や水滴サイズだけでなく、液体の密度、表面張力などが影響する⁵⁾。そのため、ミルク冠の高さの水深依存性はあまりないと考えられる。実際、水深1.0mm程度の非常に浅い水面に水滴を落下したときに形成されるミルク冠の高さは、水深30mmの場合とほとんど変わらないのに対し、水柱の高さは水深30mmの場合の45%程度である。

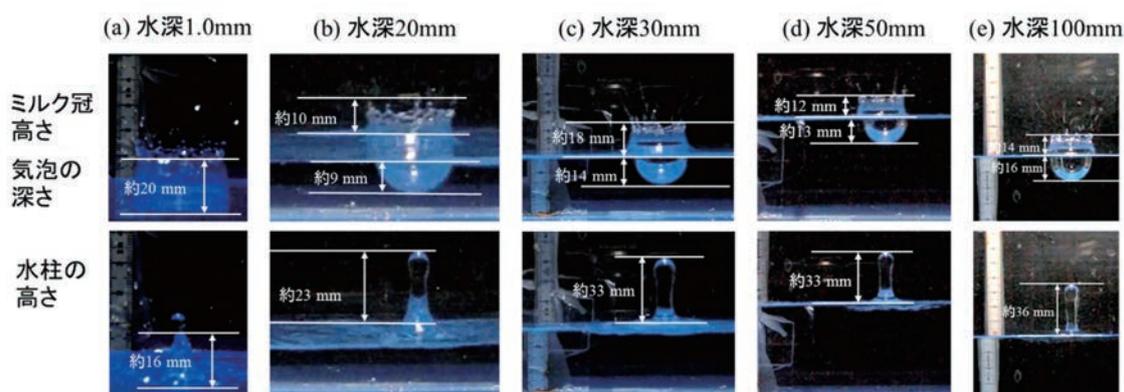


図5 各水深における代表的なミルク冠の最大高さ、水中に生じる気泡の深さ、水柱の高さ

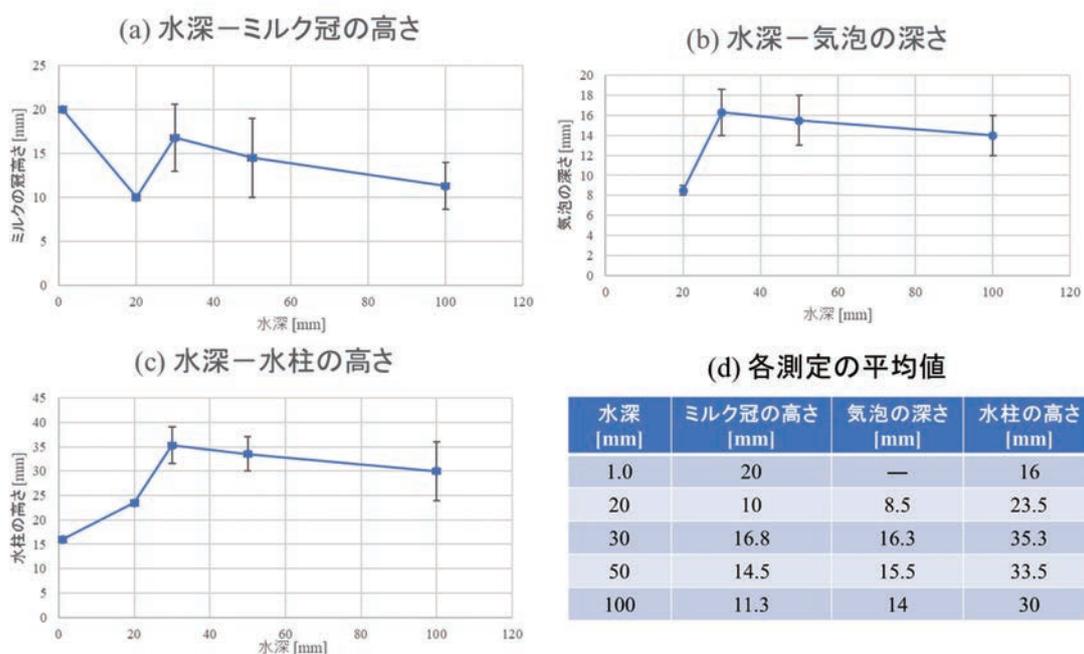


図6 水深とミルク冠の最大高さ、水中に生じる気泡の深さ、水柱の高さの関係

3.3 落下高度による衝突時波面への影響

次に、一定水深（100mm）の水面へ、落下高度を変えて水滴を滴下したときの水面形状の変化を示す。図7に、各落下高度における水面形状変化の代表的な画像を、図8に、これらの統計を取ったものを示す。図8のグラフは、落下高度24cmで4回、90cmで6回、150cmで3回ずつ測定したデータの平均値（図8（d））である。グラフのエラーバーは各データの平均値からのズレを表している。図7を見ると、水面形状、特にミルク冠の形状が落下高度によって大きく異なることがわかる。落下高度24cmではほとんど形成されないのに対し、落下高度150cmでは内側に曲がったドーム状のミルク冠が形成されている。また、図8から、ミルク冠の高さ、気泡の深さ、水柱の高さいずれにおいても落下高度が高くなるほど増加していることがわかる。3.2で述べたように、落下の衝撃は落下高度が高くなる（落下速度が大きくなる）ほど増加する。つまり、水滴の衝突により発生するミルク冠や気泡、水柱の高さは衝突時のエネルギーに依存していることが確認できた。

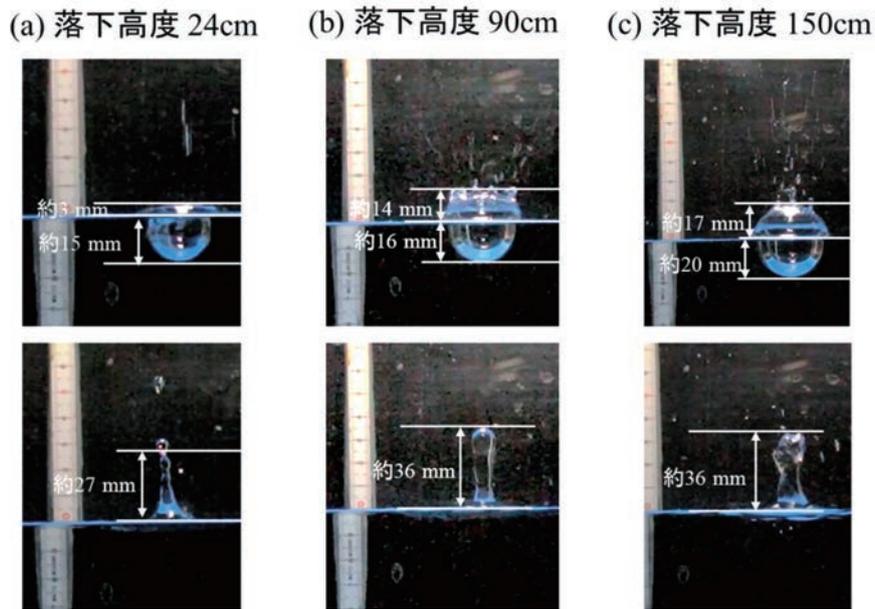


図7 各落下高度における代表的なミルク冠の最大高さ、水中に生じる気泡の深さ、水柱の高さ

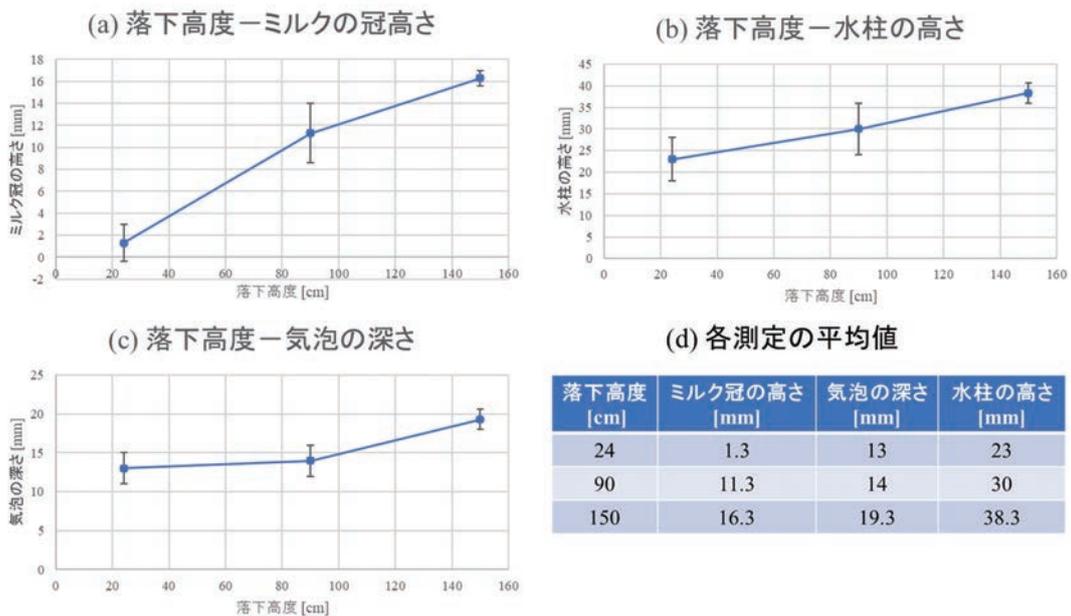


図8 落下高度とミルク冠の最大高さ、水柱の高さ、水中に生じる気泡の深さの関係

図9に、各落下高度における衝突音の波形（衝突からミルク冠の崩壊途中まで）を示す。各場合の波形は概ね似ており、落下高度が高いほど水滴落下音の振幅が大きくなっている。これは落下高度が高いほど衝突時のエネルギーが大きいためである。落下高度90cmでは、最初の落下音の35ms程度後に振幅の大きな部分がある。これは、水滴が一滴ではなく、落下途中で分裂し、ほぼ同時に二滴衝突していた可能性がある。また、落下高度150cmでは、図4で見られたようなクラウン崩壊に伴って飛び散った水滴に由来すると考えられる波形が複数観測された。さらに、衝突音が生じる70ms程度前から、背景音とは異なる波形が現れている。これは、参考文献3で述べられている衝突の瞬間の圧力波である可能性もあり、今後詳細を調査する。

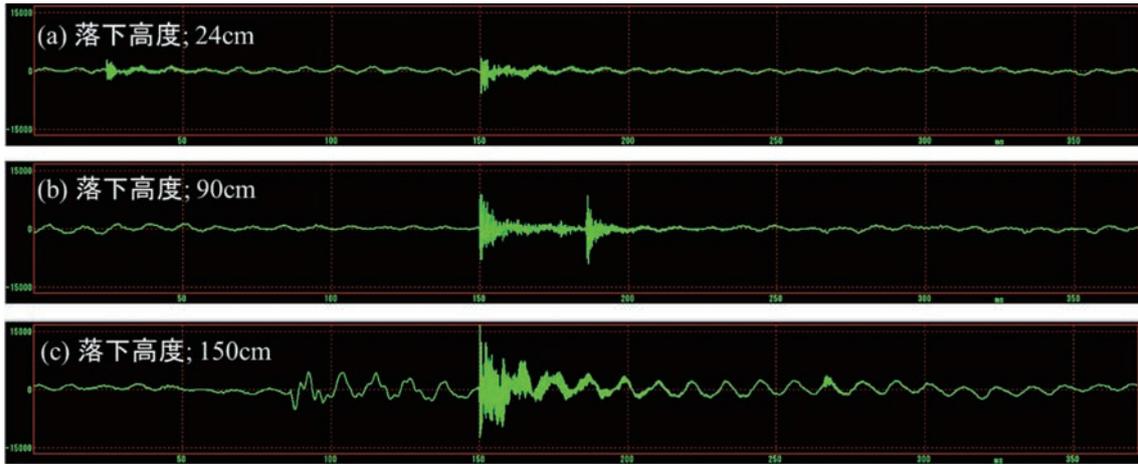


図9 各落下高度における衝突音の波形

3.4 衝突音の有無に関する考察

ここまで、水滴の衝突音がはっきりと現れた例について述べてきたが、実験では、水深・落下高度が同じ条件でも、衝突音が明瞭な場合と、不明瞭もしくは全く聞こえない場合があった。そこで、各条件での水滴衝突音の有無を調べた。その結果を表2にまとめる。この表から、水深が1.0~2.0mmから50mmの間は比較的衝突音が発生しやすいことがわかる。また、水深100mmでは落下高度によって大きく差があり、落下高度が最も高いときに衝突音の発生する割合が高かった。

以上の結果より、衝突音の発生には水面に衝突した水滴がどれほど水槽の底に近づくかが関係していると考えられる。水面から水槽の底までの距離が近ければ衝突音は現れやすく、遠ければ衝突音は現れにくい。この推論から、水深50mmの場合より1.0~2.0mmや30mmの場合のほうが衝突音の発生割合は大きくなると考えられるが、本実験はどれも試行回数が少なかったためこのような結果になったと考えられる。水深100mm、落下高度150cmの場合については、落下高度が高く水滴の落下速度が大きくなるため、落下した水滴がより水槽の底に近づいたと考えられる。

表2 各実験で観測された衝突音の回数と実験総数に対する割合

水深[mm]	1.0~2.0	30	50	100		
落下高度[cm]	90	90	90	24	90	150
実験総数[回]	3	3	13	4	6	4
衝突音あり[回]	2	2	9	1	1	2
割合	67%	67%	69%	25%	17%	50%

衝突音は、水滴落下時の水滴の速度、大きさ、個数、形状、水面の状態などいくつかの要素が組み合わさって発生すると考えられる。本実験ではスポイトで一滴ずつ滴下しているが、落下途中で2つに分裂したり、微小水滴が同時に落下していたりする可能性がある。そこで、水滴落下直前の画像を詳細に確認した。しかし、水滴が一粒の場合、微小水滴を伴う場合とも、音が発生する場合としない場合があり、系統的な結果は得られなかった。現在のカメラのフレームレートでは水滴の形をとらえるだけの解像度がないため、今後衝突時の水滴の形を詳細に解析することで、衝突音の有無に関する知見が得られると思われる。

3.5 衝突音の波形と周波数に関する考察

最後に、衝突音の波形と周波数について考察する。図10は、落下高度150cm、水深100mmでの衝突音の波形(図9(c))を周波数解析した結果である。赤線はバックグラウンドの周波数を示す。水滴落下時に生じる音(図中Aの部分)の周期はおよそ0.28msであり、これは約3.6kHzの周波数に対応している。また、飛び散った水滴由来と思われる波形(図中Bの部分)の周期は0.11ms程度であり、これは約9kHzの周波数に対応している。

本実験では、水滴の水面衝突時に発生する音の波形と含まれる周波数成分を解明することができた。一方、水面との衝突により発生する音はおよそ50ms以内で減衰してしまうため、水面形状の変化と発生する音の対応付けを行うまでには至らなかった。今後、よりフレームレートの高いハイスピードカメラによる撮像や、連続液滴による実験などを行うことで、水滴衝突による水面形状の変化と衝突音の詳細な関係を解明する予定である。

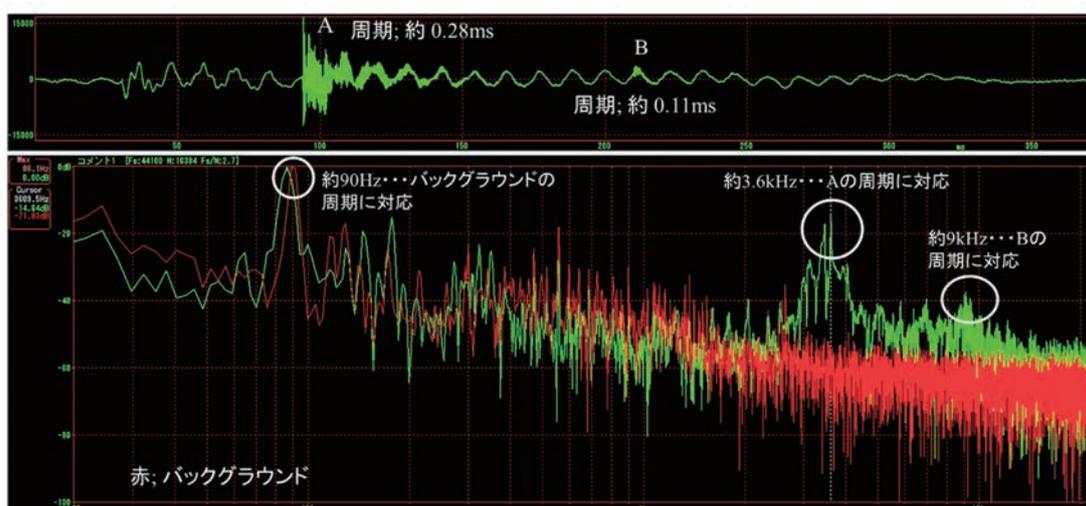


図10 落下高度150cm、水深100mmでの衝突音の波形と周波数解析結果

4. まとめと今後の課題

本研究では、水滴と水面の衝突時に生じる水音とミルク冠などの形成との関係について水深、落下する高さの2つの条件を変化させて調べた。以下、主要な結果をまとめる。

(1) 水深を変化させた実験

水滴一滴を水面に落とした場合、水滴が水面に衝突した瞬間、振幅が大きく周期の短い波形が現れた。ミルク冠形成に伴い、振幅は徐々に小さくなるが、周期の短い波形は衝突後およそ50ms続くことがわかった。よって、水滴落下時に聞こえる音は、水滴が水面に衝突し、ミルク冠が形成されるまでに発生していると考えられる。

また、ハイスピードカメラによる画像から、ミルク冠の最大高さ、水中に生じる気泡の深さ、跳ね返った水が作る水柱の高さを計測した。その結果、ミルク冠の高さは水深に依らずほぼ一定であるのに対し、気泡の深さと水柱の高さは水深1.0mm~30mmでは急激に増加し、水深30mm以降は徐々に減少していく傾向が見られた。これは、水深が浅い場合、衝突によるエネルギーは水槽の底面に沿って横方向に分散するため水が受ける衝撃は小さくなるが、ある程度の水深があると、落下の衝撃を水が全て受け止め、それに応じた気泡や跳ね返りが発生するためであると考えられる。

(2) 滴下高度を変化させた実験

水滴一滴を滴下高度を変化させて落とした場合、滴下高度を高くするほどミルク冠の高さ、水柱の高さ、気泡の深さの値が全体的に上昇していくことがわかった。また、滴下高度の上昇に伴い、水滴衝突音の振幅が大きくなっていることが確認できた。これは落下高度が高いほど衝突時のエネルギーが大きくなるためであると考えられる。

(3) 衝突音の有無および波形と周波数

衝突音の有無を調べた結果、水深が浅い方が衝突音が発生する割合が高いことがわかった。また、水滴落下時に生じる主要な音の周波数は約3.6kHzであり、飛び散った微小な水滴由来と思われる音の周波数は約9kHzであることがわかった。

今回用いたハイスピードカメラによる測定では、落下時の水滴形状を明瞭に観察することはできなかった。今後、よりフレームレートの高いハイスピードカメラによる撮像や連続液滴による実験などを行うことで、水滴形状と衝突音の有無の関係を含めた、より詳細な水滴衝突と衝突音の関係を解明していく。

謝 辞

本実験装置は、一般財団法人WNI気象文化創造センターからの助成金により製作することができました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Gangtao Liang, Issam Mudawar, “Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, October (2016).
- 2) 橋本龍朋、有岡和奏、大久保朱理、小松颯、横山有太、高田拓、衝突音による雨の分類のための基礎実験結果、高知工業高等専門学校学術紀要、62, 55-62, (2017).
- 3) 森康夫、水上雅人、武士保健、剛球または水滴の水面への落下および水流により発生する音の研究、日本機械学会論文集 (B編)、Vol. 53, 487, (1987).
- 4) WaveSpectraダウンロードページ<http://efu.jp.net/soft/ws/ws.html> (2016/09/30)
- 5) 郡司博史、石井秀樹、斉藤亜矢、酒井敏、「ミルククラウンに関する研究」、日本流体力学会ながれマルチメディア (2003) http://www2.nagare.or.jp/mm/2003/gunji/index_ja.htm (2017/11/14)

受理日：2017年11月14日