

ドルフィンリングを作って遊ぼう！

茨城大学 工学部 機械工学科 松村研究室

代表 幸田美沙紀

SAIFULAKMAL、鈴木敏修、常盤昭文、鷲山博紀

1. ドルフィンリングとは

ドルフィンリングとは別名バブルリングとも呼ばれ、水中で形成されるドーナツ状の空気のリングである。水族館のイルカショーや、近年はテレビ CM にも使用されており、多くの人目に触れる機会も次第に増えてきた。イルカ達が自ら作ったリングを作って遊ぶことはよく知られているが、人間も練習次第で口に含んだ空気によって作ることが可能である。ところで、イルカの口から出されたドーナツ形状のドルフィンリングは空気で作られた泡にも関わらず、その形状を大きく崩すことなく、水中を安定的に自在に進む。イルカが作ったドルフィンリングは水平方向に押し出されても、浮力の影響を受けることなく、そのまま水平方向に直進する。さらに、イルカが鼻先でリングに触れるとリングが複数個に分割されたり、その逆にリング同士が合体してひとつのドルフィンリングが形成されるなど、未だに解明されていない点が数多く残されている。



2. リングができる原理

ドルフィンリングを形成には、渦輪が利用されている。渦輪の特徴である、中心が速く周囲が遅いという流れの仕組みを利用している。渦輪を元にしたリングの形成は図1のようになっている。リングのノズルから排出された気泡の中心部の上昇速度が、外側よりも速くなる時、図1のような流れが発生する。

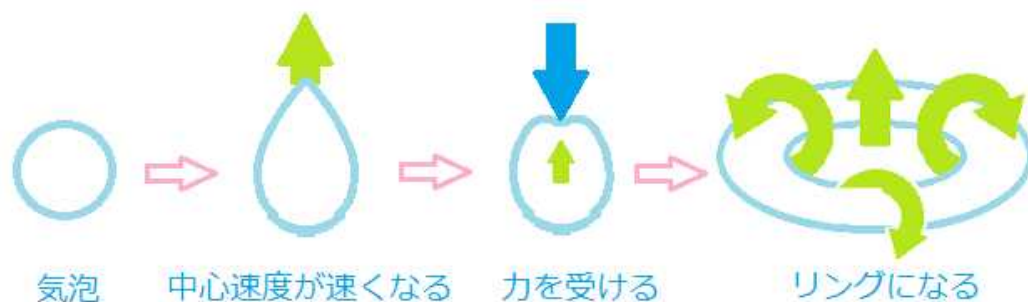


図1 渦輪の形成

図1の力というのは、気泡が受ける浮力や慣性力、水の抗力や表面張力などである。これらの力により、中心速度が速くなった気泡は潰れ、残った気泡の勢いで一番右の図のような流れが生まれ、リングになる。

この原理より、工学的に実験でドルフィンリングを作るためには、中心の流れが速い気泡を作り、またリングにかかる力をうまく調整することが重要である。

また、イルカがリングを形成する際にも渦輪の利用があると考えられている。しかし、イルカがドルフィンリングを作る仕組みとダイバーがリングを作る仕組みは異なると考えられる。まず、イルカがリングを作る方法ははっきりと解明されていない。①尾鰭などで自分の周りの水に流れを作り、その流れに口から吐いた空気を乗せてリングにしているという説や、②空気と一緒に水を少し口に吸い込み、その水を勢いよく吐き出して渦輪をつくるとき一緒に吐く空気が渦輪に巻き込まれてリングになるという説などがある。

①の鰭で流れを作り空気を乗せる方法は、牛乳パックなどで簡単に再現できる。図2に示す方法で予備実験を行った。

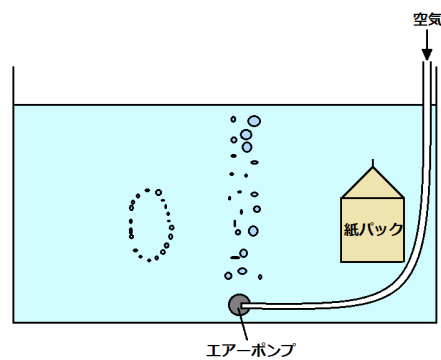


図2 簡易的なバブルリング作成

適当な穴を開けた紙パックを水槽に沈め、その紙パックの側面を勢いよく押すことで渦輪を発生させ、その渦輪を熱帯魚用のエアープンプで作った泡のカーテンを通り抜けるとバブルリングになる、という方法である。

この予備実験では紙パックの穴の径を6パターン用意し、穴の径とリングの出方の関連を調べた。穴の径と生成結果を表1に示す。30mmのときのリングの写真を図3に示す。

表1 穴の径と結果

穴の直径(mm)	リング生成
8	
10	
15	○
20	○
30	○
50	○

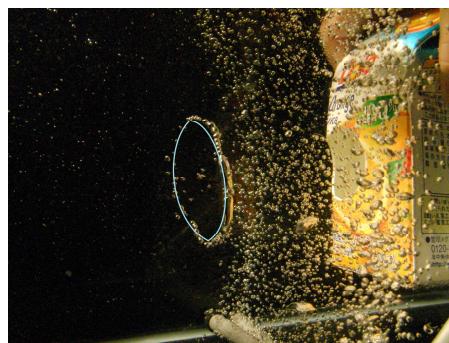


図3 径30mmのときのバブルリング

②一緒に出した空気が渦輪に巻き込まれてリングになる方法を用いて、本研究を行った。

また、ダイバーがドルフィンリングを作る方法は、空気を口から吐き出す際に唇でこするようにして、空気の渦輪を作る方法が多い。

3. 実験目的

ドルフィンリングが水中でドーナツ状のまま安定して存在する理由や、分裂・合体してもその形状を保つ理由は、まだほとんど解明されていない。そのため、我々はまず水中でリングを作る装置を作成し、ドルフィンリングに関連する謎を解明したいと考えた。イルカの作るリングはとても美しく、それで遊ぶ様子は年齢や人種を問わず、見る人をとても楽しい気分させる。このドルフィンリングは、物理的な謎の解明も面白さのひとつであるが、人々を喜ばせるおもちゃや道具などに応用が可能であると考えられるため、今回の実験ではドルフィンリングを簡単に作り、構造を解明することを目的として実験をする。また、リングを作る媒体となる水や空気に熱を加えて温度を上げて粘度などを変化させ、ドルフィンリングの形成に大きな影響を与える表面張力や抗力による形成の影響を調べる。

4. 実験（ドルフィンリング作成）

4.1 実験装置

図4.1に実験装置図を、図4.2に実際のノズル部を示す。

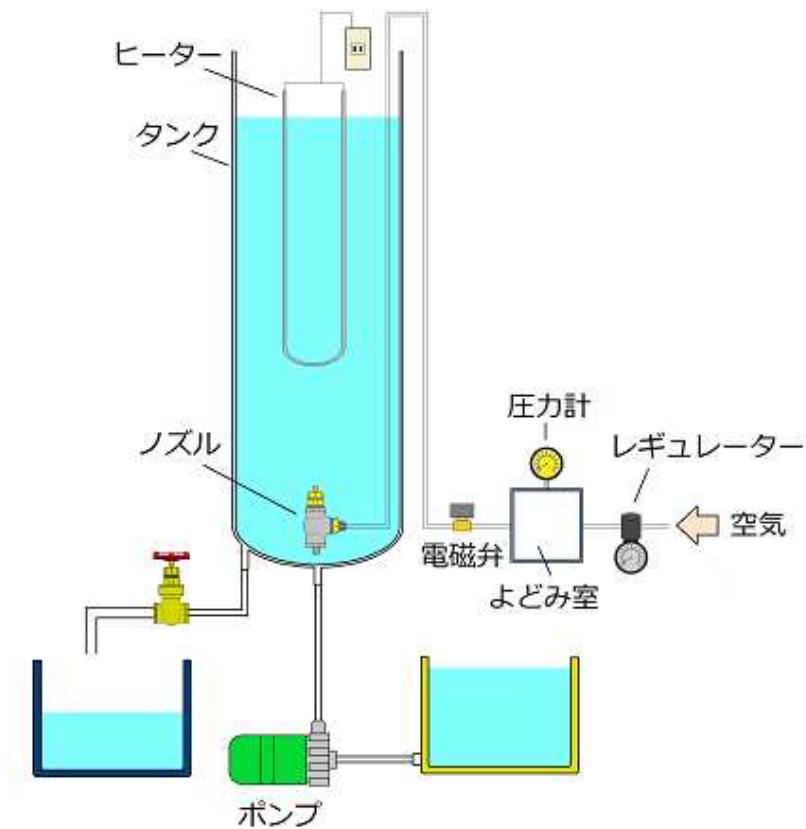


図4. 1 実験装置図



図4. 2 ノズル部

このタンクは水深 1000mm である。予備実験などより、ドルフィンリングの形成にはなるべく多くの深さが必要であることがわかっていたので、このタンクを使用することにした。

4. 2 実験方法

以下の方法で実験を進める。

- ① タンクに水を貯める。
- ② 空気を流入し、レギュレータによって空気を圧縮する。
- ③ よどみ室の圧力を圧力計を用いて測定する。今回、3つのパターンの圧力で実験を行う。
- ④ 電磁弁を用いてノズルから空気を流出する。ただし、電磁弁のスイッチは手動でON/OFFを切り替えるものになっているため、ノズルから流出する空気流量は一定ではない。
- ⑤ ドルフィンリングが形成する様子をハイビジョンカメラで撮影する。さらに流動特性を観察するために高速度カメラでも撮影を行う。
- ⑥ タンク内に入れたヒーターで水を加熱し、温度成層を作り、リングの形成状態への影響を調べる。
- ⑦ ヒーターで温めた水温の表面温度を2分おきに20分間計測し、タンク内の温水をそのまま何もしないで放置した場合と、ドルフィンリングでタンク内を攪拌したときの温度降下の差について検証する。

今回のコンテストでは時間の都合上、⑥、⑦の実験が行えなかった。

4. 3 実験条件

今回ドルフィンリングを発生させる気泡出口となるノズルは、径4mmのものを使用した。これは、紙パックの予備実験などでもわかっていた、気泡出口径は大きいほうがリングの形成がしやすい、ということより選定した。

表2によどみ室の圧力の条件を示す。

表2 実験条件

	圧力[kPa]
パターン1	50
パターン2	100
パターン3	200

次にハイビジョンカメラの撮影条件を示す。

表3 ハイビジョンカメラ撮影条件

	撮影場所	撮影角度
パターンA	全体	正面
パターンB	全体	斜め上に
パターンC	全体	斜め下に

また、表4に高速度カメラの撮影条件を示す。

表4 高速度カメラ撮影条件

	撮影場所	撮影角度	フレームレート [fps]	シャッタ 速度	絞り
パターンA	ノズル付近	正面	1000	1/4000	1.4
パターンB	タンク中央部	正面	1000	1/4000	1.4
パターンC	タンク中央部	斜め下に	1000	1/5000	1.4

表3, 4の各撮影パターンを各圧力パターンで実験を行う。

4.4 実験結果

動画1に圧力を200kPaに変化させたときのドルフィンリングの様子を示す。動画の構成は、ハイビジョンカメラで撮影したタンクの全体図、下からリングを見上げる図、高速カメラで撮影した気泡離脱時のノズル拡大図、高速カメラで撮影したリングの成長挙動を観察したタンク中心部、となっている。

動画の全体図や、下から見た図でわかるように、リングは中心を下から上にグイグイと押すような流れを作っていることがわかる。また、上昇していくにつれ、水の抵抗をうけ、リングが徐々につぶれて広がっていることもわかる。さらに、高速カメラでの動画を見るとわかるように、ノズルから出て離脱するまでで、気泡が蝋燭の火のような、中心部だけ尖っている形になっていることがわかる。これは、渦輪の形成で重要な、中心速度が速く、周りが遅くなっていることの現れである。

また、図5～7にハイビジョンカメラで撮影した、圧力パターン1～3のドルフィンリング形成の成功写真を示す。



図5 パターン1
(撮影：パターンA)

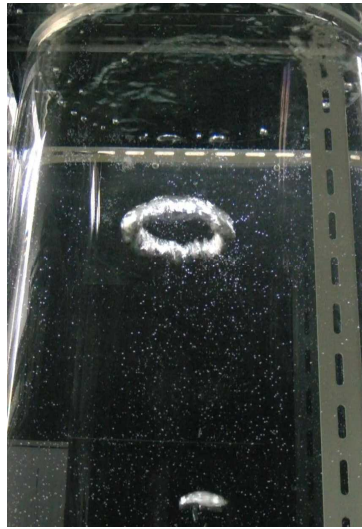


図6 パターン2
(撮影：パターンB)



図7 パターン3
(撮影：パターンC)

5. 考察

5.1 圧力の影響

- 50,100,200kPa の比較

表5に50,100,200kPaの比較を示す。

表5 圧力パターンの比較

	噴出時の 気泡の大きさ	リングの形状	リングの形成
パターン1 (50kPa)	細かい	不安定	成功しづらい
パターン2 (100kPa)	パターン1と2の間	安定	成功しやすい
パターン3 (200kPa)	大きい	安定	成功しやすい

表5より、圧力パターン1は、噴出時に気泡が細かいため、リングは成功しづらい。また、リングができてはすぐに崩れることが多い。一方、圧力パターン3は気泡の大きさが大きいため、その気泡がリング状になったとき安定し上昇する。しかし、気泡が大きすぎるとリングはできるものの、きれいな形状をしないことが多い。

- 全体としての失敗時の条件

以下にドルフィンリング形成の失敗したとき状況を挙げる。

- 気泡の塊が複数できたとき
- 気泡が合体しないとき
- タンク内に流れがあるとき

図8にドルフィンリング形成の失敗例を示す。

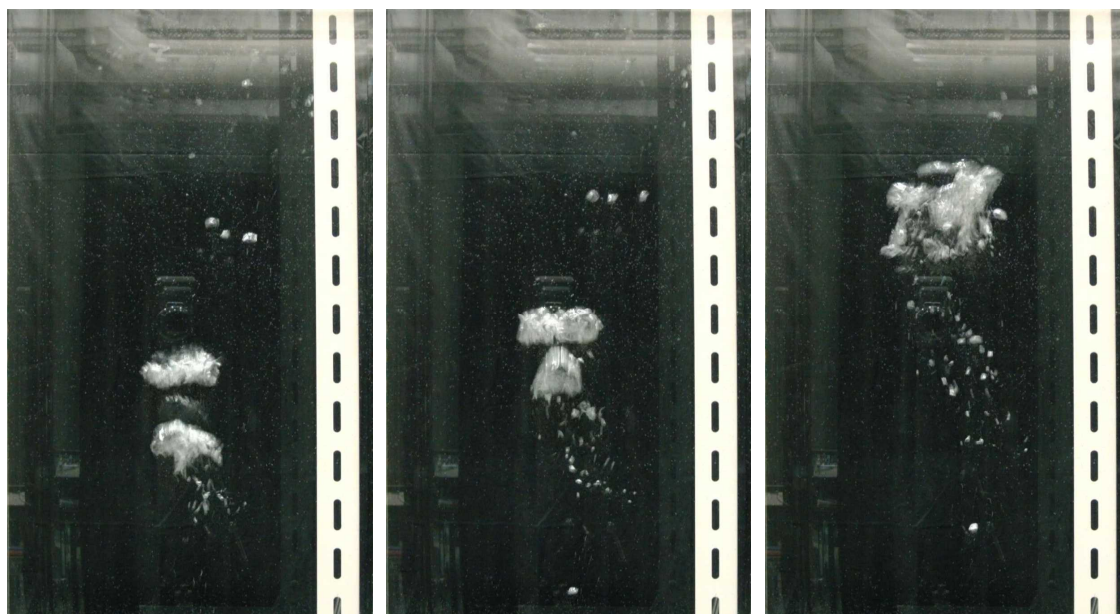


図8 失敗例(パターン1, 撮影: パターンA)

動画1を見ると、圧力が大きいとドルフィンリングができやすく径も大きくなっているのに対し、圧力が小さい場合は、径が小さくドルフィンリングもできにくくなっている。これには、空気を噴出するときの量と速度が関係していると考えられる。動画を比較してみると、圧力が大きいものほど、気泡が多くドルフィンリングの速度も速くなっていることが分かる。その上昇速度が渦輪の流れを作る助けになってリングの形成がしやすくなったとも考えられる。

このことから、ドルフィンリングを大きくかつ壊れにくくするには、噴射量を多くしたり、初速度を増加させる必要があると思われる。

5. 1 おじゃまプレートの影響

5. 1. 1 おじゃまプレートの作成

4の実験でドルフィンリングをスイッチひとつで作成することが出来た。簡単にきれいなリングを作れるため、楽しくなって研究メンバーでたくさんリングを作り、このリングがぐるぐると回転しながら勢いよく大きなタンクを上昇していく様子を見ていると、リン

グを保ったまま、丸だけでなく三角形や星の形状にできたらもっといろいろな人が楽しくなってくれるのではないかと考えた。そこで、ドルフィンリングを様々な型を通すことで形を変える方法を考案した。

形を作る型をおじゃまプレートと呼ぶ。まずおじゃまプレートとなるプリンのカップを使用して、図9のように、容器の底に簡単のため、丸、正方形、正三角形の3パターンの穴を開けた。このとき、それぞれの形の水力直径が等しくなるよう穴が開けてある。表6に各々の形の一辺の長さを示す。

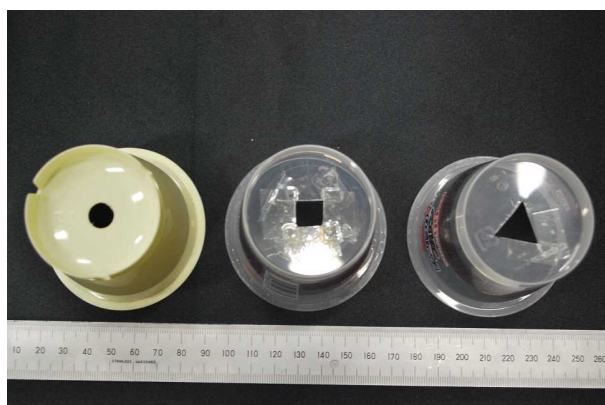


図9 容器

表 7.1 それぞれの形の長さ

	直径・一辺の長さ
丸	10mm
正方形	10mm
正三角形	17.3mm

次に、このおじゃまプレートを接着する銅板を図10のように作成し、これに容器を接着させたものを図11に示す。そして、これをアングル材で固定し、図12のように実験装置に装着させる。



図10 銅板

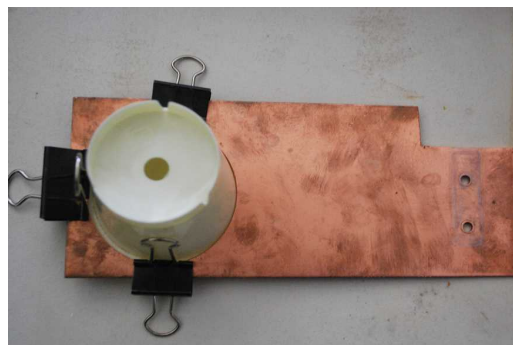


図11 接着図

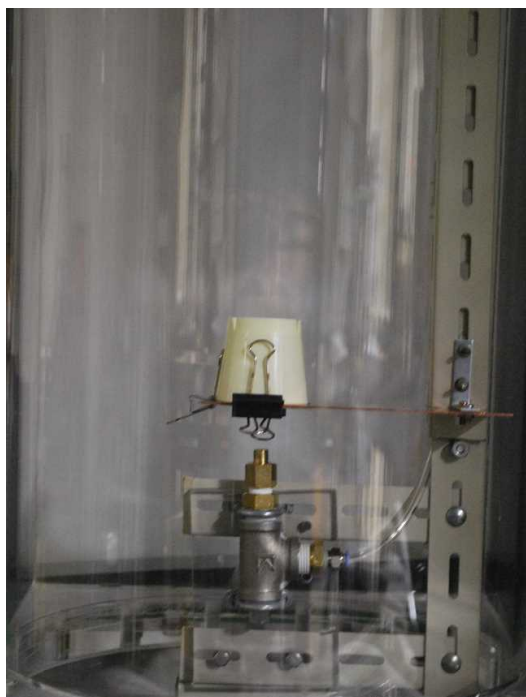


図 1 2 装着図

5. 1. 2 結果

動画 2 におじゃまプレートを変化させたときの結果を示す。動画 2 は、ハイビジョンカメラで撮影したタンクの全体図、それぞれのプレートのパターンでの下からリングを見上げる図、高速カメラで撮影したプレートが丸の場合のリングの成長挙動を観察したタンク中心部、となっている。

この動画をみると、どのプレート使用した場合でもドルフィンリングは形成でき、大きさも変化していないことが分かる。このことから、プレートの穴の形を変化させてもドルフィンリングにあまり影響しないと考えられる。勢いがあるドルフィンリングであったが、様々な形のリングにすることは今回出来なかった。しかし、これまでリングという形状から、リングを作るには丸い気泡出口ではいけないのではないかという考えが潜在的にあったが、どんな形状の出口でも丸いリングになるという結果になり、新たな驚きであった。

さらに実験を行っている、動画のように、プレートを通り抜けタンクを上昇しているドルフィンリングを後から小さな気泡がリングの中心を貫く現象がとても多く見られた。これはこのおじゃまプレートを使用したとき特有の現象である。ドルフィンリングが出来たあとに出る、二次気泡がプレートを通ったあと急に加速し、それによってリングを壊していた。この穴がドルフィンリングの径よりも小さいため、二次気泡はじゃまをされずに上昇速度がリングよりも速くなったため、ドルフィンリングに近づいたと考えられる。また、リングに接近した二次気泡はドルフィンリングの渦輪の中心部の速い流れに吸い込ま

れたことも考えられる。

6. 応用について

現在渦輪は、離れた場所へ熱量や気体の輸送に利用を検討する研究があるが、ドルフィンリングでも同じような利用ができると考える。まず、熱量の輸送である。今回のコンテストでは装置の完成が遅れたために実験が間に合わなかったが、この装置でもドルフィンリングで熱量の輸送ができるのではないかと思われる。高速カメラでの動画をみてもわかるように、リングは周りの水をたくさん回転させて進んでいる。このことより拡散効果が期待できる。タンク内の水が熱いとき、ただそのまま放置しておく場合よりも冷たい空気で作ったリングを送ることで、早く温度が下がるのではないか。また、逆に熱いリングを送ることで大きな容積の水を温めることができるのではないか。熱い空気のリングの作成ができれば、家庭用のお風呂などに導入して、追い炊き機能として利用できると考える。湯量を変えることなく、新たな水を増やさず、均等に、また、空気を暖めて押し出すだけでいいのでエコに暖め直すことが可能になるのではないかと考える。

そのほか、ヴィジュアル面でも利用ができる。今回は丸以外のドルフィンリングを作ることが出来なかったが、ほかの方法で様々な形のリングが作れたら世界の人々を楽しませることができると思う。また、水槽内にいくつもリングを形成し、それを綺麗なLEDのライトなどで輝かせると、クラゲのライトアップにも負けないような美しいものになると考えられる。

7. まとめ

水深があり、高い圧力で気泡出口が大きいとき、気泡はひとつにまとまり、ドルフィンリングを簡単に作る事ができた。

ドルフィンリングを形成するには空気の噴射時間や与える初速度が大きな影響を与えていた。

ドルフィンリングは周囲の水を大きく巻き込むようにして自ら流れを作り出して進んでいた。

高速カメラでの映像から、原理通り様々な力の働きで、気泡がリングに変化していたことがわかる。

簡単にノズルからドルフィンリングを形成することが出来たので、加熱などで空気と水それぞれの密度や粘度を最適なものにすることで、よりきれいで安定的なリングの作成が可能であると予想できる。

気泡が気泡出口のノズル先端から離脱したあと、穴のある邪魔板を通っても、穴の形状に関係なく丸いリングができ、影響がない。

リングより二次気泡の速度が速いとき、二次気泡リング中心に吸い込まれ、リングと一緒に散って消えた。