

5 『水砲、空気砲の研究』

1 動機

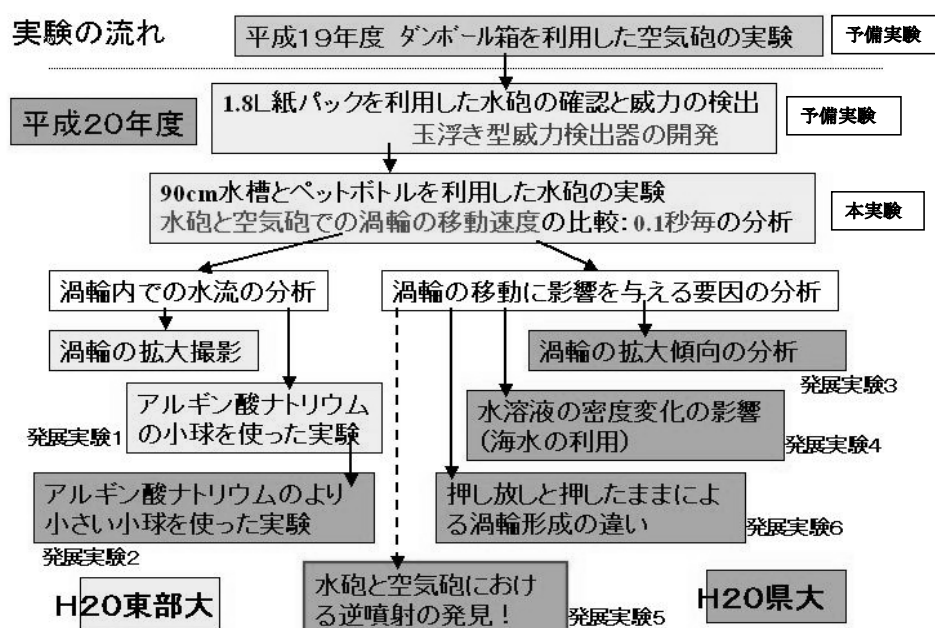
- ① 1学年上の先輩が文化祭で行った空気砲の実験（ダンボール箱を使用）に興味を持った。②空気砲はよく知られているので、新しい発想の研究をしてみたいと思った。③空気砲と同じようなことが水の中でできないかと思った（イルカが水の中でドーナツ状の空気の輪を作ることは知られているが、水の中で“水の渦輪”ができないか考えた）。

2 目的

- ① 空気砲と同じような現象が水中でも見られるかを調べる。（水の中で水の渦輪ができ、それが移動できるかを確かめる）②水の渦輪が見られるとしたら、空気砲の空気の渦輪とどこが違うかを調べる。（移動速度、速度変化、大きさが空気の場合とどれだけ違うかを調べる）③渦輪の移動にともなう水の動きを視覚化して分析する。（水の中の渦輪では、渦輪内でどのような水の動きが存在するかを視覚化して分析する工夫を行う）④水砲の伝わる仕組みについて考察する。

※ 本研究は、2年間にわたる研究を段階的に行ったものであり、その研究の発展過程が複雑であるので、その過程を次の図で示す。

図1 研究の流れ図



3 各実験の方法・結果・結論・考察

- ①予備実験【空気砲を観察する】平成19年度実施：ダンボール箱を使用した空気砲を観察する。

《方法》・箱の大きさの違い（箱の体積の違い、箱を直列につなげたときの影響、噴出穴の大きさの違い、箱をたたく強さの違い）を調べた。・箱に線香の煙を充満させて、その煙の動きをビデオカメラで撮影してその映像を分析した。

《結果》・煙を使った実験では、ドーナツ型の空気の渦輪が移動することがわかった。

《結論》・空気砲は、空気の渦輪の移動したものであることがわかった。



写真1 昨年度製作した空気砲の例

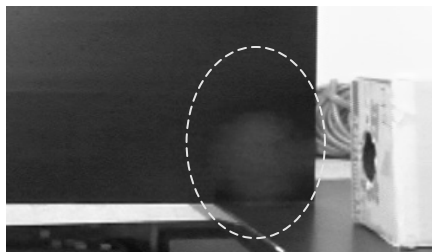


写真2 空気の渦（横から記録）

②予備実験【水砲を作りその威力を調べる“玉浮き型威力検出器”】平成20年度実施

《方法》・1L牛乳パック、1.8Lの焼酎の紙パックに穴を開けて、水槽の中で箱にショックを与えて衝撃波を作った。穴の大きさや衝撃の強さを変えて実験を行った。・穴から噴出される水の衝撃波の威力を調べるために、水槽の中～下層に“玉浮き型威力検出器”を考案し利用した。この装置は糸に付着させた発砲スチロールの小球の動きで水の移動の様子を捉えようとしたものである。・小球の動きはビデオカメラで撮影し、スロー再生を使い観察した。

《結果》・発砲スチロールの小球の動きから、水砲には相当な威力があり、それが水中を一定の速度で伝わることを確認した。・当初録画した各小球の動きから、威力の大きさや移動速度、水の局所的な移動方向を分析しようとしたが、小球の数が多すぎてその作業があまりにも煩雑となるため、ここでは水の渦輪の存在を確認するにとどまった。

《結論》・小球の連続的な動きから、水砲は存在すると判断できる。・水砲は一定の速さで移動する。



写真3 90cm水槽を利用した水流検出装置



写真4 発砲スチロール利用の玉浮型検出器

《考察》・水砲が存在することはこの実験から分かったが、その水砲における水の動きやそれが生じる仕組みを調べるためには、その動きを視覚化し、さらに速度を落として観察する必要がある。そのためには空気砲で煙を使ったように、噴出する水に色をつけて観察する必要があると思われる。

③本実験Ⅰ【空気砲の分析】平成20年度実施

《方法》・水砲は水槽の中での観察になるので、それと比較するために、同条件に設定した水槽内で、空気砲についても実験を行うことにした。・思考錯誤の結果ペットボトル（500mL～2000mL）を使用することにした。空気の動きは線香の煙を使い視覚化した。・水槽全面には“ものさし”を貼り付け、スケールとした。・空気の噴出の強さは、“弱く”と“強く”の2種類として、多数回の練習をへて、一定強度の衝撃を作り出せるようにした。・煙の渦輪の移動は1/30秒間隔の表示を画面に記録できるビデオカメラで撮影した。・画像は、コマ送り観察ができるビデオデッキを利用して、精度1/30秒間隔で観察し、分析精度1/10秒間隔（コマ送りで3コマ分）で、その動きを29型テレビ画面に映し出し、画面上にマジックで印を付けその印の距離を計測した。

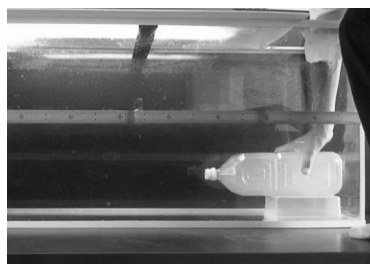


写真5 ペットボトルを使用した空気砲

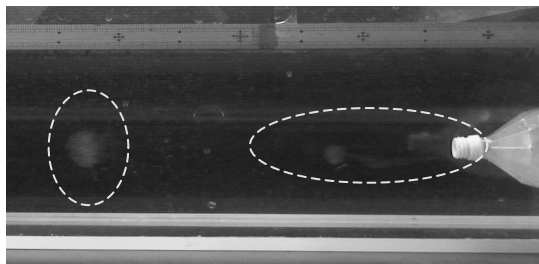


写真6 放出された煙の渦輪

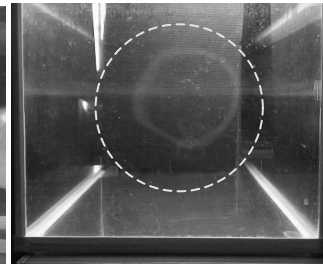
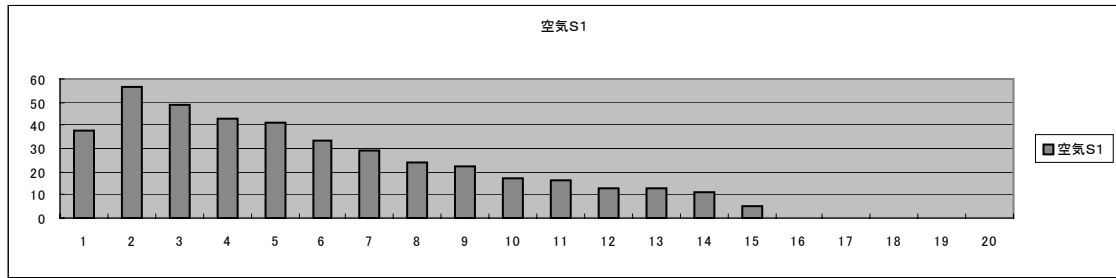


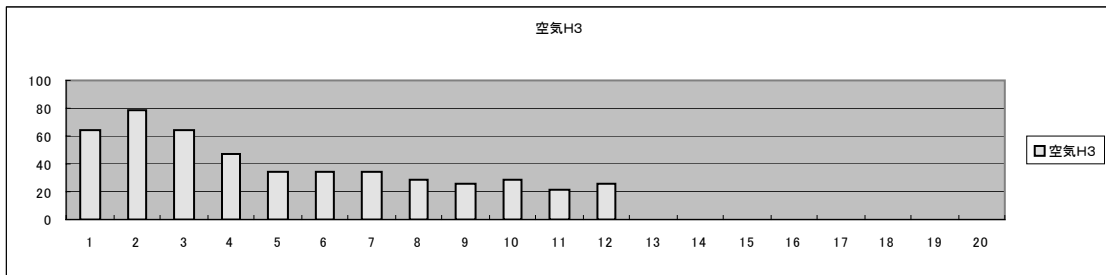
写真7 煙の渦輪(正面より)

《結果》例 グラフ 1－1 空気砲の弱く噴出した渦輪 1 3こま（1/10 秒間隔）での実移動距離（単位：mm）



【空気砲の弱く噴出した渦輪 3 回の傾向】・渦輪の移動速度は、最初の 1 区間目がやや遅く、2 区間目が最も速い。・渦輪噴出直後の 2～8 回目で速度の減少が著しく、9～17 回目では、移動速度が保たれやすい。

例 グラフ 2－2 空気砲の強く噴出した渦輪 2 3こま（1/10 秒間隔）での実移動距離（単位：mm）



【空気砲の強く噴出した渦輪 3 回の傾向】・渦輪の移動速度は、最初の 1 区間目がやや遅く、2 区間目が最も速い。・渦輪噴出直後の 2～5 回目で速度の減少が著しく、5～13 回目では、移動速度が保たれやすい。・強く噴出した時は、弱く噴出したときより渦輪の移動速度の減少が顕著である。

【空気砲の渦輪の、移動の全体的傾向】・空気砲では、強く放出された渦輪は急速に減速する。・強く放出した直後では 1/10 秒間当たり 80～100mm の速度であるが、5/10 秒間後には 1/10 秒間当たり 30～40mm に減速する。・弱く放出した場合は、放出した直後では 1/10 秒間当たり 50～60mm であるが、8/10 秒間後には 1/10 秒間当たり 20～25mm に減速する。そして 1 秒後位から減速の傾向が穏やかになる。

《結論》・強く放出したときには最大 1000mm/秒 の移動速度を示す。・強く放出したときには、噴出直後に一気に減速する。・弱く放出した場合は強く放出したときに比べて、後半の移動速度が一定の状態を保たれる傾向が見られる。・渦輪は、ドーナツ状でその部位では、右図のような空気の流れが観察される。

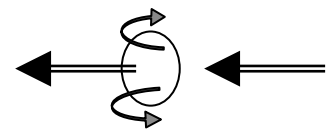


図 2 渦輪における空気の流れ

④本実験Ⅱ【水砲の分析】平成 20 年度実施

《方法》・噴出用の器具としては、空気砲と比較するために 500mL～2000mL のペットボトルを利用した。・メチレンブルーを使い水に色を付けて、渦輪の移動を分析することにした。・渦輪の移動過程や渦の形の変化はビデオカメラで撮影して、大型テレビ画面とビデオデッキのコマ送り機能を駆使して、精度 1/30 秒間隔で観察し、1/10 秒間隔で分析した。

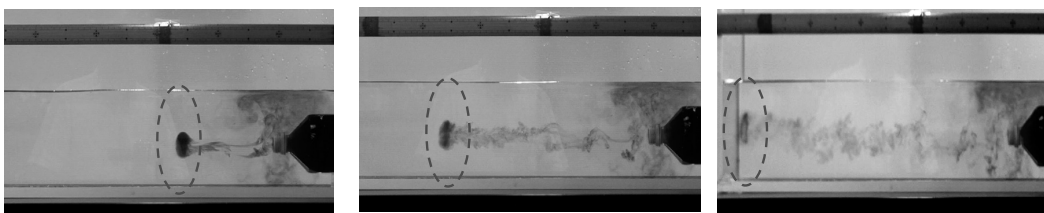
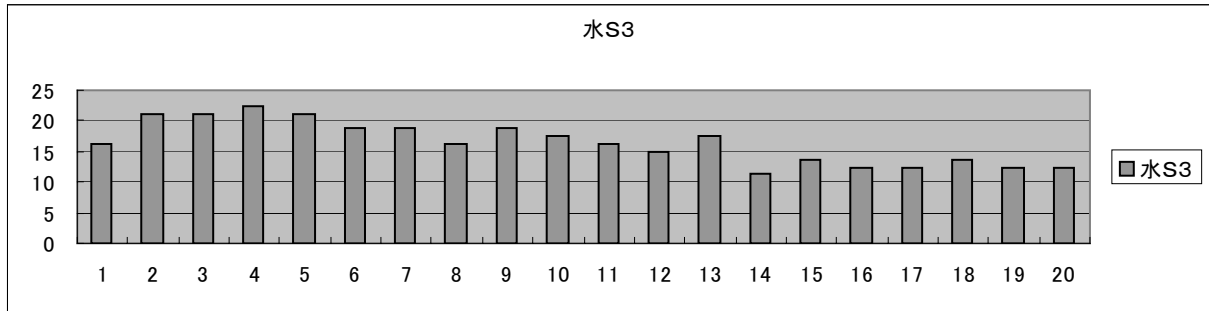


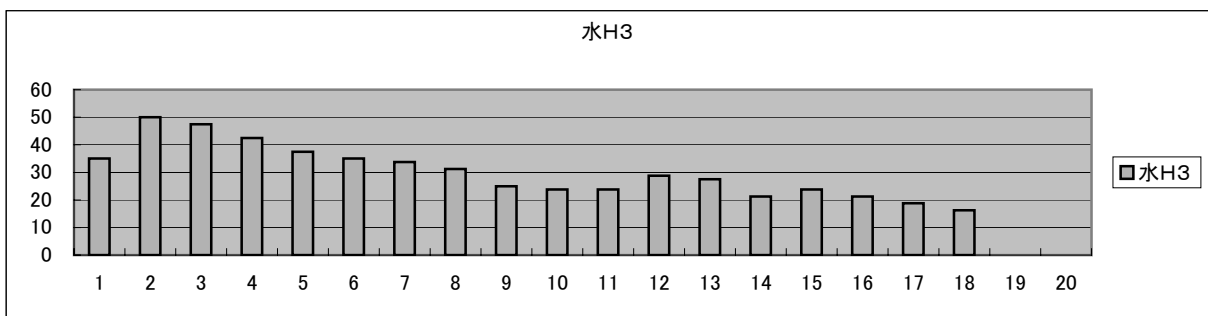
写真 8 放出された着色された渦輪の動き（3 段階）

《結果》例グラフ 3－3 水砲の弱く噴出した渦輪 3 3こま（1/10 秒間隔）での実移動距離（単位：mm）



【水砲の弱く噴出した渦輪 3 回の傾向】・渦輪の移動速度は、最初の 1 区間目がやや遅く、2 区間目が最も速い。・渦輪噴出直後の 2～20 回目にかけて速度の減少が穏やかである。（移動速度が保たれている）・緩やかな速度減少の中に速度が増加する時もととき見られる。

例グラフ 4－4 水砲の強く噴出した渦輪 3 3こま（1/10 秒間隔）での実移動距離（単位：mm）



【水砲の強く噴出した渦輪 3 回の傾向】・渦輪の移動速度は、最初の 1 区間目がやや遅く、2 区間目が最も速い。・渦輪噴出直後の 2～7 回目で速度の減少が緩やかに起こり、8～14 回目以降では、移動速度がほぼ一定に保たれている。

【水砲の渦輪の、移動の全体的傾向】・水砲では、強く放出された渦輪は緩やかに減速し、その後一定の速度に達する。・水砲では、弱く放出された渦輪は、わずかに減少はするものの、一定の速度で長い距離を移動する。・強く放出した直後では 1/10 秒間に 40～70mm 移動するが、1 秒間後には 1/10 秒間当たり 30～40mm に減速する。・弱く放出した場合は、放出した直後では 1/10 秒間当たり 10～25mm の移動速度であるが、2 秒間後でも 8～15mm の移動速度を保つ。

《結論》・強く放出したときには 600mm/秒の移動速度を示す。これは同じ力を加えて噴出させた場合、空気砲に比べて移動速度が 40% 程度遅いことを意味する。・強く放出したときには一気に減速するが空気砲ほど急な減速はしない。弱く放出した場合は強く放出したときに比べて、移動速度が一定の状態を保たれる傾向が見られる。渦輪の形も保存されやすい。渦輪の移動速度の減少傾向を空気砲と比べると、空気砲では 1 秒後に速度が 70% 程度減少するのに対して、水砲では強く噴出した場合で 50% の減少、弱く噴出した場合で 40% 程度の減少にとどまる。・ペットボトルより噴出する水に色をつけて観察した結果、水砲の渦輪も空気砲の渦輪と同様にドーナツ状で、渦内での水の流れは空気砲の渦輪と同様である。

《考察》・水は空気より密度が高く、粘性も大きい。このような流体の中で渦が移動するには大きな抵抗があり、当初渦輪の移動速度の顕著な減少を予想していたが、全く反対の結果が得られた。密度の高さや粘性の大きさを上回り、渦輪の運動を安定して維持させる要因は何であるか興味深い。

・当初、噴出の強さを強くしたときと弱くしたときで、渦輪の移動速度の減少割合は同程度であると予想していたが、以外にも弱く噴出したときに安定した移動が見られた。いろいろ噴出速度を変えてみたところある強さ（適度な弱さ）のときに最も安定した渦輪の移動が見られるようであった。しかし、手加減で噴出強度を調節しているので、厳密な分析ができない。今後この課題を解決する

ためには、手ではなく、機械的に一定で段階的な噴出を起こせる装置を開発することが必要となる。

⑤発展実験Ⅰ・Ⅱ【水砲の渦輪の詳細分析：アルギン酸ナトリウムの小球の利用】

《発展実験Ⅰの方法》・渦輪の移動にともなう、渦輪内での水の動きを調べるために、水に浮遊して動きを検知しやすくするための目印をいろいろと考案した。・最初はアルミ箔の小片を使ったが、水中ではすぐに沈むので不適であることが分かった。次に、チョークの粉を使ったが、水が濁ってしまい、粒がわかりにくくなりこれも不適であることが分かった。・そこで、水にある程度浮遊し、渦内の水の動きに合わせて移動できる材質であり、しかもその大きさ、形をある程度調節することのできるものとして、着色した人工イクラ（ゲル状アルギン酸ナトリウム的小球）に着目し、実際にその小球を製作して利用した。

《発展実験Ⅱの方法》・発展実験Ⅰでは製作した小球が、直径7～8mm程度であったので、渦輪中の水流の動きを十分分析できなかった。そこで、より小さな小球をつくるための工夫をした。

・発展実験Ⅰでは駒込ピペットを使い小球を製作したが、発展実験Ⅱではパスツールピペットを使い小球を製作した。その結果、小さな小球（直径3～4mm程度）を製作することに成功した。・この小球を渦輪に取り込ませて、その渦輪の動きを拡大撮影した映像を分析した結果、渦輪中の水の回転速度やその回転の減少過程を分析することができた。

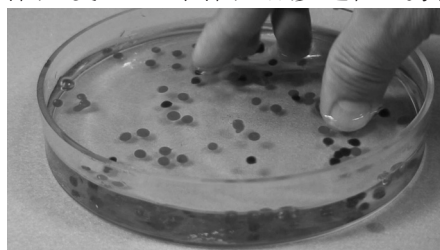


写真9 マーカーに利用した人工イクラ

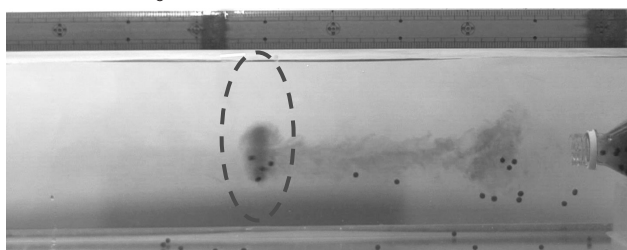


写真10 小球が回転しながら左方向へ移動する様子

《発展実験Ⅰ・Ⅱの結論》・発展実験Ⅰから、ペットボトルの口から100mm付近で渦輪の平均回転速度は1周 3/30秒、200mm付近で渦輪の平均回転速度は1周 4/30秒と移動するごとに回転速度は減少する。・発展実験Ⅱから、ペットボトルの口から50mm付近で渦輪の平均回転速度は1周 2/30秒、100mm付近で渦輪の平均回転速度は1周 3/30秒、200mm付近で渦輪の平均回転速度は1周 4/30秒と移動するごとに回転速度は減少することがわかった。※発展実験Ⅱの結果は、発展実験Ⅰとほぼ同様となったが、小球が小さいのでより正確に測定することができた。

《発展実験Ⅰ・Ⅱ考察》・渦輪内の小球の回転方向は、小球が取り込まれた位置により異なるので、今回の分析では、渦の上又は下端で円形に回転を続ける小球の選び出し、その小球が1回転するのに要するコマ数（1コマ 1/30秒）をカウントした。小球はかなり小さく、密度も水に近く水流の動きに沿って移動することを前提としている。今回の測定結果の信頼性を高めるのには、回転速度のわかっている渦にこの小球を入れ、小球の移動速度と水の速度が一致していることを確かめる必要がある。今後はこのような確認作業も行っていきたい。・今回の実験では、ペットボトル内に小球をいれ、渦輪と一緒に噴出させた。渦に取り込まれた小球の一部は渦に入ったまま最後まで移動したが、一部は渦の外にはじかれてしまった。このような結果から、移動する渦輪は同じ水が回転しながら移動するのか、水の一部は噴出された水（青）と周囲の水（透明）が一定量ずつ交換されるのか興味深い。今後は、噴出された水のどのくらい割合が途中の水と交換されていくのかも調べて見たい。この研究は渦輪の性質を使うことで、水中で一定の物質を一定の場所に正確に輸送する手段として使えるのではないかと思われた。例えば、水槽のある特定の場所に、一定量の、顆粒状の魚の餌を、水砲を使って送ったり、水槽のある部分にだけ水砲で温水を送り、そこだけ暖めたりすることができるのではないか。今後はそのような実験もおこなってみたい。