

2 つ穴の空気砲および非円形の空気砲の考察

本郷中学高等学校

科学部 高校1年 佐藤 健史

高校1年 梶原 理希

第1章 はじめに

我々本郷学園科学部空気砲班は、これまで空気砲についての実験を7年間続けてきた。今回は、その7年間の研究を元にし、新たな実験を行った。

まず、空気砲とは図1のように、箱状のものの一面に円形の穴をあけ、その穴から空気を押し出すことによって、空気の輪が発生する装置のことを言う。



図1 空気砲

第2章 目的

空気砲というものについて、1章に書いた、『空気の輪が発生する』ということしか知らなかったため、穴の形が変わったらどうなるのか、また穴の数が増えたらどうなるかということ、図1のような段ボール箱で作った空気砲の、穴の形を変えたものや、穴の数を増やしたものを用いて、過去に研究を行っていた。

しかし、その実験が終わり、穴の形が変わった時や穴の数が変わった時の理論が確立されつつあった、7年がたった今、段ボール箱以外の新たな実験装置について考察をしてきた我々は、新たな装置を用いることにより、その理論について新たな発見があるかもしれないと思い、再実験を行った。

第3章 実験装置の選定

以前までに作成した空気砲の中から、今回の実験に最もふさわしいと思われるものを選択することにした。

3.1 アクリル空気砲 (図2)

この空気砲は、アクリルの箱の一面にゴム膜を張り、その対面に穴をあけたものである。この空気砲では、ゴム膜の疲弊というものがあり定量的なデータは取れないが、ダンボールより耐久性は高い。それに加え、アクリル空気砲は容器自体が透明なため、空気砲内部の空気の流れを観察することもできるようになった。

ただし、加工が難しく、複雑な形状の穴を開けることは困難である。

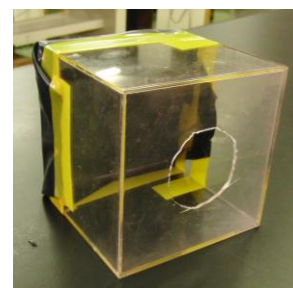


図2 アクリル空気砲

3.2 プラスチックダンボール空気砲 (図 3)

この空気砲ではプラスチックダンボールを用いて作成しており、紙ダンボールの脆さを克服し、さらに、叩くのではなく押すことによって、今まで制御が不能であった押し出す空気の体積を制御することが可能になった。

しかしその一方、この空気砲は板状のプラスチックダンボールをつなぎ合わせて作成しているため接合部分から空気が漏れてしまうことや、押す力を一定にできないことなどの問題があった。



図 3 プラスチックダンボール空気砲

3.3 円柱型亚克力空気砲 (図 4)

この空気砲では以前までの直方体状から、円柱状の亚克力容器を用いて形状を円柱にしたことで、空気砲の縁から穴までの距離が等しくなり、空気砲内部の空気の流れが安定し、安定した輪が作りやすくなった。

さらに、ピストンを押す距離を変えることで、プラスチックダンボール空気砲と同じく押し出す空気の体積を制御できる上、それに加えて既製の亚克力円柱を用いたために、空気の漏れをなくすことに成功した。

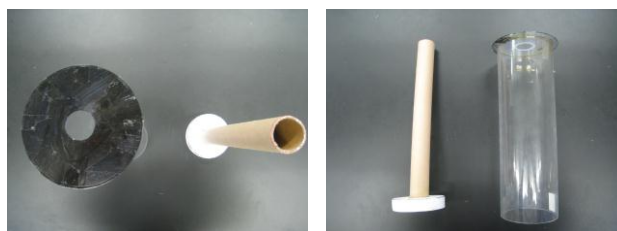


図 4 円柱型亚克力空気砲

私たちは以前作成した空気砲の中からこれらを選別し、その中でも空気砲から輪を出す際に、輪の発生が最も安定すると考えられる 3.3 の円柱型亚克力空気砲を今回の実験装置とした。

第 4 章 実験条件

先に述べたように、今回の実験では円柱型亚克力空気砲を使用した。また、穴の形を変えた試料は過去の実験で使用したのと同じ、正三角形、六芒星、正方形の穴の形をしたものと、2つ穴の穴同士の距離を変えた、合計で 9 種類の試料を用意した。

また、円柱型亚克力空気砲は、断面の外径が 10cm で、高さが 30cm となっている。

4.1 空気砲の穴の大きさの決定

穴の大きさの決定の際、下記の参考文献より、福本康秀 “最適渦輪の理論式” [1]を利用し、穴の大きさを決定することにした。それによると空気砲の輪の発生について、

L : 空気柱の長さ [cm] D : 空気砲の穴の直径 [cm]

$$\frac{L}{D} \approx 4 \cdots \textcircled{1}$$

という式を満たした場合に、出来る最大の輪が発生するといえる。

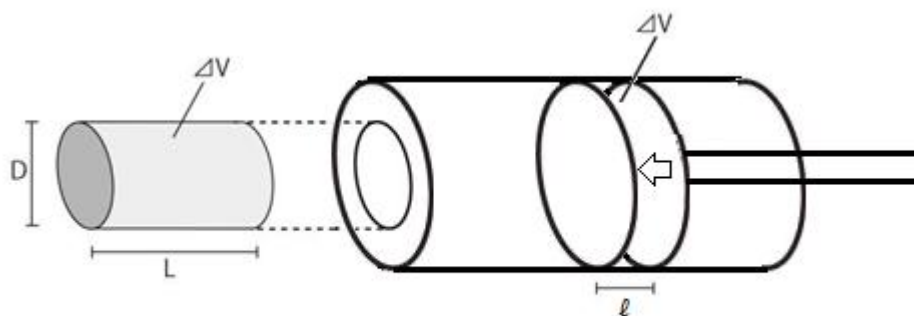


図5 空気柱の長さ L と押し出した体積 ΔV の図式化

ΔV : 押し出した体積 [cm³], S : 空気砲の穴の面積 [cm²] とすると

$$L = \frac{\Delta V}{S}$$

ℓ : ピストンを押す距離 [cm], A : 空気砲の容器の断面積 [cm²] とする。

$$\Delta V = A\ell \cdot \cdot \cdot \textcircled{3}$$

②と③を最適渦輪の理論式に代入し式変形をすると

$$D \approx \sqrt[3]{\frac{A\ell}{\pi}}$$

となる。

今回の実験では $A=68.5 \text{ cm}^2$ であり、また $\ell=1 \text{ cm}$, と仮定した。

これを計算すると、 $D=2.81 \text{ cm}$ となった。

この時の S は 6.19 cm^2 である。

穴の大きさについて、すべての穴の面積を 6.19 cm^2 にした。また、穴の数を2つにした場合では、それぞれの穴の面積を 6.19 cm^2 にした。また、2つ穴の穴同士の距離は半径の長さを基準として5種類を作成した。

4.2 予備実験

上の最適渦輪の理論式が適用されるかどうかを確かめるべく、 L/D の L の値を変化させることで、輪の発生にどのような影響が出るのかということを確認した。

結果は L/D 値が 4 を大きく下回ってしまうと、輪の形成に必要な力が足りなくなり、輪が発生しなくなり、逆に 4 を大きく上回ると、輪の後ろに余分な、図 6 に示すようなジェットと言われる空気の流れが生まれ、輪がそのジェットから切り離されなくなってしまい、輪がジェットに巻き込まれて発生が確認できなくなってしまう。

このことより、この式を適用できると分かった。



図 6 ジェット

4.3 実験器具

・穴の試料 (図 8)

- | | |
|------------|-------------------------|
| 試料①…穴の形：丸 | 試料⑤…2 つ穴の中心間の距離：直径 |
| 試料②…穴の形：星 | 試料⑥…2 つ穴の中心間の距離：直径×1.25 |
| 試料③…穴の形：三角 | 試料⑦…2 つ穴の中心間の距離：直径×1.5 |
| 試料④…穴の形：四角 | 試料⑧…2 つ穴の中心間の距離：直径×2 |
| | 試料⑨…2 つ穴の中心間の距離：直径×2.5 |

- ・デジタルカメラ (SONY HDR-CX370V)
- ・煙発生装置 (アンタリ社製 V1Fogger) : 図 7

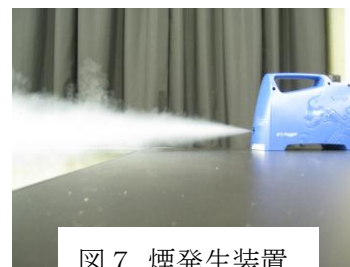


図 7 煙発生装置




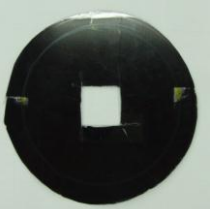





試料①	試料②	試料③
		
試料④	試料⑤	試料⑥
		
試料⑦	試料⑧	試料⑨
		

図 8 試料番号とその試料の写真

第5章 実験

5.1 実験方法

試料を図4の空気砲本体に装着し、煙発生装置で煙を充填し、その試料ごとに空気砲から輪が発生する様子をカメラで撮影し、その後パソコンを使い1秒30コマ再生でどのように輪の形状が変化しているのかを観察する。

また、2つ穴空気砲に関しては、その2つ穴空気砲から輪が発生し、それぞれの輪が合成するまでの時間と合成したその輪の形状変化の周期を測定する。この場合の周期とは、次ページの実験結果での⑤から⑥、⑥から⑤の輪の形状変化のことをいう。また、その1周期の間に輪がどのくらい動いたのかを測定することで、1周期における輪の速さも求めた。

5.2 二つ穴空気砲

過去の実験では、以下に記すように3つ穴をあけた空気砲も作成したが、今回は2つ穴空気砲に重点を置き、二つ穴のみ実験をした。

<過去の実験>

以前、段ボール箱で二つ穴空気砲を作成し、穴を段ボール箱の一面に2つ開けたもの、3つ開けたものを作成し、輪を発生させてその様子を肉眼で観察した。

結果は、2つ穴では2つの穴から出てきた輪がだんだん寄っていき、合成し1つの大きな楕円形が生じた。その楕円形はしばらくすると丸の形に変化し、次に反時計回りに90度回転した楕円形へと変化し、また次もその状態から中心へと集まっていき、最初と同じ楕円形になるという周期を繰り返しているように見えた(図9)

3つ穴では、3つの穴から輪が発生し、だんだんその3つの輪が集まっていくのだが、2つ穴の時のように大きな1つの輪になるようなことはなく、輪が衝突し、霧散してしまった。

しかし、この実験ではあくまで形を見ただけであり、さらに、肉眼でしか確認していなかったため、確実な考察はできなかった。

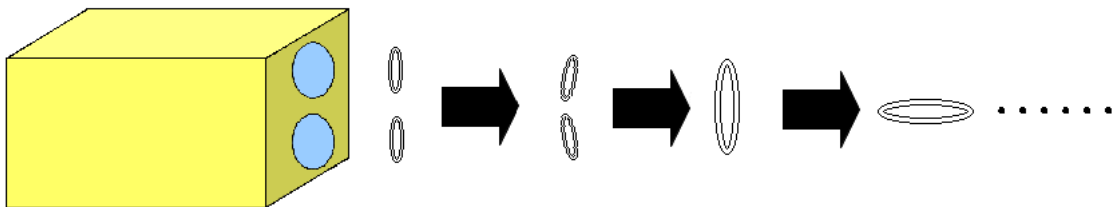


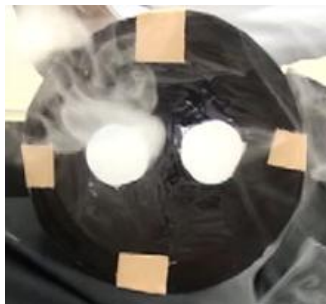
図9 2つ穴空気砲の輪の様子

<実験結果>

・2つ穴空気砲の輪の発生の様子

輪の発生直前を $t=0s$ とした経過時間を記す。また、赤線は輪の形を表している。

①輪の発生直前 $t=0s$



②輪が発生した瞬間 $t=0.03s$



③2つの輪が衝突した瞬間 $t=0.27s$



2つの輪の一部が合成

④2つの輪が合成した瞬間 $t=0.33s$



輪が合成した瞬間、輪は丸になる

⑤合成した輪が縦に振動した様子

$t=0.50s$



⑥合成した輪が横に振動した様子

$t=0.80s$



・2つ穴空気砲の周期について

結果は下の表1, 表2のようになった.

表1 2つ穴空気砲の周期の測定結果

	2つの輪の合成までの時間[s]	1周期目[s]	2周期目[s]	3周期目[s]	4周期目[s]
試料⑤	0	0.14	0.18	0.23	0.33
試料⑥					
試料⑦	0.17	0.76	1.22		
試料⑧	0.34	1.19	1.80		
試料⑨					

表2 2つ穴空気砲の周期と速さについての測定結果

	1周期にかかる距離[cm]	1周期にかかる時間[s]	1周期の間の速さ[cm/s]
試料⑤	12.90	0.23	66.68
試料⑦	15.10	0.25	60.63
試料⑧	15.60	0.35	45.47

表1の斜線はその状態を観察できなかったことを示しており, つまり試料⑥と試料⑨では輪の合成が観察されず, 試料⑦と試料⑧ではそれぞれ3周期目と4周期目が観察できなかったということである.

<考察>

・二つ穴空気砲の様子について

過去の実験では, 2つ穴空気砲から出た輪は縦長の丸, 横長の丸, という動きを繰り返していたと考えていたが, 今回の実験では輪の合成, 合成してからの動きを捉えることが出来た.

まず, 2つの輪が合成するとき, 合成した輪は円形になること

が分かった. また, その後の動きも今までは縦長の円, 横長の円, つまり楕円型と考えていたが, それが実際は図10のような, 二つの楕円形が

一部分だけ合成しているような形になっていることが分かった. この形は, 今回私たちが実験した試料⑤の形に類似している. 試料⑤とは, 2つ穴空気砲でいう, 輪の衝突から合成の部分を取り除かれ, 初めから輪が合成されている状況で, 空気砲から輪が押し出されるものと考えることができる. この試料⑤での実験では, このような輪が縦, 横, 縦・・・, と一定の周期が続いていくことが観察できた. この周期は, 穴同士が離れているほかの2つ穴空気砲とは違い, 安定した周期を繰り返していた.

そして, 輪が合成したとき, そのそれぞれの輪の接合部分だけ煙の色が濃くなっていたことが観察で

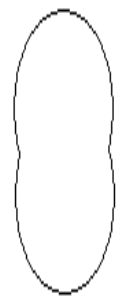


図10 2つ穴空気砲の合成後の輪の様子

きた。煙が濃くなっていたということは、その部分の空気の量が多く、かかっている力、回転が強いということと考えた。

これらのことから、2穴空気砲は2つの輪が衝突した瞬間に、一端円形になり合成する。しかし、このときに2つの輪が1つの輪になったというよりも、2つの輪の一部分だけが合成したと考えられる。そして、その合成した接合部分に強い回転がかかり、輪が縦に引き伸ばされる。そのときに図10のような形の輪になり、同時に縦方向への回転の力が弱まり相対的にへこんだ部分に強い回転がかかり横に引き伸ばされる。その輪の変化を繰り返すことで、輪が形成されていると私たちは考えた。故に、2穴空気砲の輪は時間が経つほど、かかる回転が弱まっていき、段々と周期の時間が大きくなっていくと考えることができる。

・2穴空気砲の周期について

今回の実験では、2穴空気砲の穴同士が近すぎる場合では、輪が完全に形成される前の、空気の流れだけが衝突してしまい、輪が発生せず、逆に穴同士が遠すぎてしまった場合でも、2つの輪が並走したり、輪同士が反発しあったりして、輪の合成を確認することはできなかった。

故に、この考察では2穴空気砲の輪が発生した試料⑤、試料⑦、試料⑧について考える。周期を測定した結果である表1から分かったことは、穴の距離が遠ければ合成までの時間も長くかかり、その後の周期も長くなる。そして、周期を経るにつれて1周期ごとの時間が長くなっていく。また、表2から合成された輪の1周期が長ければ長いほど、輪の速さが遅くなっているため、輪の伸び縮みが大きければ大きいほど、大きなエネルギーが必要だということが分かった。

衝突までの時間が長いと周期が長くなるということは、合成された輪の伸び縮みが大きくなるということであり、それはつまり合成したときの輪自体にかかっている回転が強いということである。

周期を重ねるにつれて輪の推進力が弱まり、1穴空気砲に比べて消滅までの時間が短くなってしまふ。よって、2穴の輪同士の距離が、合成する範囲内で遠ければ遠いほど、合成された後の輪の伸び縮みは大きく、早く消滅していくと考えられる。

5.3 穴の形を変えた空気砲

<過去の実験>

2つ穴の空気砲, 3つ穴の空気砲と同じく, 段ボール箱で三角や六芒星, 四角といった形の穴をあけ, 空気砲をそれぞれ作成した. 結果は一見円形の輪が発生しているように見えたが, よく見ると, 輪の内側に穴の形と同じ図形が回転しているように見えた(図 11).

<結果>

- 穴の形が三角の空気砲の発生の様子

①発生直前



②三角形になった瞬間



③輪が三角形の状態から丸の状態に変化した様子

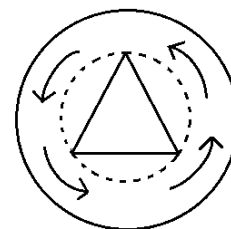


図 11

<考察>

今まで私たちは, 穴の形を変えた空気砲の輪は, その内側で穴の形が回転していると考えていた. しかし, 今回の実験の結果からそれは間違っていたことが分かった.

今回の実験から, 穴の形の違う空気砲の輪は, 穴の形と円形を繰り返して変化をしているということが分かった.

これは, 空気砲から輪が出た時点ではその穴の形だが, その後に輪が安定すると考えられる丸の形の輪になり, その後その穴の形に戻ろうとする力が働きまた穴の形に戻る, という変化を繰り返しているからと考えられる.

第6章 結論

2つ穴空気砲では、今まで考えられていた縦長、横長の輪の周期を繰り返す、ということが誤りであり、正確には2つの輪の一部だけが合成していたということや、2つの輪の合成の瞬間が円形の輪になっていたことなど、新しい発見をすることができた。また、周期と穴の距離についての相関性も新たに確認できた。

穴の形が変わった空気砲では、今まで輪の内側で穴と同じ形の図形が回転しているように見える、という曖昧な結果しか出ていなかったが、輪が穴の形と円形を繰り返しているという結果を、ビデオカメラを用いたことで明確に得ることができた。

第7章 今後の展望

今回行った実験より、円柱型アクリル空気砲による実験が現段階では最も正確であることが分かった。よってこれからは、この円柱型アクリル空気砲を利用し、過去の実験の、問題点として定量的なデータ測定が必須である輪の速さの測定実験について、押し引きばねばかりなどを用いることで、叩く力を一定にし、さらに正確な輪の速さを調べていきたい。

第8章 謝辞

今までこの研究に様々な助言を賜り、御指導いただいた科学部の顧問石川理先生、ご訂正いただいた櫻井先輩、渡邊先輩、桐野君に深謝する。

我々がこの研究を引き継ぐまで、空気砲の研究をして下さったOBの先輩方に感謝する。