

物理

溶液の混合状態を可視化する

兵庫県立宝塚北高等学校 化学部
2年大久保賢斗, 床鍋陽紀 3年高津舞衣

1. 動機及び目的

コンビニなどでアイスコーヒーを注文するとシロップがついてくる。このシロップをコーヒーに入れると密度の大きいシロップは完全には拡散せず容器の底にたまってしまふ。そのためストローやマドラーで混ぜる必要がある。また、高等学校の化学では基本的には均一な溶液として考えるのが普通であり、溶解度を超えない時は全て溶けたものとして考える。しかし私達は別の実験で計算上は十分に溶けるはずの砂糖が3か月たっても溶けきらないという結果が得られた。これらのことから小中学校で学習する「溶解する物質は混ぜなくても均一な溶液になる」ということに私達は疑問を持ち、シロップとコーヒーをどのように混ぜればよいかについて考えることとした。

物質の移動現象について調べてみると「単位時間、単位面積あたりの拡散速度は濃度勾配に比例する」(フィックの法則)¹⁾という偏微分方程式で示される法則がある。しかしこの方程式を用いて理解するのは今の私達には困難であった。この法則について実験を通してもう少し単純に近似できないかと考えたが、無色の溶質の移動はみてもわからない。そこで糖の混ぜ方を研究するための実験系を構築するために、まずは「混ぜり具合」を可視化する方法を探ることとした。

2. 方法と結果

[0] 混合の方法

溶液の混合の様子を観察するためにプラカップやビーカー、試験管、ビュレットに溶質と水を加えた。溶質とその終濃度(均一に混ざったときの理論値)は以下の通りである。なお、終濃度はモル濃度がほぼ同じになるように調製した。

① 硫酸銅(Ⅱ)五水和物【 Cu^{2+} 終濃度 2.8%(w/w)】

② ショ糖(市販の上白糖)【終濃度 6.0%(w/w)】

③ 60%(w/w)ショ糖水溶液【終濃度 6.0%(w/w)】

これらを混合後の静置時間ごとに底面からの高さごとに5または10分割しそれぞれを静かに回収した。

[1] 対流の確認(方法①~③)

糖水溶液は濃度によって屈折率が異なることが知られている。そこでモアレ図形法²⁾を参考に実験を組み立てた。LED光を透過させ白板に投影しながら混合すると、対流が生じている時は濃度が大きい界面では屈折が起こるため影の濃淡が生じ、動く様子が観察された(図1)。



図1 LED光源を用いた対流の可視化

しかし方法②で溶け残りがあるときにLED白色光やレーザーポインタで屈折を用いて濃度勾配の可視化を試みたが判別することはできなかった。

[2] Cu^{2+} の濃度測定(方法①)

Cu^{2+} の濃度を750nmの吸光度を用い検量線を作製した³⁾。これを用いて測定し高さ(下からFr.1~5)の静置時間ごとの平均濃度の変化を記録した(図2)。このことから対流がみられない状態であっても均一に混ざっているとは言えないことが分かった。

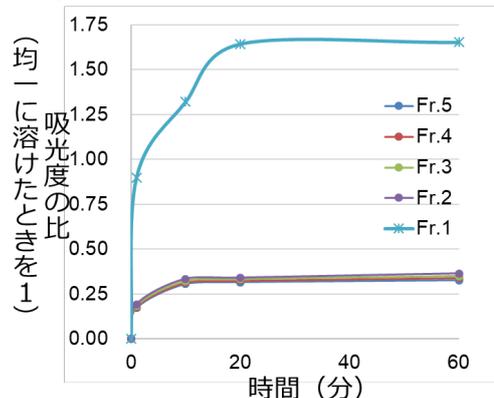


図2 Cu^{2+} の高さごとの平均濃度の変化

[3] 浮沈子を用いた拡散の可視化(方法②③)

無色透明のショ糖の拡散の状況を可視化するためにショ糖溶液は濃度により密度が異なることを利用できないかと考えた。密閉できるプラスチック容器に60%(w/w)ショ糖水溶液を適量入れて、様々な濃度でつりあう浮沈子を作製した。これを様々な容器で③の方法で溶液を作成し、対流が観察されなくなったときに浮沈子を入れた。(図3)

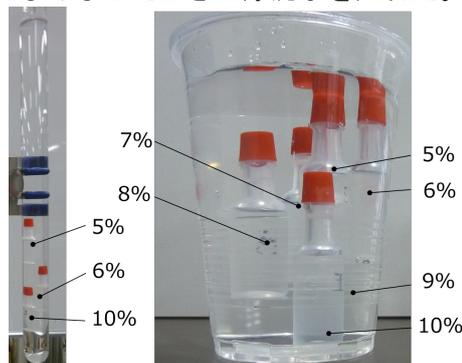


図3 浮沈子を用いた密度分布の可視化(数値は浮沈子がつりあう溶液の密度)

[4] 密度及び Brix 計による濃度測定 (方法③)

濃度が既知のシヨ糖溶液を調整し、ホールピペットを用いて密度を、屈折型糖度計を用いて Brix を測定した。そこから密度及び Brix と濃度の検量線を作成した。その結果どちらも一次関数に近似できた。(図 4)

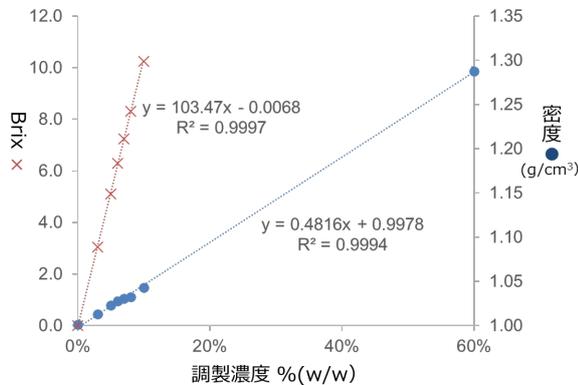


図 4 シヨ糖濃度と Brix 及び密度

[5] 浮沈子による可視化の評価 (方法②③)

[3]と同様に様々な容器や混ぜ方で調製し、[1]の方法で対流が観察されなくなったとき、5-6%でつりあう浮沈子と、6-7%でつりあう浮沈子を静かに入れて、つりあったときの浮沈子の体積の中心の高さを記録した後、その浮沈子付近の高さの分画(下から Fr. 1~10)の溶液の密度と Brix を測定し、[4]で作成した検量線を用いて濃度を算出した。その結果、先にシロップを入れた場合 200mL ビーカーのような容器の内径が大きいものに一気に水を加えたり、内径が小さくても十分に攪拌すると 5-6%でつりあう浮沈子は浮き上がり、6-7%でつりあう浮沈子は容器下部に沈んだ。一方、試験管やメスシリンダーなどの内径が小さい容器や、水を静かに加えたときは 5-6%や 6-7%でつりあう浮沈子は完全に浮き上がったり沈んだりせず、溶液中でつりあった(表)。

表 浮沈子付近の平均密度と算出された濃度
(③の条件で水を後から加えた場合)

入れ方	容器	内径の (cm)	浮沈子の種類	位置 (Fr)	密度 (g/cm ³)	Brix値 (%)	濃度 (%) (算出値)
A	一気に入れた		5-6%	10	1.027	6.2	6.00
			6-7%	1	1.031	7.0	6.80
B			5-6%	10	1.025	5.8	5.61
			6-7%	1	1.028	6.5	6.29
C	ビーカー	7.7	5-6%	10	1.024	5.7	5.51
			6-7%	2	1.030	7.1	6.68
D			5-6%	10	1.027	6.2	6.00
			6-7%	2	1.031	7.2	6.09
E	静かに入れた		5-6%	9	1.014	3.5	3.39
			6-7%	2	1.110	24.0	6.00
F	メスシリンダー	3.6	5-6%	9	1.026	6.0	5.80
			6-7%	2	1.027	6.3	6.09
G	大型試験管	2.7	5-6%	4	1.026	6.0	5.83
			6-7%	2	1.027	6.3	6.06

*位置の「1」は沈んでいることを、「10」は浮いていることを示す

3. 考察

【1】屈折を用いた観測は難しい。

実験[1]~[3]から対流の様子がなくなったからといって混ざりきったというわけではないが、その濃度勾配を観測するのは難しいことが分かった。これは連続的な濃度勾配が生じるため濃淡差が判別しにくくなっているのではないかと考えられる。

【2】静置するだけでは均一にならない。

実験[2][3]から静置状態で均一な溶液になるには時間がかかることが予想される。例えば[2]で仮に30分以降のデータから線形近似すると最低72日はかかる計算になる(実際は緩やかに変化量が減少するためもっとかかると考えられる)。これは溶液の拡散はブラウン運動が関わっているが溶質粒子(分子)が溶媒分子よりも大きいからであり、また溶液の密度が大きいことで対流が起こらないことから時間がかかると考えられる。

【3】浮沈子を用いれば濃度分布を可視化できる。

[5]で浮沈子の位置と溶液の濃度に矛盾がみられないことから簡易的ではあるがこの方法を用いることで簡易的ではあるが可視化できるといえる。

4. 反省と課題

今回用いた浮沈子は大きいため、溶液の上部や下部の濃度分布を測定することはできなかった。また、拡散の速度は断面積の影響を受けるが、径が小さい条件では浮沈子の断面積が無視できず、浮沈子自体が拡散を妨害してしまう可能性が高い。以上のことから現状の方法では汎用的かつリアルタイムで測定するには改良が必要であるといえる。今回は入手が容易で内容量が比較的調整しやすいものを用いたが、今後はリアルタイムで濃度分布を可視化するためには浮沈子の素材の検討と小型化を行う予定である。

5. 参考文献

- 1) 長倉三郎 他, “理化学辞典第 5 版—フィックの拡散法則—”, 岩波書店(1998)
- 2) 星野定司 他, “モアレ図形法: 学生実験用の液相拡散係数測定法”, 化学教育, 26, p. 184-187 (1978)
- 3) 中村純“使用済みチヨークを用いた銅廃液の処理”平成 29 年度東レ理科教育賞受賞作品集(第 49 回), p. 36-39
- 4) 電池の情報サイト, “フィックの法則の導出と計算【拡散係数と濃度勾配】”, <http://kenkou888.com/kagakukougaku/fick.html> (2019.9.25 閲覧)
- 5) 星野定司 他, “高分子溶液における低分子溶質の拡散”, 化学工学, 31, p. 961-966(1967)

概要

この研究の目標は、合成音声を誰の声でも作成できるようにすることである。例えば「病気で声を失ってしまう人の声を保存しておきたい」という要望に応えることができる。音声を録音したり、必要な部分を切り抜いたり、繋げたりするために Sound Engine¹⁾ というソフトを使用した。波形を見ながら音の繋がり方を分析し、自然な音の繋がり方を調べた。次に、文を入力するとそれに対応した文を自動で読み上げてくれる合成音声プログラムを開発した。例えば「頭」と打ち込まれた場合「あ」、「た」、「ま」と1音ずつ認識し、それに1対1対応した音声を再生する。そのため、1音ごとに対応した音声(以降は素材と呼ぶ)を録音した。そして、文を認識し自動でその素材を繋ぎ合わせて読み上げられるようにした。

仮説 1

1音単位で繋げれば人が喋ったように聞こえるのではないか。

実験と結果 1

研究チームの森下の声を「あ」、「い」、「う」、…と、1音ずつ合計126音録音し、それぞれを繋げるとどのように聞こえるかを検証した。この1音ずつ録音して素材にする方法を方式1とする。

考察 1

素材を繋げた部分で違和感が生じ、一音ずつ録音し繋げていることがわかるような音をしていたので、人が喋っているようには聞こえなかった。1音ごとの繋がり方を考察するなかで例えば「頭(あたま)」と発音する場合「た」と1音だけを発音したとき、「あた」と2音繋げて発音したときを比較すると、『た』の音の聞こえ方が違うのではないかと思った。「た」の場合は口を閉じた状態から発音するが、「あた」の場合は「あ」の口から『た』の音を発音するためである。

仮説 2

「あたま」の場合「あ」、「あた」、「あま」、と一音前の母音を繋げて録音することで音の繋がり方の不自然さを解消できるのではないか。

実験と結果 2

「あたま」を「あ」、「た」、「ま」、と録音して繋げた場合と「あ」、「あた」、「あま」、と録音した場合を比較した。「あ」、「あた」、「あま」と前の母音を繋げて録音し、素材とする方法を方式2

とする。方式2の素材は合計で約1400用意した。図1のβは一音ごとの振幅が一定なので音の大きさも一定だが、αとγは振幅が変化しているその形も似ていることがわかる。ここから方式2で作った方が方式1よりも音の繋がり方が「あたま」で録音した音声に似ていることがわかる。

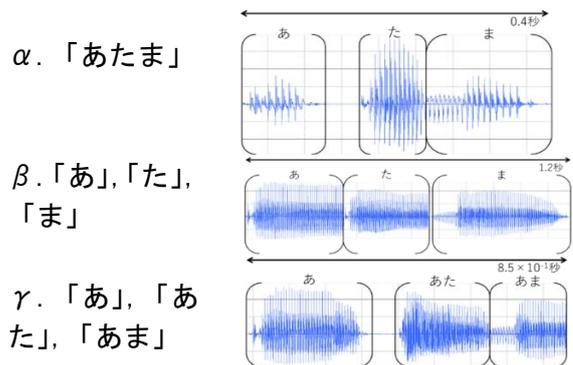


図1 本人の声, 方式1, 方式2の波形の比較
考察 2

方式2で作った音声は、例えばγの場合は「あ」は『あ』の音で終わり、「あた」は『あ』の音で始まるので素材の繋げる部分が同じ音になる。そのため音声を繋げる部分の違和感は解消された。

仮説 3

音は一定の形の波の繰り返しでできていて、その形は母音ごとに異なっている(図2, 図3)。音を繋げるときにこの形が崩れないようにするとより自然に聞こえるのではないか。また音の繋ぎ目で「ブチッ」とノイズが聞こえるのは繋ぎ目の変位が異なるためだと考えた。

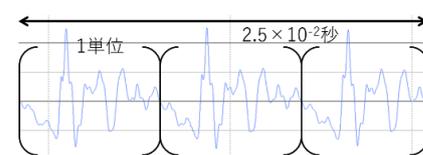


図2 「あ」の波形

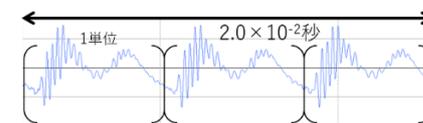


図3 「い」の波形

実験と結果 3

「あたま」を作るときに「あ」と「あた」の『あ』や「あた」と「あま」の『た』と『あ』の繋ぎ目を形が崩れず変位が基準の線に重なる所で切り素材とした(図4)。変位を合わせて切る方法を方式3A, 形を崩さず切る方法を方式3Bとする。方式3A, 3B共に素材を約1400用意した。

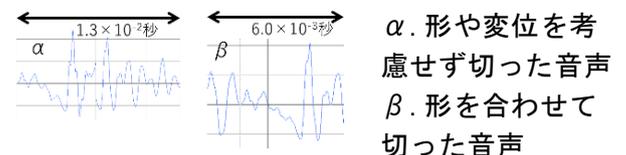


図4 方式3A, 方式3Bの波形の比較

考察3

方式 3A, 3B とともに繋ぎ目のノイズが小さくなった。方式 3A と方式 3B では違いを聞き分けることはできなかった。スピーカーは振動板を振動させて音を出しているので変位が連続的な音しか出すことはできない。そのため振幅が異なる繋ぎ目を再生しようとするときノイズが生まれるのだと考える。形を合わせて切った音声は変位だけを切った音声と比べて 1.0×10^{-3} 秒ほど音が短い事しか違いがないので私たちの耳では聞き分けられないのだと考える。

仮説4

方式 2 より素材の前に母音を付け足すようにしているので、本来の音より長くなり間延びしている。素材の長さを短くすることで、間延びを無くすることができるのではないか。

実験と結果4

素材の前半の音(「あた」, の「あ」の部分), 後半の音(「あた」, の「た」の部分)をそれぞれ元の音から 1/4 ずつ 3/4, 2/4 となるように短くしていった(図 5 のように、前半の音は手前から後半の音は後ろから両端を切り取るようにした)。

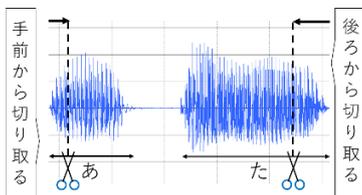


図5 実験4の補足

考察4

1/2 の長さの時が一番間延びせず自然な音の長さに聞こえた。この音の長さを 1/2 にする方法を方式 4 とする。

アンケートの実施

私たちが実験した音声を 35 人に聞いてもらい、いかになめらかに聞こえるかを 100 点満点で点数を付けてもらった。表 1 の調査は私たちの考察で考えたことと、客観的な意見が一致するか調べた。表 2 の調査は私たちが最もなめらかに作れたと感じた方式 4 と apple 社の Siri との滑らかさを比較した。

表 1 各方式の比較

	文A		文B		文C	
	順位	平均値	順位	平均値	順位	平均値
方式1	5	15.6	4	22.0	4	23.6
方式2	6	12.4	6	10.4	6	20.8
方式3A	3	26.9	3	42.6	3	24.6
方式3B	2	27.6	2	45.5	5	21.9
方式4	4	25.0	5	14.2	2	29.2
音声	1	81.9	1	80.8	1	95.2

表 2 方式 4 と Siri の比較

	文D		文E	
	順位	平均値	順位	平均値
Siri	1	75.3	1	65.7
方式4	2	38.7	2	34.4

表 1 の文 A は「こんにちは、地球科学部です」、文

B は「東京特許許可局」、文 C は「ありがとうございました」、文 D は「谷川先生おはようございます」、文 E は「24 時間たかえますか」をそれぞれ再生した。

アンケート考察

方式 3A と方式 3B の点数がいずれもほとんど同じだったので考察 3 の通りこれらの手法に大きな違いはないと思われる。方式 1 と方式 2 の比較では仮説 2 に反して方式 2 が最も評価が低かった。方式 2 は母音を余分に付け足すのでその後の実験で判明したような加工法を利用しないとかえって不自然に聞こえるのだと考える。アンケートから、音のなめらかさでは Siri の方が優れている。しかし、Siri はアンケートの文 E を「24 時間戦えますか」と漢字にして読ませると「24 時間せんえますか」と読んだ。私たちのプログラムは文 E を正しく読むことができる。この点では私たちのプログラムの方が優れている。

合成音声プログラム開発

音声を繋げるプログラムは Python²⁾ という言語を使用して書いた。プログラムは、文章をカタカナに変換してからローマ字に変換し、それぞれのローマ字に対応する素材を繋げて一つの wav ファイルとして再生する。なお文章をカタカナに変換する部分には京都大学情報研究科と日本電信電話株式会社が共同開発したソフトである MeCab³⁾ を使用したライブラリである mecab-python-windows を使用した。

結論と展望

MeCab を使用することで漢字交じりの文章を Siri より正確に読めるようになった。声のなめらかさでは Siri に劣るが、誰の声か識別できる合成音声を作れた。

文章を読ませる際に使用する素材には音程や振幅の違いが生じる。そのため、文を作ると素材間でその違いが不自然さとして現れる。そこで二つの素材を作る際、一つ目の素材を子音の終わりまで、二つ目の素材を母音の始まりからになるように用意すると、本人の声の形に近づき、聞こえ方もより明瞭になると考える。

参考文献

- 1) Sound Engine 公式 <https://soundengine.jp>, (2019 年 5 月 20 日閲覧)
- 2) Python 公式 <https://www.python.org>, (2019 年 6 月 11 日閲覧)
- 3) MeCab 公式 <https://taku910.github.io/mecab/>, (2019 年 8 月 23 日閲覧)

物理

最軽量の熱気球の製作

兵庫県立北摂三田高等学校

2年富田蒼、大前孔輝、鳥越滉人、

森西律翔、時任由樹

1年由良勘吉、清瀬皓矢

1. 動機及び目的

我々は昨年度より自作熱気球の浮力測定をテーマに研究を続け、正確な浮力測定のための理論を構築してきた。しかし研究に用いた気球はかなり大きく、製作に難があった。そこで本研究は

- ①気球の大きさと質量の関係
- ②気球の大きさと温度変化の関係
- ③気球の大きさと浮力の関係

の三点から最軽量の熱気球の大きさを求める。

2. 方法

①気球の大きさと質量の関係

気球は袋と、その内部の空気を加熱する熱源からなる。本実験ではより気球を小型にするために袋と熱源は直接接続しないことにした。本実験は正方形に加工したポリエチレンを二枚合わせて袋とした。袋の体積は、その一辺の長さの三乗に比例するという先行研究の結果を参考に求めた。熱源は燃料用アルコール（メタノール 76.6%、エタノール 21.4%、イソブロパノール 0.3%）1.0ml をコットン（大きさ 2.5×3.0cm）に浸み込ませ、アルミホイル製の皿（直径 3cm）で燃焼させる構造とした。そして様々な大きさの袋の質量を求めた。

②気球の大きさと温度変化の関係

袋をスタンドに吊るし、一定距離から熱源で加熱し袋内中心部の温度変化を測定する。（図1）



[図1 温度変化測定の様子]

袋下部が熱によって変形しないようアルミホイルで保護した。

③気球の大きさと浮力の関係

①により求まる気球の袋の質量を w [g]、実験開始時の温度（＝気温）における気球の袋内の空気の質量を m_0 [g]、加熱された袋内の空気の質量を m [g]、重力加速度を g [m/s²] とすると、アルキメデスの原理より袋による浮力 F [N] は

$$F = m_0 g$$

と表せる。一方、飛行中の気球にかかる重力 G [N] は

$$G = (w + m) g$$

と表せる。気球が飛行するためには

$$G \leq F \text{ すなわち } w \leq m_0 - m$$

を満たす必要がある。

加熱された袋内の空気の質量 m は②で測定された袋内の温度変化から気体の状態方程式を用いて計算できる。

求まった m より浮力を求める。

3. 結果と考察

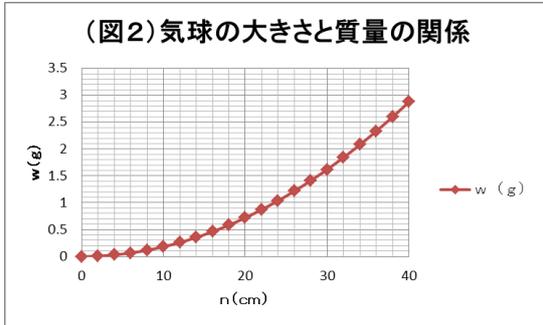
①気球の大きさと質量の関係

袋の1辺の長さを n [cm] とする。袋は二枚重ねのため面積は $2n^2$ [cm²] となる。袋の厚さは 0.010mm、密度 0.92g/cm³ のため袋の質量 w は

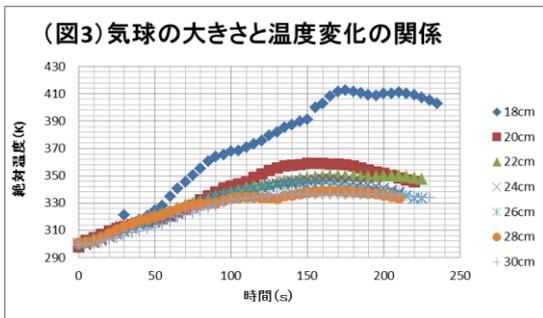
$$w = 2n^2 \times (0.010 \times 10^{-1}) \times 0.92$$

$$\approx 1.8 \times 10^{-3} n^2 \text{ [g]} \text{ である。}$$

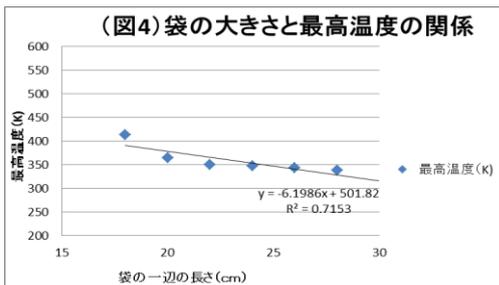
気球の大きさと質量の関係をグラフに示す。(図2)



②気球の大きさと温度変化の関係
袋の一辺の長さ n を 18cm から 30cm まで 2cm ずつ変化させそれぞれの袋内の温度変化を測定した。(図3)



グラフより、袋の大きさに関わらず、温度上昇の速さはほぼ一定だが温度上昇し続ける時間が異なるため、袋が小さくなるほど最高温度は高くなる。そこで、袋の大きさと最高温度の関係をグラフに示す。(図4)



グラフから、袋が小さいほど最高温度が高

くなることが読み取れる。

③気球の大きさと浮力の関係

気球の浮力は、袋内の温度が最も高くなったときに最大となる。図4で求めた最高温度を近似したグラフをもとに、標準状態(0°C、 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)での袋の大きさと $m_0 - m$ 、 w の関係を求めた。(図5)

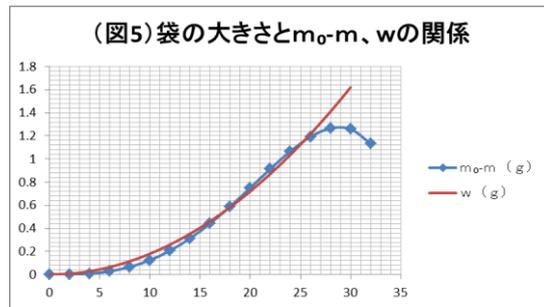


図5より $(m_0 - m) - w$ を求めた。(図6)

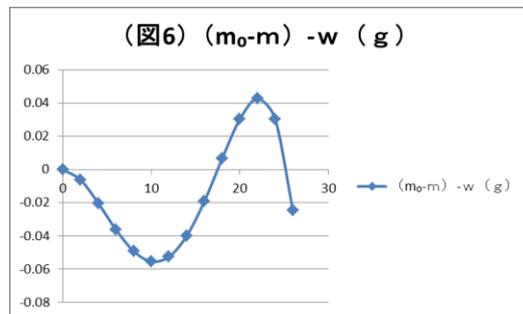


図6より気球が飛行するのは

$$17.5 \leq n \leq 25.4$$

を満たすときと分かる。ゆえに、最軽量気球の質量は

$$n = 17.5 \text{ のときの } 0.551 \text{ g}$$

と求まる。

4. 今後の展望

今回の実験で求めた理論値をもとに実際に気球を製作したい。

5. 参考文献

- 1) 平野 穉他、熱気球はどこまで軽くできるか、第39回兵庫県高等学校総合文化祭自然科学部門発表論文集

物理

水面の物体間にはたらく吸引・反発について
— 1円玉に着目して —

兵庫県立加古川東高等学校自然科学部物理班

2年 新谷琢人 山本康太

1年 高比良拓 信江南菜 平松詠万 堀江亮太 安田吉伸

1. 背景・概要

水槽の上に1円玉を2つ浮かべたとき、2つの1円玉がある距離以下に近づくと、速度が増し、お互いに吸引しようとする。これは、固体面の濡れの関係によって、固体面間に吸引もしくは反発が起こる現象の一つで、例えば指を1円玉に近づけたり、1円玉が壁面に接近したりすると、吸引ではなく反発が見られる。

比重の大きい1円玉がなぜ水面に浮かぶのかということは、表面張力の作用を理解するための材料として、これまでに様々な議論がなされてきている。しかし、2つの1円玉がなぜ速度を増してくっつくかということ、つまり濡れによる液面上のマクロな物体の吸引の話については、佐々木・鈴木²⁾が「液体薄膜を隔てた固体面間の吸引・反発」というテーマで触れているほかには、検討がされていない。佐々木らは、水面上の物体が吸引していくような現象は、物体間の毛管現象の作用が原因であると述べている。毛管現象は、文字通りの「管」の中だけでなく、2平板間にも働くことは、知られていることであるが、我々が種々の物体で水面上吸引・反発の様子を観察したところ、爪楊枝のようなかなり細く、平板とは言えないような物体を水面上の他の物体に接近させても、板のような幅の広い物体と同様の吸引もしくは反発挙動が見られた。本研究では、1円玉の接近の様子を観察することで、「毛管作用による1円玉間の水面下降」と「表面張力」によって1円玉が吸引されていることを、加速度の解析から検討した。

2. 仮説

まず、毛管現象による1円玉の吸引という現象を力学的に考えてみたい。本来1円玉は純アルミニウムできているが、アルミニウムのイオン化傾向は比較的高く、1円玉表面は酸化アルミニウムの被膜で覆われている。酸化アルミニウムは親水性であり、アルミの比重は水より大きいので単純に考えれば沈むが、1円玉には手の油等がかなり付着していて、表面が撥水性になっているから、浮力の作用と合わさって水の上に浮かんでいると考えられる。画像解析を用いた $\theta/2$ 法で、1円玉表面・側面の接触角を計測してみると、(使用水量 8 μ l)表面

の5回平均値が75.7°、側面の5回平均値が91.0°であった。側面は接触角 θ が90°以上で、撥水性である。それを踏まえ、三相の境界点に働く力を図示して見たい。図1に、水面上に1円玉が浮かんでいる様子断面図を示す。

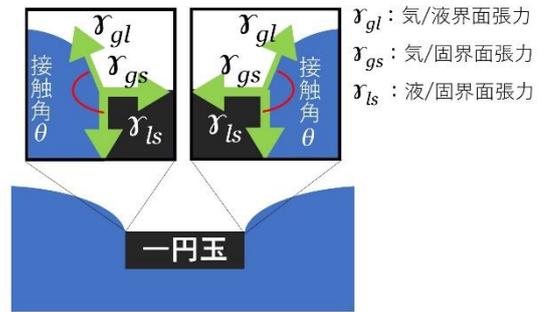


図1 1円玉にかかる表面張力

ここでは水平方向の吸引・反発を考えるので、浮力・重力は考慮しない。1円玉が撥水性のため、接触角 θ が90°以上となって、図1のような水面の形状になっている。当然のことながら、1円玉の端点に働く力は左右で相殺してしまい、1円玉は動かない。しかし、次に示す図2のように2枚の1円玉が浮かべられたときにはどうだろうか。

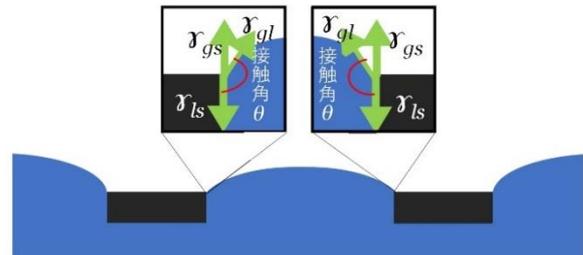


図2 1円玉間に吸引する力が働くモデル

ここで、2枚の1円玉間に平板間と同様、撥水性により毛管下降が起き、三相が接する点が1円玉の側面下部に移ると考える。すると、左右の力が相殺しなくなり、また、力の大きさ自体は何ら図1の場合と変わっていないため、結果として、2枚の1円玉が吸着する方向に力が働くことになる。毛管現象に関する Jurin の式¹⁾
$$H = \frac{2\gamma_{gl} \cos\theta}{\rho g R}$$
(γ_{gl} は液体の表面張力、 θ は接触角、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 R は毛管の半径)によれば、2物体間の距離が近くなる、すなわち R が小さくなるほど毛管降下は増進するはずであるが、図2を見ると、三相が変わらない時にいくら三相接する点が1円玉側面を下っても、水平方向にかかる力は変わらない。よって、いったん毛管降下がおこれば、一定の加速度で1円玉同士が接近することが予想される。また、表面張力の温度依存性を考えれば、水温の上昇に伴って、表面張力が低下し1円玉が接近するときの加速度が減少することも予想される。

3. 実験方法

直径 30cm の水槽(あまりに小さいと壁面との反発もおき、現象が複雑になる)を用意し、水面上に1円玉を何枚か浮かべる。少し手ではじいて、2枚の1円玉がゆっくり接近するようにすると、ある距離まで近づけば、お互い加速し、2枚がくっつく。その様子を、水槽上部の定位置に固定したハイスピードカメラ(SONY RX100)で撮影する。解析はオープンソースの運動解析ソフト「Kinovea」(Ver.0.8.27)を使用した。

4. 加速度の解析実験

仮説の通り、吸引が毛管現象によるものであるならば、水平方向にかかる力は1円玉がどれだけ接近しても変わらないので、接近時に加速度がゆるやかに増加するのではなく、加速度は急激に増加し、その後は衝突するまで一定になるはずである。実験で得られた a-t グラフ(時間と加速度の関係)の一例を図3に示す。

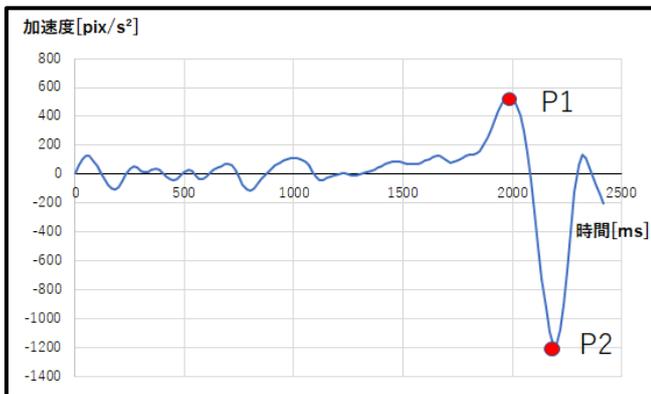


図3 1円玉が接近するときの加速度の推移 (P1 周辺が接近時、P2 周辺が衝突時を表す)

これをみると、加速度は 10^{-1} 秒オーダーで増加しており、他の部分を見ても急速な増加というより、緩やかな上昇に次いで急激な加速度上昇が起こっていることがわかる。単純な毛管降下だけでなく、接近によるメニスカス形状の変形など、もっと詳しいメカニズムを考えてみる事ができると考えている。さらなる検証のため、6章で示す光学的に水面の形状変化を可視化する方法を検討している。また、親水表面同士や親水—撥水の時の吸引・反発現象についても検討を加えたい。

5. 表面張力の温度依存性の確認実験

予備的な実験の結果、水槽内の水の水温を変更すると、より穏やかに2つの1円玉が接近するようになったため、水温を 10.2~56.3°C の範囲で様々に変更して加速度を計測した。加熱は電気ヒーター、冷却は氷によって行った。なお、約 60°C を超えると、表面張力の低下に伴って、1円玉が浮かびにくくなり、計測が不能であった。つまり、1円玉が浮かなくなる温度を計測すれば、その温度での表面張力を概算することが可能ではないか

と考えている。試したところ、うまく浮かべれば、80°C前後でも1円玉を浮かせることが可能であった。図4は、水温と図3で示した P1 加速度の分布図である。

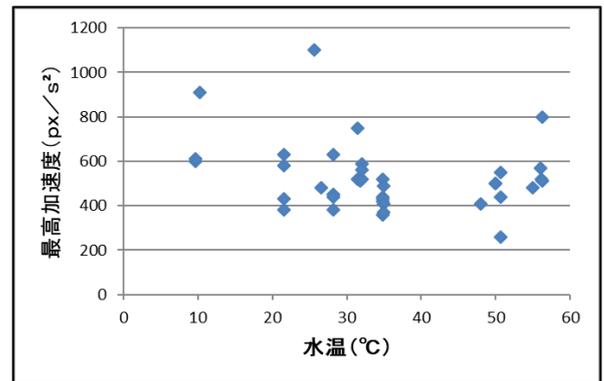


図4 水温と P1 加速度の分布図

(実験数 97 回、そのうち吸引させる 1円玉の個数等の実験条件が同一のものの中で、加速度のピーク P1 を明確に判別できる実験 37 回を採用した)

上図の相関係数は、-0.24 で、本稿執筆時点でははっきりした相関があるとは言えない。水面上のももとの揺れなどの影響による可能性が考えられる。今後、原因を明確にし、なお相関が低いようであれば、水面上での吸引・反発に関して水温非依存性を担保した理論へと修正を図りたい。

6. 今後の展望 (水面のくぼみの可視化)

電気を消した暗室で、水に水平に1円玉を浮かべ、1円玉に光を当て写真を撮影した(図5)。また、1円玉に傾きをつけて水に浮かべ光を当て写真を撮影した(図6)。



図5 光のリング



図6 変形した光のリング

水に水平に浮かべた1円玉の周囲では円形の光のリングが見られた。また、水に傾けて浮かべた1円玉周囲では1円玉が水に浸っている箇所では光のリングが湾曲していた。そのため、1円玉の周囲に見られる光のリングは1円玉周囲のくぼみと水平面との境界であると考えられる。このリングを利用することで1円玉吸着時の水面の変化を観察できると考えている。

7. 参考文献

- 1)ドゥジェンヌ・ブロシャール・ケレ著, 表面張力の物理学, 吉岡書店(2008)
- 2)佐々木恒孝・鈴木等, むれ手でアワ:液体薄膜を隔てた固体面間の吸引・反発, 化学と教育,39 巻6号, pp. 670-673(1991)

物理

高高度モデルロケットの開発Ⅱ

—淡路島で一番宇宙に近い場所を目指して—

兵庫県立洲本高等学校 科学技術部

3年 毛笠友瑛, 工藤拓巳, 柳 諒典

2年 中野祐輝

1年 赤穂幸哉, 雨松周哉, 太田楽人

菅沼優一, 高鍋祥汰, 登 開生

平野永都, 藤江利宇, 前川純輝

前田健翔, 山中啓生

1. 動機及び目的

私たちは昨年度よりモデルロケットの研究に取り組んできた。昨年は研究に取り組み始めたばかりだったので、モデルロケットの機体開発用シミュレーションに頼っていたが、より現実的な状況を掴むため 2018 年度後半より、風洞装置を自作し、抗力係数を計測する実験を行ってきた。ノーズコーン や羽根の形状、枚数について参考文献の理論的な値が適切であるかどうか風洞実験により検証し、空気抵抗が少なくなる機体を開発することを目的とし研究に取り組んだ。

2. 実験方法

2-1 抗力係数

抗力係数とは、一様な流れの中に置かれた物体が流体から受ける流体力のうち流れ方向の成分である抗力の無次元数である。抗力係数 C_d は次式の①式で表される。

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \dots \textcircled{1}$$

ここで D(N) : 抗力 ρ (kg/m³) : 流体の密度

V(m) : 流体の速度 S(m²) : 物体の断面積



図1 自作風洞装置 (測定胴と送風機 [左図]、縮流洞 [右図]) 木材と塩ビパイプで作成した。測定洞は縦 30cm×横 30cm×高さ 91cm の大きさを図1のように中にロケットの機体を吊るし、上部の電子天秤で質量の増加を求める。

2-2 自作風洞装置の概要としくみ

図1に自作風洞の写真を示した。最下部の工事用送風機により空気を吸い出し、機体重量の増加から抗力係数 C_d を求める。

2-3 ノーズコーンについて

ロケットの先端部分のパーツをノーズコーンと呼ぶ。また本研究ではノーズコーンの長さ÷直径=口径比と呼ぶことにする。

先行研究によるとオジーブ型ノーズコーンの抗力係数が最小となっていて特に口径比3のノーズコーンが最良と言われている。そこでオジーブ型のものを中心に抗力係数を求め、比較として円錐型ノーズコーンの抗力係数を求めた。本実験で計測するノーズコーンは表1に示す。これらのノーズコーンはABS樹脂を素材に3Dプリンターを用い私たちが作製した。



図2 実験に用いたノーズコーン 左よりノーズコーン番号1～9に該当する。

表1 ノーズコーンの口径比

ノーズコーン番号/型	口径比
1 オジーブ (尖)	3
2 オジーブ	3.5
3 オジーブ	5
4 オジーブ (丸)	3
5 オジーブ	1.5
6 オジーブ	4.5
7 オジーブ	2.3
8 円錐	2.5
9 円錐	2

2-4 羽根について

羽根の形状についてはモデルロケットに用いられる各種のものを計測することにした。

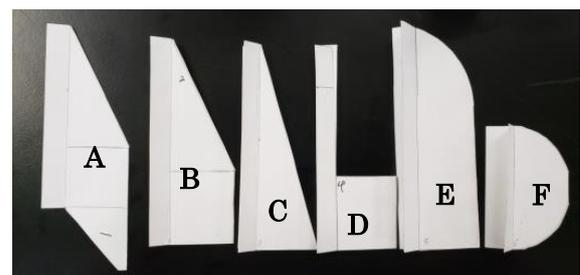


図3 実験に用いた羽根

羽根記号/型	面積 [cm ²]
A 後退	20.25
B 台形	20.25
C 三角形	15
D 四角形	10.5
E 上円下方	29.95
F 円形	14.13

表2 羽根の面積

今回実験する羽根は図3、表2の番号A~Fの6種類である。羽根の高さは3cmで統一し、面積については表2に示す通りである。また、枚数については、モデルロケットでよく使われている3枚羽根と4枚羽根を実験した。羽根のみの抗力係数を計測したかったが、バランスが崩れてうまく計測出来ないのので、2-3の9種のノーズコーンと組み合わせ機体の形で計測した。すなわちノーズコーン1~9と羽根A~Fを組み合わせ、さらに3枚と4枚羽根の計108通りの抗力係数を求めた。

3. 実験結果と考察

3-1 ノーズコーンのCd

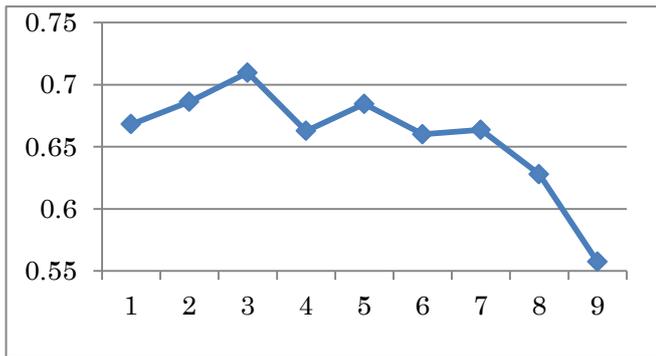


図5 ノーズコーンのみの抗力係数
横軸はノーズコーンの番号で縦軸は抗力係数である。小さいほど空気抵抗が少なく優秀である。

Cd値が小さいノーズコーン8,9は円錐型であり、オジーブ型が優秀であるという先行研究の結果とは逆の結果になっている。また口径比3のオジーブ型のものが最良とされているが、我々の結果では口径比4.5のものが優秀であった。

3-2 羽根のCd

図6に羽根のCd値を示した。羽根の枚数に関わらず羽根E、Fを取り付けた場合に抗力係数が下がっている。A~Eの羽根は角張った部分があるため、先行研究からの予想通りであった。また図6(b)すなわち4枚羽根の機体は抗力係数が小さくなっている。羽根は摩擦抵抗を生む抵抗体だが枚数が多い場合に抗力係数が下がるのは大変興味深い。

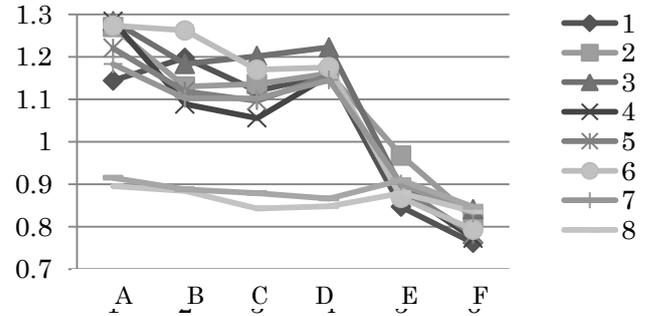
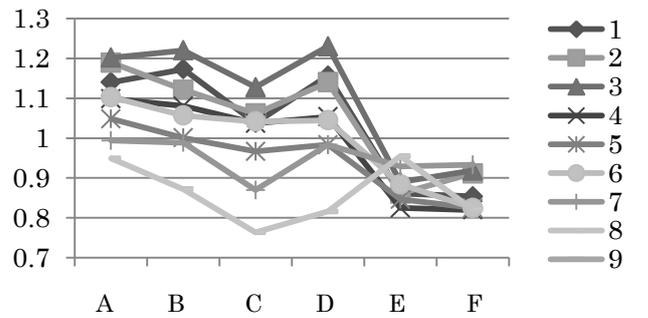


図6 羽根の抗力係数

横軸は表2の羽根の記号、縦軸は抗力係数を示す。上段(a)は3枚羽根、(b)は4枚羽根の抗力係数を示す。今回、4枚羽根の9番ノーズコーンは未実験なのでグラフからは省いた。

3-3 実機による検証

風洞装置での実験は風速10m/s弱であり、速さは36km/hに相当し、レイノルズ数を考慮すると、最高速度100km/hを超えるロケットの飛行を十分に検証しているとは言えない。十分な実験を行ったとは言えないので、ロケット教室を開催した際に子供たちに協力を得て実機の打ち上げを行なった。その結果を図7に示す。

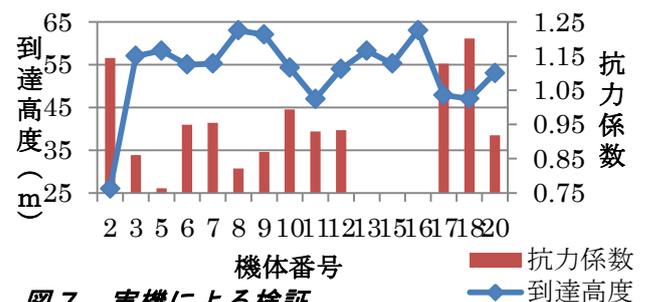


図7 実機による検証
棒グラフの高さが低いものは抗力係数が小さい優秀な機体である。折れ線グラフは実機の到達高度を示す。概ね風洞実験に沿った結果が出ている。

以上、これまでの結果から現時点で最も高高度に到達するのはノーズコーン番号9、羽根記号Cを4枚を使った機体であると結論できる。

4. 参考文献

- 1) 手作りロケット完全マニュアル
久下洋一著 誠文堂新光社 2000年