

泡花の成長

増本 優衣^{1,2}・漆原 紅¹・山田 有紗¹・伊勢 茜¹

Bubbles Flower Development

Yui MASUMOTO^{1,2}, Ko URUSHIBARA¹, Arisa YAMADA¹, Akane ISE¹

Abstract

We have studied a gravity effect on bubbles development. Mixing air and soap solution in plastic resin generated the bubbles and the bubbles were pushed out from the nozzle with plastic resin. The development depended on the chemical composition and the feeding rate of the soap solution. Focused on the development near an outlet of the nozzle, we found a linear movement under the gravity and a twisting movement under a micro-gravity.

Keyword(s): microgravity, bubbles, soap, linear movement, twisting movement

1. 序論

微小重力中でのシャボン玉やシャボン膜の研究^{1,2)}には多くの関心を持たれている。今回、私たちは泡の集団、つまりフォームの微小重力中での動的挙動に関心を持った。細長い出口を持った容器に洗剤やタンパク質を含む水溶液を入れ、そこに気泡を連続的に発生させると、フォームが生成され容器の口からあふれる。



Fig.1 泡発生

洗剤水中にドライアイス片を入れることで発生させる。

Fig.1 では、細い出口を持つ容器の中の洗剤水にドライアイス片を入れることにより泡を発生させている。容器よりあふれ出た泡は、容器の外側表面を伝わり下に落ちる。これは地上での話であるが、これが無重力中で起こる時にはどのような結果となるかを明らかにすることが本実験の目的である。ただし、本実験では、洗剤水にドライアイス片を入れるのではなく、洗剤水と空気を多孔質中で混合することにより泡を発生させる装置を用意した。

また、本実験を行うにあたって、Fig.2 (c)または(d)に示したような泡の成長を予想した。地上では Fig.2 (a)のように泡が垂れ落ちるが、微小重力下では垂れ落ちることなく、Fig.2 (b)のように直線的に成長していくと考えられる。さらに泡は空気と接触しているため、空気抵抗が働き、Fig.2 (c)のような広がった泡になると思われる。もし、泡内部で表面張力などにより横方向の力が働けば、Fig.2 (d)のようになることも考えられる。

以上のことより、下記の2つの視点から実験結果を考察する。

(1)泡は圧力差により先端から吐き出されるのであるから、

1 お茶の水女子大学理学部化学科〒112-8610 文京区大塚2の1の1,
Department of Chemistry, Ochanomizu University, 2-1-1 Ohtsuka Bunkyo-ku 112-8610 Tokyo
2 E-mail: g1020317@edu.cc.ocha.ac.jp

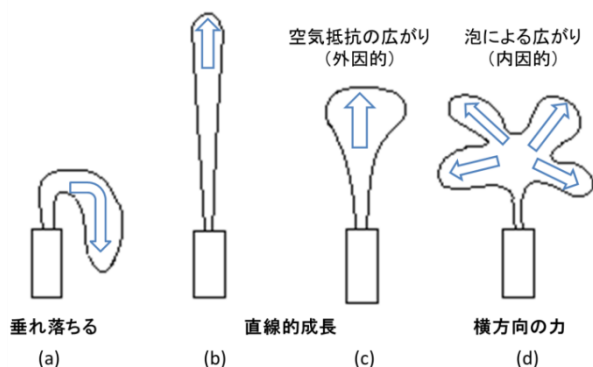


Fig.2 泡の成長

(a)地上では泡が垂れ落ちる。(b)微小重力下では直線的に成長すると思われる。(c)空気抵抗が働くと、広がった泡になると思われる。(d)泡内部で横方向の力が働くことも考えられる。

無重力中では泡は直線的に外に吐き出されるのか？

(2) もし横方向の力が発生するのならば、どのような形になるのか、またその発生の理由は何か？

2. 実験

2.1 実験装置

本実験を無重力中の航空機内で行うために、ノズルの先端から連続的に液膜の泡が発生するような仕組みを考えた。Fig.3 は泡発生装置である。泡発生ノズルは、長さ 50 mm、内径 11 mm のアクリルパイプの内部に多孔質プラスチックを詰めたものである。その下方からエアポン

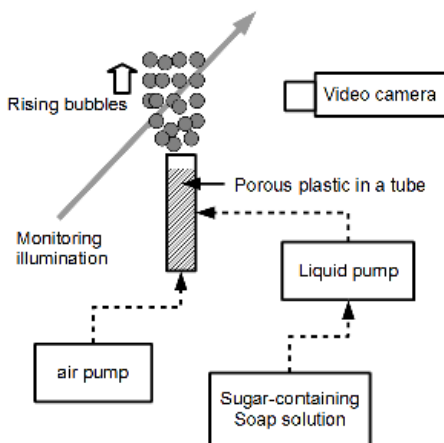


Fig.3 泡発生装置

アクリルチューブ中の多孔質樹脂に空気と洗剤水をポンプで送り込み泡を発生させ、外へ排出させる。排出された泡の成長を、発光ダイオードを用いた暗視野照明下でビデオカメラにより録画する。

プ (NICHIDO, S-200) で空気を、横から液送ポンプ (EYLA, MP-3) で砂糖を含んだ洗剤水をそれぞれ連続的にノズル内部に注入することで、ノズル上方の 2.3 mm の穴から泡を発生させる仕組みにした。泡の安定性を上げるために洗剤水に砂糖を含ませ、その液体組成は、洗剤：砂糖：水 = 1 g : 1 g : 10 mLとした。なお、洗剤は P&G ジャパン株式会社 33%アルキルエーテル硫酸エステル、砂糖は日新製糖株式会社カップ印白砂糖を用いた。空気の流速は 0.5 L/min とした。液体流速は 1.75 mL/min, 1.37 mL/min, 0.95 mL/min, 0.53 mL/min とした。泡は航空機の床に対してそれぞれ鉛直上下の 2 方向に約 20 秒発生させ、ビデオカメラで撮影した。観測照明として 1 W 赤色発光ダイオードを用い、下方からの暗視野照明でビデオ記録を行った。μG の同期には、μG 検出信号により緑色 LED を点灯させ、同時にその画像を記録した。

2.2 実験手順

約 20 秒間の微小重力状態は一定の間隔を空けて 10 回以上繰り返され、その毎回の繰り返しにおいて以下の手順により実験を行った。(i)微小重力状態前の 1G 状態における一連の操作は、観察室内蛍光灯点灯、洗剤水貯留場所とノズル間の三方活栓で接続、液送ポンプの流速を設定、エアポンプと液送ポンプの連動を組み換え回路にて設定、蛍光灯消灯、LED 点灯、カメラ録画開始である。(ii)微小重力状態になるとともに、エアポンプおよび液送ポンプを、組み換え回路を利用して同時に作動させる。(iii)微小重力状態から加重力状態への移行とともにエアポンプおよび液送ポンプを停止する。そして次の測定のために(i)の操作から再度開始する。

3. 結果

Fig.4 は、重力下((a)-(d))および微小重力下((e)-(h))で、航空機の床に対して鉛直上向きに泡を発生させたときの結果である。画像は異なる液送流速における泡発生開始後 5 秒後の画像である。なお、液送流速は(a)と(e)で 0.53 mL/min, (b)と(f)で 0.95 mL/min, (c)と(g)で 1.37 mL/min, (d)と(h)で 1.75 mL/min である。ただし、空気の流速は 0.5 L/min で一定とした。鉛直上方向に発生した泡は、重力下(1G)ではすぐに垂れ落ちるが (Fig. 4 (a)-(d)), 無重力下ではすぐに垂れ落ちることなく、最初の泡がノズル台に落ち、その泡が固定点となって、その後発生した泡は最初の泡に引き寄せられて上へ成長し、重力下に戻ると泡は一気に崩れ落ちる (Fig. 4 (e)-(h)).

Fig.5 は、重力下((a)-(d))および微小重力下((e)-(h))で、航空機の床に対して鉛直下向きに泡を発生させたときの

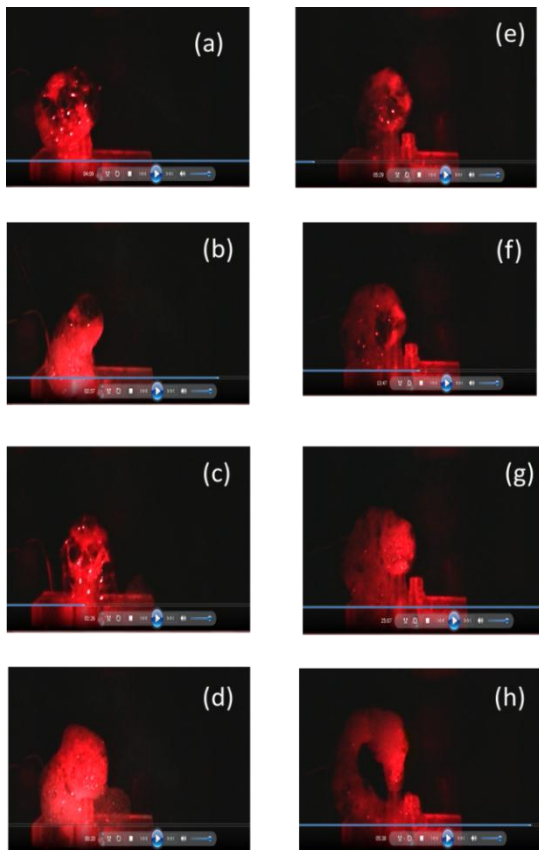


Fig.4 上方向への泡発生

航空機の床に対して鉛直上方向に泡を発生させた後5秒後の写真である。(a)-(d)は地上、(e)-(h)は微小重力下の結果である。空気の流速は0.5 L/minで一定、洗剤水の流速は(a)と(e)で0.53 mL/min、(b)と(f)で0.95 mL/min、(c)と(g)で1.37 mL/min、(d)と(h)で1.75 mL/minである。

結果である。画像は異なる液送流速における泡発生開始後5秒後の画像である。液送流速は、(a)と(e)で0.53 mL/min、(b)と(f)で0.95 mL/min、(c)と(g)で1.37 mL/min、(d)と(h)で1.75 mL/minである。ただし、空気の流速は0.5 L/minで一定とした。鉛直下方向に発生した泡は、重力下(1G)では下に向かい落下するが(Fig.5 (a)-(d))、無重力下では塊を形成し、その後重力下に戻るまで落下しなかった。

4. 考察

4.1 泡全体

4.1.1 重力による影響 (1G と μG の泡の差異)

重力下においては、航空機床に対する鉛直上向きの泡

生成は、泡を吐き出す圧力の方向に対して逆向きに重力が働くため、重力>圧力となり、ある点で泡は折れ曲がる(Fig.4 (a)-(d))。一方、鉛直下向きの場合では、泡を吐き出す圧力の方向と重力の方向が一致するため、その向きに一直線に伸びた形となる(Fig.5 (a)-(d))。無重力下では、重力がかからないため、上向きおよび下向き生成の間で差がないと予想したが、観測結果では、大きく異なる形が見られた。そこで、まず、Fig.4とFig.5の実験結果を、序論でも述べた次の2点について考察した。

(1)泡は圧力差により先端から吐き出されるのであるから、無重力中では泡は直線的に外に吐き出されるのか？

鉛直上向きノズルについては、“直線的”だといえる(Fig.2(c)とFig.4(e)-(h)を比較)。ここで“直線的”とはノズル台よりも下に落ちないことを表現している。重力下では泡がノズル台の下まで垂れ落ちているが、無重力中ではノズル台に接触しているだけである。最初に発生した泡がノズル台に接触した原因については次の4.2で考

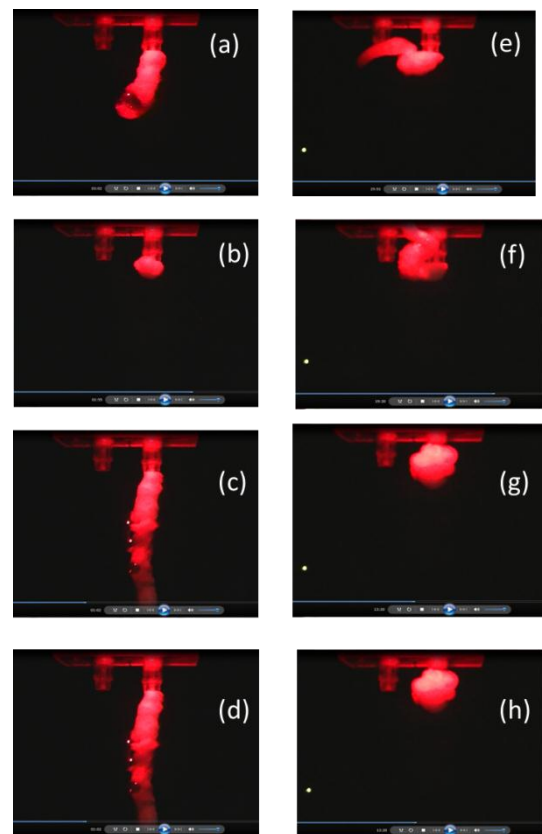


Fig.5 下方向への泡発生

航空機の床に対して鉛直下方向に泡を発生させた後5秒後の写真である。(a)-(d)は地上、(e)-(h)は微小重力下の結果である。空気の流速は0.5 L/minで一定、洗剤水の流速は(a)と(e)で0.53 mL/min、(b)と(f)で0.95 mL/min、(c)と(g)で1.37 mL/min、(d)と(h)で1.75 mL/minである。

る. 1.37 mL/min (Fig. 4 (g)), 0.95 mL/min (Fig. 4 (f)), 0.53 mL/min (Fig. 4 (e)) はノズル台上に落ちた泡と次に発生した泡がすぐに結合しているの、花のように広がることなく、どちらかという風船のように泡の塊になっているが、1.75mL/min (Fig. 4 (h)) は泡が結合せず独立であり、アーチを描いている。どの流速の泡についても重力によって押しつぶされることなく成長していると考えられる。また、鉛直下向きノズルについても同様に“直線的”だといえる (Fig. 2 (c)と Fig. 5 (e)-(h)を比較)。しかし、重力によって下向きに引かれる力がないため、鉛直下向きの直線上に泡がのびることはない。

(2) もし横方向の力が発生するならばどのような形になるのか、またその発生の理由は何か?

多くの場合、最初の泡は航空機の機体前方に曲がっているが、中には機体後方に曲がるケースも数例ある。よって曲がる方向に規則性はなく、偶然このような結果が得られたと考えた。本来は圧力のかかる方向に泡が発生するはずであるが、泡が横に曲がった原因の1つとして空気抵抗が生じていると考えられる。また、次で説明するノズル付近の泡の運動により最初に発生した泡がノズル台上に接触すると後から発生した泡が表面張力により、いったん曲がった方向へ引き寄せられる。

以上をまとめると、無重力になると泡はノズル台より下に落ちないという点で“直線的”に吐き出されると言える。しかし、横方向への力も発生しており、これについては次項で説明する。

4.1.2 ノズルの向きによる影響 (μG における上向きノズルと下向きノズルの泡の差異)

微小重力中では上方向においても下方向においても生成された泡は同じ結果となると予想されていたが、実際には、Fig.4(e)-(h)と Fig.5(e)-(h)では、その泡の排出方向について長さが異なる。前者は短く、後者は長い。この理由として、航空機の姿勢があると思われる。航空機は20秒間の微小重力状態期間において、機首が上向きから下向きに変化する。今回の実験は機首に最も近い位置で行ったためこの回転により発生する力(トルク)が十分に大きいならば、泡は慣性でその場にとどまろうとするが、ノズルは機体と一緒に下方向に引っ張られる。そのノズルから泡は新たに生成し続けるため、鉛直上向きノズルでは泡がのびる (Fig.6(a)) が、鉛直下向きノズルではノズルにより押されるため、塊のようになる (Fig.6(b))。

以上より、微小重力下で重力の作用を取り除くことでトルクによる作用が顕著に表れたのだと言える。重力下では、鉛直下向きに働く重力の作用が強く、Fig. 4 (e)-(h)と Fig. 5 (e)-(h)のような泡の挙動は見られない。

4.2 ノズル出口付近の泡

今回得られた結果について、ノズル付近に横向き

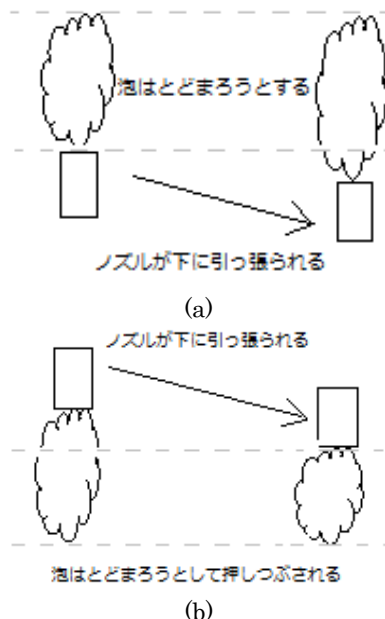


Fig.6 航空機の回転運動による影響
航空機の回転によりノズルが下に引っ張られるため、上向きノズル(a)では泡がのび、下向きノズル(b)では泡が塊になる。

が働きツイスト運動しているかのように見える不思議な泡の挙動 (Fig.4 及び Fig.5) が見られることを説明するために、twisting tube model(TT モデル)を考えた (Fig.7)。

このモデルは水道の蛇口から水を流し込んだ散水ホースをもとにしたものである。散水ホースを考えてみると、Fig.7 に示したように、液体の勢いが強いとついには、ホースはツイスト運動するであろう。また、より柔らかいホースは液体の勢いがある程度弱くてもツイスト運動が始まるであろう。従って、ツイスト運動が始まるかどうかを決める要因は液体の勢いとチューブの硬さと考えてよいだろう (Table 1)。

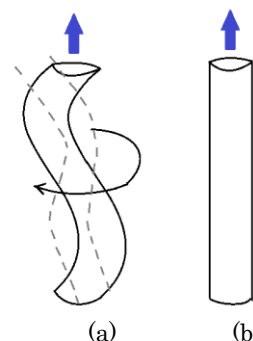


Fig.7 散水ホース
低流速(b)ではホースは変形せず、高流速(a)ではホースはツイスト運動をする。

Table 1 ツイスト運動を決める要因

		チューブの硬さ	
		硬い	柔らかい
液体の 勢い	強い	ツイストする	ツイストする
	弱い	ツイストしない	ツイストする

この TT モデルを、空気の流速を一定として、液送流速を変化させた今回の泡発生の実験に応用してみる。ただし、注意すべき点としては、泡チューブの硬さは液体の流速により定まるものである。よって、散水ホースでは、液体の勢いとチューブの硬さはそれぞれ独立であるが、本実験においては、液体の流速の変化に伴い、液体の勢いもチューブの硬さも変化する。

泡のチューブは空気と液体から成る。運動している泡チューブの粘性は、空気と液体の含量の比率によって決まると考えられる。液体は空気よりも粘性が高いため、泡のサイズが小さい、つまり空気含量が少ないと粘性は高くなる。よって、粘性は運動している物体の抵抗を表すパラメータとなるので、空気含量の少ない泡は形状を維持しやすくなると考えられる。この状態で運動している泡を、これより“硬い泡”と表現することにする。液送流速を上げると空気に対する液体の比率が上がる。液体の比率が高い泡はより硬い。一方、液送流速を下げると空気に対する液体の比率が下がる。液体の比率が低い泡はより柔らかい。泡の硬さは異なるが、これら二種の泡チューブは、散水ホースのモデル(Table 1)において、チューブは硬いが液体の勢いが強い場合、もしくは液体の勢いは弱い但チューブは柔らかい場合に対応するので、どちらの場合においてもツイスト運動がおけると結論づけられる。したがって、空気の流速が一定であるとき、液送ポンプの流速に関係なく泡はツイストする (Table 2)。本実験において、液送ポンプの流速が変化しても泡の様子に大きな違いがほとんど見られなかった (Fig.4(e)-(h) または Fig.5 (e)-(h))。これは、このモデルに当てはまるためだと考えられる。

このモデルによれば、チューブが硬く液体の勢いは弱いものでは、ツイストしないと予想される(Table 1)。今後の課題は、液送ポンプの流速を遅くして、液体の勢いが弱い状態に保ちながら、砂糖の混合比を増やすことで硬い泡チューブを作成し、このモデルを検証することである。また、今回は空気の流速を最低の値に固定したが、空気の流速を高くし、チューブをより柔らかいものにす

る実験も興味を持たれる。

Table 2 ツイストモデルと泡生成

	洗剤水の流入速度	
	速い	遅い
泡の構成	液体 > 空気	液体 < 空気
泡チューブの硬さ	硬い	柔らかい
液体の勢い	強い	弱い
泡チューブの運動	ツイストする	ツイストする

4.4 芸術的側面

今回観察した微小重力下での泡の成長の様子は、地上での重力に束縛された状態とは異なるものだった。発生し続ける泡が下方に落ちるのは地球上固有の話であって、重力の影響を取り除くことにより、重力によって隠されている自然の現象が見えた。重力下で同様の実験をしても、鉛直上向きで見られたアーチや鉛直下向きの塊のような泡を観察することはできないだろう。また、ツイスト運動も、微小重力下でのみ観察されたことから、重力の効果を排除することにより、明らかになったのだと考えられる。よって、本実験により、重力支配下では見られない自然の造形美を見てとることができたといえる。

謝辞

本実験において、パラボリックフライト実験の機会を与えてくださった宇宙航空研究開発機構、実験実施の環境を整えてくださった日本宇宙フォーラム、現地での実験実施のサポートをくださったダイヤモンドエアサービス、実験装置の開発などの支援をくださったお茶の水女子大学理数応援プロジェクトアドバンストプログラムおよび同大学教員森義仁先生、芸術面でのご指導を賜りました筑波大学教授逢坂卓郎先生、同プロジェクトに共に参加された他チームの皆様へ感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 平野大地, 他 日本マイクロ重力学会誌 vol.25 No.2 2008(96-100).
- 2) Don Pettit, NASA Science News http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/25feb_nossoap/