

# Antibubble の空気膜厚を脱気法で計測する

埼玉県立浦和東高等学校  
総合科学研究部

## はじめに

本校では継続的に Antibubble(水中シャボン玉)の研究を行っている。Antibubble はシンプルな系でありながら、興味深い構造や安定性や挙動を示す。Antibubble は液体バルク中に形成される液滴である(図 1)。シャボン玉とは逆構造をしている(図 2)。この液滴は周囲を空気薄膜で被われているため、バルクと合体せずに存在できる。すなわち、薄膜を形成している空気の浮力によって液滴が空中に浮いているのである。また、Antibubble の表面には干渉色が観察されることから(図 3)、空気薄膜の膜厚は光の波長程度と推察できる。



図 1. Antibubble

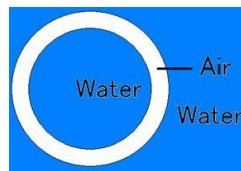


図 2. Antibubble の構造

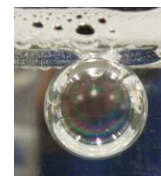


図 3. 表面の干渉色

この薄膜の膜厚を本校では過去にふたつの方法で測定した。ひとつは薄膜を形成する空気を水上置換で捕集し、その体積から膜厚を見積もる方法(空気捕集法)で、結果は  $5.4\mu\text{m}$  と報告した<sup>[1]</sup>。もうひとつは水中を等速直線運動で上昇する Antibubble の速度から膜厚を見積もる方法(上昇速度法)で、結果は  $1.2\mu\text{m}$  と報告した<sup>[2]</sup>。

本稿では、新たにふたつの方法で膜厚を測定したのでその結果について報告する。

## 実験

**目的** 空気を脱気した水、および飽和させた水をそれぞれつくり、その中に Antibubble を形成してその持続時間を調べる。

**準備** ・水(水道水を用いる) ・洗剤(LION チャーミー) ・耐熱ペットボトル ・加熱装置  
・ストロー(内径 6mm ポリプロピレン製) ・デジタルカメラ(NikonCoolpix)  
・角形水槽 (内寸 87mm×48mm×93mm アクリル製) ・エアセラミックス(カインズ)  
・エアポンプ(GEXeAIR1000SB)

**方法** ① 水(水道水)をビーカー中で、40 分間沸騰させてつくった熱水を 4 本の耐熱ペットボトル A,B,C,D に入れ密封(図 4)する。

② 次に各ペットボトルについて、次の操作を行う。

ペットボトル A: 24 時間静置した後、ペットボトルから水を角形水槽に移し、洗剤を滴下し

てAntibubbleをつくる(図6)。そして、Antibubbleが崩壊するまでの時間を測定する。

ペットボトル B: 24時間静置した後、ペットボトルから水を角形水槽に移す。続いて、エアポンプで50分間バブリング(空気通気)した後(図5)、洗剤を滴下してAntibubbleをつくる(図7)。そして、Antibubbleが崩壊するまでの時間を測定する。

ペットボトル C: 室温に戻ったあとペットボトルから水を角形水槽に移し、水面は開放したまま24時間静置(空気と接する水面の面積は $42\text{cm}^2$ )後、洗剤を滴下してAntibubbleをつくる(図8)。そして、Antibubbleが崩壊するまでの時間を測定する。

ペットボトル D: 熱水が室温に戻ったあとペットボトルから水を角形水槽に移し、水面は開放したまま72時間静置(空気と接する水面の面積は $42\text{cm}^2$ )後、洗剤を滴下してAntibubbleをつくる(図9)。そして、Antibubbleが崩壊するまでの時間を測定する。



図4. ペットボトルに密閉した熱水



図5. ペットボトルBの水をバブリングする

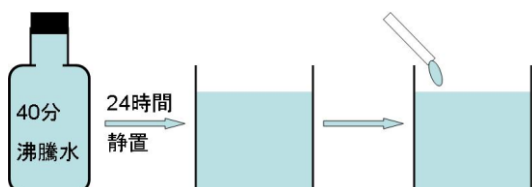


図6. ペットボトルA

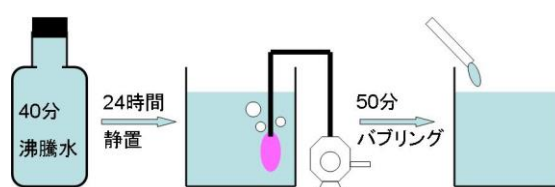


図7. ペットボトルB

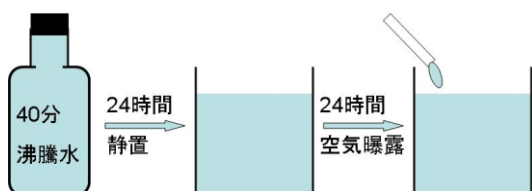


図8. ペットボトルC

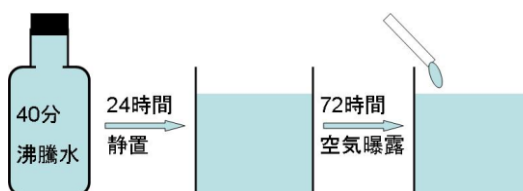


図9. ペットボトルD

なお、Antibubble作りは次のように行った。水100mLあたり5滴の洗剤を溶解させ、この溶液をストローに含ませ、同一溶液の表面に上方から落下させる(図10)。洗剤を溶解させる目的は、Antibubbleの空気薄膜中における空気移動を妨げることである。

持続時間の測定は、Antibubble形成から崩壊までを動画(30fps)撮影することで行った。

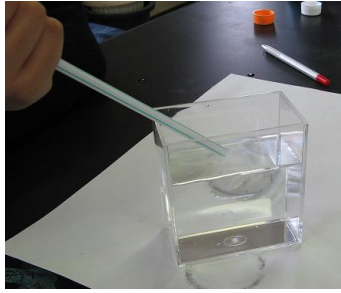


図 10. ストローに含ませた溶液をバルク表面に落下させる

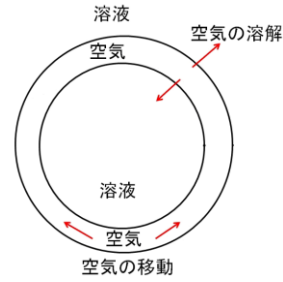


図 11. 空気移動と溶解

**結果** 20 個の Antibubble について測定した Antibubble の持続時間は、水を密封状態から角形水槽に移してすぐ実験を行ったペットボトル A で最も短く、72 時間空気暴露したペットボトル D で最も長かった(表 1)。

状態	ペットボトル A 開封後すぐ	ペットボトル B バブリング後	ペットボトル C 24h 空気暴露	ペットボトル D 72h 空気暴露
持続時間[s]	0.30	20.9	10.8	21.7

表 1. Antibubble の持続時間 (形成されてから崩壊までの時間)

**考察 [1]** Antibubble の崩壊は空気薄膜の膜厚が薄くなり、液滴とバルクが合体するためである。膜厚が減少する主な原因は、薄膜中の空気が鉛直方向下部から上部へ移動すること、および薄膜中の空気がバルクへ溶解することと考えられる(図 11)。ペットボトル A(開封後すぐ)の持続時間がペットボトル A,C,D に比べて非常に小さいことは、Antibubble 崩壊の原因が、空気移動に比べて空気溶解の寄与が大きいことを示唆している。

[2] 各場合で持続時間が異なる原因は次のように考えられる。

ペットボトル A(開封後すぐ)の場合、バルクの空気濃度が小さいので薄膜中の空気がバルクに溶け込みやすく、膜厚が短時間で薄くなり Antibubble の持続時間は短かった。

ペットボトル B(バブリング後)と D(72h 空気暴露)の場合、バルクの空気濃度が飽和に近いいため薄膜中の空気がバルクに溶け込みにくく、膜厚が維持され Antibubble の持続時間は長くなった。ペットボトル C(24h 空気暴露 24h)の場合、バルクの空気濃度が A と B,D の中間的なため持続時間は中間的な値になった。

[3] ペットボトル A(開封後すぐ)の持続時間にもとづいて、空気薄膜の膜厚を算出してみる。

まず、空気薄膜中の空気がバルクに溶解して Antibubble が崩壊する過程を次のように考える。

界面(空気薄膜とバルクの気液界面)では、空気がバルクに溶解しやすく、短時間で界面近傍は飽和する。しかし、バルク内部は飽和していないので、界面近傍のバルクからバルク内部へ空気分子が移動する。そして、移動した分の空気が界面をとおして薄膜からバルクへ溶解する。その結果、薄膜中の空気が減少する(図 12)。以上を繰り返して空気薄膜は薄くなり Antibubble は崩壊する。

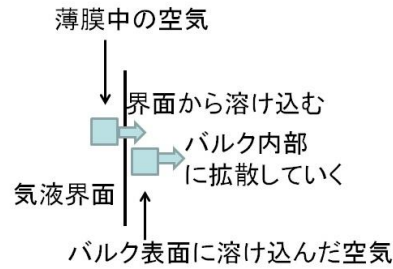


図 12. 空気が薄膜中からバルク中に溶解するながれ

また、次のように仮定する。ペットボトル A(開封後すぐ)のバルク内部の空気濃度は界面近傍バルクの空気濃度に比べて非常に小さい。空気薄膜内で鉛直下部から上部へ空気移動は十分に遅い。膜厚がゼロになったとき Antibubble が崩壊する。

以上の過程と仮定を Epstein-Plesset の式<sup>[3]</sup>に当てはめると

$$h = 4 \frac{c_s}{\rho} \sqrt{\frac{D}{\pi} t}$$

が得られる。ここで、 $h$  は膜厚、 $c_s$  は水に対する飽和空気密度、 $\rho$  は水の空気密度、 $D$  は水中における空気の拡散係数、 $\pi$  は円周率、 $t$  は持続時間である。

上記の式に、ペットボトル A(開封後すぐ)の持続時間  $t=0.30\text{s}$  および  $c_s=2.44 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ <sup>[4]</sup>、 $\rho=1.21 \text{ kg/m}^3$ <sup>[4]</sup>、 $D=2.00 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[5]</sup> を代入して  $h=1.11 \times 10^{-6} \text{ m}=1.11 \mu\text{m}$  を得た。この膜厚は、Antibubble の表面に干渉色を生じる値であり、上昇速度法で得られている  $1.2 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>に近い値である。

## 結論

1. Antibubble の持続時間には、バルク中への空気溶解の寄与が大きい。
2. 脱気法では空気膜厚が  $1.1 \mu\text{m}$  というよい値が得られた。

## 文献

- [1]新井田恵美,藤島美樹,濱田恵,“第 49 回日本学生科学賞作品集”,読売新聞社(2006)
- [2]加藤将貴,“第 3 回坊っちゃん科学賞作品集”,東京理科大学(2012)
- [3]B.Scheid, J.Zawala, S.Dorbolo, Soft Matter(2014)
- [4]国立天文台編、「理科年表」、国立天文台(2005)
- [5]E.L.Cussler, “Diffusion”, Cambridge University Press(1997)