

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

040118

泡泡造反了—反泡泡之形成、存活與破滅之物理
特性探討

學校名稱： 國立高雄師範大學附屬高級中學

作者：	指導老師：
高一 李夢筑	簡聿成
高一 黃晴	林怡秀

關 鍵 詞：反泡泡、界面活性劑

泡泡造反了

—反泡泡之形成、存活與破滅之物理特性探討

摘要

本研究主要要探討「反泡泡」(antibubble) 這個一般不被注意到的有趣物理現象。我們用數位攝影機進行實驗結果的取得，並以電腦進行擷取與分析。

實驗結果為：

- 一、反泡泡的生成主要與界面活性劑的性質有關。洗碗精這樣具界面活性劑特性的物質濃度越稀薄，反泡泡的成功越低。
- 二、反泡泡的大小範圍介於 0.35cm 至 0.6cm，不同濃度所產生的反泡泡大小並無明顯之差異。
- 三、反泡泡的內半徑約為外半徑之 $3/4$ 。
- 四、反泡泡存活時間大多在 70 秒之內，僅有少數超過 100 秒，平均存活時間為：40.65 秒。
- 五、反泡泡自行破滅可以歸納出兩大種類型。其一為：「集中破滅」；另一為「震盪破滅」。「震盪破滅」情形較為特殊少見，其破滅過程較一般反泡泡來得更久，且有 2 至 3 次的來回震盪。

壹、研究動機

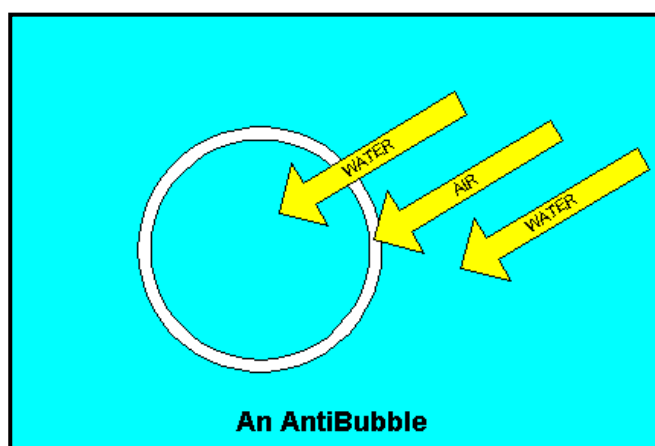
我們在「物理馬戲團 2」這本書中看到關於反泡泡(antibubbles，或稱顛倒肥皂泡)的介紹，這個從來沒聽過的名詞激起我們的好奇心。雖然在物理課上學過液體表面張力和氣泡的性質，但我們對這種反泡泡卻是第一次聽過。

在查閱相關資料後，我們知道這是一種和正常肥皂泡結構相反的肥皂泡泡，但目前都沒有很詳細的探討，因此引起我們深入研究的動機。

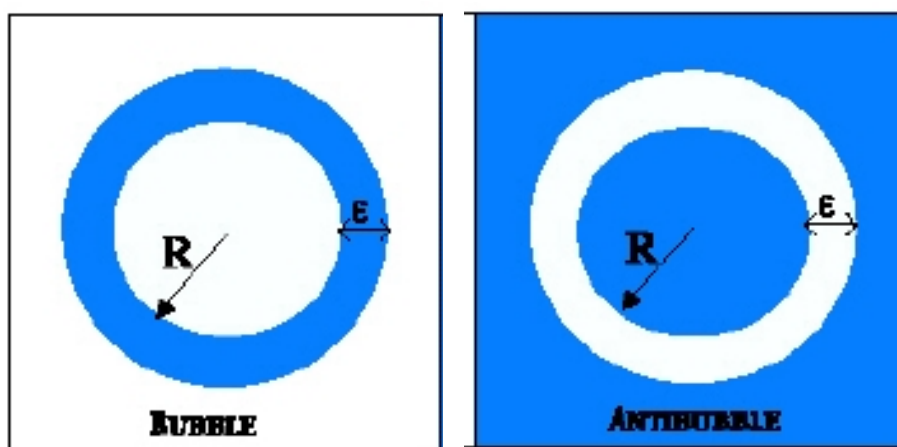
貳、文獻探討

一、結構：

反泡泡的結構(見圖一)，內部是液體，中間包裹一層空氣殼，即水在裡面而空氣殼包在外面，和正常泡泡空氣在裡面，外面是一層水的薄膜是相反的(見圖二)。



圖一



正常泡泡

反泡泡

圖二

二、原理：

水滴穿透水表面，然後留在水裡，外面包裹一層空氣殼，表面張力把泡裡的水拉成球形，以防止兩側的水流入空氣殼，形成反泡泡（見圖三）。



圖三

參、研究目的

本研究希望能從反泡泡的物理特性、反泡泡的形成以及反泡泡的破滅等三方向來進一步瞭解反泡泡特有的物理性質。

針對上述研究目的，我們的研究問題如下：

一、探討與反泡泡有關的物理性質及其關係：

1. 反泡泡外型大小
2. 空氣膜厚度
3. 存活時間

二、探討反泡泡生成原因及條件：

1. 何種溶液的搭配可以形成反泡泡
2. 不同界面活性劑濃度對反泡泡生成的影響
3. 推測並驗證反泡泡形成之條件

三、探討反泡泡破滅之有趣現象：

1. 反泡泡存活時間範圍
2. 影響反泡泡存活之因素
3. 反泡泡破滅之觀察描述

肆、研究設備及器材

實驗儀器	儀器照片	用途說明	備註
透明容器		將反泡泡滴在此透明容器中	原本使用圓形透明罐，但後來發現具放大效果，以此測量反泡泡大小極不理想。故採用平面式的觀測方向
攝影機		拍攝反泡泡及其運動過程	以錄影方式記錄反泡泡的形成、物理特性（大小、氣泡膜厚度以及存活時間）以及破滅模式。
燒杯		盛裝、調配洗碗精的濃度	
擠壓瓶		製造反泡泡	將所調配好的界面活性劑倒入擠壓瓶內，將擠壓瓶以入射角度，靠近水面幾公釐處快速倒入。
界面活性劑		研究假說所推測製造反泡泡的原料	本實驗使用洗碗精

伍、過程或方法

一、研究設計：

（一）我們的想法：

在製造反泡泡的過程中，我們擔心會因為外在的因素（製造反泡泡的角度、技術、擠壓瓶孔徑、濃度等）的影響而致使實驗產生不穩定的結果。我們希望能藉由控制變因法，增加實驗的準確性。

在以上可控制的條件固定之後，如果實驗的情形變化不大，我們就可以接受，這樣的實驗是穩定的重要結果。

（二）我們的設計：

我們將條件固定如下：

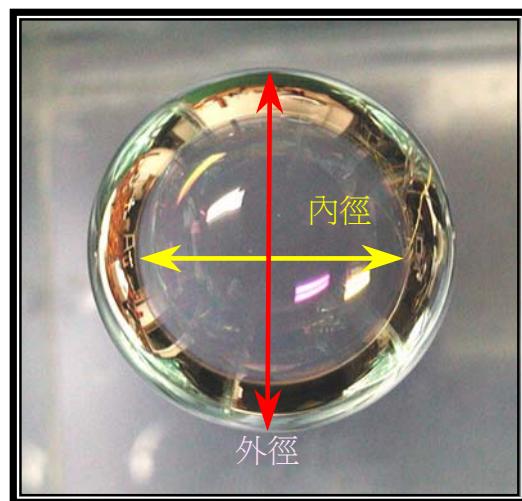
1. 技術、角度：由同一個人來製造實驗所需的反泡泡，並固定製造反泡泡的方法。
2. 擠壓瓶孔徑固定。
3. 每做一次反泡泡即換一次容器內的清水，避免擠壓瓶內的溶液倒入後會使其濃度改變，降低實驗的準確性。

二、研究過程：

（一）製造反泡泡

1. 調配所需的洗碗精濃度後，加入擠壓瓶內。
2. 準備一個透明的容器（容器口徑越大，深度越深越好），內裝清水。
3. 將擠壓瓶以入射角度，靠近水面幾公釐處快速倒入即可（需控制流量）。
4. 攝影及測量反泡泡大小，以求得其內徑、外徑（如圖示）、空氣膜厚度、以及存活時間。
5. 為了確保承接液體的物理性質，我們要求實驗中每做一次即換一次水。

- （二）探討不同界面活性劑濃度下的變化改變擠壓瓶內的洗碗精濃度，分別以體積百分濃度 2.5%、1.5%及 0.5%的洗碗精製造反泡泡。



陸、研究結果

一、探討與反泡泡有關的物理性質：

(一) 以體積百分濃度 2.5% 的洗碗精製造反泡泡所測量的物理性質數據如下：

編號	外半徑 R(cm)	內半徑 r(cm)	空氣殼厚 度 R-r	內外半徑 比值 r/R	存活時間 T(秒)	總體積 R^3-R^3	內體積 r^3-r^3	內外體積比 r^3-r^3/R^3-R^3
1—1	0.50	0.40	0.10	80.00%	10.47	0.1250	0.0640	51.20%
1—2	0.70	0.45	0.25	64.29%	9.75	0.3430	0.0911	26.60%
1—3	0.65	0.45	0.20	69.23%	10.87	0.2746	0.0911	33.20%
1—4	0.40	0.25	0.15	62.50%	37.22	0.0640	0.0156	24.40%
1—5	0.50	0.40	0.10	80.00%	90.00	0.1250	0.0640	51.20%
1—6	0.45	0.35	0.10	77.78%	25.09	0.0911	0.0429	47.10%
1—7	0.60	0.45	0.15	75.00%	66.97	0.2160	0.0911	42.20%
1—8	0.50	0.40	0.10	80.00%	11.69	0.1250	0.0640	51.20%
1—9	0.50	0.40	0.10	80.00%	15.53	0.1250	0.0640	51.20%
1—10	0.65	0.45	0.20	69.23%	17.25	0.2746	0.0911	33.20%
1—11	0.65	0.45	0.20	69.23%	35.75	0.2746	0.0911	33.20%
1—12	0.40	0.30	0.10	75.00%	15.44	0.0640	0.0270	42.20%
1—13	0.30	0.20	0.10	66.67%	160.13	0.0270	0.0080	29.60%
1—14	0.90	0.70	0.20	77.78%	9.12	0.7290	0.3430	47.10%
1—15	0.50	0.40	0.10	80.00%	56.09	0.1250	0.0640	51.20%
1—16	0.78	0.58	0.20	74.36%	19.00	0.4746	0.1901	40.80%
1—17	0.45	0.40	0.05	88.89%	49.25	0.0911	0.0640	70.20%
1—18	0.58	0.48	0.10	82.76%	36.25	0.1951	0.1072	56.40%
1—19	0.35	0.25	0.10	71.43%	23.78	0.0429	0.0156	36.40%
1—20	0.40	0.30	0.10	75.00%	20.16	0.0640	0.0270	42.20%
1—21	0.50	0.40	0.10	80.00%	27.81	0.1250	0.0640	51.20%
1—22	0.55	0.45	0.10	81.82%	44.03	0.1664	0.0911	54.80%
1—23	0.45	0.25	0.20	55.56%	26.83	0.0911	0.0156	17.10%
1—24	0.70	0.50	0.20	71.43%	19.91	0.3430	0.1250	36.40%
1—25	0.45	0.35	0.10	77.78%	12.78	0.0911	0.0429	47.10%
1—26	0.45	0.35	0.10	77.78%	4.96	0.0911	0.0429	47.10%
1—27	0.75	0.55	0.20	73.33%	7.75	0.4219	0.1664	39.40%
1—28	0.50	0.40	0.10	80.00%	27.00	0.1250	0.0640	51.20%
1—29	0.40	0.30	0.10	75.00%	27.00	0.0640	0.0270	42.20%
1—30	0.70	0.50	0.20	71.43%	83.06	0.3430	0.1250	36.40%
1—31	0.55	0.45	0.10	81.82%	28.10	0.1664	0.0911	54.80%
1—32	0.45	0.35	0.10	77.78%	161.06	0.0911	0.0429	47.10%

1—33	0.80	0.60	0.20	75.00%	145.68	0.5120	0.2160	42.20%
1—34	0.45	0.35	0.10	77.78%	8.91	0.0911	0.0429	47.10%
1—35	0.25	0.20	0.05	80.00%	13.87	0.0156	0.0080	51.20%
1—36	0.50	0.40	0.10	80.00%	24.00	0.1250	0.0640	51.20%
1—37	0.65	0.50	0.15	76.92%	13.84	0.2746	0.1250	45.50%
1—38	0.75	0.55	0.20	73.33%	8.03	0.4219	0.1664	39.40%
1—39	0.40	0.30	0.10	75.00%	31.66	0.0640	0.0270	42.20%
1—40	1.00	0.80	0.20	80.00%	7.57	1.0000	0.5120	51.20%
1—41	0.35	0.25	0.10	71.43%	34.06	0.0429	0.0156	36.40%
1—42	0.65	0.45	0.20	69.23%	45.29	0.2746	0.0911	33.20%
1—43	1.05	0.85	0.20	80.95%	112.09	1.1576	0.6141	53.10%
1—44	0.33	0.23	0.10	69.70%	4.28	0.0359	0.0114	33.20%
1—45	0.30	0.20	0.10	66.67%	17.38	0.0270	0.0080	29.60%
1—46	0.90	0.70	0.20	77.78%	159.12	0.7290	0.3430	47.10%
1—47	0.35	0.25	0.10	71.43%	29.53	0.0429	0.0156	36.40%
1—48	0.55	0.45	0.10	81.82%	10.19	0.1664	0.0911	54.80%
1—49	0.20	0.15	0.05	75.00%	4.97	0.0080	0.0034	42.20%
1—50	0.35	0.25	0.10	71.43%	26.75	0.0429	0.0156	36.40%
1—51	0.45	0.35	0.10	77.78%	23.81	0.0911	0.0429	47.10%
1—52	0.35	0.25	0.10	71.43%	34.31	0.0429	0.0156	36.40%
1—53	0.65	0.45	0.20	69.23%	62.91	0.2746	0.0911	33.20%
1—54	0.25	0.20	0.05	80.00%	23.28	0.0156	0.0080	51.20%
1—55	0.45	0.35	0.10	77.78%	10.47	0.0911	0.0429	47.10%
1—56	0.40	0.30	0.10	75.00%	57.72	0.0640	0.0270	42.20%
1—57	0.40	0.30	0.10	75.00%	75.37	0.0640	0.0270	42.20%
1—58	0.40	0.25	0.15	62.50%	53.38	0.0640	0.0156	24.40%
1—59	0.40	0.25	0.15	62.50%	53.38	0.0640	0.0156	24.40%
1—60	0.35	0.25	0.10	71.43%	18.94	0.0429	0.0156	36.40%
1—61	0.50	0.40	0.10	80.00%	28.06	0.1250	0.0640	51.20%
1—62	0.60	0.40	0.20	66.67%	16.75	0.2160	0.0640	29.60%
1—63	0.65	0.40	0.25	61.54%	59.63	0.2746	0.0640	23.30%
1—64	0.65	0.45	0.20	69.23%	57.65	0.2746	0.0911	33.20%
1—65	0.45	0.35	0.10	77.78%	12.07	0.0911	0.0429	47.10%
1—66	0.40	0.30	0.10	75.00%	27.55	0.0640	0.0270	42.20%
1—67	1.05	0.75	0.30	71.43%	221.00	1.1576	0.4219	36.40%

(註)：R：反泡泡的外半徑 r：反泡泡的內半徑 R-r：空氣膜厚度
 以上刪除不完整的數據點，包括來不及測量內外半徑或時間任一情形。

(二) 以體積百分濃度 1.5% 的洗碗精製造反泡泡所測量的物理性質數據如下：

編號	外半徑 R(cm)	內半徑 r(cm)	空氣殼厚 度 R-r	內外半徑 比值 r/R	存活時間 T(秒)	總體積 R*R*R	內體積 r*r*r	內外體積比 r*r*r/R*R*R
2—1	0.65	0.45	0.20	69.23%	27.87	0.2746	0.0911	33.18%
2—2	0.65	0.45	0.20	69.23%	112.68	0.2746	0.0911	33.18%
2—3	0.70	0.50	0.20	71.43%	25.50	0.3430	0.1250	36.44%
2—4	0.45	0.38	0.07	84.44%	48.30	0.0911	0.0549	60.22%
2—5	N	N	N	N	N	N	N	N
2—6	0.30	0.23	0.07	76.67%	31.28	0.0270	0.0122	45.06%
2—7	0.60	0.42	0.18	70.00%	13.31	0.2160	0.0741	34.30%
2—8	N	N	N	N	N	N	N	N
2—9	0.58	0.48	0.10	82.76%	23.75	0.1951	0.1106	56.68%
2—10	N	N	N	N	N	N	N	N
2—11	0.50	0.41	0.09	82.00%	57.22	0.1250	0.0689	55.14%
2—12	0.65	0.47	0.18	72.31%	8.69	0.2746	0.1038	37.81%
2—13	0.50	0.25	0.25	50.00%	22.68	0.1250	0.0156	12.50%
2—14	0.45	0.38	0.07	84.44%	25.69	0.0911	0.0549	60.22%
2—15	0.60	0.43	0.17	71.67%	19.88	0.2160	0.0795	36.81%
2—16	0.45	0.35	0.10	77.78%	12.82	0.0911	0.0429	47.05%
2—17	0.45	0.35	0.10	77.78%	65.88	0.0911	0.0429	47.05%
2—18	0.45	0.34	0.11	75.56%	38.34	0.0911	0.0393	43.13%
2—19	N	N	N	N	N	N	N	N
2—20	N	N	N	N	N	N	N	N
2—21	0.45	0.35	0.10	77.78%	30.41	0.0911	0.0429	47.05%
2—22	0.57	0.41	0.16	71.93%	114.40	0.1852	0.0689	37.22%
2—23	0.40	0.30	0.10	75.00%	35.13	0.0640	0.0270	42.19%
2—24	0.50	0.40	0.10	80.00%	36.91	0.1250	0.0640	51.20%
2—25	0.50	0.40	0.10	80.00%	21.61	0.1250	0.0640	51.20%
2—26	0.60	0.42	0.18	70.00%	102.00	0.2160	0.0741	34.30%
2—27	N	N	N	N	N	N	N	N
2—28	0.46	0.36	0.10	78.26%	21.10	0.0973	0.0467	47.93%
2—29	0.55	0.38	0.17	68.81%	64.16	0.1619	0.0527	32.58%
2—30	0.46	0.36	0.10	78.26%	67.94	0.0973	0.0467	47.93%

(註)：R：反泡泡的外半徑 r：反泡泡的內半徑 R-r：空氣膜厚度

以上刪除不完整的數據點，包括來不及測量內外半徑或時間任一情形。

(三) 以體積百分濃度 0.5% 的洗碗精製造反泡泡所測量的物理性質數據如下：

編號	外半徑 R(cm)	內半徑 r(cm)	空氣殼 厚度 R-r	內外半徑 比值 r/R	存活時間 T(秒)	總體積 R*R*R	內體積 r*r*r	內外體積比 r*r*r/R*R*R
3—1	N	N	N	N	N	N	N	N
3—2	N	N	N	N	N	N	N	N
3—3	N	N	N	N	N	N	N	N
3—4	N	N	N	N	N	N	N	N
3—5	0.65	0.45	0.20	69.23%	25.29	0.2746	0.0911	33.18%
3—6	N	N	N	N	N	N	N	N
3—7	0.40	0.34	0.06	85.00%	28.04	0.0640	0.0393	61.41%
3—8	0.80	0.65	0.15	81.25%	120.34	0.5120	0.2746	53.64%
3—9	N	N	N	N	N	N	N	N
3—10	0.45	0.35	0.10	77.78%	52.25	0.0911	0.0429	47.05%
3—11	0.60	0.47	0.13	78.33%	18.59	0.2160	0.1038	48.07%
3—12	0.83	0.60	0.23	72.29%	148.16	0.5718	0.2160	37.78%
3—13	0.17	0.15	0.02	88.24%	44.09	0.0049	0.0034	68.70%
3—14	0.61	0.41	0.20	67.21%	61.98	0.2270	0.0689	30.36%
3—15	0.63	0.41	0.22	65.60%	22.68	0.2441	0.0689	28.23%
3—16	0.30	0.21	0.10	68.33%	29.87	0.0270	0.0086	31.91%
3—17	N	N	N	N	N	N	N	N
3—18	0.45	0.35	0.10	77.78%	9.53	0.0911	0.0429	47.05%
3—19	N	N	N	N	N	N	N	N
3—20	0.24	0.16	0.08	66.67%	18.37	0.0138	0.0041	29.63%
3—21	0.53	0.36	0.17	68.57%	34.56	0.1447	0.0467	32.24%
3—22	N	N	N	N	N	N	N	N
3—23	0.45	0.34	0.12	74.44%	38.19	0.0911	0.0376	41.26%
3—24	0.60	0.43	0.17	71.67%	25.15	0.2160	0.0795	36.81%
3—25	0.51	0.40	0.11	79.21%	29.68	0.1288	0.0640	49.69%
3—26	0.65	0.46	0.19	70.77%	75.63	0.2746	0.0973	35.44%
3—27	N	N	N	N	N	N	N	N
3—28	0.45	0.34	0.11	75.56%	43.52	0.0911	0.0393	43.13%
3—29	N	N	N	N	N	N	N	N
3—30	0.41	0.31	0.10	75.61%	69.60	0.0689	0.0298	43.22%

(註)：R：反泡泡的外半徑 r：反泡泡的內半徑 R-r：空氣膜厚度
以上刪除不完整的數據點，包括來不及測量內外半徑或時間任一情形。

柒、討論

一、探討與反泡泡有關的物理性質：

(一) 反泡泡的大小、空氣殼的厚度以及存活時間之間的相關性：

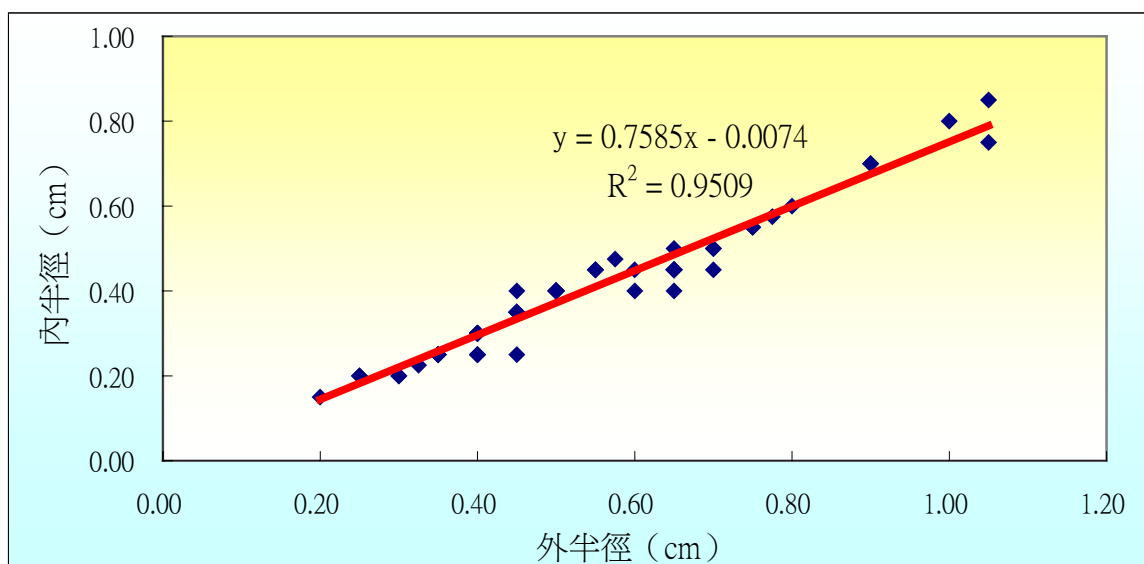
我們希望藉由以上數據探討反泡泡的大小、空氣殼的厚度以及存活時間之間的相關性，並希望藉由現象上的相關找到可以彼此加以預測之物理量值。這裡使用 Excel 中的相關係數功能計算，來得到相關係數。採用 2.5% 的溶液中的 67 顆反泡泡做為樣本。

我們希望探討的物理性質關連如下：

編號	相關之物理量	代號	相關係數
1	外半徑和內半徑的關係	$R-r$	0.978
2	空氣膜厚度和外半徑的關係	$R-r-R$	0.065
3	體積和空氣膜厚度的關係	$V-(R-r)$	0.736
4	內部液體所佔全部的體積和外半徑的關係	r^3-r^3/R^3-R-R	0.053
5	外半徑和時間的關係	$R-T$	0.339
6	空氣膜厚度和時間的關係	$(R-r)-T$	0.340
7	內、外半徑比和時間的關係	$r/R-T$	-0.062
8	體積和時間的關係	$V-T$	0.429
9	內部液體體積和時間的關係	r^3-r^3-T	0.375

分析：

1. 在實驗數據的分析之中，編號 7「內、外半徑比和時間的關係」，編號 6「空氣膜厚度和外半徑的關係」，編號 4「內部液體所佔全部的體積和外半徑的關係」，的相關值都接近 0，表示這三組的變項之間是不具相關性的。
2. 在反泡泡的存活時間上，我們比較了編號 5「外半徑和時間的關係」，編號 6「空氣膜厚度和時間的關係」，編號 7「內、外半徑比和時間的關係」，編號 8「體積和時間的關係」，編號 9「內部液體體積和時間的關係」，其中以編號「體積和時間的關係」的相關係數值最大達 0.429，顯示中度相關。
3. 在這些關連之中，以第 1 項「外半徑和內半徑的關係」的關係最大，係數達 0.978。表示，在反泡泡的結構上，外半徑越大，其內半徑也越大；反之亦然。作圖結果如下：



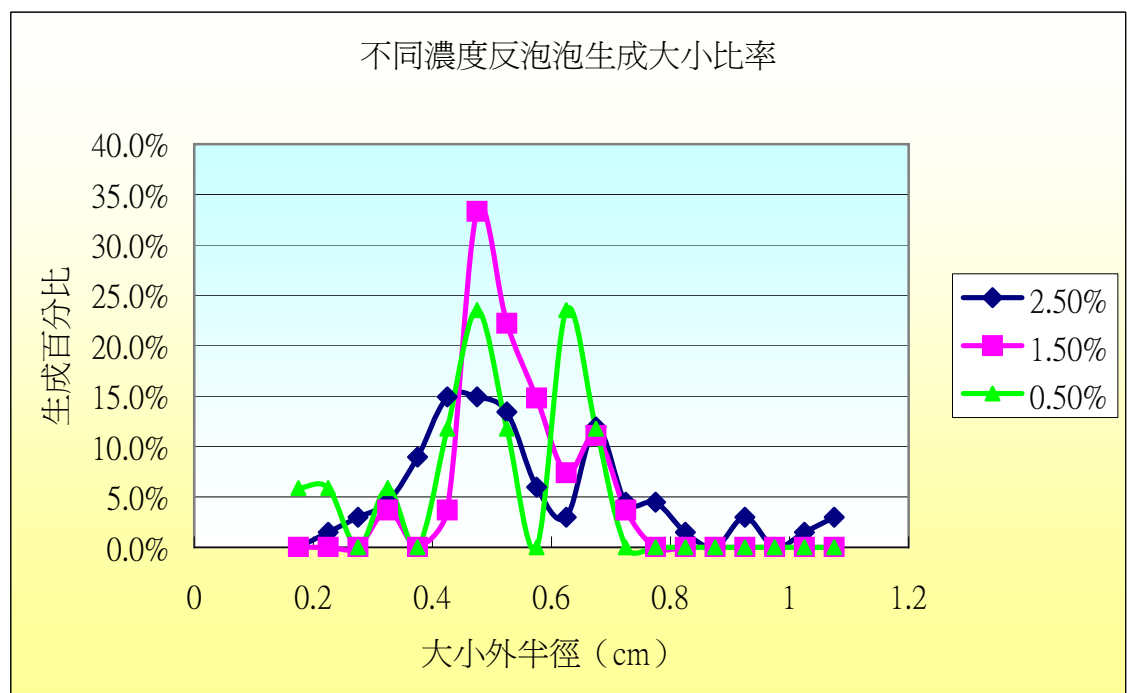
由圖表可知，外半徑與內半徑迴歸趨勢線的斜率大小為 0.7585，表示內半徑大約都為外半徑的 0.7585 倍，約為 3/4。這與（表一）中的內外半徑比的平均值 0.74 也十分接近。所以我們研究結果為，反泡泡的內外半徑比約為 3/4。

（二）反泡泡的大小與倒入液體濃度的關係：

對於反泡泡的大小，我們以不同倒入液體濃度來做為操作變因，討論生成反泡泡的大小，結果如下表：

反泡泡大小 (cm)	倒入洗碗精濃度 2.5%		倒入洗碗精濃度 1.5%		倒入洗碗精濃度 0.5%	
	數量	生成數量百分比	數量	生成數量百分比	數量	生成數量百分比
0.15~0.20	0	0.00%	0	0.00%	1	5.88%
0.20~0.25	1	1.49%	0	0.00%	1	5.88%
0.25~0.30	2	2.99%	0	0.00%	0	0.00%
0.30~0.35	3	4.48%	1	3.70%	1	5.88%
0.35~0.40	6	8.96%	0	0.00%	0	0.00%
0.40~0.45	10	14.93%	1	3.70%	2	11.76%
0.45~0.50	10	14.93%	9	33.33%	4	23.53%
0.50~0.55	9	13.43%	6	22.22%	2	11.76%
0.55~0.60	4	5.97%	4	14.81%	0	0.00%
0.60~0.65	2	2.99%	2	7.41%	4	23.53%
0.65~0.70	8	11.94%	3	11.11%	2	11.76%
0.70~0.75	3	4.48%	1	3.70%	0	0.00%

0.75~0.80	3	4.48%	0	0.00%	0	0.00%
0.80~0.85	1	1.49%	0	0.00%	0	0.00%
0.85~0.90	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
0.90~0.95	2	2.99%	0	0.00%	0	0.00%
0.95~1.00	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
1.00~1.05	1	1.49%	0	0.00%	0	0.00%
1.05~1.10	2	2.99%	0	0.00%	0	0.00%
平均	0.53 cm		0.52 cm		0.51 cm	



1. 圖表可知，在不同倒入液體濃度的操作變因之下，生成反泡泡半徑的大小大約均介於 0.35cm 至 0.6cm，不同濃度所產生的反泡泡大小並無明顯之差異。
2. 由平均值來看，2.5%，1.5%，0.5%三種不同濃度洗碗精所生成之反泡泡大小平均分別為：0.53 cm，0.52 cm，0.51 cm，也均相當接近。故我們認為，在以洗碗精為「倒入液體」以清水為「承接液體」，濃度在 2.5%之內的反泡泡大小，與倒入液體濃度並無關係。
3. 由個別數據來看，2.5%的大小分佈較為廣泛，由 0.35 公分到 1.05 公分均有出現；而濃度 1.5%的大小分佈則較為集中，聚集在 0.30 公分到 0.70 公分之間；而濃度 0.5%的大小分佈與 1.5%的分佈類似，但出現較多的小型（半徑小於 0.2 公分）反泡泡。

二、反泡泡的生成的相關討論：

（一）初步的實驗：

由於我們剛開始對反泡泡的生成原因及產生的方式均不瞭解，我們就進行各種的嘗試。最主要的是改變「倒入液體」與「承接液體」的物理性質。

1. 以鹽水做為「倒入液體」，清水做為「承接液體」：雖兩液體可互溶，但我們實驗發現，這樣的組合完全無法產生反泡泡。
2. 我們討論後認為，是否黏滯力有關，所以將「倒入液體」改成甘油，清水做為「承接液體」：結果發現，這也完全無法產生反泡泡。
3. 我們在想，是否與表面的表面張力有關，所以，我們使用了洗碗精當作「倒入液體」，清水做為「承接液體」：在這種情形下，我們開始成功產生了反泡泡。而為何可以用洗碗精做為反泡泡的形成原料？又洗碗精的濃度是如何影響反泡泡的形成與物理性質？將是我們下一階段的實驗重點。

（二）定量探討界面活性劑對反泡泡生成的影響：

上一階段我們意外的發現洗碗精這樣具界面活性劑特性的物質能產生反泡泡。這引起我們對於界面活性劑的濃度對反泡泡生成會造成什麼樣的影響？對於這個問題，我們設計了三種不同濃度的洗碗精，其濃度分別為：2.5%，1.5%，0.5%，分別計算在相同的操作之下，三種不同濃度的反泡泡生成成功比率有何不同。

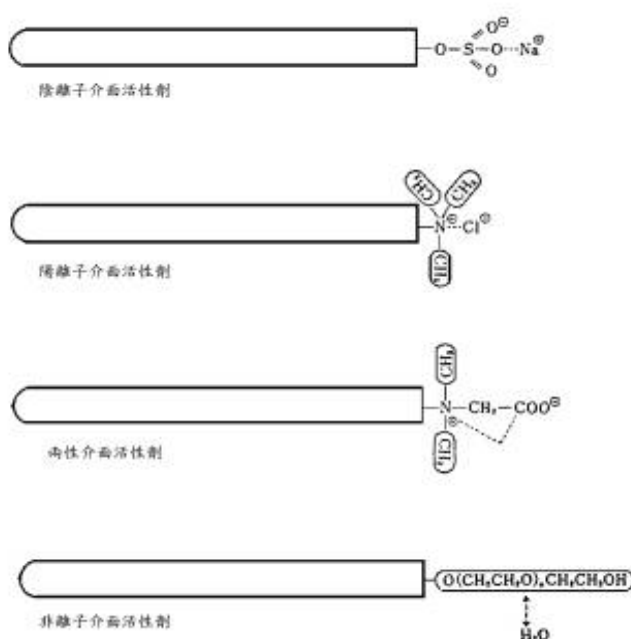
經過實驗（如第六章實驗結果）及計算，結果整理如下表：

體積百分濃度	2.5%	1.5%	0.5%
平均時間（秒）	40.65	42.81	47.13
平均外半徑（cm）	0.53	0.52	0.51
平均內半徑（cm）	0.39	0.39	0.38
平均空氣膜厚度（cm）	0.14	0.13	0.13
成功率	100%	80.0%	56.7%

實驗及統計的結果我們發現，在 2.5%，1.5%，0.5%，的比較上，濃度越稀薄，反泡泡的成功越低，顯示洗碗精這樣具界面活性劑特性的物質濃度確實會對反泡泡的生成有所影響。

(三) 探討界面活性劑與油的交互作用：

由於上述討論，我們發現界面活性劑的特性及其濃度對反泡泡的生成有所影響。而界面活性劑之基本構造為一分子中有親水性（hydrophilic part）部份與親脂性（lipophilic part）部份共存之化合物（如圖）。所以我們猜想，若我們將「承接液體」更換成油類物質（我們使用沙拉油），則因為洗碗精的親水端與「倒入液體」結合，親脂端與「承接液體」的沙拉油結合，應該不會形成反泡泡。



實驗的結果，我們發現，用同樣的方式製作以沙拉油做為「承接液體」，真的不會形成反泡泡。

所以我們推測，反泡泡形成是由於「倒入液體」的界面活性劑的特性，在倒入水面的瞬間，無法立刻的與水分子結合，而將空氣擠入水中，而形成包著界面活性劑溶液的空氣膜的反泡泡。

(四) 進一步的實驗：

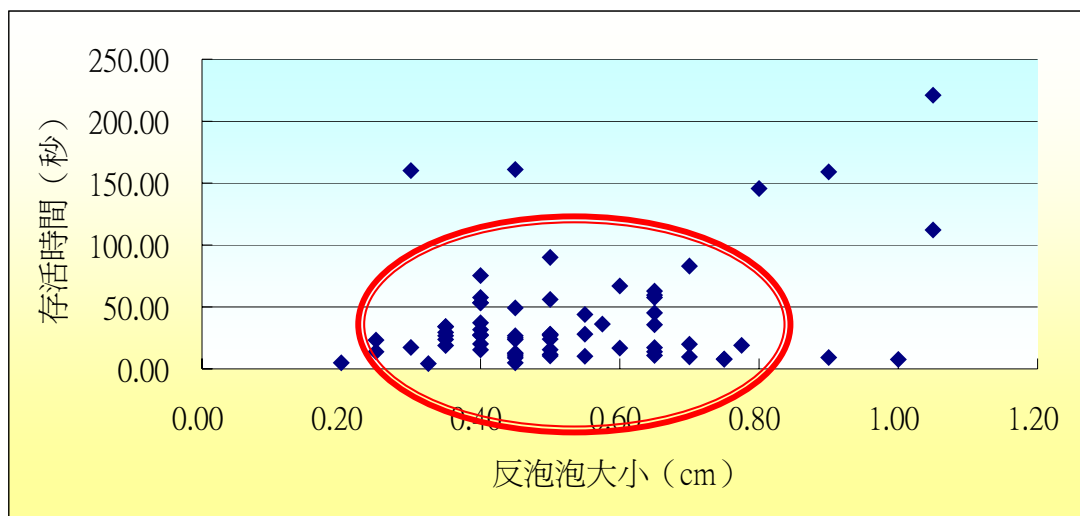
為了證明上述我們對於反泡泡生成條件的假設，我們設計了進一步的實驗。我們將其他界面活性劑：肥皂（含 14 個碳氫鍊脂肪酸的鈉鹽）、洗髮精泡成溶液進行反泡泡製作實驗。

結果發現，這樣的界面活性劑也都能形成反泡泡，所以實驗的結果支持了我們的假設。

三、反泡泡破滅的相關討論：

(一) 反泡泡的存活時間：

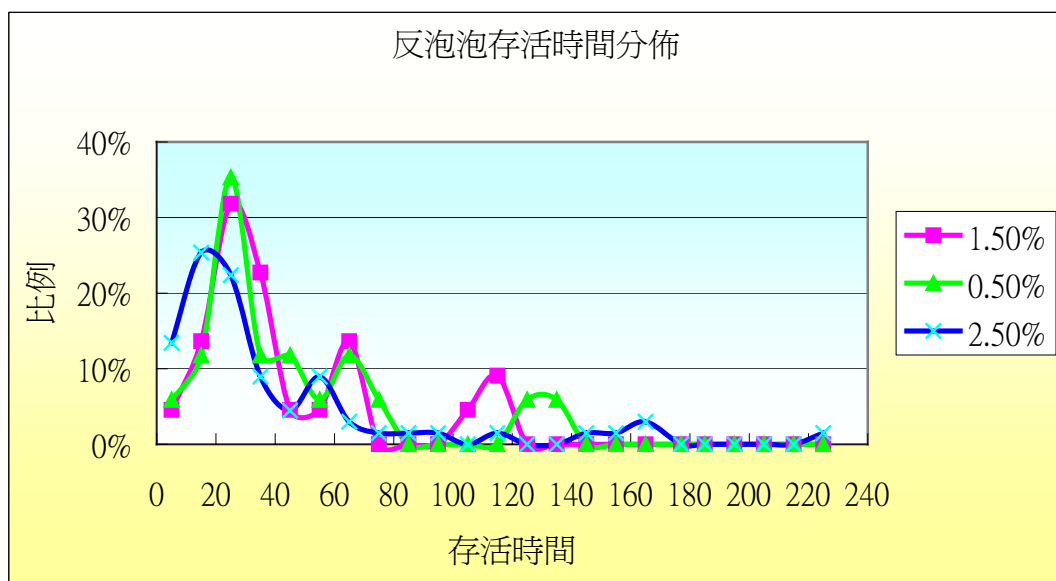
以濃度 2.5% 來討論反泡泡的存活時間與大小的關係圖如下：



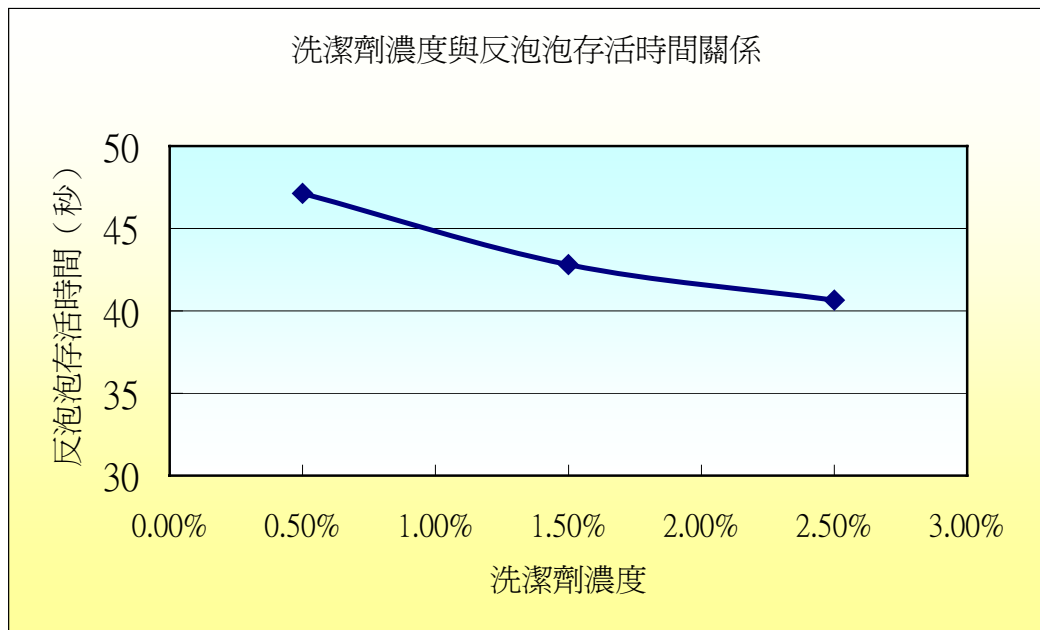
1. 由分佈圖可以看出，生成的反泡泡存活時間大多在 70 秒之內，僅有極少數（1 個）超過 200 秒，少數（6 個）超過 100 秒。
2. 經過計算，以濃度 2.5% 所產生之反泡泡的存活時間平均值為：40.65 秒。
3. 經電腦計算反泡泡的大小與存活時間的相關係數為 0.3390，為一低度正相關的情形。

(二) 反泡泡的存活時間與濃度之關連：

將三種濃度洗潔劑所生成之反泡泡的存活時間做關係圖如下：



1. 由關係圖看出，在濃度 2.5% 時，存活時間較為偏短，而濃度 1.5% 與濃度 0.5% 的情形則較為類似，其存活時間看起來較長。
2. 將濃度與平均存活時間製圖做比較如下圖：



由關係圖看出，在 2.5% 至 0.5% 範圍中，洗潔劑濃度較低時，反泡泡平均存活時間較長；反之，洗潔劑濃度較高時，反泡泡平均存活時間較短。雖然洗潔劑濃度與生成反泡泡存活時間呈現負向關係。

3. 依上圖討論，我們似乎可以推測濃度越高，越不利於反泡泡的存活，而我們實驗只做到 2.5%，未來我們可以進一步對於這一點進行討論。


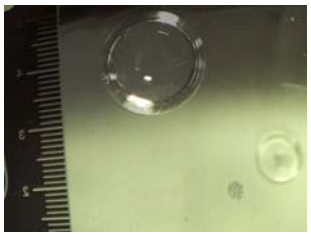




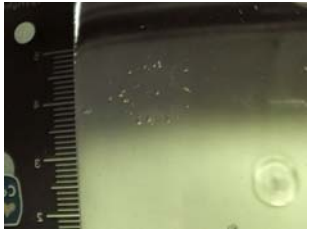

(三) 反泡泡破滅的現象觀察：

1. 觀察反泡泡破滅的原因有：

- (1) 有些反泡泡是撞到容器壁，一碰即破。但碰到容器壁並不一定會破掉，也有少部份的反泡泡是碰到後反彈沒有破掉。
- (2) 而不是因為碰撞器壁而破滅的稱之為「自行破滅」。自行破滅的過程經我們觀察 105 顆的反泡泡後，可以歸納出兩大種類型。其一為：「集中破滅」另一為「震盪破滅」。我們將於下一點透過電腦畫面擷取說明這兩者之不同。

2. 「集中破滅」的現象說明：

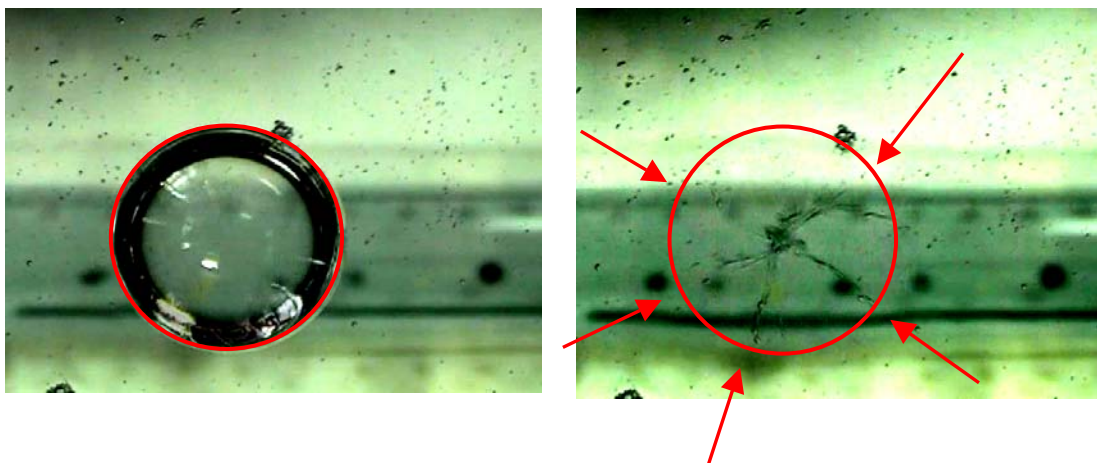
將這種現象以數為攝影機拍攝，轉成圖片檔加以呈現。以下每一張的間隔時間為 1/30 秒：

			
完整平衡反泡泡	破滅瞬間之前 全反射消失	開始破滅，由圓周之所 有空氣膜同時破滅	空氣膜中的氣泡同時 向圓心集中相互碰撞
			
碰撞後之氣泡 向外移動	碰撞後之氣泡 持續向外移動	碰撞後之氣泡 持續向外移動	碰撞後之氣泡 持續向外移動
			
已經可以看出氣泡是 以圓形的軌跡移動	看出氣泡是以圓形的 軌跡持續移動	看出氣泡是以圓形的 軌跡持續移動	經計算經過 9 個畫面 數，計算出氣泡速度約 為 2.67cm/sec

說明：

在此系列圖片，我們可以看到：

- (1) 「集中破滅」時，我們可以看到在破滅瞬間前，空氣膜的全反射消失，呈現模糊之現象。
- (2) 在破滅瞬間，可以看到周圍空氣膜中的空氣變成小泡泡，向圓心集中。電腦軟體擷取為 1/30 秒一張，但在分析時，經過一個畫面數，氣泡已經出現在圓心了，顯示氣泡運動在 1/30 秒之內已經完成將近 1 公分（半徑）的位移。經過計算求出破滅後小氣泡的運動速率至少超過 30 公分/秒。
- (3) 由另一張畫面捕捉到反泡泡破滅瞬間氣泡的運動路徑可以看到，破滅速度依然在一個 1/30 秒內完成，但氣泡以由 5 條外圍的空氣氣泡群向圓心前進（如下右圖）












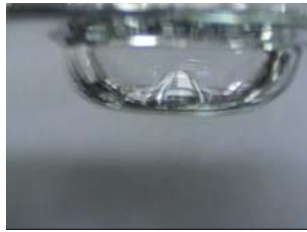

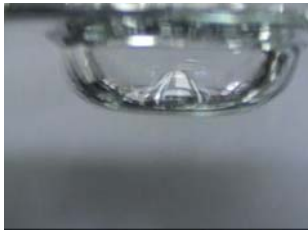

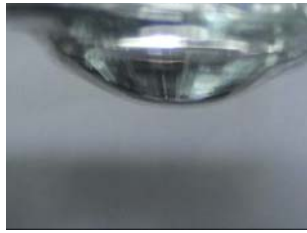
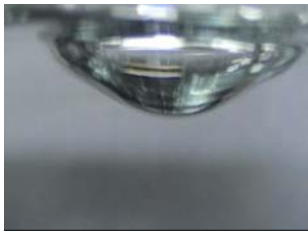
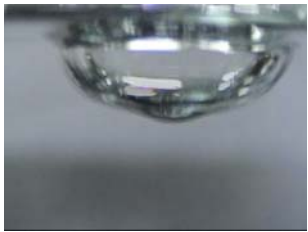

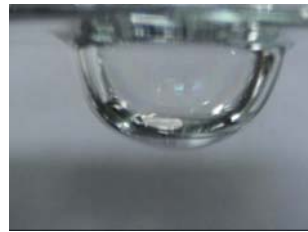
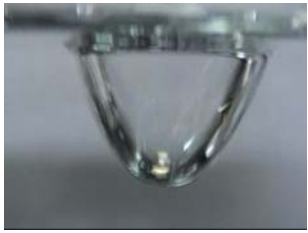
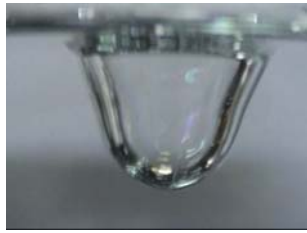




(4) 在經過往圓心的相向碰撞後，氣泡開始向外運動擴散，經觀察其擴散路徑為圓形擴散。且經過 9 個畫面數，計算出氣泡速度約為 2.67cm/sec。這個速度與破滅瞬間氣泡運動速度慢了約 11.2 倍，顯現破滅瞬間氣泡所受之力量相當大。我們推測此力量是外部液體之表面張力所提供。

3. 「震盪破滅」的現象說明：

此類反泡泡之破滅行為並不常見，與大部分之反泡泡有所不同，其在破掉時會有來回的幾次震盪，這是集中破滅反泡泡所沒有的有趣現象。

將這種現象以數為攝影機拍攝，轉成圖片檔加以呈現。以下每一張的間隔時間為 1/15 秒：

			
完整平衡反泡泡	破滅前	開始破滅，由頂部空氣膜開始破滅	頂部空氣膜與外界空氣接觸
			
球形反泡泡變為圓柱形，底部仍呈半球形	圓柱下方逐漸收縮回球形	圓柱下方逐漸收縮回球形	圓柱下方逐漸收縮回球形

			
下方空氣膜 收縮成一小氣泡 連接於反泡泡下方	下方空氣膜完整收縮 成一小橢圓形氣泡	下方橢圓形氣泡 第一次反向震盪 回反泡泡內	持續震盪入球體
			
震盪逐漸回復	震盪逐漸回復	震盪逐漸震盪出球體	震盪逐漸震盪出球體
			
震盪逐漸震盪出球體	震盪逐漸震盪出球體	震盪逐漸震盪出球體	回復接近半球體 完成第一次來回震盪
			
第二次開始 出現向下震盪	持續向下震盪形變	持續向下震盪形變	到達向下震盪 最大振幅
			
逐漸回復半球體 但此次並未出現下方 橢圓形小氣泡	逐漸回復半球體	逐漸回復半球體	開始向上震盪

			
第二次反向震盪 回反泡泡內	持續第二次反向震盪	持續第二次反向震盪	震盪逐漸回復
			
震盪逐漸回復	回復接近半球體 完成第二次來回震盪	第三次向外震盪開始	第三次向外震盪
			
第三次向外震盪	第三次向外震盪	第三次向外震盪回復	空氣膜與液體之間 呈現不明顯界線
			
破滅瞬間，此時液體中 留有少許空氣小氣泡	液體表面 仍有些許震盪現象	完全破滅 總歷時約 1.46 秒	

說明：

在此系列圖片，我們可以看到：

- (1) 「震盪破滅」過程（約 1.46 秒）較「集中破滅」（1/30 秒）來得更久，且有 2 至 3 次的來回震盪。
- (2) 第一次的震盪，反泡泡底部出現一小橢圓形氣泡，並震盪入球體。第二次震盪即無此現象發生。
- (3) 第一次的震盪歷經 18 張圖片，即為 $\frac{18}{30} = 0.6$ 秒；而第二次的震盪歷經 14

張圖片，即為 $\frac{14}{30} = 0.47$ 秒，顯示兩次的震盪歷時並不相同。

- (4) 在第一次破滅時，頂部與空氣接觸，整個反泡泡在 0.2 秒之內即以成為半球體，至此之後亦再無法回復成一完整球體。
- (5) 在最後反泡泡真正破滅時的瞬間，其空氣膜呈現模糊之現象，顯示此時無法發生全反射之現象。此現象應該才是判斷反泡泡破滅之依據。
- (6) 「震盪破滅」發生的地方均在當反泡泡漂浮於液體表面時，發生的次數僅有 2 次，較「集中破滅」發生的頻率少得多（103 次）。

捌、結論

經過以上的實驗及討論，我們對反泡泡的實驗研究結論如下：

一、與反泡泡有關的物理性質：

- (一) 在反泡泡的結構上，外半徑越大，其內半徑也越大。而且反泡泡的內外半徑比約為 $3/4$ 。
- (二) 以在存活時間方面以體積大小的相關係數值最大達 0.429。
- (三) 「內、外半徑比和時間的關係」，「空氣膜厚度和外半徑的關係」，「內部液體所佔全部的體積和外半徑的關係」的相關值都接近 0，表示這三組的變項之間是不具相關性的。

二、反泡泡的生成的相關討論：

- (一) 以洗碗精做「倒入液體」，清水做為「承接液體」來產生反泡泡的成效最佳。
- (二) 在 2.5%，1.5%，0.5%，的比較上，濃度越稀薄，反泡泡的成功越低，顯示洗碗精這樣具界面活性劑特性的物質濃度確實會對反泡泡的生成有所影響。
- (三) 我們推測，反泡泡形成是由於「倒入液體」的界面活性劑的特性，在倒入水面的瞬間，無法立刻的與水分子結合，而將空氣擠入水中，而形成包著界面活性劑溶液的空氣膜的反泡泡。

三、反泡泡破滅的相關討論：

- (一) 生成的反泡泡存活時間大多在 70 秒之內。僅有極少數超過 200 秒，少數超過 100 秒。經過計算，以濃度 2.5% 所產生之反泡泡的存活時間平均值為：40.65 秒。
- (二) 在 2.5% 至 0.5% 範圍中，洗潔劑濃度較低時，反泡泡平均存活時間較長；反之，洗潔劑濃度較高時，反泡泡平均存活時間較短。雖然洗潔劑濃度與生成反泡泡存活時間呈現負向關係。
- (三) 反泡泡破滅可以歸納出兩大種類型：其一為：「集中破滅」；另一為「震盪破滅」。「震盪破滅」情形較為特殊少見，其破滅過程較一般反泡泡來得更久，且有 2 至 3 次的來回震盪。
- (四) 在「集中破滅」瞬間，可以看到周圍空氣膜中的空氣變成小泡泡，向圓心集中。破滅後小氣泡的運動速率至少超過 30 公分/秒。

玖、未來展望與建議

一、研究設計之建議：

- (一) 這次研究中，我們發覺在量測反泡泡大小時，必須將尺接近反泡泡，如此就會有水流的擾動。雖然我們已經盡量的減少水流的影響，但是否會因此影響反泡泡的存活時間則是必須思考的。所以未來我們希望進一步的以上升速率及液體密度反推反泡泡的大小，以減少因水流所造成的影響。理論推導如下：

理論推導：

可經相片量得 R 與 r 的相對大小，及其比值（我們研究大約為 $R : r = 4:3$ ）
若反泡泡在影片上為向上之加速度運動，則

$$\text{所受浮力 } B = \frac{4}{3} \pi R^3 * \rho_{\text{水}} * g$$

$$\text{所受重力 } W = \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3) * \rho_{\text{液}} * g$$

故所受合力 $F = m * a$

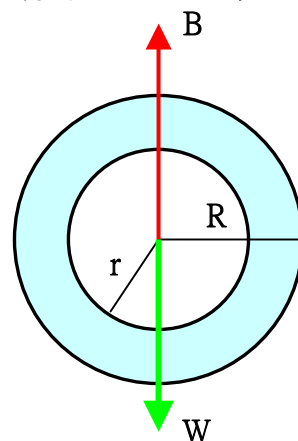
$$F = B - W = \frac{4}{3} \pi R^3 * \rho_{\text{水}} * g - \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3) * \rho_{\text{液}} * g$$

以影片分析其加速度大小 a ，代入以下式子：

$$\left[\frac{4}{3} \pi R^3 * \rho_{\text{水}} * g - \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3) * \rho_{\text{液}} * g \right] = \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3) * \rho_{\text{液}} * a$$

即可由 R 與 r 的相對大小比值，加速度大小 a ，水的密度 $\rho_{\text{水}}$ ，液體密度 $\rho_{\text{液}}$

以上述的已知值，即可求得反泡泡的真正外半徑 R 及內半徑 r 。



- (二) 本次的研究在濃度的變因，取樣上稍嫌不足（均各取三組），也許會在關鍵的濃度上有所錯失或遺漏的重要的反曲點。針對這點，我們建議後續的研究可再在取樣上取更多濃度樣本，以得到一連續無間斷的數值。

二、研究問題的展望：

- (一) 針對濃度的探討：我們在討論中認為，濃度與產生反泡泡的成功率以及存活時間有關，但因為本次研究的目的是在於初步探討出影響反泡泡的成因，故僅使用三種濃度，若欲進一步瞭解濃度所造成的影響，將是我們在研究完這個題目後進一步想探討的問題。

- (二) 針對反泡泡密度與上升速率的探討：我們知道，物體在流體中所受浮力與其體積有關，所以如果我們能用攝影機量測計算出反泡泡的上升（下降）速率，將可回推出反泡泡之（體積）外半徑，再藉由已知內部液體的密度，可求出其內半徑。再經過外半徑與內半徑相減就可求出空氣膜的半徑（或體積）。藉由這種方式與我們的比例方法做比對，進一步的瞭解反泡泡空氣膜的厚度性質。
- (三) 在研究中，我們想過是否有一特別容易成功製造反泡泡的方法？什麼樣的噴口口徑？入射角度？入射速度？液體密度？等變因。雖然後來我們已經可以很熟練的製造出反泡泡，但我們更希望已有系統性的實驗來找到這一最佳條件。

拾、參考資料

1. 葉偉文譯（2000）：物理馬戲團 2。天下文化出版社。
2. 網頁資料：<http://www.antibubble.org/>
3. 網頁資料：<http://physics.about.com/cs/bubbles/a/antibubbles.htm>

評	語
---	---

040118 泡泡造反了-反泡泡之形成、存活與破滅之物理特性探討

本件作品以洗潔精溶液注入清水中製作反泡泡，並量測反泡泡大小等物性量。作品內容著重於反泡泡幾何組態的規類，從定性討論，較欠缺定量與物理特性的探討。作品應可再從反泡泡間的交互影響作深入研究，而不僅局限於單一反泡泡幾何性質的探討。