

第十三屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA13-025

作品名稱：微粒測量儀設計之探討

姓名：林欣儀

關鍵字：泡膜、形變、表面張力

摘要

我們在玩泡膜的過程，發現泡膜會使具有彈性的塑膠光纖線彎曲變形。因此，如何測量泡膜在形變過程，張力的變化情形，甚至是否可以藉由泡膜測量溶液的**表面張力**，是本次實驗的目的。研究結果顯示：

1. 脫離水面的獨立泡膜，面積越大張力就越大，但將**獨立泡膜擴張達一定面積(10 cm *10cm)**以後，張力大小約略維持在一定值(0.027gw/cm)且接近**肥皂水的理論值(0.020gw/cm)**。證明：以測量「獨立泡膜形變張力」或是「測量水面對泡膜的拉力」來計算溶液的**表面張力**，是可行的簡便測量法。

2. 我們發現**水面對於泡膜拉力的大小與泡膜對於支撐框架的鉛垂接觸點的寬度有關**，所以利用「**水面拉力法**」，可排除泡膜本身重量所造成的誤差，方便精確計算溶液的**表面張力**。

3. **由水面泡膜高度必須超過 7 cm，表面張力會變大而使測量更準確**，推測應是泡膜高度**超過毛細現象的高度上限(賴怡安等，2002)**，水無法自由補充，使泡膜變薄，**表面張力因而變大**。因此，**應可藉由泡膜張力計算毛細現象之上限高度**。

4. **泡膜之張力可以微量天平或光纖線入射光吸收率的簡易測量，方便進行表面張力的計算**。

本次研究成果包括：

1. 藉由界面活性劑幫助形成水溶液的泡膜，方便發展液體表面張力之簡易測量方法，提供更簡易之測量方式（包括：**砝碼法、微量天平法及光纖透射率法**）。

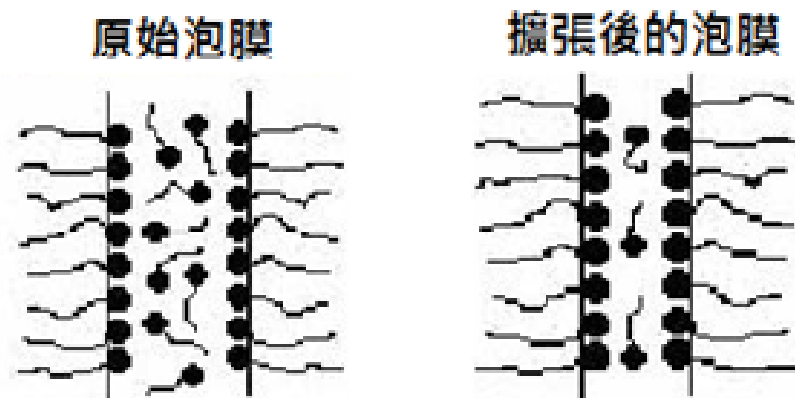
2. 運用本研究之簡易張力測量方式，藉以測量溶液濃度或是觀測不同泡膜之間張力之合成模式，提供未來各式薄膜塑形技術之改良。

壹、前言

由於在製作泡膜的過程，無意間發現泡膜竟然將棉線向上拉成圓弧形，令人訝異的是泡膜好像具有彈性可以上下形變。因此，激起我們的好奇心，想了解：泡膜形變過程，力量的來源及分布情形。

根據資料我們知道：兩層肥皂分子夾少量的水溶液構成泡膜，肥皂分子成層狀排列，親水端向溶液，疏水端向外。因此肥皂能幫助保持膜維持較大的厚度。泡膜上的肥皂分子層可以減緩內部液體的蒸發，避免泡泡太快變薄。能形成泡膜最重要的原因，是肥皂分子和水分子之間的吸引力比水分子之間的吸引力小，所以肥皂水溶液的表面張力大約只有純水的三分之一。當泡膜表面受到擾動而擴張時，表面的肥皂分子間的距離加大，水補充進來，使局部泡膜的表面張力變大(更像純水的表面張力)。增大的表面張力會使局部表面內縮，幫助泡膜回復原來的形狀，有利於穩定泡膜，這個效應稱為「馬倫哥尼效應」(Marangoni effect)(傅宗政、陳正平，2001年)。

因此，我們想藉由肥皂泡膜的形變過程，測試造成泡膜形變力量的檢測方式及能否利用泡膜的形變測定出水的表面張力。我們規劃本次研究的成效包括：希望藉由界面活性劑幫助形成水溶液之泡膜，方便發展液體表面張力之簡易測量方法，提供更簡易之測量方式。運用本研究之簡易張力測量方式，藉以觀測不同泡膜之間張力之合成模式，預測泡膜形狀之合成模式，提供未來各式薄膜塑形技術之改良。



貳、研究目的

一、單一獨立泡膜形變力量的測量與溶液表面張力之計算

(**獨立泡膜形變法**)。

1. 單一獨立泡膜邊緣各點的形變張力分布情形。
2. 單一獨立泡膜不同面積對形變張力的影響。

二、利用泡膜接觸水面的接觸過程，測量拉力與溶液表面張力之計算

(**水面拉力法**)。

1. 水面泡膜的高度對水面拉力的影響。
2. 框架寬度對於水面泡膜拉力之影響。
3. 框架形狀對水面泡膜張力的影響。

三、利用塑膠光纖線的形變與透射率，測量泡膜形變張力與表面張力之計算(**光纖透射率法**)。

1. 塑膠光纖線中點形變力與光纖線透射率關係之測量。
2. 以光纖線透射率對於泡膜張力之測定。

參、研究設備及器材

洗碗精、漆包線、三樑天平、電子天平、砝碼、雨傘支架、油性黏土、 $\phi 0.75\text{mm}$ 塑膠光纖線、 $\phi 5\text{mm}$ 光電阻、三用電表、鐵架、量角器。

實驗照片



肆、研究過程、結果及討論

一、單一獨立泡膜邊緣各點形變張力的分布情形

觀察問題：棉線不下墜，反而向上出現彎曲。

假設 1：分子拉力→ 表面張力→ 面積大小

(棉線各點上方面積不同→各點拉力不同)

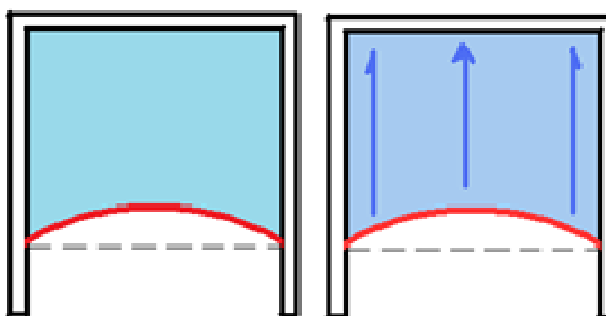
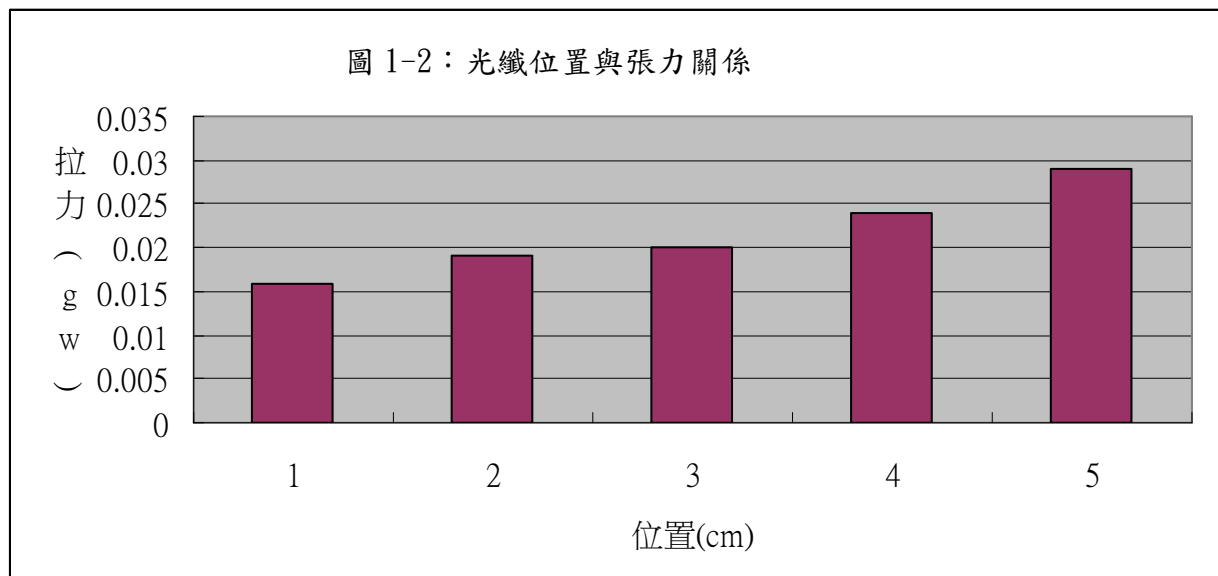


圖 1-1：張力的分布情形

實驗 1. 固定清潔劑溶液濃度(20%)及泡膜高度(10 cm)寬度(10 cm)，測量塑膠光纖線(φ0.75mm)各點(1~5 cm)各點的最大負重量，尋求代表該泡膜形變張力的測量點。結果：如表一、泡膜邊緣各點的形變張力。

表一：泡膜邊緣各點的形變張力

光纖線位置(cm)	1	2	3	4	5
拉力(gw)	0.32	0.38	0.4	0.48	0.58
表面張力(gw/cm)	0.016	0.019	0.02	0.024	0.029



討論：

- (一) 實驗發現：泡膜邊緣對於塑膠光纖線的拉力越靠近框架形變張力越小(距離 1cm 最小)，越靠近光纖中點泡膜張力越大。這是由於泡膜邊緣對於塑膠光纖線的拉力是泡膜張力與重力的合力。由於固定的光纖線具有張力，所以彎曲的光纖造成張力在鉛直方向產生大小不同的向下分力。**越靠近框架，向下的分力越大，於是泡膜對於塑膠光纖線的向上合力越小，所以越接近中央形變力越大。**
- (二) 實驗操作過程中發現：**塑膠光纖線的張力會影響光纖線的彎曲程度**，所以本實驗固定光纖的長度及固定點，以控制塑膠光纖線的最大張力。
- (三) 若將塑膠光纖線終點的最大拉力 0.58gw，當成泡膜對塑膠光纖線的拉力用來代入附錄的公式，計算泡膜的表面張力約為 0.029gw/cm，與理論值接近。可見**單一獨立泡膜的形變力量可用以計算溶液的表面張力**。

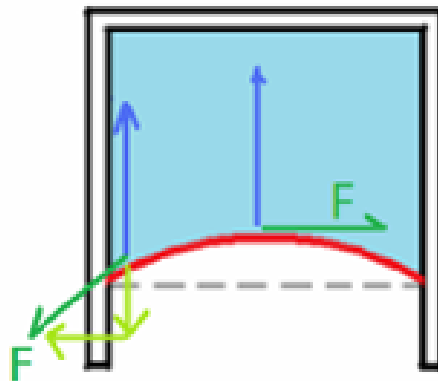


圖 1-3：泡膜邊緣各點拉力及分力之示意圖

二、單一獨立泡膜不同面積對形變張力的影響：

實驗：固定清潔劑溶液濃度(20%)及框架寬度(10 cm)，擴張或縮小泡膜面積(由高度 2 cm 逐步拉大至 10 cm，及由高度 10 cm 逐步縮至 2 cm)，測量不同泡膜高度光纖線中點最大負重量代表該泡膜的形變張力。

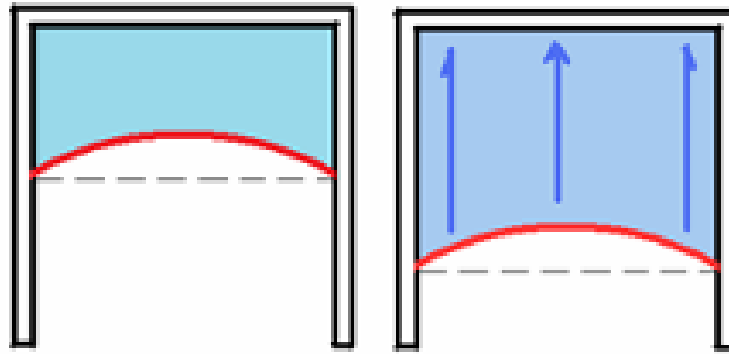


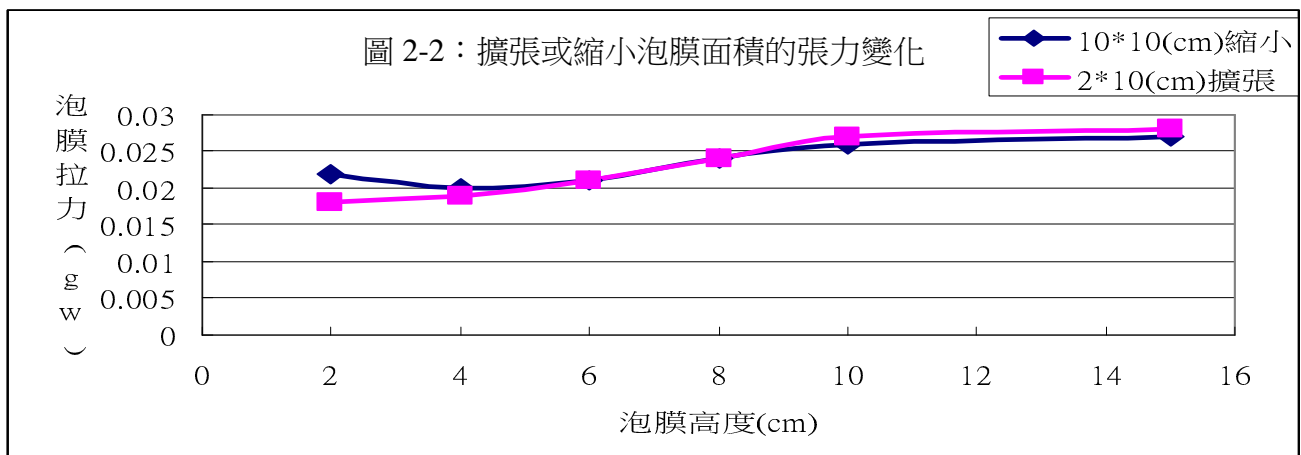
圖 2-1：張力的分布情形

實驗結果：

表二：擴張或縮小泡膜面積的張力變化

泡膜面積 (cm)	2	4	6	8	10	15
由 10*10(cm)縮小之張力(gw/cm)	0.022	0.02	0.021	0.024	0.026	0.027
由 2*10(cm)擴張之張力(gw/cm)	0.018	0.019	0.021	0.024	0.027	0.028

討論：



- (一) 由實驗結果的統計圖中可以發現：對於泡膜張力的測量，不論是縮小泡膜或是擴張泡膜面積，當面積達 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 以上時，泡膜的張力約略維持在一定值(0.027gw/cm)。亦即，**在測量泡膜張力時，面積須達到一定的面積大小，測量的準確度就能提升**。而且與附錄參考資料中，肥皂水的表面張力參考值 0.020gw/cm ，極為接近。可見：**以泡膜測量溶液的張力是一簡便的測量方式**。
- (二) 測量泡膜張力時，**「將泡膜逐漸增大」會比「將泡膜逐漸縮小」更容易穩定測量出泡膜的張力變化**。觀察此一現象應是縮小泡膜面積的過程，會有多餘的水溶液流動及滴落的情形，會影響張力的測量。
- (三) 同一泡膜，當**施加外力將面積加大時，則泡膜張力會隨之加大**，推測應是定量的水溶液被包覆在泡膜的清潔劑分子內，若將泡膜的表面積加大，則泡膜的厚度會變薄，會更容易促使水分子的表面張力表現出來，而使泡膜的總張力會伴隨面積加大而增加。
- (四) 實驗操作過程發現：單一泡膜在改變期面積時發現泡膜具有彈性，會將光纖所包圍的面積儘量縮小。若將此一泡膜由中央分隔呈兩泡膜(如下圖 2-3)，由於兩邊泡膜的水溶液仍會互相流通，所以大小兩泡膜的張力會藉由液體的流動而達成平衡，不會因為兩邊泡膜面積不同而產生合力不相等，進而產生形變位移的情形。若是其中一格泡膜破裂之後，則剩下的泡膜會將光纖往縮小面積的方式拉扯甚至位移(如下圖 2-3)。

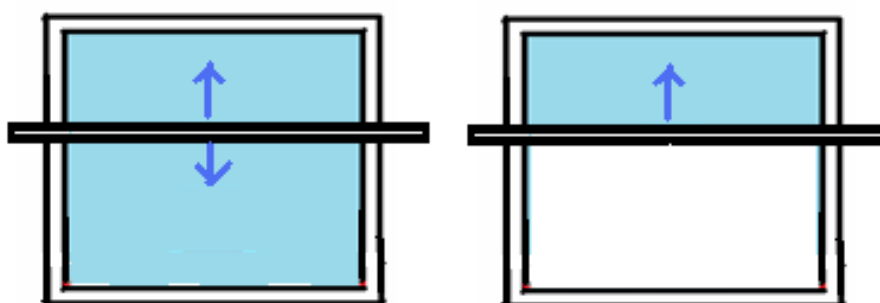


圖 2-3：形變位移的情形

三、水面泡膜的高度對水面拉力的影響

假設：分子拉力→形成表面張力→泡膜面積大小所需的拉力不同

實驗：於濃度 20% 的清潔劑溶液中將寬 2 cm 的鐵框以細銅絲拉高不同高度的泡膜，測量泡膜受水面的拉力大小。

結果：

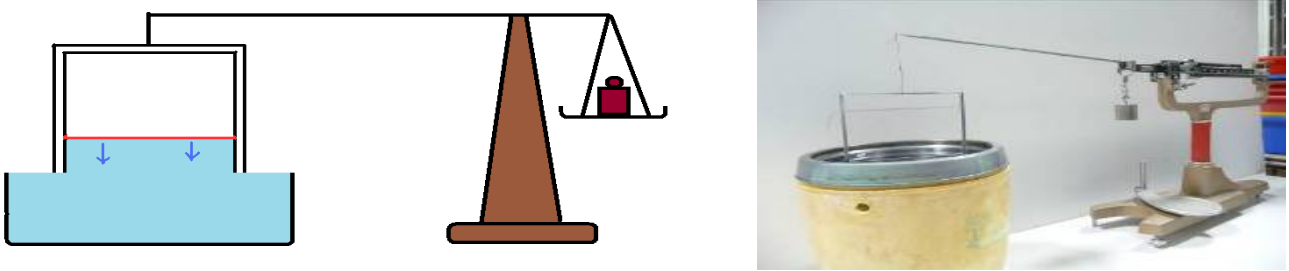
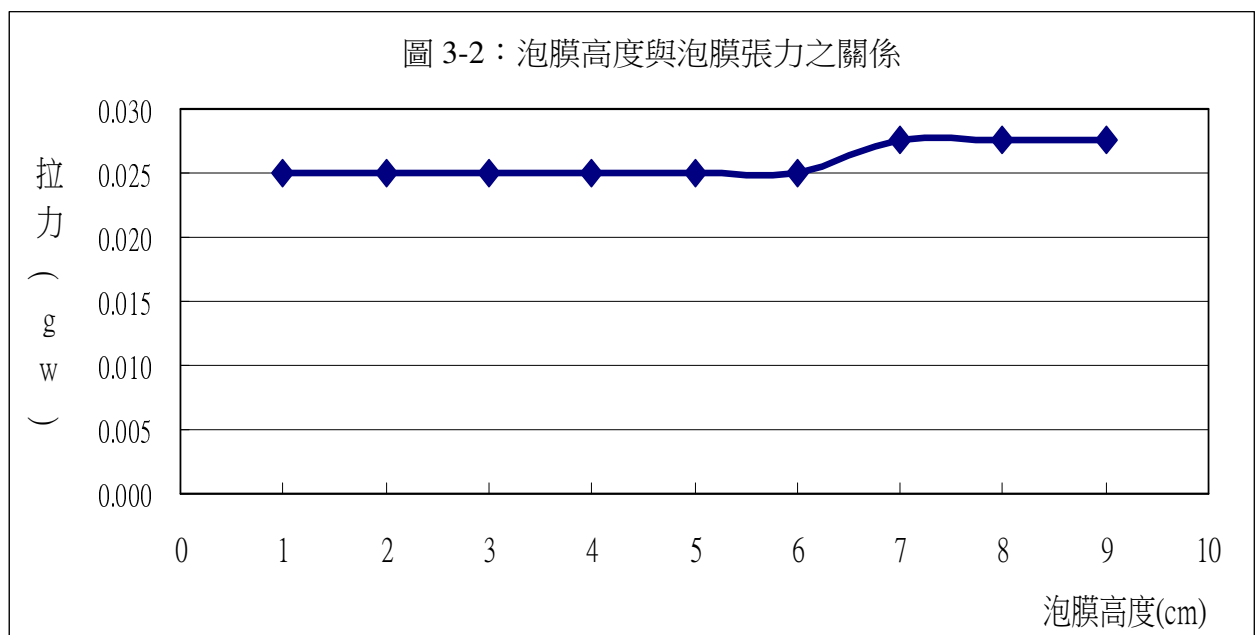


圖 3-1：天秤測量張力實驗裝置示意圖

表 3：泡膜高度與水面拉力之關係

泡膜高度(cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
泡膜張力(gw/cm)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.028	0.028	0.028



討論：

- (一) 實驗發現：水面上之泡膜，不論泡膜拉多高，加大面積對於水面所產生之拉力的影響不大(沒有隨面積增加而使拉力呈現倍數增加)，因此推斷：因為水溶液可以不斷的補充，所以單位長度的張力不變。面積加大應只是補充足夠的水分子到泡膜中，會略為影響水膜的重量，進而增加水面對泡膜的拉力(如下圖 3-3)，而加大表面張力。不過當泡膜高度到達一定高度時(高於 7cm 以上)，表面張力則不再增加，因此推論：要利用泡膜測量溶液的表面張力，泡膜高度需要達一定限度以上，因為利用分子受重力下拉而使溶液的分子均勻分布於泡膜後，表面張力的測量就會更準確。

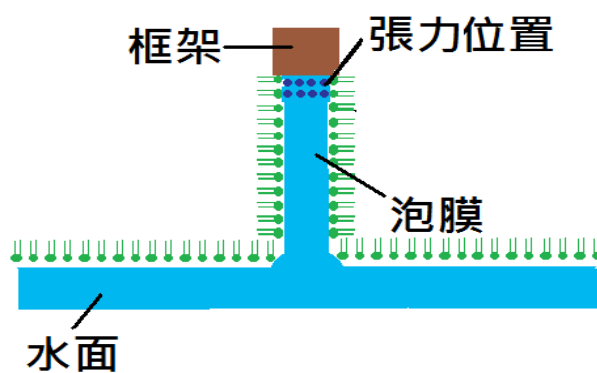


圖 3-3：水面對泡膜的張力之示意圖

- (二) 由於泡膜高度倍增卻不會影響水面對於泡膜的拉力，所以我們推論：泡膜張力大小應是溶液分子間的引力及溶液分子與框架接觸點的引力大小和方向有關。

四、框架寬度對於水面泡膜拉力之影響

實驗：固定清潔劑濃度 20%，泡膜高度均為 5 cm(使泡膜接觸面各點所受泡膜重力均相同)，以微量天平測水面對泡膜的拉力。(不同寬度的鐵框插入水中均為 1.3 cm，使所受浮力相同)。

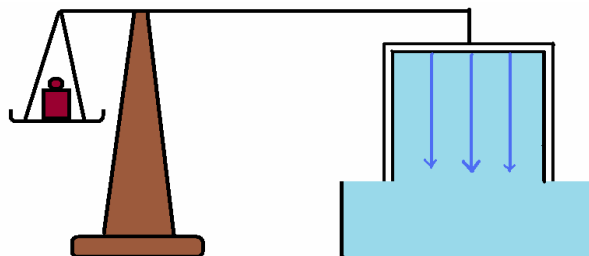
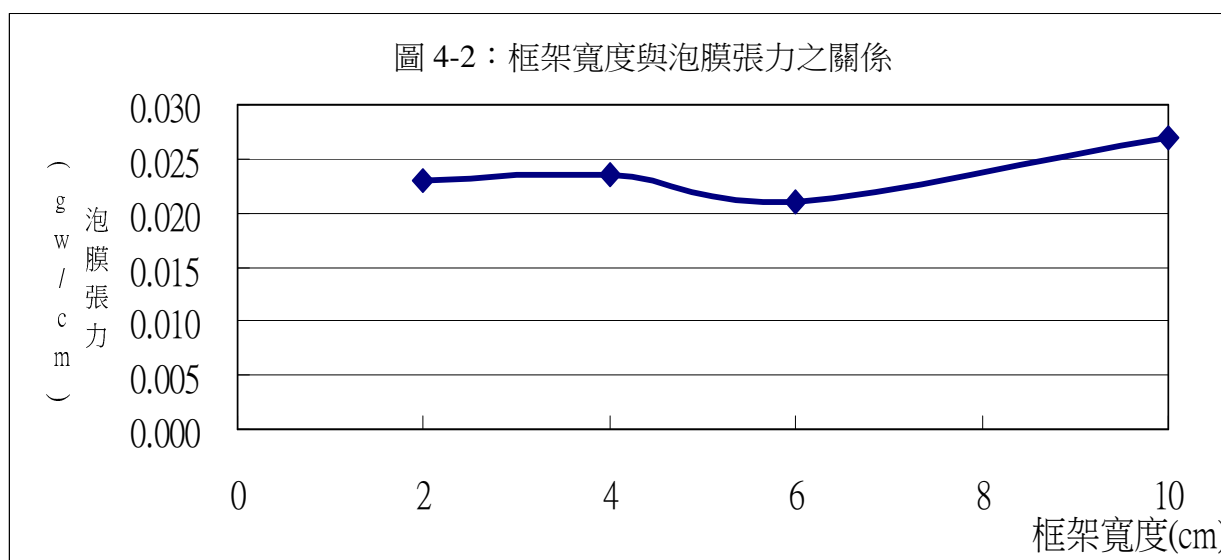


圖 4-1：天秤測量張力實驗裝置示意圖

結果：

表 4：不同框架寬度與泡膜張力之關係

框架寬度(cm)	2	4	6	10
水面拉力(gw)	0.09	0.19	0.25	0.54
張力(gw/cm)	0.023	0.024	0.021	0.027



討論：

- (一)、 由以上統計圖可知：泡膜與水接觸面之寬度與水面拉力之關係大約呈現正比的關係，因此若以此一拉力測量結果來計算濃度 20% 洗潔精溶液的表面張力時(最大拉力 / 2 倍泡膜長度，詳如附錄)，則發現洗潔精溶液的表面張力大小約略相等，而與框架的寬度無關。查閱參考資料中，關於肥皂水的表面張力約為 0.020gw/cm，本次實驗對於清潔劑的表面張力測定約為 0.027gw/cm。由此結果可以證明：利用測量水接觸面對於泡膜的拉力，計算溶液的表面張力，是一可行的簡便觀測方式。
- (二)、 水面對於 10 cm 寬泡膜的拉力略大於 5 倍 2 cm 寬泡膜的拉力，推測應是：足夠的泡膜本身重量會使溶液更均勻地分布在泡膜中，造成泡膜的張力增加，進而逼近溶液的表面張力。
- (三)、 雖然本實驗對於清潔劑溶液的表面張力計算約為 0.027gw/cm，與理論值接近，但是經測量 10 cm*10 cm 的泡膜重量約為 0.03gw，對於溶液表面張力的計算會產生有顯著的影響。因此，將來必須設法利用不同施力方向的測量，來排除泡膜重量的影響。所以，藉由水面對於泡膜的拉力，來計算溶液表面張力的觀測方式，是一個有利於排除泡膜重量影響的觀測方式。

五、框架形狀對水面泡膜張力的影響

實驗：以微量天平測量 1%清潔劑溶液所產生不同框架形狀的泡膜（如下圖 5-1），水面對泡膜的拉力。（每一寬度的鐵框插入水中均為 1.3 cm，所以所受浮力相同）。

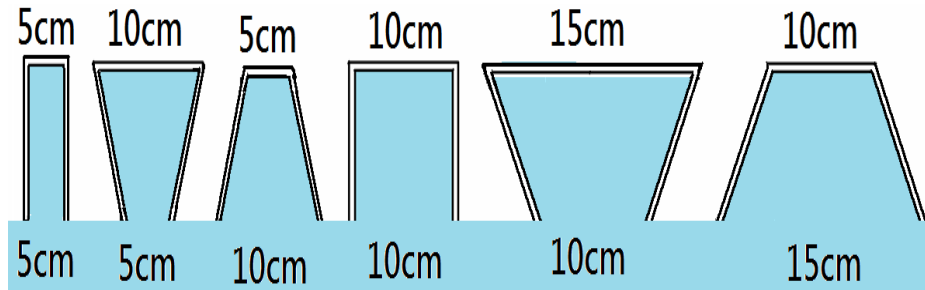
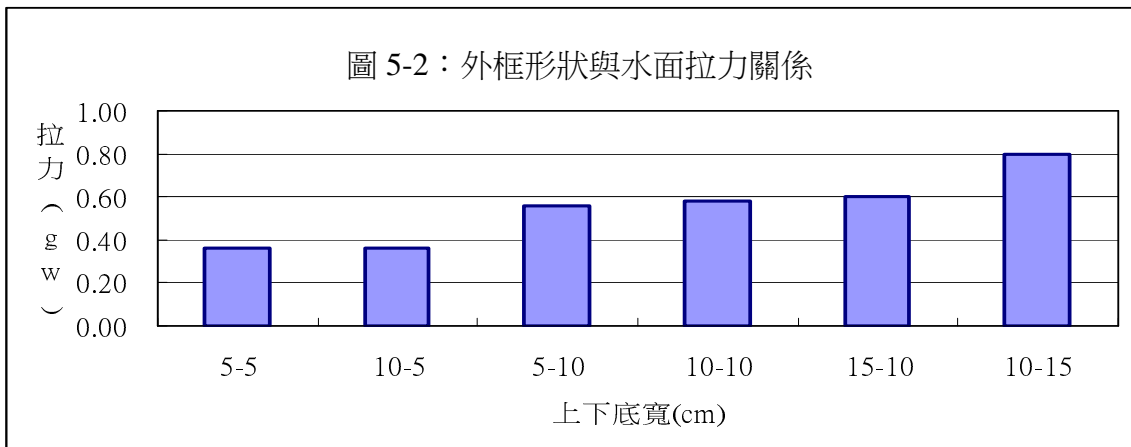


圖 5-1：不同框架形狀的泡膜

結果：

表 5：不同泡膜面積與張力的關係

上下底長(cm)	5-5	10-5	5-10	10-10	15-10	10-15
淨拉力(gw)	0.36	0.36	0.56	0.58	0.60	0.80
張力(gw/cm)	0.036	0.036	0.028	0.029	0.030	0.027



討論：

1. 由實驗發現：接觸水面的框架底面，長度相等的(立如底長 10cm 的三個框架)，水面的拉力相同；不論是正立梯形、倒立梯形、或是長方形水面對於泡膜的拉力均相等。理論推測：框架開口處與水面垂直接觸的框架，是會與泡膜產生直接拉力的位置(如下圖 5-3 中的拉力 F_a)。對於水面垂直方向無垂直接觸的部位(如下圖 5-3 中的拉力 F_b)，因泡膜的張力上下都有框架支撐，所以對於水面產生的拉力合力為零。也就是對於水面沒有垂直接觸之泡膜，不會對水面產生拉力。因此，才會有「接觸水面的框架底面長度相等，則水面的拉力相同」這一情形；也就是不論是正立梯形、倒立梯形、或是長方形，水面對於泡膜的拉力均相等。**水面對於泡膜的拉力大小，與泡膜對於支撐框架的鉛垂接觸點之寬度有關**，因此，實驗證明：**可藉由框架的鉛垂接觸點寬度，計算溶液的表面張力。**
2. 實驗操作過程發現：框架本身的扭轉會造成拉力測量的誤差，因為將框架相對扭開時，與水面的接觸點長度會增加(如下圖 5-3 右虛線部分)，但是，對於中央支架產生的直接拉力，會因為支架的扭轉，而使拉力不在鉛直線上，會造成拉力在鉛直線及水平面兩方向都會產生分力，因而降低水面鉛直拉力的大小。所以實驗過程框架的平整是會造成影響實驗誤差一項的因素。

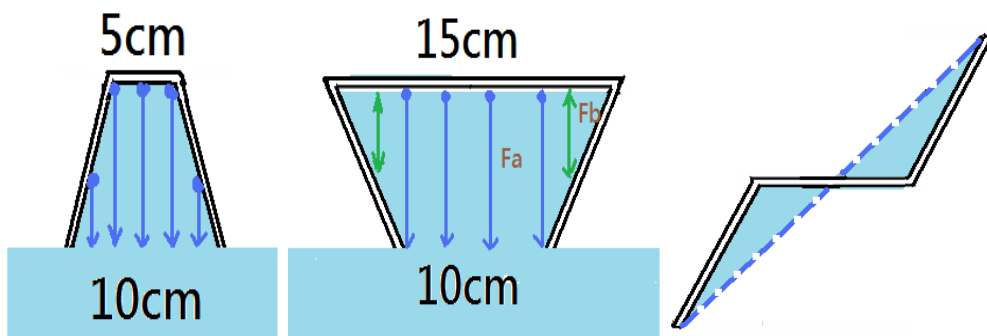


圖 5-3：不同框架之拉力示意圖

六、塑膠光纖線入射位置與透射率關係之測量。

假設：雷射光對於圓形塑膠光纖線圈的入射位置不同，入射夾角會發生改變，會使透射率發生改變。

實驗：

1. 以光纖線鋪設在直徑 10cm 的鐵圈外，雷射光入射塑膠光纖線圈中央(電阻值最大)，光纖線末端接光敏電阻。
2. 逐次加掛 1 公分之漆包線($\phi 1\text{mm}$ 漆包線 0.023gw/cm ; $\phi 0.2\text{mm}$ 漆包線 2.4mg/cm)掛鈎，再用三用電表(如圖 6-1)測量光敏電阻變化量，藉以取的塑膠光纖線的入射位置與電阻數之標準曲線。

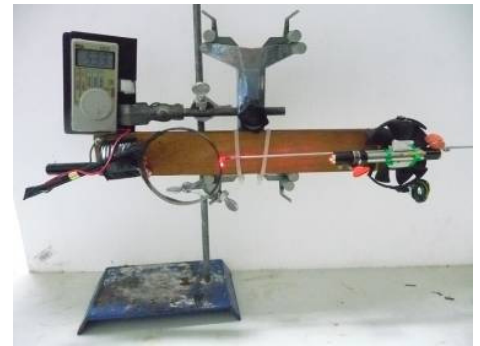
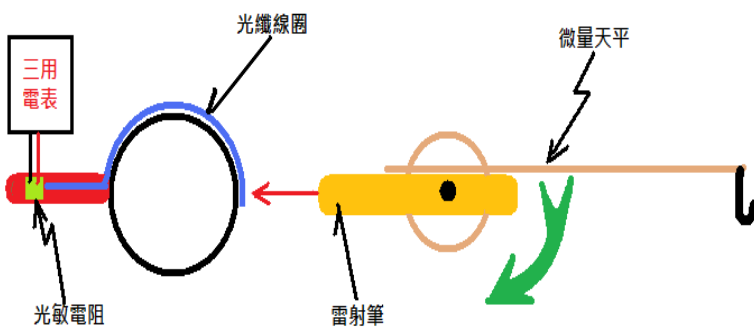
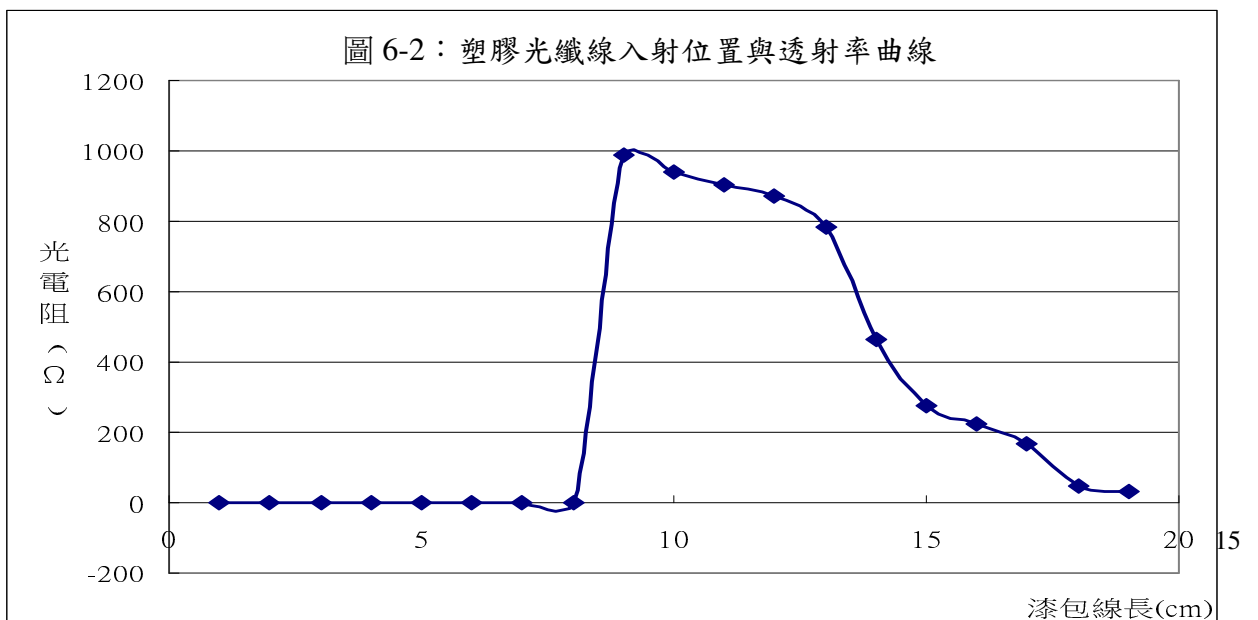


圖 6-1：塑膠光纖線入射位置之裝置示意圖

結果：

表 6：負重與光纖透射率的關係

漆包線長(cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
光電阻(k Ω)	0	0	0	0	0	0	0	0	988	939	904	872	784	463	278	226	169	47.3	31.3



討論：

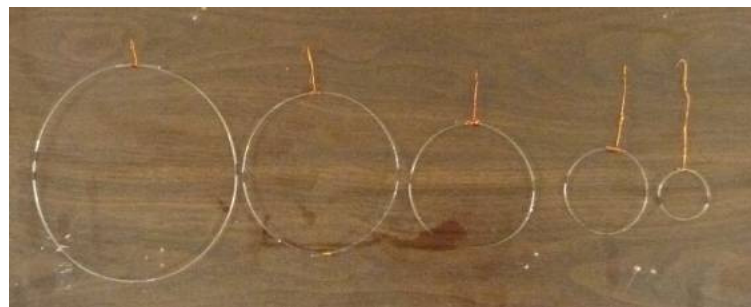
- (一) 實驗結果發現：砝碼掛重量在漆包線 13~15 cm 之間，入射角度大約在 30~60 度之間時，光纖的電阻變化量會比較大，此時每 0.023gw 約會產生 200 k Ω 的變化量，所以，應用光電阻變化量測量泡膜拉力，需調整天平的拉力變化量在最靈敏的光纖透射率區域，再以「逼近法」去測量實際的拉力大小，則此時精準度可到達小數點以下四位數。

- (二) 實驗操作過程發現：雷射光對於塑膠光纖線圈的入射角度不宜太大(大於 60 度)，否則電表的數值反應會不穩定。但是，入射光角度太小(小於 10 度)，則透射率增加的範圍太小，容易造成測量誤差。入射角度大約在 30~60 度之間時，光電阻的變化量最大，是天秤測量靈敏度最高的區域。

七、以光纖線透射率對於泡膜張力之測定。

假設：泡膜向下拉力會使雷射光對於塑膠光纖線圈的夾角發生改變，進而使透射率發生改變。

實驗：雷射筆以垂直入射塑膠光纖線圈中央，微量天平下方掛光纖線圈並以 20%清潔劑溶液形成一個泡膜(如照片)，此時泡膜拉力對天平下拉造成雷射入射位置改變，光纖末端接光敏電阻，再以三用電表測量電阻變化，代表張力變化量。

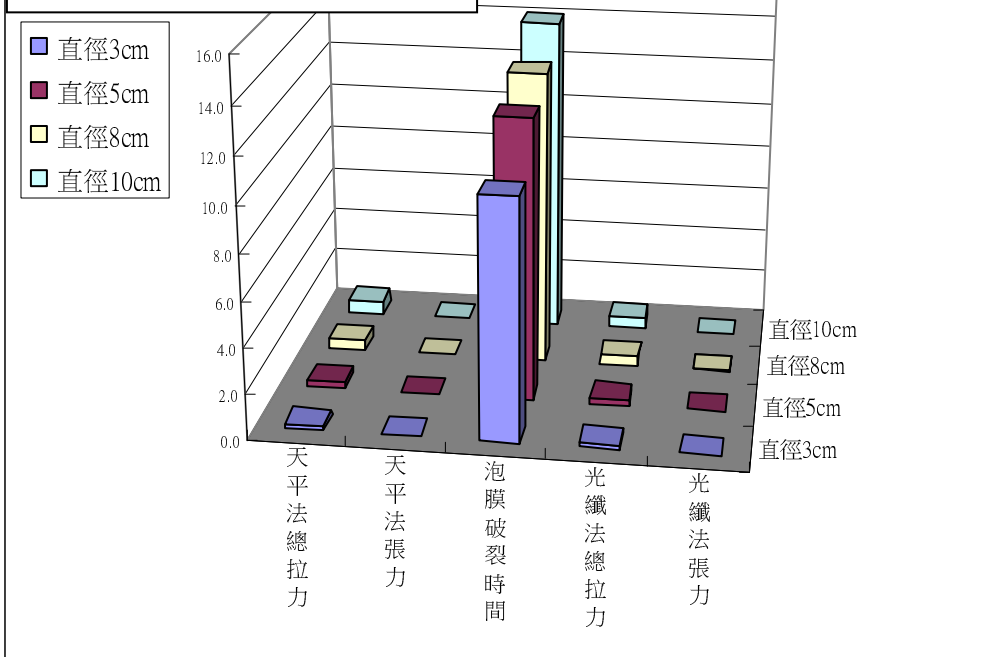


結果：

表 7：不同長度泡膜的張力測量

	泡膜直徑(cm)	3	5	7.5	10	14
天平法	水面總拉力(gw)	0.18	0.3	0.48	0.6	0.8
	張力(gw/cm)	0.03	0.03	0.032	0.03	0.029
	泡膜破裂時間(s)	10.49	12.38	13.00	14.05	12.39
光纖法	水面總拉力(gw)	0.1996	0.2853	0.4228	0.56	
	張力(gw/cm)	0.033	0.029	0.028	0.028	

圖 7：天平法與光纖法的比較



討論：

- (一) 實驗結果證實：光纖的透射率可以用來測量泡膜的張力，以寬度 8~10cm 的泡膜進行測量，泡膜張力都在 0.028gw/cm 左右，準確度及靈敏度極高。而天平法是快速的檢測方式。
- (二) 實驗操作過程發現：泡膜直徑太大或太小都容易破裂，會增加操作上的困難度，所以用直徑 8~10cm 的光纖線圈泡膜來測量表面張力會比較方便。

八、以表面張力法測量牛奶溶液的濃度

假設：不同的牛奶濃度可測得不同的表面張力

實驗：固定清潔劑溶液濃度(20%)，加上不同濃度比的水和牛奶之混合溶液，以天平法測量其表面張力。(如照片)

結果：實驗發現當牛奶稀釋到 80%時，表面張力會接近一定值。因此對於高濃度(100%~80%)的溶液，以表面張力的測定法來計算它的濃度，是可行的測量方式，測量值亦與標準值(如表 9)接近。可見本測量法是簡易的表面張力測量法。

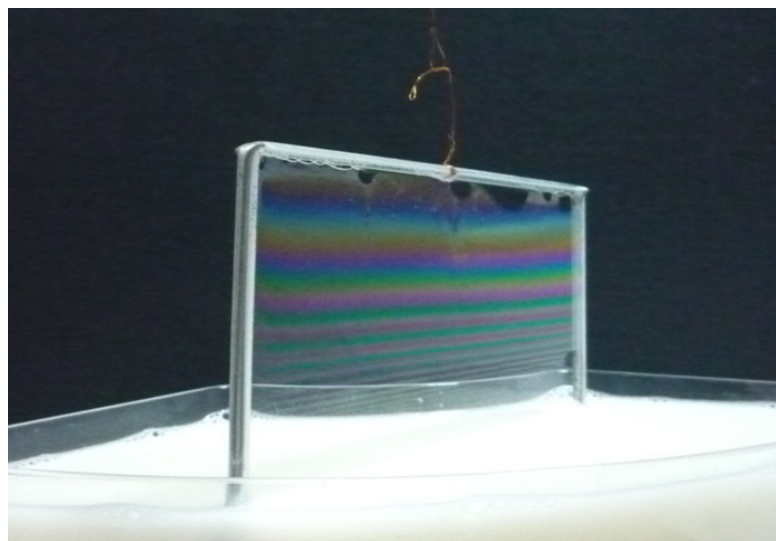


圖 8：以表面張力法測量牛奶溶液的濃度

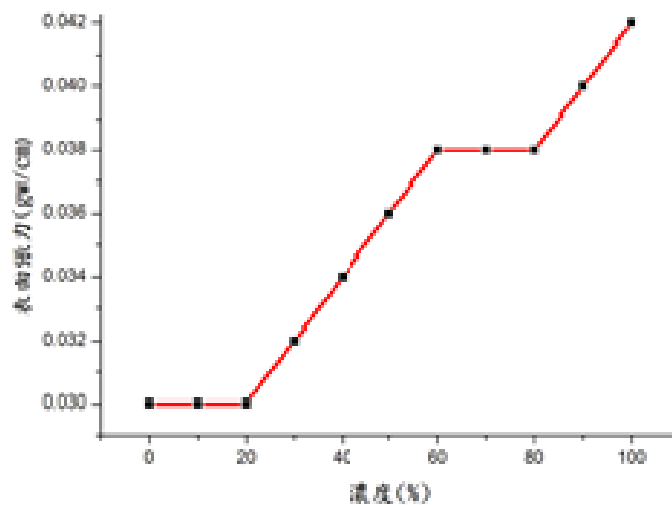


表9、各種溶液之標準測量				
	去離子水	100%清潔劑	鮮奶	20%清潔劑水溶液
密度(g/cm ³)	1.000	1.007	1.025	1.001
表面張力(mN/m)	61.7	29.7	47.6	28.3
表面張力(gw/cm)	0.0630	0.0303	0.0486	0.0289
(室溫25°C；白金環R=9.55mm， r=0.02mm)				

討論

(一) 實驗結果證實：以此裝置測量牛奶表面張力一是可行的方法，並且可利用圖九中斜直線的區段，由牛奶表面張力得知牛奶溶液濃度。

(二) 實驗結果發現及推測：牛奶濃度和表面張力的折線圖中(圖 8)，可發現其中的對應關係並不完全呈現斜直線，而有些區呈現出平移的狀態，也就是說，在牛奶溶液濃度下降的狀況下，表面張力還是呈現一定值(圖 8 中濃度 60%~80%和 0%~20%的牛奶容液所對應的表面張力)，我們認為此現象是牛奶分子在受力不同時，分子排列方式發生改變，所導致的結果，可作為未來深入討論的方向。

伍、結論

本次研究有以下四點發現：

1. 脫離水面的獨立泡膜，面積越大張力就越大，但將獨立泡膜擴張達一定面積(10 cm*10cm)以後，張力大小約略維持在一定值(0.027gw/cm)且接近肥皂水的理論值(0.020gw/cm)。證明：以測量「獨立泡膜形變張力」或是「測量水面對泡膜的拉力」來計算溶液的表面張力，是可行的簡便測量法。
2. 我們發現水面對於泡膜拉力的大小與泡膜對於支撐框架的鉛垂接觸點的寬度有關，所以利用「水面拉力法」，可排除泡膜本身重量所造成的誤差，方便精確計算溶液的表面張力。
3. 由水面泡膜高度必須超過7 cm，表面張力會變大而使測量更準確，推測應是泡膜高度超過毛細現象的高度上限(賴怡安等，2002)，水無法自由補充，使泡膜變薄，表面張力因而變大。因此，應可藉由泡膜張力計算毛細現象之上限高度。
4. 泡膜之張力可以微量天平或光纖線入射光吸收率的簡易測量，方便進行表面張力的計算。

本次研究的成果包括：

1. 藉由界面活性劑幫助形成水溶液的泡膜，方便發展液體表面張力之簡易測量方法，提供更簡易之測量方式（包括：獨立泡膜形變法、水面拉力法及光纖透射率法）。
2. 運用本研究之簡易張力測量方式，藉以量測不同溶液的濃度變化，或是觀測不同泡膜之間張力之合成模式，提供未來各式薄膜塑形技術之改良。

陸、參考資料

- (一)劉寄星，1995，從肥皂泡到液晶生物膜，牛頓出版社。
- (二)傅宗政、陳正平，2001，「冒泡的美」，科學發展月刊第 29 卷第 11 期，p. 788~P. 796。
- (三)黃泰翔，2001，表面張力的誤差探討與實驗改進，九十年台灣國際科展優勝作品集。
- (四)賴怡安、黃致維、廖奕嘉、許芳毓，2002，吸不吸有關係，台北市第三十五屆中小學科學展覽會作品。
- (五)蔡宜穎、賴念筑、林采蓉、許晏禎，2003，泡膜兩相照，第 43 屆全國中小學科展作品集。
- (六)薛宇捷、呂俊漢、陳健安、陳勝崎，2006，管狀泡膜之研究，第 46 屆全國中小學科展作品集。
- (七)柯賢文，2007，表面張力的應用，科學發展，411 期。
- (八)嚴凱傑;朱柏憲，2009，製作奈米的肥皂泡膜，第 49 屆全國中小學科展作品集。
- (九)泡泡膜與表面張力，科學遊戲實驗室，國立台中教育大學
http://scigame.ntcu.edu.tw/2D_bubble.html。

一、水之表面張力 (dyne/cm)

溫度°C	10	15	20	25	30
表面張力 (dyne/cm)	74.22	73.49	72.75	71.97	71.18
(gw/cm)	0.0757	0.0750	0.0742	0.0734	0.0726

二、液體之表面張力 (dyne/cm) (20°C)

物質	酒精	乙醚	甘油	肥皂水
表面張力 (dyne/cm)	22.3	16.5	63.4	19.6
(gw/cm)	0.0228	0.0168	0.0647	0.020

液體表面有表面張力，所以當我們用一環浸在液體中，再提到表面以上時，液體表面積將增加，即需要作功，此功等於增加的表面積乘以表面張力，也就是需要用力去提起金屬環。

設環長為 L ，液面至金屬環提上到液膜破裂的距離為 h ，而且因為薄液膜有兩個面，所以實際上表面積的增加有兩倍，即 $2Lh$ ，故所作的功 W 為

$$(1) W = F \times h = 2h \times T$$

$$(2) T = \frac{F}{2L}$$

其中 T 是表面張力， F 表拉力。

(3) 所以假設已知純水的表面張力 T_1 ，那麼只要測定純水與待測液體相對應的拉力 F_1 與 F_2

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{F_2 / 2L}{F_1 / 2L}$$

(4) 則待測液體的表面張力 T_2 為

$$T_2 = T_1 \frac{F_2}{F_1}$$

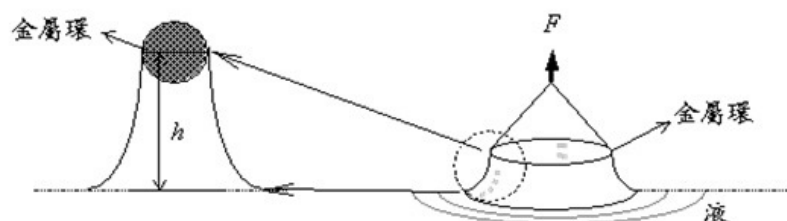


圖 2