

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

大型肥皂薄膜的設計與製造

計畫編號：NSC 89-2515-S-002-005-

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：金必耀 台灣大學化學系

共同主持人：左家靜 國家高速電腦中心

計畫參與人員：葉玉姍, 黃愷玲, 林淑瑗 台灣大學化學系

一、中文摘要

我們在本計畫中，針對大型肥皂薄膜與肥皂泡的設計與製作，做了一系列的研究，並且實際地做出實際的大型肥皂膜的儀器原型。目前這個簡易的設備能夠產生高約三米寬約半米之肥皂膜，肥皂膜能夠維持的時間與我們能提供的水溶液總量相關，原則是沒有時間的上限。此外，我們也研究了大型肥皂膜的穩定性與薄膜形狀間的關係，並且也建立起第一個倚肥皂膜為主的中文網站。

關鍵詞：肥皂泡、肥皂膜

Keywords: Soap Bubble, Soap Film

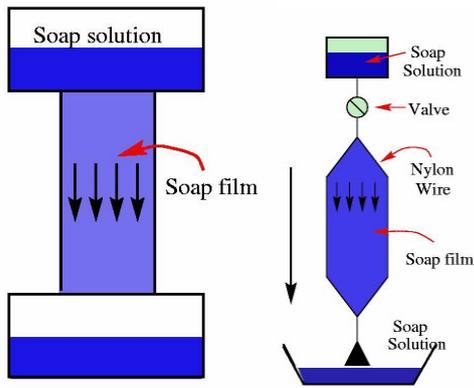
二、緣由與目的

吹肥皂泡應是大多數的人都曾有過的童年回憶，只要將肥皂水溶液準備好，再把吸管浸入肥皂水溶液中，取出吸管，然後就可吹出許多五彩繽紛的泡泡。這樣簡易的活動，竟然與許多重要的科學概念有密切的關係，吸引了歷史上許多偉大的科學家的注意與重視，例如牛頓，拉普拉斯，普拉圖(Plateau)等人。由此所衍伸出的重要數學，物理與化學領域多得不勝枚舉。近年來，由肥皂泡的研究，1972年慕尼黑奧運的運動場更是由肥皂薄膜所得的靈感，而建造出來的。本計畫的目的便是希望透過這種製作超大肥皂泡的科學活動，激發青年朋友對科學的好奇，進一步希望了解其原因，而達到對科學的認識。

製作穩定的大型肥皂薄膜一直是許多專業科學家與業餘愛好者所希望達成的目標，在過去二三十年許多業餘愛好者對此作出了許多卓越的新型設計。第一種是用鐵製的衣架，纏繞毛線，浸入肥皂水溶液中，毛線可以吸附大量的水，因此可以做出相當大型肥皂泡。但是這個設計製造頗費時，承裝溶液的容器也需要很大的開口，方能將整個圓形衣架置入容器中，並不方便。另外一種則是波士頓兒童博物館任職的 Zubrowski 發明一種簡易設計，由一條長毛線串聯兩個吸管所組成，非常容易製造，可以產生中型肥皂泡，在人數多的時候特別方便。

最聰明的發明是1984年由美國建築師 D. Stein 所設計的“做泡泡的東西”(BubbleThing)，這個設計最聰明之處，在於使用可張開閉合自由活動的絨布來產生薄膜，好處有二：第一，吸水量大的絨布可以涵養足夠的水溶液，用來製造直徑大到一兩公尺的肥皂泡；第二，可以自由開閉的絨布，可以藉由逐漸將閉合的絨布線拉開，產生大的薄膜，從而吹出非常大的肥皂泡。

但是若想進一步擴大這個設計至數公尺到數十公尺，有一些困難必須克服。由於肥皂溶液的薄膜的面積與尺寸的平方成正比，而薄膜的厚度在數個微米左右，以 Steiner 的設計，只能提供一定的體積的水溶液，所能製造出來的肥皂薄膜有一定的上限。而且重力使得肥皂溶液迅速由上向下流動，上層的薄膜會快速地變薄，因此破裂。這個問題直到1995年，才由三位物理學家(Kellay, Wu 與 Goldberg, Phys. Rev. Lett. 74, 3895)利用二維流體的方法，不斷由上面加入新的肥皂水溶液，如此就可以維持水溶液的厚度，如果水溶液流出與流入的速率達成平衡，原則上薄膜就可維持相當的時間。其中由上層容器留下之溶液，藉由兩個尼龍線，侷限在其間，順勢而下，形成一個不斷在流動的薄膜。這樣的設計所產生的薄膜，原則上可以維持很久。但是當薄膜非常大，薄膜厚度的均勻性與流速很不容易控制，這主要是因為此設計之原始目的並不只是要產生一個大的薄膜，而是要產生一個穩定持久的薄膜，用以研究二維的流體力學行為。從我們的觀點，這一個設計有個代價，即僅可製造薄膜，無法產生封閉的薄膜(肥皂泡)，但是這一結構卻較容易推廣到更大型的薄膜之製造。對這方法的一個重要修正，由目前在美國俄亥俄州立大學物理系教授 Rutgers 所發明，當時他在賓州州立大學。設計的簡圖如下，主要的差異在於幾何形狀的不同，以及薄膜的產生由而外幾條綁在主要尼龍線上的幾條細線所控制，這使得整個薄膜的上半部與下半部曾現扇行的構造，肥皂水溶液的流速更可以藉由開關調節，較不易產生亂流，並且整個薄膜可以逐漸地藉由幾條細線所拉出來的，流速的控制使得薄膜的穩定性有極大的改善，常可以維持一天不破。以前面 Stein 的設計(即所謂的泡泡的東西)相比較，不難看出兩者皆是利用緩漸的方式將支撐肥皂薄膜的繩子拉開，但 Rutgers 教授似乎並未提及 Stein 的工作。



Rutger 教授的這一個卓越設計開啟了許多的想像空間，甚至許多新的超大肥皂薄膜之設計方向，例如大型的螺旋式構造，甚至其他複雜的多面體構造的可能性。大型的肥皂薄膜的產生不僅僅是將小的肥皂泡放大而已，有許多新的困難必須克服外，更重要的是，若能在適當的科學博物館展示大型肥皂薄膜，對於社會大眾與青年學子是具有相當重要的教育意義。

三、超大肥皂泡的製作

巨型肥皂薄膜的製作主要困難在於下列幾點：(1) 薄膜面積的增加，微風所造成任何小的厚度之漲落與微擾，可使薄膜輕易破裂，所以必須選擇無風或是微風的場所。(2) 表面積增加，溶液的蒸發速率大增，實驗或是展示場所的濕度控制也對薄膜的生命期有影響。(3) 產生大表面積，必須克服相當大的水溶液之表面能，使用適當廠牌的洗潔劑也相當關鍵，文獻上或是網路上有不少相關資料可供參考，依照我們過去的經驗，美國的品牌 Joy 相當適合用來做超大肥皂泡。當我們希望藉由此計畫，也能對台灣目前常用的洗潔劑之適用性做一個較為仔細的探討。(4) 重力使溶液不斷下流，造成上層的薄膜越來越薄，最後破裂。解決此一關鍵問題的方法，是由上面不斷再讓肥皂溶液流入薄膜中。

製造大型肥皂泡分為幾個部分關鍵步驟：

1. 肥皂水溶液的配置。
2. 肥皂膜製造的設備之設計。

材料：

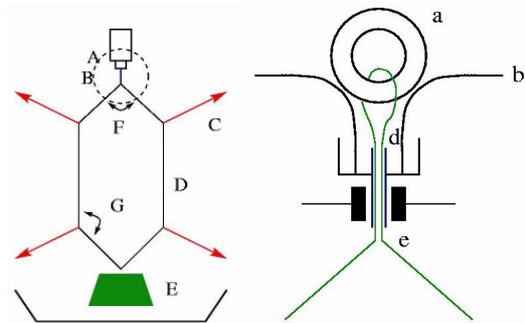
1. 半徑 0.5 至 1mm，且能支撐十到十五公斤重的釣魚使用的尼龍線兩綑（五百公尺長）。
2. 半徑 0.25 至 0.5mm，且能支撐兩到四公斤重的釣魚使用的尼龍線兩綑（五百公尺長）。
3. 兩升可口可樂的空瓶，或是其他容器數個。

4. 內徑兩到四釐米釐米的塑膠管數個。
5. 夾子數個。
6. 重量約兩至三磅的重物。
7. 兩瓶的洗碗精。
8. 干油一瓶。

肥皂水溶液的配方：文獻與網路上有許多不同的配方，我們在本計畫中，對濃度比例，做一些簡單的探討，目前以下列配方最簡單易作

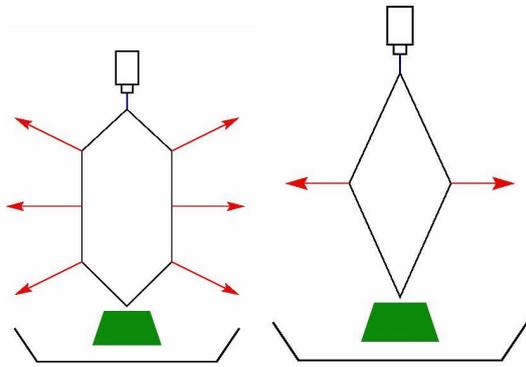
1. Joy 洗碗精一杯
2. 水十二杯
3. 干油三分之一杯

超大薄膜的儀器設計：但計畫的重點在設計出能產生出巨大肥皂薄膜的東西，我們將對 Rutgers 的設計原理，做一簡單介紹。整個設計之簡圖如下：



位在上方的肥皂水溶液的容器，簡稱 A，原則上 A 可以是任何的容器，在一般較容易取得的瓶罐中，以兩公升的保特瓶較方便。將保特瓶底部切掉倒置，瓶口鑽一個洞，將一個小塑膠管插入 d，如附圖所示，小塑膠管穿入尼龍線，並用一金屬圓環扣住，避免尼龍線掉落。用一個夾子夾住小塑膠管 d，用以控制水流速率。尼龍線最底端懸掛一重物，以保持尼龍線的形狀。一般來說，對於一個 10 平方公尺大、3 微米厚的肥皂薄膜，每次破裂落下的體積有 30 毫升，若不希望搞得滿地都是滑膩的水溶液，在地上放一個大容器承接落下之肥皂水溶液，一個很好的選擇是小朋友用的塑膠游泳池，一般直徑約有兩三公尺。

在整個裝置準備好後，我們就可以開始進行製造超大肥皂薄膜的實驗，主要的尼龍線兩邊繫上兩條或是四條的細尼龍線，如下圖所示，

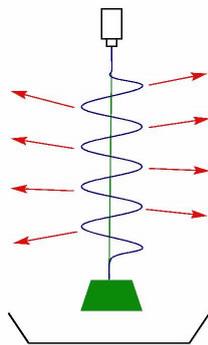


可能影響肥皂薄膜穩定性的變因有肥皂水溶液的流速、尼龍線的長度、尼龍線撐開的形狀、尼龍線的寬度與張角。當然溫度、濕度、風都會影響到薄膜穩定性。在這個計劃中，我們進行了下列的實驗：

1. 利用夾子控制流速，觀察流速如何影響肥皂薄膜穩定性。
2. 改變尼龍線的張角，肥皂薄膜與張角的關係為何？
3. 改變尼龍線的寬度，觀察薄膜失穩時的臨界寬度為何？

進一步我們可以考慮以邦浦回收肥皂水溶液，讓整個設備變得自動化。將來若是本計畫的成果需要改變為科學博物館長期的巨型展示，可以考慮購置一個邦浦，事實上 Rutgers 教授在匹茲堡卡內基博物館就是採這樣的作法，作為長期展示。

其他可能的結構：從拓樸學的角度來看，前面所述的結構是一個相當簡單平面。長期以來，肥皂泡薄膜一直是拓樸家的最愛，原因是肥皂薄膜是數學上的最小曲面問題。利用不同形狀的金屬骨架或是細線，能夠產生出引人入勝的曲面，甚至給許多建築師產生新型建築結構的靈感，而產生出如慕尼黑奧運之運動場之經典設計。我們很自然地問到是否可能設計出其他拓樸結構的大型肥皂薄膜，我們目前並無確切的答案，但相當直觀地猜測，似乎有可能設計出螺旋型結構的大型肥皂膜。參見下圖：



綜合 Stein 與 Rutgers 的方法，最關鍵處在於最後的形狀是從兩線閉合狀態逐漸拉出來的，因此這裡最主要的困難也應是在於如何從兩條尼龍線逐漸地拉出螺旋形狀的大型結構。其中尼龍線可能必須換為其他材料，才能撐起螺旋形狀的骨架。螺旋的節距，會影響在其中流動的肥皂水溶液，會改變溶液流速，對螺旋形薄膜的形成應有重要影響。

另外當然還有很多可能的拓樸結構，特別是以多面體結構的骨架，是否能放大到公尺的大小？本人認為可能性是存在的，關鍵應該還是在於如何從閉合狀態，逐漸將整個體系帶到最終的多面體結構。在考慮許多可能性後，目前我們認為最可能的是利用 tensegrity 的骨架結構。這種結構可以產生極大的拉伸形變，適合用來探討薄膜結構與形變的關係。對於大型的結構，我們可以首先讓體系在閉合狀態成膜，在逐漸將骨架像兩傘般地打開。由於許多技術性的困難，目前在這一部份我們尚未有實際的成果。

五、結果與討論

拿一個寶特瓶，將平底割開以方便添加溶液；瓶蓋挖一個剛好可以塞下一小截塑膠管的小圓孔，在塑膠管上調整鬆緊的旋轉閥；再將另一小截塑膠管橫跨在寶特瓶中，讓釣線可以懸掛在上面，要注意不要讓塑膠管變成垂直，這是出水口部分。拿適當長度的釣線（直徑 0.75 公厘），跨過寶特瓶中橫跨的塑膠管，穿過瓶蓋及其中的塑膠管，一直延伸到地面，將底端綁在一個重物上。這個重物不需要很重，只要能讓釣線自然垂下的時候保持緊繃就可以。

將整個裝置懸掛在天花板上或是牆上的掛勾上，再底下放置一個大臉盆接住從膜流下的溶液。最後是拉線，因為我們需要從兩邊將釣線拉開來得到膜，因為我們的手常常都不夠潮濕，如果用手拉很容易會將膜弄破，我們用直徑 0.25 公厘的釣線綁在兩邊釣線大約中間的地方，這樣拉出來的形狀會是風箏形。再將這兩條線固定在兩旁的牆上，這樣我們就可以不必一直用手拉著細線，而膜又會維持一定的形狀了。

溶液：實驗用的溶液是以美國的 JOY 洗碗精加水稀釋，洗碗精和水的比例是 3:200，並沒有使用甘油，因為在這個實驗中最好使用比較稀薄的溶液，濃度太高的溶液會影響溶液流下時的運動行為。

場所：首先是我們必須尋找一處適合作這項實驗的地點，我們需要夠大的空間，因為膜的高度將近一層樓高。同時，必須要找一處不怕被肥皂水弄髒的場所，但是又不能在室外，因為風很容易就把我們拉起的膜吹破了。於是我們只能在本實驗室的一間小房間裡進行我們的工作。

器材：接著是備齊所有的需要用到的器材。從瓶子開始，我們使用 1.2 公升的飲料寶特瓶。我們按照文章的建議在瓶蓋上打圓洞使一節短塑膠管恰好

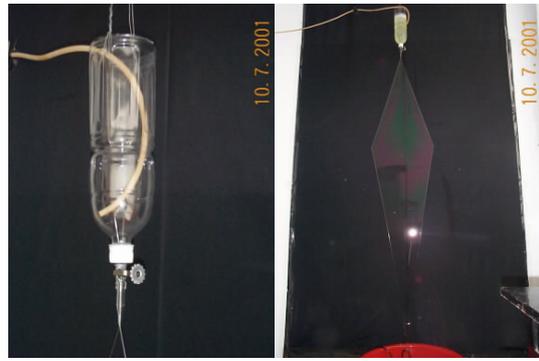
可以通過，然後使用可調整的轉閥以控制塑膠管內徑張開的大小，這是出水口的部分。

在膜的最底端必須掛上重物使釣線能在自然垂下時繃緊。我們用的是洗手台旁邊的刷子。其實一開始時我們並沒有刻意地去尋找一個重物，第一次架設裝置的時候是想暫時先拿小刷子試試看，等以後再換上一個新的重物，不過試了以後覺得小刷子的重量剛剛好，可以使釣魚線在自然垂下的時候是繃緊的，所以我們就沒有把已經綁好的刷子拆下來。最後在裝置底下放置一個大盆子，以接住流下的肥皂液，初步的裝置就算是架設完成了。

實驗中我們面臨到一些困難，因為我們使用的控制閥是直線形的，肥皂液在流下的時候會是一片液體而不是一條液柱，而這些不與膜同一平面的液柱就會干擾到膜表面，造成膜上很大的波動，此時膜就會因為不穩定而破掉。我們想出的解決辦法是請系上的技師幫我們做一個開口只容釣魚線通過的玻璃接頭，接在小塑膠管上，這樣一來，我們就可以確保流出的液體是一條液柱。還有一個問題就是瓶蓋和小塑膠管無法緊密接合，會有液體從兩者的縫隙流出來，漏下來的液體也會影響膜的穩定。我們在塑膠管與瓶蓋之間貼上膠帶試圖止住水，不過肥皂水沾濕了膠帶之後膠帶會再次脫落而溶液又會漏出來，最後我們在塑膠管與瓶蓋之間裹上 parafilm，如此而止住了漏水。

照相：在對薄膜照相的時候，遇到了很多問題，由於膜表面會將光線反射回去，所以我們在照相的時候會在膜表面上看到背景的影子。這對我們造成很大的困擾，因為如果照出來的照片都只看得到背景，就無法將膜上豐富的顏色變化以及液體流動情形表現出來了。要照到好的照片，必須讓膜的後面沒有光線反射出來，這樣的目的是讓我們只看到膜表面反射出來的光線，因此我們在膜背後的牆壁上貼上了黑布，這樣背景就算是完成了。再來是前景部分，因為我們可以在膜上照出膜前的景物，我們就想，如果用黑布遮住景物，我們就可以避免拍到雜亂的背景了。但是經過試驗後，我們發現這樣會拍不到膜上的液體流動情形和顏色，因為這樣就沒有足夠的光線射向膜表面，也就沒有足夠的光線從膜表面反射回來，我們就當然看不到膜表面的流動情形啊！這就跟在一間完全黑暗的密室裡會什麼都看不到的道理是一樣的，沒有足夠的光線反射到我們的眼睛，我們就無法看到東西。

最後，我們想到用白布當前景。因為白布會將所有光都反射回去，而且因為我們用兩層白布當前景將後面的東西擋住，拍出來的照片裡除了膜表面上的流動、顏色之外，就只有少許布的摺痕或是布的波動。因為我們沒有攝影方面的專業人士，我們只能用我們想得到的方法來得到還不錯的照片。如果將來我們有多一些攝影方面的資訊，應該可以得到更好的照片薄膜影像。



膜維持的時間：剛開始的時候，如前述，我們有出水口的問題，所以我們拉出來的膜都無法維持很久，溶液流出來之後會偏向某一邊流，另一邊就會漸漸變薄，最後就破掉了。這個問題解決了之後，膜所能維持的時間就大幅增加。但是，我們做實驗的地方有開冷氣，我們都知道冷氣有除濕的效果，有開冷氣的房間會變得很乾燥。而這種環境會增加肥皂膜表面水分的蒸發，所以在我們的實驗裡一旦出現黑膜，肥皂膜就會破掉，正常的黑膜可以維持比較久的時間。我們所拉出來的膜最久大概可以維持到一個小時左右。

由於膜內的液體不斷往下流，膜的上方就必須不斷有溶液補充。本來我們想用馬達將膜底下盆子中膜流下的溶液在抽回上方容器，形成一個迴路，這樣我們既不用每隔一段時間就補充溶液，又可以節省溶液（如果不這樣的話，流到底下臉盆中的溶液就沒用了）。我們使用魚缸抽水用的小馬達，發現馬達要放在一定的高度以上溶液才會被抽上去，抽上去之後速度又與遠比溶液流下的速度快，也就是說，裝置上方的容器一下子就會被抽上去的溶液裝滿而溢出。這樣當然不行，但是我們又無法得到更好的馬達，因此，最後我們還是採用人工補給的方式，每隔一段時間就爬上去加溶液。有時因為加溶液時不小心使溶液灑出來，會把膜弄破，所以我們的實驗可說是遇到不少困難。但是在有限的資源與差強人意的環境條件下進行我們的實驗，取得了令人滿意的成果。

五、肥皂泡網頁的建立

在本計劃中，我們建立起肥皂泡科普網頁，在目前繁體中文科普網頁還算鄉間的網路世界，我們的網頁算是相當的新穎。雖然台灣號稱有相當多的網路人口，但是到多數的年輕學生上的多半是聊天室，網路電玩等等，部分原因是在網路上與科學教育相關的中文訊息相當欠缺。我們的網站提供了一些有用的科普資訊，把肥皂薄膜與肥皂泡牽涉到非常多的數學、物理、化學與其他自然現象，涵蓋到基礎科學與複雜的自然現象，有系統地建立起一個專屬的繁體華文網頁，提供給各種不同背景的學生、教師與一般社會人士。肥皂泡與肥皂膜的神奇世界的網址設在：

<http://www.ch.ntu.edu.tw/~byjin/bubble>

六、參考文獻

- [1] C.Y.Boys, Soap Bubbles: Their colors and forces which mold them, Dover Press, New York, (1959 edition of an 1905 classic). 中譯本由湖南教育出版社出版，收錄在『聖誕科學講座』之中，肥皂泡和形成他們的力。
- [2] S. Hilderbrandt and T. Tromba, The Parsimonious Universe: The shape and form in the natural world, Springer-Verlag, 1996.
- [3] J. Cassidy, The Unbelievable Bubble Book, Klutz, 1987.
- [4] Rutgers,
<http://www.physics.ohio-state.edu.tw/~maarten/work/soapflow/soapflow.html>
- [5] Cyril Isenberg, The Science of Soap Films and Soap Bubbles, Dover, 1978
- [6] David Lovett, Demonstrating Science with Soap Films, IOP publishing LTd. 1994
- [7] S. Hildebrandt and A. Tromba, The Parsimonious Universe: shape and form in the natural world, 1990
- [8] Philip Ball, The Self-Made Tapestry: Pattern formation in nature, 1999
- [9] John Cassidy and David Stein, The Unbeleivable Buble Book, How to make the world's most incredible bubbles

