

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040108

微管道之表面張力研究—幾種變因之探討

學校名稱：臺北市立大直高級中學

作者： 高二 蔡柏彥 高二 張逸銘 高二 陳勁揚	指導老師： 陳秉貴
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：表面張力、微管道、微動力

摘要

自然界的微小力量--表面張力，微管中利用不平衡研究其的微動力現象。所形成的微動力變因很多；包括溫度梯度($\frac{\Delta T}{\Delta x}$)、濃度梯度($\frac{\Delta C}{\Delta x}$)、溶液種類及微管形狀(管徑及形狀)等，可探討上述變因對微動力之影響。利用影像顯微鏡探討(一)溫度梯度變化調制微動力不平衡的液柱速率，(二)經濃度梯度變化或不同種溶液調制其微動力不平衡的液柱速率，及探討其它變因(包含微管口徑變化及微管剖面形狀)。並以力學及表面能推導與實驗相比較。

液柱移動速率與溫度梯度、濃度梯度呈遞增。微管管徑大小亦會影響內部液柱移動速率。而微管形狀可分析出微管內部曲面變化的趨勢。微動力已應用在半導體微流道實驗；血管內物質(含藥物)輸送及燃料電池甲醇輸送等。

壹、研究動機

曾經在一些科學雜誌上看到很多有關各種微管內之微動力的討論及研究，其中又以討論表面張力及毛細理論所引起的現象的居多。很多期刊上寫著毛細管(或其它微管)在注入液柱後，由於兩邊溫度差、電壓差、溶液濃度差甚而蒸氣壓差都會造成液柱兩端曲面的受力不平衡致使液面因不平衡而移動或週期性振動。期刊上又說這種不平衡力造成液面的移動，這就是所謂的微動力。我們就找我們的專題老師討論，研究探究實驗的可行性。

自然界的微動力現象觀察很不容易，老師說主要是觀察系統的取得不易；再加上影響微動力的變因很多(溫度差、濃度差、電壓差及液體蒸散現象所造成的壓力差)，這多是我們值得注意及研究的方向。因為表面張力的理論是高中生較易學得的，我們打算規畫一些平常較不為人所使用的實驗設計及參數，像溫度梯度($\frac{\Delta T}{\Delta x}$)變化、濃度梯度($\frac{\Delta C}{\Delta x}$)變化、蒸散作用數據量取技術等等；當然我們也想針對基本的表面能量理論推導出微動力的產生源頭因素及量測方式做一次完整詳細的敘述、文獻探討及理論推導，以我們設計的微動力實驗更為堅實。最後我們將對微動力的應用做一些建設性的探討；諸如微血管藥物運送、半導體微管路系統之探討等，期望我們團隊能因這個研究，使我們的學能能因此大大提升。

貳、研究目的

一、研究目的

- (一)、微管內部液柱曲面表面張力探討
- (二)、毛細現象與表面張力引起的液柱曲面移動之微動力之研究
- (三)、微動力所引起的液柱曲面移動速率探討
- (四)、微管內部液柱曲面移動速率之變因探討
- (五)、微管內液柱兩端蒸散作用所造成表面張力變化探討
- (六)、毛細現象與表面張力引起的液柱曲面移動之液體表面能量理論推導
- (七)、微管剖面形狀(矩形、圓形及管徑)對液柱曲面移動速率之影響及液柱曲面之變化趨勢探討
- (七)、微管內部微動力之應用研究

二、研究問題

本研究將根據解決下列問題而規畫一連串實驗設計：

而本研究主要探討問題有：

- (一)微細小管(簡稱微管)內液柱兩端曲面因表面張力之不同所產生的不平衡力致使液柱曲面移動之微動力的表面能量的理論推導。
- (二)因微管之微動力產生的液柱兩端曲面不平衡力變化程度及液柱移動速率大小問題探討
包括：1. 溫度梯度變化之
2. 兩端液柱蒸散作用，微管兩端氣體壓力變化產生的不平衡力
3. 濃度梯度變化(或相接觸不同種溶液)
- (三)液柱曲面移動速率數據之其它變因數據量測
包括：不同變因(含微管管徑、剖面形狀、溫度梯度、濃度梯度)接觸角變化與曲面移動速率變化等
- (四)微管內部液柱微動力探討方式及可能應用

三、基本理論

在一個微管(micro-tube)中欲使一小流體塊在其內部傳動，一定要有作用力或不平衡力的作用，這種使極小流體塊的運動的力我們稱為微動力，而這小流體塊稱為微流體(microfluid)。而要使這一小流體塊產生不平衡力的因素很多，包括表面張力、光觸媒驅動力、氣體壓力差及一些光敏感物質的存在。而其中以表面張力的不平衡所產生的微流體現象最為普遍。

(一)表面張力理論：

在液體表面上受到內部同類分子之吸引力(內聚力，圖一)，因受力不平衡，有一指向內部的淨力，使液體表面積縮到最小，即表面張力。而因表面張力可使液面縮到最小，所以表面張力的大小值可定義為-----液面邊緣單位長度所受之垂直作用力。

$$T = \frac{F}{L} \quad \text{-----}(1)$$

液體表面張力 T

液面邊緣長度 L

垂直作用力 F

(二)毛細現象理論：

將充滿液體的細管倒放入液體中，液體柱會有上升或下降的現象即為毛細作用(圖二)。毛細現象主要是液體表面張力、內聚力及與管體之間的附著力的綜合表現，所以在微管中液柱兩端曲面可以藉兩端表面張力之變化造成的不平衡而產生移動的現象，此即為表面張力微動力研究。

$$h = \frac{2T \cos \theta}{\rho g R} \text{-----}(2)$$

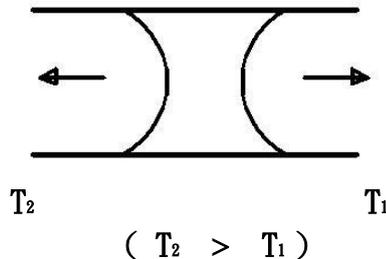
毛細現象液體上升下降高度 h
 液體表面張力 T
 液面接觸角 θ
 毛細管內半徑 R

(三)毛細管表面張力變化與接觸角關係理論

液體表面張力與溫度有密切的關係，溫度變化時液體與毛細管接觸會以變化的現象(式 2，圖三)，所以在液體表面作增溫實驗時，可看出液體接觸角的變化。

(四)微管內部液柱兩端曲面表面張力變化理論：

1. 液柱兩端曲面溫度梯度 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 產生之微動力



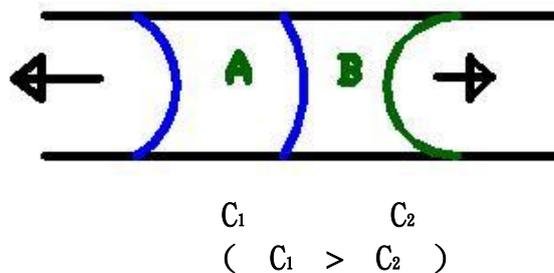
微管(毛細管)內部置放一滴液柱時，兩邊液柱曲面由於所在位置因溫度不同(存在溫度梯度 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$)

則兩邊曲面為了維持最小表面積，分別產生了大小不同的拉力(表面張力)，使微管的液柱產生移動，這就是表面張力所產生的微動力。

由於液體表面張力與液體溫度有密切的溫度，溫度越高則液體表面張力明顯變小。所以微管內部液柱在長度方向溫度梯度越大，則液柱曲面兩邊得表面張力明顯不同，使液柱兩測曲面產生不平衡的作用力，如此便可帶動液柱的移動，這就是表面張力微動力的產生。

我們可探討微管內部因表面張力變化所產生微管速率之變化。

2. 液柱兩端曲面溶液濃度梯度 $(\frac{\Delta C}{\Delta x})$ 產生之微動力

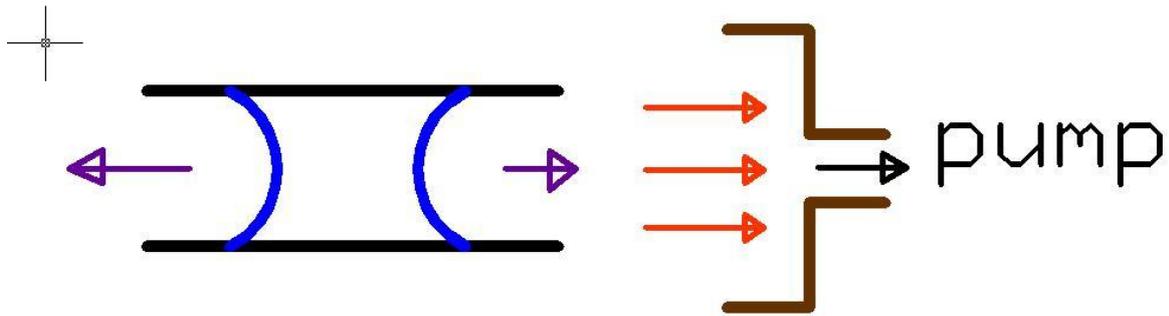


微管(毛細管)內部放置由兩種不同濃度溶液組成的液柱時，構成液柱的並排溶液有

濃度不同(存在濃度梯度 $\frac{\Delta C}{\Delta x}$)，則液柱兩端曲面因而產生不等大小的拉力(表面張力)，使微管的液柱產生移動這就是表面張力所產生的微動力。

3. 液柱兩端曲面因蒸散作用之所引起表面張力變化產生之微動力

微管液柱曲面兩端空間的大氣壓力會影響表面張力，所以在兩端空間如果實施抽氣作用(模擬蒸散作用)，則將產生兩端曲面表面張力的不平衡，如此微動力的現象便產生了



參、研究設備及器材

即時顯像顯微鏡、溫度偵測器、熱電偶、筆記型電腦、加熱帶、加熱墊片、不同管徑毛細管、小型變壓器、壓克力薄片、甲醇、蒸餾水、油酯

肆、研究過程及方法

一、建立微管微動力理論機制

- (一)表面張力、毛細現象理論推導
- (二)影響表面張力大小之物理變因探討及理論推導
- (三)因表面張力不平衡產生微動力現象的理論機制推導
- (四)因溫度變化所產生的表面張力變化之接觸角變動測試
- (五)利用微管內液體表面能量的觀念推導出產生微管內部液柱曲面之不平衡壓力。

二、表面張力微動力微管液柱曲面移動速率觀測系統建立

- (一)即時傳輸影像觀測顯微鏡建置(學校自購)
- (二)液柱曲面觀測顯微鏡鏡台設計(圖四)
- (三)液柱曲面觀測顯微鏡鏡台，溫度梯度平台建置(圖五)

三、微管內液柱兩端曲面因表面張力之不同所產生的不平衡力致使液柱曲面移動之微動力的表面能量的理論推導。

四、因溫度梯度($\frac{\Delta T}{\Delta x}$)變化之液柱曲面移動速率測定

- (一)不同溫度梯度之液柱曲面移動速率量測
- (二)加熱棒布置建立不同溫度梯度值

五、繼續進行蒸散作用產生微動力之相關實驗設計

- (一)利用白努力定律設計蒸散作用產生微動力實驗

六、因不同液體濃度($\frac{\Delta C}{\Delta x}$)或液體種類變化之液柱曲面移動速率測定

- (一)不同種類液體或濃度梯度變化之移動速率測量
- (二)調配不同濃度或不同種類液體液柱於微管(毛細管)中(圖六)

七、各種數據分析

- (一)速率計算及關係圖繪製
- (二)液柱曲面移動速率與相關物理變因之關係統整
- (三)微管剖面形狀(矩形、圓形及管徑)對液柱曲面移動速率之影響及液柱曲面之變化趨勢分析。

伍、研究結果

- (一)、由本研究設計的微管(毛細管)液柱曲面確可因部份物理變因產生微動力的現象。
- (二)、經由影響表面張力變因探討結果，確可證明。其中溫度變化確可看出液柱曲面接觸角隨溫度高低而變化(圖七)。
- (三)、本實驗研究之液柱曲面微動力現象主要由因溫度變化、濃度變化(不同種類溶液)及蒸散作用而產生的表面張力不平衡，使產生微動力現象。
- (四)、因微動力可使小液柱產生移動動力，基本微動力在我們研究中可表現出：

$$\text{液柱移動速率} \propto \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{液柱橫向溫度梯度}) \quad (\text{圖八 A、B, 表一、表二})$$

$$\text{液柱移動速率} \propto \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad (\text{液柱橫向濃度梯度}) \quad (\text{圖九})$$

- (五)、經由表面張力變因所產生微動力現象，都符合表面張力的理論及現象。
- (六)、除了溶液濃度不同之變因會使兩邊液體表面張力不平衡產生微動力現象外。不同種類液體亦會造成微動力現象。
- (七)、微管橫向不同溫度梯度將使微管內部液柱曲面移動速率以一定規律發生變化。
- (八)、不同種類液體或濃度梯度變化將使微管內部液柱曲面移動速率以一定規律發生變化。
- (九)、由於毛細微管的內徑會影響到內部液柱曲面的表面張力變化，在固定溫度梯度及濃度梯度下，本實驗結果可看出，較大管內徑的微管有較大的液柱曲面移動速率。
- (十)、矩形剖面微管(圖十)的液柱曲面移動速率在矩形剖面高度越大情況下造成較大的移動速率，而與矩形剖面寬度無直接上的速率關係。
- (十一)、藉我們實驗的微動力產生，將可利用液柱曲面移動去帶動極微細物體的運送(圖十一)。

陸、討論

- (一)、利用液柱兩端液面表面張力的不平衡，可在微管內部液柱產生一股微動力。
- (二)、利用特別設計的微管橫向溫度梯度、濃度梯度均會使微管兩端的液面表面張力產生不平衡，而微動力便在此種狀況下產生。
- (三)、微管液柱兩端的蒸散作用對微管微動力產生極不明顯。除非蒸散作用系統效率能更提高，否則對毛細微管的微動力影響將趨於微小。
- (四)、由本研究所設計的實驗得知；
 - (1)微管內部液柱移動速率隨著微管橫向溫度梯度增大而遞增。
 - (2)微管內部液柱移動速率隨著微管橫向濃度梯度比值增大而遞增(圖十二 A、B、C、D)。
- (五)、由於毛細微管的內徑會影響到內部液柱曲面的表面張力變化，因較大微管內徑具有較長邊緣的液柱曲面，在固定溫度梯度及濃度梯度下，會產生較大值的液柱曲面移動速率。
- (六)、矩形剖面微管的管道高度 h 決定液柱曲面移動速率大小(圖十三 A、B)，主要是 h 值越大，則產生表面張力液柱移動的壓力差(Δp_{la})變小，致造成較小的液柱移動速率。而管道寬度 w 較大，反而因為接觸邊緣較長，黏滯係數較大，故液柱移動無明顯變快趨勢。
- (七)、本實驗將繼續從事本實驗研究的微動力的量化推導工作，以便實際的應用工作，包括半導體工程及微量物質的運送等應用。

柒、結論

- (一)、微管微動力之產生可由微管兩側的表面張力不平衡而產生。
- (二)、本研究實驗結論得知微管液柱兩側曲面表面張力的不平衡，可由微管橫向溫度梯度、橫向濃度 梯度及不同種類液體並存來產生。而這些條件都是可以以實驗設計加已完成。
- (三)、隨著微管橫向溫度梯度及濃度梯度的增加會使微管內液柱移動速率隨之遞增。
- (四)、在固定的溫度梯度及濃度梯度下，不同微管內徑可產生微動力帶動的液柱速率不同。主要是因為較大內徑微管會產生較長的邊緣長度，如此會產生較大微動力。
- (五)矩形剖面微管高度 h 越大，微管內部液柱移動速率變小。而微管寬度 b 造成接觸邊緣變長，黏滯係數變大，液柱速率較無明顯變化。
- (六)、微管(毛細管)微動力的產生可藉由自然界的微小力量加以促成，其中表面張力是極不受摩擦、空氣阻力影響的自然界作用力，將是微管微動力研究的最佳方向。
- (七)、矩形剖面微管道的高度 h 決定內部液柱曲面移動速率，主要是造成液柱曲面移動的壓力差 (Δp_{la}) 隨著管道高度 h 增加而變小(推導式 3、4)

$$f_{la} \cos \theta + f_{sl} = f_{sa}$$

$$(A_T - A_x)f_{sa} + A_x f_{sl} + E_0 = E_s$$

$$E_s = E_0 + [A_T f_{sa} + A_x (f_{sl} - f_{sa})]$$

$$\begin{aligned} E_s &= E_0 + [(2lh + 2lw)f_{sa} + (2xh + 2xw)(f_{sl} - f_{sa})] \\ &= E_0 + 2(h+w)[lf_{sa} - x(f_{sa} - f_{sl})] \end{aligned}$$

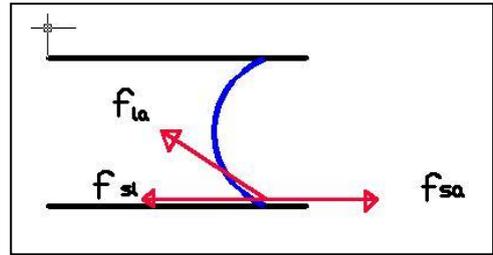
$$F_s = -\frac{dE_s}{dx} = 2(h+w)(f_{sa} - f_{sl}) = \Delta p_{la} wh \quad \text{-----(3)}$$

$$\Delta p_{la} = \frac{2(h+w)(f_{sa} - f_{sl})}{wh} \approx \frac{2(f_{sa} - f_{sl})}{h}$$

$$h \ll w$$

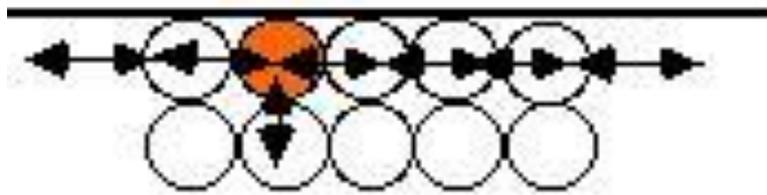
$$\Delta p_{la} \approx \frac{2(f_{sa} - f_{sl})}{r} = \frac{2f_{la} \cos \theta}{r} \quad \text{-----(4)}$$

由推導式(1)及(2)可以知道微管內部液柱曲面移動的主因在於液體表面張力之不平衡所產生壓力差 (Δp_{la})

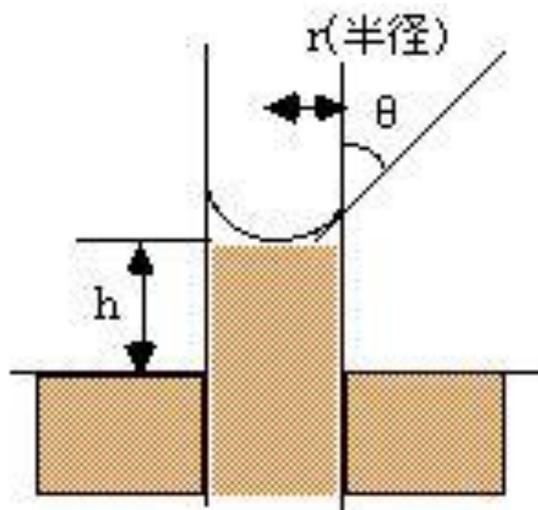


捌、參考資料及其他

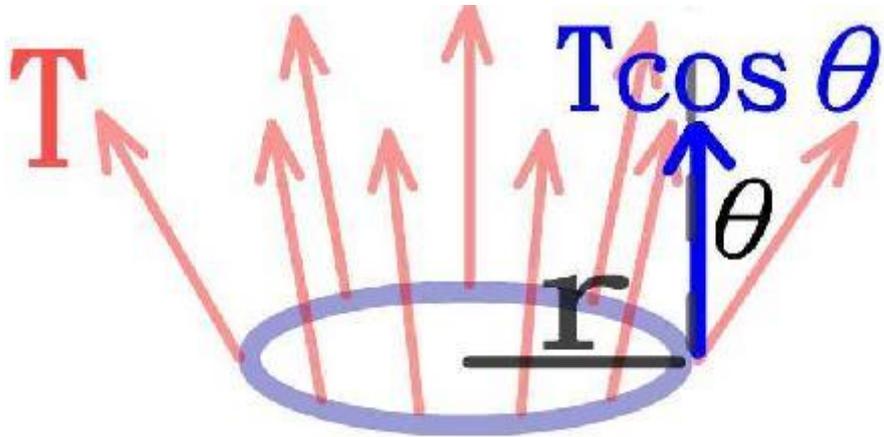
- | | | | | | |
|-----------------|--------|--|--------------------|------|------|
| 一、Lung-Jieh | 2004 | j. of micromechanics and microengineering
v. 14 | 220-225 | | |
| 二、Ken Nagai | 2007 | Spontaneous irregular motion of an Alcohol droplet
Research institute for Mathematical Sciences Kyoto
University Kyoto | | | |
| 三、Pengtao Yue | 2005 | Colloid and interface Science | 281-288 | | |
| 四、呂宗昕 | (民 92) | 奈米科技與光觸媒 | 128-144 | 台北市 | 商周 |
| 五、計光華 | 2009 | 微流動及其元器件 | 261-267
269-277 | 北京市 | 高等教育 |
| 六、周怡吟 | (民 98) | 植物運輸水份的物理機制 | 1-8 | 台南市 | 協同中學 |
| 七、Wang Jinliang | 1999 | 化工學報 | v. 50 No. 4 | 1-13 | |
| 八、許坤霖 | (民 91) | 高分子流體於微米尺度管道內流動特性模擬與研究 | 1-13 | 桃園縣 | 中原大學 |
| 九、陳正昇 | (民 95) | 高中物理(下) | 279-290 | 台北市 | 龍騰文化 |
| 十、趙修武 | (民 91) | 以理論與實驗方法研究表面張力微管流動現象 | | 桃園縣 | 中原大學 |



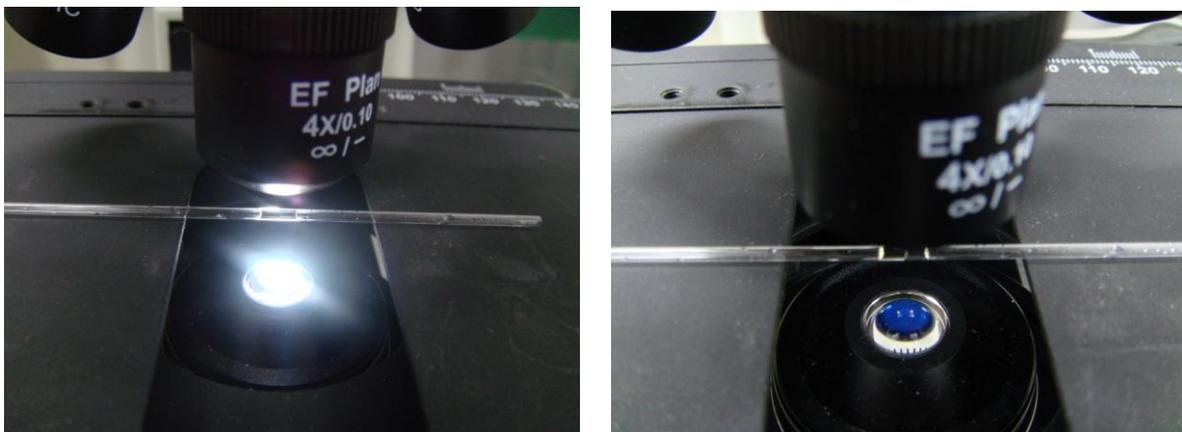
圖一 液體表面分子之總引力小於液體內部之內聚力，故使液面縮到最小面積



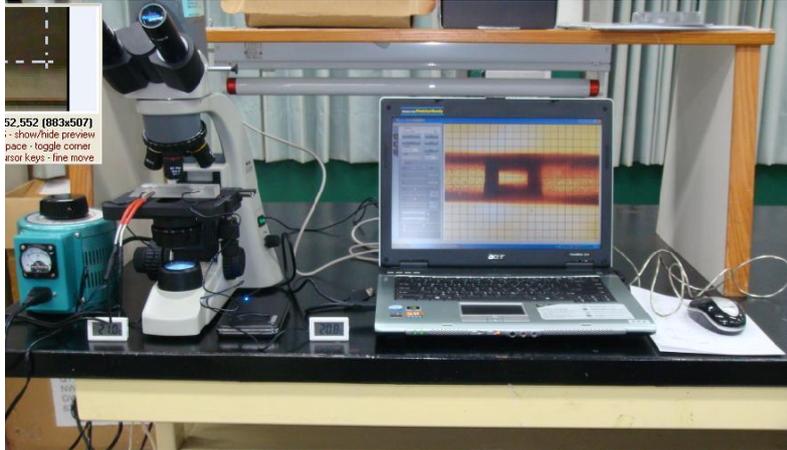
圖二 由於液體與管壁之附著力與液體表面張力之總合大於液體之內聚力所以液面將升高使成液柱且呈凹狀



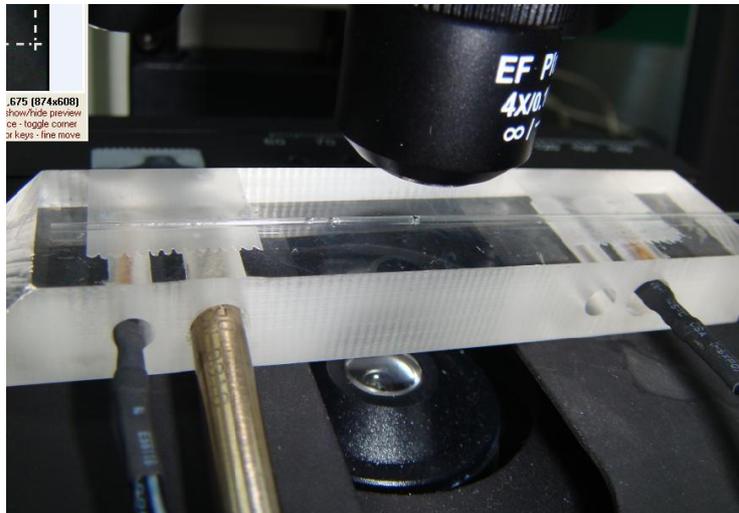
圖三液柱曲面與鉛直方向之夾角越大則表面更形增加



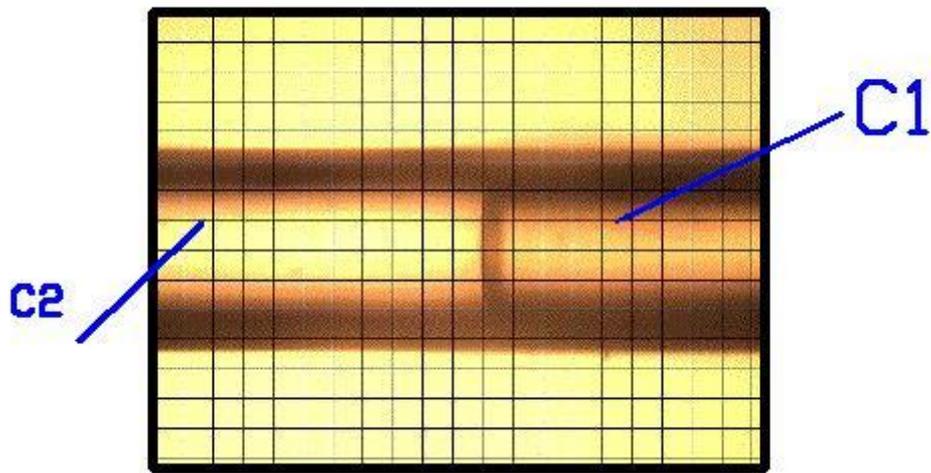
圖四 利用可即時傳輸影像觀測顯微鏡可設計為微管
(毛細管)內液柱曲面變化的觀測主力



整個微管橫向溫度梯度變化可由加熱棒及變壓器製造情境

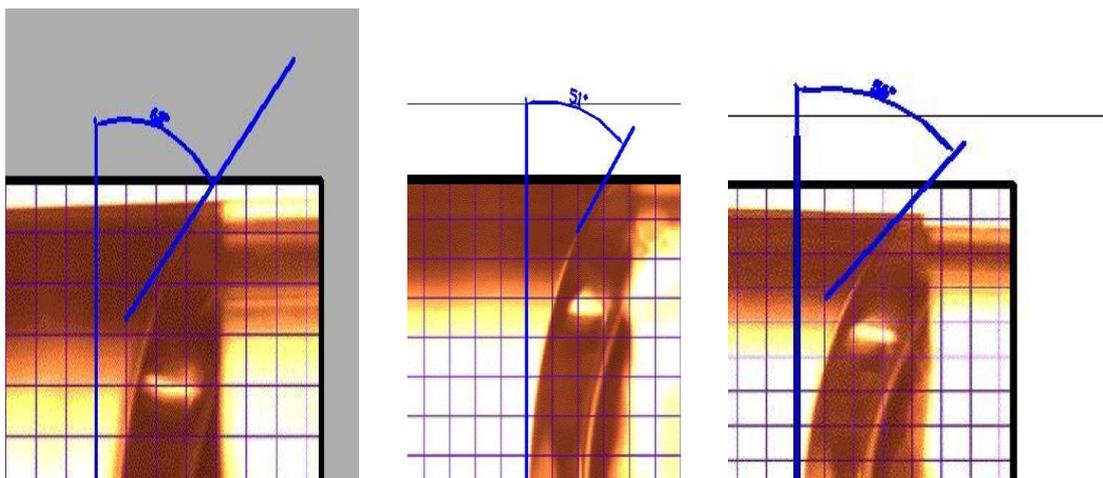


圖五 自行設計之微管液柱溫度梯度觀察台座
(主要是利用加熱棒隔開加熱造成溫度梯度)

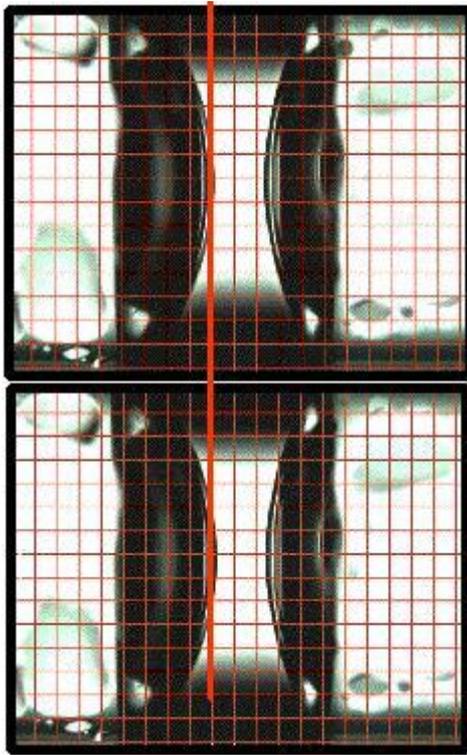


微管液柱移動方向 ←←←←

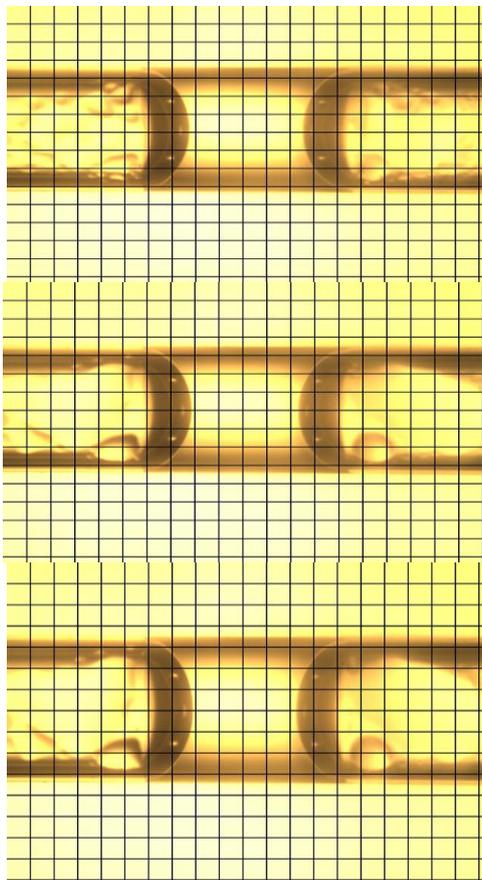
圖六 不同種類或不同濃度雙液柱，因表面張力不同使雙液柱拉扯產生微動
 (右為 DSD 界面活性劑，左為蒸餾水)
 (液柱往右移動)



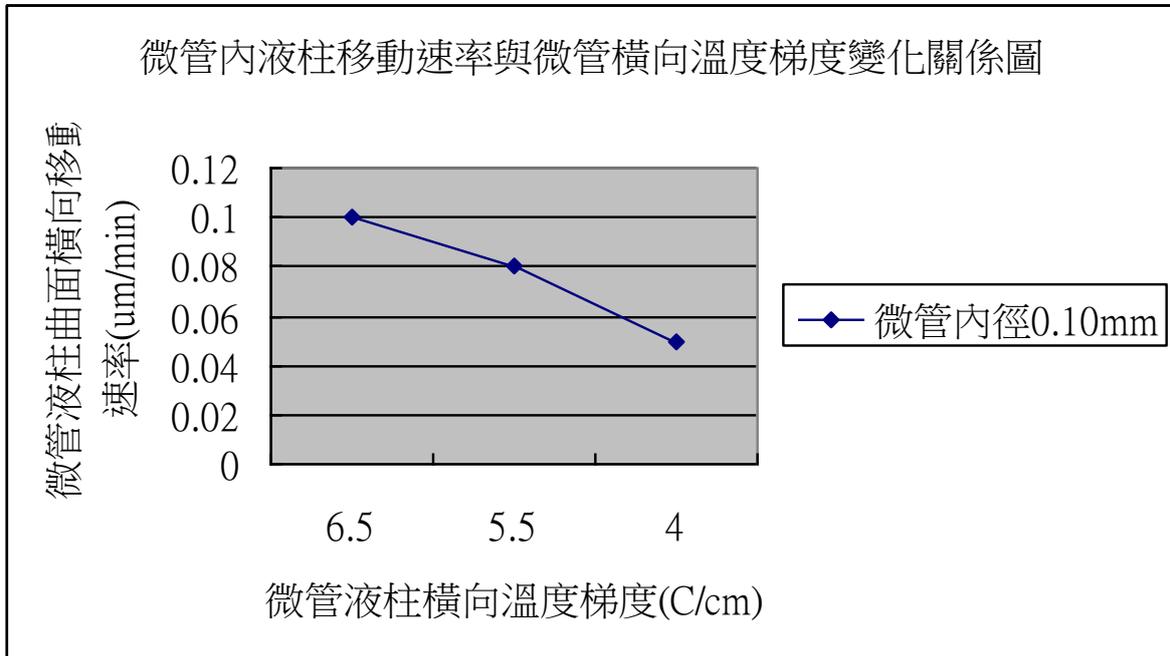
圖七 由左至右微管溫度越低
 (所以最低溫液柱曲面呈現較大接觸角)



圖八 A (整個微管內液柱左邊溫度較高, 故產生向右之微動力, $T_L > T_R$, SDS)

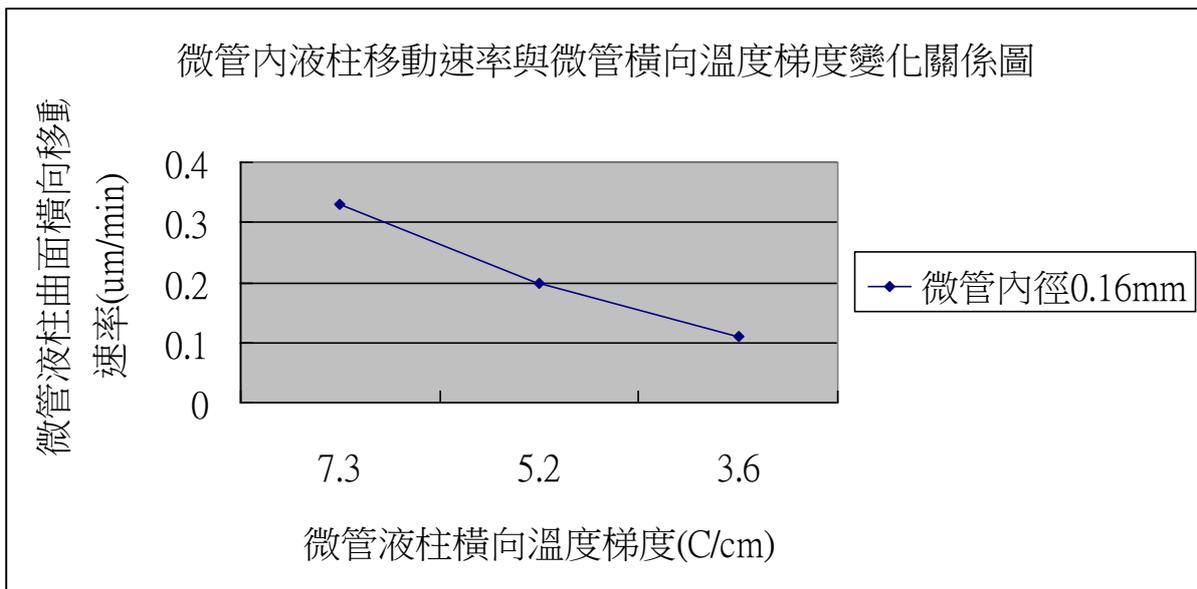


圖八 B (整個微管內液柱左邊溫度較高, 故產生向右之微動力, $T_L > T_R$, 甲醇)



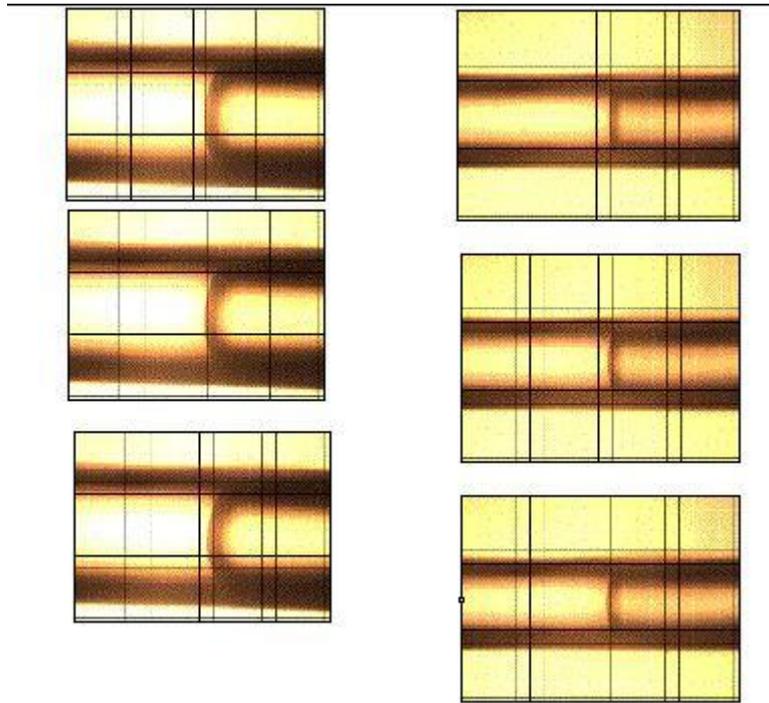
表一 由此圖看出，微管液柱溫度梯度越大，則液柱移動速率越大, 微動力越明顯

(微管內徑 $0.10\mu\text{m}$, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ $6.5 \sim 4.0 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, $0.1 \sim 0.05 \mu\text{m}$)

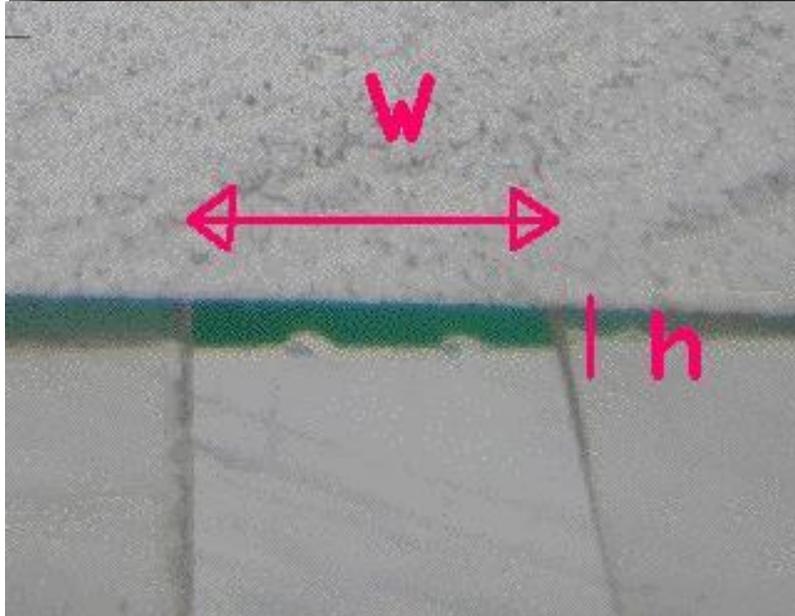
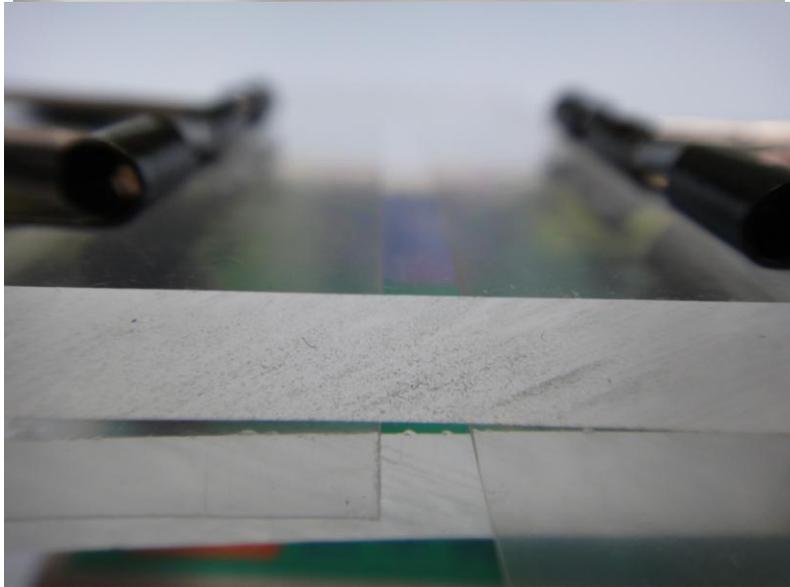
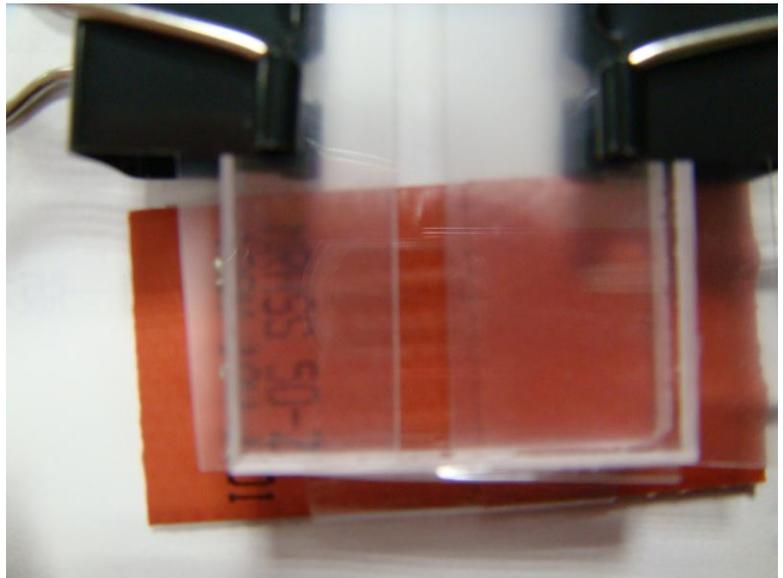


表二

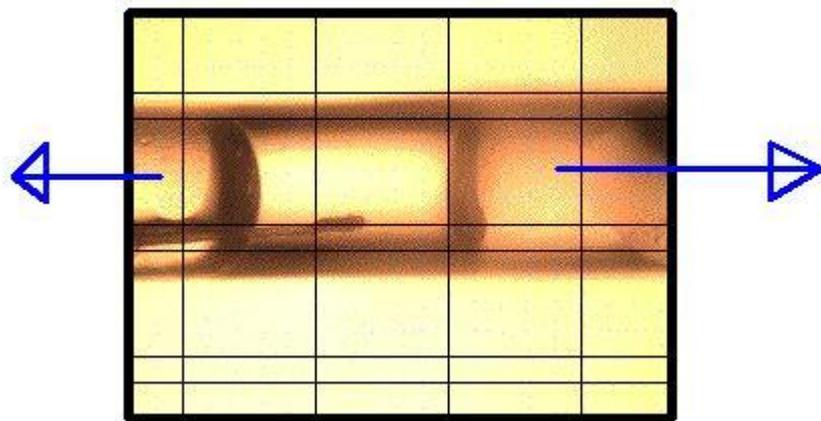
(微管內徑 $0.16\mu\text{m}$, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ $7.3 \sim 3.6 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, $0.36 \sim 0.1 \mu\text{m}$)



圖九 相鄰不相同兩液柱，表面張力大者將使產生之微動力向相同方向
(左：水 右：SDS)

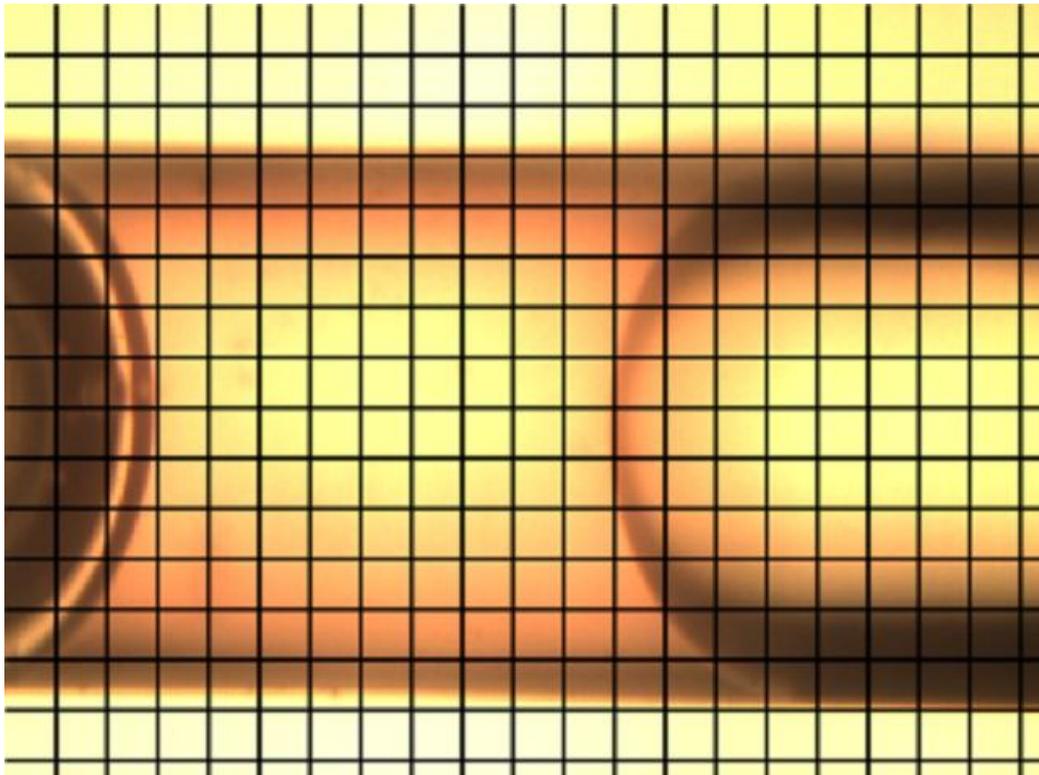


圖十. 本實驗矩形剖面微管設計



微管液柱移動方向 →→→→→

圖十一 利用本實驗研究微管之微動力帶動細線運動之試作實驗
(左：SDS 右：純水)

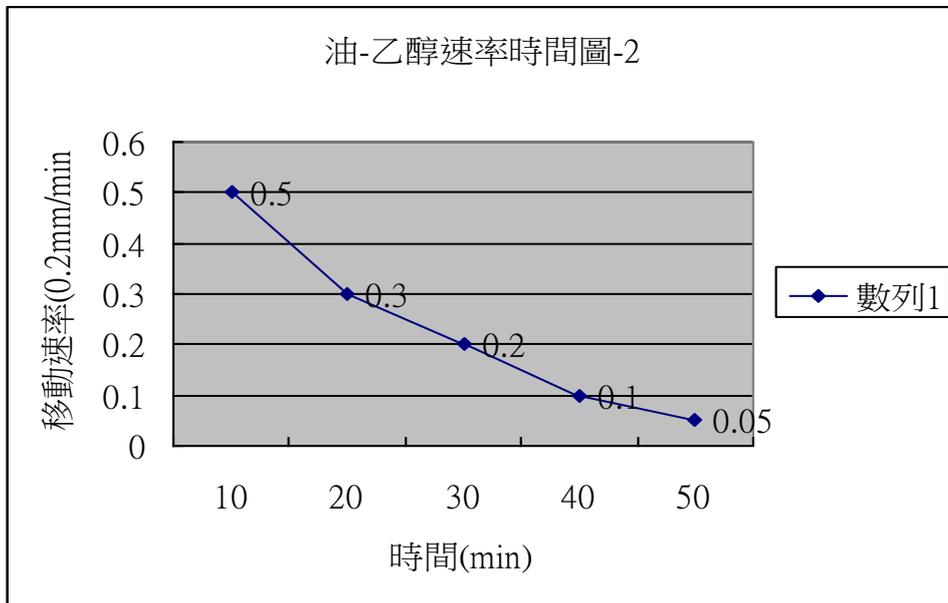


醇類

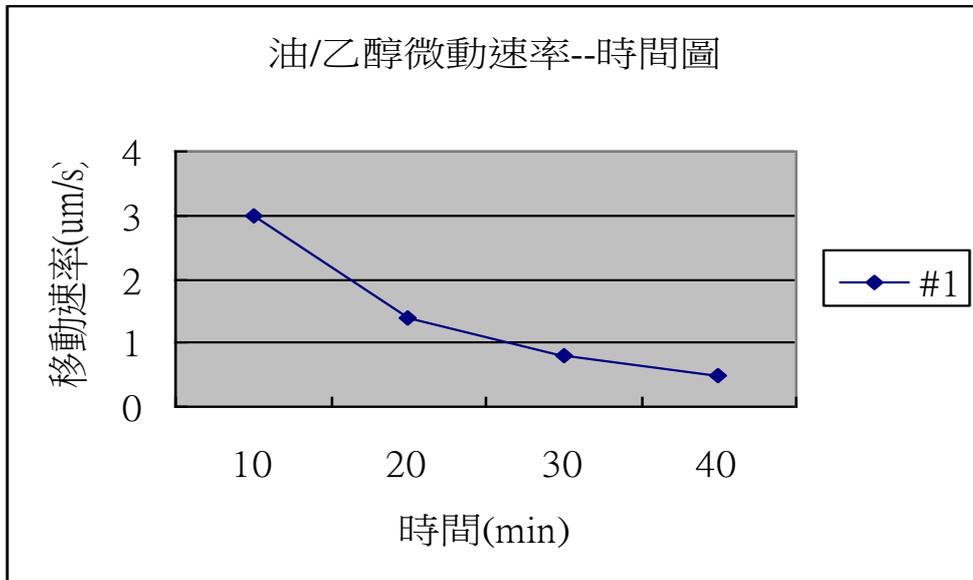
油

圖十二 A 微管內不同種類溶液相接合所形成微動力大小(液柱移動速率)
與參與之種類溶液體積有關

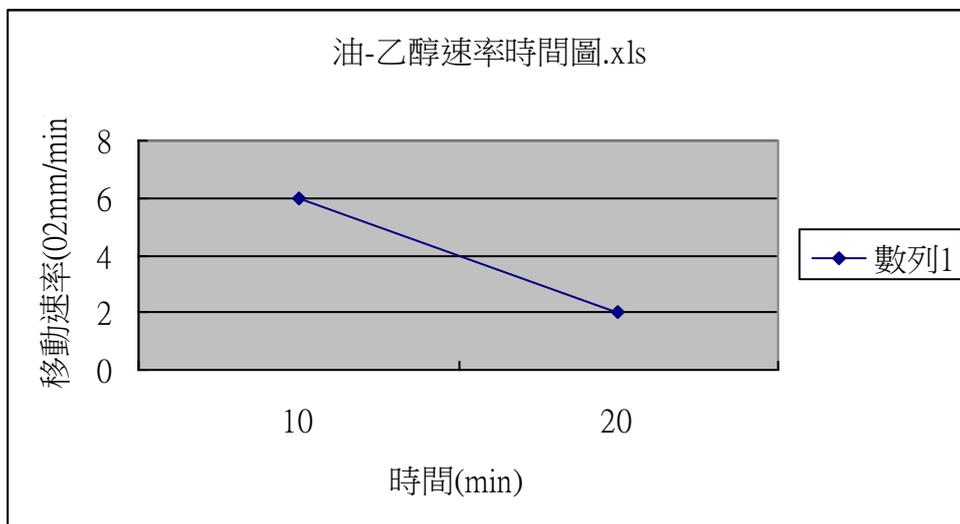
本實驗以 $\frac{\text{醇類(酒精)}}{\text{油}}$ 之體積比(液體長度比值 $\frac{LM}{LO}$)來量取液柱移動速率變化趨勢



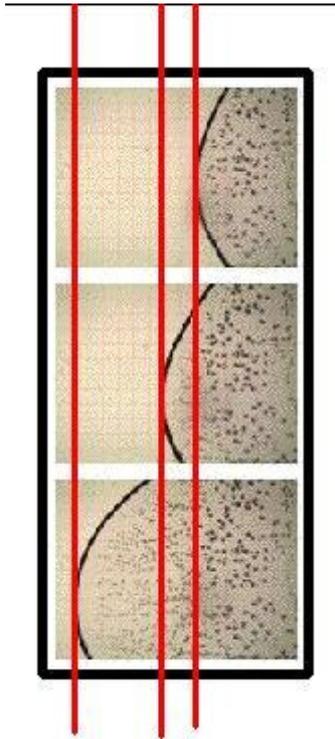
圖十二 B
 $\frac{LM}{LO} = 2.0$



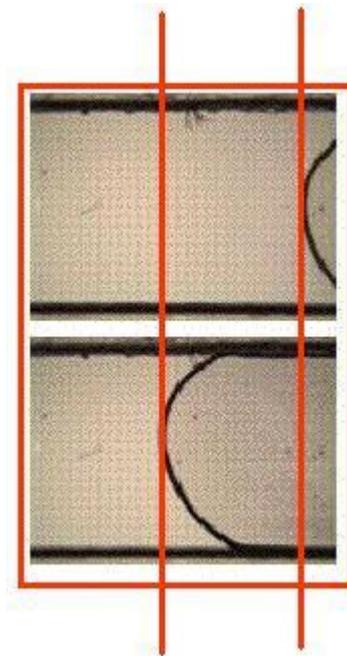
圖十二 C
LM/L0 = 1.8



圖十二 D
LM/L0 = 1.22



圖十三 A 矩形剖面為管道，管道高度 h 越大，則液柱曲面移動速率越小
($h = 0.1\text{mm}$)



$h = 0.15 \text{ mm}$

圖十三 B 矩形剖面微管道的高度 h 決定內部液柱曲面移動速率，主要是造成液柱曲面移動的壓力差 (Δp_{la}) 隨著管道高度 h 增加而變小(推導式 3、4)

【評語】 040108

此作品探討微管中微動力現象，研究動機在生物醫學及半導體，有其應用衍生價值。其運用的方法相當有系統性，雖然研究成果定性結果可信度高，但定量尚須更多實驗佐證。