

# 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051806

翻滾吧水滴－奈米碳黑砂紙疏水性質與水滴在  
其表面滾動機制之探討

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 許景茹 高二 劉 暢	指導老師： 徐志成 許永昇
-------------------------	---------------------

關鍵詞：滾動角、疏水性、靜摩擦係數

## 摘要

本研究探討奈米碳黑砂紙表面之滾動角、接觸角、靜摩擦係數與水滴大小關係。使用防水噴劑、氟素和碳黑處理不同型號之砂紙表面。利用接觸角、滾動角探討其不同表面、不同體積水滴之疏水性差異。斜面法與力感測器則測量靜摩擦係數差異。結果顯示碳黑砂紙上水滴體積越大，水滴的長短軸比值、接觸角皆增加，液滴接觸固體表面積的比例會變小，滾動角也變小。透過砂紙顆粒與碳黑可模擬出如植物葉片表面的突起物與絨毛。根據理論所推得的液滴接觸固體表面積之比例越大，滾動角越大，因水滴與載體間形成空氣層，使水滴較容易下滑。並發現砂紙疏水性最佳的為型號1000之碳黑砂紙，其接觸角145.1度，滾動角3.7度，液滴接觸固體表面積之比例0.13。

## 壹、研究動機

在生活中我們會觀察到蓮葉、荷葉等植物葉片上的水滴形狀近似，葉片稍微傾斜水滴就會滑落，我們好奇當水滴體積越大時，是否也會近似球狀？是否會更容易滑落？然而，葉片會有生長年齡、生長環境、乾枯等變數，所以想自製疏水性表面。在過去的研究中大多數都使用精密儀器來進行研究，不過也有發現前人曾使用砂紙進行研究，其使用砂紙型號較小，顆粒密度較大，且只利用含氟化物來造成疏水性，因此我們想用更多種不同的方法自製疏水性的表面，並用其進行研究。

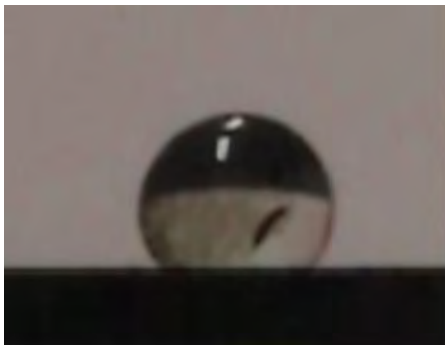


圖1 碳黑砂紙上的水滴

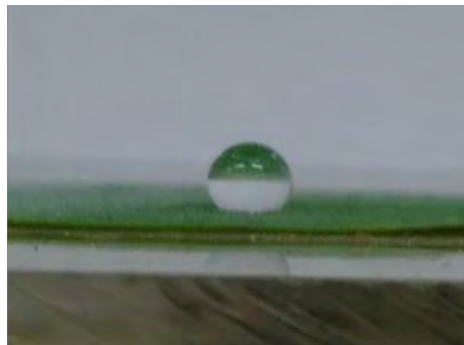


圖2 芋葉上的水滴

## 貳、研究目的

本研究目的如下：

- 一、探討經過特殊處理之不同粒徑的非奈米結構是否能達到超疏水性。
- 二、探討經不同處理載體之疏水性差異。
- 三、探討不同體積水滴之形變與接觸角、滾動角差異。
- 四、探討不同微結構下之靜摩擦係數關係。

### 參、研究設備及器材

本研究使用的研究設備及器材如下：

1. 砂紙（美式規格型號：100、220、320、400、600、800、1000砂紙型號之數字為每平方英寸內之顆粒數量）
2. 防水噴劑（成分含二氧化矽、氟化物、推進氣體）
3. 氟素（聚四氟乙烯）
4. 數位量測主機(GLX)與力感測器
5. 1cc空針（每單位刻度0.01cc）
6. 大木塊（10\*3.3\*2.7cm，因木塊質量過輕，加上砝碼）
7. 小木塊（3.2\*1.2\*2.3cm）
8. 逆滲透水
9. 打火機
10. 蠟燭
11. 50g砝碼\*5
12. 碳粉

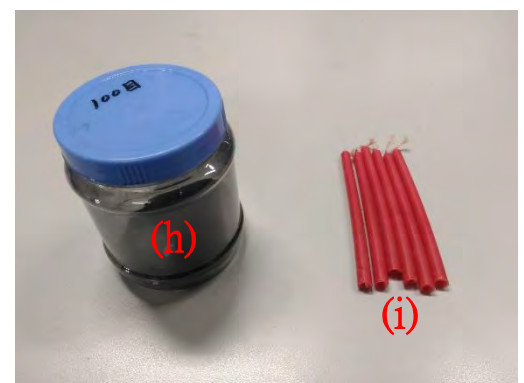


圖3 實驗器材 (a)砂紙 (b)數位量測主機與力感測器  
(c) 防水噴劑 (d) 氟素 (e)空針 (f)大木塊  
(g)小木塊(h) 碳粉 (i) 蠟燭

## 肆、研究過程與方法

### 一、原理:

#### (一)、奈米碳黑

碳黑的製程分為兩種，分別為熱分解法與不完全燃燒法，以蠟燭(芳香族碳氫化合物)為原料的碳黑製法屬於不完全燃燒法，蠟燭在燃燒過程中，首先，固態蠟受熱成液態蠟油，再經燭芯上升受熱成蠟蒸氣，最後形成二氧化碳和水蒸氣。若在燃燒過程中晃動燭火，燃燒便會不完全而冒出黑煙，生成多環芳香族碳氫化合物，再生成初期的碳核，碳核互相碰撞形成基本顆粒，經過集結後形成凝結體。此時以一載體在燭火上晃動，即可吸附黑煙而取得碳顆粒，其表面粒徑約為10~30nm，其表面為疏水性表面。

碳黑依大小可分為基本顆粒(primary particle)、凝結體(aggregate)、凝結塊(agglomerate)三種程度。凝結體與凝結塊的區別為，凝結體：由數個基本粒子以面對面的接觸方式凝結而成，結合力較強且結構較為緊密，明顯減少粒子的總表面積，較難分散。凝結塊：由數個基本粒子以角對角或邊對邊形成，結合力較弱且結構較為鬆散，較易打散[6]。

#### (二)、疏水性：

疏水性指的是一個分子與水互相排斥的物理性質。疏水性分子偏向於非極性，並因此較會溶解在中性和非極性溶液。疏水性分子在水裡通常會聚成一團，而水在疏水性溶液的表面時則會形成一個很大的接觸角而成水滴狀。製造疏水性表面有兩種方法，其一，化學方法，超低表面能(super low surface energy)之原理，乃在化學特性上尋求低表面能粘著劑及添加物，最普遍的低表面能添加物即氟化物系列，可在特定表面上建造具疏水特性之表面。其二，物理方法，建構適當尺度內之表面粗糙度(surface roughness)，即應用物理之特性，建構次微米或奈米尺度表面粗糙結構以增加表面粗糙度[1]。

#### (三)、接觸角：

氣體環繞的固體表面的液滴，形成接觸角 $\theta$ 。液體與固體的接觸角介於 $90^\circ$ 至 $150^\circ$ 之間時為疏水性表面，大於 $150^\circ$ 時為超疏水性表面。

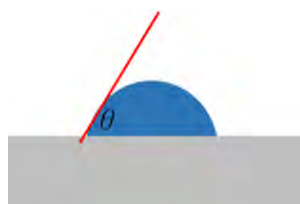


圖4 接觸角示意圖

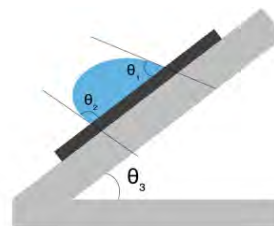


圖5 滾動角( $\theta_3$ )示意圖

#### (四)、滾動角：

滾動角是指液滴在傾斜表面上剛好發生滾動時，傾斜表面與水平面所形成的臨界角度，疏水性越強，滾動角越小。一物體表面欲達到超疏水性，除了接觸角需大於 $150^\circ$ 之外，其傾斜時使水滴下滑的滾動角亦須小於 $20^\circ$ 。

#### (五)、表面張力：

液體內部分子周圍有大量分子，因此內部分子的分子勢能較低。然而，表面層中的分子周圍的分子明顯小於液體內部分子的，所以表面層中的分子有較高的分子勢能。為了達到低能量的穩定狀態，表面層中的分子有向液體內部移動的趨勢，從而導致表面層中的分子數量減少，宏觀表現為液體表面積減小。

熱力學對表面張力係數的廣義定義為：表面張力係數 $\sigma$ 是在溫度 $T$ 和壓力 $p$ 不變的情況下吉布士自由能 $G$ 對面積 $A$ 的偏導數： $\sigma = \partial G / \partial A$

水的表面張力隨溫度 $T$ 變化的經驗近似方程為： $\sigma = 0.07275 \times (1 - 0.002 \times (T - 291))$

#### (六)、附著力：

是兩種不同物質接觸部分的相互吸引力。分子力的一種表現。只有當兩種物質的分子十分接近時才顯現出來。兩種固體的一般不能密切接觸，它們之間的附著力不能發生作用；液體與固體能密切接觸，它們之間的附著力能發生作用。例如塗料與所塗敷的物體之間具有附著力。

#### (七)、楊氏方程式(Young's equation)：

在1805年由Young提出的楊氏方程式，主要闡述了在光滑表面上界面張力的平衡與接觸角的關係，其示意圖與方程式如下：

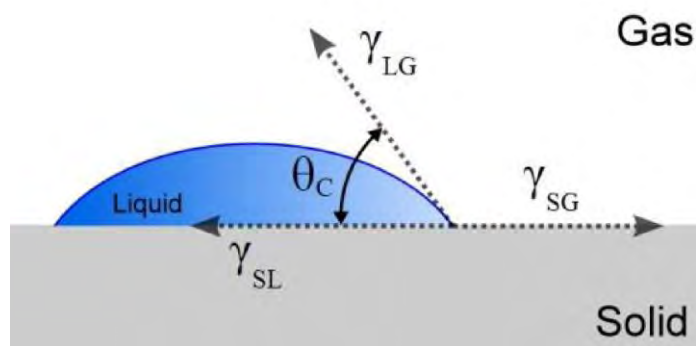


圖6 楊氏示意圖[2]

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \text{ -----(1)}$$

其中

$\gamma_{SG}$ ：固體和氣體之間表面張力

$\gamma_{SL}$ ：固體和液體之間表面張力

$\gamma_{LG}$ ：液體和氣體之間表面張力

$\theta$ ：接觸角

(八)、Wenzel model與方程式：

由於楊氏方程式假設固體表面光滑，因此適用範圍較少，在1936年，Wenzel對楊氏方程式在粗糙表面上做修正，提出液滴在粗糙表面上會完全接觸固體表面，液滴接觸角會與光滑表面上的本質接觸角相差一個係數，此係數代表表面的粗糙程度，為固體表面積與投影面積的比值[2]。

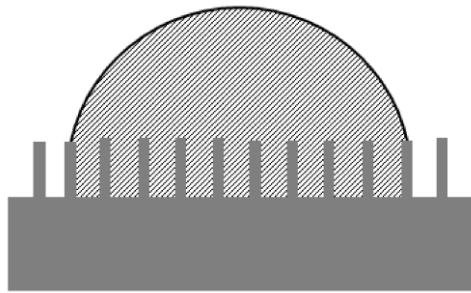


圖7 Wenzel model 示意圖[2]

$$\cos \theta_W = D \cos \theta_C = D \left( \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \right) \text{ -----(2)}$$

其中

D：粗糙係數

$\theta_W$ ：Wenzel model之接觸角

$\theta_C$ ：楊氏方程式之接觸角

(九)、Cassie and Baxter model與方程式：

在1944年，Cassie 和Baxter提出不同於Wenzel 的觀點，認為液滴在粗糙表面上不會完全接觸表面，而會懸浮於粗糙表面上，在液滴下面會有接觸氣體的部分，並提出固液接觸面積比例的概念，在粗糙表面上呈現的接觸角會與液滴接觸固體及氣體的比例有關。



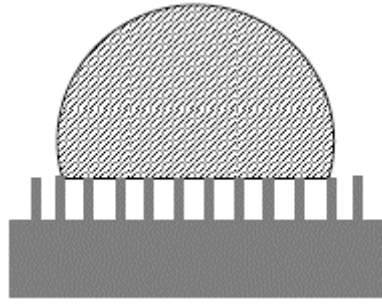


圖8 Cassie and Baxter model 示意圖[2]

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \text{ -----(3)}$$

$\theta_{CB}$  : Cassie and Baxter model 之接觸角

$f_1$  : 液滴接觸固體表面積的比例

$f_2$  : 液滴接觸氣體表面積的比例

$\theta_1$  : 液滴於固體表面之接觸角，即楊氏方程式中的 $\theta$

$\theta_2$  : 液滴於空氣之接觸角

其中液滴在空氣中呈球狀，因此 $\theta_2$ 等於 $180^\circ$ ，且 $f_1 + f_2$ 為接觸面積比例相加，因此總和恆等於1。將數值及關係代入可將原式化簡如下：

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_1 + f_1 - 1 \text{ -----(4)}$$

經換算得

$$f_1 = \frac{\cos \theta_{CB} + 1}{\cos \theta_1 + 1} \text{ -----(5)}$$

將顆粒最小的砂紙磨至光滑，測量其接觸角並帶入 $\theta_1$ ，也帶入碳黑砂紙的接觸角 $\theta_{CB}$ ，計算出 $f_1$ ，比對液滴接觸固體表面積的比例對接觸角關係，如圖9所示：

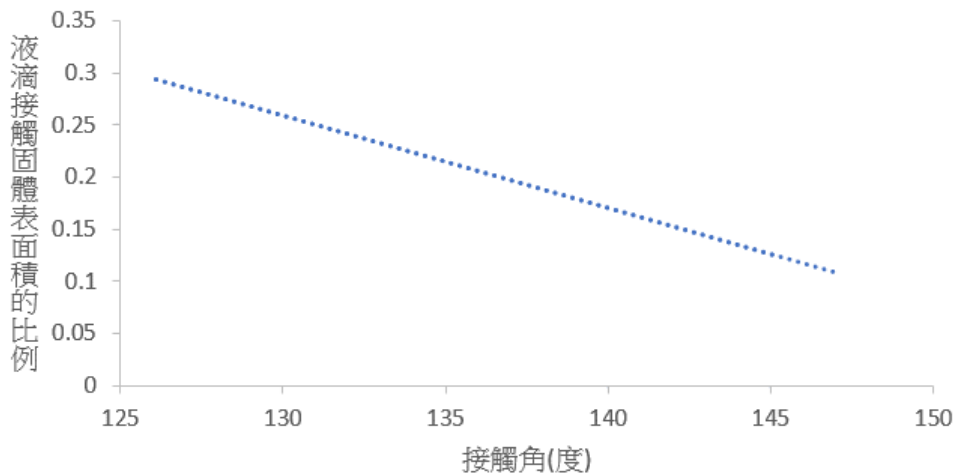


圖9 液滴接觸固體表面積的比例對接觸角關係

## 二、研究方法

### (一)、碳族的選擇

用膠帶分別黏100目炭粉和6B鉛筆筆芯，模仿類似石墨烯的載體，並滴水觀察。

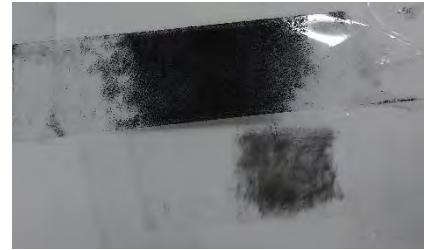


圖10 100目炭粉(上)、6B鉛筆(下)



圖11 炭粉載體上的接觸角



圖12 6B鉛筆載體上的接觸角

接觸角分別為炭粉107.2與6B鉛筆88.1，接觸角皆不如碳黑大

### (二)、砂紙的選擇

使用複式顯微鏡（150X）觀察不同型號砂紙，可發現當砂紙型號越大，砂粒密度越高，同時顆粒也越小，如附錄一所示。

由圖13可知，平均顆粒直徑與砂紙型號成反比，在後續研究結果中會以粒徑大小取代砂紙型號。

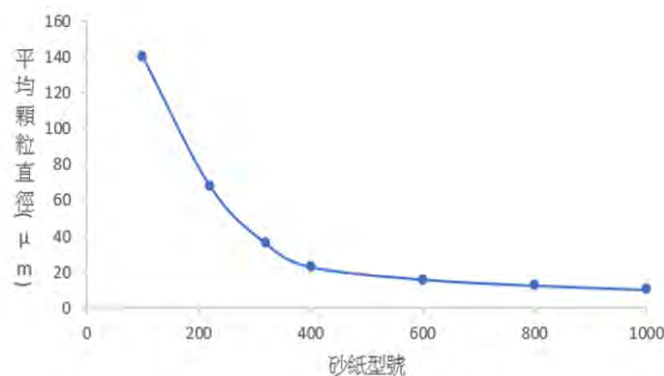


圖13 平均顆粒直徑對砂紙型號關係

### (三)、載體設計：

1. 未經處理的型號100、220、320、400、600、800、1000砂紙。
2. 使用防水噴劑，噴頭與上述砂紙面約距10公分，使噴劑盡量均勻附著在砂紙表面，並等待其乾燥後再進行實驗。
3. 將上述砂紙浸泡到氟素裡，並等待其乾燥後再進行實驗。
4. 用蠟燭在上述砂紙表面均勻燻上一層碳黑，燻上碳黑的速率在一百平方公分的範圍內約為每分鐘0.214公克，如圖14所示。

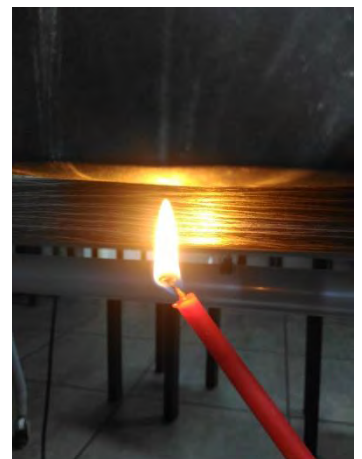


圖14 燒製碳黑裝置圖



#### (四)、實驗設計:

##### 1. 探討經過不同處理的砂紙之疏水性

(1)測量接觸角:用針筒滴定量的水(0.02cc)在載體上，並使用數位相機配合放大鏡以水平角度拍攝，如圖15所示。

(2)滾動角:增加傾斜角度  $\theta$  直到水滴滑落，並測量滑落時之傾斜角，如圖16所示。

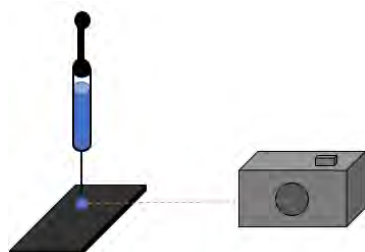


圖15 測量接觸角示意圖

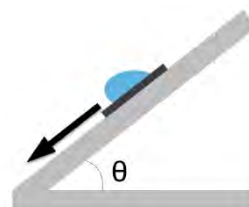


圖16 測量滾動角示意圖

##### 2. 探討經過不同處理的砂紙之靜摩擦係數

(1)利用斜面法:靜摩擦係數  $\mu = \tan \theta$ ，紀錄恰滑落時之傾斜角，如圖17所示。

(2)使用力感測器測量:確認靜摩擦係數，如圖18所示。

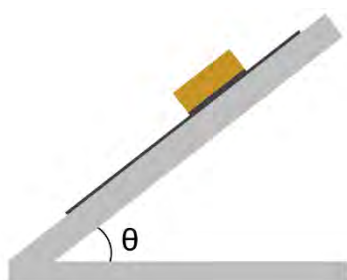


圖17 斜面法示意圖



圖18 力感測器裝置圖

#### (五)、探討不同質量水滴之形變

取型號100和型號1000的碳黑砂紙，在上面分別滴上0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴，如圖19所示，並測量其長短軸比值。

#### (六)、探討不同質量水滴之疏水性

取型號100和型號1000的碳黑砂紙，在上面分別滴上0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴，並測量其接觸角及滾動角。



圖19 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴

(七)、接觸角測量方法:

1. 利用電腦軟體(keynote)，以水滴兩邊與載體接觸點畫圓，找出圓心，從圓心畫一直線A連接接觸點，再畫一垂直於A之直線B，即直線B為切線，而直線B與水平線的夾角即為接觸角，如圖20所示。
2. 量高法利用液滴截面為圓的一部分進行計算，藉由量測液滴高度及與固體表面接觸面之直徑，可得到接觸角角度，其示意圖及方程式如下：

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{2h}{d} \text{ -----(6)}$$

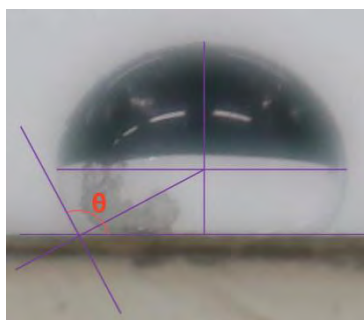


圖20 接觸角量測示意圖

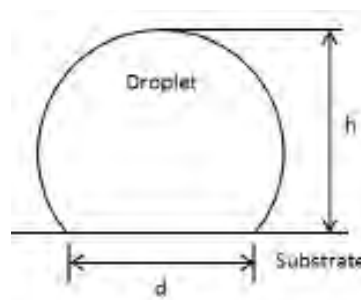


圖21 量高法示意圖 [2]

由於量高法利用液滴的h、d做計算，但實際液滴的h、d差異並不大，造成誤差極大，因此接觸角的量測上皆使用斜面法。

## 伍、研究結果

### 一、水滴在不同載體上的接觸角變化

用針筒滴定量的水(0.02cc)在經不同處理的砂紙上，並量測其接觸角，比對接觸角對平均顆粒直徑關係，如圖22所示：

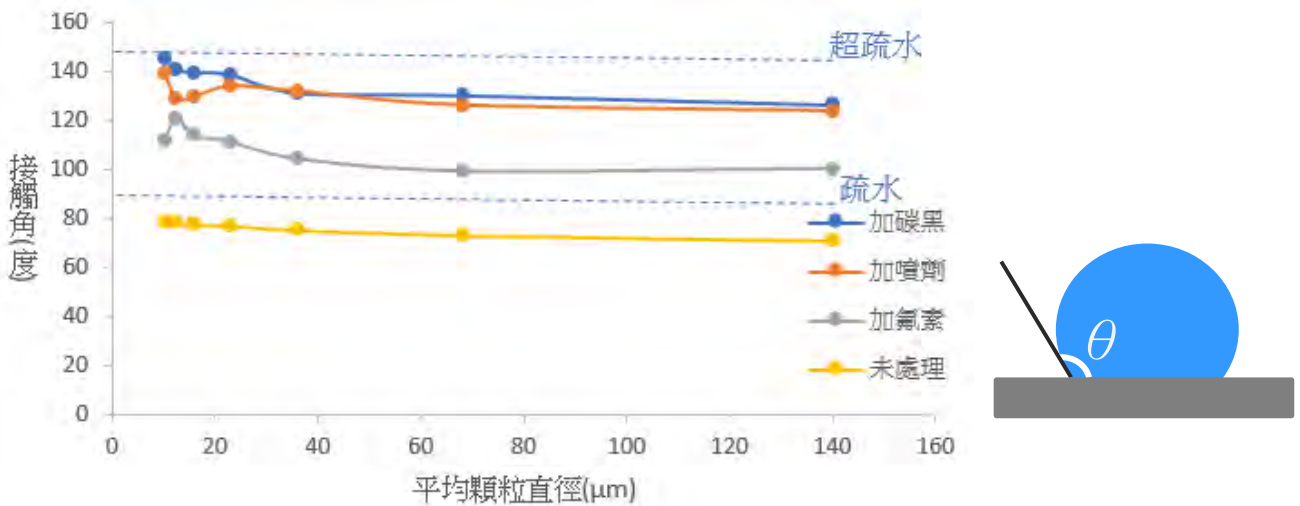


圖22 接觸角對平均顆粒直徑關係

如圖22，在砂紙的部分，燻上碳黑與噴上噴劑的疏水性最大，泡過氟素的疏水性較小，且皆為一般疏水性。當砂紙的顆粒大小越大時，疏水性會越弱。

### 二、水滴在不同載體上的滾動角變化

用針筒滴定量的水(0.02cc)在經不同處理的砂紙上，並量測其滾動角，比對滾動角對平均顆粒直徑關係，如圖23所示：

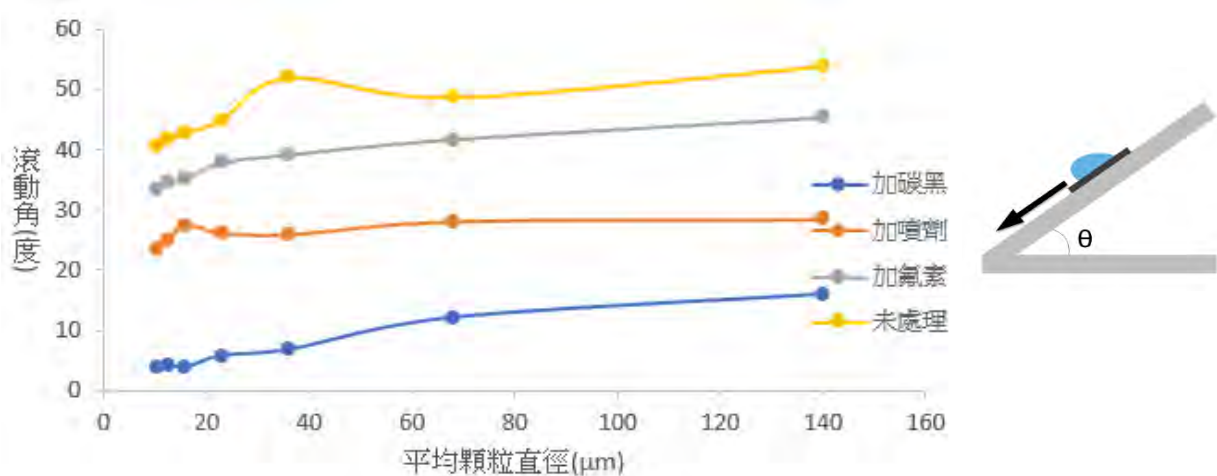


圖23 滾動角對平均顆粒直徑關係

如圖23，在砂紙的部分，燻上碳黑的滾動角極小，其次為噴上防水噴劑，加上氟素則較大，而最大的則為未處理之砂紙。

### 三、滾動角與接觸角之關係

利用燻上碳黑的型號1000砂紙比對滾動角的補角與接觸角之關係，如圖24所示：

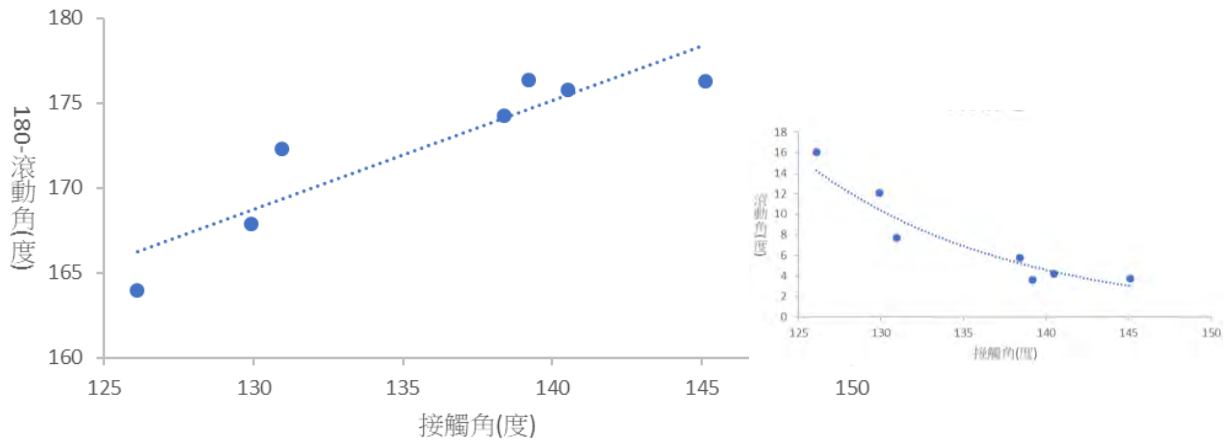


圖24滾動角之補角對接觸角關係

如圖24，當滾動角越小時，接觸角有變大的趨勢，但無準確的線性關係。

### 四、不同質量水滴之形變

取型號100和型號1000的碳黑砂紙，在上面分別滴上0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴(圖25)，並測量其長短軸比值，探討長短軸比值對水滴體積關係，如圖26所示：



圖25 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴

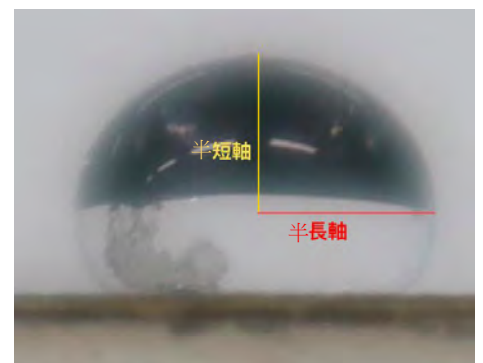
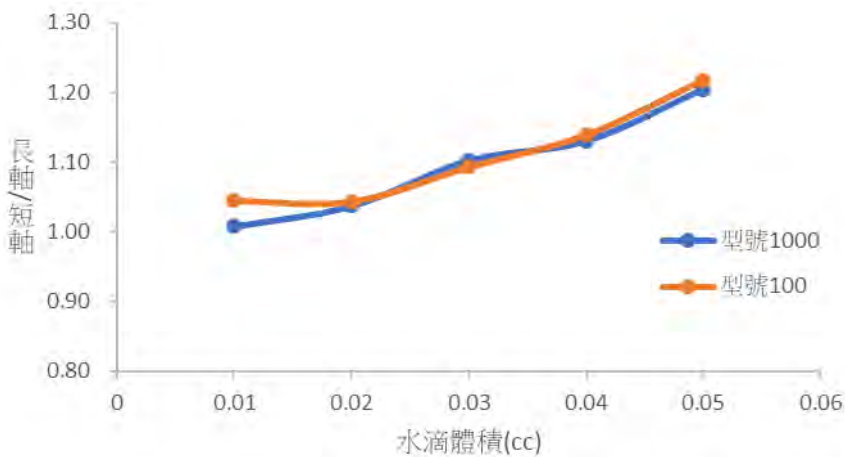


圖26 長短軸比值對水滴體積關係

如圖26，使用型號100和型號1000的砂紙測出的結果相似，但在水滴為0.01cc時型號100之砂紙比值較大，當水滴體積越大時，其長短軸之比值也隨之增加，最大可達約1.2，也就是側視形狀漸趨於橢圓形。

### 五、不同質量水滴之接觸角變化

取型號100和型號1000的碳黑砂紙，在上面分別滴上0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴，並測量其接觸角，探討接觸角對水滴體積關係，如圖27所示：

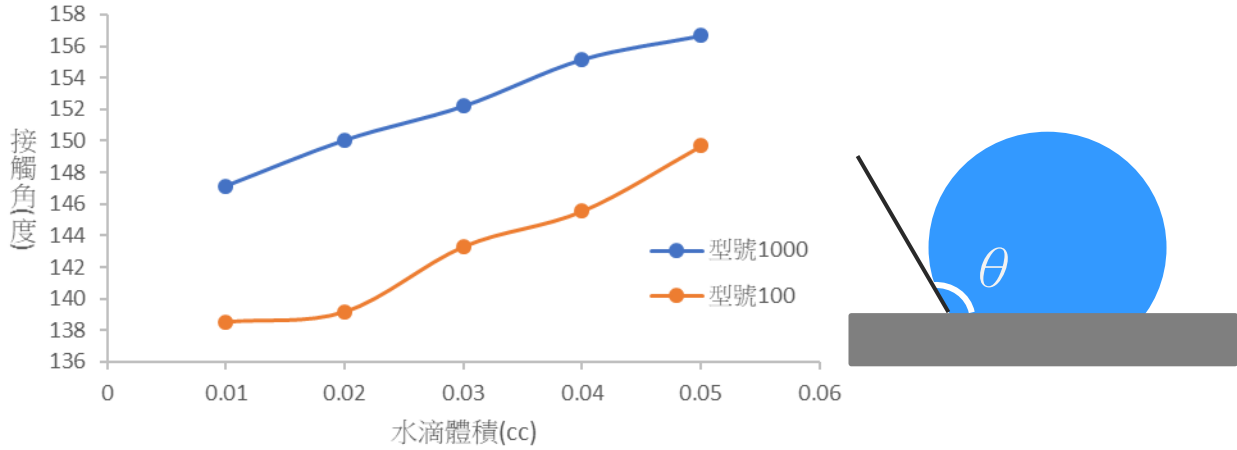


圖27 接觸角對水滴體積關係

如圖27，當水滴體積越大時，側視圖漸趨於橢圓形，接觸角逐漸變大。

### 六、不同質量水滴之滾動角變化

取型號100和型號1000的碳黑砂紙，在上面分別滴上0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴，並測量其滾動角，探討滾動角對水滴體積關係，如圖28所示：

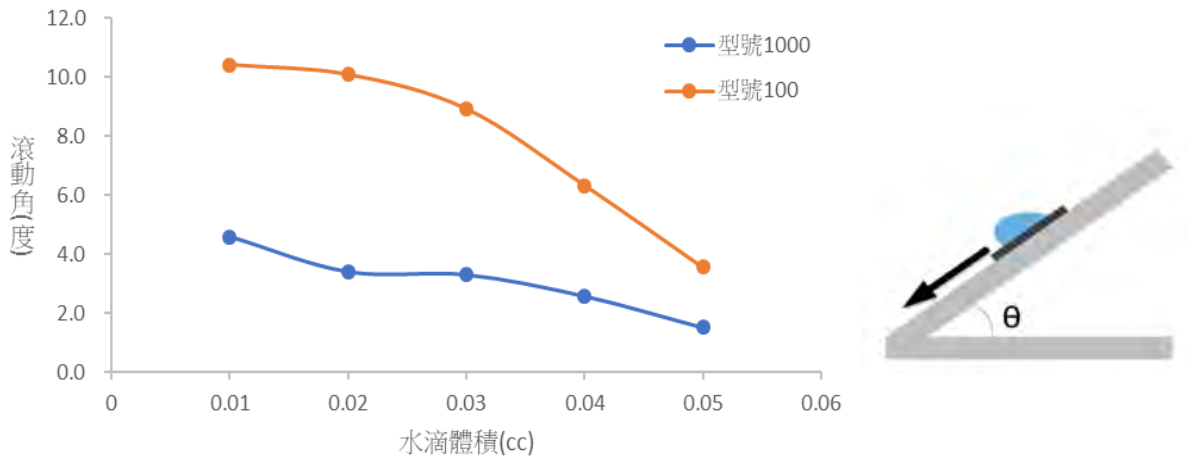


圖28 滾動角對水滴體積關係

如圖28，當水滴體積越大時，滾動角也隨之變小，但型號100的變化幅度較型號1000的大。

## 七、靜摩擦係數

(一)、使用斜面法測量不同型號砂紙之無處理、加噴劑、氟素、碳黑之靜摩擦係數變化

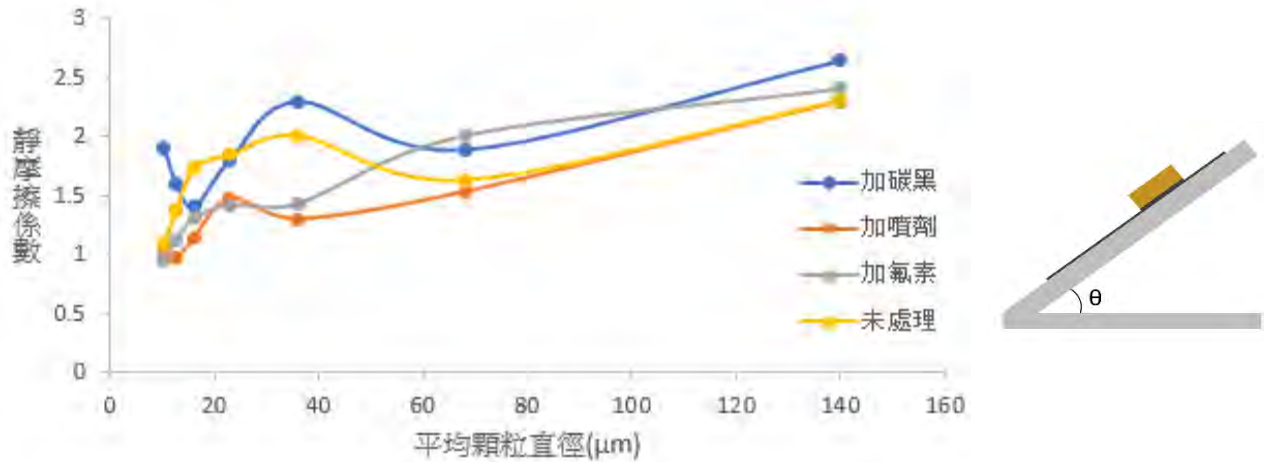


圖29 靜摩擦係數對平均顆粒直徑關係

如圖29，砂紙的靜摩擦係數與疏水性無直接關係。當砂紙的顆粒大小越大時，摩擦係數越大，但其方法誤差範圍較大，所以又使用了力感測器做進一步確認。

(二)、使用力感測器測量不同型號砂紙之無處理、加噴劑、氟素、碳黑之靜摩擦係數變化

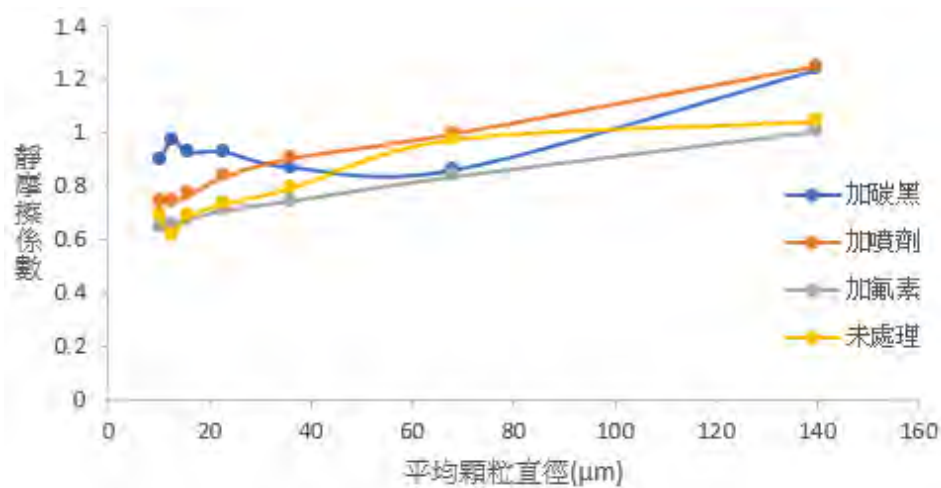


圖30 靜摩擦係數對平均顆粒直徑關係

如圖30，力感測器結果與使用斜面法相同，砂紙的靜摩擦係數與疏水性較無直接關係。當砂紙的顆粒大小越大時，摩擦係數越大，較特別的是，在顆粒直徑小於 $20\mu\text{m}$ 時碳黑砂紙有粒徑越小摩擦係數反而增大的趨勢。



### 八、疏水性與靜摩擦係數之關係

利用燻上碳黑的七種不同型號砂紙比對靜摩擦係數與接觸角之關係，如圖31所示：

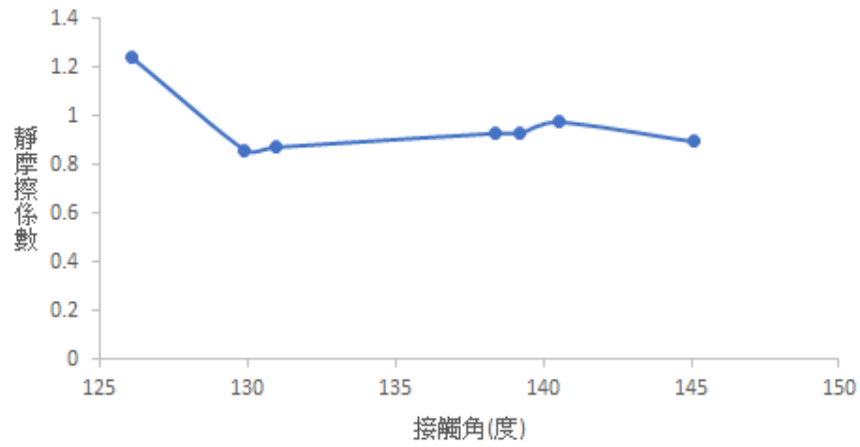


圖31 靜摩擦係數對接觸角關係

如圖31，疏水性與靜摩擦係數較無關聯。

### 九、液滴接觸固體表面積的比例 ( $f_1$ )

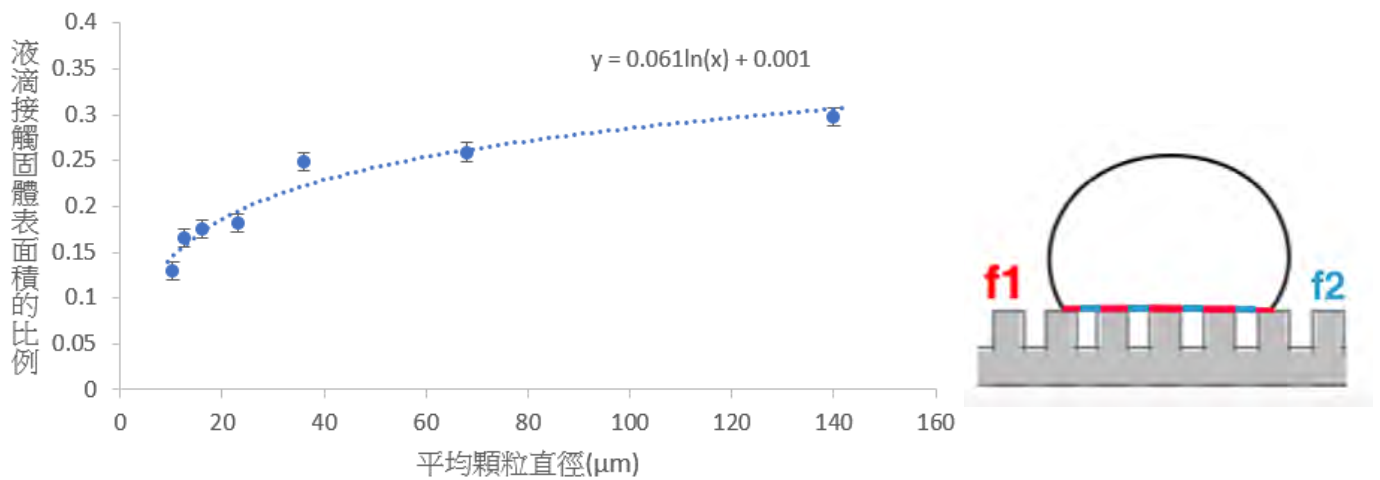


圖32 液滴接觸固體表面積的比例對粒徑關係( $f_2$ 液滴接觸氣體表面積的比例)

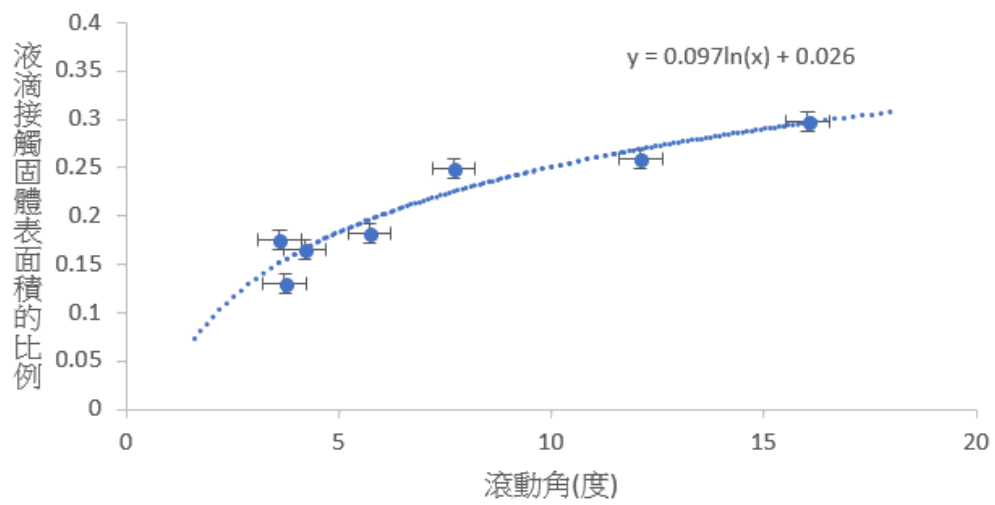


圖33 液滴接觸固體表面積的比例對滾動角關係

接觸角越大，液滴接觸固體表面積的比例越小；粒徑越大，液滴接觸固體表面積的比例越大；滾動角越大，液滴接觸固體表面積的比例越大。

## 陸、討論

一、在疏水性的部分，由實驗一、二、三中顯示，當砂紙的顆粒大小越大時，疏水性會越弱，在接觸角的部分，碳黑與噴劑相似，但在滾動角的部分，有明顯的差距，由附錄二可知，噴上防水噴劑後，砂紙表層會有一層油狀物質，根據推測，因燻上碳黑的砂紙表面結構被改變，在水滴與載體間形成空氣層(圖34)，使水滴較容易下滑，當滾動角越小時，接觸角有變大的趨勢，但無準確的線性關係。

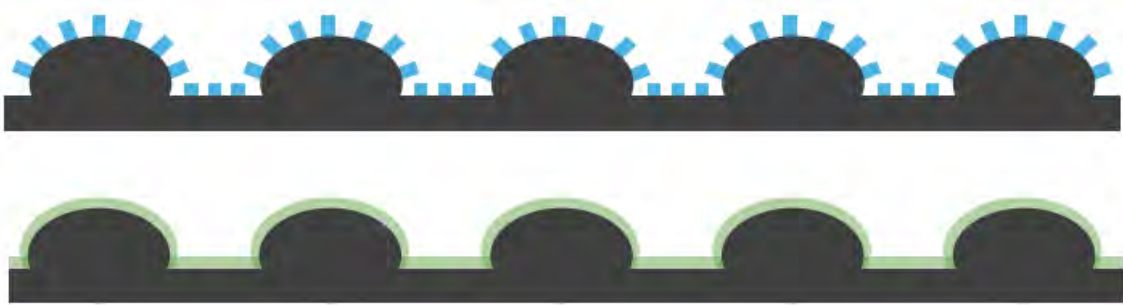


圖34 碳黑、噴劑砂紙表面結構示意圖

二、在水滴大小的部分，由實驗四、五、六中顯示，當水滴體積越大時，其長短軸之比值和接觸角也隨之增加，也就是側視形狀漸趨於橢圓形，根據推測，因為水滴的內聚力逐漸小於表面張力及重力導致水滴變扁。當水滴體積越大時，滾動角也隨之變小，但型號100的變化幅度較型號1000的大，根據推測，因其型號1000的滾動角已接近極限。

三、在靜摩擦係數的部分，由實驗七、八中顯示，砂紙的靜摩擦係數與疏水性無直接關係，根據推測，影響靜摩擦係數的因素為顆粒直徑 $10\ \mu\text{m}$ 的砂紙顆粒，而影響接觸角的因素之一為顆粒直徑 $30\text{nm}$ 的碳黑，因此疏水性與靜摩擦係數無直接關聯。當砂紙的顆粒大小越大時，摩擦係數越大，在顆粒直徑小於 $20\ \mu\text{m}$ 時，靜摩擦係數也有上升的趨勢，而我們推測是由於碳黑在摩擦過程脫落所致。

四、在液滴接觸固體表面積的比例的部分，由結果九顯示，接觸角越大液滴接觸固體表面積的比例越小，液滴形狀越圓，與根據公式推測的相符，又因粒徑越大接觸角越小，液滴接觸固體表面積的比例越大。液滴接觸固體表面積的比例越大，滾動角越大，更加一步驗證，因水滴與載體間形成空氣層(圖35)，使水滴較容易下滑。

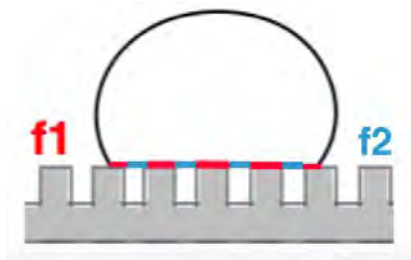


圖35 有空氣層之表面結構 $f_1$ 與 $f_2$ 示意圖

五、為驗證碳黑砂紙與水滴之間的空氣層，使用雷射筆以15公分的距離垂直分別照射在普通砂紙和碳黑砂紙上的水滴，並觀察其反射情形，由圖36、37可知，當雷射照在碳黑砂紙上的水滴時，因碳黑砂紙上的水滴光暈範圍較普通砂紙上的水滴大，且前者紋路像水波，後者呈放射狀，所以可推測是空氣層反射導致。

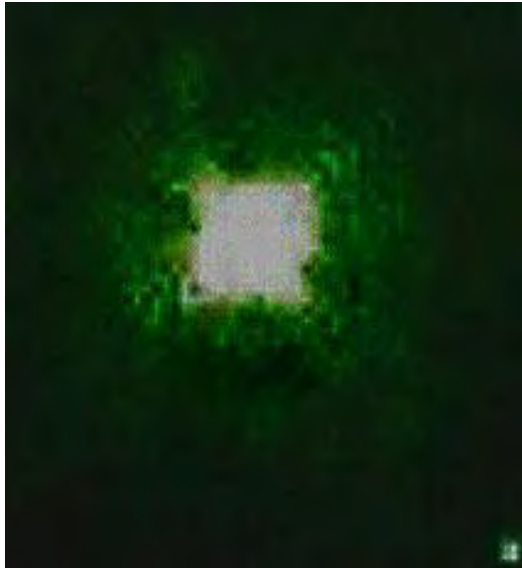


圖36 水滴於碳黑砂紙之反射光

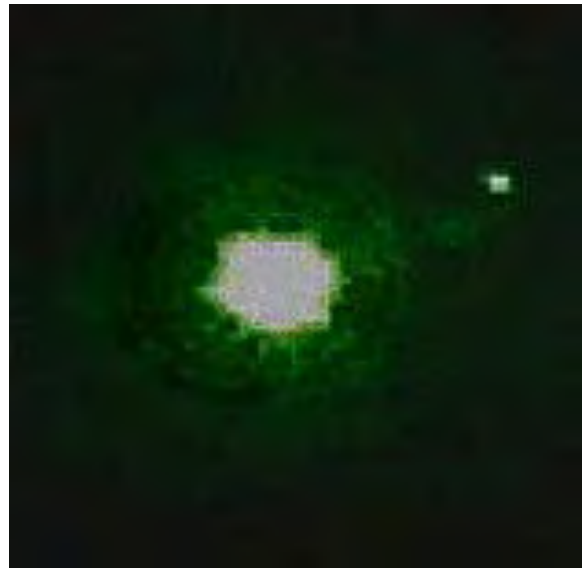


圖37 水滴於普通砂紙之反射光

六、為驗證碳黑砂紙與水滴之間的空氣層以及砂紙顆粒對其影響，使用雷射筆在距水滴15公分處水平照射在碳黑砂紙上的水滴，並觀察其反射情形，如圖38，當雷射照在碳黑砂紙上的水滴時，有類似全內反射的現象，顯示接觸介面因空氣層造成全反射之原因。



圖38 (a)水滴於碳黑砂紙之反射情形側視圖  
(b)雷射光反射示意圖

## 柒、結論

經過三種不同處理的砂紙皆為一般疏水性，燻上碳黑與噴上噴劑的接觸角最大，泡過氟素的較小，在滾動角的部分，燻上碳黑的砂紙明顯的小於其他載體，我們推測因燻上碳黑的砂紙表面結構被改變，在水滴與載體間形成空氣層，使水滴較容易下滑。而當砂紙的顆粒大小越大時，疏水性會越弱。

當水滴的體積增加時，其接觸角會增加，滾動角會變小，也就是疏水性變強，至於形變則會隨水滴體積變大而趨於橢圓形。

在摩擦係數的部分，我們發現當砂紙的粒徑越大時，其摩擦係數會逐漸增加，但燻上碳黑的砂紙在粒徑變小時摩擦係數也會增加。

在比較靜摩擦係數與接觸角時，發現靜摩擦係數與接觸角並無直接關聯，其原因為造成靜摩擦係數改變的顆粒大小約為微米等級與改變接觸角的顆粒約為奈米等級，尺度大小不同。

根據Cassie and Baxter model公式所推得的液滴接觸固體表面積之比例越大，滾動角越大，更加一步驗證，因水滴與載體間形成空氣層，使水滴較容易下滑。

我們成功利用燻上碳黑的砂紙製造出疏水性表面，其中疏水性最佳的為型號1000之碳黑砂紙，其接觸角為145.1度，滾動角為3.7度，液滴接觸固體表面積之比例為0.13。

## 捌、參考資料及其他

- [1] 林瑋隆、李頂立（民96）。表面粗糙結構對疏水性影響之應用與研究（臺灣2007年國際科學展覽會）
- [2] 陳新龍（民103）。石英奈米針狀結構表面之潤濕性及遲滯性研究
- [3] Z. Yoshimitsu, A. Nakajima, T. Watanabe, K. Hashimoto, "Effects of Surface Structure on the Hydrophobicity and Sliding Behavior of Water Droplets ", *Langmuir*, Vol. 18, pp. 5818-5822, 2002.
- [4] 游輔銘（民101）。微結構疏水性表面製作與表面特性之研究
- [5] 陳世家（民101）。碳顆粒與油滴粒徑的探究。奈米新視界，1，61-81。
- [6] 方昱迪、蘇芳儀、高子婷、林孜育（民98）。碳黑受閃光產生爆鳴聲之研究
- [7] 張育誠、蔡幸芬、鄭景亮（民95）。氣凝膠疏水性與表面能之研究
- [8] 結晶美術館（無日期）。ハスやサトイモの葉が水を葉はじくわけ

取自<https://sites.google.com/site/fluordoublet/nature/lotus>

## 附錄

### 一、使用複式顯微鏡（150X）觀察不同型號砂紙之比較

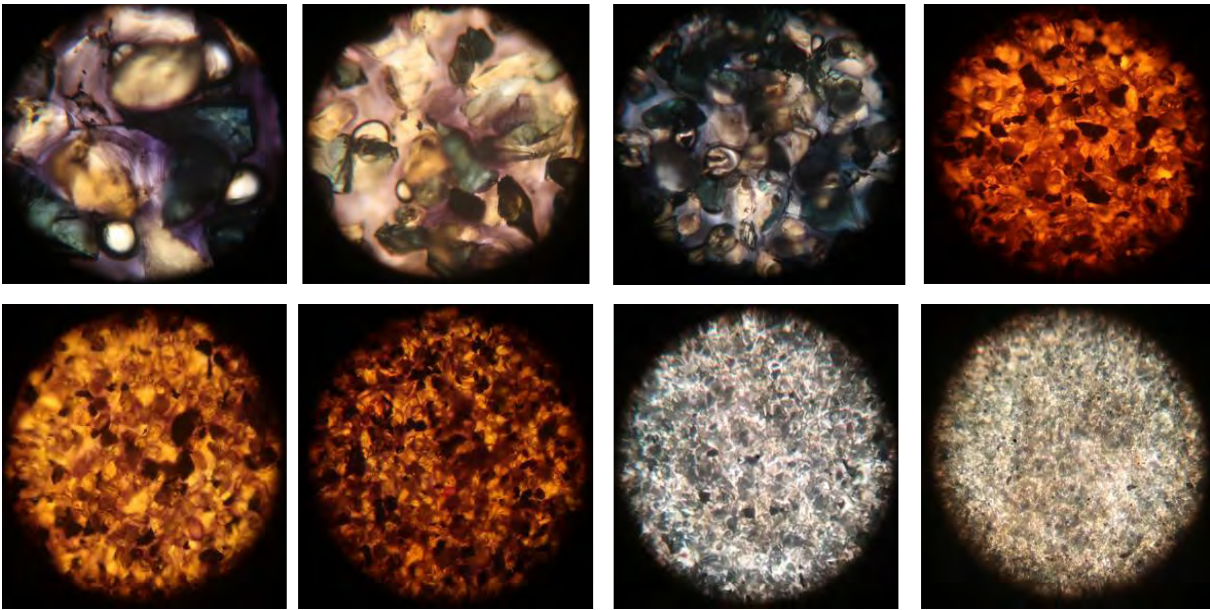


圖1.砂紙型號順序為（上）100、220、320、400

（下）600、800、1000、2000

### 二、噴上噴劑前後之比較

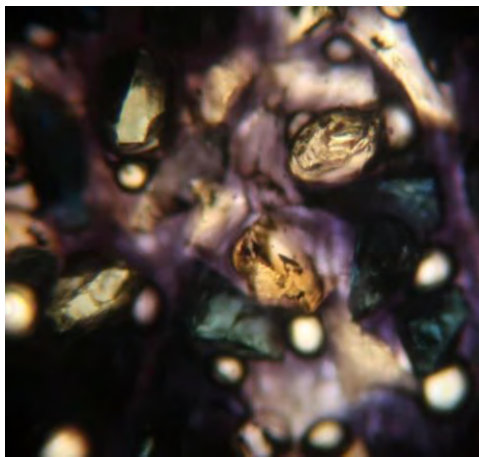


圖2 無噴劑之砂紙表面

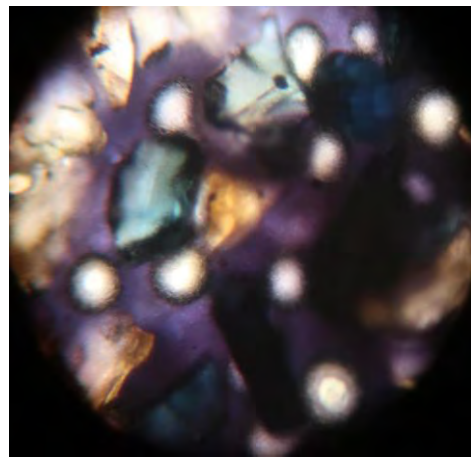


圖3 噴上噴劑之砂紙表面



## 【評語】 051806

能夠善用設計，觀察各項變因間的定性變化趨勢，建議可以加強定量關係式之探討。



# 研究動機

同樣具有超疏水性的玫瑰與荷葉，因其微結構不同，使液滴在表面上的滾動情形有所不同。我們想對此現象做進一步的探討，由於水的滾動也受摩擦力之影響，因此想進一步探討疏水性載體間的摩擦係數，又為了模擬葉片表面之結構，我們選用碳黑。

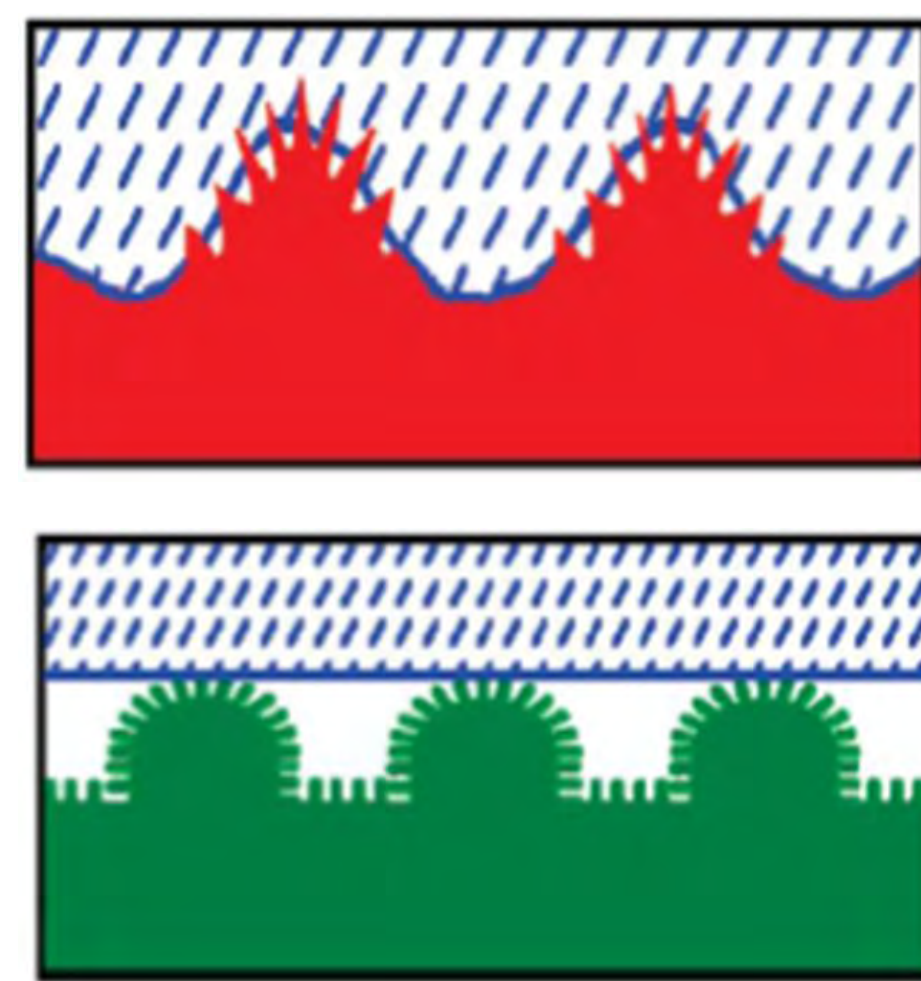


圖1(上:玫瑰結構示意圖; 下:荷葉結構示意圖)

# 研究目的

- 一、探討經不同處理(碳黑、氟素、噴劑)載體之接觸角、滾動角差異。
- 二、探討不同微結構下之靜摩擦係數關係。
- 三、探討不同微結構下接觸角、滾動角和靜摩擦係數之關係

# 原理

## 一、碳黑

如圖2，利用不完全燃燒法，以蠟燭(芳香族碳氫化合物)為原料，形成碳核，再形成基本顆粒，最後在表面形成粒徑約為10~30nm的碳黑。

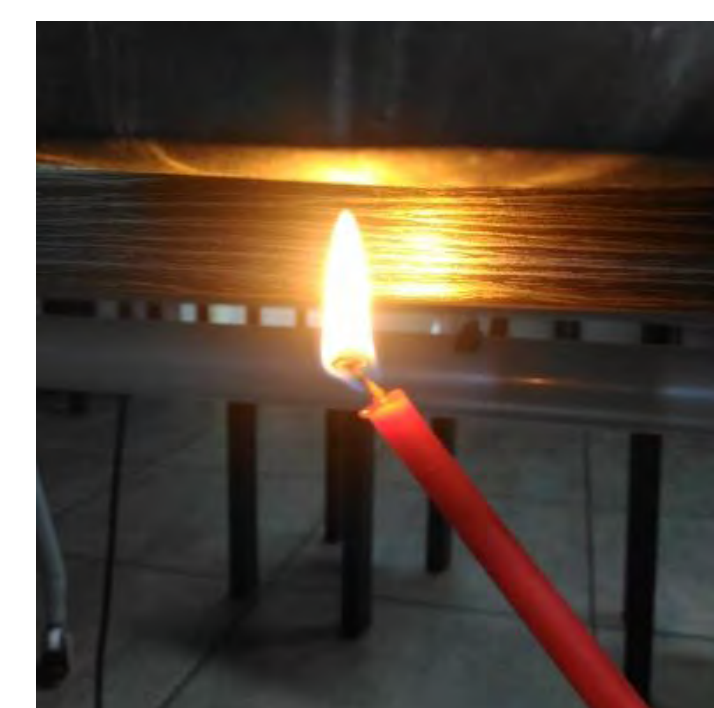


圖2 燒製碳黑裝置圖

## 二、疏水性

疏水性指的是一個分子與水互相排斥的物理性質。疏水性分子偏向於非極性，並因此較會溶解在中性和非極性溶液。

Cassie and Baxter model方程式：

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2$$

如圖3，其中液滴在空氣中呈球狀，因此 $\theta_2$ 等於 $180^\circ$ ，且 $f_1+f_2$ 為接觸面積比例相加，因此總和恆等於1。將數值及關係代入可將原式化簡如下：

$$f_1 = \frac{\cos \theta_{CB} + 1}{\cos \theta_1 + 1}$$

## 三、接觸角與滾動角

如圖3，在氣、液、固三相交點處所做的氣-液介面的切線穿過液體與固體交界線之間的夾角，即為接觸角 $\theta$ 。如圖4，滾動角則是指液滴在傾斜表面上剛好發生滾動時，傾斜表面與水平面所形成的臨界角度。

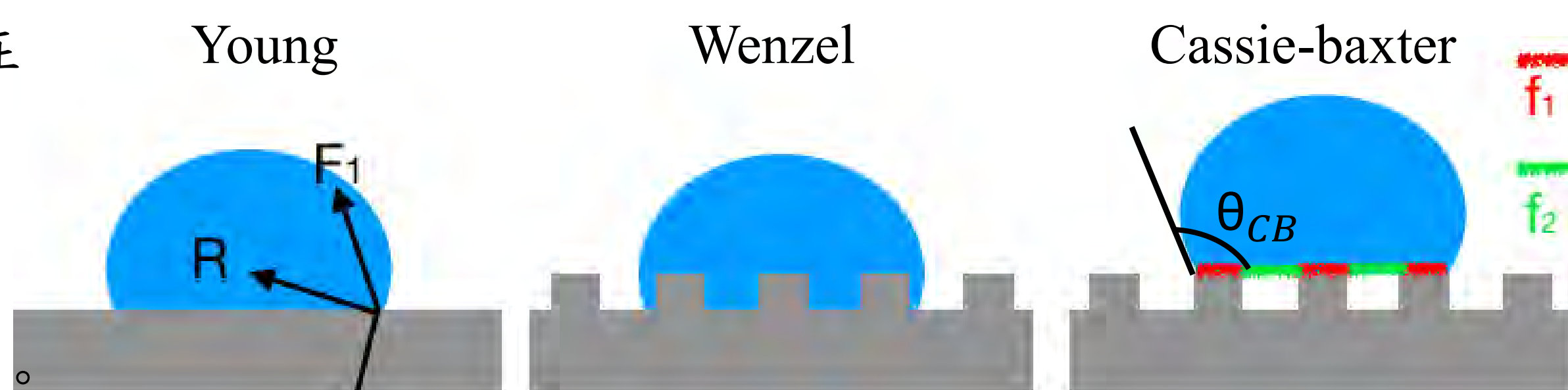


圖3 三種模型示意圖( $F_1$ 為內聚力， $F_2$ 為附著力， $R$ 為合力)

- $\theta_{CB}$  : Cassie and Baxter model之接觸角；
- $f_1$  : 液滴接觸固體表面積的比例；
- $f_2$  : 液滴接觸氣體表面積的比例；
- $\theta_1$  : 液滴於固體表面之接觸角，即楊氏方程式中的 $\theta$ ；
- $\theta_2$  : 液滴於空氣之接觸角

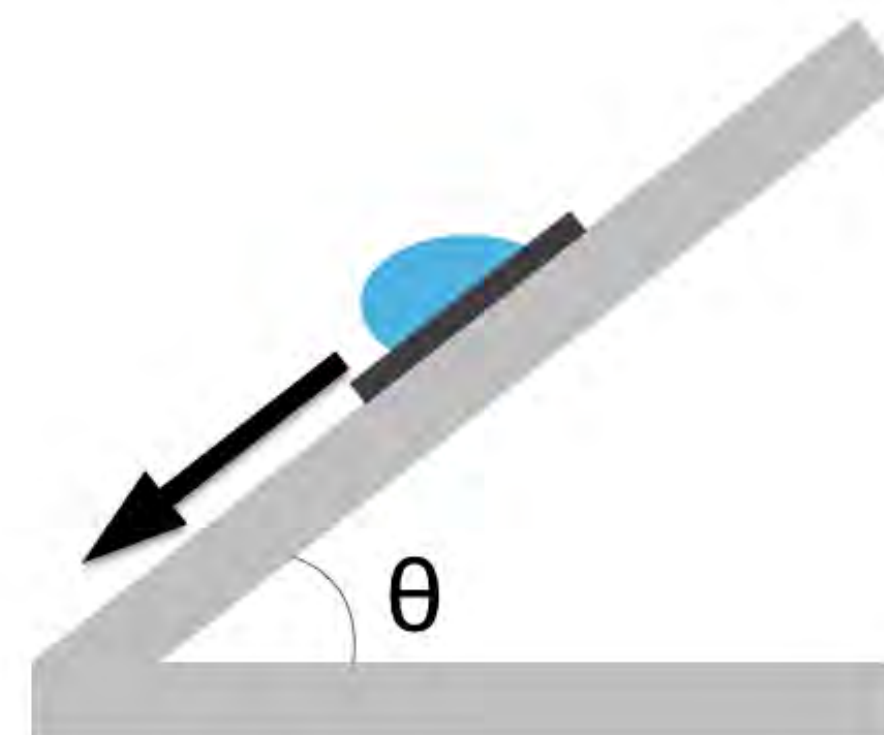


圖4 滾動角示意圖

# 過程與方法

## 一、載體設計：

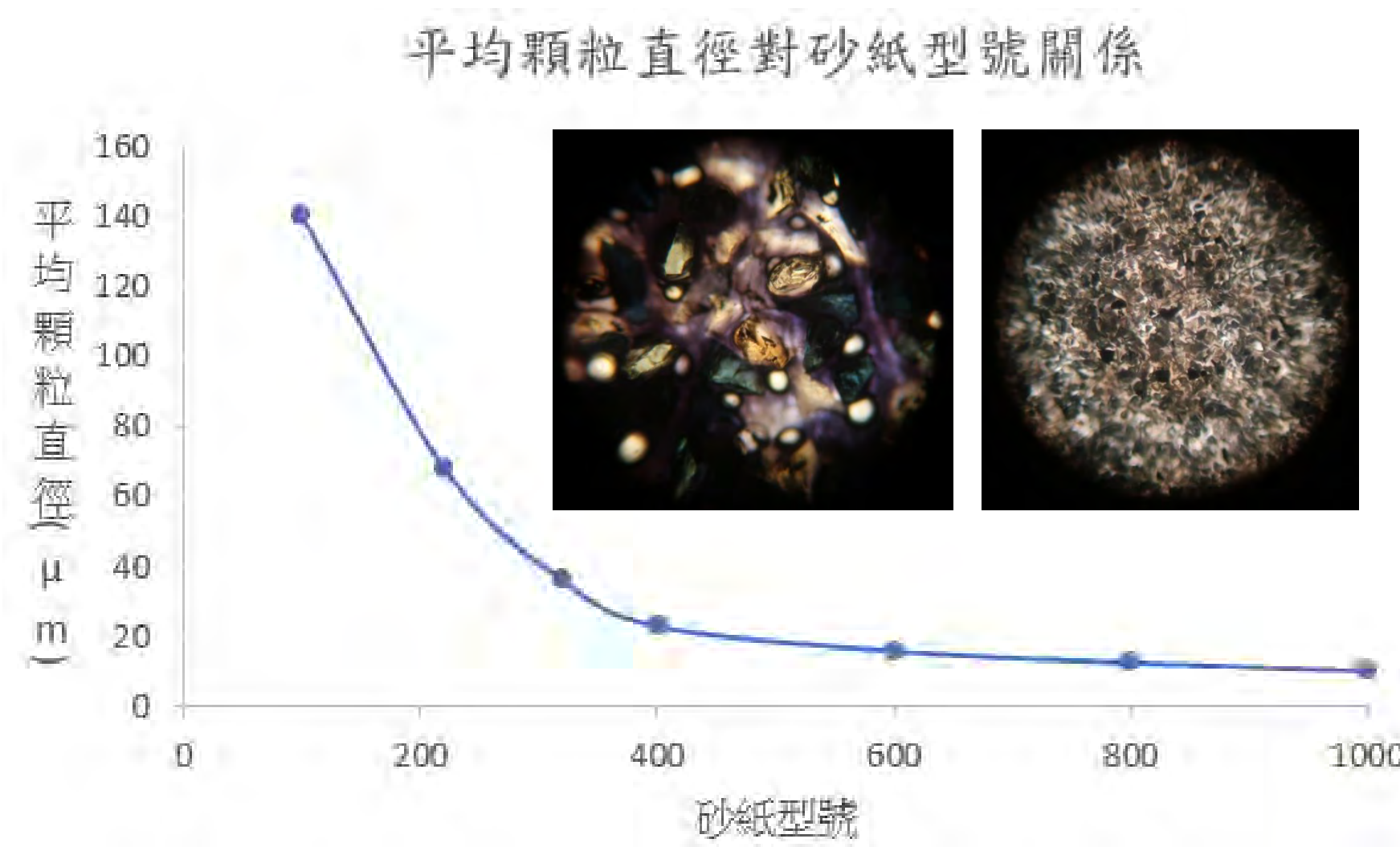
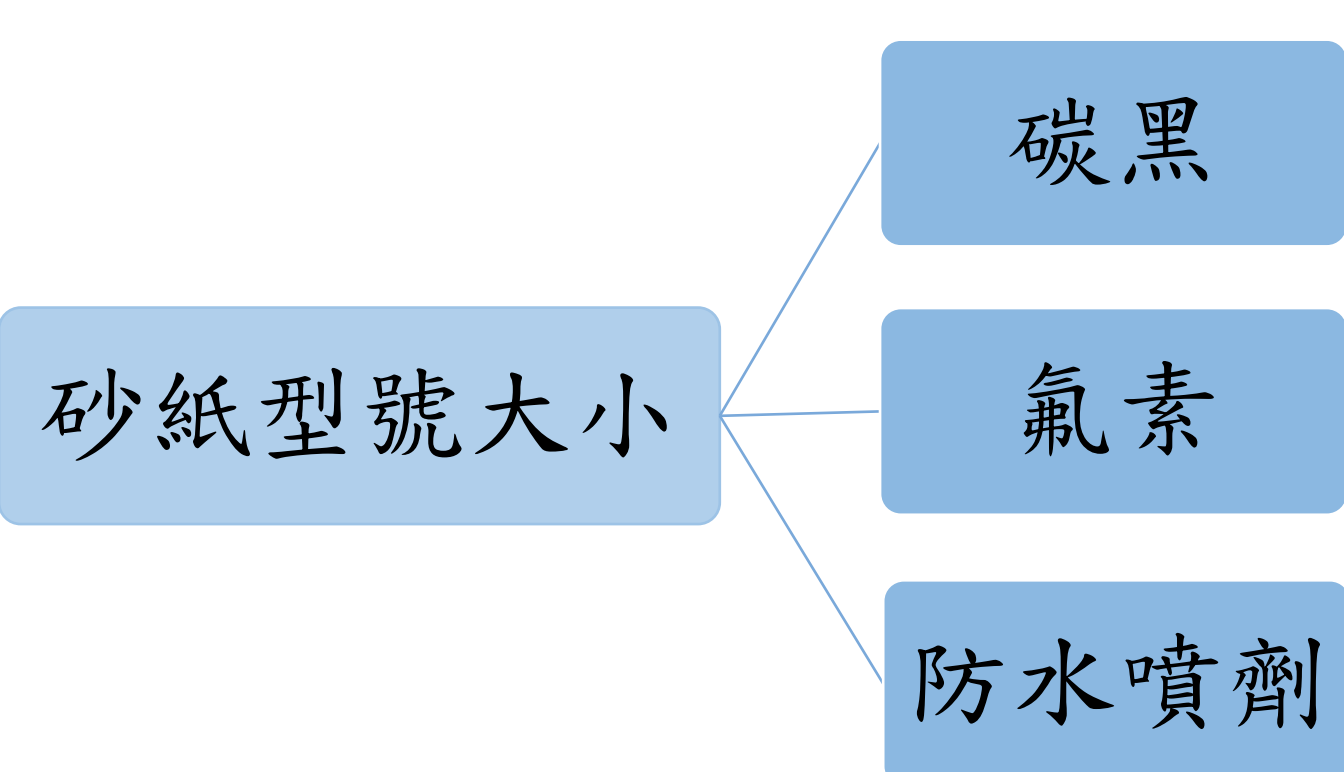


圖5 實驗器材

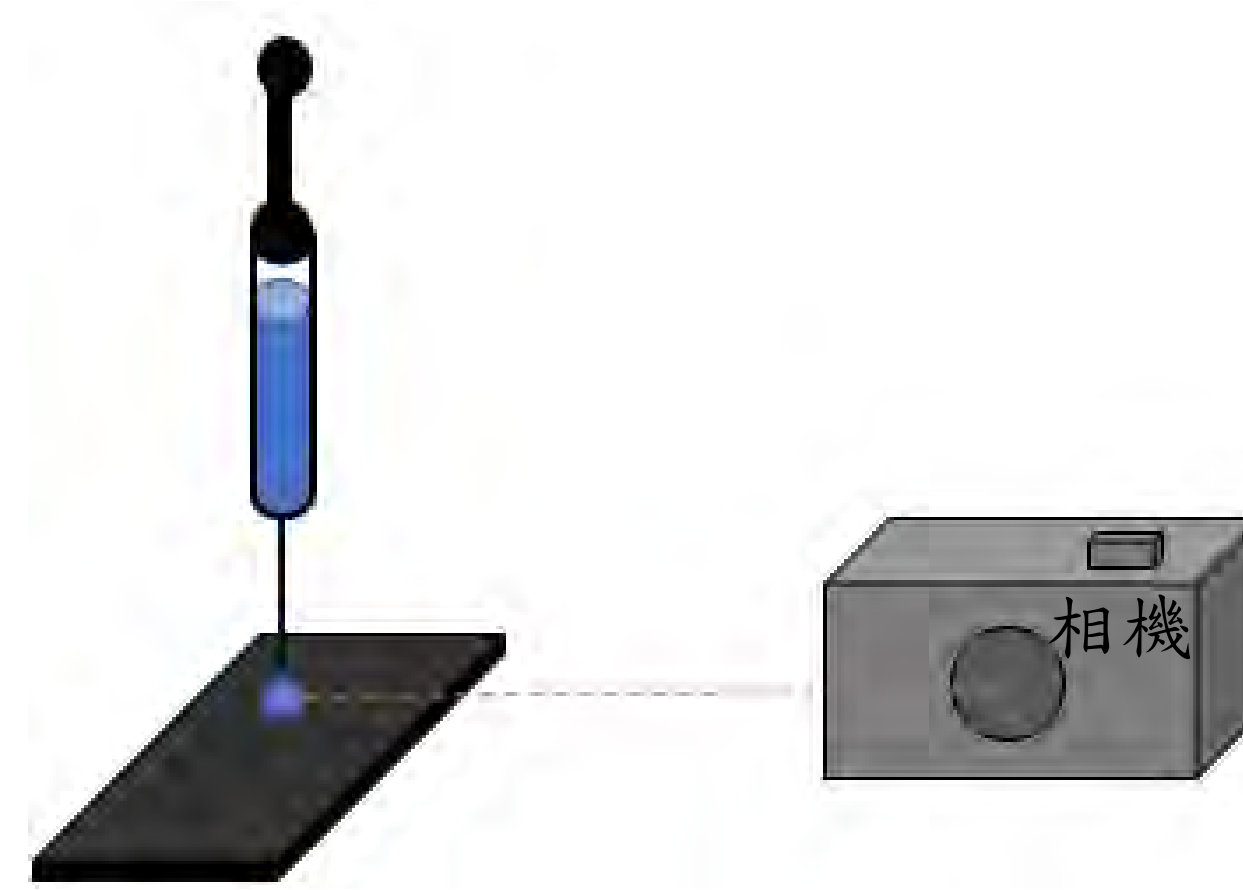


圖6 接觸角量測示意圖

## 二、實驗設計：

- (一)測量接觸角:用針筒滴定量的水(0.02cc)在載體上，並使用數位相機配合放大鏡以水平角度拍攝(圖6)。
 

接觸角測量方法:利用電腦軟體，以水滴兩邊與載體接觸點畫圓，找出圓心，從圓心畫一直線A連接接觸點，再畫一垂直於A之直線B，即直線B為切線，而直線B與水平線的夾角即為接觸角(圖7)。
- (二)不同體積之水滴:取型號100和1000的碳黑砂紙，分別滴上0.01、0.02、0.03、0.04、0.05cc的水滴，測量長短軸和接觸角對水滴體積關係。

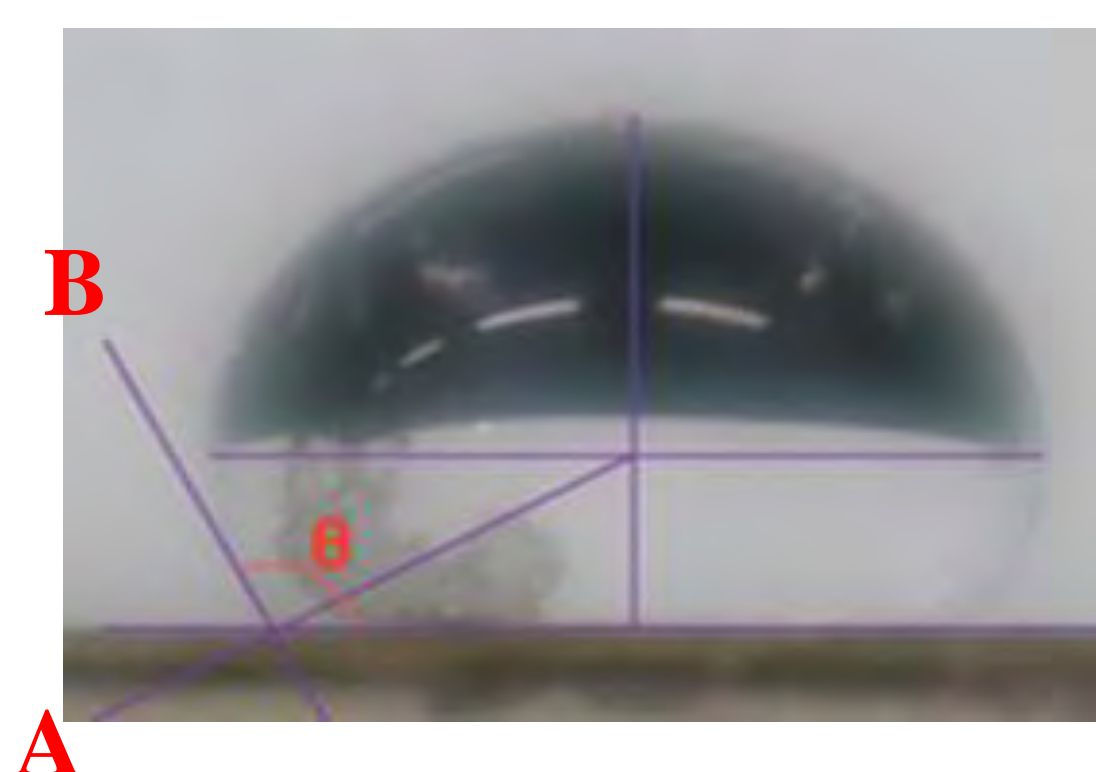


圖7 接觸角量測方法示意圖

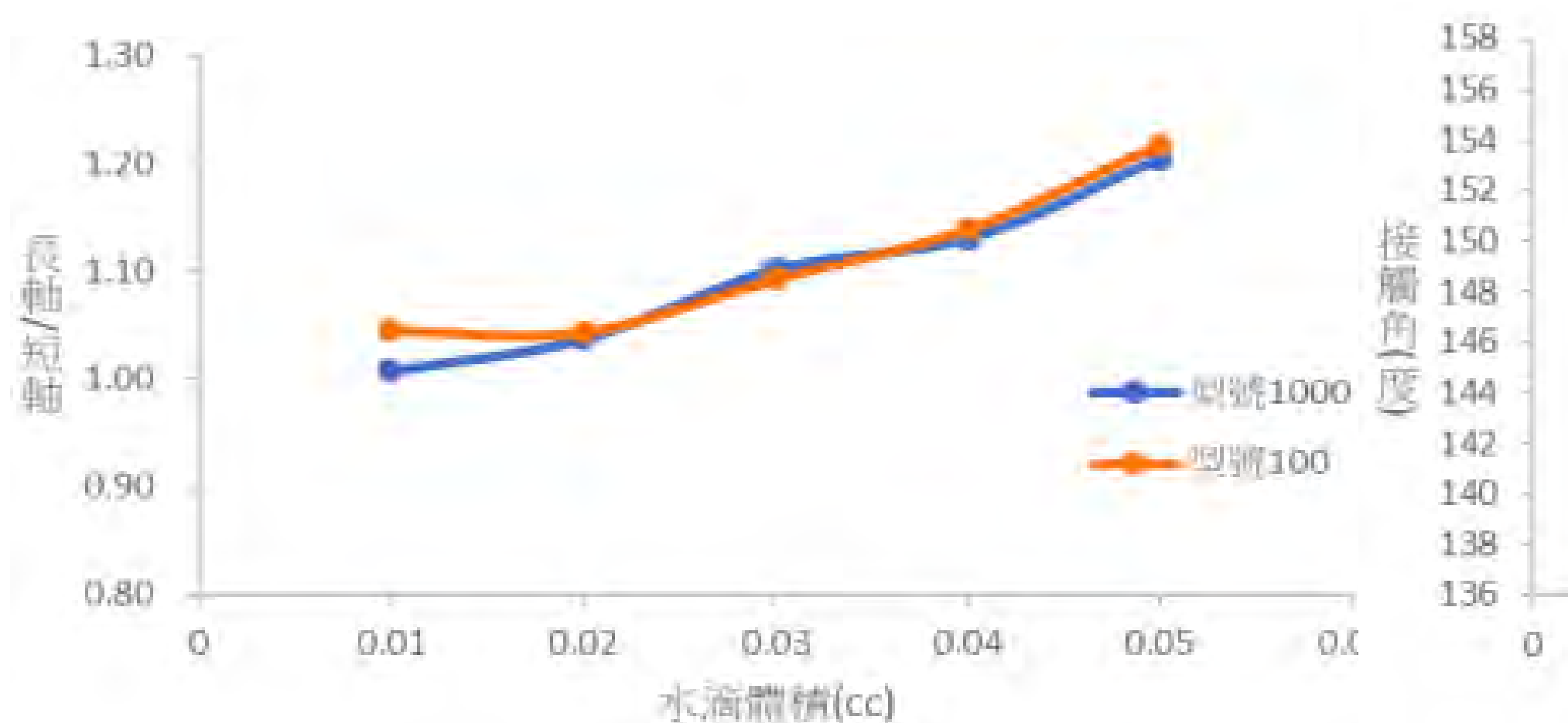


圖8 長短軸比值對水滴體積關係

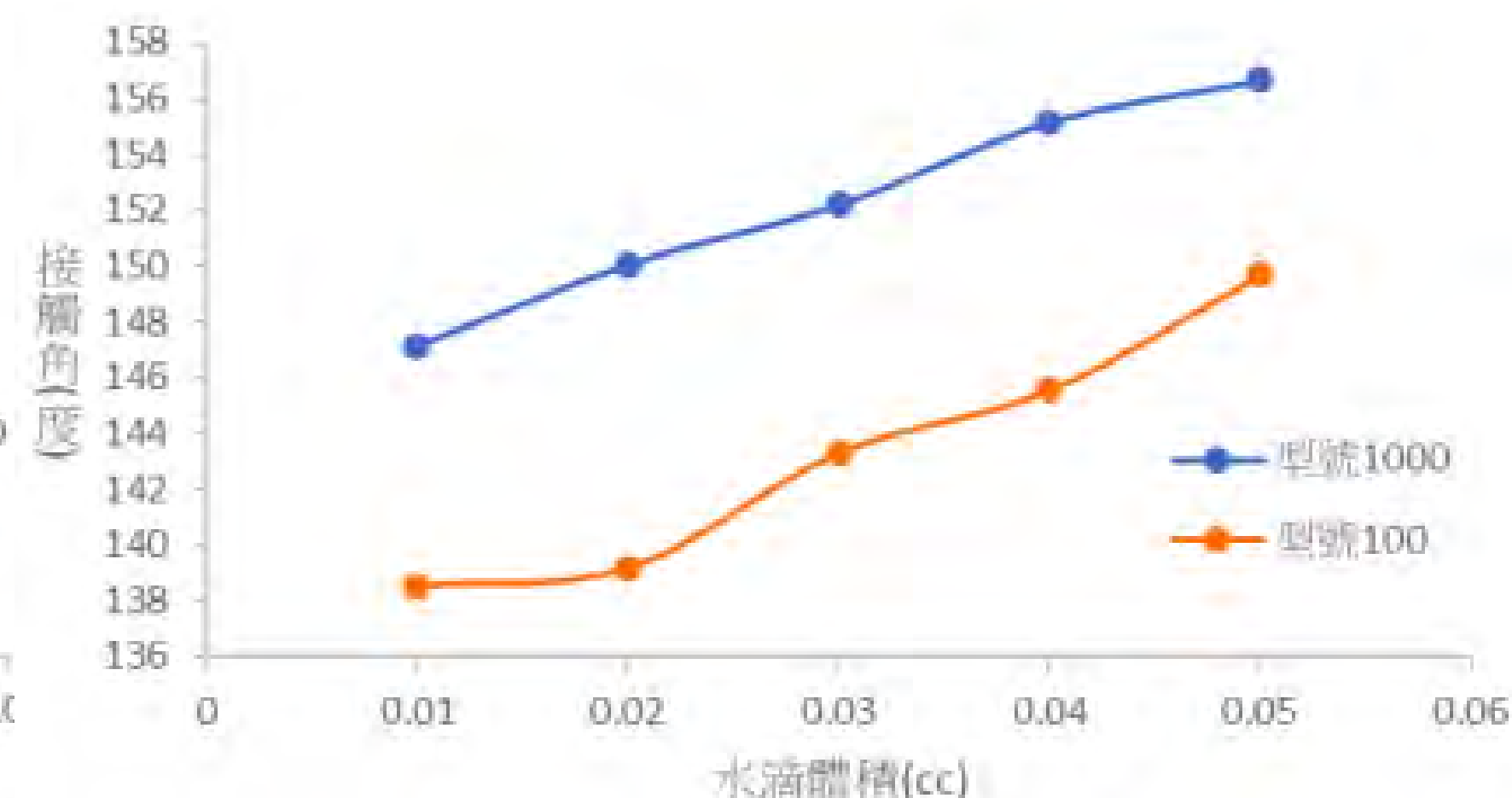


圖9 接觸角對水滴體積關係



(三)滾動角:增加傾斜角度 $\theta$ 直到水滴滑落,並測量滑落時之傾斜角(圖10)。

(四)探討靜摩擦係數:

1. 利用斜面法:靜摩擦係數 $\mu = \tan\theta$ , 在木塊上貼與測量表面材質相同的載體, 量測其沿滑落的角度(圖11)。

2. 使用力感測器測量:確認靜摩擦係數(圖12)。

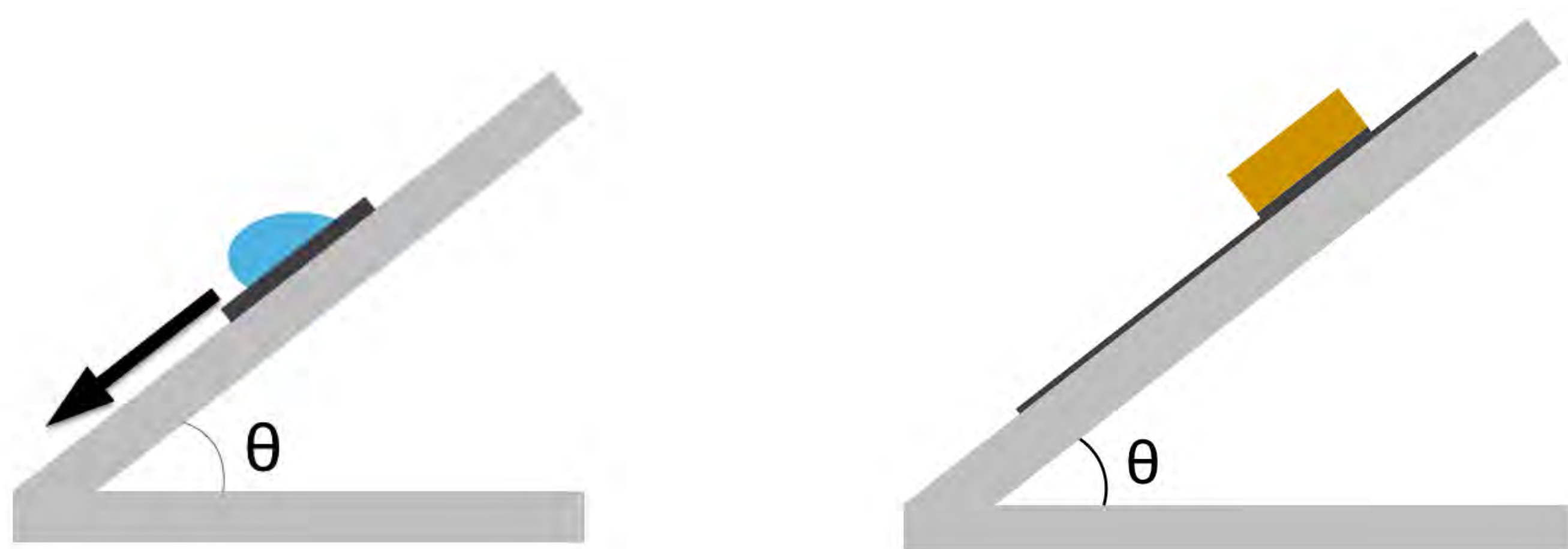


圖10 滾動角示意圖

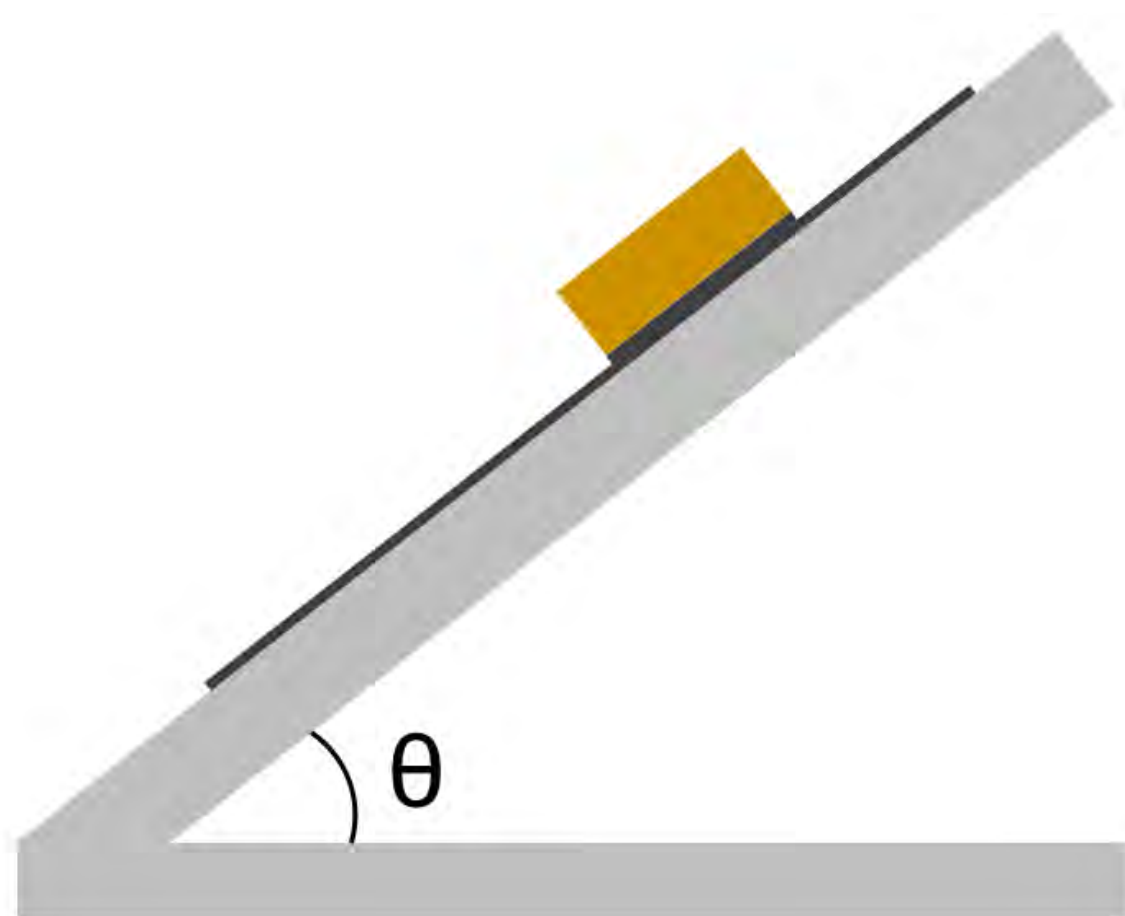


圖11 斜面法示意圖

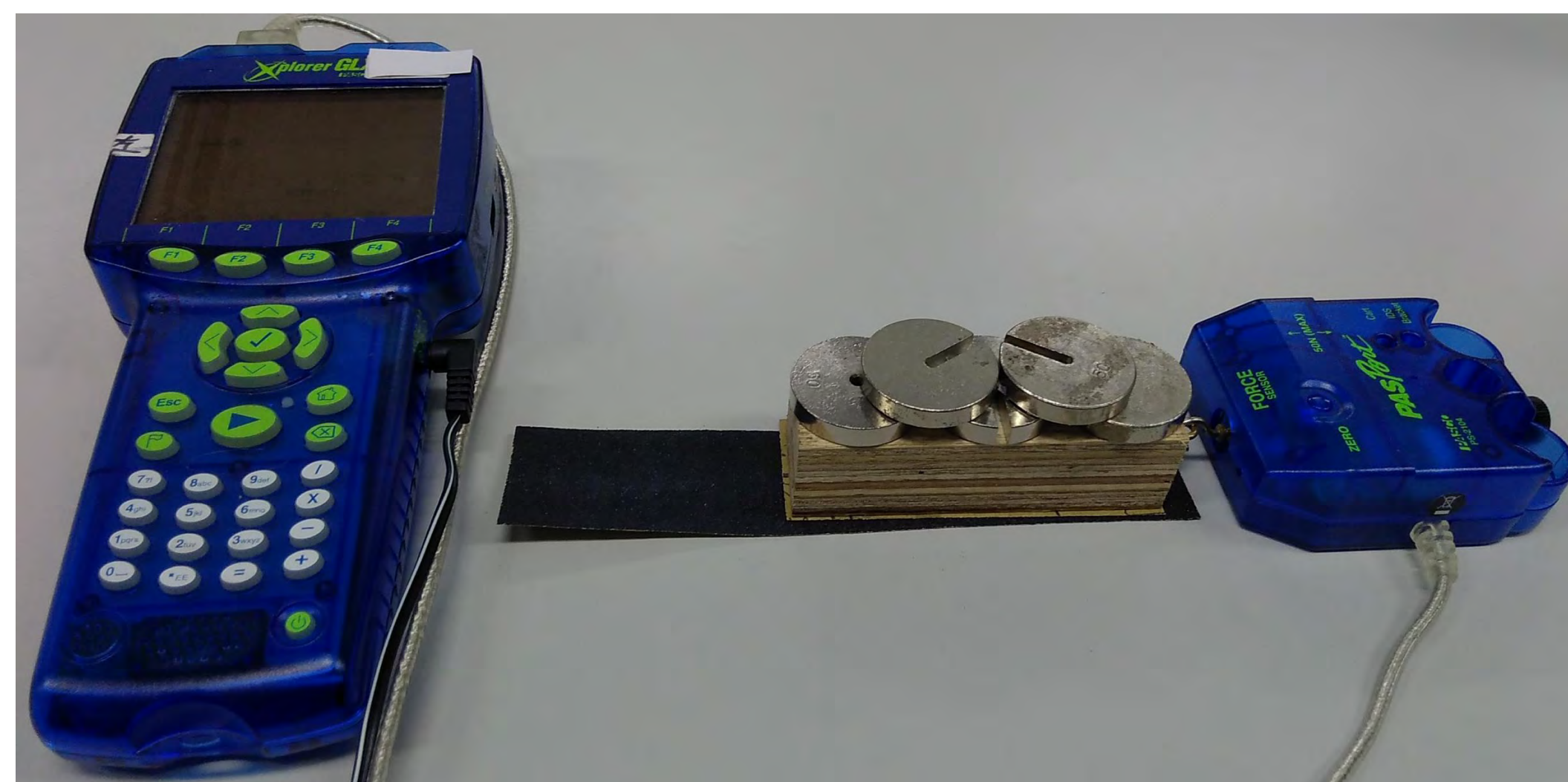


圖12 力感測器裝置圖

## 結果與討論

### 一、水滴在不同載體上的接觸角與滾動角變化

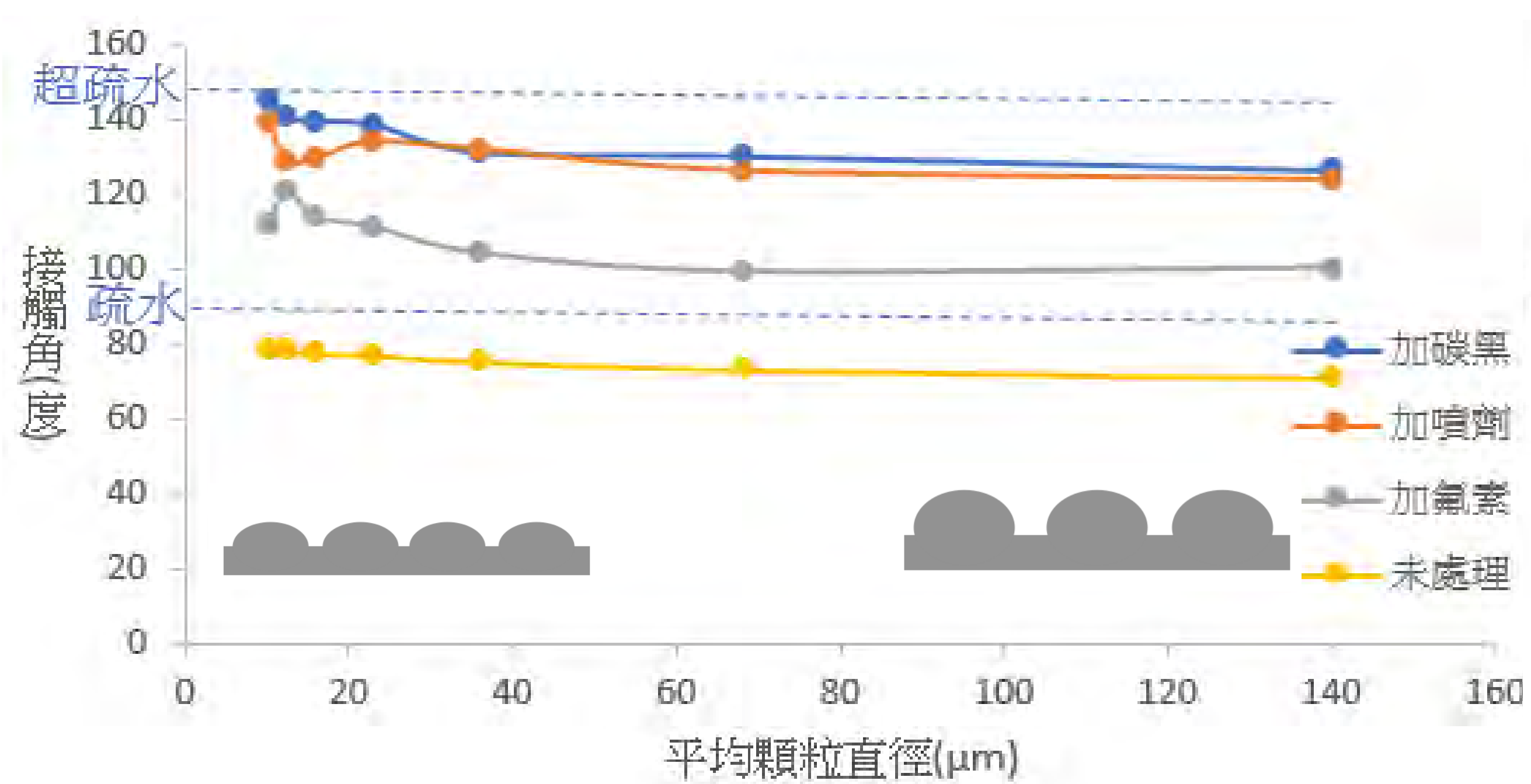


圖13 接觸角對平均顆粒直徑關係

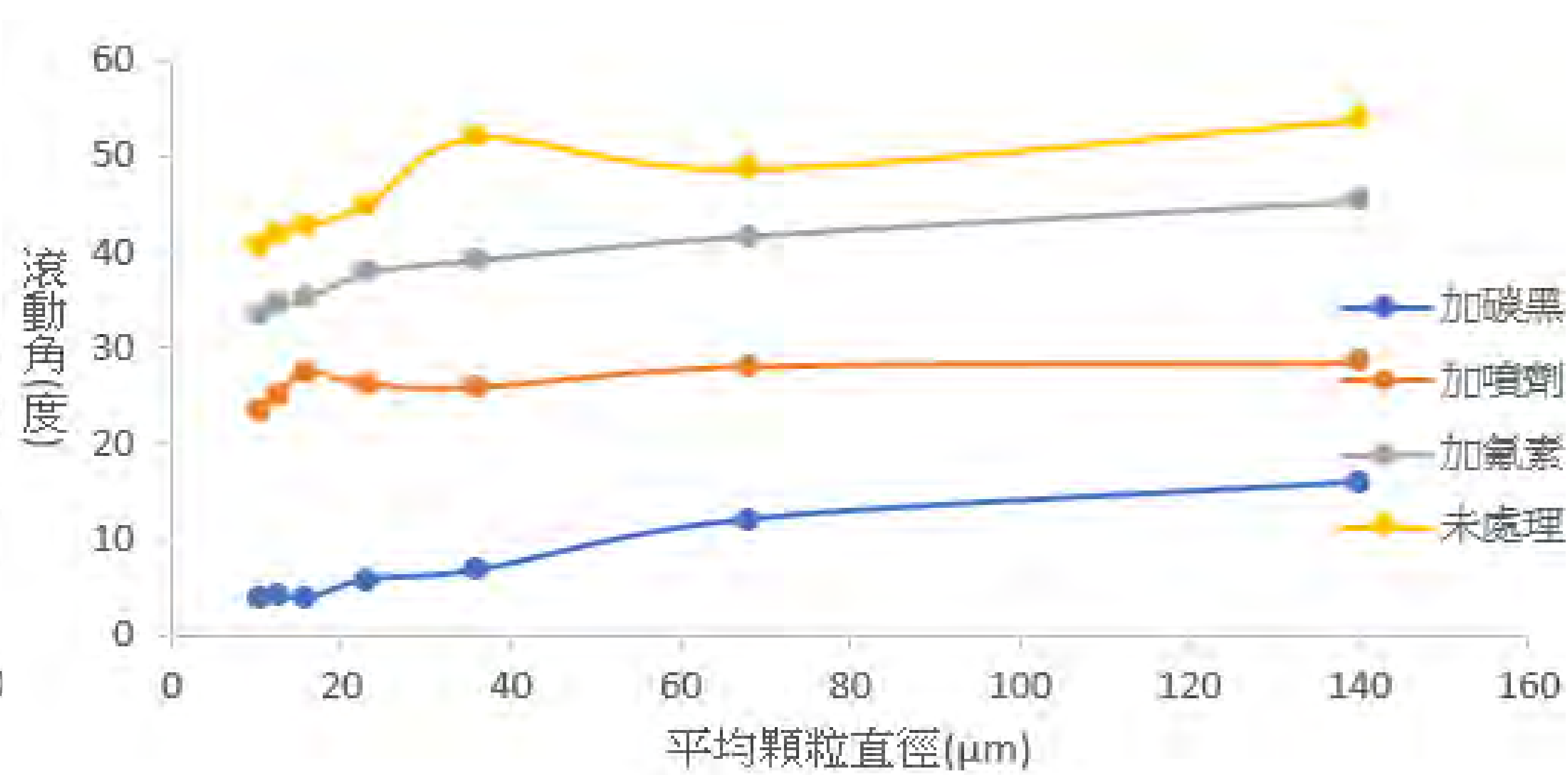


圖14 滾動角對平均顆粒直徑關係

### 二、靜摩擦係數

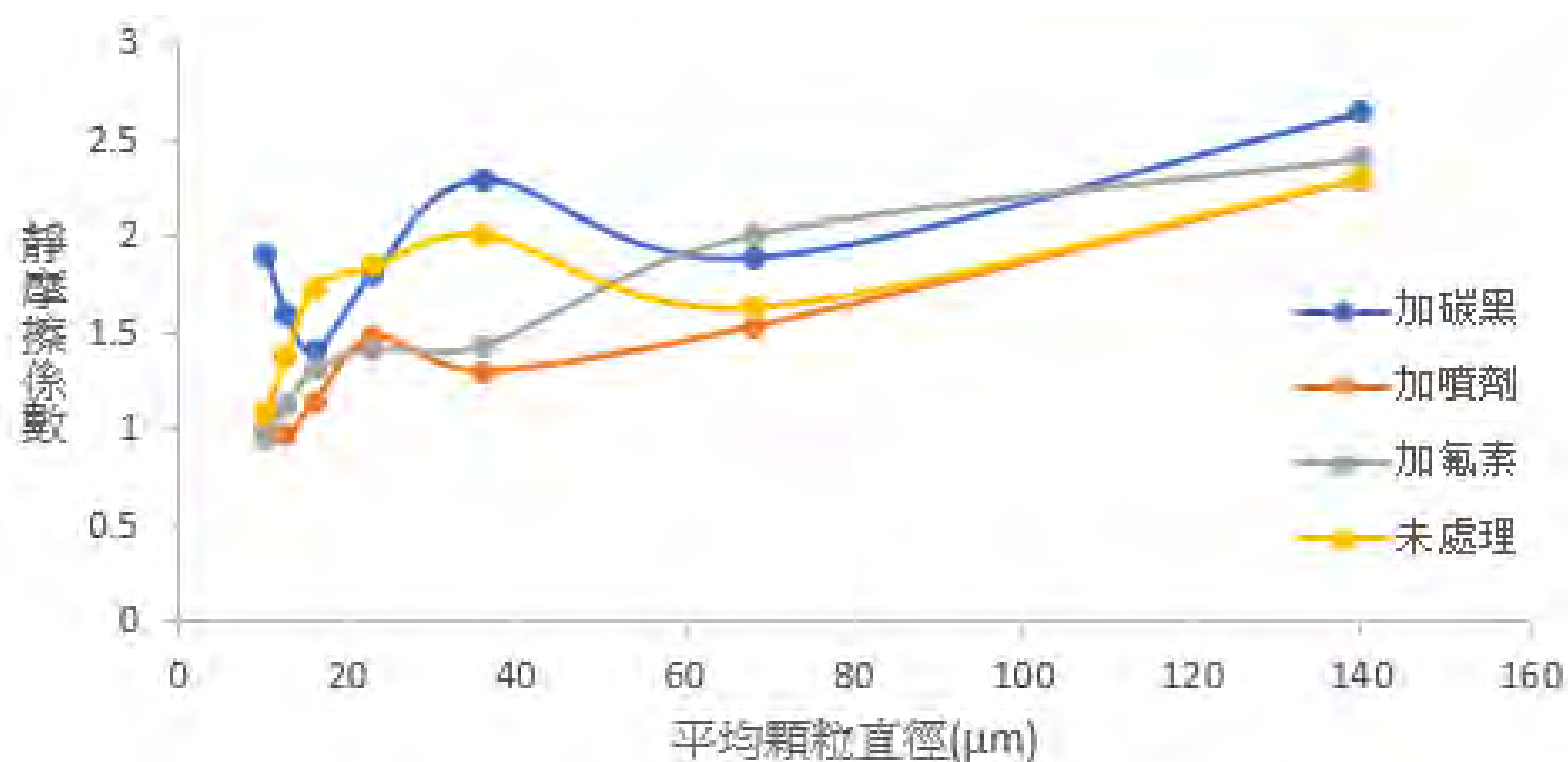


圖15 靜摩擦係數對平均顆粒直徑關係(斜面法)

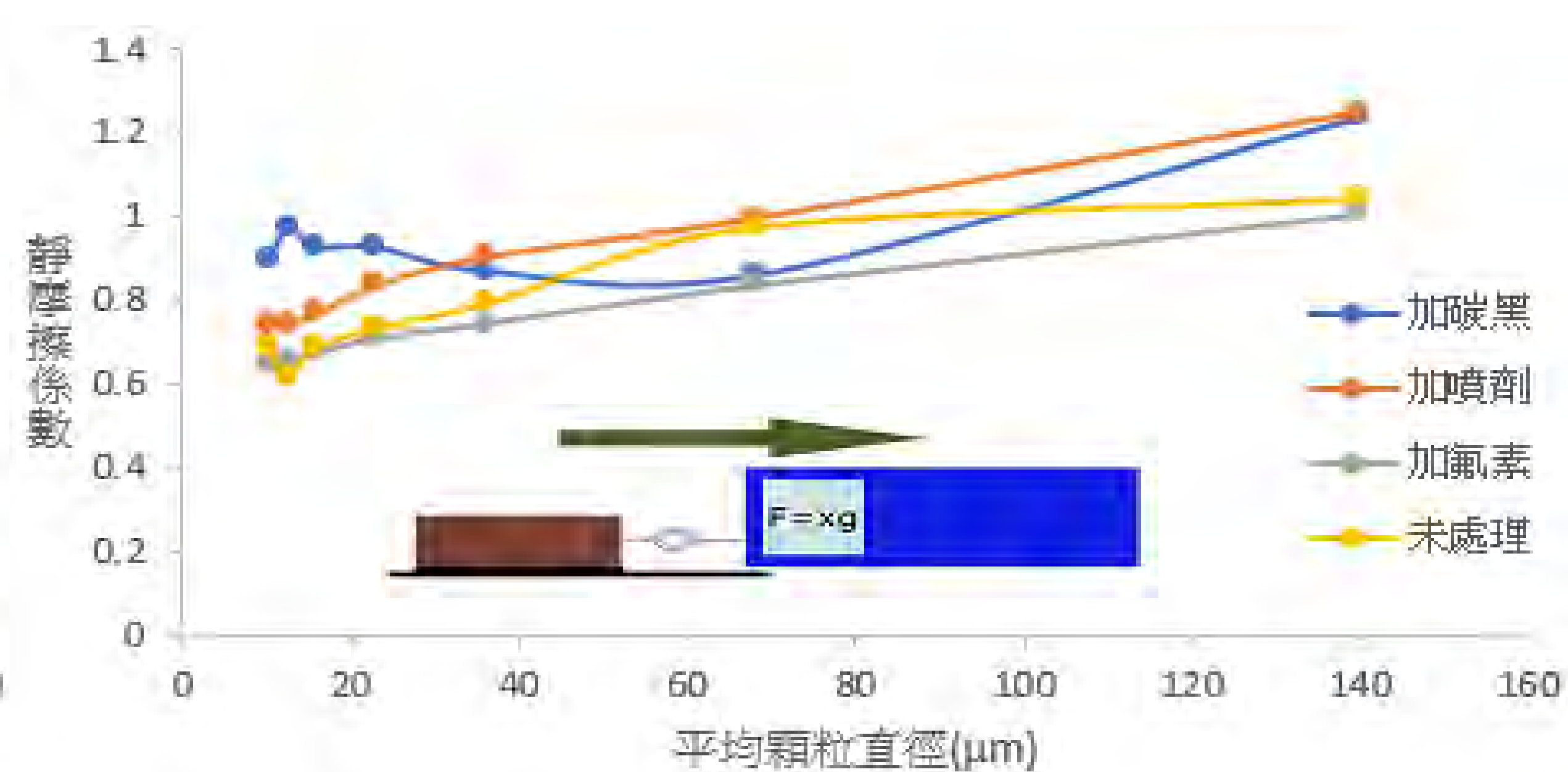


圖16 靜摩擦係數對平均顆粒直徑關係(力感測器)

### 三、接觸角、滾動角和靜摩擦係數之比較

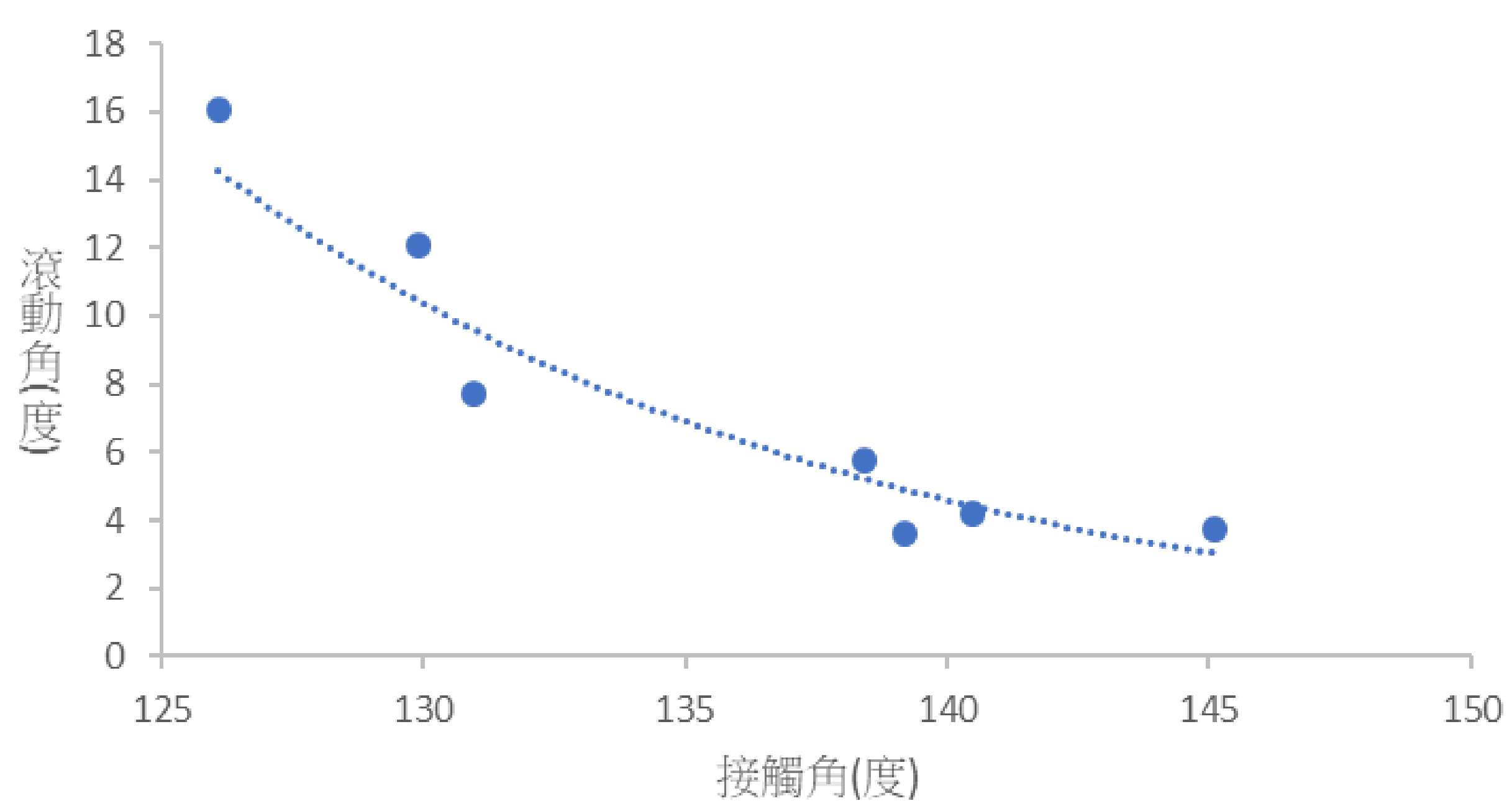


圖17 滾動角對接觸角關係

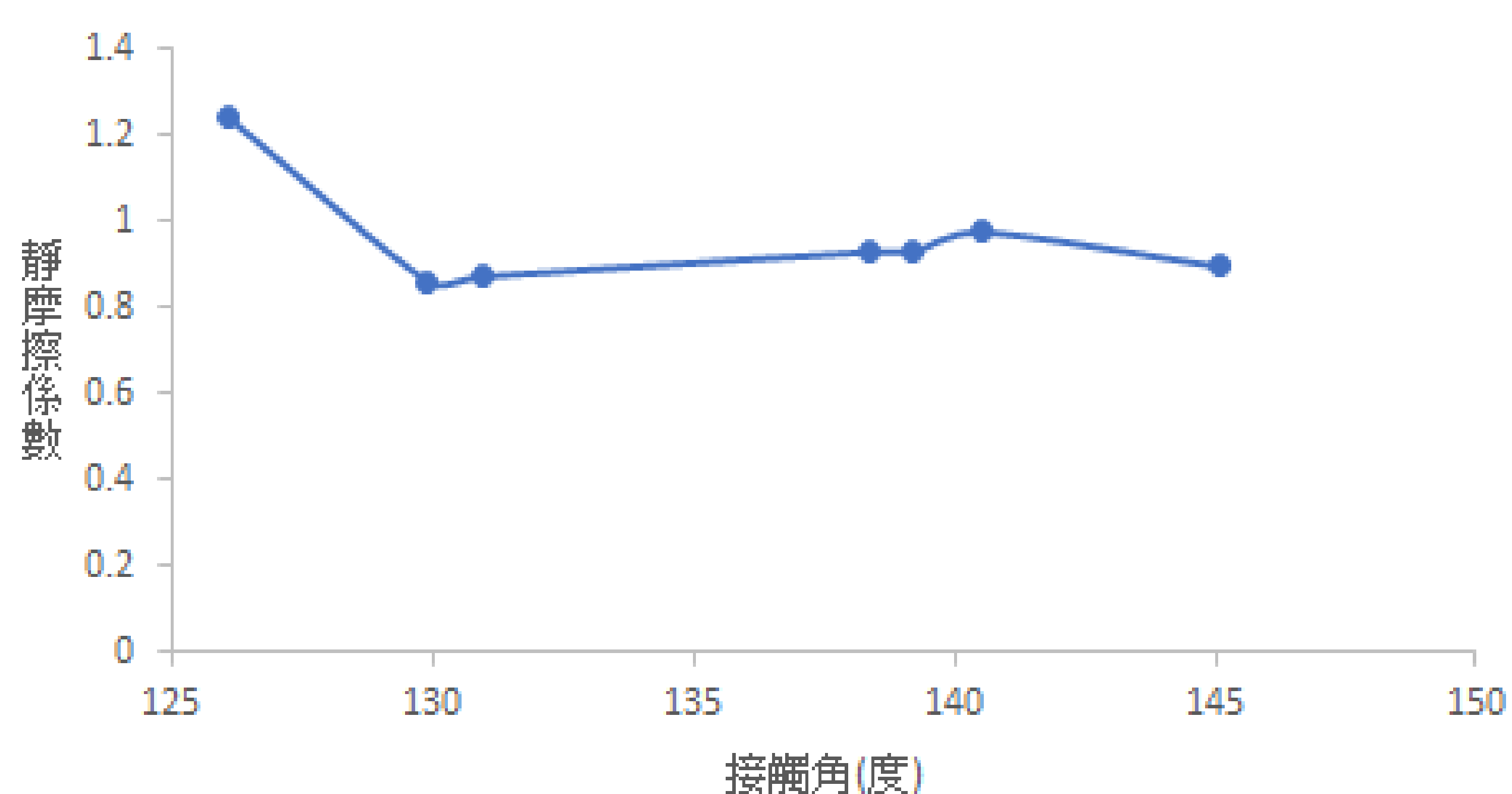


圖18 靜摩擦係數對接觸角關係



#### 四、液滴接觸固體表面積的比例 ( $f_1$ )

使用燻上碳黑的型號1000砂紙，套用Cassie and Baxter model方程式

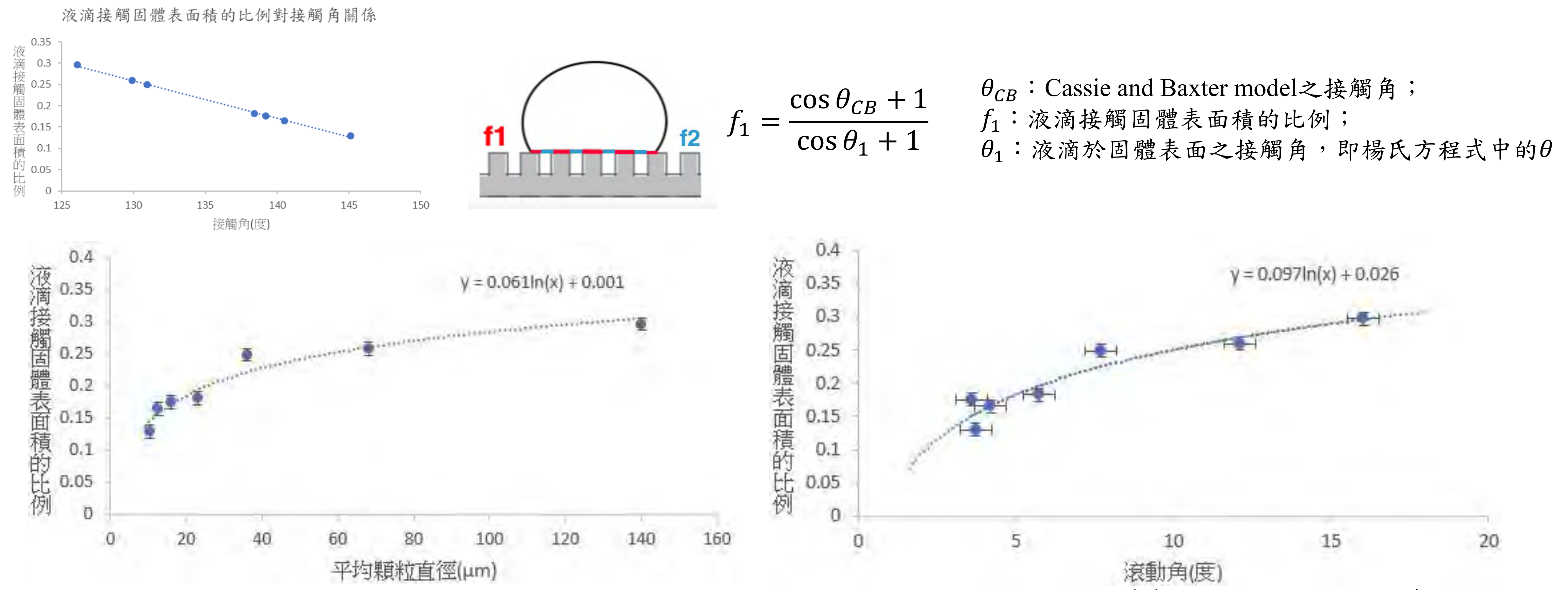


圖19 液滴接觸固體表面積的比例對平均顆粒直徑關係

圖20 液滴接觸固體表面積的比例對滾動角

#### 討論

- 一、在接觸角的部分，碳黑與噴劑相似，但在滾動角的部分，有明顯的差距，推論因燻上碳黑的砂紙表面結構被改變，在水滴與載體間形成空氣層(圖21)，使水滴較容易下滑。在靜摩擦係數的部分，砂紙粒徑小於  $30 \mu\text{m}$  時有靜摩擦係數愈大的趨勢，推測其主要影響因素由砂紙顆粒轉變為碳黑的顆粒。
- 二、在液滴接觸固體表面積的比例的部分，接觸角越大液滴接觸固體表面積的比例越小，液滴形狀越圓，與根據公式推測的相符，又因粒徑越大接觸角越小，液滴接觸固體表面積的比例越大。液滴接觸固體表面積的比例越大，滾動角越大，更加一步驗證，因水滴與載體間形成空氣層(圖22)，使水滴較容易下滑。

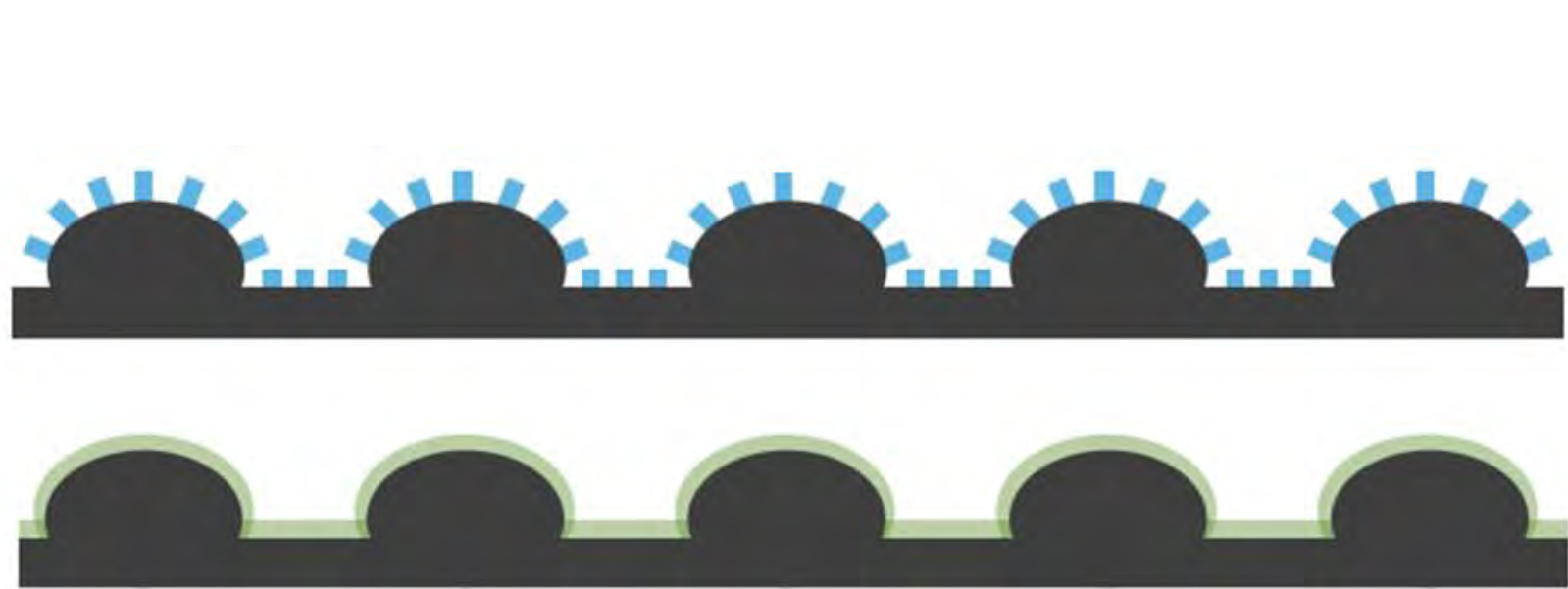


圖21 物理與化學疏水性表面結構示意圖

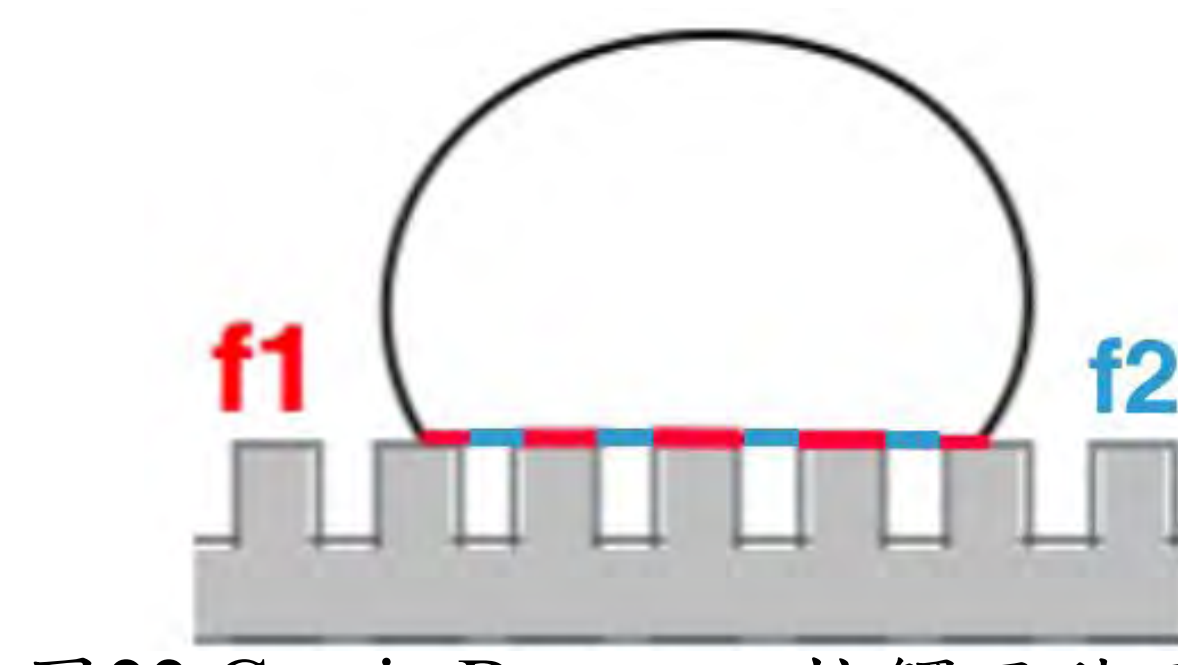


圖22 Cassie Baxter 之接觸面積示意圖

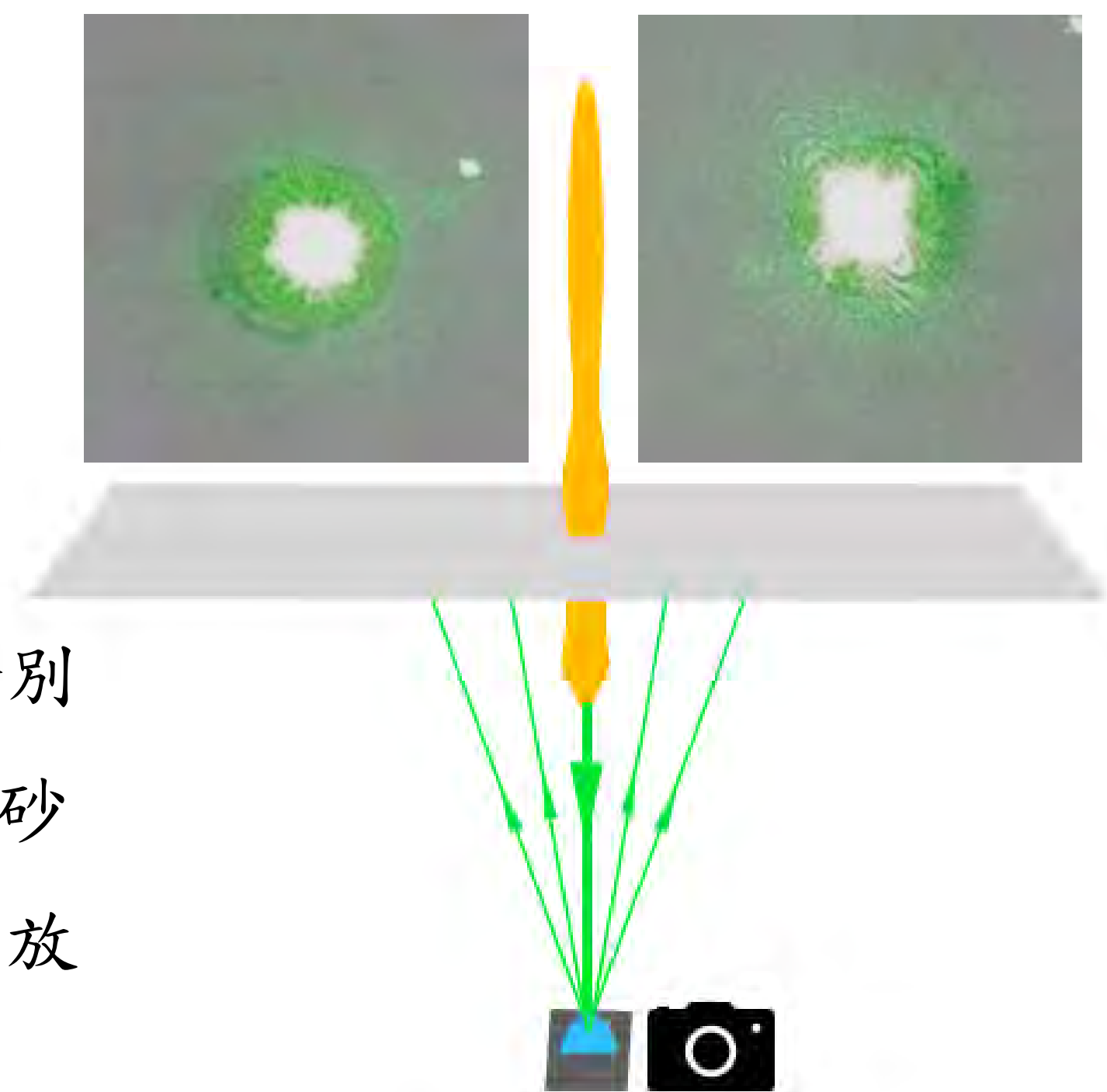


圖23 光反射實驗側視示意圖與水滴於普通砂紙(左)、碳黑砂紙(右)之反射光

- 三、為驗證碳黑砂紙與水滴之間的空氣層，使用雷射筆以15公分的距離垂直分別照射在普通砂紙和碳黑砂紙上的水滴，並觀察其反射情形(圖23)，因碳黑砂紙上的水滴光暈範圍較普通砂紙上的水滴大，且前者紋路像水波，後者呈放射狀，可推測是空氣層反射導致。
- 四、使用雷射光側面平行射入碳黑砂紙上的水滴(圖24、25)，雷射光在水滴內經折射打到底面時，會經射入面反射出，推測是空氣層反射導致。
- 五、在滾動角的部分，拍攝水滴在傾斜5度之不同載體上的情形(圖26、27)，測量其左右接觸角和側視液滴與載體的接觸長度。

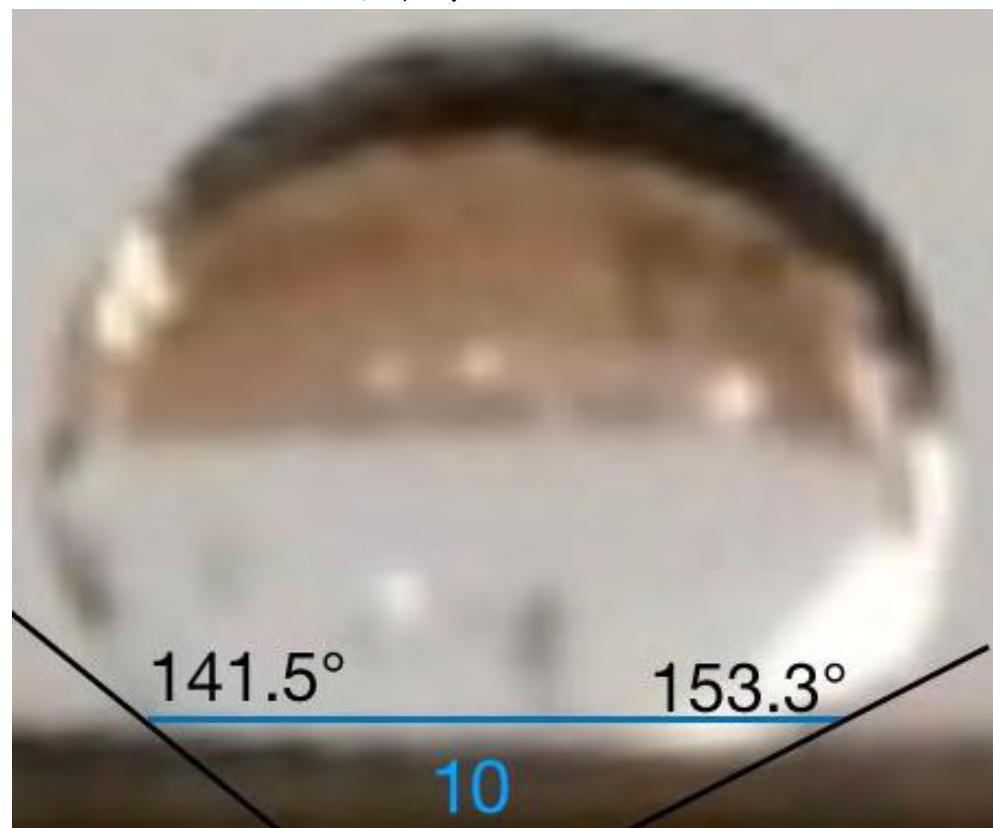


圖26 碳黑砂紙上的水滴

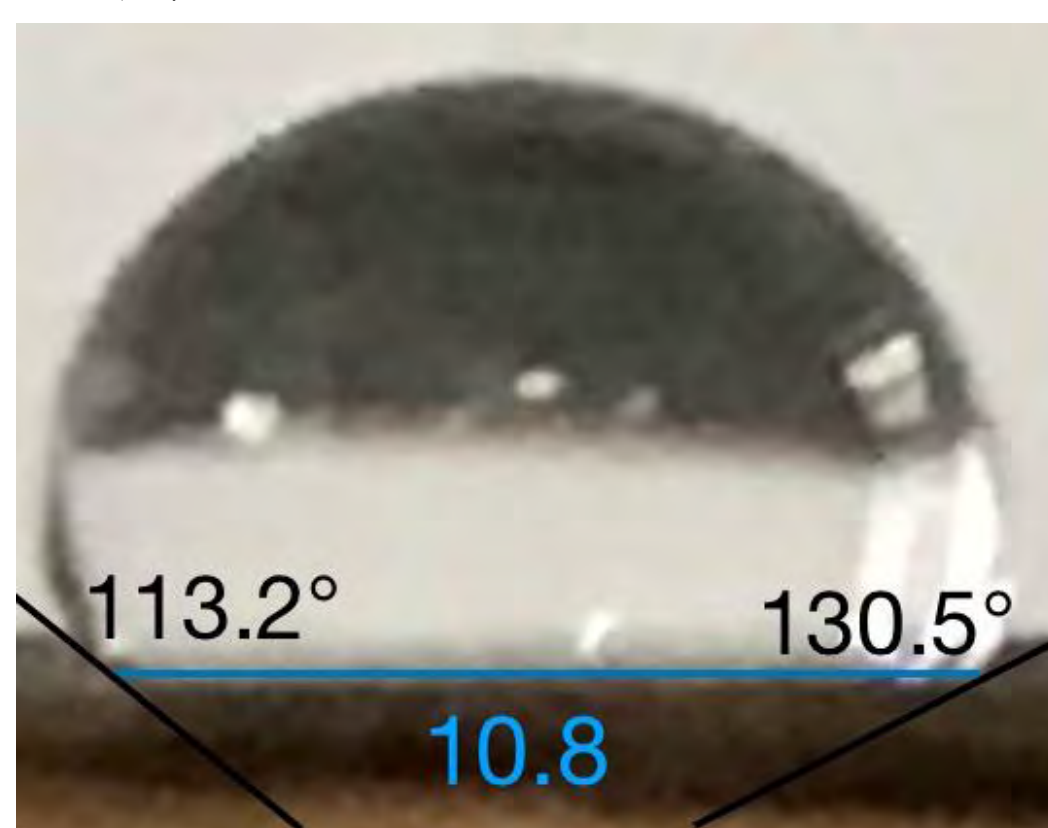


圖27 氟素砂紙上的水滴



圖24 雷射光射入水滴示意圖



圖25 雷射光射入水滴反射圖

#### 結論

- 一、砂紙的不同處理方式之疏水性大小：碳黑>噴劑>氟素>純砂紙，碳黑因表面結構改變而疏水性最強，疏水性最佳的為型號1000之碳黑砂紙，其接觸角為145.1度，滾動角為3.7度。
- 二、水滴體積增加時疏水性會變強，且形狀趨於橢圓形，當水滴為  $50 \mu\text{m}$  時長短軸比值約為1.2。
- 三、靜摩擦係數與接觸角無直接關聯，因造成靜摩擦係數改變的顆粒大小與改變接觸角的顆粒尺度大小不同。
- 四、液滴接觸固體表面積之比例越大，滾動角越大，因水滴與載體間形成空氣層，使水滴較容易下滑。
- 五、我們發現當砂紙的粒徑越大時，其摩擦係數會逐漸增加，但燻上碳黑的砂紙在粒徑變小時摩擦係數也會增加，其原因則是細小的碳黑填滿了砂紙間的縫隙，以致摩擦係數增加。

#### 參考文獻

[1] 林瑋隆、李頂立 (民96)。表面粗糙結構對疏水性影響之應用與研究 (臺灣2007年國際科學展覽會)  
 [2] 陳新龍 (民103)。石英奈米針狀結構表面之潤濕性及遲滯性研究  
 [3] 陳世家 (民101)。碳顆粒與油滴粒徑的探究。奈米新視界, 1, 61-81