2011 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號：140003

作品名稱

水滴在高溫鋸齒狀金屬表面上的爬坡現象

得獎獎項

一等獎

加拿大正選代表:2011 年加拿大科學展覽會

作者姓名：張芳瑀

就讀學校：臺中市立大雅國民中學

指導教師：鐘文生

關鍵字：高溫、鋸齒、向上爬坡

作者簡介



我是張芳瑀，就讀臺中市立大雅國中二年級。

在國中的生涯當中，我從事了兩年有關水滴的研究，在這之中，我擁有同年齡的學生所沒有的經驗並且過的非常充實，在當前考試密集的學習環境，要如何尋找除了考試重點以外的知識? 在參加科展的過程中，我找到了答案。

我熱愛思考，總是嘗試著問「為什麼」，這也使我喜愛科學研究，其中，你永遠可以找到尚未被探討的領域，並且經過不斷實驗、修正，得到解答，但是在這個過程中免不了遇到瓶頸，感謝曾經替我解除疑惑、鼓勵我的老師!

在未來，我希望自己能夠嘗試多元的學習管道並得到新知。

摘要

實驗發現，在高溫並排鋸條之齒面上可以形成懸浮水珠，而水珠具有爬坡的現象。當鋸條齒面溫度達四百度且鋸條傾斜角低於二十度時，水滴均可向上爬坡，特別的是，角度在十二度內，大小水滴的爬升速度皆有隨著角度提高而變快的趨勢，且質量較小的水珠爬升速率較快。

水珠之所以能向上爬坡與其表面受熱快速蒸發和齒廓曲線有關。首先，水珠因受熱在周圍形成一層很薄的蒸氣層，阻隔熱的傳遞，使得在鋸齒面上可以形成懸浮水珠，持續一段時間而不會立即蒸發；而水珠爬坡的現象，肇因於蒸氣壓力和蒸發所產生的反向動量，配合不對稱的齒廓曲線，造成水珠會受到一個沿斜坡向上之淨力，進而可以爬坡。綜合前述的原因，我們可以合理的解釋各項實驗結果。

Abstract

We have found out that water droplets may be formed and can climb up the stacked saw blades (SSBs) when the whole system is in high temperatures. The exact conditions for water droplets to climb up are (1) the temperatures of the SSBs are more than four hundred degrees of Celsius and (2) the inclined angles of the SSBs are less than twenty degrees. In particular, when the angle of the SSBs is less than twelve degrees, the steeper the SSBs are, the faster the water droplets climb up. In addition, the smaller droplets are climbing up faster than the bigger ones.

The climbing phenomenon of water droplets on the SSBs may be due to reasons associated with the evaporation of water droplets and the saw tooth profile. Firstly, a thin vapor layer is formed when the water droplet touches the heated SSBs, slowing heat transfer to the water droplet from the hot SSBs and thus making a floating water droplet that stays on the saw tooth surface for a while. The climbing phenomenon may be deduced based on the forces analyzed from the gas pressure, the recoiled momentum of the water droplet resulted from the water evaporation, and the asymmetric saw tooth profile. Consequently, an upward net climbing force is obtained. With the arguments mentioned above, all of the observations may be explained reasonably.

目錄

摘要……p.iv

壹、　研究動機……p.1

貳、　研究背景……p.2

參、　實驗架設與步驟……p.3

肆、　研究結果……p.9

一、鋸齒表面溫度對水滴運動的影響……p.9

二、鋸齒傾斜角度(β)對水滴爬升速率的影響……p.10

三、水滴大小對水滴爬升速率的影響……p.11

四、鋸齒齒廓曲線對水滴運動方向的影響……p.11

伍、　原理與討論……p.14

陸、　結論……p.25

柒、　參考資料……p.26

捌、　附錄……p.27

一、不同液體對水滴爬升速率的影響……p.27

二、不同鋸齒大小對水滴爬升速率的影響……p.28

三、拍攝的爬樓梯現象，放大進行分析。……p.30

壹、研究動機

學期初我們決定參加校內科展競賽，一開始，我們的研究方向為：「水滴的蒸發現象是否與金屬材質或與凹凸不平的表面而有不一樣的狀況？」。研究的過程中，我們購買一般市售的鋸子來做為一個凹凸不平的表面，但我們卻發現滴在高溫鋸齒狀鋸子上方的水滴，會停不下來，而且都是往固定的方向滾動，如果我們把鋸子交換 180 度方向，接下來的水滴則往另一個方向滾動。本來以為是長條狀的鋸子沒有擺放成水平所造成的影響，所以我們把鋸子的其中一邊架高，讓鋸子成五度的傾斜角，結果水滴會有往上爬升的現象。這個有趣的結果引起了我們的注意，我們查詢歷屆科展作品，找到在全國第 48 屆科展比賽中，有一篇作品可以使水滴向上爬升【1】，但不同的是，作者是利用板子震動的方式來使水滴向上爬升，我們並沒有發現國際科展中有人使用加熱的方式來使水滴向上移動。於是我們決定改變研究題目為：「水滴在高溫鋸齒狀金屬表面上的爬坡現象」，期望能知道水滴向上爬升的原因。

貳、研究背景

科學家萊頓弗羅斯特(Leidenfrost)在 1756 年發現水珠在一炙熱的湯匙上能停留 30 秒之久，而不會立即蒸發【2】，此現象是由於水珠受熱而在周圍形成一蒸氣層，減緩了水珠本身的蒸發速率所造成的，這就是萊頓弗羅斯特現象(Leidenfrost effect)。

2003 年的一篇作品：Leidenfrost drops【3】中提出，滴在高溫金屬平面上的水滴，當其半徑越大，水滴周圍的蒸氣層也隨之越厚。

2008 年美國 Intel 國際科展的一篇作品「見微知『駐』-水珠律動與圓駐波」【4】，當中研究水珠在一高溫加熱板上的運動變化，且發現當金屬表面溫度越高，水滴周圍的蒸氣層也越厚。

而在 2006 年刊出的一篇專業文章中【5】，發現在一高溫的階梯鋸齒狀表面上，水珠會有爬坡的現象，向上速度可達每秒五公分。該篇作者認為水滴在接觸高溫金屬板之前，會形成蒸氣層氣墊，受到鋸齒形狀的影響，水蒸氣會朝向最容易的途徑走，因黏滯的關係，同時會把水珠帶往同一方向，就像水流帶著船前進一樣，而鋸齒溝槽的作用即在控制水蒸氣方向。

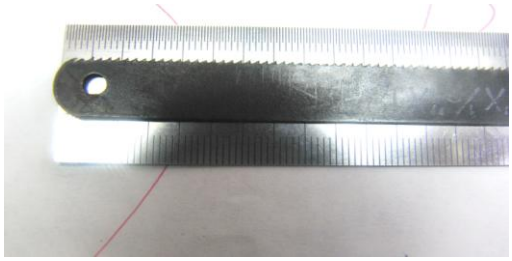
不同於上述作品的是，在我們的實驗當中採用的鋸齒面其兩側長邊與短邊的夾角固定為 60 度，鋸齒長邊與短邊長度的比值為 2，則滴在上方的水滴最大爬坡速率為 18.00cm/s，若採用鹽水作為爬升液滴，最大爬坡速率更高達為 20.40cm/s。

參、實驗架設與步驟

本段包含：一、實驗架設；二、實驗方法說明；三、實驗步驟。詳細內容如下:

一、 實驗架設：

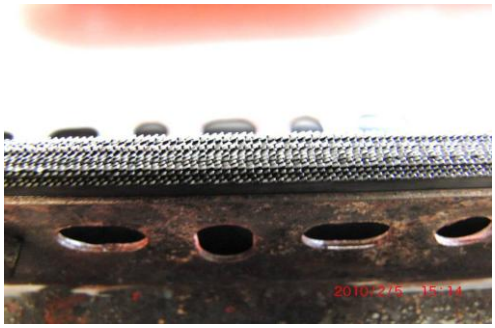
1. 將約 15 條相同鋸片(如圖一)並排，形成水滴可滾動的表面，如圖二。
2. 再用兩個角鐵將 15 條鋸齒固定住，如圖三。
3. 將鋸齒組放至瓦斯爐上加熱。
4. 達到特定溫度，滴下水滴並進行拍攝。
5. 實驗裝置全圖如圖四所示。



圖一:實驗中使用的鋸齒片



圖二:15 條鋸齒片並排



圖三: 鋸齒面以角鐵固定



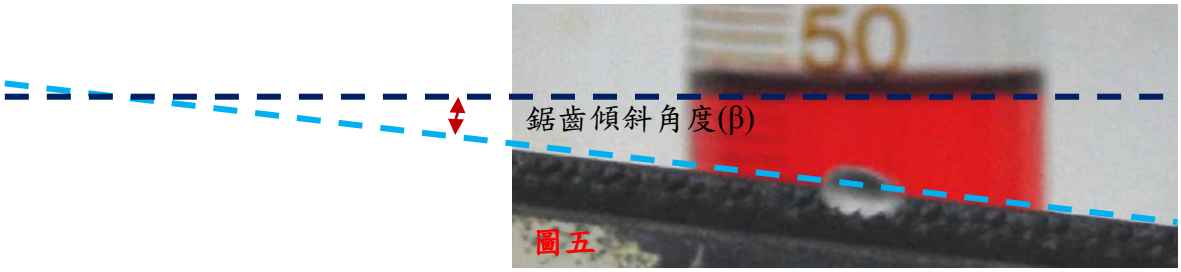
圖四: 實驗全圖

二、實驗方法說明：

1、計算水滴在鋸齒狀金屬上的爬升角度之方式：

(1)、我們在鋸齒狀金屬後方放一個量筒，內裝有紅色液體。紅色液體水面即為一個水平基準線。

(2)、紅色液體的水面和鋸齒狀金屬形成一個夾角，如圖(五)，我們將其定義為β角。



圖五

2、計算水滴爬升速率的方法：

(1.)使用照相機，我們設定拍照模式為 1 秒照 60 張照片。我們會在鋸齒狀金屬後方架設一個"尺"，來測量水滴爬升的距離。

(2.)拍照完畢後在電腦上放大測量。我們取的照片範圍共 15 張，時間間隔為 14/60 秒，計算水滴跑得距離，然後根據速率公式：速率 ＝ 距離 ÷ 時間 ＝ **距離 ÷ 14/60**

(3.)我們考慮到水滴剛接觸鋸齒狀金屬時，水滴正處於加速過程，我們忽略不計，所以我們取的照片範圍是從水滴接觸鋸齒狀金屬後的第 6 張圖片開始算起，一直取到第 20 張照片，取的照片範圍共 15 張，時間間隔為 14/60 秒。

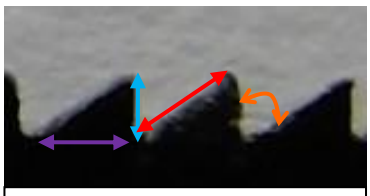
3、實驗中主要採用的鐵片規格如下:

鋸齒間距：1.09mm　(標示箭頭為 ⟷ 的長度)、

鋸齒長邊：1.27mm(標示箭頭為 ⟷ 的長度)、

鋸齒短邊：0.64mm(標示箭頭為 ⟷ 的長度)，

如圖六。



圖六

鋸齒長邊與短邊夾角：60 度(標示為箭頭 ↷)

*以鋸齒大小為操縱變因的實驗結果，請參考附錄-二，P.22 所呈現。

三、實驗步驟:

此部分包含四個實驗，操縱變因分別為：

實驗 1：金屬表面溫度；**實驗 2**：鋸齒傾斜角度(β)；**實驗 3**：水滴大小；**實驗 4**：鋸齒長邊與短邊長度的比值。

實驗 1: 鋸齒表面溫度對水滴運動的影響

(1)變因：

a、操縱變因：金屬表面溫度(以熱電偶式溫度計測量)。

b、控制變因：水滴為 0.04c.c.、鋸齒傾斜 5 度角、使用蒸餾水、鋸齒使用 A 鐵片。

(2) 實驗步驟：

a、將鋸齒狀金屬面固定傾斜 5 度角。

b、先將鋸齒狀金屬鐵片加熱至 200℃，然後滴下水滴，觀察水滴是否能

沿鋸齒狀金屬階梯向上爬升。

c、逐次增加金屬鐵片溫度至 400℃、500℃，觀察水滴是否能沿鋸齒狀金屬階梯向上爬升。

實驗 2: 鋸齒傾斜角度(β)對水滴爬升速率的影響

(1)、變因：

a、操縱變因：改變鋸齒傾斜角度，分別為：5、7.5、12、15、20 度五種。

b、控制變因：

第一組實驗：水滴大小為 0.04C.C.、使用蒸餾水、鋸齒使用 A 鐵片。

第二組實驗：水滴大小為 0.02C.C.、使用蒸餾水、鋸齒使用 A 鐵片。

(兩組實驗鋸齒表面皆達 400℃。)

(2)、實驗步驟：

a、將鋸齒鐵片傾斜 5 度並放於瓦斯爐上加熱。

b、等到一定的溫度後，在鐵片上滴水滴。逐次增加鐵片角度至 7.5、12、15、20 度。

c、計算水滴在不同角度的爬升速率。比較水滴爬升速率和角度的關係。

實驗 3: 水滴大小對水滴爬升速率的影響

(1)、變因：

a、操縱變因：改變水滴大小分別為：0.02c.c.與 0.04c.c.兩種

a、操縱變因：改變水滴大小分別為：0.02c.c.與 0.04c.c.兩種

b、控制變因：使用 A 鐵片、使用蒸餾水、鋸齒傾斜角度為 5 度角、溫度約 400℃。

(2)、實驗步驟:

a、將 A 鐵片放在瓦斯爐上加熱，等到一定的溫度後，在鐵片上滴不同大小水滴。

b、計算不同大小的水滴在鋸齒上的爬升速率。比較水滴的爬升速率和水滴大小的關係。

實驗 4: 鋸齒齒廓曲線對水滴運動方向的影響

(1)、變因：

a、操縱變因：改變鋸齒長邊與短邊長度的比值*為 1、1.5 與 2 等三種(如圖七所示)。

b、控制變因：使用蒸餾水，塑膠滴管滴出水滴(0.04c.c.)。

(2)、研究步驟：

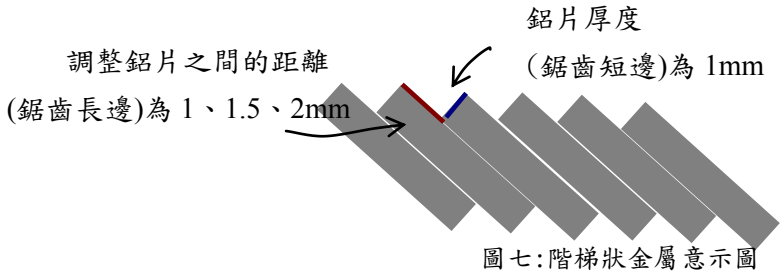
a、我們以厚度為 1mm 的鋁片疊成階梯狀，共 3 種。

b、將比值為"1"的鋁片，放置在瓦斯爐上，先讓階梯面呈**水平**，接下來，加熱鋁片達水滴可以滾動的溫度，水滴滴在階梯表面上，統計水滴會往哪一個方向滾動？

c、承 b，讓階梯面向右傾斜向下(左高)，統計水滴會往哪一個方向滾動？

d、承 b，讓階梯面向左傾斜向下(右高)，統計水滴會往哪一個方向滾動？

e、比值為 1.5、2 的階梯皆依循步驟 b~d，擺放「水平」、「左高」、「右高」，並觀察水滴移動方向。



圖七:階梯狀金屬意示圖

*鋸齒長邊與短邊長度的比值即為”**鋸齒長邊的**長度”÷”**鋸齒短邊的**長度”。

肆、研究結果

本研究的重要實驗結果如下詳述:

實驗 1: 鋸齒表面溫度對水滴運動的影響

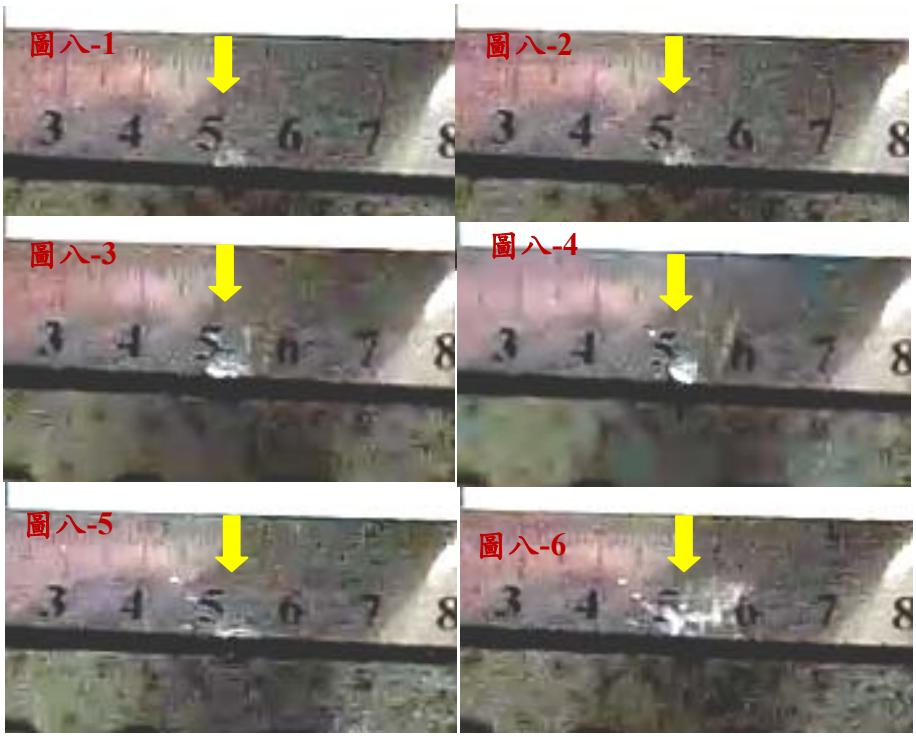
(1) 、實驗發現的現象如下：

a、 鋸齒狀金屬表面中達到 **400 度時，水滴結成珠狀**，不會馬上蒸發，且會向上滾動。

b、 當鋸齒狀金屬溫度**在 100~300℃左右會造成水滴快速的蒸發**。

c、 當鋸齒狀金屬溫度**大約為 300℃，會造成液滴產生炸開**的現象。(如圖八)我們用數個鋸子所排列而成的鋸齒狀金屬表面，非常難以加熱。我們放在瓦斯上用大火燒 30 分鐘才能達到約 400℃的表面溫度，即使連續燒 2 個小時，溫度頂多也只有約 480℃，可見鋸子的導熱性很差。

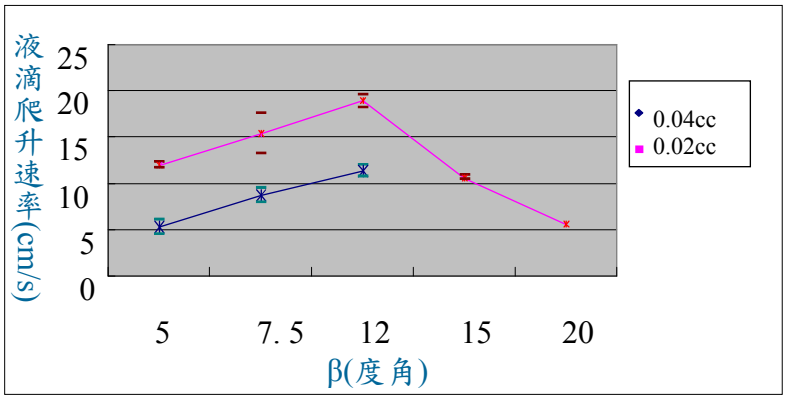
d、 後來的實驗，我們皆是用大火燒 30 分鐘，製造約 400℃的表面溫度，再把水滴滴在鋸齒狀金屬表面上，觀察水滴的爬升情形。



圖八:水滴在鋸齒狀金屬溫度約為 **300℃時，液滴炸開**的照片。

實驗 2: 鋸齒傾斜角度(β)對水滴爬升速率的影響

(1)、此實驗將鋸齒片傾斜角度(β)分別擺放 5、7.5、12、15、20 度，並分別計算水滴爬坡速率，以下為 β 和水滴速率的關係趨勢圖：



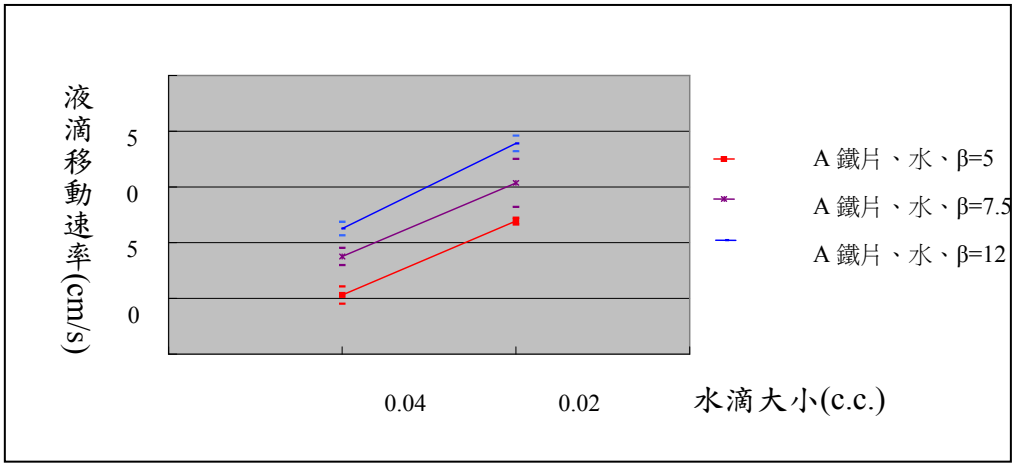
(2)、結論:

a、當 β＜ 12，角度越大，水滴爬坡速度越快。且 0.02c.c.水滴的爬坡速率較 0.04c.c.水滴快。

b、當 β＞ 12，角度越大，0.02c.c.水滴的爬坡速度變慢，0.04c.c.水滴則不能爬坡。

實驗 3: 水滴大小對水滴爬升速率的影響

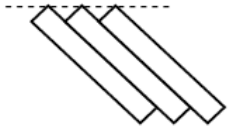
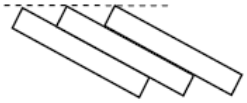
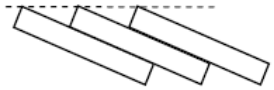
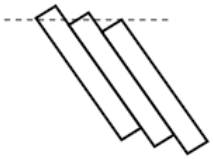
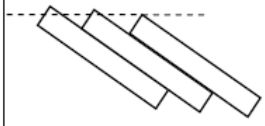
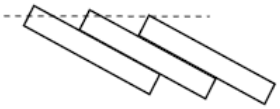
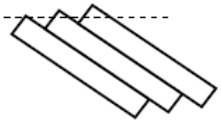
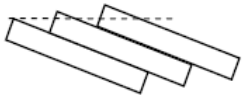
(1)、此實驗將水滴大小控制為 0.02c.c.和 0.04c.c.兩種，並計算水滴爬坡速率，以下為水滴大小和水滴速率的關係圖:



(2)、結論:在相同的條件之下， 0.04 cc的水滴爬升速率較慢。

實驗 4：鋸齒齒廓曲線對水滴運動方向的影響

(1)、實驗結果：

鋸齒長邊與鋸齒短邊的比值 階梯面傾斜情形	1	1.5	2
階梯面呈**水平**，統計滴在上方的水滴會向左及向右滾動的機率	編號：水平-1 向右：50 % 向左：50 % 	編號：水平-1.5 向右：100% 向左： 0% 	編號：水平-2 向右：100% 向左：0 % 
階梯面**向右傾斜向下(即左邊高、右邊低)**，統計滴在上方的水滴會向左及向右滾動的機率	編號：左高右低-1 向右：100 % 向左： 0 % 	編號：左高右低-1.5 向右：100% 向左： 0% 	編號：左高右低-2 向右：100% 向左： 0% 
階梯面**向左傾斜向下(即左邊低、右邊高)**，統計滴在上方的水滴會向左及向右滾動的機率	編號：左低右高-1 向右： 0% 向左：100% 	編號：左低右高-1.5 向右：90% 向左：10% 	編號：左低右高-2 向右：97 % 向左： 3 % 

(2)、總結：

a.根據實驗數據編號：左高右低-1、左高右低-1.5、左高右低-2 等三個實驗結果，水滴皆是向右移動，可以很容易理解的是，水滴一定會順著金屬階梯面向下的坡度而向下滾下去，即水會往低處流。但是編號：左低右高-1.5 與左低右高-2 等兩個實驗數據，明明水滴應該向左的方向(往低處的方向)滾下去，但卻朝右方向(向高處的方向)滾上去，而編號：左低右高-1 卻沒有這樣的現象。

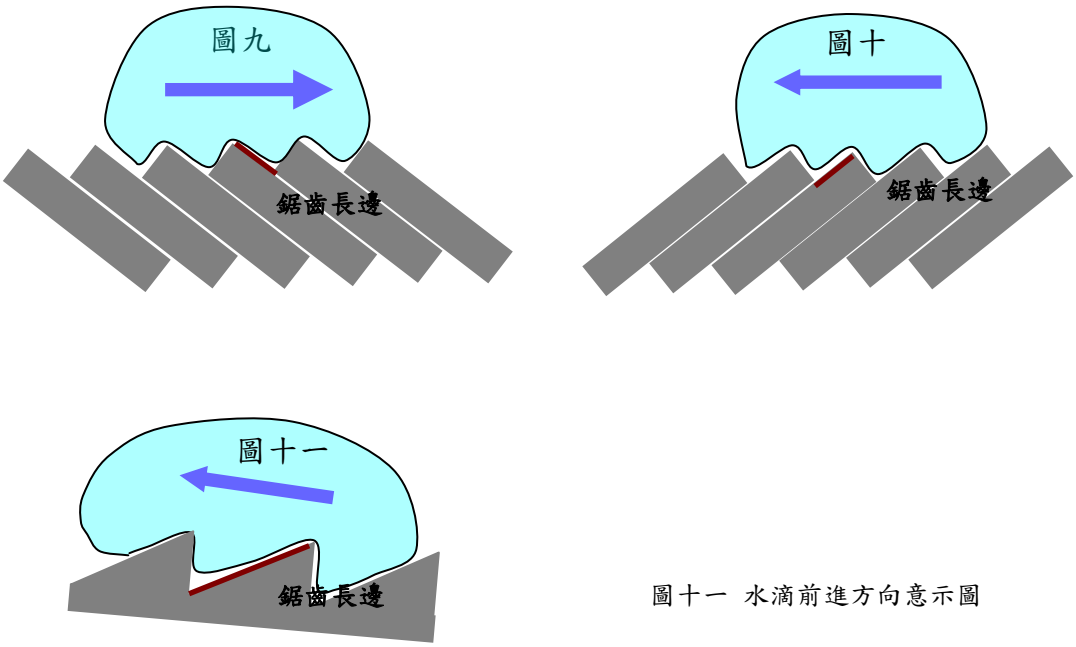
b.當階梯面呈現"水平"狀態時，鋸齒長邊與鋸齒短邊的比值＝1，水滴不會有固定的移動方向。如編號：水平-1。

c.當階梯面呈現水平狀態時，照理說向左、向右滾動的機率應該各半，但實

驗數據編號：水平-1.5、水平-2 兩個實驗結果，卻極為明顯的呈現向右方滾動的趨勢。

d.因此，我們認為水滴滾動的方向會受到階梯面形狀的影響，鋸齒長邊與鋸齒短邊的比值若大於 1，也就是接觸到水滴的左右兩方的其中一方較大(此處是：鋸齒長邊的長度>鋸齒短邊的長度)，水滴就會固定沿著同一個方向滾動。水滴移動方向即為鋸齒長邊所面對的方向，如圖(九、十) 。

e.當我們採用鋸齒狀金屬為爬坡表面時，如實驗 1~3，水滴亦會固定往鋸齒長邊所面對的方向前進。如圖十一。



圖十一 水滴前進方向意示圖

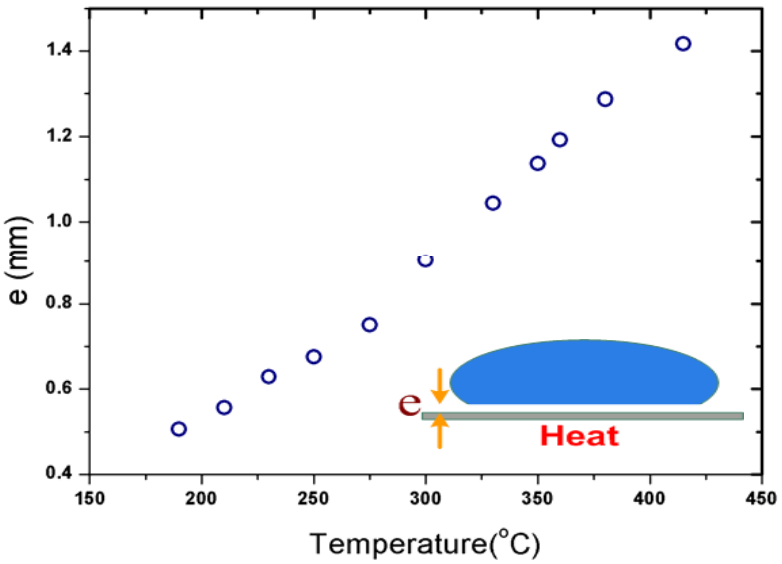
伍、原理與討論

討論重點包含：一、推論水滴爬坡主因；二、不同角度之下水滴的速率變化；三、不同水滴大小對其移動速度的影響。內容如下：

一、推論水滴爬坡主因:

原因有四: 1.水滴形成蒸氣層、2.蒸發產生力量、3.力量受到齒廓曲線控制，且沿斜面向上 4.此力量為反向動量及蒸氣壓力所產生，內容如下:

1、鋸齒溫度達 400℃時，水滴周圍形成蒸氣層，會延長水滴在鋸齒面上存在的時間。



圖十二 ： 水滴下方的蒸氣層厚度與金屬面溫度的趨勢圖

摘自＜見微知「駐」-水珠律動與圓駐波＞科展作品

在一高溫面上，水珠因受熱產生一蒸氣層，並且隨著金屬面溫度提高，蒸氣層的厚度越厚，如圖十二。

當鋸齒表面達到 400℃時，水滴下方存有足夠的蒸氣以阻隔熱的傳遞，使水滴不致於蒸發太快，並且才能懸浮於鋸齒上方。

但當鋸齒表面的溫度大約是 300℃時，水滴反而會有碎裂開來的情形，參考圖十二，可知當鋸齒表面約為 300℃時，水滴下方的蒸氣層厚度較 400℃時薄，而蒸氣是不好的導熱體，當其厚度較薄則代表其阻隔熱傳遞的效果變差，因此整顆水滴會劇烈的蒸發，類似沸騰的狀態，但是，在平面上卻無法觀察到水滴炸開的現象，原因是鋸齒的不對稱形狀促使此巨大的蒸發力量分散，才會導致水滴「炸開」。

2、水滴滴落鋸齒面上時，蒸發的過程產生了力量。

實驗當中，有三個現象可驗證此推論，分別詳述如下:

證據(1):水滴彈跳

條件:A 鐵片、液滴大小為 0.02c.c.、鋸齒階梯傾斜 5 度角，連續加熱 4 小時。

圖十三-1　t = 0 秒



圖十三-2　t = 1/60 秒



圖十三-3　t = 2/60 秒



圖十三-4　t = 3/60 秒



圖十三-5　t = 4/60 秒



圖十三-6　t = 5/60 秒

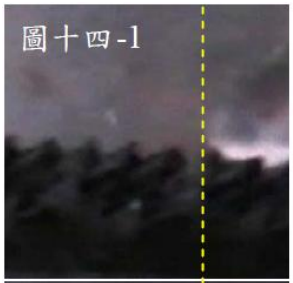


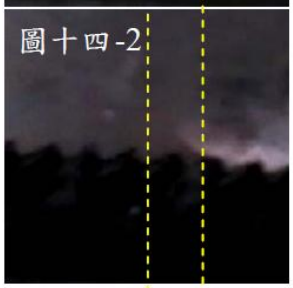
圖十三，我們一直對鐵片加熱 4 小時，接著滴下水滴且同時進行拍攝。圖十三-3 中，水滴剛接觸高溫鋸齒面時所產生的模糊形狀，可見水滴蒸發得非常劇烈，之後，水滴甚至從鐵片表面往上彈跳起來。此現象讓我們想到的是：**蒸發**提供了水滴向上力量。從水滴往「左上方」的彈跳方向便可推知，水滴在接觸鋸齒面金屬之後，其蒸發所產生的力量是往左上方的。

證據(2)：

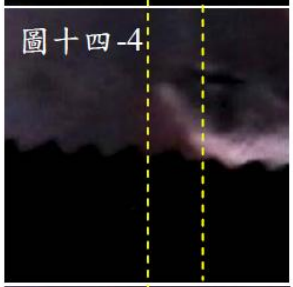
0.04c.c.水滴「往前」→「前端劇烈蒸發」→「產生凸起形狀」→「水滴前進」

a.水滴移動照片：

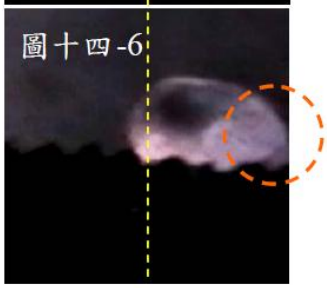




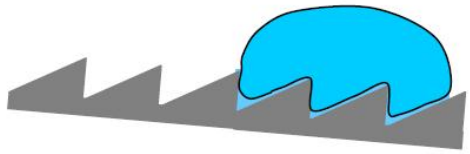


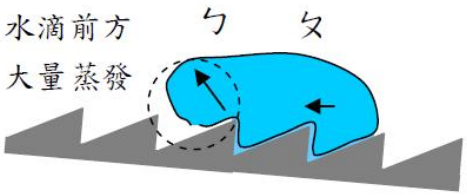


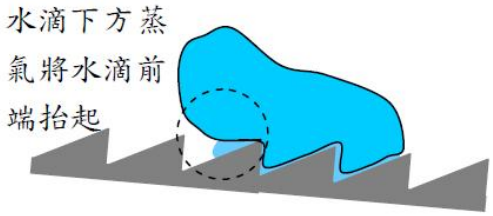


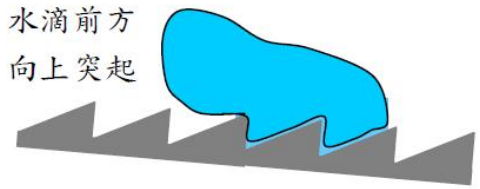


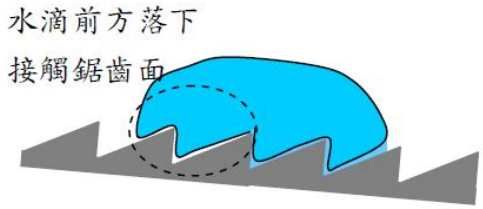
b.水滴移動示意圖(深藍為水滴；淺藍為蒸氣層)

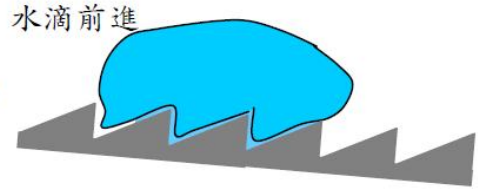












c.現象分析：

(a). **因為水滴下方蒸發，使其向上抬起後接著向前移動：**

接觸鋸齒面時，因受熱而大量蒸發，使得水滴下方有一蒸氣壓，此蒸氣壓力會使水滴抬起。

(b).**水滴往前，前端大量蒸發，是水滴前進的關鍵：**

雖然水滴下方的蒸氣會阻隔熱的傳播，使得蒸發速率變小，那麼少量的蒸發將不足以使得水滴前進或向上抬起。

但是水滴往前進的過程當中，其下方蒸氣會受到鋸

齒短邊的阻擋，因此下方的水蒸氣將不會(或只有少量)隨著水滴前進。因此，在水滴前進的過程中，我們如果將水滴分為勹、夕兩部分，則勹部分下方的蒸氣會較少，阻隔熱傳遞的效果變差，因此水滴前端勹部分將會大量蒸發，而相較於夕部份下方，勹部分的蒸發力量是大多的(因夕部分下方一開始就有一層蒸氣層)，也因此水滴會有向上凸起的情形如圖十四-3、4。當水滴再次覆蓋到鋸齒面上，又劇烈的蒸發、前進，如此循環不斷。

(c).總結：

I.從水滴「往前」→「前端劇烈蒸發」→「產生凸起形狀」，可知蒸發會產生力量。

II.蒸發的力量主要來自前端，但後方依然會蒸發，推動水滴前進，(如圖十四-6 橘色圈：水滴被推離鋸齒長邊。)

齒長。

證據(3)- 0.02c.c.水滴前方凸起、後方被抬起:

條件:A 鐵片、蒸餾水、液滴大小為 0.02c.c.、鋸齒階梯傾斜 7.5 度角。

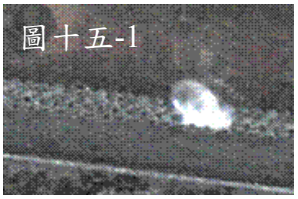
由此連續照片，可觀察到小水滴也有相同的運動情形:前端凸起，不同的是，水滴的後端甚至有被推起的形狀(如圖十五-2、4)。

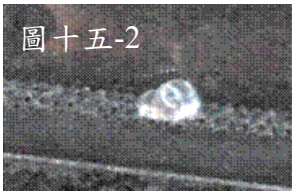
由前段的解釋，我們可以清楚的知道，水滴前端凸起的形狀與前端劇烈蒸發有關，對於水滴後方被推起的現象，我們推論：

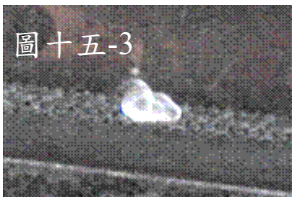
a.根據上頁圖十四-6「0.04c.c.水滴被推離鋸齒長邊」與左圖「0.02c.c.水滴後方被抬起」，我們可知，水滴後方亦有一蒸發的力量，差別在於，此力量對於不同質量的水滴會造成不同的抬起程度。

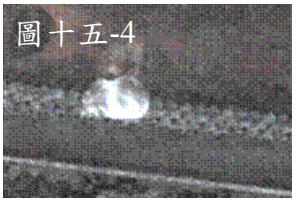
b.前端與後端的力量互相配合，使水滴沿斜面爬坡。

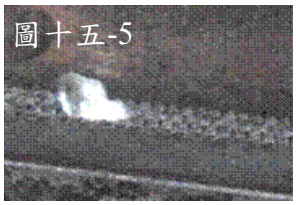
c.將水滴抬起的力量方向與鋸齒長邊有關，且與之幾乎垂直。


圖十五-1


圖十五-2


圖十五-3


圖十五-4


圖十五-5

*總結上述三個現象，可知蒸發會產生一力量。

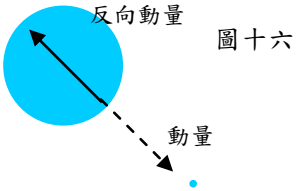
3、鋸齒齒廓曲線配合蒸發力量：

在實驗四當中，我們發現水滴的運動情形會受到「鋸齒長邊與短邊的比值」所影響， 當鋸齒長邊與鋸齒短邊的比值等於 1 時，水滴不會有固定的移動方向。但當比值大於 1 時，水滴會往鋸齒長邊所面對的方向前進。由此可知：**水滴接觸鋸齒狀金屬的兩邊(即鋸齒長邊與短邊)之面積大小，會決定了蒸發的淨力方向。**

4、綜合以上證據，我們推論出蒸發的力量為：

第一、 蒸發所產生的<u>反向動量</u>

(1).原理:當一個水分子往右下蒸發，則其有一往右下的動量，此時水珠會獲得一反向動量以維持系統的動量守恆(如圖十六)。



圖十六

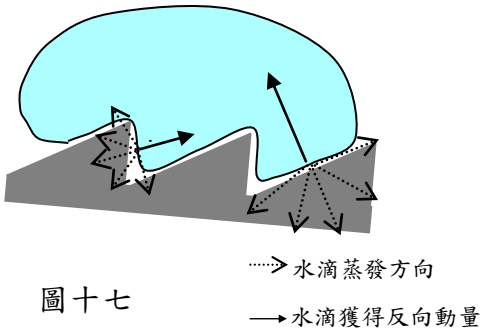
(2).水滴在鋸齒面上所獲得的反向動量如圖十七所示。

第二、<u>蒸氣壓力所形成之正向力</u>:

(1)原理:水滴因受熱，在其周圍形成一蒸氣層，蒸氣具有動能，會施加給水滴一<u>正向力</u>，在單位面積上所受的正向力，即為壓力。

(2) 水滴在鋸齒面上所受的正向力如圖十八所示。

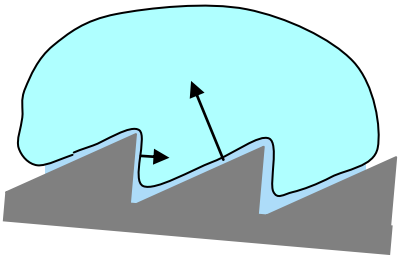
在鋸齒短邊上，水滴有無數個蒸發方向，但是在短邊上蒸發的水分子，它們的總動量方向往左，使水滴獲得一往右的反向動量。同理，在長邊的蒸發情形，會使水滴獲得一往左上的反向動量。



圖十七

小結:水滴在長邊上的蒸發量較多，因此往左上的反向動量較大。

在兩斜面上的力量大小:根據 P=F/A 可知，在相同壓力之下，受力面積越大，則其所受的力量也越大。

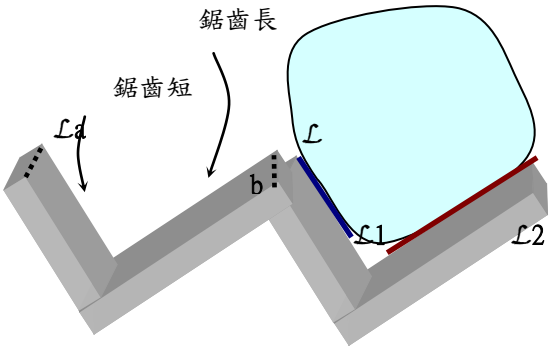


圖十八

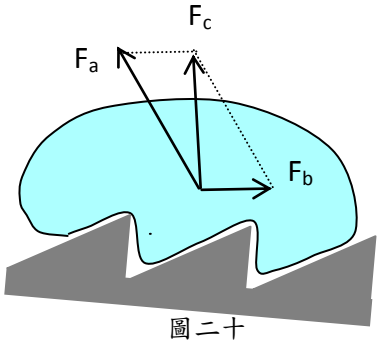
總結:根據以上兩個力的分析，可知水滴在鋸齒面上所受的力，以往左上的力為最大，因此水滴會往左上移動。藉此分析，我們對於所有的研究結果最大的共同點「水滴總是沿著鋸齒長邊所面向的方向前進」，可以得到一個合理的解釋。

根據以上分析，我們繪出一水滴受力圖(此圖當中設 β=5):

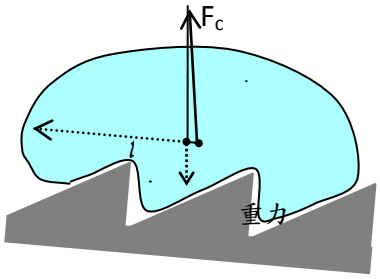
(1.) 水滴在兩側面上蒸發所產生的力量會受到水滴接觸的兩斜面面積大小影響，因此，我們想要藉此估計在兩斜面的力量比。見圖十九，因水珠在鋸齒面上接觸 L a 及 Lb 的長度是一樣的，因此我們只須考慮水珠所接觸的 L 1：L 2 的比例，我們測得 L1 和 L 2 的長度比為 1：2.2，由此可知水滴在兩斜面蒸發的**力量比亦為 1:2.2**，在圖二十中表示為 Fa、F_b，兩者的淨力即為 F_c 。



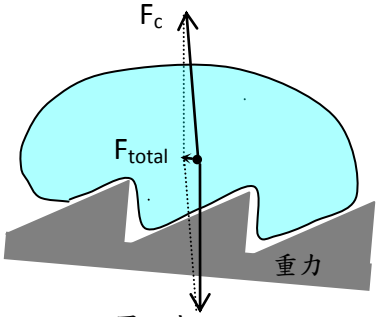
圖十九:兩斜面之力量比說明



圖二十



圖二十一: 透過 F_{total} 和重力的方向及 F_c 來推知 F_{total} 和重力的大小



圖二十二

0.0009gw，與重力(0.02gw)的比例為 1:22.2。

(2.) 見圖二十一,實驗當中,我們觀察到水滴在 5 度的傾斜面上，幾乎是延斜面加速的，因此我們將 F_{total} 視為是沿斜面的(即為 5 度角)，而重力是垂直向下的，得到這幾項訊息，我們在 F_c 的下端繪出一條 5 度角的斜線 l(代表 F_{total} 的方向),並繪出另一條通過 F_c 上端及 l 的鉛垂線(重力),其中 l 和重力的交點到 F_c 的距離即為 F_{total}(兩黑點間),完整力圖表示在圖二十二，F_{total} 的方向即為水滴移動方向。

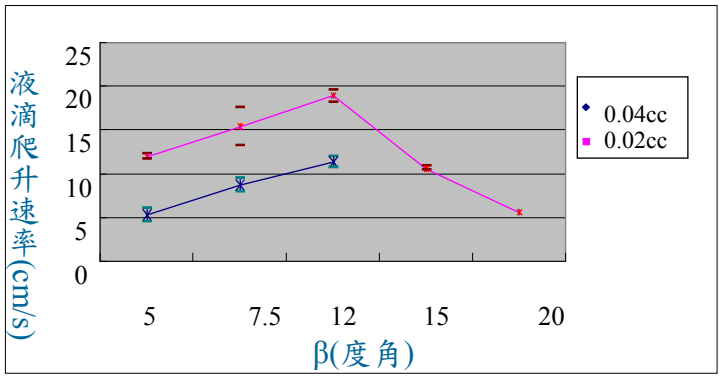
(3.) 測量後可得 F_{total}:重力 ≒ 1:18。 (即施加給水滴的淨力為重力的 1/18)

(4.)為檢驗力圖，我們計算 0.02c.c.水滴在 5 度角的加速度，測得液滴加速度為 $0.45m/s^2$，並根據公式:F=ma，代入 $a=0.45m/s^2$ 且 m=0.02g 可得施加在水滴的 F 為

(5.) 承(3.)、(4.)，水滴所受的 F_{total}:重力，實際上是 1:22.2，但力圖顯示的結果卻是 1:18。

造成此誤差可能是「計算水滴加速度」時所造成的，因為水滴在鋸齒上會有拉長再縮短的情形，造成計算上會有所差異，不過，力圖所求出的結果和實際相比，已經是相當接近了。未來，我們希望拍攝更多水滴爬坡的影像並依以上方法，來驗證我們提出的兩個力量。

二、不同角度之下，水滴的速率變化：



照理來說，水滴停留在越傾斜的鋸齒上，會因為斜面上的下滑力較大的緣故，而使得水滴爬的較慢，甚至不會爬升。但根據我們的實驗，當鋸齒傾斜 12 度角以內，水滴的爬升速率會隨著角度越大而越快。

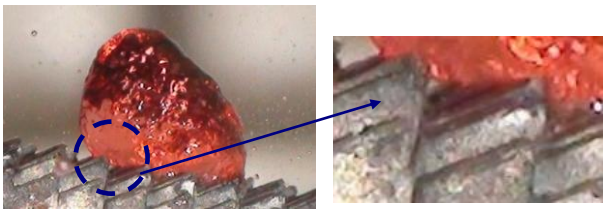
我們試著繪出 β=5、12、20 時水滴在鋸齒上的附著情形(如圖二十三~二十五):當 β=5 時，水珠緊黏於鋸齒上方，且在水滴下方的兩個斜面上，壓力是差不多的，此時水珠在鋸齒面上所受的力量與其所接觸的兩斜面**面積大小**有關;但當 β 提高至 12 時，水珠與鋸齒短邊脫離，造成水滴在兩斜面的蒸發量不平均，形成 a、b 兩處的壓力差:如圖二十四當中，水滴直接與鋸齒長邊接觸，蒸發量會較多，造成 b 處的壓力較大;而水珠脫離鋸齒短邊的動作，使得水滴在鋸齒短邊產生空隙，因此

水蒸氣較容易散逸，此處的蒸氣壓較小。相較於 β=5，所形成的阻力也較小。上述的現象是「β＜12，角度越大，水滴爬升速率會較快」的原因。

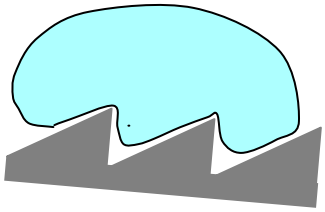
當角度持續提高，直到 β= 20(見圖二十五)，水滴依然是脫離鋸齒高的，也就是當角度從 12 提高至 20 度，鋸齒短邊對水滴的阻力已變動不大，反倒是在斜面上的下滑力越大，造成「β＞12，角度越大，水滴爬升速率會較慢」。



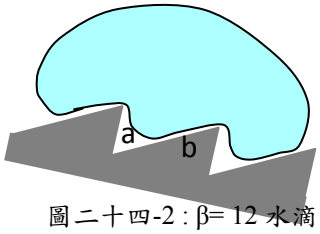
圖二十三-1: β=5 水滴實際圖



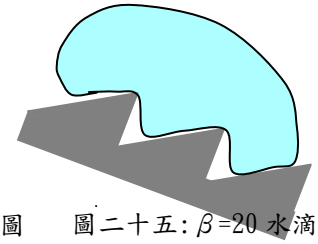
圖二十四-1 : β= 12 水滴實際圖



圖二十三-2 : β=5 水滴示意圖

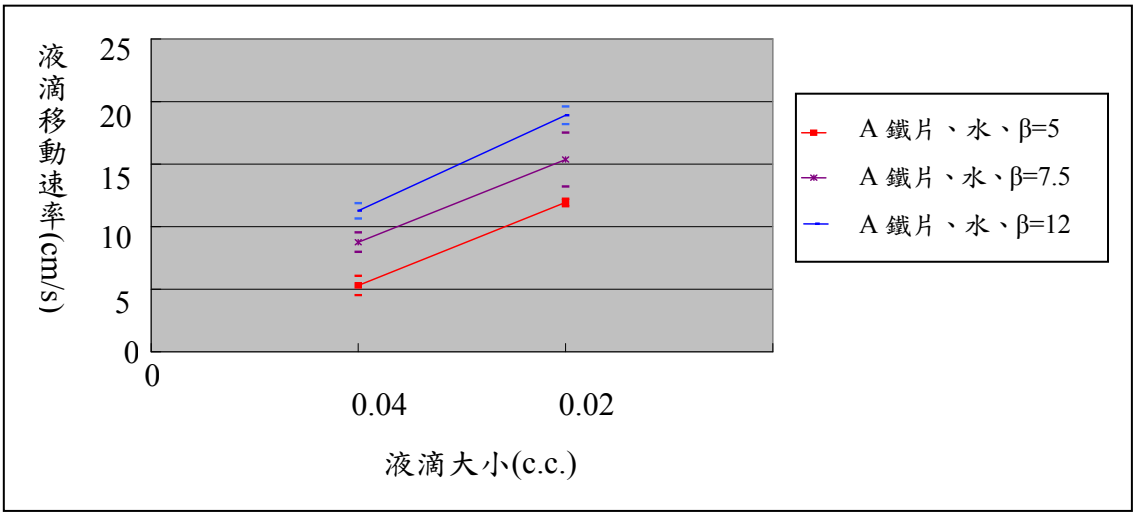


圖二十四-2 : β= 12 水滴示意圖



圖二十五: β =20 水滴示意圖

三、不同水滴大小對其移動速度的影響



當一水滴的質量變大時，涵蓋的鋸齒面變大，因此所得到的助力變大，但其所受的下滑力也要大許多。我們思考的是，助力和下滑力變大的程度如何:若有一個半徑為 1cm 的圓球，當其半徑(r)變為原來的 2 倍，表面積($4\pi\gamma^2$)會變為原來的 4 倍(接觸金屬的面積我們也視為半徑的平方倍) ，但體積(質量)會變為原來的 8 倍。假設水滴為上述圓球，則其所受的助力(與接觸金屬的面積有關)為原來的 4 倍，下滑力為原來的 8 倍，因此水滴變得較大顆，會使阻力增大，進而速率變慢。

陸、結論

一、水滴爬坡綜合了以下因素:

1、鋸齒表面達到 400℃以上，水滴周圍形成蒸氣層

2、β＜20 度

3、鋸齒的兩個斜面必需不等長再配合蒸發的力量

4、蒸發所產生的力量有二: 反向動量、蒸氣壓所形成的正向力。

二、液滴的移動速率與鋸齒傾斜角度(β)、水滴大小、液滴種類、鋸齒大小有關:

1、β＜12，水滴移動速率隨角度變變大而增快。

2、β＞12，0.02C.C.水滴的移動速率變慢而 0.04C.C.水滴則不能爬升。

3、0.02C.C.水滴的爬升速率較 0.04C.C.的水滴快。

4、表面張力較大的液滴其爬升速率較快。

5、水滴在大小適中的 B 鐵片上爬升效果較好。

*有關第 4、5 項的實驗詳述於附錄當中。

三、液滴的移動方向會受到鋸齒長邊與鋸齒短邊的比例影響，水滴總是沿著鋸齒長邊所面對的方向前進，可見鋸齒的形狀會控制水滴的蒸發方向，也因此特性，我們可以將鋸齒長邊擺放面向高處，使水滴向上爬坡。

柒、參考資料

【1】力爭向上的水滴，第 48 屆全國中小學科學展覽會，國中組物理科，作者：鄧奉芸、張翠文。

【2】膜沸騰、萊氏現象 http://www.nsc.gov.tw/files/popsc/2005_57/64-67.pdf

【3】Anne-Laure Biance、Christophe Clanet and David Que´re´，2003，Leidenfrost drops，PHYSICS OF FLUIDS。

【4】見微知「駐」-水珠律動與圓駐波，2008 年美國 Intel 國際科學展覽會，作者:崔德昕。

【5】 H. Linke、 B. J. Alema´n、 L. D. Melling、 M. J. Taormina、 M. J. Francis、 C. C. Dow-Hygelund、 V. Narayanan、R. P. Taylor and A. Stout1，2006 年，Self-Propelled Leidenfrost Droplets，PHYSICAL REVIEW LETTERS。

【6】原著者：REESE，編譯者：駱劍秋、李金連、林世穆、陳堯輝、李世格、曾世杰、蔡淑雲，普通物理，高立圖書有限公司，P.346~352，2006.7.10 出版。

捌、附錄

附錄一

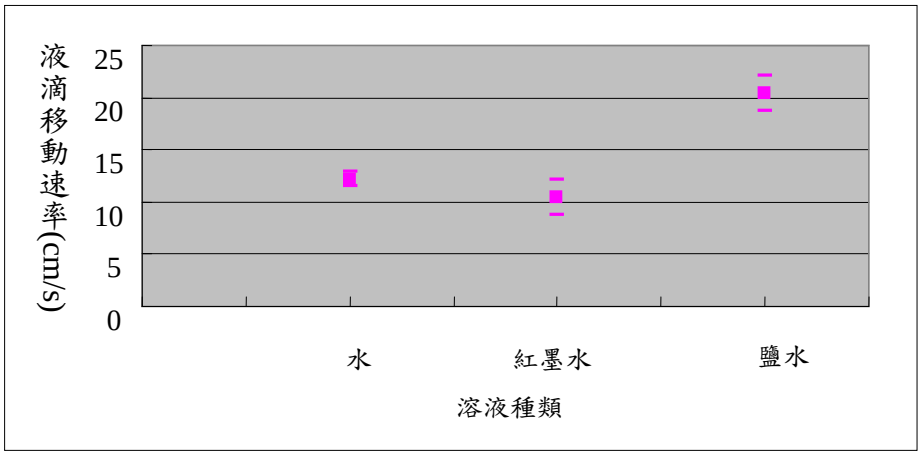
不同**液滴種類**對水滴爬升速率的影響

1.實驗變因:

操縱變因:液滴種類分為水、鹽水、紅墨水

控制變因:液滴大小為 0.04c.c.，β=5，鋸齒大小為 A 鐵片，鋸齒表面達 400℃。

2.實驗數據如下所示:



3.結論:

表面張力大小依序為:鹽水＞水＞紅墨水，而液滴移動速率亦是:鹽水＞水＞紅墨水，可見:表面張力越大，液滴移動速率越快。

4.分析:

實驗當中，我們發現液體會有拉長、往前縮短的運動情形(參考

附錄三-1，P.23) ，其中液滴之所以會往前縮短，與其本身的表面張力有關，當液體的表面張力較大，代表向液體內部的垂直拉力越大，會使其運動時的伸長、縮短的時間差較小，故造成爬升速率會較快，所以液滴的爬升速率會受到表面張力的影響。

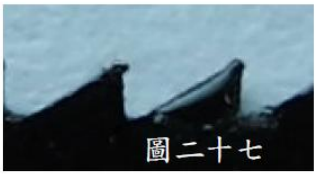
附錄二
不同**鋸齒大小**對水滴爬升速率的影響

1.實驗變因:

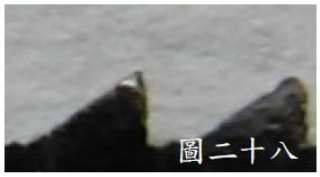
(1)、操縱變因:鋸齒大小分別為:A、B、C 鐵片(三種鋸齒的鋸齒長邊與鋸齒短邊的比例皆為 2，其中 A 鐵片最小，C 鐵片最大，鋸齒規格如下圖二十六~二十八所示)



A:鋸齒長邊:1.27
鋸齒短邊:0.64
(單位:mm)



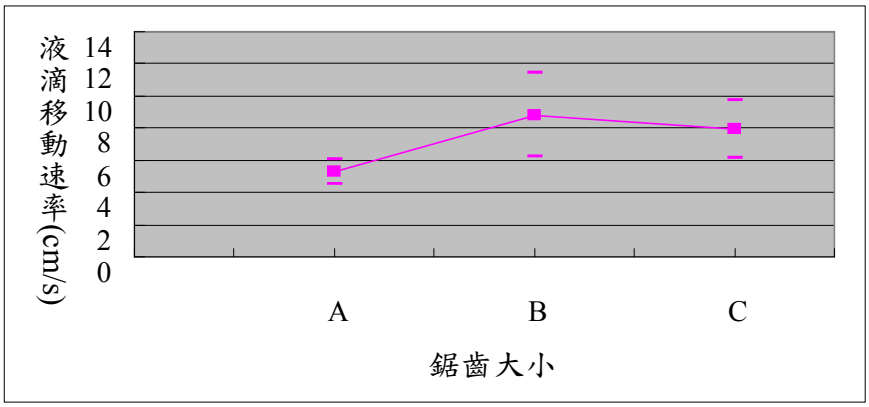
B:鋸齒長邊:1.68
鋸齒短邊:0.84

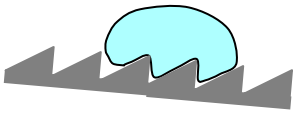


C:鋸齒長邊:2.00
鋸齒短邊:1.00

(2)、控制變因:液滴種類為水、β=5、液滴大小為 0.04C.C.、鋸齒表面達 400℃。

2.實驗數據如下所示:





圖二十九-1



圖二十九-2

3.結論:液滴在大小適中的 B 鐵片上爬升效果較好

4.分析:

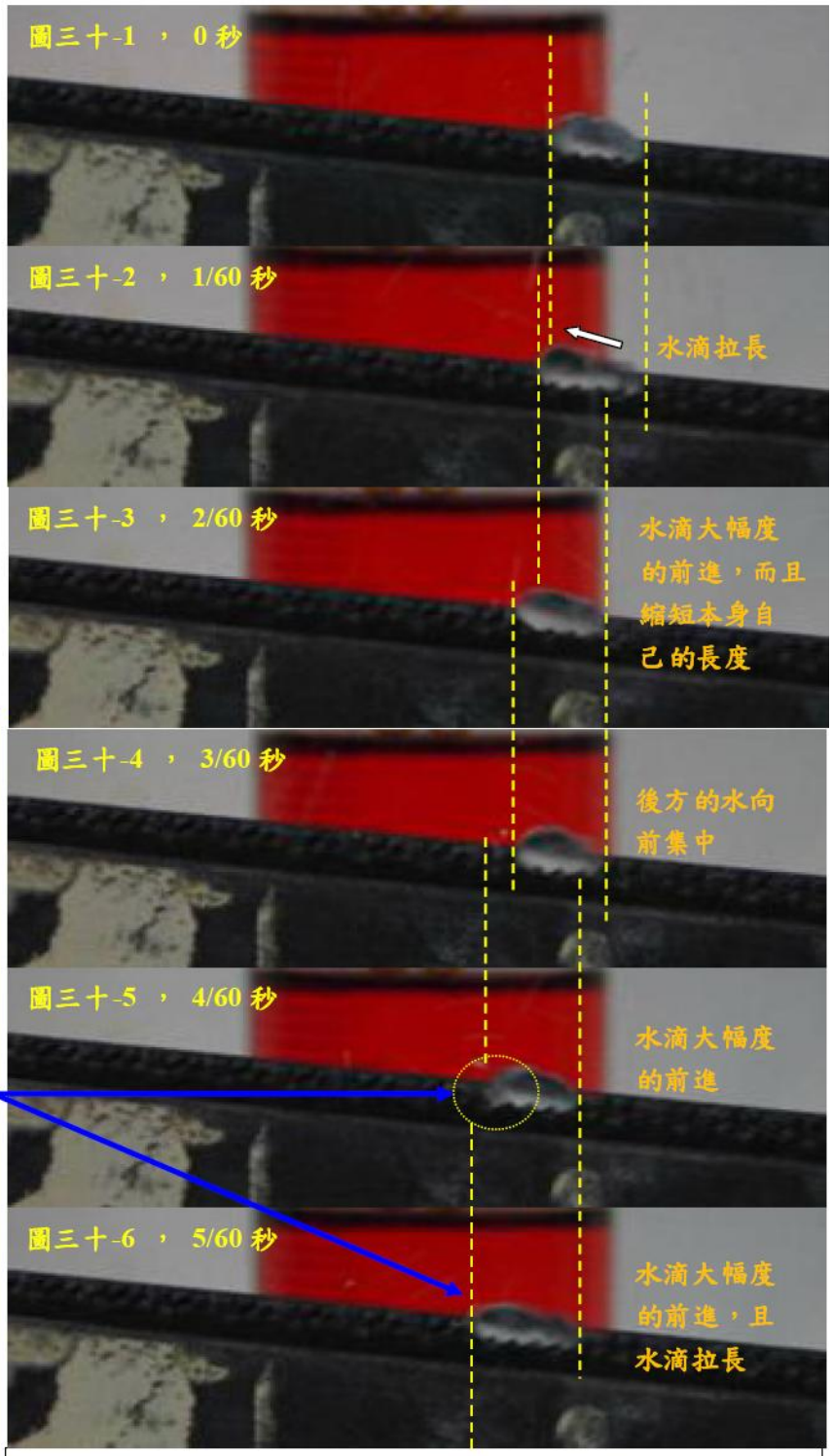
由圖中可知，當水滴在太小或太大的鋸片上，水滴的爬升速率都是較慢的。水滴處在鋸齒上，將會造成凹陷(如圖二十九-1)，但若水滴處在極小的鋸齒片上，水滴會因為本身表面張力而不容易在細小鋸齒上產生凹陷，其水滴下方接觸鋸齒時的形狀會是平緩的(如圖二十九-2)，那麼水滴在鋸齒上蒸發所產生的淨力便不是沿斜坡向上的，進而無法使水滴前進，這有如水滴處在一個平面上，水滴是不會有爬坡效果的。實際上，我們嘗試把水滴滴在比 A 鐵片更小的鋸齒片上，水滴確實不能爬坡。這是因為鋸齒越細小，水滴下方接觸鋸齒的形狀將越平緩，以致於水滴在 A 鐵片上的爬升效果是三種鋸齒當中最差的。

C 鐵片的鋸齒是最大的，但水滴在 C 鐵片的爬升速率卻不是最快的，這是因為水滴前進時，會撞擊鋸齒短邊，使得「鋸齒短邊會對水滴爬升造成阻力」，因此當鋸齒的尺寸太大時，水滴前進時所受到鋸齒短邊的阻力太大，水滴不易往前移動，因此也不易爬升。

附錄三

拍攝的爬樓梯現象，放大進行分析

1、條件：B 鐵片、蒸餾水、液滴大小為 0.04c.c.、鋸齒階梯傾斜 5 度角。

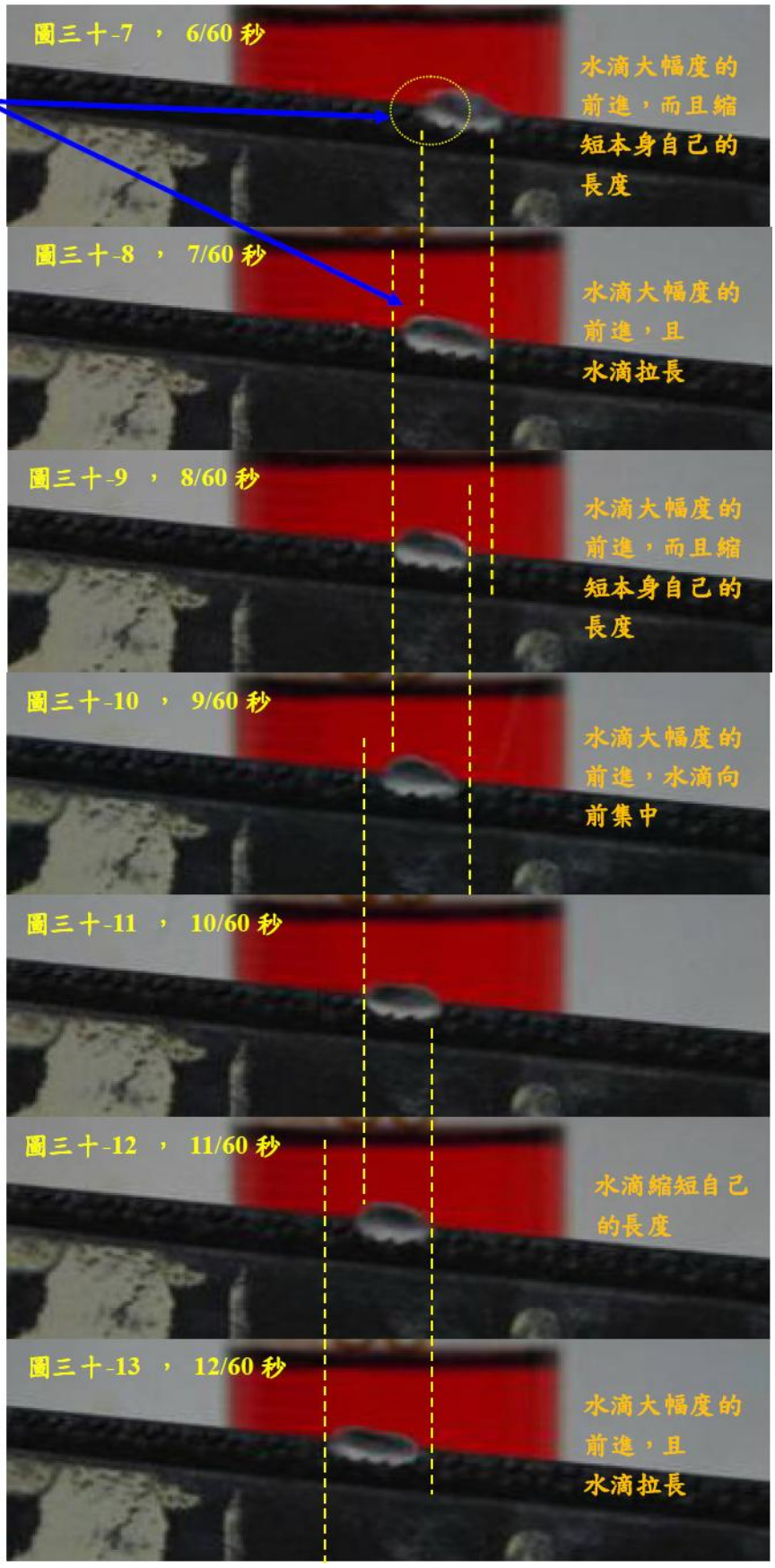


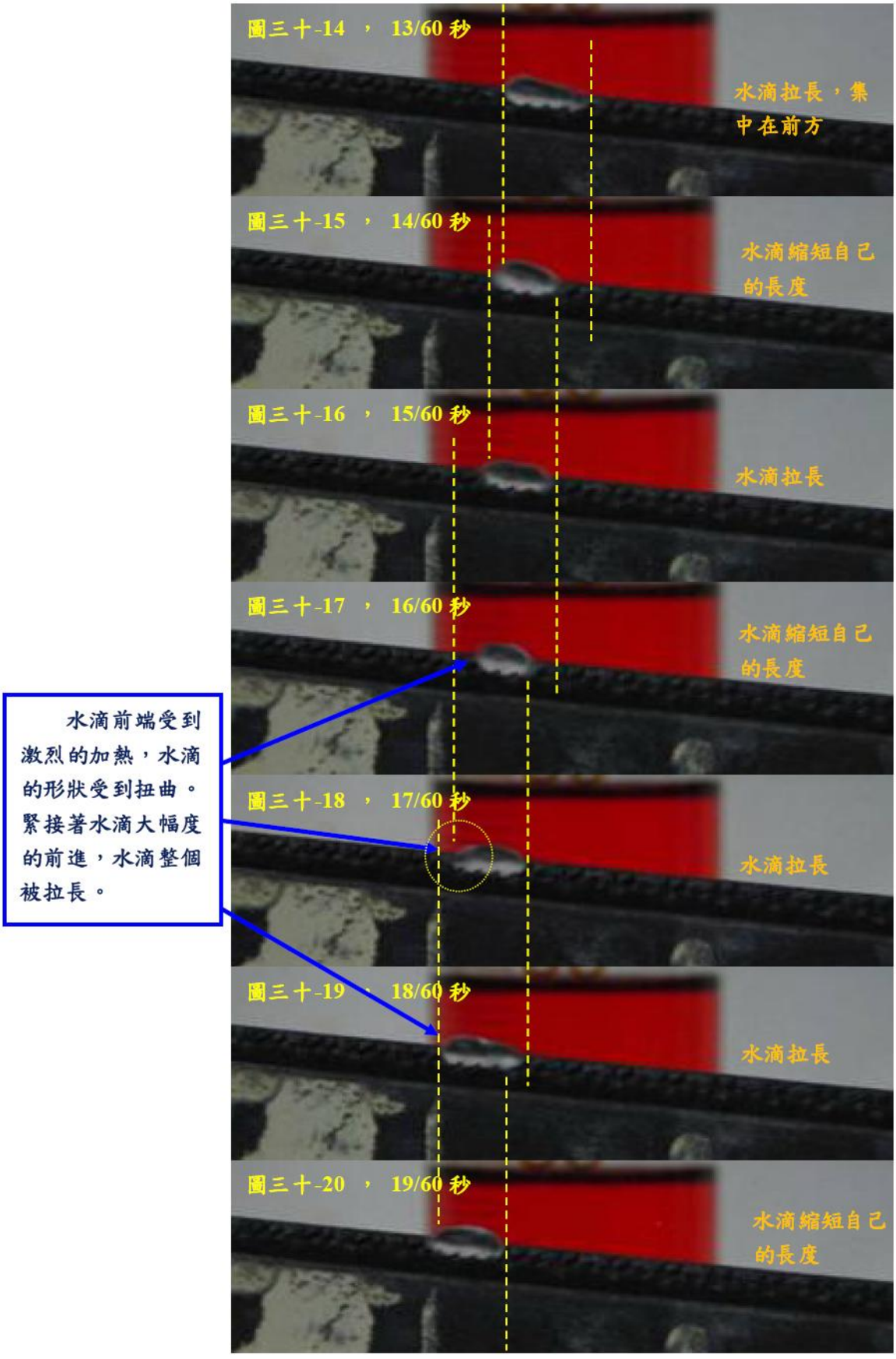
水滴前端受到激烈的加熱，水滴的形狀受到扭曲。緊接著水滴大幅度的前進，水滴整個被拉長。

這個過程，我們認為水滴因為往前移動的瞬間與金屬面接觸，受到高溫金屬面的加熱而產生大量的水蒸氣，而此水蒸氣的噴發對水滴產生一個力道，造成水滴激烈的震動。我們認為此水蒸氣的產生，可提供水滴一個向左方前進的動力，造成水滴向上移動。

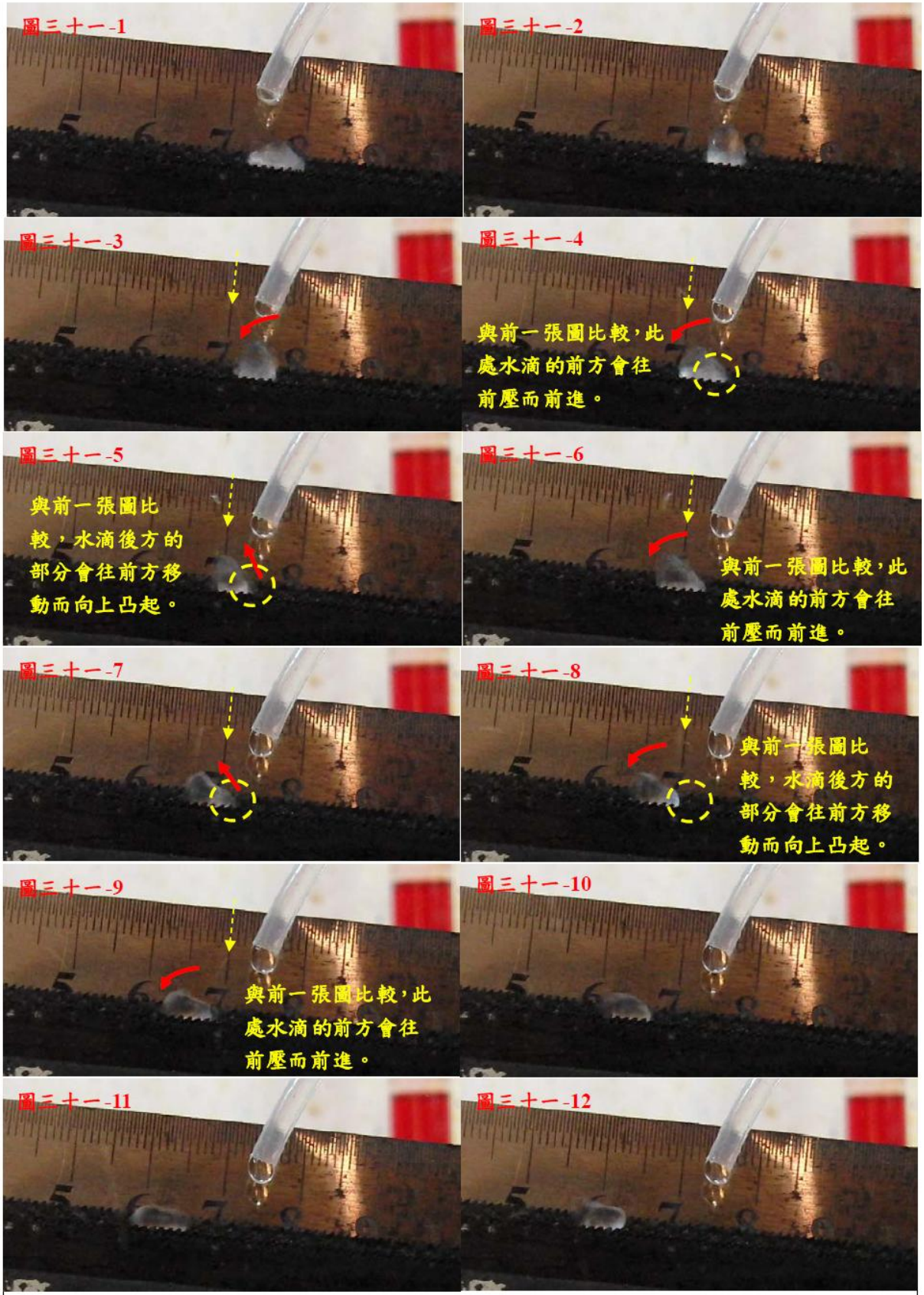
我們發現水滴在前進的過程中，會依循：拉長、縮短、再拉長、再縮短等方式前進，我們稱為毛毛蟲運動。

水滴前端受到激烈的加熱，水滴的形狀受到扭曲。緊接著水滴大幅度的前進，水滴整個被拉長。



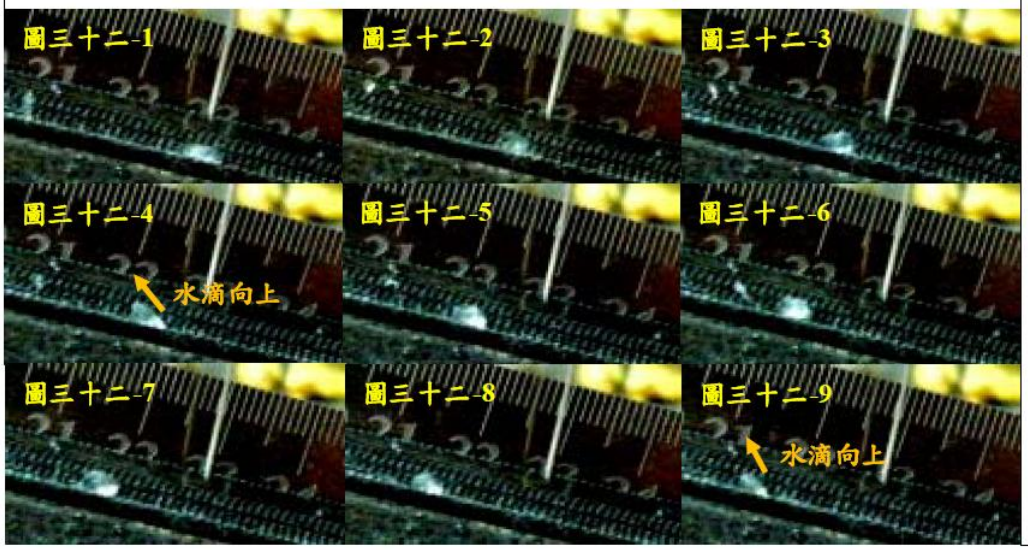

圖三十-14 ， 13/60 秒
水滴拉長，集中在前方
圖三十-15 ， 14/60 秒
水滴縮短自己的長度
圖三十-16 ， 15/60 秒
水滴拉長
圖三十-17 ， 16/60 秒
水滴縮短自己的長度
圖三十-18 ， 17/60 秒
水滴拉長
圖三十-19 ， 18/60 秒
水滴拉長
圖三十-20 ， 19/60 秒
水滴縮短自己的長度
水滴前端受到激烈的加熱，水滴的形狀受到扭曲。緊接著水滴大幅度的前進，水滴整個被拉長。

2、A 鐵片、蒸餾水、液滴大小為 0.04c.c.、鋸齒階梯傾斜 7.5 度角。



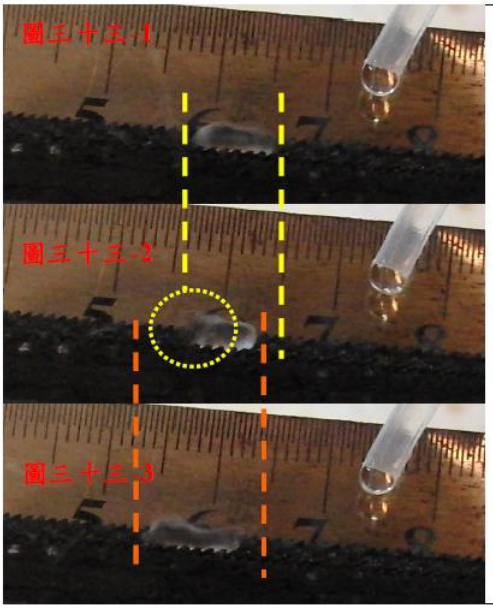
圖三十一、我們發現水滴在前進的過程中，水滴的前端會向上、向前凸起。

3、A 鐵片、液滴大小為 0.02c.c.、鋸齒階梯傾斜 20 度角



水滴大小為 0.02c.c.時，鋸齒傾斜 20 度角時，水滴仍會向上爬升。移動的過程中，水滴會產生向上突起的形狀。水滴若為 0.04 c.c.時，則不會有爬升的效果。

4、A 鐵片、蒸餾水、液滴大小為 0.04c.c.、鋸齒階梯傾斜 7.5 度角。



水滴前進之後，因為瞬間蒸發的緣故，導致水滴激烈震動，以至於我們拍攝到水滴前方的形狀模糊，如圖三十三-2。水滴的形狀模糊之後，整個水滴被拉長，又往前邁進，如圖三十三-3。可見前進的力量來自於水滴的蒸發。

評語

1. 作品能呈現出水滴的爬坡現象，在定性實驗上有較完整的呈現。

2. 能以鋁板疊成鋸齒狀金屬板，得以改變鋸齒的形狀來討論相關現象，具創意。

3. 建議能再進一步實驗，討論所提水蒸發模型之實際性。

2011 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號：140003

作品名稱

Investigation of water droplets climbing up hot saw blades

得獎獎項

一等獎

加拿大正選代表:2011 年加拿大科學展覽會

作者姓名

張芳瑀

I. Abstract

We have found out that water droplets may be formed and can climb up the stacked saw blades when the whole system is in high temperatures. The exact conditions for water droplets to climb up are (1) the temperatures of the stacked saw blades are more than four hundred degrees of Celsius and (2) the inclined angles of the stacked saw blades reveal certain maximum values, depending on the size of water droplet. In particular, when the angle of the stacked saw blades is less than twelve degrees, the steeper the stacked saw blades are, the faster the water droplets climb up. In addition, the smaller droplets are climbing up faster than the greater ones.

The climbing phenomenon of water droplets on the stacked saw blades may be due to reasons associated with the evaporation of water droplets and the saw tooth profile. Firstly, a thin vapor layer is formed when the water droplet touches the heated saw blades, slowing down heat transfer to the water droplet from the hot saw blades and thus making a floating water droplet that stays on the saw tooth surface for a while. The climbing phenomenon may be deduced based on the forces analyzed from the vapor pressure, the recoiled momentum due to water evaporation, and the asymmetric saw tooth profile. Consequently, an upward net climbing force is obtained. With the arguments mentioned above, all of the observations may be explained reasonably.

II. Apparatus and Setup

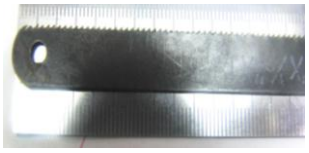
The experimental apparatus/setup and the relevant parameters studied are listed below:

1. Stack fifteen saw blades together. (shown in Fig.1 and Fig.2)

2. Clamp saw blades in-between two right angle iron bars.

3. Heat up the whole system with a gas stove.(shown in Fig.3)

4. Drop liquids on the stacked saw blades (SSBs) when the system is hot enough.



Zoom in

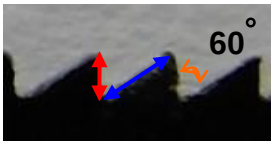


Fig.1: Single saw blade

The short segment (0.64mm)

The long segment (1.27mm)

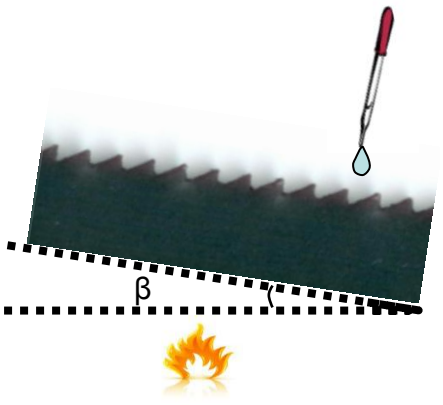


Fig.2: Fifteen saw blades are stacked together.



Fig.3: Saw blades are clamped in-between two right angle iron bars and are heated up with a gas stove

5. Relevant parameters/variables studied are listed below:



(1).Saw tooth temperature dependent

(2-1).Droplet size dependent

(2-2).Inclined angle dependent Angle β

(3).Saw tooth size dependent

(4).Saw tooth profile dependent

III. Results and Discussions

The variables manipulated in the experiment contain: (1) the temperature of the saw blades; (2) the inclined angle of the saw blades (β); (3) the size of the droplet; (4) the size of the saw teeth; (5) the ratio of the long segment to the short segment.

Droplets' motion vs. saw tooth temperature (T_{saw}):

1. Results:

a. ~ 300℃, water droplet blows up.(shown in Fig.4)

b. ~400℃, a floating water droplet is formed and climbs up the steps.(shown in Fig.5)

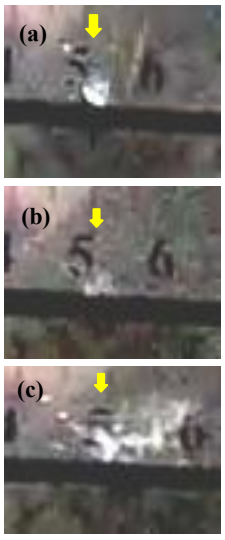


Fig.4

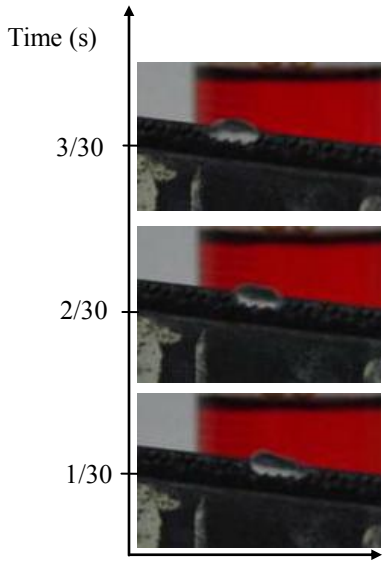
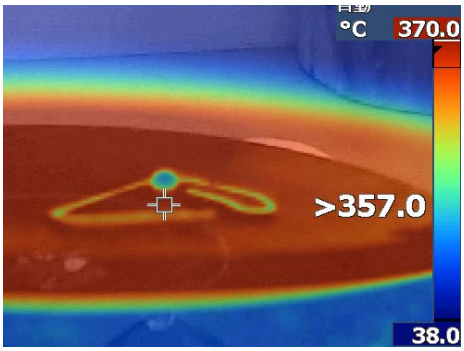


Fig.5

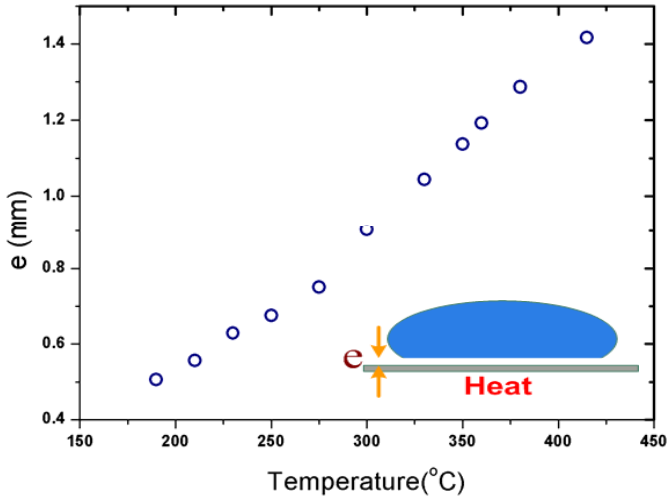
Why can the water droplets climb up the steps?

a. A **vapor layer** formed around the droplet reduces the friction, thus the droplet is able to move spontaneously. This layer is an insulator of heat which can slow down heat transfer to the water droplet, preventing the droplet from evaporating very fast.





The thermal image shows that a vapor layer is formed around the droplet. The real system is shown on the right.



The thickness of the vapor layer vs. temperature of the hot plate. (Ref.2)

b. Climbing is driven by **liquids' evaporation.**













(c). A droplet of salt solution has a fuzzy shape when it touches the heated saw blades. This shows that liquid evaporates quite violently. (d)~(f) liquid bounces off the saw blades. This observation suggests us that liquids' evaporation generates a great force.

c. The driving forces are associated with **vapor pressure** and the **recoiled momentum** due to water evaporation.

• arguments:

(a). vapor pressure:

The gas molecules under the droplet constantly move around freely, and collide with the droplet. On an average, the forces due to molecular collisions are perpendicular to the surface of the liquid and are proportional to the liquids' surface area.

(b). Recoiled momentum due to water evaporation:

Based on the law of conservation of momentum, when liquid molecules escape from the surface, a recoiled momentum is obtained by the water droplet. This mechanism is the same as for the blastoff of the rocket. (Diagrams are shown on the next page, in Fig.6)

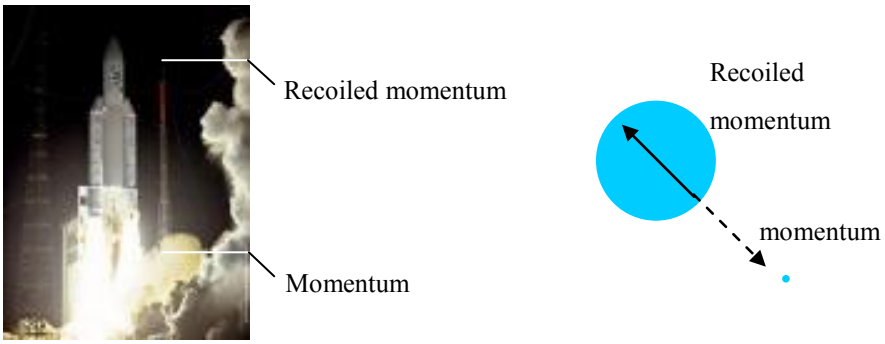


Fig.6: The phenomena based on the law of conservation of momentum.

• How driving forces work in the system?

(a). the force due to vapor pressure:

Direction: perpendicular to the droplet surface.

Magnitude: According to the equation: F/A=P, the force is proportional to liquids' surface area (A_a: A_b=1:2.2, thus F_a: F_b =1:2.2)

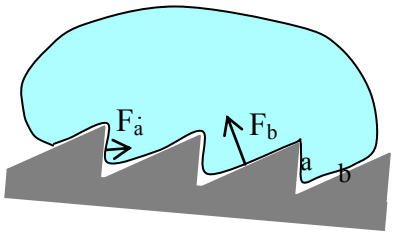


Fig.7: F_a is the force generated on the short segment, F_b is the force generated on the long segment

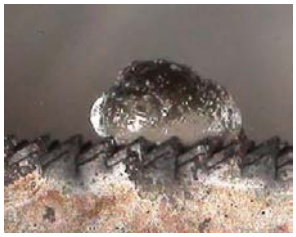


Fig.8: droplet that contacts with the saw blades

(b). the force due to recoiled momentum:

Direction: molecules escapes in many directions (shown in Fig.9, dotted line), but the net momentum of them is perpendicular to the droplets' surface, and the recoiled momentum droplet obtains is also perpendicular to the surface.

Magnitude: Basically, the greater the liquids' surface area is, the larger the number of escaping molecules is, hence greater recoiled momentum. We deduce that the magnitude of the recoiled momentum is also proportional to the surface area.

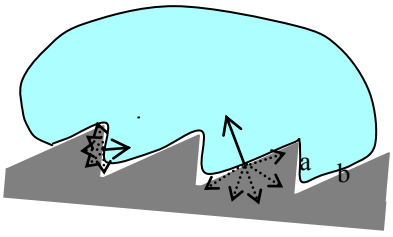


Fig.9: dotted line: the momentum of escaping molecules, solid line: the recoiled momentum obtained by the droplet

• Free-body diagram

(a). F_a and F_b are added up, generating a net force, F_c.(shown in Fig.10)

(b). F_c and the gravity are added up, a net climbing force is formed. Thus the droplet can climb up the steps.(shown in Fig.11)

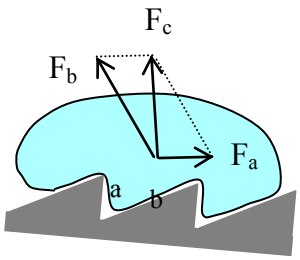


Fig.10

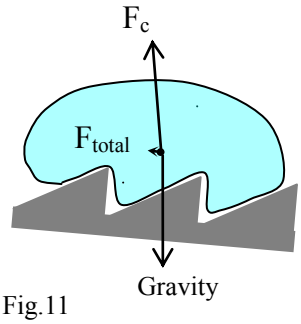


Fig.11

Climbing velocity vs. inclined angle of the saw blades (*β*):

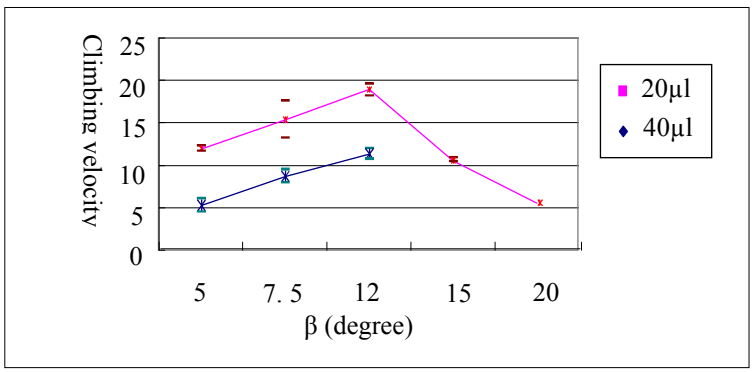
1. Controlled variables:

   (1).water、40μl、saw tooth A (shown on p.2) 、T_{saw}~400℃ (blue line below)

   (2).water、20μl、saw tooth A、T_{saw}~400℃ (pink line)

2. Manipulated variable: β are controlled to be 5、7.5、12、15、20°

3. Results:



(1).The greatest climbing angle depends on droplet size. The greatest angle of a 20μl droplet is 20 degrees.

(2).5≦β≦12, the steeper the SSBs are, the faster the droplets climb up.

(3).β>12, the steeper the SSBs are, the slower the 20μl droplets climb up. But, the 40μl droplets can not climb up the steps.

(4).The 20μl water droplets are climbing up faster than the 40μl ones.

Why does the angle affecting climbing

According to Fig.12, β=5、12, when the saw blades become steeper, droplets tend to break off the short segment and result in a smaller amount of evaporation on the short segment (the drag in χ direction is also smaller). Thus, the larger the angle is, the faster the droplets climb up. Besides the element of the evaporation forces, the component of the gravity that parallels the incline also affects the climbing velocity. Simply, the steeper the saw blades are, the greater the component is. Thus, when β>12, the steeper the saw blades are, the slower the 20μl droplets climb up and the 40μl droplets even can not climb up the steps

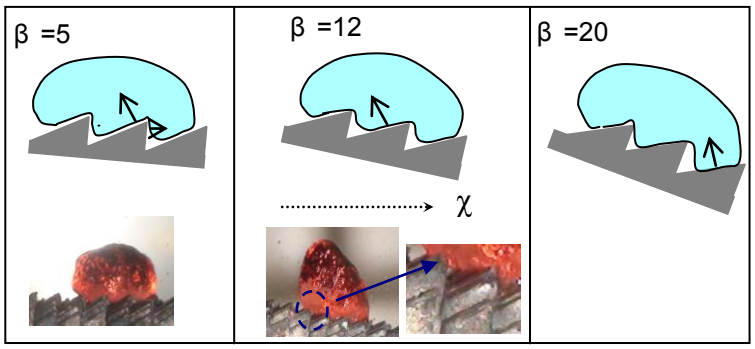


Fig.12: droplets' shape on contact vs. different angle.

Why do the 20μl droplets climb up faster than the 40μl ones?

When the droplet's mass is two times the original, two conditions are changed at the sametime, including**:**

a. the **component of the gravity** (drag) acting on the droplet is two times the original.

b. the **forces resulted from evaporation**:

Basically, the greater the number of saw teeth the droplet covers is, the greater the evaporation forces are. On average, the number of the saw teeth droplet covers is less than two times the original.(the real values are shown in Fig.13) Thus, the evaporation forces is also less than two times the original.

To compare the variation of the two conditions mentioned above, the increase in drag is more than the increase in the evaporation forces. Thus, the greater the droplet is, the slowerthe droplets climb up.

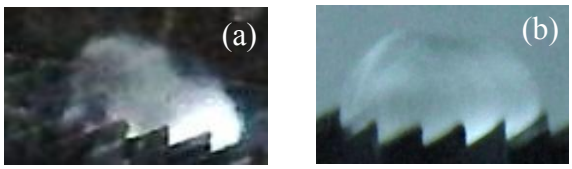


Fig.13: (a) 20μl droplet covers 3~4 saw teeth
(b).40μl droplet covers 5~6 saw teeth

Droplets' moving direction vs. saw tooth profile

1. controlled variables: water、40μl
2. manipulated variables: the ratio of the long segment to the short segment (1、1.5、2)
   We stack several aluminum sheets (each one is 1 mm in thickness) up to make steps. (shown in Fig.14)

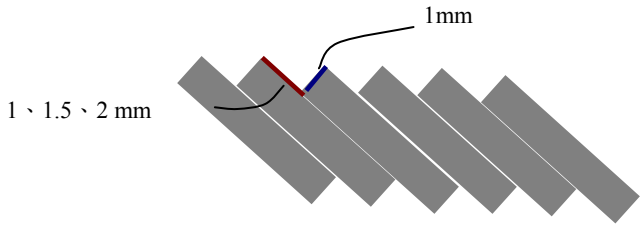
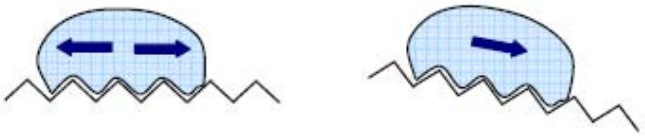


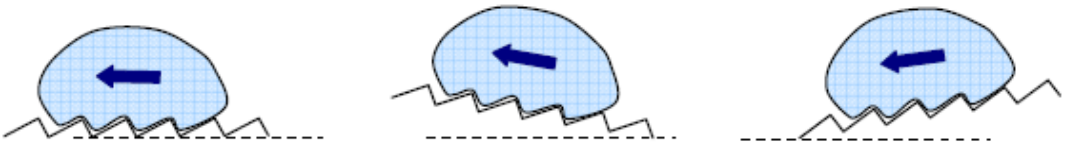
Fig.14: the diagram of the steps

3. Results:

(1). Ratio=1, droplets move in a random direction. If the steps are inclined, the droplets slide down.



(2). Ratio>1, droplets tend to move to a regular direction.



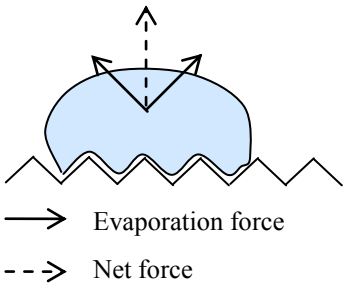
(3). If the long segment faces the right (left), then the droplets move to the right (left).



Why does the saw tooth profile control droplets' motion?

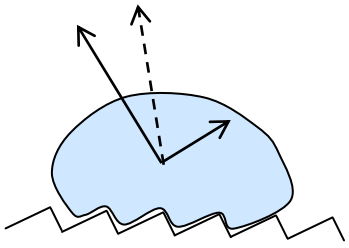
According to the analysis of the forces resulted from the evaporation on pages four to six, the driving force is proportional to surface area of the droplet. All of the observations could be described reasonably and the free-body diagrams are shown below:

a. Droplets on symmetric steps:



The net force is totally upright, thus the droplet moves in a random direction.

b. droplets on asymmetric steps



Because the force generated on the long segment is greater, the net force points to the direction where the long segment faces. Thus, the droplet will move to a regular direction.

Finally, the observations correspond with the arguments we proposed, demonstrating the climbing is due to water evaporation and the asymmetric saw tooth profile.

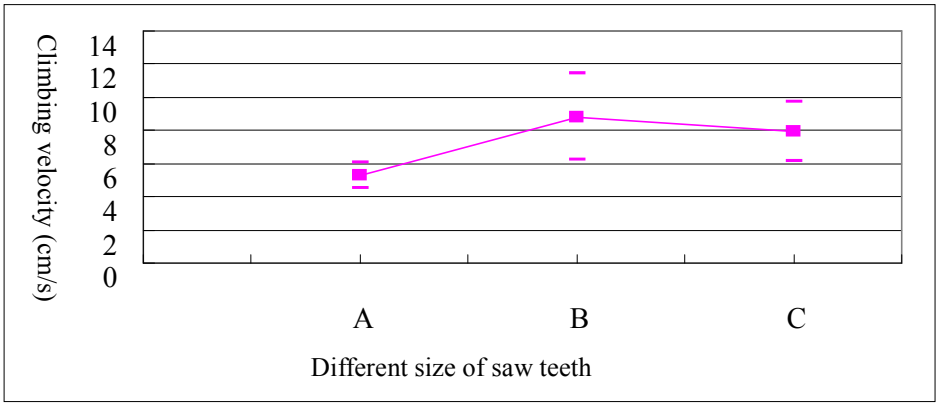
Climbing velocity vs. size of the saw teeth

1.controlled variables: water、40μl 、β=5

2.manipulated variable: saw teeth A、B、C (the specification is shown below)

Fig.15 : saw teeth A、B、C :			
The sort segment (mm)	0.64	0.84	
1.00			

3. Results: droplets placed on middle-sized saw teeth climb up fastest.



Why does the size of the saw teeth affect the climbing velocity?

Suppose that droplets are placed on extremely small saw teeth, droplets' shape on contact must be quite flat due to surface tension (Fig.16) Thus, the evaporation forces will not lead to a climbing effect. Within a specific range, the smaller the saw teeth are, the flatter the droplets' surface is and the slower the droplets climb up.

While climbing, droplet hits the short segment and the short segment gives the droplet a drag (shown Fig.17) Thus, within a specific range: the bigger the saw teeth are, the greater the drag is, and the slower the droplets climb up.

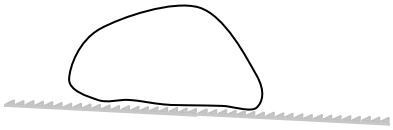


Fig. 16: droplets' shape on contact

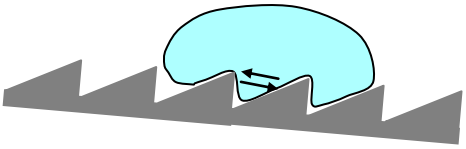


Fig. 17

IV. Conclusions

1. The conditions for water droplets to climb up are:

   a. temperature of the saw blades**:** ~400℃

   b. saw tooth profile**:** asymmetric

   c. driving forces { Recoiled momentum; Force due to vapor pressure

   d. climbing angle { 20μl droplet: $0 \leqq \beta \leqq 20$; 40μl droplet: $0 \leqq \beta \leqq 12$

2. Droplets' climbing is affected by:

   a. β=12, The droplets climb up fastest.

   b. 20μl.droplets are climbing up faster than 40μl droplets.

   c. The water droplets on middle-sized saw teeth climb up fastest.

   d. If the long segment faces the right (left), then the droplets move to the right (left).

V. References

1. H. Hinke et al., Self-propelled Leidenfrost Droplets, Phys. Rev. Lett. 96, 154502(2006)

2. De-Shin Tsuei, Dancing water droplet, Intel International Science and Engineering Fair

3. Leidenfrost effect (film boiling), Wikipedia