

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

佳作

030109

杯中液的濺與不濺

學校名稱：臺南市立建興國民中學

| | |
|---------------|--------------|
| 作者： 國二 田翊辰 | 指導老師： 楊志鴻 |
|---------------|--------------|

關鍵詞：初波、撞擊波

Abstract

This research was carried out to investigate what causes coffee to splash out from the cup, and to find out an ideal coffee cup design to stop spilling. The result shows that spilling is affected by the increase of the height of the water surface.

Furthermore, the height increased is related to acceleration, the size of the cup and the initial height of water surface. Moreover, to stop coffee from spilling, we make the inner surface of the cup rough to reduce the height amplitude of the waterwave.

摘要

本研究在探討咖啡外溢的原因，並試圖找出不讓咖啡外溢的理想杯子。

研究結果發現液體外溢取決於液面上升的高低與杯口的距離，而上升的高低又與瞬間加速、容器口徑和液面水位高低有關；液面升降的變化過程，則與產生初波後的來回衝撞有關。

研究結果發現設計一個可以簡易拆裝的杯壁阻隔板，能有效減少杯中液體的外溢現象。

壹、 研究動機

每當手拿咖啡走動時，總會不小心將咖啡溢出，常弄髒手，這時我就在想怎麼拿才不會咖啡溢出，是甚麼因素會造成咖啡溢出，若使用不同的容器來裝咖啡，是否會有不同的結果。因此誘發了我想要去探討造成咖啡溢出來的可能原因，希望透過研究的結果了解液體溢出的機轉，並進一步設計能減少液體溢出的杯子，在和老師討論之後便開始了我的實驗。

貳、 研究目的

透過改變不同參數及記錄水面上升的變化來了解哪些參數才是主要關鍵因素，這些參數包括：

- 一、加速度 (a) 對液面最大升起高度 (h) 的影響。
- 二、容器口徑 (l) 對液面升起高度 (h) 的影響。
- 三、水面高度對液面升起高度的影響。
- 四、不同容液對液面升起高度的影響。
- 五、容器杯壁形狀不同對液面升起高度 (h) 的影響。
- 六、容器杯底形狀不同對液面升起高度 (h) 的影響。
- 七、最後設計出不容易灑出水的杯子。

參、 研究設備與器材

一.硬體部分:

(一)一般器材:

兩個彈簧(1.8mm*60mm)、iphone 手機、水、沙拉油、保麗龍球、壓克力容器(15cm*10cm*4cm)、
壓克力容器(20cm*10cm*4cm)、保麗龍板、海綿、保麗龍切割器

(二)特殊器材: 木製發射台(自製)180cm*25cm(圖 3-1-1)

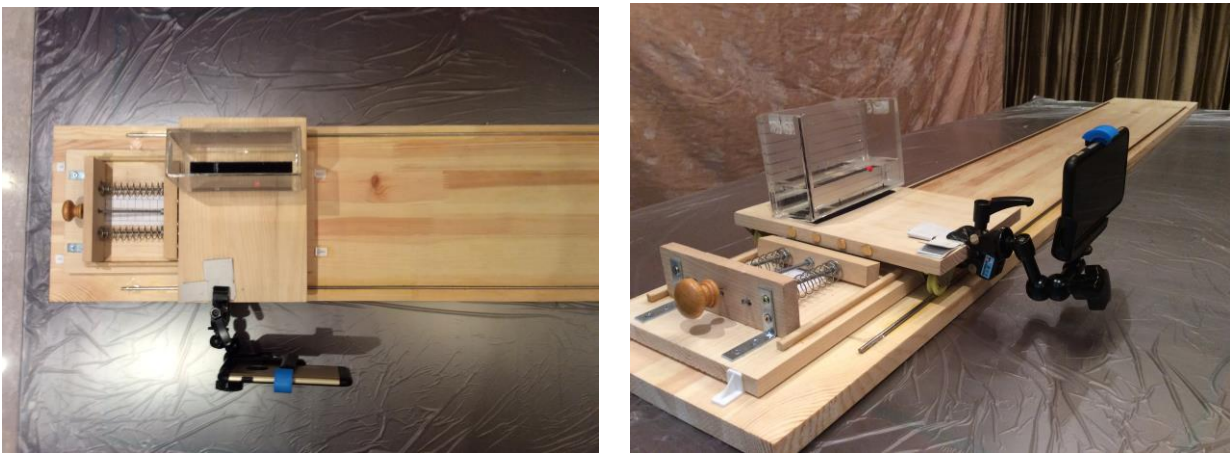


圖 3-1-1

二.軟體部分:

Tracker 4.92 版(圖 3-2-1)

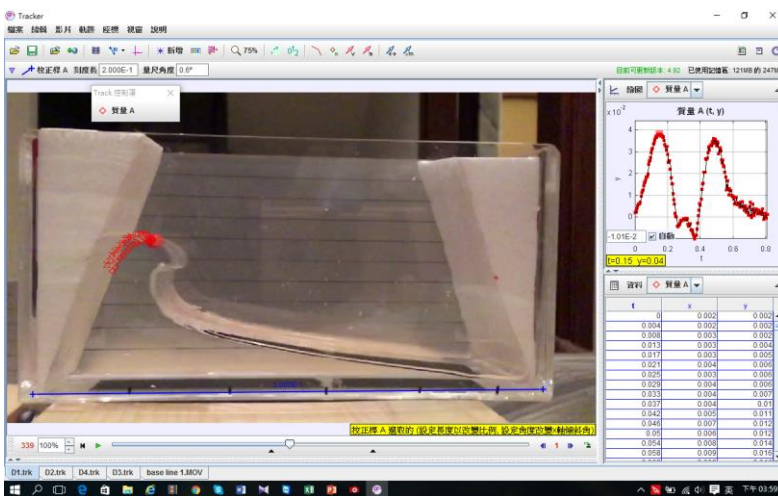


圖 3-2-1

肆、 研究過程與方法

一、 前期觀察試探研究

(一) 力學原理分析

實驗前我們先做了針對理想狀況進行基本力學原理推導與分析，假設水處於瞬間平衡的狀態。將容器口徑稱為 L ，傾斜的水面高稱為 h 。杯子瞬間用 a 的加速度右拉，我們預測液面會呈一斜直線，分析如圖 4-1a~c：

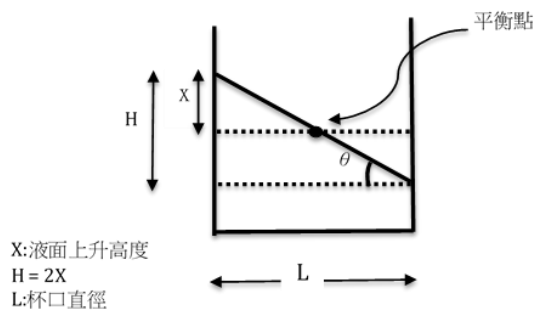


圖 4-1a

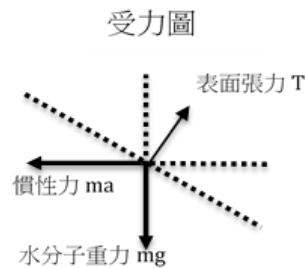
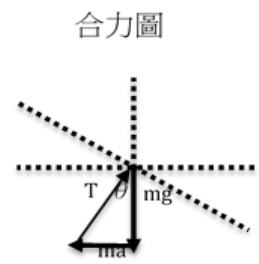


圖 4-1b



$$\tan \theta = ma/mg = H/L$$

$$H = aL/g$$

圖 4-1c

從理論推導可知 $H = \frac{aL}{g}$

液面上升(H)和瞬間加速度 a 及杯子口徑 L 有正相關，但實際情況呢？

當實際實驗後我們發現波形並不是與預測的一樣是斜直線，而是呈現波浪型，此波我們稱之為「初波」(圖 4-2)。



圖 4-2

之後我們又發現當這個初波打到杯壁時，還會激起一個更高的波，我們稱之為「撞擊波」(圖 4-3)。

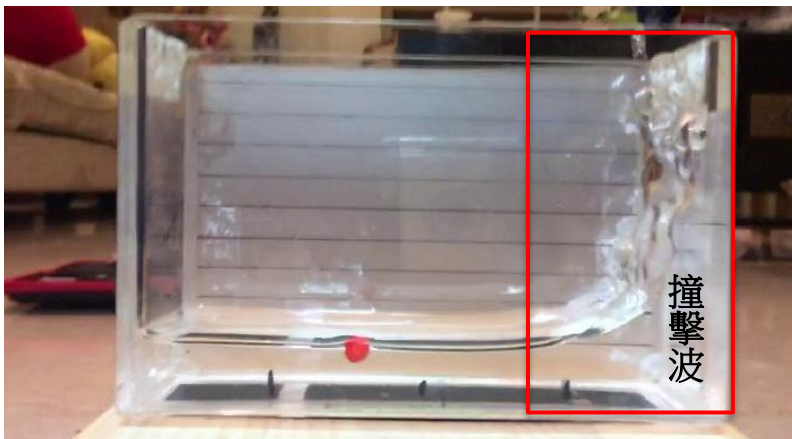


圖 4-3

所以看來決定咖啡是否會溢出來是在打到杯壁的那個撞擊波

我重新思考實際狀況可能是:手拿咖啡杯前進時，會產生一加速度，此瞬間加速度使杯子向前推擠水面上升形成初波，之後因瞬間加速度消失，水面逐漸下降而形成一個撞擊波往前進並撞擊到前面杯壁。前後兩次上升都可以是造成咖啡外溢現象，尤其第二個撞擊波使水面上升高度更高，若杯緣不夠高，咖啡當然就很容易溢出了。

(二)可能的影響因子: 雖然移動中的咖啡杯液面呈波浪型，此波浪高低仍應受加速度的影響，而杯子口徑及杯子形狀，液體黏稠度，液面高低，杯底杯壁形狀及摩擦力都是我們想要知道的影響因素。

二. 模擬咖啡杯移動時水面上升之變化

(一)建立一穩定之推力源及記錄平台

1. 自行製作以彈簧作為發射器的發射台，以彈簧壓縮之長度來提供不同的發射力量也就是提供不同的加速度 a 。
2. 將手機架設在記錄平台上，手機與容器同時固定在平台上，兩者可同步移動。利用手機的慢速攝影功能來記錄容器水面的變化。

(二)利用保麗龍球來定水位:

1. 以口徑 15cm 的容器裝水 3cm 高，將不同顏色的保麗龍球置入，分別在容器的前，前中，中，中後，後，用代號 A,B,C,D,E 來表示。
2. 藉由各個參數的改變來記錄水面高低的變化。

(三)利用 Tracker 電腦軟體進行實驗分析:

1. 利用手機的慢速攝影功能來記錄容器水面的變化。
2. 將錄製好的影片下載至電腦，利用 Tracker 來針對不同顏色的保麗龍球分析其上下運動的運動軌跡。

三. 改變杯底與杯壁形狀來影響水面上升的程度

(一)杯壁貼上各種形狀的保麗龍片和海綿，包括:

1. 海綿:用海綿來吸收水波的力量
2. 向內傾斜 20°
3. 向外傾斜 20°
4. 鋸齒狀
5. 左右杯壁成內凹狀
6. 左右杯壁成外凸狀
7. 凹凸狀

(二)在杯底放上高低不平的保麗龍片:利用高低不平的保麗龍片來破壞水波的力量

四.改變各個參數並記錄水位變化

- (一) 探討加速度 (a) 對液面最大升起高度 (h) 的影響。
- (二) 探討容器口徑 (l) 對液面升起高度 (h) 的影響。
- (三) 探討水面高度對液面升起高度 (h) 的影響。
- (四) 探討溶液種類對液面升起高度 (h) 的影響。
- (五) 探討容器杯壁加消波海綿對液面升起高度 (h) 的影響。
- (六) 探討容器杯底形狀不同對液面升起高度 (h) 的影響。

伍、 研究結果與討論

一、探討加速度 (a) 對液面最大升起高度 (h) 的影響

(一) 研究結果發現加速度與液面升起的高度有關，加速度越大，升起的高度越高。

(二) 不同的位置，最高水位上升幅度亦不同。(表 1)

表 1:

| | | 加速度 | | |
|-----|---|-------|-------|-------|
| | | 小 | 中 | 大 |
| 初波 | A | 3.8cm | 4.4cm | 5.2cm |
| | B | 4.3cm | 5.6cm | 5.4cm |
| 撞擊波 | C | 4.2cm | 5.9cm | 4.2cm |
| | D | 4.8cm | 6.2cm | 6.7cm |
| | E | 4.0cm | 5.9cm | 6.5cm |

在這個實驗中我們發現不是一般大家所認為的初波(A 點)升起高度最高，也不是離撞擊波最近的 E 點升起高度最高，而是因為水的力量被帶到撞擊波最高點的 D 點有最大升起高度，因此我們以 D 點分析加速度 (a) 對液面最大升起高度 (h) 的影響(圖 5-1-1)

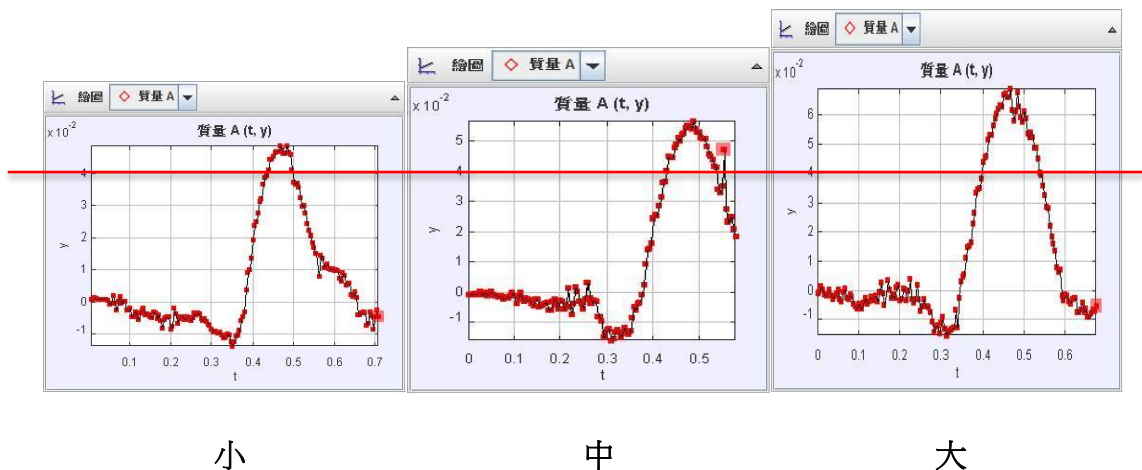


圖 5-1-1

【討論】

在實驗中我們發現不同的點最高水位都不相同，原因是在剛開始時會先有一個初波，打到杯壁之後，會激起另一個更高的撞擊波，進而導致每一個點的最高點有可能是不一樣的。

1. 在同質量的情況下，施力就越多，加速度越大，所產生的波也就越大，此結果符合牛頓第二運動定律 $F=ma$ 。
2. B 點在加速度中時的水面高度，比在加速度大的時候還要高，原因是由於水波在碰到杯壁產生撞擊波後，上升速度太快，結果保麗龍球來不及上升至水面上，C 點也有同樣的情形。
3. 由結果可以發現五個點之中，D 點上升的水面最高。撞擊波的水面高會比初波還要高，所以 D,E 這兩點比較有機會能夠激起較高的水面。不過 E 點因為會與杯壁產生附著力，因此上升的幅度減少，而 D 點又比 C 點還要更接近第二個波，所以在加速度一樣大的時候，D 點能夠上升最多。

二、探討容器口徑 (\varnothing) 對液面升起高度 (h) 的影響

(一) 以長度各為 15cm, 20cm 的容器在相同加速度下來實驗 (表 2)

(二) 20cm 容器較長故又多設一定位點 F。

(三) 結果顯示不同容器長度在相同加速度下初波 (A 點) 高度相同但撞擊波 (D~E 點) 在長容器反而較低。

表 2

| 位置 口徑 | A | B | C | D | E | F |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15cm | 4.4cm | 5.6cm | 5.9cm | 6.2cm | 5.2cm | |
| 20cm | 4.5cm | 3.5cm | 3.6cm | 3.6cm | 3.9cm | 3.8cm |

【討論】

1. 容器口徑對液面升起高度在不同點有不同的影響。
2. 在初波的位置(A 點)，水面高度並不受容器口徑的影響。
3. B 點，C 點，D 點在較長容器時推移距離較長，導致力道減弱，所以當它們到達杯壁時，已經沒有能量可以再往上跑。在較短容器裡，B 點，C 點，D 點會先被拉到初波，接著滑下來的時候，由於距離太短，因此就能夠被帶到第二個波，而最高點也就會在這裡。

三、探討水面高度對液面升起高度的影響

- (一) 將水加入容器中至不同高度 1cm,2cm,和 3cm。
- (二) 將保麗龍球放置於五個位置，並分別拍攝。
- (三) 以相同的加速度推動，結果如(表 3)。

表 3

| 位置 高度 | A | B | C | D | E |
|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| 1cm | 3.2cm | 1.7cm | 1.3cm | 1.8cm | 1.9cm |
| 2cm | 4.4cm | 5.6cm | 5.9cm | 6.2cm | 5.9cm |
| 3cm | 4.5cm | 4.2cm | >7cm(溢出) | 1.5cm | 4.7cm |

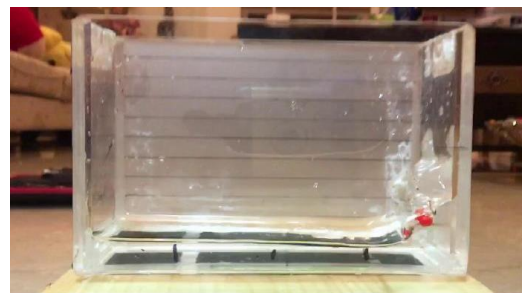
【討論】

1. 在水的高度為 1cm 時，A 點是最高點，原因是在相同加速度的情況下，波的振幅都會相同，然而這個振幅介於 1~2cm 之間，所以這個波就會受到破壞。(圖 5-3-1)
2. 當水與杯底的距離比波的振幅還要大，則水波上升的幅度就不會受影響(水高 2~3cm 時)。

3. C 點之所以會噴到杯外是因為水波從高處落下的力量實在是太強了，再加上保麗龍球本來就很輕，因此撞擊波上升時，保麗龍球脫離了水面，結果就飛了出去。
4. D 點照理來講應該要有 6,7cm，但結果卻只有 1.5cm，看完慢動作的播放，才發現 D 點原來是被落下來的水波給壓在下面。
5. 雖然水高 2cm 或 3cm 波所上升的距離都一樣，但是它們掉落下來的距離卻不一樣，所以 3cm 高的會比 2cm 所濺起的水花還要來的高。

初波 (A 點)

衝擊波



水高 1cm



水高 2cm



水高 3cm

圖 5-3-1

四、不同溶液對液面升起高度的影響。

(一)在做這個實驗之前發現咖啡與水的附著力差異不大，不同濃度的咖啡也差不多，所以

以下是針對附著力差異較大的液體進行探討

(二)將三種不同的溶液(水、沙拉油、優酪乳)分別放置於容器中並以不同加速度來進行實

驗，觀察水波變化。結果如下表 4

表 4

| 溶液 加速度 | 水 | 優酪乳 | 沙拉油 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 大 | 7.4cm | 6.0cm | 4cm |
| 中 | 7.0cm | 7cm | 3.5cm |
| 小 | 5.7cm | 5.1cm | 2cm |

【討論】

1. 由實驗可知，溶液升起的高度與本身的附著力似乎有些關聯。
2. 因此我們做了一個有關附著力的實驗(圖 5-4-1)



(圖 5-4-1)

由實驗可得附著力大小: 沙拉油 >優酪乳>水, 所以波的大小的確與溶液的附著力有關, 附著力越大水波上升高度越小。

五、探討容器杯壁加消波海綿及改變杯壁形狀對液面升起高度(h)的影響。

(一) 放置消波海綿：在前後杯壁放置 1 cm 厚的消波海綿來進行實驗，觀察水波變化，結果如下表 5

表 5

| 位置 | A | C | E |
|-----|-------|-------|-----|
| 無海綿 | 4.5cm | 2cm | 3cm |
| 有海綿 | 4.3cm | 1.5cm | 1cm |

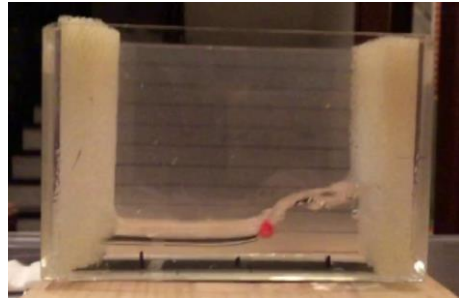
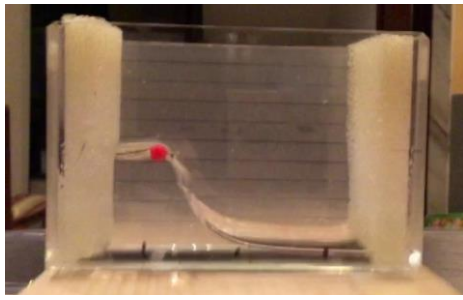
【討論】

在初波方面，放置消波海綿與未放置的效果差不多。(圖 5-5-1)

1. 但在撞擊波(E 點)的地方，情況大幅改善，液面幾乎沒有甚麼晃動的現象。

(圖 5-5-2)

2. 當我們再把加速度變得更大時，便發現與以往大不相同，經過分析後發現撞擊波的高度連容器的一半都不到，之前在同樣加速度與質量的情況下，每次測量都會噴出水來。
3. 海綿內充滿氣泡與隙縫，就如同消波塊一樣，很容易破壞水波結構並吸收水波的能量進而降低撞擊波的高度。
4. 本實驗是利用消波塊的原理來破壞水波的能量，以能量觀點來講，當水通過縫隙時，會和海綿產生附著力，使水波的能量大幅降低。



使用海綿(圖 5-5-1)



未使用海綿(圖 5-5-2)

(二) 由於海綿不容易清洗，因此我們決定改變杯壁形狀(表 6)包括:

1、向內傾斜 20° (圖 5-5-3)

2、向外傾斜 20° (圖 5-5-4)

3、鋸齒狀(圖 5-5-5)

4、左右成弧形(圖 5-5-6)

5、左右杯壁凸起(圖 5-5-7)

6、凹凸狀(圖 5-5-8)



圖 5-5-3

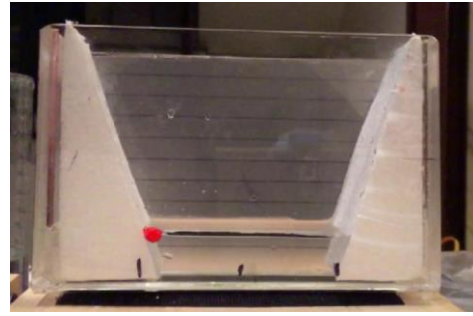


圖 5-5-4

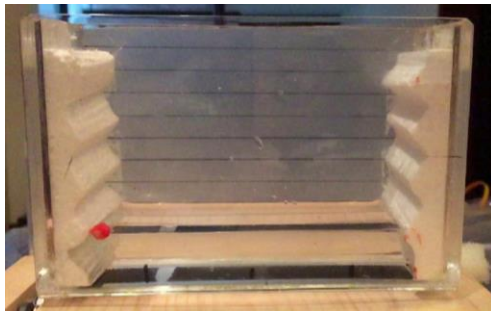


圖 5-5-5

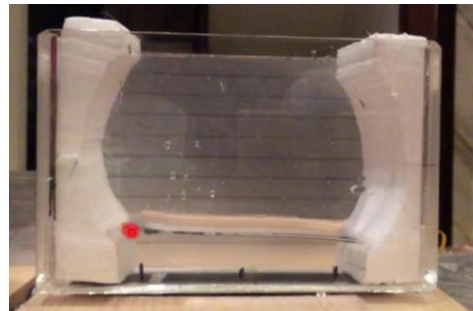


圖 5-5-6

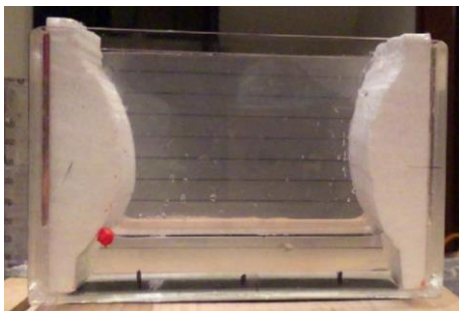


圖 5-5-7

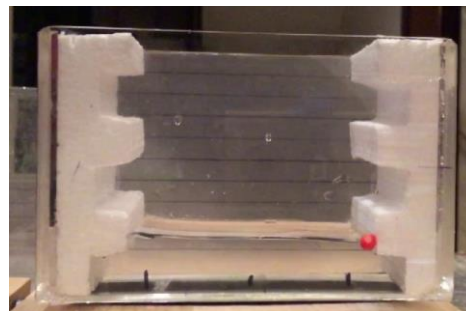


圖 5-5-8

透過這些參數進行實驗，實驗結果如下表(表 6)

| 類別 位置 | 無 | 向內 20° | 向外 20° | 鋸齒狀 | 左右成弧形 | 左右杯壁凸起 | 凹凸狀 |
|----------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|
| 初波 | 4.5cm | 3.8cm | 3.4cm | 2.7cm | 4.1cm | 3.3cm | 3.2cm |
| 撞擊波 | 7.6cm | 4.1cm | 7.1cm | 3.0cm | 5.0cm | 6.4cm | 2.7cm |

表 6

【討論】

1. 在初波方面，每一種都比未加裝時還要好，而其中又以鋸齒狀效果最好。
2. 在撞擊波方面，效果呈現非常大的差別。效果最好的是凹凸狀，這種形狀比未加裝時降低了 5cm 之多。
3. 向內 20° 在初波和撞擊波的地方效果都還不錯，也沒有水珠噴出的情形。
4. 向外 20° 在初波的效果雖然還不錯，但是在撞擊波的地方，水波卻會順著杯壁往上衝。
5. 鋸齒狀整體來講效果都還不錯，但是有一個缺點，當水波碰到杯壁時，會有水珠濺出()，所以這不是一個最好的選擇。
6. 左右成弧形時，效果沒有很好，與未加裝時差不多。
7. 左右杯壁凸起對於初波是有幫助的，但在撞擊波的地方會有些許的水珠噴出。
8. 凹凸狀整體來講是所有形狀裡面效果最好的(圖 5-5-10)，因此我們決定以這種杯壁來當作理想杯子的杯壁。
9. 這些形狀都是依據防波堤和消波塊來設計。



圖 5-5-9

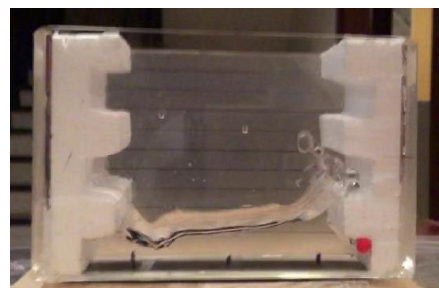


圖 5-5-10

六、探討容器杯底形狀不同對液面升起高度 (h) 的影響。

(一) 用保麗龍塊在杯底製造出凹凸不平的表面，分別製作兩個，一個凹凸程度較密集，而另外一個的凹凸程度則是較為稀疏。

(二) 以相同加速度實驗，觀察哪一組能讓水波上升較小，結果如下表 7:

表 7

| | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 稀疏程度 | 無 | 無 | 疏 | 疏 | 密 | 密 |
| 位置 | 前 | 後 | 前 | 後 | 前 | 後 |
| 高度 | 4.0cm | 7.0cm | 3.1cm | 2.0cm | 3.4cm | 2.0cm |

討論:

1. 不平的杯底對於初波只有一點效果，但可破壞水波下降時的力量而減緩後續的波動。
2. 有一種消波塊叫做潛堤，主要的消坡方式為反射、碎波及因黏滯力所產生的阻力來減少波的能量。這種消波塊至於海平面下，此原理就如同上述實驗來破壞波一樣。
3. 疏密程度不同的杯底對水波的破壞方式不同，不平程度較密集者，是在水波下降時，直接破壞水波(圖 5-6-1)；不平程度較稀疏者，是利用杯底的高低差來改善問題(圖 5-6-2)。這兩種方法都能改善問題，但水位較高時，改善程度不大。



圖 5-6-1

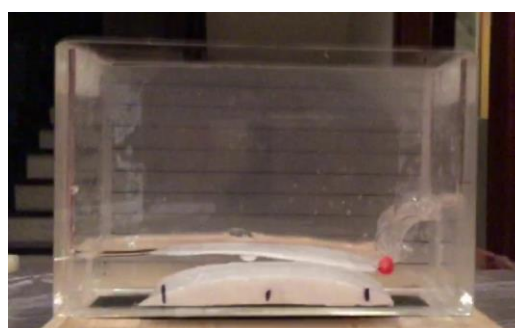


圖 5-6-2

七、設計出不容易灑出水的理想杯子。

(一) 在方形容器觀察到的現象，我們將杯底形狀放入圓杯來進行測試。

(二) 比較有無杯底的情況進行實驗(表 8)，結果如下表:

表 8

| | 最高點水位 |
|---|----------------|
| 有 | 5.5cm(圖 5-7-1) |
| 無 | 6.0cm(圖 5-7-2) |



圖 5-7-1

【討論】

1. 實驗中我們發現圓形杯子內因為距離較短，除了原有的初波(圖 5-7-2)和撞擊波(圖 5-7-3)之外，還有一個比前兩者都還要高的回波(圖 5-7-4)。



圖 5-7-2



圖 5-7-3

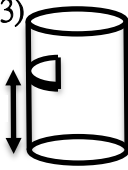
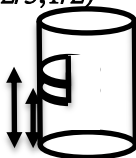
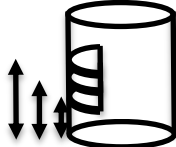


圖 5-7-4

2. 雖然有杯底是有幫助的，但是效果卻不大。
3. 加了杯底反而拉近了水面與杯口的距離，所以有沒有加其實差不多。

(三) 根據前面實驗杯壁形狀對液面上升的影響，我們發現凹凸狀(圖 5-5-8)的效果最好，因此我們將此構想把凹凸狀改用 1~3 個凸出的阻擋片置於前側杯壁來進行實驗(表 9)，實驗結果如下表：

表 9

| | 200cc | 300cc | 400cc |
|--|-------|-------|-------|
| 無 | 7.1cm | 6.0cm | 6.0cm |
| 1 個(2/3)  | 3.2cm | 3.3cm | 3.2cm |
| 2 個(2/3,1/2)  | 3.8cm | 2.7cm | 3.2cm |
| 3 個(2/3,1/2,1/3)  | 3.4cm | 3.5cm | 3.3cm |

【討論】

1. 實驗中我們發現只要破壞掉初波能量就能減低後續的波動。
2. 放置一個、兩個或三個保麗龍阻隔板均能有效降低撞擊波及回波上升的高度，但這三者的改善程度差別不大，基於容易清洗及簡單製造的考量，只要在杯高

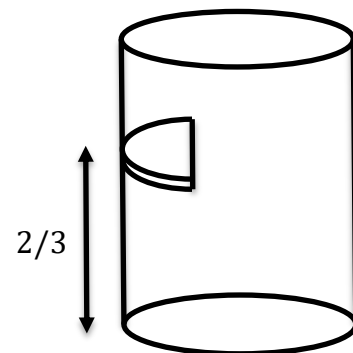


圖 5-7-5

2/3 的前側杯壁放置一個阻隔板，則在水裝八分滿的情況下，都能有效阻止水溢出，也是我們想要的理想杯子。(圖 5-7-5)

(四) 根據上述的實驗我們進一步比較兩個圓杯在有無阻隔板的情況下水面升降的影響:
將兩個圓杯同時置放在移動平台上，以相同的推力前進並同步錄影，影片中可發現有隔板的杯子水面波動變化的幅度較小(圖 5-7-6)，而沒有隔板的圓杯無論初波、撞擊波或回波均起伏較大，水容易濺出杯外。結論:阻隔板可有效降低移動中的水杯溢出水來。



圖 5-7-6

陸、討論

一、關於本研究所發現的「撞擊波」反而造成較大的振幅，應該可以利用「初波」形成時，液面因慣性力造成的傾斜，然後產生類似海嘯抵達岸邊的波高放大效應(圖 6--1)。因為表面水波的波速與深度有關，水深愈深則波速愈快。因此如果水波從較深的地方跑到較淺的位置時，因波速減小，波長縮短(頻率不會改變)，此時水波會因為能量集中而劇烈加大震幅；加上瞬間停住杯子時，撞擊波端的側壁反作用力亦會對液面做功，表面水分子的位能因而加得更大了。

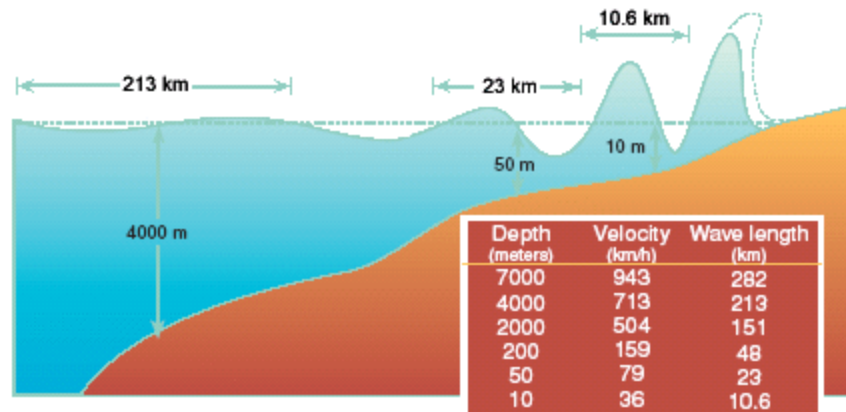


圖 6--1

本研究於步驟六針對不同的杯底對水波的破壞方式所做得探討，發現杯底不平程度較密集者，是在水波下降時，直接破壞水波(圖 5-6-1)；不平程度較稀疏者，是利用杯底的高低差來改善問題(圖 5-6-2)。水深變化情形果然會有影響。

二、關於液面與杯口距離的討論

(一) 如圖 6-2，當 D 大於 x 的時候，則液體較不容易溢出，但相對付出的代價是限縮了杯子的容量。

(二) 當裝入杯子的液體較滿，可以小心翼翼地行走，減少加速度 a 便可以減少 X 的振幅，

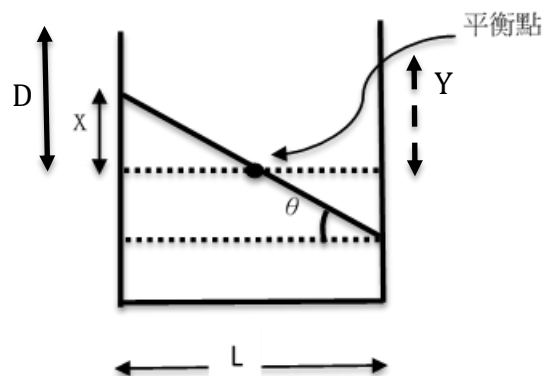


圖 6-2

雖然初波 X 小於 D，但是衝擊波 Y 卻還是會溢濺出來。經討論，我們認為又想裝多一點液體，又不想讓液體溢濺出來，除了走慢一點之外，不然就以穩定的加速度行進，而且要適度地調整手隨杯子的擺動角度。

(三)關於初波在瞬間加速時最大上升高度 H 之探討

1. $F=ma=kX \rightarrow a=\frac{kX}{m}$

由於我的彈簧是並排的排列，所以 $F_{外}=F_1+F_2 \rightarrow k_{並}X=k_1X+k_2X \rightarrow k_{並}=k_1+k_2$

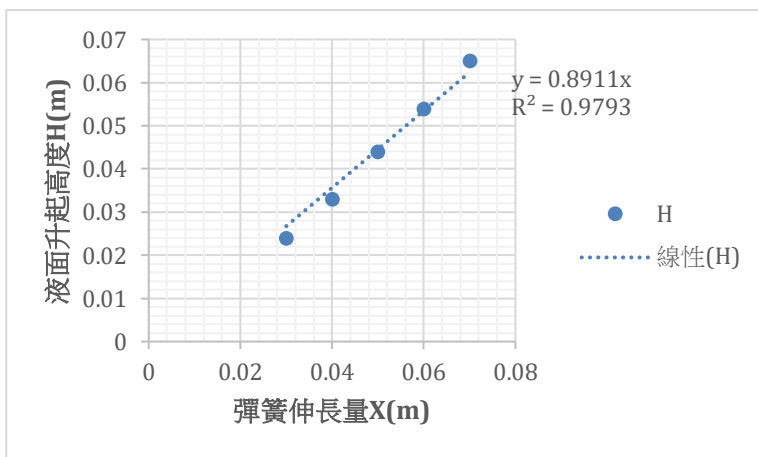
2. 已知 $\tan \theta = \frac{ma}{mg} = \frac{H}{L}$ (理論建立在每一表面水分子受到相同的 T 及 ma)

從理論式可以推得： $\frac{H}{L} = \frac{a}{g} \rightarrow H = \left(\frac{L}{g}\right) a = \left(\frac{L}{g}\right) \left(\frac{k}{m}\right) X \rightarrow H \propto X$

由已知的參數計算得到上述關係式的理論斜率應為 $\frac{Lk}{gm} = 0.955414$

其中 L : 0.15(m)， $k_{並}$: 24.5(N/m)， g : 9.8(m/s²)，m : 0.3925(kg)

雖然實驗結果符合兩者間的正比關係，但是其斜率卻是 0.8911(如圖 6-3)，兩者斜率相差 0.6，誤差率約為 6.7%，因此我認為此斜率的誤差除了與測量時的人為誤差(誤差率<1%)有關之外，更重要的是需考慮水和杯壁間的摩擦力(理論分析時並未提及)。



(圖 6-3)

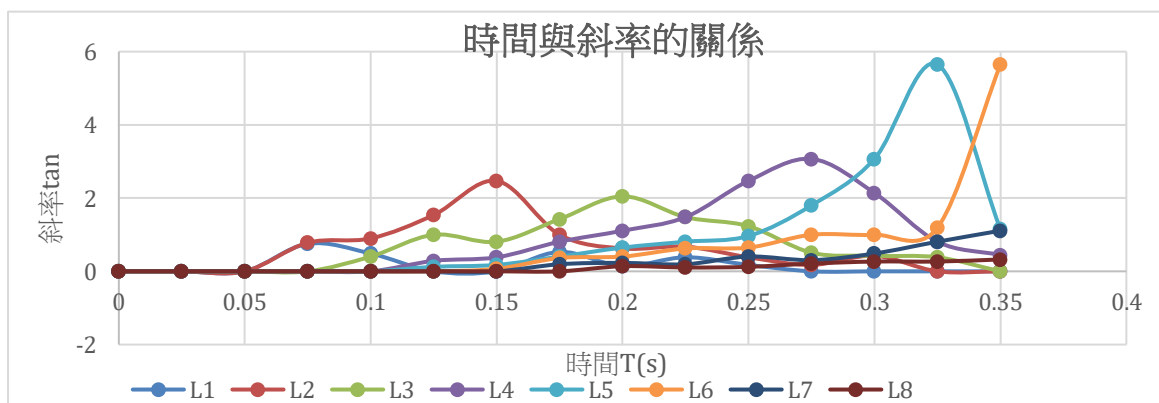
三、浪面的斜率變化及杯型的討論

在我設計環形阻擋物的時候，我發現有時候有加比沒加溢出更多水，原因就是因為環形阻擋物放的高度不對，而我們已經知道只要破壞掉初波後續的波動就會變小，因此我就想要來了解初波的構造。

在實驗前我們的理論假設是浪面的斜率變化為一斜直線，然而實際的情況是距離初波端側壁的一段範圍內，不同位置的浪面斜率會隨時間而改變。不同形狀的杯子其浪面的斜率變化也不盡相同，在本實驗的方形容器內，可以很明顯地看到初波和撞擊波這兩種斜率變化。但在圓形容器內，由於杯壁呈圓弧狀，所以當水波碰到杯壁時，水會立即由杯壁的兩側反射後朝多種方向散開，因此造成了它的斜率趨近於斜直線，杯壁附近的浪面斜率隨位置與時間的變化並不明顯。

至於方形水槽的側視之浪面波形會呈現波浪型而非一斜直線，我認為在理論推導中，每一個表面水分子的加速度都一樣，但如果把初波側壁附近的瞬間波形切得很細，會發現每一段液面水分子的 $\tan \theta$ 不一樣，即瞬間加速度與張力就會不一樣，而且也會隨著時間而改變；這些現象應該與「慣性現象」發生後的水分子間撞擊力、不同溶液的黏滯力、不同形狀杯壁的反作用力等等有關。

因此我取形成初波的側壁 A~B 區(0~4cm)，每 0.025 秒截取實驗影片的畫面，並每隔 0.5cm 做畫面切割(如 L1 為 0~0.5cm，以此類推)，測量每一小段範圍內的液面斜率，得到每一段範圍的液面斜率隨時間變化的情形如圖 6-4 所示:



在初波形成到最高的時候，總共分成 4 個部分 (圖 6-5):L1 和 L2 為水平面；L3 和 L4 在波浪上端邊緣；L5 和 L6 是波浪上端和下端的過渡位置， θ 角也最大；L7 和 L8 則位在波的下端。因此我便能利用分析出來環形阻擋物放在哪個位置最能有效破壞初波的形成。

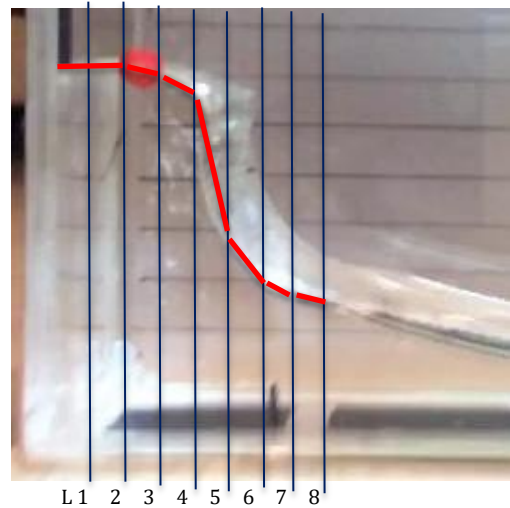


圖 6-5

由圖 6-6 可以看出，L1 處之液面斜率因為側壁瞬間撞擊後的能量反射，上下振動的能量愈來愈小，斜率變化的情形類似具指數衰減之波函數圖形。

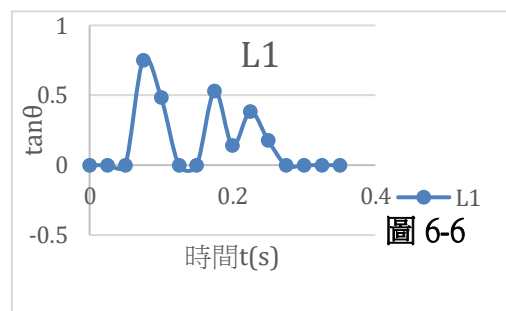


圖 6-6

而從 L2 開始一直到 L6，則發現會有一瞬間角度特別大的情形，而且他們最大的角度是依序出現的。L1~L4 經過 0.35 秒的振盪後均變成高水位面的平坦浪型，而 L5 和 L6 是在波從最高點到下面的過渡位置，因此會出現瞬間很大的斜率。

若是 L5 和 L6 的 θ 角 $> 90^\circ$ 時，這時初波就會變成像衝浪時的浪頭形狀 (圖 6-7)，此型浪頭落下來後水波便會被破壞，D~E 區的撞擊波也就會變得很零碎 (圖 6-8)，所以如果出現了這種波形，撞擊波就會變得比較不容易溢出水。



圖 6-7



圖 6-8

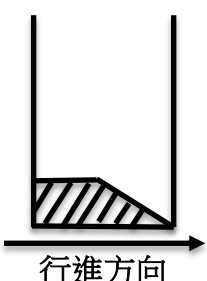
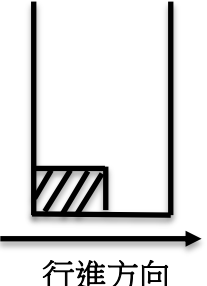
四、持續加速問題

在整個實驗過程中，為了方便觀察，我們只有進行一次的加速，然而人正常走路時不只加速一次，而是加速、減速、加速、減速……。於是我們將自己設計的理想杯子實際拿起來走走看，發現波的晃動情形真的有變小，甚至在快走後急停，水也沒有升到很高。

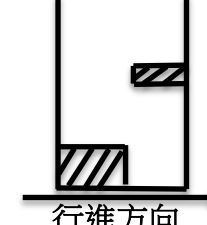
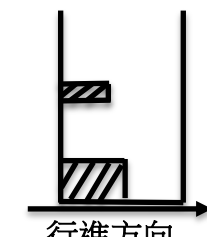
五、理想杯子的設計

在實驗中我們發現杯底的高低差或杯壁成凹凸狀都有抑制波形成的效果，於是我們就利用這兩個變因以不同的組合來進行實驗並設計，而造型有以下這幾種：

(一) 先比較底部的形狀：

| | |
|---|--|
|  | <p>在這個設計中我們希望能利用高低差來降低撞擊波的高度，然而當波反射回來時會順著斜坡而激起另一個更高的回波。所以這個方法雖然能夠降低撞擊波的高度，卻會有更高回波產生，此設計並不理想。</p> |
|  | <p>這個設計是將斜面拿掉，增加杯底的落差程度。初波的高度和上述一樣，但當波繼續往前衝時，從較高的部分轉移到較低的部分，水波會瞬間掉下來而被破壞，所以衝擊波會變小。而當水反射回來時，由於水波上升時有阻礙物，回波也因此變小，因此這個設計較前者好。</p> |

(二) 在杯壁旁架設阻礙物：我們保留了底座，並分別在杯壁的前後兩側放置半環形的阻隔板

| | |
|---|---|
|  | <p>在對面加上阻隔板，在這個設計中當水位較低時，又比沒架設時的效果還要好，能夠進一步的阻擋撞擊波的高度。但當水位高過於阻隔板時，這時這塊阻隔板就沒有甚麼作用。</p> |
|  | <p>將阻隔板放在與前進方向相同的杯壁時，當水位低於阻隔板時，初波剛升起時便立刻遭到阻擋，而後續的浪高也變得更小。水位高過於阻礙物時，初波形成時同樣會受到破壞，因此在撞擊波和回波的地方都明顯地變小許多，而我們也得到了一個結論：只要破壞掉初波能量，後續的波動就能變小，震盪幅度也變小。</p> |

(三) 利用破壞初波的原理，我們最後就做了實驗七，並得到我們想要的理想杯子。

六、環形阻擋物的設計

環形阻擋物的設計就是凹凸狀的樣子，而我們只做環形的一半的原因是因為在有阻擋物的地方，很難喝到水，所以我們才這樣設計。在網路上的文獻資料中發現國外也有做類似實驗，不過他們所做的實驗是持續加速並使用圓杯，並進行細項的分析。類似的設計在油罐車(圖 6-9)裡也有，可以用來抑制汽油的波動。

槽車構造簡介

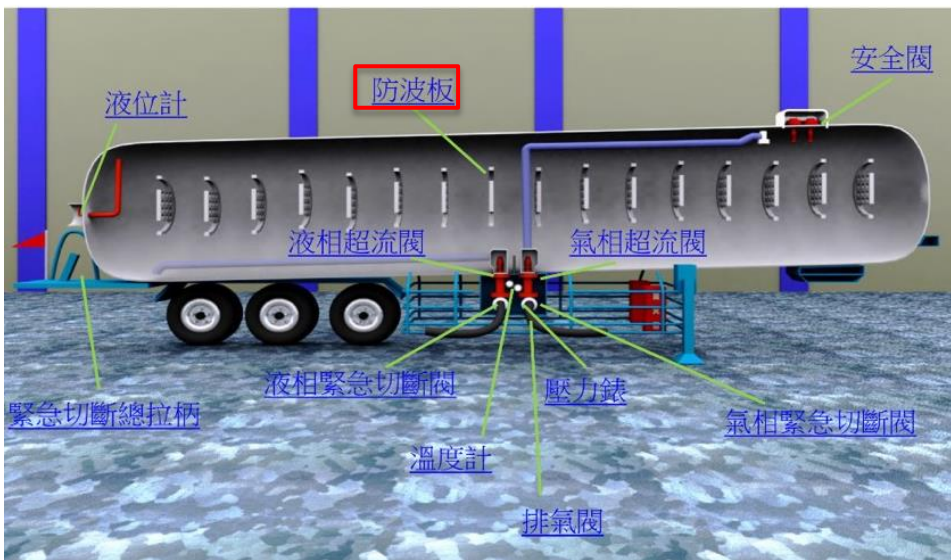


圖 6-9

在文獻資料中也發現到材質較柔軟的杯子能夠吸收杯子晃動時的能量，因此也是解決方式的其中一項。在現實生活中，不可能每個杯子都做個阻隔板來防止水濺出。為此我設計了可加掛上去的阻隔板以適用各種杯子，也可結合攪拌器或吸管的功能，達到多功能的使用目的，如圖 6-10。



圖 6-10

柒、 結論

經過上述的實驗和討論，我們得到以下結論:

- 一、 波形並不是與預測的一樣是斜直線，而是呈現波浪型。
- 二、 打到杯壁的波(撞擊波)會比加速時的波(初波)還高，這是咖啡外溢的原因。
- 三、 加速度與液面升起的高度有關，加速度越大，升起的高度越高。
- 四、 不同的位置，最高點的水位不同。
- 五、 容器口徑對液面升起高度在不同點有不同的影響。口徑越大，升起幅度越低。
- 六、 當水與杯底的距離比波的振幅還要大，則水波上升的幅度就不會受影響。
- 七、 不同的液體的液面升起高度與其液體對杯壁的附著力有關。
- 八、 粗糙的杯壁(如海綿)或凹凸狀的杯壁會吸收或破壞波的能量而降低水波高度。
- 九、 不平的杯底可破壞水波下降時的力量或利用水位高低差而減緩後續的波動。
- 十、 在杯壁置放障礙物可有效減弱初波的能量，降低撞擊波及回波的高度，進而減少外溢現象。
- 十一、 解決水溢出的方法
 - (一) 加速度變小:走慢一點。
 - (二) 速度變化越小:不要停停走走。
 - (三) 在產生初波端的杯壁適當高度放置阻隔板可以有效破壞初波，並減少震盪幅度。

捌、參考資料

- 一、Jon Cartwright.The Physics of Spilled Coffee | Science | AAAS.2016 年 1 月 15 日取自：
<http://www.sciencemag.org/news/2012/05/physics-spilled-coffee>
- 二、Natalie Wolchover.Science Reveals How Not to Spill Your Coffee When Walking | Coffee Cup.2016 年 1 月 15 日取自：
<http://m.livescience.com/20246-coffee-spill-walking.html>
- 三、吳祚任海嘯 - TSUNAMI SCIENCE LABORATORY.國立中央大學.2016 年 2 月 5 日取自：
tsunami.ihs.ncu.edu.tw/tsunami/tsunami.htm
- 四、消波塊 . 维基百科，自由的百科全书.2016 年 2 月 18 日取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/消波塊>
- 五、張亦萱等從人工消波塊看自然生態工法.國立臺灣科學教育館.2016 年 3 月 9 日取自：
activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/44/c08/080801.pdf
- 六、林昆逸.福爾摩沙的無名英雄.2016 年 3 月 11 日取自：
www.shs.edu.tw/works/essay/2011/03/2011032912474364.pdf
- 七、黃議德.海岸巨人-----消波塊.2016 年 3 月 13 日取自：
<https://www.nmmst.gov.tw/other/B151-wc.pdf>
- 八、孫鎮球.海嘯.2016 年 3 月 21 日取自：
ejournal.stpi.narl.org.tw/NSC_INDEX/Journal/EJ0001/.../9402-11.pdf
- 九、鄭明修.消波塊@ 地理教學 geography teaching :: 痞客邦 PIXNET :: .2016 年 3 月 24 日
取自：jianwenadam.pixnet.net/blog/post/23240105-消波塊
- 十、海浪的成因.中央氣象局.2016 年 3 月 28 日取自：www.cwb.gov.tw/kids/swf/9_2_2/9_2_2.html
- 十一、邱淑慧.台灣會不會發生大海嘯?.科學人雜誌.2016 年 4 月 1 日取自：
sa.ylib.com/MagCont.aspx?Unit=newscan&id=635

【評語】 030109

1. 整體作品相當完整。從問題發想到解決難題，都可以看出作者的企圖心。
2. 作者對科學的態度與熱情令人感動。