

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 物理科

第一名

040114

“稜”波微步

國立新竹女子高級中學

作者姓名：

高二 楊子君 高二 林于涵

指導老師：

陳沛慈 陳文楠

# 「稜」波微步

## 壹、摘要

以衝擊波中會出現的馬赫角的概念為基礎，利用雙水槽與單一軌道設計一簡便實驗方法量測液體表面波波速，並利用此裝置來探討不同變因，例如溫度、黏度等對波速的影響。

## 貳、研究動機

某天在家裡看 HBO 的時候，那時候正在放映『神鬼奇航』，那詭異神秘的船隻劃過黑黑的海面，或快或慢，我專注的盯著螢幕『咦！水面的波紋好奇怪啊！拖曳著兩條長長的尾巴。記得之前在國家地理頻道有播出過一集介紹海嘯的特集，其中也介紹到了深水波和淺水波的特性，那時美國的某海洋大學教授說到，深水波會比淺水波行進的速度還要快。那麼所謂的深水，是多深呢？那它會不會漸漸地傳到水面上呢？傳到水面上之後又會是什麼樣子？』一連串的問題在我腦海中成形，越來越壯大的好奇心澎湃湧湧地向我迎來。又碰巧最近在學校看到課本上都卜勒效應的附圖，我想到那時鬼盜船在海面上滑行時劃出的角度，是不是波源速度（鬼盜船）滑的比水波快呢？所以開始了這次的研究。

## 參、研究目的

- 一、設計一簡便裝置量測液體波速。
- 二、探討擾動源深度和水波波速的關係。
- 三、探討溶液濃度和水波速度的關係。
- 四、探討水溫和水波速度的關係。

## 肆、研究設備及器材

- |     |                           |    |   |
|-----|---------------------------|----|---|
| 一、  | 軌道·····                   | 1  | 座 |
| 二、  | 重車·····                   | 1  | 台 |
| 三、  | 槽碼·····                   | 20 | 個 |
| 四、  | 彈簧·····                   | 1  | 個 |
| 五、  | 水箱·····                   | 2  | 個 |
| 六、  | 支架·····                   | 2  | 座 |
| 七、  | 起波器（直徑 1.6/2.0 mm 的白鐵絲）·· | 2  | 枝 |
| 八、  | 長尺（100 cm）·····           | 1  | 把 |
| 九、  | PASCO SW 750 主機、位置感應器··   | 1  | 組 |
| 十、  | 數位相機·····                 | 1  | 台 |
| 十一、 | PhotoImpact 8             |    |   |

## 伍、研究過程或方法

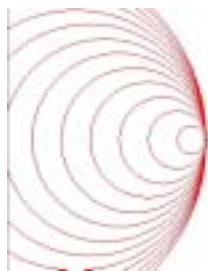
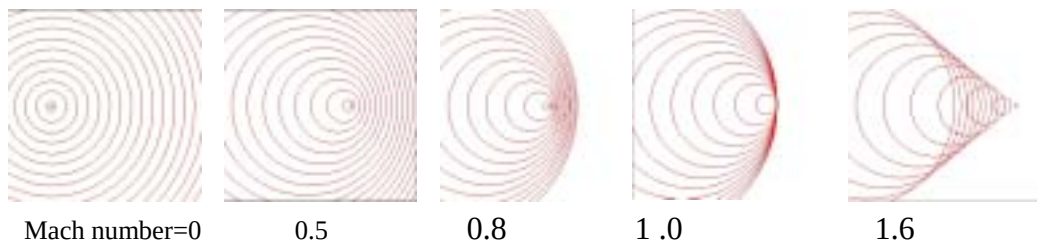
### 一、研究方法

#### (一)實驗原理

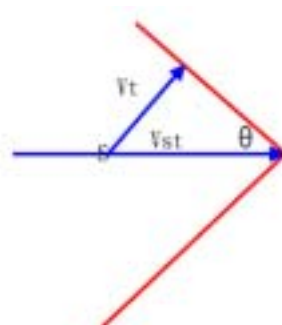
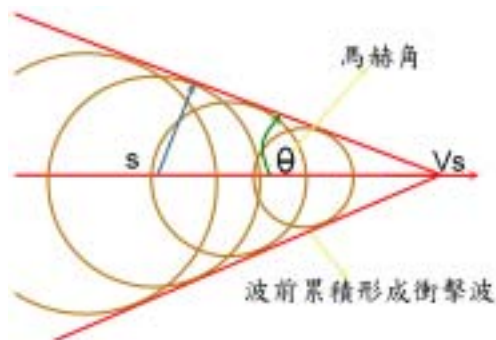
##### 1.馬赫角

由都普勒效應 (**Doppler effect**), 我們知道當**波源**以速度  $V_s$  朝觀察者移動時, 由於波被壓縮觀察到的波頻率  $f'$  會比原來的頻率  $f$  增加, 當波源速度大於波速時便會產生馬赫錐(Mach Cone)。

下列各圖為  $V_s$  對  $V$  的比值, 這裡  $V$  表示波速。 ( $\text{Mach number} = V_s/V$ )



當波源速度與波速相等時, 在過去的時間由波源所發出的**波前 (wavefronts)** 通通擠在波源附近而形成**震波**。



當波源的速率超過波速時, 由於波形重疊的結果, 產生一圓錐形的衝擊波

$$\sin \theta = \frac{vt}{V_s t} = \frac{v}{V_s}$$

2.如果產生 AB 兩衝擊波之波源速度相同，則

A 水槽中水波波速  $V_a = V_s \times \sin \theta_A$

B 水槽中水波波速  $V_b = V_s \times \sin \theta_B$



3.將 2 中的結果運用在我們實驗的雙水槽裝置上，得

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{\sin \theta_B}{\sin \theta_A}, \text{ 故欲求的 } V_b = V_a \times \frac{\sin \theta_B}{\sin \theta_A}$$

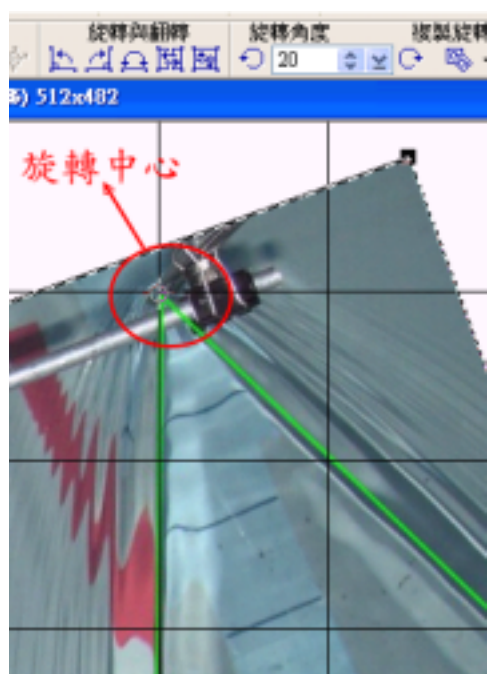
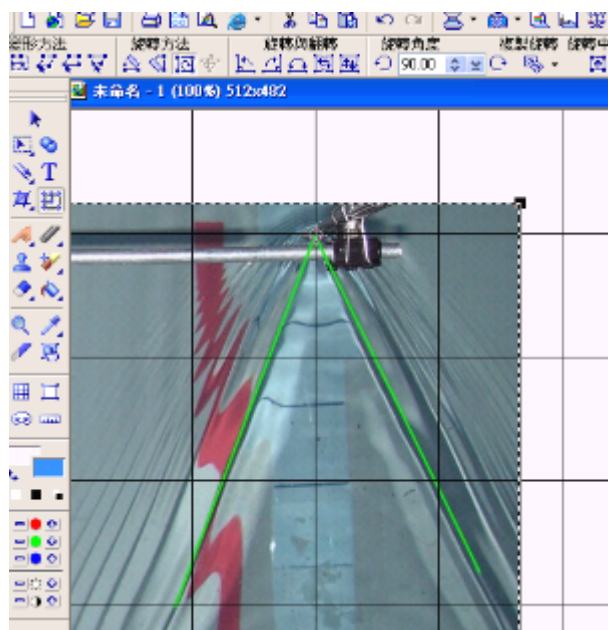
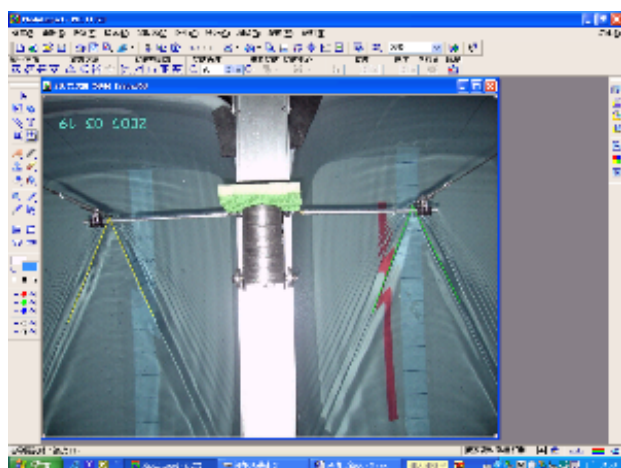
4.在實驗中我們會先將入水深度為 1.0cm 的波速求出，作為對照組的參考波速，用來推導之後 B 槽各種變因下的波速，探討表面波波速在不同情況下的大小。

## (二)實驗組與對照組

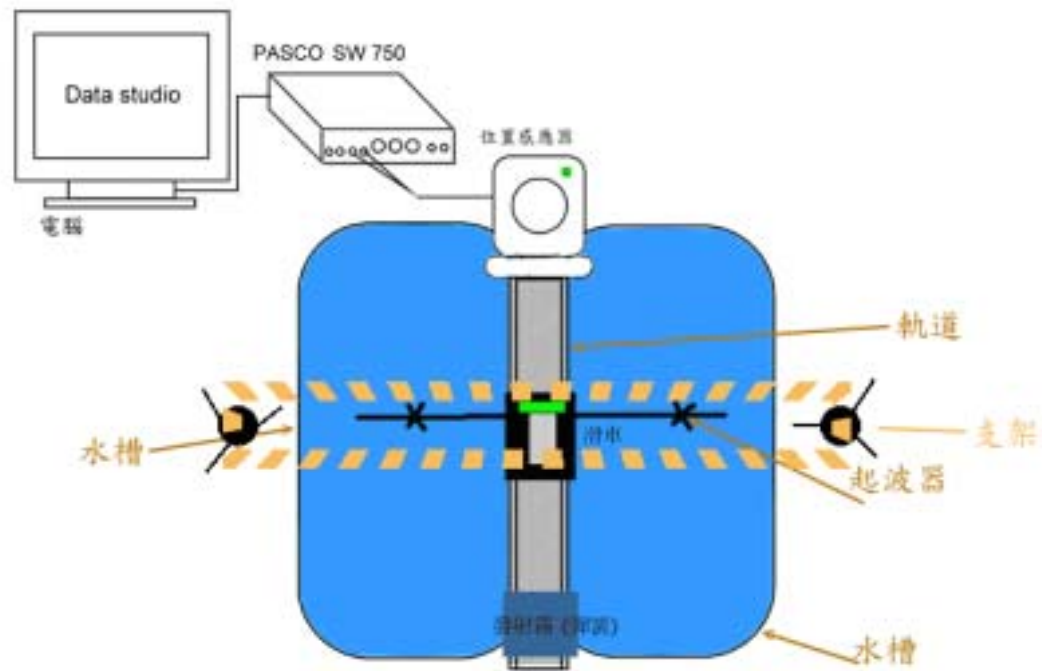
- 1.將 A 水箱設為對照組，於實驗過程中固定水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度 1.0cm，食鹽 0 包。
- 2.將 B 水箱設為實驗組，固定水深為 40.0cm，其他條件依實驗之操縱變因而改變之。
- 3.A、B 兩水箱的起波器均固定於啟動滑車兩側，確保實驗組與對照組的波源速度均相同。
- 4.測量角度的部分，為求較精確的角度我們將在電腦中利用 PhotoImpact 8 進行。

## (三)馬赫角的量取

- 1.開啟各實驗所拍攝的照片檔。
- 2.用影像處理軟體(*PhotoImpact 8*)畫出波產生的角。
- 3.旋轉照片——先開啟一空白頁面並顯示格線，利用已畫好線的圖片，選取需要量角度的部份，移到空白頁面，使用變形工具中的**任意旋轉**，將旋轉中心設在頂點，先旋轉至對齊格線十字交叉處，再藉由輸入角度反向旋轉得到它的角度。



## 二、裝置圖



上圖為實驗主要裝置



圖一、裝置圖



圖二、滑車

### 三、實驗步驟

#### (一)表面波速與波源速度的關係

- 1.調整 A 水箱之水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度為 1.0cm。
- 2.調整 B 水箱之水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度為 1.0 cm。
- 3.調整軌道，提高一邊些許高度使滑車克服軌道摩擦力，進而讓滑車等速前進。
- 4.將滑車置於軌道上，壓縮彈簧。
- 5.釋放彈簧時，以數位相機拍下由移動中滑車所產生的衝擊波波形，同時以 sw 750 主機記錄滑車速度。
- 6.改變彈簧壓縮量，令滑車以不同速度前進，重複步驟 4、5。
- 7.分析表面波速與波源速度的關係

#### (二)表面波速與起波器入水深度的關係

- 1.調整 A 水箱之水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度為 1.0cm。
- 2.調整 B 水箱之水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度分別為 8/16/32/40 cm 。
- 3.調整軌道，提高一邊些許高度使滑車克服軌道摩擦力，進而讓滑車等速前進。
- 4.調整起波器入水深度，將滑車置於軌道上，壓縮彈簧。
- 5.於釋放彈簧時，以數位相機拍下由移動中滑車所產生的衝擊波波形，同時以 sw 750 主機紀錄滑車速度。
- 6.改變彈簧壓縮量，令滑車以不同速度前進，重複步驟 4、5。
- 7.重複 4、5、6 取完 B 水箱需改變深度的變因。
- 8.分析照片測量衝擊波之衝擊角。

#### (三)表面波速與鹽水濃度的關係

- 1.調整 A 水箱之水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度為 1.0cm。
- 2.調整 B 水箱之水深為 40.0cm，水溫 20.0°C，起波器入水深度為 1.0cm，食鹽濃度為 5/10/15/20/25/30/35 包。
- 3.調整軌道，提高一邊些許高度使滑車克服軌道摩擦力，進而讓滑車等速前進。
- 4.倒入食鹽全溶於水後，將滑車置於軌道上，壓縮彈簧。
- 5.於釋放彈簧時，以數位相機拍下由移動中滑車所產生的衝擊波波形，同時以 sw 750 主機紀錄滑車速度。
- 6.改變彈簧壓縮量，令滑車以不同速度前進，重複步驟 5。
- 7.重複步驟 4、5、6 取完 B 水箱需改變食鹽濃度的變因。
- 8.分析照片測量衝擊波之衝擊角。

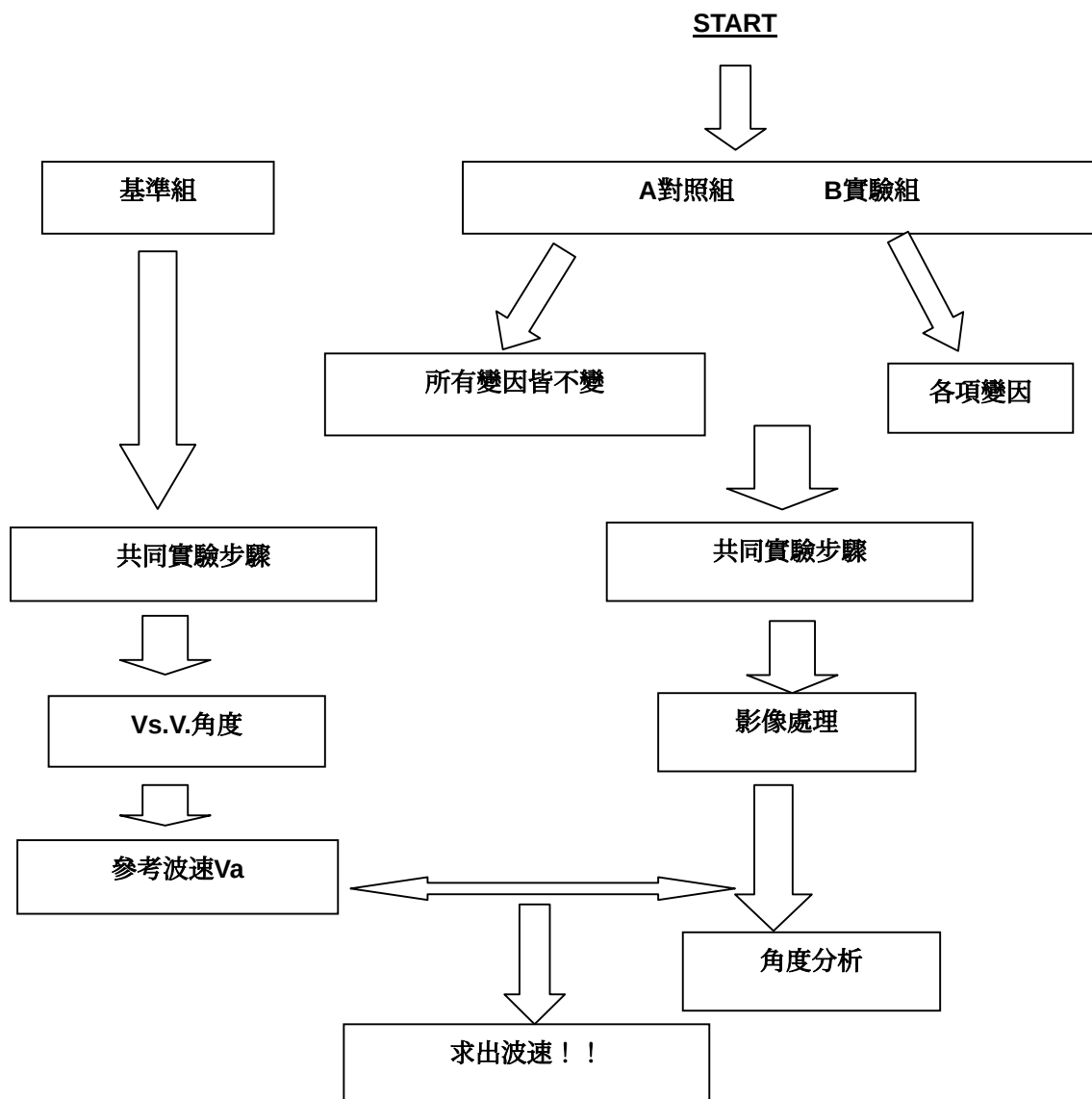
#### (四)表面波速與水溫的關係

- 1.調整 A 水箱之水深為 40.0cm，起波器入水深度為 1.0cm，水溫 20.0°C。
- 2.調整 B 水箱之水深為 40.0cm，起波器入水深度為 1.0cm，水溫為 5/20/40°C。
- 3.調整軌道，提高一邊些許高度使滑車克服軌道摩擦力，進而讓滑車等速前進。
- 4.改變 B 槽溫度後，將滑車置於軌道上，壓縮彈簧。
- 5.於釋放彈簧時，以數位相機拍下由移動中滑車所產生的衝擊波波形，同時以 sw 750 主機紀錄滑車速度。
- 6.改變彈簧壓縮量，令滑車以不同速度前進，重複步驟 5。
- 7.重複步驟 4、5、6 取完 B 水箱需改變水溫的變因。
- 8.分析照片測量衝擊波之衝擊角。

#### (五)表面波速與水量的關係

- 1.調整 A 水箱起波器入水深度為 1.0cm，水溫 20.0°C，水深為 39.0cm。
- 2.調整 B 水箱起波器入水深度為 1.0cm，水溫為 20°C，水深為 39.0、34.0、29.0、24.0、19.0、14.0、9.0、4.0cm。
- 3.調整軌道，提高一邊些許高度使滑車克服軌道摩擦力，進而讓滑車等速前進。
- 4.改變 B 槽水量後，將滑車置於軌道上，壓縮彈簧。
- 5.於釋放彈簧時，以數位相機拍下由移動中滑車所產生的衝擊波波形，同時以 sw 750 主機紀錄滑車速度。
- 6.改變彈簧壓縮量，令滑車以不同速度前進，重複步驟 5。
- 7.重複步驟 4、5、6 取完 B 水箱需改變水溫的變因。
- 8.分析照片測量衝擊波之衝擊角。





## 六、實驗結果

### (一) 表面波速與起波器入水深度的關係

※水溫控制在 20°C

#### (一、實驗數據)

【實驗組起波器入水深度 8 cm

對照組起波器入水深度 1 cm】

| 實驗組   |        | 對照組    |        |        |                   |            |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------------------|------------|
| 照片編   | 全角(度)  | 半角(B)  | 全角(度)  | 半角(A)  | $\sin B / \sin A$ | $V_g(m/s)$ |
| 1095  | 56.500 | 28.250 | 55.500 | 27.750 | 1.017             | 0.207      |
| 1096  | 56.000 | 28.000 | 56.000 | 28.000 | 1.000             | 0.204      |
| 1097  | 66.750 | 33.375 | 64.750 | 32.375 | 1.027             | 0.210      |
| 1098  | 55.250 | 27.625 | 55.750 | 27.875 | 0.992             | 0.202      |
| 1099  | 57.500 | 28.750 | 56.750 | 28.375 | 1.012             | 0.206      |
| 1100  | 54.000 | 27.000 | 54.000 | 27.000 | 1.000             | 0.204      |
| 1102  | 57.000 | 28.500 | 57.000 | 28.500 | 1.000             | 0.204      |
| 1103  | 52.500 | 26.250 | 50.000 | 25.000 | 1.047             | 0.213      |
| 1104  | 54.250 | 27.125 | 54.000 | 27.000 | 1.004             | 0.205      |
| 1105  | 47.250 | 23.625 | 47.250 | 23.625 | 1.000             | 0.204      |
| 1107  | 41.500 | 20.750 | 42.000 | 21.000 | 0.989             | 0.202      |
| 1108  | 37.000 | 18.500 | 38.500 | 19.250 | 0.962             | 0.196      |
| 1108  | 37.500 | 18.750 | 38.000 | 19.000 | 0.987             | 0.201      |
| 1110  | 33.500 | 16.750 | 32.500 | 16.250 | 1.030             | 0.210      |
| 1111  | 40.000 | 20.000 | 38.000 | 19.000 | 1.051             | 0.214      |
| 1112  | 35.500 | 17.750 | 35.500 | 17.750 | 1.000             | 0.204      |
| 1114  | 40.250 | 20.125 | 40.000 | 20.000 | 1.006             | 0.205      |
| 1115  | 38.000 | 19.000 | 40.000 | 20.000 | 0.952             | 0.194      |
| 1116  | 40.250 | 20.125 | 40.500 | 20.250 | 0.994             | 0.203      |
| 1117  | 40.750 | 20.375 | 40.250 | 20.125 | 1.012             | 0.206      |
| 1118  | 36.750 | 18.375 | 39.000 | 19.500 | 0.944             | 0.193      |
| 1121  | 70.750 | 35.375 | 68.500 | 34.250 | 1.029             | 0.210      |
| 1122  | 60.500 | 30.250 | 61.750 | 30.875 | 0.982             | 0.200      |
| 1124  | 35.250 | 17.625 | 38.250 | 19.125 | 0.924             | 0.189      |
| 1125  | 37.000 | 18.500 | 37.750 | 18.875 | 0.981             | 0.200      |
| 1127  | 58.500 | 29.250 | 61.500 | 30.750 | 0.956             | 0.195      |
| *1128 | 20.250 | 10.125 | 20.750 | 10.375 | 0.976             | 0.199      |
| 1129  | 18.500 | 9.250  | 18.750 | 9.375  | 0.987             | 0.201      |
| 1132  | 20.000 | 10.000 | 20.250 | 10.125 | 0.988             | 0.202      |
| 1134  | 27.000 | 13.500 | 28.500 | 14.250 | 0.948             | 0.193      |
| 1137  | 25.500 | 12.750 | 27.000 | 13.500 | 0.945             | 0.193      |
| 平均    |        |        |        |        |                   | 0.202      |

【實驗組起波器入水深度 16 cm

對照組起波器入水深度 1 cm】

| 實驗組   |       | 對照組   |       |       |                   |               |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|---------------|
| 照片編   | 全角    | 半角(B) | 全角    | 半角(A) | $\sin B / \sin A$ | $V_{16}(m/s)$ |
| 1873  | 94.75 | 47.38 | 98.00 | 49.00 | 0.975             | 0.199         |
| 1874  | 95.25 | 47.63 | 97.00 | 48.50 | 0.986             | 0.201         |
| 1875  | 66.25 | 33.13 | 67.00 | 33.50 | 0.990             | 0.202         |
| 1876  | 62.50 | 31.25 | 63.00 | 31.50 | 0.993             | 0.203         |
| 1830  | 69.00 | 34.50 | 70.00 | 35.00 | 0.987             | 0.201         |
| 1881  | 76.50 | 38.25 | 77.00 | 38.50 | 0.995             | 0.203         |
| 1882  | 57.00 | 28.50 | 57.75 | 28.88 | 0.988             | 0.202         |
| 1883  | 58.50 | 29.25 | 58.50 | 29.25 | 1.000             | 0.204         |
| 1884  | 59.50 | 29.75 | 60.25 | 30.13 | 0.989             | 0.202         |
| 1888  | 45.00 | 22.50 | 45.50 | 22.75 | 0.990             | 0.202         |
| 1889  | 51.75 | 25.88 | 51.50 | 25.75 | 1.005             | 0.205         |
| 1895  | 48.00 | 24.00 | 48.00 | 24.00 | 1.000             | 0.204         |
| *1899 | 27.25 | 13.63 | 28.00 | 14.00 | 0.974             | 0.199         |
| 1900  | 32.75 | 16.38 | 34.50 | 17.25 | 0.951             | 0.194         |
| 1907  | 21.50 | 10.75 | 22.00 | 11.00 | 0.978             | 0.199         |
| 平均    |       |       |       |       |                   | 0.201         |

【實驗組起波器入水深度 24 cm

對照組起波器入水深度 1 cm】

| 實驗組   |       | 對照組   |        |       |                   |               |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------------------|---------------|
| 照片編   | 全角    | 半角(B) | 全角     | 半角(A) | $\sin B / \sin A$ | $V_{24}(m/s)$ |
| 1184  | 96.50 | 48.25 | 100.50 | 50.25 | 0.970             | 0.198         |
| 1185  | 97.00 | 48.50 | 101.00 | 50.50 | 0.971             | 0.198         |
| 1186  | 81.50 | 40.75 | 84.00  | 42.00 | 0.976             | 0.199         |
| 1188  | 96.00 | 48.00 | 97.00  | 48.50 | 0.992             | 0.202         |
| 1190  | 79.50 | 39.75 | 80.00  | 40.00 | 0.995             | 0.203         |
| 1192  | 71.50 | 35.75 | 74.00  | 37.00 | 0.971             | 0.198         |
| 1193  | 66.00 | 33.00 | 66.50  | 33.25 | 0.993             | 0.203         |
| 1194  | 75.00 | 37.50 | 77.50  | 38.75 | 0.973             | 0.198         |
| 1195  | 56.00 | 28.00 | 58.00  | 29.00 | 0.968             | 0.198         |
| 1196  | 57.00 | 28.50 | 59.25  | 29.63 | 0.965             | 0.197         |
| 1198  | 43.00 | 21.50 | 43.50  | 21.75 | 0.989             | 0.202         |
| 1201  | 55.50 | 27.75 | 56.00  | 28.00 | 0.992             | 0.202         |
| 1202  | 53.50 | 26.75 | 54.00  | 27.00 | 0.991             | 0.202         |
| 1203  | 45.50 | 22.75 | 48.00  | 24.00 | 0.951             | 0.194         |
| 1204  | 39.00 | 19.50 | 42.00  | 21.00 | 0.931             | 0.190         |
| 1205  | 39.50 | 19.75 | 41.00  | 20.50 | 0.965             | 0.197         |
| 1206  | 52.50 | 26.25 | 52.00  | 26.00 | 1.009             | 0.206         |
| 1207  | 42.00 | 21.00 | 42.50  | 21.25 | 0.989             | 0.202         |
| 1210  | 34.00 | 17.00 | 34.00  | 17.00 | 1.000             | 0.204         |
| *1212 | 25.00 | 12.50 | 25.00  | 12.50 | 1.000             | 0.204         |
| 1213  | 21.00 | 10.50 | 21.00  | 10.50 | 1.000             | 0.204         |
| 1215  | 24.50 | 12.25 | 27.00  | 13.50 | 0.909             | 0.185         |
| 平均    |       |       |        |       |                   | 0.199         |

【實驗組起波器入水深度 32 cm

對照組起波器入水深度 1 cm】

| 照片編   | 實驗組    |       | 對照組    |       | $\sin B / \sin A$ | $V_{32}(\text{m/s})$ |
|-------|--------|-------|--------|-------|-------------------|----------------------|
|       | 全角(度)  | 半角(B) | 全角(度)  | 半角(A) |                   |                      |
| 1224  | 109.50 | 54.75 | 111.00 | 55.50 | 0.991             | 0.202                |
| 1230  | 65.00  | 32.50 | 66.00  | 33.00 | 0.987             | 0.201                |
| 1231  | 53.25  | 26.63 | 54.00  | 27.00 | 0.987             | 0.201                |
| 1233  | 45.00  | 22.50 | 45.50  | 22.75 | 0.990             | 0.202                |
| 1237  | 36.00  | 18.00 | 36.50  | 18.25 | 0.987             | 0.201                |
| 1238  | 35.00  | 17.50 | 36.50  | 18.25 | 0.960             | 0.196                |
| 1239  | 41.00  | 20.50 | 43.00  | 21.50 | 0.956             | 0.195                |
| 1242  | 43.00  | 21.50 | 43.50  | 21.75 | 0.989             | 0.202                |
| *1245 | 23.50  | 11.75 | 25.50  | 12.75 | 0.923             | 0.188                |
| 1255  | 26.00  | 13.00 | 26.50  | 13.25 | 0.981             | 0.200                |
| 1256  | 22.50  | 11.25 | 24.50  | 12.25 | 0.919             | 0.188                |
| 1257  | 15.75  | 7.88  | 16.00  | 8.00  | 0.984             | 0.201                |
| 平均    |        |       |        |       |                   | 0.198                |

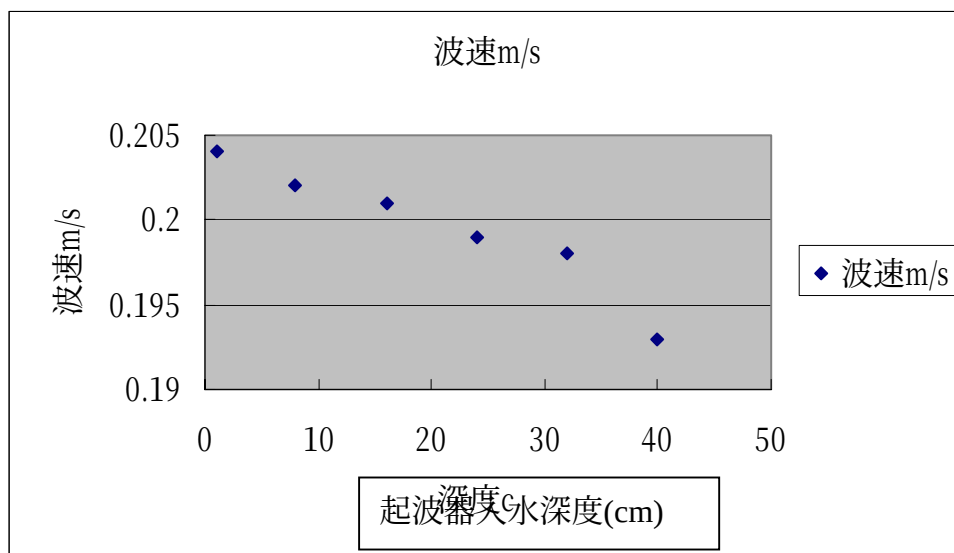
【實驗組起波器入水深度 40 cm

對照組起波器入水深度 1 cm】

| 照片    | 實驗組   |       | 對照組   |       | $\sin B / \sin A$ | $V_{40}(\text{m/s})$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|----------------------|
|       | 全角(度) | 半角(B) | 全角(度) | 半角(A) |                   |                      |
| 1259  | 88.00 | 44.00 | 94.75 | 47.38 | 0.944             | 0.193                |
| 1263  | 73.00 | 36.50 | 78.50 | 39.25 | 0.940             | 0.192                |
| 1264  | 63.00 | 31.50 | 65.00 | 32.50 | 0.972             | 0.198                |
| 1268  | 56.00 | 28.00 | 58.00 | 29.00 | 0.968             | 0.198                |
| 1271  | 61.00 | 30.50 | 65.00 | 32.50 | 0.945             | 0.193                |
| 1272  | 52.00 | 26.00 | 54.25 | 27.13 | 0.961             | 0.196                |
| 1276  | 40.25 | 20.13 | 40.50 | 20.25 | 0.994             | 0.203                |
| 1278  | 37.50 | 18.75 | 38.75 | 19.38 | 0.969             | 0.198                |
| 1281  | 33.00 | 16.50 | 34.75 | 17.38 | 0.951             | 0.194                |
| 1284  | 34.50 | 17.25 | 37.50 | 18.75 | 0.923             | 0.188                |
| *1286 | 27.25 | 13.63 | 30.00 | 15.00 | 0.910             | 0.186                |
| 1289  | 27.50 | 13.75 | 30.00 | 15.00 | 0.918             | 0.187                |
| 1291  | 30.00 | 15.00 | 33.75 | 16.88 | 0.892             | 0.182                |
| 1294  | 24.25 | 12.13 | 26.00 | 13.00 | 0.934             | 0.190                |
| 1271  | 61.50 | 30.75 | 65.00 | 32.50 | 0.952             | 0.194                |
| 1272  | 52.00 | 26.00 | 54.50 | 27.25 | 0.957             | 0.195                |
| 1276  | 40.00 | 20.00 | 41.50 | 20.75 | 0.965             | 0.197                |
| 1278  | 37.50 | 18.75 | 38.50 | 19.25 | 0.975             | 0.199                |
| 1280  | 36.25 | 18.13 | 37.75 | 18.88 | 0.962             | 0.196                |
| 1281  | 33.00 | 16.50 | 35.00 | 17.50 | 0.944             | 0.193                |
| 1283  | 35.50 | 17.75 | 39.00 | 19.50 | 0.913             | 0.186                |
| 1284  | 34.50 | 17.25 | 37.00 | 18.50 | 0.935             | 0.191                |
| 平均    |       |       |       |       |                   | 0.193                |

(二、表面波速和擾動源入水深度關係圖)

| 深度cm | 起波器入水在不同深度之平均表面波速(m/s) |
|------|------------------------|
| 1    | 0.204                  |
| 8    | 0.202                  |
| 16   | 0.201                  |
| 24   | 0.199                  |
| 32   | 0.198                  |
| 40   | 0.193                  |



由上圖可知，起波器入水深度越深，表面波速越慢。

## (二) 表面波速與鹽水濃度的關係

※起波器入水深度：實驗組入水深度 1 cm 對照組入水深度 1 cm

且水溫控制在 20°C

### (一、實驗數據)

【實驗組 0 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶之數據採用(一)中起波器入水深度皆為 1 cm之數據】

【實驗組 5 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶】

| 照片編號 | 實驗組   |       | 對照組   |       | $V_{5\text{salt}} = (\sin A / \sin B) * V_c$ |                                 |
|------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------------------|---------------------------------|
|      | 5包全角  | 半角(A) | 0包全角  | 半角(B) | $\sin A / \sin B$                            | $V_{5\text{salt}} (\text{m/s})$ |
| 1450 | 72.00 | 36.00 | 77.00 | 38.50 | 0.94                                         | 0.193                           |
| 1451 | 50.00 | 25.00 | 58.50 | 29.25 | 0.86                                         | 0.176                           |
| 1453 | 49.50 | 24.75 | 57.00 | 28.50 | 0.88                                         | 0.179                           |
| 1455 | 49.00 | 24.50 | 55.00 | 27.50 | 0.90                                         | 0.183                           |
| 1458 | 33.50 | 16.75 | 40.00 | 20.00 | 0.84                                         | 0.172                           |
| 1459 | 35.00 | 17.50 | 38.00 | 19.00 | 0.92                                         | 0.188                           |
| 1461 | 33.00 | 16.50 | 38.25 | 19.13 | 0.87                                         | 0.177                           |
| 1462 | 20.50 | 10.25 | 24.00 | 12.00 | 0.86                                         | 0.175                           |
| 1475 | 16.00 | 8.00  | 18.00 | 9.00  | 0.89                                         | 0.181                           |
| 1476 | 44.00 | 22.00 | 50.00 | 25.00 | 0.89                                         | 0.181                           |
| 1479 | 39.00 | 19.50 | 45.50 | 22.75 | 0.86                                         | 0.176                           |
| 平均   |       |       |       |       |                                              | 0.180                           |

【實驗組 10 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶】

| 照片編   | 實驗組      |       | 對照組     |       | $V_{10\text{salt}} = (\sin A / \sin B) * V_0$ |                                  |
|-------|----------|-------|---------|-------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
|       | 10包全角(度) | 半角(A) | 0包全角(度) | 半角(B) | $\sin A / \sin B$                             | $V_{10\text{salt}} (\text{m/s})$ |
| 1483  | 44.00    | 22.00 | 50.00   | 25.00 | 0.886                                         | 0.181                            |
| 1484  | 39.00    | 19.50 | 45.50   | 22.75 | 0.863                                         | 0.176                            |
| 1486  | 37.50    | 18.75 | 47.00   | 23.50 | 0.806                                         | 0.164                            |
| 1493  | 34.50    | 17.25 | 38.50   | 19.25 | 0.899                                         | 0.183                            |
| 1494  | 59.50    | 29.75 | 67.00   | 33.50 | 0.899                                         | 0.183                            |
| 1496  | 37.00    | 18.50 | 40.75   | 20.38 | 0.911                                         | 0.186                            |
| 1498  | 37.00    | 18.50 | 42.00   | 21.00 | 0.885                                         | 0.181                            |
| 1499  | 84.50    | 42.25 | 98.00   | 49.00 | 0.891                                         | 0.182                            |
| 1500  | 39.25    | 19.63 | 42.75   | 21.38 | 0.922                                         | 0.188                            |
| 1519  | 50.75    | 25.38 | 60.00   | 30.00 | 0.857                                         | 0.175                            |
| *1502 | 22.00    | 11.00 | 25.50   | 12.75 | 0.865                                         | 0.176                            |
| 1503  | 50.75    | 25.38 | 57.00   | 28.50 | 0.898                                         | 0.183                            |
| 1505  | 23.25    | 11.63 | 27.00   | 13.50 | 0.863                                         | 0.176                            |
| 1507  | 24.50    | 12.25 | 28.00   | 14.00 | 0.877                                         | 0.179                            |
| 1510  | 29.50    | 14.75 | 33.00   | 16.50 | 0.896                                         | 0.183                            |
| 1513  | 22.50    | 11.25 | 25.00   | 12.50 | 0.901                                         | 0.184                            |
| 平均    |          |       |         |       |                                               | 0.180                            |

【實驗組 15 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶】

| 實驗組   |          |       | 對照組     |       | $V_{15\text{salt}} = (\sin A / \sin B) * V_0$ |                                  |
|-------|----------|-------|---------|-------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 照片編   | 15包全角(度) | 半角(A) | 0包全角(度) | 半角(B) | $\sin A / \sin B$                             | $V_{15\text{salt}} (\text{m/s})$ |
| 1523  | 55.50    | 27.75 | 64.50   | 32.25 | 0.873                                         | 0.178                            |
| 1524  | 55.50    | 27.75 | 64.50   | 32.25 | 0.873                                         | 0.178                            |
| 1525  | 41.00    | 20.50 | 51.00   | 25.50 | 0.813                                         | 0.166                            |
| 1526  | 49.50    | 24.75 | 55.50   | 27.75 | 0.899                                         | 0.183                            |
| 1527  | 43.00    | 21.50 | 50.00   | 25.00 | 0.867                                         | 0.177                            |
| 1528  | 40.00    | 20.00 | 48.00   | 24.00 | 0.841                                         | 0.172                            |
| 1529  | 52.50    | 26.25 | 59.00   | 29.50 | 0.898                                         | 0.183                            |
| 1530  | 36.00    | 18.00 | 42.00   | 21.00 | 0.862                                         | 0.176                            |
| 1531  | 37.50    | 18.75 | 45.00   | 22.50 | 0.840                                         | 0.171                            |
| 1532  | 38.00    | 19.00 | 43.00   | 21.50 | 0.888                                         | 0.181                            |
| 1533  | 33.00    | 16.50 | 38.50   | 19.25 | 0.861                                         | 0.176                            |
| *1534 | 29.00    | 14.50 | 34.00   | 17.00 | 0.856                                         | 0.175                            |
| 1535  | 20.50    | 10.25 | 23.00   | 11.50 | 0.893                                         | 0.182                            |
| 1545  | 18.50    | 9.25  | 22.50   | 11.25 | 0.824                                         | 0.168                            |
| 1546  | 16.50    | 8.25  | 20.50   | 10.25 | 0.806                                         | 0.165                            |
| 1548  | 18.00    | 9.00  | 19.50   | 9.75  | 0.924                                         | 0.188                            |
| 平均    |          |       |         |       |                                               | 0.176                            |

【實驗組 20 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶】

| 實驗組   |          |       | 對照組     |       | $V_{20\text{salt}} = (\sin A / \sin B) * V_0$ |                                  |
|-------|----------|-------|---------|-------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 照片編   | 20包全角(度) | 半角(A) | 0包全角(度) | 半角(B) | $\sin A / \sin B$                             | $V_{20\text{salt}} (\text{m/s})$ |
| 1564  | 37.00    | 18.50 | 46.00   | 23.00 | 0.812                                         | 0.166                            |
| 1565  | 43.00    | 21.50 | 52.00   | 26.00 | 0.836                                         | 0.171                            |
| 1566  | 47.00    | 23.50 | 53.00   | 26.50 | 0.894                                         | 0.182                            |
| 1567  | 49.00    | 24.50 | 53.50   | 26.75 | 0.921                                         | 0.188                            |
| 1569  | 46.00    | 23.00 | 55.00   | 27.50 | 0.846                                         | 0.173                            |
| 1572  | 30.00    | 15.00 | 37.00   | 18.50 | 0.816                                         | 0.166                            |
| 1573  | 61.00    | 30.50 | 77.00   | 38.50 | 0.815                                         | 0.166                            |
| 1574  | 46.00    | 23.00 | 53.00   | 26.50 | 0.876                                         | 0.179                            |
| *1575 | 24.50    | 12.25 | 29.00   | 14.50 | 0.847                                         | 0.173                            |
| 1576  | 23.00    | 11.50 | 27.00   | 13.50 | 0.854                                         | 0.174                            |
| 1577  | 30.00    | 15.00 | 34.00   | 17.00 | 0.885                                         | 0.181                            |
| 1582  | 16.00    | 8.00  | 19.00   | 9.50  | 0.843                                         | 0.172                            |
| 1583  | 15.00    | 7.50  | 18.00   | 9.00  | 0.834                                         | 0.170                            |
| 平均    |          |       |         |       |                                               | 0.174                            |

【實驗組 30 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶】

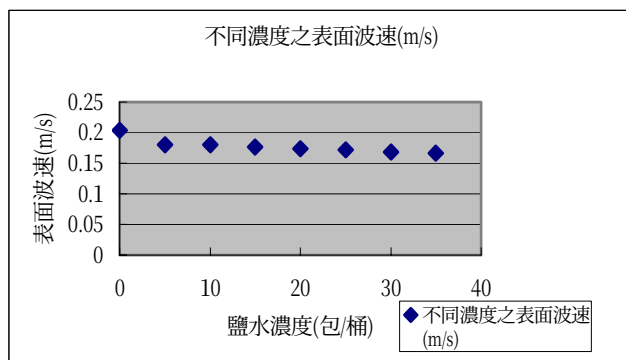
| 實驗組   |          | 對照組   |         | $V_{30\text{salt}} = (\sin A / \sin B) * V_0$ |                   |                                  |
|-------|----------|-------|---------|-----------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| 照片編   | 30包全角(度) | 半角(A) | 0包全角(度) | 半角(B)                                         | $\sin A / \sin B$ | $V_{30\text{salt}} (\text{m/s})$ |
| 1611  | 70.00    | 35.00 | 86.50   | 43.25                                         | 0.837             | 0.171                            |
| 1612  | 65.00    | 32.50 | 87.00   | 43.50                                         | 0.781             | 0.159                            |
| 1613  | 59.00    | 29.50 | 72.00   | 36.00                                         | 0.838             | 0.171                            |
| 1617  | 40.00    | 20.00 | 52.00   | 26.00                                         | 0.780             | 0.159                            |
| 1618  | 52.00    | 26.00 | 61.00   | 30.50                                         | 0.864             | 0.176                            |
| 1621  | 33.00    | 16.50 | 42.00   | 21.00                                         | 0.793             | 0.162                            |
| 1622  | 43.00    | 21.50 | 53.00   | 26.50                                         | 0.821             | 0.168                            |
| 1623  | 34.00    | 17.00 | 38.50   | 19.25                                         | 0.887             | 0.181                            |
| 1624  | 31.00    | 15.50 | 37.50   | 18.75                                         | 0.831             | 0.170                            |
| *1630 | 19.00    | 9.50  | 24.00   | 12.00                                         | 0.794             | 0.162                            |
| 1631  | 21.00    | 10.50 | 24.50   | 12.25                                         | 0.859             | 0.175                            |
| 平均    |          |       |         |                                               |                   | 0.168                            |

【實驗組 35 包鹽/桶 對照組 0 包鹽/桶】

| 實驗組   |          | 對照組   |         | $V_{35\text{salt}} = (\sin A / \sin B) * V_0$ |                   |                                  |
|-------|----------|-------|---------|-----------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| 照片編   | 35包全角(度) | 半角(A) | 0包全角(度) | 半角(B)                                         | $\sin A / \sin B$ | $V_{35\text{salt}} (\text{m/s})$ |
| 1637  | 56.00    | 28.00 | 66.00   | 33.00                                         | 0.862             | 0.176                            |
| 1641  | 35.00    | 17.50 | 45.00   | 22.50                                         | 0.786             | 0.160                            |
| 1645  | 35.00    | 17.50 | 44.50   | 22.25                                         | 0.794             | 0.162                            |
| 1646  | 33.00    | 16.50 | 41.00   | 20.50                                         | 0.811             | 0.165                            |
| 1648  | 31.00    | 15.50 | 37.00   | 18.50                                         | 0.842             | 0.172                            |
| *1650 | 19.00    | 9.50  | 22.00   | 11.00                                         | 0.865             | 0.176                            |
| 1652  | 17.00    | 8.50  | 21.50   | 10.75                                         | 0.792             | 0.162                            |
| 1654  | 16.50    | 8.25  | 20.50   | 10.25                                         | 0.806             | 0.165                            |
| 1656  | 13.50    | 6.75  | 18.00   | 9.00                                          | 0.751             | 0.153                            |
| 平均    |          |       |         |                                               |                   | 0.166                            |

## (二、數據分析)

| 濃度(包/桶) | 不同濃度之表面波速(m/s) |
|---------|----------------|
| 0       | 0.204          |
| 5       | 0.18           |
| 10      | 0.18           |
| 15      | 0.176          |
| 20      | 0.174          |
| 25      | 0.172          |
| 30      | 0.168          |
| 35      | 0.166          |



## (三) 水溫對表面波速的影響

### (一 實驗數據)

【實驗組起波器入水深度 1 cm, 水溫 0~1°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

【實驗組起波器入水深度 1 cm, 水溫 5°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

| 照片編號  | 實驗組   |       | 對照組   |       | $\sin B / \sin A$ | $V_{0^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------------------------|
|       | 全角(度) | 半角(B) | 全角(度) | 半角(A) |                   |                                     |
| 1919  | 51.75 | 25.88 | 51.50 | 25.75 | 1.005             | 0.205                               |
| 1920  | 59.25 | 29.63 | 56.50 | 28.25 | 1.044             | 0.213                               |
| 1922  | 68.75 | 34.38 | 66.50 | 33.25 | 1.030             | 0.210                               |
| 1923  | 66.00 | 33.00 | 63.00 | 31.50 | 1.042             | 0.213                               |
| 1924  | 65.50 | 32.75 | 63.25 | 31.63 | 1.032             | 0.210                               |
| 1925  | 61.75 | 30.88 | 62.00 | 31.00 | 0.996             | 0.203                               |
| 1926  | 65.50 | 32.75 | 65.00 | 32.50 | 1.007             | 0.205                               |
| 1930  | 47.25 | 23.63 | 46.75 | 23.38 | 1.010             | 0.206                               |
| 1931  | 42.00 | 21.00 | 40.50 | 20.25 | 1.035             | 0.211                               |
| 1932  | 42.50 | 21.25 | 41.25 | 20.63 | 1.029             | 0.210                               |
| 1934  | 40.25 | 20.13 | 38.25 | 19.13 | 1.050             | 0.214                               |
| *1935 | 20.50 | 10.25 | 19.00 | 9.50  | 1.078             | 0.220                               |
| 1936  | 41.50 | 20.75 | 38.00 | 19.00 | 1.088             | 0.222                               |
| 1937  | 32.75 | 16.38 | 32.15 | 16.08 | 1.018             | 0.208                               |
| 1939  | 37.00 | 18.50 | 36.50 | 18.25 | 1.013             | 0.207                               |
| 1944  | 27.00 | 13.50 | 26.25 | 13.13 | 1.028             | 0.210                               |
| 1946  | 27.75 | 13.88 | 27.00 | 13.50 | 1.027             | 0.210                               |
| 1947  | 29.00 | 14.50 | 27.75 | 13.88 | 1.044             | 0.213                               |
| 1948  | 25.00 | 12.50 | 24.50 | 12.25 | 1.020             | 0.208                               |
| 1951  | 21.50 | 10.75 | 21.00 | 10.50 | 1.024             | 0.209                               |
| 1952  | 18.75 | 9.38  | 18.25 | 9.13  | 1.027             | 0.210                               |
| 平均    |       |       |       |       |                   | 0.210                               |

| 照片編號  | 實驗組    |       | 對照組    |       | $\sin B / \sin A$ | $V_{5^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
|-------|--------|-------|--------|-------|-------------------|-------------------------------------|
|       | 全角(度)  | 半角(B) | 全角(度)  | 半角(A) |                   |                                     |
| 1696  | 60.00  | 30.00 | 65.50  | 32.75 | 0.924             | 0.189                               |
| 1697  | 58.50  | 29.25 | 60.25  | 30.13 | 0.974             | 0.199                               |
| 1698  | 57.75  | 28.88 | 60.00  | 30.00 | 0.966             | 0.197                               |
| 1699  | 97.50  | 48.75 | 98.00  | 49.00 | 0.996             | 0.203                               |
| 1701  | 115.50 | 57.75 | 117.25 | 58.63 | 0.991             | 0.202                               |
| 1702  | 89.75  | 44.88 | 90.75  | 45.38 | 0.991             | 0.202                               |
| 1703  | 66.25  | 33.13 | 67.25  | 33.63 | 0.987             | 0.201                               |
| 1704  | 123.50 | 61.75 | 126.75 | 63.38 | 0.985             | 0.201                               |
| 1705  | 77.50  | 38.75 | 77.75  | 38.88 | 0.997             | 0.203                               |
| 1706  | 69.25  | 34.63 | 71.00  | 35.50 | 0.978             | 0.200                               |
| 1707  | 52.75  | 26.38 | 53.25  | 26.63 | 0.991             | 0.202                               |
| 1709  | 47.00  | 23.50 | 50.75  | 25.38 | 0.930             | 0.190                               |
| 1710  | 42.50  | 21.25 | 46.25  | 23.13 | 0.923             | 0.188                               |
| 1711  | 41.25  | 20.63 | 43.00  | 21.50 | 0.961             | 0.196                               |
| 1714  | 41.75  | 20.88 | 43.25  | 21.63 | 0.967             | 0.197                               |
| 1715  | 117.75 | 58.88 | 119.25 | 59.63 | 0.992             | 0.202                               |
| 1717  | 65.00  | 32.50 | 67.00  | 33.50 | 0.973             | 0.199                               |
| 1728  | 97.50  | 48.75 | 99.50  | 49.75 | 0.985             | 0.201                               |
| 1729  | 96.75  | 48.38 | 98.00  | 49.00 | 0.990             | 0.202                               |
| 1731  | 90.75  | 45.38 | 95.75  | 47.88 | 0.960             | 0.196                               |
| 1732  | 56.25  | 28.13 | 58.75  | 29.38 | 0.961             | 0.196                               |
| 1733  | 57.75  | 28.88 | 60.00  | 30.00 | 0.966             | 0.197                               |
| 1734  | 67.25  | 33.63 | 68.00  | 34.00 | 0.990             | 0.202                               |
| *1718 | 38.75  | 19.38 | 41.25  | 20.63 | 0.942             | 0.192                               |
| 1719  | 24.50  | 12.25 | 25.00  | 12.50 | 0.980             | 0.200                               |
| 1722  | 38.00  | 19.00 | 41.25  | 20.63 | 0.924             | 0.189                               |
| 1724  | 22.00  | 11.00 | 24.00  | 12.00 | 0.918             | 0.187                               |
| 1725  | 23.50  | 11.75 | 25.50  | 12.75 | 0.923             | 0.188                               |
| 1738  | 18.00  | 9.00  | 18.50  | 9.25  | 0.973             | 0.199                               |
| 平均    |        |       |        |       |                   | 0.197                               |



【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 10°C    【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 15°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】      對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

| 實驗組   |       |       |       |       |                   |                                      | 對照組   |       |       |       |       |                   |                                      |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|--------------------------------------|
| 照片    | 全角(度) | 半角(B) | 全角(度) | 半角(A) | $\sin B / \sin A$ | $V_{10^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ | 照片    | 全角(度) | 半角(B) | 全角(度) | 半角(A) | $\sin B / \sin A$ | $V_{15^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
| 1957  | 55.25 | 27.63 | 53.75 | 26.88 | 1.026             | 0.209                                | 1985  | 60.50 | 30.25 | 62.00 | 31.00 | 0.978             | 0.200                                |
| 1958  | 55.50 | 27.75 | 57.25 | 28.63 | 0.972             | 0.198                                | 1986  | 91.00 | 45.50 | 87.25 | 43.63 | 1.034             | 0.211                                |
| 1959  | 75.75 | 37.88 | 74.00 | 37.00 | 1.020             | 0.208                                | 1987  | 57.50 | 28.75 | 57.50 | 28.75 | 1.000             | 0.204                                |
| 1961  | 79.25 | 39.63 | 82.00 | 41.00 | 0.972             | 0.198                                | 1989  | 56.25 | 28.13 | 56.25 | 28.13 | 1.000             | 0.204                                |
| 1962  | 44.25 | 22.13 | 44.00 | 22.00 | 1.005             | 0.205                                | 1990  | 59.50 | 29.75 | 59.50 | 29.75 | 1.000             | 0.204                                |
| 1963  | 51.25 | 25.63 | 51.00 | 25.50 | 1.005             | 0.205                                | 1991  | 49.50 | 24.75 | 48.25 | 24.13 | 1.024             | 0.209                                |
| 1964  | 56.75 | 28.38 | 57.25 | 28.63 | 0.992             | 0.202                                | 1994  | 44.25 | 22.13 | 44.75 | 22.38 | 0.989             | 0.202                                |
| 1966  | 65.25 | 32.63 | 62.00 | 31.00 | 1.047             | 0.214                                | 1995  | 55.00 | 27.50 | 55.00 | 27.50 | 1.000             | 0.204                                |
| 1967  | 47.25 | 23.63 | 46.25 | 23.13 | 1.020             | 0.208                                | 1997  | 39.75 | 19.88 | 39.25 | 19.63 | 1.012             | 0.206                                |
| 1968  | 48.65 | 24.33 | 48.50 | 24.25 | 1.003             | 0.205                                | 1998  | 39.75 | 19.88 | 39.50 | 19.75 | 1.006             | 0.205                                |
| 1969  | 37.50 | 18.75 | 37.75 | 18.88 | 0.994             | 0.203                                | 1999  | 68.00 | 34.00 | 67.50 | 33.75 | 1.007             | 0.205                                |
| 1970  | 36.25 | 18.13 | 38.00 | 19.00 | 0.956             | 0.195                                | 2000  | 85.00 | 42.50 | 84.25 | 42.13 | 1.007             | 0.205                                |
| 1971  | 35.00 | 17.50 | 35.75 | 17.88 | 0.980             | 0.200                                | *2001 | 32.25 | 16.13 | 32.00 | 16.00 | 1.008             | 0.206                                |
| *1972 | 35.00 | 17.50 | 32.25 | 16.13 | 1.083             | 0.221                                | 2004  | 32.50 | 16.25 | 32.00 | 16.00 | 1.015             | 0.207                                |
| 1973  | 23.75 | 11.88 | 24.50 | 12.25 | 0.970             | 0.198                                | 2005  | 31.25 | 15.63 | 31.50 | 15.75 | 0.992             | 0.000                                |
| 1975  | 18.75 | 9.38  | 18.00 | 9.00  | 1.041             | 0.212                                | 2006  | 22.50 | 11.25 | 22.75 | 11.38 | 0.989             | 0.202                                |
| 1976  | 32.50 | 16.25 | 33.75 | 16.88 | 0.964             | 0.197                                | 2007  | 38.75 | 19.38 | 37.50 | 18.75 | 1.032             | 0.211                                |
| 1977  | 22.75 | 11.38 | 23.00 | 11.50 | 0.989             | 0.202                                | 2011  | 19.00 | 9.50  | 19.75 | 9.88  | 0.962             | 0.196                                |
| 1979  | 32.00 | 16.00 | 32.25 | 16.13 | 0.992             | 0.202                                | 2014  | 27.75 | 13.88 | 29.25 | 14.63 | 0.950             | 0.194                                |
| 1981  | 25.75 | 12.88 | 24.75 | 12.38 | 1.040             | 0.212                                | 平均    |       |       |       |       |                   | 0.193                                |
| 平均    |       |       |       |       |                   | 0.205                                |       |       |       |       |       |                   |                                      |

【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 20°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

| 實驗組  |        |       |        |       |                   |                                      | 對照組 |       |       |       |       |                   |                                      |
|------|--------|-------|--------|-------|-------------------|--------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------------------|--------------------------------------|
| 照片編  | 全角(度)  | 半角(B) | 全角(度)  | 半角(A) | $\sin B / \sin A$ | $V_{20^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ | 照片編 | 全角(度) | 半角(B) | 全角(度) | 半角(A) | $\sin B / \sin A$ | $V_{20^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
| 1304 | 78.50  | 39.25 | 77.00  | 38.50 | 1.016             | 0.207                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1305 | 102.00 | 51.00 | 102.00 | 51.00 | 1.000             | 0.204                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1310 | 79.50  | 39.75 | 78.50  | 39.25 | 1.011             | 0.206                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1314 | 56.50  | 28.25 | 56.00  | 28.00 | 1.008             | 0.206                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1315 | 52.00  | 26.00 | 52.00  | 26.00 | 1.000             | 0.204                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1318 | 46.50  | 23.25 | 47.50  | 23.75 | 0.980             | 0.200                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1319 | 44.50  | 22.25 | 44.00  | 22.00 | 1.011             | 0.206                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1322 | 44.00  | 22.00 | 45.00  | 22.50 | 0.979             | 0.200                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1324 | 44.00  | 22.00 | 45.00  | 22.50 | 0.979             | 0.200                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1325 | 41.00  | 20.50 | 41.00  | 20.50 | 1.000             | 0.204                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1326 | 47.50  | 23.75 | 47.00  | 23.50 | 1.010             | 0.206                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1329 | 35.00  | 17.50 | 36.00  | 18.00 | 0.973             | 0.199                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1332 | 40.00  | 20.00 | 39.50  | 19.75 | 1.012             | 0.206                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 1333 | 37.00  | 18.50 | 37.00  | 18.50 | 1.000             | 0.204                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |
| 平均   |        |       |        |       |                   | 0.204                                |     |       |       |       |       |                   |                                      |

【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 25°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

| 實驗組  |       | 對照組   |       |       |                 |                                      |
|------|-------|-------|-------|-------|-----------------|--------------------------------------|
| 照片編  | 全角    | 半角(B  | 全角    | 半角(A  | $\sin B/\sin A$ | $V_{25^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
| 2017 | 83.00 | 41.50 | 86.75 | 43.38 | 0.965           | 0.197                                |
| 2018 | 54.35 | 27.18 | 53.25 | 26.63 | 1.019           | 0.208                                |
| 2019 | 60.00 | 30.00 | 60.00 | 30.00 | 1.000           | 0.204                                |
| 2020 | 67.50 | 33.75 | 68.75 | 34.38 | 0.984           | 0.201                                |
| 2021 | 47.25 | 23.63 | 47.00 | 23.50 | 1.005           | 0.205                                |
| 2022 | 64.25 | 32.13 | 64.25 | 32.13 | 1.000           | 0.204                                |
| 2023 | 54.75 | 27.38 | 56.00 | 28.00 | 0.979           | 0.200                                |
| 2024 | 49.00 | 24.50 | 48.25 | 24.13 | 1.015           | 0.207                                |
| 2025 | 38.00 | 19.00 | 39.25 | 19.63 | 0.969           | 0.198                                |
| 2026 | 44.50 | 22.25 | 44.50 | 22.25 | 1.000           | 0.204                                |
| 2027 | 39.25 | 19.63 | 41.25 | 20.63 | 0.953           | 0.195                                |
| 2029 | 44.25 | 22.13 | 45.00 | 22.50 | 0.984           | 0.201                                |
| 2030 | 49.00 | 24.50 | 50.50 | 25.25 | 0.972           | 0.198                                |
| 2034 | 22.25 | 11.13 | 24.50 | 12.25 | 0.909           | 0.186                                |
| 2035 | 24.00 | 12.00 | 24.75 | 12.38 | 0.970           | 0.198                                |
| 2038 | 34.25 | 17.13 | 35.50 | 17.75 | 0.966           | 0.197                                |
| 2039 | 30.00 | 15.00 | 30.25 | 15.13 | 0.992           | 0.202                                |
| 2041 | 35.75 | 17.88 | 36.25 | 18.13 | 0.987           | 0.201                                |
| 2042 | 36.75 | 18.38 | 36.50 | 18.25 | 1.007           | 0.205                                |
| 平均   |       |       |       |       |                 | 0.201                                |

【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 35°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

| 實驗組   |       | 對照組   |       |       |                 |                                      |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|--------------------------------------|
| 照片編   | 全角    | 半角(B  | 全角    | 半角(A  | $\sin B/\sin A$ | $V_{35^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
| 2067  | 60.50 | 30.25 | 62.25 | 31.13 | 0.975           | 0.199                                |
| 2071  | 62.50 | 31.25 | 74.75 | 37.38 | 0.855           | 0.174                                |
| 2072  | 49.00 | 24.50 | 63.75 | 31.88 | 0.785           | 0.160                                |
| 2073  | 54.00 | 27.00 | 61.25 | 30.63 | 0.891           | 0.182                                |
| 2074  | 54.00 | 27.00 | 62.25 | 31.13 | 0.878           | 0.179                                |
| 2075  | 45.75 | 22.88 | 52.50 | 26.25 | 0.879           | 0.179                                |
| 2078  | 49.50 | 24.75 | 53.00 | 26.50 | 0.938           | 0.191                                |
| 2079  | 49.25 | 24.63 | 54.50 | 27.25 | 0.910           | 0.186                                |
| 2080  | 80.50 | 40.25 | 88.75 | 44.38 | 0.924           | 0.188                                |
| 2081  | 67.50 | 33.75 | 70.25 | 35.13 | 0.966           | 0.197                                |
| 2082  | 46.50 | 23.25 | 50.00 | 25.00 | 0.934           | 0.191                                |
| 2083  | 59.50 | 29.75 | 72.75 | 36.38 | 0.837           | 0.171                                |
| 2084  | 41.25 | 20.63 | 49.00 | 24.50 | 0.849           | 0.173                                |
| 2085  | 55.25 | 27.63 | 62.50 | 31.25 | 0.894           | 0.182                                |
| 2086  | 41.00 | 20.50 | 41.50 | 20.75 | 0.988           | 0.202                                |
| 2087  | 43.00 | 21.50 | 46.50 | 23.25 | 0.928           | 0.189                                |
| 2088  | 39.75 | 19.88 | 44.75 | 22.38 | 0.893           | 0.182                                |
| *2089 | 37.75 | 18.88 | 39.50 | 19.75 | 0.957           | 0.195                                |
| 2090  | 33.00 | 16.50 | 33.00 | 16.50 | 1.000           | 0.204                                |
| 2093  | 47.00 | 23.50 | 48.75 | 24.38 | 0.966           | 0.197                                |
| 2094  | 28.25 | 14.13 | 29.25 | 14.63 | 0.967           | 0.197                                |
| 2096  | 26.00 | 13.00 | 28.25 | 14.13 | 0.922           | 0.188                                |
| 2097  | 24.00 | 12.00 | 26.50 | 13.25 | 0.907           | 0.185                                |
| 2100  | 19.00 | 9.50  | 19.00 | 9.50  | 1.000           | 0.204                                |
| 平均    |       |       |       |       |                 | 0.187                                |

【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 30°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

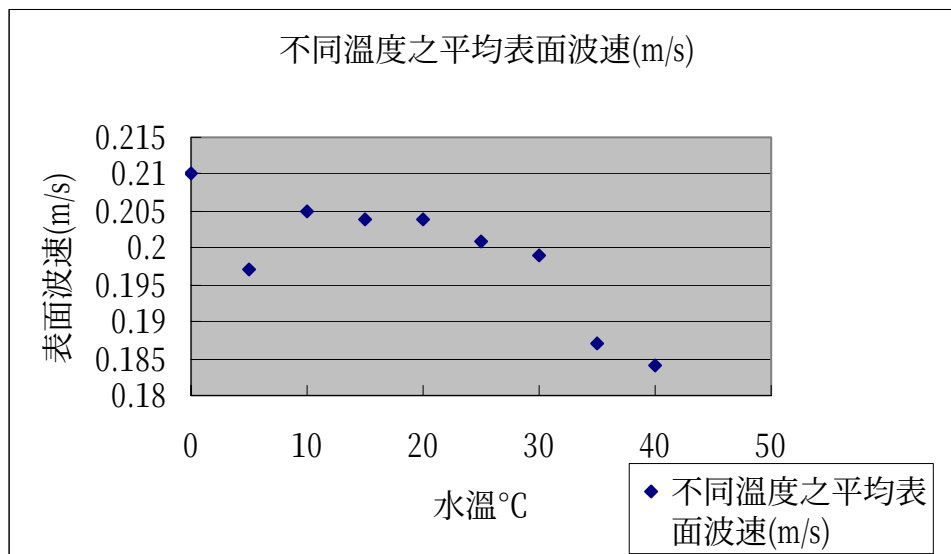
| 實驗組   |       | 對照組   |       |       |                 |                                      |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|--------------------------------------|
| 照片編   | 全角    | 半角(B  | 全角    | 半角(A  | $\sin B/\sin A$ | $V_{30^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
| 2043  | 82.25 | 41.13 | 85.75 | 42.88 | 0.967           | 0.197                                |
| 2045  | 74.75 | 37.38 | 73.75 | 36.88 | 1.012           | 0.206                                |
| 2046  | 76.75 | 38.38 | 76.75 | 38.38 | 1.000           | 0.204                                |
| 2047  | 63.50 | 31.75 | 65.25 | 32.63 | 0.976           | 0.199                                |
| 2048  | 51.25 | 25.63 | 52.25 | 26.13 | 0.982           | 0.200                                |
| 2049  | 44.25 | 22.13 | 44.75 | 22.38 | 0.989           | 0.202                                |
| 2050  | 44.00 | 22.00 | 47.25 | 23.63 | 0.935           | 0.191                                |
| 2052  | 44.75 | 22.38 | 46.50 | 23.25 | 0.964           | 0.197                                |
| 2054  | 44.75 | 22.38 | 44.00 | 22.00 | 1.016           | 0.207                                |
| 2055  | 44.50 | 22.25 | 46.50 | 23.25 | 0.959           | 0.196                                |
| 2056  | 44.75 | 22.38 | 45.25 | 22.63 | 0.990           | 0.202                                |
| *2057 | 21.00 | 10.50 | 24.00 | 12.00 | 0.877           | 0.179                                |
| 2058  | 29.00 | 14.50 | 28.75 | 14.38 | 1.009           | 0.206                                |
| 2059  | 37.00 | 18.50 | 40.00 | 20.00 | 0.928           | 0.189                                |
| 2060  | 35.50 | 17.75 | 34.75 | 17.38 | 1.021           | 0.208                                |
| 2062  | 26.00 | 13.00 | 27.25 | 13.63 | 0.955           | 0.195                                |
| 2064  | 43.75 | 21.88 | 44.00 | 22.00 | 0.995           | 0.203                                |
| 2066  | 30.25 | 15.13 | 31.50 | 15.75 | 0.961           | 0.196                                |
| 2041  | 35.75 | 17.88 | 36.25 | 18.13 | 0.987           | 0.201                                |
| 2042  | 36.75 | 18.38 | 36.50 | 18.25 | 1.007           | 0.205                                |
| 平均    |       |       |       |       |                 | 0.199                                |

【實驗組起波器入水深度 1 cm,水溫 40°C  
對照組起波器入水深度 1 cm, 水溫 20°C】

| 實驗組   |        | 對照組   |        |       |                 |                                      |
|-------|--------|-------|--------|-------|-----------------|--------------------------------------|
| 照片編號  | 全角     | 半角(B  | 全角     | 半角(A  | $\sin B/\sin A$ | $V_{40^{\circ}\text{C}}(\text{m/s})$ |
| 1747  | 65.00  | 32.50 | 74.00  | 37.00 | 0.89            | 0.182                                |
| 1749  | 107.00 | 53.50 | 127.00 | 63.50 | 0.90            | 0.183                                |
| 1750  | 86.00  | 43.00 | 99.00  | 49.50 | 0.90            | 0.183                                |
| 1751  | 84.00  | 42.00 | 104.00 | 52.00 | 0.85            | 0.173                                |
| 1752  | 66.00  | 33.00 | 76.00  | 38.00 | 0.88            | 0.180                                |
| 1753  | 44.00  | 22.00 | 48.00  | 24.00 | 0.92            | 0.188                                |
| 1754  | 46.00  | 23.00 | 53.00  | 26.50 | 0.88            | 0.179                                |
| 1755  | 43.00  | 21.50 | 48.00  | 24.00 | 0.90            | 0.184                                |
| 1756  | 41.50  | 20.75 | 46.50  | 23.25 | 0.90            | 0.183                                |
| 1757  | 35.50  | 17.75 | 39.00  | 19.50 | 0.91            | 0.186                                |
| 1758  | 44.00  | 22.00 | 52.00  | 26.00 | 0.85            | 0.174                                |
| 1759  | 37.00  | 18.50 | 42.00  | 21.00 | 0.89            | 0.181                                |
| 1767  | 56.00  | 28.00 | 63.00  | 31.50 | 0.90            | 0.183                                |
| *1762 | 21.00  | 10.50 | 22.50  | 11.25 | 0.93            | 0.191                                |
| 1768  | 24.00  | 12.00 | 25.00  | 12.50 | 0.96            | 0.196                                |
| 1770  | 22.00  | 11.00 | 24.00  | 12.00 | 0.92            | 0.187                                |
| 1771  | 16.00  | 8.00  | 18.00  | 9.00  | 0.89            | 0.181                                |
| 1772  | 23.00  | 11.50 | 24.00  | 12.00 | 0.96            | 0.196                                |
| 平均    |        |       |        |       |                 | 0.184                                |

## (二 數據分析)

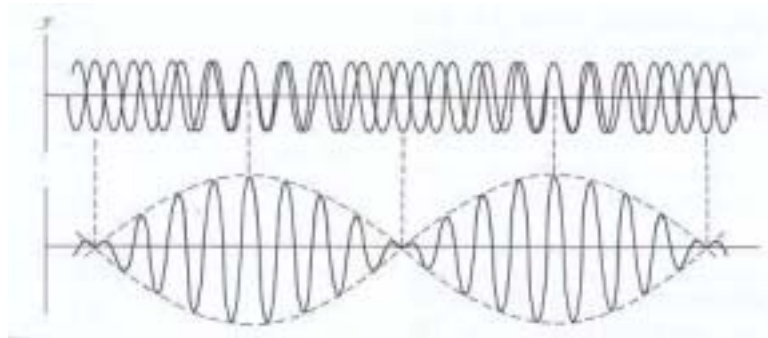
| 溫度°C | 不同溫度之平均表面波速(m/s) |
|------|------------------|
| 0    | 0.21             |
| 5    | 0.197            |
| 10   | 0.205            |
| 15   | 0.204            |
| 20   | 0.204            |
| 25   | 0.201            |
| 30   | 0.199            |
| 35   | 0.187            |
| 40   | 0.184            |



由上圖可知，溫度越高表面波速越慢，但在 5°C（密度較大）的時候突然變慢很多。

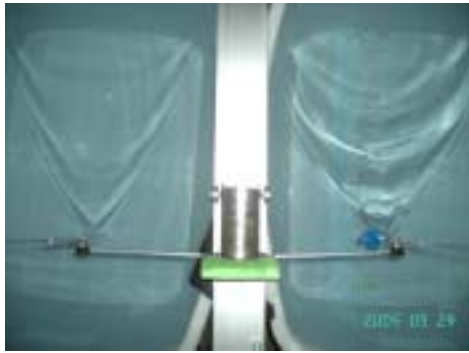
## 柒、討論

- 一、水深比波長的一半還長時為深水波，深水波的波速受重力與表面張力影響。當波長越短時，表面張力的作用越大，而當波長較長時，重力影響波速的效應較大。本實驗中水深為 40 公分，而波長遠小於 40 公分，所以所討論的波是屬於深水波，波速受重力與表面張力影響。
- 二、水波的傳遞有相速和群速的差別，船尾形成的波列通常成群向外傳播。每一波群內可能含括了很多個單一波形，這一群波有時又統稱為一個波包(Wave packet) (如下圖所示)，波包移動的速度即為群速度，也就是波浪能量傳播的速度。深水重力波的群速會比相速慢，所以隨著波包移動時會看到波包內的外觀波不斷由波包後方冒出來，然後向前移動，抵達波包前緣時又自行消失。

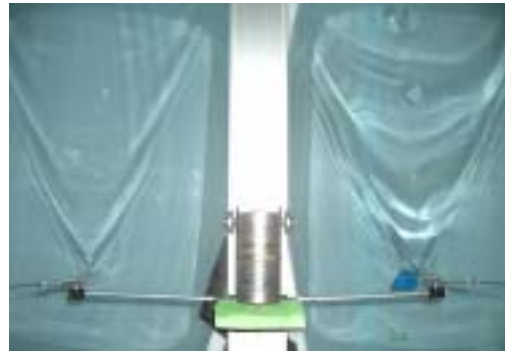


我們想驗證實驗中起波器畫過水面所形成拖曳尾的軌跡，是屬於單一波還是整個波包的傳遞，因此利用雙槽可以同時觀測兩種情況的優點設計了一個實驗來試著探討：

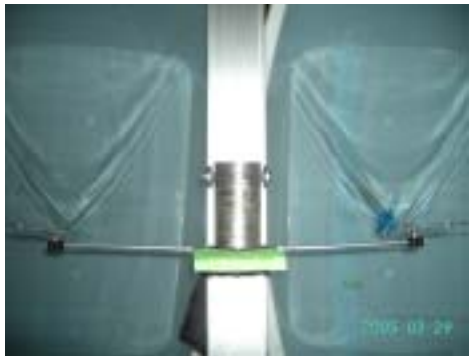
讓雙槽兩邊的起波器有同樣的入水深度，但其中一個綁上了藍色的大塊不規則形狀黏土，並且在實驗中逐次改變其距水面的距離，來探討整個的實驗過程中較深的單一波形是否來的及傳遞上來，並且呈現在相片中。



(圖一)



(圖二)



(圖三)

(圖一) 黏土在水面下一公分處  
(圖二) 黏土在水面下兩公分處  
(圖三) 黏土在水面下六公分處

從照片中的觀察發現，藍色的黏土距水面下約一公分時，跟另一邊沒有綁黏土的起波器造成的波形相比，明顯不同。而逐次降低藍色大塊不規則形狀黏土到大約在水面下六公分處左右，拍到的相片跟另一邊相比，就沒有因黏土所造成的不規則波形。是因為實驗過程中黏土的不規則波形由深水傳到水面上的時間大於滑車運動的時間，所以在相片中不會顯現出來。

實驗中觀測到衝擊波造成的馬赫角並非波源速度與單一波行進的相速所造成。觀測到的衝擊波波列是由內含很多單一波一起運動的波包形成。實驗中探討的馬赫角是由波源速度與代表能量傳遞的波包的群速所構成，因此，可以由實驗中的馬赫角關係探討水面波的能量傳遞情形。

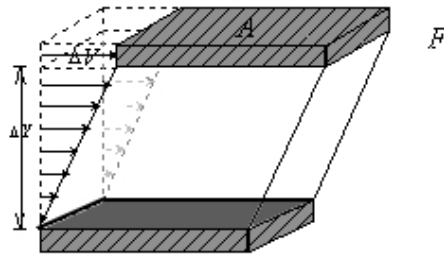
三、水面波的能量傳遞情形由波包展現出來，而入水深度不同，能量傳遞時會影響的水質量也就不同，水的質量越大，慣性也就越大，也就越難改變其速度。

實驗中探討入水深度與波速的關係時發現，入水深度越深波速越慢。討論之後覺得入水一公分與入水二十四公分相比，能量傳遞過程中，入水一公分的起波器所要推動的水質量遠比入水二十四公分的起波器所要推動的水分子質量少，慣性也就比較小，速度較容易改變。因此，入水一公分波速比入水二十四公分的波速快。

四、液體的黏滯性是由液體之間的摩擦力造成的。如圖，兩片平板，中間夾著一層液體，下面那片平板保持固定，而上面的則以  $\Delta V$  的速度移動，把中間的液體分成許多層，每一層之間都有摩擦力，摩擦力會阻止各層液體間的相對運動，使得我們必須要用一個力  $F$  去拉上面的平板才能使它保持一定的速度。施力  $F$  的大小和平板的面積  $A$  及平板間的相對速度  $\Delta V$  成正比，和平板間的距離  $\Delta Y$  成反比，即

$$F = \eta \cdot A \frac{\Delta V}{\Delta Y} \quad \text{比例常數 } \eta \text{ 為液體的黏滯係數 (viscosity) 。 } \eta = \frac{F/A}{\Delta V/\Delta Y}$$

液體的黏滯係數愈大，拖動上面平板所需的力也就愈大。



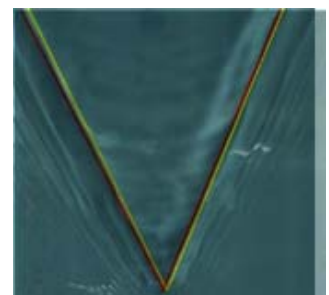
在做濃度實驗時，發現食鹽水的濃度越高，波速會越慢。因為食鹽水濃度越高，黏滯性就越大。推測在黏滯性增加的情況下，需要花更多的水平切應力去推動水，讓不同層的水產生相對運動。因此，在起波器入水深度相同的情況下，食鹽水與清水相比，同樣的擾動，食鹽水需克服較大的摩擦阻力，所以，食鹽水中的波速會比清水的波速還要慢。

五、在探討溫度對水波速度的影響時，發現整體來看水波的速度大致隨著溫度的增加而變慢；但是在溫度在 5°C 附近時，水波波速有下降的現象，推測，可能是水在 5°C 時密度較大因此慣性也較大，所以波速降低。

水的黏滯係數與溫度關係圖

| $t/^{\circ}C$               | 0    | 2    | 50   | 100  |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| $\eta/(10^{-3} Pa \cdot s)$ | 1.79 | 1.01 | 0.55 | 0.28 |

六、在探討表面波波速與水量的關係時，我們將拍得的照片疊合發現兩者的角度幾乎沒有差(如右圖)，故水量並不會影響到波速。

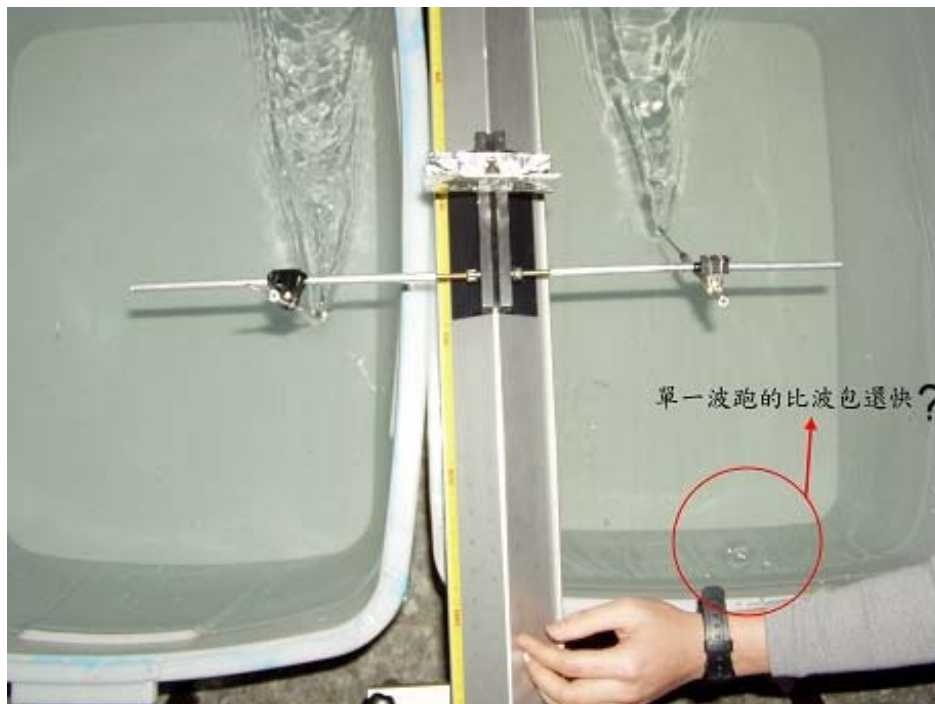




- 七、一開始為了減低摩擦力以達到等速移動的目的，我們曾經在滑車軌道之前使用過空氣軌，但經過三個月的努力，最後仍決定放棄空氣軌選擇重車軌道系統，其優點如下：
- (一)由於波源的運動過程需要很穩定，而在滑車上安裝約 1.5 kg 的槽碼，使其慣性變大，而較不易受水的干擾，達到起波器的入水角保持穩定不易改變的控制性。
  - (二)慣性很大，以固定的初速出發之後，在運動過程中水的阻力造成的速度變化相對之下較小，波源較容易穩定運動，達到等速的效果。

#### 八、後續研究及展望

- (一)由於時間和水箱耐熱度的關係，溫度還有許多研究空間，不過看到圖表 20°C 和 40°C 的落差那麼大，更讓我們想找出其間溫度與水波波速的關係，後續實驗持續進行，期待可以在七月以前了解溫度和波速的關係。
- (二)起波器入水深度的改變會讓水波波速改變。且發現入水深度越深，波速越慢。
- (三)本實驗利用馬赫角來測量波速中群速的大小，並利用討論中式子算出相速，而反推回去也符合實驗中測得的群速。
- (四)在實驗中，發現有時起波器前端衝擊，波列尚未到達的平靜地方會出現由水下升起的擾動，推測這就是所謂的孤立波。



## 八、結論

- 一、本實驗藉由對照組-實驗組的裝置，藉由數位相機搭配電腦軟體，準確的測出液體表面波速，不失為一簡便的好方法。
- 二、經由實驗證明，實驗裝置在入水深度皆為一公分的時候，將所有的實驗變因控制都相同，而實驗的誤差是 1.87%，所以證明本裝置在實驗上的可靠性與穩定性。
- 三、經由實驗照片顯示藉由馬赫角所求得的水波波速為群速而非相速。
- 四、起波器入水深度越深，表面波速傳速越小，表示傳遞波的慣性越大，能量傳遞越小。
- 五、純水中有其他物質時波速會改變。  
在清水中加入食鹽進行實驗，發現溶液濃度的變化會造成液體波速的改變。發現食鹽水的濃度越高，波速越慢，推測是黏滯係數增大所致。
- 六、水溫的改變會讓波速改變。而 5°C 比 20°C 還慢，但是 40°C 卻比 5°C 更慢，後續實驗將持續進行，以期能找出水波波速與溫度的關係。

## 九、參考資料及其他

- 一、林明瑞編 物質科學物理篇（下冊）南一書局
- 二、林明瑞編 高級中學物理（上冊）南一書局
- 三、趙凱華 羅蔚茵編 新概念物理教程力學 建宏出版社
- 四、White 著 范德仙編譯 大專用書流體力學 全華科技圖書股份有限公司
- 五、Fox/McDonald 著 鄭智中編譯 大專用書流體力學導論 全華科技圖書股份有限公司
- 六、盛博納 水波物語 科學發展雙月刊
- 七、國立台灣大學海洋所教材 <http://140.112.68.243>



中華民國第四十五屆中小學科學展覽會  
評 語

---

高中組 物理科

第一名

040114

“稜”波微步

國立新竹女子高級中學

評語：

1. 實驗設計頗具創意
2. 波速與水溫關係極為明顯，顯見實驗頗具精確性。唯在  $4^{\circ}\text{C}$  左右數據過少，數據又未給離散度(標準差)使人不易判斷係因密度變化之關係或誤差所致之波速劇降。