

2011 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號：140018

作品名稱

自製電磁力振盪器探討斑馬魚卵軟結構生物力學特性

得獎獎項

二等獎

美國團隊正選代表:美國第 62 屆國際科技展覽會

作者姓名：宋昀蓁、胡乃文

就讀學校：臺北市立第一女子高級中學

指導教師：傅昭銘、陳文盛

關鍵字：生物力學、生物軟物質結構、黏彈性反應

作者簡介



胡乃文（左）和宋昀蓁（右），就讀北一女中數理資優班，廣泛閱讀各類型科普文章與研究，對生物力學產生極大興趣。經過反覆實驗及與教授的討論，進一步決定本研究題目。近一年多來每星期的專研時間與假日時光都在台大的實驗室度過。喜歡討論各式各樣新奇的想法，並且嘗試許多嶄新的作法。

摘要

生物系統的力學表徵會因為其系統內部物理結構和化學組成的改變而變化。本研究希望能找出斑馬魚魚卵的彈性力學特性與其成長發育的關聯。本實驗利用自行設計製作的電磁力振盪儀器分析斑馬魚魚卵的彈性力學特性。實驗上使用自製電磁線圈對槓桿端所繫磁鐵作用，使桿間連棒對魚卵施加作用力。由於斑馬魚魚卵形變量很小，本實驗加入光槓桿的設計來放大微小的形變。實驗時以錄影記錄施力對魚卵產生周期振盪彈性形變關係。

本研究實驗得到，魚卵的彈性力學特性是隨發育時期改變而不同，但不是隨時間而單純線性演化改變。本研究關注於魚卵囊胚期彈性力學特性。發現囊胚期不同發育階段，魚卵的彈性振盪特性會有所不同。本實驗進一步以阻尼振盪模式分析振盪振幅的改變，可以得到魚卵生物阻尼係數。發現阻尼係數在囊胚期最初的前一個半小時的改變最為顯著，也就是會與該期細胞移動有關。本研究可以作為判定魚卵在不同發育時間的生化微觀機制，也可進一步作為分析環境變遷對生物族群影響的探討參考。

Abstract

The mechanics in the biological systems may vary according to their internal physical structure and their chemical composition. The present study aims to investigate the relationship between the elasticity of the zebrafish eggs and the embryonic development. With our uniquely-designed magnetic oscillator, we generate damping oscillation on the eggs to see their elasticity in different embryonic stages. In our experiment, we generate forces with the specially-designed magnetic wires on the magnets fixed at the end of the lever and apply the force to the eggs by the stick. Due to the minute formal change of the eggs, we incorporate the design of the optical lever into our experiment in order to amplify their formal changes. We videotape the formal changes of the eggs in hope for a better understanding of the relationship between the forces of the oscillation and the elasticity of the fish eggs.

The result shows that the elasticity of the fish eggs varies according to different embryonic stages. However, the embryonic development does not hold a simple linear relationship with the elasticity index. The present study focuses on the fish eggs in the blastula period, and we observe that the reaction to the oscillation may also differ in different stages of the blastula period. We further analyze the changes of the amplitude to obtain the damping coefficient in organism. It is found that these alterations appear most significant in the first and half hour of the blastula period, thus highly correlated with the movement of the cells in that period. Therefore, our study may serve as a window for the biological micro mechanisms of the eggs and a reference for the influence of the environmental change on the biological population.

壹、前言

一、研究動機

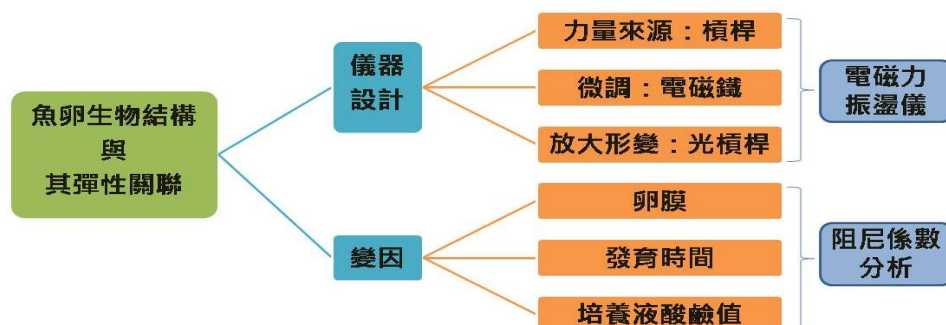
生物系統的力學特性與其微觀生理結構息息相關，而近來運用各種物理原理發展微力學分析工具，如微流道結構、微吸住器、光鉗等方法為熱門發展的研究。我們對生物系統的發生學與其微觀力學特性感到興趣，查閱文獻剛好閱讀到一篇利用磁鉗測量癌細胞的彈性表現，並分析其與癌細胞演化關係的論文，引起我們對磁鉗工具的興趣，並決定自己設計組裝簡易的電磁控制生物力學分析儀器，來探討生物發生學與生物力學表徵的關係。於是我們利用自製電磁控制的生物力學分析儀器測量斑馬魚魚卵的生物力學表徵，進一步以阻尼運動方程作分析，再配合外在觀察魚卵發育變化，探討斑馬魚魚卵力學的特性與發生學關係。

二、研究目的

由於上述動機，我們於是進行實驗設計以達到下列研究目的：

1. 設計與製作電磁控制的生物力學分析儀器從事斑馬魚魚卵生物力學測量。
2. 測量斑馬魚魚卵生物力學行為，並以阻尼運動方程作分析。
3. 系統化測量斑馬魚魚卵各發育期的生物力學特性並作分析。

本自製實驗儀器與實驗分析結果，希望能進一步提供對其他生物胚胎發育過程機制探討的實驗參考。



貳、研究方法或過程

一、文獻探討

1.細胞生物力學

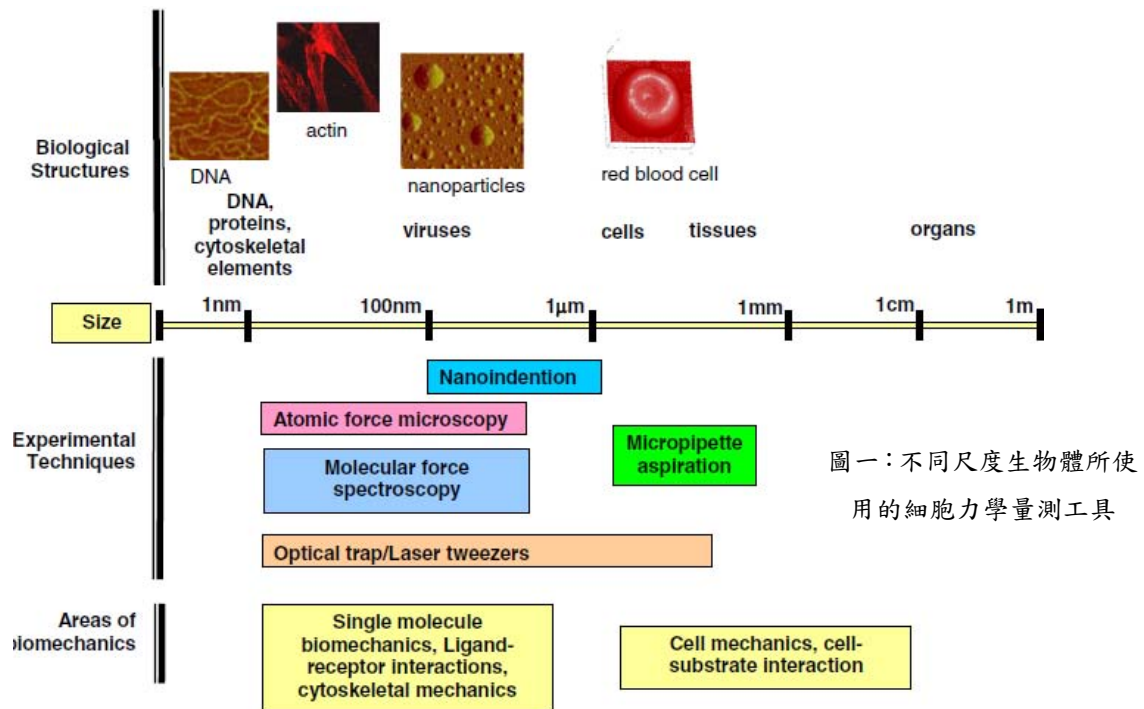
生物體的細胞力學，泛指研究：生物結構與功能的關係、生物體的調節與控制機制、生物的應力與生長關係，例如生物的肢體運動、神經肌肉控制、生物體內的血液循環、骨骼力學、肌肉力學、器官力學等。細胞是生命功能的基本單位，過去研究對細胞力學了解不多。近年來，由於生物力學實驗技術的進步，使得研究漸漸往生物體內發展。生物力學的範圍包括從宏觀到微觀的整個細胞過程。而細胞力學研究強調細胞的黏彈性物理、細胞結構的微觀力學性能與細胞間的相互作用關係等研究。

2.細胞力學量測工具

藉由生物力學而測量工具研究細胞生物力學是一個重要領域，許多實驗說明了活細胞的力學性能探討是更加了解生物化學與細胞功能關係的重要方法。

現今有很多工具可測量細胞的特性。依照各類細胞在不同尺度和時間中的細胞力學特性，選擇適合的工具，如圖一所示，為細胞力學量測技術與適合的測試對象。

下列總結出一些先進的細胞力學量測工具。



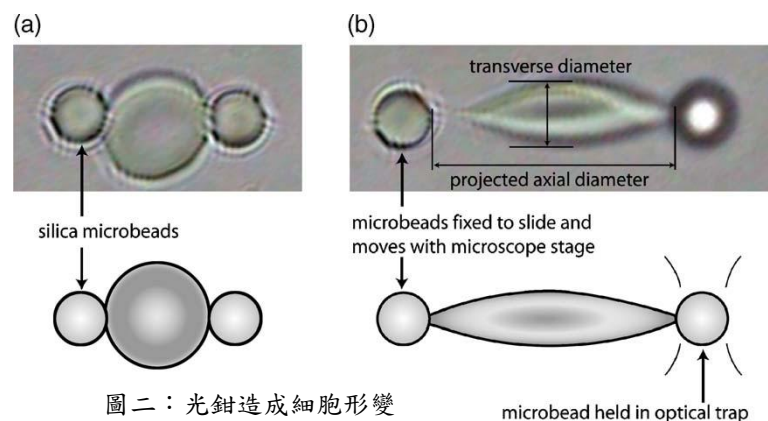
圖一：不同尺度生物體所使用的細胞力學量測工具

(a) 原子力顯微鏡

原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM)是一個具有強大功能的工具，可用來測量力與細胞尺度的位移。錐形探針是原子力顯微鏡的關鍵，當探針與樣品相互作用下懸臂會產生偏轉，透過偏轉可測量出激光束在懸臂上通過的位置。在生物應用中，有關原子力顯微鏡的光學範圍，是包括可用來實際觀測的。

(b) 光鉗

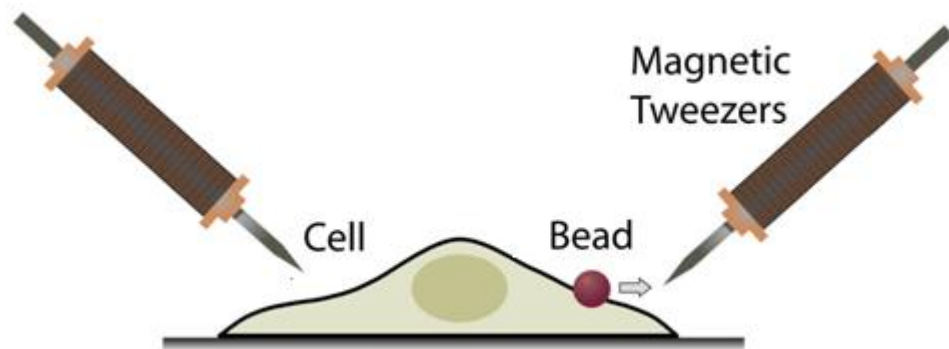
當輕微的力量施力在表面時，會產生大約在 1 到 200 pN 範圍的壓力。因此可以使用 1 到 2 的直徑小粒子的雷射束。藉由雷射束可觀察細胞的形變來確定細胞剛度。



圖二：光鉗造成細胞形變

(c)磁鉗

磁鉗可用來觀察電磁體對磁顆粒產生的作用力。藉由使用適當的儀器可測得細胞內的彈性係數與剛度用來分析細胞的力學特性。

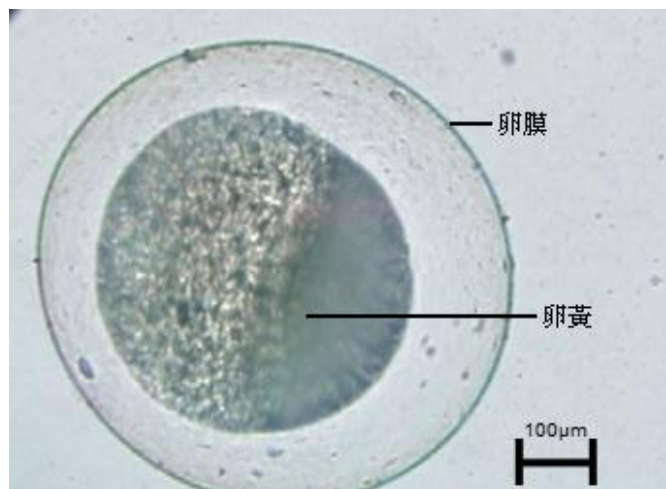


圖三：磁鉗

3.斑馬魚胚胎發育學

斑馬魚是現在很多生物實驗常使用的模式動物，因飼育容易、胚胎透明易觀察又對環境極敏感易產生突變，而成為遺傳學的熱門研究動物。目前已有每個發育時期胚胎內部的生物研究報告，並且有許多基因相關實驗都是使用斑馬魚。

在顯微鏡下的斑馬魚魚卵如圖四，可看到外部包覆的卵膜及內部的卵黃。其胚胎發育共分六期：卵裂期 (Cleavage Period)、囊胚期 (Blastula Period)、原腸胚期 (Gastrula Period)、分裂期 (Segmentation Period)、成形



圖四：顯微鏡底下所見卵裂期魚卵

期(Pharyngula Period)和孵化期(Hatching Period)。而斑馬魚魚卵從產出到孵化，經歷時間約莫二到三天，發育週期短，適合用來進行與脊椎動物發育時間有關的研究。

由於斑馬魚魚卵直徑約 1mm，較一般以磁鉗或光鉗測量的細胞還大，經過幾次探索實驗後，發現無法使用磁鉗或光鉗測量斑馬魚魚卵的彈性，需要另行設計儀器。

二、研究設備與器材

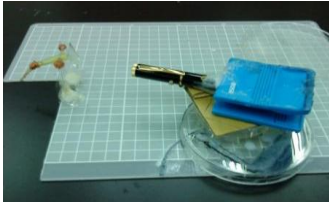
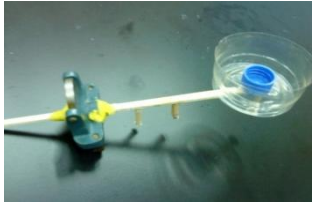
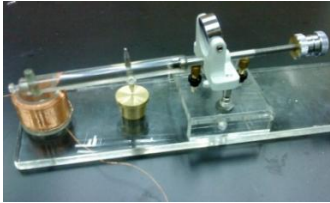
為了達到本實驗探討目的，我們進行設計與製作儀器電磁振盪控制生物力學分析儀器，從事斑馬魚魚卵的生物力學特性測量，其實驗器材與設計如下。

1.實驗材料：斑馬魚魚卵

2.實驗器材：電流供應器、自製磁力振盪器、滴管、載玻片、蓋玻片、培養皿

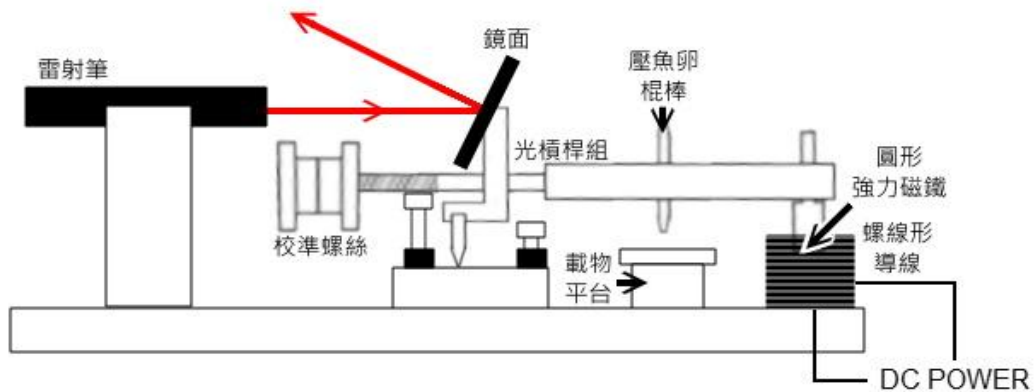
3.電磁力振盪生物力學量測儀設計與製作

本實驗原先擬設計製作磁鉗，並讓魚卵包噬磁性顆粒，藉以磁力拉動魚卵卵膜，在顯微鏡觀察拉力形變的關係，以推測魚卵的彈性力學特性。經過實驗嘗試後，發現磁鉗無法拉動魚卵卵膜，因為磁鉗僅適用於測量應力較小即可導致物體形變的生物物質。而斑馬魚魚卵的黏滯係數較高，磁鉗力量無法拉動魚卵，且包噬過多磁性顆粒的魚卵會導致卵膜容易破裂。幾個先期的實驗嘗試雛形設計如雛形 I、II。

雛形 I	雛形 II	成品： 電磁力振盪生物力學量測儀
 使用電磁鐵作力量來源，但水平部分(X 軸)未固定，易產生 X 軸誤差。	 水平部分(X 軸)固定並增加整體重量減少誤差。外將壓卵與磁力吸引處分開。	 右端加上螺絲校正，並加上用來固定位置的銅製座台。簡稱為電磁力振盪儀。

但雛形 I、II 磁鉗無法得到穩定拉動魚卵力學實驗數據，因此決定以自製電磁力振盪儀器測量魚卵彈性力學特性。下列說明此電磁振盪生物力學量測

儀，架構圖如圖五。



圖五：電磁力振盪器示意圖

電磁力振盪生物力學量測儀器是使用電磁鐵作為力量來源，並以槓桿原理作為分析施力與受力關係。槓桿的一端黏貼圓柱狀磁鐵，桿與支點中間位置連接壓棒以對魚卵施作用力。實驗設計先前階段，先製作電磁線圈。作好了自製電磁線圈，通入電流，電磁線圈會產生感應磁場，磁場再對桿端所柱狀磁鐵作用，產生拉力。

實驗前先確定電流大小與磁作用拉力的關係。由於磁作用拉力對斑馬魚魚卵形變量仍然很小，因此本實驗加入光槓桿的設計來放大微小的位移。

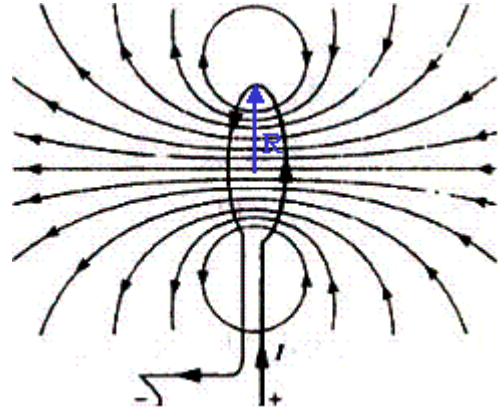
儀器自雛型 I 至雛型 II 進行多次機械結構調整，增加穩定性與減小誤差，最後製作出可以作為本實驗使用的電磁力振盪生物力學量測儀器成品。實驗時記錄電磁作用施力，對魚卵產生周期振盪彈性形變對時間關係。

三、實驗原理

下列簡述本實驗相關的原理。

1. 電磁線圈的磁力

帶有電流的圓形線圈所產生的磁場，如右圖六所示。在半徑為 R 的線圈中心，磁場是和線圈環面垂直，其大小 $B = N \frac{\mu_0 I}{2R}$ 。因我們所使用的為螺旋型線圈，將圓形線圈的磁場公式不斷疊加後便可得磁場大小。



圖六：圓形線圈所產生的磁場

經由前置實驗已證明自製電磁線圈通入電流大小和磁場所產生的拉力成正比。因此本實驗將電磁線圈通入電流，產生磁力來吸引槓桿前端的磁鐵。只要微幅改變電流，便可以對下拉力量大小進行微調。

2. 生物力學阻尼振盪理論

施力於魚卵可產生彈性形變。若是理想彈性形變，則魚卵會產生簡諧運動變化。由於魚卵具有黏滯性，因此所產生的振盪非一般簡諧運動模式，而為阻尼振盪運動(damping oscillation)。

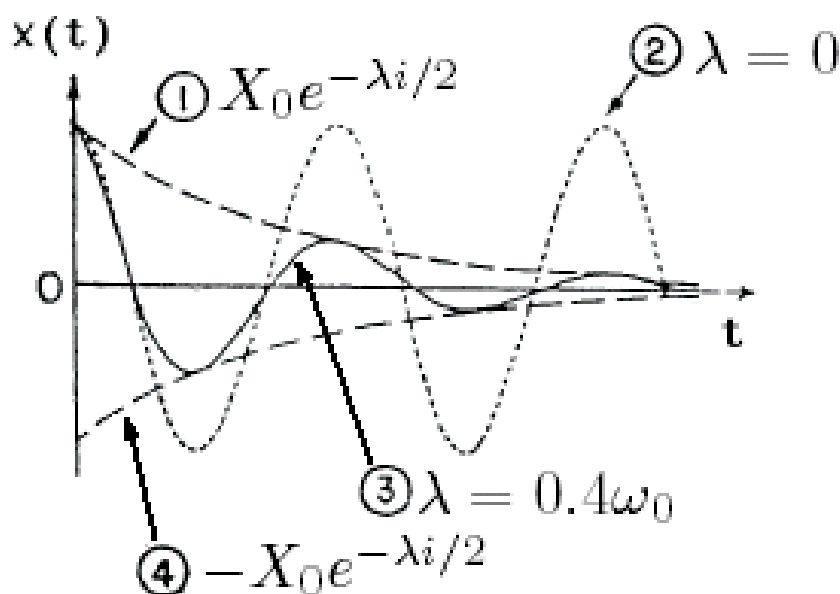
阻尼振盪為物體除受彈性恢復力 $F = -kx$ 外，同時還受到阻滯力： $\lambda \frac{dx}{dt}$ ，其中 λ 稱為阻尼係數，因此物體運動方程式為 $m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - m\lambda \frac{dx}{dt}$ ，整理後得到 $\frac{d^2x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$ ，其中 ω_0 為振盪頻率，且 $\omega_0 \propto \sqrt{k}$ ， k 為彈性係數。

這種運動不是一個週期性的運動，因為每重複一次，物體不會回到原先的最大位移，所以只稱往復運動，但在 λ 不大時，還是可以當作一個振幅逐漸衰減的簡諧振盪。

如果 $t=0$ 時，振幅位移是一個極大值 x_0 ，每經一個週期 $T_d = 2\pi/\omega_d$ 之後，位移極大值依次為 $x(T_d) = x_0 e^{-\lambda T_d/2}$ ， $x(2T_d) = x_0 e^{-\lambda 2T_d}$ 等，可見這種運動的最大位移是隨時間程指數函數的上衰減的。

如右圖，各振幅極大值畫出的軌跡方程式為 $x = x_0 e^{-\lambda t/2}$ 定義半生期週期 $T_{1/2}$ 為 x 降到 $(x_0/2)$ 所需的時間，則 $T_{1/2} = 2\ln 2/\lambda$ ，由 $T_{1/2}$ 可以推算出阻尼係數，由上推出 λ 可得知方程式。也可以在半對數紙上畫出 X 對 t 的關係，得到一條線，由直線的斜率可以求出阻尼係數 λ 。

將位移變化對時間(t)畫圖，得到的波形可用來分析阻尼振盪，由於每組的阻尼振盪角度與週期皆沒變化，可進而直接將不同發育時間的波相減，得知魚卵受到下壓力的改變量。

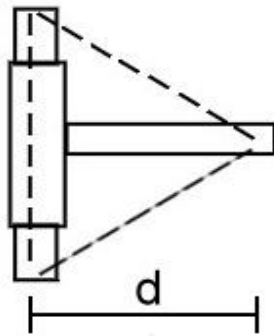


圖七：阻尼震盪 $X-t$ 圖

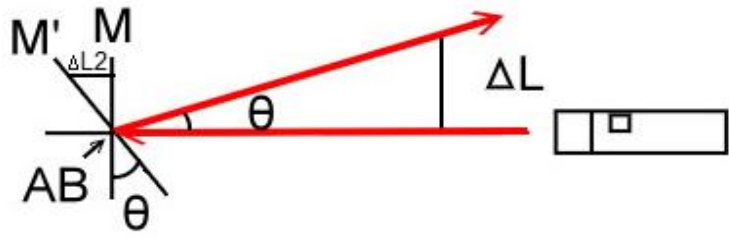
3. 光槓桿原理

光槓桿為光學反射定律的一個應用，它能將微小的長度放大很多倍，幫助進行精密的測量。因我們實驗的變化差距皆十分微小，故光槓桿是很好利用工

具。

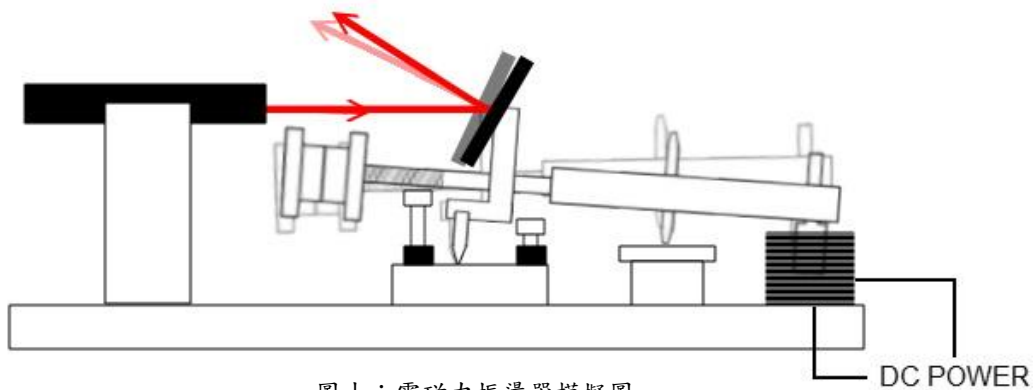


圖八：鏡台俯視圖



圖九：鏡台和雷射筆

如上圖九所示，將鏡台的 A、B 設為支點，雷射筆放置位子即為光源打燈處，鏡面 M 因儀器受到振動會擺幅至 M'，反射出來的差距為 ΔL 。因它的差距可放大 $\Delta L/\Delta L2$ ，由於 $\Delta L2$ 極為微小，所以可放大極大倍數。



圖十：電磁力振盪器模擬圖

實驗中，將壓力產生的魚卵形變和光槓桿結合，利用雷射光打到鏡面在牆上投影來放大魚卵的微小變化。為了可以讀取魚卵微小投影在牆上變化，乃使用數位相機將光點的運動情形錄下後，放入電腦中，便可用軟體繪製出光點位移對時間的圖形。

四、實驗流程與步驟

為了確定自製儀器是否可運作，須先確定電流所產生的磁場是否與下拉力有關聯性，我們先設計了實驗一，觀察兩者的關係。之後，再利用自製儀器進行實驗二和實驗三，初步測量魚卵在不同發育時期彈性係數是否有改變，以確定整個實驗的可行性。

實驗一：施力大小與位移關係

1. 將一頭黏有磁鐵的光槓桿放置線圈中心正上方。
2. 未加電流的情況下將雷射光投影至牆壁方格紙上並定此點為原點。
3. 將線圈接上電流產生器，並通入 0.4A 電流。
4. 將雷射光投射至鏡面，並紀錄反射光點的 x 與 y 座標。
5. 以 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5A 電流重覆步驟 3、4。
6. 數據輸入 excel 並作圖分析。

實驗二：魚卵可行性探討

1. 儀器校正並確認原點位置。
2. 取同一時期魚卵放至載物台上。
3. 開起雷射光源及相機並通入 0.4A 電流使儀器振動施力。
4. 重複步驟 2、3 二十五次，取得二十五組同一時期數據。
5. 利用相機錄製雷射光源投射在牆壁方上的振動變化。
6. 利用程式 image-pro plus 繪出雷射光點上下振動的波形。

實驗三：魚卵發育時間與彈性的關聯

1. 儀器校正並確認原點位置。
2. 將卵裂時期的斑馬魚卵放至檯上，開起雷射光源並通入 0.4A 電流使儀器振動，對魚卵施力，並重複測量 25 次。
3. 紀錄雷射光源投射在牆壁方格紙上的最高點與最低點。
4. 放置出生後卵裂期、囊胚期、原腸胚期、分裂期的斑馬魚卵並重複步驟 2、3。
5. 將每個最高點與最低點相減取得振幅。
6. 將各期 25 次實驗數值加以平均並轉入 excel 檔匯至表格。
7. 參考文獻，研究斑馬魚卵出生到完全發育中的內部變化。

實驗四：在囊胚期魚卵彈性與時間關聯

1. 儀器校正並確認原點位置。
2. 將出生後 2 小時的斑馬魚卵放至載物檯上。
3. 開起雷射光源及相機並通入 0.4A 電流使儀器振動施力。
4. 重複步驟 2、3 五次，取得五組同一時期數據。
5. 利用相機錄製雷射光源投射在牆壁方上的振動變化。
6. 以出生後 2.5、3、3.5、4、4.5、5 小時的魚卵重複上述步驟。
7. 利用程式 image-pro plus 繪出雷射光點上下振動的波形。

實驗五：培養液酸鹼值與魚卵彈性關聯

1. 利用 NaOH 水溶液與 HCl 水溶液分別調配酸鹼值 6.0、6.5、7.3、7.5 與 8.0 之培養液。
2. 將魚卵泡入配置好之培養液中。
3. 儀器校正並確認原點位置。
4. 將浸泡酸鹼值 6.0 之培養液 2 小時後魚卵放至載物台上。
5. 開起雷射光源及相機並通入 0.4A 電流使儀器振動施力。
6. 重複步驟 4、5 三次，取得三組同一時期、浸泡不同酸鹼值培養液魚卵的數據。
7. 利用相機錄製雷射光源投射在牆壁方上的振動變化。
8. 以浸泡酸鹼值 6.5、7.3、7.5 和 8.0 培養液的魚卵重複上述步驟。
9. 利用程式 image-pro plus 繪出雷射光點上下振動的波形。

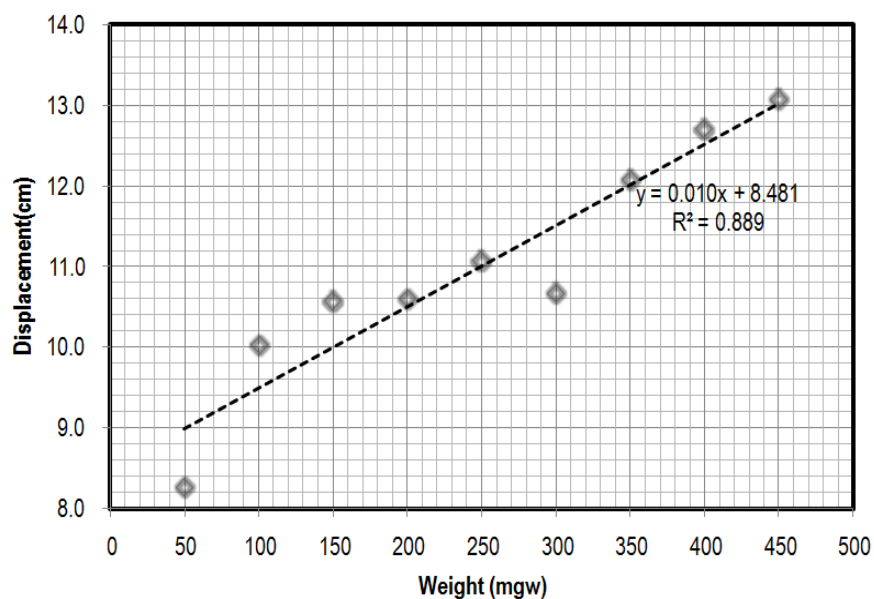
參、研究結果與討論

實驗一：施力大小與位移關係

在實驗過程中，需要一個力量來源對直徑約 1mm 的魚卵施一固定下壓力，而本研究使用的是一自製儀器：利用電磁鐵吸引槓桿前端磁鐵產生下壓力。為了找出所製作的儀器組受到不同大小的力下拉時，力的大小與位移的關聯，且確認能以簡單微調電流的方式改變磁場大小以控制力的大小，而進行了這個前置實驗。

首先，第一個進行的實驗是在雛型 I 前端掛上重量為 50、100、150、200、250、300、350、400、450mg 砝碼，經光點投影後得下拉力與 Y 軸方向位移如圖一。

其中，Y 軸位移介於 8cm 到 13cm 之間，除了在 350mg 時的誤差外，可以很明顯的看出下拉力大小和座標的線性關係。由數據可推得，每下加 100mg 的砝碼，Y 軸座標便會上移 1cm。這證明了我們可以直接藉由測量光點反射位置 Y 軸的位移，來得知下拉力的變化量。

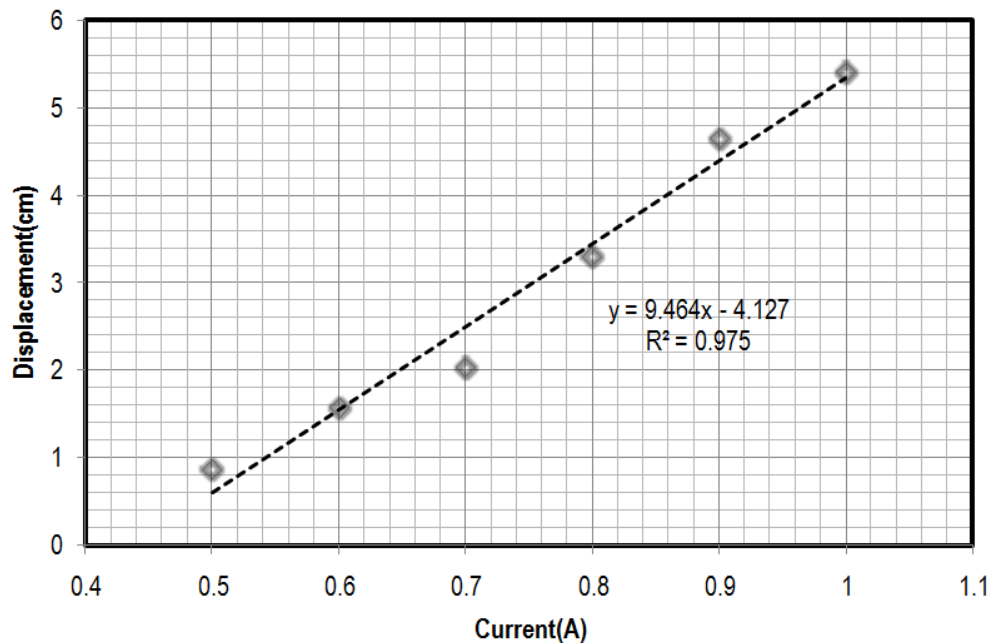


圖十一：下拉力與 Y 軸方向位移關係圖

確定了這個關係後，我們將下拉力量的來源由砝碼改為電磁鐵吸引吸注管前端磁鐵的磁力。利用改變通入電流大小來改變磁力大小，分別對電磁鐵通入 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0A 電流。得到的電流大小與位移如圖十二。

圖十二中，當通入電流大小介於 0.5 到 1A 時，可以看到一個很明顯的線性正關係。

在實驗過程中，觀察到當電流超過一定大小，因為中心未固定、槓桿整體重量相對較輕，一瞬間施加太大的力，使槓桿失去平衡，便會產生不規律的上下擺動，影響平衡時的光點位置。於是設計了第二代儀器組，增加槓桿本身的重量並且在鏡面與槓桿連接處加上黏土固定。同時在鏡面底下裝置兩根支架做為支點。另外我們將下壓物體處和被吸引處分開，改為在棍棒長 1/2 處黏貼另一短棒。

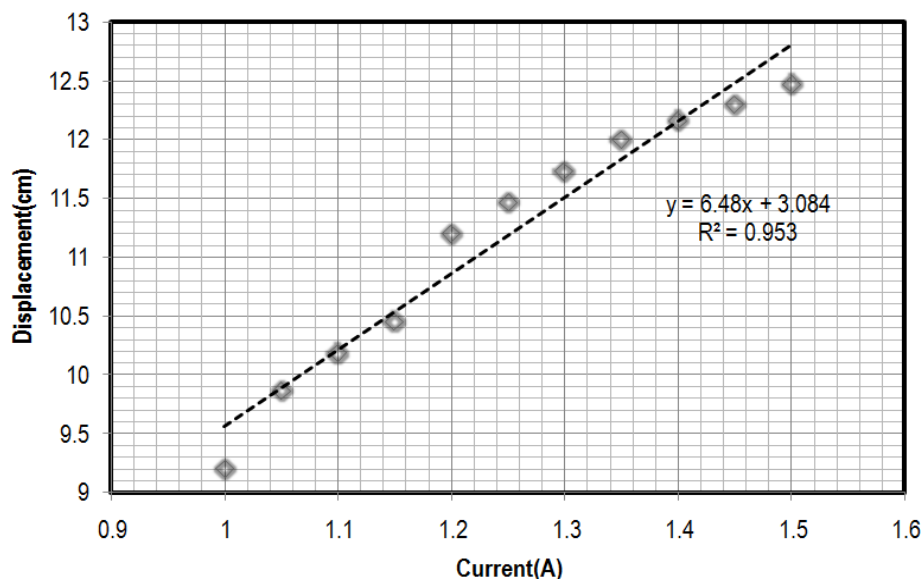


圖十二：電流大小與位移關係圖

完成雛型 II 設計與製作後，對電磁鐵通入 1.00、1.05、1.10、1.15、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40、1.45、1.5A 的電流，並投影在牆上的方格紙，得到的 X 座標皆為零，表示反射光點並沒有 X 軸方向的位移，而 Y 座標和電流大小的關係則如圖十三所示。

由圖十三可以看出當排除了 X 軸方向的誤差並且增加儀器組整體重量後，電流大小和 Y 軸位移呈明顯線性關係。分析後得到使用雛型 II 時，電流每增加 1A 雷射光點 Y 座標上升約 6.5cm。

另外，觀察發現當施加外力時，魚卵可能整顆連同卵膜一起變形、只有卵膜變形、或是只有卵黃部分在卵膜內飄移。在魚卵產出後不久和一段時間，對魚卵施以相同大小的外力，魚卵會有不同的反應。有些時期的魚卵彈性很好，被擠壓後仍能恢復原狀；有些則是剛性很強，不容易被擠壓；又有些一壓就破了。

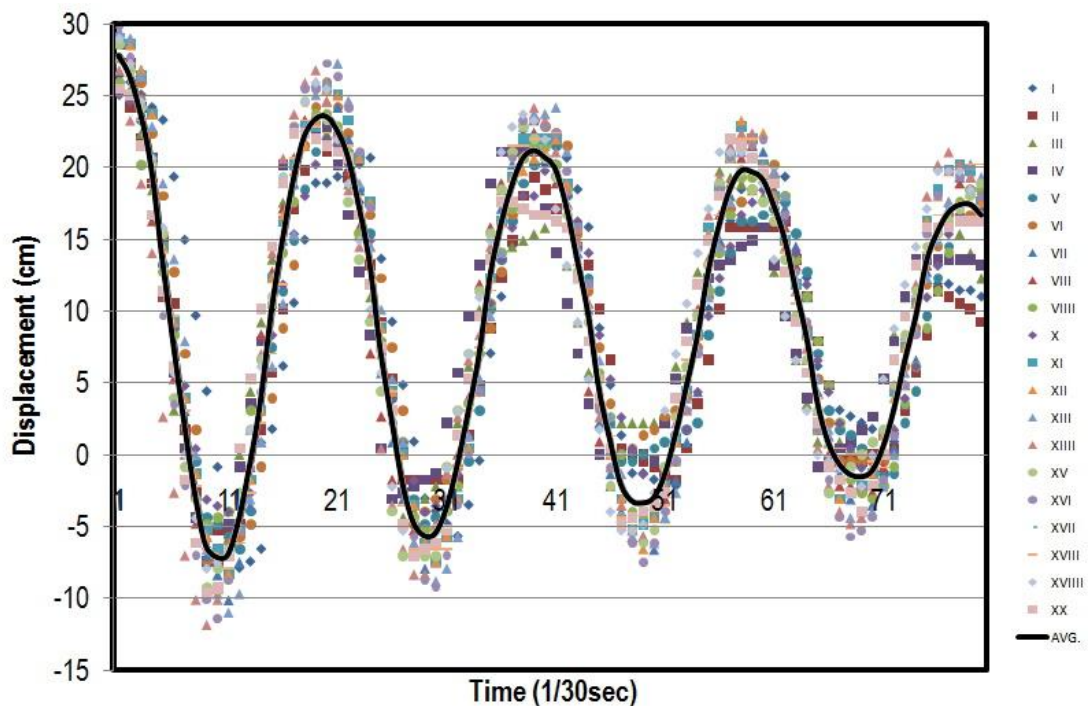


圖十三：電流大小與位移關係圖

實驗二：魚卵可行性探討

為了確定魚卵本身個體變異對其彈性的影響較不顯著，我們取同一品種、同一發育週期的魚卵二十五顆進行實驗，而刪除當中誤差較大的數據後得到圖十九的圖形如下：

由圖十九可見數據點匯聚成一個很明顯的波形，且各數據點皆集中於平均波形周圍。雖因魚卵本身基因上、結構上無可避免的個體差異而有數據高低，但可透過多次的實驗來提高數據的精準度。同時也確認魚卵數據的重複性。



圖十九：相同時期魚卵振盪波型圖

實驗三：魚卵發育時期與彈性的關聯

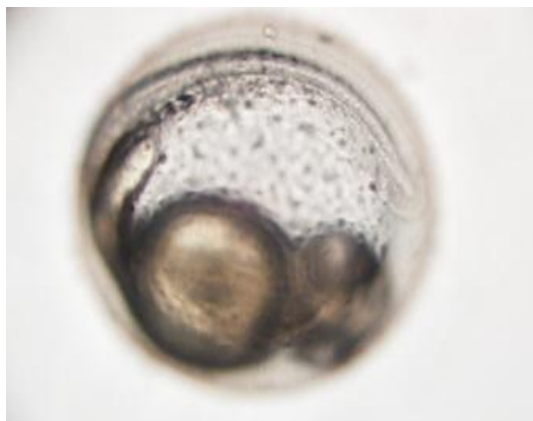
成功製作出電磁力振盪儀後，分別取用在孵化前的五個時期：卵裂期、囊胚期、原腸胚期、分裂期、成形期的魚卵進行實驗。

在幾次的實驗當中，發現當電磁力振盪儀通入 0.4A 的電流所產生的磁力大小，剛好可以使魚卵產生形變，卻又不會太大造成魚卵破裂。

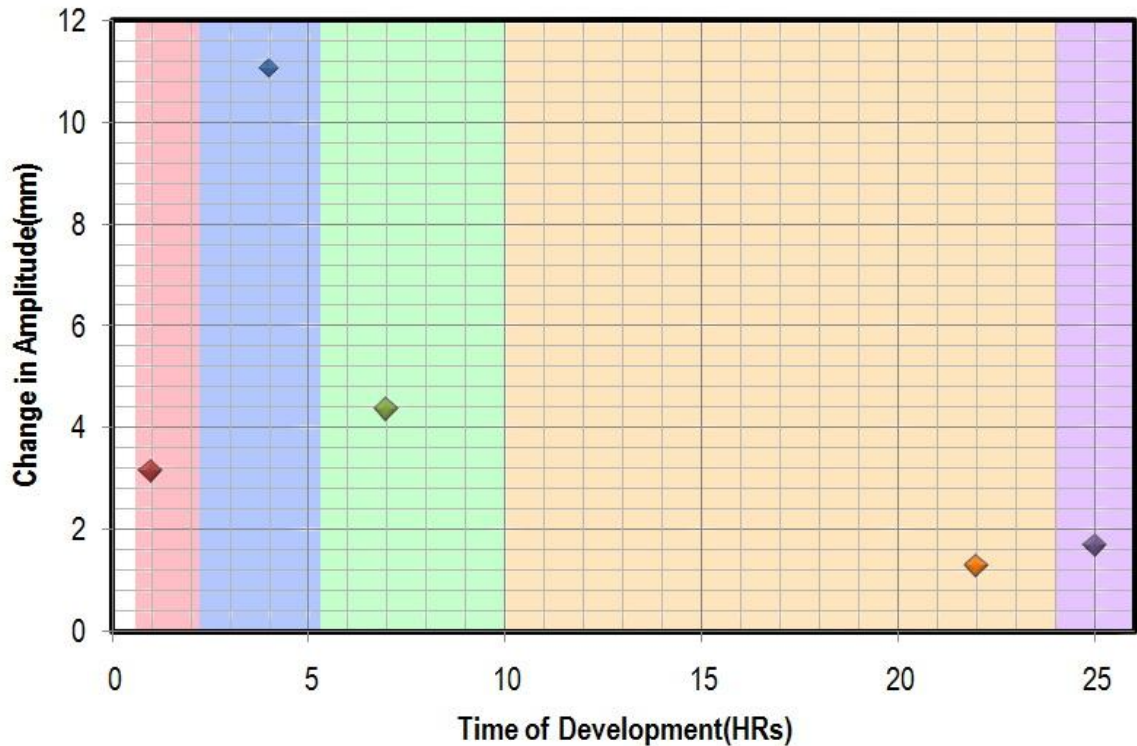
當通入電流時，會使整個槓桿產生一個固定振幅大小為 145mm。當在載物平台放上魚卵後，振幅便會因儀器接觸到魚卵而改變。

由阻尼震盪的公式 $m \frac{d^2x}{dt^2} = F = -kx - m\lambda \frac{dx}{dt}$ 可以推得，當位移量越大，也就是儀器原本的振幅減去加上魚卵後振幅的振幅變化量越大，整個振盪儀的合力也就越小。但由電磁鐵所輸入的力大小不變，因此可以得知魚卵給了一個和上壓力方向相反的抗力，而當振幅變化量越大，此抗力也就越大。而圖十四當中的點分別表示分別測量放置五個時期魚卵的振幅變化量。

由圖十四中我們可以看到後面兩個點，也就是魚卵發育到分裂期與成形期時，施以同樣大小的外力，振幅量改變不大，可以得知魚卵所給的向上抗力較其他三期小。此時期的魚卵已長出脊椎骨且即將孵化。因此推測在這時魚卵發育應該偏向彈性變小的趨勢，卵膜對於魚卵的保護機制變低，來使內部的魚更容易突破卵膜孵出。



圖十五：顯微鏡底下成形期魚卵



圖十四：發育時間與振幅變化量

而第一個數據點卵裂期（紅）和第三個數據點原腸胚期（綠），變化量較後兩個數據點高，推測原因是因為在這兩點都屬於胚胎發育的初期，內部細胞正在快速的分裂及移動，且尚未長出任何硬的骨骼結構，是發育週期當中很重要卻也脆弱的時期。除了因為本身內部物質較軟以外，我們推測魚卵內部本身的細胞骨架和卵膜也使得整顆魚卵在此時期彈性較好。

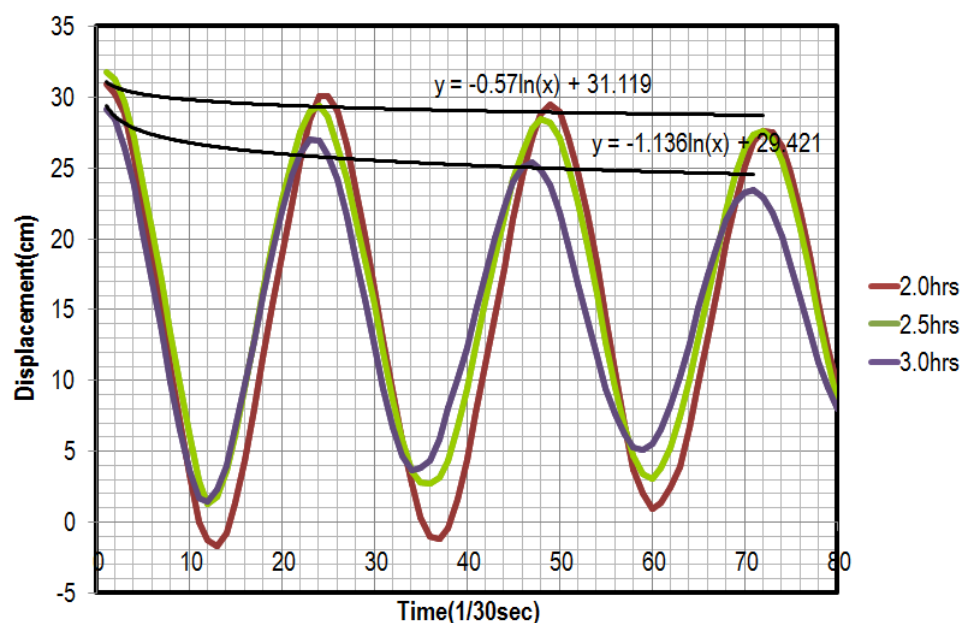
第二個數據點為囊胚期（藍）的魚卵，變化量高達 11.05mm。參考各個發育時期的資料後，得知此期胚胎內部細胞正由其中一極移向另外一極，胚胎整體由卵裂期桑椹型構造到橢圓球形，最後則是一半有雙層膜狀構造的球體。推測囊胚期魚卵給予的抗力較大的原因和此時胚胎內細胞的運動和整體形狀有關。

實驗四：在囊胚期魚卵彈性與時間關聯

完成實驗三後，發現魚卵的彈性和時間的關係並非簡單的線性關係，需要做更多、更密集的實驗才能顯示。而當中囊胚期的魚卵，數據又最為特別。因此在實驗四中，我們從發育時間兩小時，也就是囊胚期的起點，到五小時，每半個小時測試一次魚卵的彈性。

囊胚期的魚卵剛經過卵裂期，內部卵黃外型桑葚一般。到了囊胚期時，細胞會開始由卵黃當中所謂的動物極往植物極移動，也就是所謂的外包(epiboly)，並在外部形成一個半圓形的結構。在這個過程中，斑馬魚魚卵會因為此一結構的改變，而產生彈性變化。同時，此時期的魚卵也是在發育週期當中，外形較為規則，文獻形容此時期魚卵是由橢圓球體發育成圓形球體，相較其他時期，比較容易進行力學模型模擬與分析。

利用攝影機錄影後再由電腦軟體分析，會得到一個每隔 1/30 秒測量一次反射光點位置的波形圖。而我們將每個波的第一個頂點，也就是槓桿剛壓到魚卵的時間點對齊，利用阻尼方程計算得到各組的阻尼係數。為了方便比較，我們將七組數據分為三組一張圖和四組一張圖，如圖十六和圖十七。



圖十六：發育時間 2-3 小時位移波形

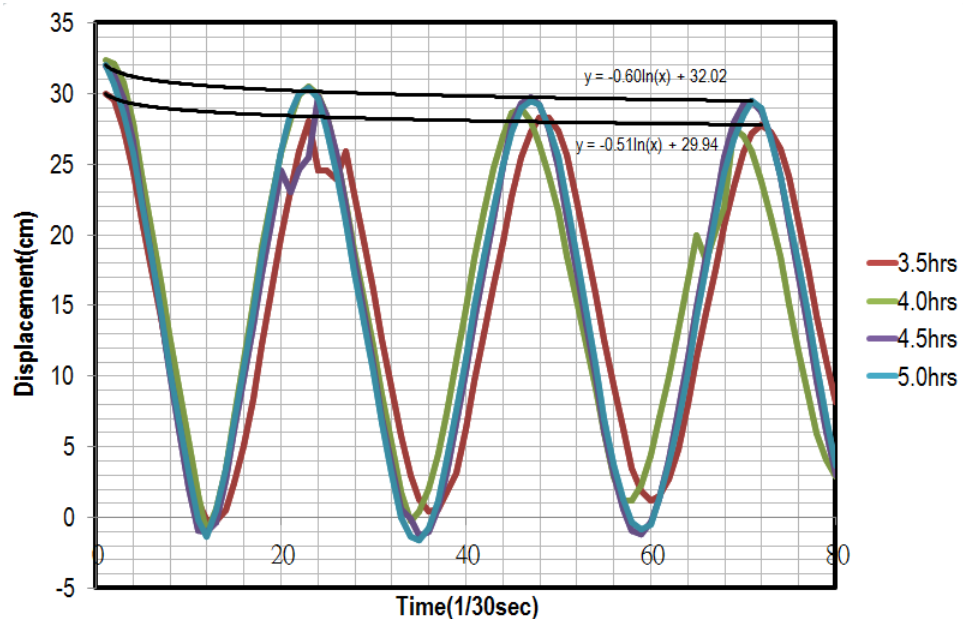
圖十六為魚卵發育 2 到 3hrs 的圖形。在 2hrs 和 2.5hrs 時，波形十分類似。而由 2hrs 波形所求得其阻尼係數為 0.57。另外在 3hrs 時，波形的變化十分明顯，阻尼係數則為 1.136。2 小時、2.5 小時、3 小時，由左至右照片如下：



圖十二：顯微鏡底下發育時間 2-3 小時的魚卵

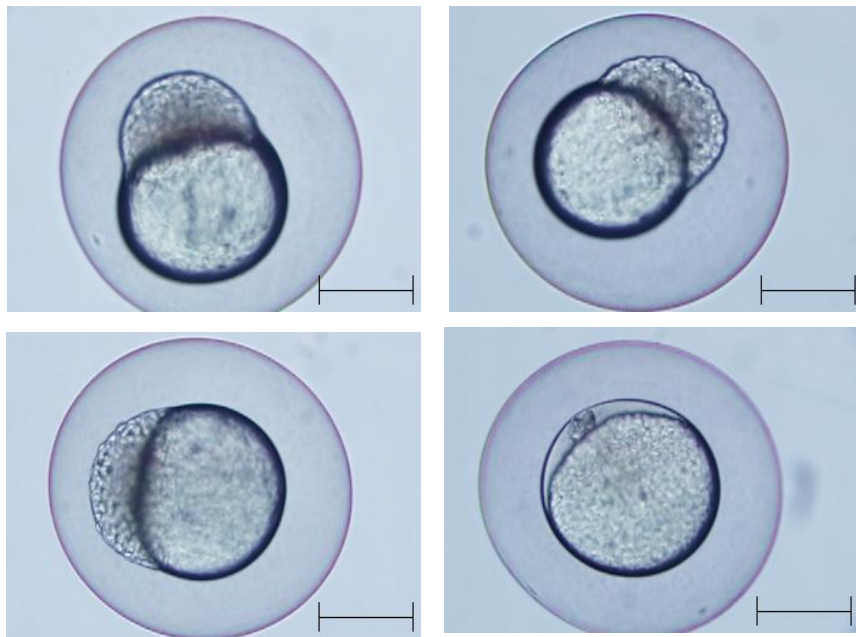
由照片可以看到在卵裂期分裂出的細胞，由一開始很明確地一顆一顆排列，到 3 小時階段幾乎看不到每個細胞間的分界。這時的細胞正在從魚卵的動物極往自然極聚集。

圖十七則是由 3.5 至 4.5hrs 的圖形。此期間波形變化並不如 2 至 3 小時明顯，但可以看出在 3.5 及 4 小時阻尼係數約為 0.51，和 2、2.5 小時的係數 0.57 接近。而後 4.5 及 5 小時，阻尼係數升為 0.6。



圖十七：發育時間 3.5-5 小時位移波形圖

3.5 小時、4 小時、4.5 小時、5 小時，由左上至右下照片如下：



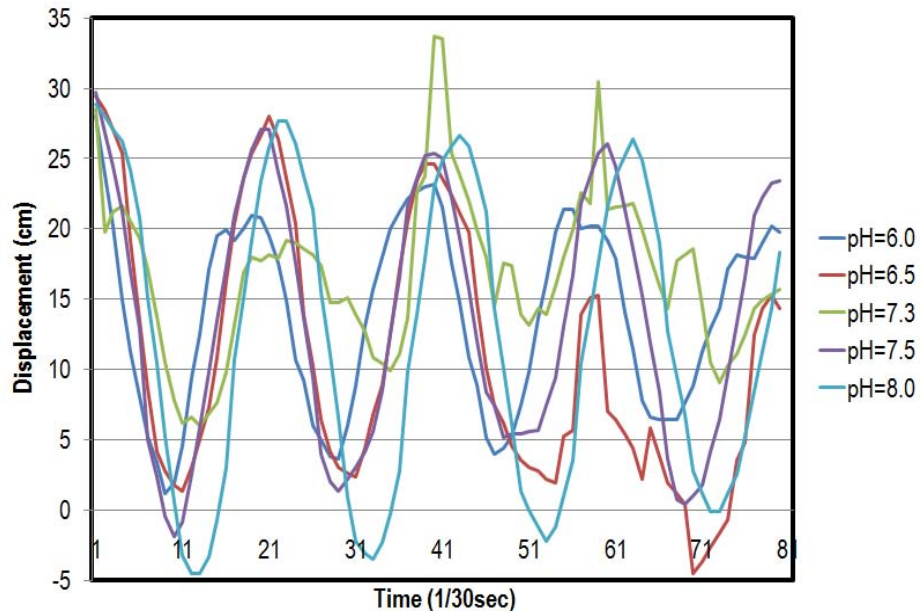
圖十八：顯微鏡底下發育時間 3.5-5 小時的魚卵

由照片可以看到胚胎細胞由動物極移至自然極到開始外包。

阻尼係數變大，表示物體的黏滯力變強或剛性變大，這和細胞內部的細胞骨架、分子間牽引有關。而在囊胚時期，魚卵內細胞正在由動物極互相牽引至自然極，從發育時間 2 小時開始往自然極遷移到 5 小時遷移結束開始外包，推測互相牽引與阻尼係數的改變有關。

實驗五：培養液酸鹼值與魚卵彈性關聯

生物卵的發育對環境因素十分敏感，本實驗進行不同酸鹼與魚卵彈性關係探討，得到結果整理如圖二十：



圖二十：浸泡不同酸鹼值培養液後光點位移波形

斑馬魚對於環境酸鹼值的變化十分敏感，例如會造成其膜上細胞開口方向、大小的不同。因此利用 NaOH 與 HCl 調整培養液酸鹼度並浸泡兩小時後側得上述圖型。當中 pH=7.3 是文獻推薦的最適環境。而可看到只要微幅的改變酸鹼值，便會影響卵膜，造成其物理表徵大幅改變。

此外，觀察浸泡十二個小時不同酸鹼值培養液的魚卵，其內部發育速度不同。有些酸鹼值聚幅改變者，如 pH=6.0 與 pH=8.0 的培養液當中，魚卵死亡率大為增加。

肆、結論與應用

一、結論

1. 本實驗自製的電磁力振盪儀器結合光槓桿設計可以量測物體的微小形變量，並成功應用以分析斑馬魚魚卵的彈性力學特性。
2. 應力應變實驗發現，魚卵各發育階段的生物力學特性明顯不同；魚卵在囊胚期，其受外力的抗力應變最大，成型期受力應變最小，其力學表徵與胚胎內胞器和生理結構形貌等有關。
3. 振盪實驗發現，魚卵隨發育階段其阻尼係數變化，應與魚卵體內微結構的黏彈性與黏滯力特性有關。如囊胚期，2 小時到 3 小時期間，阻尼係數從 0.57 變到 1.136，且振盪波形變化較明顯。在 3.5 至 5 小時則由 0.51 微幅上升為 0.60，但其波形變化不如 2 至 3 小時明顯。此阻尼係數改變與魚卵的細胞遷移變化有關。
4. 魚卵的生物力學表徵會因培養液酸鹼值改變而劇幅變動，甚至產生不規則波形。而此一酸鹼值變化主要影響魚卵卵膜上細胞以及蛋白質的結構，造成魚卵整體力學表現的差異。
5. 由實驗觀察可發現魚卵整體的力學表徵的改變來自於兩個變因：魚卵外部卵膜變化以及內部結構改變。

二、應用

一般藉由顯微鏡觀察生物體胚胎發育期只能觀察到內部結構變化，如經由物理的方法，可進而得知力學表徵、外在形狀的變化與影響，使得可觀察的生物性質的範圍變廣。

在進行實驗過程中，發現死亡的魚卵易破，推知可藉由魚卵的彈性作為一

個標準值，以彈性變化來判定生物體的狀態。

由胚胎學的角度來看，魚卵在不同時期發育出不同的構造，有時是增加彈性有時是減少彈性，代表著魚卵在不同時期時所需要的生理機制、保護機制不同。可先以物理方式探討內部結構的改變對於魚卵整體彈性的影響，再回歸到生物的角度推論為何此時期需要這樣的構造。每種生物胚胎發育所經歷的過程都不同，有些生物會缺少特定的幾期，當得知各個時期生物體物理量變化的傾向與原因後，再加上遺傳學的理论，可看出生物演化的傾向與原因。

三、未來展望

在未來，會先將儀器定量，求出儀器的施力大小，並重複實驗四的數據，減小誤差。同時將測量時間由發育後 2-6 小時擴張的發育後 2-10 小時，進而得知更多魚卵力學表徵變化與發育時間的關聯。

目前這份報告當中使用的是楊氏係數，是當力量集中於一個施力點時所使用，但實驗當中其實是力量集中在球體的表面，但卻又不是常見的球體彈性係數那樣是從四面八方均勻施力。因此需要找尋一個更適合的彈性模型。

而儀器的部分，未來希望能輸入一個定值的訊號，利用超音波震盪的原理，觀察魚卵在高速振動下的情形，並找出其共振頻率。

另一方面，將會改變外在環境變因(如：水質酸鹼度、溫度、汙染物濃度)，再由所得數據與實驗四數據做比較，觀測魚卵的發育狀況，進而推知全球暖化、酸雨、水汙染對淡水魚的影響。

最後，會改變魚卵種類，採取海水魚的魚卵，測得海水魚的魚卵在外在環境改變時，所受到的影響，並和淡水魚進行比較。

伍、參考文獻

- 一、Chih-Yuan Shiao 2010 Study on Bio-Mechanical Properties of Mouse Colon Carcinoma CT26) Utilizing Magnetic Tweezers
- 二、Charles B. Kimmel,William W.Ballard,Seth R. Kimmel,Bonnie Ullmann,and Thomas F. Schillingc 1995 Stages of Embryonic Development of the Zebrafish Developmental Dynamics 203:253-310
- 三、J Kopfova 2006 Hysteresis in biological models Journal of physics: Conference Series 55 130-134
- 四、Luca Cardone and Paolo Sassone-Corsi 2003 Timing the cell cycle Nature Cell Biology 5, 859 - 861
- 五、Xiaobo Tan and Ram v.Iyer 2009 Modeling and Control of Hysteresis IEEE Control Systems Magazine February 2009

陸、附錄

實驗一：確認儀器設計可行性

1. 雛形一放置不同重量砝碼對位移的影響

W (mg)	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG.
50	4	3.3	8.4	5.2
100	4.8	3	8.7	5.5
150	5	2	8.9	5.3
200	5.4	3	9.1	5.8
250	5.7	1	9.2	5.3
300	5	3	9.3	5.8
350	5	2	9.6	5.5
400	5.2	4	9.7	6.3
450	5	3	10	6.0

2. 雛形一通入不同大小電流對位移的影響

I (A)	$\Delta Y(\text{cm})$				
	I	II	III	IV	AVG.
0.5	1	1.1	0.8	0.6	0.875
0.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.575
0.7	2.2	2.1	2	1.8	2.025
0.8	3.9	3.4	3	2.9	3.3
0.9	6	4.7	4.2	3.7	4.65
1	7	5.3	5.1	4.2	5.4
1.1	7.3	5.2	5.8	4	3.75
1.2	7.2	5	5	5	5.55
1.3	7	5.3	4.6	4.3	5.3
1.4	6.8	4.9	5	4.1	5.2
1.5	5.7	5.3	4.9	4	4.975

3. 雛形二通入不同大小電流對位移的影響

I (A)	I		II		III		AVG.	
	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$
1.00	0	9.20	0	9.20	0	9.20	0	9.20
1.05	0	9.90	0	9.80	0	9.90	0	9.87
1.10	0	10.15	0	10.25	0	10.15	0	10.18
1.15	0	10.45	0	10.45	0	10.45	0	10.45
1.20	0	11.20	0	11.20	0	11.20	0	11.20
1.25	0	11.50	0	11.40	0	11.50	0	11.47
1.30	0	11.75	0	11.70	0	11.75	0	11.73
1.35	0	12.00	0	12.00	0	12.00	0	12.00
1.40	0	12.17	0	12.14	0	12.17	0	12.16
1.45	0	12.27	0	12.35	0	12.27	0	12.30
1.50	0	12.40	0	12.60	0	12.40	0	12.47

實驗二：魚卵可行性探討

T $\frac{1}{30} \text{ s.}$	ΔY (cm)	T $\frac{1}{30} \text{ s.}$	ΔY (cm)	T $\frac{1}{30} \text{ s.}$	ΔY (cm)	T $\frac{1}{30} \text{ s.}$	ΔY (cm)	T $\frac{1}{30} \text{ s.}$	ΔY (cm)
	AVG		AVG		AVG		AVG		AVG
1	27.52	17	18.77	33	3.36	49	-1.79	65	4.46
2	25.80	18	21.39	34	7.01	50	-1.48	66	1.83
3	22.64	19	22.41	35	11.99	51	-0.05	67	0.30
4	18.58	20	22.60	36	15.47	52	2.37	68	-0.46
5	12.41	21	21.62	37	17.89	53	5.18	69	-0.69
6	6.91	22	19.83	38	19.33	54	8.31	70	-0.32
7	1.90	23	16.63	39	19.86	55	12.16	71	1.28
8	-2.64	24	12.83	40	19.49	56	15.10	72	3.62
9	-5.75	25	7.08	41	18.61	57	17.24	73	6.64
10	-6.13	26	2.65	42	16.38	58	18.19	74	9.47
11	-5.75	27	-1.39	43	13.22	59	18.14	75	12.83
12	-3.39	28	-3.60	44	9.82	60	17.68	76	14.80
13	0.05	29	-4.36	45	5.29	61	16.24	77	15.92
14	4.39	30	-4.13	46	1.97	62	14.18	78	16.54
15	10.18	31	-2.57	47	-0.76	63	11.25	79	16.63
16	14.87	32	0.04	48	-1.76	64	8.24	80	15.96

灰底者為未列入平均計算之誤差較大組別

T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$				
	I	II	III	III	V		I	II	III	III	V		I	II	III	III	V
1	2636	2548	2768	2856	2636	28	088	-176	-395	-22	-352	55	1011	659	1538	123	-044
2	2592	2417	2548	2724	2461	29	-308	-176	-308	-176	-659	56	1318	1011	1977	1318	703
3	2505	2197	2241	2417	2197	30	-395	-176	-22	-132	-659	57	1626	1582	1933	1362	1098
4	2417	1889	1845	2065	1802	31	-483	-176	-132	22	-615	58	1845	1582	1889	145	1450
5	2329	1494	1362	1098	1362	32	-571	-176	22	571	-615	59	1845	1582	1845	1494	1758
6	1933	1055	308	571	352	33	-352	132	615	967	-571	60	1889	1582	1802	1582	2021
7	1494	176	-176	044	-132	34	-044	483	1011	1318	-220	61	1933	1582	1274	1318	2241
8	967	-264	-615	-439	-571	35	703	879	1406	1889	176	62	1933	1626	967	967	2197
9	439	-527	-571	-747	-879	36	1098	123	1406	2109	1055	63	1538	1362	659	703	2065
10	-088	-527	-483	-747	-879	37	145	1494	145	2109	1450	64	123	1098	352	395	1845
11	-835	-527	-395	-483	-835	38	1802	1802	1494	2109	1802	65	615	791	088	-088	1582
12	-791	-483	0	-088	-791	39	2021	1933	1538	2109	2065	66	308	483	088	-044	879
13	-747	-176	439	352	-747	40	2021	1845	1582	1714	2065	67	308	-044	088	044	527
14	-659	176	923	791	-352	41	2021	1714	1626	1406	2109	68	264	-044	044	088	176
15	176	571	1362	145	088	42	2065	1582	1318	1055	2153	69	22	-044	044	176	-132
16	615	1011	1758	2021	1055	43	1845	145	923	703	2241	70	176	0	0	264	-352
17	1055	1714	2065	2241	1494	44	1582	1318	571	352	2021	71	132	0	527	527	-352
18	1494	1977	2329	2241	1889	45	879	1011	22	0	1714	72	088	044	835	791	-395
19	1889	2197	2285	2241	2197	46	483	659	22	0	967	73	308	308	1098	1098	-439
20	1889	2109	2241	2285	2417	47	132	044	22	0	527	74	615	571	1362	1362	-176
21	1933	2021	2197	2021	2417	48	-132	0	22	0	132	75	1186	835	1582	1362	088
22	1977	1933	1889	167	2373	49	-132	-044	22	0	-220	76	1186	1142	1845	1362	791
23	2021	167	1538	1274	2109	50	-176	-088	22	-044	-439	77	1186	1098	1714	1362	1098
24	2065	1318	1098	835	1802	51	-176	-132	264	22	-395	78	1142	1055	1538	1362	1450
25	1362	923	703	044	1362	52	-22	-176	615	527	-308	79	1142	1011	1406	1362	1714
26	923	527	308	-308	439	53	044	044	923	879	-220	80	1098	923	123	1318	1889
27	483	-176	-439	-264	000	54	352	352	1274	1186	-132						

T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$				
	VI	VII	VIII	VIII	X		VI	VII	VIII	VIII	X		VI	VII	VIII	VIII	X
1	2856	2461	2944	2592	2505	28	-483	483	-527	-439	1450	55	1098	483	1362	1142	1230
2	2724	2373	2768	2505	1802	29	-395	088	-571	-527	1845	56	145	439	167	1406	879
3	2592	2285	2505	2021	176	30	-308	-264	-615	-527	2109	57	1714	747	1889	167	483
4	2241	2197	1626	167	-527	31	-176	-483	-352	-395	2329	58	1758	1055	2065	1933	-176
5	1802	2065	1098	1274	-1055	32	-088	-395	0	-22	2329	59	1845	1362	2153	1933	-395
6	1274	1670	527	835	-615	33	044	-308	395	352	2329	60	1933	1362	2021	1977	-308
7	703	1230	0	395	-132	34	439	-220	1186	703	2109	61	2021	1406	1845	1933	-176
8	176	747	-483	-308	352	35	879	-132	1582	1055	1802	62	1802	1406	1582	1802	-088
9	-747	308	-571	-483	923	36	1274	220	1889	1406	1450	63	1186	1450	1318	1362	044
10	-703	264	-703	-439	1450	37	167	615	2109	1714	1011	64	879	1450	659	1098	308
11	-615	220	-835	-395	1933	38	2065	967	2241	2065	176	65	527	1494	308	791	659
12	-571	132	-483	-308	2329	39	2329	1318	2241	2153	-220	66	22	1230	0	483	1011
13	-483	088	-088	308	2461	40	2285	1933	2109	2153	-527	67	-044	923	-22	22	1274
14	-088	044	835	659	2592	41	2241	1889	1889	2021	-659	68	-044	659	-22	-176	1274
15	395	-044	1274	1055	2724	42	2153	1845	1582	1845	-527	69	-044	308	-22	-264	1318
16	879	352	1714	1406	2461	43	1538	1802	123	1274	-352	70	-044	352	-264	-308	1362
17	1318	747	2065	1758	2109	44	1142	1758	439	923	-044	71	-044	439	-088	-22	1406
18	2153	1186	2329	2241	1186	45	747	1714	088	571	352	72	0	483	176	-088	1450
19	2417	1626	2373	2373	659	46	352	1406	-22	264	703	73	615	571	483	352	1494
20	2592	2065	2461	2373	132	47	0	1055	-439	0	1098	74	879	615	1098	615	1230
21	2417	2329	2241	2285	-352	48	044	703	-439	-395	1758	75	1186	703	1318	879	923
22	2241	2329	1977	2109	-703	49	132	703	-395	-439	2021	76	145	747	1582	1142	615
23	2065	2285	1582	1538	-835	50	176	659	-352	-395	2109	77	167	835	1758	1406	308
24	167	2241	703	1186	-615	51	264	615	-308	-264	2197	78	167	1098	1889	1758	308
25	123	1670	264	791	-264	52	308	571	-044	-044	2197	79	167	1362	1933	1845	308
26	747	1274	-176	439	132	53	395	571	308	527	1845	80	167	1362	1845	1845	308
27	308	879	-483	088	615	54	747	527	1011	835	1582						

T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$				
	XI	XII	XIII	XIII	XV		XI	XII	XIII	XIII	XV		XI	XII	XIII	XIII	XV
1	29	29	2988	29	2856	28	-352	-352	-571	-659	-703	55	1582	1538	1494	1318	1318
2	2856	2856	2768	2636	268	29	-615	-615	-879	-659	-703	56	1845	1845	1845	167	1889
3	2636	268	2461	2329	2417	30	-747	-747	-923	-659	-703	57	2065	2065	2065	2109	2065
4	2373	2373	2065	1889	2021	31	-571	-571	-703	-659	-088	58	2285	2329	2109	2197	1977
5	145	145	967	1406	1538	32	-308	-308	-352	-088	308	59	2197	2197	2153	2197	1845
6	923	923	352	967	395	33	044	044	0	308	703	60	2021	2241	2197	1933	1758
7	395	395	-22	308	-088	34	439	439	439	747	1142	61	1802	1802	1933	167	1626
8	-132	-132	-703	-22	-615	35	123	123	1362	1142	1538	62	1494	1494	167	1406	1362
9	-527	-571	-1011	-659	-923	36	1626	1626	1758	1582	1845	63	1186	1142	1274	1055	967
10	-659	-703	-1142	-967	-791	37	1933	1933	2065	2153	2109	64	835	835	923	703	659
11	-835	-835	-879	-791	-659	38	2197	1977	2329	2153	2285	65	176	176	176	395	308
12	-527	-527	-527	-615	-264	39	2197	2065	2329	2197	2197	66	-088	-088	-176	044	-264
13	-176	-176	-088	-264	176	40	2197	2109	2285	2197	2065	67	-308	-308	-439	044	-176
14	308	308	439	22	659	41	2197	2197	2241	2241	1933	68	-264	-264	-571	0	-088
15	123	123	145	703	1098	42	1889	1889	1977	1714	167	69	-22	-22	-527	0	0
16	1626	167	1889	1186	1933	43	1582	1582	1582	1318	1274	70	-132	-132	-439	-044	088
17	2021	1977	2285	2065	2285	44	1186	1186	1186	923	923	71	132	132	-176	-088	176
18	2285	2153	2548	2329	2461	45	352	352	308	527	527	72	439	395	132	483	483
19	2285	2329	2548	2285	2548	46	0	0	-088	132	-22	73	747	747	483	791	835
20	2548	2548	2724	2241	2329	47	-308	-308	-439	-439	-439	74	1055	1055	835	1098	1142
21	2505	2505	2636	2197	2109	48	-527	-527	-615	-439	-527	75	1626	1626	1538	1406	145
22	2329	2461	2417	2153	1758	49	-483	-659	-747	-395	-615	76	1845	1802	1802	167	1538
23	2065	2065	2109	1802	1362	50	-439	-439	-615	-395	-527	77	1977	1977	1977	1977	1626
24	1758	1758	1714	1362	923	51	-22	-22	-395	-352	-088	78	2021	2021	1933	1977	1714
25	879	879	703	923	439	52	088	088	-044	264	264	79	1977	2021	1845	2021	1802
26	439	439	22	439	-395	53	439	439	308	659	615	80	1758	1758	1802	2021	1889
27	0	0	-22	-352	-703	54	835	835	703	1011	967						

T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$				
	XVI	XVII	XVIII	XVIII	XX		XVI	XVII	XVIII	XVIII	XX		XVI	XVII	XVIII	XVIII	XX
1	2944	268	2768	2548	29	28	-615	-835	-923	-308	-659	55	1098	167	1977	835	1318
2	29	2329	2505	2505	2636	29	-835	-835	-747	-483	-659	56	145	1933	2153	1142	167
3	2636	1889	2153	2329	2329	30	-879	-483	-483	-439	-659	57	1758	2153	2241	1406	2109
4	2285	1406	1186	2065	1889	31	-791	-132	-088	-395	-659	58	2109	2241	2241	1626	2197
5	1889	264	659	1318	1406	32	-571	264	308	-308	-088	59	2065	2241	1977	1626	2197
6	1362	-264	088	879	967	33	132	659	747	-044	308	60	2021	2021	1670	167	1933
7	791	-703	-439	395	308	34	527	835	1362	308	747	61	1977	1758	1362	1714	167
8	0	-1011	-835	-044	-22	35	967	145	1933	1011	1142	62	1802	145	1011	1758	1406
9	-659	-1186	-1142	-439	-659	36	1406	1845	2197	1362	1582	63	123	1142	659	1538	1055
10	-967	-1011	-967	-483	-967	37	1758	2109	2197	1626	2153	64	879	747	-044	1274	703
11	-1098	-703	-659	-571	-791	38	2285	2329	2197	1889	2153	65	527	044	-308	703	395
12	-967	-308	-220	-659	-615	39	2373	2417	2197	2021	2197	66	176	-22	-483	308	044
13	-308	176	264	-395	-264	40	2373	2329	1977	2065	2197	67	-088	-395	-703	176	044
14	088	703	1230	-088	22	41	2417	2109	1626	2153	2241	68	-439	-483	-527	132	0
15	615	1406	1670	747	703	42	2109	1845	1230	1802	1714	69	-439	-439	-176	044	0
16	1055	2065	2065	1142	1186	43	145	1494	835	1538	1318	70	-395	-088	088	-044	-044
17	1538	2373	2373	1494	2065	44	1055	1055	044	123	923	71	-22	176	439	-132	-088
18	2285	2592	2548	1845	2329	45	659	264	-308	527	527	72	0	483	747	-132	483
19	2505	268	2461	2109	2285	46	264	-088	-527	22	132	73	571	835	1098	22	791
20	2592	2461	2373	2153	2241	47	-132	-352	-703	-044	-439	74	879	1186	1714	439	1098
21	2724	2241	2065	2241	2197	48	-571	-527	-747	-044	-439	75	123	1802	1845	967	1406
22	2461	1845	1714	2109	2153	49	-571	-571	-439	0	-395	76	1494	2021	2021	123	167
23	1889	145	1274	1845	1802	50	-615	-352	-132	044	-395	77	1758	2109	2109	145	1977
24	145	967	352	1538	1362	51	-439	-088	220	088	-352	78	1977	2021	2065	1626	1977
25	1011	044	-132	791	923	52	-264	22	615	132	264	79	2021	1933	1758	1626	2021
26	527	-352	-483	395	439	53	395	615	967	176	659	80	1933	1802	1494	1626	2021
27	088	-659	-791	044	-352	54	747	967	1714	22	1011						

T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$					T $\frac{1}{30}$ s	$\Delta Y(\text{cm})$				
	XXI	XXII	XXIII	XXIII	XXV		XXI	XXII	XXIII	XXIII	XXV		XXI	XXII	XXIII	XXIII	XXV
1	2724	2944	2505	29	2548	28	-264	-615	-1.76	-703	-703	55	1186	1186	967	1714	1494
2	23.73	28.56	2461	2724	2505	29	-1.76	-791	-395	-659	-659	56	1494	1494	123	2109	1802
3	19.77	268	2329	2461	2153	30	-088	-747	-352	-615	-615	57	1406	1802	145	2109	2197
4	1494	23.73	2065	2065	167	31	000	-571	-308	-088	-527	58	1274	2109	167	2109	2153
5	3.52	145	13.18	1582	1142	32	088	-22	-132	308	132	59	1186	2153	1758	2065	2065
6	-1.76	8.79	8.79	5.71	615	33	395	132	132	703	527	60	1055	2109	1845	1889	19.77
7	-6.15	308	483	0	-1.76	34	747	527	439	1098	967	61	967	1933	1758	1362	1889
8	-967	-264	044	-439	-6.15	35	1450	1362	1055	1494	1362	62	835	1714	1626	967	12.74
9	-967	-703	-308	-791	-967	36	1758	1714	1362	2109	1758	63	747	145	1406	659	923
10	-967	-835	-352	-747	-923	37	19.77	2021	1582	2285	1758	64	615	1098	1186	308	5.71
11	-10.11	-10.11	-395	-659	-703	38	1933	2197	1802	23.73	1714	65	483	439	659	0	22
12	-703	-747	-483	-308	044	39	1845	2329	1802	2329	167	66	220	132	439	-044	-088
13	-308	-352	-264	1.76	527	40	1758	2153	19.77	2197	167	67	000	-132	22	-088	-1.76
14	1.76	088	088	615	10.11	41	1670	19.77	1933	1714	1626	68	000	-308	044	-132	-264
15	1098	1055	835	1098	145	42	1582	1758	1802	13.18	1582	69	000	-395	-088	-22	-395
16	1582	1494	1186	1933	1889	43	1230	1406	1626	923	123	70	-044	-352	-22	0	-22
17	19.77	1889	1538	2241	2241	44	1055	10.11	1406	527	791	71	1.76	-1.76	0	527	0
18	23.29	2241	1802	2461	2241	45	5.71	22	835	1.76	395	72	395	044	1.76	8.79	659
19	23.29	2592	2021	2592	2197	46	220	-132	527	-395	044	73	703	352	395	1186	967
20	2285	2548	2197	2548	2153	47	220	-395	264	-527	-483	74	967	659	615	145	13.18
21	2241	2417	2153	2197	2109	48	1.76	-571	044	-527	-439	75	1450	1274	1098	1714	1582
22	2197	2197	2021	1889	2065	49	132	-571	-132	-483	-395	76	1670	1494	13.18	19.77	1582
23	1889	1845	1758	1494	167	50	088	-659	-308	-264	-352	77	1626	1714	1538	19.77	1582
24	1450	145	1494	10.11	1186	51	044	-439	-22	308	-264	78	1538	1933	167	19.77	1626
25	527	5.71	747	5.71	747	52	000	-1.76	-044	703	395	79	1494	19.77	1845	1845	1626
26	088	088	395	-22	308	53	264	088	1.76	1055	791	80	1406	1889	1714	167	1626
27	-308	-308	088	-527	-483	54	5.71	439	439	1406	1186						

實驗三：魚卵發育時期與彈性的關聯

發育時間 (hrs)	1 卵裂期		4 囊胚期		7 圓腸胚期		22 分裂期		25 成形期	
振幅 (mm)	139.00	141.00	132.00	132.00	140.50	138.00	145.00	143.50	143.50	143.50
	142.50	141.00	132.00	136.50	140.50	141.50	142.50	143.50	142.50	142.00
	142.50	140.50	132.50	129.00	138.50	139.50	142.50	143.50	144.00	145.00
	142.50	142.50	139.50	128.00	143.50	136.50	145.00	143.50	144.50	145.00
	141.50	143.00	137.00	135.00	142.50	139.00	145.00	143.00	144.00	140.00
	140.00	143.50	135.00	133.00	139.50	142.50	144.00	143.50	145.00	142.50
	141.50	143.00	138.00	137.00	142.00	142.50	144.50	143.00	143.50	145.00
	142.50	138.50	137.50	136.50	142.00	145.00	143.00	143.50	142.50	143.00
	142.00	145.00	132.00	137.50	141.00	141.00	145.00	143.50	145.00	145.00
	142.00		131.50		138.00		143.50		143.00	
	平均	141.88	平均	133.95	平均	140.65	平均	143.73	平均	143.55

實驗四：在囊胚期魚卵彈性與時間關聯

發育時間：2 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	30.84	30.84	30.97	30.88	28	23.61	26.11	21.11	23.61	55	14.67	18.88	9.94	14.50
2	30.31	30.45	29.92	30.23	29	20.06	22.95	17.56	20.19	56	10.73	14.80	6.39	10.64
3	29.79	29.00	27.82	28.87	30	15.99	19.14	13.88	16.34	57	6.91	10.60	2.84	6.78
4	27.29	25.58	24.27	25.71	31	13.09	14.93	10.33	12.79	58	3.89	6.65	0.60	3.72
5	24.27	22.03	20.59	22.30	32	10.20	10.86	6.78	9.28	59	3.50	3.23	-0.58	2.05
6	20.46	18.48	17.04	18.66	33	7.18	6.78	3.10	5.69	60	3.10	0.47	-0.84	0.91
7	16.25	14.93	13.36	14.85	34	4.29	3.23	0.60	2.71	61	5.21	-1.24	0.08	1.35
8	11.65	11.38	9.81	10.95	35	1.26	0.47	-0.84	0.30	62	8.10	-1.89	1.00	2.40
9	7.31	7.83	6.13	7.09	36	-0.58	-1.24	-1.24	-1.02	63	11.25	-1.50	1.92	3.89
10	3.37	4.29	2.58	3.41	37	-1.24	-1.89	-0.58	-1.24	64	14.80	-0.05	5.21	6.65
11	0.21	0.74	-1.10	-0.05	38	-0.97	-1.63	1.13	-0.49	65	18.22	2.45	8.62	9.76
12	-0.97	-1.10	-1.76	-1.28	39	0.47	-0.18	4.55	1.61	66	21.38	5.60	12.04	13.01
13	-2.16	-1.76	-1.37	-1.76	40	2.84	2.31	7.97	4.37	67	24.00	9.54	15.46	16.34
14	-0.97	-1.50	0.21	-0.75	41	6.26	5.47	11.52	7.75	68	26.24	13.62	18.88	19.58
15	1.26	-0.05	2.71	1.31	42	9.81	8.62	14.93	11.12	69	27.42	17.83	22.30	22.51
16	4.68	2.31	5.99	4.33	43	13.36	11.78	18.48	14.54	70	27.95	21.77	25.71	25.14
17	8.23	5.73	10.07	8.01	44	16.91	14.93	21.90	17.91	71	27.42	25.06	27.95	26.81
18	11.65	9.15	14.15	11.65	45	20.46	18.22	25.45	21.38	72	25.98	27.82	29.13	27.64
19	15.20	12.57	18.22	15.33	46	24.00	21.38	27.95	24.44	73	23.74	29.53	29.26	27.51
20	18.61	15.99	22.03	18.88	47	27.55	24.53	29.26	27.12	74	20.98	30.05	28.47	26.50
21	22.16	19.40	25.32	22.30	48	29.13	27.82	29.53	28.82	75	17.69	29.66	26.63	24.66
22	25.58	22.82	27.95	25.45	49	29.79	29.53	29.00	29.44	76	14.28	28.21	23.22	21.90
23	29.13	26.24	29.66	28.34	50	29.39	30.31	27.29	29.00	77	10.86	25.71	19.80	18.79
24	30.05	29.79	30.31	30.05	51	27.95	29.79	23.87	27.20	78	7.57	22.43	16.38	15.46
25	30.05	30.45	29.79	30.10	52	25.45	28.34	20.32	24.71	79	4.94	18.75	12.96	12.22
26	28.87	30.05	28.21	29.04	53	22.43	25.84	16.91	21.73	80	4.29	14.67	9.68	9.54
27	26.50	28.61	24.66	26.59	54	18.75	22.69	13.36	18.26					

發育時間：2.5 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	29.66	33.47	32.37	31.80	28	26.24	18.48	19.72	21.46	55	18.88	10.07	9.31	12.74
2	29.53	33.08	31.19	31.23	29	23.48	15.59	16.42	18.48	56	15.07	6.78	6.67	9.50
3	29.26	31.23	28.42	29.61	30	20.19	12.70	13.26	15.37	57	11.25	4.02	4.82	6.70
4	27.29	28.47	25.52	27.07	31	16.38	9.81	9.97	12.04	58	7.83	1.92	4.17	4.64
5	24.79	24.53	22.62	23.96	32	12.44	6.91	6.67	8.67	59	4.68	0.60	4.82	3.37
6	21.51	20.46	19.72	20.54	33	8.76	4.02	4.43	5.73	60	2.31	0.47	6.41	3.06
7	17.83	16.38	16.82	16.99	34	5.47	1.79	3.37	3.54	61	0.87	1.13	9.31	3.76
8	13.75	12.30	14.05	13.36	35	4.15	0.47	3.77	2.80	62	0.47	2.84	12.34	5.21
9	9.94	8.23	11.15	9.76	36	2.71	0.21	5.22	2.71	63	1.13	5.99	15.24	7.44
10	6.26	4.15	8.25	6.21	37	0.87	0.87	7.59	3.10	64	2.84	9.15	18.27	10.07
11	3.23	0.08	5.35	2.88	38	0.08	2.45	10.49	4.33	65	5.21	12.30	21.17	12.87
12	1.00	0.34	2.45	1.26	39	0.47	5.60	14.05	6.70	66	8.36	15.46	24.20	15.99
13	-0.32	1.79	3.90	1.79	40	1.79	8.89	17.48	9.37	67	11.91	18.61	26.57	19.01
14	-0.32	5.07	6.14	3.63	41	4.02	12.04	21.04	12.35	68	15.59	21.77	28.55	21.94
15	0.87	8.36	9.17	6.13	42	7.44	15.33	24.20	15.63	69	19.27	25.06	29.34	24.53
16	4.02	11.65	12.73	9.46	43	10.86	18.48	26.84	18.70	70	22.56	27.16	29.47	26.37
17	7.18	14.93	16.56	12.87	44	14.28	21.77	28.82	21.59	71	25.32	28.21	28.68	27.38
18	10.46	18.22	20.25	16.29	45	17.69	25.06	30.00	24.22	72	27.55	28.34	26.97	27.60
19	13.62	21.51	23.81	19.62	46	21.11	27.16	30.00	26.06	73	28.61	27.69	24.73	26.98
20	16.77	24.92	26.71	22.78	47	24.66	28.34	30.27	27.73	74	28.87	25.84	21.83	25.49
21	20.06	27.16	29.08	25.41	48	27.03	28.74	29.61	28.43	75	28.21	23.48	18.67	23.43
22	23.22	28.74	30.66	27.51	49	28.74	27.95	28.02	28.21	76	26.50	20.46	15.24	20.72
23	26.50	29.26	31.32	29.00	50	29.26	26.24	25.78	27.07	77	24.14	17.04	11.94	17.69
24	28.61	28.61	30.92	29.35	51	28.87	23.87	22.75	25.14	78	21.11	13.49	9.04	14.54
25	29.53	27.03	29.34	28.61	52	27.29	20.98	19.46	22.56	79	17.56	9.81	6.67	11.34
26	29.00	24.27	26.18	26.46	53	25.19	17.43	16.03	19.53	80	13.88	6.65	4.96	8.49
27	28.47	21.38	22.88	24.22	54	22.30	13.75	12.47	16.16					

發育時間：3 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	28.21	29.53	29.55	29.09	28	19.53	24.14	12.45	18.70	55	13.09	11.52	3.63	9.41
2	27.16	29.39	28.76	28.43	29	16.51	21.11	9.42	15.68	56	9.68	9.02	4.16	7.62
3	24.00	28.21	27.05	26.41	30	13.36	17.56	6.26	12.39	57	6.52	6.52	5.47	6.17
4	20.85	25.98	24.42	23.74	31	10.33	13.75	4.03	9.37	58	3.89	4.42	7.45	5.25
5	17.69	22.56	21.13	20.46	32	7.18	9.94	2.97	6.70	59	2.05	3.10	10.08	5.07
6	14.54	19.14	17.32	16.99	33	4.02	6.52	3.50	4.68	60	1.00	2.71	12.84	5.51
7	11.52	15.72	13.24	13.49	34	2.05	3.76	5.21	3.67	61	1.00	2.97	15.74	6.56
8	8.23	12.17	9.42	9.94	35	0.87	2.84	7.58	3.76	62	1.92	4.15	18.63	8.23
9	5.07	8.76	5.61	6.48	36	0.60	1.79	10.61	4.33	63	3.76	5.99	21.13	10.29
10	2.58	5.34	2.97	3.63	37	1.39	2.71	13.50	5.86	64	6.26	8.36	23.11	12.57
11	0.87	1.79	2.32	1.66	38	2.97	4.42	16.66	8.01	65	9.41	11.25	24.55	15.07
12	0.21	0.21	3.76	1.39	39	5.34	6.91	18.11	10.11	66	12.83	14.28	25.08	17.39
13	0.87	-0.18	6.13	2.27	40	7.31	9.94	19.55	12.26	67	16.12	17.30	25.08	19.49
14	2.31	0.34	9.16	3.94	41	9.41	13.09	22.05	14.85	68	19.53	20.06	24.42	21.33
15	5.34	1.92	12.58	6.61	42	11.78	16.25	24.16	17.39	69	22.43	22.43	22.97	22.60
16	8.49	4.42	16.00	9.63	43	15.20	19.40	25.47	20.02	70	24.79	24.27	20.87	23.30
17	11.65	7.57	19.29	12.83	44	18.75	22.03	26.00	22.25	71	26.50	25.45	18.37	23.43
18	14.67	11.12	22.18	15.99	45	21.90	24.40	25.74	24.00	72	27.29	25.98	15.61	22.95
19	17.83	14.80	24.68	19.10	46	24.40	26.11	24.68	25.06	73	27.16	25.58	12.71	21.81
20	20.98	18.61	26.39	21.99	47	26.37	26.90	22.97	25.41	74	26.24	24.27	9.95	20.15
21	24.14	22.03	27.18	24.44	48	27.42	26.77	20.61	24.92	75	24.40	22.43	7.45	18.09
22	26.11	24.79	27.18	26.02	49	27.55	25.84	17.97	23.79	76	21.90	19.93	5.47	15.77
23	27.55	27.16	26.26	26.98	50	26.77	24.00	14.82	21.86	77	18.88	17.17	4.29	13.44
24	27.82	28.34	24.68	26.94	51	25.19	21.77	11.66	19.53	78	15.59	14.15	4.16	11.30
25	27.29	28.74	21.66	25.89	52	22.82	18.88	8.76	16.82	79	12.17	11.12	5.08	9.46
26	25.71	28.21	18.63	24.18	53	19.93	16.51	6.26	14.23	80	8.89	8.36	6.66	7.97
27	22.69	26.63	15.47	21.59	54	16.64	14.01	4.42	11.69					

發育時間：3.5 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	30.58	28.87	30.58	30.01	28	22.03	23.61	22.82	22.82	55	10.07	14.15	13.36	12.52
2	29.92	28.74	29.92	29.53	29	18.75	20.46	19.40	19.53	56	7.18	11.12	9.68	9.32
3	28.21	27.69	26.50	27.47	30	15.46	16.91	15.85	16.07	57	4.81	7.97	5.99	6.26
4	24.79	25.71	22.95	24.49	31	12.17	13.09	12.44	12.57	58	3.37	4.81	2.31	3.50
5	21.38	22.43	19.40	21.07	32	9.02	9.41	9.02	9.15	59	2.97	2.58	-0.05	1.83
6	17.83	19.01	15.85	17.56	33	5.60	6.13	5.60	5.78	60	3.76	1.26	-1.50	1.17
7	14.41	15.59	12.44	14.15	34	3.50	3.23	2.05	2.93	61	5.34	1.00	-1.89	1.48
8	10.86	12.30	8.89	10.68	35	2.58	1.39	-0.32	1.22	62	7.57	1.66	-1.10	2.71
9	7.44	8.89	5.34	7.22	36	2.58	0.47	-1.76	0.43	63	10.46	3.37	0.74	4.86
10	3.89	5.47	1.79	3.72	37	3.10	0.74	-2.16	0.56	64	13.49	6.39	4.29	8.05
11	1.92	2.05	-0.71	1.09	38	4.68	1.79	-1.24	1.74	65	16.64	9.41	7.83	11.30
12	1.13	0.47	-2.16	-0.18	39	6.91	1.79	0.60	3.10	66	19.53	12.57	11.52	14.54
13	1.26	-0.18	-1.89	-0.27	40	9.81	4.94	4.15	6.30	67	22.16	15.59	15.07	17.61
14	2.45	0.47	-1.50	0.47	41	12.96	8.10	7.83	9.63	68	24.40	18.75	18.75	20.63
15	4.42	2.18	0.60	2.40	42	16.25	11.25	11.52	13.01	69	25.98	21.77	22.30	23.35
16	7.18	4.68	3.37	5.07	43	19.40	14.41	15.20	16.34	70	26.63	24.92	25.98	25.84
17	10.46	7.83	6.91	8.40	44	22.30	17.43	18.88	19.53	71	26.63	26.63	28.34	27.20
18	14.01	11.52	11.12	12.22	45	24.66	20.72	22.56	22.65	72	25.71	27.69	29.79	27.73
19	17.56	15.33	15.33	16.07	46	26.37	23.87	26.24	25.49	73	24.00	27.69	30.18	27.29
20	20.98	19.01	19.53	19.84	47	27.16	26.11	28.61	27.29	74	21.90	26.90	29.53	26.11
21	24.00	22.16	23.35	23.17	48	27.16	27.69	29.92	28.26	75	19.27	25.19	27.82	24.09
22	26.24	25.06	26.50	25.93	49	26.37	28.08	30.31	28.26	76	16.12	22.16	24.27	20.85
23	27.95	27.16	28.87	27.99	50	24.79	27.69	29.66	27.38	77	12.96	19.01	20.72	17.56
24	28.74	14.80	30.18	24.57	51	22.56	26.50	27.82	25.63	78	9.81	15.85	17.04	14.23
25	28.47	14.80	30.45	24.57	52	19.67	23.48	24.27	22.47	79	7.05	12.70	13.49	11.08
26	27.29	14.80	29.66	23.92	53	16.64	20.32	20.59	19.18	80	4.94	9.54	9.81	8.10
27	25.32	26.11	26.24	25.89	54	13.22	17.30	16.91	15.81					

發育時間：4 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	33.21	31.79	32.05	32.33	28	18.35	17.97	20.21	18.83	55	2.84	6.53	8.76	6.04
2	33.08	31.53	31.79	32.11	29	15.20	14.55	16.53	15.42	56	-0.18	3.76	5.08	2.88
3	31.89	30.21	30.21	30.75	30	12.17	11.13	12.84	12.04	57	1.13	0.87	1.39	1.13
4	28.21	27.84	27.58	27.86	31	9.02	7.71	9.16	8.62	58	3.37	0.74	-0.71	1.13
5	24.53	24.03	24.03	24.18	32	5.86	4.29	5.47	5.21	59	6.78	1.79	-1.89	2.23
6	20.85	20.08	20.34	20.41	33	2.71	0.87	1.66	1.74	60	10.33	4.95	-2.03	4.42
7	17.17	16.13	16.66	16.64	34	-0.45	0.34	-0.71	-0.27	61	13.88	8.11	-0.84	7.05
8	13.36	12.32	12.97	12.87	35	1.39	0.61	-0.71	0.43	62	17.43	11.26	1.13	9.94
9	9.68	8.37	9.42	9.15	36	4.42	2.45	-0.71	2.05	63	20.98	14.42	4.68	13.36
10	5.99	4.42	5.74	5.38	37	7.83	5.74	-0.18	4.46	64	24.53	17.58	8.37	16.82
11	2.31	0.47	2.05	1.61	38	11.91	9.16	1.00	7.35	65	27.03	20.74	12.05	19.93
12	-1.50	-0.05	-1.63	-1.06	39	16.12	12.58	4.68	11.12	66	14.80	24.03	15.61	18.13
13	0.47	0.74	0.47	0.56	40	20.06	15.87	8.37	14.76	67	15.20	26.39	19.29	20.28
14	3.63	3.11	3.37	3.37	41	23.74	19.29	12.05	18.35	68	14.93	27.84	22.97	21.90
15	7.57	6.79	7.05	7.13	42	26.63	22.71	15.74	21.68	69	27.55	28.37	26.66	27.51
16	11.65	10.61	11.13	11.12	43	28.74	26.13	19.29	24.71	70	24.27	28.11	28.76	27.03
17	15.72	14.29	15.61	15.20	44	29.79	28.11	23.11	26.98	71	20.98	26.92	29.82	25.89
18	19.67	18.11	19.68	19.14	45	29.92	29.16	26.79	28.61	72	17.56	23.76	29.95	23.74
19	23.74	21.79	21.92	22.47	46	28.87	29.16	28.89	28.96	73	14.28	20.61	28.89	21.24
20	27.82	25.61	24.16	25.84	47	25.98	28.24	29.95	28.04	74	10.86	17.45	27.05	18.44
21	29.92	28.11	26.53	28.17	48	23.08	26.26	29.95	26.41	75	7.57	14.29	23.50	15.11
22	30.97	29.82	28.89	29.88	49	20.19	23.50	29.03	24.22	76	4.15	11.26	19.82	11.73
23	30.97	30.34	30.08	30.45	50	17.30	20.74	26.92	21.64	77	1.79	7.97	16.26	8.67
24	29.79	29.82	30.21	29.92	51	14.41	17.84	23.37	18.53	78	0.47	4.82	12.58	5.95
25	27.69	28.24	29.42	28.43	52	11.52	15.08	19.68	15.42	79	0.60	2.45	9.03	4.02
26	24.66	24.82	27.58	25.67	53	8.62	12.18	16.00	12.26	80	1.92	1.26	5.34	2.84
27	21.51	21.39	23.89	22.25	54	5.73	9.42	12.45	9.19					

發育時間：4.5 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	31.10	32.18	32.55	31.94	28	20.19	19.68	15.20	18.35	55	8.89	6.00	3.37	6.08
2	30.71	31.92	31.50	31.37	29	16.51	16.00	11.25	14.58	56	5.34	2.58	1.13	3.01
3	29.26	30.47	29.26	29.66	30	12.83	12.18	7.44	10.81	57	1.66	0.47	-0.32	0.60
4	26.77	27.97	25.06	26.59	31	9.15	8.50	3.50	7.05	58	-0.58	-0.97	-1.24	-0.93
5	22.95	23.89	20.85	22.56	32	5.47	4.82	1.00	3.76	59	-1.76	-1.37	-0.45	-1.19
6	19.01	19.82	16.64	18.48	33	1.79	1.00	-0.97	0.60	60	-1.76	-0.45	1.13	-0.36
7	15.07	15.61	12.44	14.36	34	-0.45	-1.11	1.26	-0.10	61	-0.71	1.39	3.23	1.31
8	11.12	11.53	8.36	10.33	35	-1.76	-2.03	-0.05	-1.28	62	1.39	3.89	6.78	4.02
9	7.18	7.32	4.02	6.17	36	-1.89	-1.50	0.34	-1.02	63	4.94	7.58	10.46	7.66
10	3.23	3.24	-0.18	2.09	37	-0.97	0.34	2.58	0.65	64	8.49	11.26	14.15	11.30
11	-0.71	-0.97	-1.10	-0.93	38	1.00	2.58	5.73	3.10	65	12.04	14.95	17.69	14.89
12	-1.50	-0.97	-0.71	-1.06	39	4.55	6.13	9.28	6.65	66	15.59	18.63	21.38	18.53
13	-1.37	-1.37	1.52	-0.40	40	8.23	9.82	12.96	10.33	67	19.14	22.32	25.06	22.16
14	0.47	2.18	5.21	2.62	41	11.78	13.37	16.64	13.93	68	22.69	26.13	27.55	25.45
15	4.02	5.74	8.89	6.21	42	15.46	17.05	20.19	17.56	69	26.37	28.24	29.13	27.90
16	7.70	9.29	12.57	9.85	43	19.01	20.61	23.87	21.16	70	28.47	29.42	29.66	29.18
17	11.38	12.97	16.38	13.58	44	22.69	24.29	27.55	24.84	71	29.66	29.55	29.13	29.44
18	15.07	16.53	20.06	17.21	45	26.37	27.97	29.13	27.82	72	29.79	28.76	27.69	28.74
19	18.75	20.08	23.74	20.85	46	28.61	29.55	29.79	29.31	73	28.74	26.92	25.19	26.94
20	22.43	23.63	27.55	24.53	47	29.79	29.95	29.53	29.74	74	26.63	23.50	22.16	24.09
21	26.11	27.32	15.72	23.04	48	29.92	29.55	28.08	29.18	75	23.87	19.95	18.48	20.76
22	28.34	29.42	16.25	24.66	49	28.87	27.97	25.71	27.51	76	20.19	16.39	14.54	17.04
23	29.79	30.47	16.12	25.45	50	26.90	25.34	22.03	24.75	77	16.51	12.84	10.73	13.36
24	30.05	30.47	29.00	29.83	51	23.35	22.05	18.35	21.24	78	12.83	9.29	6.78	9.63
25	29.26	29.29	26.77	28.43	52	19.80	18.11	14.54	17.48	79	9.15	5.74	3.50	6.13
26	27.42	27.05	22.95	25.80	53	16.12	14.03	10.86	13.66	80	5.47	2.18	1.26	2.97
27	23.87	23.37	19.01	22.08	54	12.57	10.08	7.18	9.94					

發育時間：5 小時														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	31.50	32.42	32.02	31.98	28	15.99	15.72	20.32	17.34	55	8.89	6.00	3.37	6.08
2	28.21	32.02	31.76	30.67	29	12.44	12.30	16.64	13.79	56	5.34	2.58	1.13	3.01
3	24.92	30.31	30.31	28.52	30	9.02	8.76	12.96	10.25	57	1.66	0.47	-0.32	0.60
4	21.64	27.69	27.82	25.71	31	5.60	5.21	9.28	6.70	58	-0.58	-0.97	-1.24	-0.93
5	18.22	24.14	24.27	22.21	32	2.18	1.66	5.60	3.15	59	-1.76	-1.37	-0.45	-1.19
6	14.93	20.46	20.06	18.48	33	-1.37	-0.58	1.79	-0.05	60	-1.76	-0.45	1.13	-0.36
7	11.65	16.91	15.33	14.63	34	-1.89	-1.89	-0.32	-1.37	61	-0.71	1.39	3.23	1.31
8	8.23	13.22	10.46	10.64	35	-1.37	-1.89	-1.76	-1.67	62	1.39	3.89	6.78	4.02
9	4.94	9.54	6.13	6.87	36	0.34	-0.97	-1.76	-0.80	63	4.94	7.58	10.46	7.66
10	1.66	5.99	2.05	3.23	37	2.84	1.13	-0.58	1.13	64	8.49	11.26	14.15	11.30
11	-1.76	2.31	-1.10	-0.18	38	5.99	4.68	1.39	4.02	65	12.04	14.95	17.69	14.89
12	-0.32	-1.37	-2.42	-1.37	39	9.81	8.36	4.55	7.57	66	15.59	18.63	21.38	18.53
13	2.05	0.60	-1.24	0.47	40	13.88	12.04	7.70	11.21	67	19.14	22.32	25.06	22.16
14	5.73	3.63	0.87	3.41	41	18.09	15.72	10.99	14.93	68	22.69	26.13	27.55	25.45
15	9.41	7.31	3.50	6.74	42	21.77	19.40	14.15	18.44	69	26.37	28.24	29.13	27.90
16	13.09	11.38	7.31	10.60	43	25.06	23.08	17.30	21.81	70	28.47	29.42	29.66	29.18
17	16.77	15.72	11.25	14.58	44	27.55	26.77	20.59	24.97	71	29.66	29.55	29.13	29.44
18	20.32	19.93	15.20	18.48	45	29.13	29.00	23.74	27.29	72	29.79	28.76	27.69	28.74
19	24.14	23.74	19.01	22.30	46	29.79	30.18	27.03	29.00	73	28.74	26.92	25.19	26.94
20	27.82	26.90	22.95	25.89	47	29.26	29.92	29.13	29.44	74	26.63	23.50	22.16	24.09
21	29.66	29.26	26.90	28.61	48	27.69	29.53	30.31	29.18	75	23.87	19.95	18.48	20.76
22	30.45	30.45	29.13	30.01	49	25.32	27.55	29.92	27.60	76	20.19	16.39	14.54	17.04
23	30.18	30.58	30.45	30.40	50	22.30	24.66	29.53	25.49	77	16.51	12.84	10.73	13.36
24	28.74	29.79	30.45	29.66	51	18.48	21.11	27.42	22.34	78	12.83	9.29	6.78	9.63
25	26.24	26.37	29.66	27.42	52	14.41	17.04	24.40	18.61	79	9.15	5.74	3.50	6.13
26	22.82	22.82	27.69	24.44	53	10.33	12.83	20.85	14.67	80	5.47	2.18	1.26	2.97
27	19.40	19.27	24.00	20.89	54	6.52	8.76	16.91	10.73					

實驗五：培養液酸鹼值與魚卵彈性關聯

培養液酸鹼值：6.0														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	28.12	28.12	27.68	27.97	28	-1.32	13.18	-0.44	3.81	55	25.48	12.74	25.92	21.38
2	24.61	27.68	19.33	23.87	29	-0.44	8.79	2.64	3.66	56	24.61	12.30	27.24	21.38
3	20.21	27.24	13.18	20.21	30	3.08	8.79	6.15	6.01	57	23.29	11.86	25.05	20.07
4	10.55	26.80	7.47	14.94	31	7.47	8.35	10.55	8.79	58	22.41	15.38	22.85	20.21
5	5.27	26.36	2.20	11.28	32	11.86	7.91	19.33	13.04	59	21.09	18.89	20.65	20.21
6	0.44	25.92	-2.20	8.06	33	16.26	7.91	22.85	15.67	60	20.21	18.89	18.45	19.19
7	-3.52	21.97	-2.64	5.27	34	20.65	7.47	25.92	18.02	61	18.89	18.45	16.26	17.87
8	-4.39	18.02	-3.52	3.37	35	24.61	7.03	28.56	20.07	62	15.38	18.02	8.79	14.06
9	-5.27	13.18	-4.39	1.17	36	28.56	6.59	28.56	21.24	63	11.42	17.58	5.27	11.42
10	-2.64	8.79	-0.44	1.90	37	29.00	10.55	26.80	22.12	64	3.95	17.14	2.20	7.76
11	1.32	8.79	3.52	4.54	38	28.12	14.94	25.05	22.70	65	0.88	16.70	2.20	6.59
12	5.71	8.79	13.62	9.37	39	26.80	18.89	23.29	22.99	66	1.32	16.26	1.76	6.44
13	10.55	8.35	18.45	12.45	40	25.48	22.41	21.53	23.14	67	2.20	15.82	1.32	6.44
14	20.21	8.35	22.85	17.14	41	22.41	22.85	19.33	21.53	68	3.08	15.38	0.88	6.44
15	24.17	7.91	26.36	19.48	42	18.45	23.29	10.98	17.58	69	3.95	15.38	3.52	7.62
16	27.24	7.91	24.61	19.92	43	14.06	23.73	6.59	14.79	70	4.83	14.94	6.59	8.79
17	27.68	7.47	22.41	19.19	44	5.27	24.17	3.08	10.84	71	8.79	14.50	10.55	11.28
18	28.12	11.86	20.21	20.07	45	1.76	25.05	0.00	8.93	72	12.74	14.06	11.86	12.89
19	28.56	16.26	18.02	20.94	46	-0.88	18.45	-2.20	5.13	73	16.26	13.62	13.18	14.35
20	25.92	20.65	15.82	20.80	47	-0.88	14.50	-1.76	3.95	74	23.73	13.18	14.50	17.14
21	22.85	21.97	13.62	19.48	48	-0.44	14.50	-0.88	4.39	75	25.92	12.74	15.82	18.16
22	18.02	23.29	11.42	17.58	49	0.00	14.06	1.76	5.27	76	24.61	12.30	17.14	18.02
23	13.62	24.61	6.59	14.94	50	3.08	14.06	5.27	7.47	77	23.29	11.86	18.45	17.87
24	3.95	25.92	2.20	10.69	51	6.59	13.62	9.23	9.81	78	21.97	15.38	19.77	19.04
25	0.44	27.68	-0.44	9.23	52	10.98	13.18	16.70	13.62	79	20.65	18.89	21.09	20.21
26	-3.08	21.53	-0.44	6.01	53	14.94	13.18	20.65	16.26	80	19.33	21.97	18.02	19.77
27	-2.20	17.58	-0.44	4.98	54	22.85	12.74	23.73	19.77					

培養液酸鹼值：6.5														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	31.20	29.88	27.24	29.44	28	-1.32	11.42	2.20	4.10	55	25.48	-19.77	10.11	5.27
2	29.00	29.44	26.80	28.41	29	-0.88	6.59	3.52	3.08	56	27.24	-24.17	14.06	5.71
3	25.48	29.00	26.80	27.10	30	0.00	2.64	5.27	2.64	57	28.56	-4.83	18.02	13.91
4	21.09	28.56	26.36	25.34	31	3.52	-3.52	7.03	2.34	58	26.80	-3.08	21.53	15.09
5	11.42	28.12	18.02	19.19	32	7.47	-3.08	8.79	4.39	59	24.61	-0.88	21.97	15.23
6	6.59	20.21	13.62	13.47	33	11.86	-2.20	10.55	6.74	60	22.41	-24.17	22.85	7.03
7	2.20	14.94	8.79	8.64	34	16.26	-1.76	12.30	8.93	61	20.21	-24.17	23.29	6.44
8	-1.76	9.67	4.39	4.10	35	24.17	-0.88	14.06	12.45	62	16.26	-24.17	24.17	5.42
9	-1.76	4.39	5.71	2.78	36	26.80	6.59	18.02	17.14	63	12.30	-24.17	25.05	4.39
10	-1.32	-0.88	7.47	1.76	37	29.00	10.98	21.53	20.51	64	8.79	-24.17	21.97	2.20
11	-0.88	-3.95	8.79	1.32	38	29.88	15.82	24.61	23.43	65	2.20	0.44	14.94	5.86
12	2.64	-3.95	10.55	3.08	39	29.44	19.77	24.61	24.61	66	2.64	-2.64	11.42	3.81
13	7.03	-3.95	11.86	4.98	40	25.92	23.29	24.61	24.61	67	3.08	-4.83	7.47	1.90
14	12.30	-3.95	13.62	7.32	41	22.85	23.73	24.17	23.58	68	3.52	-7.03	7.03	1.17
15	21.09	-3.95	15.38	10.84	42	18.89	24.17	24.17	22.41	69	3.95	-8.79	6.15	0.44
16	25.05	3.95	19.77	16.26	43	14.50	24.61	24.17	21.09	70	4.83	-24.17	5.71	-4.54
17	28.12	9.23	23.73	20.36	44	10.55	25.05	23.73	19.77	71	8.35	-24.17	4.83	-3.66
18	29.88	14.06	26.80	23.58	45	3.08	25.48	15.82	14.79	72	11.86	-24.17	4.39	-2.64
19	29.88	18.89	27.24	25.34	46	0.00	18.45	11.86	10.11	73	15.82	-24.17	3.52	-1.61
20	29.44	22.85	27.68	26.66	47	0.44	14.06	7.91	7.47	74	19.77	-24.61	2.64	-0.73
21	26.80	29.00	28.12	27.97	48	1.32	9.67	7.47	6.15	75	25.48	-24.17	9.23	3.52
22	23.29	27.24	28.56	26.36	49	1.76	5.27	6.59	4.54	76	25.48	-24.17	13.18	4.83
23	19.33	25.48	25.92	23.58	50	2.64	2.20	5.71	3.52	77	25.92	-4.83	16.26	12.45
24	14.50	23.73	22.85	20.36	51	6.59	-2.64	5.27	3.08	78	26.36	-3.08	19.77	14.35
25	5.27	21.97	14.50	13.91	52	10.55	-6.59	4.39	2.78	79	26.80	-0.88	19.77	15.23
26	1.32	19.77	9.67	10.25	53	14.06	-10.98	3.52	2.20	80	22.41	0.44	20.21	14.35
27	-1.76	15.82	5.27	6.44	54	18.45	-15.38	2.64	1.90					

培養液酸鹼值：7.3														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	32.52	31.64	21.53	28.56	28	-0.44	18.45	26.36	14.79	55	14.94	11.86	27.24	18.02
2	30.32	30.76	-1.76	19.77	29	-0.44	17.14	27.68	14.79	56	19.33	15.38	25.05	19.92
3	27.24	29.88	6.59	21.24	30	0.00	16.26	29.00	15.09	57	25.05	18.89	23.73	22.56
4	23.29	29.88	11.86	21.68	31	0.00	14.94	26.80	13.91	58	24.61	18.89	21.97	21.82
5	18.45	26.36	16.70	20.51	32	0.44	13.62	24.17	12.74	59	24.17	18.45	48.77	30.46
6	14.06	22.85	21.09	19.33	33	3.95	12.74	15.82	10.84	60	23.29	18.02	22.85	21.38
7	7.91	18.45	25.05	17.14	34	8.35	11.42	11.42	10.40	61	22.85	17.58	24.17	21.53
8	3.08	13.18	25.05	13.77	35	12.74	10.11	7.03	9.96	62	21.97	17.14	25.92	21.68
9	-1.32	7.47	25.48	10.55	36	16.70	14.06	2.64	11.13	63	18.89	16.70	29.88	21.82
10	-4.39	2.20	25.48	7.76	37	24.17	17.58	-0.88	13.62	64	14.94	13.18	31.64	19.92
11	-3.95	-3.52	25.92	6.15	38	26.80	19.33	21.53	22.56	65	10.98	9.23	33.83	18.02
12	-3.08	-3.52	26.36	6.59	39	28.56	21.09	21.53	23.73	66	7.03	5.27	35.59	15.96
13	0.44	-0.88	18.45	6.01	40	29.44	22.85	48.77	33.69	67	0.88	5.27	36.91	14.35
14	4.39	2.64	13.62	6.88	41	27.24	24.61	48.77	33.54	68	-0.88	5.27	48.77	17.72
15	8.79	5.71	8.35	7.62	42	24.61	26.36	25.05	25.34	69	0.44	5.27	48.77	18.16
16	14.06	11.42	3.95	9.81	43	21.53	21.09	29.00	23.87	70	2.20	4.83	48.77	18.60
17	22.41	17.14	0.00	13.18	44	17.58	17.14	31.20	21.97	71	3.52	4.83	35.15	14.50
18	26.36	25.48	-1.32	16.84	45	13.18	13.18	33.39	19.92	72	5.27	4.83	21.53	10.55
19	28.56	28.56	-3.08	18.02	46	8.79	9.67	35.59	18.02	73	9.23	4.39	13.62	9.08
20	30.32	27.68	-4.83	17.72	47	1.32	5.27	36.91	14.50	74	12.74	8.35	9.67	10.25
21	30.76	26.36	-2.64	18.16	48	-1.32	5.27	48.77	17.58	75	16.26	11.86	5.27	11.13
22	27.68	25.48	0.44	17.87	49	-1.32	4.83	48.77	17.43	76	19.77	15.38	2.20	12.45
23	24.61	24.17	8.79	19.19	50	-1.32	4.83	38.23	13.91	77	25.48	18.45	-0.88	14.35
24	21.09	22.85	13.18	19.04	51	-1.76	4.39	36.91	13.18	78	26.80	18.89	-0.88	14.94
25	16.26	21.97	17.58	18.60	52	3.08	4.39	35.59	14.35	79	27.24	19.77	-0.88	15.38
26	11.86	20.65	21.97	18.16	53	6.59	3.95	31.20	13.91	80	28.12	20.21	-1.32	15.67
27	7.47	19.33	25.48	17.43	54	10.98	7.47	29.44	15.96					

培養液酸鹼值：7.5														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	31.20	28.12	29.88	29.73	28	2.20	3.08	0.88	2.05	55	7.91	21.97	9.23	13.04
2	30.32	21.09	29.00	26.80	29	-1.76	4.83	0.88	1.32	56	12.30	24.61	13.18	16.70
3	29.00	16.70	27.68	24.46	30	-0.88	6.59	0.88	2.20	57	20.21	24.61	20.65	21.82
4	27.68	11.86	24.17	21.24	31	0.00	8.35	0.88	3.08	58	23.29	24.61	23.29	23.73
5	24.17	6.59	20.21	16.99	32	0.88	10.55	0.88	4.10	59	25.92	24.61	25.48	25.34
6	20.65	2.20	15.82	12.89	33	1.76	14.50	0.44	5.57	60	27.24	24.17	26.80	26.07
7	14.06	-4.83	5.71	4.98	34	2.64	18.89	3.95	8.49	61	26.80	21.09	25.48	24.46
8	8.79	-3.95	2.20	2.34	35	7.03	22.85	7.91	12.60	62	25.92	14.06	24.17	21.38
9	3.52	-3.08	-1.76	-0.44	36	11.86	25.48	12.30	16.55	63	23.29	10.11	22.41	18.60
10	-1.32	-2.20	-2.20	-1.90	37	19.77	25.05	20.21	21.68	64	19.77	6.59	19.33	15.23
11	1.32	-1.32	-2.64	-0.88	38	23.29	24.17	23.29	23.58	65	16.26	3.52	15.82	11.86
12	3.95	7.03	-3.52	2.49	39	25.92	23.73	25.92	25.19	66	12.30	0.44	12.30	8.35
13	6.59	11.86	-0.88	5.86	40	25.92	22.85	27.24	25.34	67	8.79	-2.64	4.83	3.66
14	9.67	17.14	2.64	9.81	41	26.36	21.97	26.80	25.05	68	1.32	-1.32	2.20	0.73
15	12.30	21.09	7.03	13.47	42	26.80	14.06	25.92	22.26	69	0.88	0.44	0.00	0.44
16	14.94	25.05	11.86	17.28	43	24.61	10.11	23.29	19.33	70	0.44	2.20	0.44	1.03
17	18.02	25.05	19.77	20.94	44	21.09	6.15	19.77	15.67	71	0.00	3.95	1.32	1.76
18	22.41	25.05	23.29	23.58	45	17.14	2.64	16.26	12.01	72	-0.44	10.98	1.76	4.10
19	25.92	25.05	25.92	25.63	46	12.74	0.00	12.30	8.35	73	2.20	14.50	2.64	6.44
20	28.12	25.05	28.12	27.10	47	11.86	1.76	8.79	7.47	74	5.27	18.45	5.27	9.67
21	28.12	25.48	27.68	27.10	48	10.55	3.52	1.32	5.13	75	9.23	21.53	9.23	13.33
22	28.12	17.14	26.80	24.02	49	9.67	5.71	0.88	5.42	76	13.18	23.73	12.74	16.55
23	27.68	12.74	24.61	21.68	50	8.35	7.47	0.44	5.42	77	20.65	22.41	19.77	20.94
24	24.17	7.47	21.09	17.58	51	7.47	9.23	0.00	5.57	78	23.29	20.65	22.85	22.26
25	20.21	3.52	17.14	13.62	52	6.15	11.42	-0.44	5.71	79	25.48	19.33	25.05	23.29
26	15.82	-0.44	12.74	9.37	53	5.27	14.94	2.20	7.47	80	26.80	17.58	25.92	23.43
27	5.71	1.32	4.83	3.95	54	3.95	18.89	5.27	9.37					

培養液酸鹼值：8.0														
T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$				T $\frac{1}{30}$ s.	$\Delta Y(\text{cm})$			
	I	II	III	AVG		I	II	III	AVG		I	II	III	AVG
1	32.08	26.80	27.68	28.85	28	6.15	7.91	18.89	10.98	55	3.95	3.08	-3.95	1.03
2	31.64	25.05	27.24	27.97	29	1.76	3.52	14.50	6.59	56	8.35	6.59	-4.39	3.52
3	31.20	23.29	26.80	27.10	30	-2.20	-0.44	5.27	0.88	57	17.58	15.38	-1.76	10.40
4	30.76	21.53	26.36	26.22	31	-4.83	-3.08	1.32	-2.20	58	21.53	19.33	1.32	14.06
5	27.24	19.77	25.48	24.17	32	-4.39	-2.64	-2.20	-3.08	59	25.05	22.85	4.83	17.58
6	22.85	18.02	21.53	20.80	33	-3.95	-1.76	-4.83	-3.52	60	25.48	25.92	13.18	21.53
7	12.30	15.82	17.14	15.09	34	-0.88	-0.88	-5.27	-2.34	61	25.92	27.68	17.58	23.73
8	7.03	11.42	12.74	10.40	35	3.08	2.20	-6.15	-0.29	62	26.36	28.12	21.09	25.19
9	1.32	6.15	8.35	5.27	36	7.03	5.71	-4.39	2.78	63	27.24	26.80	25.05	26.36
10	-3.08	1.76	3.08	0.59	37	16.70	14.06	-1.32	9.81	64	24.17	24.61	25.92	24.90
11	-6.15	-2.20	-1.32	-3.22	38	21.09	18.45	2.20	13.91	65	20.65	21.53	24.61	22.26
12	-6.59	-2.64	-4.39	-4.54	39	24.61	22.41	6.59	17.87	66	16.26	18.02	22.85	19.04
13	-3.95	-3.08	-6.59	-4.54	40	27.68	25.48	15.82	22.99	67	7.47	9.23	21.53	12.74
14	0.00	-3.52	-6.59	-3.37	41	27.24	27.68	19.77	24.90	68	3.08	5.71	19.77	9.52
15	4.39	-0.44	-6.15	-0.73	42	26.80	27.68	23.29	25.92	69	0.00	2.20	18.02	6.74
16	9.67	3.52	-3.95	3.08	43	26.36	27.68	25.92	26.66	70	-1.32	-0.44	10.11	2.78
17	19.77	12.74	-0.44	10.69	44	25.92	25.92	25.92	25.92	71	-2.64	0.44	5.71	1.17
18	24.17	17.58	3.52	15.09	45	22.41	23.29	25.92	23.87	72	-3.95	1.32	2.20	-0.15
19	27.24	21.97	8.35	19.19	46	18.02	19.33	26.36	21.24	73	-1.76	2.20	-0.88	-0.15
20	27.24	25.48	17.58	23.43	47	8.79	10.55	23.73	14.35	74	1.32	3.08	-0.88	1.17
21	27.68	28.12	21.53	25.78	48	3.95	6.15	20.21	10.11	75	4.83	3.95	-1.32	2.49
22	27.68	30.32	25.05	27.68	49	0.00	2.20	16.26	6.15	76	9.23	7.91	-1.32	5.27
23	28.12	29.88	25.05	27.68	50	-2.64	-0.88	7.47	1.32	77	11.42	15.82	-1.76	8.49
24	25.05	27.68	25.48	26.07	51	-2.64	-0.88	3.52	0.00	78	13.62	19.33	0.88	11.28
25	20.65	25.05	25.48	23.73	52	-2.64	-0.88	0.00	-1.17	79	16.26	22.85	3.95	14.35
26	17.14	21.09	25.92	21.38	53	-2.64	-0.88	-3.08	-2.20	80	18.45	25.05	11.42	18.31
27	11.42	12.30	22.85	15.53	54	0.44	-0.44	-3.52	-1.17					

評語

結合幾項傳統技術自製出振盪器以量測物體的結構特性，並運用於斑馬魚卵作為實例。作品具有創意，並有很大的潛力可以改善該振盪器的偵測能力，該儀器亦有廣泛的應用潛力，堪稱佳作。建議在儀器的精準度及校正上進行補強及改進，振盪器中的線圈裝置部分亦可改為周期驅動器，讓量測數據中具有更多的自由度，可量測出更多的結構物性。

2011 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

編號：140018

作品名稱

Studies of Cell Elasticity by Nonlinear Damping

得獎獎項

二等獎

美國團隊正選代表:美國第 62 屆國際科技展覽會

作者姓名

Nai-Wen Hu

Janet Yun-Chen Sung

Abstract

The compartments of cell organization can frequently be associated to their adhesive and elastic properties. In this study, we investigate the bio-mechanical properties of zebrafish embryos through damping oscillations. We construct a homemade electromagnetic oscillator coupled to an optical lever to enhance the viscoelastic responses. This device allows us to extract the viscous damping coefficient and elasticity of cells in various stages of embryonic development, through nonlinear damping processes. The strain of the cell in each developing period can be obtained by measuring the alternations in the amplitudes of the damped oscillations. The elasticity of the zebrafish embryo in the blastula period is significantly lower than those of other periods, reflecting the reduction in the buffer resistance of the outer shell. A temporal exponent that indicates the growth rate of cell development can also be extracted from the nonlinear damping profile. This proper time of embryonic development is found to be noticeably different in each stage, which can be coupled to the changes in cell compartments. Modifications of the fluid compartments of the outer shell by emerging the embryo into solutions of slightly different pH values would significantly alter the oscillation profile. Surprisingly, the viscosity of the shell is extremely sensitive to the environment experienced.

INTRODUCTION

The project identifies the mechanical system of a zebrafish embryo utilizing an unique homemade electromagnetic oscillator. By looking into the oscillation curves, the relationship between biological structure and physical properties are fully observed. This experimental method is able to investigate forces such as stress force and adhesive force. The project proves that subtle changes in biological structure can be measured by its physical characteristics.

MOTIVATION

We learned in biology class that a cell's function is greatly affected by its shape, and the shape is decided by the cell's elasticity. This physical characteristic is a result of cytoskeleton movement and inner cellular structure. However, cytoskeleton and subtle structural changes can only be observed under expensive equipment such as Scanning Electron Microscope (SEM). Therefore, we wish to develop an easier experimental method that enables us to observe the subtle changes in biological structure.

RESEARCH GOALS

The project aims to understand the relationship between physical characteristics and structural changes in biological cell. Furthermore, a new experimental method which is low-cost and capable of extracting precise data for biophysics research is established.

MATERIALS AND METHODS

I. Apparatus: Electromagnetic Oscillator

The Electromagnetic Oscillator is designed to apply appropriate magnitude of force on the zebrafish embryo and amplify the slight deformation when exerting force on the embryo.

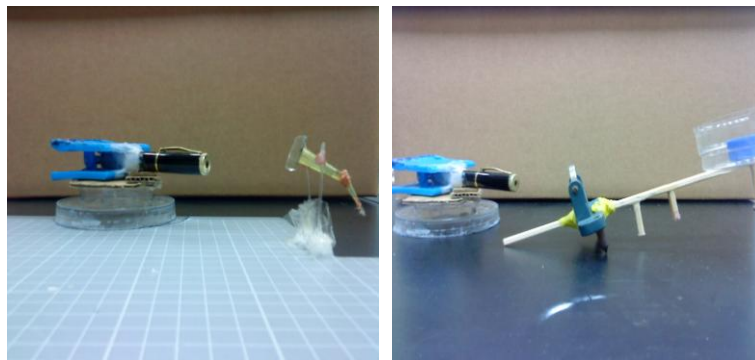


Fig.1. Early models of the electromagnetic

There are four forces in this mechanical system: gravity, electromagnetic induction, cell stress and cell adhesion. The apparatus is able to tell the measurement of cell elasticity and cell adhesion.

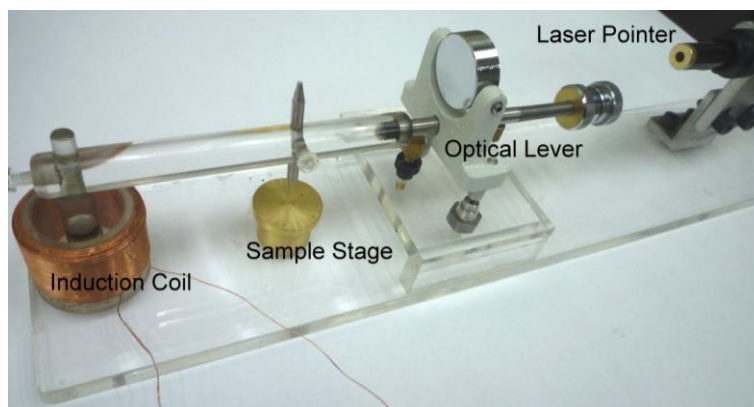


Fig.2. Photo image of the electromagnetic

Induction Coil

When an electric current is passed through the induction coil, due to the magnetic effect in current, the strong magnet fixed at one end of the apparatus will be pulled by the coil and further exert a force on

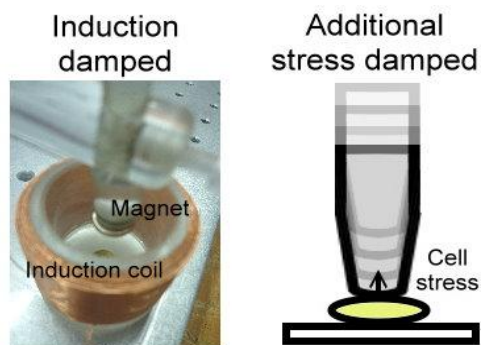


Fig.3. Schematic plot of the two damping mode.

the testing body put onto the sample stage.

Different magnitude of force is exerted to the testing body by adjusting the value of the electric current input. Also, the tip of the probe is specially designed to make sure that the force is exerted equally to the testing body, in this case, the zebrafish embryo.

Oscillation

The current passed through the induction coil initiate the oscillation. This oscillation is caused by gravity and the induced magnetic field. Figure 4 is a typical oscillation curve obtained from the oscillation of pure apparatus without any testing body on the sample stage.

The oscillation curves give details on the mechanical system. If a material is put on the sample stage, the oscillation curve changes. By analyzing the change,

we can understand the physical properties of this material.

Optical Lever

Optical lever is a device used to amplify small angular displacement in thermal expansion experiment.

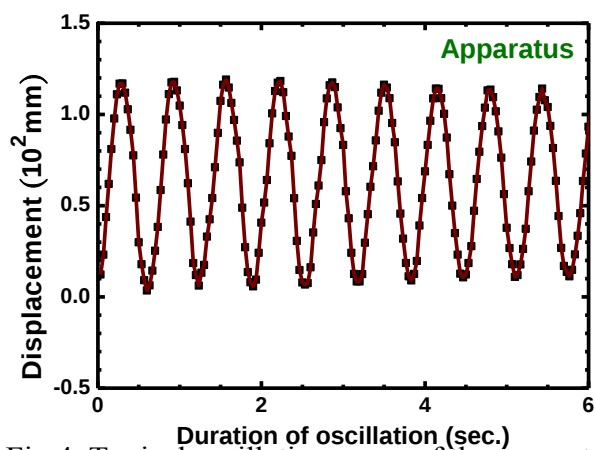


Fig.4. Typical oscillation curve of the apparatus.

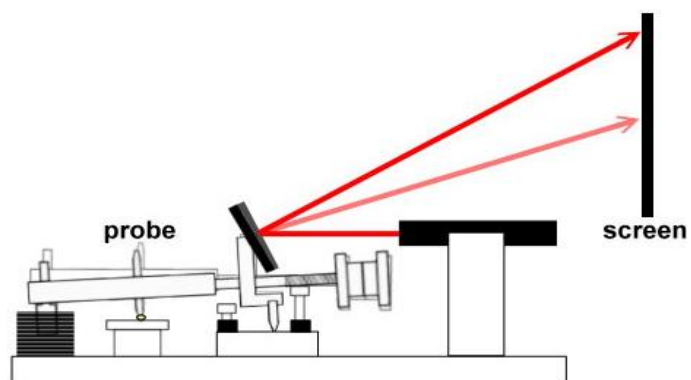


Fig.5. Schematic illustration demonstrating the function of the optical

A beam of laser light is directed to the mirror of the apparatus, and reflects on the screen. Once the apparatus oscillates, the reflecting light-spot will move along with the oscillation. Using trigonometry and geometry theory, we can easily calculate the slight deformation of the embryo.

Momentum Transfer

Using the piezoelectric force sensor, the instant force applied to the testing body is extracted. Figure 6 illustrates the magnitude of force at the first time of contact during the oscillation. The integration of the data point represents the momentum transfer in each contact. As shown in figure 7, there is also an exponential decrement in the momentum of each contact which proves that there is a damping system coming from the induction.

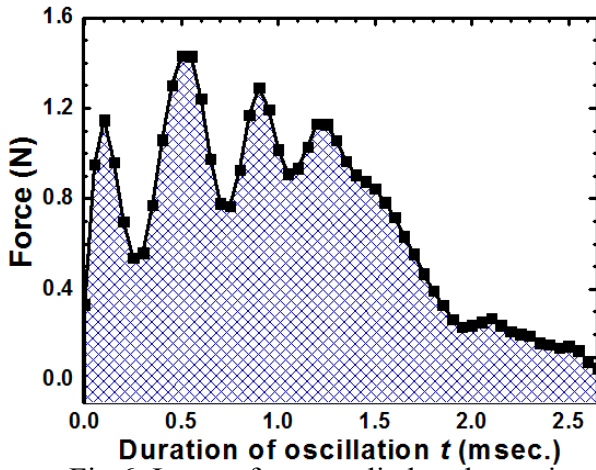


Fig.6. Instant force applied to the testing material at the first time of contact.

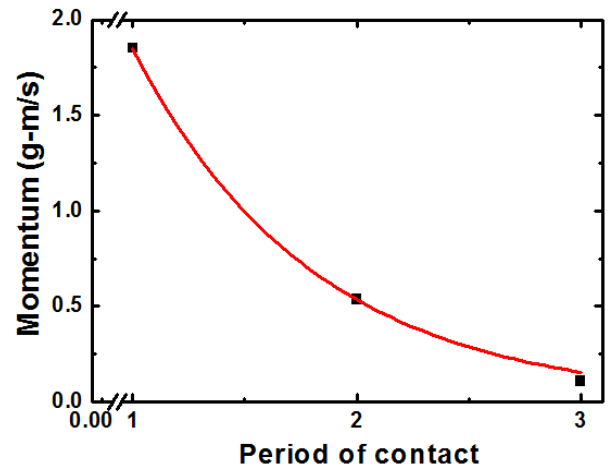


Fig.7. Momentum of each

II. Physical Parameters

The motion of the probe can be described by the following equation of motion:

$$M\ddot{X} = -kX - b\dot{X} + f_c(t, \Delta d)$$

The first and second terms in this equation are the general term for a damped oscillation. As for the cell function, f_c , it represents a complicated force function from the cell. However, in the project, the damping coefficient, b , is not a constant. In addition, the complicated cell function is unclear. Therefore, we add another temporal

exponent into a general damping expression and obtained the following expression which can more precisely describe the motion of the probe:

$$X(t) = A \exp(-\alpha t^\beta) \sin(\omega t + \phi)$$

The oscillation curve resembles the pattern of a sine wave which is indicates in the sine term in our expression. However, due to damping phenomena, the amplitude decreases as in function of time. Therefore an exponent term is added into the expression.

Parameter α is the damping constant of the testing materials. This constant comes from the elasticity of the material. The materials exerted a stress force on the probe of our oscillator. As defined in damping equation, the magnitude of this force is related to the speed of the probe. In our project, the inner structure of the embryo mainly contributes to the value of this constant.

Furthermore, instead of a symmetric pattern for a typical damped oscillation, the oscillation curves obtained shows asymmetry. This asymmetric pattern suggests that there is another force in the mechanical system other than the defined stress force, and the two forces together caused this nonlinear damping. The additional force is defined as β in our equation.

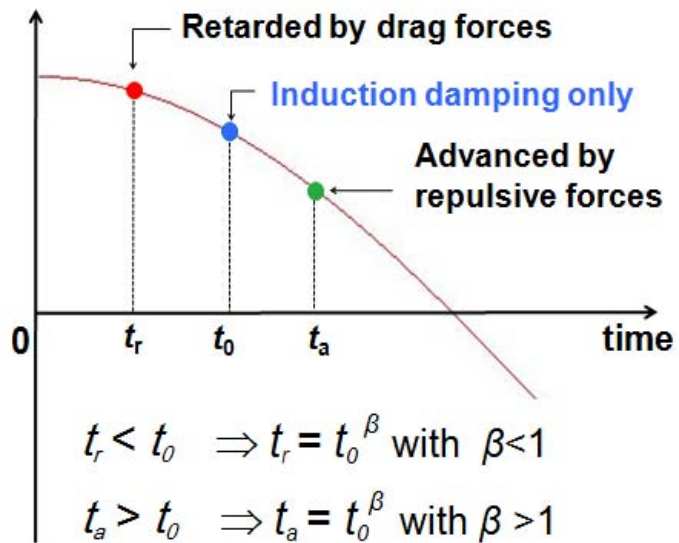


Fig.8. Physical meaning of nonlinear temporal exponent.

This additional force only exists when the probe makes contact with the testing material. The value of β tells the direction of this force. If the motion of the probe is retarded by drag forces, it would give a β value smaller than 1. On the other hand, if the motion is advanced by repulsive forces, β would be greater than 1.

Viscosity

In order to understand the role of α and β in viscosity, we performed our experiment on the glycerol. The viscosity of testing body, such as zebrafish embryo, can be estimated using the result of the experiment.

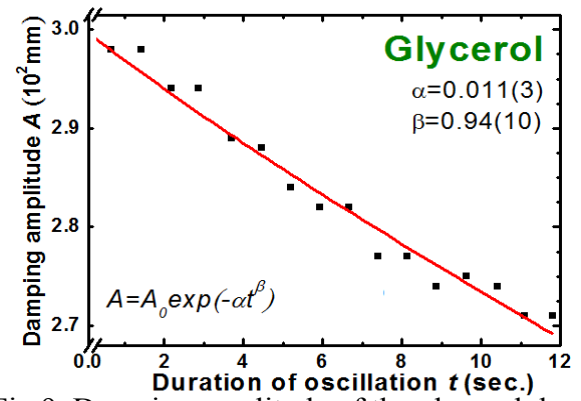


Fig.9. Damping amplitude of the glycerol drop.

III. Zebrafish Embryo

Zebrafish is a common laboratory animal with adequate information in biology. The embryonic development takes about two to three days, dividing into seven broad periods: Zygote Period, Cleavage Period, Blastula Period, Gastrula Period, Segmentation Period, Pharyngula Period, and Hatching Period. The biological structure of the embryo is fully understood, and we can further refer our data to the embryonic development.

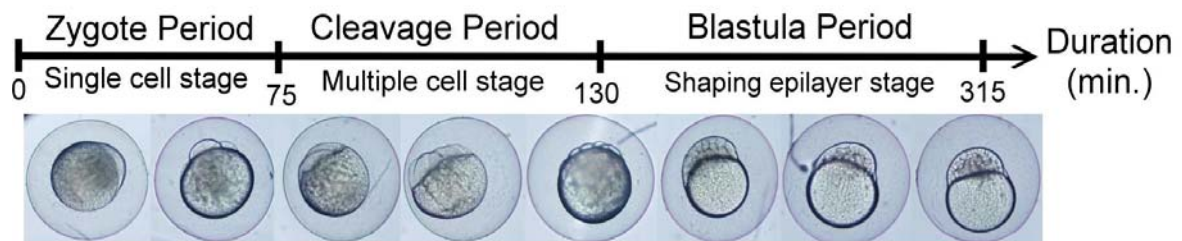


Fig.10. Stages of development for the zebrafish embryo.

The project focuses on the first three periods: Zygote Period, Cleavage Period and Blastula Period.

In Zygote (0-75 mins) Period, the molecules in the yolk are moving toward the animal pole of the embryo to prepare for the cell division. The appearance of the first cleavage marks the end of this period. Only one cell is seen in this period.

As for Cleavage Period (75-130 mins), the embryo mainly goes through its cell mitosis process. The newly divided cells are in a regular orientation, and ultimately, become a compacted structure named Morula. The appearance of this structure marks the start of the Blastula Period.

The cellular differentiation starts in Blastula Period (130-315 mins). The newly divided cells first move toward the animal pole and start to consume nutrient from its

vegetal pole. Then, the blastomere goes through epiboly process, the formation of the three germ layers.

RESULTS AND DISCUSSION

I. Oscillation Curves

The damped oscillation can be described as a forced oscillation with a parameter β in addition to the damping constant α .

Two regimes are identified in the oscillation curve as shown in figure 11: an induction damped regime at the lower portion and a stress damped regime at the upper portion. The tip of the probe contacts the embryo during the stress damped regime and a

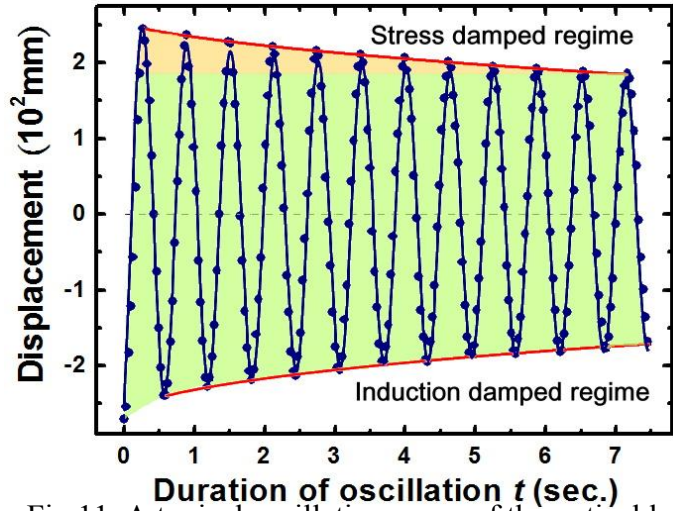


Fig.11. A typical oscillation curve of the optical lever.

dragging force is exerted to the probe.

In the induction damped regime, forces contribute to the oscillation curves are: gravity, damping force from cell stress, and friction. On the other hand, in the stress damped regime, the amplitude of the curve is slightly bigger than the one in the induction damped regime, and thus suggests an adhesive force in this regime.

Respectively, the two parameters used to describe the oscillation reveals the physical characteristics of the system. α describes the damped phenomena and β marks the nonlinearity. The two values are used to calculate cell stress and the interaction force.

II. Nonlinearity

There are two damping system in the mechanical system, one from the oscillator and the other from the zebrafish embryo. Due to the different time scale of the two systems, β is added into the expression to mark the nonlinearity.

Figure 12 compares the endpoints from the stress damped and induction damped regimes. The asymmetric curves prove that other then the stress force from cell deformation, another force is exerted to the probe.

A α value and a β value are given to each of the curves. α_s and β_s are identified according to the endpoints in the stress damped regime, whereas α_I and β_I are given to the induction damped regime.

The differences between the α and β values reveal the mechanical system. The difference between two α values is responsible for the deforming force while the difference between two β values is used to calculate the force from cell reaction.

As shown in figure 12, the amplitude of the stress damped regime decreases at a slower rate than in the induction damped regime. It was expected that the two amplitudes will correspond to each other. However, the data plot reveals that there is an adhesive force against the dragging force from the electromagnetic induction.

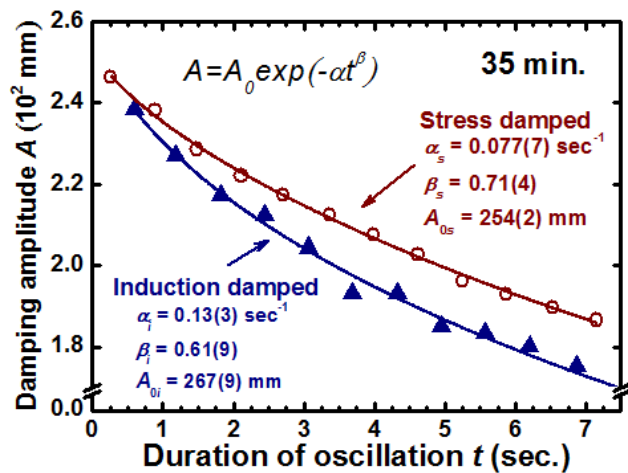


Fig.12. Direct comparisons of the endpoints in the stress damped, and induction damped regimes.

This adhesive force delays the movement of the apparatus. Furthermore, one can conclude that when $0 < \beta < 1$, a force against the dragging force is applied on the probe while when $\beta > 1$, a force in the same direction as the dragging force is exerted and advance the movement of the probe.

APPLICATIONS

The experimental method proposed in this project has a wide range of application. It enables us to observe subtle changes in biomechanical structure by looking into its mechanical system. The biological characteristics which were only visible under the scanning electron microscope (SEM) are represented by α and β values which are measured by the electromagnetic oscillator. To explain how to apply this method into biological experiments, we conducted the following experiment:

I. Mechanical hysteresis

The compressing curve indicates the amount of deformation in the zebrafish embryo, and the releasing curve shows that the cell doesn't maintain the same shape once the pressure is released.

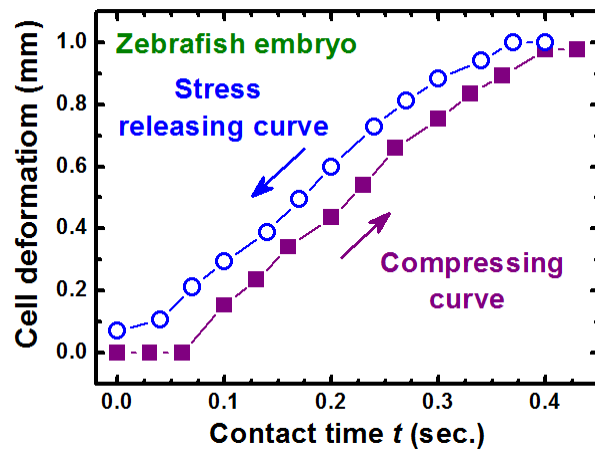


Fig.13. Mechanical hysteresis curve observed in the shaping epiblast stage

The differences in the displacement of the compressing curve and the releasing curve presents a mechanical hysteresis in the deformation of the zebrafish embryo.

This interesting hysteresis phenomenon comes from the viscoelasticity of the zebrafish embryo. The hysteresis suggests the energy lost in the motion.

II. Cell Stress

The same magnitude of force is exerted on the embryo throughout the course of development. The oscillation curves shows how embryos from different stages of development response to the applied stress.

The variation of α_s is shown in figure 14.

In single cell stage, the damping constant weakens reflecting that the cell structure becomes tender. Furthermore, the embryo mainly goes through cell division in the first two stages, single cell and multiple cell stage. Therefore, the damping constants in the two stages are quite similar.

The dramatic rise in the later stage, shaping epilayer stage, marks the beginning of cell migration. The newly divided cells from the previous stages start to move from the vegetal pole to the animal pole of the embryo. This migration process causes the nonuniform local mass distribution in the embryo. Furthermore, the structure of the embryo is comparatively harder in this period.

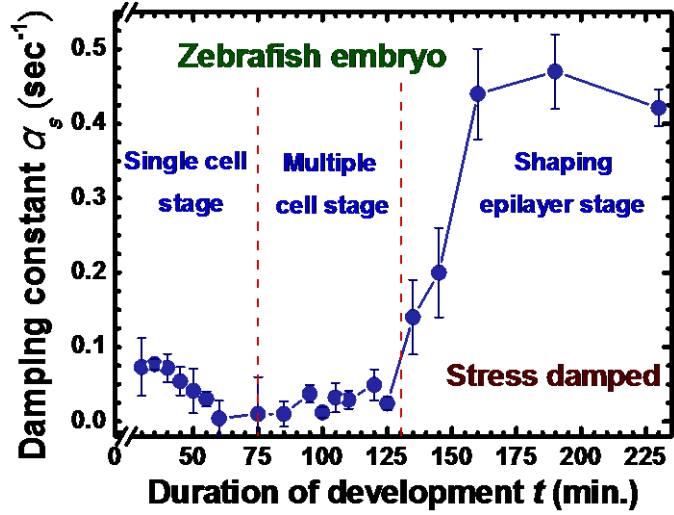


Fig.14. Variations of the damping constant in the cell developing period.

III. Self-protection

In nature, all organisms have their own way to protect themselves. Even just a single cell has its own protecting system. As mentioned before, the nonlinear temporal exponent reflects how the embryo reacts to an external force, either a drag force or a repulsive force. This force is used to protect the embryo from an external force applied on it.

In single cell stage, the temporal exponent gradually increases and reaches unity which demonstrates that the retarded drag forces are weakening.

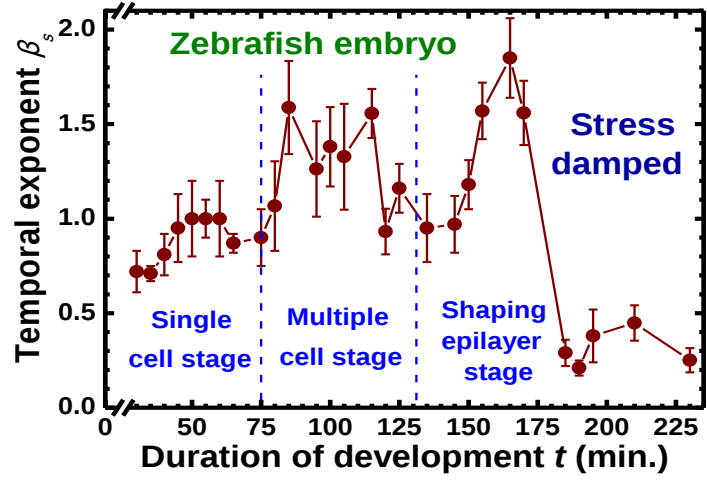


Fig.15. Variations of the temporal parameter in the developing periods.

Later on, the exponent continues increasing and become larger than one indicates that the reaction force is now repulsive.

The self-protection responses of the zebrafish embryo are observed within the three earlier stages. The data shows that the embryo will generate a resisting reaction to protect itself from external force.

IV. Effects of pH pollution

A living cell is very sensitive to environmental variation. Three hours after fertilization, the embryos are put into solutions with different pH values for two hours to simulate the effect of acid rain.

Figure 16 is the amplitude graph of the embryo submerged into solution of different acid level. The embryos in this project are kept in its natural environment with a pH value of 7.4. For the variation, PBS buffer is used to control the pH value.

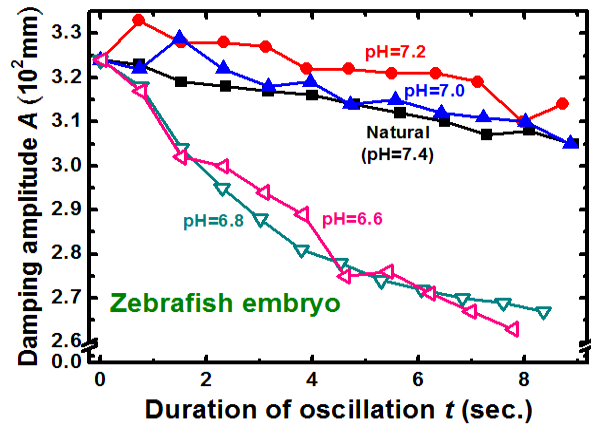


Fig.16. Damping amplitudes taken on the embryos developing in various acidic solutions.

From the figure, amplitudes of embryos submerged into solution ranging from pH7.4 (natural environment) to pH7.0 decreases at a similar rate. However, the oscillation curves alter when the pH value is smaller than 6.8.

Base on direct observation, the acid solution slows down the development of the embryo. Also the H^+ and H_3O^+ ions in the solution open up the porin on the cell membrane which allows ions to diffuse into the embryo.

Other interesting applications are: (a) effects from thermal pollution, (b) detecting the early mutant signal of the cells by looking into its physical properties, and (c) understanding the evolutionary proof of close species by looking into their embryo.

CONCLUSION

1. Cell elasticity and adhesion of zebrafish embryo have been measured using a home-made electromagnetic oscillator. Damping constant α , temporal exponent β , and angular frequency ω can be used to study the deforming force, adhesion, and elasticity of the cell.
2. The existence of cell adhesion is clearly demonstrated as the mechanical hysteresis curves appear in the damping routes.
3. Self-protection of zebrafish embryo is observed, as it generates resistive reactions to the external pressure throughout the development.
4. A slight change in the pH environment can significantly affect the embryo development.

REFERENCES

- [1] M. Krieg, Ph.D. thesis (Technische Universität Dresden, 2009).
- [2] P.-H. Puech, A. Taubenberger, F. Ulrich, M. Krieg, D. J. Muller, and C.-P. Heisenberg, *J. Cell Science* **118**, 4199 (2005).
- [3] B. Ilic, Y. Yang, K. Aublin, R Reichenbach, S. Krylov, and H. G. Craighead, *Nano Lett.* **5**, 925 (2005).
- [4] C. B. Kimmel, W. W. Ballard, S. R. Kimmel, B. Ullmann, and T. F. Schilling, *Dev. Dyn.* 203(3), 253 (1995).

ACKNOWLEDGEMENT

We would like to express our gratitude to:

Professor Chao-Ming Fu of the Department of Physics, National Taiwan University

Professor Wen-Hsien Li of the Department of Physics, National Central University

Professor Huai-Jen Tsai of the Institute of Molecular and Cellular Biology, National Taiwan University

Professor Tzuyin Wu of the Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University

Associate Professor Chung-Jen Wu of the Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University

Professor Kwok-Tung Lu of the Department of Life Science, National Taiwan Normal University

Mr. Wen-Sheng Chen of Taipei First Girls' High School

Research fellows Chih Yuan Shiao, David Li, Ming-Liang Wei and faculty of General Physics Lab, National Taiwan University

Faculty of the Chao-Ming Fu's Lab, National Taiwan University

Faculty of the Wen-Hsien Li's Lab, National Central University

Faculty of the Huai-Jen Tsai's Lab, National Taiwan University

Faculty of the Equipment Center, Taipei First Girls' High School

Last but not least, our beloved family, friends, classmates and teachers who have been so supportive all the time.