

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051813

芬達棒棒棒-童玩中有趣現象之物理變因探討

學校名稱：新北市立板橋高級中學

作者： 高二 何冠霆 高二 張羽萱	指導老師： 茅崇德 郭柔含
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：芬達棒、步進馬達

摘要

芬達棒是一款旋轉時能產生像泡泡一般視覺效果的玩具，並且在來回轉動時會出現結點。我們利用步進馬達連接芬達棒，運用 MEXE 02 程式設定參數來探討結點位置與不同轉動狀態的關係。最後針對結點位置結果來分析推論造成其可能發生原因。



芬達棒(靜置時)



壹、 研究動機

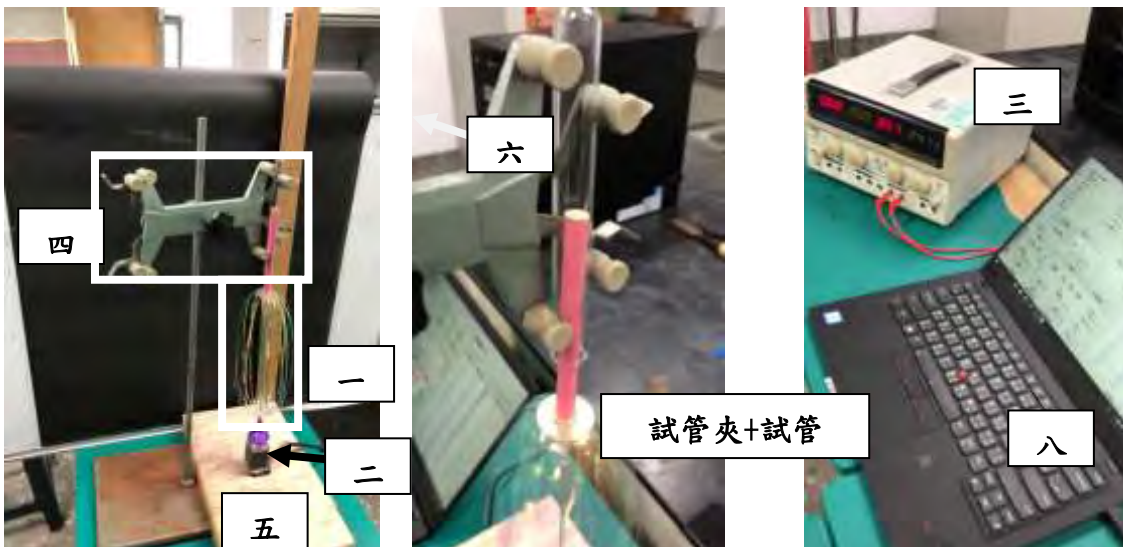
近日老師和我們分享了一款叫做芬達棒(Sparkling Spindle)的產品，我們看到後感到既新奇又驚奇，沒想到這東西外表看似簡單無奇，不過是幾條紙帶加上一支棍子，旋轉起來居然能有泡泡的效果，而且還能做出各種造型變化，雪人、開花、還能收成球。被這美麗的旋轉圖形震驚之餘，在好奇心驅使之下，我們決定好好利用科展的機會來好好研究芬達棒這玩意兒，探討究竟是哪些因素影響而造成這些現象，讓它能夠如此令人驚奇！

貳、 研究目的

- 一、 研究一 探討馬達轉速對芬達棒結點位置的影響
- 二、 研究二 探討角加速度對結點範圍中間位置的影響
- 三、 研究三 在相同速度下模擬結點發生狀況來找出打結原因
- 四、 研究四 改變下盤重量對結點的影響
- 五、 研究五 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

參、 研究設備及器材

- 一、 芬達棒
- 二、 步進馬達(可調整轉速、可知道明確速度並且可減少旋轉時人為因素)
- 三、 電源供應器
- 四、 芬達棒固定裝置(支架+試管夾+試管)
- 五、 馬達固定裝置(木片)
- 六、 木尺
- 七、 手機攝影底座(木塊)、攝影背景(以白板為底+黑紙黏上面為背景)
- 八、 筆電(操控程式)
- 九、 高速攝影機
- 十、 鹵素燈



肆、 研究過程及方法

研究一 探討馬達轉速對泡泡打結位置的影響

一、 研究過程或方式

- (一) 以馬達廠商提供的 MEXE 程式來設定馬達旋轉時的參數(操縱變因為轉速(單位:deg/s)，其餘皆固定不變)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。
- (二) 固定角加速度為 360 (單位: 1000deg/s²)並依次紀錄不同轉速下(1080、1260、1440、1620、1800、1980、2160、2340、2520、2700，單位:deg/s) 芬達棒旋轉時結點位置並求出平均值，同時以手機攝影紀錄以便觀察芬達棒旋轉狀況。

研究二 探討角加速度對打結範圍中間位置的影響

一、 研究過程或方式

- (一) 以馬達廠商提供的 MEXE 程式來設定馬達旋轉時的參數(操縱變因為起動/變速斜率(單位: 1000deg/s²)，其餘皆固定不變)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。
- (二) 依次紀錄四種轉速下(1080、1440、1800、2160，單位:deg/s)，分別測試七組變速斜率(90、180、270、360、450、540、1080，單位: 1000deg/s²)芬達棒旋轉時結點範圍的中間位置，同時以手機攝影紀錄以便觀察芬達棒旋轉狀況。

研究三 在相同速度下模擬結點發生狀況來找出打結原因

一、 研究方法

- (一) 以不同材質替代塑膠條製作芬達棒模型(彈簧、橡皮筋、串珠)
 1. 彈簧、橡皮筋(原長):使用手轉來觀察旋轉情形
 2. 橡皮筋(一半長度)、串珠:以馬達廠商提供的 MEXE 程式來設定馬達旋轉(以相同速度旋轉)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。

(二) 觀察模型上方固定點與中間點(結點出現處)移動的運動現象(圖 3-1)



圖 3-1 自製模型觀測點示意圖

二、研究過程

(一) 我們先利用兩條彈簧固定在板子兩側來做為塑膠條的代替品(圖 3-2、3-3)，用手旋轉並觀察其旋轉的情形。可能因為彈簧本身重量太重不便旋轉且打結現象與芬達棒本身差異很大，甚至出現纏繞的現象(圖 3-3)，無法觀察結點，故決定尋找其他替代材質。



圖 3-2 彈簧模型(靜置)



圖 3-3 彈簧模型(纏繞現象)

(二) 我們先使用剪開的粗橡皮筋固定在板子兩側來做為塑膠條的代替品(圖 3-4、3-5)，重複同彈簧版的實驗步驟。我們發現橡皮筋版本雖有較明顯結點，但也有纏繞的現象因此不便紀錄。



圖 3-4 橡皮筋模型(靜置)



圖 3-5 橡皮筋模型(纏繞現象)

(三) 再來我們將橡皮筋條剪為原長一半長度後，固定在板子兩側來做為塑膠條的代替品(圖 3-6、3-7)，並重複實驗步驟。我們發現橡皮筋依然有纏繞的現象，不便觀察結點，所以我們就決定改尋找不受彈力因素影響的材質。

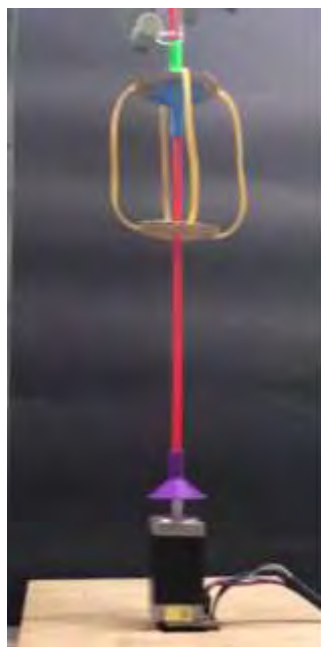


圖 3-6 橡皮筋-短模型(靜置)

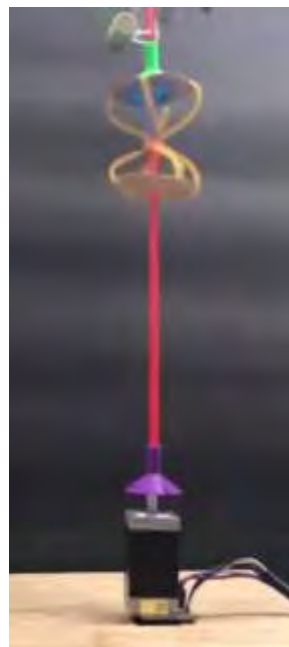


圖 3-7 橡皮筋-短模型(纏繞現象)

(四) 再來我們改成使用釣魚線和串珠串成珠鍊固定在板子兩側(中間使用淺色串珠，
圖 3-8)，重複實驗步驟，得到最接近市售芬達棒的效果。



圖 3-8 珠鍊模型

研究四 改變下盤重量對結點的影響

一、研究過程或方式

(一) 先在芬達棒下盤黏上寶特瓶蓋(重 1 克)，之後以加上黏土在瓶蓋上的方式增加下盤重，分別為原重(1 克)、加上瓶蓋(共重 2 克)、再加上 1、2、3 克黏土(分別共重 3、4、5 克)。

(二) 以馬達廠商提供的 MEXE 程式來設定馬達旋轉時的參數(操縱變因為轉速(單位:deg/s)，其餘皆固定不變)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。改變轉速並以手機攝影紀錄結點位置 (轉速分別為 1260, 1440, 1620, 1800, 1980, 2160, 2340, 2520, 2700，單位:deg/s)。



加上瓶蓋
(下盤重 2g)



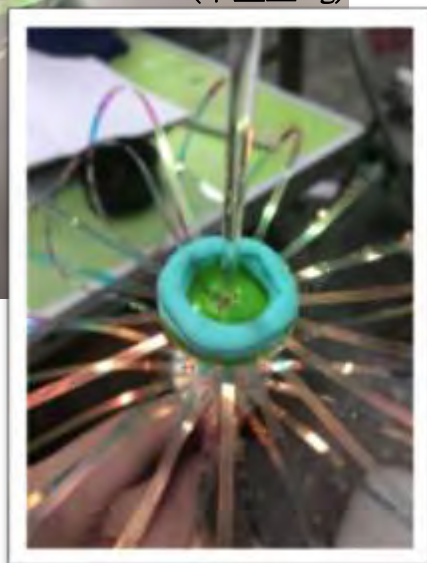
瓶蓋+3g 黏土
(下盤重 5g)



瓶蓋+1g 黏土
(下盤重 3g)



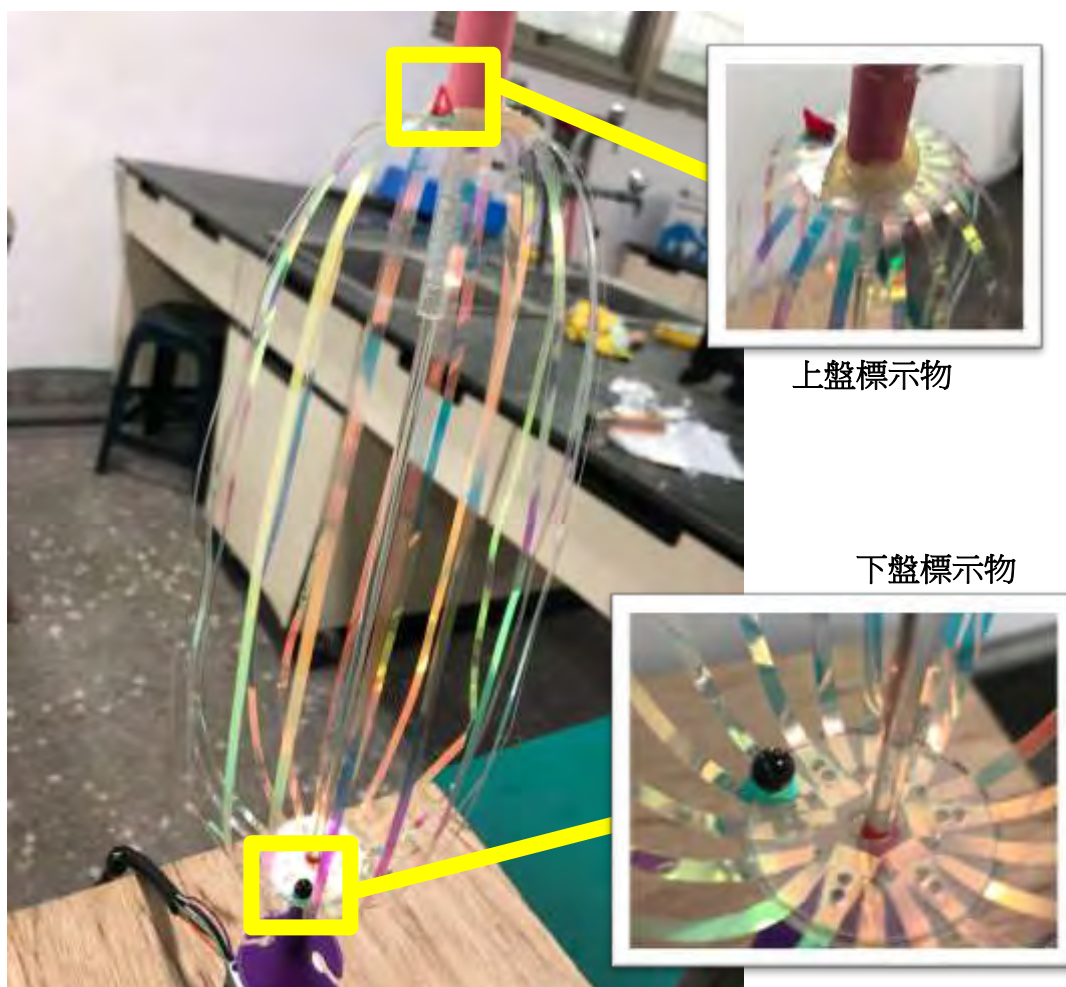
瓶蓋+2g 黏土
(下盤重 4g)



研究五 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

一、研究過程或方式

- (一) 在芬達棒上盤選一處黏上紅色標示物；下盤黏上黑色珠子作為標示以方便觀察。
- (二) 以手機慢動作俯拍以及正拍攝影並選用同一段運動過程截圖分析。
- (三) 將標示物照片轉為手繪紀錄，整理運動過程。



伍、 研究結果

研究一 探討馬達轉速對泡泡打結位置的影響

(一) 發現轉速越快，結點的位置範圍差距會縮小，且數值有下降的趨勢，直到一定速度後，差距達到最小值，數值範圍幾乎無變化

(表 1-1 為實驗數據，表 1-2 為角速度為 1080、2160deg/s 時各自取最高和最低點的實驗照片)

定義: ω 為馬達旋轉時所達之固定角速度 (單位: deg/s)

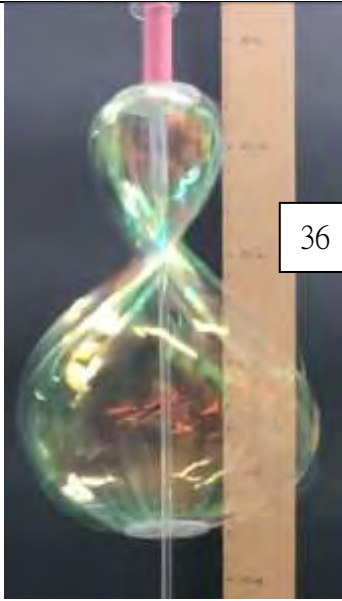
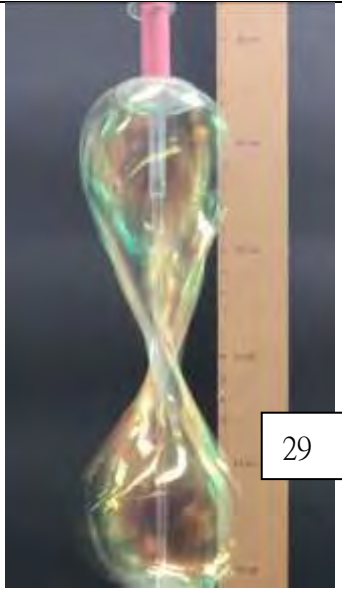

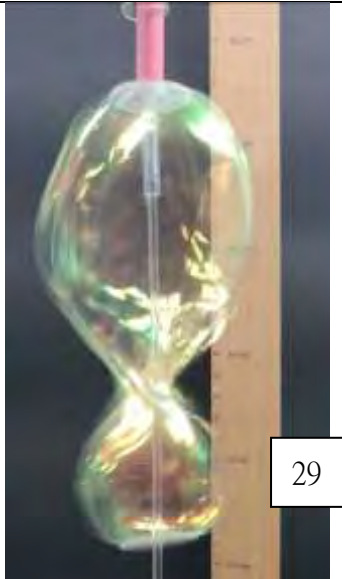
x 為結點發生位置 (單位: cm)

α 為馬達旋轉時之角加速度 (單位: deg/s²)

表 1-1 實驗數據-高、低結點位置- α 皆固定 360deg/s²

ω (單位: deg/s)	x -高(單位: cm)	x -低(單位: cm)
1080	35.1	29.7
1260	34.3	29.1
1440	34.4	28.8
1620	35	29.4
1800	34.7	30.1
1980	32.7	29.8
2160	33.3	30
2340	31.8	29.3
2520	31.1	29.8
2700	31	29.8

表 1-2 實驗照片- α 皆固定 360deg/s^2

ω (單位: deg/s)	x-高(單位: cm)	x-低(單位: cm)
1080		
2160		

研究二 探討角加速度對結點範圍中間位置的影響

- (一) 在固定角速度 1080deg/s 及 1440deg/s 時，增加角加速度，結點的位置有明顯的上升。
- (二) 在固定角速度 1800deg/s 時，增加角加速度，結點位置沒有明顯的改變。
- (三) 在固定角速度 2160deg/s 時，增加角加速度，結點位置數值有下降的趨勢。
- (四) 表 2-1~2-8，兩兩一組分別為四種轉速下拍攝的實驗照片、程式設定參數以及測得位置

表 2-1 實驗數據- ω 為 1080deg/s

ω (單位: deg/s)	α (單位: deg/s ²)	x(單位: cm)
1080	90	31.5
	180	32
	270	32
	360	32.5
	450	33.5
	540	35
	1080	36

表 2-2 實驗照片- ω 為 1080deg/s

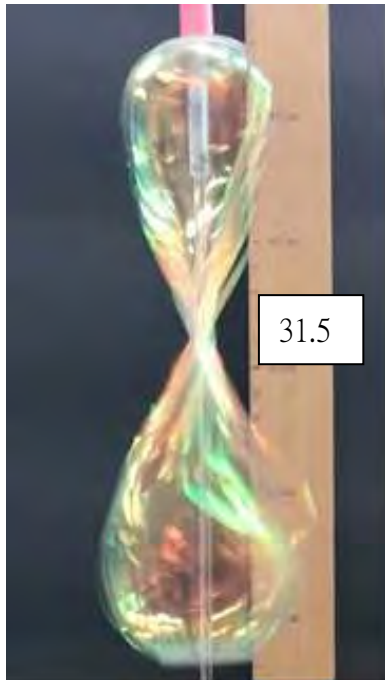
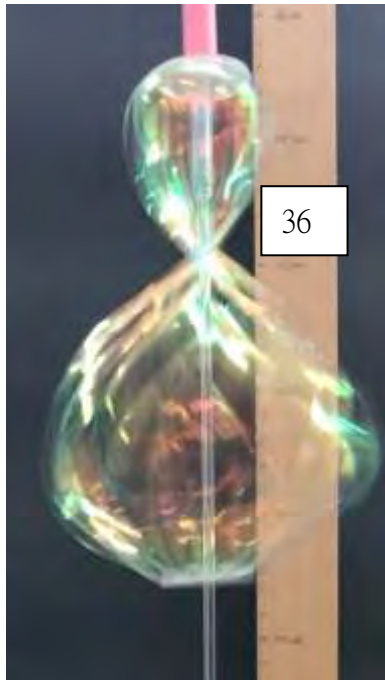
ω (單位: deg/s)	1080	
α (單位: deg/s ²)	90	1080
x(單位: cm)	 <p>31.5</p>	 <p>36</p>

表 2-3 實驗數據- ω 為 1440deg/s

ω (單位: deg/s)	α (單位: deg/s ²)	x(單位: cm)
1440	90	31
	180	32
	270	32
	360	32
	450	33
	540	32.5
	1080	33

表 2-4 實驗照片- ω 為 1440deg/s

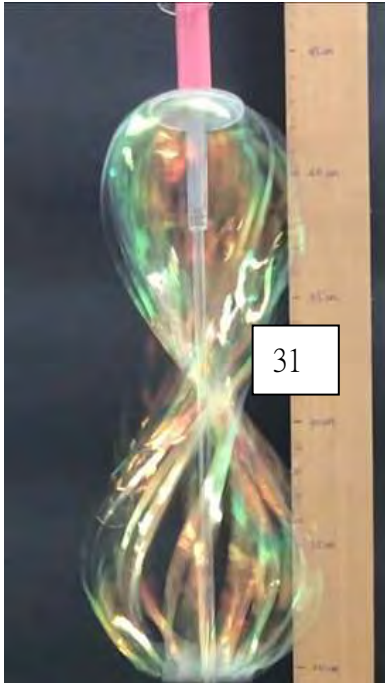
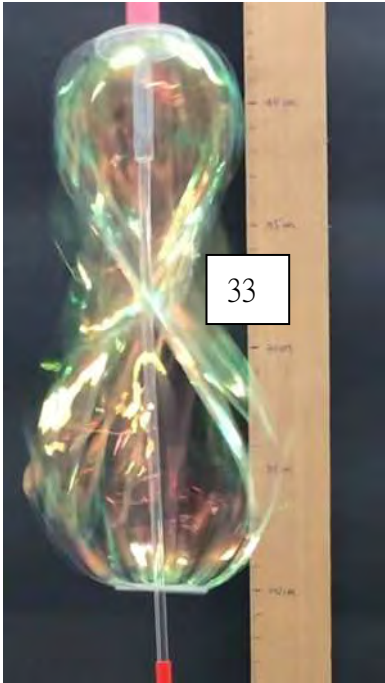
ω (單位: deg/s)	1440	
α (單位: deg/s ²)	90	1080
x(單位: cm)		

表 2-5 實驗數據- ω 為 1800deg/s

ω (單位: deg/s)	α (單位: deg/s ²)	x (單位: cm)
1800	90	31
	180	30
	270	30
	360	30
	450	30.5
	540	31
	1080	31

表 2-6 實驗照片- ω 為 1800deg/s



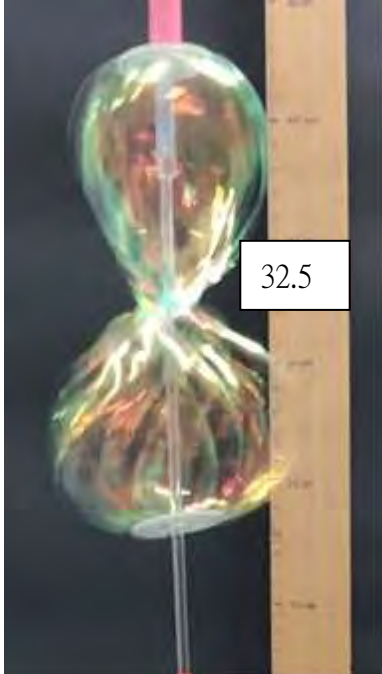
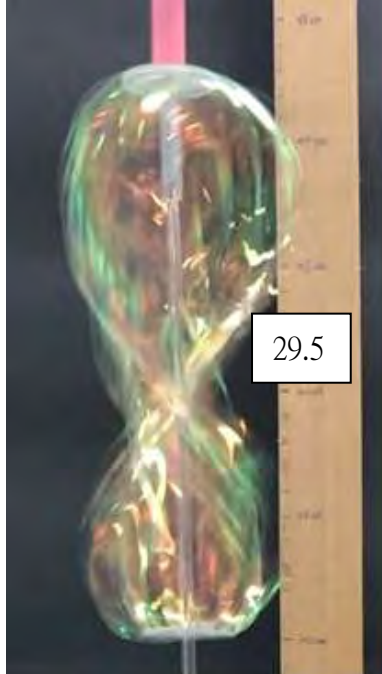
ω (單位: deg/s)	1800	
α (單位: deg/s ²)	90	1080
x (單位: cm)		

表 2-7 實驗數據- ω 為 2160deg/s

ω (單位: deg/s)	α (單位: deg/s ²)	x(單位: cm)
2160	90	32.5
	180	32
	270	31
	360	30
	450	30
	540	29.5
	1080	29.5

表 2-8 實驗照片- ω 為 2160deg/s

ω (單位:deg/s)	2160	
α (單位:deg/s ²)	90	1080
x(單位: cm)		

研究三 在相同速度下模擬結點發生狀況來找出打結原因

- (一) 使用彈簧作為塑膠條替代品時，因為彈簧會纏繞在棍子上，所以不易觀察其結點。
- (二) 改用橡皮筋替代時，纏繞現象減輕但還是不易紀錄結點發生處，故仍不適合做為模擬的工具。
- (三) 最後選用釣魚線串上珠子作為替代，旋轉時狀況最接近市售芬達棒的打結現象，決定利用此模型來探討結點發生的原因。

研究四 改變下盤重量對結點的影響

- (一) 固定角加速度為 $360\text{deg}/\text{s}^2$ 發現一旦改變了下盤的重量，結點現象就會離開原本的規律。增加 1 克時，結點數值就發生明顯下降，但是加重後的系統依舊成規律變化。
- (二) 下各表為五種不同下盤重時結點發生之測得數值整理。

表 4-1 下盤增加 0g

ω (單位: deg/s)	x(單位: cm)
1044	29.167
1260	32.833
1440	32.067
1620	31.333
1800	30.6
1980	30.4
2160	29.433
2340	29.333
2520	28.4
2700	28.167



ω (單位: deg/s)=1044



ω (單位: deg/s)=2700

表 4-2 下盤增加 1g

ω (單位: deg/s)	x(單位: cm)
1260	31.1
1260	31.1
1440	30.333
1620	29.833
1800	29.167
1980	28.333
2160	28
2340	27.067
2520	26.767
2700	25.833



ω (單位: deg/s)=1260



ω (單位: deg/s)=2700

表 4-3 下盤增加 2g

ω (單位: deg/s)	x(單位: cm)
1170	31.333
1260	31.167
1440	30.767
1620	30.833
1800	30.167
1980	30.1
2160	29.367
2340	28.933
2520	28.5
2700	28.333



ω (單位: deg/s)=1170



ω (單位: deg/s)=2700

表 4-4 下盤增加 3g

ω (單位: deg/s)	x(單位: cm)
1035	30.333
1260	29.833
1440	29.167
1620	28.333
1800	28
1980	27.067
2160	26.767
2340	25.833
2520	29.433
2700	28.333



ω (單位: deg/s)=1035



ω (單位: deg/s)=2700

表 4-5 下盤增加 5g

ω (單位: deg/s)	x(單位: cm)
999	30.833
1260	30.667
1440	31
1620	30.833
1800	30.667
1980	30.1
2160	30.167
2340	30
2520	29.433
2700	28.733

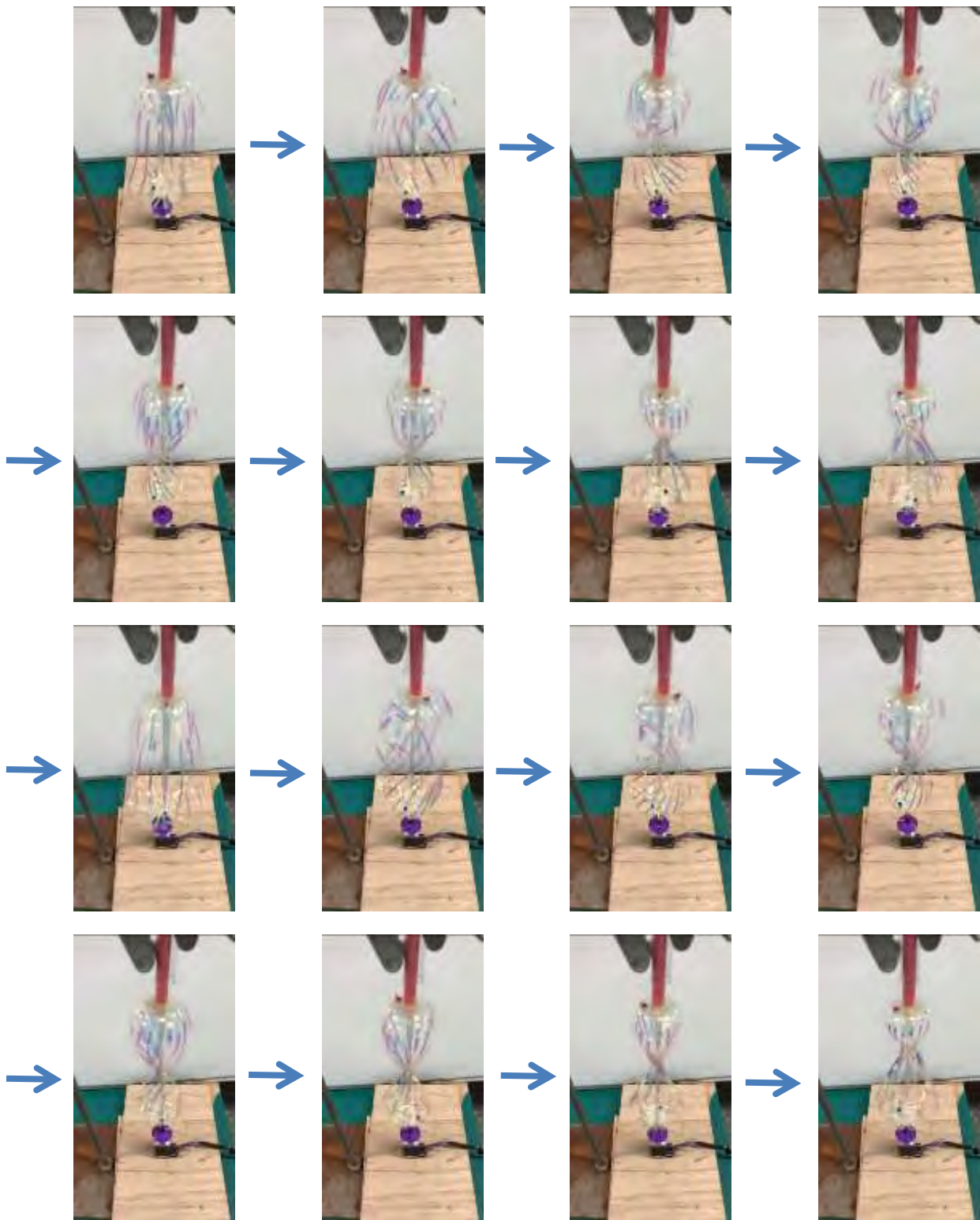


ω (單位: deg/s)=999



ω (單位: deg/s)=2700

研究五 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

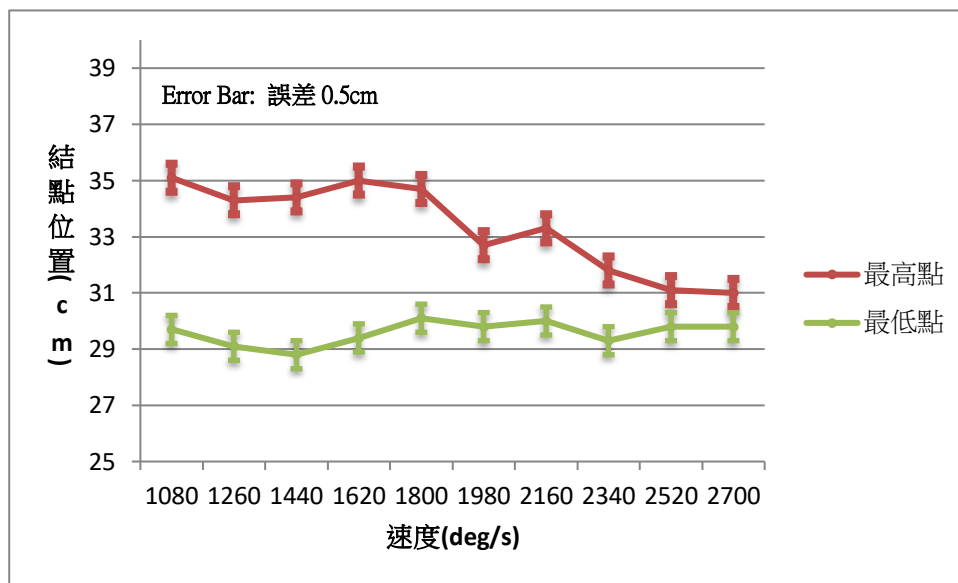


- (一) 發現上盤來回旋轉時實際旋轉角度並未達 360 度，而是 340 ± 10 度
- (二) 下盤旋轉時會稍微超過 360 度
- (三) 詳細過程將會於討論中以手繪表格說明介紹

陸、 討論

一、 研究一 探討馬達轉速對結點位置的影響

(一) 從表 1-1 中能看到主要改變結點範圍的部分是高結點下降所導致，我們推測角速度增加但角加速度不變時，加速所需的時間將變長，傳遞時間也會加長，上下盤傳遞作用力相遇的位置就會下降，也就是結點發生處漸漸往下。

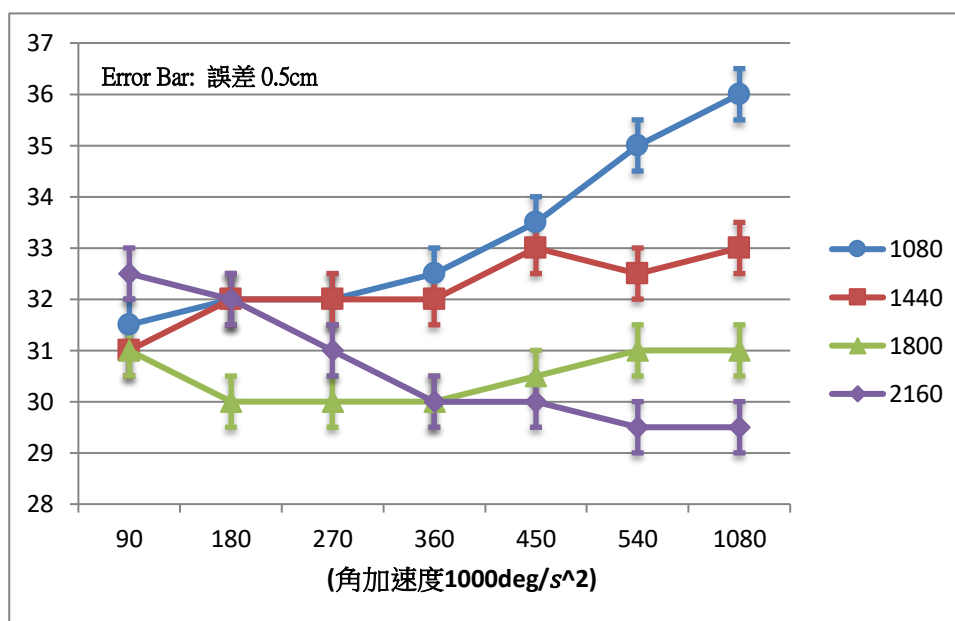


二、研究二 探討角加速度對結點範圍中間位置的影響

本問題是結合問題一的原理加上角加速度的改變。

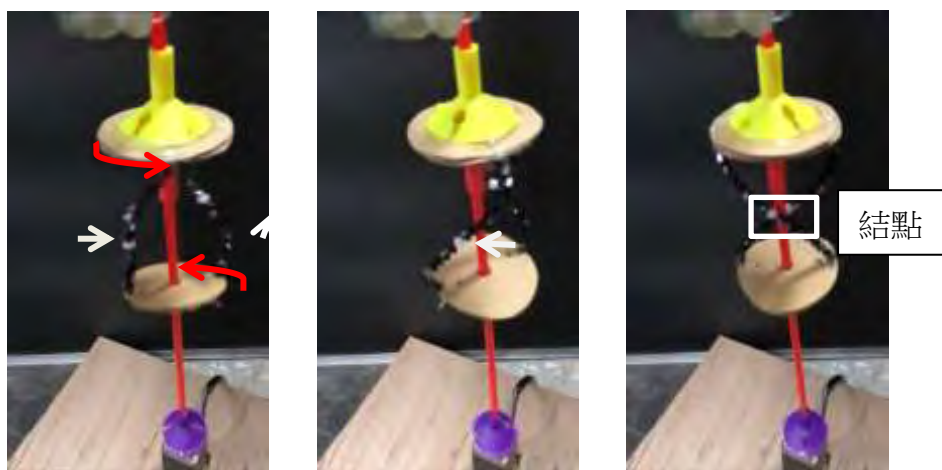
我們推測：

- (一) 在固定角速度 1080deg/s 及 1440deg/s 時，增加角加速度，結點的位置上升是因為角加速度越大，所需時間越短，傳遞時間也會縮短，結點就會向上移動。



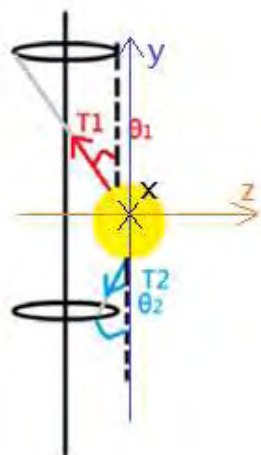
三、 研究三 在相同速度下模擬結點發生狀況來找出打結原因

- (一) 我們將速度設定在 1260deg/s 時，觀察我們的實驗，我們猜測結點的發生可能是因為馬達旋轉時直接帶動上端的固定板，再由上端的固定板帶動其連接的塑膠條等介質，介質進而帶動下端的板子，所以造成上下板子時間上無法同步。馬達旋轉時是以正逆時鐘各一圈順序轉，介質上端被馬達帶動改向時，下端還是依照原方向轉動，故此時會有類似慣性的現象，再加上馬達轉向時帶動上方的扭力和原本下方的慣性作用，兩相反的力造成介質中心點減速向內(朝棍子徑向方向)移動，造成介質在中間位置交會，形成結點。
- (二) 而在介質的選擇上，若使用彈簧、橡皮筋等材質，會有纏繞的現象，很可能是因為這兩種材質都具有彈性，無法真實還原不具彈性的塑膠條旋轉時的樣子。
- (三) 以下圖例以珠鍊版本模型來解釋芬達棒打結過程的運動情形

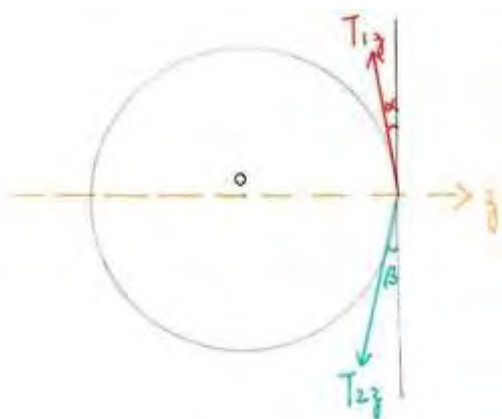


四、分析馬達正、反轉時中間點運動受力情形(以彈簧-乒乓球-彈簧模型解釋):

(一) 正轉: (以乒乓球為主體)

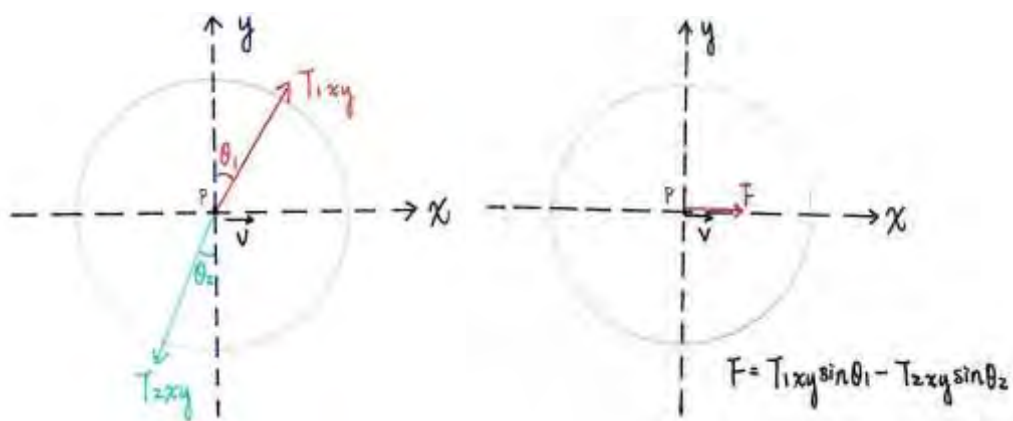


俯視圖(y-z 軸):



$$\text{徑向向內的力} = T_{1z} \sin \alpha + T_{2z} \sin \beta$$

x-y 軸上力圖:



x 軸方向，球受到來自上方 $T_{1xy}\sin\theta_1$ (向右)、下方 $T_{2xy}\sin\theta_2$ (向左)，可從圖中看出上段彈簧伸長量大於下段，故 $T_{1xy}\sin\theta_1 > T_{2xy}\sin\theta_2$ ，球所受合力向右，產生和運動方向相同的加速度，導致速度上升，球所需向心力也隨著上升，一直到徑向向內的力無法提供足夠的向心力時，乒乓球便沿切線方向飛出(圖 3-1)。

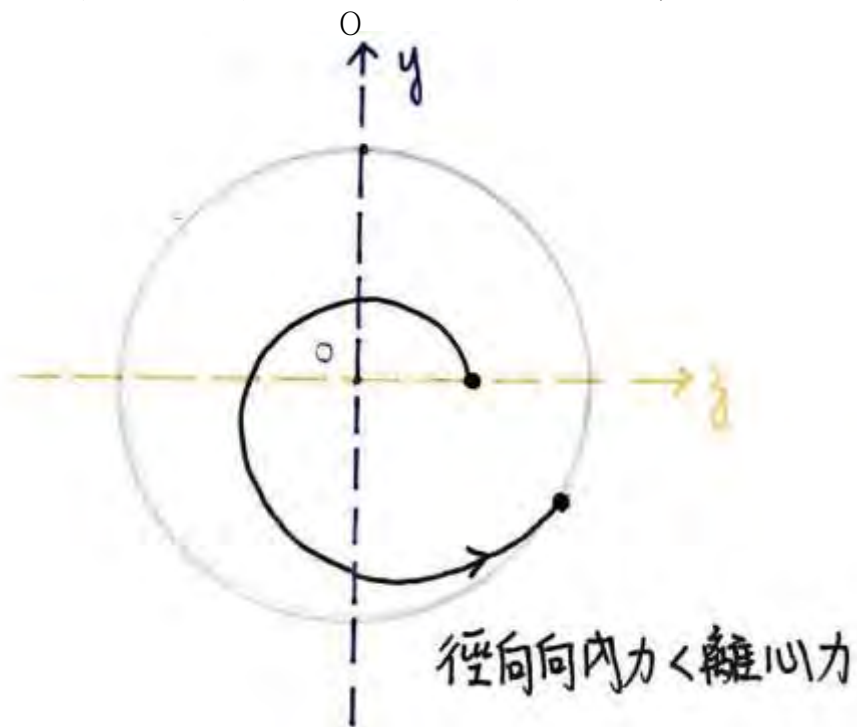
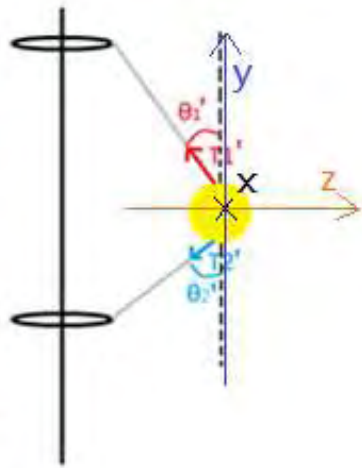
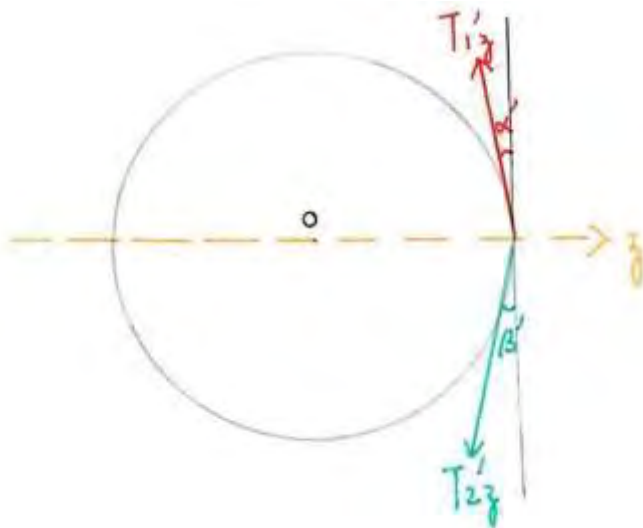


圖 3-1

(二) 反轉:(以乒乓球為主體)

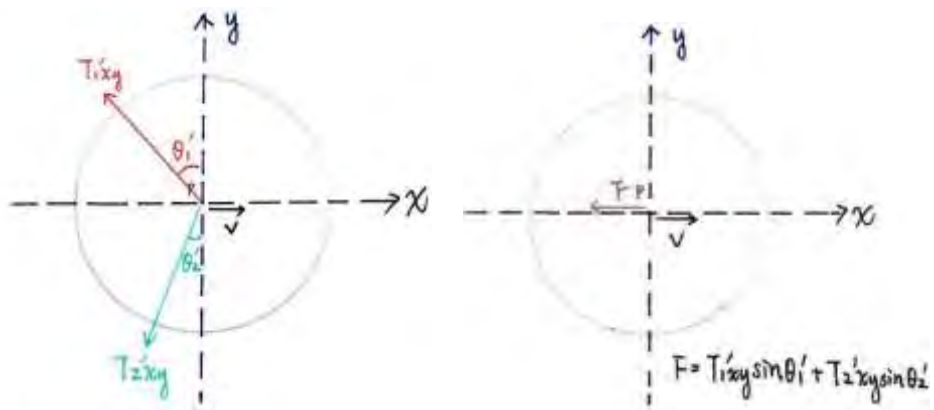


俯視圖(y-z 軸):



徑向向內的力= $T'_{1z} \sin \alpha' + T'_{2z} \sin \beta'$

x-y 軸上力圖:



x 軸方向，球受到來自上方 $T'_{1xy} \sin \theta'_1$ (向左)、下方 $T'_{2xy} \sin \theta'_2$ (向左)，
 可從圖中看出上段彈簧伸長量大於下段，故 $T'_{1xy} \sin \theta'_1 > T'_{2xy} \sin \theta'_2$ ，球所受合力
 向左，產生和運動方向相反的加速度，導致速度減小，球所需向心力也隨著下
 降，當徑向向內的力大於向心力時，乒乓球便向內移動 (圖 3-2)。

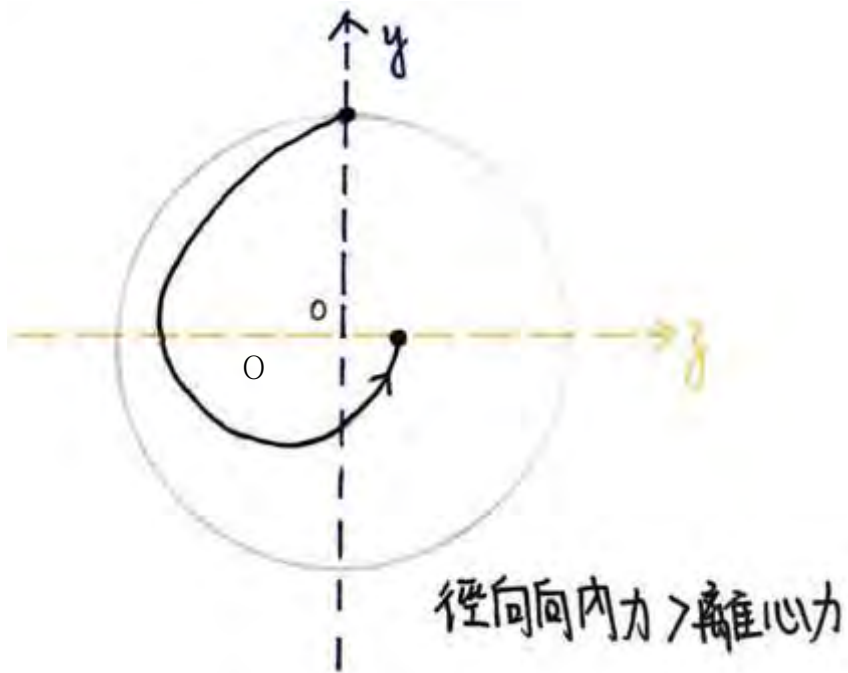


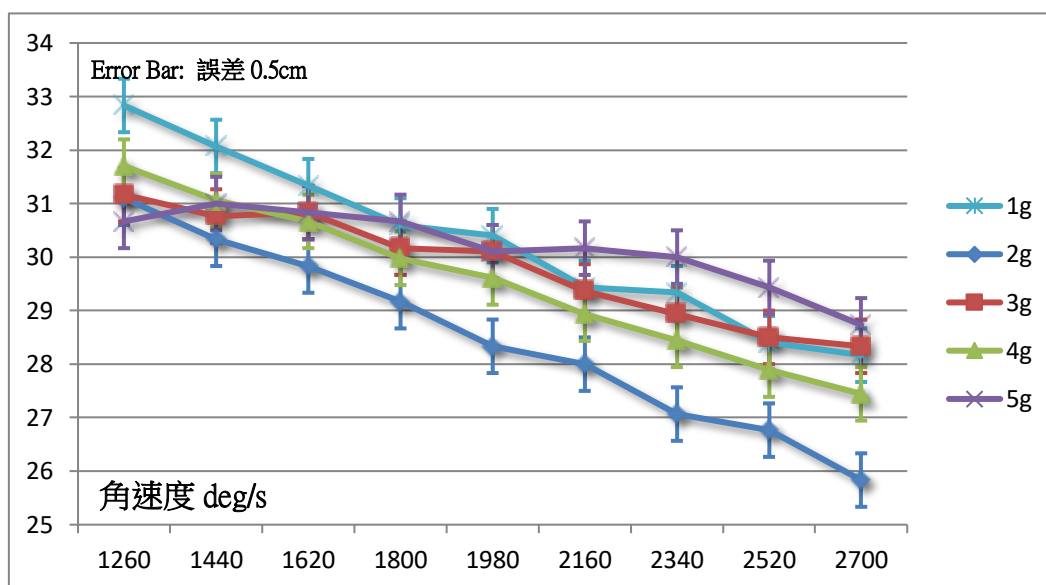
圖 3-2

五、研究四 改變下盤重量對結點的影響

(一) 下盤的加重會使結點向下，而且下盤越重時結點隨轉速變化越小。

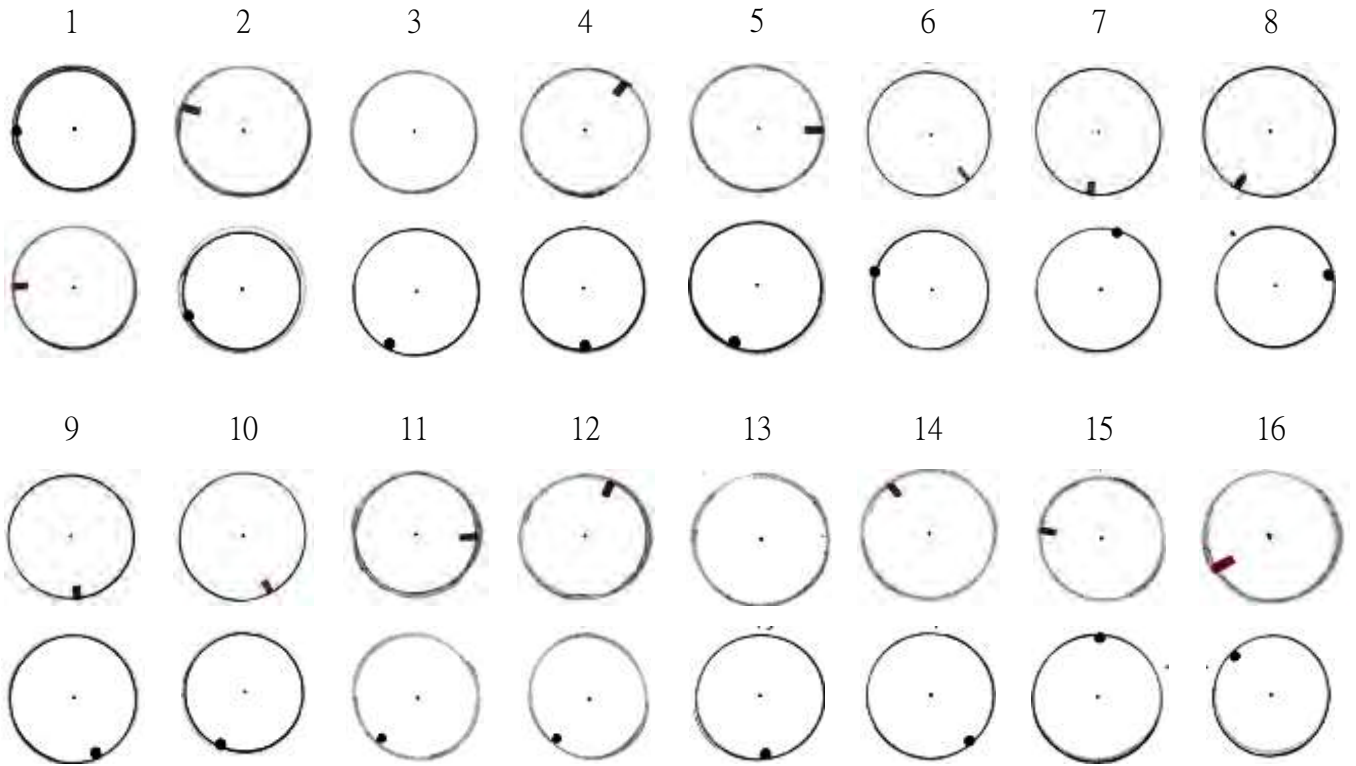
我們推測：

因為我們加重下盤時已經超出塑膠條所能帶動的極限，所以當加重下盤結點數值就會離開原本的規律，但依然遵守**研究一**中結點位置與轉速的關係。



六、研究五 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

(一) 下圖為同運動過程內上、下盤標示物所在位置分解圖(上排為上盤、下盤為下盤)



(二) 將上圖各點整理後繪製成以下圖形:

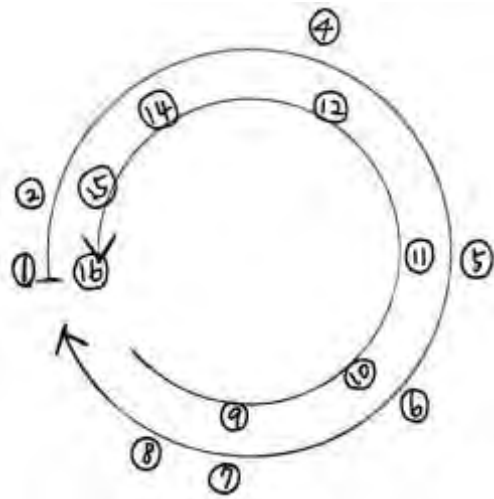


圖 1-上盤標示物運動過程

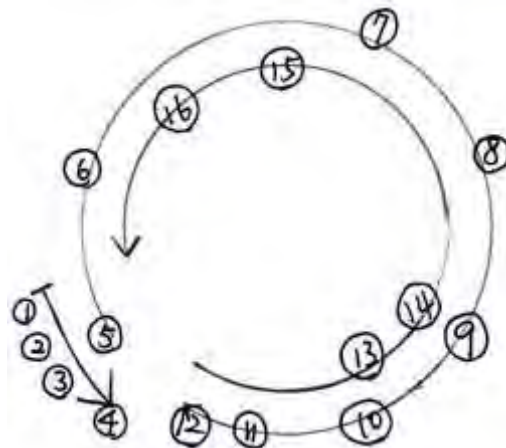


圖 2-下盤標示物運動過程

(三) 在拍攝過程中，發現上、下盤轉動過程週期相同。上盤旋轉角度不到 360 度，我們推測原因可能是：將馬達與芬達棒銜接上的裝置，可能產生些許摩擦力，以至於造成馬達旋轉誤差，故無法達到我們參數設定的 360 度；下盤在馬達運動方向改變的瞬間，則會因為慣性而繼續沿原移動方向轉動，故其旋轉角度會超出 360 度。

(四) 自實驗結果中發現，在第 4、5、6、7 階段時，芬達棒處於產生結點的情況，並推算出上、下盤相位角差約為 150 度至 180 度。

(五) 芬達棒運動時，當下盤近乎靜止，而上盤以正常速度繼續旋轉時，結點即產生。

柒、 結論

- 一、 高結點與低結點的範圍與轉速有很大的關係
- 二、 結點位置的改變與角加速度有很大的關係
- 三、 結點的產生是因為慣性所產生
- 四、 下盤重量對結點位置有很大的關係

捌、 未來展望

- 一、 研究上、下盤轉動時精確測量相位角差的方法，修正我們的實驗數據範圍
- 二、 測試改變下盤重量時對於下盤轉動弧度的影響

玖、 參考資料

- 一、 賽先生科學工廠

<https://www.mr-sai.com/products/%E5%BD%A9%E8%99%B9%E6%B3%A1%E6%B3%A1%E6%A3%92-%E8%8A%AC%E9%81%94%E6%A3%92>

- 二、 台灣東方馬達股份有限公司-步進馬達型錄

https://www.orientalmotor.com.tw/products/st/#_04

- 三、 維基百科-轉動慣量

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%BD%89%E5%8B%95%E6%85%A3%E9%87%8F>

【評語】 051813

本實驗探討玩具芬達棒在旋轉時出現節點的現象，以轉動速率為實驗參數，討論芬達棒節點出現的位置，有詳實的實驗觀察及記錄，研究動機頗新穎，是一項有趣的作品，但是比較聚焦在現象的討論，分析未見新思維，要解決的科學問題不是很清楚。

研究動機

近日老師和我們分享了一款叫做芬達棒(Sparkling Spindle)的產品，我們看到後感到既新奇又驚奇，沒想到這東西外表看似簡單無奇，不過是幾條紙帶加上一支棍子，旋轉起來居然能有泡泡的效果，而且還能做出各種造型變化，雪人、開花、還能收成球。被這美麗的旋轉圖形震驚之餘，在好奇心驅使之下，我們決定好好利用科展的機會來好好研究芬達棒這玩意兒，探討究竟是哪些因素影響而造成這些現象，讓它能夠如此令人驚奇！

研究目的

- ✓ 研究一 探討馬達轉速對芬達棒結點位置的影響
- ✓ 研究二 探討角加速度對結點範圍中間位置的影響
- ✓ 研究三 改變下盤重量對結點的影響
- ✓ 研究四 觀察並推算上、下盤運動時之相位差
- ✓ 研究五 統計芬達棒旋轉時上、下盤之相位差

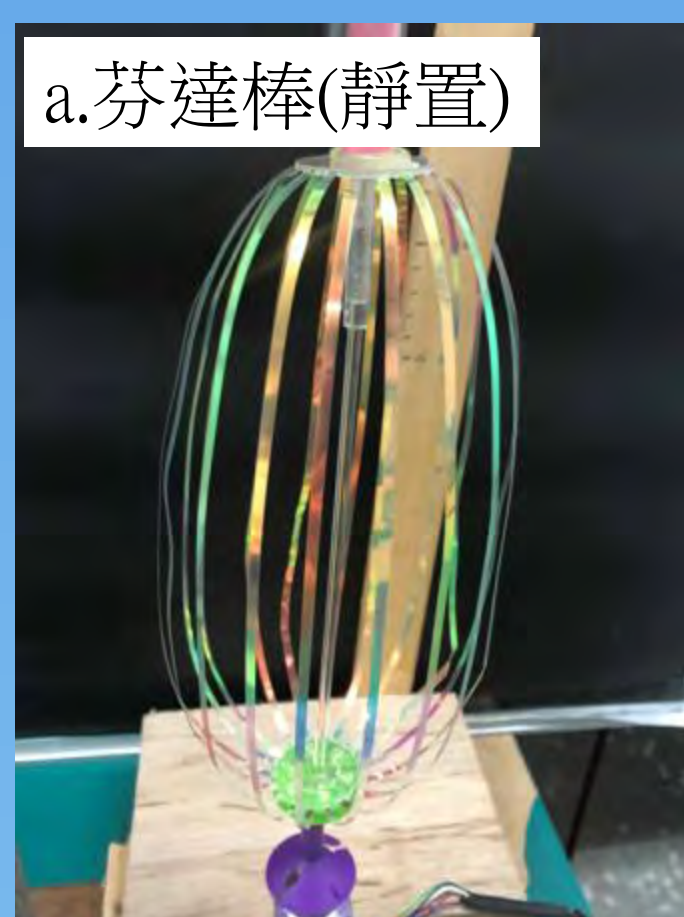


圖1-芬達棒不同型態示意圖

研究設備及器材

名稱	芬達棒	筆電	芬達棒固定裝置	木尺	壓克力板
照片					
備註	所有實驗中皆使用同一支	可透過程式控制參數	支架+試管夾+試管	上頭以1cm為單位標上刻度	上頭繪有角度
名稱	步進馬達	步進馬達驅動器	電源供應器	馬達固定裝置	手機攝影底座
照片					
備註	中央挖洞固定馬達				

圖2-研究設備及器材

研究過程及方法

研究一 探討馬達轉速對泡泡打結位置的影響

- 以馬達廠商提供的MEXE程式來設定馬達旋轉時的參數(操縱變因為轉速(單位: deg/s)，其餘皆固定不變)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。
- 旋轉時固定角加速度為360 (單位: 1000deg/s²)並依次紀錄不同轉速下(1080、1260、1440、1620、1800、1980、2160、2340、2520、2700，單位: deg/s) 芬達棒結點位置並求出平均值，同時以手機攝影紀錄以便觀察芬達棒旋轉狀況。

研究二 探討角加速度對打結範圍中間位置的影響

- 以馬達廠商提供的MEXE程式來設定馬達旋轉時的參數(操縱變因為起動/變速斜率(單位: 1000 deg/s²)，其餘皆固定不變)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。
- 依次紀錄四種轉速下(1080、1440、1800、2160，單位: deg/s)，分別測試七組變速斜率(90、180、270、360、450、540、1080，單位: 1000deg/s²)芬達棒旋轉時結點範圍的中間位置，同時以手機攝影紀錄以便觀察芬達棒旋轉狀況。

研究三 改變下盤重量對結點的影響

- 先在芬達棒下盤黏上寶特瓶蓋(重1克)，之後以加上黏土在瓶蓋上的方式增加下盤重，分別為原重(1克)、加上瓶蓋(共重2克)、再加上1、2、3克黏土(分別共重3、4、5克)。
- 以馬達廠商提供的MEXE程式來設定馬達旋轉時的參數(操縱變因為轉速(單位: deg/s)，其餘皆固定不變)，以順一圈、反一圈、順一圈、反一圈……的方式旋轉。改變轉速並以手機攝影紀錄結點位置 (轉速分別為 1260, 1440, 1620, 1800, 1980, 2160, 2340, 2520, 2700，單位: deg/s)。

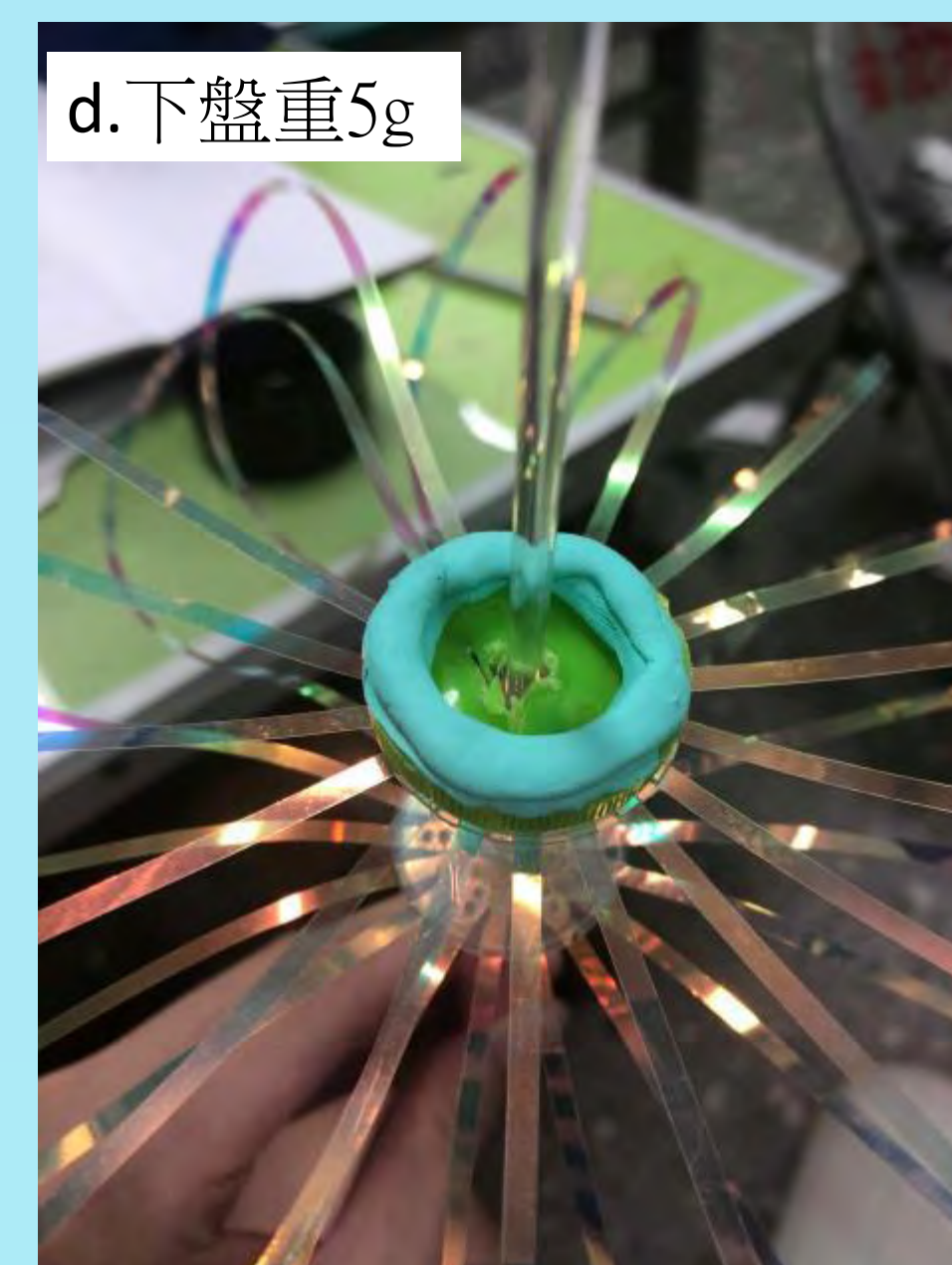
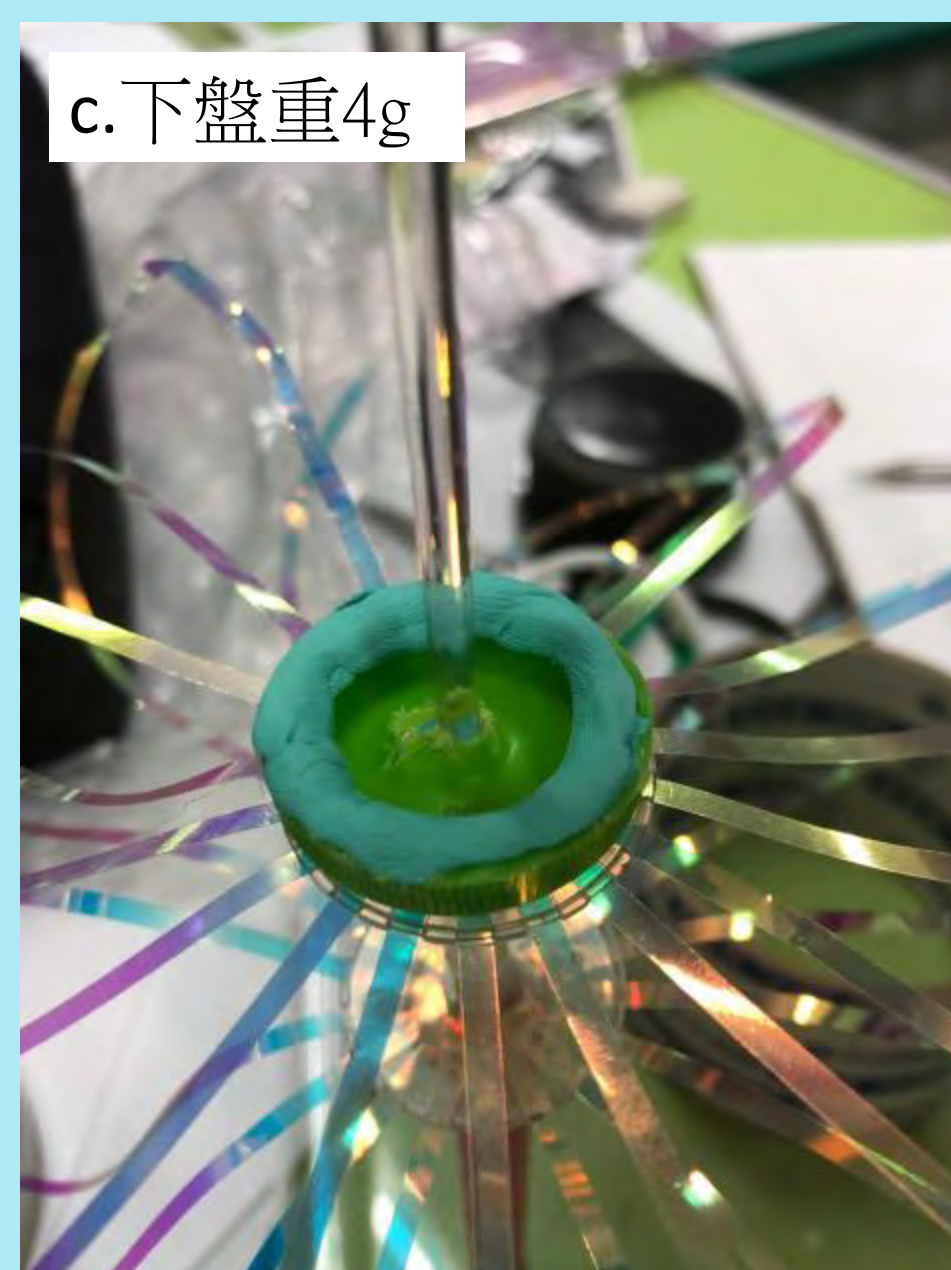
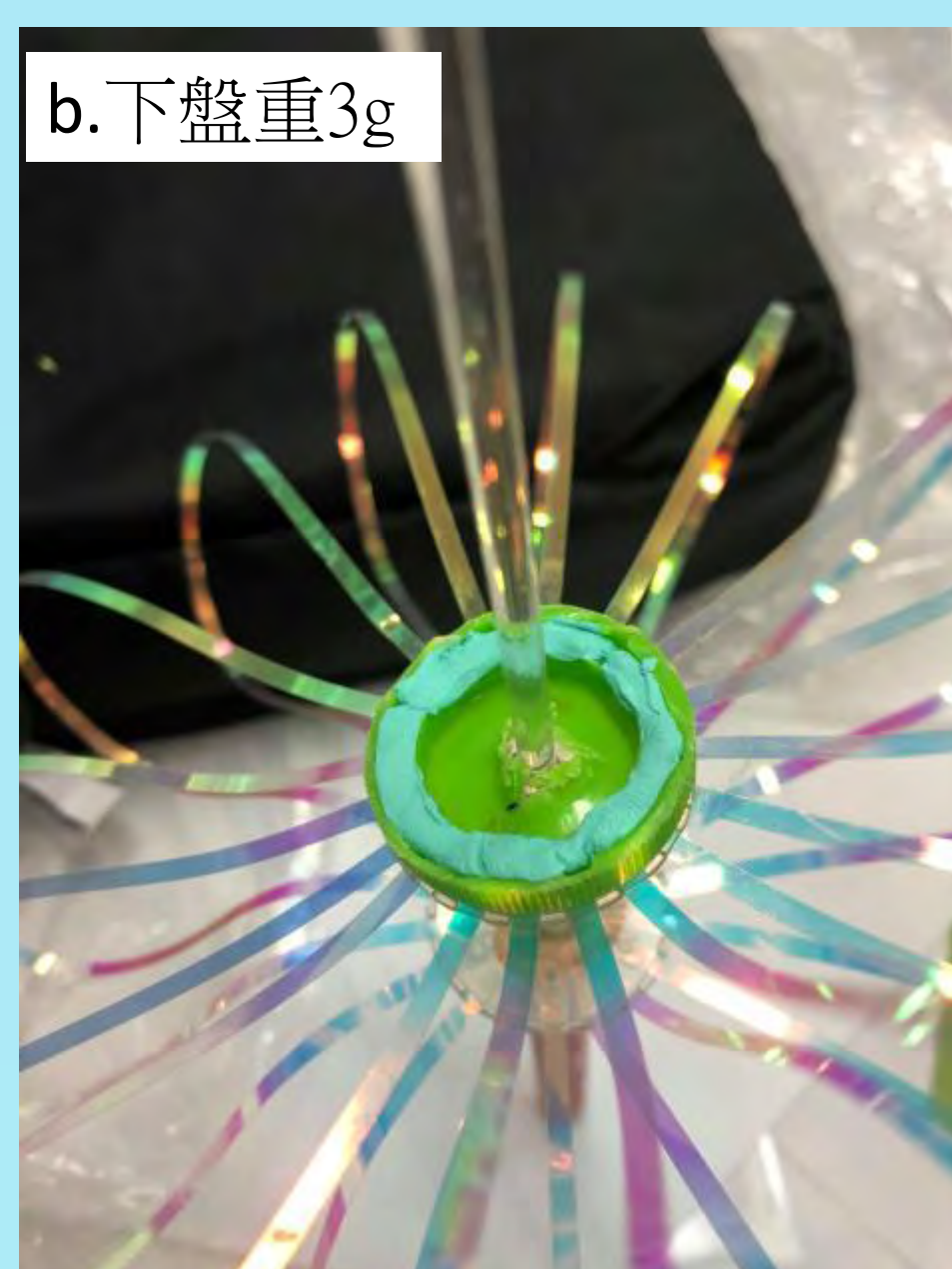


圖3-不同下盤重量示意圖

研究四 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

- 在芬達棒上盤選一處黏上紅色標示物；下盤黏上黑色珠子作為標示以方便觀察。
- 以手機慢動作俯拍以及正拍攝影並選用同一段運動過程截圖分析。
- 將標示物照片轉為手繪紀錄，整理運動過程。

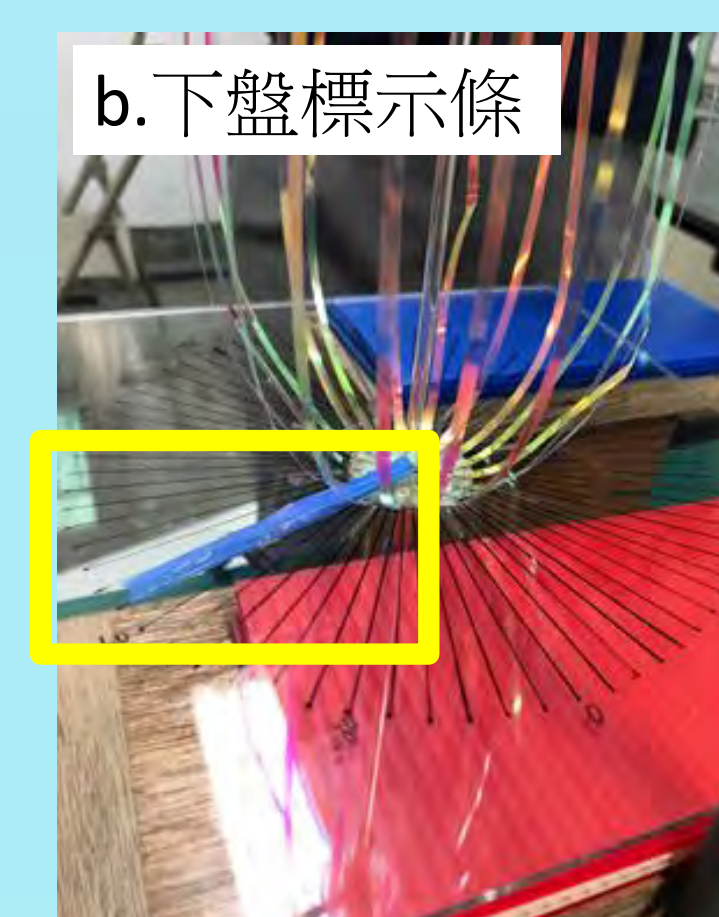


圖4-上、下盤標示條示意圖

研究五 統計芬達棒旋轉時上、下盤之相位差

- 在上、下盤加裝畫有刻度的壓克力板，並各自做上標示條
- 使用馬達旋轉芬達棒(ω :1800)，並以手機慢動作攝影觀察上、下盤之相位角
- 紀錄上盤停頓點、下盤停頓點以及打結時上下盤之相位差

研究結果

定義:

ω 為馬達旋轉時所達之固定角速度 (單位: deg/s)

x 為結點發生位置 (單位: cm)

α 為馬達旋轉時之角加速度 (單位: deg/s²)

研究一 探討馬達轉速對泡泡打結位置的影響

發現轉速越快，結點的位置範圍差距會縮小，且數值有下降的趨勢，直到一定速度後，差距達到最小值，數值範圍幾乎無變化

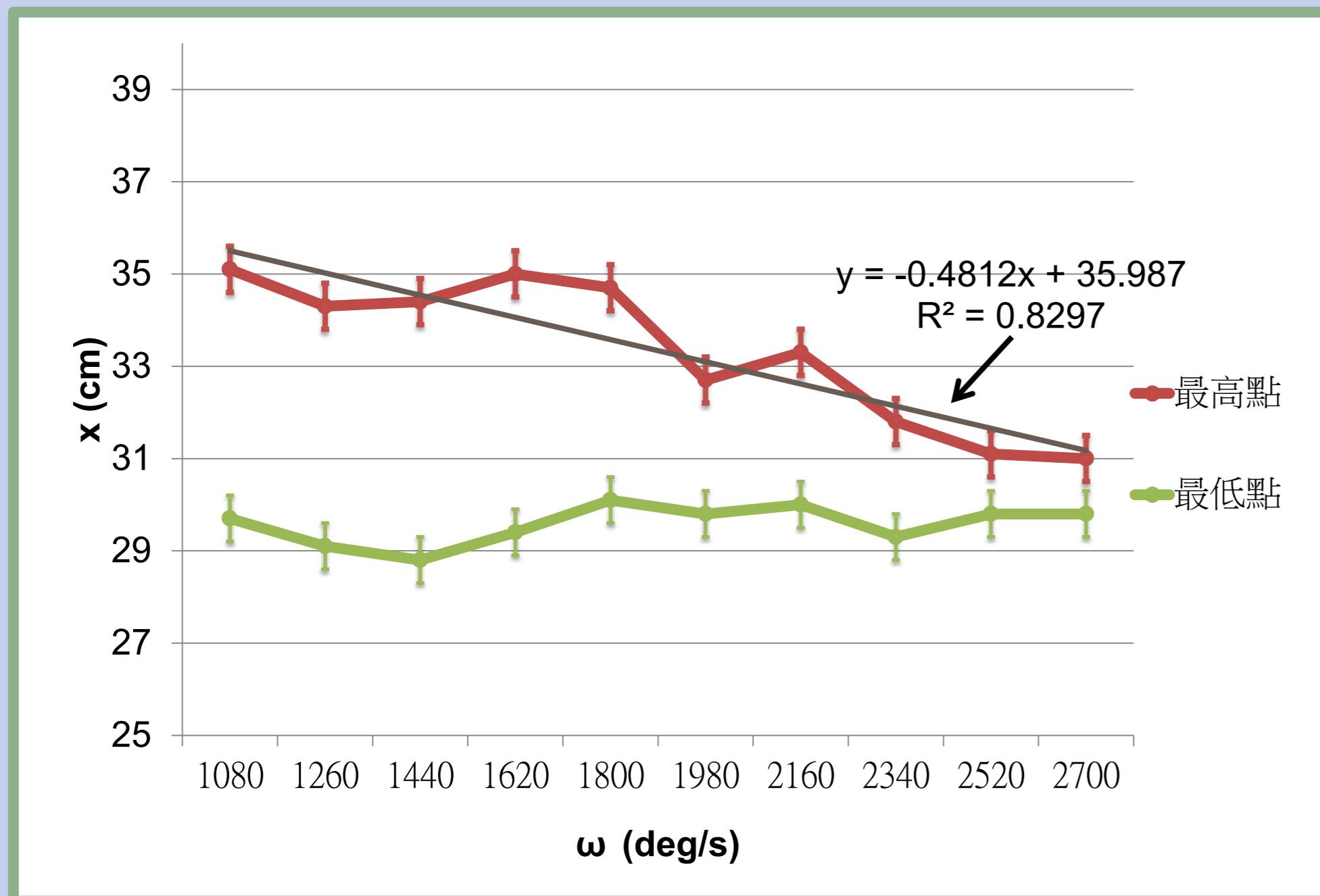


圖5-a 固定時， x - ω 關係圖

研究二 探討角加速度對結點範圍中間位置的影響

1. 在固定角速度1080deg/s及1440deg/s時，增加角加速度，結點的位置上升。
2. 在固定角速度1800deg/s時，增加角加速度，結點位置沒有明顯的改變。
3. 在固定角速度2160deg/s時，增加角加速度，結點位置數值有下降的趨勢。

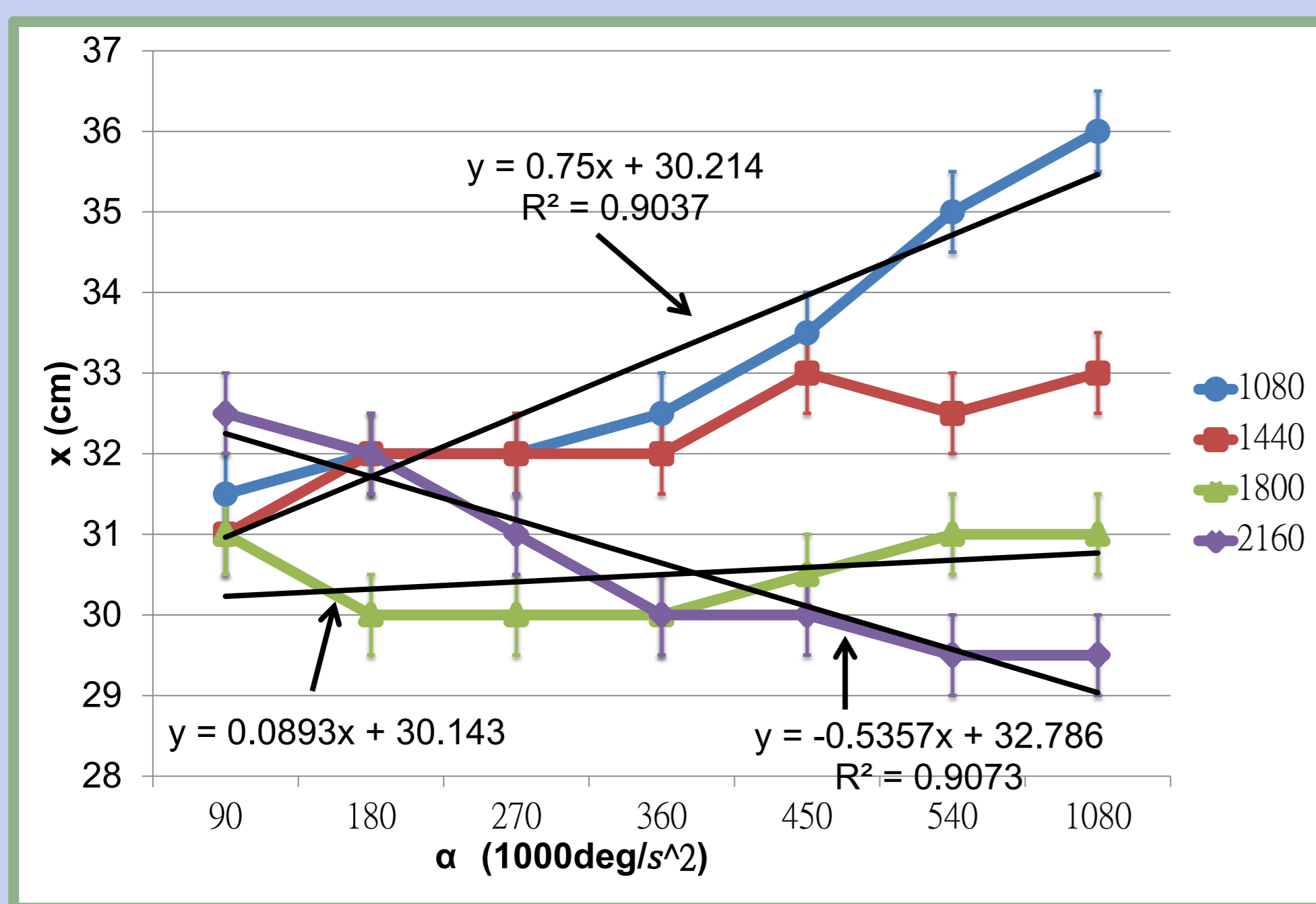


圖6-不同 ω 下， x - α 關係圖

研究三 改變下盤重量對結點的影響

固定角加速度為360000deg/s²發現一旦改變了盤的重量，結點現象就會離開原本的規律。增加1克時，結點數值就發生明顯下降，但是加重後的系統依舊呈規律變化。

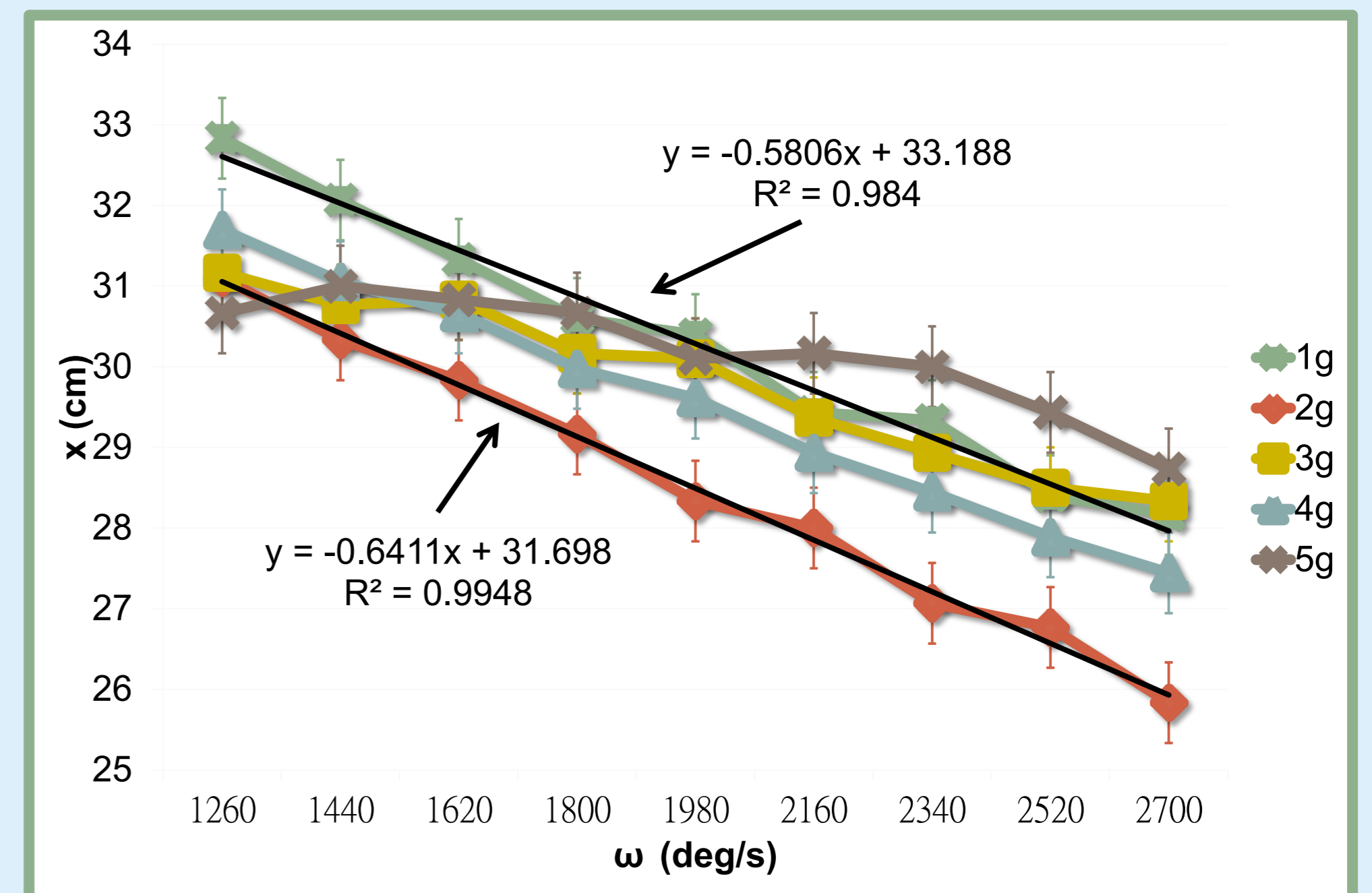


圖7-改變下盤重量時， x - ω 關係圖

研究四 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

發現上盤來回旋轉時實際旋轉角度並未達360度，而是340±10度
下盤旋轉時會稍微超過360度

研究五 統計芬達棒旋轉時上、下盤之相位差

固定 ω 為1800、 α 為360時:

1. 打結發生時為上盤靜止時刻，而下盤處於運動狀態
2. 在兩次完整旋轉週期中，會出現四次打結現象，而其上、下盤之相位角差分別為270度、230度、190度、195度。

討論

研究一 探討馬達轉速對結點位置的影響

從實驗數據圖中能看到主要改變結點範圍的部分是高結點下降所導致，我們推測角速度增加但角加速度不變時，加速所需的時間將變長，傳遞時間也會加長，上下盤傳遞作用力相遇的位置就會下降，也就是結點發生處漸漸往下。

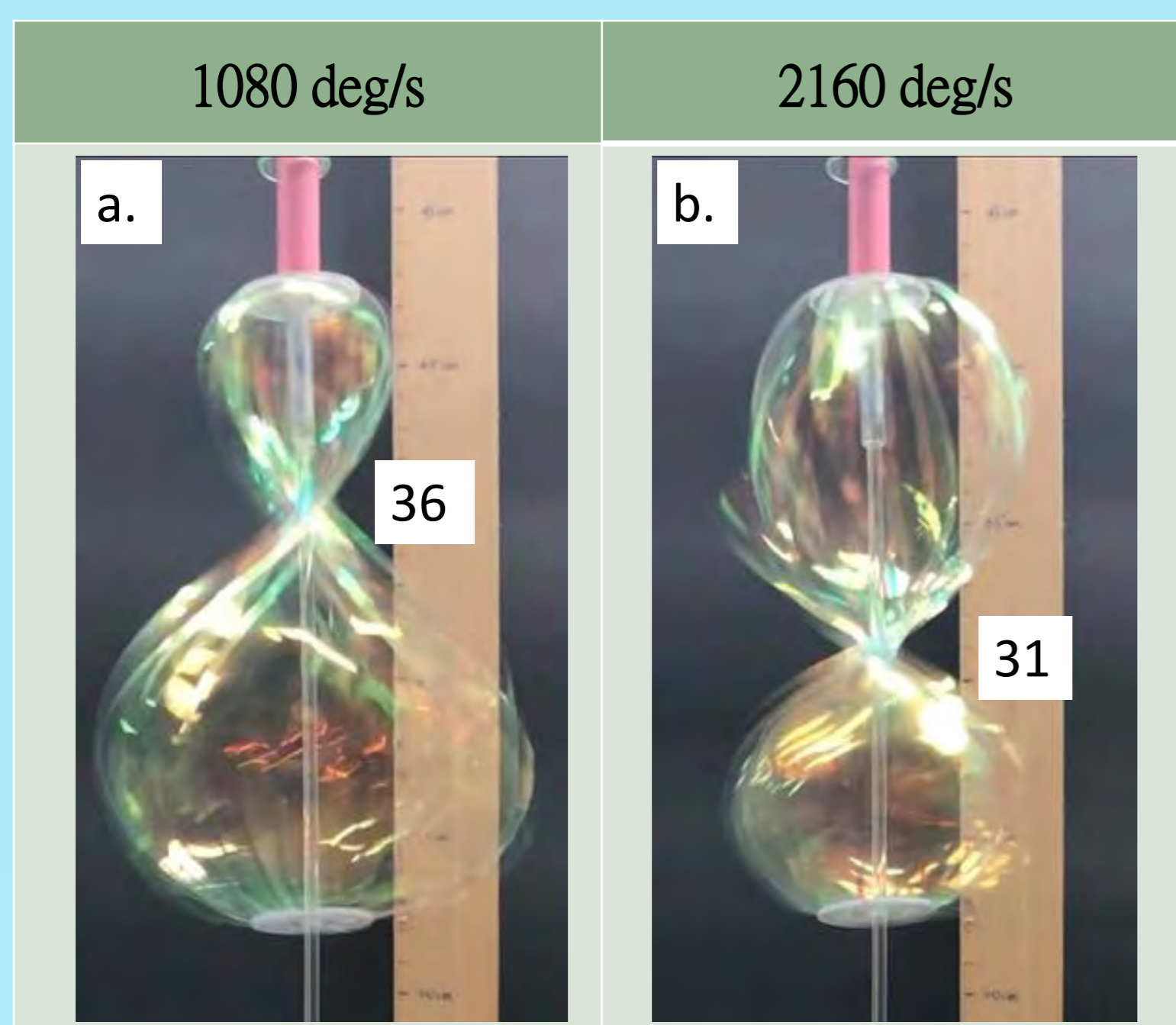


圖8-不同轉速下高結點變化

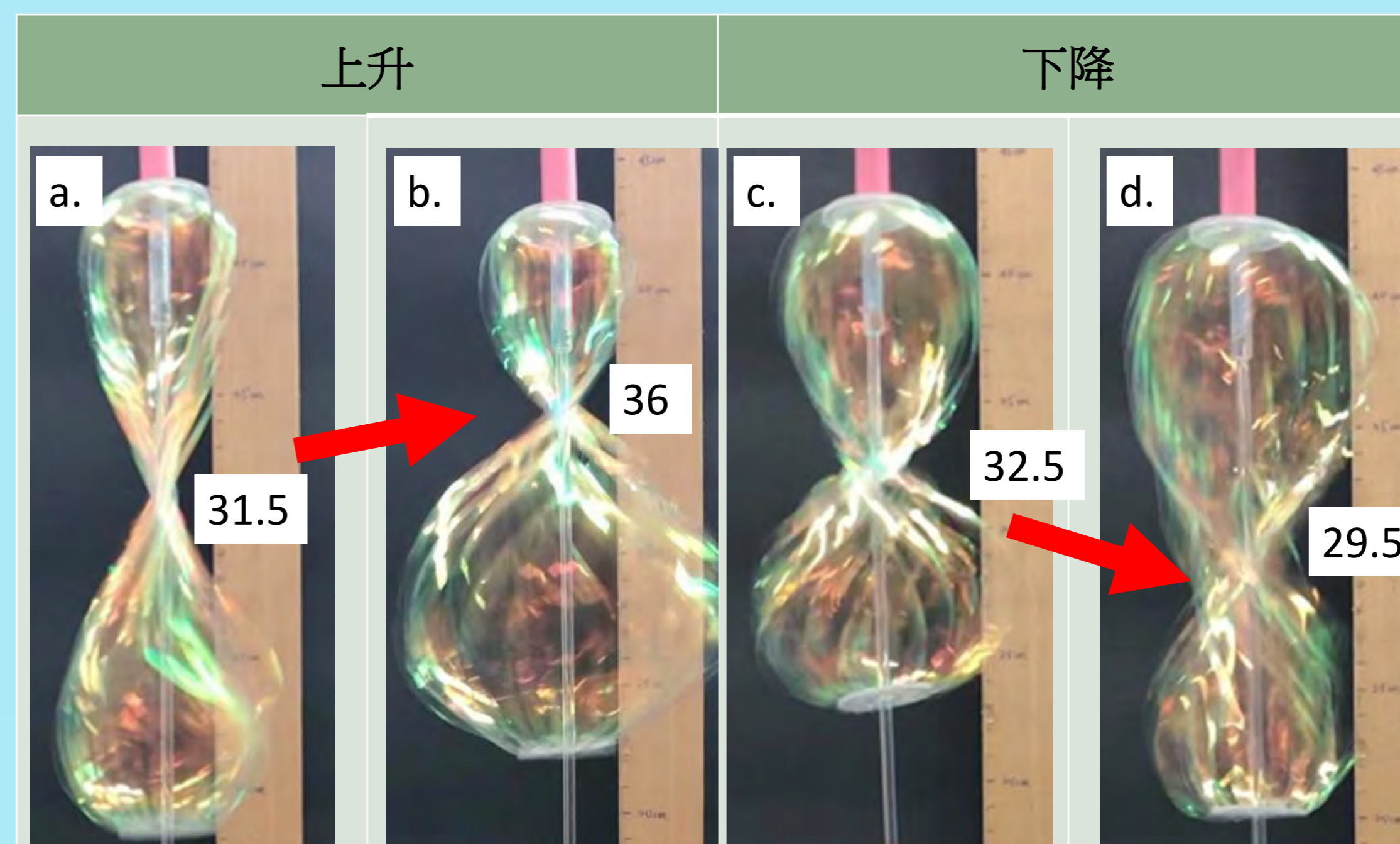


圖9- 改變角加速度時結點變化趨勢-上升及下降照片

研究二 探討角加速度對結點範圍中間位置的影響

本問題是結合問題一的原理加上角加速度的改變。

我們推測：(根據圖)

在固定角速度1080deg/s及1440deg/s時，增加角加速度，結點的位置上升是因為角加速度越大，所需時間越短，傳遞時間也會縮短，結點就會向上移動。

自製模型模擬觀察芬達棒打結過程以及探討打結原因

- 我們將速度設定在1260deg/s時，觀察我們的實驗，我們猜測結點的發生可能是因為馬達旋轉時直接帶動上端的固定板，再由上端的固定板帶動其連接的塑膠條等介質，介質進而帶動下端的板子，所以造成上下板子時間上無法同步。馬達旋轉時是以正逆時鐘各一圈順序轉，介質上端被馬達帶動改向時，下端還是依照原方向轉動，故此時會有類似慣性的現象，再加上馬達轉向時帶動上方的扭力和原本下方的慣性作用，兩相反的力造成介質中心點減速向內(朝棍子徑向方向)移動，造成介質在中間位置交會，形成結點。
- 而在介質的選擇上，若使用彈簧、橡皮筋等材質，會有纏繞的現象，很可能是因為這兩種材質都**具有彈性**，無法真實還原不具彈性的塑膠條旋轉時的樣子。

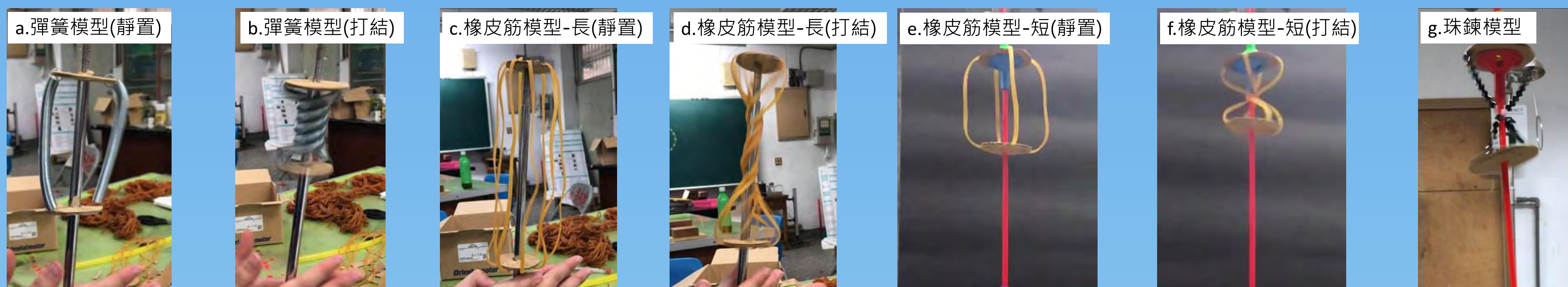


圖10-自製芬達棒模型示意圖

研究三 改變下盤重量對結點的影響

下盤的加重會使結點向下，而且下盤越重時結點隨轉速變化越小。我們推測：因為我們**加重下盤時已經超出塑膠條所能帶動的極限**，所以當加重下盤結點數值就會**離開原本的規律**，但依然遵守研究中一結點位置與轉速的關係。

研究四 觀察並推算上、下盤運動時之相位差

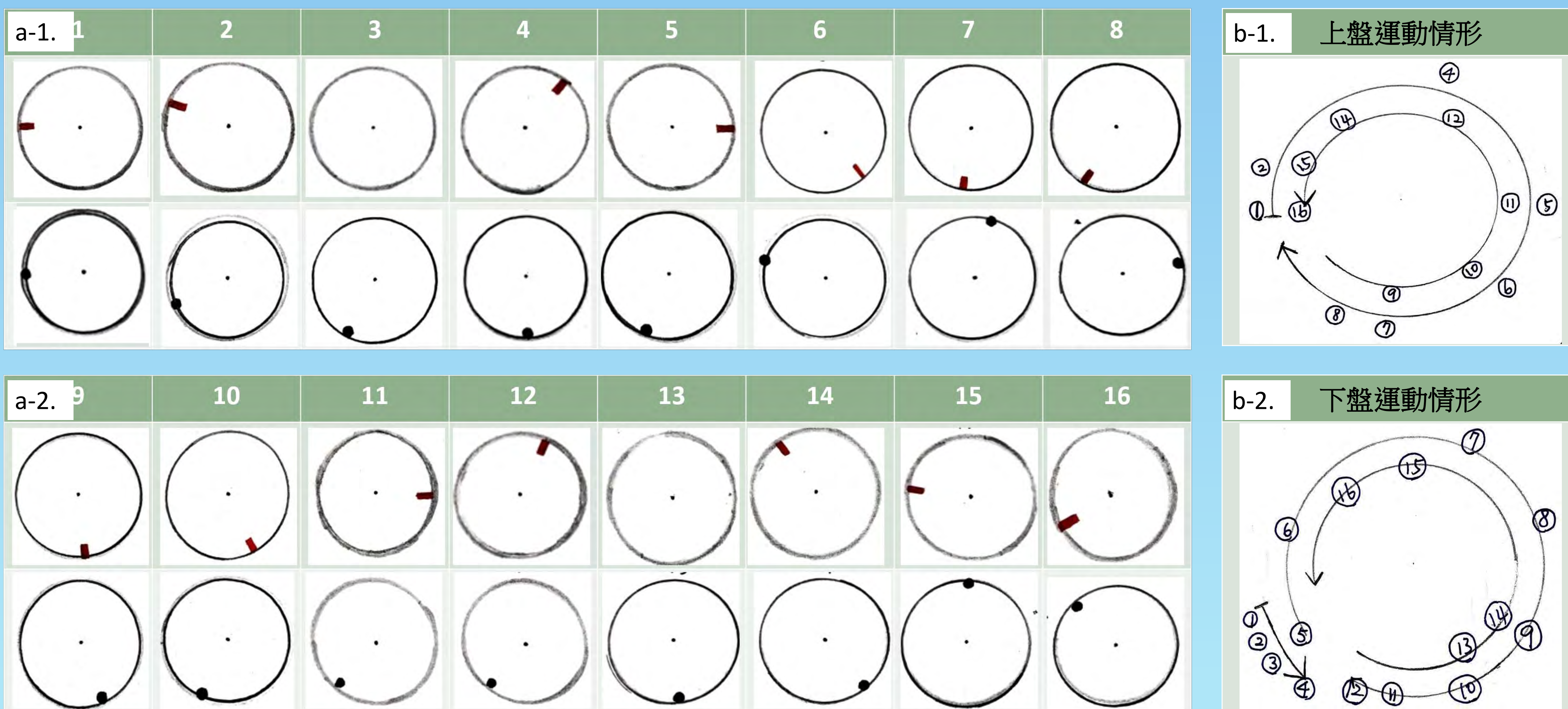


圖11-運動過程內上、下盤標示物所在位置分解圖(上排為上盤、下排為下盤)

研究五 統計芬達棒旋轉時上、下盤之相位差

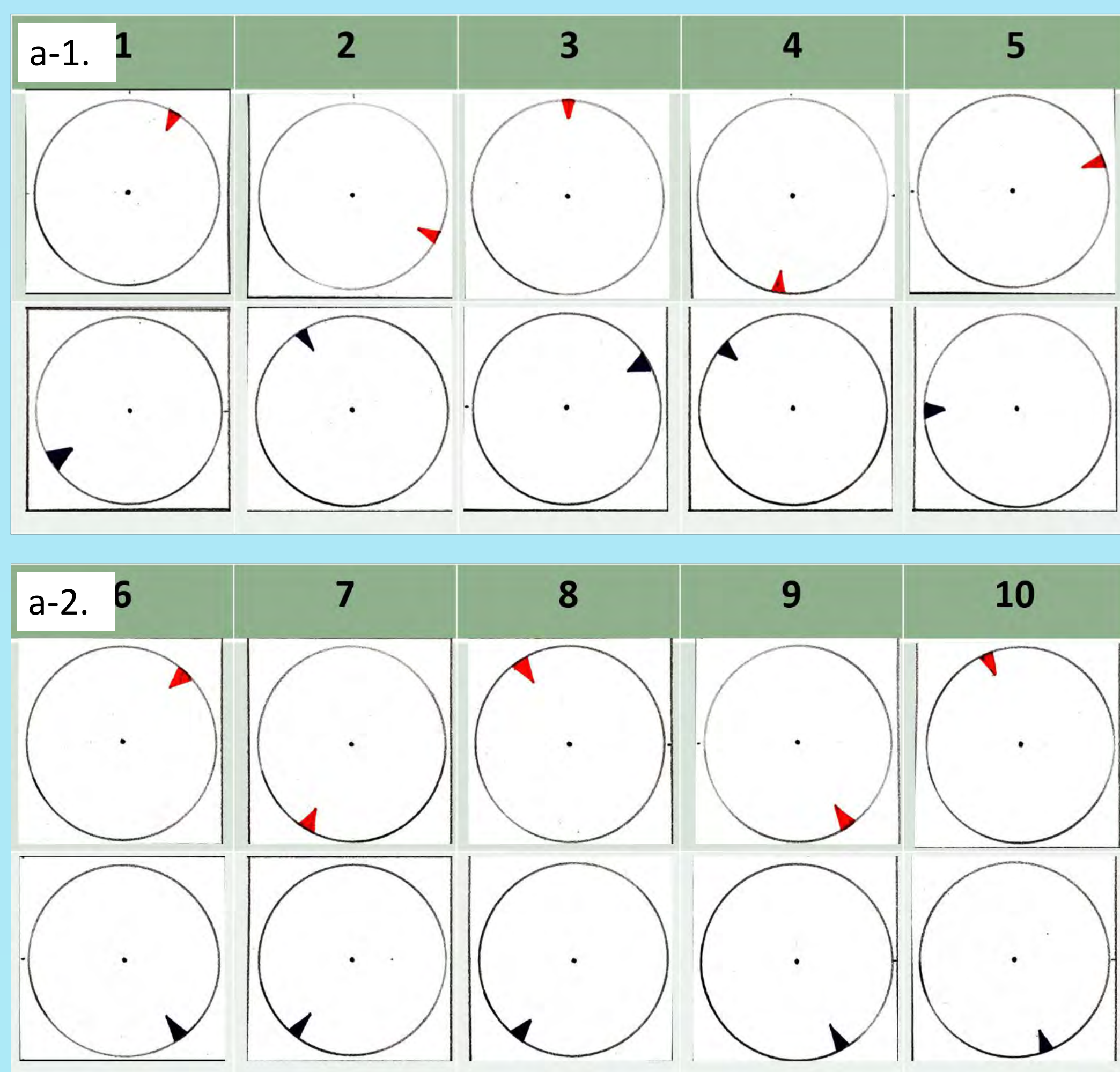


圖12芬達棒旋轉時上、下盤之相位差

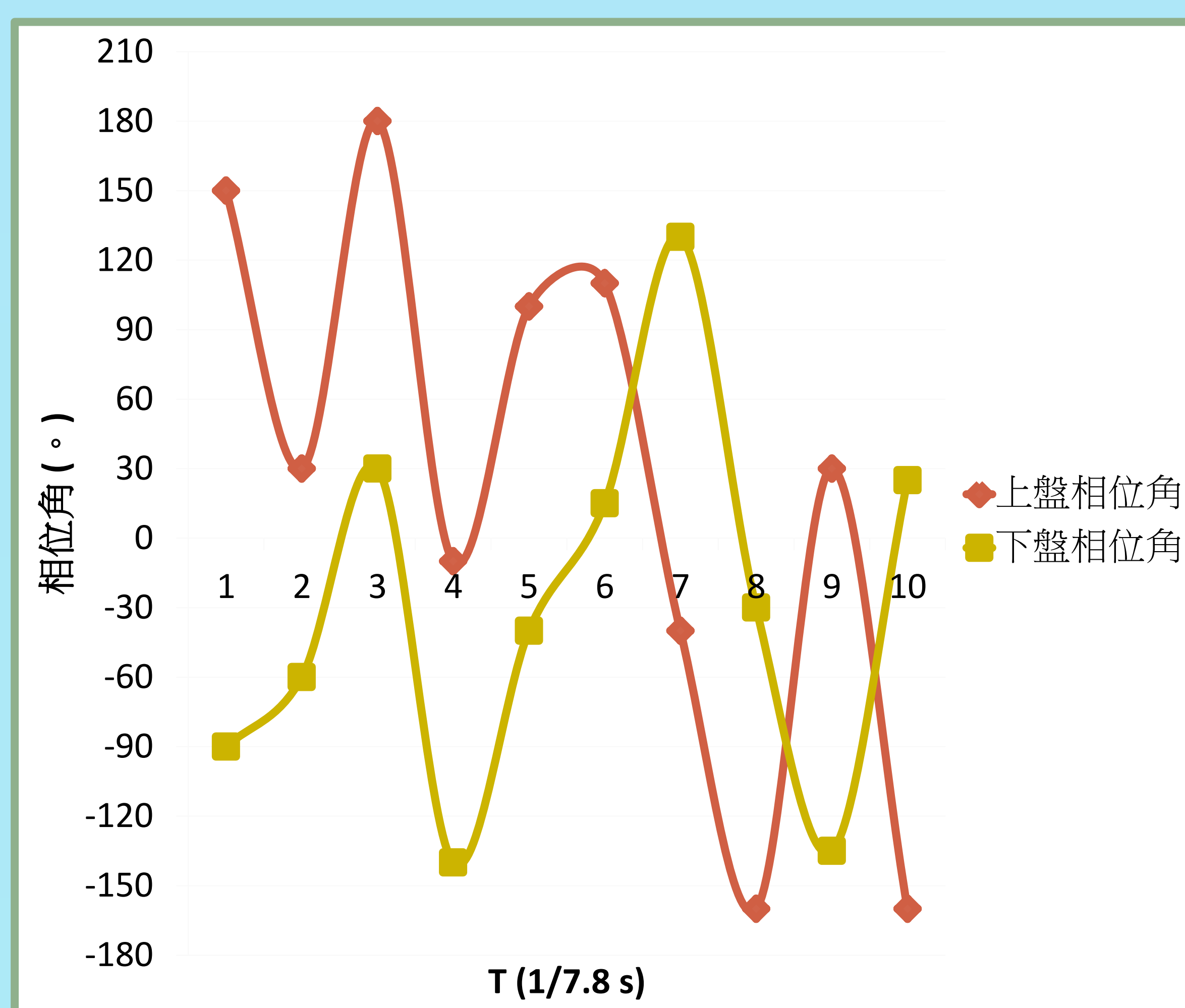


圖13-固定 ω 與 α ，繪製上下盤相位角與時間關係圖

結論

- 高結點與低結點的範圍與**轉速**有很大的關係，並且轉速對高結點位置的變化斜率約為**-0.5**。
- 結點位置的改變與**角加速度**有很大的關係，當發生下降趨勢時斜率與結論1相符，變化斜率約為**-0.5**；上升趨勢時斜率則約為**0.75**。
- 結點的產生是因為**慣性**所產生，且上、下盤的運動具有**同週期但有時間差**的特徵。
- 下盤重量對結點位置有很大的關係，**一旦改變原下盤重，便會產生新的運動狀態**，並且轉速對結點位置的變化斜率約為**-0.5**。