

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	180015
參展科別	地球與環境科學
作品名稱	自製模型模擬地震對地球自轉速率變化之探討
得獎獎項	國家地理獎:That's Geography!-Cultivating Empathy for the Earth Award

就讀學校 臺中市立臺中女子高級中等學校

指導教師 游明珠、林惠貞

作者姓名 柯語筑、徐心韻

關鍵詞 自製地球模型、地震、日長改變量

作者簡介



大家好，我們是徐心韻（左）和柯語筑（右）。

高一的我們因為對科學探究的好奇而開始這個研究，經過將近三年的時間，終於孵出成果了。這個作品彷彿是我們高中三年成長的縮影——挑戰現實限制，把理論概念轉化成可以用雙手思考的實體。特別感謝引領我們思考的教授、給予全力協助的指導老師和提供專業技術支援的前輩。

摘要

為了解地震對地球自轉速率變化之影響，本研究使用自製地球模型、模擬板塊裝置，並運用 Tracker 等程式，模擬地震後地球自轉變化情形。

自製地球轉動時角速度有週期變化，可當作模擬地震發生的背景資料。研究結果顯示，加重板塊負重，角速度無明顯變化趨勢，但自轉一圈所需時間皆增加。改變板塊位置，北緯 22.5 度組角速度圖形高峰值及振幅顯著增加，赤道、北緯 45 度組變化則不明顯。

板塊移動與球體旋轉同向時，角速度變化振幅明顯加大，反向則不明顯。在角速度相對小時移動板塊，角速度趨勢往下，平均角速度減少；反之，在角速度相對大時移動板塊，角速度趨勢往上，平均角速度增加。

本模型模擬之地震所引發之日長改變量，經由換算相當於自轉週期 24 小時的地球改變了 36 分鐘。

Abstract

In order to understand the influence of earthquakes on earth rotation rate, we designed an earth model with plate mechanisms, and adopted the program “Tracker” to observe the variation of the model after simulated earthquakes.

We discovered that the angular velocity of the model had a periodic change even before the simulated earthquake occurred and could be regarded as background data. The result revealed that the increase of the plate mass had no obvious influence on the change of angular velocity, while higher latitude position contributed to the increase of the amplitude and the peak value of angular velocity.

When the plate moved in the same direction as the sphere rotated, the amplitude of the angular velocity change increased significantly, but it was not obvious in the opposite direction. When the angular velocity is relatively small when the plate is moved, the angular velocity trend goes down and the average angular velocity decreases. On the contrary, when the angular velocity is relatively large when the plate is moved, the angular velocity trend goes up and the average angular velocity increases.

The change in day length caused by the earthquake simulated by this model is equivalent to 36 minutes.

壹、研究動機

我們在網路上看到一篇文章在討論，如果使地球上近 80 億人口同時往東方跳躍，地球自轉速率有沒有可能變慢呢？這篇有趣的文章讓我們聯想到實際發生的大地震改變地球質量分佈，好奇其是否也會造成地球自轉速率改變，而此改變和板塊質量、板塊移動方向以及地震發生的緯度位置是否有關？我們參考趙丰博士在科學人雜誌刊登的〈地震！把地球震歪了？〉一文（參考資料 1），了解到現今 NASA 科學家已有完整的公式可計算大地震對地球自轉的影響，然而其影響細微，對生活在地球的我們來說，即使是大如 2011 年日本 311 大地震所造成的日長度變化，仍然微小得難以察覺。這讓我們很感興趣，到底要發生多大規模的地震才能造成明顯的日長度變化。

因此我們決定自製地球模型，利用機關模擬板塊移動，試圖放大地震對地球自轉影響尺度，以呈現明顯有感的日長度變化，並進一步討論板塊質量、地震發生的緯度位置以及板塊移動方向對地球自轉速率之影響。

貳、研究目的

- 一、設計地球模型與模擬板塊移動之裝置，呈現地震造成地球自轉速率變化之影響。
- 二、改變模型上板塊質量、板塊位置、板塊移動方向，探討不同變因對球體旋轉角速度變化之影響。
- 三、分析本模型模擬地震所造成之日長度變化之於實際地球影響尺度。

參、研究設備及器材

- 一、自製地球模型（鐵製薄殼球體、萬向支架、板塊裝置、控制器、遙控器）
- 二、橡皮筋
- 三、強力磁鐵
- 四、膠帶
- 五、尺規紙膠帶
- 六、圓點貼紙
- 七、電子磅秤
- 八、手機
- 九、手機支架

十、筆記型電腦

十一、使用軟體：Tracker、Microsoft Excel、Microsoft Word

肆、研究過程及方法

一、文獻探討

趙丰博士在科學人雜誌的文章〈地震！把地球震歪了？〉（參考資料 1）中，指出在無外力作用下，地球整體為一角動量守恆之系統，而地震由地球內力造成，並不會改變地球系統之角動量。由此可知地震造成地球自轉速率改變之現象並非源於板塊撞擊本身，而是源於板塊移動後地球質量分布之變化。

進一步說明，板塊移動後地球上各質點質量重新分布，導致轉動慣量（ I ）變化，而在角動量（ L ）守恆的狀況下，改變地球自轉的角速度（ ω ）。

$$L = I \cdot \omega$$

在此理論基礎下，模擬地震造成地球自轉速率變化的模型需有以下要點：

一、在不提供外力矩的情況下球體能持續且穩定旋轉（即其自成一角動量守恆之系統）。

二、球體上質量分佈變化必須在旋轉中進行，且必須來自球體系統內力。

依照上述要點，我們設計出可以任意轉軸、向任何方向自由轉動之地球模型，並在其上設置磁吸式的模擬板塊裝置，利用遙控機關控制板塊移動，以在不施予任何外力的情況下模擬地震發生，以下是我們的裝置設計說明。

二、模型設計概念

（一）支架設計

由於地震不只造成地球自轉單一軸的速度變化，也會影響其他兩軸的轉動（極移現象），因此我們參考 Wizard's Globe 的球體（詳見參考資料 3），設計一個萬向支架，讓球體可以任意轉軸、向任何方向自由轉動。如圖 1。



圖 1、自製地球模型

(二) 球體設計

球體的大小與質量攸關其轉動慣量，而這是實驗現象觀測的關鍵。當球的體積小、質量小，較小幅度的質量分布變化就能改變球體自轉速率，使現象容易觀察，但同時球體自身的轉動會較不穩定，容易東倒西歪；當球的體積大、質量大，可以在加裝機關的同時維持相對穩定的轉動，但質量分布變化若不夠明顯，也可能觀察不出任何改變。

最終我們決定製作較坊間常見的地球儀略大的鐵製薄殼球體，規格如圖 2 所示。而選用金屬且具磁性的材質，除了容易打造塑形、結構穩定，主要目的是其能吸附板塊機關和磁鐵，幫助我們調整球體的配重以使轉動穩定。

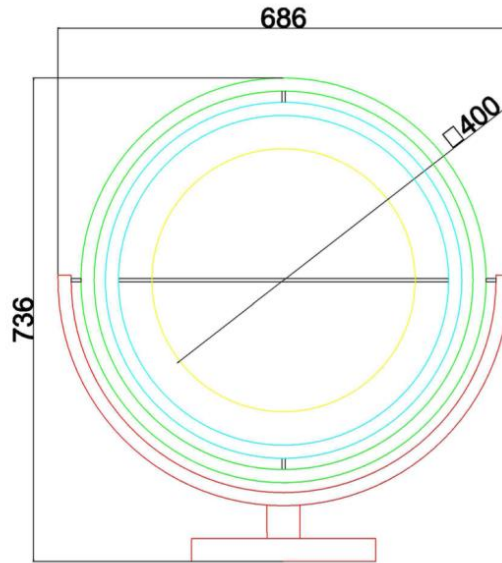


圖 2、自製地球模型規格（圖中數字單位為毫米）

（三）板塊裝置與機關設計

板塊機關的設計重點，是製造一個可以不經由外力（或外力極小可忽略不計），即能改變球體質量分布的裝置。操作機關時必須不造成任何外力矩，才能觀察到球體本身因遵守角動量守恆而產生的轉動變化。

我們設計一個鐵製的軌道，其上有兩個板塊可在軌道上自由滑動。將其中一者套上橡皮筋，並遙控減速馬達使勾住橡皮筋的鉤子旋轉，橡皮筋回彈，就可藉由橡皮筋的恢復力使板塊移動。其中讓板塊移動的橡皮筋恢復力，並不造成的外力矩，可以模擬地震為地球內力所造成之現象。

另外，我們將軌道底部加上磁鐵，讓它能吸在鐵球上任何一個地方，以模擬發生在地球不同位置的地震。板塊裝置規格如圖 3 所示，圖中綠色箭頭為板塊移動方向，圖 4、圖 5 則分別為實際裝置的上視圖、側視圖。

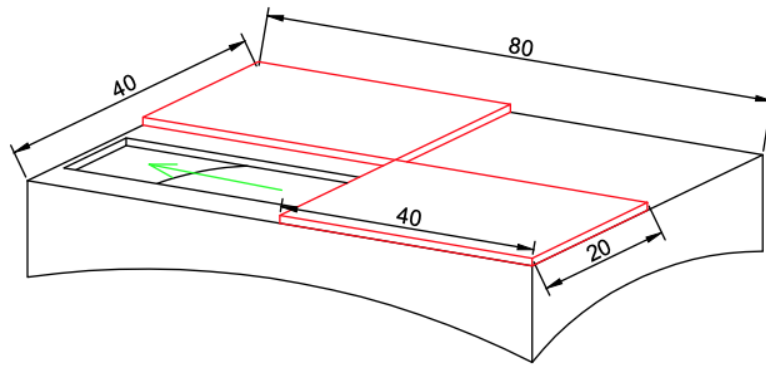


圖 3、板塊裝置規格（圖中數字單位為毫米）



圖 4、板塊裝置上視圖

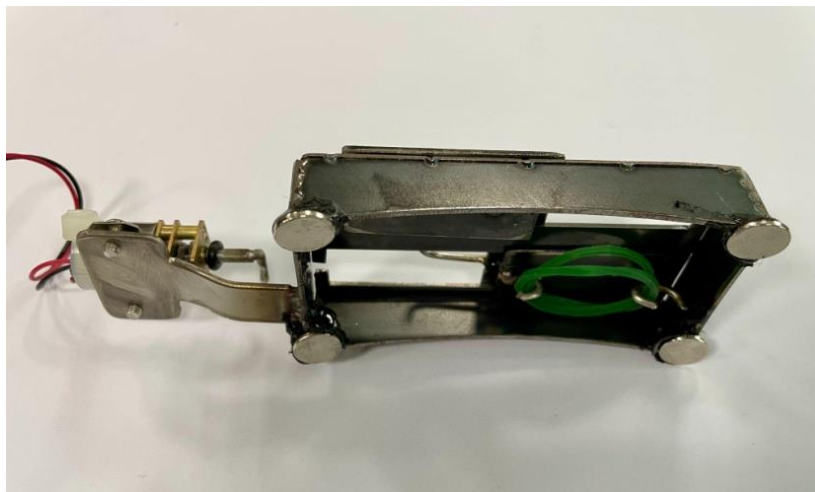


圖 5、板塊裝置側視圖

(四) 控制器設計

控制器之外殼為 3D 列印材料，質量輕且易組裝，內含電池與控制面板，搭配無線遙控器，可操控板塊裝置上的減速馬達以使板塊移動。板塊裝置、控制器、遙控器如圖 6 所示。

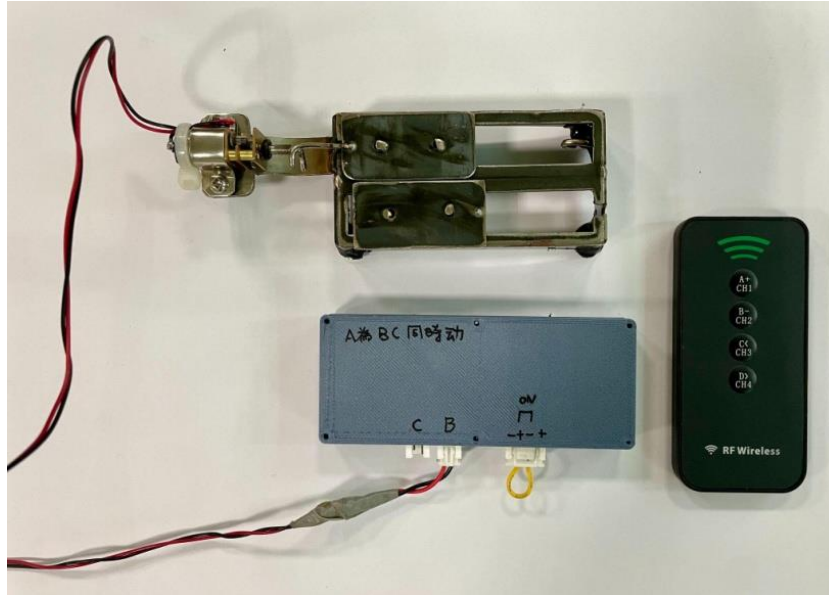


圖 6、板塊裝置、控制器、遙控器

三、實驗設計

(一) 模擬不同質量的板塊移動改變地球自轉速率

為探討不同質量的板塊移動對球體角速度的影響，我們在板塊上增加不同重量的磁鐵，分別設計五組比較。增加磁鐵的位置如圖 7 所示。

1. 未加磁鐵（增加 0 克重）
2. 增加 4 克重的磁鐵
3. 增加 8 克重的磁鐵
4. 增加 12 克重的磁鐵
5. 增加 16 克重的磁鐵

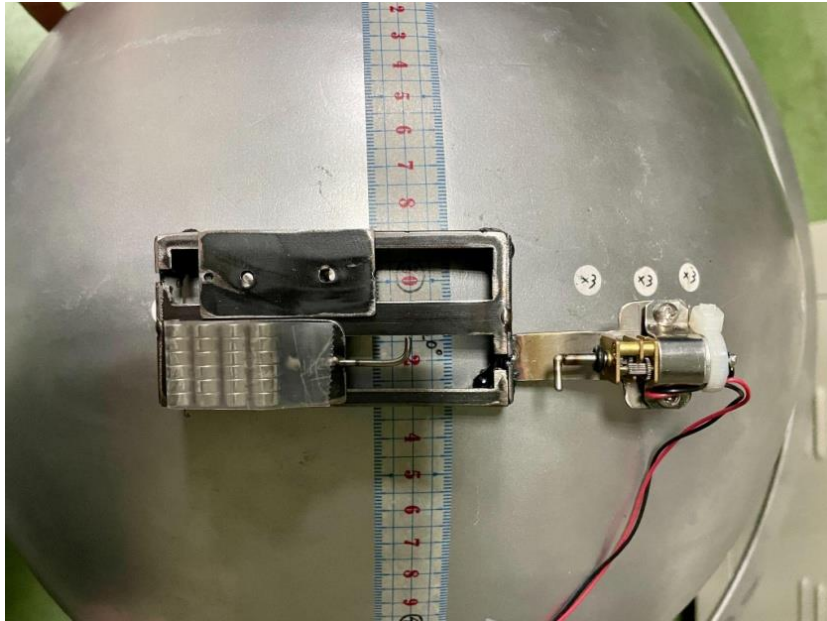


圖 7、在板塊上加上磁鐵

(二) 模擬不同緯度的地震改變地球自轉速率

為探討不同緯度位置的板塊移動對球體角速度的影響，我們以球體直徑計算出模型上相對於地球赤道、北緯 22.5 度、北緯 45 度的位置，並在尺規紙膠帶上紀錄，將板塊裝置吸附於以下三處進行實驗，如圖 8 所示。

1. 赤道
2. 北緯 22.5 度
3. 北緯 45 度

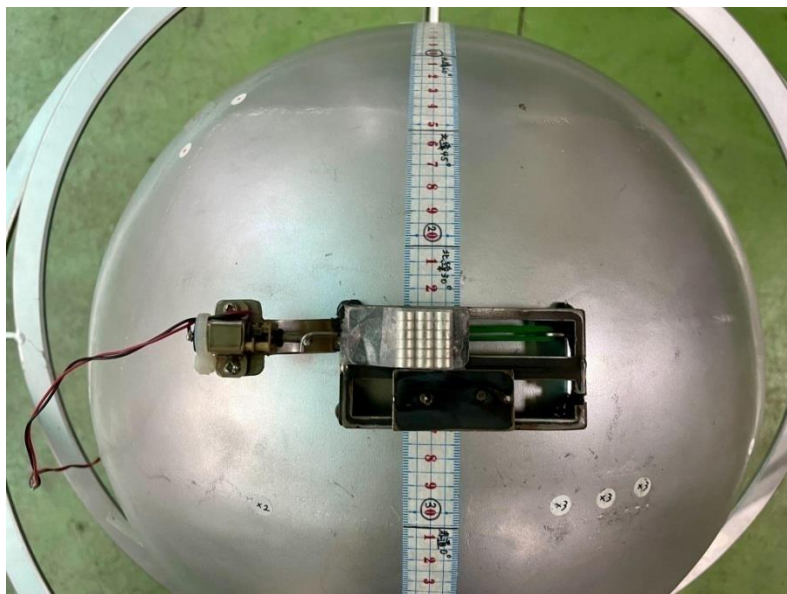


圖 8、將板塊裝置吸附於球體不同位置

（三）模擬不同板塊移動方向改變地球自轉速率

為探討不同板塊移動方向與球體旋轉方向對球體角速度的影響，我們設計了以下四組實驗。

1. 球體順時針旋轉；板塊順時針移動
2. 球體逆時針旋轉；板塊逆時針移動
3. 球體逆時針旋轉；板塊順時針移動
4. 球體順時針旋轉；板塊逆時針移動

四、實驗方法

將操作模型模擬地震的過程，以錄影紀錄，每組實驗進行三次，再將錄製的影片匯入 Tracker 程式進行分析，分別比較板塊質量、板塊位置、板塊移動方向對球體角速度變化的影響。

（一）配重平衡

由於板塊機關具有體積與質量，放上球體後會影響球體平衡，我們會在板塊裝置的對稱端放上控制器並吸附磁鐵以調整球體平衡，如圖 9 所示。實驗時，我們以肉眼觀察球體轉動時有無明顯的晃動來判斷球體是否平衡，但當我們將拍攝影片匯入影像追蹤軟體 Tracker 後，發現球體仍有小幅度肉眼不可見的晃動，在數據分析上，此小幅度晃動就成為觀察模擬地震發生的背景。

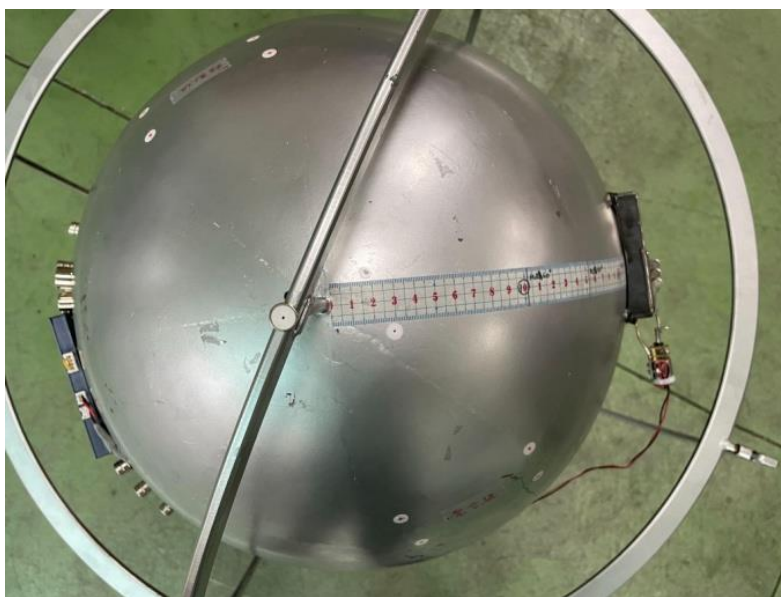


圖 9、吸附控制器與磁鐵以調整球體平衡

（二）實驗操作與拍攝方法

配重完成後，我們以手撥動球體使其旋轉，並在觀察球體維持穩定轉動之後按下遙控器使板塊移動。如圖 10 所示，我們在地球模型正上方架設支架，以手機錄影紀錄球體在板塊移動前後之轉動情形。



圖 10、以手機錄影紀錄板塊移動前後球體轉動情形

五、數據處理

（一）Tracker 影像追蹤

由於慢速攝影影格數龐大，我們只剪輯板塊移動前後球體旋轉三圈的影片片段匯入影像追蹤軟體 Tracker，追蹤球體上兩記號點之座標位置，以利後續角速度計算。Tracker 頁面與兩記號點位置如圖 11 所示。

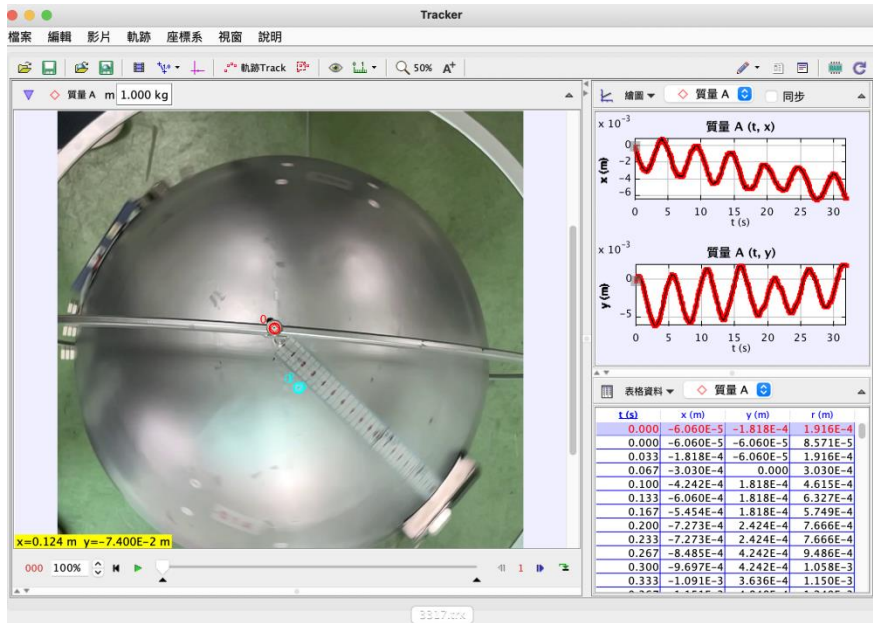


圖 11、圖中的紅色點為中心點，藍色點則為距中心點 2.5 公分處

(二) 角速度計算

以中心點為基準，取 2.5 公分處相對於中心點的向量。以向量內積的方式計算時間前後的兩向量，得到角度變化量的餘弦值，再以反函數轉換成弧度後，除以經過時間得到角速度。

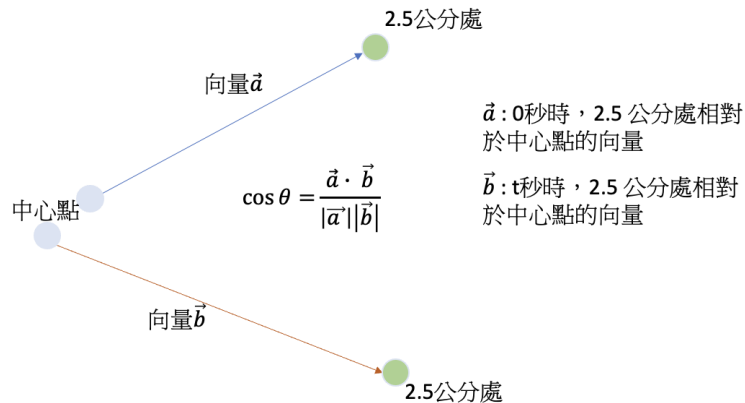


圖 12

(三) 取滑動平均作圖

參考圖 12，角速度對時間作圖後，結果不易觀察角速度變化與圖形特徵，因而以七組數據取一滑動平均，重新作圖如圖 13 所示，後續皆以取滑動平均後之角速度對時間之圖形進行討論。

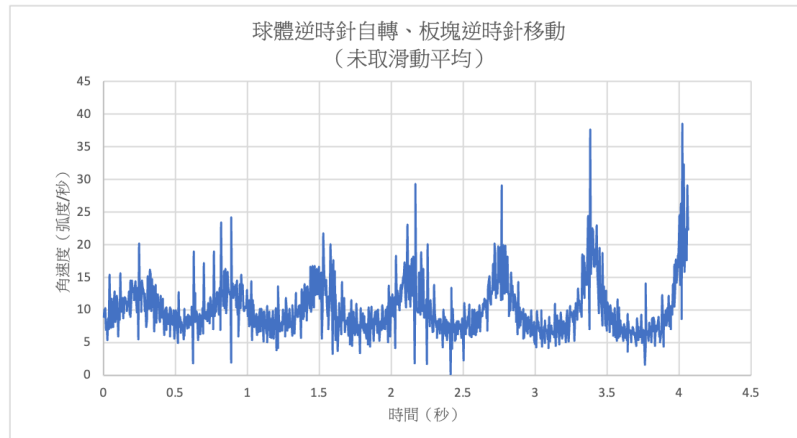


圖 13A、未取滑動平均之角速度對時間作圖

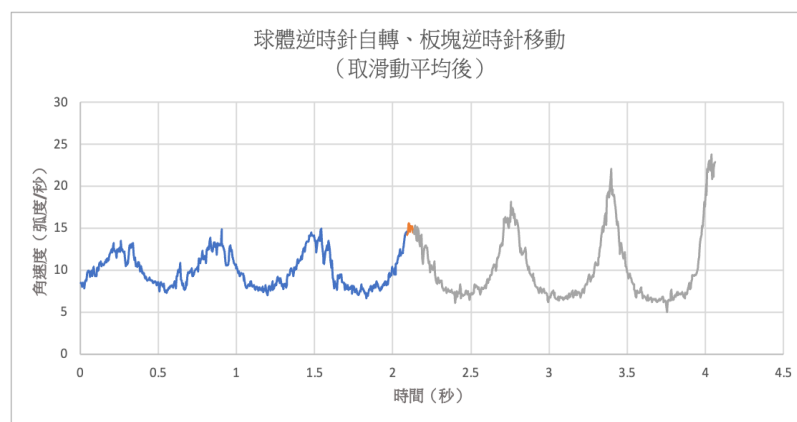


圖 13B、取滑動平均後之角速度對時間作圖

伍、研究結果

圖 14 至圖 25 為不同變因下，板塊移動前後球體旋轉 3 圈之瞬時角速度圖形（皆取過滑動平均）。其中藍色區間表示板塊移動前，橘色區間表示板塊移動瞬間，灰色區間表示板塊移動後之角速度變化。而藍色直線與灰色直線分別為板塊移動前、後之線性迴歸。改變不同變因造成球體角速度變化的結果如下分述：

一、板塊加重不同重量之球體角速度變化

圖 14 至圖 18 分別為在板塊上加裝 0 克重、4 克重、8 克重、12 克重、16 克重磁鐵，板塊移動前後球體旋轉 3 圈之瞬時角速度圖形。其中板塊裝置皆加裝於赤道位置，球體順時針旋轉，板塊順時針移動。

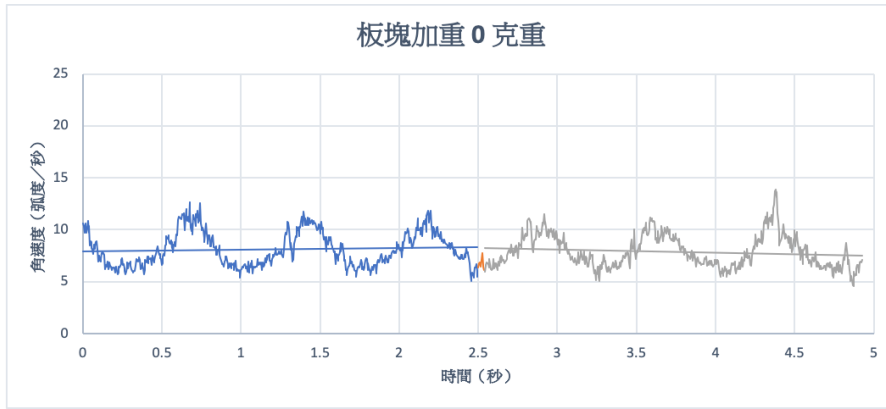


圖 14

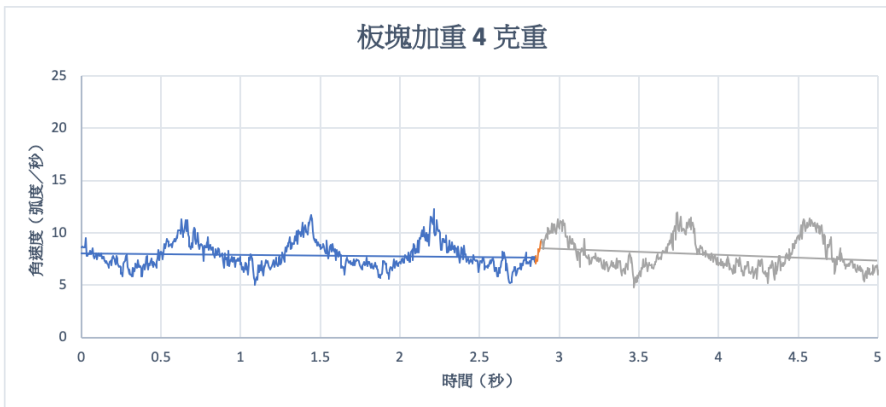


圖 15

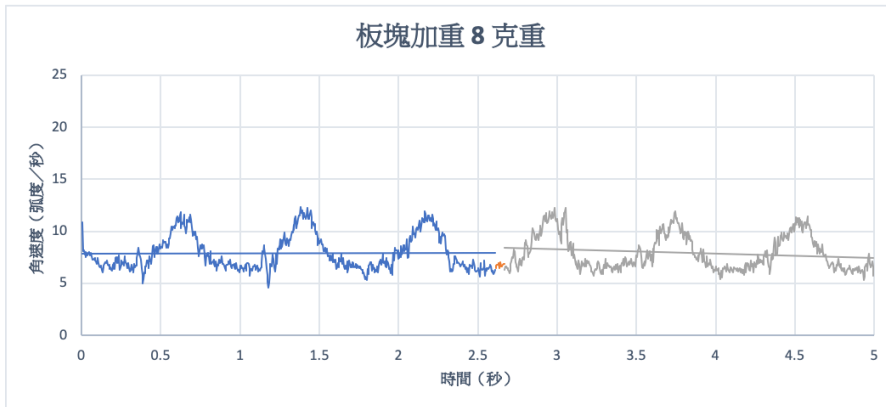


圖 16

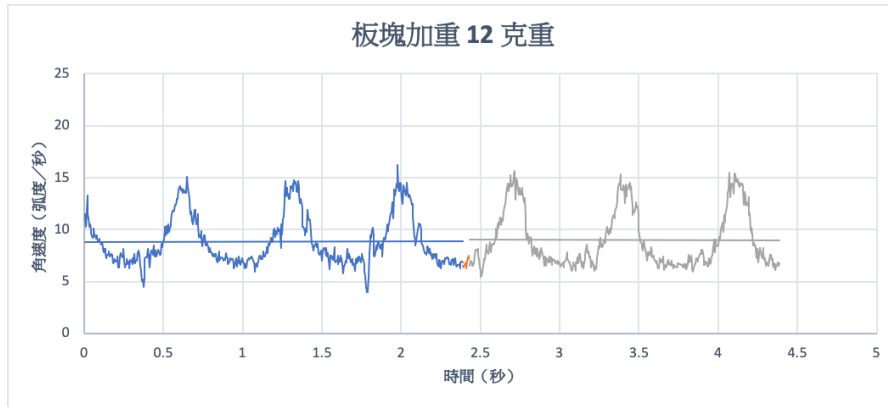


圖 17

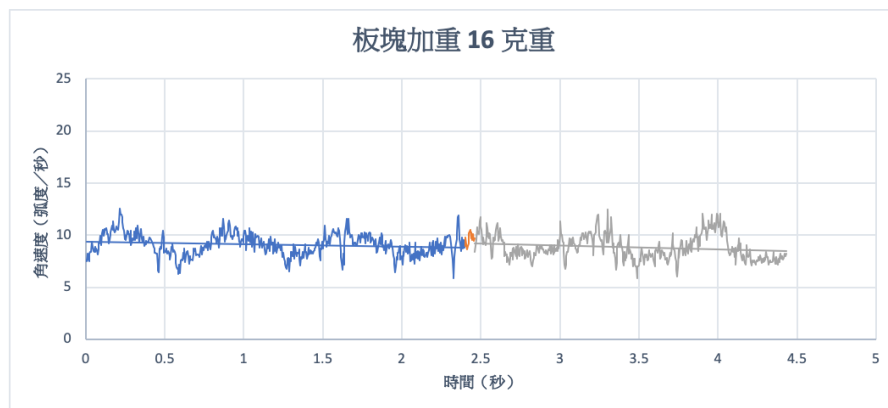


圖 18

二、板塊裝置加裝於不同緯度位置之球體角速度變化

圖 19 至圖 21 分別為板塊裝置加裝於赤道、北緯 22.5 度、北緯 45 度各位置，板塊移動前後球體旋轉 3 圈之瞬時角速度圖形。其中板塊上皆加重 12 克重之磁鐵，球體順時針旋轉，板塊順時針移動。

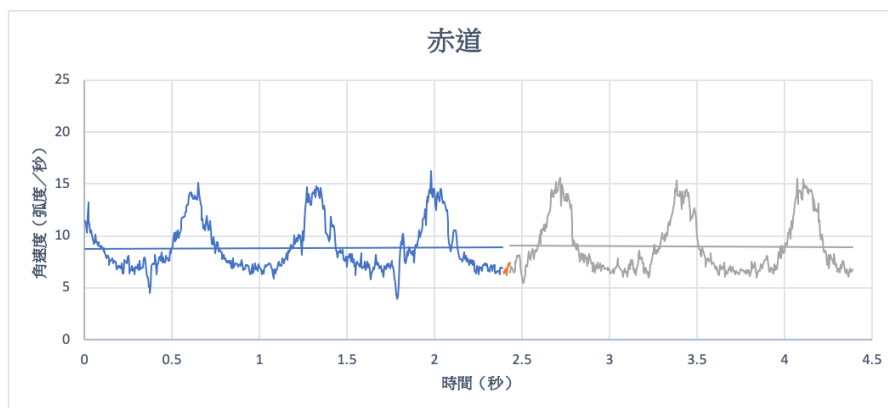


圖 19

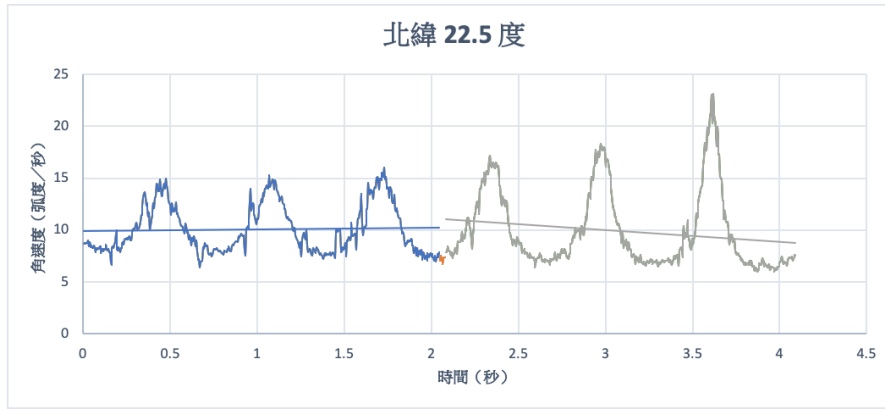


圖 20

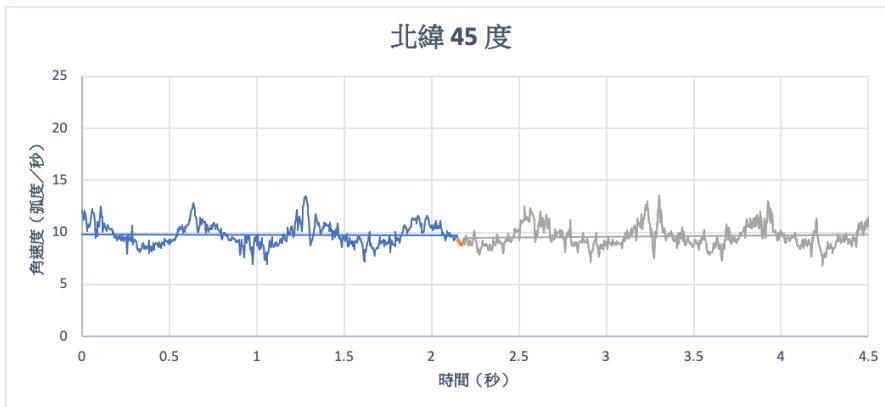


圖 21

三、球體旋轉方向與板塊移動方向之球體角速度變化

圖 22 至圖 25 分別為不同球體旋轉方向與板塊移動方向之組合，板塊移動前後球體旋轉 3 圈之瞬時角速度圖形。其中板塊裝置的位置皆在北緯 22.5 度，板塊上皆加重 12 克重之磁鐵。

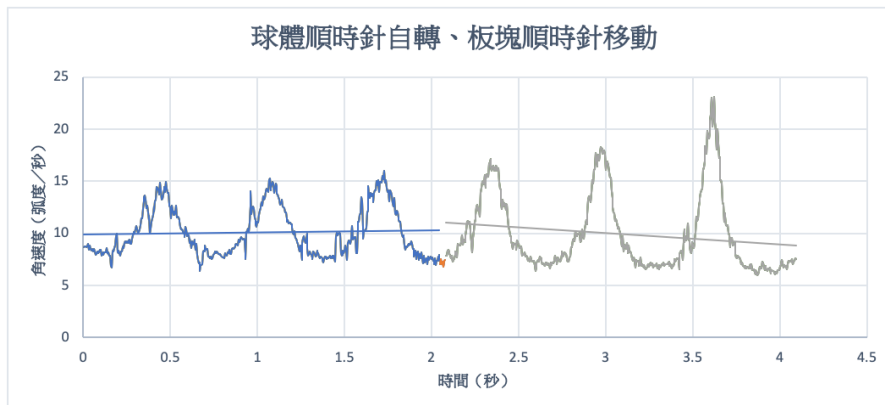


圖 22

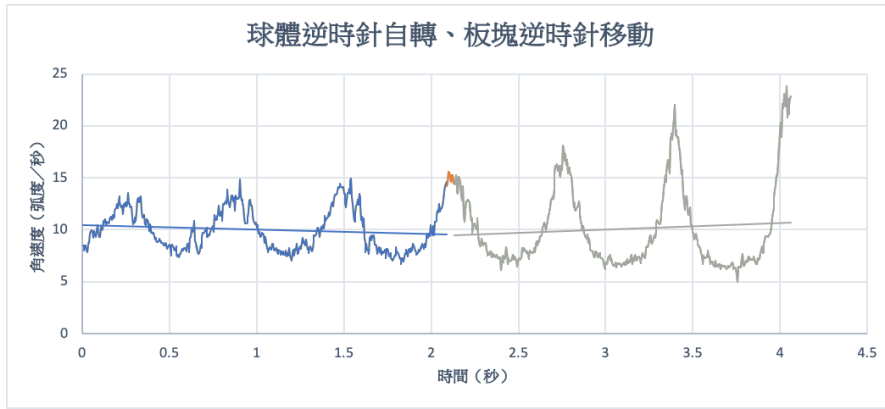


圖 23

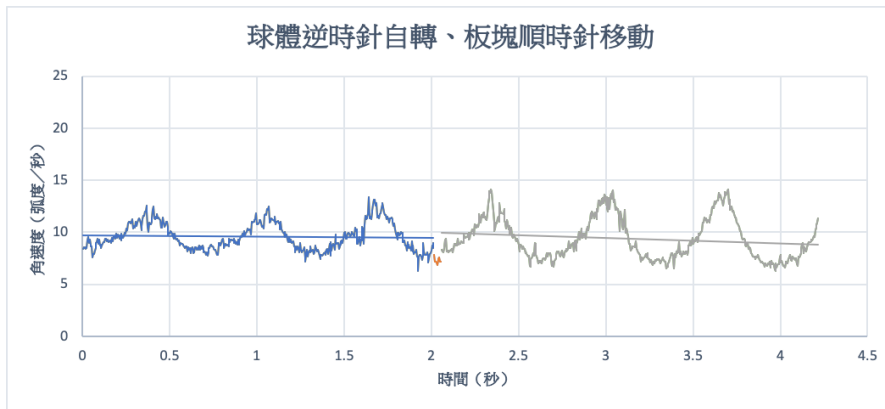


圖 24

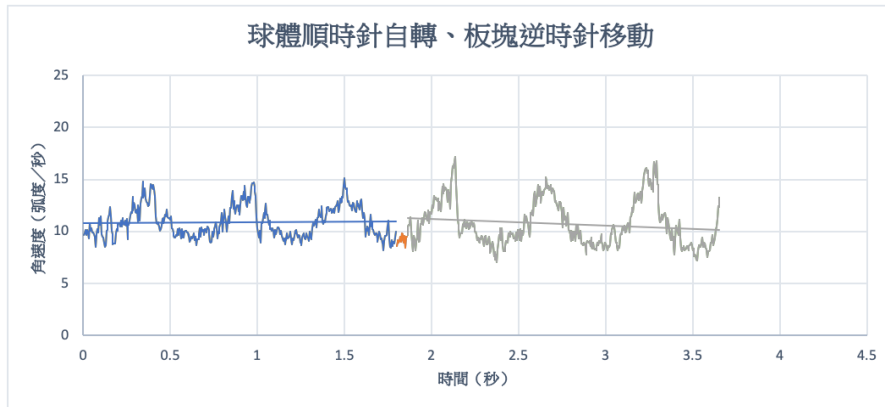


圖 25

陸、討論

我們發現在任何變因下，角速度皆具有週期性的快慢變化，呈現出有尖峰的波動圖形。此週期變化在還沒有使板塊移動前就已經穩定存在，我們推論可能是球體本身的質量分佈不均，受到無可避免的重力場與轉軸摩擦力影響，因而產生角速度在旋轉一圈中某處較快某處較慢的情形。在我們控制此球體每次轉動的情形之下，這種有規律的角速度變化可當作未發生地震時的背景值。每當我們控制板塊移動之後，皆產生了程度不一的改變，即板塊移動除了會改變地球模型的平均角速度（或旋轉一週的週期），也會影響原先角速度波動圖形之圖形特徵，包括角速度變化週期、角速度的高峰值與尖銳程度。以下將就板塊重量、板塊位置、球體與板塊運動方向三個變因對地球模型角速度的影響進行討論。

一、板塊加重不同重量對於球體角速度變化之影響

以下將就圖 14 至圖 18，改變板塊上加重重量的五組圖形進行討論。由圖 14 至圖 18 可見，在赤道上的板塊無論加重多少重量，板塊移動前後球體角速度變化的圖形並無明顯不同。除了板塊加重 12 克重組之外（參考圖 16），其餘四組圖形之迴歸直線在板塊移動後斜率為負值，但搭配平均角速度的數值比較（參考表 1），迴歸直線斜率為負值與平均角速度是否變慢亦不完全符合。

綜合圖形特徵、迴歸直線與平均角速度的比較，可以發現這五組數據並沒有呈現出板塊重量與球體角速度變化的線性關係。

由於改變板塊加重重量實驗的板塊裝置都加裝於赤道位置，我們因而有以下推論：一、比起板塊質量，板塊位置在板塊移動後對球體角速度的影響可能更大。二、如果考慮重力場影響，在赤道位置進行實驗很可能造成較高緯度位置更大的外力矩，進而影響實驗的結果，未來應該再做一組在高緯度位置改變板塊加重重量的實驗，可能可以更明顯地看出不同板塊重量對於球體角速度之影響。

表 1、板塊加重不同重量之球體平均角速度

	加重 0 gw	加重 4 gw	加重 8 gw	加重 12 gw	加重 16 gw
板塊移動前 平均角速度 (弧度/秒)	8.10	7.84	7.90	8.84	9.07
板塊移動後 平均角速度 (弧度/秒)	7.90	7.88	7.93	8.98	8.83
平均角速度變化 (弧度/秒)	-0.20	+0.04	+0.03	+0.14	-0.24

另從原始數據計算自轉一圈所需的時間，得到的結果如下：

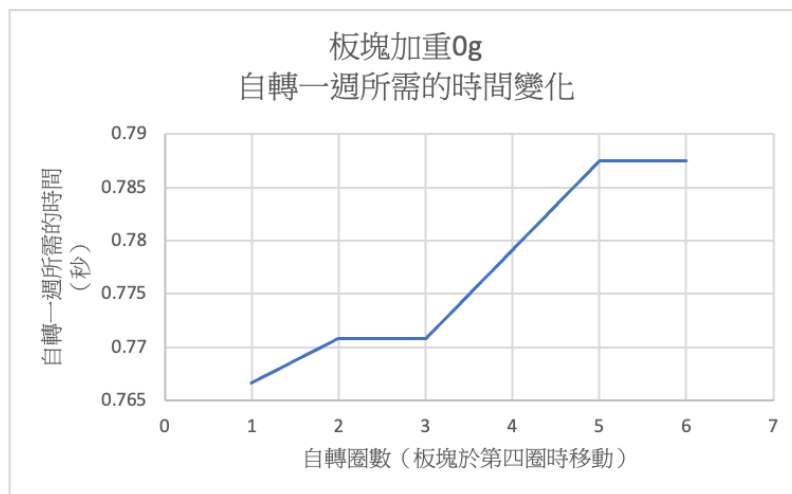


圖 26

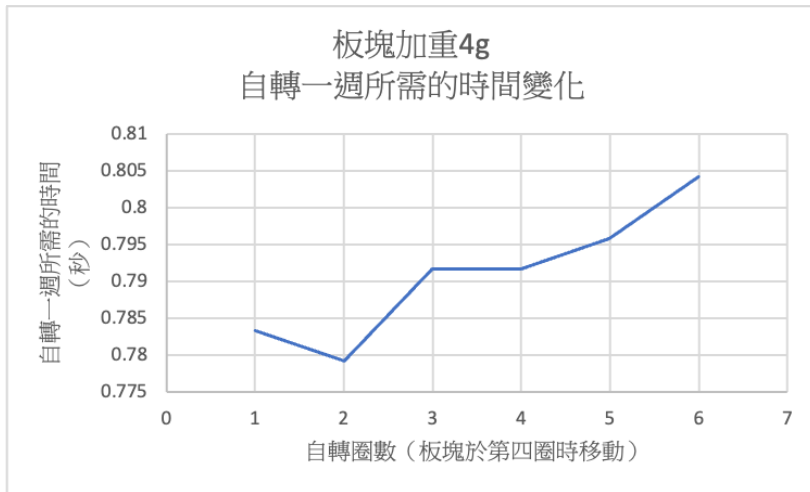


圖 27

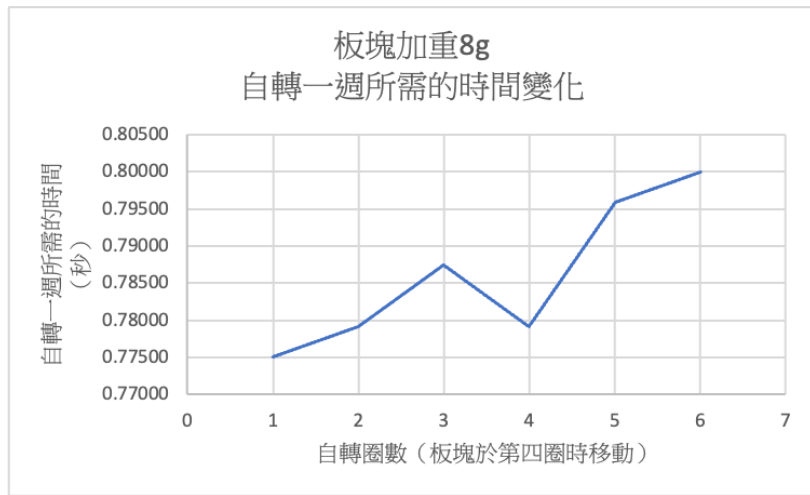


圖 28



圖 29

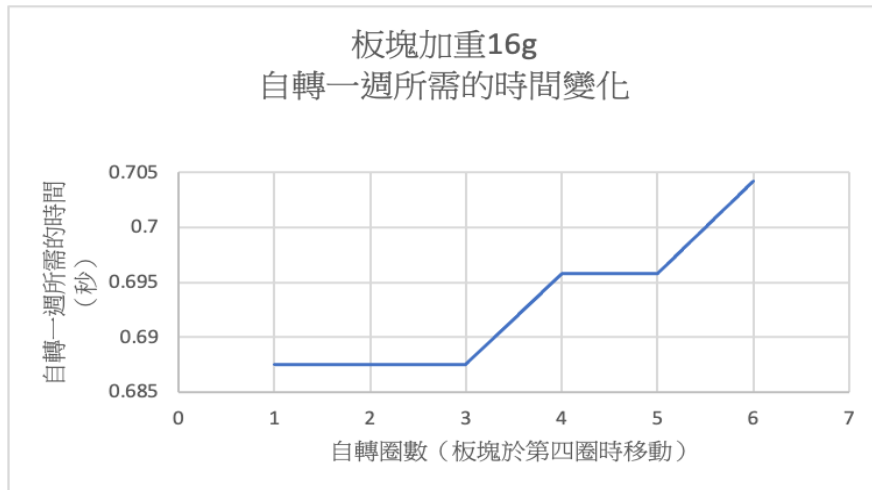


圖 30

圖 26 至圖 30 顯示板塊加了重量後，在移動的瞬間前後，自轉一週所需時間有變短的現象，其中以加重 8 克重、12 克重較為明顯。而所有組別在板塊移動之後，自轉一週所需的時間皆增加。

二、板塊裝置加裝於不同緯度位置對於球體角速度之影響

以下將就圖 19、圖 20、圖 21，板塊加裝於不同緯度位置的三組角速度圖形進行討論。參考圖 21，北緯 22.5 度組在板塊移動後圖形高峰值明顯漸高、低峰值略漸低，整體而言振幅漸大。推論其原因應為板塊移動後球體質量分佈更加不均，使得原角速度快者愈快，慢者愈慢。

然而，實驗結果雖然顯示圖形振幅逐漸增大，但若以地球實際狀況推論，地震後地球轉動慣量的變化會由潮汐等其他因素作用，再一次調整至穩定轉動狀態，因此一段時間後角速度圖形的波動起伏應會逐漸趨緩，呈現板塊移動前穩定的波動情形。未來實驗應追蹤更長時間的轉動數據以觀察。

由圖 14 至圖 18 與圖 20 做比較，比起在赤道位置上的板塊增加重量，其板塊移動前後圖形特徵的變化遠不如在北緯位置加裝板塊明顯，因而有以下推論：在考慮重力場的情況下，將板塊裝置加裝於赤道位置，球體會受到較大的重力矩，因而減輕板塊移動對球體角速度變化的影響。然而參考圖 21 北緯 45 度組之圖形，將板塊裝置移動至更高緯度位置，板塊移動前後角速度的變化卻未較北緯 22.5 組明顯。可能原因是北緯 45 度實驗數據的背景變化不顯著，或緯度變化不是改變角速度的因素。

表 2、板塊裝置加裝於不同緯度位置之球體平均角速度

	赤道	北緯 22.5 度	北緯 45 度
板塊移動前平均角速度 (弧度/秒)	8.84	9.82	10.08
板塊移動後平均角速度 (弧度/秒)	8.98	9.64	9.92
平均角速度變化 (弧度/秒)	+0.14	-0.18	-0.16

另從原始數據計算自轉一圈所需的時間，得到的結果如下：

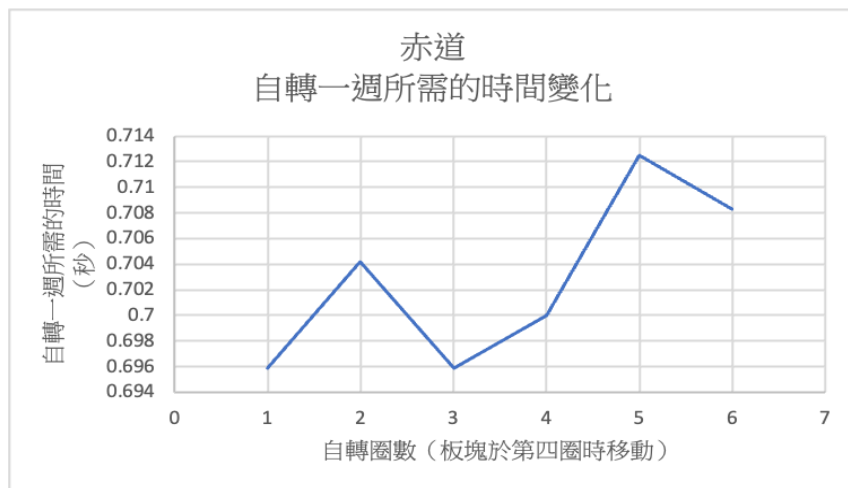


圖 31



圖 32

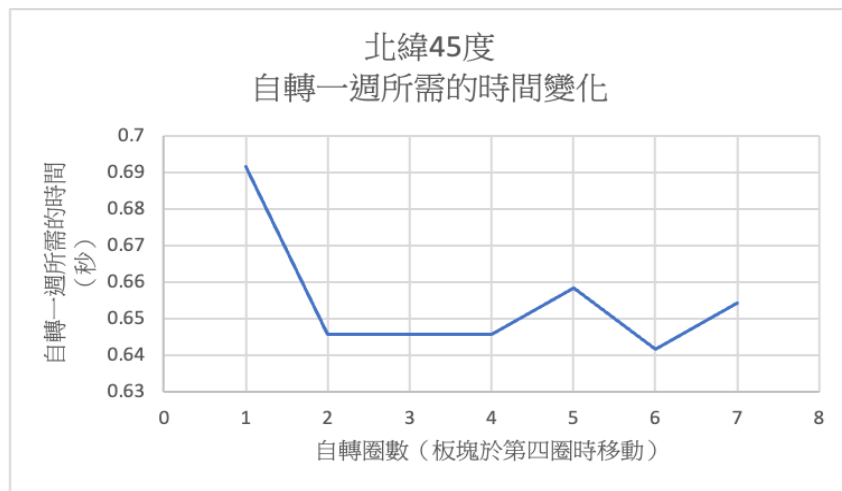


圖 33

由圖 31 至圖 32 可見，在這三個緯度位置，均呈現發生板塊移動時，自轉一週所需時間變短之現象，但變動幅度差異不大。

三、板塊移動方向與球體旋轉方向同向或反向對於球體角速度之影響

以下將就圖 22 至圖 25，不同板塊移動方向與球體方向的四組角速度圖形進行討論。由圖 22、圖 23 可發現板塊移動與球體旋轉同向的兩組圖形變化特徵極為類似：板塊移動後角速度變化的高峰值都明顯增高，低峰值略降低，振幅明顯變大。而圖 24、圖 25 中，板塊移動與球體旋轉反向時，則顯示板塊移動後振幅變化極不顯著。

如上段所推論，板塊移動後球體質量分布更加不均，使得原角速度快者愈快，慢者愈慢。而板塊移動方向與球體旋轉方向相同時，此質量分佈不均的影響有加乘效

果，對角速度週期性快慢變化的影響較兩者方向相反時更大。

將角速度前後變化情形做成表 3，我們發現在角速度波形之波峰或波谷移動板塊，會造成角速度迴歸直線斜率和平均角速度變化之差異。其中，圖 22、圖 24、圖 25 皆為在角速度波谷處移動板塊，角速度變化趨勢在板塊移動後瞬間先快速上升而後緩下降，迴歸直線斜率為負值。最終三組平均角速度變化亦皆為負值，即板塊移動後平均角速度變慢。而參考圖 23，在圖形波峰處移動板塊，角速度變化趨勢在板塊移動後瞬間並無明顯改變但呈上升趨勢，迴歸直線斜率為正值，平均角速度變化亦為正值，即板塊移動後平均角速度變快。

表 3、不同板塊移動方向與球體旋轉方向之球體平均角速度

	球體順時針； 板塊順時針	球體逆時針； 板塊逆時針	球體逆時針； 板塊順時針	球體順時針； 板塊逆時針
在波峰或波谷處 移動板塊	波谷	波峰	波谷	波谷
迴歸直線斜率	-1.1058	0.6554	-0.5328	-0.6484
板塊移動前 平均角速度 (弧度/秒)	10.08	9.96	9.58	10.90
板塊移動後 平均角速度 (弧度/秒)	9.92	10.07	9.35	10.73
平均角速度變化 (弧度/秒)	-0.16	+0.11	-0.23	-0.17

另從原始數據計算自轉一圈所需的時間，得到的結果如下：

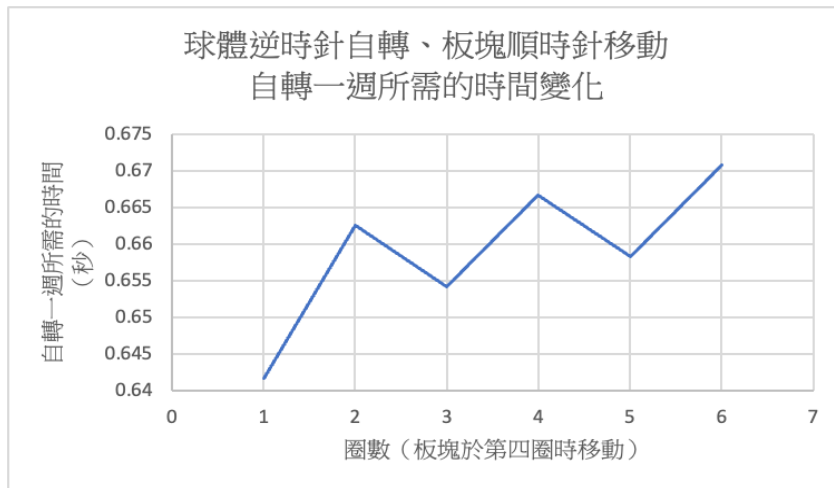


圖 34

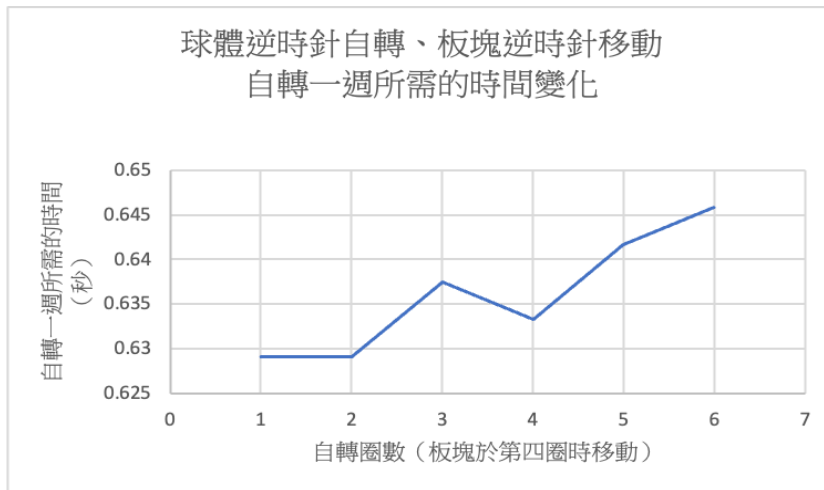


圖 35

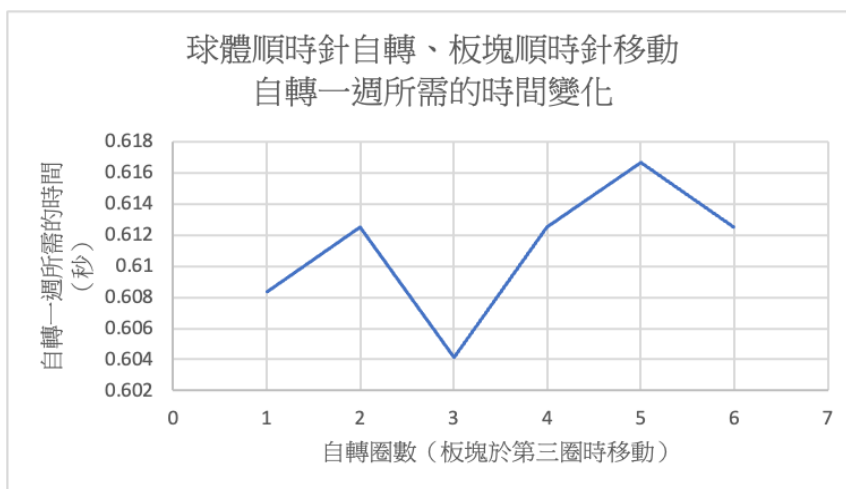


圖 36

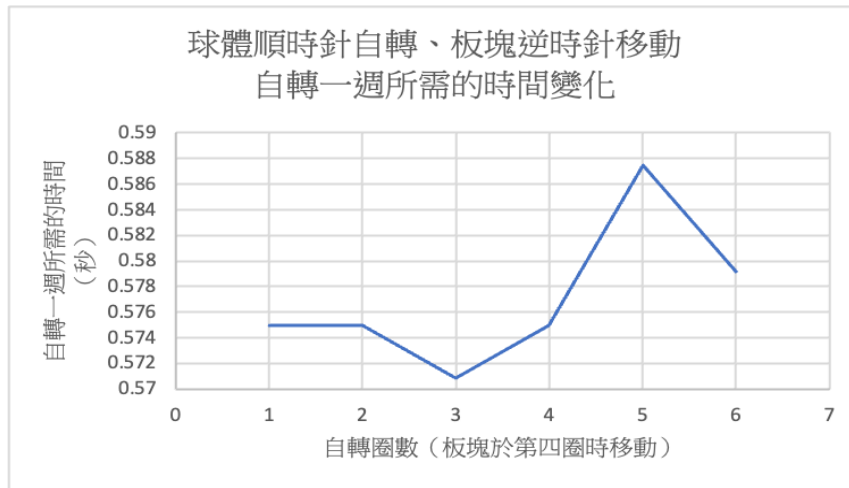


圖 37

圖 34 至圖 37 中，也呈現出板塊移動前後自轉一週所需時間發生改變，但是沒有規律性。可能如前所述，板塊移動發生在角速度相對小或大時，會有不同的結果。

四、計算本模型模擬地震所造成之日長度變化之於實際地球影響尺度

以板塊無加重、位於赤道位置，板塊移動與球體旋轉皆為順時針組為例：

板塊移動前平均角速度 8.10 弧度／秒，相當於平均自轉一圈約需 0.7757 秒。

板塊移動後平均角速度 7.90 弧度／秒，相當於平均自轉一圈約需 0.7953 秒。

平均自轉一圈所需時間變化量為 $0.7953 - 0.7757 = 0.196$ （秒），除以板塊移動前平均自轉一圈所需時間得變化比例 $0.196 / 0.7757 = 0.025$ 。

取平均太陽日 24 小時， 24 （小時） $\times 0.025 = 0.6$ （小時） $= 36$ （分鐘）。

即本模型模擬之地震所引發之日長改變量，相當於自轉週期 24 小時的地球改變了 36 分鐘。

柒、結論

一、自製地球模型轉動時角速度有周期變化，可以當作觀察模擬地震發生的背景資料。在模擬板塊移動後，角速度圖形週期、峰值、振幅與角速度平均值會發生變化。

二、加重在赤道上板塊的重量，角速度變化並無明顯趨勢，但在板塊移動前後球體自轉一週所需時間會減少，且最後自轉一圈所需時間皆增加。

三、板塊位置在赤道因受重力外力矩影響，角速度變化遠不如北緯位置明顯。其中北緯 22.5 度組角速度圖形之高峰值及振幅皆顯著增加，北緯 45 度組變化則較不明顯。

四、在板塊移動與球體旋轉同向的狀況下，角速度變化振幅明顯加大，反向則不明顯。在角速度相對小時移動板塊，角速度趨勢往下，且平均角速度減少，反之，在角速度相對大時移動板塊，角速度趨勢往上，且平均角速度增加。

五、本模型模擬之地震所引發之日長改變量，經由換算相當於自轉週期 24 小時的地球改變了 36 分鐘。

捌、參考資料

一、趙丰。地震！把地球震歪了？。科學人。

<https://www.earth.sinica.edu.tw/content/people/bfchao/publication/cht/201102-108.pdf>

二、趙丰。一天 24 小時不夠用？再等等，地球自轉越來越慢.....。研之有物。

<https://research.sinica.edu.tw/chao-fong-earth-rotation-moon-angular-momentum/>

三、Wizard's Globe - The Creativity of it

<http://www.stormthecastle.com/creativity/the-creativity-of-it-wizards-globe.htm>

【評語】 180015

本研究使用自製地球模型模擬板塊變化，並運用 tracker 等程式，模擬地震後板塊位移對地球自轉影響之變化。雖然巨幅放大這種變化之影響，但製作模型與實驗資料分析費了很大之功夫，對相關概念之科普教育具應用價值，也很合乎 STEM 的科學探究歷程，值得嘉許。名種外力之可能影響以及實驗過程可能產生之誤差可以深入再分析探討。結論在定性上合理，在定量上有所不足(由於自轉是向量，而目前的測量值只是其一分量)