

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

第三名

051902

「震」去「震」又回

—臺灣西南近海地震群實例研究

學校名稱：高雄市立高雄女子高級中學

作者： 高二 陳仟袖 高二 曾子華 高二 林均容	指導老師： 蔡靜誼 黃春盛
---	-----------------------------

關鍵詞：地震、能量、斷層

摘要

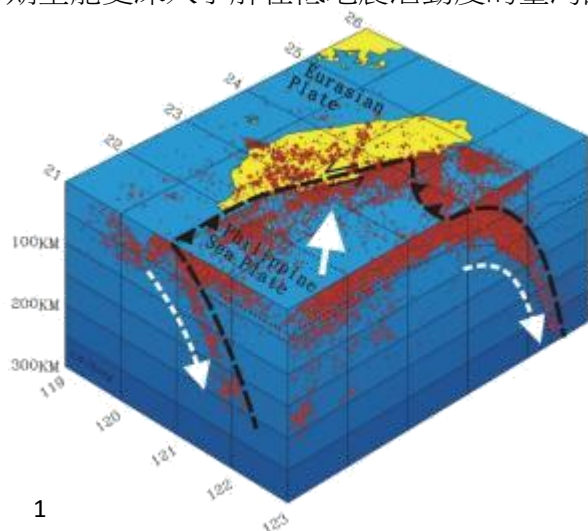
本報告分析臺灣西南近海約東經 120.5 度、北緯 21.7 度的地震目錄，此地震群在西南部低地震活動區發生，顯得特別。分析結果在 1994~2013 年 10 月間，出現四次大地震，震源深度均約 40 多公里。大地震發生後，較長期的地震位置變遷，均約以近 2 年時間向上向東遷移，再向下向西回到 40 多公里，並接續下一次大地震。深入統計分析，發現數次變遷範圍常大於 10 公里，超過定位不確定性，是可信賴的結果。不過大地震發生後約 2、3 月內的短時間變化趨勢較複雜，和長期趨勢相似。本研究也建立一系列模擬實驗和一假設模型，解釋地震隨時間空間的變動，接近週期性發生的原因。並比較附近地區地震活動，考慮岩層受大環境應力作用後，大地震後數年內地震平均位置的變遷。

壹、研究動機

根據高一學過的知識，臺灣位於聚合性板塊交界帶，東北部和南部海域各有一隱沒帶（圖 1），其附近地震頻繁。檢查我們的居住地附近，發現雖然地震活動度低，仍可見一些地震群集（圖 2）。例如：以往的白河大地震及今年的美濃大地震引起的餘震群，均在較平靜的南部地震帶引起了極大的震撼。我們的研究開始早於美濃大地震，當時最引起我們注意的是約位於東經 120.5 度、北緯 21.7 度，在空間上獨出的地震群集，查閱資料發現此和 2006 年 12 月 26 日發生的屏東大地震相關，根據我們初步研究，這一群像是在地震較不頻繁的區域內出現的「孤島」，近 10 年內，有數次規模大於 5.0 的大地震及伴隨餘震的發生（見表 1），顯示地震活動的頻繁，因此我們可分析的地震資料數量應較足夠，並與其他區域的地震較易區隔開來，因此本報告以此地震群為開端做研究，期望能更深入了解在低地震活動度的臺灣西南近海地震區地震的時空分布特性。

圖 1、臺灣地區地震帶及板塊交界帶

（圖片來源：www.earth.sinica.edu.tw）



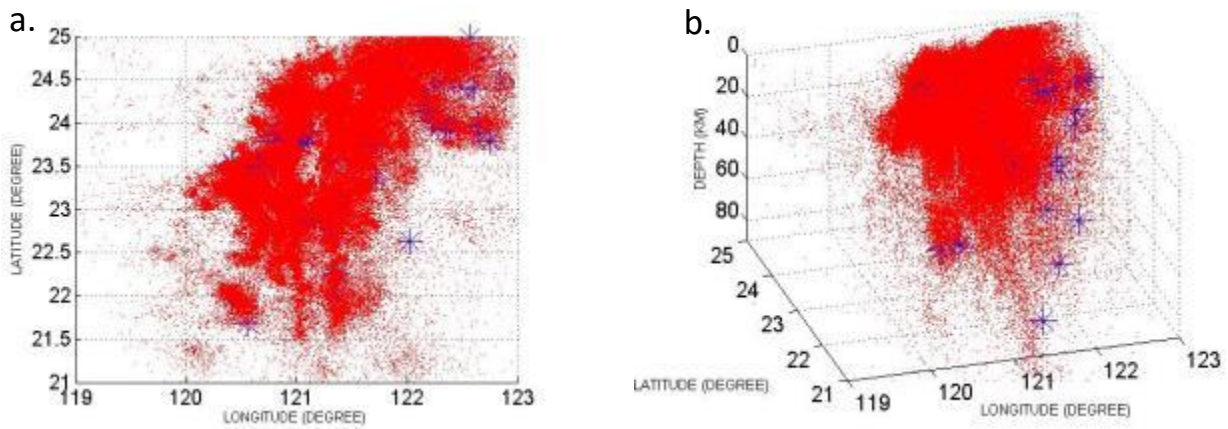


圖 2、臺灣地區地震空間分布 a.俯視圖 b.側視圖

(時間：1994 年 1 月～2013 年 10 月。藍色 * 表地震規模 ≥ 6.0)

表 1、北緯 21.7 度、東經 120.5 度附近較大地震時空列表

時間	空間	規模 (M _L)
1997 年 08 月 24 日	東經 120.2722 度，北緯 21.6295 度	5.35
2003 年 08 月 03 日	東經 120.4460 度，北緯 21.9732 度	5.18
2006 年 12 月 26 日	東經 120.5553 度，北緯 21.6873 度	6.96
2009 年 07 月 29 日	東經 120.4825 度，北緯 22.0537 度	5.75

貳、研究目的

藉由分析台灣西南近海區域地震目錄，了解地震群在時空上變動趨勢，並提出可能模型。

參、研究設備及器材

一、硬體設備：

a.仿地層（樹脂土） b.自製施壓裝置 c.天文望遠鏡之重錘 d.攝影機 e.塑膠透明桌墊

二、軟體設備：

UltraEdit、MATLAB R2014a、Microsoft Office Word、Microsoft Office Excel

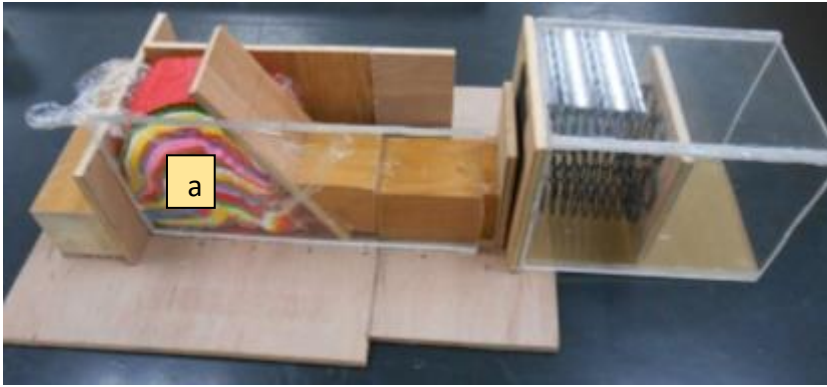


圖 3、研究設備及器材圖

肆、研究過程及方法

一、地震資料分析

(一) 地震群的選取

- 1.於中央氣象局之台灣地區地震目錄選取 1994 年 1 月～2013 年 10 月台灣西南部的地震資料（包含：時間、地點、規模）。
- 2.以表 2 條件為空間邊界，選取和屏東大地震（2006 年）可能相關的資料作為研究素材。
- 3.繪出此地震群內之地震深度、經度及緯度位置隨時間的變化。

表 2、研究的地震群選取條件

條件一	緯度- $(-0.8667*經度+126.67) \leq 0$
條件二	經度 < 120.7
條件三	緯度 > 21.58
條件四	緯度- $(-2.55*經度+328.3) \geq 0$
條件五	緯度- $(0.766*經度-69.98) \leq 0$

(二) 地震資料的時間序列分析

1.長時間序列分析

- (1) 將 1994 年 1 月～2013 年 10 月地震在空間中，東西（經度）、南北（緯度）及垂直（深度）方向上隨時間的變化，製出時間序列，表示地震位置的變動情形。
- (2) 以移動視窗在三序列上選取地震，視窗大小為 0.5 年，每 0.1 年移動一次。
- (3) 分別計算移動視窗內經度、緯度及深度位置的「平均值」及「標準差」範圍，並繪圖比較「平均值」及「標準差」隨時間的變化。

2.人工地震序列分析

- (1) 在上述長時間序列中選取規模大於 5 的地震，不更動地震發生時間、位置及規模，打亂其它地震的順序，做成東西、南北及垂直深度三方向上新的「人工地震序列」。
- (2) 以上述長時間地震序列分析中步驟 1 的 (2) ~ (5) 分析「人工地震序列」。

3.短時間序列分析

- (1) 以較小的移動視窗（視窗大小為 0.05 年，每 0.01 年移動一次）選取地震，分析大地震發生後 2.5 年內視窗內地震的「平均經度」、「平均緯度」及「平均深度」。
- (2) 將上述結果與長時間序列做比較。

(三) 地震時空移動趨勢分析

1.地震密度之空間變化分析

- (1) 將研究區域之北緯 21.5 到 22.5 度，東經 121 到 122 度，深度 0 到 90 公里範圍，經度 0.05 度×緯度 0.05 度×深度 5 公里，分成 7200 個邊長約 5 公里的立方格（圖 4）。

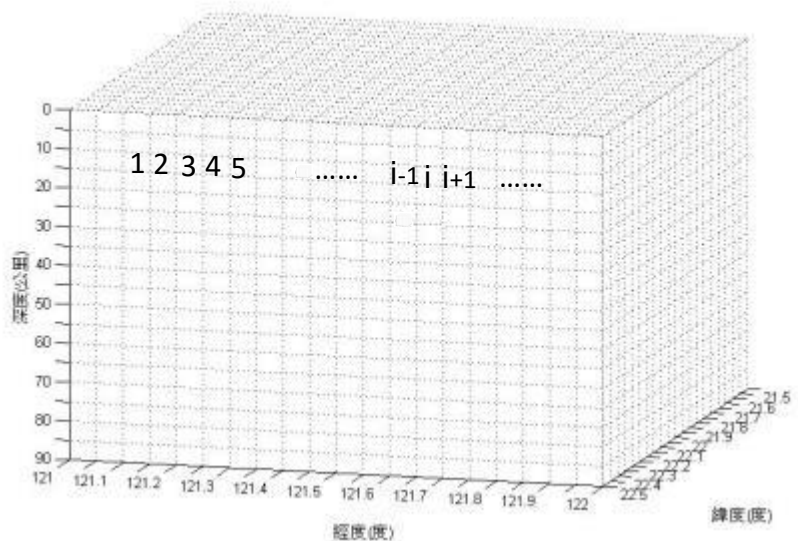


圖 4、本研究地震時空分布網格點示意圖

- (2) 以和上述步驟 (二) 1. (2) 相同的移動視窗選取地震，作成不同的子地震序列並計算序列中地震總數 N 。
- (3) 以不同顏色及大小的泡泡表示立方格的地震密度，繪製各移動視窗，地震空間分布的密度圖。依時間演進觀察地震密度的移動情形，並對照步驟 (二) 的結果。
- (4) 將上述各視窗中地震密度以規模做權衡 (weighting)，即每個地震個數原以 1 計算，權衡後以每個地震乘上 10 的規模次方表示，所以在第 i 立方格上權衡前地震原本有 j 個，總和為 $n_i=j$ ，權衡後總和 $W_i=10^{M_1}+10^{M_2}+\dots+10^{M_j}$ ，代表立方格內的能量總和。
- (5) 計算各視窗內代表所有格點的能量數值 W_i 總和，可得總能量數 $E=W_1+W_2+\dots+W_i$ 。
- (6) 計算各視窗內各立方格能量機率密度 $e_i=W_i/E$ ，並重覆上述 5、6 兩步驟。
- (7) 計算上述主震發生後地震位置的平均值在權衡前後，隨時間變化的情形。

2.高密度平均位置隨時間改變分析

- (1) 在 2003、2006 及 2009 年主震發生後三週期中，地震密度高於平均值的地震，訂為「高密度群」，低於平均值則訂為「低密度群」，分別計算高低密度群內位置平均值。
- (2) 計算上述步驟（10）中高密度群地震位置平均值隨時間的變化。
- (3) 將上述（2）結果與所有地震得到的平均位置隨時間的變化做比較。

（四）地震週期性分析

- (1) 以和步驟（二）1.（2）相同移動視窗選取地震，並作成不同的子地震序列。
- (2) 計算各視窗時間最大 T_{max} 及最小值 T_{min} ，求各視窗的中點時間 T_{mid} 。
- (3) 計算各視窗內分別規模大於 3.0、4.0、5.0、6.0 的地震個數 N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 。
- (4) 繪製個數（ N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 ）與時間（ T_{mid} ）變化圖。

二、模擬實驗

（一）實驗製備

1. 仿地層製作

- (1) 為了證實我們所觀察到斷層受力變化的結果，我們嘗試了許多材料模擬受力變化，最後決定以可塑性強的樹脂土做為材料，模擬地層擠壓之變化。
- (2) 以七種不同顏色的樹脂土作為區分地層的顏色區隔，觀察地層單壓受力後的現象
- (3) 依序把處理好的不同顏色樹脂土疊成一疊，三疊共 21 層形成一組仿地層。



圖 5、一組樹脂土仿地層

2. 單壓平台製作

- (1) 裝置中前方透明壓克力板與下方木板以熱熔膠固定，後方木板以魔鬼氈置於底板，可方便拆除以控制側壓效果。將攝影機旋轉 90 度拍攝，使仿地層畫面保持平行。
- (2) 將裝置垂直放置，以望遠鏡重錘（總重 8.55 公斤）施力，實驗兩分鐘。

（二）實驗步驟

1. 實驗一：上層側壓對仿地層在單壓模式下造成的行為。

- (1) 將一組仿地層置於單壓平台上，除了單壓的施力方向外，其他方向均有固定的木板或透明壓克力（方便觀察、錄影用）對仿地層施予側壓效果。裝置完成後，開始單方向擠壓 2 分鐘。
- (2) 將上述實驗中的上方側壓移除，重複進行實驗，作為對照組。



圖 6、上壓側壓裝置圖

2. 實驗二：不同塑性的分層在單壓模式下所造成的行為。

- (1) 將樹脂土的上、中、下三層分別烘乾至不同程度，呈現仿地層不同塑性之效果（上層：溫度 50 度 1 小時、中層：溫度 50 度半小時、下層無烘乾），並施以前後側壓。
- (2) 以實驗一第 (2) 的仿地層做對照組，比較擠壓後仿地層之變化。

3. 實驗三：非水平方向施力在單壓模式下所造成的行為。

- (1) 仿地層置於平台，施力木板角度改為 60 度，裝置施以側壓（無上壓）進行實驗。
- (2) 仿地層置於平台，施力木板角度改為 120 度，裝置施以側壓（無上壓）進行實驗。
- (3) 以實驗一之 (2) 的仿地層做對照組，比較擠壓後仿地層之變化。

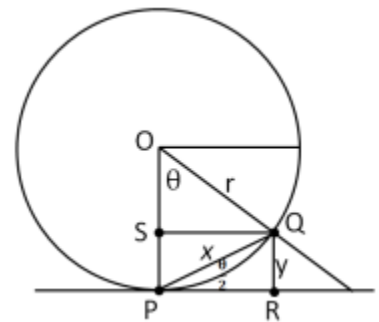
4. 實驗四：仿地層隨時間變化的投影面積百分比與褶皺曲率之研究。

- (1) 對實驗三的仿地層擠壓過程錄影每 30 秒截圖，並將仿地層分上、中、下三層討論。
- (2) 以透明塑膠墊切割成與仿地層等大小，並以其重量比討論各層投影面積之變化。
- (3) 由錄影截圖量測褶皺部分曲率，也利用數學方法做近似計算。

在弧長 PQ 的曲率值為 2 倍 Q 點至過 P 點切線距離除以 PQ 線段長的平方。即，

$$\begin{cases} \cos\theta = \frac{OS}{R} = \frac{r-y}{r} \\ \cos\frac{\theta}{2} = \frac{PR}{PQ} = \frac{\sqrt{x^2-y^2}}{x} \end{cases}, \text{ 又 } \cos\frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1+\cos\theta}{2}}$$

$$\Rightarrow \frac{x^2-y^2}{x^2} = \frac{1+\frac{r-y}{r}}{2} \therefore \text{曲率} K = \frac{1}{r} = \frac{2y}{x^2}$$



伍、研究結果

一、「地震資料分析」結果

(一)「地震群的選取」結果

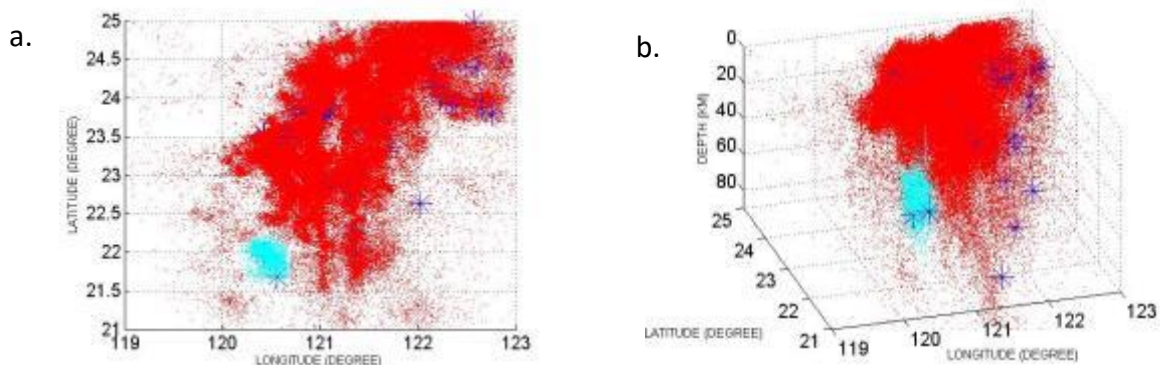


圖 7、本報告研究的地震群（淺藍色）位置圖 a.俯視圖 b.側視圖（藍色 * 表規模 ≥ 6.0 ）

圖 7 a.b.中淺藍點為本報告研究重點地震群，其內地震在三方向上位置變化如圖 8a.b.c.。對照表 1，發現上述四次主震發生後地震出現較為頻繁，尤以 2006 年底最明顯，此可能與地震測站建佈增多及 2006 年底發生的主震規模較大有關。觀察其位置改變，發現有些相似的趨勢，例如圖 8 c.中震源深度在大地震發生前似乎有變深情形，發生後則常見由深到淺。

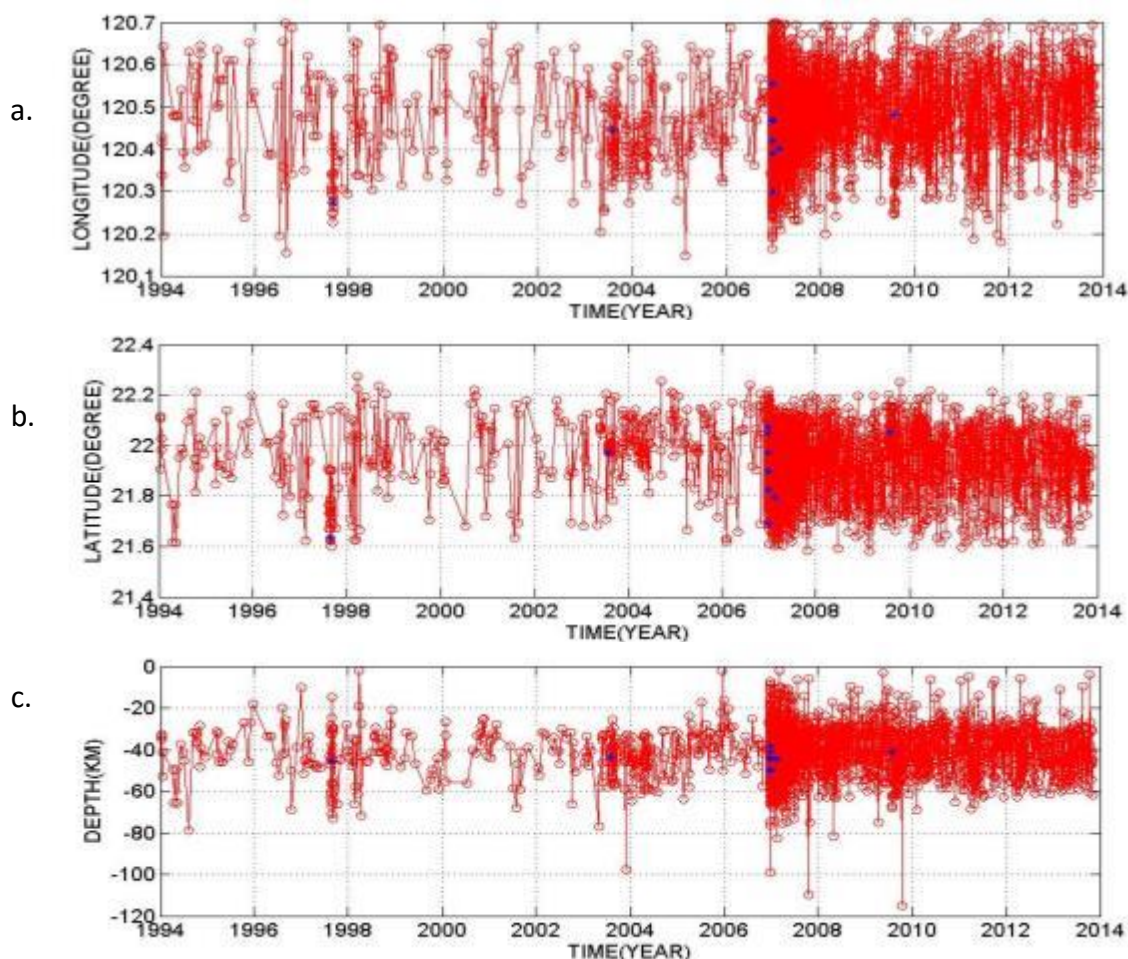


圖 8、1994~2014 年地震群內地震位置在 a.東西經度 (LONGITUDE) b.南北緯度 (LATITUDE) c.垂直深度 (DEPTH) 方向上隨時間的變化 (紅色。表地震，藍色 * 表規模 ≥ 5.0 地震)

為更深入了解此地震群在大地震發生前後，是否有規則的位置變遷，我們作了一些統計分析，結果如下。

(二) 「地震資料的時間序列分析」結果

1. 「長時間序列分析」結果

圖 9 為以移動視窗求出地震的平均經度、緯度及深度隨時間的變化。由圖可見，大地震均在偏西偏深處發生，而大地震後，視窗平均會漸淺漸東，然後其值又變大，即地震再次漸西漸深移到下一次大地震發生。而在緯度方向上 (圖 9b.) 則不太一致。

為證明這些平均位置的變動趨勢具一定的可信度，我們在分析中加入「標準差」，標示視窗內大部分地震群的分布範圍，剔除視窗內地震分布較邊緣者，以找出大部分地震所在位置。在圖中可見大部分地震分布範圍（a.b.c.圖中上下兩虛線範圍內）和平均值（紅色○）的變動趨勢相符，可見我們求出的位置平均值具整群地震位置移動趨勢的代表性。

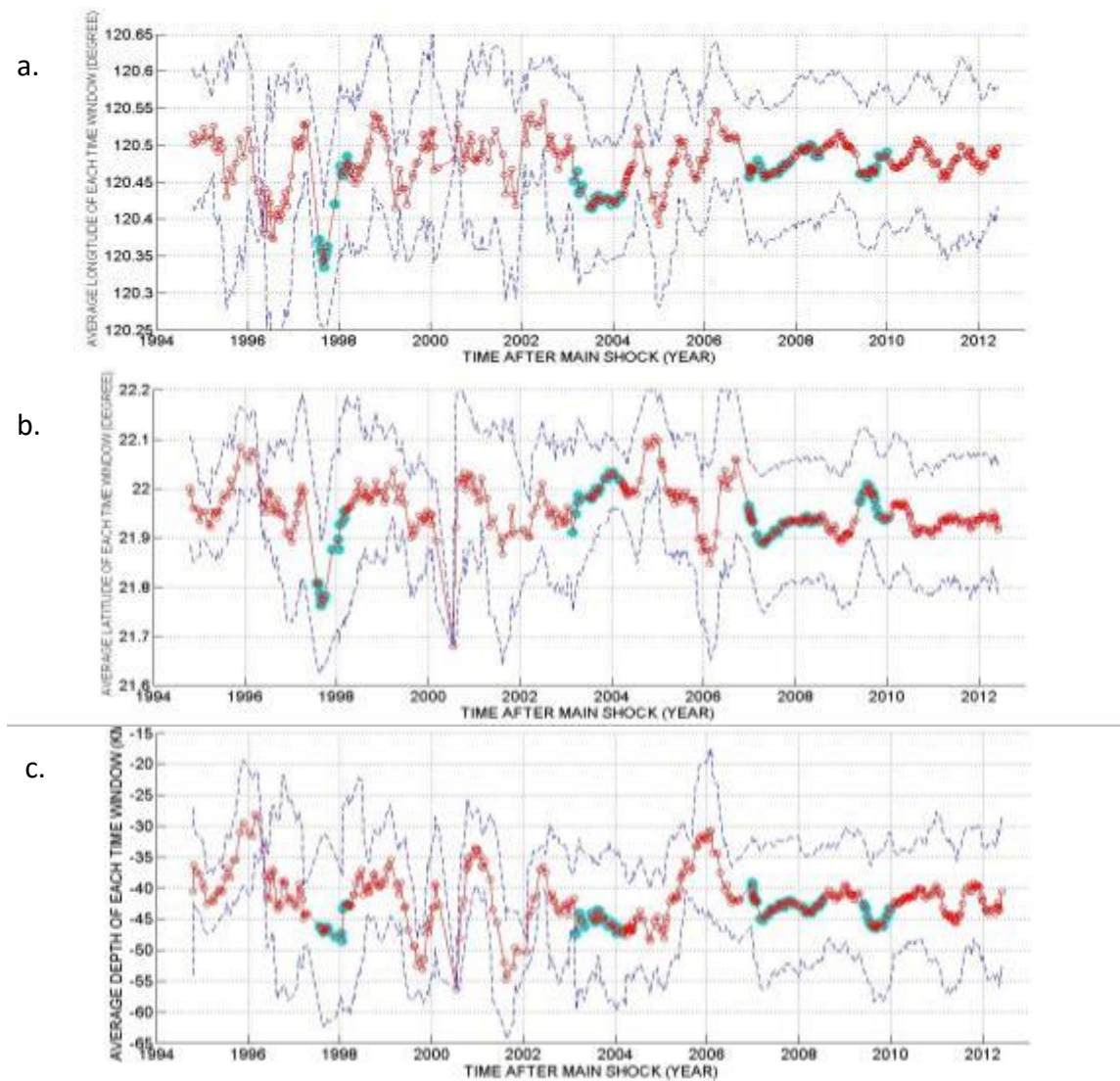


圖 9、1994~2014 年 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度隨時間變化（藍點○視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，藍色虛線—視窗內地震位置平均值的標準差）

2. 「人工地震序列分析」結果

為更深入了解幾次大地震發生後，位置漸東漸淺，接著漸西漸深直到下次大地震出現的趨勢，是否出於偶然。於是打亂大地震外的地震順序，做成人工序列並重做分析，發現經度、深度均無上述趨勢，比較標準差也發現較無明顯變化，表示此時大部分地震移動較不明顯。

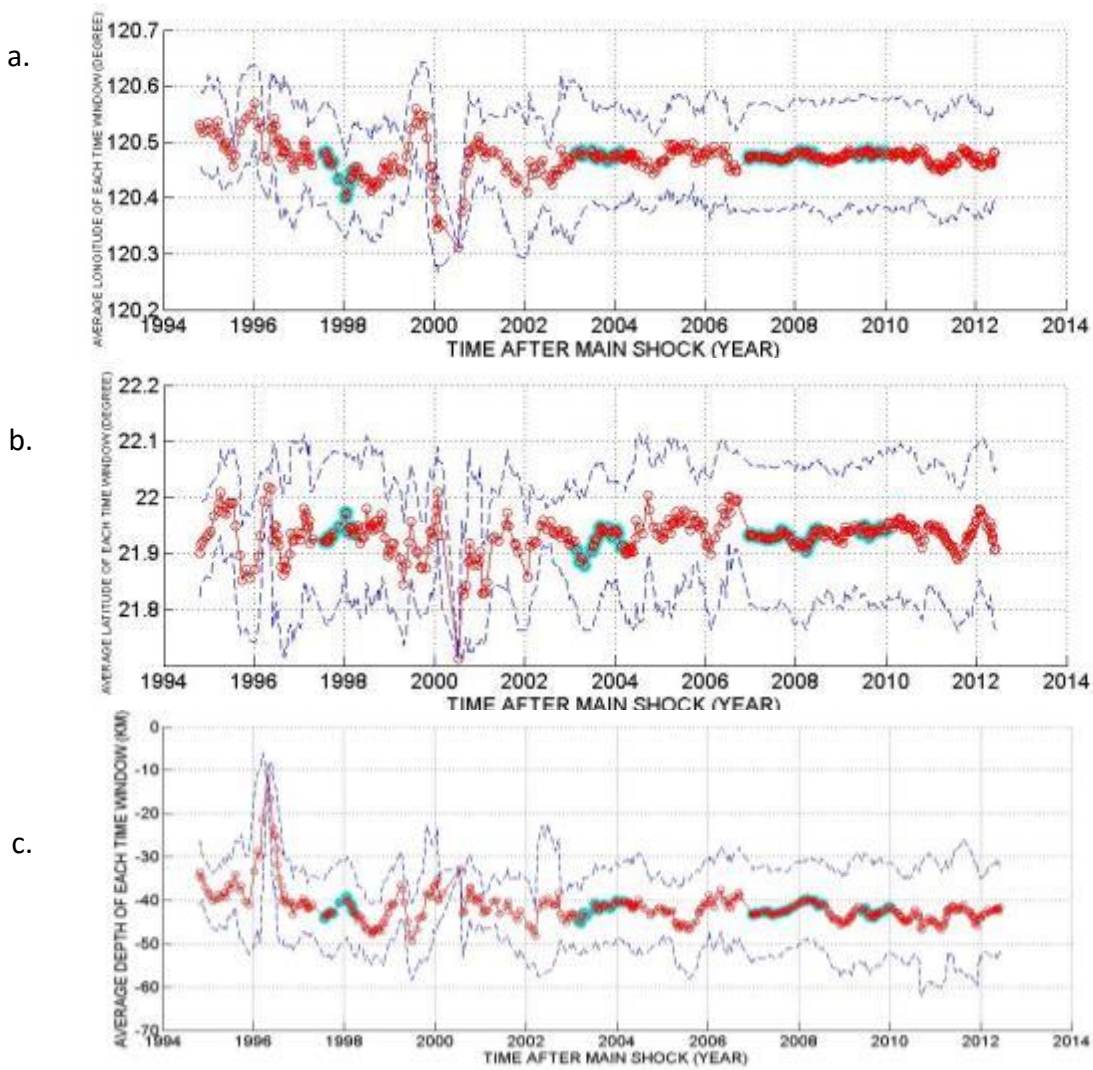
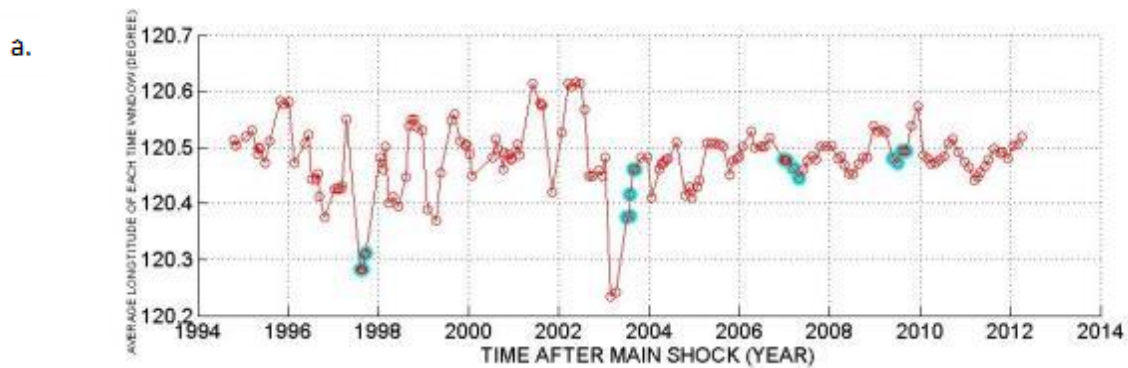


圖 10、亂數序列求取 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度的結果（藍點。視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，藍色虛線—。視窗內地震位置平均值的標準差）

若只將視窗內所有地震位置平均，較多個數的小地震影響較大。為減低此影響，以地震規模權衡計算出來的平均位置較不偏頗。圖 11 顯示，權衡後的位置仍有漸西漸深的趨勢。



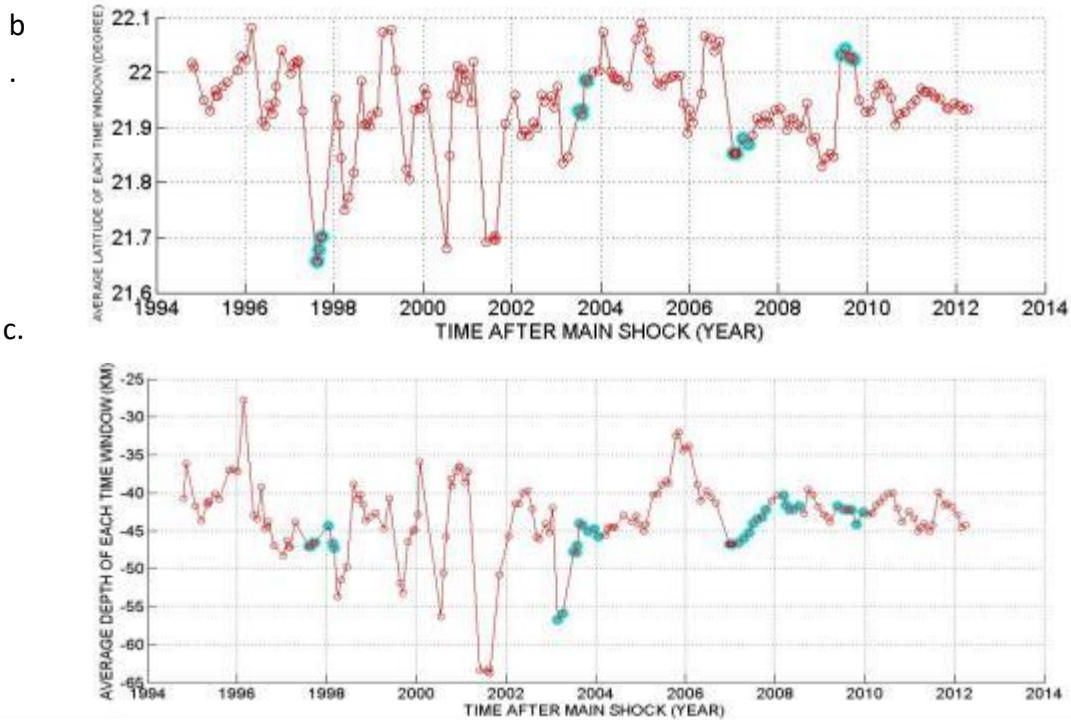


圖 11、1994~2014 年權衡後 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度(。視窗內包含規模 ≥ 4.5 地震)

3.短時間序列分析結果

利用較小的移動時間視窗 (0.05 年, 每 0.01 年移動), 可了解地震後短時間內位置變化的趨勢。分析結果顯示 (圖 12a.b.) 主震發生後 0.25 年間, 平均位置的變化有先變深後變淺再變深的趨勢。比較圖 12c.和 a.發現, 當地震位置變深時也向東偏, 反之變淺則向西偏。而四次大地震後均向南移動。

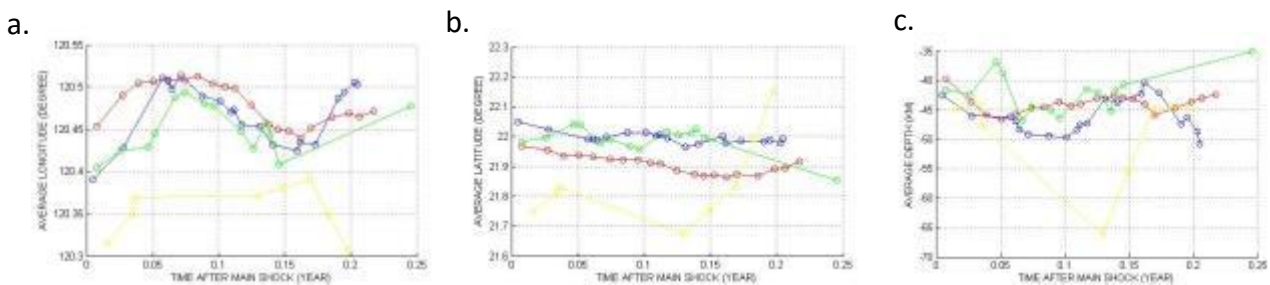


圖 12、以移動視窗分析主震發生後 0.25 年間視窗內平均位置在各方向的改變結果 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度 (黃色為表一中 1997 年、綠色為 2003 年、紅色為 2006 年、藍色為 2009 年的地震分析結果)

總結, 地震位置變化長時間 (圖 9) 和短時間 (圖 12) 的結果, 共同的趨勢為:

- 1.長時間 (2~6 年) 內, 約花 2 年由深度 40 公里漸淺 (也漸東), 再來 2 年漸深 (也漸西)。
- 2.短時間內, 同時由 40 公里左右漸深 (也漸東) 到漸淺 (也漸西) 再漸深 (也漸東)。

表 3、2003、2006、2009 年主震發生後地震（* 為規模 ≥ 5.0 地震）分布隨時間改變情形（各週期僅抽選 5 個移動視窗結果）

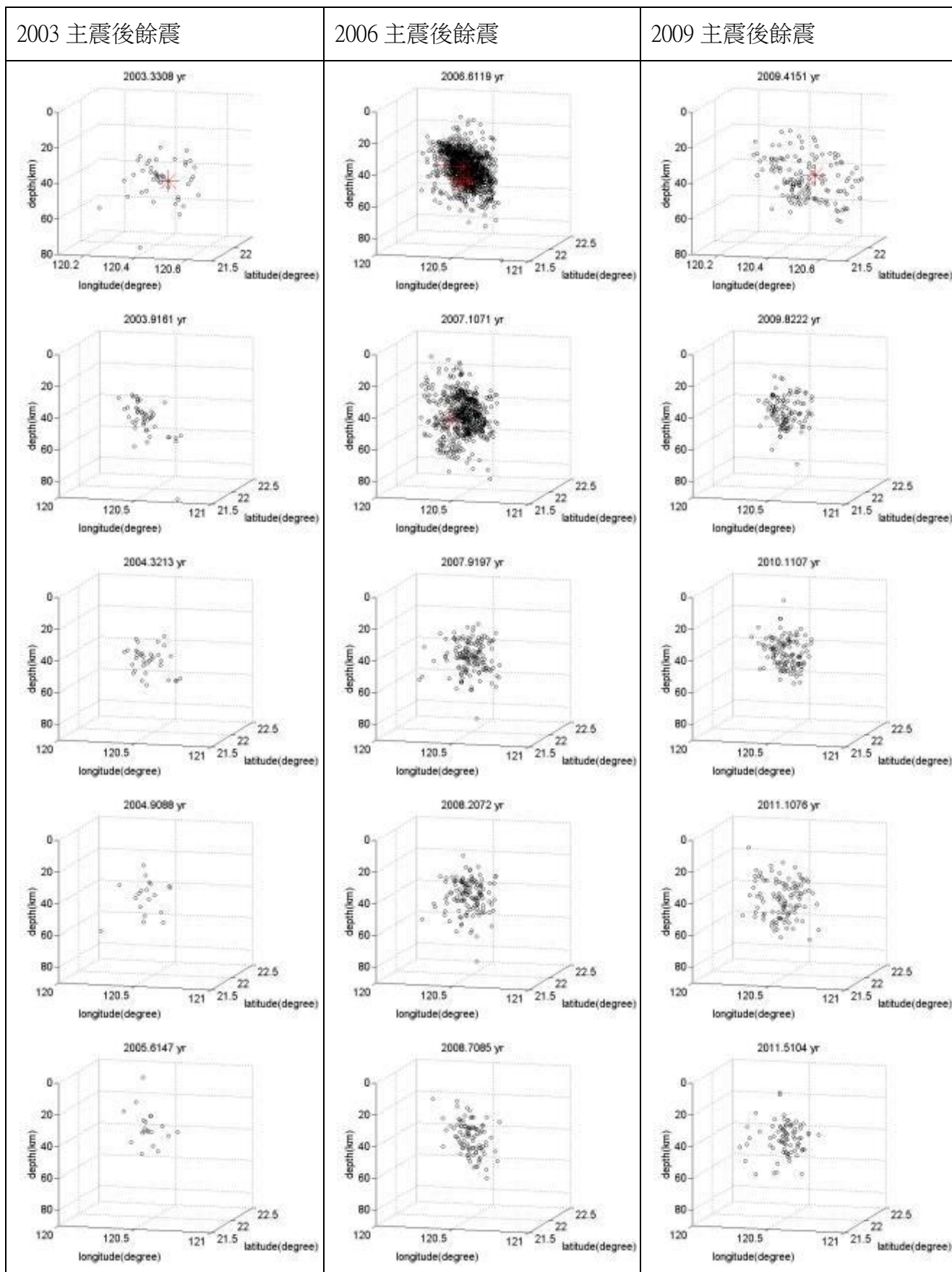


表 4、2003、2006、2009 年主震發生後地震分布密度隨時間改變情形（各週期僅抽選 5 個移動視窗結果，☆為規模 ≥ 5.0 地震，泡泡顏色及大小表在視窗內地震密度，淺藍色△表地震平均位置，黑色箭頭表示平均位置在 0.1 年前後變化情形）

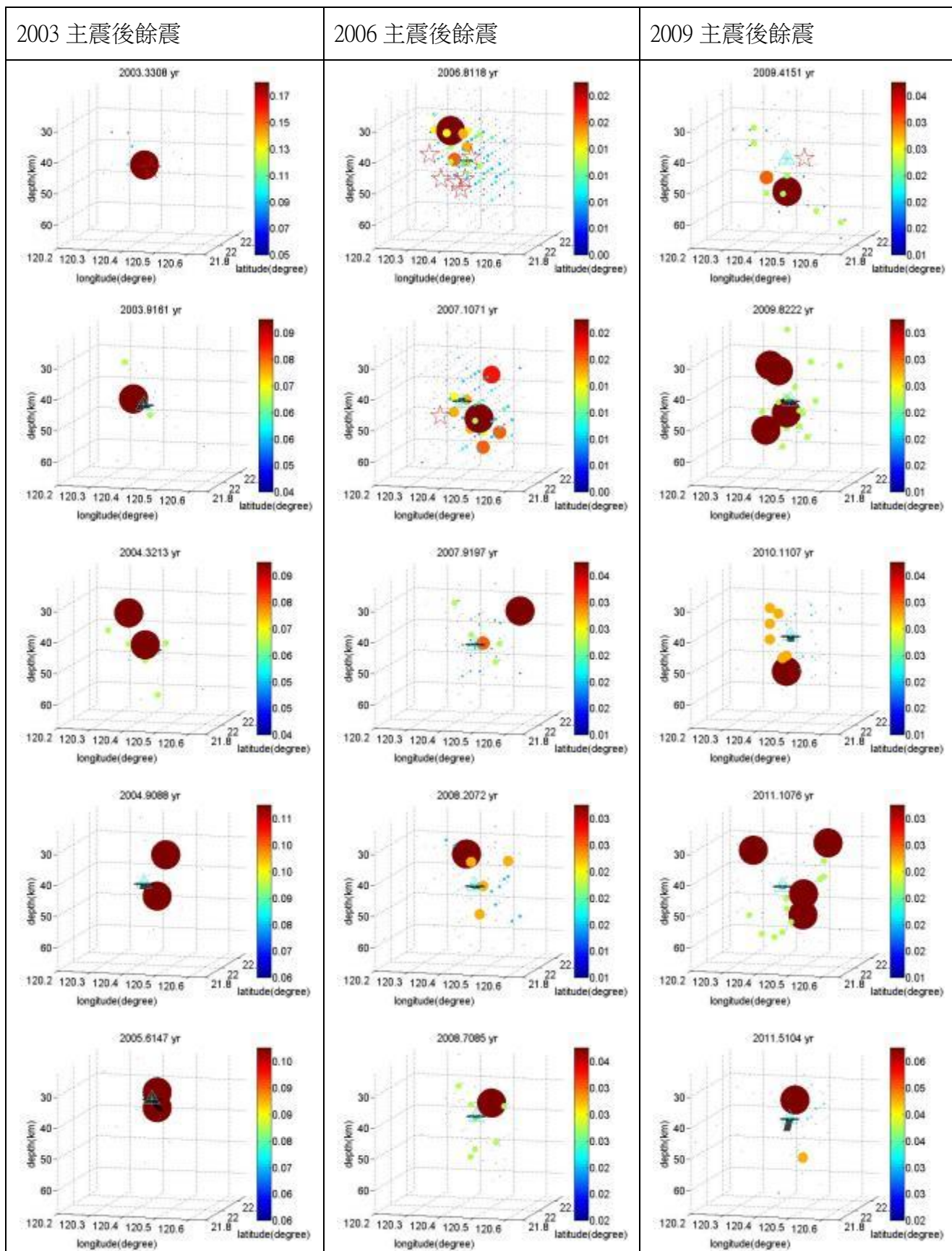
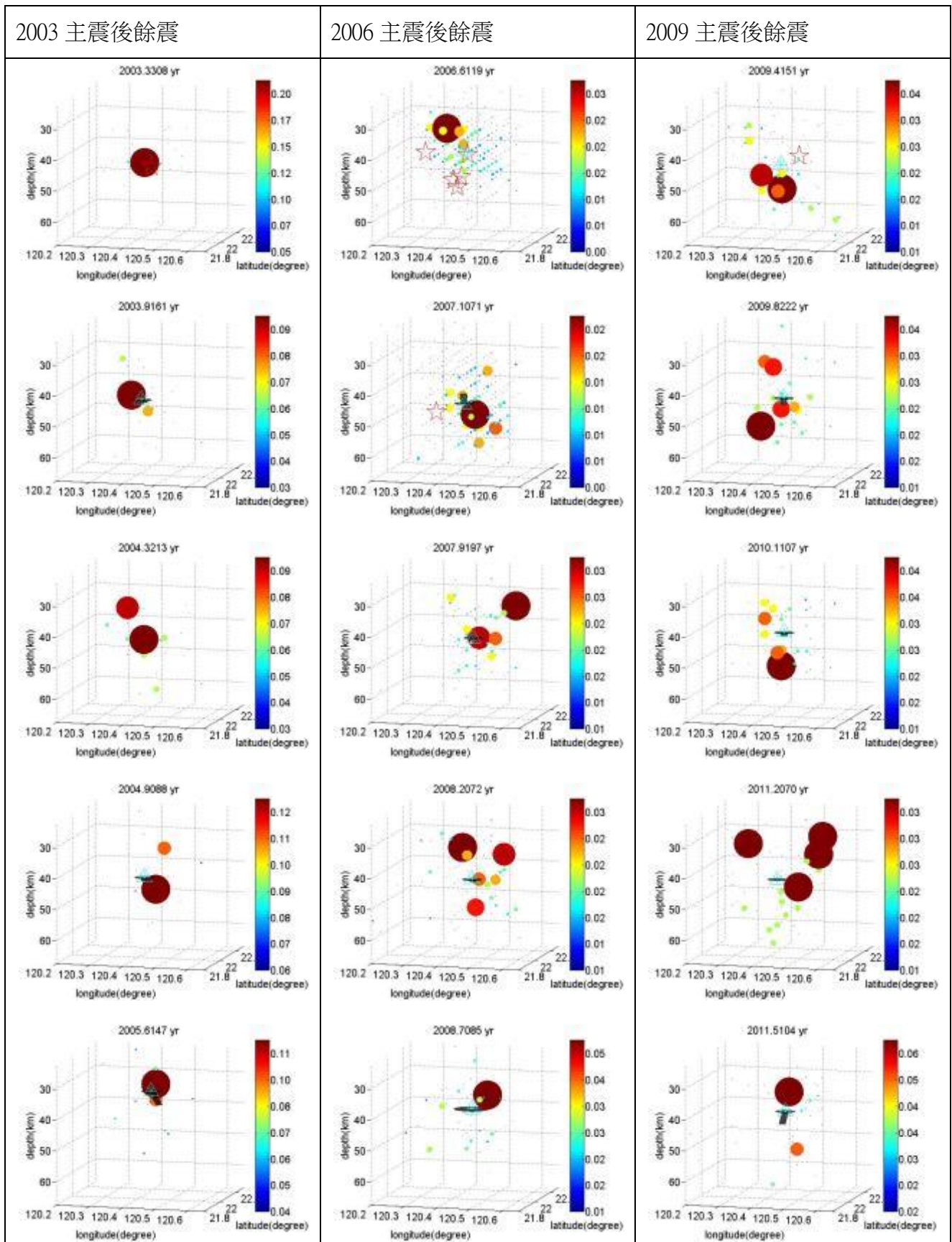


表 5、2003、2006、2009 三主震發生後地震「權衡」後密度分布隨時間改變情形（各週期僅抽選 5 個移動視窗結果，☆為規模 ≥ 5.0 地震，泡泡顏色及大小表在視窗內地震密度，淺藍色 \triangle 表地震平均位置，黑色箭頭表示平均位置在 0.1 年前後變化情形）



(三) 「地震時空移動趨勢分析」結果

1. 「地震密度之空間變化分析」結果

表 3 表示 2003、2006、2009 年三主震（見表 1）發生後，地震空間位置隨時間改變情形。圖中見主震（*）均偏左（西）或偏深（約 40 公里）發生，而餘震（。）約發生在其對側，即偏右（東）偏淺（約 20~80 公里）。觀察可見，主震發生後餘震個數增多、分布範圍由增大到縮小，但無法確定地震位置的移動趨勢。而若改以空間中地震發生密度觀察移動趨勢（如表 4），發現大地震發生後 2 年內地震高密度的位置均有向右（東）向上（淺）的趨勢。考慮大小地震能量及個數權衡後，亦可發現大地震發生後 2 年內密度較大區域向淺向東移動。

2. 「高密度平均位置隨時間改變分析」結果

圖 13 為三次主震後各視窗內地震平均位置隨時間改變的情形，由圖可見，三次主震後約 3 年內，地震初始發生在圖左側約 40 多公里處（白色箭頭），之後漸漸向圖右側（向東）且向上（向淺層）發生（黃→淺藍→黑色箭頭）。雖然 2006 年的週期內（圖 13b），餘震平均先向深（白→黃色箭頭）後才向淺（淺藍→黑色箭頭）移動，但此週期初始在較深處達到 40 多公里深後，接下來的移動就和 a.c.相同，漸東漸淺（約 35 公里深）移動。

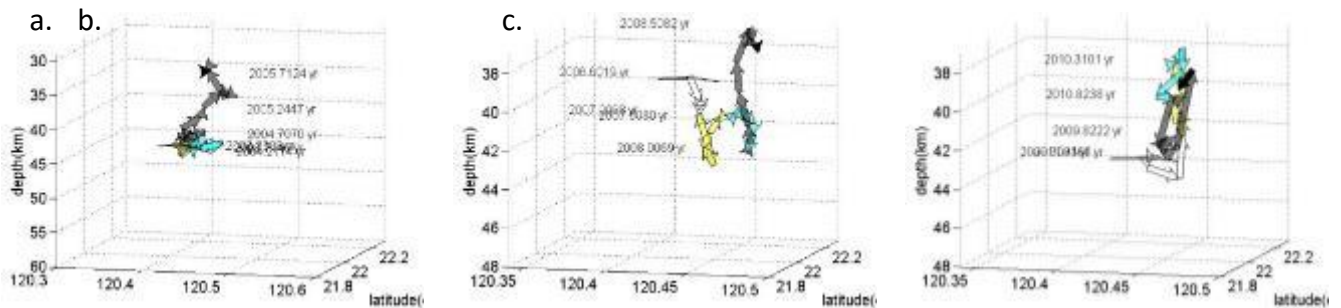


圖 13、主震後地震平均位置改變圖（視窗編號：白 1~5、黃 6~10、淺藍 11~15 及黑 16）

a.2003 年 3 月~2006 年 3 月 b.2006 年 7 月~2009 年 4 月 c.2009 年 4 月~2012 年 3 月

將位於高密度格點（>平均密度）內的地震位置求平均得「高密度平均位置」（圖 14），

顯示高密度地震發生區域的平均移動情形，和圖 13 移動趨勢接近，均約隨時間而向東向上。

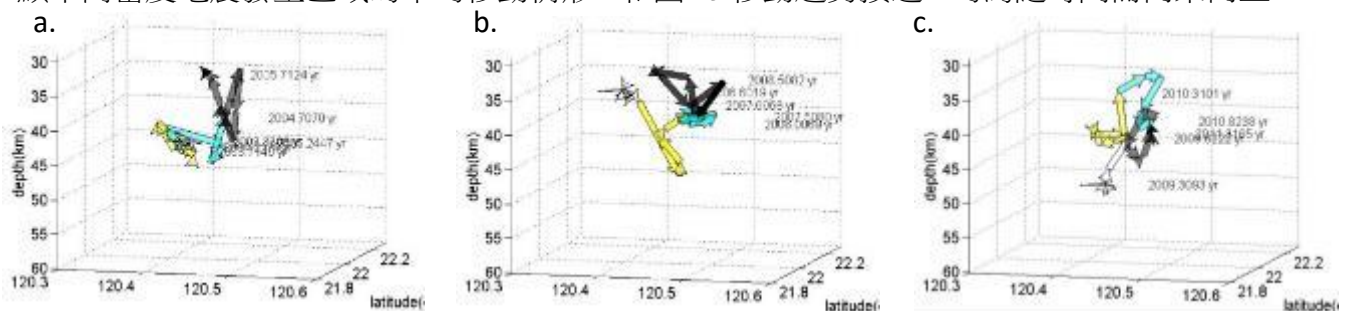


圖 14、主震後「高密度平均位置」改變圖（視窗編號：白 1~5、黃 6~10、淺藍 11~15 及黑 16）

a.2003 年 3 月~2006 年 3 月 b.2006 年 7 月~2009 年 4 月 c.2009 年 4 月~2012 年 3 月

圖 13 及 14，以地震規模做權衡後，得三主震「地震平均位置」(圖 15) 及「高密度地震平均位置」(圖 16) 權衡後結果，發現由 45 公里左右漸漸向東、向上仍是各大地震發生後餘震能量移動的趨勢，並且移動幅度更加明顯一些。

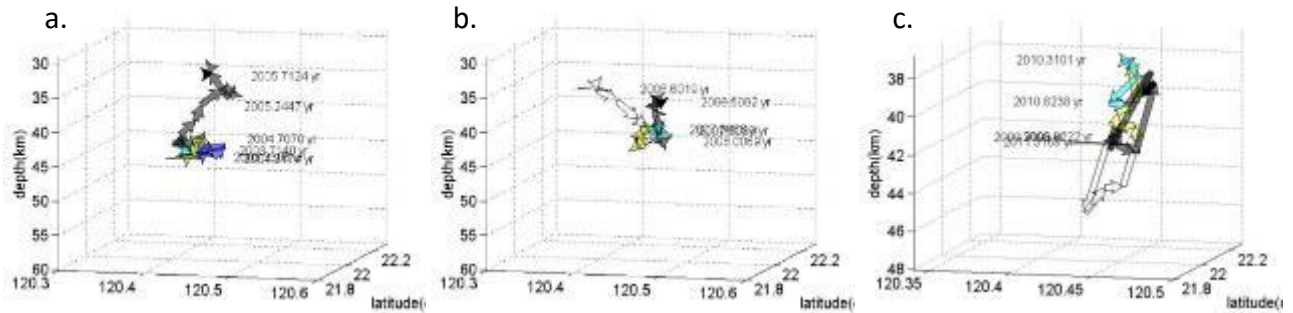


圖 15、主震後地震平均位置改變 (有加權衡，視窗：白 1~5、黃 6~10、淺藍 11~15 及黑 16)

a. 2003 年 3 月~2006 年 3 月 b. 2006 年 7 月~2009 年 4 月 c. 2009 年 4 月~2012 年 3 月

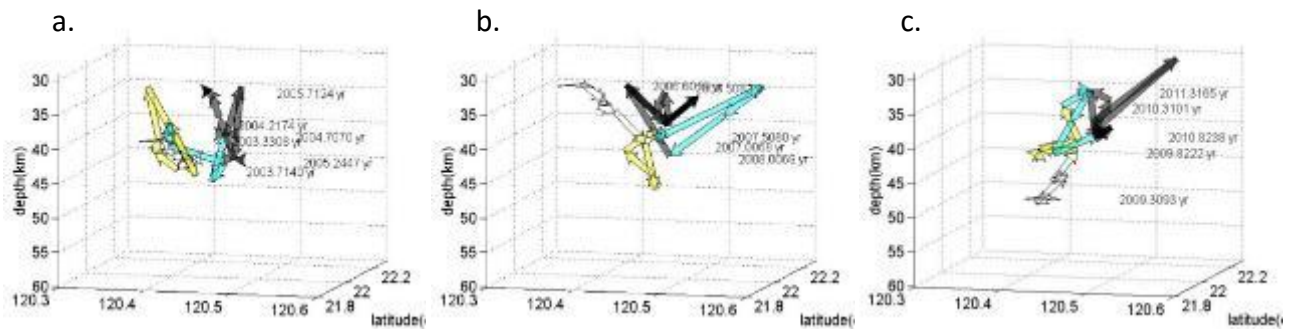


圖 16、主震後「高密度平均位置」改變 (有權衡，視窗：白 1~5、黃 6~10、淺藍 11~15 及黑 16)

a. 2003 年 3 月~2006 年 3 月 b. 2006 年 7 月~2009 年 4 月 c. 2009 年 4 月~2012 年 3 月

(四)「地震週期性分析」結果

觀察到 1994 到 2013 年 10 月間，各移動視窗內不同地震規模以上的地震個數隨時間變化的比較 (圖 17)，可發現在上述 1997、2003、2006、2009 年四個大地震發生後，規模 5.0、4.0、3.0 以上的地震個數增加，亦即此區約在間隔 3~6 年地震活動度變大，2009 年到 2013 年前資料，兩者也約間隔三年。在此之後雖然缺乏規模大於 5.0 的地震，但在 2012 年初仍有規模大於 4.0 的地震較多情形，顯示此區域大約 3~6 年出現一次較大規模的地震。

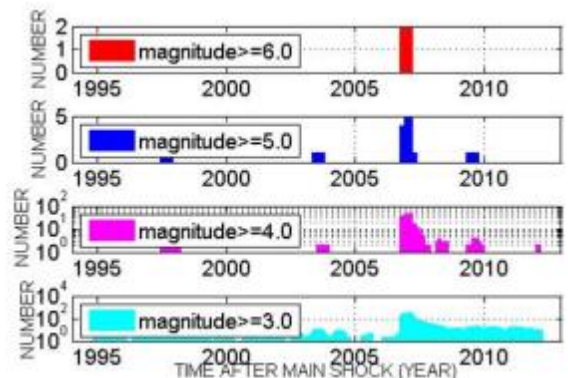








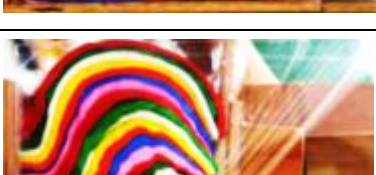

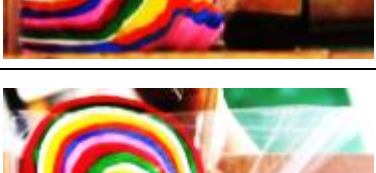
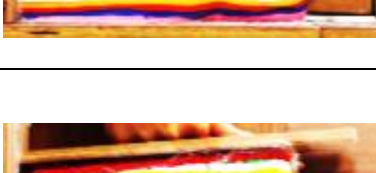
圖 17、不同規模地震個數比較

二、「模擬實驗」結果

(一) 實驗一：不同側壓對樹脂土在單壓模式下造成的行為。

在表 6 的截圖中，若六面均有側壓（表中右圖）的情況下，因樹脂土不易壓縮，或壓縮不明顯，沒有產生褶皺。而無上方側壓的樹脂土會往無圍壓的上層表面產生變形，且越接近受力面形變量越大。在最初受力時，在無上方圍壓的條件下，會使樹脂土上下層開始因為力量傳遞需要時間而產生差異。上層的樹脂土會先變形，隨著力量的傳遞與累積，越下層的樹脂土會漸漸變形且變形量更大。

表 6、實驗一的錄影截圖。擷取第 0、10、30、60、90、120 秒影像畫面截圖。











	無上壓	有上壓
0 秒		
10 秒		
30 秒		
60 秒		
90 秒		



(二) 實驗二：分層不同塑性在單壓模式下所造成的行為。

考慮到板塊本身上下層並非均勻，將不同烘乾程度的仿地層和無烘乾的仿地層做比較，發現烘乾後的仿地層在擠壓後，僅會彎曲而沒有產生明顯形變，亦沒有像無烘乾的仿地層具有塑性，彼此拉扯後所造成的下層變厚情形。

表 7、實驗二的錄影截圖。擷取第 0、10、30、60、90、120 秒影像畫面截圖。

時間	無風乾	有風乾
0 秒		
10 秒		
30 秒		
60 秒		
90 秒		



(三) 實驗三：非水平方向施力在單壓模式下所造成的行為。

表 8、實驗三的錄影截圖。擷取第 0、10、30、60、90、120 秒影像畫面截圖。

時間	60 度施力	90 度施力	120 度施力
0 秒			
10 秒			
30 秒			
60 秒			
90 秒			



120 秒

大小固定、不同方向對樹脂土施力，並三面施予圍壓可見樹脂土層擠壓形變後的軸大致都垂直於施力方向，受力角度的不同會造成軸的傾斜角不同。而在 120 度方向施力的實驗中還可看到軸與前方受力平行板之間的樹脂土會向下彎曲，且越下層彎曲程度越大，推測是上層樹脂土受木板正向力向下推擠，而下層樹脂土因周圍壓力而無法向左右延伸，便向下產生褶皺。

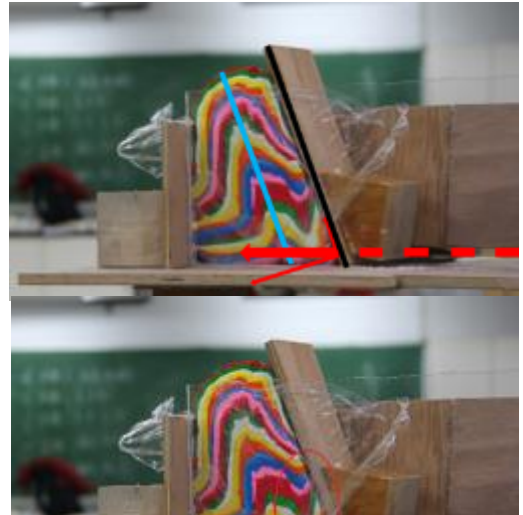


圖 18、樹脂土層 120 度擠壓後的軸、施力與受力示意圖

考慮本次討論的台灣西南海域板塊交接處，可能較接近實驗中 120 度方向施力之情況，特地取其截圖繪製

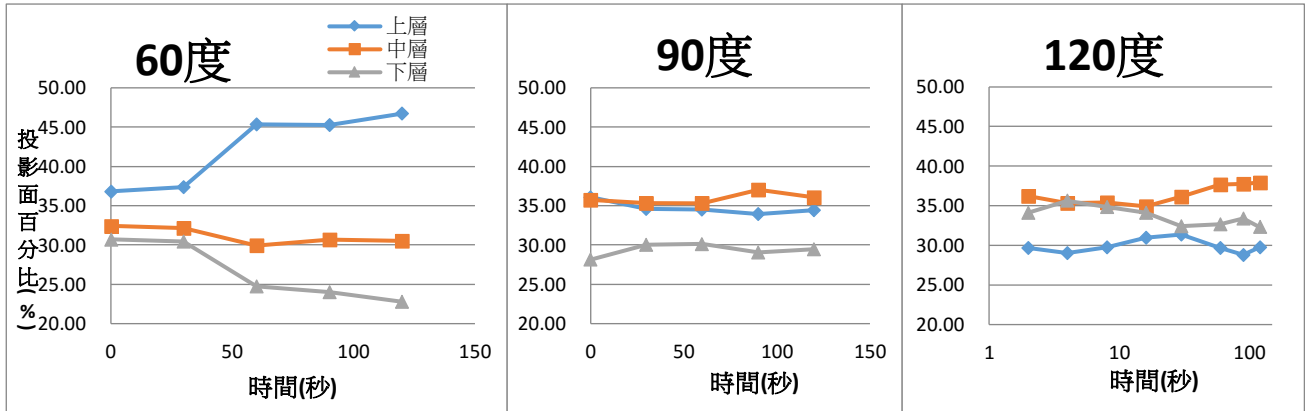
圖 18，可觀察到樹脂土形變後褶皺所形成的軸（淺藍線段），會平行施力接觸面（黑色線段），也就是與受力方向（紅色線段）的垂直分量垂直。這個特殊現象，讓我們接著進行實驗四。

（四）實驗四：仿地層隨時間變化的投影面積百分比與褶皺曲率之研究。

1. 投影面積百分比關係圖

施力角度	截圖時間 (秒)	上層		中層		下層	
		重量(gw)	百分比(%)	重量(gw)	百分比(%)	重量(gw)	百分比(%)
90 度	0	7.90	36.09	7.83	35.77	6.16	28.14
	30	6.20	34.64	6.32	35.31	5.38	30.06
	60	13.67	34.55	13.97	35.30	11.93	30.15
	90	8.77	33.94	9.57	37.04	7.50	29.02
	120	18.26	34.48	19.08	36.03	15.62	29.49
60 度	0	3.44	36.83	3.03	32.44	2.87	30.73
	30	3.49	37.41	3.00	32.15	2.84	30.44
	60	13.66	45.32	9.02	29.93	7.46	24.75
	90	7.29	45.28	4.94	30.68	3.87	24.04
	120	6.85	46.73	4.47	30.49	3.34	22.78
120 度	0	2.97	32.82	3.16	34.92	2.92	32.27
	2	2.62	29.64	3.2	36.20	3.02	34.16

	4	5.93	29.05	7.21	35.33	7.27	35.62
	8	3.07	29.72	3.66	35.43	3.60	34.85
	16	3.83	30.96	4.32	34.92	4.22	34.11
	30	3.78	31.37	4.36	36.18	3.91	32.45
	60	5.25	29.69	6.66	37.67	5.77	32.64
	90	6.03	28.81	7.91	37.79	6.99	33.40
	120	6.08	29.76	7.75	37.93	6.60	32.31

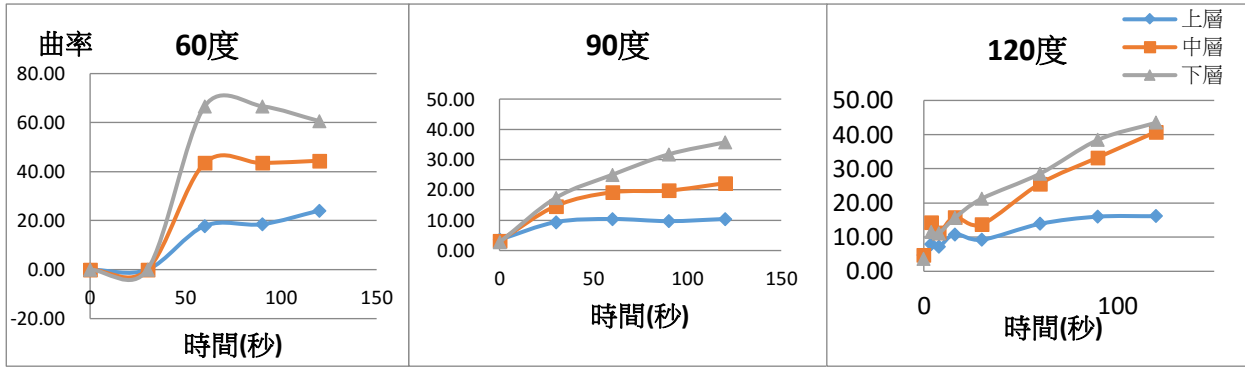


截圖投影面所量測的百分比結果，發現 90 度施力時各層受力較均勻，投影面的形變量較無太大變化。60 度施力時，在褶皺部份，下層所受壓力與上層張力有較明顯的差異性，導致下層壓縮量與上層的擴張量相對明顯。120 度的施力方向有向下的鉛直分力，此鉛直分力抑制了上層向上擴張的可能性，使得上層受張力後擴張量不明顯；比較 60 度施力時有向上的鉛直分力，使得上層的擴張量顯著增加。而下層無向上發展空間，都有較大的壓縮量。

2. 褶皺曲率

施力角度	截圖時間 (秒)	上層	中層	下層
		曲率	曲率	曲率
90 度	0	3.57	3.17	2.70
	30	9.39	14.71	17.39
	60	10.42	19.23	25.00
	90	9.71	19.80	31.75
	120	10.42	22.22	35.71
60 度	0	0.05	0.04	0.03
	30	0.03	0.05	0.08
	60	17.86	43.48	66.67
	90	18.52	43.48	66.67
	120	24.10	44.44	60.61
120 度	0	4.81	4.72	3.75
	2	5.00	4.98	3.88

	4	7.94	14.29	11.49
	8	7.25	11.36	11.24
	16	10.87	15.87	15.63
	30	9.26	13.77	21.28
	60	13.89	25.64	28.57
	90	16.00	33.33	38.46
	120	16.13	40.82	43.48



實驗中，各下層均有較大的曲率變化，顯示下層在受力的過程中，因為在黏土的壓縮有限情形下，造成扭曲形變，越往上層，褶皺的曲率變化明顯較小。可以推論出，越下層褶皺的彎曲越劇烈，其造成斷層破裂面的能量也越大，因此大規模的地震會在較下層的位置發生。中、上層雖然也有曲率變化，但變化較小，也可以推論其地震的規模較小。

陸、討論

一、此地震群的地震發生是否見週期性？

由表 1、圖 8 及圖 17 顯示大地震（規模 ≥ 5.0 ）約每 3~6 年發生一次，此研究時間內，2009 年為最後一次規模 5.0 以上的地震，若週期性屬實，應約在 2012 至 2015 年見到地震個數增多情形。圖 17 顯示 2012 年出現規模 4 以上的地震，和 2009 年

發生日期 O	震央經度	震央緯度	震央地點	深度 (km)	芮氏規模
2015-02-08 01:47:13	120.59	21.81	⊙	44.42	4.45
2009-09-06 23:10:16	120.4	22.04	⊙	46.86	4.51
2009-07-30 00:53:06	120.48	22.05	⊙	41.33	5.75
2008-05-01 03:22:26	120.38	21.82	⊙	38.35	4.55
2007-09-05 07:55:11	120.58	21.83	⊙	47.34	4.56
2007-07-01 01:54:38	120.41	21.84	⊙	44.8	4.4
2007-05-27 12:05:25	120.42	22	⊙	45.15	4.57
2007-04-22 01:08:28	120.39	21.73	⊙	55.88	4.57
2007-02-19 05:04:59	120.4	21.79	⊙	44.25	5.09
2007-01-07 13:45:34	120.32	21.76	⊙	58.61	4.46
2007-01-01 03:19:40	120.44	22.01	⊙	53.83	4.54
2006-12-31 22:05:58	120.53	21.99	⊙	45.89	4.43

年間隔約 3 年，在中央氣象局資料庫查詢，圖 19、2006 年至 2016 年 3 月研究區域內規模 > 4.4 地震發現規模 4.4 以上的地震，在 2009 年 7 月 30 日後直至 2015 年 2 月 8 日才發生，間隔約 6 年。因為我們的分析資料時間不長，仍需更長的時間資料分析，才能確定是否有週期性。

二、為何地震的發生約從 40 多公里開始，然後有餘震越淺的趨勢？

圖 8 可看出研究區域內大地震均發生在約 40 多公里深處。為深入了解，我們做了圖 20 比較，發現台灣地區及台灣西南部，大地震的分布範圍在 0 公里到 150 公里，不過多數大地震發生在 0~50 公里深，而研究區域的大地震均發生在此範圍的底部。為解答此區域的大地震發生深度問題，我們查閱一篇科學期刊 (Wu, Y.-M., 2009)，裡面提到了對屏東大地震發生的錯動模型 (圖 21，引用 Wu, Y.-M., 2009，文中 Fig7)，圖中對 2006 年底兩次大地震分別以張裂及錯動的斷層面解 (海灘球) 說明錯動機制，並且主震及餘震約由 20~50 多公里深的錯動面造成。根據此模型，我們推測此研究區主震均發生在錯動面最深處 (40~50 公里)，釋放掉高能量後，餘震多在較淺深度發生。因此可見圖 13~14 地震沿斷層面由西南移動到東北的趨勢。

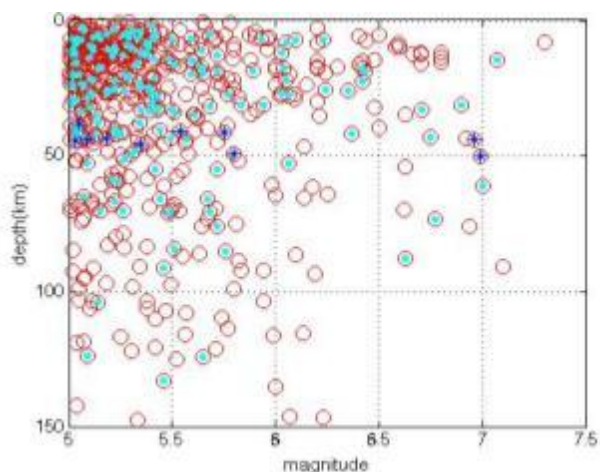


圖 20、不同地區大地震 (規模 ≥ 5.0) 發生深度與規模之比較 (紅色 \bullet 西南部，位置：東經 119~123 度，北緯 21~25 度，深度 0~90 公里，淺藍色 \bullet 隱沒帶附近，位置：東經 120~122.5 度，北緯 21~23 度，深度 0~90 公里，深藍 * 研究區域，位置：東經 120~120.7 度，北緯 21.58~23 度，深度 0~90 公里)

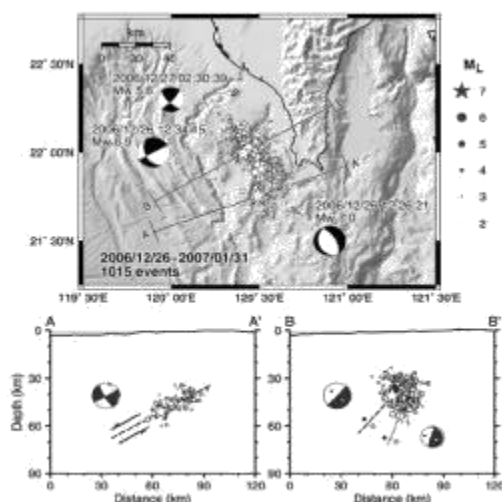


Fig. 3. Distribution of the relocated hypocenters of the Pingtung Earthquake region. Stars show the hypocenters of the shallow events.

圖 21、2006 屏東大地震破裂可能模型 (採自 Wu, Y.-M., 2009 的 Fig7)

三、地震的移動趨勢在考慮地震定位不確定性後是否可採信？

因為地震的位置在本研究佔極重要分量，而雖然中央氣象局的地震定位不確定性約小於 5~10 公里，而誤差值和測站的分布、地震規模、深度等相關，此地震群位在西南海域，較無地震測站包圍，並且地震發生可深達 60 公里左右，因此定位不確定性應比許多陸上地震大，在分析結果時須謹慎考慮。為此我們已經在圖 9、圖 12~16 及表 3~5 利用各種分析多方驗證，且分析結果的地震位置移動常超過 10 公里，顯示地震移動趨勢可採信。未來我們會再採取「重新定位」的地震資料 (如 Wu, et al, 2009 的地震定位目錄) 來分析，提高準確度。

四、為何計算地震位置要乘上權衡因子？

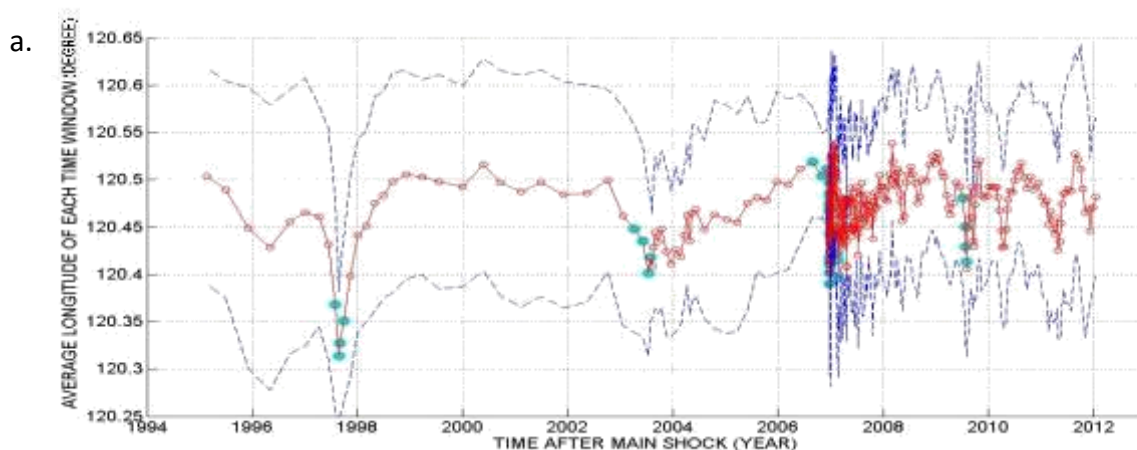
當我們計算地震平均位置，考慮所有地震的情況下，數量較多的小地震會貢獻較大。為降低此現象，我們把每個地震權衡。關於權衡值的選取，我們將原本每個地震以「1」來計數，以「10的規模次方」取代。原因是地震能量 E 和規模 M 間的關係為： $\log E = 1.5M + 11.8$ (Gutenberg and Richter, 1958)，即 E 正比於 $10^{1.5M}$ 。若以能量代表地震，計算出來的能量密度圖，大地震會對圖中密度最大的平均位置貢獻最大。也就是以「1」（ 10^0 ）來計數地震，計算出來的位置受小地震控制；以「 $10^{1.5M}$ 」做權衡計算出來的位置受大地震控制。為了不偏向任何一端點，我們以 10^M 做權衡，觀察考慮個數及能量後，高密度地震群的平均位置如何隨時間變化。

五、以地震個數作為移動視窗條件，是否會影響分析結果？

2007 年以後，由於地震測站數較多、較敏銳，故地震紀錄也變多，我們考慮到「時間移動視窗」內的地震個數多寡是否會影響分析結果。因此我們以大小為 30 個地震，每 5 個地震移動一次的「個數移動視窗」同樣以經度、緯度、深度分別計算移動視窗內位置的平均值。

在經度、深度方向，我們發現在時間視窗中看到四次大地震後的趨勢，在個數視窗中也可見到，即大地震主要在偏西偏深處發生，大地震後平均位置向東向上移，再向西向下移動直到下一次大地震發生。而緯度方向，在時間視窗中我們並未觀察到明顯趨勢，個數視窗中我們也同樣無觀察到四次大地震後的共同趨勢。另外，在深度方向，可發現平均後地震的移動範圍較小，即較集中於同一深度，不過大地震發生的位置對照到整體趨勢仍無太大差別。

綜合來說，地震個數視窗會受到地震個數多寡的影響，且在時間視窗中我們看到四次大地震後的趨勢，在個數視窗中也有此趨勢，可與我們的研究結果相呼應。



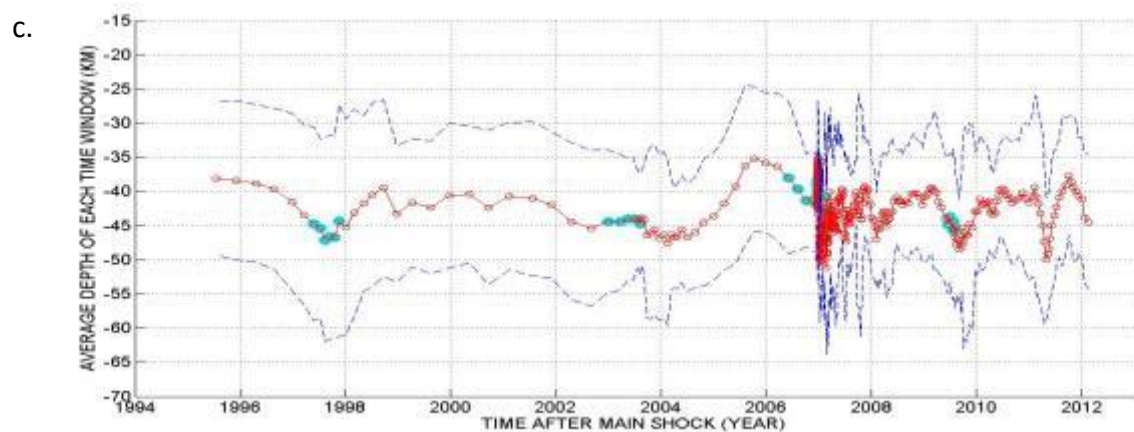
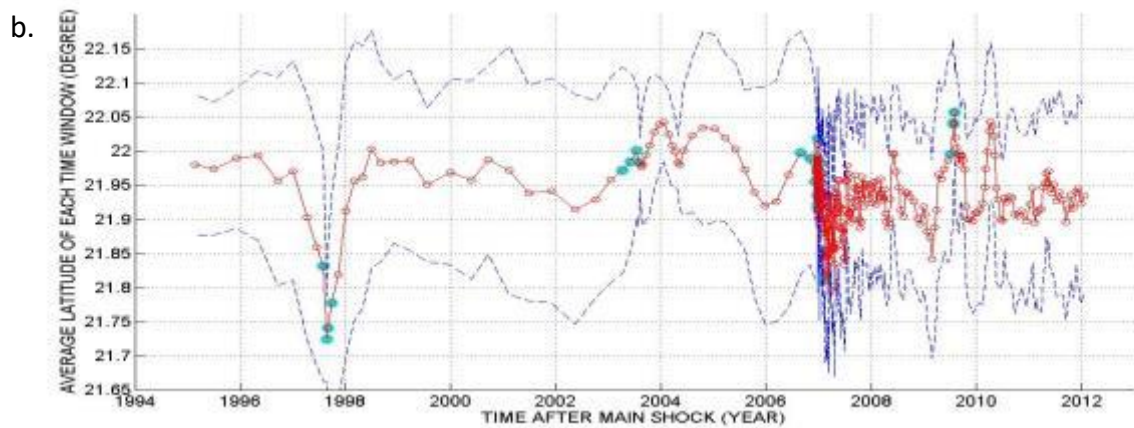
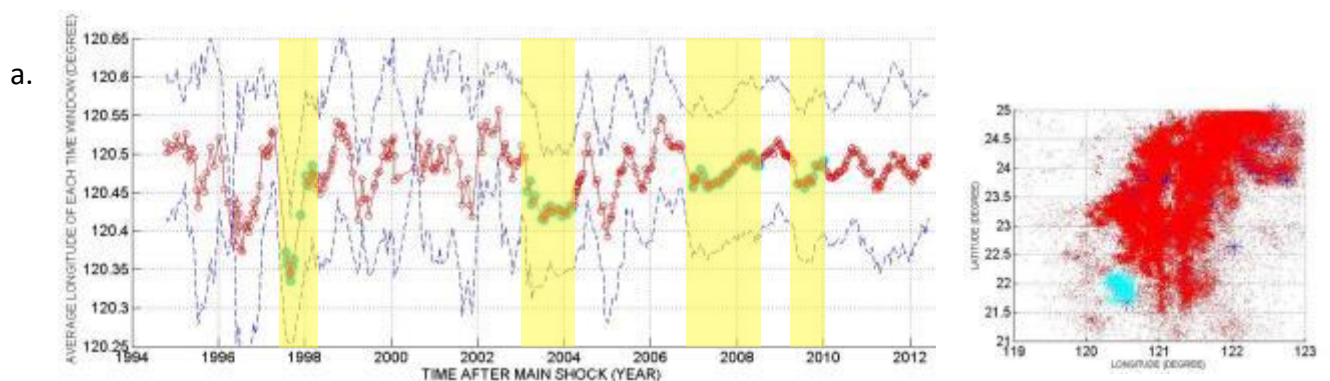


圖 22、1994~2014 年 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度隨時間變化（個數視窗）

六、不同區域的斷層是否也有相同的趨勢？

為了比較其他區域地震移動情形，我們另外選取潮州旗山、東部和集集地區的地震資料，分別繪出平均位置變化圖，觀察發現此三區域的地震位置變化趨勢和研究區域不同（圖 23）。據我們的研究結果，在研究區域內，若移動視窗平均偏西偏深，則大地震發生機率大，但並不是每個偏西偏深的趨勢最終都指向大地震的發生。比較鄰近的潮州旗山區（圖 23b.），大地震發生的時間與研究區域（圖 23a.）有互補情形。而集集區域在約 2000 年時發生的大地震，即 921 大地震，可能會影響附近地震出現頻率。



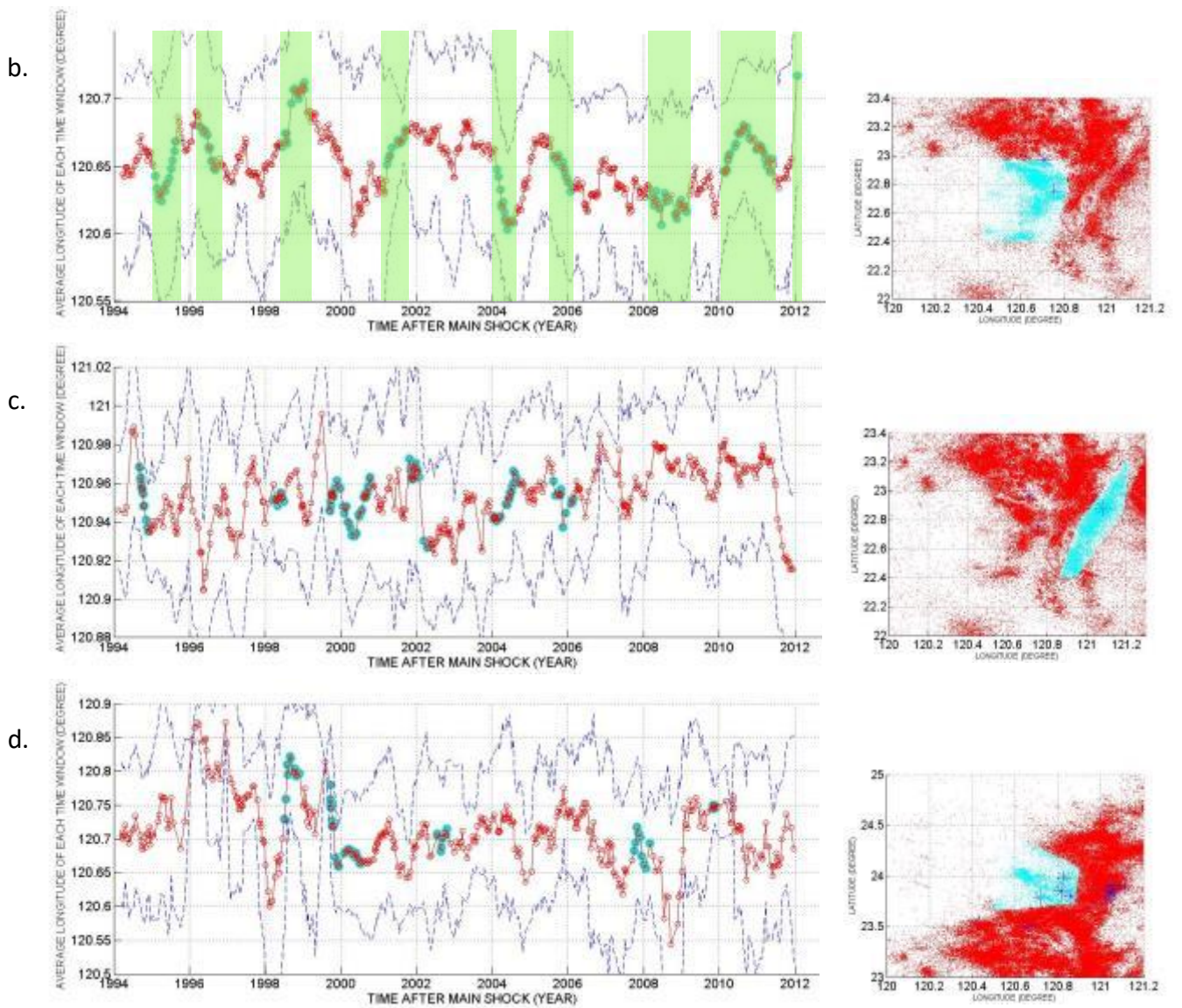
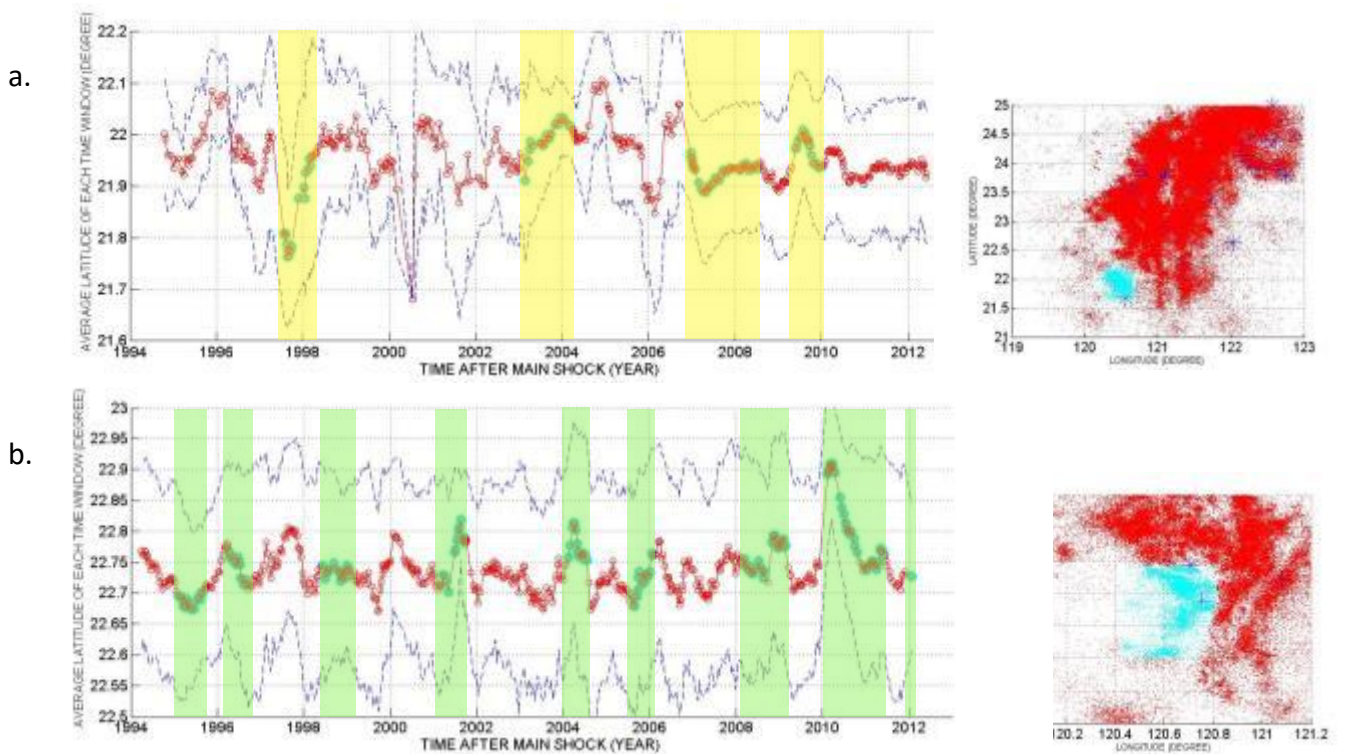


圖 23、1994~2013 年 a.研究區域 b.潮洲旗山 c.東部 d.集集平均經度隨時間的變化圖
 (。視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，塗色區域表有前述時間視窗的時段，虛線—。視窗內地
 震位置平均值的標準差)



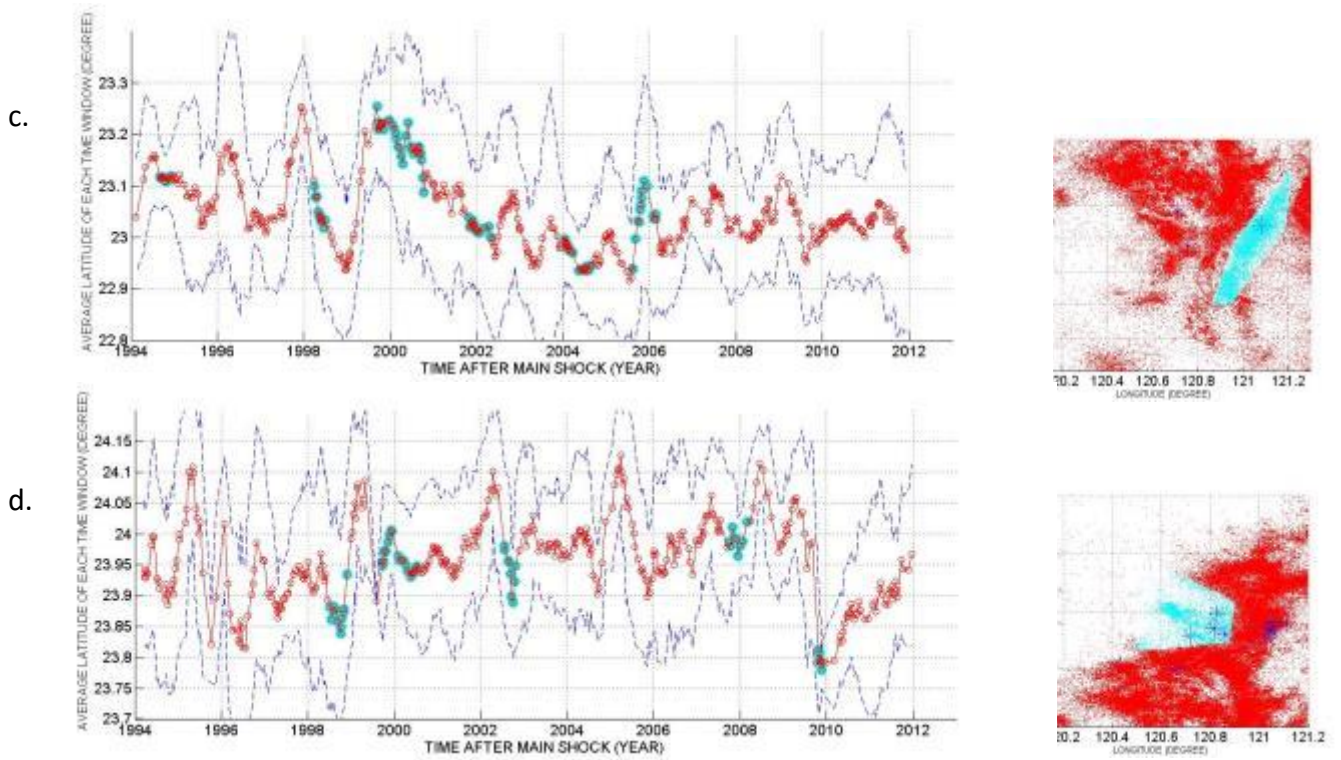
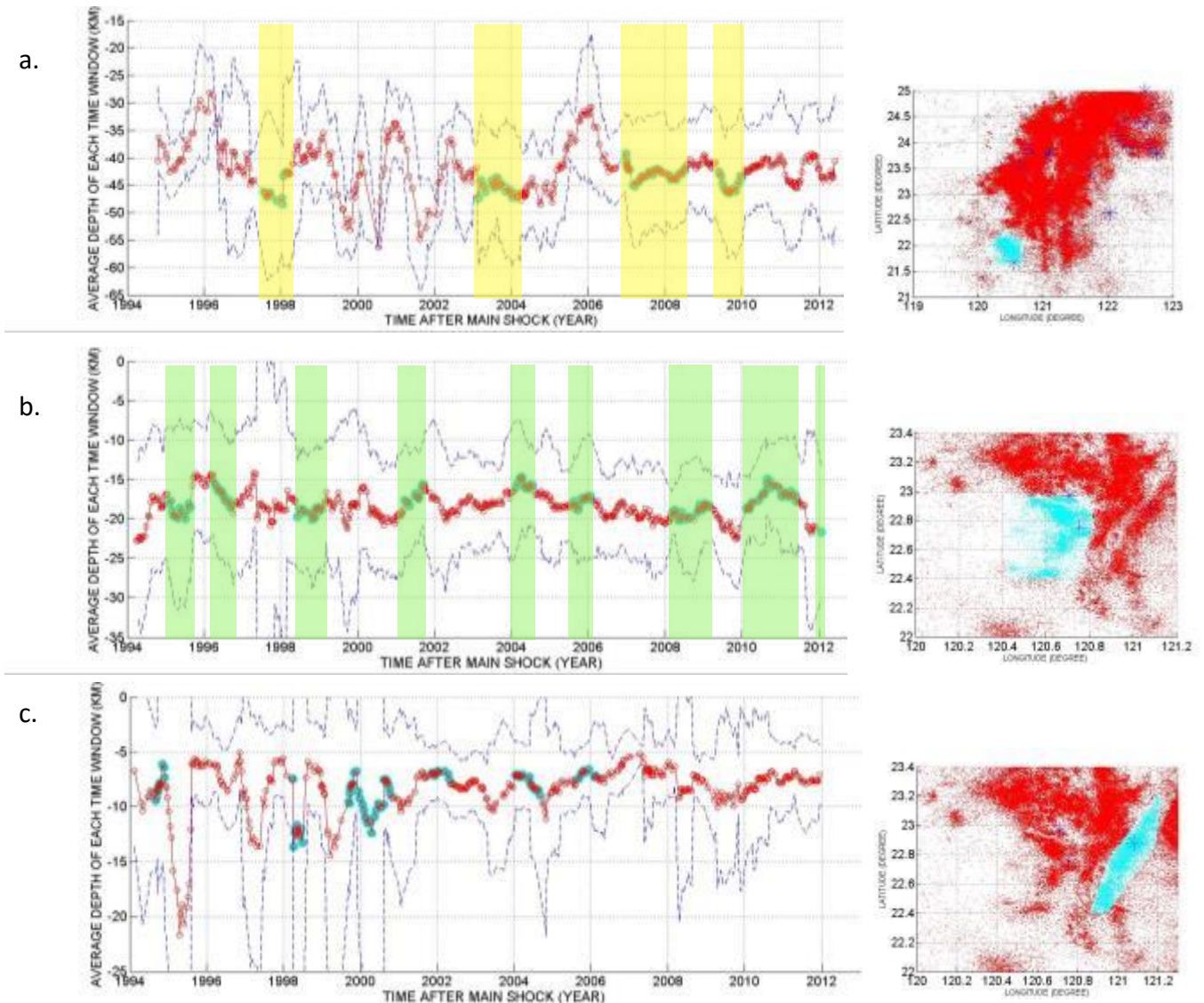


圖 24、1994~2013 年 a. 研究區域 b. 潮洲旗山 c. 東部 d. 集集平均緯度隨時間的變化圖
 (○ 視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震, 塗色區域表有前述時間視窗的時段, 虛線— 視窗內地
 震位置平均值的標準差)



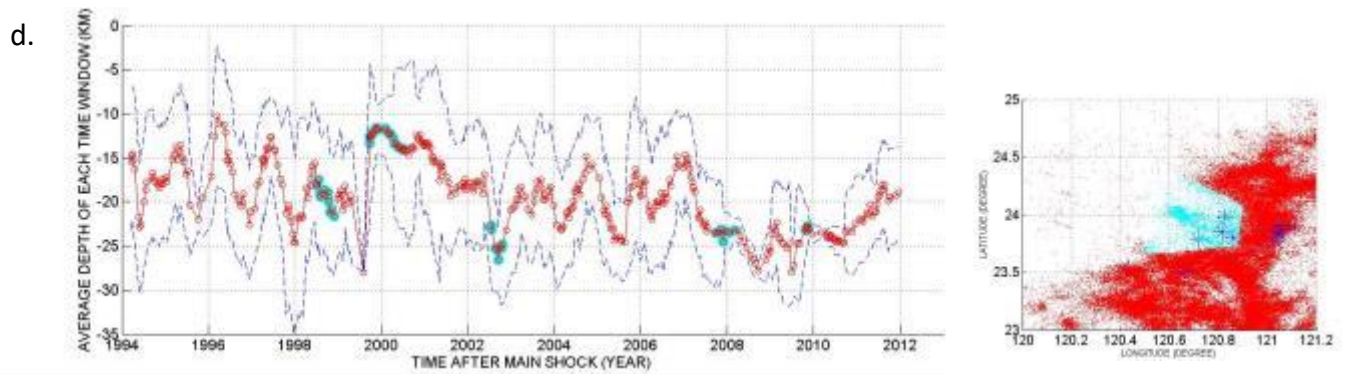


圖 25、1994~2013 年 a.研究區域 b.潮州旗山 c.東部 d.集集平均深度隨時間的變化圖
 (。視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，塗色區域表有前述時間視窗的時段，虛線—。視窗內地震位置平均值的標準差)

我們發現研究區域與潮州旗山區域，大地震（規模 ≥ 4.5 ）在發生時間上有互補情形，但 1999~2001 年間，兩區域卻都沒有大地震發生，原先推測是受 921 大地震影響，但重新以規模大於 4.3 分析，原先無大地震發生的時段被規模 4.3~4.5 地震補齊，兩區域互補情形也更明顯。

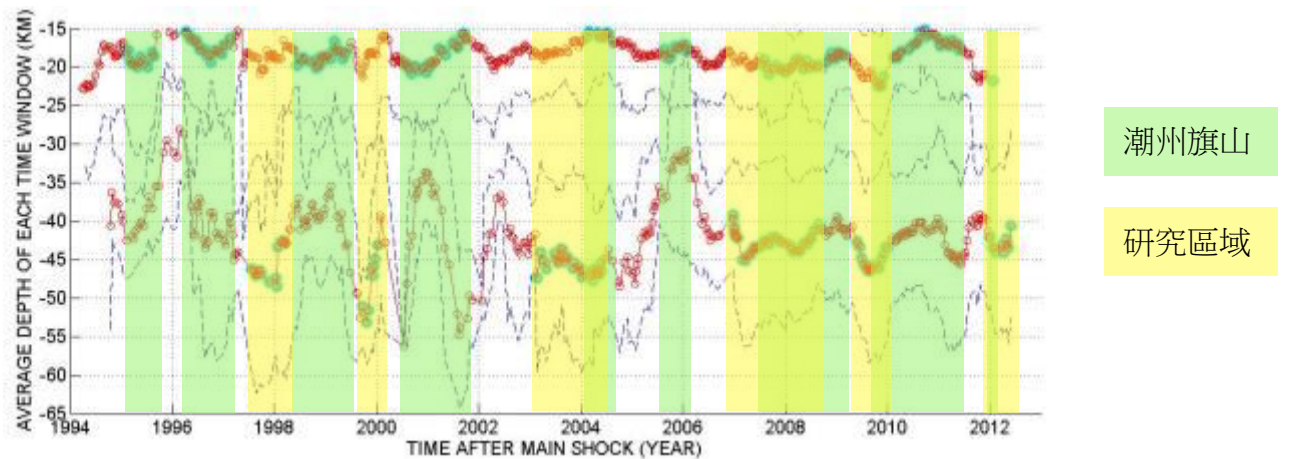


圖 26、1994~2013 年研究區域及潮州旗山深度時間序列 (。視窗內有包含規模 ≥ 4.3 的地震，塗色區域表有前述時間視窗的時段，虛線—。視窗內地震位置平均值的標準差)

七、假想一模型理論來探討地震資料分析發現的週期之變化。

想像能量像一把插入地層中的鐵尺，能量的傳遞是從上方擠壓鐵尺時開始，由於整個鐵尺大部分沒入地層中不易發生形變，只有最上端的鐵尺因為擠壓受力而微微彎曲，當能量持續累積，最上端鐵尺的彎曲程度逐漸加大，最終使在彎曲端與地層交接的節點處發生崩裂，引發小規模地震。崩裂的程度並無法完全釋放能量，卻使鐵尺上累積的能量可以向下傳遞，直到下一個節點。這樣的結果也使鐵尺上端可彎曲的範圍加大，能夠累積更多的能量來向下突破下一個節點，終使能量向下傳遞，並在傳遞中對路徑上的某點造成崩裂（能量累積處），不斷地隨著時間累積的能量向下造成小規模地震。直到約 40 公里深的地層，猜想在此深度能量無法繼續向下傳遞，無法在此地層的節點位置造成崩裂。能量不斷地累積的結果，最終造

成大規模的地震。

雖想用實驗來驗證這樣的模型想法，卻無法用一般鐵尺模擬大尺度的地層能量傳遞。最後我們用樹脂土做地層擠壓的實驗，發現有相同於鐵尺模型的結果。實驗中，仿地層由上層先開始逐漸彎曲發展至下層，最後在下層有了劇烈的褶皺產生。而褶皺卻是由下層蔓延回至上層。由下面的圖 22 可以看到施力 120 度方向褶皺產生的過程。地層彎曲面逐漸向下，表現了能量向下傳遞的過程，傳遞到適當深度時便開始產生劇烈褶皺，引發大規模地震。而褶皺會繼續向上傳遞，正好符合我們的預測，地震隨時間發展由淺層小規模地震慢慢深入，最後在深處（約 40 公里）引發大規模地震。在長時間的發展下，大規模地震後，又會有小規模地震隨著褶皺由深返淺回來，像極了一種「能量震盪」。因為真正的地層，具有一定的剛性，所以此一過程後應會回復成原始狀態，不會像黏土被塑形，於是在板塊持續擠壓下，這種「能量震盪」就多次由淺而深再變淺，不斷發生。

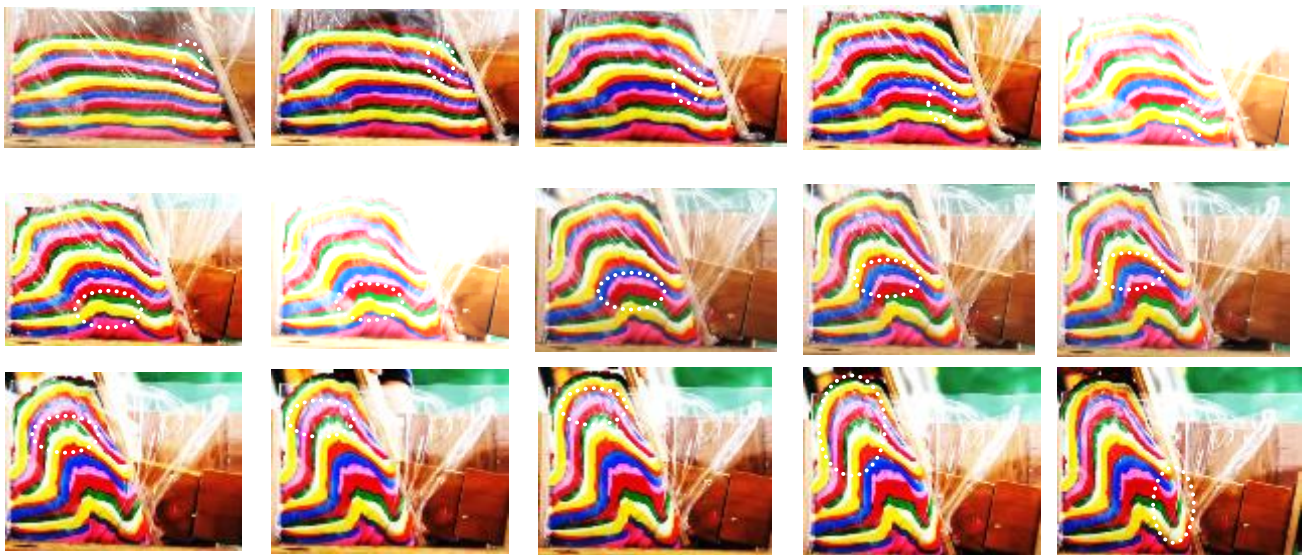


圖 27、仿地層經 120 度擠壓後隨時間變化實驗截圖（截圖間隔 6 秒）

八、為何大地震後短時間（3 月內）及長時間（數年內）變化趨勢有所不同？

推測長時間的位置變化，大地震發生在約 40 多公里深的地層，沿著斷層面漸漸向斷層另一較淺較東的端點移動到達斷層面淺的端點後，再因大環境應力累積漸回到偏西偏深的一端，接著「觸發」下次大地震。其中大地震發生後，短時間之內，空間變動幅度沒有長時間大，但可能斷層彈性回跳，由北向南錯動，過程中因斷層面是彎曲的，並且傾斜程度不同，以致於短時間地震位置在東西及深度方向上的變動，和長時間的變化稍有差別。

柒、結論

- 一、台灣西南部外海東經 120.5 度、北緯 21.7 度附近的地震群近年來地震頻繁，並於 3~6 年間有大地震出現情形。
- 二、此研究區域大地震出現後，長期地震平均位置變遷，均以約 2 年時間漸漸向淺（上）向東偏，接下來 2 年向深（下）向西回到 40~50 公里，並接續下一次大地震。
- 三、此研究區域大地震發生後，2~3 個月內短時間地震平均位置的變動均是向南，並同時由 40 公里左右變深變東，到變淺變西，再變深變東，和長時間趨勢略有不同。
- 四、黏土模擬實驗的斜向施力結果可見最大變形量由表層漸深，接著由底層向上傳遞，此與研究區域的實際研究趨勢相符。
- 五、研究區域和潮州旗山系統大地震發生有互補情形。

捌、參考資料

- 一、Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1956). Magnitude and energy of earthquakes. *Ann. Geofis.*, 9, 1-15.
- 二、Wu, Y.-M., L. Zhao, C.-H. Chang, N.-C. Hsiao, Y.-G. Chen, & S.-K. Hsu (2009). Relocation of the 2006 Pingtung Earthquake sequence and seismotectonics in southern Taiwan. *Tectonophysics*, 479 (1-2), 19-27.
- 三、許瑛珺（主編）（民 99）。普通高級中學基礎地球科學上冊。臺北市：三民。
- 四、許瑛珺（主編）（民 100）。普通高級中學基礎地球科學下冊。臺北市：三民。

【評語】 051902

本研究分析屏東外海 1994-2013 年間發生之地震的時空分布，討論此區域地震活動在時間及空間上之遷移現象，進而推論其可能代表的涵義。研究主題符合台灣地震科學之重要議題。本研究雖然簡化地震本身之複雜度，例如地震發生機制及地震深度誤差問題，然而，科學方法程序完整，表達能力良好。如能對地震發生之構造及地震發生之機制有所瞭解，將可對此問題有更進一步之深刻理解。