

中華民國第 58 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

第二名

051902

「震」知道了

—臺灣南部板塊隱沒帶附近地震群研究

學校名稱：高雄市立高雄女子高級中學

作者： 高二 楊俐婷 高二 廖珮妤	指導老師： 蔡靜誼 洪瑞和
-------------------------	---------------------

關鍵詞：地震、應力、斷層

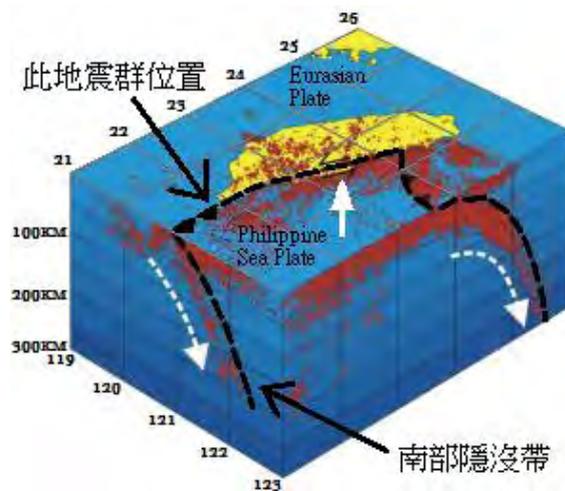
摘要

本報告分析位於台灣西南部東經 120.5 度、北緯 21.7 度地震群。數據顯示在 1994~2017 年 6 月間，共出現 10 次規模大於 5.0 的大地震，震源深度均為 40 公里左右，歸納地震發生時間發現約 2 到 5 年發生一次大地震，推測此區域可能有持續發生此地震型態的情況。我們利用一些模擬實驗和假設模型，提出此近隱沒帶但呈張裂型態的區域，地震發生的時間空間變動的規則，可能和板塊隱沒時應力施於交界處附近，使應力易累積於弱下部地殼與強上部地殼交界處有關。

壹、研究動機

台灣位於聚合性板塊交界帶，分別在東北部及南部海域有隱沒帶(圖 1)，在這附近地震頻繁。在西南部雖然地震活動度低，但仍有一些地震群集，像是白河大地震以及美濃大地震和引起的餘震群，均發生在極少發生地震的南部地區。引起我們注意的是位在東經 120.5 度、北緯 21.7 度的地震群，離南部隱沒帶有些距離，突兀地出現在台灣南部海域，在這塊區域近十年來，發生多次規模大於 5.0 的地震及餘震，地震相對頻繁(表 1)，2006 年發生的屏東大地震應與此有關。這個有趣的地震群出現得似乎「不尋常」，因此我們對此區域的地震群展開研究，希望可以更瞭解這群地震發生的可能性，並嘗試對未來地震的發生做時空分布的推測，或許對台灣南部地區地震預警可有助益。

圖 1、台灣區域地震帶及板塊交界帶
(圖片來源：www.earth.sinica.edu.tw)



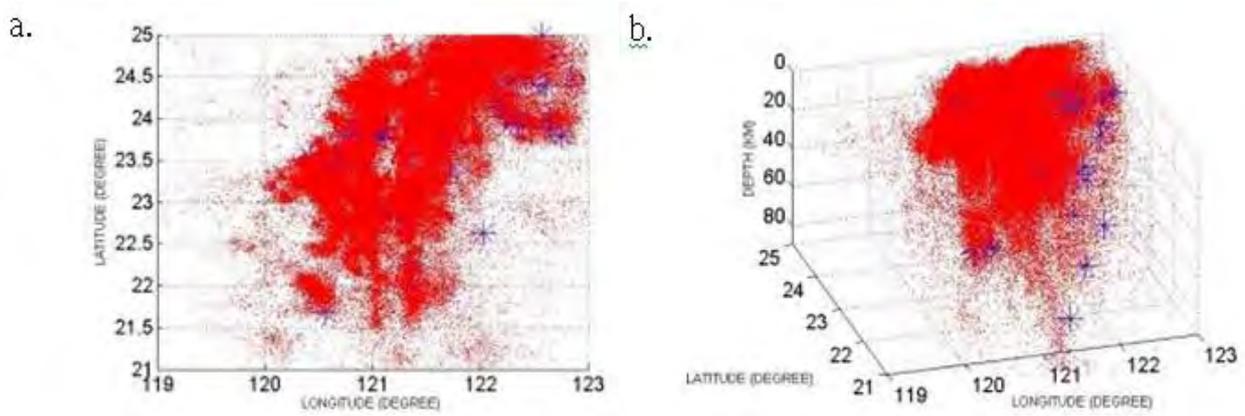


圖 2、台灣地區地震空間分布 a.俯視圖 b.側視圖

(時間：1994 年 1 月~2017 年 6 月。藍色 * 表地震規模 ≥ 6.0)

表 1、2003-2017 年北緯 21.7 度、東經 120.5 度附近規模大於 5.0 地震時空列表

時間	空間	規模(M_L)
2003 年 08 月 03 日	東經 120.4592 度，北緯 21.9900 度	5.18
2006 年 12 月 25 日	東經 120.6950 度，北緯 21.5997 度	5.23
2006 年 12 月 25 日	東經 120.4910 度，北緯 21.6778 度	6.96
2006 年 12 月 25 日	東經 120.4045 度，北緯 21.9518 度	6.99
2006 年 12 月 25 日	東經 120.4925 度，北緯 21.8973 度	5.05
2006 年 12 月 25 日	東經 120.3025 度，北緯 22.0642 度	5.54
2006 年 12 月 25 日	東經 120.4318 度，北緯 21.8003 度	5.03
2006 年 12 月 26 日	東經 120.3818 度，北緯 22.0398 度	5.80
2007 年 02 月 19 日	東經 120.3227 度，北緯 21.7123 度	5.09
2009 年 07 月 29 日	東經 120.3965 度，北緯 21.9817 度	5.71

貳、研究目的

一、研究台灣西南近海所發生的地震，藉以了解地震群在時空上變動的趨勢

二、模擬此區地震情況，並提出可能模型解釋。

參、研究設備及器材

一、麵團模擬實驗：

高筋麵粉、低筋麵粉、發糕粉、水、砝碼、重物單壓平臺、烤箱、攪拌棒、烤紙、電子秤、石頭、麵包刀、尺

二、偏振片應力分析：

吉利丁粉、水、電腦螢幕、螺旋單壓平臺、保鮮膜、手機、偏振片、裝置架、燒杯、電磁爐

三、記錄：

電腦、手機

肆、研究過程及方法

一、資料分析

(一)地震群的選取

- 1.由中央氣象局地震目錄選取 1994 年 1 月～2017 年 6 月台灣地區的地震資料(圖 2)。
- 2.根據以下條件篩選地震做為研究地震群。

設經度= x ，緯度= y ， $y - (-0.8667x + 126.67) \leq 0$ ， $x < 120.7$ ， $y > 21.58$ ， $y - (-2.55x + 328.3) \geq 0$ ， $y - (0.766x - 69.98) \leq 0$ 。

(二)地震週期性分析

- 1.計算規模大於 3.0、4.0、5.0、6.0 的地震個數，繪製個數與時間變化圖(圖 8)。

(三)地震時間序列分析

1.真實地震時間序列分析

(1)將地震數據分別以東西(經度)、南北(緯度)及垂直(深度)方向，繪出地震位置的時間序列。

- (2)以 0.5 年大小的移動視窗在三序列上，每 0.1 年移動一次選取視窗內地震。

(3)計算移動視窗內地震在經度、緯度及深度方向上位置的「平均值」及「標準差」，以圖表繪出。

2.人工地震時間序列分析

(1)在上述時間序列中選取規模大於 5.0 的地震，固定地震發生時間、位置及規模，打亂規模小於 5.0 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)以步驟 1(1)(2)(3)的方法分析「人工地震序列」。

(四)不同板塊隱沒帶分析

1.使用 IRIS Earthquake Browser 查詢 (<http://ds.iris.edu/ieb/>)地震深度分布圖，區域分別為：(1)日本地區(2)台灣東北部(3)美國中西部(4)台灣南部(5)喜馬拉雅山地區。

2.比較各地區地震深度分布情形，並以大陸及海洋地殼的隱沒帶分類地震分布的結果。

二、模擬實驗

(一)實驗一：麵團試體的彈塑性分析實驗

1.備置高筋麵粉(H)、低筋麵粉(L)、發糕粉(F)成分的麵團模擬地層(圖 3)。



圖3、麵團試體

2.將模擬地層試體置於平台(圖 4)上，由上方施力下壓，觀察麵團受力變化情形。

3.取消施力後，觀察是否回復原狀(以確定是否於彈性限度內)。

4.增加應力大小。重複步驟 2、3。

5.對相同條件的 4 塊試體進行實驗，取平均值做為實驗結果。

6.改換合併三層成分不同的麵團為試體，分別為低筋麵團夾高筋麵團(LHL)和高筋麵團夾低筋麵團(HLH)，重複步驟 2~5。



圖 4、重物單壓平台

(二)實驗二：吉利丁應力分析實驗

1.以巧拼製作不同形狀的模型(圖 5 a、b、c、d)。

2.製備不同濃度(8%、6%、4%)的吉利丁試體模擬地層。

3.將模擬地層試體置於螺旋單壓平台(圖 5 e)上之模型內，旋轉螺旋鈕使施力臂壓縮試體，試體受模型壓縮有不同受力情形。

4.透過偏振片觀察試體受力變化及取消施力後應變情形，繼續施力直到試體破裂變形。

5.改成濃度不同(8%、6%、4%)的吉利丁合併成為試體，重複步驟 3~4。

6.將吉利丁繪上網格，以攝影機和手機拍攝偏光結果，擷取不同時間偏光情形，並分析比較。

7.將瑜珈墊以拍攝截圖的網格大小切成小塊，測量各網格重量，紀錄並和步驟 6 偏光結果比較。

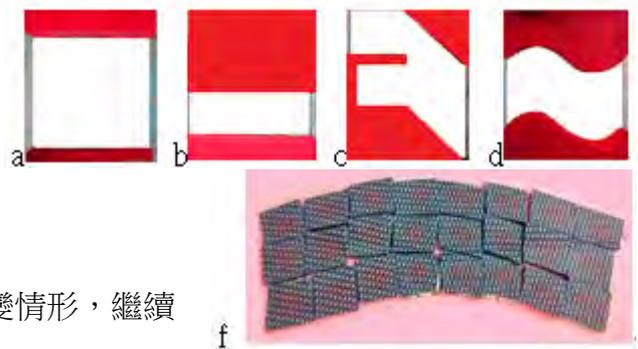


圖5、吉利丁應力實驗配置
a-d為單壓模型、e為螺旋單壓平台
f以瑜珈墊重量估計試體變形大小

伍、研究結果

一、「地震資料分析」結果

(一)「地震群的選取」結果

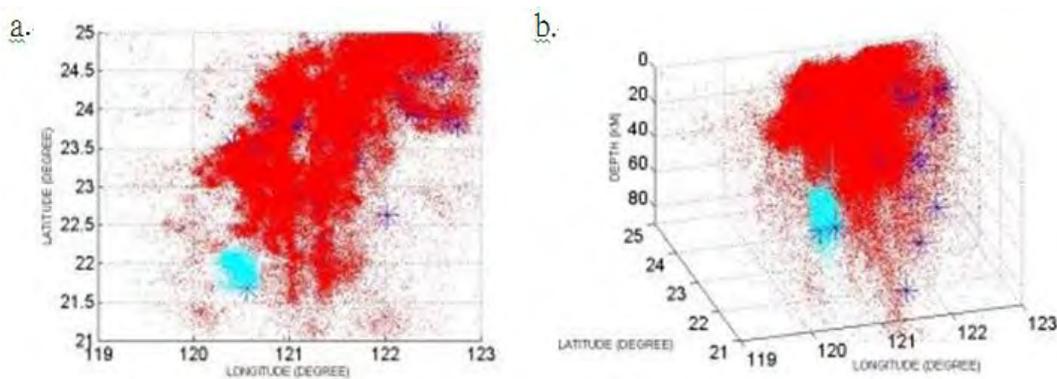


圖 6、本研究的地震群(淺藍色)位置圖 a.俯視圖 b.側視圖(藍色 * 表地震規模 ≥ 6.0)

圖 6 a.b.中淺藍色塊部分利用篩選條件選擇出來的本研究重點地震群，可看出其在全台地震空間分布中與其他地區孤立開來，我們推測其地質或地物特性可能有些特殊性，觀察三方向(經、緯、深度)空間變化(圖 7)，發現在 2003、2006、2009 年均出現規模大於 5.0 的大地震(表

1), 並在 2006 年起地震數目較多, 應與地震規模大於 6.9 所伴隨的餘震有關。除此之外, 在大地震發生前, 似乎有地震向深處遷移情形(圖 7 藍箭頭)。

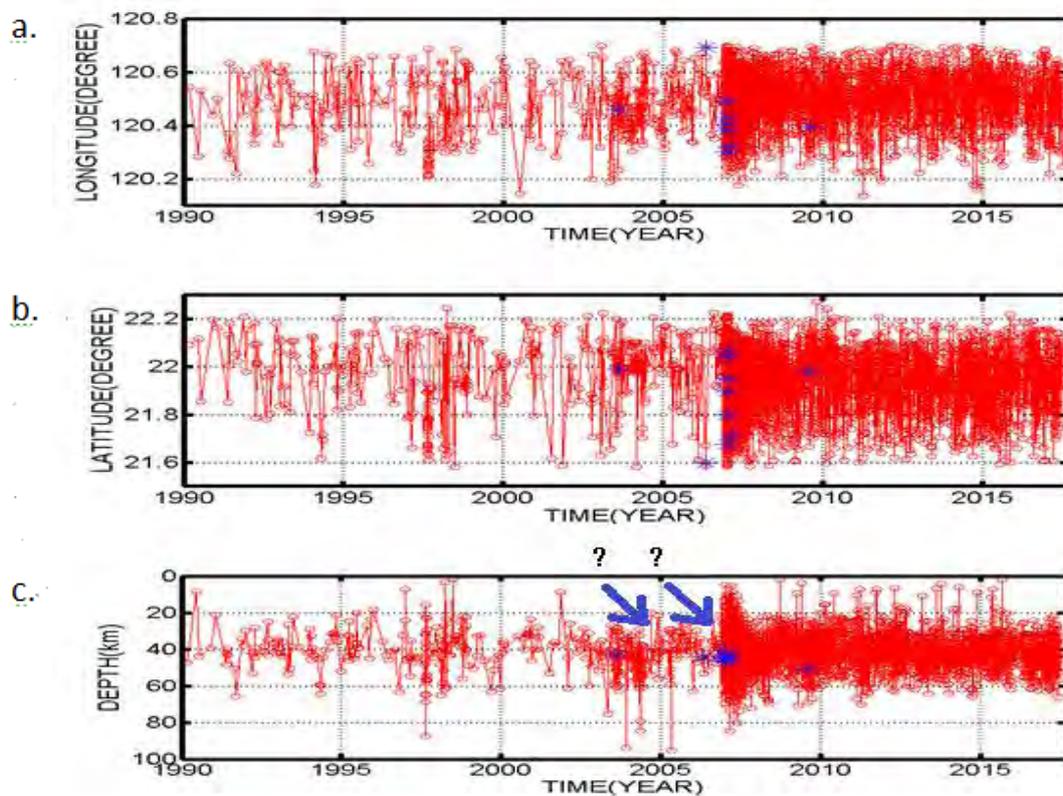


圖 7、1994~2016 年地震群內地震位置在 a.東西經度(LONGITUDE)b.南北緯度(LATITUDE)c.垂直深度(DEPTH)方向上隨時間的變化(紅色 \circ 表地震, 藍色 $*$ 表規模 ≥ 5.0 地震)

(二)「地震週期性分析」結果

計算不同規模地震個數結果(圖 8)，發現均約每 2 到 6 年左右出現規模 4.0 以上大地震，也就是每隔 2 到 6 年會發生規模大於 4.0 以上的地震，並伴隨餘震群。不過我們的資料分析僅約 20 多年時間太短，但是否具週期性仍要再詳加查證，但至少可以了解此區地震活動頻繁，依據圖 7 可推測出現在相同深度。

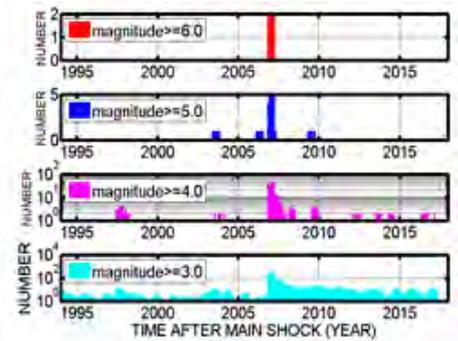


圖 8、不同規模地震個數比較

(三)「地震時間序列分析」結果

圖 7 中似乎觀察到位置有規則的改變。為了分析大地震發生前後，本研究地震群的空間及時間的變化是否有規則，我們做了進一步的比較。

1.「地震時間序列分析」結果

由移動視窗在時間序列上求各視窗位置的平均值及標準差(圖 9)可見，大地震發生位置在深度及緯度時間軸較具規則變動，均為在偏西稍深處約 40 公里深發生，且大地震後，視窗平均漸漸偏東，接續下次地震繼續偏西漸深發生。而經度方面則不太有規則。

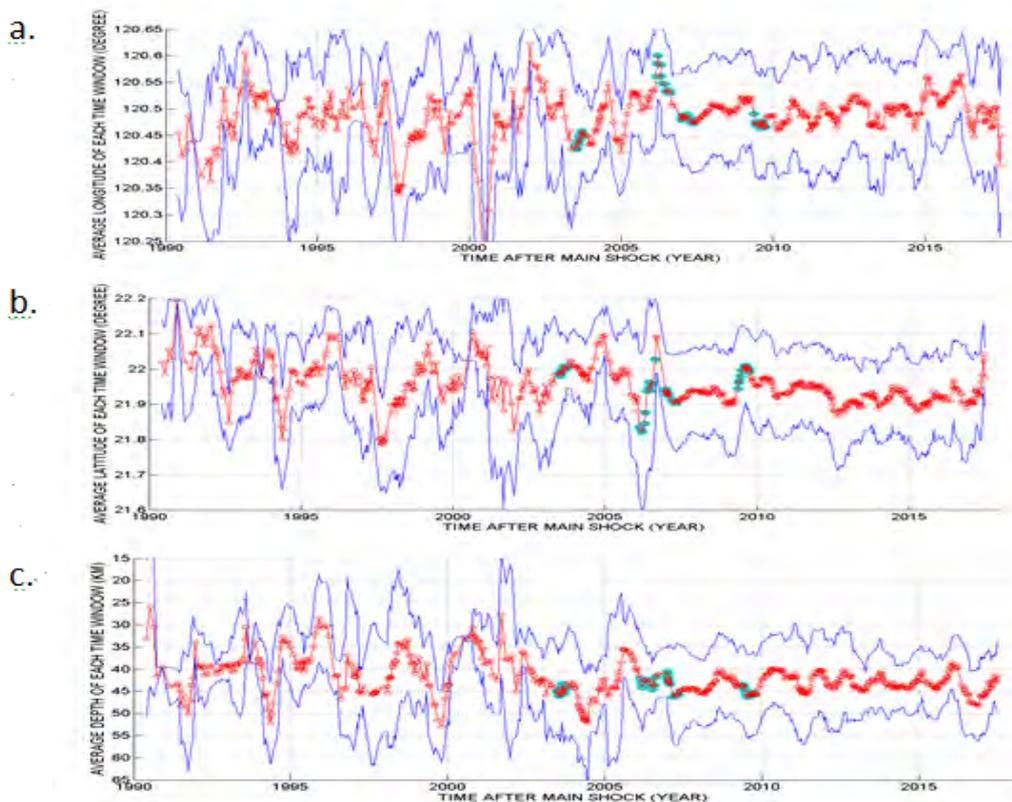


圖 9、1994~2014 年研究地震群 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度隨時間變化(藍點。視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，藍色虛線—為視窗內地震位置平均值的標準差)

2. 「地震個數序列分析」結果

圖 10 為時間與空間的地震變化圖，在經度的部分可以看到約在 2014 年的地震有稍微向東偏移，而在之後的地震則因位置偏移密集的曲折沒有太大的規律。緯度則可發現有較明顯向北偏移，而深度可看到在大地震後所發生的地震皆有變深的趨勢，可推斷在大地震後對地震空間上的影響。

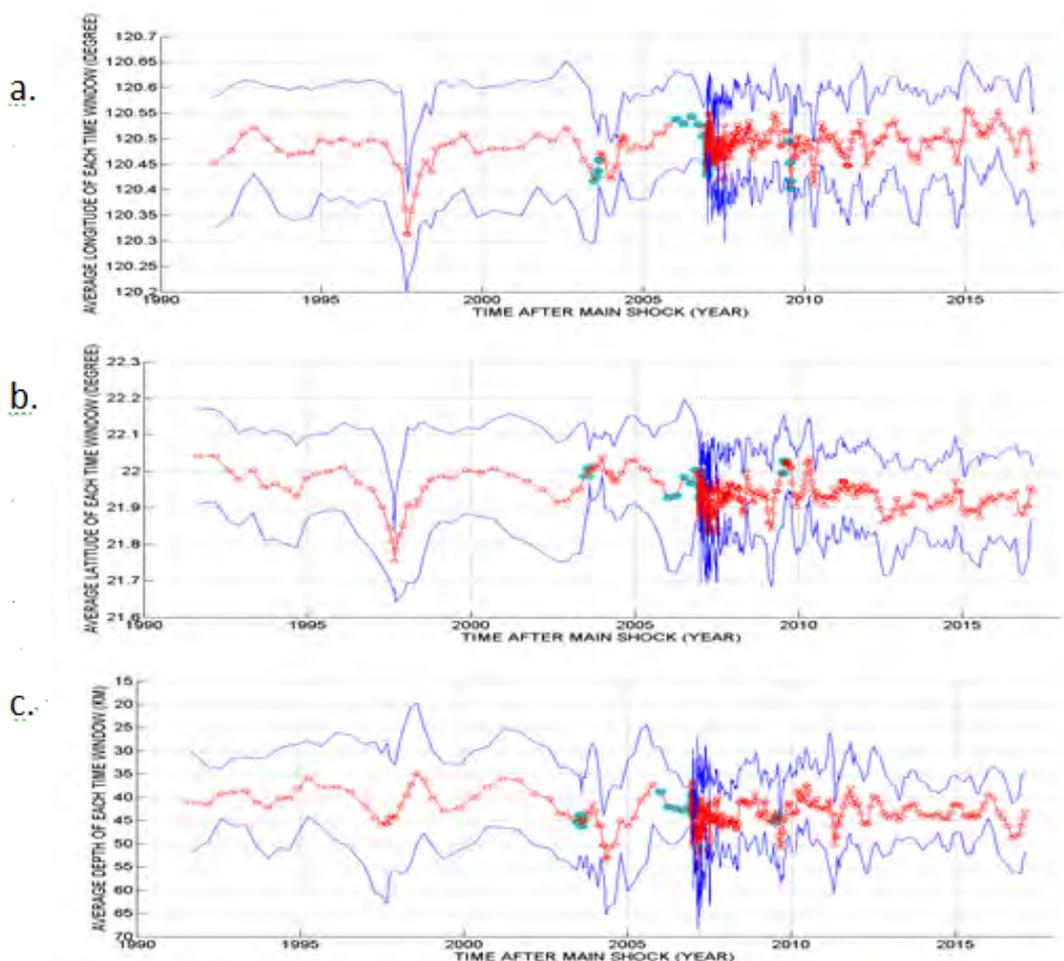


圖 10、1994~2014 年研究地震群 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度隨時間變化(藍點。視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，藍色虛線—為視窗內地震位置平均值的標準差)

3. 「人工地震序列分析」結果

為更深入了解幾次大地震發生後，地震位置偏移是否出於偶然。於是打亂大地震外的地震順序，做成人工序列並重做移動視窗分析，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(圖 11)，表示此時大部分地震移動較不明顯並較無規則。

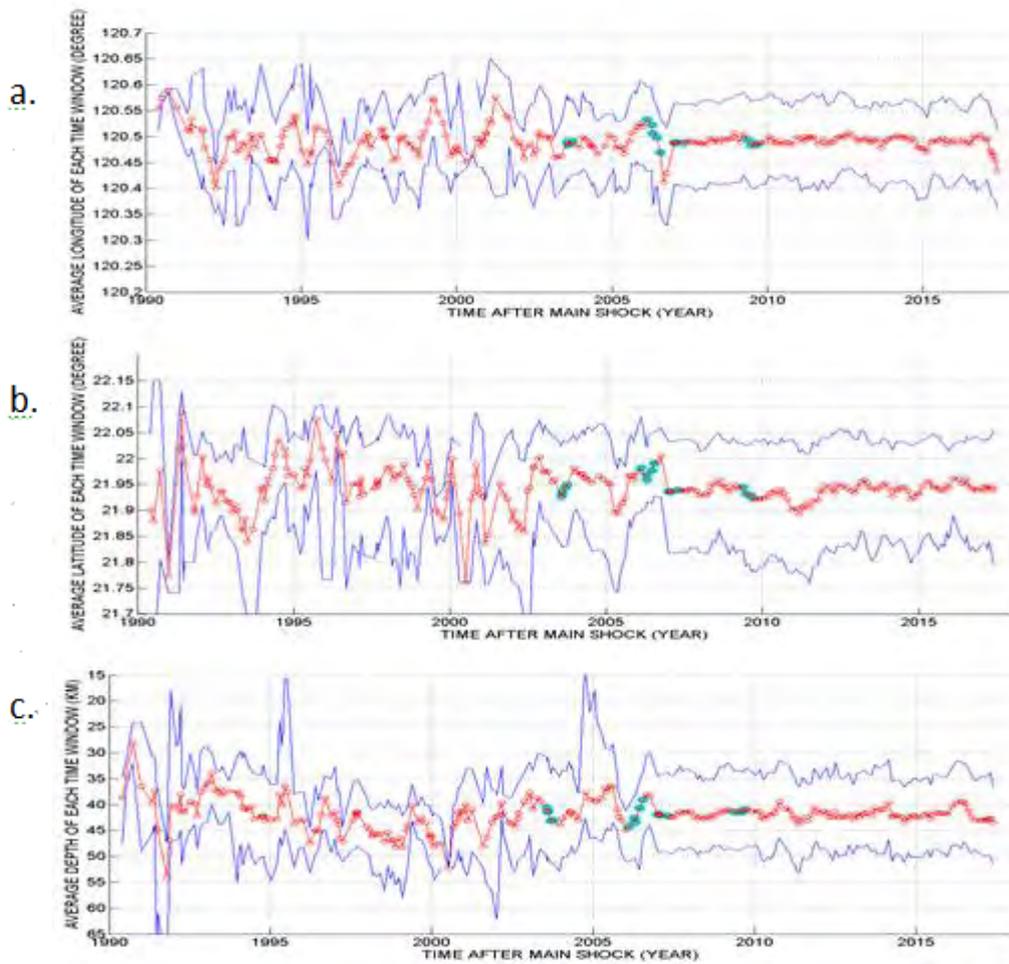


圖 11、亂數序列求取 a.平均經度 b.平均緯度 c.平均深度的結果(藍點。表視窗內有包含規模 ≥ 4.5 的地震，藍色虛線—為視窗內地震位置平均值的標準差)

(五)不同板塊隱沒帶分析結果

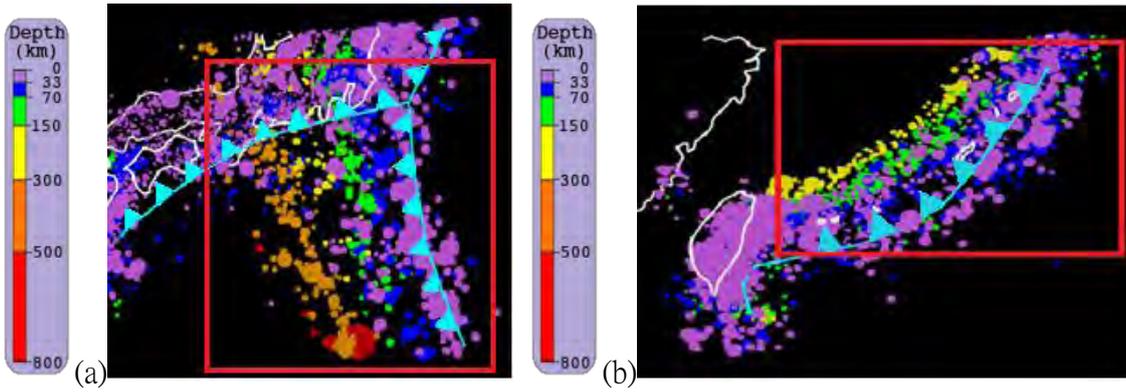
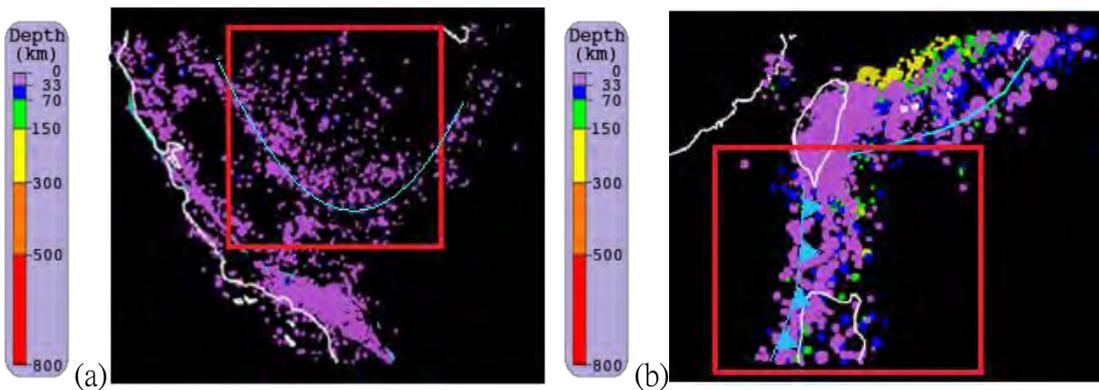


圖 12、海洋板塊隱沒實例(a)日本南部(b)台灣東北部板塊交界帶(紅色框線區域，區域內淺藍色實線表示板塊邊界，三角形指示板塊隱沒方向)

本研究區位於台灣南部板塊隱沒帶附近圖 13(b)，相對於東北部板塊隱沒帶圖 12(b)，地震型態有些不同，東北部隱沒帶圖 12(b)在震源深度大於 150km 的地震黃點數量多且明顯呈帶狀(平行海溝)，南部隱沒帶則比較缺少深度大於 150km 的地震。研究發現不同性質的板塊隱沒會造成不同的地震分布型態，其一為和東北部隱沒帶(如圖 12(b))與日本東北隱沒帶相同型態地震分布均由 0-300km(日本隱沒帶甚至大於 300km)；相對於此兩種震源分布由淺到深情形，另一種型態為美國中部(圖 13(a)紅色框線內)台灣南部(圖 13(b)紅色框線內)及喜馬拉雅山(圖 13(c))，這樣的狀態震源深度由 0-70km 左右，相對於圖 12，其深度較淺。比較結果發現一種情形(圖 12)為海洋地殼的板塊隱沒，第二種情形(圖 13)為大陸地殼的板塊隱沒。



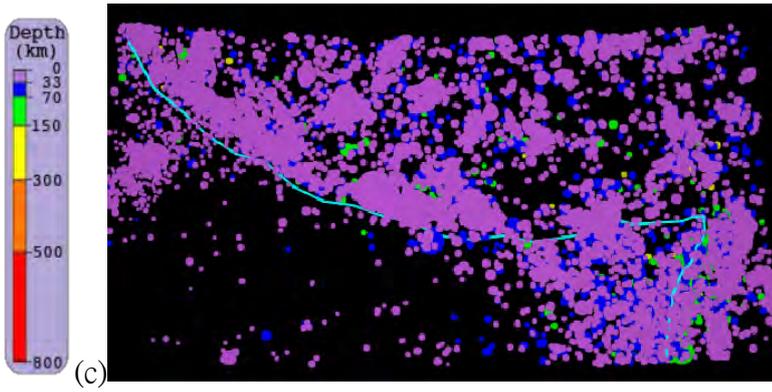


圖 13、大陸板塊隱沒實例(a)美國中部(b)台灣南部(c)喜馬拉雅山板塊交界帶(紅色框線區域，區域內淺藍色實線表示板塊邊界，三角形指示板塊隱沒方向)而海洋性質板塊的隱沒地震會形成由淺至深分布的班尼奧夫帶(如圖 12)，大陸板塊隱沒情形則較複雜，如台灣南部馬尼拉海溝附近(圖 13(b))，及北美洲地盾隱沒(圖 13(a))。

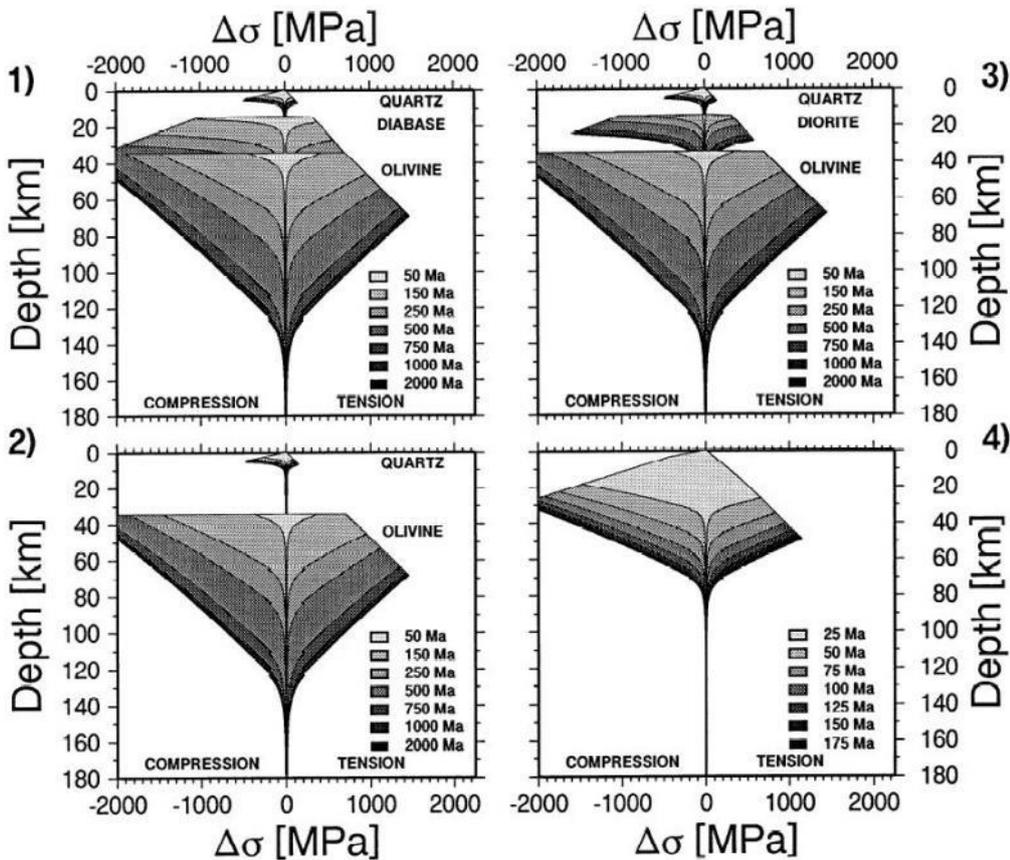


圖 14、不同物理性質板塊隱沒時應力及熱年齡的分布情形((1)(2)(3)為不同岩性的大陸地殼隱沒，(4)為海洋地殼隱沒)

查閱許多文獻之後才發現隱沒帶可能有不同的物理型態。例如 Burov 及 Diament (1995)

的文章內，使用理論公式計算及數值模擬具 35 公里厚地殼的板塊隱沒情形。結果顯示不同物理性質板塊隱沒時，應力及熱力分布情況不同，海洋性質板塊隱沒，不同熱年齡(thermal age)的玄武岩性質海洋地殼，在不同深度分布情形及所受最大及最小應力差的情況，呈現單純的樹形(圖 14(4))。和(4)海洋地殼比較起來，不同岩性的大陸地殼(圖 14(1)-(3))在聚合帶時受力物理狀態呈現分開(detach)情形，也就是像有不同樹冠分層的狀況。例如：(1)的 10km 處出現高溫變形(creep)處(此時在石英質的上部地殼下方的下部地殼出現輝綠岩 diabase)，而編號 (2)低度溫度變形產生處(下部地殼則為石英質花崗岩)，以及編號(3)中度溫度造成變形處(下部地殼岩性為石英質閃長岩 diorite)，在不同岩石交界處形成物理性的弱帶，使得應力分布呈現深度不連續的情形，形成類似聖誕樹形狀的圖樣，在出現弱帶時樹冠與樹冠間出現弱帶的間格(Gap)。

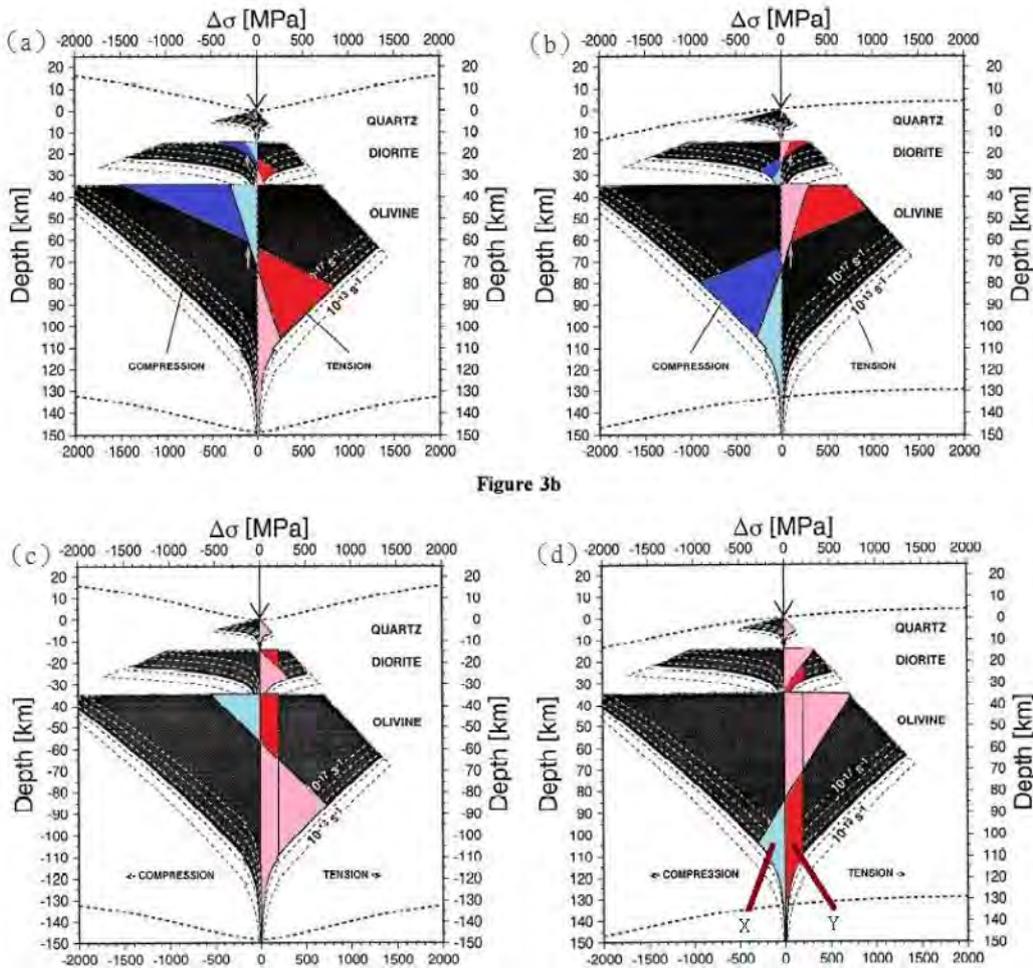


圖 15、具弱帶的大陸板塊隱沒時應力分布隨深度的變化(位方便對照，我們將圖中張力以紅色及粉紅色塗滿，壓力以藍色及淺藍色塗滿)

Burov 及 Diament 文中並提出圖 14(3)中具弱帶在 10km 及 35km 的大陸板塊受力(圖 15(a)(c))及隱沒(圖 15(b)(d))時，最大應變(原文為深灰色，在此我們改為深紅及深藍)及第二大應變(原文為淺灰色，在此我們改為淺紅及淺藍)主要出現於 15~25km 呈現張力狀態，25~35km 呈現壓力狀態，更深區域在約 35~70km 處為張力，70~130km 處為壓力狀態。

數據分析結果顯示本研究區主震多出現於 20 多公里，而餘震或背景地震有變淺的趨勢，約在 50-20km 之間地震深度分布接近圖 13 大陸地殼隱沒情形，根據 Wu,Y.-M.(2009)等人的研究顯示此研究區域的主震形態呈現張裂形狀，如果是由於此種介質不同形成的張力集中區域，在圖 15(b)及(d)之模擬中均可找到應力的弱帶並伴隨張力(紅色)的情形。此提供了我們研究聚合性板塊交界帶附近有下部地殼張裂性質地震的資訊，這也是研究台灣南部大陸板塊的隱沒很好的材料。

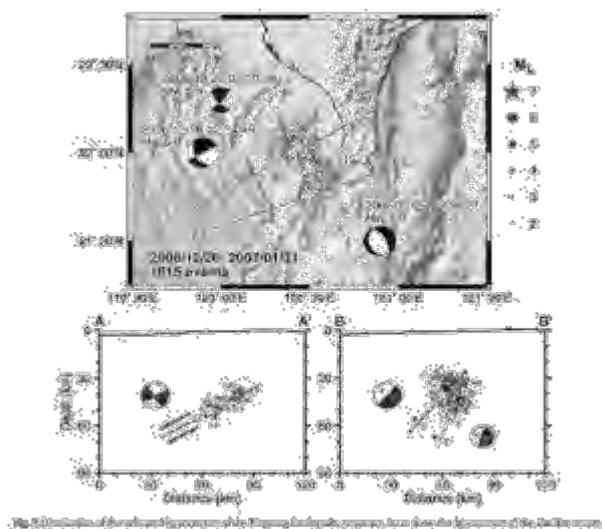


圖 16、2006 屏東大地震破裂可能模型(採自 Wu,Y.-M.,2009 的 Fig7)

二、實驗結果

為了解板塊隱沒時受力應變分布情形，我們先以麵團進行以下實驗。

(一)麵團試體彈塑性分析實驗結果

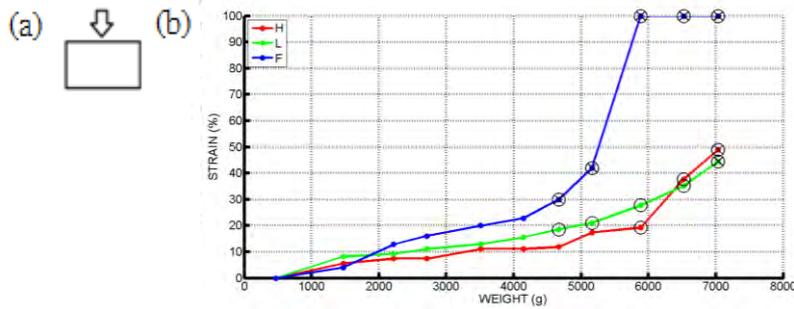


圖 17、試體受力方向(a)及受力變形情況(b)

(烘烤時間：三十分鐘。圖例中，H、L、F 分別表高筋、低筋麵粉及發糕粉，○表試體受力超過彈性限度，⊗表試體呈破裂。)

圖 17 結果顯示，發糕粉(藍色)受力具較大變形量，並且超過彈性限度，即破裂沒有塑性變形。麵粉試體變形量較小，且在破裂之前會有塑性變形。比較高筋及低筋的麵粉試體，發現二者受力變形情況接近，高筋(紅色)彈性限度較大，因為本研究地層應同時具備彈塑性變形，因此選用高低筋做為合成試體。

當施力於高低筋合成夾層後，不論何種施力及夾層情形，受力變形曲線差別不大(如圖 18 及 19)。但當應力(壓力 stress，單位面積施力)加大時且受力平行層面方向時，高筋比例較多(H L H)的試體變形量較小(見圖 18 的藍色曲線)，此和圖 17 結果(高筋試體彈塑性限度較大)相符。

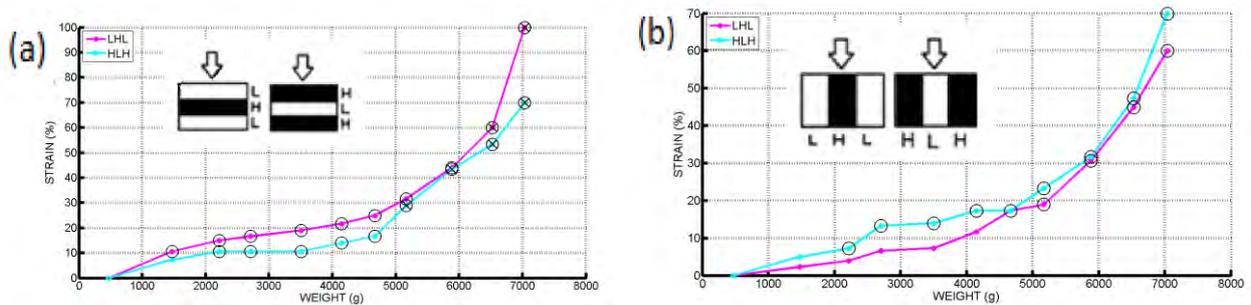


圖 18、試體受力方向及受力變形情況

((a)施力垂直層面方向，層面平行樣本長邊方向。(b)施力平行層面方向。○試體已超過彈性限度，⊗表試體破裂。)

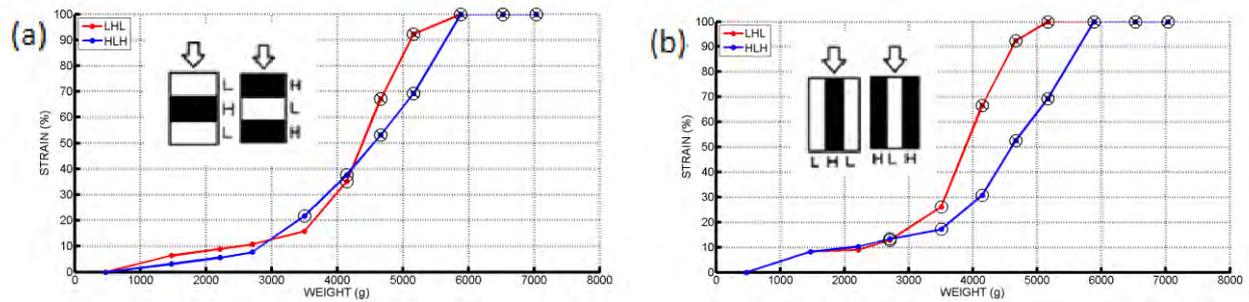


圖 19、試體受力方向及受力變形情況

(a)施力垂直層面方向，層面平行樣本短邊方向。(b)施力平行層面方向。○表試體已超過彈性限度，⊗表試體呈脆性變形。)

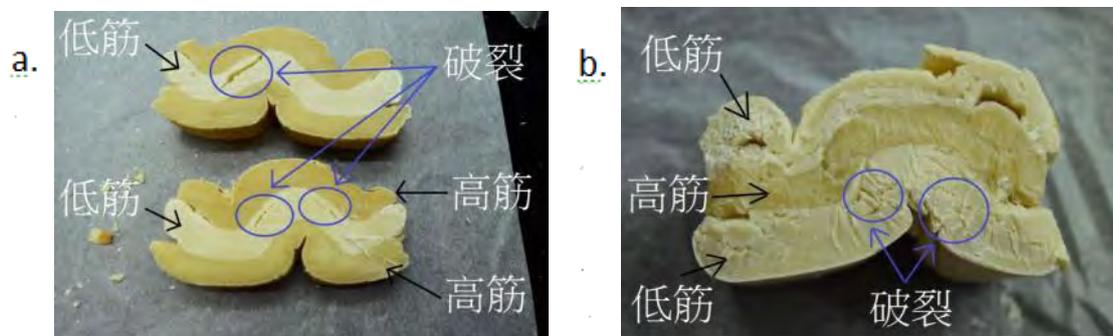


圖 20、(a)高筋夾低筋試體(b)低筋夾高筋受力彎曲破裂

圖 20(a) (b)為高低筋合併試體受力破裂情形，可以看到當試體受到平行層面應力時，在低筋夾層的內部出現破裂，且破裂面接近高低筋的介面，而高筋麵粉則指出現彎曲的情況，推斷因低筋夾層的彈性限度較小較易破裂有關，對照到圖 15，麵團交接處可能為應力聖誕樹樹冠相接部分，而破裂處即在弱區上下應力較大處。

(二)「吉利丁應力分析實驗」結果

偏光片能讓光源的光產生偏極化(polarization)，亦即偏光片能產生特定波動面的光(稱為偏極光)，因此偏光片有如光的過濾器。

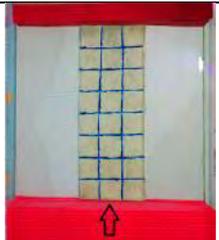
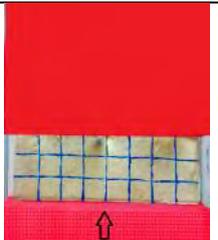
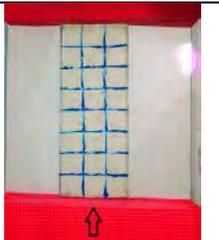
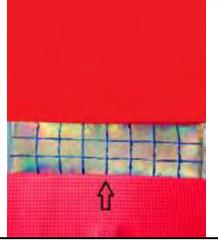
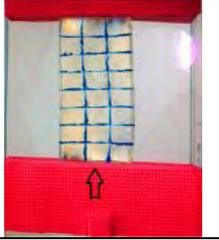
大多塑膠製品，具有雙折射性質，使得通過第一個偏光片的偏極光在通過塑膠時，分解為二道快慢差異的光線。而經過雙折射的偏極光，通過第二個偏光片時，偏振光的過濾作用，

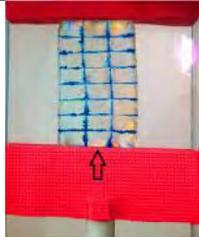
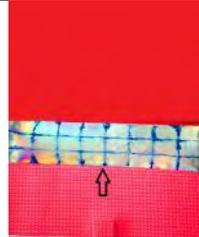
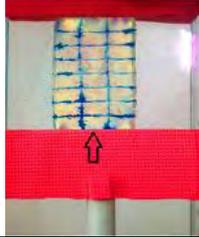
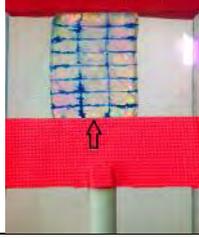
只讓某一特定的偏極光通過，因此我們只能看到特定顏色的光。由於雙折射的折射程度，和塑膠材質的密度、厚度、分子排列等等的微小差異有關，因此塑膠材質只要有彎曲或形狀變化，就很容易顯示出這種特性，進而形成彩虹的現象。

上述的現象被稱為光彈性(photoelasticity)，在材料科學上常應用於「應力(stress)」分析，用以檢視材料是否有潛在的應力破壞、疲勞性破壞等等的殘留應力，材料的應力分佈我們不容易用肉眼看見，但卻會使材料的內部分子與分子之間的排列被扭曲而造成光學性質的改變。也因為光學性質的改變，偏振光會在偏光片上干涉而見到絢麗的七彩圖案進而間接了解材料的應力分布情況，例如彩虹條紋密度越高，代表該區的殘留應力越高。

為更清楚試體受力時應力(應變)的分布，我們又再加入擠壓吉利丁的實驗。表 2 為以正向壓力擠壓不同吉利丁的結果，以偏光片觀察應變分布情形發現顯示應變分布的紅藍色散亂而沒有規則。

表 2、不同濃度吉利丁受壓變形情形

實驗 轉軸圈數	1	2	3	4
	吉利丁濃度高 8%(直向)	吉利丁濃度高 8%(橫向)	吉利丁濃度低 4%(直向)	吉利丁濃度低 4%(橫向)
0				
12				

18				
24				
30				

在板塊隱沒時，板塊受力除正向之外，也會有隱沒造成的變形，為此我們再加上吉利丁的彎曲變形偏光實驗如表 3 所示。

表 3、不同吉利丁彎曲變形偏光實驗結果

實驗 轉軸圈數	5	6
	吉利丁濃度高 8%	吉利丁濃度低 4%
0		
12		

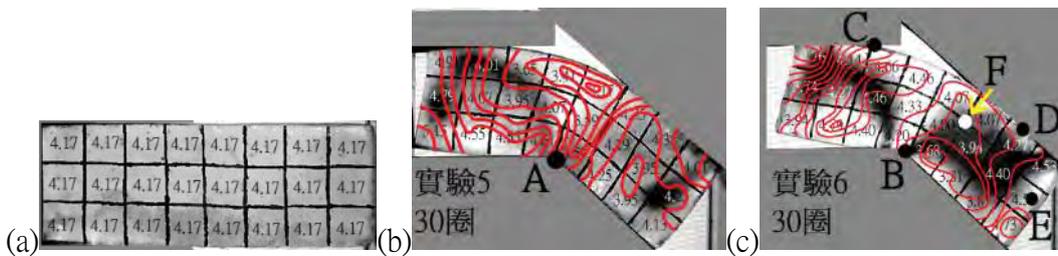
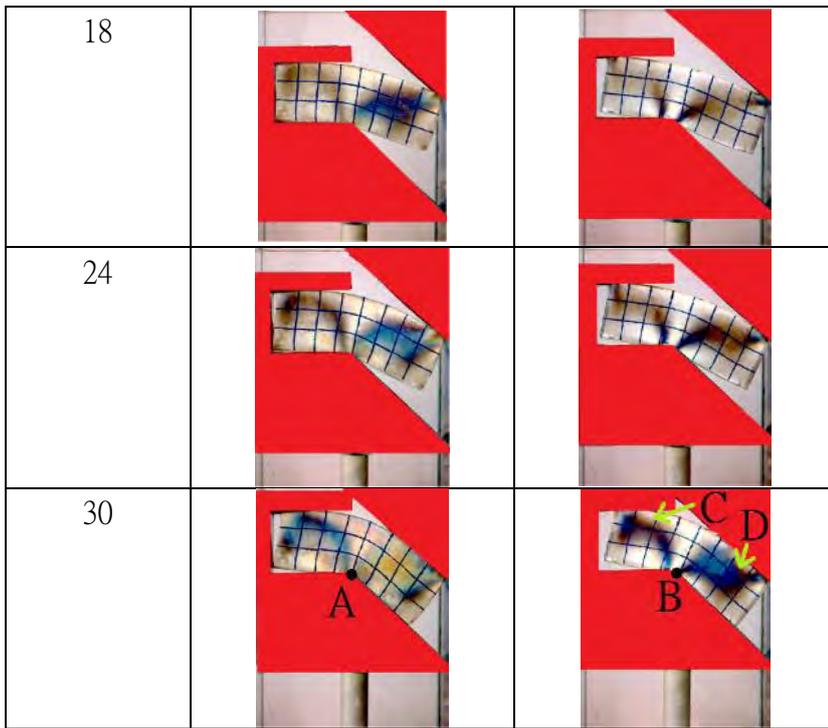


圖 21、表 3 吉利丁變形後面積分析(網格內數字表示重量百分比，紅色曲線為百分比的等值線)(a)為變形前 (b)(c)為變形後濃度 8%及 4%的試體

表 3 實驗結果顯示吉利丁彎曲變形時，在與模型板接觸的 B、C、D 三點連線 BC 及 BD 可見明顯變形造成的偏光現象。為更深入了解，將瑜珈墊切割成吉利丁網格點，切割出每塊瑜珈墊的重量表示變形的吉利丁各網格的變形量，重量越大，表示吉利丁受張力變形，面積變大；重量越小，表示吉利丁受壓力變形，因此面積變小。如圖 21(a)為變形前各試體重量百分比，圖 21(b)及(c)分別為表 3 高濃度(8%)及低濃度(4%)吉利丁彎曲變形實驗中當轉軸轉到 30 圈時，網格面積變形情形。圖 21 的背景為表 3，實驗 5、6 的試體偏光情形，紅色的等值線是變形後面積(即瑜珈墊質量)的等值線分布。由圖可見偏光最重顏色即表 3 中 BC 及 BD 連線會垂直等值線，尤其會通過等值線轉彎處，如 BD 線段，推測因變形梯度變大造成偏光加強。而在梯度較大兩側面積變大(質量大)時，顏色偏紅，如圖 21(c)之 E 點附近；相反的面積變小

顏色偏藍，如圖 21(c)之 F 點附近。紅藍色(壓力、張力)應變的分布在 BD 連線二端，相對情況也在圖 15 中可見。

表 4、中間具弱帶吉利丁彎曲變形偏光實驗結果

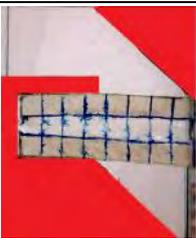
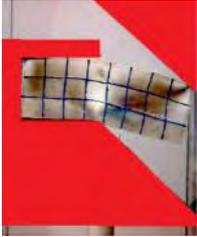
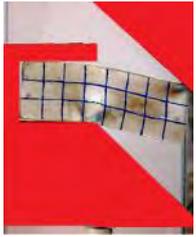
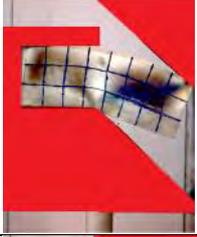
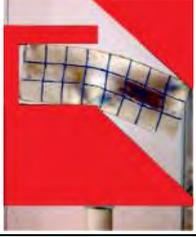
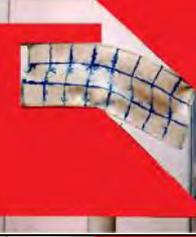
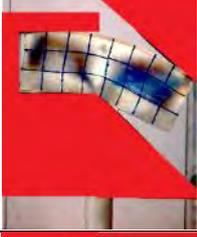
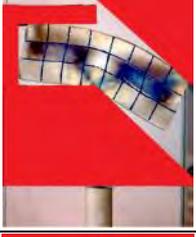
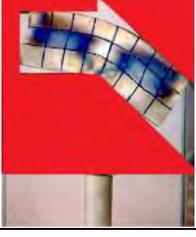
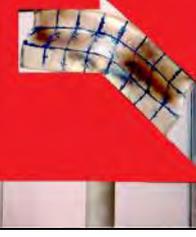
實驗 轉軸圈數	7	8	9
	高低高 8%-6%-8%	高低高 8%-4%-8%	高低高 8%-2%-8%
0			
12			
18			
24			
30			

表 4 為中間夾不同濃度弱帶的吉利丁測試結果，對照表 3 可發現應變區域縮小到大部分在弱帶內，小部分在弱強帶接觸邊界間，分析在轉軸 30 圈變形時網格點的改變(圖 22)，發現網格點面積(質量百分比表示)的等值線比圖 21 有更多曲率變化在弱帶內，意即有高應變量的變化(應變量梯度較大)在弱帶內(如圖 22(a)之 G 點處)及強弱帶交接的介面附近(如 22(a)之 H 點處)。

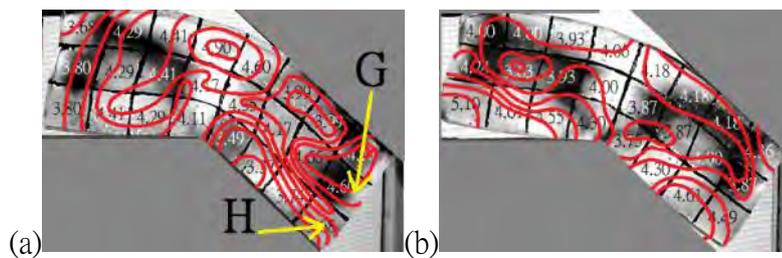


圖 22、表 4 吉利丁變形分析(a)為變形後(濃度 8%-6%-8%)(b)為變形後(濃度 8%-4%-8%)

中間夾強帶的吉利丁測試結果(表 5)，強帶較無累積應變，呈深色，而應變最高也在強弱相交的邊界。變形量分析如圖 22 所示，其結果的變形量變化曲線較圖 21 曲率較小。

表 5、中間具強帶吉利丁彎曲變形偏光實驗結果

實驗 轉軸圈數	10	11	12
	低 高 低 6%-8%-6%	低 高 低 4%-8%-4%	低 高 低 2%-8%-2%
0			
12			

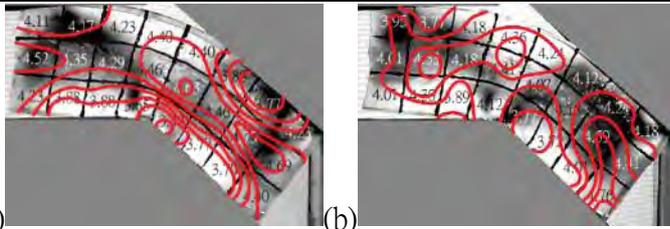
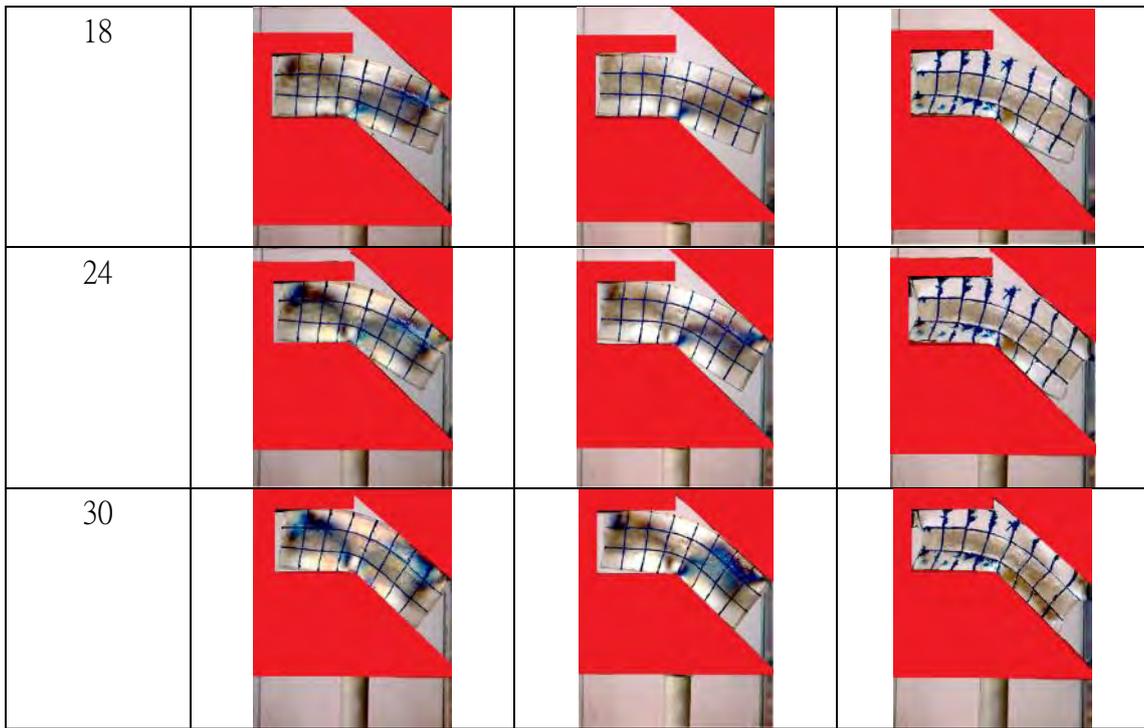
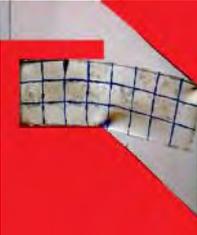
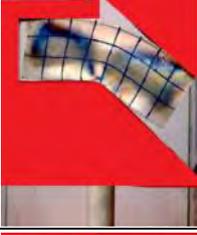
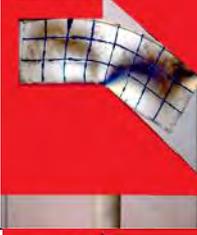


圖 23、表 5 吉利丁變形分析(a)為變形後(濃度 6%-8%-6%)(b)為變形後(濃度 4%-8%-4%)

表 6、中心具較小的強弱帶吉利丁彎曲變形偏光實驗結果

實驗 轉軸圈數	13	14
	高低高 8%-4%-8% 	低高低 4%-8%-4%
0		

12		
18		
24		
30		

為了解中間夾弱帶體積縮小造成的影響，我們進行表 6 的實驗，結果顯示變形的偏光情形較不明顯，除此之外，表示應力變化情形的等值線分布情況(圖 24)類似圖 23 但更為疏鬆，顯示不均勻帶比例越大，應變差別越大。

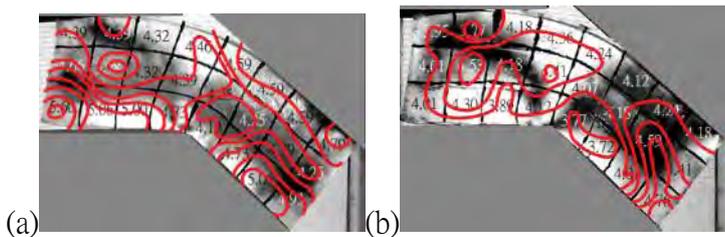


圖 24、表 6 吉利丁變形分析(a)為變形後(濃度 8%-4%-8%)(b)為變形後(濃度 8%-6%-8%)

接下來，我們想保持當板塊隱沒擠壓情形較複雜時，應變會有怎樣的改變。表 7 中顯示吉利丁濃度高時，應變較散亂；濃度低時，壓力(藍)及張力應變(紅)就較明顯。

表 7、多彎試體受力變形情形-均勻試體

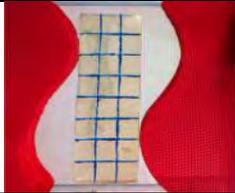
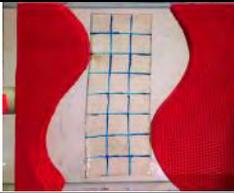
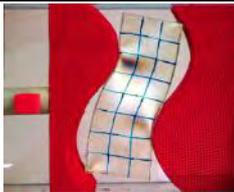
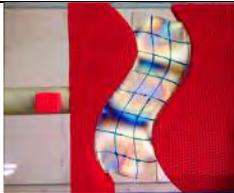
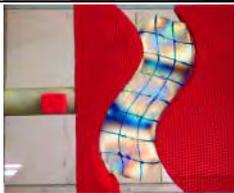
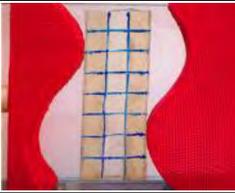
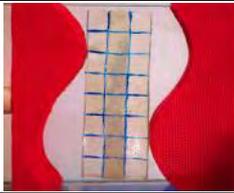
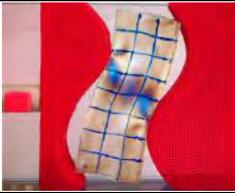
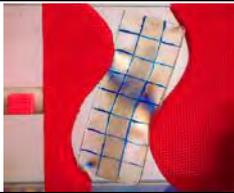
實驗 轉軸圈數	15	16
	吉利丁濃度高 8%	吉利丁濃度低 4%
0		
12		
18		
24		

表 8、多彎試體受力變形情形-中間夾弱帶或強帶

實驗 轉軸圈數	17	18
	高 低 高 8% 4% 0% 8%	低 高 低 4% 8% 4%
0		
12		

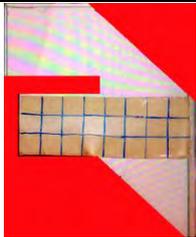
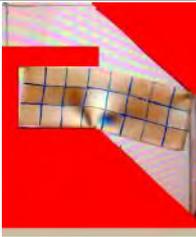
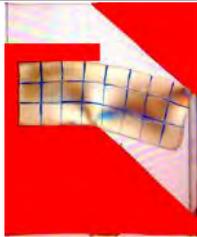
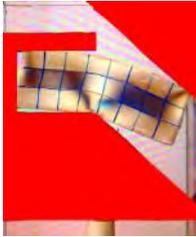
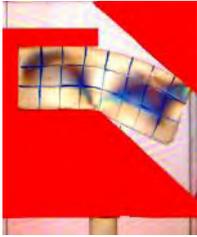
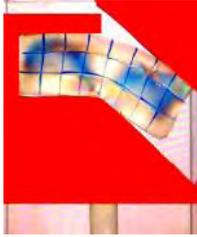
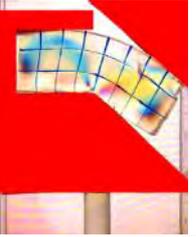
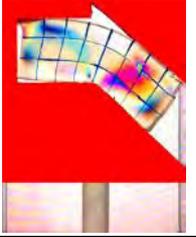
18		
24		

表 9、多彎試體受力變形情形-較小的弱帶或強帶

實驗 轉軸圈數	19	20
	高低高 8%-4%-8%	
0		
12		
18		
24		

表 7-9 顯示當受力時不只一處彎曲會在每個彎曲處出現表 2-6 的規則，例如表 8 及表 9 在中間夾弱層時，張力及壓力較明顯出現偏中央弱區及交界處。

表 10、不同吉利丁彎曲變形偏光實驗結果(白色為濃度 4%之試體，黑色為 8%)

實驗 轉軸圈數	21	22	23
	高低高 8%-4%-8% 	高低高 8%-4%-8% 	高低高 8%-4%-8% 
0			
12			
18			
24			
30			

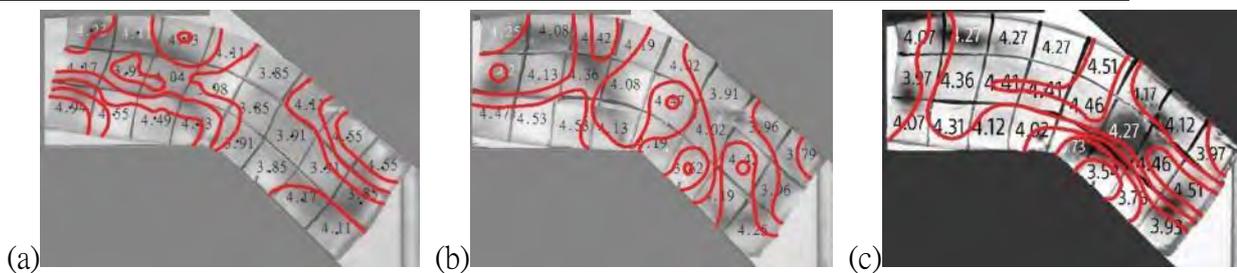


圖 25、表 10 吉利丁變形分析(a)實驗 21 試體(b)實驗 22 試體(c)實驗 23 試體

在圖 25 吉利丁試體變形分析中，我們對照圖 22(b)試體的等值線圖，發現在試體強帶內含有部分弱帶時，等值線會垂直強帶內的弱帶層面，等值線密度也較圖 22(b)疏鬆且不規則。

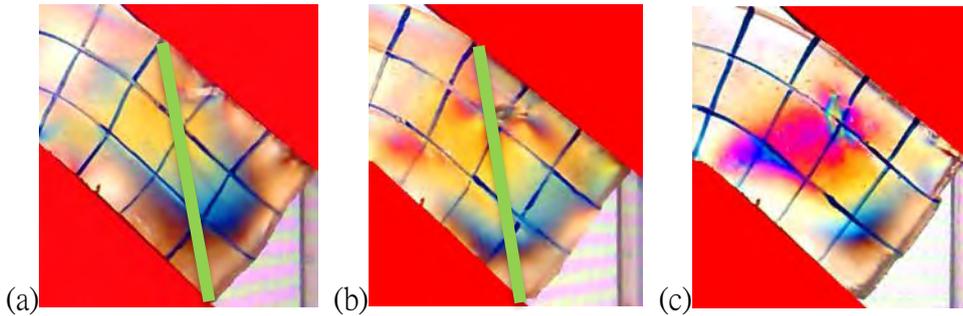


圖 26、表 10 轉軸圈數 30 圈之試體放大圖(右半部試體)

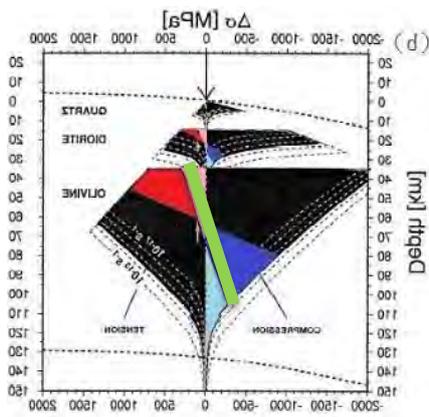


圖 27、圖 15(b)水平翻轉後的圖形(翻轉是為了讓隱沒方向與實驗一致，方便對照)

表 10 實驗結果顯示吉利丁彎曲變形，在強帶內有部分弱帶出現時，實驗 21-22 的試體應變分布會與圖 27 結果相符，在綠線下方受較大的張力(紅黃色)與較小的壓力(藍色)，綠線上方受較大的壓力(藍色)與較小的張力(紅黃色)，實驗 23 則較無此結果，推測此區域板塊強帶內(實驗 21-23 示意圖黑色部分)，可能含有部分弱帶(實驗 21-23 示意圖白色部分)，且弱帶分布方向垂直板塊隱沒方向，使板塊隱沒時造成應變不均的情形。

陸、討論

實驗 5-12(表 3-表 5 及圖 21-23)的應變結果也顯示，除應變差別大的連線之外，壓力應變易產生於彎曲試體下側介質成分不同處(如圖 21 中 E 為紅色張力應變，F 為藍色壓力應變)，此結果和數值模擬板塊隱沒時(圖 15(c)及(d))，板塊和軟流圈接觸面彎曲處會出現壓力形式(藍色)的應變相符。仔細觀察圖 15(d)在壓力應變(藍色 X)的隱沒板塊下部另一側也同時出現張力

應變(紅色 Y)處，此情況更符合我們實驗結果。實驗中弱帶出現會使應變集中，並在強弱介質的邊界附近，這也可對應到圖 15(c)(d)中介質交界處，應變更大的情形，例如圖 15(d)在 15km 深張力約到 500Mpa，其為 QUART 及 DIORITE 交界；在 35km 深張力約達 700Mpa。而在受力彎曲的所有實驗中，相對於下部壓力應變(如圖 21BE)，其另一側表面(圖 22G)主要出現張力應變。根據圖 16 文獻所示本區域大地震主要為張力形式，並且深度約為 40km，因此推測其為大陸地殼隱沒時，應變集中弱帶邊界有關。

分析台灣地區及台灣西南部，大地震的分布範圍深度(圖 13(b))其多在 0 公里到 150 公里，且多數大地震發生在 0~30 公里深，這個結果和研究區域的大地震均發生 40 多公里約在此範圍的底部不同。我們的研究發現主震及餘震均約由 20~50 多公里深的向西傾斜的一些斷層面造成。對照實驗 7-9(表 4)中厚試體已有弱面存在時，施力後應變較集中於弱面內及強弱兩介質的交界附近。但斷層的走向以及每次大地震均由 40 多公里向淺層移動，仍是待加以深入探討的方向。

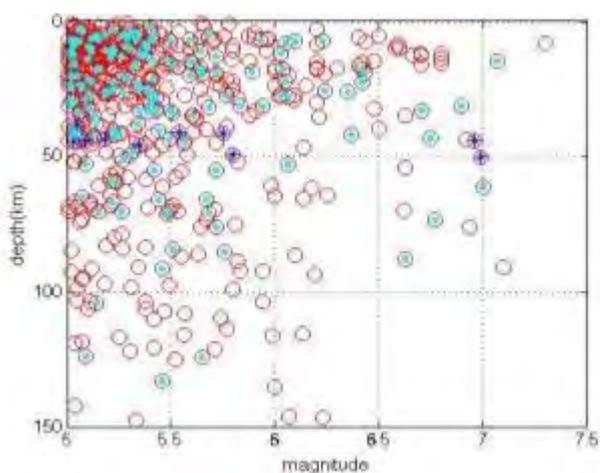


圖 28、不同地區大地震(規模 ≥ 5.0)發生深度與規模之比較(紅色●西南部，位置：東經 119~123 度，北緯 21~25 度，深度 0~90 公里，淺藍色●隱沒帶附近，位置：東經 120~122.5 度，北緯 21~23 度，深度 0~90 公里，深藍*研究區域，位置：東經 120~120.7 度，北緯 21.58~23 度，深度 0~90 公里)

查閱資料發現 Yang 等人(2007)以不同物理狀況的上下地殼模擬台灣南部隱沒帶推測的模型(圖 29)，提出台灣南部板塊隱沒應接近強上部地殼(橘)加黏滯度高較具塑性弱下部地殼(黃)，形成的板塊由西向東隱沒，其所受聚合作用使應力(深紅色區塊)集中在隱沒轉彎附近上下地殼交界的下部地殼內。李浣撰(2004)更參考此模型(圖 29)模擬此區域的受力結果，數值分析顯示除隱沒轉彎處上方有可能造成破裂的應變(紅色線狀)下方的黃色線狀破裂的分布，可能是此處斷層易出現的方向及樣態，這些參考資料提供了靈感，相對也讓我們發現更多的問題待解決。

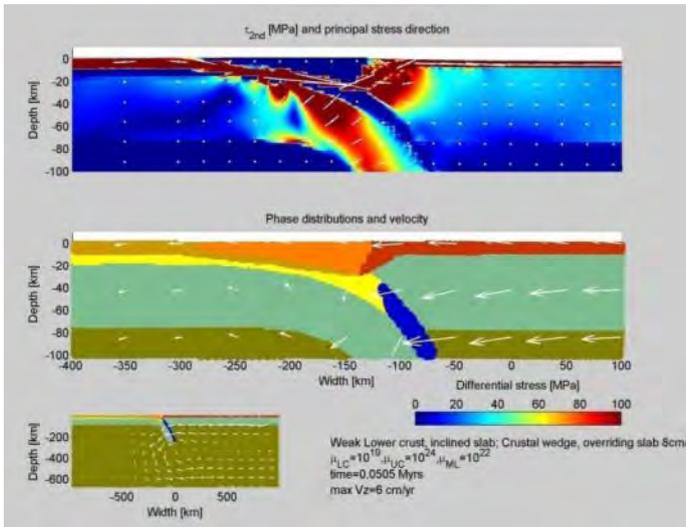


圖 29、2006 屏東大地震破裂可能模型
(採自 Yang, D.-A.,2007 的 p.23)

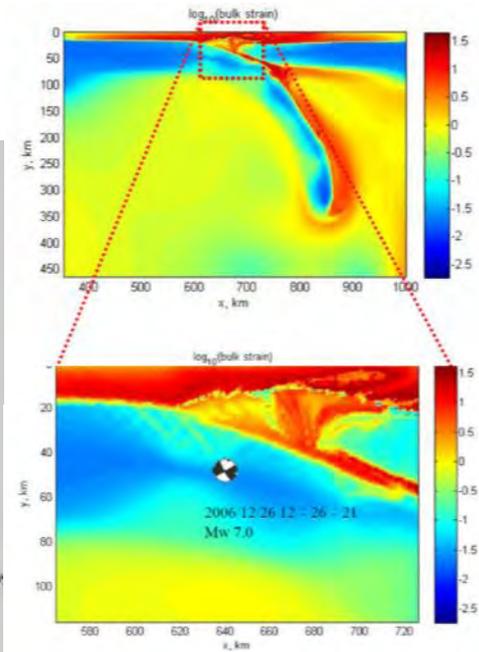


圖 30、2006 屏東大地震破裂可能模型(採自李沅,台灣南部恆春半島的地體動力模擬,2014 的圖 4.1.1)

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 2~5 年間有大地震出現情形。
- 二、大地震出現後，平均位置變遷有共通趨勢，均約漸漸向淺(上)向東偏，接下來向深(下)向西約到 40~50 公里深接續下一次大地震。
- 三、實驗結果顯示，應力易集中於二種物理性質不同的界面附近，一旦超過彈性限度，破裂常出現在較弱的岩層內近界面處，原本存在的弱面尖端也是應變易集中處。
- 四、本研究區重複出現大地震，可能為隱沒帶附近地殼內物理性質有差異的交界面處，並在接近已存在的弱面區發生。

捌、參考資料及其他

- 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。
- 五、李沅(民 103)。台灣南部恆春半島地體動力模擬。第 48 頁。
- 六、Yuen, D., B. Kaus., Y. C. Liu., Y. I. Shi., & E. Serve. (2007). Pingtung Earthquakes of Taiwan and Geodynamics, 23.
- 七、C.-Y. Tsai, G. Ouillon and D. Sornette, New Empirical Tests of the Multifractal Omori Law for Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America* 102 (5), 2128-2138 (2012)

【評語】 051902

本作品以地震為主題，目標為台灣南部(含外海)地區，板塊聚合帶中，具張裂特性的地震。作者先蒐集資料，分析此地區內地震的時空分布特徵，再以實驗模擬不同材料混合後，在應力作用下，應變分布情形。實驗中以偏光片觀察試體之應變分布為一結合材料學與光學之構思，甚是難得。建議在討論中除應變分布相關的討論外，嚐試多著墨張力區與壓力區辨識之討論，以呼應研究地區地震之特徵。以偏光片觀察應變分布乃本作品之特色，故宜說明偏光片與試體及光源之相對位置，另可在地震位置圖中標示台灣位置，凸顯研究區域之地理位置。

作品摘要

分析台灣西南部東經120.5度、北緯21.7度地震群，在1994-2017年6月，在20-70公里頻繁出現地震，且規模4.0以上的中大型地震好發於40公里左右。根據資料顯示此地區地震發生和向西傾斜的張裂及走向滑移斷層關係密切。地震發生的空間規則，可能和板塊隱沒時應力施於交界處附近，使應力易累積於弱下部地殼與強上部地殼交界處有關，我們設計的模型在地震深度分布與應力累積的空間分布均得到很好的證實。

研究動機

此區域的中大型地震集中在40公里深，且為低角度張裂型態，而在板塊聚合帶很少發生此情形，所以引發我們的好奇，想了解為何在此處會有地震集中的情形。

研究目的

模擬此區地震情況，並提出可能的模型解釋，並且找出地震集中發生的原因。

研究設備及器材

◎ 實驗：吉利丁粉/電腦螢幕/單壓平臺/偏光片/燒杯/電磁爐 ◎ 記錄：電腦/手機

研究過程及方法

一、地震資料分析

由中央氣象局地震目錄選取1994年-2017年6月此地區的地震資料

計算規模大於3.0、4.0、5.0、6.0的地震個數

將地震隨深度分布繪製成俯視圖與側視圖

將地震位置隨時間的分布分別從經度、緯度、深度三方向繪製成表

二、吉利丁實驗分析

以不同濃度的吉利丁試體模擬地層。將試體置於平台上，旋轉螺旋鈕壓縮試體，並將吉利丁繪上網格，透過偏光片觀察吉利丁內部受力後的彈性光偏折變化。

(一) 剪力基準實驗

以試體受剪力形變時角度 $\Delta\theta$ 的偏移(偏移弧度 $\Delta\ell$)表示應變及應力大小。黃色箭頭為受力方向，黃框為實驗結果擷取位置。

厚度 h 物體相對相位差沿:

$$\sigma_3 \text{ 方向: } \Delta_{12} = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$\sigma_1 \text{ 方向: } \Delta_{23} = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_2 - \sigma_3)$$

$$\sigma_2 \text{ 方向: } \Delta_{31} = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_3 - \sigma_1)$$

$\sigma_1 - \sigma_2$ 為主應力差

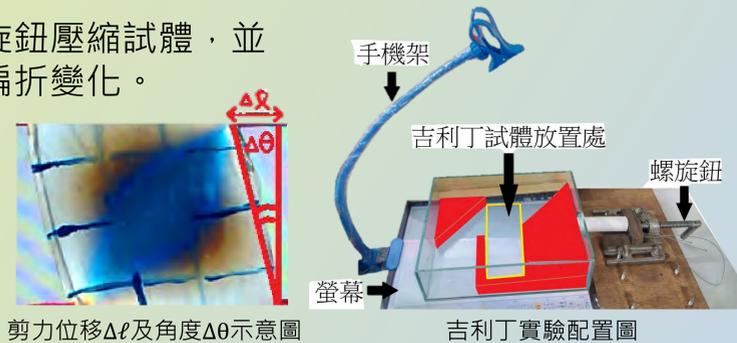
在我們的模擬實驗中 h 為定值

$$\text{若 } \sigma_3 = 0, \Delta = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$n = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{h}{f\sigma}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

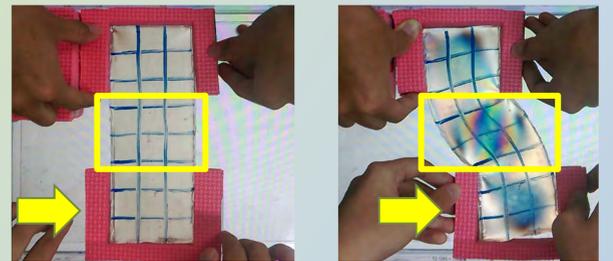
n : 等色線序 (fringe order)

λ : 波長 c : 光速



剪力位移 $\Delta\ell$ 及角度 $\Delta\theta$ 示意圖

吉利丁實驗配置圖



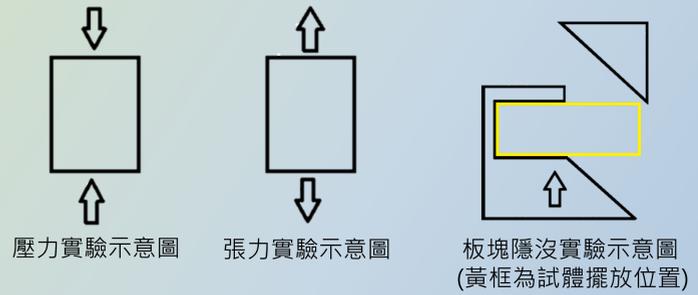
剪力實驗示意圖(黃框為實驗擷取位置, 箭頭為施力方向)

(二) 正向力基準實驗

以壓力及張力測試吉利丁形變的偏光結果。

(三) 沿板塊隱沒方向

以不同濃度(8%、6%、4%)吉利丁試體，模擬板塊隱沒。



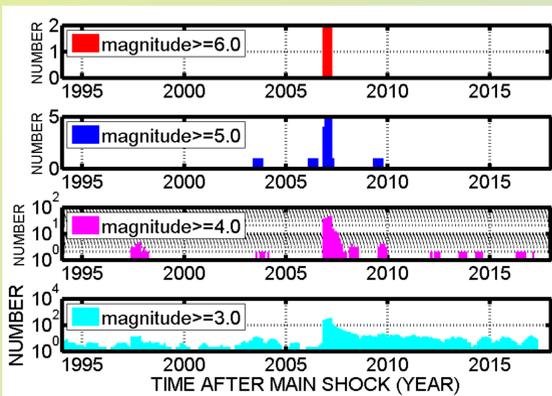
壓力實驗示意圖

張力實驗示意圖

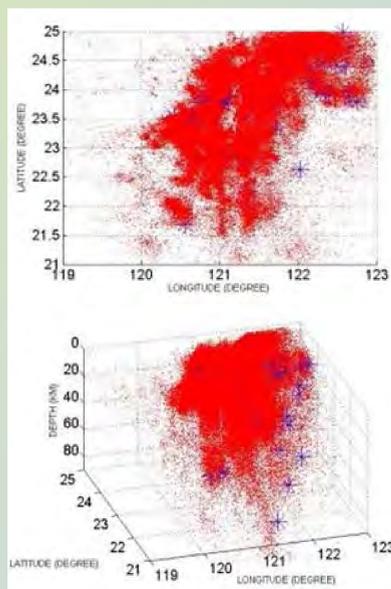
板塊隱沒實驗示意圖(黃框為試體擺放位置)

研究結果

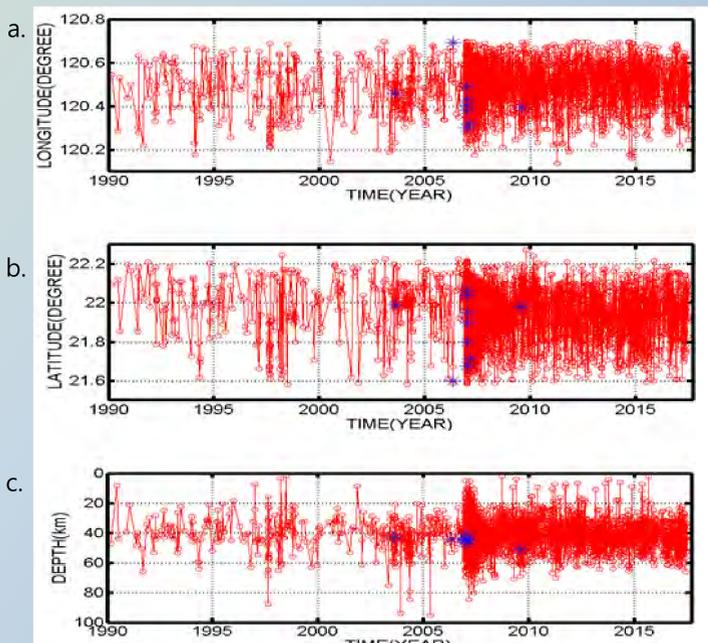
一、地震資料分析



研究範圍內不同規模地震個數比較圖



台灣地區地震空間分布俯視圖(上圖) 側視圖(下圖)(藍色* 表地震規模 ≥ 6.0)



研究範圍內地震位置在a.經度b.緯度c.深度隨時間的變化(紅色* 表地震, 藍色* 表地震規模 ≥ 5.0)

結果

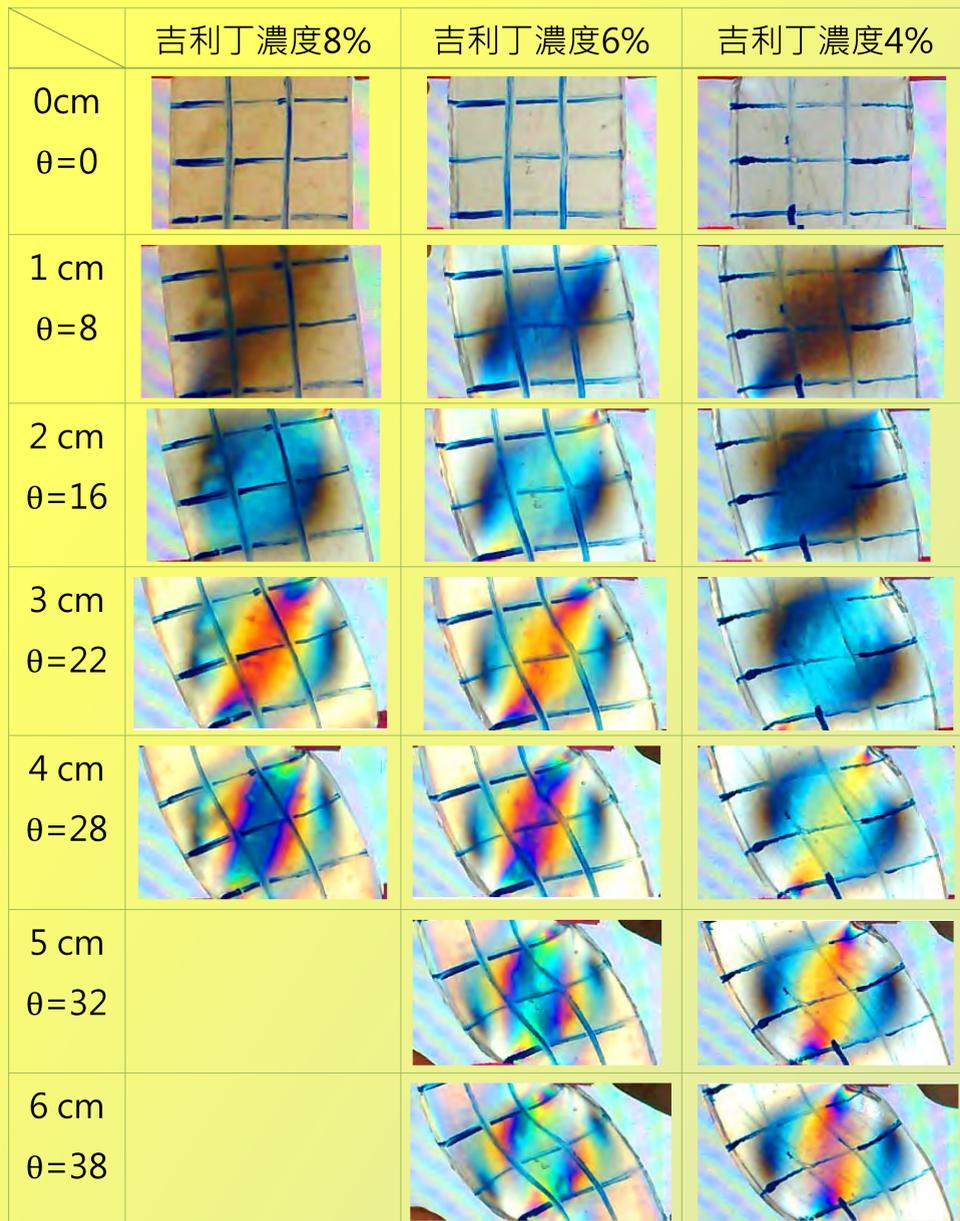
- 1. 此地區地震沒有週期性
- 2. 地震集中在40多公里左右發生

探討

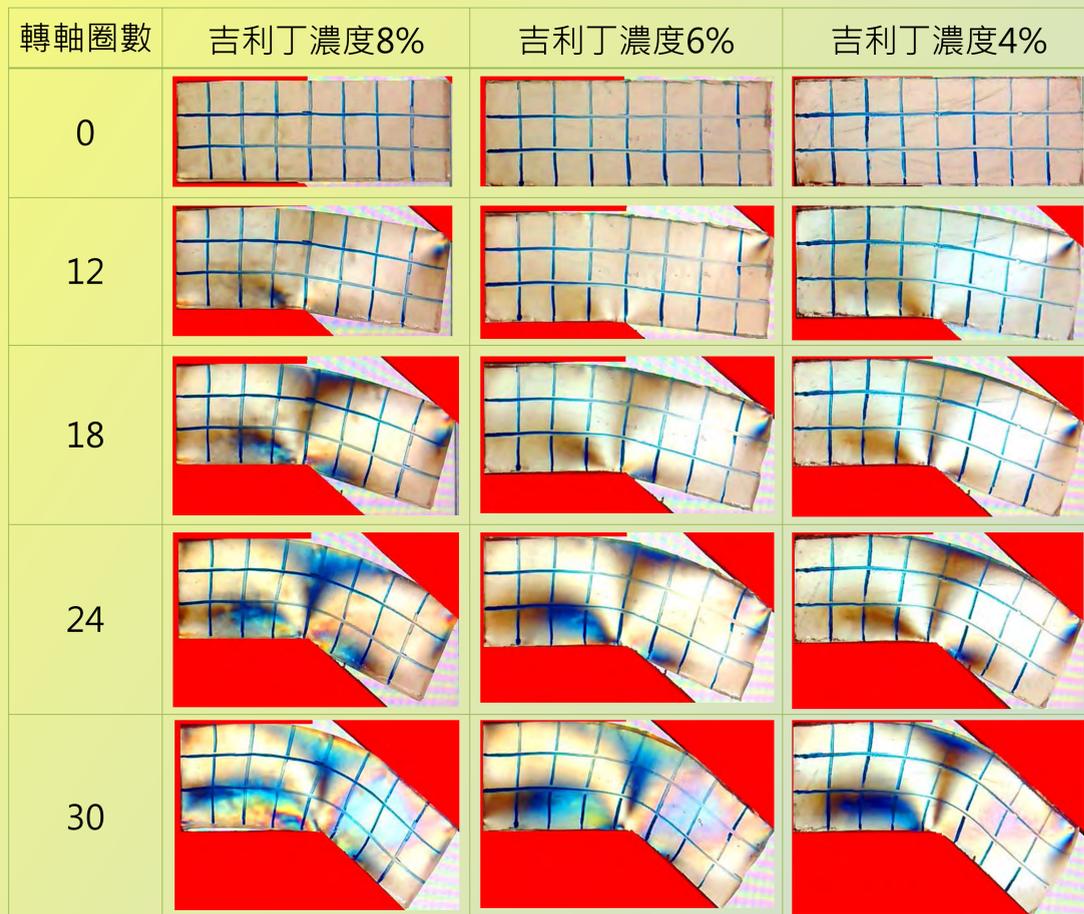
地震分布與應力累積的空間分布

二、吉利丁實驗分析

(一) 剪力基準實驗

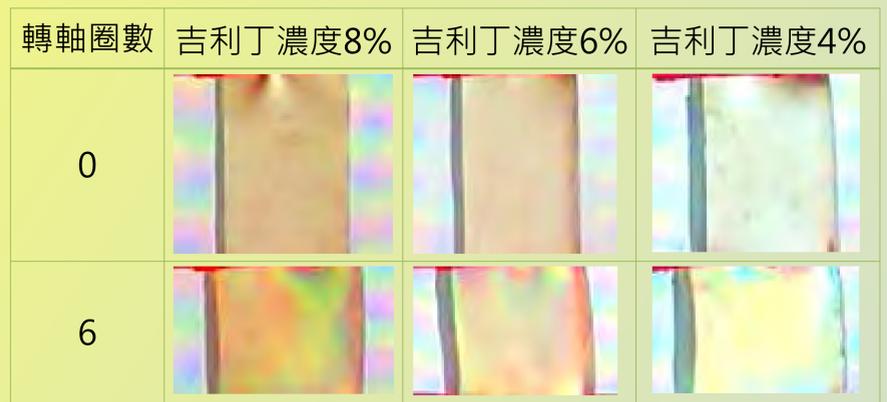


(三) 沿板塊隱沒方向

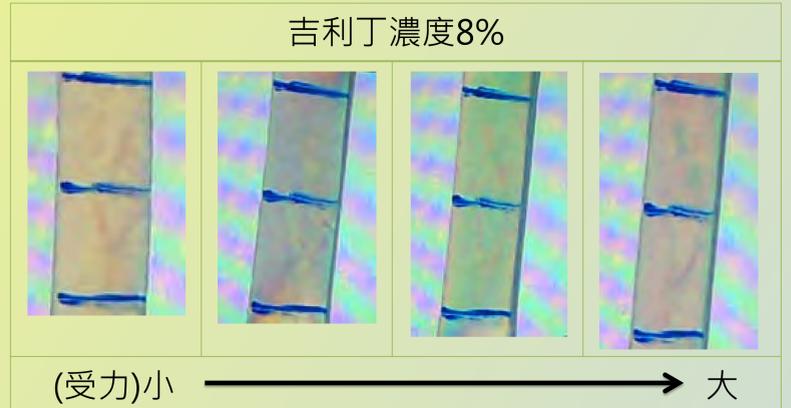


(二) 正向力基準實驗

1. 壓力



2. 張力

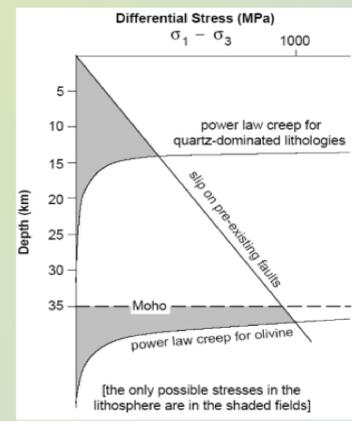


探討

板塊隱沒時，是否是因為應力集中而造成板塊破裂。

結果

1. 不管試體受到剪力或正向力，產生的偏光均會由藍色到紅色循環，受力越大，偏光循環次數越多。
2. 濃度(地殼強度)越高的試體呈現彈性光性。
3. 濃度(地殼強度)越低的試體出現塑性變形。



錯動滑移與塑性潛移和深度的關係圖

受力產生破裂滑移
板塊彈性限度較高：
0-15、35-40km

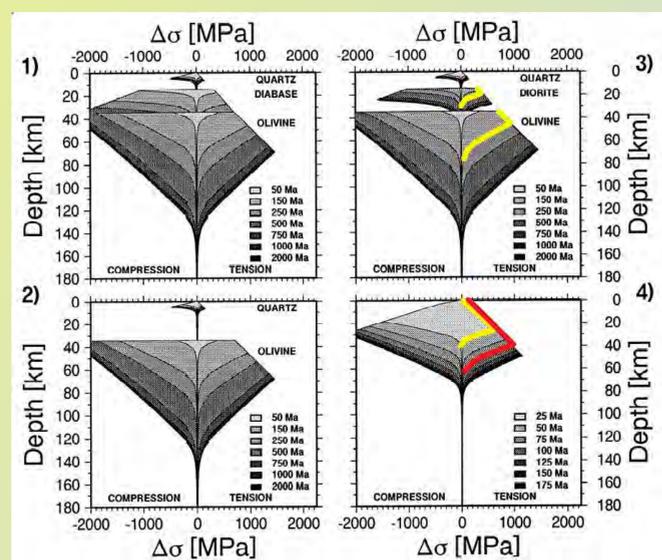
受力產生流動或塑性變形
板塊彈性限度較低：
15-35、40km以下

探討

板塊隱沒時內部的應力分布與剪力和正向力的比較。

結果

1. 無論吉利丁濃度高低，左方與上方的偏光結果大致相同。
2. 右方偏光結果，在濃度4%的試體中最不明顯，此與上述剪力實驗結果相符。
3. 濃度(地殼強度)較低的試體因為會產生塑性變形，所以偏光較弱。



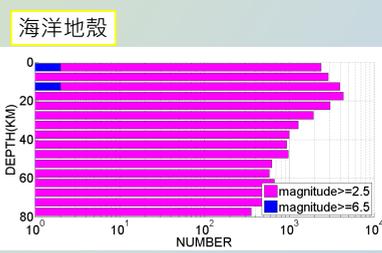
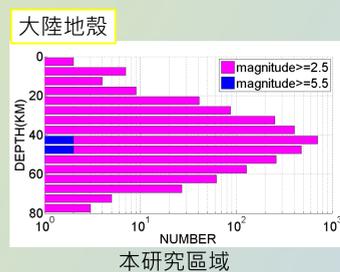
不同物理性質板塊隱沒時應力及熱年齡的分布情形
(1)(2)為不同岩性的大陸地殼隱沒 (4)為海洋地殼隱沒

探討

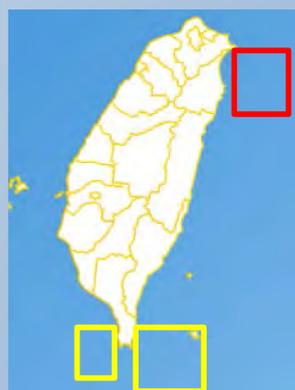
不同隱沒帶地震個數隨深度分布情形。

結果

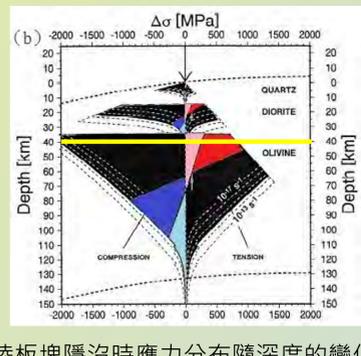
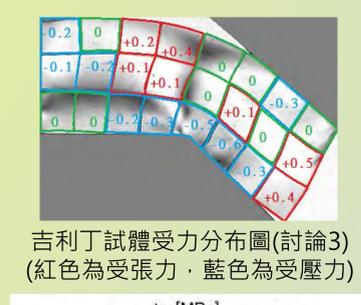
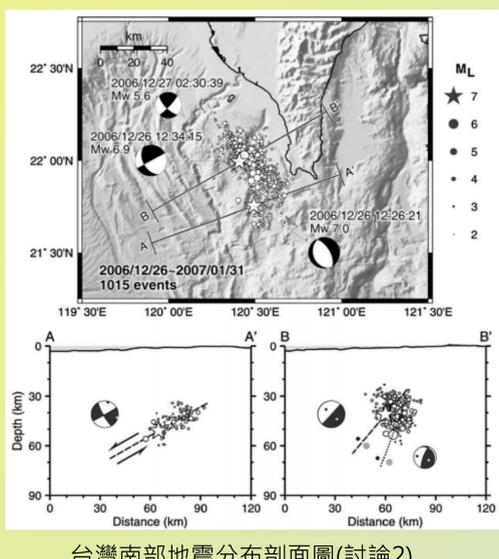
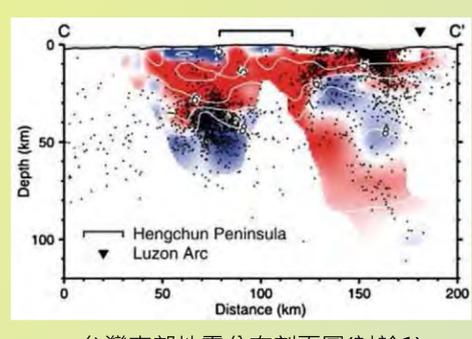
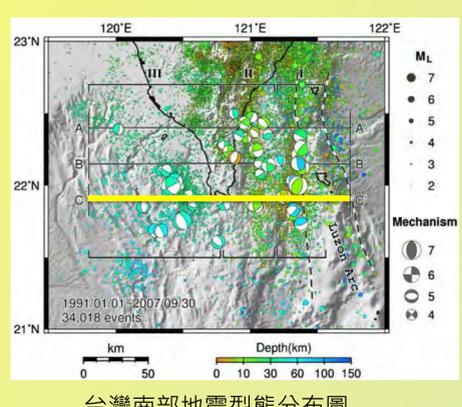
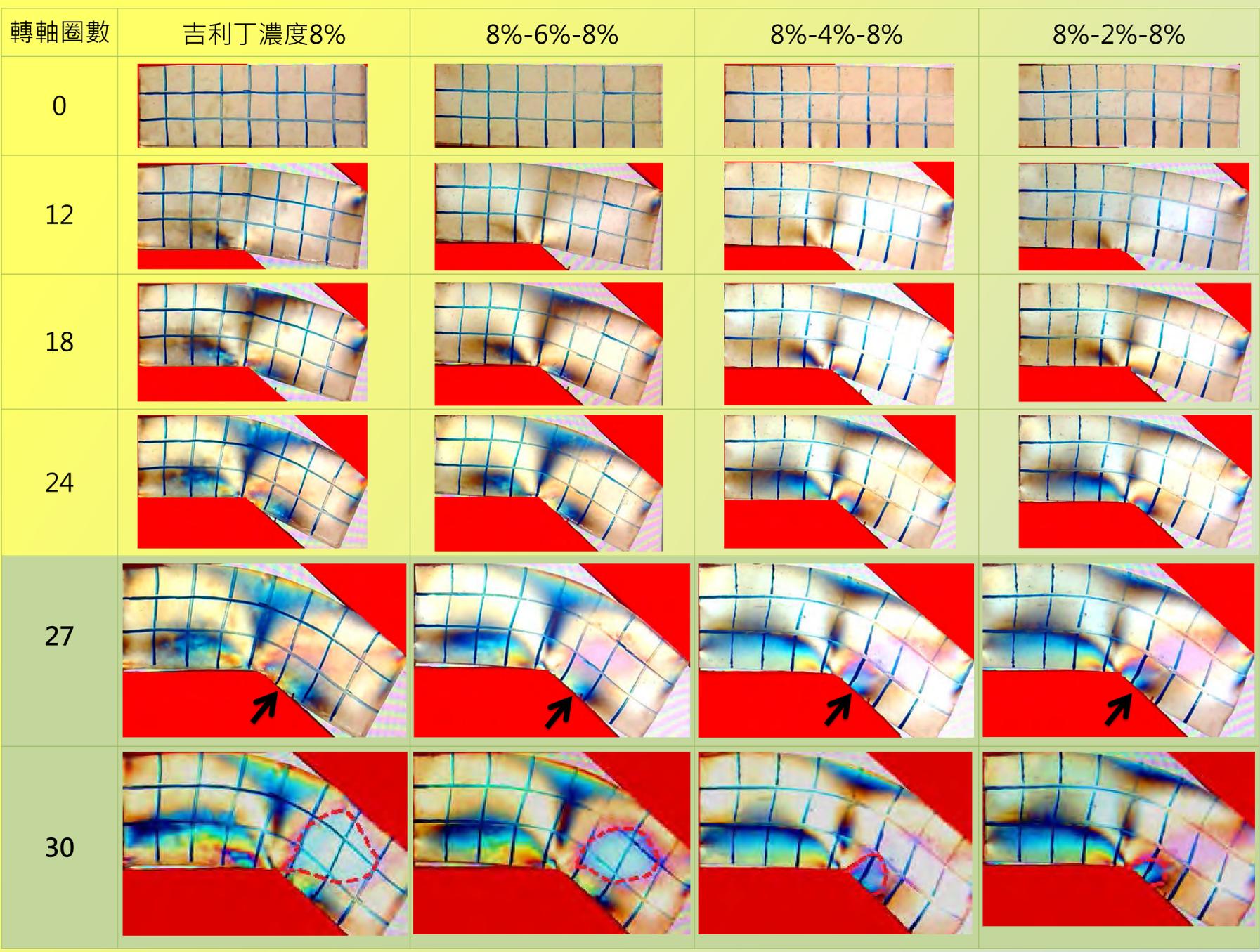
1. 地震個數分布與文獻的應力結果相符。
2. 海洋板塊隱沒帶地震集中位置與地殼年齡有關。



台灣各地地震個數隨深度分布圖



地震擷取範圍示意圖



結果

1. 濃度越低的試體左邊的偏光會越小且向下集中(紅色虛線)。

討論

1. 偏光集中的結果可以對照左邊地震隨深度的剖面圖, 圖中左下方藍色為地震集中區域, 此與上述實驗結果相符, 地震集中處即是偏光集中的位置, 隱沒帶的相對位置也與實驗吻合。

2. 對照另一則文獻的地震剖面圖, 可以看到此區域為低角度的正斷層與平移斷層, 此與8%-4%-8%實驗中應力集中處(紅色虛線)和層面的夾角相符。

3. 為了瞭解試體內部受力情形, 我們用8%-4%-8%實驗受力最大時的圖形討論, 並用瑜珈墊計算每個方格的大小, 此時在最底層主要受壓力(藍色部分)。

4. 對照文獻發現此區同時受到壓力跟張力, 且大地震集中在40多公里深, 比照圖為受張力, 可以解釋本研究區地震為張裂型態。

未來展望

- 一、吉利丁試體模擬之地殼性質均勻, 但真實地殼性質並非均勻分布。
- 二、地殼性質改變是漸進的, 但我們模擬之地殼在兩不同性質層面交界處具明顯分隔。
- 三、我們用彈性光學說明真正地殼受力的型態, 但真正地殼的對照情況仍有待深入探討。
- 四、真正地殼隱沒的因素更複雜, 加入其他影響地殼隱沒的變因是我們需要繼續討論的方向。

結論

- 一、研究區地震群可能和大陸地殼隱沒時出現低角度向西傾斜張裂及滑移形斷層有關。
- 二、地殼夾弱帶模擬實驗結果, 在下部地殼出現的應力或應變集中區域和低應變的分界線與實際觀測資料地震位置及斷層型態結果相符。
- 三、地震個數隨深度的分析結果也符合弱帶較無滑移產生地震的情形, 並且在抗壓及抗剪力最強處會發生大地震。
- 四、斷層的張裂滑移型態也可利用模擬實驗及文獻資料得到證實, 即弱帶下方地殼上部會出現張力應變。