

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 以絕對重力研究台灣造山運動:觀測與模式比較 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2116-M-009-001-  
執行期間：98年08月01日至99年07月31日  
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：黃金維  
共同主持人：趙丰  
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：彭千惠  
碩士班研究生-兼任助理人員：蘇洵頡  
碩士班研究生-兼任助理人員：羅元旻  
碩士班研究生-兼任助理人員：吳夢伶  
碩士班研究生-兼任助理人員：姚鐙凱  
博士班研究生-兼任助理人員：高豫麒  
博士班研究生-兼任助理人員：高瑞其

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 10 月 29 日

# 以絕對重力研究台灣造山運動:觀測與模式比較

## 中文摘要

本計畫是用重力及 GPS 方法來研究台灣造山運動，內政部提供研究所需要之儀器設備，交通大學、中央大學、工研院及法國 Frederic Masson 教授所帶領的團隊共同合作。由於台灣地處於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交界，而且以每年 7 公分的速度向西北方移動。板塊運動所造成之垂直位移和質量變化可以用 GPS 及重力來監測。本計畫主要的三個目標為：(1)利用絕對重力儀 FG5、超導重力儀 SG、相對重力儀 Graviton-EG 及 GPS 來驗證地殼活動跟台灣的造山運動的關係(2)增進對台灣造山運動之瞭解及(3)研究在 1946 年新化斷層發生 6.3 級的地震，其北側屬沉降之前陸盆地至今未發生隆起的原因。由大量降雨、潮汐和地震的影響，造成很明顯與時間相依的重力變化，在研究造山運動之前這些雜訊都要被去除。我們將建立影響重力變化之固體潮、海潮覆載、地下水文及 3-d 大氣模式改正。建立優化的數學模式來處理有關絕對重力及相對重力之數據。我們也將建議在這實驗區內擺設超導重力儀。超導重力將提供連續且長週期之重力數據，以獲得時間相依的重力變化及造山運動相關之重力訊號。在新化斷層附近的 GPS 顯示板塊向西隱沒形成島弧的同時，也造成歐亞板塊邊緣張裂，而形成嘉南平原。本計畫的研究範圍涵蓋新化斷層，用 GPS 及重力觀測資料將提供新化斷層相關現象之有力證據及新的資訊，本計畫測得之重力變化為  $-2.09 \mu\text{Gal}/\text{year}$ ，和  $\text{GPS}0.45 \text{ cm}/\text{year}$  的變化趨勢一致。

關鍵詞：絕對重力、相對重力、超導重力、全球定位系統、造山運動

## Abstract

In collaboration with a French team led by Frederic Masson, this project aims to study Taiwanese Orogeny using gravimetry and GPS, taking advantage of the gravimetry facility provided by the Ministry of the Interior in southern Taiwan and Hsinchu. Taiwan is located at the converging zone of the Eurasia and the Phillipine Sea Plate and moves northwestwards at a rate of 7 cm/year. Such a plate motion creates vertical displacements and mass changes that can be detected by repeat gravimeter and GPS measurements. Three major objectives of this project are (1) use measurements of a FG5 absolute gravimeter, Superconducting gravimeter, Graviton-EG relative gravimeter and GPS to validate the tectonic motion model associated with Taiwanese orogeny, (2) improve our understanding of the Taiwanese orogeny and (3) investigate the pattern of deformation on both sides the frontal thrust fault corresponding to the 1946 Hsinshua earthquake. Due to large rainfall and oceanic and seismic effects, temporal gravity variations in Taiwan are significant, and aliased into the gravity signal of orogeny and must be removed. We will develop models accounting for such gravity variations as solid earth tide, ocean loading, hydrological and atmospheric effects. Optimal methods of processing absolute and relative gravity data will be developed. We will also propose to install a superconducting gravity site in the study area. A superconducting gravimeter will provide continuous and long-term gravity measurements that can be used to model temporal gravity changes and provide gravity signatures originating from orogeny. Current GPS results near the Hsinshua fault show that in this region the shortening is accompanied by a large subsidence of the SW coastal plain. GPS and gravimetric measurements will be collected in this region to verify this shortening and provide further information. The final result of gravity change(-2.09  $\mu$ Gal/year) which is equal to the trend of GPS(0.45 cm/year).

Keywords : absolute gravity, relative gravity, superconducting gravity, GPS, orogeny

## 1. 背景

台灣位於歐亞板塊及菲律賓海板塊交界，屬於環太平洋活躍的造山帶之一，由GPS 觀測知 (Yu et al., 2003) 菲律賓海板塊以每年7 公分速度向西北方向前進，在台灣東南部造成約每年1-2 公分的板塊抬昇(Hwang and Hwang, 2002)，此抬昇量在觀測條件良好情況，可由GPS或水準測得。但GPS或水準僅可提供板塊幾何的知識，深層或整體板塊的變遷則需要其他如地震監測或重力資料之配合解釋。台灣西部斷層的成因是由於板塊推擠所造成(Teng, 1990)。

內政部於2006年為配合國家重力基準站（地址：新竹市十八尖山）的建立及國家重力網之建置，在南橫、綠島及台南建立了10個絕對重力點，由法國Frederic Masson 教授為首的一群地球物理學家對台灣的造山運動極為有興趣，其建議採用重力為主，GPS為輔的方法，收集此二種資料，進行台灣造山運動之研究;內政部在此10個重力點的基礎建設恰好提供重力和GPS法資料收集條件。Masson 教授在伊朗、葉門及非洲已有進行過類似研究。台灣的交大—中央大—工研院團隊在絕對重力儀FG5、超導重力儀SG及GPS之觀測及資料處理上已累積數年之經驗，由過去的經驗得知，在南橫地區的重力觀測精度可達 $1 \mu\text{Gal}$  ( $10^{-8}\text{ms}^{-2}$ )，而超導重力之精度可達 $1 \text{nGal}$  ( $10^{-11}\text{ms}^{-2}$ )，GPS 測高精度視環境而定。在仰角 $15^\circ$ 以上無遮蔽處觀測24小時，在垂直方向可達公分級之精度。較佳之高程觀測可採精密水準，但費用較高。

重力觀測研究造山運動，在台灣面臨的問題中，除了觀測時的重力精度外，最大的限制來自環境變化引起之重力變化，若不移除此種變化，則造山運動之訊號無法從觀測之重力分離出來。台灣團隊的強項在模式化環境引起之重力變化，尤其在處理水文、海潮引力負載及3維大氣變化等方面之所產生之效應。

台灣團隊將有三名博士生（來自交大及中央大）全時參與本計畫之外業觀測、資料處理等，與對重力及GPS 資料在造山運動之解釋，法國團隊有一名全時學生參與資料處理及解釋，台法兩方面之互補將使本計畫產生不錯之科學成果。

本計畫之重力樁埋設位置如圖1，主要分布在南橫公路上，其點位之所在縣市請參考表1。



圖1：南橫AGTO點位分佈

表1：點位坐標及所在縣市

點號	點名	97 坐標(Lat,Lon,Elev)	所在縣市
AG1	綠島	緯度:22.658 經度:121.476 高度：4m	台東縣
AG2a	東河國小	緯度:22.970 經度:121.300 高度：50m	台東縣
AG2b	富里	緯度:23.142 經度:121.280 高度：378m	花蓮縣
AG3	新武橋	緯度:23.133 經度:121.119 高度：409m	台東縣
AG4	摩天	緯度:23.201 經度:121.026 高度：1622m	台東縣
AG5	埡口	緯度:23.264 經度:120.961 高度：2762m	台東縣
AG6	寶來國中	緯度:23.109 經度:120.706 高度：410m	高雄縣
AG7	左鎮國中	緯度:23.057 經度:120.412 高度：51m	台南縣
AG8	成功大學	緯度:22.999 經度:120.220 高度：62m	台南市
AG9	澎湖	緯度:23.565 經度:119.563 高度：18m	澎湖縣



(root-sum-squared distance residuals) 而定出權。每10 秒1個下落，連續量測上述的自由落下實驗100次，約費時17 分鐘，可得到1組 (set) 重力觀測量，經加權計算之後可得該組的重力測量。在檢測的絕對重力點上，每隔半個小時量測1個重力值，並連續觀測至少1天，共得48組重力值以上，其加權平均值即為量測重力值。

上述量測過程中，除避免人為操作錯誤外，尚須利用品質控制的觀念，以統計方法對量測結果之品質加以控制。測站的優劣受外在環境如振動、噪音等影響極大，在單組觀測過程中，若出現100  $\mu\text{Gal}$  以上的偏差，或是在連續數組中，出現與平均值相差20  $\mu\text{Gal}$  以上的重力觀測量時，則剔除該組重力資料並重新計算。另外合格測站所測得的單組數據需呈現常態分佈，而處理每組100個數據時，需先去掉明顯錯誤的資料，再利用電腦以迭代法去除偏差在3個標準差以上的數據，以提高結果的可信度。

絕對重力儀FG5量測時須使用原廠軟體「g」。「g」包括了FG5出廠規格、儀器架設參數、雷射波長、鈷頻率標準器頻率等的相關設定，並支援相關重力改正、儀器量測時的操控與數據記錄等。

### 2.2.2. 重力改正

「g」所提供的相關改正包括：大氣壓力改正、極移 (Polar Motion) 改正、潮汐改正等 (Torge, 1989)。本計劃將改善「g」改正模式 (見第3 節)

(1) 大氣壓力改正，公式如下：

$$C(p) = A * (P(0) - P(n)) \quad (2-1)$$

A 為大氣壓力改正參數，單位為  $\mu\text{Gal}/\text{hPa}$ ，可由程式中設定，通常介於 0.30 至 0.42 間，建議值為 0.30。

$A = 0.30$ ，單位  $\mu\text{Gal}/\text{hPa}$

$A(p)$  = 大氣壓力改正量，單位  $\mu\text{Gal}$

$P(o)$  = 觀測大氣壓力值，單位 hPa

$P(n)$  = 參考理論大氣壓力值 1002.77 hPa，單位為 hPa。

(2) 極移運動改正，採用 IAGBN 於 1992 年使用的方法，" Absolute Observations Data Processing Standards"，公式如下：

$$\delta g = -1.164 \times 10^8 \omega^2 a^2 \sin \varphi \cos \varphi (x \cos \lambda - y \sin \lambda) \quad (2-2)$$

$\delta g$  = 極移改正量，單位  $\mu\text{Gal}$

$\omega$  = 地球自轉角速度，單位 rad/s

$a$  = 地球參考橢球體長軸半徑，單位 m

$\varphi$  = 地理緯度，單位 rad

$\lambda$  = 地理經度，單位 rad

$x, y$  = IERS 系統公佈之極移坐標，單位 rad，可在 Micro-g LaCoste 網頁上查得。(http://www.microglacoste.com/)

(3) 零點位置改正：

由於通常起使時間 ( $t_0$ ) 所測得的位置並非零點位置 ( $x_0$ )，因此需做此修正，而通常零點位置的改正值都很小，一般小於  $0.05 \mu\text{Gal}$ 。

(4) 基準高度換算：

利用所量測的參考高度加上儀器本身的固定高度及基準高度，乘上該測站的重力梯度可得基轉轉換後的重力值。

(5) 潮汐改正量可藉由讀取相關潮汐參數，改正地球固體潮、海潮等產生之重力效應。此軟體中可供改正的模式有下列 2 種：

Berger - 最早由 Jon Berger 寫於 1969 年，並陸續經過其他學者多次的改良修正。

ETGTAB - 最早由 Georg Wenzel 總整，此套模式為極富經驗的精密改正模式。

## 2.2. 相對重力儀 EG

不同於其他電子重力儀透過數值推算以補償傾斜，Graviton-EG 是一台全功能、全自動化且自動水平的可攜式重力儀(圖3)，透過電子馬達驅動的嵌腳得到一真正水平的讀數，不需再以人工旋轉刻度盤校正，免除了手算每一站重力值的繁複程序，經過數年研究與改進，更提供了優異的靈敏度與觀測範圍。其優點有：容易操作、自動水平、堅固耐用、重量輕、全功能、高靈敏度、整合資料讀取、可擴充性等等。

EG 觀測相對重力差值之感應器型式則以 Zero-Length Metal Spring 為主，此感應器為 LaCoste Romberg 的產品，其使得獲得之資料解析度約小於  $0.0001 \text{ mGal}$  的範圍，重複性在可控制情況下可達到  $0.001 \text{ mGal}$ ，而在野外情況下則約在  $0.003$  到  $0.020 \text{ mGal}$ 。其每月絕對偏移量小於  $1.0 \mu\text{Gal}$ ，配合使用的  $32 \text{ MB}$  快閃記憶體，可觀測記錄  $100,000$  站以上。



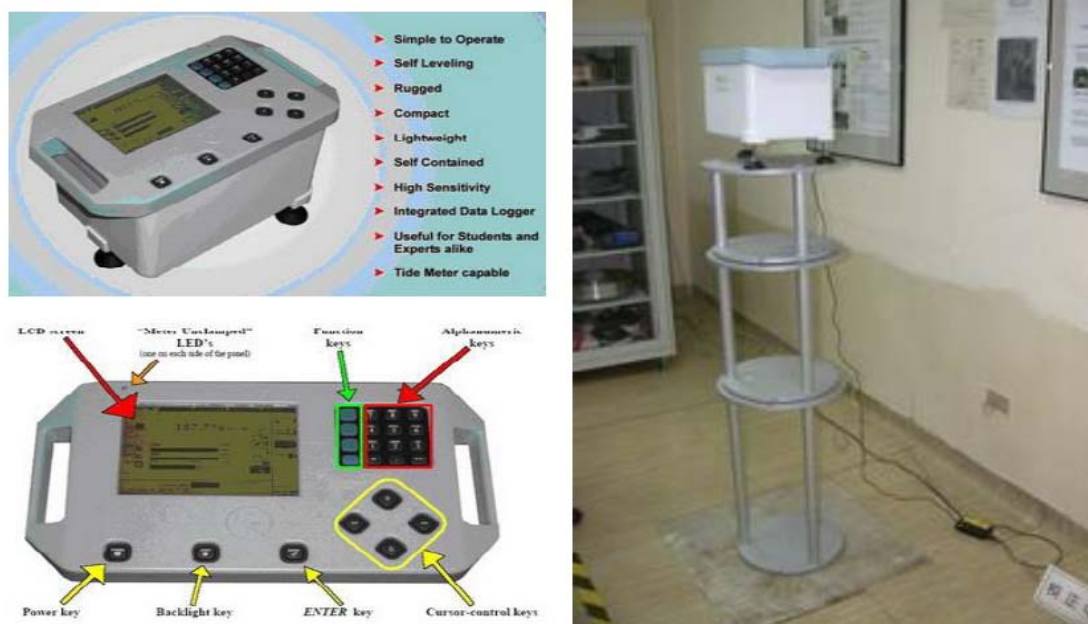


圖3：相對重力儀EG

### 2.2.1. 重力梯度

為了歸算絕對重力的觀測，必須進行垂直方向的重力梯度觀測(圖4)。由於量測各點位之絕對重力時需要每個點位之梯度資料，所以利用EG可得每個點位之梯度值，其步驟如表2。

表2：相對重力儀EG 操作步驟

項次	工作項目	工作確認
1	量測	將EG 擺在點位上量測其重力值。
2	記錄	將每個高度之重力值記錄在簿子上。
3	移動並量測	利用梯度架組合3組不同高度，並經由重複量測計算出各高度所相對應之標準差，共計算出3段不同高差所對應之重力差值。
4	擺回原點	固定一組擺法後，最後量測值擺回第一次量測之位置。
5	關機	計算梯度值並移動至下一站。



圖4：相對重力儀EG 配合重力架觀測梯度

共製作了三種不同高度之梯度架(圖5)，由圖5中可看出，各點位於相同高度差之重力差值存在一定差異性，初步推斷與點位高程、量測精度有相關；

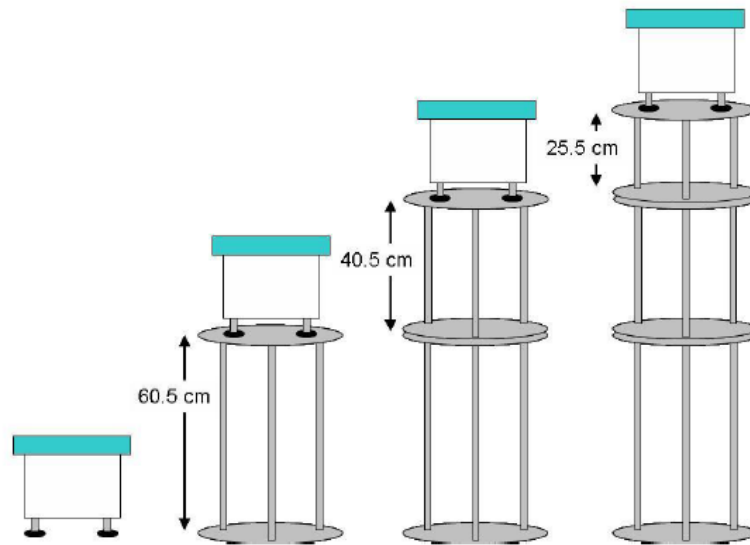


圖5：梯度量測示意圖

### 2.2.2. 南橫重力加密

相對重力觀測補強該區域之重力密度，選取沿公路之一等水準點利用相對重力儀做觀測，以階梯式做往返之觀測。其步驟如表3:

表3：相對重力儀操作流程

項次	工作項目	工作確認
1	規劃	整合全部測區內之所有重力觀測資料，以絕對

		重力點位作為約制，對所有重力觀測點作加權約制平差計算，求得各觀測點之重力值。
2	開始測量	重力網平差過程中，通常會選定一個或一個以上的固定點(絕對重力點)作為平差時的約制點，以確保所有的未知點位皆位於同一基準上。
3	計算	加權約制平差之計算模式，係平差前能給該約制點先驗變方值 (p priori variances)，亦即一個適當的權值，用來控制平差過程中的誤差量。
4	約制	在加權約制平差的過程中，約制用控制點之未知參數所組成的設計矩陣 $A$ 為一特殊類型矩陣，其行數 (columns) 和列數 (rows) 皆等於未知參數個數 (令為 $n$ )，而 $P$ 為約制用控制點之權值所組成的對角線矩陣，其維數為 $n \times n$ 。
5	$n \times n$ 矩陣	所以 $A_2^T P_x A_2$ 與 $A_1^T P_1 A_1$ 也是 $n \times n$ 維矩陣。以符號 $\bar{P}_x$ 代替 $A_2^T P_x A_2$ ，那 $\bar{P}_x$ 為一個除了相對於約制用控制點未知參數之對角線上元素值為+1外，其餘元素都為零的 $n \times n$ 矩陣。

例如，以 $X_2$ 、 $X_3$  為控制點，也就是分別以第二和第三個未知參數為控制點，故

$$\bar{P}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

因 $A_2^T P_x A_2 = \bar{P}_x$ ，所以

$$A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_x A_2 = A_1^T P_1 A_1 + \bar{P}_x \quad (2-3)$$

由上式得知，控制點的權值可直接加入法方程矩陣 (normal equation matrix) 中相對於約制用控制點之未知參數的對角線元素。當控制點之權值相當大或無限大時，平差後 $\hat{X}_2$  會與平差前所給予的控制點值相當接近，即 $V_x$  趨近於零。本研究中之絕對重力點作為平差計算之約制點，計算出其他由相對重力法所引測之 20 個點位重力值。相關理論見 Koch (1987)。

依不同的點位分佈(圖 6)，可以分成階段、階梯式、改良式階梯式、星狀式

及線狀式等方式來成做重力量測。

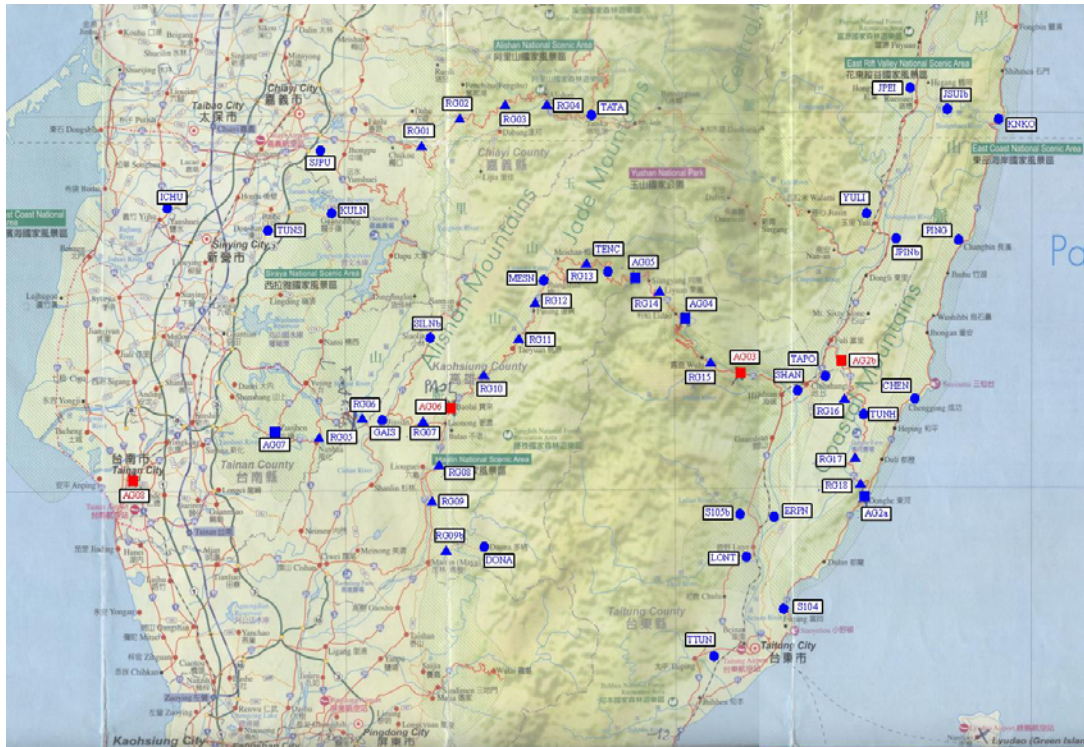


圖6：南橫公路沿線相對重力測量路線圖

### 2. 3. 超導重力儀 SG

超導重力儀係一個整合性重力感測裝置，用來量測周圍環境質量重新分佈而引起的重力微小變化，由於是反應重力總變化量，無法顯示單一來源之重力變化，但可藉由分析予以區分。其解析度達  $10^{-11} \text{ ms}^{-2}$ ，精度達  $0.3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2} / (\text{Hz})^{1/2}$ 。

目前多集中全球性重力效應研究，例如地潮、地震模、核模、近日自由擺動及極移運動等，而且為了分析調查某一特定效應，那麼其他部分效應將視為干擾訊號，必須從重力資料中移除。對於評估地區性環境變遷，結合GPS 觀測地殼形變，解釋地質構造活動與預防地震危害，將列為主要應用發展方向。

超導重力原始數據，每秒紀錄觀測值，過濾後數據可分為每一分鐘與每10秒一筆觀測值兩種格式，配合超導重力數據所蒐集的環境感測數據資料包括地下水、溫度、溼度、大氣壓力、雨量、風速、風向、土壤溼度等時間序列數據。

利用長時間觀測超導重力數據，進一步和絕對重力儀數據比對，可得到率定SG(T48)之率定因子(Scale factor)藉由絕對重力儀數據的比對，亦可分析儀器漂移量(Drift rates)，數據雜訊分析，探討適用的頻率與波長，異常的重力訊號可用超導重力儀配合寬頻地震偵測(Shen, 2010)。



(1)杜瓦瓶內裝低溫液態氦與超導材料 (2)電子控制單元及資料擷取單元  
組成重力感測器

圖7：超導重力儀SG

#### 2.4. 衛星定位接收儀 GPS

Trimble 5700衛星定位接收儀(圖8)，採用先進 MAXWELL 42訂製的GPS測量晶片，它包含了接收儀、天線、電台、測量控制器和室內處理軟體。其所採用的RTK增強技術，比一般的RTK大4倍。

另參考中央氣象局GPS固定站24小時長期的接收資料，以蘭嶼GPS接收站為固定站，計算AG1-AG9附近GPS相對於蘭嶼GPS站之高度變化。



圖8：全球定位系統GPS Trimble 5700

### 2.4.1. 資料收集步驟

- (1) 以南橫為本研究計畫之實驗區，蒐集GPS固定站24小時長期的接收資料、地下水位資料、雨量資料以及潮位資料。
- (2) 進行GPS 資料處理分析，測誦GPS固定站訊號品質、解算基線，確認GPS 追縱站運作正常、解算測站座標，可依據不同時刻的高程值是否變動來監測地層下陷。
- (3) 進行其他相關資料分析工作如下列說明：

#### a. 地下水文特性分析：

由水位觀測井，進行地下水位觀測，由於自然的地下水位係隨著豐水或枯水季節而變化，若有人為抽水現象則易使其變化頻率增加。可配合地層下陷監測井各地層之壓縮量，藉以分析不同地層受地下水位的變動影響之壓縮行為。

#### b. 降雨量資料：

以迴歸分析探討GPS連續觀測站資料與雨量參數間變化的關係。在進行迴歸分析時，假設地層之下陷為持續下陷之線性關係，將GPS連續觀測站各參數資料求其線性之趨勢線，減去該參數之值，利用趨勢線和觀測值之間的差值，可以得到地層於此一時間明顯之變化量，藉此探討雨量資料與GPS資料之間的相關性。

#### c. 潮位資料：

收集台南及台東觀測站海潮數據，相同時段，同步觀測，以調和分析法分析：每一測站分別做調和分析，再將分析結果之各分潮振幅，預報該時段各測站之水位變化，將觀測資料減去預報資料，可得到誤差值，誤差值去除低頻水位變化後，當作非線性現象的指標。藉由此指標了解測站非線性現象(誤差值)大小隨大小潮之變化。

#### (4) 證實分析

執行單變量及多變量之時間序列分析，並探討實驗區地層下陷的變動。探討GPS 固定站經解算取得之每日高程差，並藉由平均計算求一週之平均值以及月平均，以單變量時間序列分析法預測模式進行模式預測。以GPS 固定站經解算取得之高程差為自變數，利用地下水位資料、雨量資料以及潮位資料為應變數進行多變量時間序列分析。

### 3. 建立環境重力變化之模式

利用FG5的處理軟體「g」，可以得到所需要之絕對重力值，但由於台灣環境的特殊，交通大學對於台灣重力處理方面已經有不錯的經驗及自行開發之軟體，相信對本計劃在改善環境重力變化之模式會有滿意的效果。

#### 3.1. 固體潮改正

固體潮為重力觀測中，數量級最大的背景效應。固體潮的產生原因，是來自日、月對地球的引潮力。日、月引潮力可對地表一點產生兩種重力變化：(1) 由引力產生之重力變化 (2) 由地球變形而產生之重力變化。首先，地球表面上任一點所受月球影響之潮位 (tidal potential) 為 (只考慮球諧 2, 3 階)：

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{GM_m r^2}{R_m^3} (3 \cos^2 \psi_m - 1) + \frac{1}{2} \frac{GM_m r^3}{R_m^4} (5 \cos^2 \psi_m - 3 \cos \psi_m) \quad (3-1)$$

任一點所受太陽影響之潮位為 (因為距離較遠，只考慮 2 階)

$$W_s = \frac{1}{2} \frac{GM_s r^2}{R_s^3} (3 \cos^2 \psi_s - 1) \quad (3-2)$$

其中， $GM_m$ ：牛頓萬有引力常數乘月球質量 ( $4902.778 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$ )， $GM_s$ ：牛頓萬有引力常數乘太陽質量 ( $1.327124399 \times 10^{11} \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$ )， $R$  表該點與地心之距， $R_m$  表地心與月球中心之距， $R_s$  表地心與太陽中心之距， $\psi_m$  為該點與月球在地心之夾角， $\psi_s$  表該點與太陽在地心之夾角。

所以，因直接引力造成之重力變化為：

$$g_{t1} = -\frac{\partial(W_m + W_s)}{\partial r} = -\frac{GM_m r}{R_m^3} (3 \cos^2 \psi_m - 1) - \frac{3}{2} \frac{GM_m r^2}{R_m^4} (5 \cos^2 \psi_m - 3 \cos \psi_m) - \frac{GM_s r}{R_s^3} (3 \cos^2 \psi_s - 1) \quad (3-3)$$

按Moritz and Mueller (1987) 指出，此引力造成地表變形而再次引起重力變化，其大小為：

$$g_{t2} = (h - \frac{3}{2}k) g_{t1} \quad (3-4)$$

其中  $h$ ,  $k$  為洛夫數 (Love number)。因  $h=0.6$ ,  $k=0.3$ ，故總重力變化為：

$$g_t = g_{t1} + g_{t2} = (1 + h - \frac{3}{2}k) g_{t1} = 1.15 g_{t1} \quad (3-5)$$

其中進行研究所使用之日、月坐標及  $\psi_m$ ,  $\psi_s$  等值均可由JPL之DE200星曆嚴密計算而得，該程式適用時間為1990-2020年。除絕對重力儀FG5原廠所提供

之固體潮估算軟體外，交通大學多年以來亦藉由超導重力儀，絕對重力儀之比對研究固體潮在台灣地區的效應(圖9)。

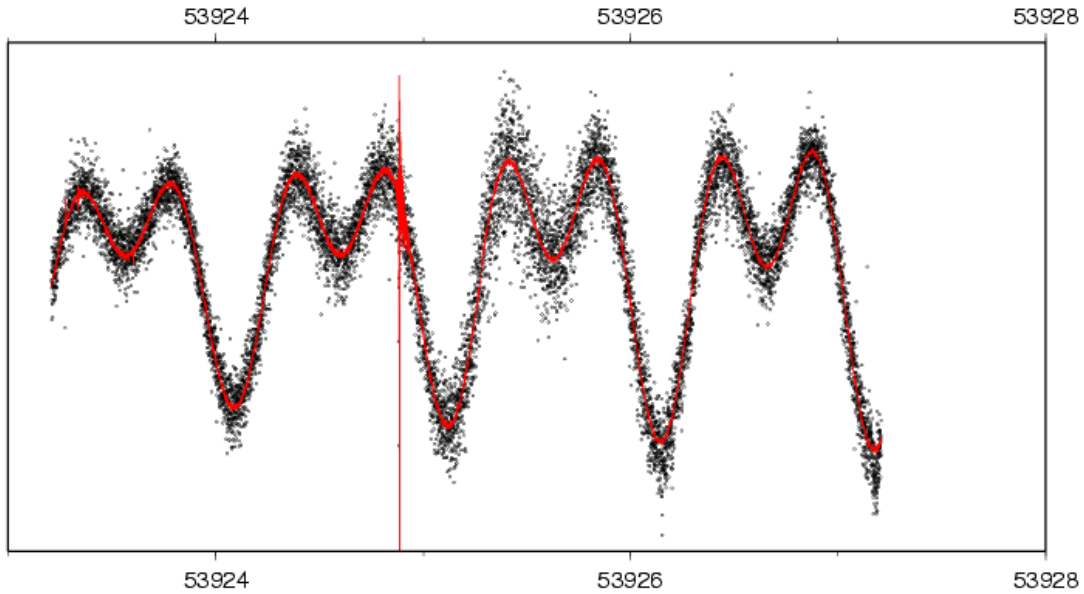


圖9：新竹地區固體潮預估成果(上) 固體潮預估成果與絕對重力觀測資料擬合

### 3.2. 海潮負載效應改正

在重力數據的觀測中，週期性負載效應是僅次於固體潮的重要訊號。由於測站周圍受到海水或大氣質量分佈變化所引起的載重變化，測站地殼受到總合的壓載效應，反映在重力讀數上。這種負載效應可由平衡位能的觀點，推導出Green's function 形式的全球積分式，用以計算地表某特定位置之負載效應重力改正。在高精度重力觀測中，海潮負載效應的修正完善與否，對成果的精度有相當程度的影響。

海潮負載效應可以簡述如下：若測站G所在經緯度以 $(\theta_G, \lambda_G)$ 表之，而位於 $(\theta, \lambda)$ 之單位負載來源面積 $ds$ ，在時間 $t$ 時，密度 $\sigma(\theta, \lambda, t)$ 與測站G之負載重力位影響量間之關係可表為：

$$dV(\theta_G, \lambda_G, t) = G \frac{\sigma(\theta, \lambda, t)}{l} ds \quad (3-6)$$

其中 $G$  為萬有引力常數， $l$  為單位負載來源與測站間之距離。若 $\psi$ 表兩者間距離之球面弧長，則(3-7)可以球諧函數表為

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \theta) \quad (3-7)$$

其中 $a$  和 $P_n$  為地球的半徑與第 $n$ 階Legendre多項式。藉由球面弧長與這兩點之經緯度的關係，位於測站G 的總負載重力位可進行全球積分而得



$$V(\theta_G, \lambda_G, t) = \frac{G}{a} \iint_{\text{global}} \sigma(\theta, \lambda, t) \left( \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\theta, \lambda, t) \right) ds \quad (3-8)$$

同時，在測站G受的負載重力改正量可將(3-8)微分而得到

$$\Delta g(\theta_G, \lambda_G, t) = \frac{-G}{a^2} \iint_{\text{global}} \sigma(\theta, \lambda, t) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2h'_n - (n+1)k'_n) P_n(\cos \psi) ds \quad (3-9)$$

其中， $h_n$ 和 $k_n$ 分別表示第 $n$ 階之Love number。

若我們定義負載重力因子為 $\delta'_n = 1 + (2h'_n/n) - k'_n - k'_n/n$ ，並代入單位密度 $\sigma(\theta, \lambda, t)$ ，標準地表重力值 $g_0$ ，以及地表壓力 $p(\theta, \lambda, t)$ 間之關係式

$$\sigma(\theta, \lambda, t) = \frac{p(\theta, \lambda, t)}{g_0} \quad (3-10)$$

則(3.2.4)可改寫成

$$\Delta g(\theta_G, \lambda_G, t) = \iint_{\text{global}} \zeta(\psi) p(\theta, \lambda, t) ds \quad (3-11)$$

其中，Green's函數定義可見(Moritz, 1987)，一般而言，負載還可細分為萬有引力的直接吸引力與地表受負荷產生應變所造成的重力位變化。若我們以 $g^N(\psi)$ 代表前者， $g^E(\psi)$ 代表後者，分別有下列表式

$$g^N(\psi) = \frac{-G}{g_0 a^2} \sum_{n=0}^{\infty} n P_n(\cos \psi), \quad g^E(\psi) = \frac{-G}{g_0 a^2} \sum_{n=0}^{\infty} (2h'_n - (n-1)k'_n) P_n(\cos \psi) \quad (3-12)$$

為了使海潮負載效應的改正達到最佳的精度，我們特別發展一套改正模式。在這個模式中，我們將全球積分的計算方式作了些調整：

1. Green's function 採二階高斯法(Gaussian quadrature)進行數值積分計算
2. 在負載洛夫數(Love numbers)上，採用Han和Wahr所提議之數據。
3. 海岸線模型採用80米乘80米之數值地形加以定義。
4. 合併使用全球潮汐模式與區域潮汐模式，例如NAO.99b與NAO.99jb。

除了嘗試組合使用全球與區域海潮模式外，我們也使用由海洋動力法所建立的近海海潮模型。

這個由中央大學所提供的海潮模型，涵蓋99.25至135.25E，2.25至43.25N的範圍。在此模型中，科氏力、擾動壓、深度效應及壓力梯度等效應都列入考量。此外，並採用改良的海底摩擦參數，更高解析度的海底地形，而且將台灣沿岸之驗潮站資料聯合加入計算。

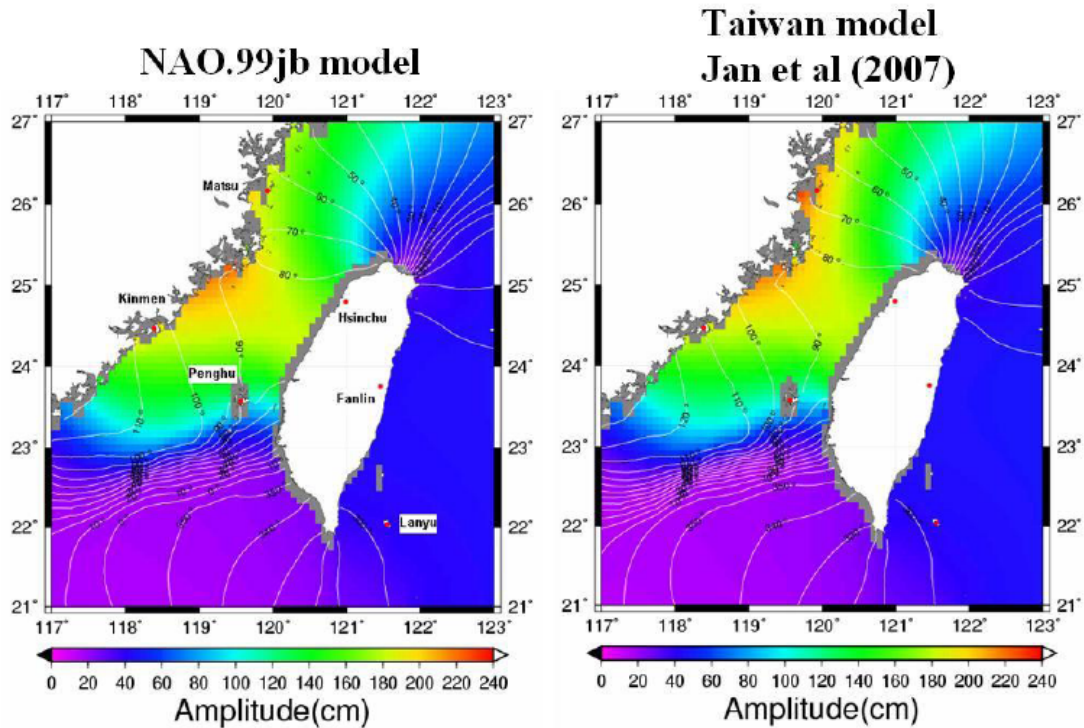


圖10：海潮模型。NAO.99Jb 海潮模型M<sub>2</sub>分潮之振幅(左)以及台灣中央大學海洋動力模型振幅(右)

這個自行發展的海潮負載改正模式的成果，藉由位於新竹國家重力基準站的超導重力儀觀測，分佈於各離島的絕對重力觀測，以及位於新竹外海的潮位站潮位資料，可與世界其他機構研發的海潮負載改正模式比對。由表4，針對M<sub>2</sub>分潮效應的成果可知，自行發展之海潮負載模式確實優於當前其他各種海潮負載模式(Hwang, 2010)。本研究將藉由此一自行發展之海潮負載改正模式，提升鄰近海岸線附近各點位絕對重力觀測精度。

表4：各種海潮負載模式與超導觀測之比較

負載數據來源	SG(T048)	NCTU1	GOTIC2	BS
M <sub>2</sub> 分潮	3.9 $\mu$ Gal $\pm$ 0.1	3.8 $\mu$ Gal	3.0 $\mu$ Gal	3.6 $\mu$ Gal
	40.2 $\pm$ 0.7	48.6	39.5	35.5

### 3.3. 大氣負載效應

同為流體的大氣，也會對重力觀測產生類似的影響。大氣層同樣有受星體引力而產生潮汐與溫度不均而產生方向性流場。所以進行精密重力觀測時，亦須考慮大氣負載量。由目前大氣改正所廣泛使用之經驗公式來看，大約每1毫巴之大氣壓力變化會產生重力值0.3  $\mu$ Gal 變化。而一般大氣壓力變化量可達數十毫巴之譜，換算成對應之重力值變化，可十幾個 $\mu$ Gal。一般大氣負載的改正，多半使用較為簡易的response 轉換的方式進行，亦既以測站位置一點所讀得之氣壓，以前述-0.3~-0.4間之轉換係數得到大氣負載對重力的影響。

本實驗經由實測大氣資料來計算氣壓變化引起的重力及位移效應的影響，由於超導重力儀之觀測精度已達 $\pm 0.1 \mu\text{Gal}$ ，而VLBI、SLR和GPS的精度則在 $\pm 0.1 \sim \pm 1 \text{ cm}$  ( $10^{-8} \sim 10^{-9}$ )量級，藉由國家重力基準站長時間量測之超導重力資料來分析大氣壓力所造成重力變化的模式，有其必要性。而由大氣壓力所引起的地表重力可達 $\pm 20 \mu\text{Gal}$ 、點位垂直變化達 $\pm 2.5 \text{ cm}$ 及水平位移可達 $\pm 0.25 \text{ cm}$  (Rabbel, 1985)，若大氣壓力所造成之影響改善不完全，將造成整個造山運動判讀誤差。

而步驟是將從大範圍的大氣負載效應變化所造成的倒轉氣壓效應 (Inverted Barometer effect, IB)，即說明氣壓每下降一毫巴將使水位上升一公分，其中大氣壓力的數據可由歐洲中尺度天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 取得，海水面高度將從衛星測高 (例如Topex/Poseidon、ERS1、ERS2和Geosat等) 計算求得，並討論大氣負載的重力效應變化。

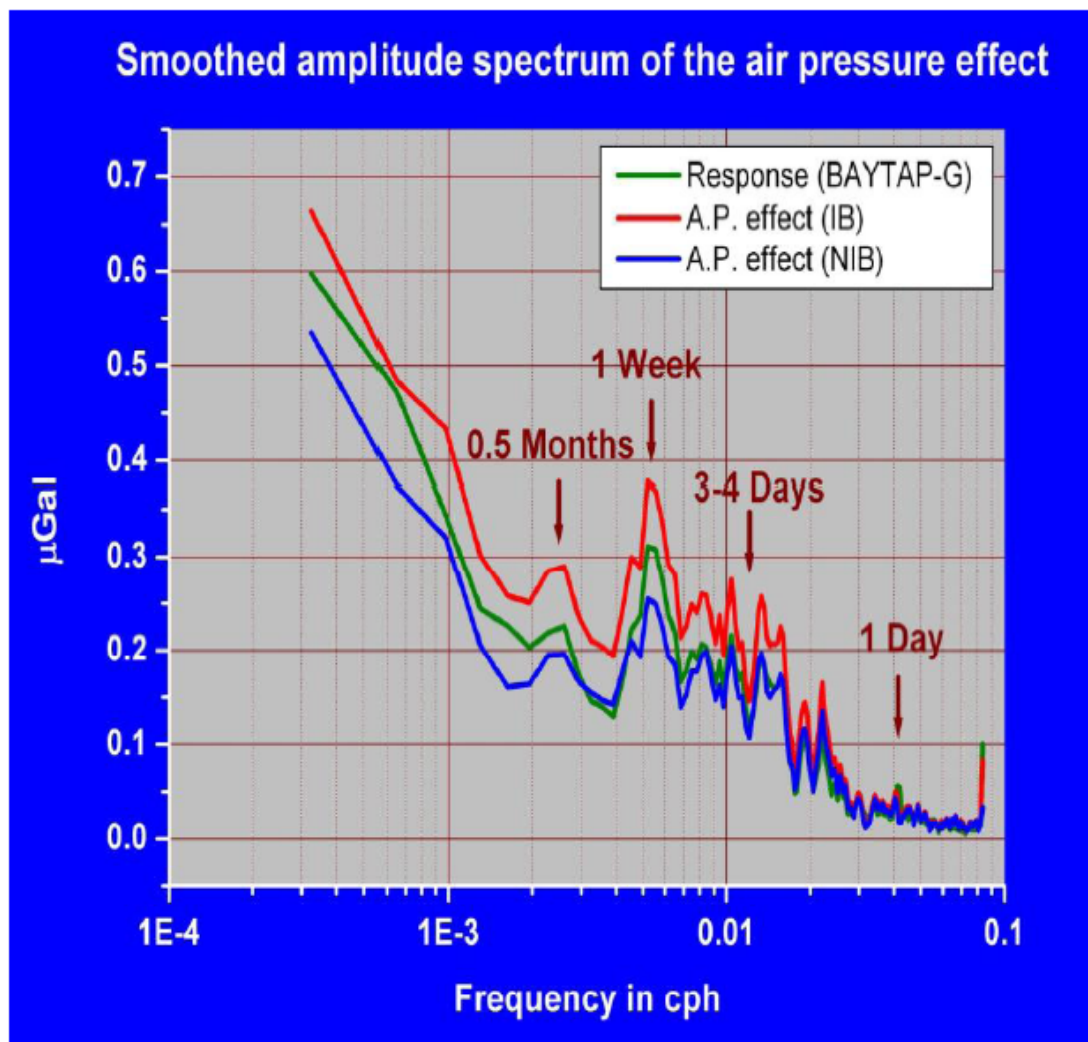


圖11：不同訊號頻率下三種大氣負載模式所計算的重力效應

然而單點大氣訊號對重力觀測的線性轉換關係實際上取決於大氣訊號的頻率。因為大氣訊號的頻率反映了大氣現象的影響範圍，所以在低頻波段的訊號所

影響的範圍遠超出單點氣壓觀測所能反映的模式。所以，精確的大氣負載效應以全球氣象資料進行Green's function 積分計算。

假設地表上一點負載效應對指定點的重力位影響

$$dV(\theta_G, \lambda_G, t) = G \frac{\sigma(\theta, \lambda, t)}{l} ds \quad (3-13)$$

則全球負載效應的加總

$$V(\theta_G, \lambda_G, t) = \frac{G}{a} \iint_{\text{global}} \sigma(\theta, \lambda, t) \left( \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\theta, \lambda, t) \right) ds \quad (3-14)$$

所以對測站重力值的影響

$$\Delta g(\theta_G, \lambda_G, t) = \frac{-G}{a^2} \iint_{\text{global}} \sigma(\theta, \lambda, t) \sum_{n=0}^{\infty} (n + 2h'_n - (n+1)k'_n) P_n(\cos \psi) ds \quad (3-15)$$

針對氣壓變化對重力場(g)、垂直位移(u)、水平位移的東西分量(v)和南北分量(w)，經由Green's function積分如下：

$$L(\theta_0, \lambda_0, t) = \iint_{\text{surface}} G(\phi) P(\theta, \lambda, t) ds \quad (3-16)$$

式中

$$L = \begin{bmatrix} g(\theta_0, \lambda_0, t) \\ u(\theta_0, \lambda_0, t) \\ v(\theta_0, \lambda_0, t) \\ w(\theta_0, \lambda_0, t) \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} G(\psi) \\ U(\psi) \\ V(\psi) \sin \alpha \\ V(\psi) \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

式中， $\theta_0, \lambda_0$  代表測站的餘緯及經度， $\psi$  為測站到積分面元的角距； $(\theta, \lambda)$  是積分面元  $ds$  的球面坐標； $P(\theta, \lambda, t)$  是與餘緯  $\theta$  和經度  $\lambda$  有關的積分面元內的平均大氣壓； $\alpha$  為站台到積分面元的方位角； $S$  為整個地球表面； $G(\psi), U(\psi)$  和  $V(\psi)$  分別為重力、垂直位移及水平位移的格林函數，其方程式如下：

$$\begin{aligned} G(\psi) &= \frac{g_0}{m_e} \sum_{n=0}^N [n + 2h'_n - (n+1)k'_n] \\ U(\psi) &= \frac{ah'_\infty}{m_e \sin(\psi/2)} + \frac{a}{m_e} \sum_{n=0}^N (h'_n - h'_\infty) P_n(\cos \psi) \\ V(\psi) &= \frac{al'_\infty}{m_e} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \frac{\partial P_n(\cos \psi)}{\partial \psi} + \frac{a}{m_e} \sum_{n=1}^N (nl'_n - l'_\infty) \frac{1}{n} \frac{\partial P_n(\cos \psi)}{\partial \psi} \end{aligned} \quad (3-18)$$

式中， $g_0$  代表地面平均重力， $m_e$  為地球質量； $\alpha$  是地球平均平徑； $h'_n, k'_n$  及  $l'_n$  為  $n$  階負荷勒夫數； $P_n(\cos \psi)$  為  $n$  階勒讓德多項式； $N$  為截斷階數。

就總體而言，重力觀測中約有90%的氣壓變化來自於50 公里的近區域(Sun, 1997)，這說明距離的遠近可以由積分的貢獻得知，整個計算採用的球諧函數、

FFT及聯合求解法(Xu & Mao, 1988)將可獲得更好的精度。

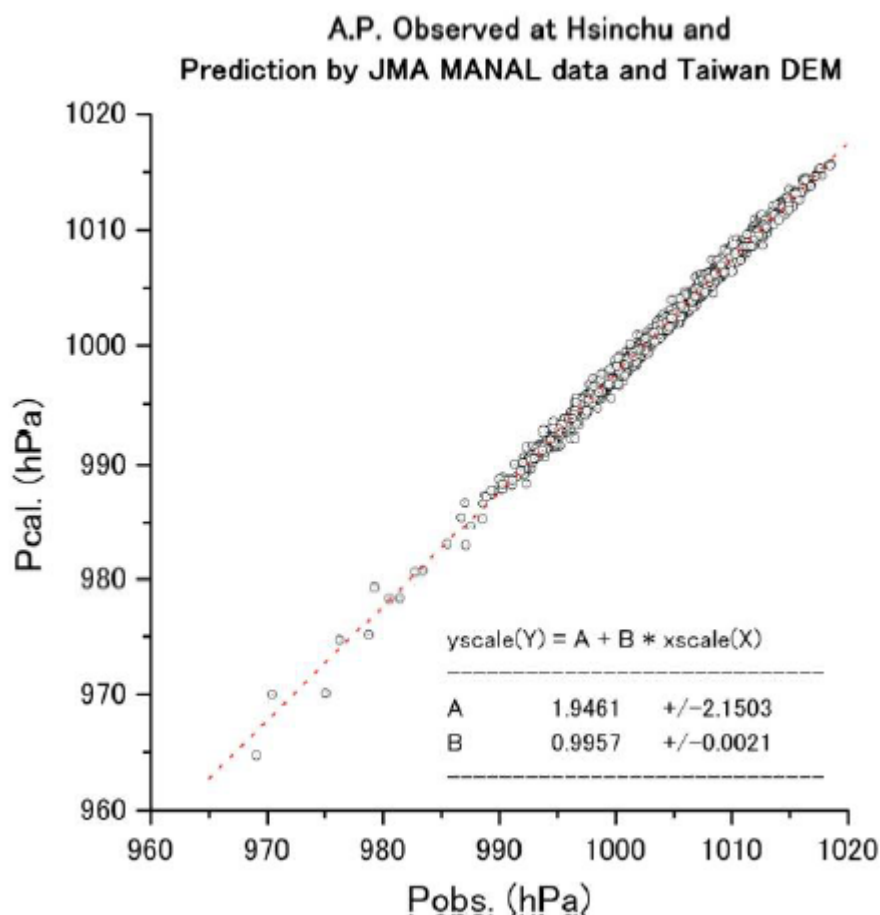


圖12：MANAL 大氣模式預估新竹測站氣壓與實際觀測氣壓比較地下水及土壤溼度對重力的影響

最後將所求得之大氣負載影響模式，應用在此次造山運動的重力影響改正中，結合GPS所量得之點位位移分析，期望能將這幾年之實測成果的分析上提供更完整的說明。

### 3.4. 地下水及土溼效應

地下水(飽和含水帶)及土壤溼度代表了地下密度的局部變化，對地面重力測站約產生數個micro Gal 等級的影響。對於地下水文所造成的重力影響，最基本的模式化方式便是以布格板的方式進行積分，得到重力變化與水位變化，溼度變化間的response 關係式

$$\delta g = 2\pi G P \delta H = 4.2 P \delta H \quad (3-19)$$

$$\delta g = 2\pi G H \delta P = 4.2 H \delta P \quad (3-20)$$

其中P 與H 代表了土壤含水量(%)與飽和含水帶的水位。考量地下水文區域性影響的特性，這種線性response 轉換式確實有一定的合理性。然而布格板的積分所使用的假設與各測站的實際環境仍有相當差異，所以轉換係數本身仍有探討

的空間。

一個研究的方向是取一個時間段的重力觀測數據，將其他已知的影響量去除，剩下的重力殘值可與土壤溼度，地下水位觀測量比對出response 轉換的係數。(見圖13)

目前經濟部水利署在台灣各地普遍設有地下水位觀測井，藉以評估地下水資源，以進行相應的規劃管理。此地下水觀測網至目前為止已有3至5 年的觀測歷史，其觀測數據部分已於網站上公開提供民眾使用。而鑿井當時所探得的地質資訊，亦可以申請方式獲得。這些資料對地下水文模式的建立可提供相當的助益(圖14)。

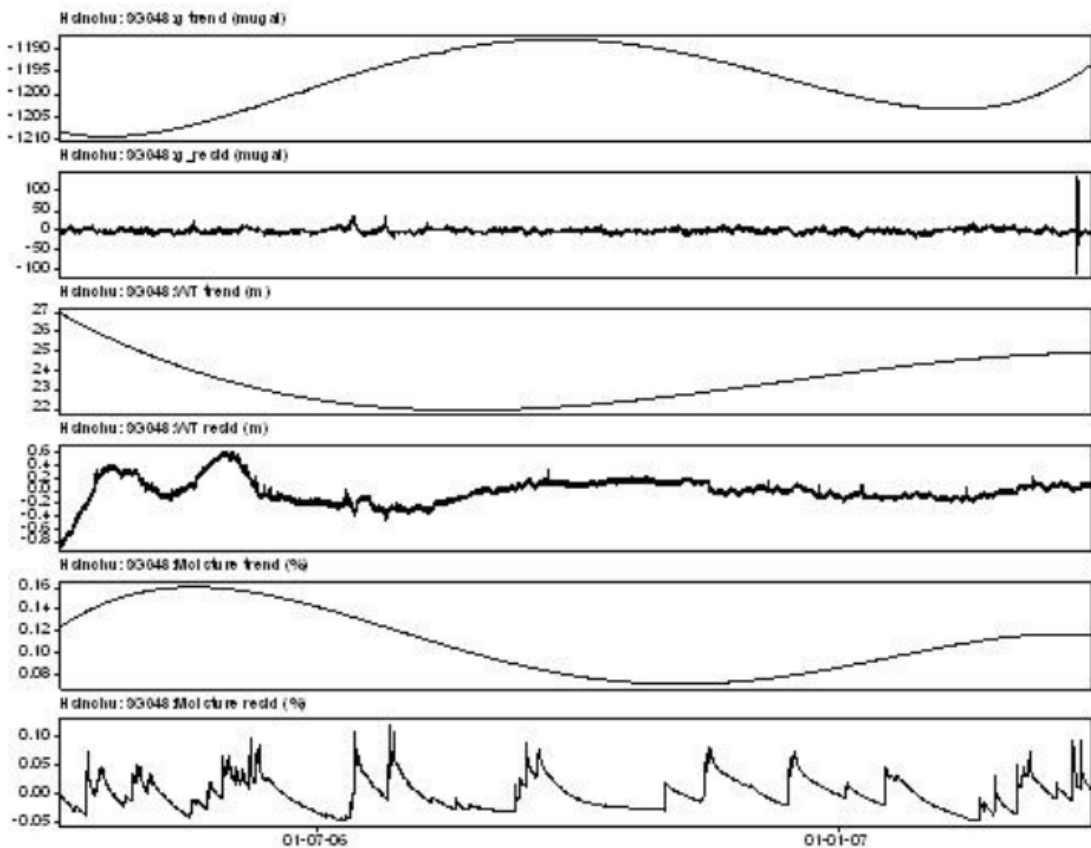


圖13：由上而下分別為2006 年3 月至2007 年4 月間，1.以Fourier 轉換所得無潮位訊號效應之重力趨勢。2.重力殘值。3.地下水位趨勢。4.地下水位殘值。5.土壤溼度趨勢。6.土壤溼度殘值。

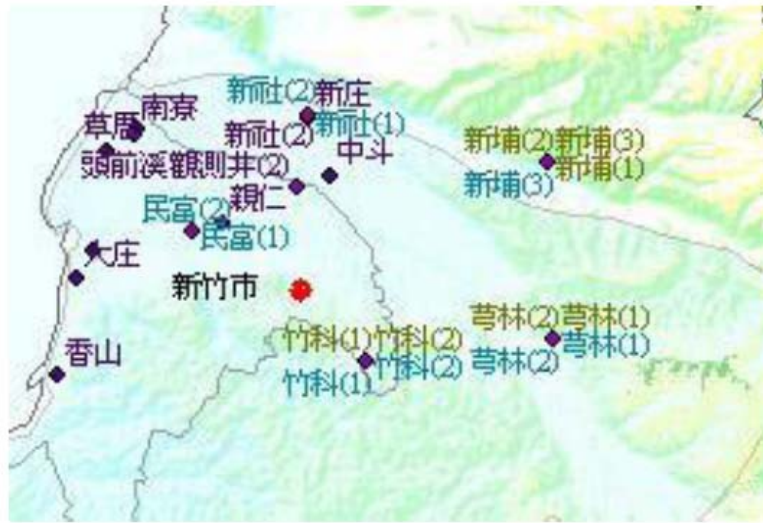


圖14：經濟部水利署地下水觀測網於新竹地區井位分佈圖

#### 4. 重力及 GPS 用於造山運動解釋

關於本篇台灣造山運動已有初步成果發表(Mouyen et al., 2009)，至目前已完成 4 年次 AGTO 觀測作業，2006 與 2008 年使用法國絕對重力儀 FG5-228；2007 及 2009 年使用內政部絕對重力儀 FG5-224 如表 5，在 2009 年南橫遇到莫拉克颱風的影響，整條南橫已面目全非，其中又以 AG5 的啞口被整個土石埋沒最為嚴重，無法進行測量，AG3 的新武橋週圍的土石也都比人還要高，增加數據分析上的困難。

表 5：AGTO 絕對重力值一覽表

點號	2006 年		2007 年		2008 年		2009 年	
	絕對重力值 (μGal)	不確定度 (μGal)95 %信賴水準涵蓋因子 K=2	絕對重力值 (μGal)	不確定度 (μGal)95 %信賴水準涵蓋因子 K=2	絕對重力值 (μGal)	不確定度 (μGal)95 %信賴水準涵蓋因子 K=2	絕對重力值 (μGal)	不確定度 (μGal)95 %信賴水準涵蓋因子 K=2
AG1	*837	9	*841	13	*837	9	*831	9
AG2a	*578	9	*582	9	*578	9	*576	9
AG2b	*495	9	*499	9	*493	9	*486	9
AG3	*025	9	*015	9	*011	9	*061	9
AG4	*875	9	*873	9	*880	9	*867	9
AG5	*960	9	*959	9	*962	9	毀損	
AG6	*869	9	*867	9	*871	9	*895	9
AG7	*377	9	*378	10	*375	9	*367	9
AG8	*243	9	*197	10	*233	9	*228	9
AG9	無	無	*717	9	*716	9	*710	9
註：絕對重力值換算至基樁面 0 公分高度，假設重力梯度-3.0 μGal / cm *代表省略之前的數值，不是相同的數值								

圖 15 顯示各點位重力值之前 4 年來趨勢，目前點位變化不明顯，但 AG3 在 2008 年前卻有明顯的重力變小趨勢，其位於中央山脈，應與點位 AG4、點位 AG5 有類似趨勢，但結果不然，到了 2009 年時，由於經過八八風災，在點位旁有比人還要高的土堆造成 2009 年跟 2007 年(同一台 FG5-224)相差 46 μGal。另 AG8 位於台南市內，背景雜訊較大，重力值變動大，值得持續觀測以探究原因。



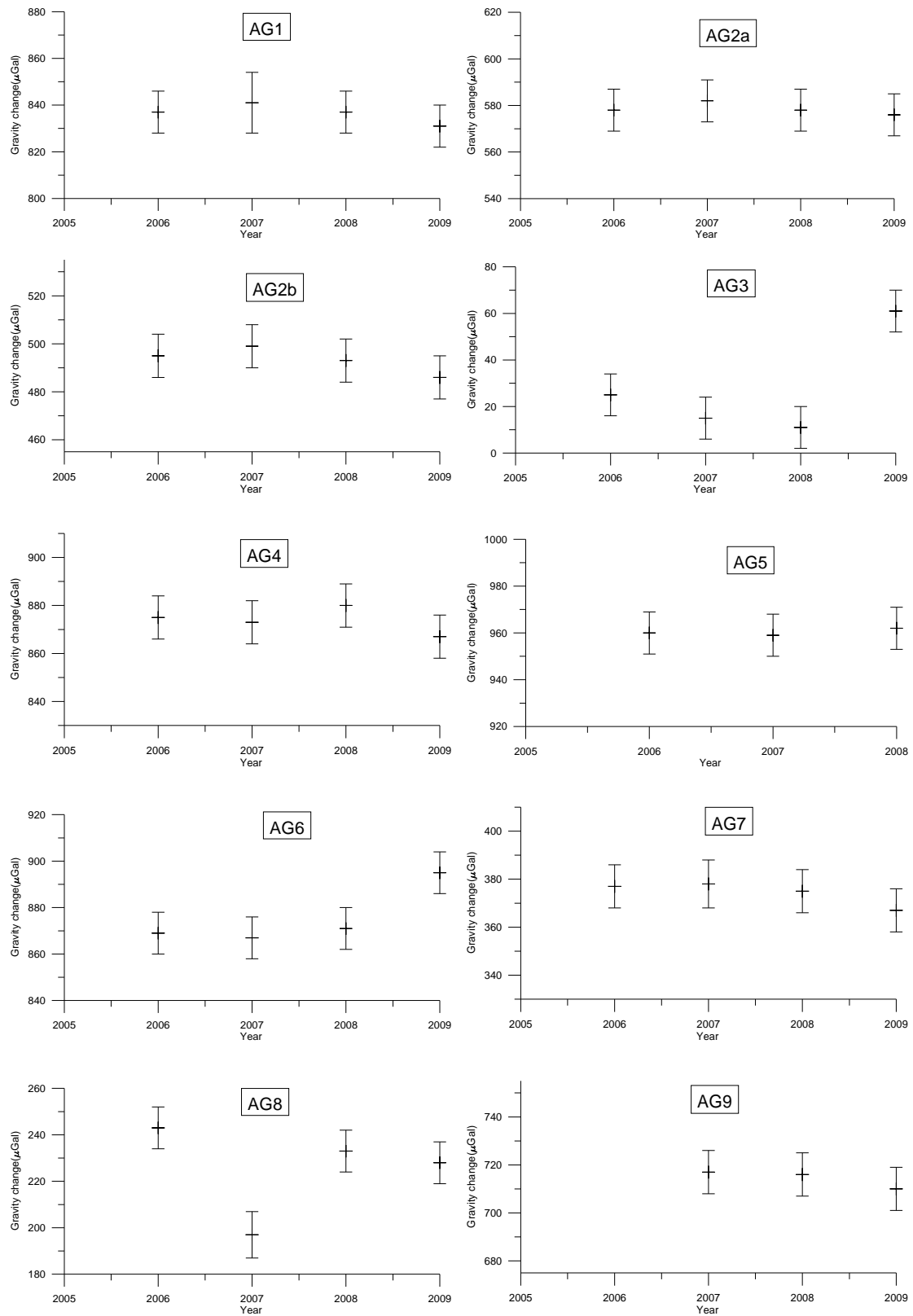


圖 15 AG 各點位重力值變化

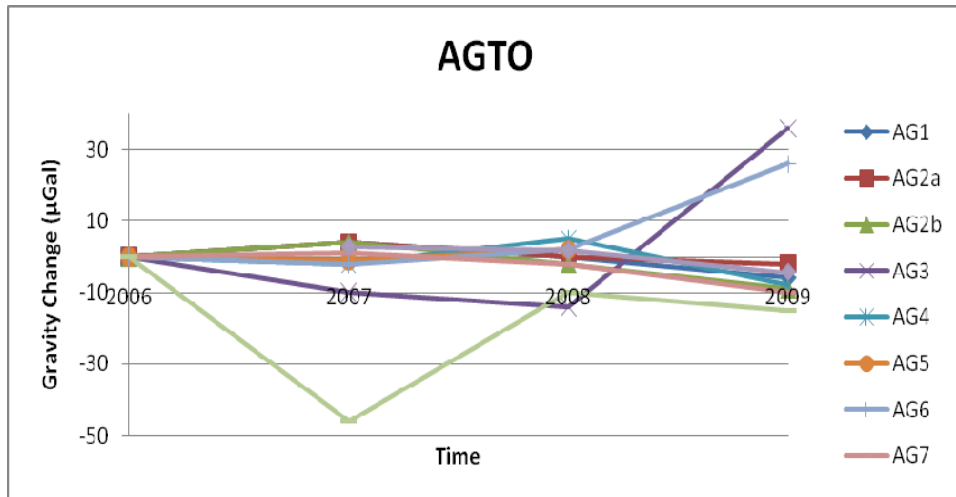


圖16 AG各點位年重力值變化

將所有點位依不同時間繪製成，以2006 年為起始值，將每一點位與2006 年之差值繪成圖16，可以發現所有點位都跟第一年所測之值差異不大，其中有最明顯差異的就是位於台南市區的成大(AG8)，從2006至2008 年重力值逐年遞減的新武橋(AG3)卻因為八八風災影響，使重力值突然變大，相同情形也發生在寶來國中(AG6)，這個發現可以說明八八風災讓山頂的土石沖刷到平地，主要的土石都堆積在丘陵(二千公尺沖到四百公尺左右)，而滅村的小林村就在寶來國中附近，其海拔高度為三五二公尺。

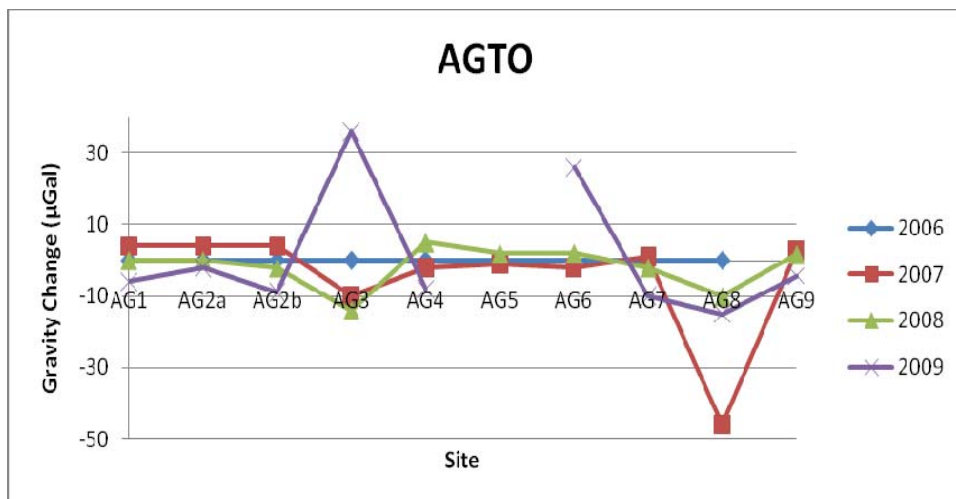


圖17 AG每年之各點位重力值變化

將每個點位依不同年度排列發現，從2006至2008 年變化趨勢中可知除了成大以外每個點位變化不大，扣除2009 年由八八風災造成明顯不同的新武橋(AG3)及寶來國中(AG6)後，可以發現每一點都比2008 年低，也就是重力持續變小(圖17)。

將其附近已知GPS及重力點位繪製成圖18，其中靠近AG1為蘭嶼B(LANB)、靠近AG2a為東河(TUNH)、靠近AG2b為池上(SHAN)、靠近AG3為霧鹿(CHUL)、靠近AG4為摩天(MOTN)、靠近AG5為天池(TENC)、靠近AG6為寶來國中(PAOL)、靠近AG7為龍崎尖峰(LNCH)、靠近AG8為台南市(CK01)、靠近AG9為澎湖(PANG)，將GPS資料選取2006年1月至2009年12月之成果繪製成圖19，圖中紅色線為GPS資料，藍色為趨勢線(其成果是相對於蘭嶼LANY點位)，而綠色為距離點為50公里內之地震及其震幅大小，將重力移除2009年AG3及AG6的成果，及2007年AG8的成果，將其重力變化趨勢和GPS成果比較如表6。

由表6可以發現，中央山脈以東的AG1-AG4主要的趨勢為向上，而西部地區則因為擠壓作用而出現上升及下降都出現的情形，但整體來說整個南橫的造山運動的趨勢是向上的，而整個AGTO中只有寶來國中符號相反，其中原因可能在2007年時寶來國中操場整修時將步道接觸到基樁而造成重力異常，不過此一情形仍在誤差範圍內，四年下來所測得之重力變化為  $-2.09 \mu\text{Gal}/\text{year}$ ，和GPS  $0.45 \text{ cm}/\text{year}$  的變化趨勢一致。

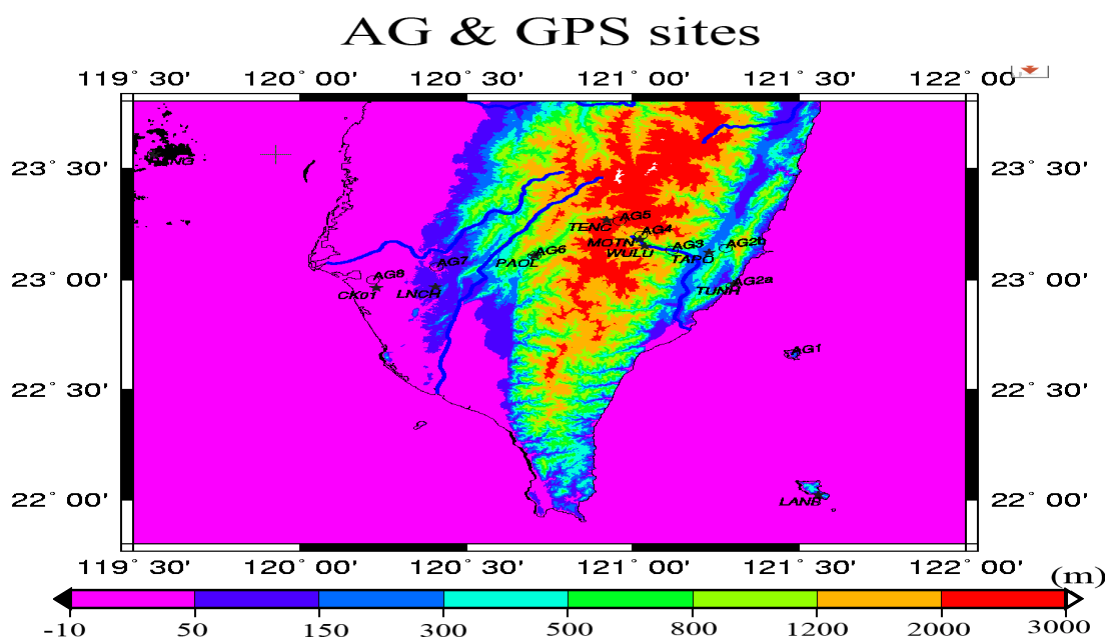


圖18 AG點位及GPS位置圖

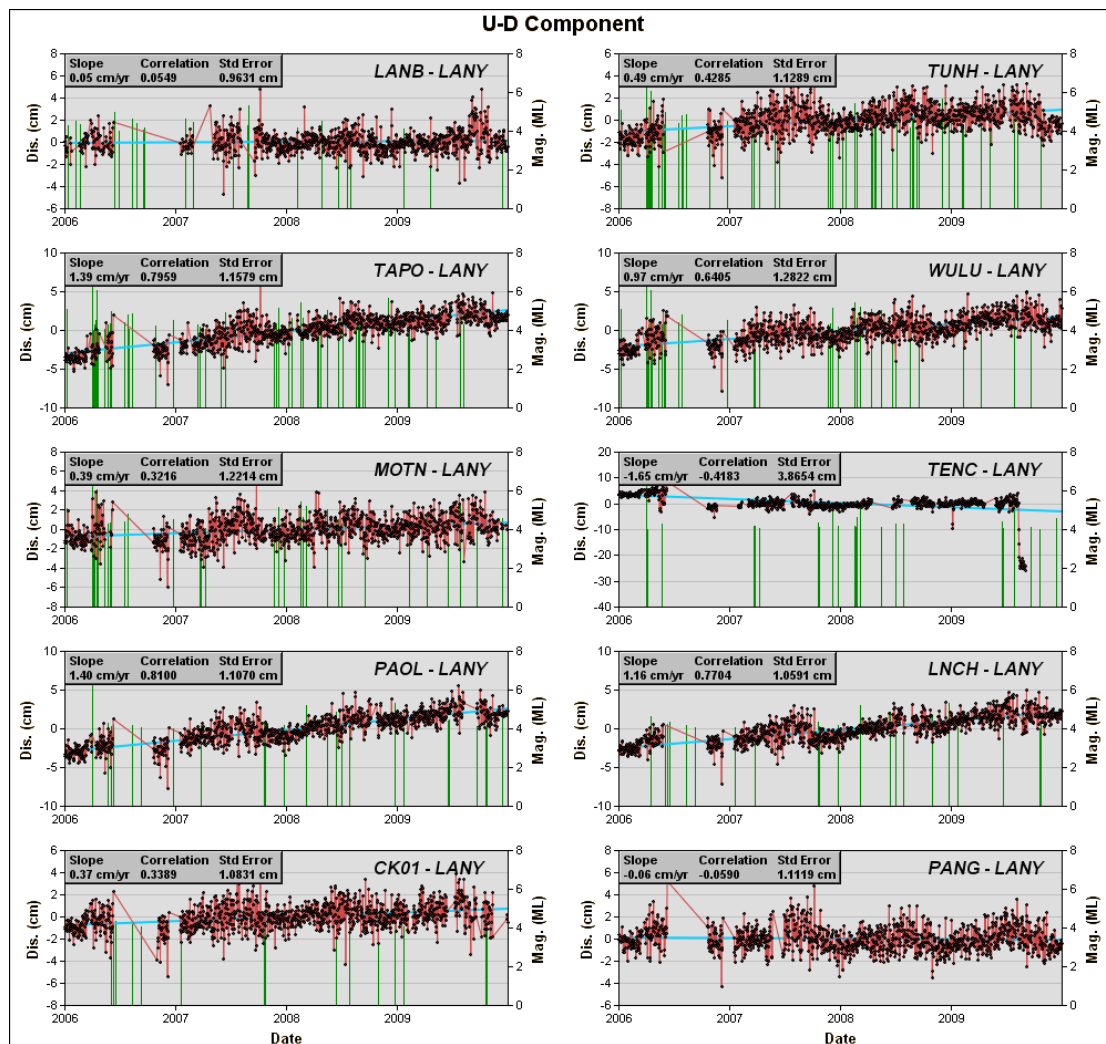


圖19 GPS垂直方向成果

表 6： AGTO 絕對重力趨勢及 GPS 趨勢比較

點位(AG/GPS)	重力趨勢變化( $\mu\text{Gal}/\text{year}$ )	GPS趨勢變化( $\text{cm}/\text{year}$ )
AG1/LANB	-2.20	0.05
AG2a/TUNH	-1.00	0.49
AG2b/TAPO	-3.30	1.39
AG3/WULU	-7.00	0.97
AG4/MOTN	-1.70	0.39
AG5/TENC	1.00	-1.65
AG6/PAOL	1.00	1.40
AG7/LNCH	-3.30	1.16
AG8/CK01	-0.90	0.37
AG9/PANG	-3.50	-0.06
AVERAGE	-2.09	0.45

#### 4.1. 台灣地區板塊構造背景

台灣位處於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交界處，同時是菲律賓海板塊上呂宋火山島弧(Luzon arc)向歐亞大陸板塊邊緣延伸的聚合點。在東北側，菲律賓海板塊隱沒進歐亞大陸板塊之下；這可從琉球海溝得到驗證。另一方面，在南邊兩個板塊的交界，歐亞大陸板塊則隱沒入菲律賓海板塊之下，且形成了馬尼拉海溝 (Angelier, 1986)。在陸地上，台灣花東縱谷正是這兩個板塊交接的分界線。呂宋火山島弧和歐亞大陸板塊邊緣的碰撞大約自6千5百萬年前開始發生。由於兩個板塊的斜向交會，這個碰撞以每年31 mm的速度向南推進(Simoes & Avouac, 2006)。台灣的造山運動已累積了約4000 公尺的高度，且不斷的繼續增長(圖20)。

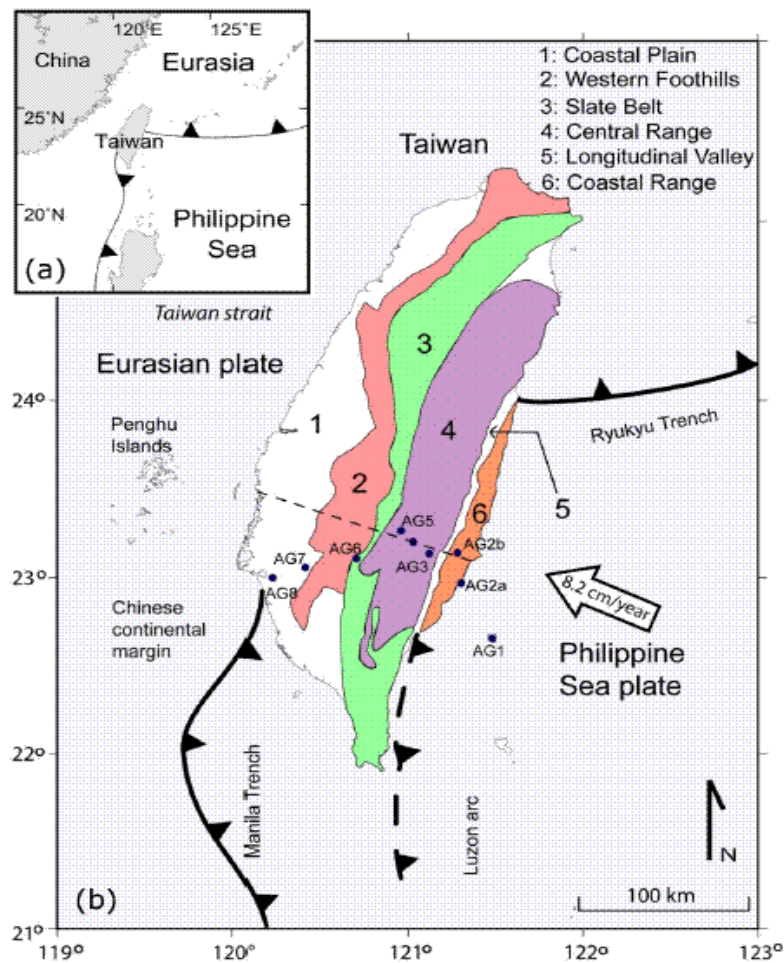


圖 20 板塊碰撞的邊界與推移方向。五個地質區以顏色區分。9 個編號 AG 之點位為絕對重力觀測點。橫斷台灣的虛線為模型剖面位置。

在地質構造上，台灣地區可分為五個地質區(Ho, 1986)。從西部海岸線到東部海岸線可以分為海岸平原，西側丘陵，slate belt，中央山脈，以及海岸山脈。源自碰撞，造山，隱沒等作用使得台灣成為地球上板塊活動最明顯的地區之一。這些板塊活動可以驗證自長時間的GPS觀測。新化斷層則位於1跟2的交界處，也

是位於本次實驗中AG7跟AG8的中間，依據表5所示，AG7以每年3  $\mu\text{Gal}$ 的速率下降，而AG8除去2007年的誤差，可以得知AG8以每年5  $\mu\text{Gal}$ 的速率下降，在新竹斷層的兩邊重力下降並不一致，也就是兩邊累積不同的能量，此寶貴成果將提供未來判斷新化斷層發生是由多少能量累積之參考數據，由於菲律賓海板塊和歐亞大陸板塊間的相對運動大約為每年82 mm(Yu et al.,1997)。此外，從頻繁的地震活動以及遍佈全島的斷層亦說明了板塊運動的活躍程度。然而，截至目前為止，學界對呂宋島弧與歐亞大陸板塊邊緣的碰撞機制，仍有相當的爭議。若在台灣東西板塊結構剖面上，以位移與否的境界面作為分野，境界面以上的部份厚度作為考量依據，可以區分成兩個主要的理論，薄皮機制與厚皮機制。這兩個理論可以分別在地表地貌上，或是震波呈現的物理特性上各自找到支持的證據，然而，兩者也都有其未竟完善的地方。

## 4.2. 薄皮模型及厚皮模型的理論

根據Chapple(1978)及其他學者推想的薄皮模型的理論(thin skin tectonic)，台灣地區板塊移動層的分界面應當在新第三紀(Neogene)層的深度(圖21)。西側移動境界面的位置約在深度10 公里處，一既沈積層的底部。向東逐漸向深處隱沒在中央山脈下方。編號1至5的邊界線分別為區別五個地質區之斷層。此模型中所有斷層皆不超過移動境界面。在這種模型的設定下，板塊交界處推擠所產生的隆起相當類似推土機推刀前的堆積。根據這樣的模型，可以推估地表形變的狀況(Davis et al., 1983)。這些推估的結果與野外調查的結果相當吻合。Dahlen等人(1984)更進一步推論這個移動分界面應當位處第三紀中新世(Miocene)層與第三紀上新世(Pliocene)層間的深度。近年來有更多的學者就薄皮模型的假設推論更詳盡的剖面結構(Malavieille & Trullenque,2009)。

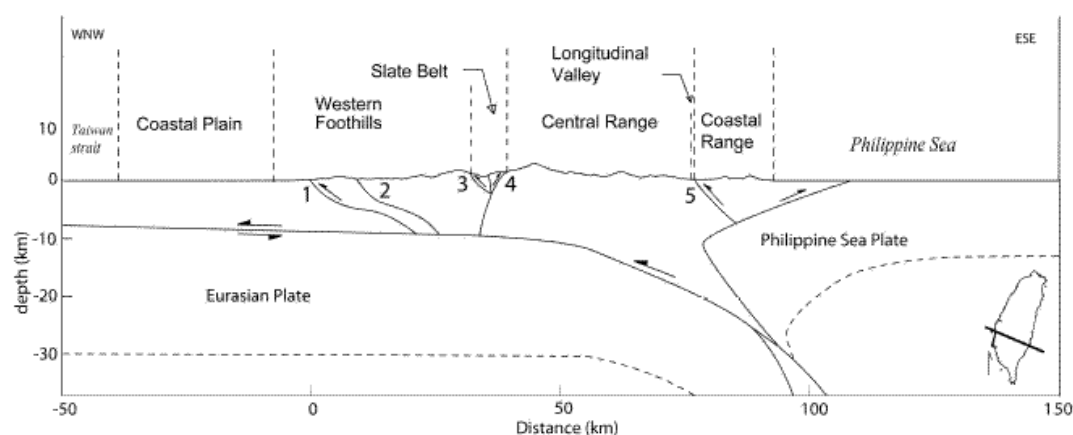


圖 21 薄皮模型的板塊剖面結構

另外有些學者根據台灣的震源分佈資料，鑽探資料，與震測資料(Hung et al., 1999)，提出了截然不同的厚皮機制模型，這個模型推定板塊移動的境界面在更

深的地殼底部。根據這樣的模型，板塊擠壓的變形會伴隨著一些正斷層轉變成逆衝斷層的作用。相關的研究(Wu,1997)指出，台灣地區的造山運動包含了整個地殼(Mouyen, 2010)，以及上部地函(upper mantle)-尤其在中央山脈的地區(圖 22)。相較於圖 21 之薄皮模型，移動境界面位於比較深的地方，大約是靠地殼與上部地函的交界處。為了合理解釋厚皮機制所造成的變形，板塊移動的境界面必須是地殼中結構相對較弱的部份，極可能為硬脆與延展性層次間的不連續面。這個研究並不計畫在理論爭議中全然的支持或否決其中一個理論，而是希望藉由兩種理論機制所衍生的重力場，比對實際觀測的重力數據與 GPS 數據，藉由觀測數據改良理論細節，作為板塊構造研究一個新的探討方向。

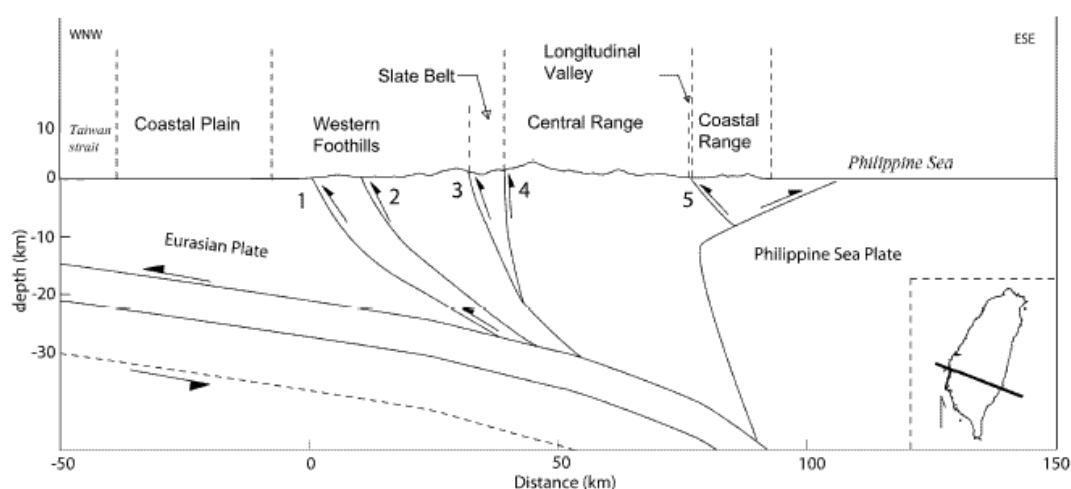


圖 22 厚皮模型之板塊剖面結構。

### 4.3. 斷層模型的計算

#### 4.3.1. 變形模型的計算

在完成模型設定以後，Okada(1985, 1992)的數學模式可用來計算由斷層滑移所造成地表的水平與垂直位移。斷層的幾何構形與移動方向可在計算前加以設定。依照所得到台灣地區地球物理，地質資料，這些參數被小心的調整使計算模式能夠趨近實際的狀況。在初步的實驗裡，參數的設定原則包括

1. 斷層的位置依照台灣地質圖的資料設定。所有的斷層皆容許逆向運動。
2. 東側板塊滑移的速率依照菲律賓海板塊的移動速度，每年82 mm的參考值設定。
3. 板塊移動的速率由東向西遞減。
4. 斷層的設定從地表開始一直延伸到板塊位移的境界面。程式的設定可以容許一個斷層面有兩段不同的幾何結構。在不同的深度可以有不同的斷層滑移速

度。

5. 大部分的斷層在地表皆無滑移，但東縱谷的斷層在地表仍設定每年30 mm的滑移量。

6. 在花東縱谷之外，西部丘陵的斷層設定有較多的滑移量。

根據這些設定，針對兩種板塊運動機制，我們可預估地表的水平與垂直變化。這個預估量可以拿來與GPS連續追蹤站的資料相互比較。然而，必須要強調的，在本建議書中展示的變形模型僅是初步用來說明的1維剖面簡化版本，所以只考慮菲律賓海板塊隱沒到歐亞大陸板塊的情形。在後續的研究中，我們會將2維的模型推展到3維的狀況，並納入更多複雜的考量。現階段所試驗的簡化模型，將作為後續模擬計算的範本。

#### 4.3.2. 薄皮模型的模擬計算

板塊的移動境界面在西部海岸設定為5公里深，線性遞增到海岸山脈下的10公里深(圖 23a)。根據這樣的設定，計算出的地表水平位移與 GPS 水平速度有相當不錯的吻合度(圖 23b)。垂直位移上則在西部丘陵與西部海岸平原顯示了較大的歧異(圖 23c)。由於薄皮模型中斷層的深度較淺，所以會產生較大的水平位移與較小的垂直位移。根據各種嘗試錯誤的方式探討模型的設定後發現，若將板塊移動境界面的深度設得淺一點，地表的水平位移量可以與 GPS 的觀測量有更好的吻合。

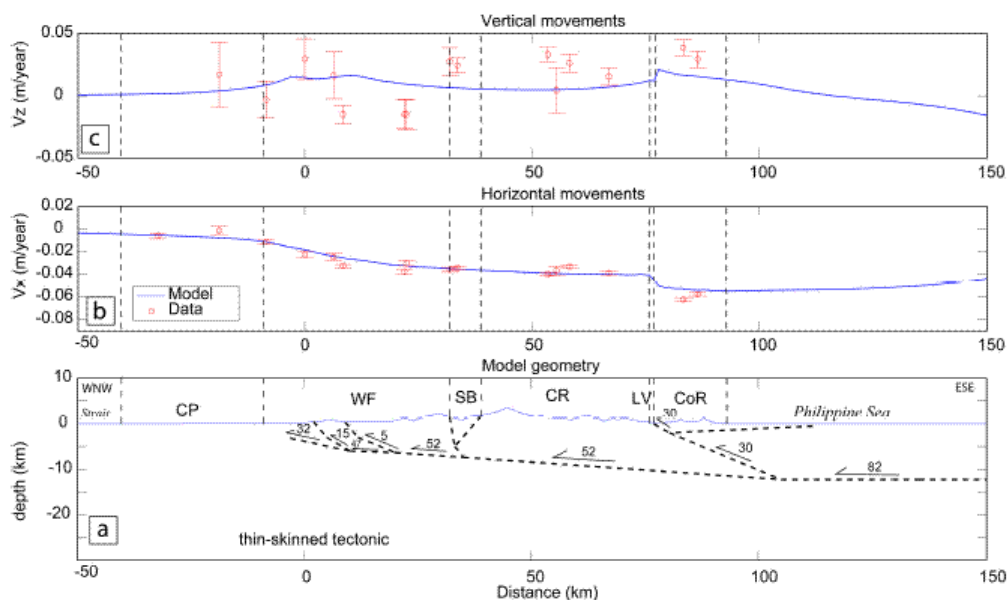


圖 23 由下而上，(a)薄皮模型剖面之斷層，板塊移動境界面之狀況。(b)模型推估之沿剖面方向水平位移，以向東邊為正。紅色符號表實際觀測量與其觀測誤差上



下界(c)模型推估之垂直位移。可見紅色標示之觀測量有較大之散佈。

#### 4.3.3. 厚皮模型的模擬計算

根據各種嘗試計算，我們把厚皮模型在西部的板塊位移境界面深度設在 15 公里處(圖 24a)，向東以 3 度的角度遞增。厚皮模型的斷層有較深的深度，所以深部斷層的滑移減輕了地表的變形量。這個模型的計算結果在西部丘陵與海岸山脈兩區的水平位移量較 GPS 的觀測明顯低估(圖 24b)。相較之下，垂直位移則有較明顯的訊號(圖 24c)。與圖 23 之薄皮模型相較，厚皮模型在水平方向的位移與實際觀測有較大的不一致。

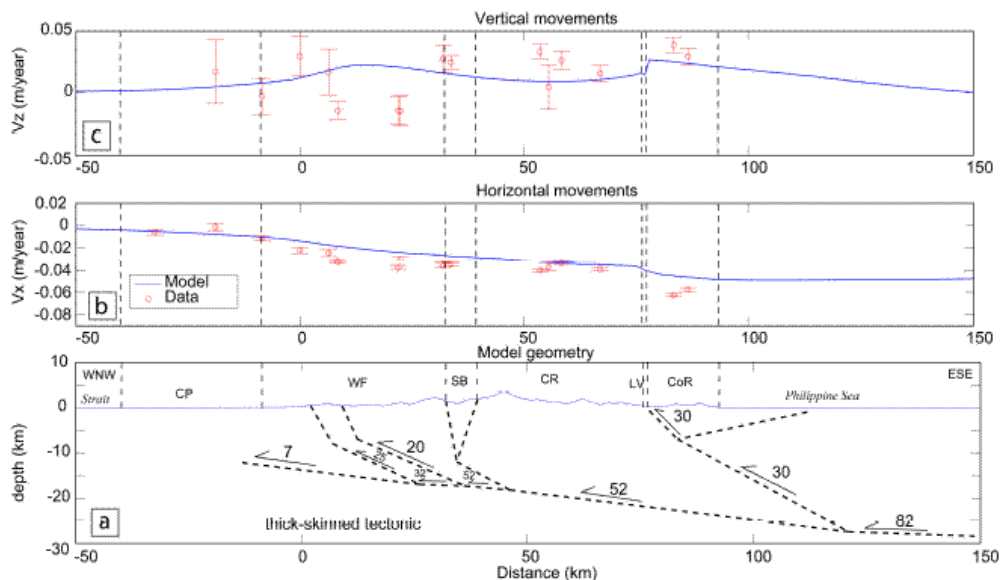


圖 24 厚皮模型剖面的理論與實際觀測比較

#### 4.4. 板塊運動的重力效應

由於 GPS 在高程定位上需要長時間大量觀測資料以達成所需精度(參考資料)，重力觀測正可提供幾何位移或物理異變量的資訊。我們使用程式 GRANOM 來計算理論上板塊運動造成變形後所相應的重力效應。這個程式是依照 Won 和 Bevis(1987)的演算法則編寫而成，可計算 2 維剖面裡彈性變形前的重力值與變形後的重力值。兩個重力值的差值極為板塊運動所相應的重力效應。GRANOM 的計算需要剖面上的密度分佈資料。根據台灣五個地質區域，根據斷層的分界，我們可採表 7 所列的密度設定

表 7 密度設定模式

區域	密度(kg m <sup>-3</sup> )
西部海岸平原	2500
西部丘陵，Slate belt，中央山脈	2700
海洋地殼（包含海岸山脈）	2800

另一方面，模型裡沿垂直方向上的密度分佈變化(圖 25)，原則上以由淺至深逐漸增加做為設定原則。針對兩種板塊模型，其彈性變形效應所衍生的重力剖面顯示在圖 25b，主要包含了自由空間位移效應(free air effect)與板片效應(plate effect)，這兩個效應每年可達 3 個  $\mu\text{Gal}$  的增量。經過移除自由空間效應後的重力剖面展現在圖 25a，呈現了變形部分質量所產生的引力。在對照以 GPS 或其他方式得到的地表幾何位移量之下，可以驗證變形部分的密度值。

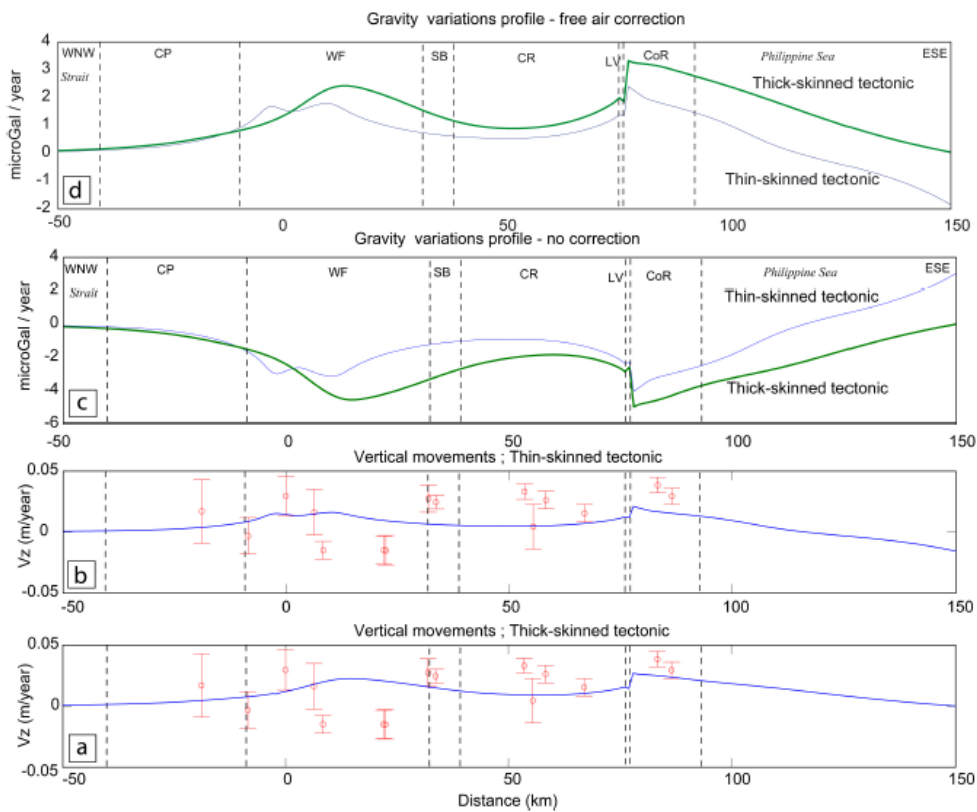


圖 25 (a)厚皮模型之垂直位移(b)薄皮模型之垂直位移(c)垂直位移所產生之重力效應(d)去除自由空間位移效應後之重力殘值。

如果更進一步假定了變形部分的平均密度，並把相應的重力效應移除後，剩下的殘值呈現了深部的質量轉移，或稱密度分佈變化。這個殘量相對應於自由空間位移效應與板片效應而言，相當微弱。厚皮模型所產生的質量轉移效應較大，可達每年 0.3  $\mu\text{Gal}$  的程度；而薄皮模型的質量轉移效應則趨近於零。以厚皮模型

而言，東部地區的質量轉移訊號來自於密度較大的海洋板塊，包括海岸山脈，在中央山脈下向西側擴張的結果。而西部平原與丘陵下的質量轉換可能源自於在板塊位移境界面的深度下部地殼與上部地函質量交換所產生的效果(圖 26)。

在後續的研究裡，以 GPS 觀測站與相對，絕對重力點組成的監測網將提供幾何位移，質量重分佈的資訊，作為約制理論模型的條件。在空間涵蓋良好的數據輔助下，理論模型的調整將可包含更多，更複雜的參數，例如非彈性的應變，並且藉由觀測數據的空間關連性將 1 維剖面拓展成面狀涵蓋的模型。

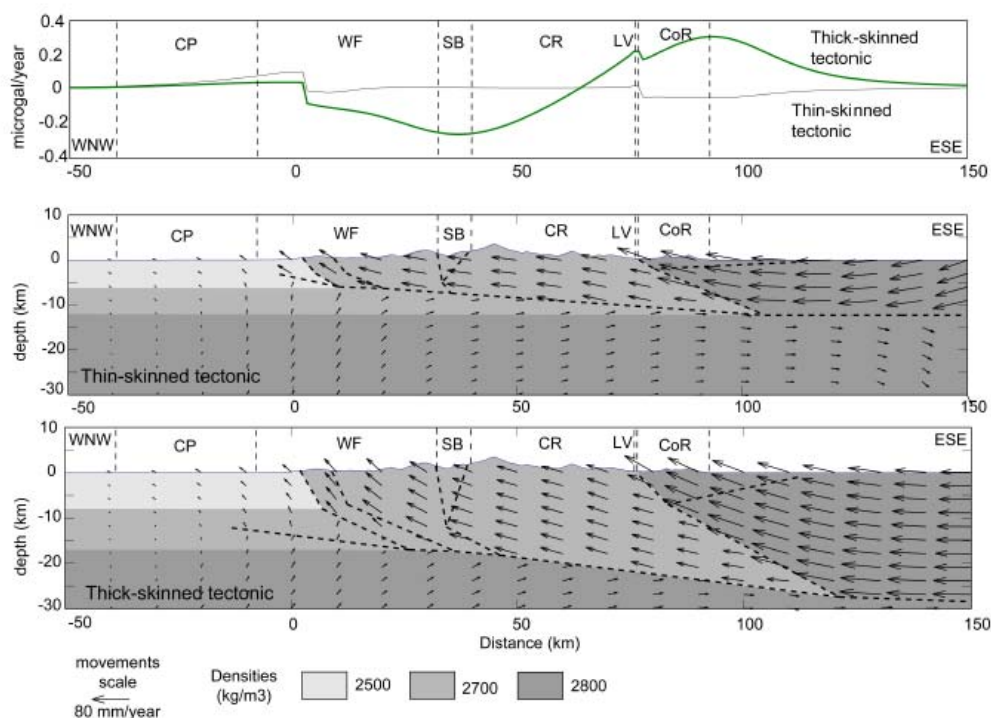


圖 26 移除自由空間效應與板片效應後，殘餘的質量轉移效應。厚皮模型(綠線)在海岸山脈將會有最大達 0.3  $\mu\text{Gal}/\text{year}$  的訊號(上圖)。薄皮模型(中圖)與厚皮模型(下圖)的質量轉移向量圖。

因為台灣島來自海洋，板塊互相推擠運動造成了地殼的隆起而成為陸地，由於台灣現今利用 GPS 等測量所得的構造運動型態與造山速率相對於幾萬年、幾百萬年之造山運動速率相異甚大，加上氣候影響山脈侵蝕造成土石流，山區的地貌也會持續變化，所以單純從幾何上來對於造山運動之解釋，沒有考慮到地底內部質量變化，在說造山運動過程中有些現象解釋會有盲點，像是在監測青藏高原的隆升利用了絕對重力儀 FG5，從 1993 年至 1999 年重力值減小了  $12 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ，証實拉薩的上升速率為 10 mm/year(張為民,2000)。

事實上在台灣島的四周海域內，東北方有沖繩海槽，南方有呂宋島弧等海底構造，全都在影響著台灣島的形成，而台灣島構造依地質來區分，也可以清楚的看出台灣的構造和縱切台灣的幾條斷層線是有很大的關係的。再透過變形模型的分析來解釋所經過之斷層重力變化情形，像是1946年的新化6.3級的大地震，造成北側沉降盆地未發生隆起，而現今技術量得之成果來說明南橫沿線各斷層的重力變化情形。

中國在1982~1996年期間也曾用LaCoste-G型相對重力儀在成都-拉薩做過多次重覆的相對重力，但其精度不如絕對重力儀FG5，高精度之絕對重力測量有二個優勢：一是它反應地面上某點的地殼垂直形變，且提供該點下方物質運動之訊息；其次是它所量到的是地表相對於大地水準面的垂直變化。

本計畫是利用重力及GPS來分析造山運動之成因，跨越了東部海岸山脈、花東縱谷、中央山脈、西部麓山帶及西部海岸平原，可以說將整個台灣主要的結構都做了深入的量測及分析，除了空間幾何上的原因之外，還考慮到地底下質量運動所帶來重力變化，而影響重力變化之成因包含了固體潮、海潮負載、大氣壓力、地下水位、極運動及其他環境因素之影響，本團隊對於環境影響之改正經驗，有助於將FG5所測得之絕對重力值，用來建立台灣更完善之環境改正模式。

## 5. 遇到的問題及解決的方法

本觀測計畫起緣於地球物理學界對台灣地區板塊推擠現象所造成之造山運動所投注之高度興趣。由於此地表隆升與位移現象相當顯著，對於國土測繪基準勢必造成相當程度之影響。是故在本計畫測量整合服務計畫中，將和法國蒙普利爾大學地球動力研究中心所提之絕對重力觀測計畫合作，期使此一地球物理之觀測任務，能更深入了解台灣的地質構造及相關斷層資訊，針對實施方法、遇到的問題及解決方法如下：

### 一、點位選定與相關行政作業

分析全台各地之全時衛星定位接收站之資料，顯示中央山脈地區，造山運動地表隆升的現象相當顯著。在考量交通後勤的便利性的情況下，選擇了南部橫貫公路沿線作為觀測場地。由於南部橫貫公路的方向，大致與歐亞大陸板塊、菲律賓海板塊交界線垂直，所以沿南部橫貫公路之重力觀測，正好組成一個理想的剖面。為了選取適合的觀測點位，95年6月中旬，法方科學家一行四人，由Dr. Frederic Masson領隊，抵台與本團隊研究人員會合，前往南部橫貫公路地區進行為期一週之勘查。經此探查，選定8個主要絕對重力觀測點、外加1個副點。這9個點分布東起離島綠島，沿南部橫貫公路西止台南市。觀測點位選定後，經歷兩個月文書作業與現場會勘後，於同年八月底完成所有點位之施工許可。

經過前四年之持續觀測，將原本八點已經擴充成十點，但後來由於莫拉克颱風的侵襲，造成AG5的啞口已經被埋在三層樓之石堆之下，必須更換觀測地點。

未來為擴大量測範圍，由線狀展開成面狀，將納入更多之一等水準點及GPS觀測點，相關數據及資料來源將不只由一個單位提供，會有格式及時間不同之問題，將針對此一問題做整合性的資料處理，期許精度達到同一個標準。

### 二、重力觀測樁埋設

本計畫之重力樁埋設要領參酌內政部之施工工法，將點位區分為兩大類。若測站地基地質結構為堅固岩盤石，則於岩盤鑽孔植入鋼筋，再以混凝土砌成標準尺寸之基樁平台。若測站場址無岩盤可利用，則於地面向下挖掘深度1.5米之坑洞；基樁設置於坑洞中央，以鋼筋組成籠狀結構，外覆板模澆灌混凝土建成。基樁四周預留10公分寬之絕震壕溝，以細砂填實，頂部覆以不伸縮水泥蓋頂作為防水措施。重力樁週遭5米見方進行整地作業清除障礙物以架設遮蔽設施並方便重力觀測作業之進行。

未來觀測後之資料將分析各重力觀測樁之好壞，每年做適度之調整，以增減之方式保留好的觀測樁。

### 三、野外觀測遮蔽裝置之設計

本次外業任務為國內首度於室外場所進行觀測。為阻絕環境干擾，將噪訊盡

可能降低，必須設計一個可移動式的遮蔽罩裝置將絕對重力儀及其週邊設備遮蔽於其中。法方團隊過去的操作經驗中曾使用過固定式的臨時屋，也使用過可收折的臨時屋。本研究團隊考量野外施作的實用性與後勤作業的便利性，採用帆布式帳棚，外加四面獨立可收折之帆布遮風罩。當室外氣溫降至接近冰點，影響絕對重力儀操作時，啟動鹵素燈殿暖氣維持帳棚內氣溫於絕對重力儀工作溫度範圍之內。

而考量野外量測所用之帆布因年份長久而不堪使用，在施測第二年將重新檢討，找到最商合台灣之野外量測可行之遮蔽裝置。

#### **四、儀器運送與檢較**

各項前置作業於11月上旬，法國科學團隊抵台前陸續完成。法方儀器首先空運來台，點收後暫時安置十八尖山重力實驗室。期間利用法方絕對重力儀(編號228)測試的機會，與我方編號231與224之絕對重力儀於實驗室內各重力樁位交互進行觀測比較。待法方人員陸續抵台後，野外重力觀測團隊於法方人員抵台後正式由新竹出發，開始外業觀測任務。

儀器在運送時會有風險，將來預計由台灣及法國輪流施測，除可以比對雙方之儀器精度外，還可以針對不同年份之資料分析，來做較嚴密之控管。

#### **五、野外觀測**

根據原先擬定之觀測計畫，首先由東部海岸之重力點位AG2開始觀測任務。緊接著搭乘渡輪前往綠島進行觀測；而後視工作進展持續往高山地區逐站觀測。預定觀測由東至西，最終於澎湖內之點位AG9結束任務而北返。

每個點位預計觀測12小時，利用晚上觀測，白天搬站，所要考慮之路線規畫需於出發前先做完整的設計，最好能在出發前先至各樁位檢查一遍，將影響之環境因素(如雜草、樹枝、人工建物、電源問題等)，確認無誤再開始野外觀測。

#### **六、絕對重力觀測數據分析**

由於之前有初步檢視野外觀測數據，其成果相當令人鼓舞。以位於東河國小校園內的AG2a為例，落下觀測的組散佈值為 $4.34 \mu\text{Gal}$ ，顯示這些觀測點背景噪訊相當安靜。相較於過往於西部地區的觀測資料，組散佈值經常大於 $10 \mu\text{Gal}$ ，可說是極佳的地球動力觀測區域。

台法合作造山運動觀測計畫第四年度觀測於98年11月底完成。聯合團隊的組成包含台灣團隊(工研院，交通大學)與法國團隊(CNRS, EOST, GM)。

#### **七、絕對重力儀觀測組參數設定**

由於這是台法雙方首度在戶外使用FG5絕對重力儀，因此在事先對資料品質的預估毫無經驗法則可循。我們嘗試將資料組間之觀測間隔設定為30分鐘，每個資料組觀測100組落下。然而，經過摸索之後，我們發現戶外觀測的環境品質優於原本的預期，所以決定將資料組間觀測間隔設定為1個小時，每個資料組觀測100組落下。其中3個站由於環境噪訊過大，我們將資料組的落下數增加至120組，觀測間隔仍維持1小時。

#### **八、消除科氏力的影響**

為了將科氏力對落車下落動作所造成的影響降至最低，必須將FG5重力儀底座裝設有氣泡盒的支座朝向南方。

### 九、極運動改正

極運動的影響依照法國地軸運動資料中心(Service de la rotation de la Terre)所發布的資料進行改正。

### 十、重力樁環境因素分析

經過前述觀測資料的分析，重力樁展現了相當優異的工程品質。不論就穩定性或絕震性而言，這些基樁本身皆能符合絕對重力觀測的需求。

然而，部分重力樁所在位置仍然有進一步改善的空間。例如位於綠島的AG1，樁位四周相當擁擠，妨礙帳幕的搭設與儀器的操作。其他如AG2b，位在容易受土石流崩落損毀，應考慮保護措施。

在電力供應方面。台灣使用110 伏特~50Hz的電力供應，與歐盟規格相異。相關電器設備皆須轉換器轉換成歐盟規格。而從本次野外作業經驗顯示，700 W的不斷電系統太小，不足以保護全部的儀器，建議此後野外作業應使用1500 W規格的不斷電系統。而在電源接線部份，由於部分樁位離電源供應達50 米以上，再加上使用到電暖器，所以在電力接續上產生問題。應考慮使用更高規格電源線以改善電力損耗的問題。

由於台灣山區時常有陣雨與落雷，擺設儀器時務必進行接地防護。在移動式帳棚方面，這是首次的野外作業嘗試。移動式帳棚相當輕便，操作簡易，然而帳棚對日光照射的隔熱效果有限，所以觀測難以持續超過16 小時，否則儀器在對準上將產生問題。

### 十一、其他伴隨觀測

重力梯度為了歸算絕對重力的觀測，必須進行垂直方向的重力梯度觀測。我們使用L&R相對重力儀擔任重力梯度的觀測，並搭配由工研院量測中心特別設計之梯度架。而針對GPS觀測，在本計畫所選定的樁位中，有三個點位AG4，AG6，AG8靠近GPS連續觀測站。其他點位則以三腳架架設天線進行GPS觀測。由於觀測時間皆未超過24小時，故在高程精度方面並無法達到使用需求。所以後來使用連續GPS觀測的數據成果。

### 十二、地下水井數量不夠

本計畫遇到問題有地下水井數量不夠，無法在絕對重力點位附近取得地下水的高度，由經濟部水利署規劃之地下水觀測網只包含嘉南平原及花東縱谷，南橫在台灣地區地下水資源分區中大部分為中央山脈區，此區為縱貫全島之脊樑山脈，西半部以板岩及變質砂岩為主，東半部則屬變質雜岩，均緻密難以含水或透水。而且山谷多峻深狹隘，沒有大規模沖積層的存在，所以為地下水貧乏區域。此時需依岩質特性，其含水量很小及地下水位很低。

### 十三、大氣改正模式

由目前大氣改正所廣泛使用之經驗公式來看，大約每1mbar 之大氣壓力變化會產生重力值-0.3  $\mu$ Gal 變化。而一般大氣壓力變化量可達數十mbar 之譜，換

算成對應之重力值變化，可十幾個 $\mu\text{Gal}$ 。所以台灣必需要有屬於自己的大氣改正模式，以全球氣象資料進行Green's function 積分計算。並進行大氣模式預估絕對重力點氣壓與實際觀測氣壓比較。

#### **十四、超導重力儀選址**

本計畫還有另一個任務，目前超導重力儀有二台都放在新竹十八尖山，如果本計畫能找到一個地質穩定的地區且又有其科學意義，將來會把第二台超導重力儀擺放於當地，做為台灣第二個超導重力的觀測站，這段期間曾經針對中部鹿林山及北部陽明山使研究，目前預計2011年在陽明山先行觀測。



## 6. 目前成果及未來計畫

由於本計畫是和法國展開五年之長期合作，2010年底也就是合作的第五年開始，將由法方運FG5-228來台量測絕對重力、相對重力，台灣團隊將負責共同觀測及成果分析，在每年的十一月做絕對重力測量，目前完成四次絕對重力測量，而且已發表的文章如下：

1. Hwang, C., R. Kao, C. Cheng, J. Huang, C. Lee, T. Sato, Results from parallel observations of superconducting and absolute gravimeters and GPS at the Hsinchu station of Global Geodynamics Project, Taiwan. *J. Geophys. Res.* 114 (B07406), 2009. Doi:10.1029/2008JB006195 (IF=3.147)
2. Mouyen, M, F Masson, C Hwang, CC Cheng, R Cattin, CW Lee, NL Moigne, J Hinderer, J Malavieille, R Bayer, and B luck, Expected temporal absolute gravity change across the Taiwanese Orogen, a modeling approach, *Journal of Geodynamics*, Vol. 48, No. 3-5, pp. 284-291, 2009. (IF=1.692)
3. Shen, WB, D Wang and C Hwang, Anomalous signals prior to Wenchuan earthquake detected by superconducting gravimeters and broadband seismometers records, *Journal of Earth Science*, in press, 2010.

已投稿，並在審閱中之文章如下：

1. Hwang, C, JF Huang and S Jan, Short-period and shallow-water tide-induced gravity effects along the southeast China and Taiwan coasts: validation by superconducting and absolute gravimetry, submitted to *Geophysical Journal International*, 2010.
2. Mouyen, M, F Masson, C Hwang, CC Cheng and N Le Moigne, Time-lapse relative gravity measurements over wide and mountainous area in Taiwan, submitted to *Geophysics*, 2010.

本計畫從第三年起申請國科會補助，主要結合之前的數據求出各環境改正量之模式，以求得各絕對重力點之絕對值，配合GPS所觀測之情形，分析南橫整體地形變化之貌。申請的第二年則主要是加強環境改正量之模式，並自行開發改正模式，針對大氣壓力及地下水位變化做更深入的研究分析，繪製地體動力模型，利用絕對重力點之重力及GPS值的變化探討台灣造山運動的模式及成因，目前得知重力變化為-2.09  $\mu\text{Gal}/\text{year}$ ，和GPS 0.45  $\text{cm}/\text{year}$ 的變化趨勢一致。

2011年之量測計畫為重新比對台灣絕對重力儀FG5-224及法國絕對重力儀FG5-228兩者之差距，將分析從2006年至2010年之所有絕對及相對重力成果，配合長時間GPS之連續觀測，討論台灣造山運動的變化，由於期間遇到莫拉颱風及

無數次地震影響，本研究最後成果將針對自然環境造成的影響提出更進一步的探討。

由於本計畫是長期監測南橫之重力及GPS變化，而南橫通過海岸山脈斷層南段、玉里斷層、中央山脈斷層、左鎮斷層、觸口斷層及新化斷層等，由於活斷層對於地表會有二種破壞機制，分別是地盤的錯動和異常激烈的地震動（侯進雄，2004），本計畫之成果將有助於提供地質學在地震防災的研究上有更多的參考資料，對於基礎地球科學的研究也提供重要的數據。

#### **經過長時間的國際合作目前的成果能達到：**

一、利用實測資料來分析台灣造山運動之模式。並將成果分享各相關領域，期望推廣重力量測，利用重力量測之方式能以較經濟的方式來監測台灣斷層及地質的變化。

二、加入全球地體動力計畫，將台灣現有之超導重力、絕對重力及相對重力之成果，能自行分析及應用，提昇台灣自有研究之能力。

三、由於災害預防之觀念已日趨重要，各山區在經過數次颱風及地震之侵襲下，造成許多土石流、斷橋、地基流失等問題，而重力量測可以在地質變化之初期即偵測得到，達到預警的功效。

四、台灣東部地質堅硬，重力量測成果穩定，而西部則是以較軟之地質，在重力實測結果有很明顯之不同，而台灣造山運動目前以AG3最為明顯，期望能有更多的數據來證明之前成果。

五、利用超導長期量測所得之重力數據，來求得各分潮之頻譜來代替全球模式，求得更精確之絕對重力值。

六、分析歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊在經過數年之變化情形，利用實測數據來求得之間的相對關係。

對於參與之工作人員，經由台灣與法方的互相交流提升台灣在重力相關領域中，各改正量及影響成因有更進一步的認知，結合台灣實測數據分析之能力及法國方面對地質環境意義之解釋，培養優秀之人材，經過長期的合作對台灣發展重力技術研究及提升有非常重要的幫助。

## 7. 參考文獻(紅色跟本計畫有相關)

- 黃金維、李瓊武、彭森祥、鄭景中、高瑞其、汪俊寰、謝文祺，國家重力基準站結案報告，2008年6月
- 張為民、王勇、許厚澤、張赤軍、郝興華、劉明，用FG5絕對重力儀檢測青藏高原拉薩點的隆升，科學通報第45卷第20期，2000年10月
- 陳文山、楊志成、楊小青、吳樂群、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄、李元希、石同生、盧詠丁，從構造地形探討嘉南地區的活動構造。經濟部中央地質調查所彙刊，2004年。
- 侯進雄、陳建良、王菁穗、謝中敏、鍾瑋、鍾令和、陳彥甫，台灣西南地區地表斷層監測之近況與成果，經濟部中央地質調查所，2004年10月
- Angelier, J. (1986), *Preface Tectonophysics* 125.
- Angelier, J. (1990), Geodynamic Evolution of the Eastern Eurasian Margin, *Tectonophysics* 183(1-4): special issue, 362 pp.
- Chapple, W. M. (1978), Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89, 1189-1198.
- Chen, H. (1984), Crustal uplift and subsidence in Taiwan: an account based upon retriangulation results. *Spec. Publ. Cent. Geol. Surv.* 3, 127-140.
- Dahlen, F., A., Suppe, J., Davis, D. (1984), Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: cohesive Coulomb theory. *J. Geophys. Res.* 89 (B12), 10,087-10101.
- Davis, D., J. Suppe, F. Dahlen (1983), Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *J. Geophys. Res.* 88(B2), 1153-1172.
- Ho, C. (1986), A synthesis of the geologic evolution of Taiwan, *Tectonophysics* 125, 1-16
- Hung, J., Wiltschko, D.V., Lin, H.C., Hickman, J.B., Fang, P. and Bock, Y., (1999), Structure and motion of the southwestern Taiwan fold and thrust belt. *TAO*, v.10, no. 3, 543-568.
- Hwang, C., L.S. Hwang (2002), Use of geoid for assessing trigonometric height accuracy and detecting vertical land motion, *Journal of Surveying Engineering*, ASCE, 128 (1), pp. 1-20.
- Hwang, C., R. Kao, C. Cheng, J. Huang, C. Lee, T. Sato, Results from parallel observations of superconducting and absolute gravimeters and GPS at the Hsinchu station of Global Geodynamics Project, Taiwan. *J. Geophys. Res.* 114 (B07406), 2009. Doi:10.1029/2008JB006195

- Hwang, C., J. F. Huang and S. Jan, Short-period and shallow-water tide-induced gravity effects along the southeast China and Taiwan coasts: validation by superconducting and absolute gravimetry (2010), submitted to *Geophysical Journal International*.
- Koch, K.R. (1987), *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*, Springer, Berlin.
- Malavieille, J., Trullenque, G. (2009), Corrected proof. Consequences of continental subduction on forearc basin and accretionary wedge deformation in SE Taiwan: insights from analogue modeling. *Tectonophysics*, v.479, 43-51.
- Moritz, H., Mueller, I. I. (1987)*Earth Rotation: Theory and Observation*, Unger Publ. Comp., New York.
- Mouyen, M., Masson F., Hwang, C., Cheng C.-C., Cattin, R., Lee, C.W., Moigne, N., Hinderer, J., Malavieille, J., Bayer, R., Luck, B. (2009), Expected Temporal Absolute Gravity change across the Taiwanese Orogen, a modeling approach, *Journal of Geodynamics*, Vol. 48, No. 3-5, pp. 284-291.
- Mouyen, M., F. Masson, C. Hwang, C. C. Cheng and N. Le Moigne, Time-lapse relative gravity measurements over wide and mountainous area in Taiwan, submitted to *Geophysics*, 2010.
- Okada, Y., (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 1135-1154.
- Okada, Y., (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1018-1040.
- Rabbel, W. and Zschau, J. (1985), Static Deformations and Gravity Changes at the Earth's Surface due to Atmospheric Loading[J]. *J Geophysics*, 56(2):81-99
- Shen, W. B., D. Wang and C. Hwang, Anomalous signals prior to Wenchuan earthquake detected by superconducting gravimeters and broadband seismometers records, *Journal of Earth Science*, in press, 2010.
- Sibuet, J.-C. and S.-K. Hsu (1997), Geodynamics of the Taiwan arc-arc collision. *Tectonophysics* 274:221-251.
- Simoès, M., Avouac, J. P., (2006). Investigating the kinematics of the mountain building in Taiwan from the spatiotemporal evolution of the foreland and basin and western foothills. *J. Geophys. Res.* 111, B10401, doi:10.1029/2005JB004209.
- Sun H.-P. (1997), Atmospheric Gravity Green's Functions. *Chinese Science Bulletin*, 42(15):1640-1646.
- Teng, L. S. (1990), Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics* 183: 57-76.
- Torge, W (1989) *Gravimetry*, Walter de Gruyter, Berlin.
- Wenzel H. (1997), ETGTAB software.

- Won, I. J., Bevis, M., (1987). Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geo447 physics* 52, 232-238.
- Xu, H.-Z. and Mao, W.-J. (1988), Loading Tide Corrections on Chinese Continent. *Science in China (series B)*, (9):984-995.
- Yu, S.-B, Chen, H.-Y., Kuo, L.-C., 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics* 274, 41-59.
- Yu, S.B., Y.J. Hsu, L.C. Kuo, H.Y. Chen, and C.C. Liu (2003), PS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*108 (B11): Art. No. 2520.

無衍生研發成果推廣資料

## 98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

<b>計畫主持人：</b> 黃金維		<b>計畫編號：</b> 98-2116-M-009-001-					
<b>計畫名稱：</b> 以絕對重力研究台灣造山運動:觀測與模式比較							
成果項目		量化			單位	備註(質化說明:如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等)	
		實際已達成數(被接受或已發表)	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	1	1	100%		2010 第二十九屆測量及空間資訊研討會
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 (本國籍)	碩士生	5	5	50%	人次	彭千惠, 羅元旒, 姚鎧凱, 蘇洵韻, 吳夢伶
		博士生	2	2	80%		高瑞其, 高豫麒
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

國外	論文著作	期刊論文	3	3	100%	篇	1. Results from parallel observations of superconducting and absolute gravimeters and GPS at the Hsinchu station of Global Geodynamics Project, Taiwan.
		研究報告/技術報告	0	0	100%		2. Expected temporal absolute gravity change across the Taiwanese Orogen, a modeling approach
		研討會論文	0	0	100%		3. Anomalous signals prior to Wenchuan earthquake detected by superconducting gravimeters and broadband seismometers records, Journal of Earth Science, in press, 2010.
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	章/本 件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件 千元	
		權利金	0	0	100%		
	參與計畫人力 (外國籍)	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	1	1	100%		Maxime Mouyen
		博士後研究員	2	2	80%		Frederic Masson, Jacques Hinder
		專任助理	1	1	100%		Nicolas Lemoigne



<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>已投稿審核中有 2 篇</p> <p>1. Hwang, C, JF Huang and S Jan, Short-period and shallow-water tide-induced gravity effects along the southeast China and Taiwan coasts: validation by superconducting and absolute gravimetry, submitted to Geophysical Journal International, 2010.</p> <p>2. Mouyen, M, F Masson, C Hwang, CC Cheng and N Le Moigne, Time-lapse relative gravity measurements over wide and mountainous area in Taiwan, submitted to Geophysics, 2010.</p> <p>研討會 2010.6.20-6.22 舉辦第二屆亞洲超導重力研討會</p>
--	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	



# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

已發表 3 篇，另有 2 篇審查中

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

學術成就：分別在 Journal of Geophysical Research(IF=3.147), Journal of Geodynamics(IF=1.692)及 Journal of Earth Science 各發表一篇文章，共三篇

技術創新：利用實驗室等級的 FG5 長時間量測造山運動，得到高精度的成果，將以往只看單點微觀的高度變化，擴大成巨觀的橫斷面空間變化

社會影響：許多災害都是在未發生前累積能量，用重力的方式來量測質量變化的影響比單純用 GPS 有更佳的說服力