

# 國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

台灣大屯山群地區之時變重力觀測及  
增益相對重力網精度之研究

Time-lapse gravity monitoring and enhancement of relative  
gravity accuracy at Tatun Volcano Group of Taiwan

研究生：林健輝

指導教授：黃金維 教授

中華民國一〇二年七月

台灣大屯山群地區之時變重力觀測及

增益相對重力網精度之研究

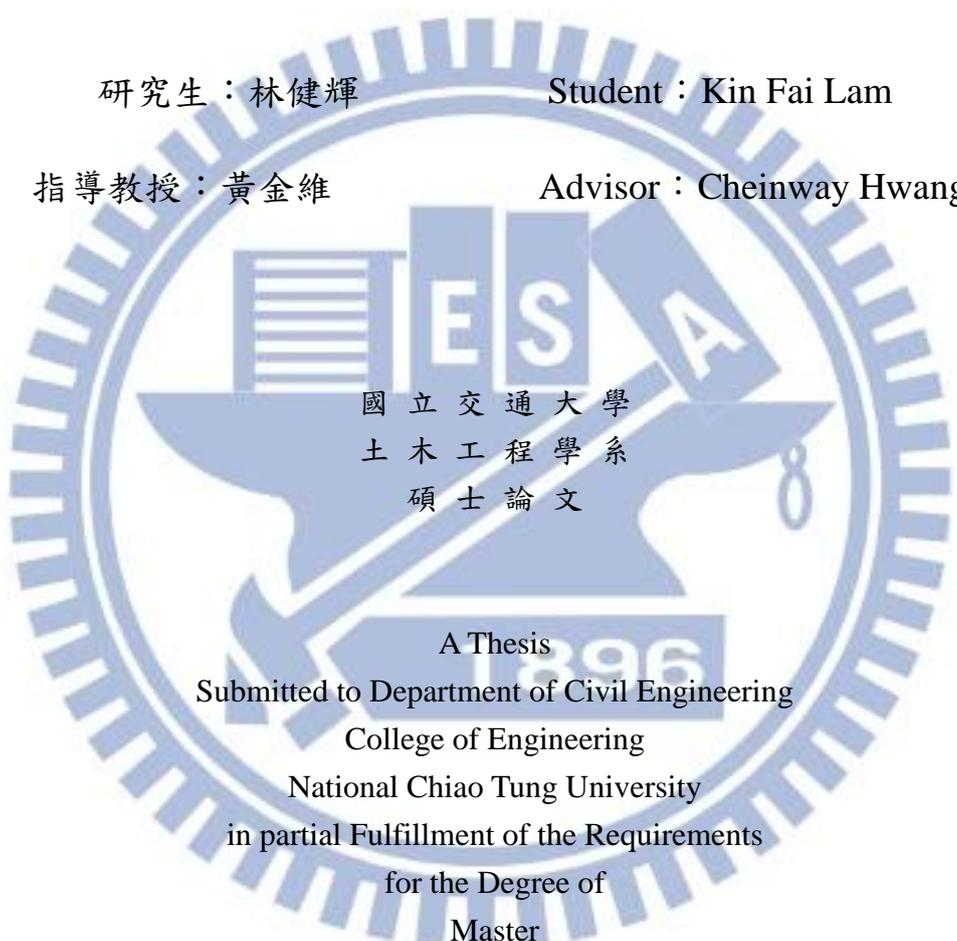
Time-lapse gravity monitoring and enhancement of relative  
gravity accuracy at Tatun Volcano Group of Taiwan

研究生：林健輝

Student：Kin Fai Lam

指導教授：黃金維

Advisor：Cheinway Hwang



國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文

A Thesis  
Submitted to Department of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in

Civil Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

# 台灣大屯山群地區之時變重力觀測及

## 增益相對重力網精度之研究

研究生：林健輝

指導教授：黃金維

國立交通大學土木工程學系

### 摘要

本研究區之時變重力觀測網的設置以陽明山衛星追蹤站(YMSG)為中心，在2012年間分成四期的監測時期，測量規劃以32個相對重力點搭配5個絕對重力點的加密方式來進行重力網形監測工作，並考量儀器的漂移因素及絕對重力點的位置來分配成五條主要監測路線，監測儀器主要採用兩台相對重力儀Scintrex CG-5來進行相對重力點監測和一台絕對重力儀Micro-g LaCoste FG5來對絕對重力點進行監測，並經過重力網平差程式(gravnet)平差處理及進行以下增益精度方法：第一方面，在相對重力值經過海潮改正模式(SGOTL模式)的改正後能使重力網平差精度平均提升約1.4%~6.2%；第二方面，運用 $-0.35\mu\text{gal/hPa}$ 的大氣壓力導納係數(gravity-atmosphere admittance factor)來進行氣壓改正能使在第二期監測時期的平差精度平均可提升 $1\mu\text{gal}$ ；第三方面，運用穩定的CG-5原始觀測數據，研究以有效的資料篩選處理方法，經過資料篩選處理後能使平差後的重力網平差精度提升約11.1%~53.8%。第四方面，設計6種的平差模式測試，運用有效提高平差精度之平差模式設定，使本研究區之平差後的共四期標準差平均達 $7.8\mu\text{gal}$ ；最後應用於研究區之時變重力監測，經過以第一期為基準時間，通過第二、三、四期各自與第一期間產生的重力差值( $\Delta g_1^2, \Delta g_1^3, \Delta g_1^4$ )比較，經過95%信心水平的顯著測試後，配合本研究區所用之水井及雨量計資料，並分析和討論各水井水位和累積雨量的相關性及各時期的變化趨勢。

# **Time-lapse gravity monitoring and enhancement of relative gravity accuracy at Tatun Volcano Group of Taiwan**

Student : Kin-Fai Lam

Advisor : Dr. Cheinway Hwang

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## **Abstract**

The study area of the time-lapse, network-type microgravity is located at the Tatun Volcano Group in northern Taiwan. The gravity observation station at the GPS tracking station of Yangming Mountain (YMSG) is the center of gravity network. The gravity network consists of 32 gravity stations, where absolute and relative gravity observations are measured in four campaigns in 2012. The 32 gravity stations are visited by two Scintrex CG-5 relative gravimeters, and one absolute gravimeter (the Micro-g LaCoste FG5 absolute gravimeter) in each campaign. The relative gravimeter measurements in the network is least-squares adjusted using the software gravnet. The enhancement of gravity accuracy is achieved by (1) correction of ocean tide loading effect by the SGOTL model, obtaining improvement percentages of 1.4%-6.2%, (2) use of an gravity-atmosphere admittance factor of  $-0.35 \mu\text{gal/hPa}$  from the T49 superconducting gravimeter, enhancing the gravity accuracy by  $1 \mu\text{gal}$  in the second campaign, (3) use of only stable gravity readings of the raw CG-5 readings, enhancing the gravity accuracy by 11.1% to 53.8%, (4) use of the best adjustment model (selected from six models), achieving a mean gravity accuracy of  $7.8 \mu\text{gal}$ . We computed gravity differences ( $\Delta g_1^2, \Delta g_1^3, \Delta g_1^4$ ) from data in the four campaigns using the first campaign as the reference epoch. Significances of gravity changes are tested at the 95% confidence level. The trends of the gravity changes and their correlations with groundwater levels and precipitations are discussed.

## 誌謝

感謝我的指導老師 黃金維教授，黃金維教授對研究的熱誠與毅力，不斷的用心叮嚀教導，驅使我不斷進步和加強我對研究學習的動力，使我明白到努力不懈是成功的不二法門，獲益良多，並且黃金維老師在百忙的研究工作中，也能抽空來到田徑場上跑步健身，這都是我十分敬佩的。感謝測量及空間資訊組的授課老師：史天元老師、張智安老師和鄭景中老師，感謝老師們在課堂上和課業上的用心教導和對學生的嚴格琢磨，使我能認識到各種測量知識，衷心感謝老師們的教導。感謝郭重言教授、葉大綱教授及口試委員們的蒞臨指導，才能使本論文更臻完善，在此表示深切的感謝。

感謝研究室助理們(綉雯、冠宏、小光)和宇伸(蕭董)學長，感謝你們舉辦的活動和外業事務的幫助，感謝鉅富學長的技术協助，研究人員謝文祺學長的重力儀技術支援和教導，還有中國科學院博士班交流訪問生徐長儀學長的大力幫忙。

感謝測量組研究室的學長學姐們：自強(強哥)、瑞其(小高學長)、啟訓(訓訓哥)、英雄(NATT)、祥鴻(貓哥)、宏銳(Henry)、俊毅(小悶學長)、彥杕(杕杕學長)、新發(發哥)、詠升(大師)、宜珊學姐、紫漪學姐、雅琦學姐。各位學長姐，感謝你們在我困惑時的用心協助，還有感謝你們平常願意與我一同去跑步(如校內的環校比賽)，辛苦你們了，在此衷心感謝，讓我多了一段快樂的跑步回憶。感謝碩士班同學們：俊銘、大任、張朔、以諾、宛宜、尚儒、伯鴻，很高興能與你們在課業上一同打拚，特別是俊銘、大任、張朔你們在學業上的協助與幫忙。

感謝我的家人：慈祥的(外公)黃添寶、慈祥的(外婆)梁金玉、辛勤的(母親)黎金疊、嚴厲的(父親)林錫堂、有霸氣的(弟弟)林志誠，親愛的戴琬欣，有了你們的支持和體諒，使我做事無後顧之憂，能勇於向前。

感謝中央研究院地球科學所、工業技術研究院及國防部軍備局生產製造中心測量隊提供的技術設備及人力支援。感謝中國文化大學大氣科學系游政谷教授提供的雨量資料，中國文化大學地質學系陳柔飛老師提供的水井資料。

# 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌 謝.....	III
目 錄.....	IV
表 目 錄.....	VII
圖 目 錄.....	IX
第一章 前言.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	1
1-3 研究方法.....	3
1-4 論文架構.....	4
第二章 重力儀簡介.....	5
2-1 絕對重力儀 Micro-g LaCoste FG5 之介紹.....	5
2-2 相對重力儀 Scintrex CG-5 之介紹.....	7
2-3 相對重力儀 Graviton EG 型之介紹.....	11
第三章 研究區域資料收集設定及規劃考量.....	12
3-1 研究區域——大屯火山群地區.....	12
3-2 研究資料規劃.....	13
3-2-1 重力網形規劃.....	13
3-2-2 重力網監測時期考量.....	14
3-2-3 重力網的監測點位配置設定.....	14
3-3 絕對重力儀 FG5 的監測方式考量.....	17
3-3-1 絕對重力儀 FG5 的數據收集處理設定.....	17
3-3-2 絕對重力儀 FG5 的精度計算設定.....	18

3-4	相對重力儀 CG-5 的監測方式考量 .....	21
3-4-1	相對重力儀 CG-5 的監測路線與漂移量的考量 .....	21
3-4-2	相對重力儀 CG-5 的數據收集設定考量 .....	21
第四章	重力網形數據處理過程及成效分析 .....	23
4-1	重力網形觀測資料的處理流程 .....	23
4-2	相對重力觀測資料前處理 .....	25
4-3	相對重力值的環境改正 .....	26
4-3-1	地球固體潮 DDW 模型 .....	27
4-3-1-1	地球固體潮模式操作過程 .....	27
4-3-2	海潮負載 SGOTL 模式 .....	30
4-3-2-1	海潮負載 SGOTL 模式操作過程 .....	32
4-3-2-2	海潮負載重力改正值計算操作過程 .....	36
4-3-3	大氣壓力效應 .....	40
4-3-4	極移效應 .....	41
4-4	相對重力值的各改正量綜合處理 .....	43
4-5	絕對重力值之綜合處理及改正模式 .....	45
4-6	整合絕對重力值與相對重力值的歸算 .....	46
4-7	資料篩選處理考量 .....	49
第五章	重力觀測網之平差計算原理 .....	54
5-1	建立相對重力觀測方程式 .....	54
5-2	自由基準平差法 .....	56
5-3	加權約制平差法 .....	58
5-4	平差模式之整體模式測試及偵測粗差 .....	59
5-4-1	整體模式測試 .....	59
5-4-2	偵測粗差 .....	60
5-5	顯著測試 .....	62

第六章	重力網形平差處理模式及時變重力結果分析.....	63
6-1	應用於大屯山研究區之重力網平差模式設定.....	63
6-2	應用於大屯山研究區之重力網平差模式之精度分析.....	64
6-3	應用於大屯山研究區之時變重力變化與分析.....	68
6-3-1	應用於大屯山研究區之時變重力變化量.....	68
6-3-2	應用於大屯山研究區之時變重力變化顯著測試.....	74
6-3-3	應用於大屯山研究區之時變重力顯著變化分析.....	78
6-4	應用於大屯山研究區時變重力之超導值變化及水文變動分析.....	82
第七章	結論與建議.....	89
參考文獻	.....	92
附錄 A	.....	98
附錄 B	.....	99
附錄 C	.....	100
附錄 D	.....	102
作者簡歷	.....	106

## 表 目 錄

表 3-1 相對重力監測網的主要路線和站名 .....	15
表 3-2 相對重力監測主路線之施測往返小段路線和站名 .....	15
表 3-3 相對重力觀測網的 32 個監測站資訊 .....	15
表 3-4 大屯火山區四期的絕對重力儀 FG5 的觀測精度 .....	20
表 3-5 相對重力儀 CG5 的監測資訊.....	22
表 4-1 擎天崗衛星站 YMSG 的 DDW 振幅系數和相位 .....	28
表 4-2 海潮負載合計效應(牛頓引力和彈性效應)重力改正參數(振幅和相位)....	35
表 4-3 第一期數據加入 SGOTL 海潮改正前後的標準差 SD 比較 .....	39
表 4-4 第二期數據加入 SGOTL 海潮改正前後的標準差 SD 比較 .....	39
表 4-5 第三期數據加入 SGOTL 海潮改正前後的標準差 SD 比較 .....	39
表 4-6 第四期數據加入 SGOTL 海潮改正前後標準差 SD 比較 .....	39
表 4-7 運用兩種 admittance 係數(-0.3 及-0.35 $\mu$ gal/hPa)之平差精度比較 .....	41
表 4-8 測站 YMSG 的觀測時段之環境改正效應量.....	44
表 4-9 第一期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值 .....	47
表 4-10 第二期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值 .....	47
表 4-11 第三期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值 .....	48
表 4-12 第四期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值 .....	48
表 4-13 第一期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較.....	52
表 4-14 第二期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較.....	52
表 4-15 第三期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較.....	53
表 4-16 第四期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較.....	53
表 6-1 本研究的新實測五個絕對重力測站的垂直重力梯度值 .....	64
表 6-2 第一期(First campaign)各種平差模式之結果.....	64
表 6-3 第二期(Second campaign)各種平差模式之結果 .....	65

表 6-4 第三期(Third campaign)各種平差模式之結果 .....	65
表 6-5 第四期(Fourth campaign)各種平差模式之結果 .....	65
表 6-6 共四期監測的不同平差模式之標準偏差值 .....	67
表 6-7 第一期及第二期各測站之平差後所得的重力值及標準差 .....	69
表 6-8 第三期及第四期各測站之平差後所得的重力值及標準差 .....	70
表 6-9 共四期監測之 32 個監測站的重力差值及標準差 .....	71
表 6-10 大屯山地區共四期測量平差所得的重力值平均標準差及平均殘差值 ...	74
表 6-11 第二期與第一期之各測站重力差值及 95%信心水平顯著測試結果 .....	75
表 6-12 第三期與第一期之各測站重力差值及 95%信心水平顯著測試結果 .....	76
表 6-13 第四期與第一期之各測站重力差值及 95%信心水平顯著測試結果 .....	77
表 6-14 監測期間 $\Delta T_1^2$ 各路線(顯著測試為變動的監測站)重力差值與標準差 ....	79
表 6-15 監測期間 $\Delta T_1^3$ 各路線(顯著測試為變動的監測站)重力差值與標準差 ....	80
表 6-16 監測期間 $\Delta T_1^4$ 各路線(顯著測試為變動的監測站)重力差值與標準差 ....	81
表 6-17 以 4 月份為基準之水位變化 .....	85
表 6-18 以 5 月份為基準之水位變化 .....	85
表 6-19 四月，七月，九月及十二月之整月份 4 個雨量計的雨量累積表 .....	88

## 圖目錄

圖 2-1 絕對重力儀 FG5 以雷射測距的工作原理 .....	5
圖 2-2 絕對重力儀 FG5 以最小二乘法調整出從鈷原子鐘時間與不同下落高度獲得的數據組 .....	6
圖 2-3 儀器參數 AUTOGRAV 選項設置 .....	8
圖 2-4 DEFINE THE OPTION 設定選項.....	8
圖 2-5 Scintrex CG-5 儀器調平設定.....	9
圖 2-6 Scintrex CG-5 儀器收集重力資料的顯示介面 .....	10
圖 2-7 收集資料結束後 AUTOGRAV FINAL DATA 介面 .....	10
圖 2-8 Graviton-EG 相對重力儀外觀及三腳架的配置圖 .....	11
圖 3-1 大屯火山群地區絕對重力儀和相對重力儀監測分佈高程地形圖 .....	12
圖 3-2 大屯火山群地區絕對重力儀和相對重力儀監測重力網路線圖 .....	13
圖 4-1 重力網觀測資料處理流程圖 .....	24
圖 4-2 Add location 操作示範.....	28
圖 4-3 擎天崗衛星站 YMSG 以 DDW 的 12 個分潮參數解算(2012/4/23~2012/4/26)的地球固體潮效應重力值.....	29
圖 4-4 擎天崗衛星站 YMSG 以 DDW 的 12 個分潮參數解算(2012/4/27~2012/4/28)的地球固體潮效應重力值.....	30
圖 4-5 在 Microsoft DOS 中執行 SGOTL.bat 計算海潮負載重力改正係數的振幅和相位的命令列介面執行顯示過程.....	34
圖 4-6 測站 YMSG 的海潮負載模式(SGOTL 與 GOTIC2)重力效應振幅比較....	35
圖 4-7 在 Microsoft DOS 中執行批次指令檔(otlprdt.bat)的執行過程介面 .....	37
圖 4-8 測站 YMSG 的監測時刻(2012/4/24~4/28)之海潮負載效應重力改正值。	38
圖 4-9 測站 YMSG 在監測期間(2012/4/24~4/48)的極移效應重力值變化 .....	43
圖 4-10 觀測路線 1R 之 YMSG 監測站改正前的原始重力值和改正後的殘餘重力	

的變化量.....	44
圖 4-11 FG5 與 CG5 的重力儀施測的重力值與儀器高度的關聯圖 .....	47
圖 4-1 共四期的 FG5 監測所得並轉化至高度 $h_{CG5}$ 的絕對重力值( $g_{CG5}$ ).....	49
圖 4-13 測站 YMSG 的 CG-5 觀測重力值讀數運作處理時間差值.....	50
圖 4-14 (左圖) YMSG 監測站的觀測重力值 $G_{raw}$ (未經環境改正)和(右圖)YMSG 監測站的觀測儀器內部溫度值.....	51
圖 4-15 (左圖)監測站 YMSG 的傾斜 X 值及(右圖)傾斜差值的變化範圍 .....	51
圖 4-16 (左圖)監測站 YMSG 的傾斜 Y 值及(右圖)傾斜差值的變化範圍 .....	51
圖 5-1 t 分佈之機率密度函數及臨界值的機率函數圖 .....	62
圖 6-1 第一期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖.....	67
圖 6-2 第二期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖.....	67
圖 6-3 第三期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖.....	68
圖 6-4 第四期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖.....	68
圖 6-5 第二期與第一期間( $\Delta T_1^2$ )之 32 個監測站的重力差值( $\Delta g_1^2$ )分佈圖 .....	72
圖 6-6 第三期與第一期間( $\Delta T_1^3$ )之 32 個監測站的重力差值( $\Delta g_1^3$ )分佈圖 .....	73
圖 6-7 第四期與第一期間( $\Delta T_1^4$ )之 32 個監測站的重力差值( $\Delta g_1^4$ )分佈圖 .....	73
圖 6-8 監測期間 $\Delta T_1^2$ 的各測站之地形分佈圖(經過顯著測試為變動的測站).....	79
圖 6-9 監測期間 $\Delta T_1^3$ 的各測站之地形分佈圖(經過顯著測試為變動的測站).....	80
圖 6-10 監測期間 $\Delta T_1^4$ 的各測站之地形分佈圖(經過顯著測試為變動的測站).....	81
圖 6-11 陽明山擎天崗 SG 超導重力儀之監測重力變化圖 .....	82
圖 6-12 鄰近超導重力站的絕對重力測站(YMSG 及 YAG3)之重力變化圖.....	82
圖 6-13 鄰近超導重力站的絕對重力測站 YAG2 之重力變化圖	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 6-14 大屯山研究區之絕對重力監測站、相對重力監測站、水井及雨量計位置地形分佈圖.....	83
圖 6-15 測站 YAG2 的重力變化與 TW23 號水井的水位變化趨勢.....	84

圖 6-16 水井(TW17, TW20, TW21 及 TW22)水位變化圖 .....	85
圖 6-17 水井(TW11, TW25 及 TW26)水位變化圖 .....	86
圖 6-18 雨量計(AR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖 .....	87
圖 6-19 雨量計(BR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖 .....	87
圖 6-20 雨量計(CR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖 .....	87
圖 6-21 雨量計(DR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖 .....	88
圖 6-22 四月, 七月, 九月及十二月之整月份 4 個雨量計的雨量累積圖 .....	88



# 第一章 前言

## 1-1 研究動機與目的

在台灣北部地區的大屯火山群地區包含了數個火山亞群，如大屯山、七星山、紗帽山、小觀音山、竹子山亞群等，並且在大屯火山群的底部還包含着金山斷層及其所衍生的裂縫與小斷層，遠在過去數十萬年前已發生劇烈的噴發活動。楊燦堯(2006)指出大屯火山群之最近一次爆發時間為 5 千年前，使大屯火山為具有潛在性的活動型態；由於大屯火山群距離台北地區約為 15 公里，不論是斷層錯動還是火山爆發都可能造成嚴重的人命傷亡、建築物損毀及地形地物之重大變動，故此，本研究以大屯山群地區(包含七星山)為研究對象地區展開重力觀測工作，為了解大屯山群地區隨着季度時間改變而產生的重力變化，於大屯山群地區進行三十二個重力點的相對重力值監測，並探究增益大屯山群地區的相對重力網之精度研究；相對重力網精度的提升可以從網形的設計、環境改正、儀器漂移來進行，其中影響着重力環境的因素包括為固體潮、海潮、極移(polar motion)，氣壓等影響(Torge, 1989; Moritz & Mueller, 1987)；並且重力網形的設計關係著平差後的精度，需要依照環境的設計原則來規劃網形(魏祥鴻，2005)，相對重力網的精度提高，可以使經過平差後所得的重力值之時變重力變化量更具顯著性的意義。

## 1-2 文獻回顧

在地球科學界相對重力潮汐效應(tidal effect)和儀器的漂移是採用經驗的法則，修正此兩項造成之影響。在施測的過程中，需考量儀器收集數據的設定方法，並規劃各監測路線，以迴路(loop)方式進行，並考量儀器的漂移，在數個小時內返回出發之基點，依各點所讀數時間，將差值平均分配，並把漂移現象在數個小時內當作線性的方式來處理(顏宏元，1991；葉義雄 等，1989；Jacob et al., 2010；Mouyen et al., 2013)。本研究以數個小時內返回出發之基點為原則，儀器的漂移採用重力網平差程式 gravnet.f90 的線性漂移平差模式設定(Hwang et al., 2002)。

海潮負載最主要受日月引力影響，尤其是月亮。一日中有兩次高潮及兩次低潮的潮汐稱為半日周潮(Semidiurnal tide)一日中有一次高低潮稱為日周潮(diurnal tide)(殷富，1984)。海潮負載對重力影響可應用格林函數及潮高積分來模擬(Farrel, 1972；Yang et al., 1996；陳南松，2003)。為提高重力測量成果精度，需進行海潮負載改正，根據 Hwang et al.(2009)研究指出，海潮負載 M2 分潮效應對國內重力觀測之影響可達 3 至 16  $\mu\text{gal}$ 。

海潮負載重力效應，本文採用黃鉅富(2012)的 SGOTL 模式以計算重力觀測改正量；其中數值積分所使用之格林函數理論公式，該 SGOLT 模式考慮與高程相依(Hwang & Huang, 2012)。對於離島及近岸地區，如不考慮測站高度，分析其影響達 1  $\mu\text{gal}$ ；以台灣地區超導重力(Superconducting gravimeter, SG)及絕對重力(Absolute gravimeter, AG)實測重力觀測進行案例研析，SGOTL 與其他既有 GOTIC2、g7.0 及 BS 模式相比，表現較佳，除因 SGOTL 模式使用嚴謹理論公式及數值積分方法外，如特別考慮高解析之區域海潮模型、海岸線網格，可提高計算成果精度(黃鉅富，2012；Hwang & Huang, 2012)。

在各個相對重力測站設定以 90 秒來收集 1 筆讀數，共收集 15 筆平均數據為觀測組數據；在 15 筆數據中為了取得穩定的數據，需要注意監測數據的穩定度，如該監測點獲取的觀測組數據需要附合最後 3 筆變化量應少於 5  $\mu\text{gal}$  及檢視儀器內部溫度的變化情形，以利提高數據穩定度(Mouyen et al., 2013)

利用重力網之自由基準及加權約制平差理論發展出的平差相對重力之重力網平差程式 gravnet.f90，已經過測試結果證明理論之推導及程式的撰寫皆無誤差，經由平差計算後得到的新重力值，再與舊值通過顯著測試來進行檢測，即可得知重力變動與否(李莉華，2001)。本研究以分析共四期的大屯山研究區監測的平差後重力值，以分析兩期間的平差後重力差值，其中兩期之重力差值比較分別為第二期與第一期之重力差值、第三期與第一期之重力差值和第四期與第一期之重力差值，並通過 95%信心水平的顯著測試來進行檢測，以得知顯著變動重力點觀測站的分佈。

### 1-3 研究方法

本研究於大屯山群研究地區進行相對重力值監測工作，研究方法主要區分為四項。第一項，研究設置 5 個絕對點監測站，並配置 32 個重力測站來構成相對重力網的方法，重力監測點主要分佈於以內政部所設置之陽明山擎天崗衛星追蹤站(YMSG)為中心所構成的相對重力監測網，根據以上的 5 個絕對重力點觀測樁位，並考量時間對重力儀器漂移的影響，從而規劃 5 條相對重力監測路線，其中包括途經七星山之重力監測點路線。

第二項，將所得的重力觀測資料進行環境改正、儀器漂移改正等重力觀測量改正，使重力觀測資料處於標準(正常)環境條件的地球狀態下，其中的環境改正因素主要包括為固體潮、海潮、極移(polar motion)和氣壓之效應影響(Torge, 1989; Moritz & Mueller, 1987)，當中的海潮效應改正模式採用新的 SGOTL 模式方法，從而分析經過改正後精度提高之研究，並且進行重力觀測量的資料篩選之研究，分析在經過資料篩選處理後可達到平差精度改善的效果。

第三項，通過運用包含自由基準方法及加權約制方法編寫的重力網平差程式 gravnet.f90 (Hwang et al., 2002) ，並且適當地加入絕對重力監測點及使用最佳之平差模式設定，使所得的標準偏差平均值為最小，在經過重力平差網程式進行網形平差計算後，可解出各相對測點的平差後重力值及重力儀的漂移率，並藉由 Pope's  $\tau$ -test 方法(Pope, 1976)反覆偵查粗差加以濾除，以提高解算精度。

第四項，經由上述之處理及重力平差網程式之平差後，所得的平差後的監測點重力值，再經過在 2012 年共分成四期進行重力監測工作，並以各期觀測資料所得的平差後重力值與相對於第一期觀測資料的平差後重力值進行差異比較，以 Koch(1987)的顯著測試方法，分析大屯火山群研究地區隨着季度時間改變而產生的重力變化，並配合陽明山擎天崗的超導重力儀(Superconducting gravimeter, SG)的連續重力觀測資料訊號分析，考量由大屯火山群研究地區之各水井水位變化資料及雨量計資料之研究，基於上述所得資料的分析影響着時變重力變化的成因。

## 1-4 論文架構

本文共分為七章，各章節內容之安排簡述如下：

第一章：本論文之前言，說明本研究之研究動機、文獻回顧、研究方法及論文架構。

第二章：介紹本研究所運用的重力儀，包括絕對重力儀 Micro-g LaCoste FG5 之測量方法介紹、相對重力儀 Scintrex CG-5 之測量介紹及相對重力儀 Graviton EG 型。

第三章：介紹研究區域資料收集設定及規劃考量，包括研究區域之網形規劃、重力網監測時期考量、重力網的監測點位配置設定、絕對重力儀 FG5 和相對重力儀 CG-5 的數據收集處理設定及現場監測方式設定。

第四章：介紹重力網形數據處理過程及成效分析，包括詳細的重力網形觀測資料的處理流程、相對重力觀測資料前處理、相對重力值的環境改正方式、相對重力值的各改正量綜合處理、絕對重力值之綜合處理及改正模式、整合絕對重力值與相對重力值的歸算，以及資料篩選處理考量介紹。

第五章：介紹重力觀測網之平差計算原理，包括相對重力觀測方程式之介紹、自由基準及加權約制平差法、平差模式之整體模式測試、偵測粗差原理、以及顯著測試。

第六章：介紹重力網形平差處理模式及結果分析，包括應用於大屯山研究區之重力網平差模式設定，應用於大屯山研究區的重力網平差模式之精度分析，應用於大屯山研究區之時變重力顯著變化分析及時變重力之水文變動分析。

第七章：總結本研究之結論及建議。

## 第二章 重力儀簡介

### 2-1 絕對重力儀 Micro-g LaCoste FG5 之介紹

絕對重力儀 FG5 具有可移動性監測及高精度的特點，在標準操作下可達約  $1\sim 2\ \mu\text{gal}$  ( $1\ \mu\text{gal} = 10^{-8}\text{m/s}^2$ ) 的精度表現 (Micro-g LaCoste, 2006)。絕對重力儀 FG5 的主要組成包括落體腔 (Dropping Chamber)、雷射干涉儀 (Interferometer)、超彈簧 (Superspring)、系統控制器 (System controller) 及電子儀器設備 (Electronics) 等。

絕對重力儀 FG5 的測量原理為根據自由落體法來進行測量，以一個稜鏡體 (測試下落體, test object) 在真空落體腔中，由機械設備垂直提升稜鏡體，隨後自由下落約 20 公分的距離，稜鏡體從落體腔的頂部下落期間，雷射光束以分光鏡分別反射到下落的稜鏡體和另一個固定的參考稜鏡上 (如圖 2-1)；在下落的稜鏡體落向真空腔的底部的過程中，用雷射干涉儀來確定稜鏡體下落過程中不同時刻的位置距離，電子干涉儀以稜鏡體每下落  $1/2$  個激光波長就相應地產生光學干涉條紋，利用光電探測器進行計算及檢測光學干涉條紋，並以鈷原子鐘計時，故此可獲得準確的時間間隔與不同下落高度的數據組 (如圖 2-2)，根據最小二乘法來擬合這些數據組來計算出重力加速度  $g$  值 (Micro-g LaCoste, 2006)。

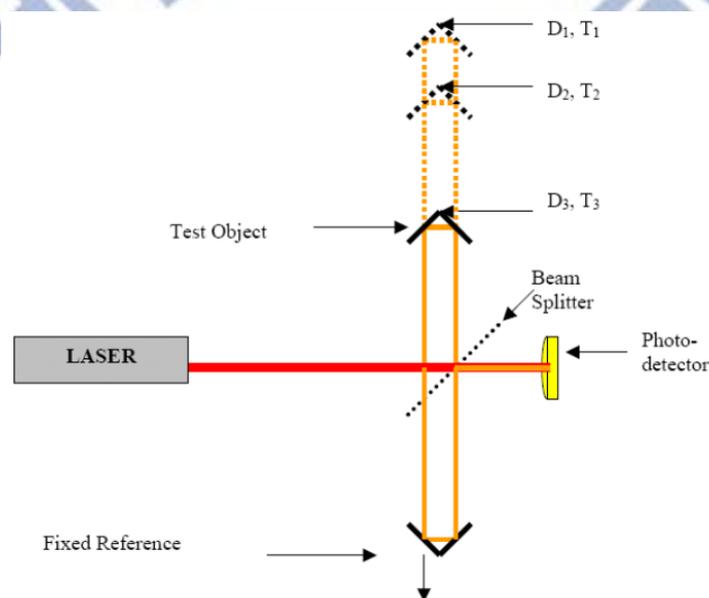


圖2-1 絕對重力儀 FG5 以雷射測距的工作原理 (圖像來源 Micro-g LaCoste, 2006)

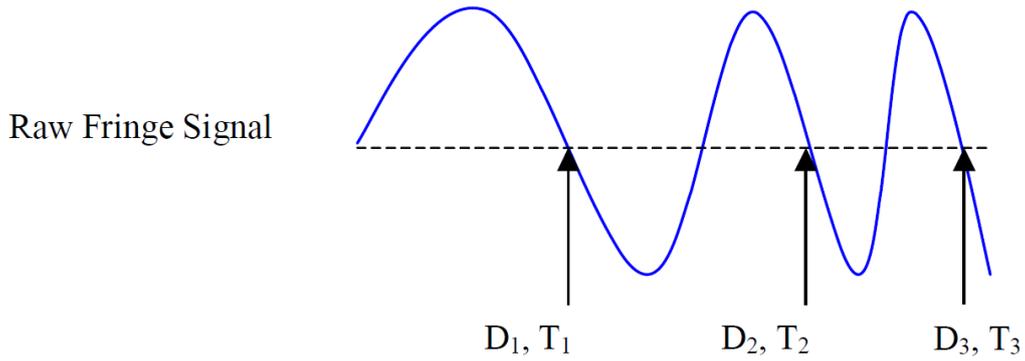


圖2-2 FG5 以最小二乘法調整出從鈷原子鐘時間與不同下落高度獲得的數據組

(圖像來源 Micro-g LaCoste, 2006)

絕對重力儀 FG5 的所測量出的絕對重力值  $g$  值，以準確的鈷原子時間間隔與對應不同下落高度的數據組，並按照自由落體方程式如(2-1)式所示。

$$x_i = x_0 + v_0 t_i + \frac{1}{2} g t_i^2 \quad (2-1) \text{式}$$

在(2-1)式中  $x_i$  為位置  $i$  的自由落體下落距離； $x_0$  為自由落體的起始高度； $t_i$  為下落對應的時間； $v_0$  為起始高度的下落速度； $g$  為監測點的重力值。如圖 2-1、圖 2-2 中設落體腔的頂端位置高度為  $D_0$ ，則  $x_1 = D_1 - D_0$ 、 $x_2 = D_2 - D_0$ 、 $x_3 = D_3 - D_0$ ；在(2-1)式中的  $g$  值，實際上受到地球重力場梯度的變化，故此需考量重力梯度值  $\gamma$  的影響，自由落體式(2-1)式可編寫成下式(Micro-g LaCoste, 2006)：

$$x_i = x_0 + v_0 t_i + \frac{1}{2} g_0 t_i^2 + \frac{1}{2} \gamma g_0 t_i^2 + \frac{1}{6} \gamma v_0 t_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 t_i^4 \quad (2-2) \text{式}$$

在(2-2)式中的  $g_0$  為起始位置  $x_0$  的重力值； $\gamma$  為重力梯度值；根據 Micro-g LaCoste(2006)指出由於干涉儀反射下落體(稜鏡體)的光線路徑在稜鏡體自由下落時會逐漸變短，並受限於光速  $c$ ，所以下落過程中的底部干涉條紋到達時間會出現延遲，故此考量遲緩的時間  $\tilde{t}_i$ ，(2-2)式更改編寫成(2-3)式(Micro-g LaCoste, 2006)。

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{1}{2} g_0 \tilde{t}_i^2 + \frac{1}{2} \gamma g_0 \tilde{t}_i^2 + \frac{1}{6} \gamma v_0 \tilde{t}_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{t}_i^4 \quad (2-3) \text{式}$$

在(2-3)式中的  $g_0$  為起始位置  $x_0$  的重力值；遲緩的時間  $\tilde{t}_i = t_0 - \frac{(x_i - x_0)}{c}$ 。由(2-3)式轉換所得的重力值按照最小二乘法來解算出最佳的絕對重力估值  $g_0$ ，此值為自由落體的頂部下落位置的絕對重力值，接著可依據重力梯度值  $\gamma$  來歸算至使用者需求的高度位置的重力值。

## 2-2 相對重力儀 Scintrex CG-5 之介紹

相對重力儀 Scintrex CG-5 是加拿大 Scintrex 公司制造生產的新型相對重力儀，採用數位化的訊號分析處理器裝置，可以實現自動測量，可選擇地球固體潮改正、傾斜改正、溫度改正和濾波等修正，正常環境操作下儀器提供的參考精度約為  $5 \mu \text{ gal}$  (Scintrex Limited, 2010)。

相對重力儀 Scintrex CG-5 的測量原理與傳統 L&R 重力儀的機械式垂臂測量原理不同(LaCoste and Romberg, 2001)，CG-5 儀器採用的感測系統為電容感測器結合電子回饋力的整合系統，使感測體(mass)受到電子回饋系統的電子回復力來回復至零點位置；儀器設計上的感測體(mass)為平衡於石英彈簧，故此，當受到重力變化而引起石英彈簧長度變化時，透過電容感測器量測感測體(mass)的位移變化，並以電子回饋系統施行電壓，使感測體回復到零點位置，繼而測量出回饋系統所需的電壓值，藉由所得的電壓值可關聯於重力的變化量(Scintrex Limited, 2010)。

相對重力儀 Scintrex CG-5 在野外測量的基本操作(Scintrex Limited, 2010)包括 9 點：(1)參數初始化設置；(2)儀器放置在三角架上；(3)調整三角架螺栓使三角架水平；(4)設置地形校正參數(可選用)；(5)開始讀數；(6)等待測量自動結束或人為結束；(7)保存數據；(8)導出數據；(9)清除內容。

相對重力儀 Scintrex CG-5 重力值測量的主要流程(Scintrex Limited, 2010)如下所示。

(1) 參數初始化設置：開機後，需加入參數設定分為儀器參數、記錄與循環

時間設定。儀器參數設置在 AUTOGRAV 選項(如圖 2-3)，設定包括潮潮汐校正 (Tide Correct)、連續傾斜校正(Con Tilt Corr)、自動去除(Auto Reject)、地形校正 (Terrain Corr)、震動濾波設定(Seismic Filter)和原始數據存儲(Save Raw Data)；讀數記錄與循環時間設定 DEFINE THE OPTION 選項(如圖 2-4)，包括設置讀數時間(Real time)、循環時間(Cycle time)、循環次數(# of Cycle)、啟動延時(Start Delay)、測線間隔距離(Line separation)、測站間隔(Station separation)、自動測站編號(Auto station Inc.)、LCD 加熱器(LCD Heater)和記錄環境溫度(Record Amb.Temp)等，儀器內部參數說明詳述於 Scintrex CG-5 操作手冊(Scintrex Limited, 2010)

AUTOGRAV SETUP		NEXT PAGE
Tide Correct.:	YES	
Cont. Tilt. Corr:	YES	
Auto Reject:	YES	
Terrain Corr.:	NO	FUNCT EDIT
Seismic Filter:	YES	
Save Raw Data:	NO	CANCEL
		RECORD
Sel: ↑↓ Ch: →←		90%

圖2-3 儀器參數 AUTOGRAV 選項設置(Scintrex Limited, 2010)

DEFINE THE OPTIONS 09:16		FINAL KEY
Read Time:	60	on off
Factory Flas:	80	
#Of Cycles:	88888	
Start Delay:	4	
Line separation:	0.	FUNCT EDIT
Station separation:	0.	
Auto station inc.:	NO	
Chart Scale:	1	
Measurement:	NUMERIC	
LCD Heater:	OFF	
Record Amb.Temp:	NO	OK
Sel: ↑↓ Ch: Enter #		100%

圖2-4 DEFINE THE OPTION 設定選項(Scintrex Limited, 2010)

(2) 測站點輸入：參數設置完成後按 MEASURE/CLR 鍵，會進入 station designation 介面，在此介面中，可輸入 Station(測站)、Line(測線)以及 Elevation(高程)資訊其中，若在 Options 設置時，Auto station Inc.測站編號自動增加功能選擇 YES，則使用時，一個測量迴圈完成後，測站編號自動增加，不需進行手動進行更改。

(3) 調平設定：按【F5/LEVEL】鍵進入儀器調平，依照螢幕頂部焦爐圖示指示的方向，旋轉三角架的腳螺旋進行儀器調平(如圖 2-5)。水準狀態由十字絲和螢幕底部的弧秒顯示。連續旋轉腳螺旋直到交叉點進入中心小圓的內部( $\pm 10''$ )，螢幕出現笑臉圖示即可。注意先調平 Y 軸(垂直十字絲)，再調整 X 軸。隨後按【F5/READ GRAV】鍵開始測量，儀器進行收集重力資料。

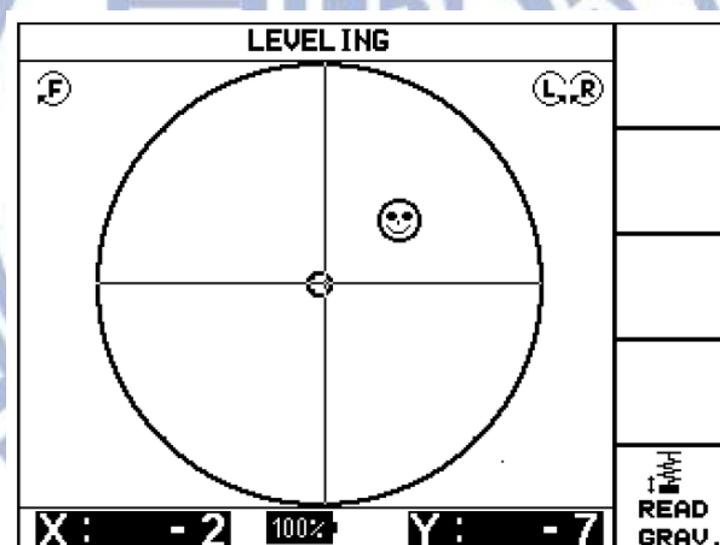


圖2-5 Scintrex CG-5 儀器調平設定(Scintrex Limited, 2010)

(4) 數據收集：在 OPTION 選項介面中選擇了 Numeric(數字)測量模式，並且在經過調平儀器設定和在 station designation 選項中設定完成測站與測線資訊後，進入顯示介面。如圖 2-6 所示，重力值讀數 3773.222mGal 為現時監測所得的重力值，圖 2-6 上方顯示的 n 值(1、2、3、4、5)為分別列出前幾組採樣經改正後的重力結果及時間資訊，並且在重力值讀數下方顯示出時間、溫度、誤差、標準差、傾斜改正、溫度補償等資訊。

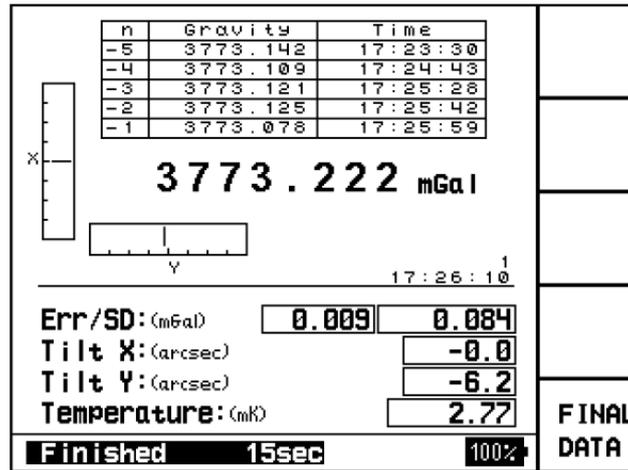


圖2-6 Scintrex CG-5 儀器收集重力資料的顯示介面(Scintrex Limited, 2010)

(5) 收集結束：按選項 F5(Final Data)來結束測量，結束後進入 AUTOGRAV FINAL DATA 介面(如圖 2-7)，在圖 2-7 的 Preceding 欄為最後一筆讀數之前的資料，Current 欄為當前資料，包含了進行濾波和自行設定的改正選項後的當前重力值(Grav)、標準差(SD)、傾斜 X、傾斜 Y、感測器溫度(Temp)、固體潮改正模式(E.T.C.)、讀數時間週期(Dur)、自動刪除率(#Rej)、時間(Time)等。擇 CANCEL 為放棄當前資料，選擇 RECORD 可保存當前資料，並返回 station designation 介面隨後進行下一監測點的測量。

AUTOGRAV FINAL DATA		
ID	Preceding	Current
Grav.	2339.267	<b>2339.252</b>
S.D.	0.049	<b>0.051</b>
TiltX	-2.824	<b>-2.824</b>
TiltY	12.435	<b>12.435</b>
Temp.	0.09	<b>0.09</b>
E.T.C.	-0.028	<b>-0.034</b>
Dur.	64	<b>64</b>
#Rej.	0 = 0.0%	<b>0 = 0.0%</b>
Time	18:11:42	<b>18:20:59</b>
Line	0.S	<b>0.S</b>
Stat.	0.W	<b>0.W</b>
Preceding Recall ↓    :(n- 1)		

**CANCEL**  
**RECORD**

圖2-7 收集資料結束後 AUTOGRAV FINAL DATA 介面(Scintrex Limited, 2010)

### 2-3 相對重力儀 Graviton EG 型之介紹

本研究為考量相對重力儀 CG-5 的緊密監測工作時期及長時間監測後儀器會產生數據漂移的影響，故此在重力梯度值的監測工作為運用相對重力儀 Graviton EG 型來進行施測(施測方法詳述於第 4-6 節)；根據魏祥鴻(2005)指出相對重力儀(Graviton EG)為具有功能整合、全自動化、自動定平的儀器。Graviton EG 的重複精度達到  $1\sim 3\mu\text{gal}$ ，優於 L&R G 型相對重力儀的精度( $10\sim 20\mu\text{gal}$ )，並且 Graviton EG 包含了地球固體潮位模式的改正。Graviton EG 不僅可提供相對重力測量，也可以做長時間觀測及各種不同的實驗等。Graviton-EG 相對重力儀(圖 2-8)主要組成與配件包含下列，區分為四個部分(LaCoste and Romberg, 2002)：

(1) 重力主機：大小  $21.5 \times 22 \times 31 \text{ cm}$ ，重量 9 公斤，主要是以支桿和彈簧相互作用來進行觀測與紀錄。適合外在溫度  $-10^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 。量測範圍  $0\sim 7000\text{mgal}$ ，適合全世界各地方使用。

(2) 電池：兩個 12V 蓄電池，每一個電池在正常操作可使用  $8\sim 10$  小時，另附主機電源線和電池充電器。

(3) 傳輸線：有 RS-232 和 USB 傳輸線，方便把資料從儀器傳至電腦中。

(4) 三角架和平台：在有灌木叢、苔原、沼澤、高草原等。不易架設儀器地點，可用三角架撐高(50cm)來測量。

(5) Graviton-EG 在施測時，如重力點高度不一，需量儀器高。從面板量到地面的監測重力點距離減七英吋(感應器)即是儀器高。



圖2-8 Graviton-EG 相對重力儀外觀及三腳架的配置圖(魏祥鴻，2005)

### 第三章 研究區域資料收集設定及規劃考量

#### 3-1 研究區域——大屯火山群地區

本研究地區範圍約為北緯 25.13 度至 25.19 度，東經 121.525 度至 121.65 度。重力觀測點位主要以內政部所設置之陽明山衛星追蹤站(YMSG)為中心(圖 3-1)，並利用相對重力儀(CG-5)和絕對重力儀(FG5)進行重力網形施測，重力網範圍包含以陽明山擎天崗衛星追蹤站(YMSG)為中心並連接至其東方的大坪國小(YAG4)，其西南方連接至文化大學(YAG1)，及其西北方包括橫越七星山地區連接至湖田國小(YAG2)和小油坑旅客服務中心(YAG3)。

本重力測量網途經的七星山為大屯火山群的中央並為最高的山峰，其主峰海拔高 1,120 公尺，屬為錐形火山，過去頂部有噴火口，隨後經過火山噴發被侵蝕成七個小山頭，並且七星山的東南側與西北側有被斷層切過，形成着不少的溫泉和噴氣孔等，故此其監測路段對該火山地區的探討尤其重要。

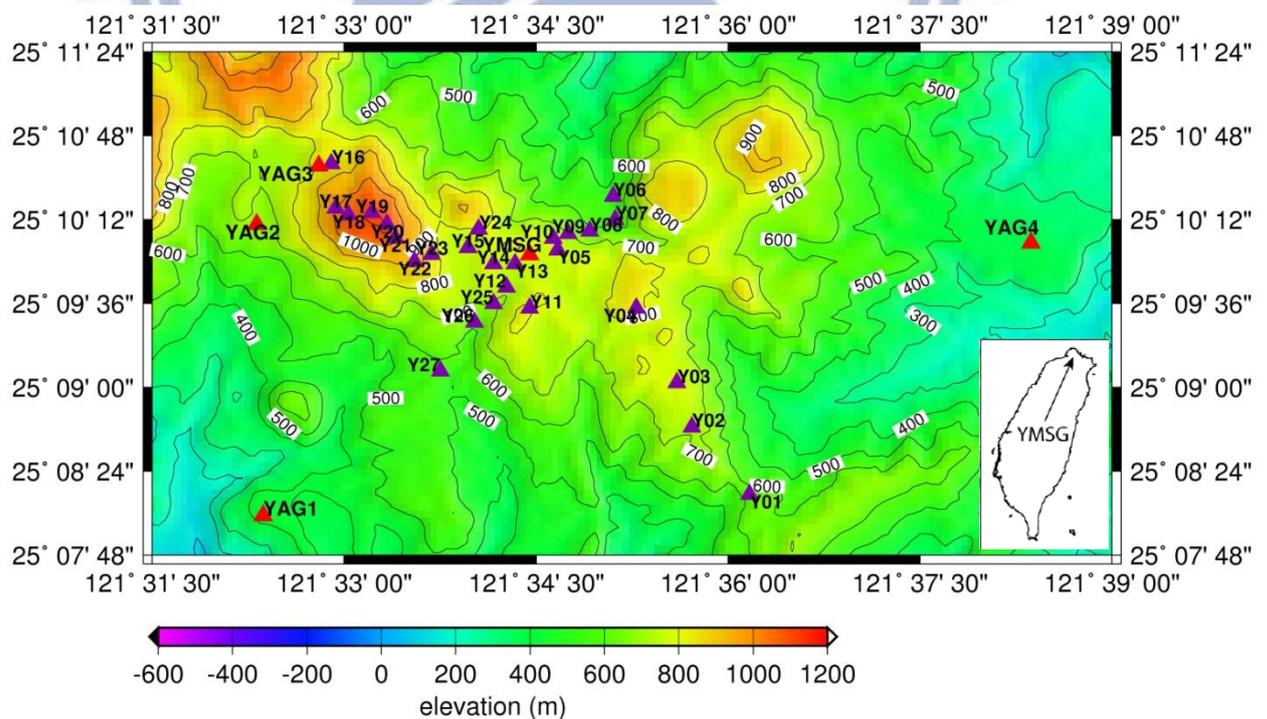


圖3-1大屯火山群地區絕對重力儀 FG5 和相對重力儀 CG-5 監測分佈高程地形圖

(紅色三角形圖示為 FG5 監測點，紅色和紫色三角形圖示皆為 CG-5 監測點)

### 3-2 研究資料規劃

本研究大屯火山地區重力網觀測規劃以絕對重力點搭配相對重力點加密的方式來進行重力網形監測，主要採用兩台相對重力儀 Scintrex CG-5(CG-5 序號 050800136 和 CG-5 序號 050800137)來進行相對重力點監測和一台絕對重力儀 Micro-g LaCoste FG5(FG5 序號 231)來對絕對重力點進行監測。

#### 3-2-1 重力網形規劃

大屯火山地區重力網監測區內建置 5 個絕對重力點觀測樁位，並運用絕對重力儀 FG5 來對絕對重力點樁位進行監測，5 個絕對重力點觀測樁位分別為陽明山擎天崗衛星追蹤站(YMSG)、文化大學(YAG1)、湖田國小哺乳室樓梯旁(YAG2)、小油坑旅客服務中心一樓(YAG3)、大坪國小(YAG4)。

重力網規劃以放射狀的路線規劃，來進行往返重覆施測，主要根據以上的 5 個絕對重力點觀測樁位，規劃 5 條相對重力監測路線，包含 27 個監測點和 5 個絕對重力點合共 32 點，每條相對重力監測路線的開端與結束的監測點都設置在絕對重力點上，以用於約制相對重力點位的觀測量，並運用兩台相對重力儀 CG-5 來進行相對重力點監測，重力網形施測路線圖如下圖 3-2 所示。

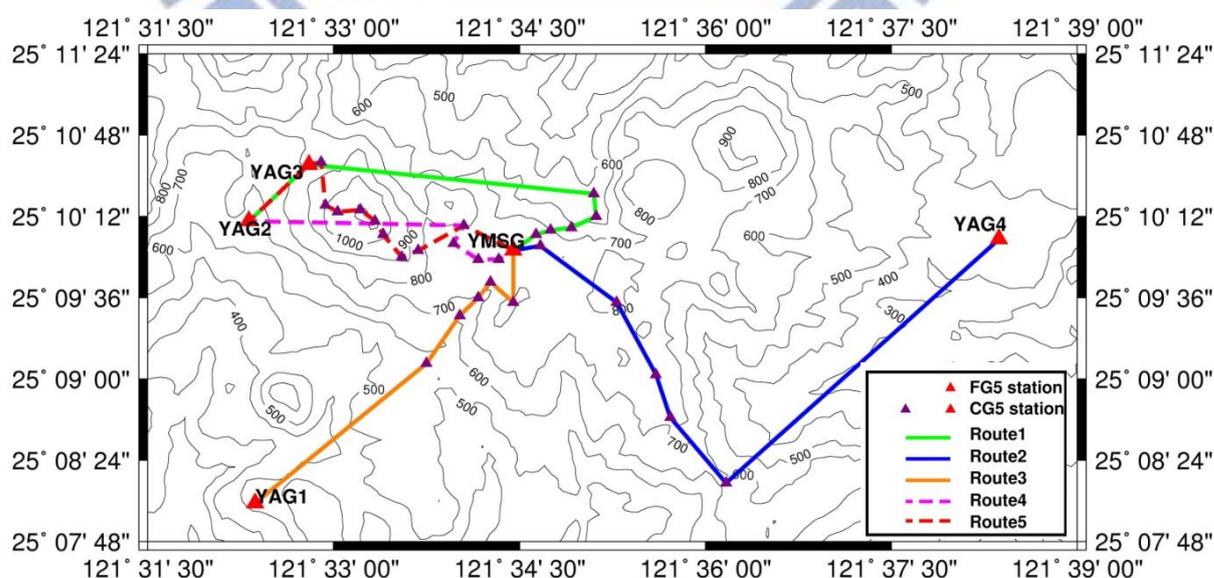


圖3-2 大屯火山群地區絕對重力儀 FG5 和相對重力儀 CG-5 監測重力網路線圖

### 3-2-2 重力網監測時期考量

大屯火山地區重力網監測共 4 期(季)，其中包括豐水期和枯水期為監測時期原則，於大屯火山區域進行重力網監測。相對重力儀 CG-5 施測日程為配合季節性的豐水期和枯水期，並搭配國防部測量隊運用相對重力儀 CG-5 施測日程來進行監測，而絕對重力儀 FG5 的施測時間約為相對重力儀 CG-5 監測前後的一個月期間完成。

### 3-2-3 重力網的監測點位配置設定

本研究的相對重力網觀測主體路線分為 5 條(如表 3-1，表 3-2)，共經過 32 個監測點(如表 3-3)，包括經過 5 個絕對重力監測點，5 條主體路線中因應地形的分配需求，每條路線共包含 6~12 個觀測點，路線的開端與結束都覆蓋在絕對重力點上。

絕對重力儀 Micro-g LaCoste FG5 的重力監測點位都主要配置在有 GPS 衛星追蹤站附近穩定的樁位上，並且在 FG5 觀測前需要把真空落體管艙、光電檢測器、干涉儀、彈簧管艙和雷射器等主要配件組裝，因此，需要考量儀器的運輸和較大的觀測場地空間要求，加上配合儀器提供的直立式三腳架和基座的設定，可提高儀器的穩定性；相對重力儀 CG-5 在每次測量時都需放置在專屬的三腳架(Tripod)上，加設三腳架可使儀器在不平坦和不堅固的表面中保持平衡穩定和精確地定平儀器(Scintrex Limited, 2010)。

在各個相對重力點位的室外監測設點都設置在大型穩固和低壓縮性的岩石上，故假設各測點的高程變化不會明確影響於連續的重力點位測量工作，但這種配置法可能不適合於沖積含水層或永久凍土帶的地形(Ferguson et al., 2007; Pool, 2008)，在各測點的岩石上都設置了三個螺栓小孔來放置穩定 CG-5 的三腳架，並且固定一個螺栓小孔為儀器放置的方向，在每次監測重力點位時 CG-5 的三腳架高度都利用金屬銅圈把腳架固定在相同高度，因此可使 CG-5 儀器感測器的高度為固定常數，即不需再進行儀器高度改正，減少了相關的不確定度誤差。

表3-1 相對重力監測網的主要路線和站名

主路線	各站點名稱
路線 1R	YAG2--YAG3--Y006--Y007--Y008--Y009--Y010--YMSG
路線 2R	YAG4--Y001--Y002--Y003--Y004--Y005--YMSG
路線 3R	YMSG--Y011--Y012--Y025--Y026--Y027--YAG1
路線 4R	YMSG--Y013--Y014--Y015--Y024--YAG2
路線 5R	YAG2--YAG3--Y016--Y017--Y018--Y019--Y020--Y021-- --Y022--Y023--Y024--YMSG

表3-2 相對重力監測主路線之施測往返小段路線和站名

主路線	施測往返小段	各站點名稱
路線 1R	1R1	YAG2--YAG3--Y006--Y007--Y008
	1R2	YMSG--Y010--Y009--Y008
路線 2R	2R1	YAG4--Y001--Y002--Y003
	2R2	YMSG--Y005--Y004--Y003
路線 3R	3R1	YMSG--Y011--Y012--Y025
	3R2	YAG1--Y027--Y026--Y025
路線 4R	4R1	YMSG--Y013--Y014
	4R2	YAG2--Y024--Y015--Y014
路線 5R	5R1	YAG2--YAG3--Y016--Y017--Y018--Y019
	5R2	YMSG--Y024--Y023--Y022--Y021--Y020--Y019

表3-3 相對重力觀測網的 32 個監測站資訊

站名	經度(度)	緯度(度)	正高(公尺)
YMSG	121.5742900	25.165900	759.600
YAG1	121.5394440	25.1347218	406.670

YAG2	121.5386124	25.1694450	689.679
YAG3	121.5466690	25.1763897	800.685
YAG4	121.6394424	25.1672230	379.506
Y001	121.6027756	25.1372223	597.465
Y002	121.5952759	25.1452770	697.481
Y003	121.5933304	25.1505547	779.495
Y004	121.5880585	25.1594448	815.528
Y005	121.5777740	25.1663895	740.568
Y006	121.5849991	25.1727772	695.569
Y007	121.5852814	25.1700001	564.555
Y008	121.5819473	25.1686115	614.558
Y009	121.5791702	25.1683331	645.568
Y010	121.5772247	25.1677780	726.575
Y011	121.5741653	25.1594448	781.550
Y012	121.5711136	25.1619453	720.558
Y013	121.5722198	25.1647224	717.569
Y014	121.5694427	25.1647224	746.578
Y015	121.5661087	25.1666660	716.594
Y016	121.5483322	25.1766663	799.690
Y017	121.5488892	25.1713886	956.715
Y018	121.5505524	25.1705551	1058.725
Y019	121.5536118	25.1708336	1103.727
Y020	121.5555573	25.1694450	1093.714
Y021	121.5566635	25.1677780	989.689
Y022	121.5591660	25.1650009	869.648
Y023	121.5613861	25.1658325	821.629
Y024	121.5674973	25.1688881	767.607
Y025	121.5694427	25.1599998	630.552
Y026	121.5669479	25.1577778	572.549
Y027	121.5625000	25.1519451	541.560

### 3-3 絕對重力儀 FG5 的監測方式考量

在各絕對重力點監測站上，由於絕對重力儀 FG5 對現場環境條件如溫度、濕度、風力、氣壓等的要求嚴謹，並且絕對重力儀的 FG5 的工作溫度約為  $15^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ ，現場即時溫度變化幅度不應超過  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$  (鄂棟臣 等，2007)，故此，在進行施測點位時需要架設大形帳篷，以防惡劣多變的現場環境影響儀器精度。

#### 3-3-1 絕對重力儀 FG5 的數據收集處理設定

絕對重力點的測量資料處理是運用軟體 Micro-g LaCoste g7 Absolute Gravity Data Acquisition and Processing Software (以下簡稱 g7) 進行數據處理。該軟體在處理觀測數據時，首先是設置該軟體所需要的儀器和環境參數，如站名、測站座標、儀器高、基準高、初始重力梯度值、環境氣壓值、氣壓因數、極移座標、固體潮模型和海潮模型參數等 (Micro-g LaCoste, 2007)。

由於 FG5 所附設的 Micro-g LaCoste g7 軟體能處理連續觀測組的觀測資料，故此，把這些連續的觀測組分成各時段。因此，當觀測時受到儀器原因或人為干擾而被中斷時，可分時段進行處理。綜合該監測站所觀測出全部時段的各組測值，並加入各組的標準差為各組權重比重的考量，以計算總標準差和不確定度，可獲得觀測高度處的觀測重力值結果，並且必須進行觀測高度的改正 (詳見於第 4-6 節)，換算至所需高度的觀測重力值。

本研究的 FG5 觀測每次落體所測得的絕對重力值的設定，以絕對重力監測點的觀測時間為不少於 14 小時的觀測，觀測時下落體次數分組進行，每組的觀測起始時間設置在整點或整 30 分鐘進行。除了監測點大坪國小 (YAG4) 的第一期監測因現址環境潮濕而只能進行 17 組的觀測外，各監測點觀測組數為不少於 30 組進行；組與組的時間間隔為半小時，每組觀測的下落次數為 100 次，每次落體的時間間隔為 5 秒；若該組每次落體觀測的重力值  $g_i$  與該組平均重力值  $\bar{g}_j$  之差大於 3 倍的標準差，則將其刪除，以去除環境雜訊的影響，總體下落次數的刪除率不大於 4% (如表 3-4)。

### 3-3-2 絕對重力儀 FG5 的精度計算設定

由絕對重力儀 FG5 觀測得的絕對重力值進行各項改正後得到各組每次落體觀測的絕對重力值，此觀測值為每次落體測量的頂部高度(儀器量測高度)的重力值，可計算每組內所有次數的重力平均值  $\bar{g}_j$  和各觀測量的標準差  $\sigma_j$  運算式如(3-1)式、(3-2)式所示；當  $g_i$  與  $\bar{g}_j$  之差大於 3 倍的標準差  $\sigma_j$ ，則將其刪除並且重新計算  $\bar{g}_j$  和  $\sigma_j$  (Micro-g LaCoste, 2007；劉冬至，2007)，以去除現場環境雜訊的影響：

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g}_j)^2}{n-1}} \quad (3-1) \text{式}$$

$$\bar{g}_j = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n} \quad (3-2) \text{式}$$

在(3-1)、(3-2)式中的  $\sigma_j$  為組  $j$  所有落體次數的標準差， $n$  為每組落體的觀測次數， $j$  為各組數的序號， $g_i$  為每次落體改正後的重力觀測值， $\bar{g}_j$  為每組所有落體次數的平均重力觀測值。

計算觀測組平均標準差  $\sigma_{\bar{g}}$  如(3-3)式所示，並以  $\sigma_{\bar{g}}$  為權重的考量，計算觀測重力值  $\bar{\bar{g}}$  (Micro-g LaCoste, 2007)：

$$\sigma_{\bar{g}} = \frac{\sigma_j}{\sqrt{n}} \quad (3-3) \text{式}$$

$$\bar{\bar{g}} = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\bar{g}_j}{\sigma_{\bar{g}}} \right)^2}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{\sigma_{\bar{g}}} \right)^2} \quad (3-4) \text{式}$$

計算出以考量  $\sigma_{\bar{g}}$  為權重的觀測重力值  $\bar{\bar{g}}$  後，可以計算該測站所有觀測組的組離散度(Set scatter)，以呈現出該觀測站的現場環境觀測精度：

$$\text{Set scatter} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left( \frac{\bar{g}_j - \bar{\bar{g}}}{\sigma_{\bar{g}}} \right)^2}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{\sigma_{\bar{g}}} \right)^2}} \quad (3-5) \text{式}$$

由於在觀測時的重力值誤差除了落體重覆觀測時儀器的誤差外，還包括環境改正模型誤差。在改正環境誤差時加入了改正模型不準確的影響，因此，需考量將改正後的觀測重力值進行修改(高瑞其，2011)，如(3-6)式所示。

$$\bar{g}' = \bar{g} - \sum C_i \quad (3-6) \text{式}$$

在(3-6)式中的  $\bar{g}'$  為修改後的重力平均值， $C_i$  為包括儀器誤差和環境改正模式等不確定度的評估所導致的重力效應。

故此，經考量由儀器誤差和環境改正模型的不確定度等評估所致的重力效應，其綜合標準差(總不確定度)可表達為如(3-7)式所示(高瑞其，2011)。

$$\sigma_{\bar{g}'} = \sqrt{\sigma_{\bar{g}}^2 + \sum_{i=1}^k \sigma_{C_i}^2} \quad (3-7) \text{式}$$

在(3-7)式中的  $\sigma_{C_i}$  為包括儀器誤差和環境改正模式等誤差，可在儀器附設軟體 Micro-g LaCoste g7 Absolute Gravity Data Acquisition and Processing Software 加入該誤差的估算參數；其中環境改正模型誤差約為  $1\mu \text{ gal}$ ，儀器組裝誤差約為  $1.6\mu \text{ gal}$ (Van Camp et al., 2005)，最後計算出綜合標準差(總不確定度)  $\sigma_{\bar{g}'}$ 。

絕對重力儀 FG5 於大屯火山區共四期(季)的五個絕對點的觀測結果精度如表 3-4 所示，施測時期主要以四期為監測原則，除了在 YAG1 和 YAG4 的現址開放施測排程時間所規限，故此上述兩個絕對重力監測點只能進行三次監測，而第三次的施測時間為選擇在第三期與第四期之間的時間進行監測。

在表 3-4 中，五個絕對點的綜合標準差(總不確定度)範圍為  $2.02\sim 2.15\mu \text{ gal}$ 。觀測組平均標準差範圍為  $0.13\sim 0.7\mu \text{ gal}$ ，總下落體刪除率不大於 4%，由各站的平均標準差和總下落體刪除率可觀測出 YAG1 和 YAG4 的每期平均標準差較大，亦可表示為該兩站(YAG1, YAG4)的環境雜訊對儀器的影響較大，其中最大值為 YAG4 的  $0.7\mu \text{ gal}$ ，其原因為該點在觀測時，出現周邊的環境濕度變化大，而且取得總體合格下落數較少，影響了施測的精度。

表3-4 大屯火山區四期的絕對重力儀 FG5 的觀測精度

站名	時期	總合格 下落數	總刪除率	組離散度 Set scatter ( $\mu$ gal)	觀測組平 均標準差 ( $\mu$ gal)	綜合標 準差 $\sigma_{\bar{g}}$ ( $\mu$ gal)
擎天崗 衛星追蹤 站 YMSG	2012/4/18	3,993	0.18 %	1.22	0.19	2.04
	2012/7/6	7,648	0.42 %	1.63	0.20	2.06
	2012/11/2	22,464	0.43 %	2.05	0.15	2.05
	2012/12/13	28,952	0.30 %	2.02	0.13	2.05
文化大學 YAG1	2012/4/17	3,570	3.50 %	2.13	0.35	2.05
	2012/7/4	3,747	1.39 %	1.73	0.28	2.06
	2012/11/7	2,957	1.43 %	1.88	0.34	2.04
湖田國小 YAG2	2012/4/19	4,084	0.39 %	2.51	0.39	2.07
	2012/7/2	3,783	0.45 %	1.33	0.22	2.05
	2012/10/23	3,693	0.19 %	1.20	0.20	2.02
	2012/12/10	3,984	0.40 %	1.99	0.31	2.07
小油坑 YAG3	2012/4/16	3,877	0.59 %	1.33	0.21	2.04
	2012/7/5	4,386	0.32 %	1.40	0.21	2.06
	2012/10/22	3,883	0.44 %	1.25	0.20	2.03
	2012/12/11	4,276	0.56 %	1.70	0.26	2.07
大坪國小 YAG4	2012/4/20	1,653	2.76 %	2.90	0.70	2.15
	2012/7/3	3,978	0.55 %	1.65	0.26	2.07
	2012/11/1	3,171	0.91 %	2.32	0.41	2.09

### 3-4 相對重力儀 CG-5 的監測方式考量

#### 3-4-1 相對重力儀 CG-5 的監測路線與漂移量的考量

相對重力儀CG-5的感測系統為通過感測重力變化引起石英彈簧長度變化的原理，再採用電容感測器量測感測體(mass)的位移變化，可獲得以量測回饋系統所需的電壓值，藉由電壓值可得關聯於重力的變化量，故此，CG-5的儀器感測器受儀器漂移量(drift)的影響是不可避免的，主要原因為石英彈簧材質特性的影響所導致的，如當彈簧受到儀器溫度的不同改變時，會使靈敏的石英彈簧長度產生變化，因此，相對重力儀CG-5儀器的設計上採用監測其內部真空腔的溫度，依其儀器內部溫度係數的改變來對重力的變化量進行溫度補償改正(Temperature Compensation)，此外，另一個重要的儀器漂移量為在長時期的運作中，CG-5儀器的彈簧系統會產生彈力鬆弛(Scintrex Limited, 2010)，為使相對重力儀CG-5的儀器漂移量(drift)有效呈現線性範圍內的變動，故此監測重力點的往返約在4小時完成(Jacob et al., 2010)，若觀測4小時內，CG-5儀器的線性漂移量(drift)約為數個 $\mu\text{Gal}$ (彭森祥一等，2007)。

本研究區域中的32個監測點分佈在5條監測路線中，每條監測路線的頭尾都有覆蓋在絕對重力點的施測(圖3-2，表3-1)，因此，可校正出CG-5儀器的漂移量，另外，為考量CG-5儀器的漂移量能在線性範圍內漂移，故此把每條監測路線分成兩個小段往返，以減少往返起點(絕對重力點)所用的時間，在各小段回圈往返內包括約3至7個相對重力點位(如表3-2)，所形成的相對重力點間的連接個數約為68至70條(如表3-5)，各相對重力點間的連接個數代表着兩個連續重力點間的重力差值的個數，亦即是重力網形平差的觀測值的個數。

#### 3-4-2 相對重力儀 CG-5 的數據收集設定考量

在各相對重力點監測站上，相對重力儀CG-5的監測讀數為每秒讀數重力值，並設置以每90秒重力值計算成一筆平均重力值(Debeglia & Dupont, 2002; Mouyen

et al., 2013), 每站接收15筆重力值, 在抵達測站收集觀測資料前, 需靜置儀器數分鐘, 各站點的施測操作時間平均約為30分鐘完成; 長時間靜止狀態下的儀器可為數小時外業的儀器漂移量作出補償(Torge, 1989; 魏祥鴻, 2005)。考量為減少環境因素影響測量的精確度, 故此在測量期間使用遮陽傘裝備, 遮蔽陽光照射, 以減低由太陽光線熱量所引致的三腳架傾斜, 並使用塑膠桶覆蓋儀器以減少風力擾動(Jacob et al., 2010; Mouyen et al., 2013)。

在共分四期的重力網監測中, CG-5的數據測量日程約為每期4~5天(如表3-5), 本研究規劃了在每一獨立的往返小段中每次的觀測路段必需至少兩次重覆經過相同監測站, 以利於提高平差精度, 並將各重力觀測值都作環境改正(詳見於第四章)包括固體潮改正、海潮改正、極移改正、大氣壓力改正、儀器傾斜改正、觀測量粗差剔除, 為排除重力觀測值受到以上環境變化之影響, 把經過改正後兩站間的相對重力差值為後續重力網形平差的觀測量, 藉以提高重力網形平差後各點重力值精度。

表3-5 相對重力儀 CG5 的監測資訊

相對重力監測時期 Survey schedule	CG-5 監測日程 Time of CG-5 schedule	重力點數量 Number of station	重力點間連接個數 Number of gravity ties
First 第一期	2012/4/24~4/28	32	70
Second 第二期	2012/6/29~7/2	32	70
Third 第三期	2012/9/14~9/18	32	70
The Fourth 第四期	2012/11/28~12/2	32	68

## 第四章 重力網形數據處理過程及成效分析

### 4-1 重力網形觀測資料的處理流程

相對重力儀 CG-5 的重力紀錄系統為電容感測器結合電子回饋力的整合系統，藉由電壓值可得關聯於重力的變化量(Scintrex Limited, 2010)，並且觀測所得的重力值已包括相對重力儀 CG-5 的內部設定改正模式的改正後重力值；根據本研究區域內的五個絕對重力點觀測所得的絕對重力值，並經過運用 g7 軟體的綜合處理改正觀測數據如環境改正(包括地球固體潮、海潮負載、大氣壓力和極移改正)，地面高度的化算改正及粗差剔除後，所獲得的絕對重力值，用於在相對重力網的網形平差中進行加權約制平差處理。

本研究把 CG-5 觀測的重力資料經過前處理來計算出未經環境改正的原始重力觀測資料  $G_{\text{raw}}$ (詳述於 4-2 節所示)，再進行環境改正(包括地球固體潮、海潮負載、大氣壓力和極移改正)和觀測資料篩選後(詳述於 4-3 節和 4-7 節所示)，運用 Hwang(2002)以 Fortran 語言所編寫的收集資料處理程式 correct.f 和 arrange.f90；correct.f 程式為進行觀測資料改正整合運算，轉換程式 arrange.f90 為用於把各站之間的重力差值轉換為後續供應平差程式中所需的觀測量檔案格式(.obs)，隨後設定儀器率定函數的階數和儀器漂移階數，並運用 g7 軟體綜合處理及改正，其環境改正項目與 CG-5 的環境改正項目相同(包括地球固體潮、海潮負載、大氣壓力和極移的環境改正項目)，改正後的絕對重力值(詳述於 4-5 節)為平差約制條件，經過平差網程式 gravnet.f90(Hwang et al., 2002)進行網形平差計算後，可解出各相對測點的平差後重力值及重力儀的漂移率，並藉由 Pope's  $\tau$ -test 方法(Pope, 1976)反覆偵查粗差加以濾除，以提高解算精度，並分析運用以上的模式改正後及資料篩選後可達到的平差精度改善效能。本研究的重力網觀測資料的處理流程圖如圖 4-1 所示。

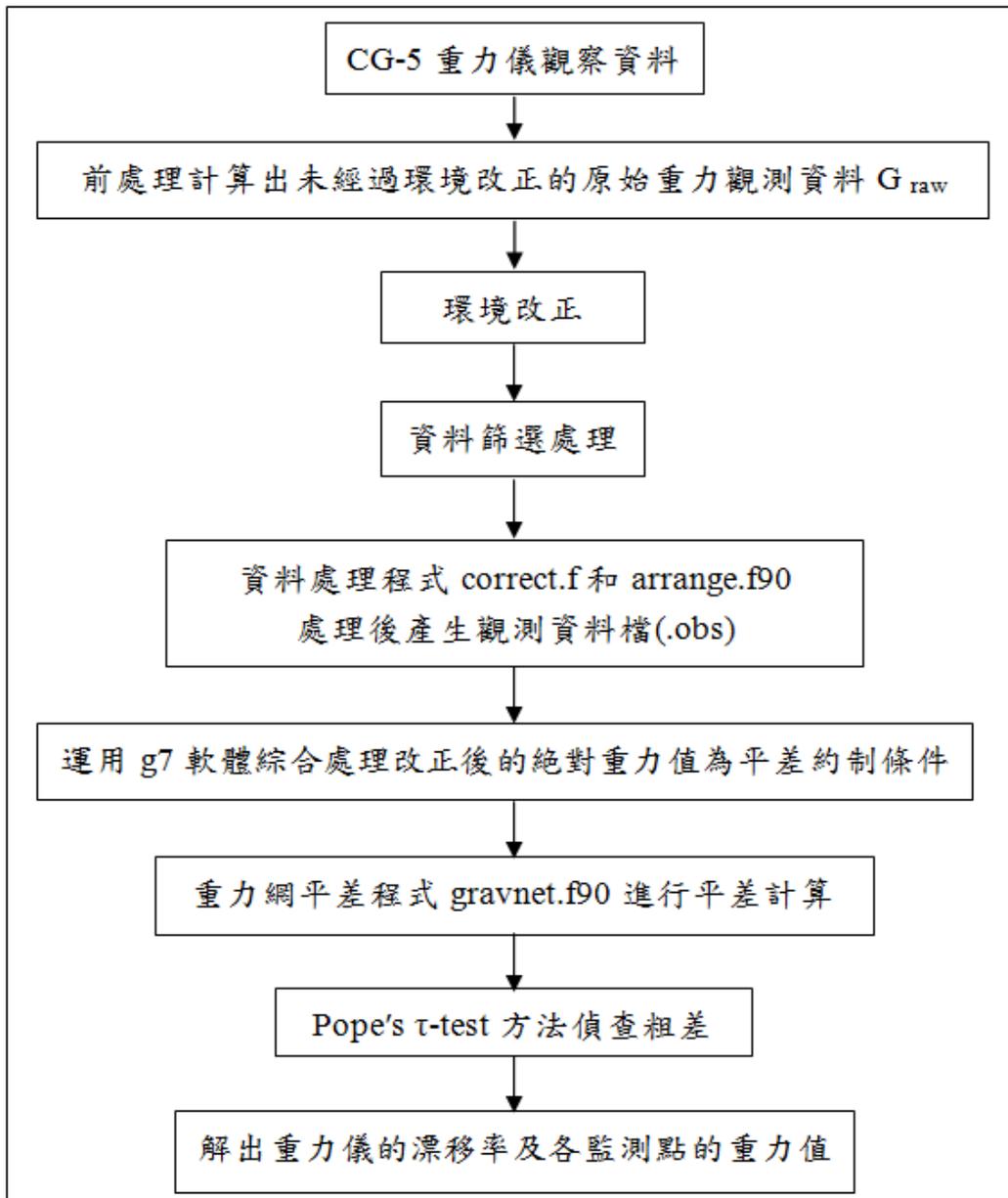


圖4-1 重力網觀測資料處理流程圖

## 4-2 相對重力觀測資料前處理

本研究共監測了 32 個相對重力點位的重力值(包括 5 個絕對重力站)，相對重力儀 CG-5 所得之觀測重力值資料已包含儀器內部所設定的改正量(相關改正模型如 CG-5 操作手冊 Scintrex Limited, 2010 所示)，當中的儀器改正模式可分為儀器內部改正模式和外部環境改正模式。儀器內部改正模式包括水平軸傾斜改正模式(Tilt correction.TIC)和溫度改正模式(Temperature correction.TEC)；外部環境改正模式為地球固體潮改正模式(Earth tide correction.ETC)改正量。故此，CG-5 所得之觀測重力值資料，如(4-1)式(Scintrex Limited，2010)所示。

$$\text{CG5 觀察資料} = \text{CG5 原始資料} + \text{TIC} - \text{TEC} + \text{ETC} \quad (4-1)\text{式}$$

本研究的外部環境改正模式中所運用的地球固體潮改正模式為非 CG-5 內部設定的地球固體潮改正模式(ETC)，故此，為了得到未經過外部環境改正模式下的觀測資料，必需先把 CG-5 所設定的地球固體潮改正模式(ETC)去除，去除後才是未經外部環境改正的重力觀測資料  $G_{\text{raw}}$ 。

本研究保留其餘的基本儀器內部改正模式，包括水平軸傾斜改正模式(TIC)和溫度改正模式(TEC)，如(4-2)式所示。

$$G_{\text{raw}} = (\text{CG5 原始資料} + \text{TIC} - \text{TEC}) = \text{CG5 觀察資料} - \text{ETC} \quad (4-2)\text{式}$$

本研究運用前處理後的未經過儀器環境改正的原始重力觀測資料  $G_{\text{raw}}$ ，並把原始重力觀測資料  $G_{\text{raw}}$  經過環境改正(包括固體潮、海潮、壓力變化、極移改正)和資料篩選處理，隨後運用 Hwang (2001)以 Fortran 語言所編寫的 correct.f 和 arrange.f90 進行資料改正整合運算和轉換程序，把各站之間的重力差值轉換為後續平差程式中所需的觀測量檔案格式(.obs)，接著以絕對重力觀測值為加以約制，並經過重力網平差程式 gravnet 程式(Hwang et al., 2002)進行重力網形平差計算。

### 4-3 相對重力值的環境改正

在進行大地測量的過程中，地表重力值會跟隨着時間變化而作出改變，因此為了獲取平差處理前準確的相對重力差值的觀測量，必需對監測所得的各點重力值進行環境改正；其中主要造成地表重力值改變的原因(Torge, 1989.)包括：(1)非構造源的引力作用如大氣壓力變化、土壤濕度變化、水文地下水效應、人類活動干擾導致質量變遷；(2)重力固體潮引起的作用力如地球固體潮、海潮負載等；(3)地球動力造成地球質量轉移如地震活動、板塊活動、造山運動、火山噴發等。故此，重力一般須定義在標準(正常)環境條件下的地球狀態，即無地球固體潮(Solid earth tide)、海潮負載(Ocean tide loading)、大氣壓力(Atmospheric pressure)及極移(Polar motion)等效應影響下的狀態。因此，進行重力觀測時，需要對觀測站選取適合的改正模式，移除及改正地球固體潮、海潮負載、大氣壓力、極移、水文、垂直位移及環境質量改變等的重力效應，模擬建立一個不隨時間改變之正常重力值(Boedecker, 2002)。

本研究的 CG-5 監測獲得的每筆觀測重力資料都經過所選用的環境模式改正包括海潮負載 SGOTL 模式(黃鉅富, 2012)、大氣壓力效應模式(Torge, 1989; Hwang et al., 2009)、地球固體潮 DDW 模型(Dehant et al.1999)和極移模式(Torge, 1989)並用 TSoft 軟體(Van Camp & Vauterin, 2005)進行處理，未受 CG-5 儀器內部環境改正的原始重力觀測資料  $G_{raw}$  經過環境改正後的剩餘重力值，本研究的剩餘重力值計算模式為參考文獻(蘇洵韻, 2010; 高瑞其, 2011)之標準處理化過程，其經過環境改正後的殘餘重力公式如(4-3)式所示。

$$\text{剩餘重力} = G_{raw} - \text{地球固體潮效應(DDW 模型)} + \text{海潮負載改正(SGOTL 模式)} - \text{大氣壓力效應} - \text{極移效應} \quad (4-3)\text{式}$$

#### 4-3-1 地球固體潮 DDW 模型

本研究所運用的地球固體潮模式參數為 Dehant-Defraigne-Wahr (1999)建立的理論地球固體潮模型(以下簡稱 DDW)所計算的理論參數(Dehant et al.1999),包括振幅系數(amplitude factor)和相位(phase)參數;操作過程配合運用 TSoft 軟體(Van Camp & Vauterin, 2005),首先選定本研究的 CG-5 在大屯山監測站所施測的時間序列範圍,以及分別建立本研究的 32 個 CG-5 的大屯山監測站的位置檔案(包括經緯度和正高),接著 DDW 模型透過所建立的該監測站的經緯度位置,可產生出該監測站的共 12 個分潮的理論振幅系數(amplitude factor)和相位(phase)參數,進而解算出該監測點位置在選定時間範圍內的地球固體潮效應重力值。

##### 4-3-1-1 地球固體潮模式操作過程

以陽明山擎天崗衛星追蹤站 YMSG 的固體潮操作過程為例,本研究所用的為 UTC 時間序列檔為利用在陽明山超導儀設定輸出的資料檔(.049)已包含 UTC 時間序列資料。陽明山超導資料下載來源:AGTO FTP: [AGTO@140.113.16.174](ftp://AGTO@140.113.16.174)。每個資料檔為每秒一筆的一整天超導資料檔。本文以下載的 G1120425.049 檔案為說明,檔案中的 049 為陽明山超導儀代號,G1 為儀器設定編碼,120425 代表日期 2012 年 4 月 25 日;運用 TSoft 軟體實行 DDW 固體潮效應重力值( $\text{nm/s}^2$ )的操作如下:

(1) 在 TSoft 軟體的主選單中選擇 open,並以 TSF format 打開從 AGTO FTP 提供的陽明山超導資料的檔案(包含 UTC 時間序列)G1120425.049。

(2) 選擇 Tide →Synthetic tides →Open location database。

(3) 在 Location database 主選單中選擇 Location →Add location。接著加入該 YMSG 監測站的經緯度和正高值(如圖 4-2 所示)。

(4) 在 Location database 主選單中選擇 Theotide →Compute tidal parameters。可計算該 YMSG 監測站的 DDW 的 12 個分潮參數包括振幅系數(amplitude factor)

和相位(phase)如表 4-1 所示

(5) 點選計算所得的 DDW 分潮參數後，選擇 Theotide → Calculate。隨即計算出 YMSG 監測站在選定時間序列的地球固體潮效應重力值( $\text{nm/s}^2$ )，本文經過單位換算  $\mu\text{gal}$ ，如圖 4-3 及圖 4-4 所示 DDW 地潮模型效應重力值呈現出半日潮及全日潮的現象。

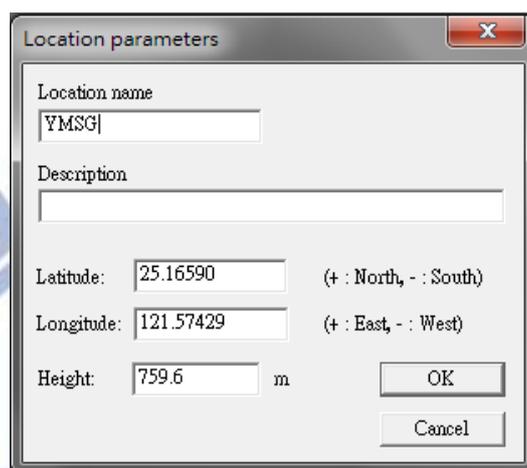


圖4-2 Add location 操作示範

表4-1 擎天崗衛星站 YMSG 的 DDW 振幅系數(amplitude factor)和相位(phase)

Minimum Frequency (CPD)	Maximum Frequency (CPD)	Amplitude factor	Phase Shift	Group Name
0.000000	0.002427	1.00000	0.0000	long
0.002428	0.249951	1.15812	0.0000	Mf
0.721500	0.906315	1.15415	0.0000	Q1
0.921941	0.940487	1.15416	0.0000	O1
0.958085	0.998028	1.14926	0.0000	P1
0.999853	1.003651	1.13550	0.0000	K1
1.005329	1.005623	1.26565	0.0000	PSI1
1.007595	1.011099	1.16965	0.0000	PHI1
1.013689	1.216397	1.15613	0.0000	OO1
1.719381	2.182843	1.16174	0.0000	All2
2.753244	3.381478	1.07341	0.0000	M3
3.381379	4.347615	1.03900	0.0000	M4

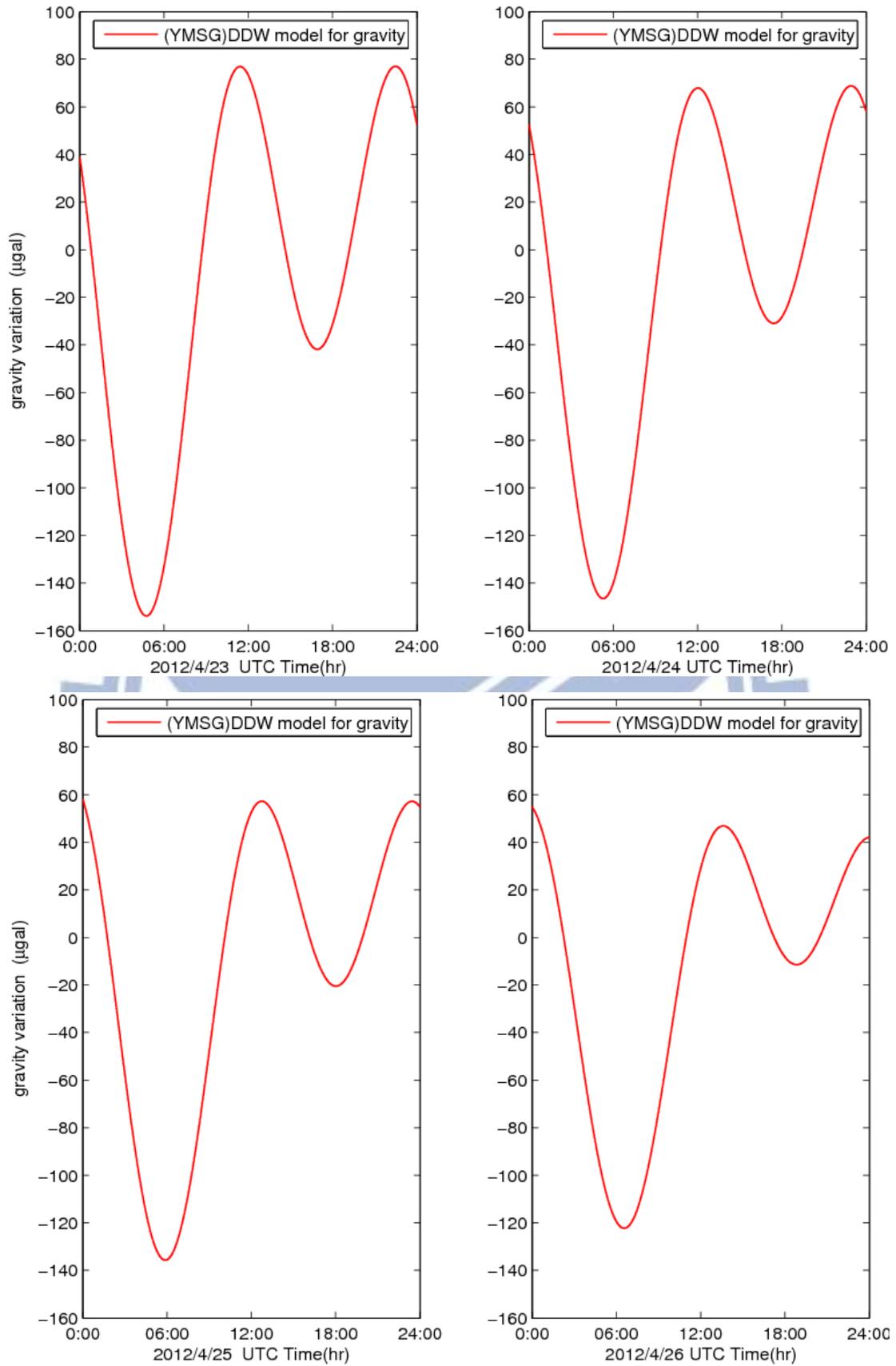


圖4-3 擎天崗衛星站 YMSG 以 DDW 的 12 個分潮參數解算(2012/4/23~2012/4/26) 的地球固體潮效應重力值( $\mu\text{gal}$ )

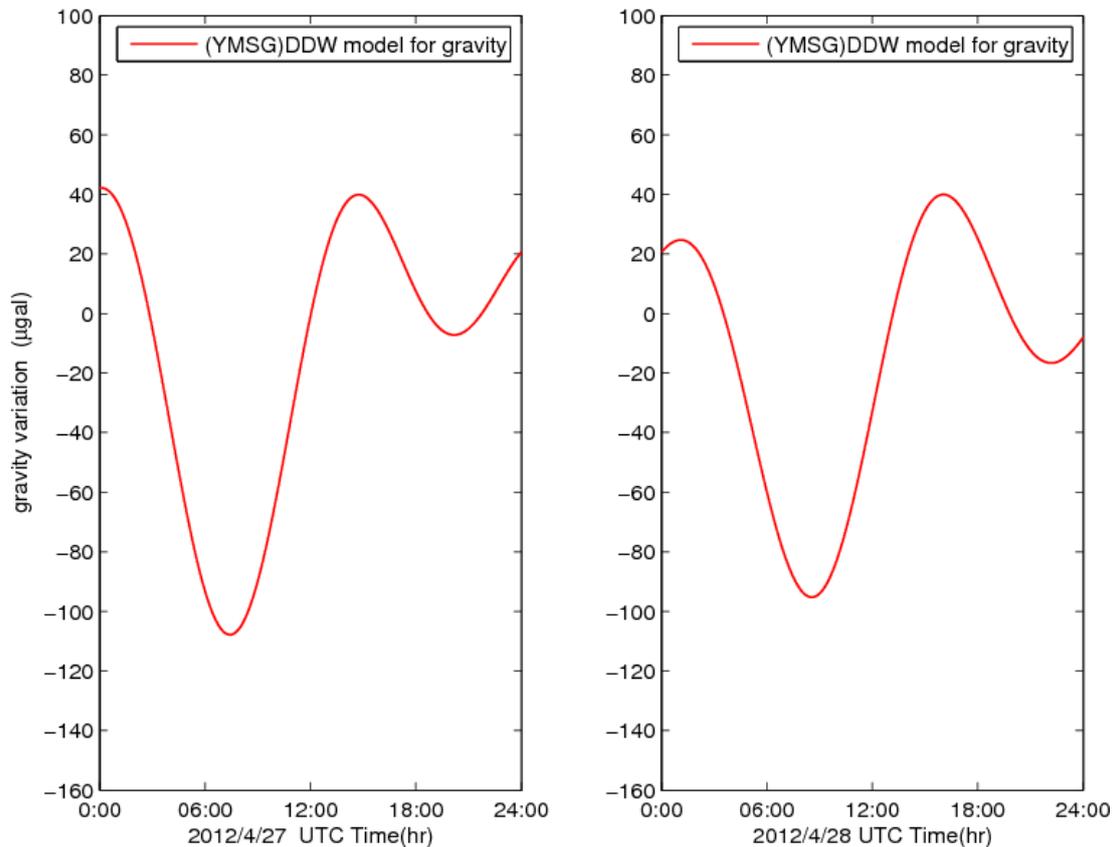


圖4-4 擎天崗衛星站 YMSG 以 DDW 的 12 個分潮參數解算(2012/4/27~2012/4/28) 的地球固體潮效應重力值( $\mu$  gal)

#### 4-3-2 海潮負載 SGOTL 模式

隨同於大地測量觀測中，具有週期特性的海潮負載(ocean tide loading, OTL)的訊號影響是僅次於地球固體潮的重要考慮因素；海潮負載(OTL)，指由於天體(如太陽，月球等)運行，引致地球各點海水質量受着不同的引力變化，使海水質量不斷的重新變化分佈的海潮現象，地球因而受到海水質量引力的變化而引致的變形情況，整體情形可分為兩個部分，第一部分稱為牛頓引力效應(Newtonian effect)，指施測點受到海水質量吸引而產生的垂直引力影響的直接效應；第二部分稱為彈性效應(elastic effect)，指在施測點的地表，受到海水質量引力的影響導致產生地表變形而影響施測點的間接效應(參見於 Farrell, 1972；Melchior, 1983；Torge,1989)。OTL 改正量可通過平衡位能的方式，以格林函數(Green's function)形式推導出全球積分關係式，用於計算地表的某特定位置之 OTL 改正量(參見於黃鉅富，2012)。

本研究所用的海潮負載改正模式為運用黃鉅富(2012)利用FORTRAN電腦程式語言所開發的推估海潮負載改正之SGOTL數值模式(以下簡稱SGOTL模式)，SGOTL模式可配合使用者的設定而更改的OTL洛夫數、格林函數、海潮模型及岸線資料進行OTL牛頓引力及地球彈性之重力效應計算。

SGOTL模式的特點如下所示(黃鉅富，2012)。

- (1) 所使用的牛頓引力、地球彈性效應格林函數與高程相依。
- (2) 利用高斯求積(Gauss quadrature)方法(Press et al.,1989)計算全球數值積分。
- (3) 洛夫函數預設值來自 Farrell 參數(1972)；也可由使用者自選或自訂參數。
- (4) 可具備使用區域海潮模型、全球海潮模型計算內圈效應、外圈效應。
- (5) 來自 GMT(Generic Mapping Tools)軟體(Wessel and Smith,1999)及(或)國內 Digital Elevation Model(DEM)之高解析岸線資料。

本文以高解析且高程相依的海潮負載 SGOTL 模式，SGOTL 模式的設定中以 Farrell 參數(1972)為洛夫函數，以 NAO 模型(Matsumoto et al., 2000; Takanezawa et al., 2001)來提供 SGOTL 模式計算海潮模型，解算出各分潮的重力效應改正參數(振幅和相位)，本研究運用的 NAO 海潮模型包括全球模型 NAO99b 及區域模型 NAO99jb 的 8 個主要的短週期分潮(M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1)，及全球模型 NAO99L 的 3 個長週期分潮(Mf、Mm、SSA)，合共計算出 11 個主要分潮的海潮負載振幅和相位；本研究 SGOTL 模式計算的外圈範圍引用全球海潮模型 NAO99b 的網格，其網格大小為  $0.5^\circ$ ，而在內圈計算範圍的高精度海陸網格遮罩(mask)海岸線資料，選用台灣地區的海岸線資料來自申請取得的內政部產製的 DEM 網格為 2007 年運用航空攝影測量技術所獲得(黃鉅富，2012)，相關資料可參閱於內政部供應系統 (<https://dtm.gps.moi.gov.tw/dtm/dtm/index.aspx>)，並以 LANDM 附加程式(黃鉅富，2012)製作成的高精度海陸網格遮罩(mask)資料檔 twlandf.01，提供給 SGOTL 模式的積分計算。

#### 4-3-2-1 海潮負載 SGOTL 模式操作過程

海潮負載 SGOTL 模式為計算測站的海潮負載重力效應改正參數(振幅和相位)，SGOTL 模式是利用電腦程式語言 FORTRAN 所編寫的程式 SGOTL.f，程式之使用是以 command-line 方式或建立批次指令檔案(.bat)來執行，本研究用於 Microsoft DOS 模式之作業環境。SGOTL 模式的操作示範首要建立 SGOTL.bat 檔，編輯 SGOTL.bat 檔以分別計算出各個觀測站的 11 個主要分潮(M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、Mf、Mm、SSA)的海潮負載之 11 個振幅和 11 個相位，SGOTL 模式運用的操作過程參數根據文獻(黃鉅富，2012)說明如下所示。

(1) 建立 windows 批次檔案 SGOTL.bat 來直接執行，SGOTL.bat 的編輯內容為：  
SGOTL -A station\_file -G tide\_file -N interval -O name  
[-S loadnumber\_file -C landmask\_file -B width -L regionaltide\_file -I interval]

SGOTL.bat 檔的必要編輯參數說明：

-A 測站檔案(station\_file)：

可編輯多個測站，測站檔案包括每筆以東經(度)、北緯(度)、正高(公尺)的坐標位置。本研究以 32 個 CG-5 大屯山觀測點建立測站檔案。

-G 全球海潮模型(tide\_file)：

本研究以全球海潮模型 NAO99b 之 8 分潮(M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1)和 NAO99L 之 3 分潮(Mf、Mm、SSA)為 -G 參數檔，NAO 海潮模型可至下載網頁 [http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index\\_En.html](http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html) (Matsumoto et al., 2001)。

-N 全球海潮模型分潮網格寬度(interval)，以分為單位：

本研究以全球海潮模型 NAO99b 的網格寬度，其網格間距為 30 分。

-O 輸出的檔名(name)，包括以下三個輸出檔(檔名.g1，檔名.g2和檔名.gra)：

檔名.g1 為牛頓引力(Newtonian)效應重力改正參數檔案；

檔名.g2 為彈性(elastic)效應重力改正參數檔案；

檔名.gra 為海潮負載合計效應重力改正參數檔案。

SGOTL.bat 檔的可選編輯參數說明：

-S 海潮負載洛夫函數檔(loadnumber\_file)：

本研究以內定值Farrell(1972)洛夫數為函數檔。

-C 內外圈計算時，內圈計算所需之高精度海陸地網格遮罩(landmask\_file)：

本研究運用黃鉅富(2012)的高精度海陸網格遮罩(mask)資料檔twlandf.01。

-B 內外圈計算時，內圈計算的正方範圍(外框範圍)寬度(width)，以度為單位：

本研究根據文獻黃鉅富(2012)研究之組合以外框大小參數-B的3度計算，並配合以下內圈網格間距參數-I的5分計算，可提高SGOTL模式的積分計算精度和計算效率。

-L 內外圈計算時，內圈計算所需高精度區域海潮模型檔(regionaltide\_file)：

本研究以NAO.99jb為區域海潮模型分潮檔，NAO海潮模型可至下載網頁 [http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index\\_En.html](http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.html) (Matsumoto et al., 2001)。

-I 使用內外圈計算時，區域海潮分潮模型網格寬度(interval)，以分為單位：

本研究根據文獻黃鉅富(2012)研究之組合以內圈網格間距參數-I的5分計算，並配合以上外框大小參數-B的3度，可提高SGOTL模式的積分計算精度和計算效率。

(2) 根據以上的設定完成編輯批次指令檔(SGOTL.bat)後，在 Microsoft DOS 命令列介面中執行批次指令檔(SGOTL.bat)，計算測站的 11 個分潮的海潮負載重力改正參數(振幅和相位)，批次指令檔(SGOTL.bat)的執行過程介面(如圖 4-5)，在執行介面中首先顯示批次指令檔(SGOTL.bat)的指令內容，並且順序顯示主要的資訊包括讀取的記錄數目(number of records read)、目前計算的測站(point name)、目前計算的分潮名稱(wave name)、計算後所獲得的振幅和相位(amp.& phs.)、計算所需的執行時間(Total execution time)和測站數目(number of point)。執行完成批次指令檔(SGOTL.bat)後產生的三個輸出檔(檔名.g1，檔名.g2 和檔名.gra)資料分別依序為在命令列介面的振幅和相位(amp.& phs.)欄列中的振幅和相位數值。

```

C:\Users\terry>cd\
C:\>cd test0TL
C:\test0TL>SGOTL.bat
C:\test0TL>Debug\SGOTL -AsiteYMSG041819 -Gnao99bcon\m2.xyap -N30 -OYMSG041819_m
2 -Ctwlandf.01 -B3 -Lnao99Jbcon\m2_j.xyap -15
reading land mask ...
number of records read:          1
point name:
YMSG

wave name:
nao99bcon\m2.xyap

amp & phs:
2.09663688118910          226.022654870134          2.82219788423922
186.303440142629          4.63286271148409          203.113264259568
Total execution time :          373 sec
*****
number of point:          1

```

圖4-5 在 Microsoft DOS 中執行 SGOTL.bat 計算海潮負載重力改正係數的振幅和相位的命令列介面執行顯示過程(圖中顯示為已計算的 M2 分潮係數)

(3) 計算後獲得的海潮負載合計效應(牛頓引力和彈性效應)重力改正參數檔案(.gra)，包括 11 個主要分潮(M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、Mf、Mm、SSA)的振幅和相位(如表 4-2 所示)，後續需以黃鉅富(2012)編寫的海潮負載重力改正值程式執行檔 otlprdt.exe，並運用計算出的振幅和相位，來求出該時刻的海潮負載合計效應(牛頓引力和彈性效應)重力改正值(述見於 4-3-2-2 節)。

以測站 YMSG 為例子分析 SGOTL 模式與 GOTIC2 模式計算所得的 11 個主要分潮的海潮負載合計效應重力改正參數(振幅和相位)比較(如表 4-2，圖 4-6)。本研究的 GOTIC2 模式的海潮負載計算內部設定為以向上為正的海潮負載重力改正參數，在表 4-2 及圖 4-6 可見，其參數結果與 SGOTL 模式計算的海潮負載重力改正參數值的方向一致，並且在 SGOTL 模式計算出的 M2 分潮振幅較小於 GOTIC2 模式計算出的 M2 分潮振幅，原因為 SGOTL 模式考慮監測站的高程影響，而 GOTIC2 模式則沒有。

表4-2 海潮負載合計效應(牛頓引力和彈性效應)重力改正參數(振幅和相位)

海潮分潮	SGOTL 模式		GOTIC2 模式		偏差量 Difference (GOTIC2-SGOTL)	
	振幅 ( $\mu$ gal)	相位 (degree)	振幅 ( $\mu$ gal)	相位 (degree)	振幅 ( $\mu$ gal)	相位 (degree)
M2	4.63	203.11	5.28	201.50	0.65	-1.61
S2	1.23	210.77	1.43	207.98	0.2	-2.79
K1	3.41	286.67	3.66	288.44	0.25	1.77
O1	2.98	264.40	3.17	264.80	0.19	0.4
N2	1.00	178.89	1.10	179.74	0.1	0.85
P1	1.11	284.91	1.19	286.45	0.08	1.54
K2	0.33	200.72	0.37	198.68	0.04	-2.04
Q1	0.63	254.81	0.67	256.04	0.04	1.23
Mf	0.13	203.98	0.11	206.72	-0.02	2.74
Mm	0.06	200.29	0.09	202.86	0.03	2.57
SSA	0.11	183.97	0.10	184.22	-0.01	0.25

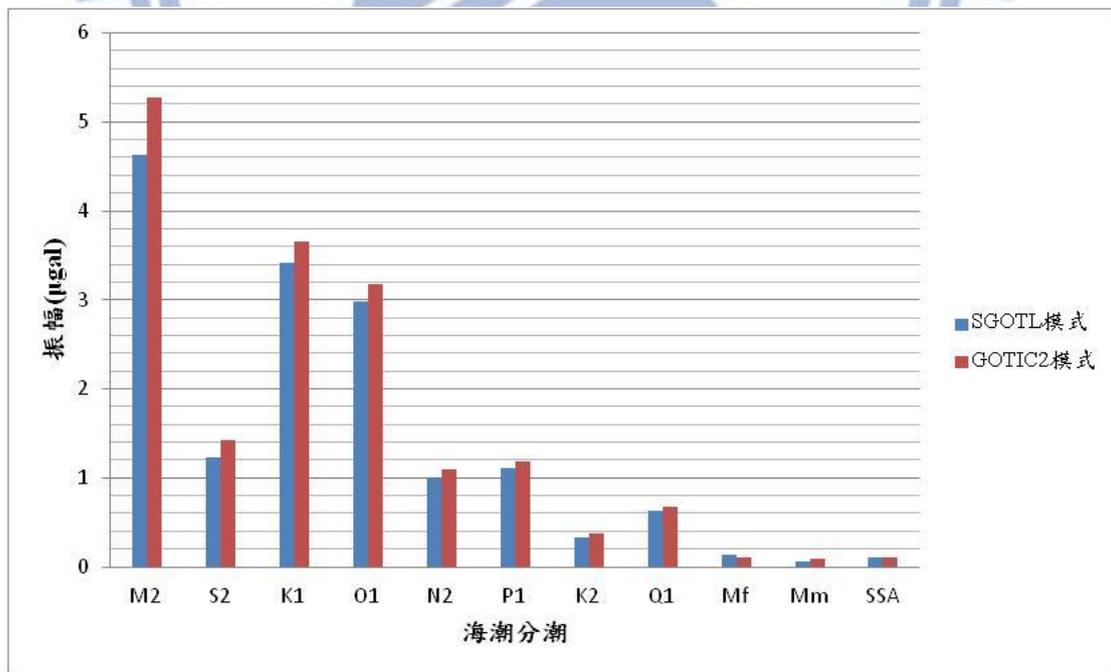


圖4-6 測站 YMSG 的海潮負載模式(SGOTL 與 GOTIC2)重力效應之振幅比較

運用監測站 YMSG 為例子分析海潮負載模式 SGOTL 模式與 GOTIC2 模式在計算相同的 NAO 海潮模型下(包括全球模型 NAO99L, NAO99b 和區域模型 NAO99jb)所得的 11 個主要分潮的海潮負載合計效應重力改正參數(振幅和相位)比較(如表 4-2, 圖 4-6)。由圖 4-6 可知監測站 YMSG 的海潮負載重合計效應重力改正參數之振幅的強度以 M2 分潮的最大, SGOTL 模式計算所呈現之振幅強度大至小的順序為  $M2 > K1 > O1 > S2 > N2 > P1 > Q1 > K2 > Mf > SSA > Mm$ , 與 GOTIC2 模式計算出的振幅強度大小順序一致; 在表 4-2 中的兩個海潮負載模式(SGOTL 模式與 GOTIC2 模式)比較結果可見振幅的最大偏差值於 M2 分潮的  $0.65 \mu\text{gal}$ , 相位的最大偏差值於 SSA 分潮的  $2.74^\circ$ 。由於監測站 YMSG 的海拔高度達 759.6m, 而 GOTIC2 模式的海潮負載計算是使用 Farrell 的捲積計算方法, 但未考量高程相依的海潮負載影響, 故此, 運用高程相依的 SGOTL 模式可嚴謹計算出海潮負載合計效應(牛頓引力和彈性效應)重力改正參數(振幅和相位)。

#### 4-3-2-2 海潮負載重力改正值計算操作過程

根據前 4-3-2-1 節所計算出的海潮負載合計效應重力改正參數之振幅和相位後, 需利用與時間相關之傅利葉函數式(詳述於黃鉅富, 2012), 計算出該測站的監測時刻海潮負載效應重力改正值。

本研究運用的海潮負載重力改正值程式檔(otlprdt.exe), 計算出該測站之監測時刻的重力效應改正值, 該程式是透過黃鉅富以電腦程式語言 FORTRAN 編寫的 predict.f 所產生的程式檔, 其程式的使用是以 command-line 方式或建立批次指令檔案(.bat)來執行, 本研究用於 Microsoft DOS 模式之作業環境。海潮負載重力改正值程式的操作如下二點:

第一點: 建立 windows 批次檔案 otlprdt.bat 來直接執行, otlprdt.bat 的編輯內容為: otlprdt.exe -Isite\_file -Ogravity\_file

otlprdt.bat 檔的編輯參數說明:

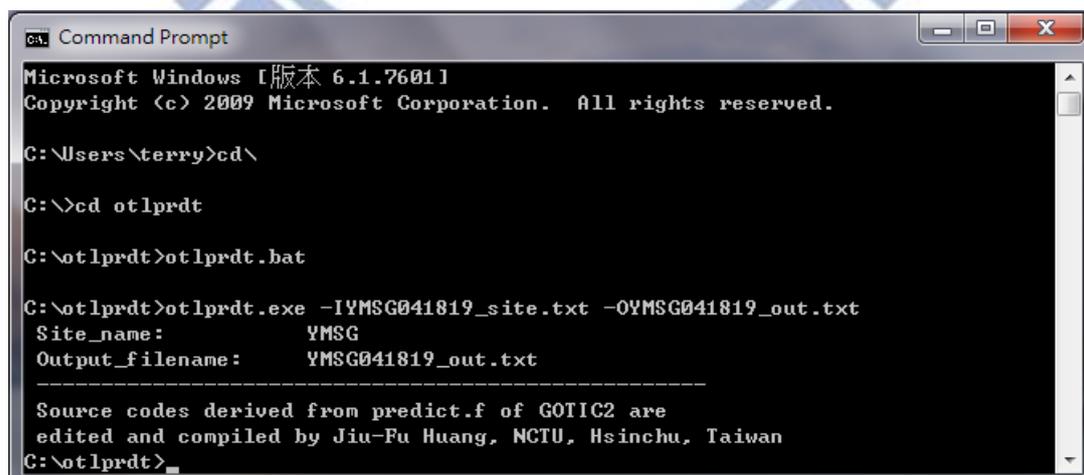
-I 測站的11個主要分潮海潮負載效應重力改正參數檔案(site\_file)：

site\_file檔內格式以參照GOTIC2格式(Matsumoto et al.,2001)編制形成(詳見於附錄A)，檔內格式主要包括坐標位置的東經(度)、北緯(度)、正高(公尺)、計算海潮負載效應重力改正值的起始及結束時間、時間間隔、相位類型設定、11個主要分潮(M2、S2、K1、O1、N2、P1、K2、Q1、Mf、Mm、SSA)的振幅和相位。

-O 輸出的檔名(gravity\_file)：

輸出的檔案包括海潮負載效應重力改正值( $\mu\text{gal}$ )及對應的日期 UTC 時間。

第二點：根據以上的設定完成編輯批次指令檔(otlprdt.bat)後，在 Microsoft DOS 命令列介面中執行批次指令檔(otlprdt.bat)，執行過程介面如圖 4-7 所示，根據該測站在 site\_file 檔中自設的起始和結束日期時間(UTC)的海潮負載合計效應的重力改正值(圖 4-8)；本文的操作示範以第一期的相對重力監測作業時期 2012 年 4 月 24 日至 4 月 28 日，儀器施測的時間為台灣本地時(Local time)，故此，在起始和結束的時間設定上，需轉換成對應的世界協調時間(UTC)。在執行介面中(如圖 4-7)首先顯示批次指令檔(otlprdt.bat)的指令內容，並且順序顯示的兩項資訊包括(1)測站名(Site\_name)：在輸入檔 site\_file 的內容格式中(詳見於附錄 A)的第一列所自定的名稱；(2)輸出的檔案(Output\_filename)。



```
ca. Command Prompt
Microsoft Windows [版本 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\terry>cd\

C:\>cd otlprdt

C:\otlprdt>otlprdt.bat

C:\otlprdt>otlprdt.exe -IYMSG041819_site.txt -OYMSG041819_out.txt
Site_name:      YMSG
Output_filename: YMSG041819_out.txt
-----
Source codes derived from predict.f of GOTIC2 are
edited and compiled by Jiu-Fu Huang, NCTU, Hsinchu, Taiwan
C:\otlprdt>
```

圖4-7 在 Microsoft DOS 中執行批次指令檔(otlprdt.bat)的執行過程介面

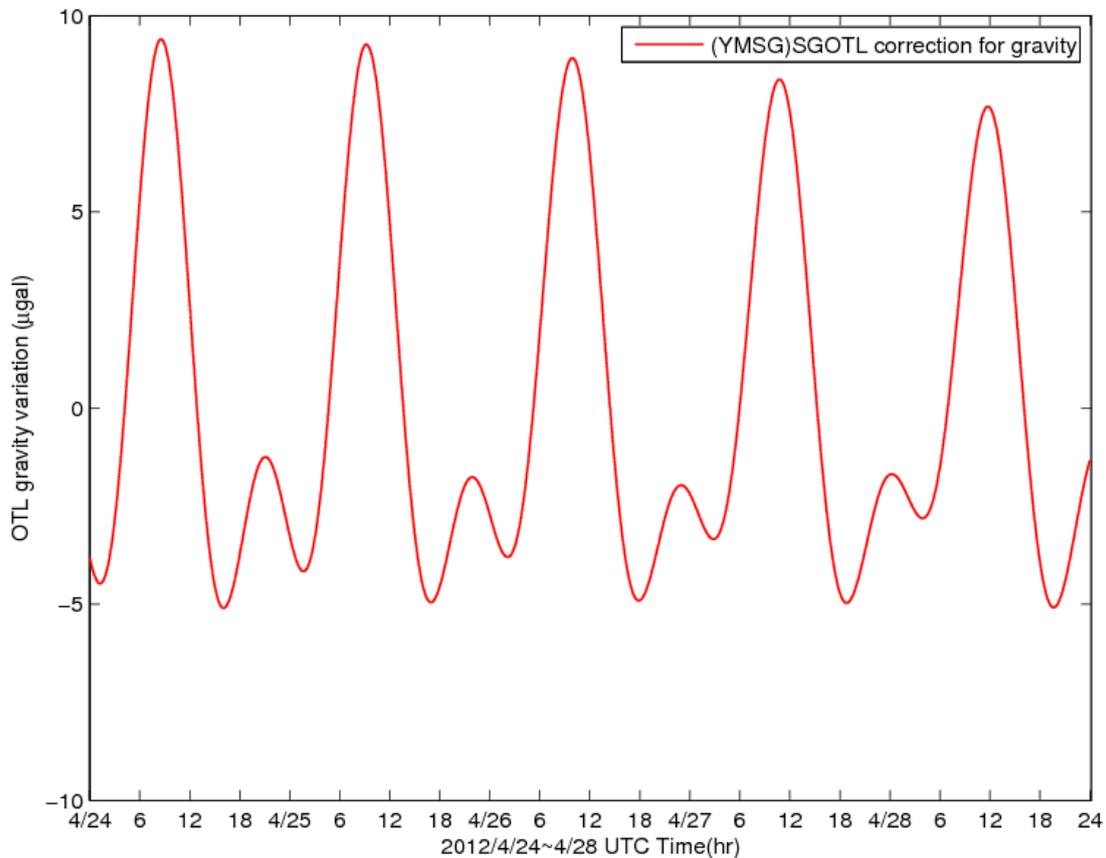


圖4-8 測站 YMSG 的監測時刻 2012/4/24~4/28 之海潮負載效應重力改正值。

由於 SGOTL 模式使用的高程相依的海潮負載格林函數，並以傅利葉函數型態推求之系數(振幅和相位)來推估重力改正值，為國內首次採用的方法，根據黃鉅富(2012)指出在重力觀測資料改正中經過 SGOTL 模式的海潮負載改正後，能提高改正成效；本研究運用穩定數據 check data(詳述於第 4-7 節)，經過 SGOTL 海潮負載模式改正後，以平差組合模式 caseA2 之平差計算(詳述於第六章)，所得的 SGOTL 海潮負載模式改正前後標準差(standard deviation, SD)，如表 4-3、表 4-4、表 4-5、表 4-6 所示可知在第一期、第二期、第三期和第四期數據的標準差精度平均提升約 1.4% ~ 6.2%，其中的海潮改正前與改正後的標準差最小改變量之測站為 YMSG 及 YAG3，原因為該兩測站為用於平差計算的約制固定站，另外，海潮改正前及改正後的標準差最大改變量之測站分佈在 Y018、Y019 及 Y021，原因為該這三個測站都處理在重力網形中地形較高的位置，故此，受到高程相依的 SGOTL 模式改正後的標準差下降量較大，即有較佳的精度提升。

表4-3 第一期數據加入 SGOTL 海潮改正前後的標準差 SD 比較 (unit:  $\mu$  gal)

最小及最大偏差量之測站	SD (SGOTL 模式改正前)	SD (SGOTL 模式改正後)	SD 下降量 (SGOTL 模式改正前-改正後)	精度提升
Minimum(YMSG)	0.1367	0.1325	0.004	2.9%
Maximum (Y021)	20.0149	19.4087	0.606	3%
所有測站的平均標準差(SD)改正後之下降量為 0.248 $\mu$ gal，平均精度提升約 3%				

表4-4 第二期數據加入 SGOTL 海潮改正前後的標準差 SD 比較 (unit:  $\mu$  gal)

最小及最大偏差量之測站	SD (SGOTL 模式改正前)	SD (SGOTL 模式改正後)	SD 下降量 (SGOTL 模式改正前-改正後)	精度提升
Minimum (YAG2)	0.1733	0.1702	0.003	1.73%
Maximum (Y018)	19.6427	19.2913	0.351	1.79%
所有測站的平均標準差(SD)之下降量為 0.155 $\mu$ gal，平均精度提升約 1.78%				

表4-5 第三期數據加入 SGOTL 海潮改正前後的標準差 SD 比較 (unit:  $\mu$  gal)

最小及最大偏差量之測站	SD (SGOTL 模式改正前)	SD (SGOTL 模式改正後)	SD 下降量 (SGOTL 模式改正前-改正後)	精度提升
Minimum (YAG2)	0.07051	0.06953	0.00098	1.39%
Maximum (Y019)	18.7383	18.4768	0.262	1.4%
所有測站的平均標準差(SD)之下降量為 0.130 $\mu$ gal，平均精度提升約 1.4%				

表4-6 第四期數據加入 SGOTL 海潮改正前後標準差 SD 比較 (unit:  $\mu$  gal)

最小及最大偏差量之測站	SD (SGOTL 模式改正前)	SD (SGOTL 模式改正後)	SD 下降量 (SGOTL 模式改正前-改正後)	精度提升
Minimum (YAG2)	0.1190	0.1116	0.007	5.9%
Maximum (Y019)	21.9682	20.6111	1.357	6.2%
所有測站的平均標準差(SD)之下降量為 0.558 $\mu$ gal，平均精度提升約 6.2%				

### 4-3-3 大氣壓力效應

重力觀測的過程中，在監測站所測得重力觀測資料必需考量由大氣壓力對重力值產生的影響效應，而大氣造成的重力變化之效應(Warburton and Goodkind, 1977)可分成兩部分：(1)由大氣壓力變化所造成之直接牛頓吸引力作用；(2)大氣壓力對於地表或海面所產生之大氣負載效應。故此，本研究將每次所觀測的重力值歸算至標準大氣壓狀態，對每筆重力觀測值進行氣壓改正，參考 Torge(1989)公式如(4-4)式所示。

$$\delta_{gb} = A(P_0 - P_n) \quad (4-4) \text{式}$$

$$P_n = 1013.25 \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15}\right)^{5.2259} \quad (4-5) \text{式}$$

$\delta_{gb}$  為大氣壓力重力改正量，單位為  $\mu \text{ gal}$ ； $P_0$  為觀測站的大氣壓力觀測值， $P_n$  為測站的標準大氣壓力， $P_0$  與  $P_n$  單位為  $\text{hPa}$ ； $P_n$  可由公式(4-5)式求得；而  $H$  代表該測站的海拔高程，單位為公尺； $A$  為大氣壓力導納係數(gravity-atmosphere admittance factor)，本文以下簡稱 admittance 係數，單位為  $\mu \text{ gal/hPa}$ 。

本研究運用的  $P_0$  值為在監測站進行相對重力觀測過程中採用氣壓計測得的現地大氣壓力讀數； $P_n$  值為根據測站的高程  $H$  計算出其標準大氣壓力值，本研究根據以上公式(4-4)式和(4-5)式，並運用 The MathWorks 公司出品的數學軟體 MATLAB 編寫大氣壓力重力改正量程式 PresCorr.m(詳見於附錄 B)；本研究以穩定數據 check data(詳述於第 4-7 節)，並運用 admittance 係數為  $-0.35 \mu \text{ gal/hPa}$ (參考 Hwang et al., 2009)，並分析比較與 Torge (1989)運用的  $-0.30 \mu \text{ gal/hPa}$  標稱氣壓導納(nominal admittance)係數的平差計算結果，平差計算方式選用平差組合模式 caseA2 之平差計算(詳述於第六章)，運用兩種(admittance)係數( $-0.30$  及  $-0.35 \mu \text{ gal/hPa}$ )的網形平差計算後所得平均標準差(SD)之精度比較結果如下表 4-7 所示。

表4-7 運用兩種 admittance 係數(-0.3 及-0.35 $\mu$  gal/hPa)之平差精度 SD 比較

相對重力監測時期 Survey schedule	運用 nominal admittance 係數(-0.30 $\mu$ gal/hPa)之 平差後平均 SD	運用 admittance 係數 (-0.35 $\mu$ gal/hPa)之 平差後平均 SD
第一期 (2012/4/24~4/28)	8 $\mu$ gal	8 $\mu$ gal
第二期 (2012/6/29~7/2)	7 $\mu$ gal	6 $\mu$ gal
第三期 (2012/9/14~9/18)	9 $\mu$ gal	9 $\mu$ gal
第四期 (2012/11/28~12/2)	8 $\mu$ gal	8 $\mu$ gal

註 1：SD 代表為 standard deviation

從表 4-7 中可見本研究運用的 admittance 係數(-0.35 $\mu$  gal/hPa)在第二期觀察資料的平差結果之標準差(SD)精度提升(SD 下降 1 $\mu$  gal)，其原因可能由於在四期的施測作業中，在第二期的施測時期(2012/6/29~7/2)內受到一個有效影響台灣外圍環流的颱風(交通部中央氣象局，2012)，本文根據交通部中央氣象局 6 月的氣候監測報告內容指出在 6 月 28 日至 29 日間臺灣受到杜蘇芮(DOKSURI)颱風的外圍環流影響，根據文獻(高瑞其 等，2009)指出一般情形下導納係數跟氣壓變化大時的導納係數不同。故此，本文所運用的導納(admittance)係數較適合於本研究的施測作業，建議利用超導重力儀等儀器的連續監測重力值來推算適合該施測時期的大氣導納係數，使大氣壓力改正模式更加精確。

#### 4-3-4 極移效應

監測站在施測過程中受到的極移效應為地球的瞬時旋轉軸的動態改變而產生加速度的變化所造成的重力影響，其改正值以監測站施測時的極點坐標位置來進行計算，計算公式參考 Torge(1989)如下(4-6)式所示：

$$\delta_{g_p} = - (1.164 \times 10^9) \omega^2 R \sin 2\phi (x \cos \lambda - y \sin \lambda) \quad (4-6) \text{式}$$

在(4-6)式中 $\delta_{g_p}$ 為極移效應改正，單位為 $\text{nm/s}^2$ ； $\omega$ 為地球旋轉角速度； $R$ 為平均地球半徑(m)， $\lambda$ 與 $\phi$ 分別為大地經度和大地緯度，單位為 $\text{rad}$ ； $x$ 與 $y$ 分別為監測站在 The international earth rotation service(IERS)中的極坐標； $x$ 與 $y$ 值為運用 IERS 公佈的極坐標值，本研究運用 IERS 公佈的 EOP08C04 系列參數，下載的地球自轉參數(EOP)源自 IERS 官方網址 <http://www.iers.org/> 或簡易網址 <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04>。

本研究運用 TSoft 軟體進行極移效應的計算，其操作過程如下：

(1) 下載地球自轉參數(EOP)檔：根據監測站的觀測年份，在 IERS 簡易網址 <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04> 中下載對應觀測時間的地球自轉參數(EOP)檔 eopc04.XX，XX 為年份；本文以下載 2012 年的 EOP 參數檔 eopc04.12 進行計算。

(2) 根據監測站的台灣本地觀測時間( $T_{\text{local}}$ )，轉換成 UTC 時間( $T_{\text{local}} - 8$ )，下載供應 TSoft 計算的 UTC 時間序列(來源於 AGTO FTP: <AGTO@140.113.16.174>)，在 TSoft 軟體的主選單中選擇 open，並以 TSF format 打開從 AGTO FTP 提供的超導資料的檔案(包含時間序列)G1120425.049(檔案說明詳述於 4-3-1-1 節)。

(3) 建立測站資料檔：選擇 Tide  $\rightarrow$  Synthetic tides  $\rightarrow$  Open location database。

(4) 在 Location database 主選單中選擇 Location  $\rightarrow$  Add location。接著加入該 YMSG 監測站的經緯度和正高值(如圖 4-2 所示)。

(5) 點選在(4)建立的測站檔和點選前 4-3-1-1 節所產生的 DDW 檔(根據 TSoft manul(2011)指出所點選的 DDW 內容不影響極移效應，只為內定的操作程序)，隨後在 Location database 主選單中選擇 Theotide  $\rightarrow$  Compute polar motion effect。可計算出該監測站在選定時間序列之極移效應( $\text{nm/s}^2$ )，並經本文轉化成統一重力值單位  $\mu\text{gal}$ ，如圖 4-9 所示，其 YMSG 測站在監測期間(2012/4/24~4/48)的極移效應重力值變化範圍為  $0.13\mu\text{gal}$  ( $-4.523 \sim -4.653\mu\text{gal}$ )，其影響值不大。

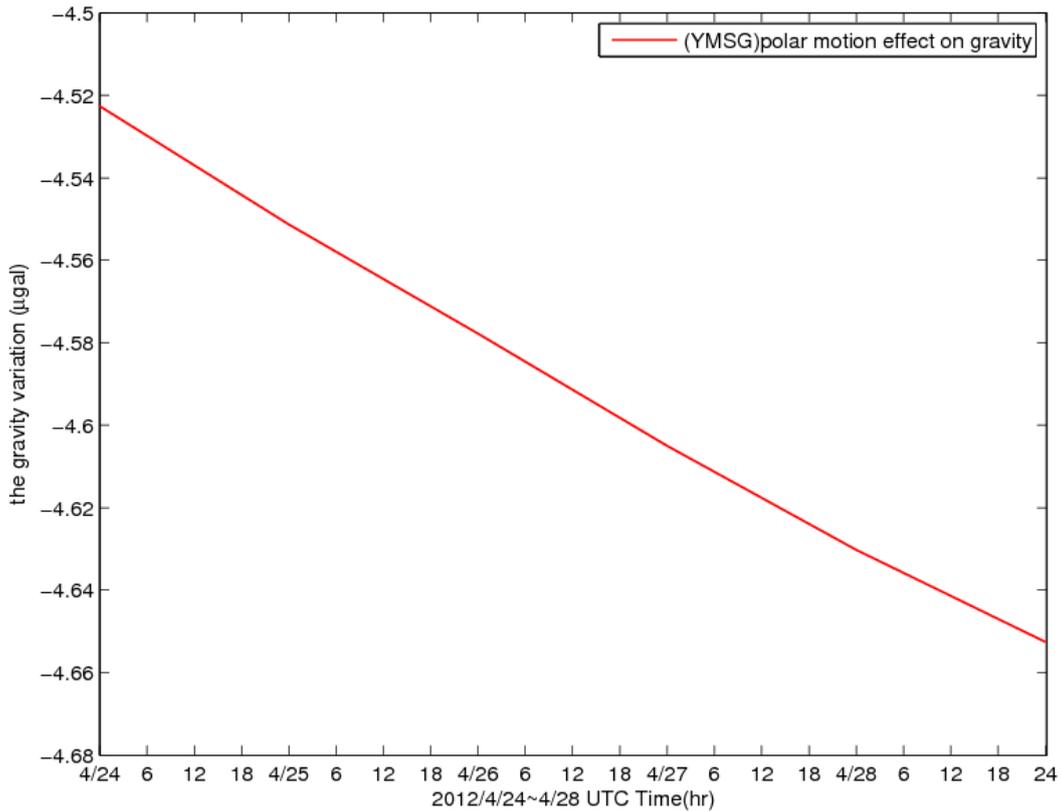


圖4-9 測站 YMSG 在監測期間(2012/4/24~4/48)的極移效應重力值變化

#### 4-4 相對重力值的各改正量綜合處理

從上述第 4-3 節的環境處理後，可得到各項環境因素影響的重力改正量，並通過本研究運用 MATLAB 軟體所編寫的改正量篩選程式(如附錄 C)，該程式可根據本研究的各小段路線的施測實行時間(UTC 時間)，把對應施測時間所需要的改正量挑選取出，隨後經過第 4-3 節的環境改正後殘餘重力公式(4-3)式所示的運算式以原始值  $G_{raw}$  去除環境改正之綜合效應量；本文示範以第一期施測時間的路線 1R 之監測站 YMSG 的觀測時段以呈現該點環境改正的效應量(如表 4-8)，其監測時間 22 分鐘內的重力效應量最大可達  $-31.081 \mu gal$ ，可知其改正尤其重要，如圖 4-10 所示，可看出改正前的 15 筆原始重力值變化線(紅色線)在最後三筆(第 13 筆至第 15 筆)重力值出現下降的變化，使原始重力值變化線(紅色線)出現曲線的變化趨勢，比較經過改正後的 15 筆殘餘重力值變化線(藍色線)，可看出有近似於一致的線性變化趨勢，原因為經過環境改正後還剩下相對重力儀器 CG-5 的線性漂移量所致。

表4-8 測站 YMSG 的觀測時段之環境改正效應量

施測日期及 時間(UTC) (hr : min : sec)	(a)地球固體潮 及極移效應量 ( $\mu$ gal)	(b)海潮負載 重力改正量 ( $\mu$ gal)	(c)氣壓效 應量 ( $\mu$ gal)	綜合效應量 (a - b + c) ( $\mu$ gal)
4/28 04:21:41	-22.9694	-2.7539	-1.614	-21.830
4/28 04:23:20	-23.6377	-2.7455	-1.614	-22.506
4/28 04:24:54	-24.2747	-2.7411	-1.614	-23.148
4/28 04:26:28	-24.9142	-2.7317	-1.614	-23.797
4/28 04:28:02	-25.556	-2.7217	-1.614	-24.448
4/28 04:29:36	-26.2	-2.7164	-1.614	-25.098
4/28 04:31:10	-26.8463	-2.7054	-1.614	-25.755
4/28 04:32:44	-27.4946	-2.6996	-1.614	-26.409
4/28 04:34:18	-28.1449	-2.6875	-1.614	-27.071
4/28 04:35:52	-28.7972	-2.6812	-1.614	-27.730
4/28 04:37:26	-29.4513	-2.6681	-1.614	-28.397
4/28 04:39:00	-30.1072	-2.6543	-1.614	-29.067
4/28 04:40:34	-30.7648	-2.6471	-1.614	-29.733
4/28 04:42:08	-31.4241	-2.6323	-1.614	-30.406
4/28 04:43:43	-32.0919	-2.6246	-1.614	-31.081

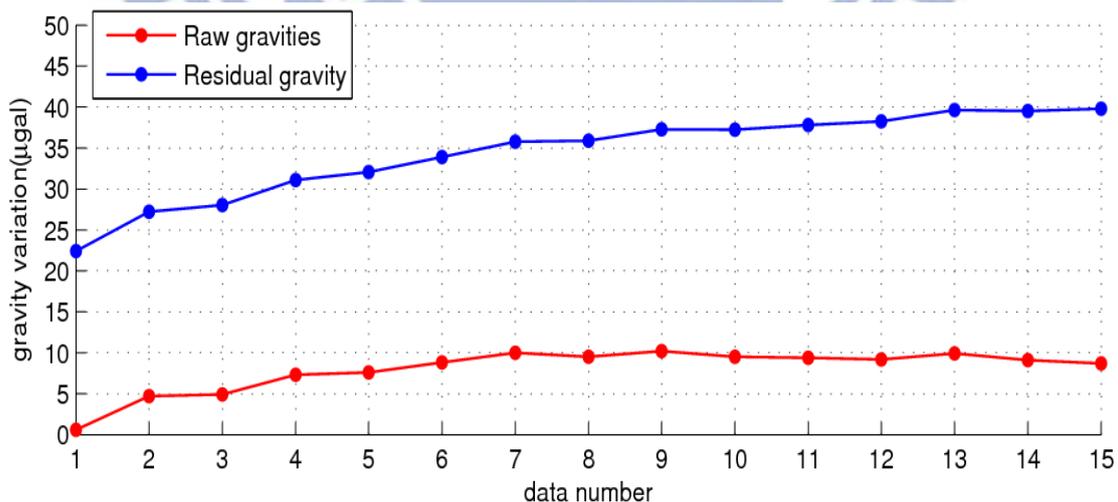


圖4-10 路線 1R 之 YMSG 站改正前的原始重力值和改正後的殘餘重力的變化量

(以上顯示的重力值是扣除基準為 4003530 $\mu$  gal 的重力值)

#### 4-5 絕對重力值之綜合處理及改正模式

本研究的絕對重力觀測資料的環境改正採用絕對重力儀器內建搭配軟體 g7.0 (Micro-g 公司提供)對各個監測站的觀測重力值進行數據綜合處理，參考文獻(Micro-g LaCoste, 2007)指出的絕對重力儀 FG5 量測作業程序，g7.0 軟體可供使用的重力觀測資料之改正包括地球固體潮(Solid earth tide)、海潮負載(Ocean tide loading)、大氣壓力(Barometric pressure)、極移(Polar motion)、換算高度等以獲取改正後高精度的絕對重力值；該 g7.0 軟體相關的處理及改正模式如下所述：

(1) 潮汐改正(Tide correction)：

運用 g7.0 軟體的潮汐改正(Tide correction)的功能選項進行地球固體潮及海潮負載的改正模式，本研究運用 ETGTAB 模式(Wenzel, 2002)來進行地球固體潮改正及運用海潮模式 FES2004(Letellier *et al.* 2004)來進行海潮負載計算。

(2) 大氣壓力(Barometric pressure)：

根據現場觀測的大氣壓力值來計算至正常大氣壓力狀況下的重力值改正量，其公式如前第 4-3-3 節的(4-4)式(Torge, 1989)所示，在本項的改正中，(4-4)式的大氣壓導納係數  $A$  為  $-0.30 \mu \text{ gal/hPa}$ (Torge, 1989; Merriam, 1992)，並加入現場觀測的大氣壓力值( $P_0$ )和測站的標準大氣壓力值  $P_n$ ， $P_0$ 與  $P_n$ 單位為 hPa； $P_n$ 可由 g7.0 軟體根據公式(4-5)式所得。

(3) 極移(Polar motion)：

極移改正方程式根據1992年IAGBN使用的Absolute Observations Data Processing Standards，及運用International Earth Rotation Service and Reference System所提供的地球自轉參數(參考來源IERS: <http://hpiers.obspm.fr/>)來進行計算該測站的極移改正。

(4) 絕對重力觀測數據的篩選：

在 FG5 觀測數據的篩選上運用 g7.0 的不確度(Uncertainty)設定，根據設定的排除下落離散程度(Reject Sigma)，設定上以大於 3 倍標準差的觀測數據作為排除條件，排除後的數據再重新計算平均值(詳述前第 3-3-2 節)。

#### 4-6 整合絕對重力值與相對重力值的歸算

絕對重力儀 FG5 觀測出的絕對重力值是用於在相對重力網的網形平差中進行加權約制平差處理；在加權約制平差處理前，由 FG5 監測出的絕對重力值需要歸算至相對重力儀 CG-5 的感測器高度(Jacob et al., 2010)，使網形中各測點所測出的重力值都在同一的基準上處理，以減少相對點重力值在歸算時造成的不確定度；根據文獻(Jacob et al., 2010 ; Niebauer et al., 1995; Timmen, 2003)指出 FG5 觀測得到的絕對重力值為下落體質量球在下落頂端位置的重力值( $g_c$ )，如圖 4-11 所示，並且進行高度歸算，把重力值轉換至參考面高度( $h_{ref}$ )的重力值( $g_{ref}$ )；故此，在進行歸算處理時實測的垂直重力梯度值尤其重要。

從參考面高度( $h_{ref}$ )的重力值( $g_{ref}$ )換算至 CG-5 感測器高度( $h_{CG5}$ )的重力值( $g_{CG5}$ )的關係式如(4-7)式(Jacob et al., 2010)所示如下：

$$g_{CG5} = g_{ref} + g_r(h_{ref} - h_{CG5}) \quad (4-7) \text{式}$$

(4-7)式中的 $g_r$ 為垂直重力梯度值，單位為  $\mu \text{ gal/cm}$ 。本研究的 FG5 儀器的下落體距地面高度( $h_c$ )為 120 公分，如圖 4-11 所示，各個絕對重力點的觀測值首先統一經過標準作業歸算至參考面高度( $h_{ref}$ )距地面高為 100 公分；CG-5 感測器至地面高度( $h_{CG5}$ )為 26.9 公分，包含三腳架高度為 18 公分和 CG-5 感測器與儀器底部的內距為 8.9 公分(Scintrex Limited, 2010)。

在高度歸算時所需要運用的垂直重力梯度值，其梯度測量採用相對重力儀 EG-1200，並使用梯度架(架高為41公分)進行垂直重力梯度量測，依據基樁面(底點)A點及梯度架面(高點)B點，為提供高精度重力測量需求，各點分別重覆觀測 15筆為平均重力值，並以獨立測線的順序A→B→A來進行觀測，重力監測點的地理位置及地形條件的差異，可導致得出的垂直重力梯度值不同；本文的5個重力監測點 $g_{ref}$ 換算至 $g_{CG5}$ 的重力值及重力梯度值 $g_r$ ， $g_r$ 範圍為-2.89~-3.61  $\mu \text{ gal/cm}$ 如表4-9、表4-10、表4-11、表4-12和圖4-12所示。

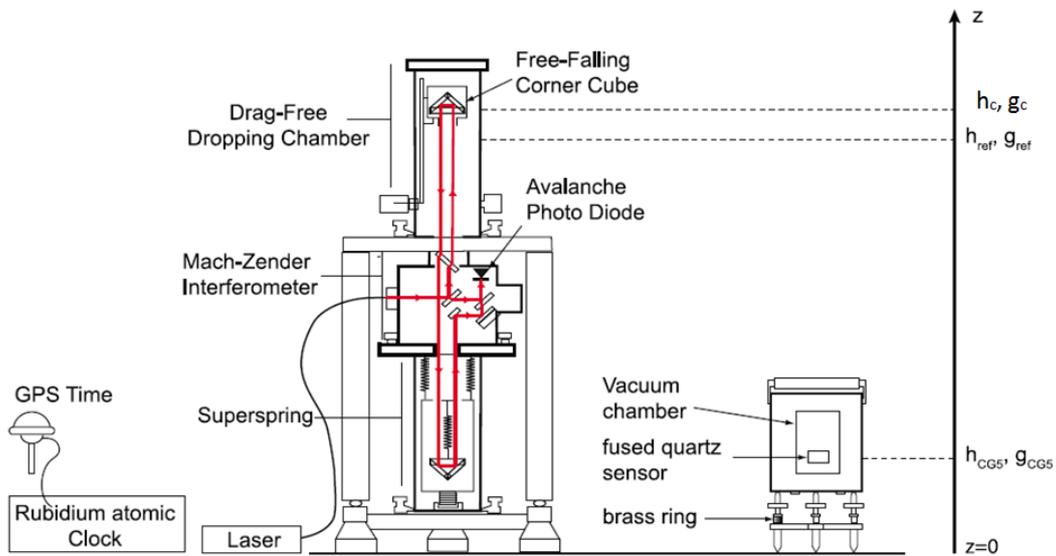


圖4-11 FG5 與 CG5 的重力儀施測的重力值與儀器高度的關聯圖

[圖形來源：Jacob et al., 2010]

表4-9 第一期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值

第一期 監測站	絕對重力值 $g_{ref}$ ( $\mu$ gal)	重力梯度值 $g_r$ ( $\mu$ gal/cm)	換算至 CG5 感測器高度之 絕對重力值 $g_{CG5}$ ( $\mu$ gal)
擎天崗 YMSG	978813912.44	-3.61	978814176.33
文化大學 YAG1	978886554.22	-3.9	978886839.31
湖田國小 YAG2	978836211.09	-2.89	978836422.35
小油坑 YAG3	978804639.04	-2.98	978804856.88
大坪國小 YAG4	978901724.77	-3.26	978901963.08

表4-10 第二期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值

第二期 監測站	絕對重力值 $g_{ref}$ ( $\mu$ gal)	重力梯度值 $g_r$ ( $\mu$ gal/cm)	換算至 CG5 感測器高度之 絕對重力值 $g_{CG5}$ ( $\mu$ gal)
擎天崗 YMSG	978813908.55	-3.61	978814172.44

文化大學 YAG1	978886559.40	-3.9	978886844.49
湖田國小 YAG2	978836208.27	-2.89	978836419.53
小油坑 YAG3	978804636.35	-2.98	978804854.19
大坪國小 YAG4	978901724.32	-3.26	978901962.63

表4-11 第三期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值

第三期 監測站	絕對重力值 $g_{ref}$ ( $\mu$ gal)	重力梯度值 $g_r$ ( $\mu$ gal/cm)	換算至 CG5 感測器高度之 絕對重力值 $g_{CG5}$ ( $\mu$ gal)
擎天崗 YMSG	978813901.86	-3.61	978814165.75
文化大學 YAG1	978886544.10	-3.9	978886829.19
湖田國小 YAG2	978836217.25	-2.89	978836428.51
小油坑 YAG3	978804620.26	-2.98	978804838.10
大坪國小 YAG4	978901720.10	-3.26	978901958.41

表4-12 第四期絕對重力點的重力梯度值及歸算前後的絕對重力值

第四期 監測站	絕對重力值 $g_{ref}$ ( $\mu$ gal)	重力梯度值 $g_r$ ( $\mu$ gal/cm)	換算至 CG5 感測器高度之 絕對重力值 $g_{CG5}$ ( $\mu$ gal)
擎天崗 YMSG	978813908.17	-3.61	978814172.06
湖田國小 YAG2	978836208.16	-2.89	978836419.42
小油坑 YAG3	978804634.56	-2.98	978804852.40

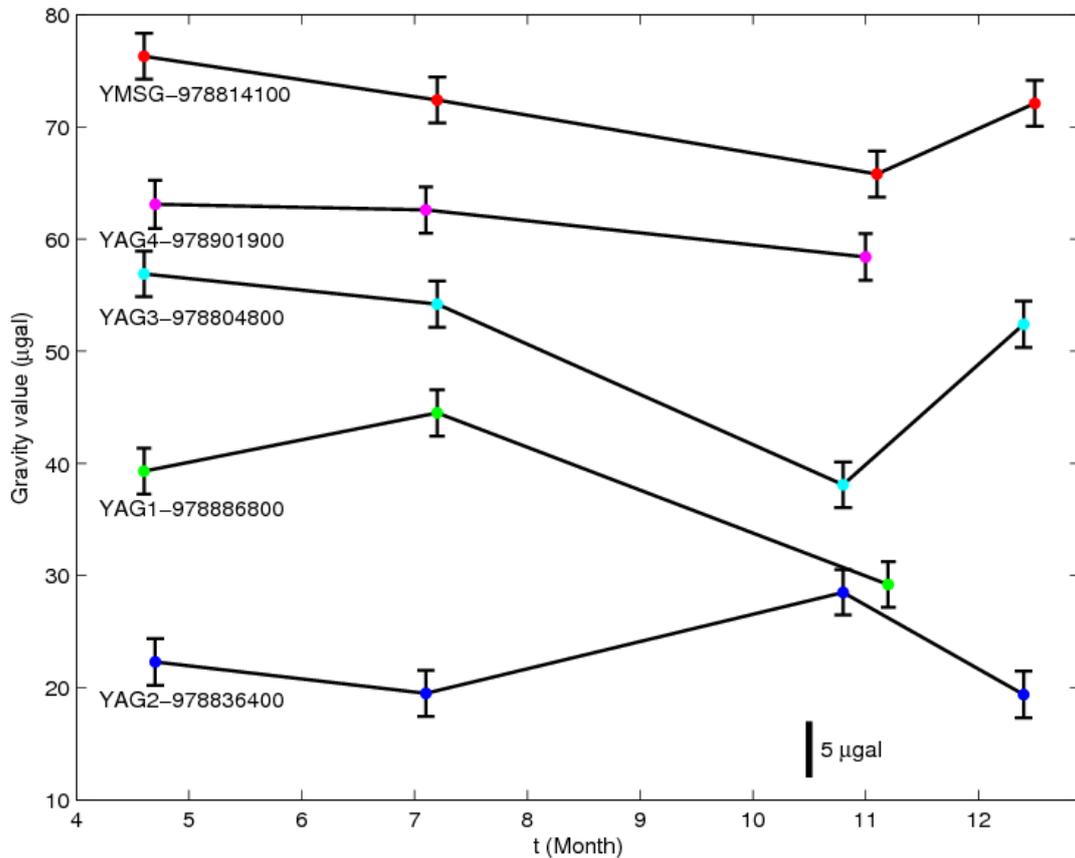


圖4-12 共四期的 FG5 監測所得並轉化至高度 $h_{CG5}$ 的絕對重力值( $g_{CG5}$ )  
(以上顯示的重力值已扣除基準重力值，用於檢視相對重力變化量)

#### 4-7 資料篩選處理考量

本研究根據 CG-5 實測的重力值觀測資料收集設定(詳述於第 3-4-2 節)，以觀測 90 秒(Debeglia & Dupont, 2002; Mouyen et al., 2013)所得的 90 筆樣本數據，並經過 seismic filter 雜訊去除模式，把大於 4 倍標準差的樣本刪除，最後平均成一筆平均數據(Scintrex Limited, 2010)，在各個相對重力測站共收集 15 筆平均數據為觀測組數據；在 15 筆數據中為了取得穩定的數據，根據文獻( Mouyen et al., 2013)指出需要注意監測數據的穩定度，如該監測點獲取的觀測組數據需要附合最後 3 筆變化量應少於  $5\mu\text{gal}$  及檢視儀器內部溫度的變化情形；本研究依據如下四點以獲得穩定的觀測量數據(本文選取的穩定數據簡稱 check 8 data)：

(1) 在 15 筆觀測數據中，如圖 4-13 所示的絕對點位 YMSG 的相對重力儀 CG-5 觀測重力值讀數運作處理時間差值，儀器在設定 seismic filter 濾波模式後，

在開始施測運作時間的第一筆讀數需額外增加 5 秒的處理時間(Scintrex Limited, 2010)，最後一筆的內定處理程序需增加 1 秒，故可知在第 2 筆至第 14 筆的儀器內部處理運作時間需要出現一致的 94 秒時間差值(包括 90 秒數據讀數及 4 秒的儀器改正模式處理時間)，考量各筆讀數處理運作時間之差異而產生的不確定度影響，故此，本研究以第三筆讀數為選取數據的開始。

(2) 刪除前二筆數據後選取連續觀測組數據，該觀測組數據需符合最後 3 筆數據(即最後的 3 個 90 秒的平均讀數)之間的變化量少於  $5\mu\text{gal}$ ，並且從所選取的連續讀數中不再呈現明顯(大於  $5\mu\text{gal}$ )上升或下降的趨勢。

(3) CG-5 的感測器管腔(sensor chamber)的內部溫度變化，具有影響着彈簧的材質特性，彈簧受到儀器溫度的不同改變時，會使靈敏的石英彈簧長度產生變化，根據 CG-5 操作手冊指出正常操作情況下的儀器內部溫度值範圍為  $\pm 10\text{mK}$  內，並且經過儀器內部設定以溫度改正模式(TEC)進行改正(詳述於 Scintrex Limited, 2010)，為考量減少溫度產生的影響效應，故此需要選取溫度變化穩定的讀數，本研究資料的溫度值範圍為  $\pm 7\text{mK}$  內，並且各觀測讀數之間的儀器內部溫度變化量不大於  $0.1\text{mK}$ ，如圖 4-14(右)為監測站 YMSG 的儀器內部溫度值範圍。

(4) 考量 CG-5 儀器的水平傾斜軸的傾斜值 tilt X 和 tilt Y，儀器內部設定可以在傾斜(tilt)範圍在  $\pm 200\text{arcsec}$  內以傾斜改正模式(TEC)進行重力值改正(詳述於 Scintrex Limited, 2010)，根據文獻(Merlet et al., 2008)指出若要達到  $1\mu\text{gal}$  的誤差精度，該傾斜(tilt)範圍應少於  $\pm 20\text{arcsec}$ ，並在傾斜(tilt)範圍少於  $\pm 3\text{arcsec}$  時，該誤差可忽略不計。圖 4-15 及圖 4-16 為監測站 YMSG 的傾斜值及傾斜差值變化範圍。

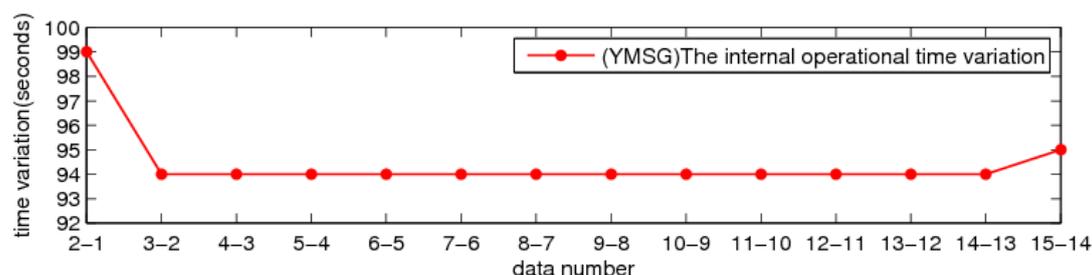


圖4-13 測站 YMSG 的 CG-5 觀測重力值讀數運作處理時間差值

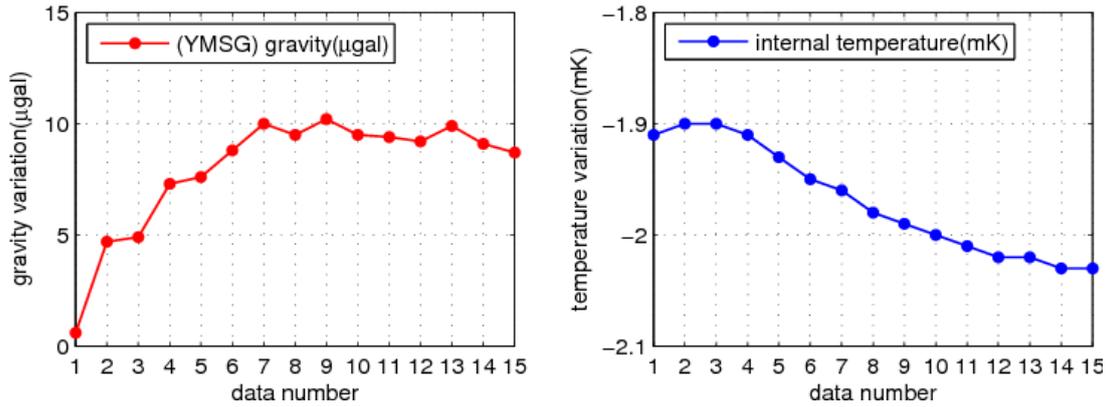


圖4-14 (左圖)測站 YMSG 的觀測值  $G_{raw}$ (未經環境改正)；(右圖)儀器內部溫度值

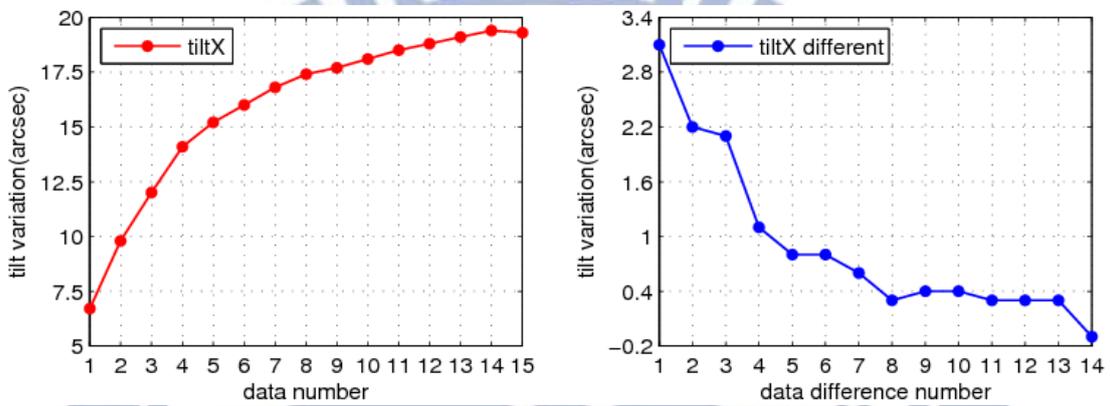


圖4-15 (左圖)監測站 YMSG 的傾斜 X 值及(右圖)傾斜差值的變化範圍

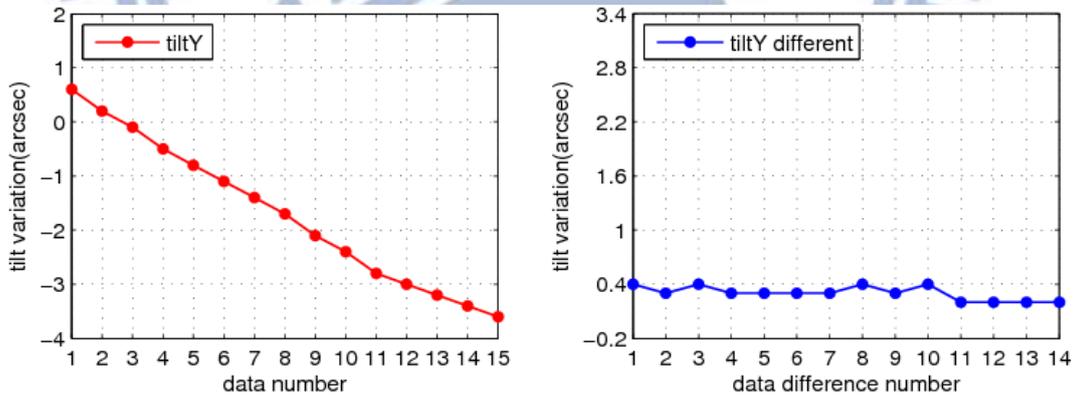


圖4-16 (左圖)監測站 YMSG 的傾斜 Y 值及(右圖)傾斜差值的變化範圍

在圖 4-14(左圖)監測站 YMSG 的觀測值  $G_{raw}$  為保留儀器內部改正模式，包括水平軸傾斜改正模式(TIC)和溫度改正模式(TEC)，但未經過儀器外部環境改正的重力值(詳述於第 4-2 節)；圖 4-15 及圖 4-16(右圖)為連續觀測傾斜值之間的相鄰變化差值(取絕對值呈現)，該差值越小即表示傾斜值之間越趨向穩定；從儀器

的觀測值  $G_{raw}$  的穩定讀數約在第 8 筆開始(如圖 4-14)，與儀器內部溫度值及傾斜 X 值約在第 8 筆起開始穩定的趨勢相同，而傾斜 Y 值小於  $\pm 4\text{arcsec}$ ，已接近穩定的線性趨勢變化，該變化量不大於  $0.4\text{arcsec}$ (如圖 4-16 右圖)。

本研究依據以上所述的四點考量方式，以獲得穩定的觀測量數據平均值(本文選取的穩定數據簡稱 check 8 data)，經過重力網形平差程式(gravnet)，本研究運用最佳之平差組合模式 caseA2 進行計算(詳述於第六章)，並與選取全部共 15 筆數據(all data)平均值，合共四期的重力網形施測作業的平差計算之精度結果比較如表 4-13、表 4-14、表 4-15、表 4-16 所示，可知在選取的 check 8 data 精度表現較佳，該殘差的最大值及最小值範圍小於 all data，並且 check 8 data 的重力值標準偏差平均值為最小，平均能有效提高 10% 至 53.8% 的精度。

表4-13 第一期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較

第一期(First campaign)					
Count data	殘差之最大值 Maximum residuals (mgal)	殘差之最小值 Minimum residuals (mgal)	重力值標準偏差最大值 Maximum standard deviation (mgal)	重力值標準偏差最小值 Minimum standard deviation (mgal)	重力值標準偏差平均值 Average standard deviation (mgal)
all data (15 data)	0.029	-0.037	0.022	0.0002	0.009
check 8 data	0.027	-0.029	0.019	0.0001	0.008
從 all data 至 check 8 data 的標準差平均值有效降低 $1 \mu\text{gal}$ ，精度提高約 11.11% ( $1 \mu\text{gal} / 9 \mu\text{gal}$ )。					
註： $1\text{mgal} = 1000 \mu\text{gal}$ ， $1 \mu\text{gal} = 1 \times 10^{-8} \text{m s}^{-2}$ 。					

表4-14 第二期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較

第二期 (Second campaign)					
Count data	殘差之最大值 (mgal)	殘差之最小值 (mgal)	重力值標準偏差最大值 (mgal)	重力值標準偏差最小值 (mgal)	重力值標準偏差平均值 (mgal)

all data (15 data)	0.025	-0.023	0.029	0.0002	0.013
check 8 data	0.015	-0.023	0.015	0.0001	0.006
從 all data 至 check 8 data 的標準差平均值(SD)有效降低 7 $\mu$ Gal 精度提高約 53.8% (7 $\mu$ gal / 13 $\mu$ gal)					
註：1mgal = 1000 $\mu$ gal，1 $\mu$ gal = $1 \times 10^{-8}$ m s <sup>-2</sup> 。					

表4-15 第三期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較

第三期 (Third campaign)					
Count data	殘差之 最大值 (mgal)	殘差之 最小值 (mgal)	重力值標準 偏差最大值 (mgal)	重力值標準 偏差最小值 (mgal)	重力值標準偏 差平均值 (mgal)
all data (15 data)	0.038	-0.026	0.021	0.0001	0.010
check 8 data	0.031	-0.020	0.018	0.0001	0.009
從 all data 至 check 8 data 的標準差平均值(SD) 有效降低 1 $\mu$ Gal 精度提高約 10% (1 $\mu$ gal / 10 $\mu$ gal)					
註：1mgal = 1000 $\mu$ gal，1 $\mu$ gal = $1 \times 10^{-8}$ m s <sup>-2</sup> 。					

表4-16 第四期觀測資料選用 all data 與 check 8 data 之精度結果比較

第四期 (Fourth campaign)					
Count data	殘差之 最大值 (mgal)	殘差之 最小值 (mgal)	重力值標準 偏差最大值 (mgal)	重力值標準 偏差最小值 (mgal)	重力值標準偏 差平均值 (mgal)
all data (15 data)	0.028	-0.031	0.024	0.0001	0.010
check 8 data	0.026	-0.019	0.021	0.0001	0.008
從 all data 至 check 8 data 的標準差平均值(SD) 有效降低 2 $\mu$ Gal 精度提高約 20% (2 $\mu$ gal / 10 $\mu$ gal)					
註：1mgal = 1000 $\mu$ gal，1 $\mu$ gal = $1 \times 10^{-8}$ m s <sup>-2</sup> 。					

## 第五章 重力觀測網之平差計算原理

相對重力網形之平差處理中的觀測量為各個相鄰監測部之間的相對重力差值，該相對重力觀測量包含各種儀器外部環境變化的影響及儀器內部系統誤差而造成的影響，故此必需對重力觀測量進行改正 (Vanicek and Krakiwsky, 1986; Moritz & Mueller, 1987; Torge, 1989)，本研究的儀器外部環境改正方法及過程詳述於第四章所示，而儀器內部的系統誤差如Hwang et al (2002)指出受到儀器漂移及未率定參數的影響，該影響值可在組成觀測方程式中以數學模式來表示，並經過平差處理而求得；本章將介紹觀測組方程的處理，自由基準及加權約制平差之平差處理模式說明，最後敘述以平差程式gravnet的平差處理實例。

### 5-1 建立相對重力觀測方程式

相對重力觀測方程式的組成元素包括經過環境改正的相對重力值觀測量、基準未知數、率定函數和漂移參數。參考文獻(Torge, 1989)重力觀測方程式可編寫為如(5-1)式所示。

$$l(t) + v = g + N_0 + \Delta F(z) + D(t) \quad (5-1) \text{式}$$

在(5-1)式中的元素包括： $l$  為經過環境改正及約化後的重力觀測值； $t$  為觀測時間； $v$  為觀測量的殘差； $g$  為站點的重力值； $z$  為重力儀讀數量； $\Delta F(z)$  為率定函數； $D(t)$  為重力儀之漂移函數。其中重力儀器之系統誤差 $\Delta F(z)$ 及 $D(t)$ 的函數式參考文獻(Torge, 1989; Hwang et al, 2002)說明如(5-2)式及(5-3)式所示。

$$\Delta F(z) = \sum_{l=1}^m b_l z^l + \sum_{l=1}^n (x_l \cos \omega_l z + y_l \sin \omega_l z) \quad (5-2) \text{式}$$

在(5-2)式中 $\omega_l$ 為頻率，該值可參考文獻(Krieg, 1981, Jiang et al., 1988)的說明， $m, n$  為模式組數量， $b_l, x_l, y_l$  為平差處理後所求得的系數，本文簡化以一階率定函數的標準處理數學模式來計算。

儀器漂移量以讀數  $z$  和時間  $t$  的關係以泰勒函數展開(Taylor series expansion)

來模擬重力儀的漂移效應，如(5-3)式所示。

$$z(t) = z(t_0) + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)(t - t_0) + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}\right)(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{\partial^3 z}{\partial t^3}\right)(t - t_0)^3 + \dots \quad (5-3) \text{式}$$

在(5-3)式中的 $t_0$ 為測量時段的參考時間，把上式經過簡化成多項式(5-4)式。

$$\begin{aligned} z(t) &= z(t_0) + d_1(t - t_0) + d_2(t - t_0)^2 + d_3(t - t_0)^3 + \dots \\ &= z(t_0) + \sum_{p=1}^s d_p(t - t_0)^p \\ &= z(t_0) + D(t) \end{aligned} \quad (5-4) \text{式}$$

如(5-4)式所示可推導得重力儀漂移量模式 $D(t) = \sum_{p=1}^s d_p(t - t_0)^p$ ；在(5-4)式的 $z(t_0)$ 為參考時刻 $t_0$ 時的近似儀器漂移量； $d_p$ 為約化(5-3)式後的漂移率係數； $p$ 、 $s$ 為階數項；本文以一階儀器漂移計算模型來進行計算。

相對重力觀測方程式參考文獻(Hwang et al, 2002)重力觀測方程式可編寫為(5-5)式所示。

$$\Delta l_{i,j} + v_{i,j} = g_j - g_i + \left(\Delta F(z_j) - \Delta F(z_i)\right) + D(t_j) - D(t_i) \quad (5-5) \text{式}$$

在(5-5)式中 $\Delta l_{i,j}$ 為相鄰監測站 $i$ 和監測站 $j$ 之間重力差值( $l_j - l_i$ )； $v_{i,j}$ 為 $\Delta l_{i,j}$ 之殘差； $t_j$ 和 $t_i$ 為監測時間；未知基準 $N_0$ 可在兩式相減下而消除。

若有 $n$ 個觀測量，該設計矩陣表示於觀測方程式如(5-6)式所示。

$$L^b + V = AX \quad (5-6) \text{式}$$

在(5-6)式 $L^b$ 為 $n \times 1$ 的相對重力觀測量矩陣， $L^b$ 之權重 $P$ 為 $\sigma_0^2 \Sigma^{-1}$ ； $V$ 為 $n \times 1$ 的殘差矩陣； $A$ 為設計矩陣； $X$ 為 $u \times 1$ 的未知數矩陣； $u$ 為未知數總個數，未知數包括重力值 $g_i$ 、 $g_j$ ，重力儀器率定函數之參數 $b_l$ 、 $x_l$ 、 $y_l$ 及重力儀漂移率 $d_p$ 。

## 5-2 自由基準平差法

在重力觀測方程式如(5-6)式，令目標方程式(Target function) $\Phi = V^T P V$  為最小值，利用 $\partial\Phi/\partial X=0$ ，可得法方程式(Koch, 1987)如(5-7)式所示。

$$(A^T P A)X = A^T P L^b \quad \text{或} \quad NX = U \quad (5-7) \text{式}$$

在(5-7)式的 $L^b$ 為相對重力觀測量矩陣， $L^b$ 之權重 $P$ 為 $\sigma_0^2 \Sigma^{-1}$ ； $V$ 為殘差矩陣； $A$ 為設計矩陣； $X$ 為未知數矩陣，未知數總數為 $u$ 的 $X$ 矩陣，包含的重力值矩陣 $X_g$ 及儀器參數 $X_I$ ，可編寫成如(5-8)式所示(Hwang et al, 2002)。

$$X = \begin{bmatrix} X_g \\ X_I \end{bmatrix} \quad (5-8) \text{式}$$

在建立的觀測方程式中，根據文獻(Hwang et al, 2002；魏祥鴻，2005)指出若無加約制條件，會造成法方程式中 $A$ 之秩虧度(rank defect)為1，即表示 $A$ 之秩不足，則 $N^{-1}$ 不存在，在自由網平差中沒有已知的解算數據，若要得出唯一解，在 $V^T P V$ 改正量加權平方和最小外，需有(5-9)式兩種特性(Caspary, 1988):

$$X^T X = \|X\|^2 = \min \quad \text{且} \quad \text{trace}(Q_{XX}) = \min \quad (5-9) \text{式}$$

在(5-9)式的 $\|X\|$ 為規(norm)值， $\text{trace}(Q_{XX})$ 為未知數的協因子矩陣(Cofactor Matrix)的跡(trace)，故此，若不用加權約制方法而使法方程式(5-7)式有唯一解，這時可加入基準條件(Koch, 1987)如(5-10)式所示。

$$S^T X = 0 \quad (5-10) \text{式}$$

在(5-10)式 $S$ 矩陣為需要滿足的條件(Koch, 1987；Caspary, 1988)：

$$A S = 0 \quad (5-11) \text{式}$$

若在重力點數為 $k$ ，而重力儀器參數量為 $u-k$ 個，重力觀測方程之 $A$ 矩陣設定為每一列之前 $k$ 個元素內由0、-1、1組成，並且-1、1只出現一次； $S$ 矩陣可

編寫成(5-12)式(Hwang et al, 2002；魏祥鴻，2005)所示。

$$S^T = \left[ \underbrace{1 \quad 1 \quad \dots \quad 1}_k \quad \underbrace{0 \quad 0 \quad \dots \quad 0}_{u-k} \right] \quad (5-12) \text{式}$$

未知數之解為最小規範數解( minimum norm solution)，滿足(5-7)式並加入基準條件(5-10)式後，未知數之解如(5-13)式(Koch, 1987；Caspary,1988)所示。

$$\hat{X}^+ = (A^T P A + S S^T)^{-1} A^T P L^b = (N + S S^T)^{-1} U \quad (5-13) \text{式}$$

經誤差傳播得 $\hat{X}^+$ 後驗協變方矩陣為如(5-14)式(Koch, 1987)， $N^+$ 為 $N$ 的虛擬逆矩陣(pseudo inverse)(Caspary,1988)，而後驗單位權變方如(5-15)式所示。

$$\hat{\Sigma}_{\hat{X}^+} = \hat{\sigma}_0^2 (N + S S^T)^{-1} N (N + S S^T)^{-1} = \hat{\sigma}_0^2 N^+ \quad (5-14) \text{式}$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n+1-u} \quad (5-15) \text{式}$$

在(5-13)式中解算得的 $\hat{X}^+$ 為滿足(5-10)式，因此可編成(5-16)式(Koch, 1987)：

$$\sum_{i=1}^k \hat{g}_i = 0 \quad (5-16) \text{式}$$

在(5-16)式的 $\hat{g}_i$ 為在於 $\hat{X}^+$ 矩陣第 $i$ 站之重力估值，其所有點的重力平均值為零，故此，自由基準解算得出的重力值為不具實質意義的非真正重力值，而解算得的改正數 $V$ 為唯一具有意義(Koch, 1987)，解算得的 $\hat{X}^+$ 矩陣如(5-17)式所示。

$$\hat{X}^+ = \begin{bmatrix} \hat{X}_g \\ \hat{X}_I \end{bmatrix} \quad (5-17) \text{式}$$

在(5-17)式中 $\hat{X}_g$ 為解算得的重力值矩陣， $\hat{X}_I$ 為解算得的儀器參數矩陣，則兩站間經過儀器參數改正後的相對重力值 $\Delta G$ 如(5-18)式所示。

$$\Delta G = A_g \hat{X}_g = V + L^b - A_I \hat{X}_I \quad (5-18) \text{式}$$

在(5-18)式的 $A_g$ 為對應 $\hat{X}_g$ 的係數矩陣， $A_I$ 為對應 $\hat{X}_I$ 的係數矩陣，各測站點的重力值可由已知一個重力值，解算得改正後的相對重力值 $\Delta G$ 。

### 5-3 加權約制平差法

在重力網平差系統中加入加權約制方程式，以加入未知數觀測方程式來克服平差的秩虧問題，利用一個或一個以上的已知監測點之重力值及其先驗變方值 (priors variance) 的加權約制條件，使改正數  $V_X$  值接近於零，參考文獻(Uotila,1986；Hwang et al, 2002；魏祥鴻，2005)該加權約制方程數學模式如(5-19)式所示。

$$L_g + V_g = A_g X = [I \ 0] \begin{bmatrix} X_g \\ X_I \end{bmatrix} ; \quad L_g \text{的權矩陣為 } P_g \quad (5-19) \text{式}$$

在(5-19)式的  $L_g$  為約制先驗重力值， $V_g$  為約制方程的殘差值，其協變方矩陣為  $\Sigma_g$ ，該約制重力值的權  $P_g$  為對角線矩陣，Hwang et al(2002)指出  $P_g$  值的三要點：(1) 當  $P_g$  值為無限大時，約制先驗重力值在平差處理後不會被改變，其殘差值為零；(2) 當  $P_g$  值為零時，約制先驗重力值在平差處理中能自由變化，變動之大小與權成反比；(3)  $P_g$  的對角線元素中不能為零，如法方程式(5-7)式需具備可逆變化。

利用觀測方程式(5-6)式和加權約制方程式(5-19)式可組合新的觀測方程式及其權矩陣如(5-20)式所示。

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_g \end{bmatrix} \hat{X} - \begin{bmatrix} L^b \\ L_g \end{bmatrix} ; \quad \text{權矩陣 } \bar{P} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P_g \end{bmatrix} \quad (5-20) \text{式}$$

以最小化新目標函數式(new target function)  $\bar{\Phi}$  如(5-21)式，可獲得新法方程式如(5-22)式，以最小二乘法可求得未知數之估值  $\hat{X}$  如(5-23)式(Hwang et al, 2002；魏祥鴻，2005)。

$$\bar{\Phi} = V^T P V + V_g^T P_g V_g \quad (5-21) \text{式}$$

$$(A^T P A + A_g^T P_g A_g) \hat{X} = (A^T P L^b + A_g^T P_g L_g) \quad (5-22) \text{式}$$

$$\hat{X} = (A^T P A + A_g^T P_g A_g)^{-1} (A^T P L^b + A_g^T P_g L_g) \quad (5-23) \text{式}$$

以(5-23)式的估值  $\hat{X}$  及(5-20)式的  $\bar{V}$ ，可得觀測量改正數的加權平方和(5-21)式，該後驗單位權變方(posteriori variance)  $\hat{\sigma}_0^2$  如(5-24)式所示。

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\bar{\Phi}}{n-u+r} \quad (5-24) \text{式}$$

在(5-24)式中  $\bar{\Phi}$  為改正數的加權平方和(如(5-21)式);  $n$  為相對重力觀測數目;  $u$  為未知數的個數;  $r$  為約制數的總數，即為約制方程式(5-19)式之數目。經過誤差傳播獲得的未知數  $\hat{X}$  的後驗協方變(posteriori covariance)矩陣  $\hat{\Sigma}_{\hat{X}}$  如(5-25)式。

$$\hat{\Sigma}_{\hat{X}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A + A_g^T P_g A_g)^{-1} \quad (5-25) \text{式}$$

在(5-25)式中， $P_g$  為約制重力值的權如(5-19)式，約制之控制點設計矩陣  $A_g$  為對角線元素中不能為零的  $u \times u$  對角線矩陣。Hwang et al(2002)指出在加權約制平差處理中，若只約制一個已知點的情況稱為最小約制(minimum constraint)平差法。

#### 5-4 平差模式之整體模式測試及偵測粗差

在平差的過程中，平差的結果受到所使用的數學模式及資料內的粗差所影響着，故此，需要對平差所運用的資料進行偵測粗差及數學模式的測試是不可或缺的步驟(李莉華，2001)；本章以介紹重力網平差運用的整體模式測試及偵測粗差的方法。

##### 5-4-1 整體模式測試

根據 Hwang et al(2002)指出若使用的數學模式及隨機模式不正確，可引致錯誤的平差結果；本文以整體模式測試(Global model test)來對所使用的數學模式及隨機模式進行測試，根據條件式(5-26)式(Koch, 1987)的成立，表示所使用的模式為正確及完整的。

$$\chi^2 = \frac{m\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < \chi_c^2(1 - \alpha; m) \quad (5-26) \text{式}$$

在(5-26)式的  $\sigma_0^2$  為先驗單位權變方； $\hat{\sigma}_0^2$  為後驗單位權變方； $m$  為平差的

自由度； $\chi_c^2(1-\alpha; m)$ 為在信心水平為 $(1-\alpha)$ 及自由度為 $m$ 時的 $\chi^2$ 分佈之臨  
界值， $\chi_c^2(1-\alpha; m)$ 臨界值的近似公式(Koch, 1987)於範圍 $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 計算如  
(5-27)式、(5-28)式所示。

$$\chi_c^2(1-\alpha; m) = m \left[ \chi_{1-\alpha} \left( \frac{2}{9m} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 - \frac{2}{9m} \right]^3 \quad (5-27) \text{式}$$

在(5-27)式的 $\chi_{1-\alpha}$ 於範圍 $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 的計算如(5-28)式所示。

$$\chi_{1-\alpha} = t - \frac{2.515517 + 0.802853t + 0.010328t^2}{1 + 1.432788t + 0.189269t^2 + 0.001308t^3} ; \quad t = \sqrt{2 \ln(1/\alpha)} \quad (5-28) \text{式}$$

若條件式(5-26)式不成立，則表示如三點所示：(1)數學模式或隨機模式不適  
合；(2)粗差存在於數據資料中，需要把資料中的粗差刪除。(3)所用的權值或先  
驗權值 $\sigma_0^2$ 估值不正確。

#### 5-4-2 偵測粗差

根據文獻 Caspary(1988)提及的偵測粗差方法(Baarda, 1968; Pope, 1976)都對  
偵測粗差的效果有良好的表現；本文運用偵測粗差的方法為 Pope's  $\tau$ -test 法(Pope,  
1976)，該偵測法以殘差之協變方矩陣來執行運算，並根據自由基準平差和加權  
約制平差之法方程式解的不同情況而分成如下兩個處理部分 (李莉華，2001；  
Hwang et al, 2002)：

(1)自由基準平差：

以觀測方程式(5-6)式及其解(5-13)式組合成殘差方程式如(5-29)式所示：

$$\begin{aligned} V^+ &= A[(A^T P A + S S^T)^{-1} A^T P L^b] - L^b \\ &= [A(N + S S^T)^{-1} A^T P - I] L^b = K L^b \end{aligned} \quad (5-29) \text{式}$$

在(5-29)式中  $N = A^T P A$ ， $K = A(N + S S^T)^{-1} A^T P - I$

利用誤差傳播法，條件式(5-11)式 $AS=NS=0$ ，及矩陣等式法(Lancaster and

Tismenetsky, 1985)，殘差  $V^+$  之協變方矩陣可編寫如(5-30)式所示。

$$\begin{aligned}\Sigma_{V^+} &= \hat{\sigma}_0^2 K P^{-1} K^T = \hat{\sigma}_0^2 (P^{-1} - A N^+ A^T) \\ &= \hat{\sigma}_0^2 [P^{-1} - A(N + S S^T)^{-1} A^T]\end{aligned}\quad (5-30) \text{式}$$

(2)加權約制平差：

以(5-20)式及(5-23)式可編寫成殘差方程式如(5-31)式(Hwang et al, 2002)。

$$\begin{aligned}V &= \begin{bmatrix} A \\ A_g \end{bmatrix} [\bar{N}^{-1} (A^T P \quad A_g^T P_g) - I] \begin{bmatrix} L^b \\ L_g \end{bmatrix} \\ &= G \begin{bmatrix} L^b \\ L_g \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (5-31) \text{式}$$

在(5-31)式中  $\bar{N} = A^T P A + A_g^T P_g A_g$ ，殘差矩陣  $Z = [V \quad V_g]$  的加權約制之殘差協變方矩陣如(5-32)式所示(Hwang et al, 2002)。

$$\begin{aligned}\Sigma_Z &= \hat{\sigma}_0^2 G \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & P_g^{-1} \end{bmatrix} G^T \\ &= \hat{\sigma}_0^2 \begin{bmatrix} P^{-1} - A \bar{N}^{-1} A^T & -A \bar{N}^{-1} A_g^T \\ -A_g \bar{N}^{-1} A^T & P_g^{-1} - A \bar{N}^{-1} A_g^T \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (5-32) \text{式}$$

依據以上完成的自由基準殘差協變方矩陣( $\Sigma_{V^+}$ )或加權約制之殘差協變方矩陣( $\Sigma_Z$ )，如(5-30)式和(5-32)式所示；若設定第  $i$  個觀測量殘差為  $v_i$ 、其標準差為  $\sigma_{v_i}$  (以  $\Sigma_{V^+}$  或  $\Sigma_Z$  開方之對角元素所得)；若所得的  $v_i$  及  $\sigma_{v_i}$  達成條件(5-33)式，則表示第  $i$  個觀測量為粗差。

$$\frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}} > \tau_c \left(1 - \frac{\alpha}{n}; 1, m\right) \quad (5-33) \text{式}$$

在(5-33)式的觀測量總數為  $n$ ；當信心水平為  $(1 - \frac{\alpha}{n})$ ，並且自由度為  $1$  及  $m$  時的臨界值  $\tau_c$  (Pope, 1976)；在加權約制平差處理時，以(5-33)式來檢查其約制值是否合理，當達成(5-33)式時，代表要把觀測量中的粗差刪除，並重新計算。

## 5-5 顯著測試

本文所用的重力變化顯著性測試為 Koch(1987)顯著測試方法，其顯著性測試方法說明為：

(1) 假設  $g_1$  及  $g_2$  為第一時期(初期)與第二時期(後期)之重力值， $\sigma_1$  及  $\sigma_2$  分別為對應的標準差， $d_1$  及  $d_2$  分別為相應的平差自由度，

(2) 以 Koch(1987)的假說分為零假說及變動說。

零假說  $H_0 : g_2 - g_1 = 0$

變動說  $H_1 : g_2 - g_1 \neq 0$

$$\text{測試子 } T = \frac{|g_2 - g_1|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} > T_c(m) \quad (5-34) \text{式}$$

若(5-34)式成立，代表拒絕  $H_0$ ，即變化顯著。在(5-33)式中的  $T_c(m)$  值為在自由度為  $m = d_1 + d_2$  及信心水平  $(1 - \alpha)$  下，Student's t-分佈，即 t 分佈(Mikhail, 1976)之  $(1 - \alpha)$  臨界值，分佈如圖 5-1 所示。若以本研究的信心水平  $(1 - \alpha)$  為 95% 和自由度  $m$  為 31 時，則可從 95% 雙側 t 分佈表(即 97.5% 單側 t 分佈表(Mikhail, 1976))可得  $T_c(m) = 2.040$ 。若以 90% 之信心水平和自由度  $m$  為 31 時，則 90% 雙側 t 分佈表中可得  $T_c(m) = 1.696$ 。

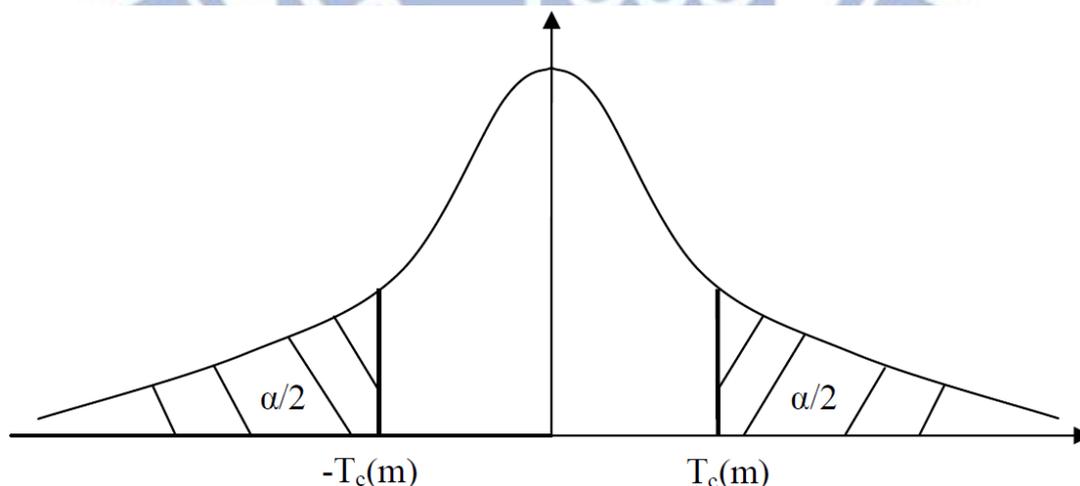


圖5-1 t 分佈之機率密度函數及臨界值  $T_c(m)$  的機率函數圖

## 第六章 重力網形平差處理模式及時變重力結果分析

本文採用重力網平差程式 gravnet.f90 (Hwang et al, 2002)的前處理過程，首先以 Hwang et al.(2002)所編寫的收集資料處理程式 correct.f 和 arrange.f90，相關程式操作過程詳述於附錄 D；correct.f 程式為進行觀測資料初部改正整合運算，環境改正方法於第四章所詳述；轉換程式 arrange.f90 為把各站之間的重力差值轉換成觀測量檔案格式(.obs)；前處理後獲得的 obs 檔案用以提供 gravnet 平差程式的輸入檔資料，在 gravnet 平差程式中設定儀器率定函數的階數和儀器漂移階數，以及運用 g7 軟體綜合處理及改正後的絕對重力值(詳述於4-5節)為平差約制條件，經過平差網程式 gravnet.f90 進行網形平差計算，並以 Pope's  $\tau$ -test 方法(Pope, 1976)偵測粗差並加以刪除後，解出各相對測點的平差後重力值及重力儀的漂移率等儀器參數。

### 6-1 應用於大屯山研究區之重力網平差模式設定

相對重力值之平差計算模式以根據 6 種 case 的重力網平差模式設定，平差模式設定分別為 case 1、case A1、case A2、case B、case C 和 case D，平差模式設定的說明如下所示。

- (1) case 1：用自由基準平差模式，以絕對重力測點 YMSG 為起始解算點，並計算一階之儀器漂移率。
- (2) case A1：用加權約制平差模式，以固定五個絕對重力測點(YMSG, YAG1, YAG2, YAG3, YAG4)作為基準約制值，並計算一階之儀器漂移率。
- (3) case A2：用加權約制平差模式，以固定五個絕對重力測點(YMSG, YAG1, YAG2, YAG3, YAG4)作為基準約制值，並計算一階之儀器漂移率和計算一階率定函數之長波長系數。
- (4) case B：用加權約制平差模式，以固定四個絕對重力測點(YMSG, YAG2, YAG3, YAG4)作為基準約制值，並計算一階之儀器漂移率。
- (5) case C：用加權約制平差模式，以固定三個絕對重力測點(YMSG, YAG2,

YAG3)作為基準約制值，並計算一階之儀器漂移率。

(6) case D：用加權約制平差模式，以固定兩個絕對重力測點(YMSG, YAG3)作為基準約制值，並計算一階之儀器漂移率。

## 6-2 應用於大屯山研究區的重力網平差模式之精度分析

平差模式以固定的絕對重力值為基準，在儀器高度歸算時所需要運用的垂直重力梯度值，本研究採用新實測的五個絕對點的垂直重力梯度值(詳述於第四章 4-6 節)，本研究的實測重力梯度值(如表 6-1 所示)，分別對五個測點的絕對重力值進行高度歸算，高度歸後的重力值為平差模式之固定基準及約制條件，通過觀測數據的篩選處理(詳述於第四章 4-7 節)，並以不同的平差模式及不同的固定點的平差精度結果比較如表 6-2、表 6-3、表 6-4、表 6-5 所示。

表6-1 本研究的新實測五個絕對重力測站的垂直重力梯度值

各絕對重力測站之實測 垂直重力梯度值 New Gradient:	YMSG: $-3.61 \mu \text{ gal/cm}$	YAG1: $-3.90 \mu \text{ gal/cm}$
	YAG2: $-2.89 \mu \text{ gal/cm}$	YAG3: $-2.98 \mu \text{ gal/cm}$
	YAG4: $-3.26 \mu \text{ gal/cm}$	

表6-2 第一期(First campaign)各種平差模式之結果

平差模式 (Adjustment model)	整體 平差 測試 (global model test)	殘差之最 大值 Maximum residuals (mgal)	殘差之最 小值 Minimum residuals (mgal)	重力值標 準偏差最 大值 Maximum SD (mgal)	重力值標 準偏差最 小值 Minimum SD (mgal)	重力值 標準偏 差平均 值 Average SD (mgal)
case 1	accept	0.024	-0.030	0.023	0.000	0.014
case A1	accept	0.041	-0.043	0.029	0.0002	0.011
case A2	accept	0.027	-0.029	0.019	0.0001	0.008
case B	accept	0.024	-0.032	0.025	0.0002	0.012
case C	accept	0.022	-0.032	0.021	0.0001	0.011
case D	accept	0.023	-0.029	0.020	0.0001	0.011

註：SD = standard deviation,  $1 \text{ mgal} = 1000 \mu \text{ gal}$ ,  $1 \mu \text{ gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ 。

表6-3 第二期(Second campaign)各種平差模式之結果

平差模式 (Adjustment model)	整體 平差 測試 (global model test)	殘差之最 大值 Maximum residuals (mgal)	殘差之最 小值 Minimum residuals (mgal)	重力值標 準偏差最 大值 Maximum SD (mgal)	重力值標 準偏差最 小值 Minimum SD (mgal)	重力值 標準偏 差平均 值 Average SD (mgal)
case 1	accept	0.012	-0.017	0.014	0.000	0.008
case A1	accept	0.027	-0.025	0.019	0.0002	0.009
case A2	accept	0.015	-0.023	0.015	0.0001	0.006
case B	accept	0.027	-0.025	0.018	0.0001	0.009
case C	accept	0.027	-0.025	0.015	0.0001	0.008
case D	accept	0.014	-0.018	0.013	0.0001	0.007

註：SD = standard deviation，1mgal = 1000  $\mu$  gal，1  $\mu$  gal =  $1 \times 10^{-8}$  m s<sup>-2</sup>。

表6-4 第三期(Third campaign)各種平差模式之結果

平差模式 (Adjustment model)	整體 平差 測試 (global model test)	殘差之最 大值 Maximum residuals (mgal)	殘差之最 小值 Minimum residuals (mgal)	重力值標 準偏差最 大值 Maximum SD (mgal)	重力值標 準偏差最 小值 Minimum SD (mgal)	重力值 標準偏 差平均 值 Average SD (mgal)
case 1	accept	0.027	-0.017	0.029	0.000	0.013
case A1	accept	0.027	-0.022	0.016	0.0001	0.008
case A2	accept	0.031	-0.020	0.018	0.0001	0.009
case B	accept	0.027	-0.018	0.019	0.0001	0.010
case C	accept	0.027	-0.018	0.028	0.0001	0.012
case D	accept	0.027	-0.018	0.028	0.0001	0.012

註：SD = standard deviation，1mgal = 1000  $\mu$  gal，1  $\mu$  gal =  $1 \times 10^{-8}$  m s<sup>-2</sup>。

表6-5 第四期(Fourth campaign)各種平差模式之結果

平差模式 (Adjustment model)	整體 平差 測試	殘差之 最大值 Maximum	殘差之 最小值 Minimum	重力值 標準偏差 最大值	重力值 標準偏差 最小值	重力值 標準偏 差平均
-------------------------------	----------------	-----------------------	-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------

	(global model test)	residuals (mgal)	residuals (mgal)	Maximum SD (mgal)	Minimum SD (mgal)	值 Average SD (mgal)
case 1	accept	0.018	-0.016	0.024	0.000	0.010
case A1	accept	0.022	-0.022	0.017	0.0001	0.008
case A2	accept	0.026	-0.019	0.021	0.0001	0.008
case B	accept	0.022	-0.022	0.029	0.0001	0.009
case C	accept	0.022	-0.022	0.029	0.0001	0.011
case D	accept	0.018	-0.016	0.024	0.0001	0.009

註：SD = standard deviation，1mgal = 1000  $\mu$  gal，1  $\mu$  gal =  $1 \times 10^{-8}$  m s<sup>-2</sup>。

在以上共四期的平差精度結果如表 6-2 至表 6-5 所示，各期的平差結果皆顯示通過整體平差測試(測試方法詳述於第 5-4 節)，故此，表示 6 種 case 所建立的平差數學模式及隨機模式適當，在綜合表 6-2 至表 6-5 得出表 6-6 所示，可看出 case 1 模式中出現共四期重力值標準差的平均值為較大的情況，原因為該模式只運用一個陽明山擎天崗衛星追蹤測站(YMSG)為已知點基準約制值，該模式只受到 YMSG 的影響，並且已知點基準約制小於其他的模式的數量所致，並且由表 6-2 至表 6-5 顯示出在 case 1 模式中出現重力值標準偏差最小值為零的現象，原因為該模式單一以 YMSG 測站之絕對重力值為起始固定值解算，故此該測點之變動量為零。

由上述表格的不同的平差模式及不同的固定點的平差精度結果綜合得出如下表 6-6 所示的各模式標準偏差比較，可得知各模式之共四期的平均標準差範圍介於 9  $\mu$  gal~11.25  $\mu$  gal，並且在約制 5 個絕對重力點後之設定平差模式 case A1 及 caseA2 有較佳的成果表現，所得的標準偏差平均值為最小，其中以 caseA2 的標準偏差平均值達 7.75  $\mu$  gal 為最小，故此本研究採用以平差模式 case A2 的平差結果進行後續研究；運用該平差模式所得的共四期之平差後觀測量殘差分佈直方圖，如圖 6-1、圖 6-2、圖 6-3、圖 6-4 所示，各殘差分佈直方圖顯示出之分佈均成常態分佈，即無系統誤差存在於平差模式中。

表6-6 共四期監測的不同平差模式之標準偏差值 SD (unit:  $\mu$  gal)

平差模式 Adjustment mode (Fixed station)	第一期 First campaign SD	第二期 Second campaign SD	第三期 Third campaign SD	第四期 Fourth campaign SD	共四期標 準差平均 值 Average SD
case A1 fixed 5	11	9	8	8	9
case A2 fixed 5	8	6	9	8	7.75
case B fixed 4	12	9	10	9	9.75
case C fixed 3	11	8	12	11	10.5
case D fixed 2	11	7	12	9	9.75
case1 fixed 1	14	8	13	10	11.25

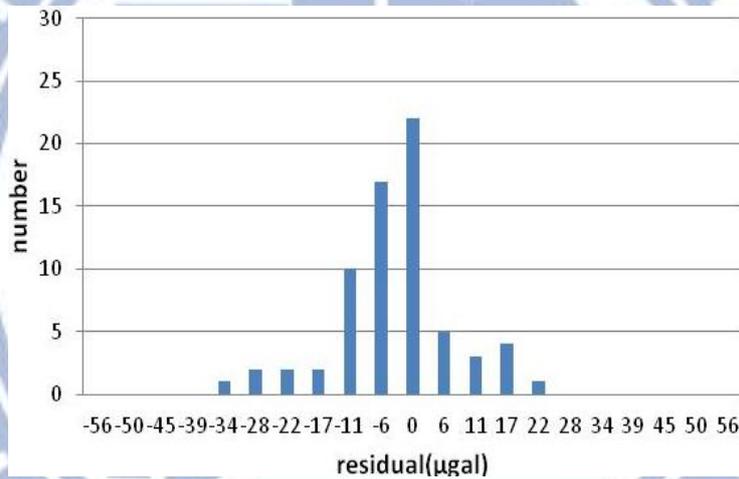


圖6-1 第一期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖 (unit:  $\mu$  gal)

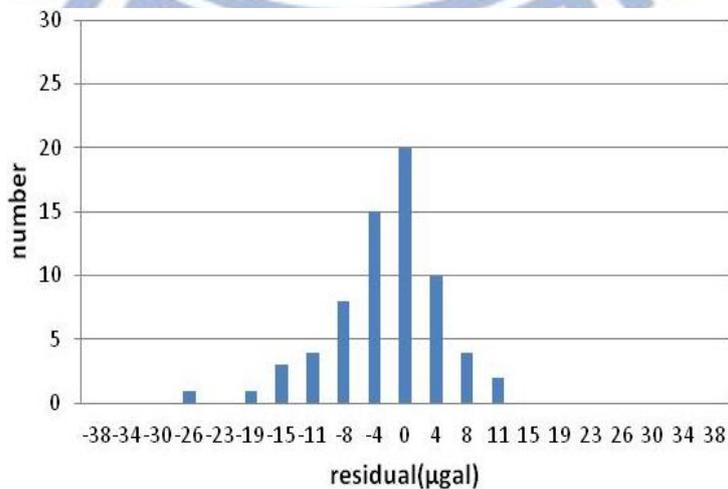


圖6-2 第二期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖 (unit:  $\mu$  gal)

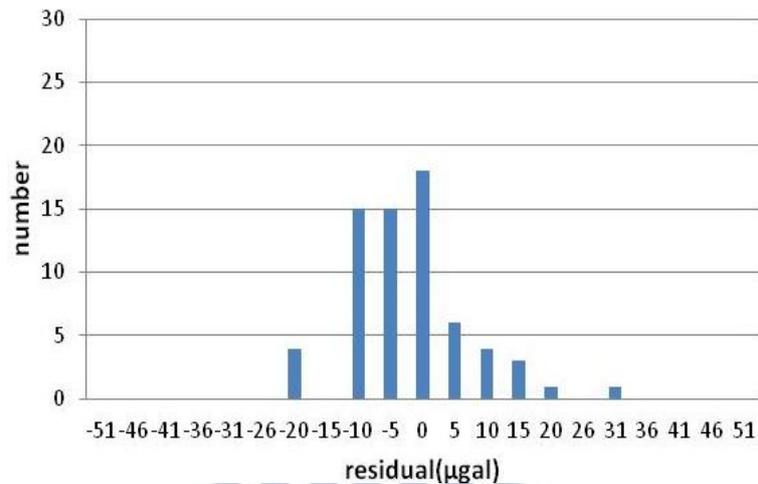


圖6-3 第三期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖 (unit:  $\mu\text{gal}$ )

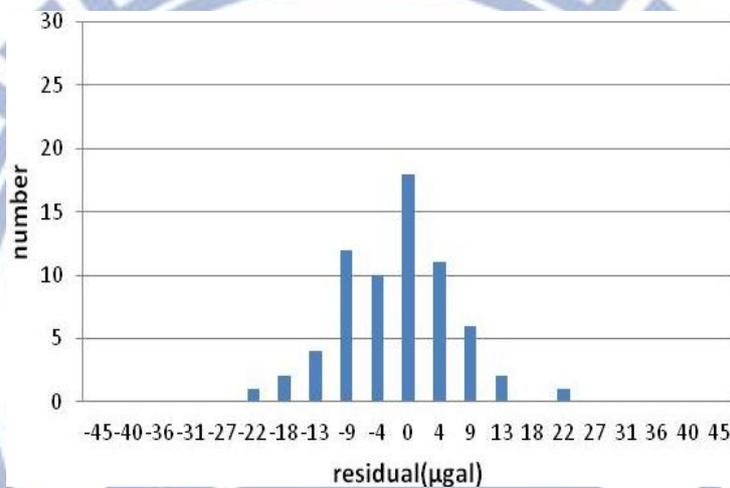


圖6-4 第四期 case A2 模式平差後之殘差分佈直方圖 (unit:  $\mu\text{gal}$ )

### 6-3 應用於大屯山研究區之時變重力變化與分析

#### 6-3-1 應用於大屯山研究區之時變重力變化量

大屯山研究區之共四期的平差後所得的重力值及標準差(如表 6-7, 表 6-8), 共四期監測期間的重力變化分析, 透過第二、三、四期的平差後重力值各自與第一期的平差後重力值相減後獲得的重力差值, 如表 6-9 所示, 包括第二期與第一期間( $\Delta T_1^2$ )的重力差值( $\Delta g_1^2$ )、第三期與第一期間( $\Delta T_1^3$ )的重力差值( $\Delta g_1^3$ )、第四期與第一期間( $\Delta T_1^4$ )的重力差值  $\Delta g_1^4$ 。根據表 6-7, 表 6-8 及表 6-9 整合出共四期監測之各期平均殘差值及平均標準差(如表 6-10 所示), 並包括  $\Delta T_1^2$ 、 $\Delta T_1^3$ 、 $\Delta T_1^4$  的監測期之間的 5 條路線之平均標準差及重力變化量, 5 條路線(1R、2R、3R、4R、

5R)的路線代號詳述於 3-2-3 節，其中每條路線的平均標準差及重力差值之整合成果已包含對應的絕對點固定站。由表 6-10 可知 $\Delta T_1^3$ 的平均重力變化量 $|\Delta g_1^3|$ 為最大，表示大屯山研究區以 4 月至 9 月期間( $\Delta T_1^3$ )重力變化量相較於 $\Delta T_1^2$ 及 $\Delta T_1^4$ 劇烈；其中以路線 5R 的 $|\Delta g_1^3|$ 平均重力變化量達  $22.5 \mu \text{gal}$  為最大( $|\Delta g_1^3|$ 平均變化量大於 $|\Delta g_1^2|$ 約  $12.6 \mu \text{gal}$  且大於 $|\Delta g_1^4|$ 約  $17.8 \mu \text{gal}$ )。在重力差值( $\Delta g_1^2$ 、 $\Delta g_1^3$ 及 $\Delta g_1^4$ )地形分佈圖(圖 6-5、圖 6-6 及圖 6-7)及表 6-10 可知在 $\Delta T_1^2$ 及 $\Delta T_1^3$ 期間之東南方路線 2R 及東北方路線 1R 與其它路線的變化趨勢不一致；另外，在路線 4R 及 5R 的各期間重力差值( $\Delta g_1^2$ 、 $\Delta g_1^3$ 及 $\Delta g_1^4$ )皆表現一致的負值趨勢，其中在路線 4R 及 5R 的重力差值  $\Delta g_1^3$  分別為 $-8.5 \mu \text{gal}$  及 $-22.5 \mu \text{gal}$ ，而 $\Delta g_1^4$ 分別為 $-3.5$  及 $-4.7 \mu \text{gal}$ ，顯示路線 4R 及 5R 在第三至第四期平均重力值分別出現增加  $5 \mu \text{gal}$  及  $17.5 \mu \text{gal}$  的變化趨勢。隨後經過顯著測試，以明確指出重力變化顯著的監測點位置。

表6-7 第一期及第二期各測站之平差後所得的重力值及標準差(mgal)

測站	第一期 重力值	第一期之 重力標準差	第二期 重力值	第二期之 重力標準差
Y001	978847.7937	0.0062	978847.8064	0.0056
Y002	978825.2258	0.0083	978825.23	0.0066
Y003	978807.9186	0.0095	978807.931	0.0068
Y004	978799.5418	0.0087	978799.5569	0.0061
Y005	978815.5366	0.0058	978815.5598	0.0036
Y006	978873.8735	0.0137	978873.8714	0.0082
Y007	978861.4109	0.0128	978861.4055	0.0076
Y008	978850.5755	0.0068	978850.58	0.0059
Y009	978836.8079	0.0054	978836.8103	0.0046
Y010	978819.2942	0.0037	978819.2885	0.0031
Y011	978804.3418	0.0096	978804.3323	0.0067
Y012	978828.4063	0.0093	978828.3953	0.0075
Y013	978821.4343	0.0055	978821.428	0.0075
Y014	978821.1599	0.0074	978821.1455	0.0090
Y015	978821.7204	0.0077	978821.6978	0.0081
Y016	978803.7992	0.0040	978803.7791	0.0097
Y017	978761.2056	0.0083	978761.1687	0.0135

Y018	978741.0568	0.0111	978741.0429	0.0145
Y019	978721.3976	0.0128	978721.4048	0.0140
Y020	978722.8278	0.0133	978722.8272	0.0133
Y021	978754.7053	0.0194	978754.7149	0.0109
Y022	978783.0537	0.0189	978783.0358	0.0081
Y023	978794.8622	0.0155	978794.835	0.0056
Y024	978810.5037	0.0065	978810.4942	0.0034
Y025	978837.0801	0.0086	978837.0758	0.0068
Y026	978850.3937	0.0075	978850.3902	0.0058
Y027	978856.4351	0.0065	978856.4315	0.0047
YMSG	978814.1763	0.0001	978814.1724	0.0001
YAG1	978886.8393	0.0002	978886.8445	0.0002
YAG2	978836.4223	0.0003	978836.4195	0.0001
YAG3	978804.8569	0.0001	978804.8542	0.0001
YAG4	978901.9631	0.0003	978901.9626	0.0002

註：1mgal = 1000  $\mu$ gal，1  $\mu$ gal =  $1 \times 10^{-8}$  m s<sup>-2</sup>。

表6-8 第三期及第四期各測站之平差後所得的重力值及標準差(mgal)

測站	第三期 重力值	第三期之 重力標準差	第四期 重力值	第四期之 重力標準差
Y001	978847.77	0.0117	978847.806	0.0124
Y002	978825.1974	0.0154	978825.23	0.0127
Y003	978807.8946	0.0160	978807.935	0.0071
Y004	978799.5174	0.0141	978799.552	0.0060
Y005	978815.5376	0.0099	978815.552	0.0034
Y006	978873.9179	0.0086	978873.889	0.0150
Y007	978861.445	0.0078	978861.421	0.0139
Y008	978850.6046	0.0072	978850.582	0.0116
Y009	978836.8316	0.0066	978836.808	0.0057
Y010	978819.2807	0.0067	978819.291	0.0032
Y011	978804.2975	0.0097	978804.339	0.0043
Y012	978828.3819	0.0103	978828.413	0.0057
Y013	978821.4307	0.0080	978821.433	0.0036
Y014	978821.1442	0.0097	978821.159	0.0049
Y015	978821.7017	0.0091	978821.708	0.0055
Y016	978803.7782	0.0116	978803.775	0.0109

Y017	978761.1608	0.0157	978761.191	0.0163
Y018	978741.0243	0.0177	978741.067	0.0190
Y019	978721.3622	0.0185	978721.422	0.0206
Y020	978722.7845	0.0178	978722.845	0.0199
Y021	978754.7041	0.0150	978754.713	0.0150
Y022	978783.016	0.0124	978783.001	0.0125
Y023	978794.8404	0.0098	978794.848	0.0081
Y024	978810.4947	0.0058	978810.505	0.0043
Y025	978837.0692	0.0073	978837.093	0.0072
Y026	978850.3944	0.0059	978850.421	0.0122
Y027	978856.4423	0.0047	978856.478	0.0116
YMSG	978814.1658	0.0001	978814.172	0.0001
YAG1	978886.8292	0.0001	978886.829	0.0001
YAG2	978836.4285	0.0001	978836.419	0.0001
YAG3	978804.8381	0.0001	978804.852	0.0001
YAG4	978901.9584	0.0001	978901.958	0.0002

註：1mgal = 1000  $\mu$ gal，1  $\mu$ gal =  $1 \times 10^{-8}$  m s<sup>-2</sup>。

表6-9 共四期監測之 32 個監測站的重力差值及標準差

測站	第二期與第一期( $\Delta T_1^2$ )		第三期與第一期( $\Delta T_1^3$ )		第四期與第一期( $\Delta T_1^4$ )	
	重力差值 ( $g_2 - g_1$ ) ( $\mu$ gal)	兩期間 標準差 ( $\mu$ gal)	重力差值 ( $g_3 - g_1$ ) ( $\mu$ gal)	兩期間 標準差 ( $\mu$ gal)	重力差值 ( $g_4 - g_1$ ) ( $\mu$ gal)	兩期間 標準差 ( $\mu$ gal)
Y001	12.782	8.334	-23.694	13.224	12.590	13.856
Y002	4.152	10.610	-28.401	17.515	3.749	15.169
Y003	12.454	11.677	-23.986	18.611	16.158	11.841
Y004	15.049	10.648	-24.378	16.617	10.133	10.565
Y005	23.141	6.853	1.011	11.441	14.908	6.725
Y006	-2.081	15.912	44.457	16.160	15.206	20.274
Y007	-5.492	14.905	34.045	15.014	10.239	18.881
Y008	4.518	9.000	29.102	9.902	6.154	13.394
Y009	2.406	7.136	23.756	8.514	-0.104	7.912
Y010	-5.714	4.793	-13.563	7.659	-3.527	4.846
Y011	-9.492	11.721	-44.295	13.701	-2.759	10.573
Y012	-11.048	11.970	-24.440	13.925	6.201	10.951
Y013	-6.247	9.315	-3.621	9.685	-1.234	6.552

Y014	-14.387	11.681	-15.660	12.163	-1.314	8.866
Y015	-22.566	11.150	-18.664	11.930	-12.473	9.462
Y016	-20.154	10.465	-21.009	12.242	-24.058	11.571
Y017	-36.942	15.817	-44.815	17.755	-14.646	18.265
Y018	-13.855	18.285	-32.482	20.865	10.526	22.014
Y019	7.218	18.957	-35.362	22.488	24.085	24.272
Y020	-0.539	18.762	-43.231	22.181	17.727	23.881
Y021	9.583	22.267	-1.232	24.555	7.669	24.515
Y022	-17.950	20.552	-37.773	22.590	-53.243	22.643
Y023	-27.164	16.448	-21.773	18.334	-14.211	17.453
Y024	-9.494	7.289	-8.983	8.682	1.081	7.781
Y025	-4.337	10.952	-10.926	11.278	13.061	11.180
Y026	-3.542	9.490	0.711	9.551	26.969	14.324
Y027	-3.662	8.018	7.222	8.009	42.419	13.244
YMSG	-3.902	0.194	-10.498	0.178	-4.199	0.187
YAG1	5.195	0.277	-10.107	0.256	-10.109	0.263
YAG2	-2.769	0.299	6.231	0.284	-2.863	0.305
YAG3	-2.704	0.190	-18.806	0.161	-4.509	0.182
YAG4	-0.504	0.354	-4.702	0.347	-4.703	0.355

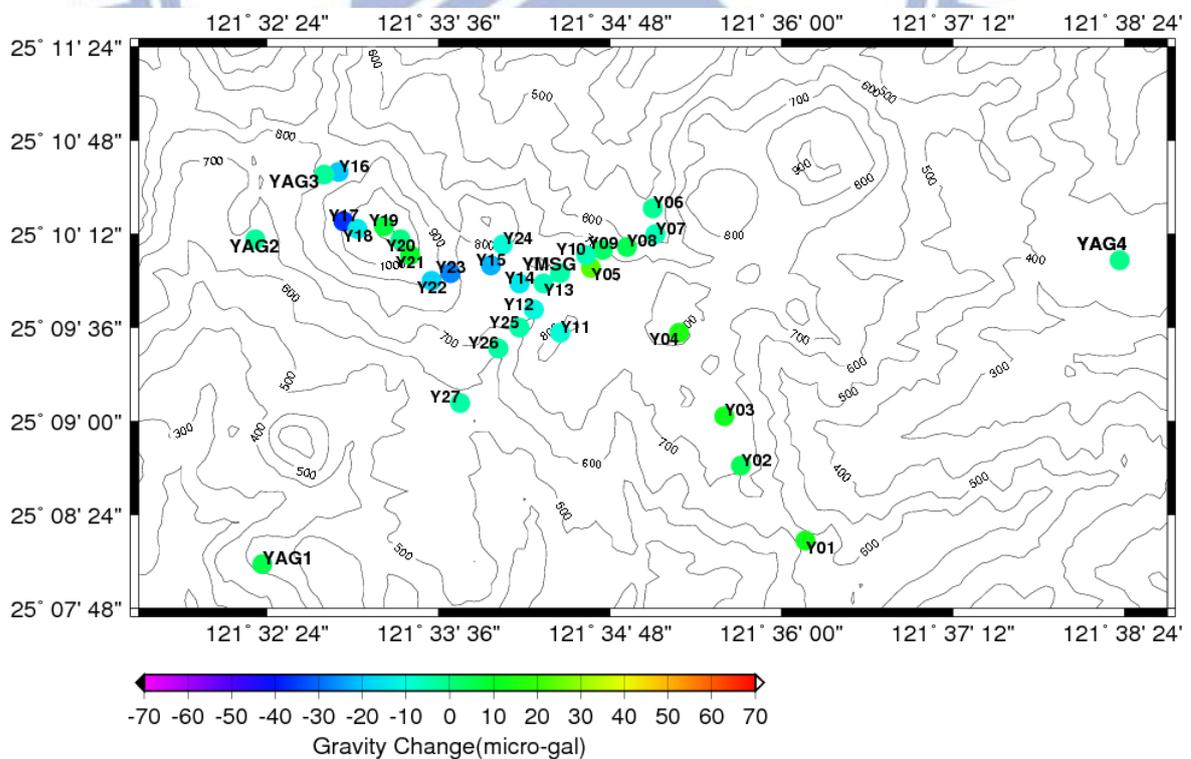


圖6-5 第二期與第一期間( $\Delta T_1^2$ )之 32 個監測站的重力差值( $\Delta g_1^2$ )分佈圖

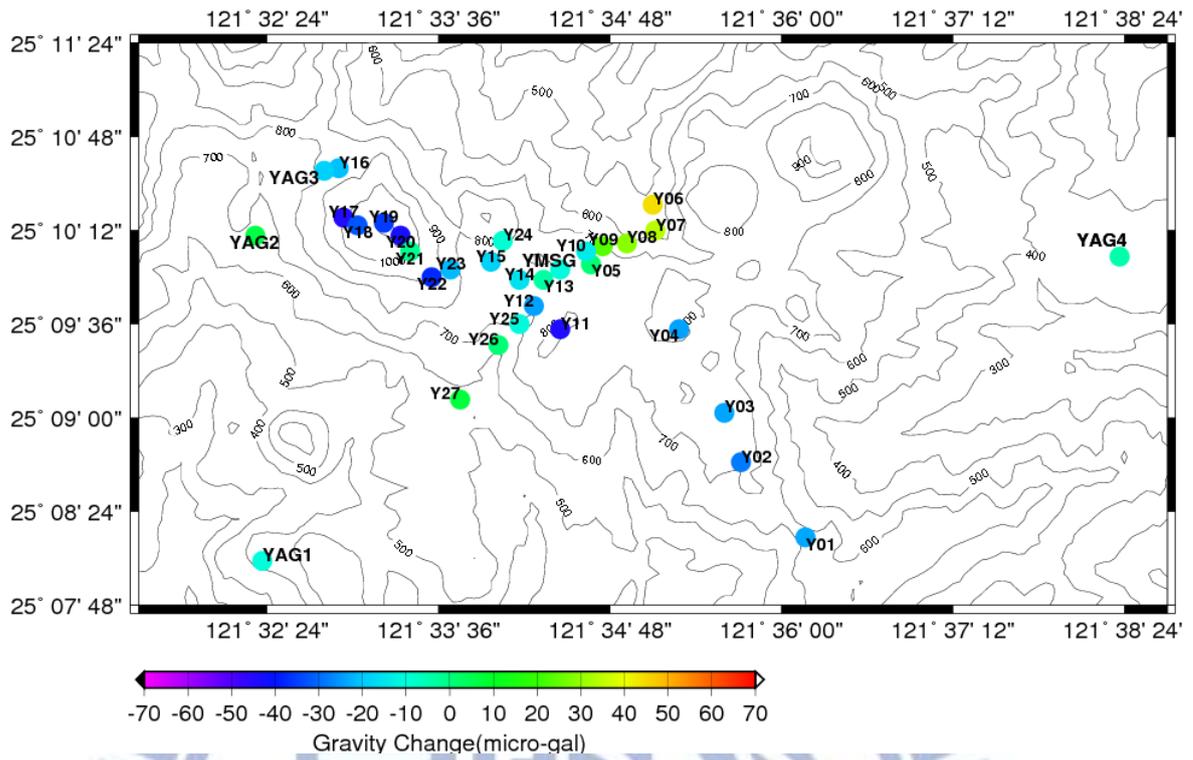


圖6-6 第三期與第一期間( $\Delta T_1^3$ )之 32 個監測站的重力差值( $\Delta g_1^3$ )分佈圖

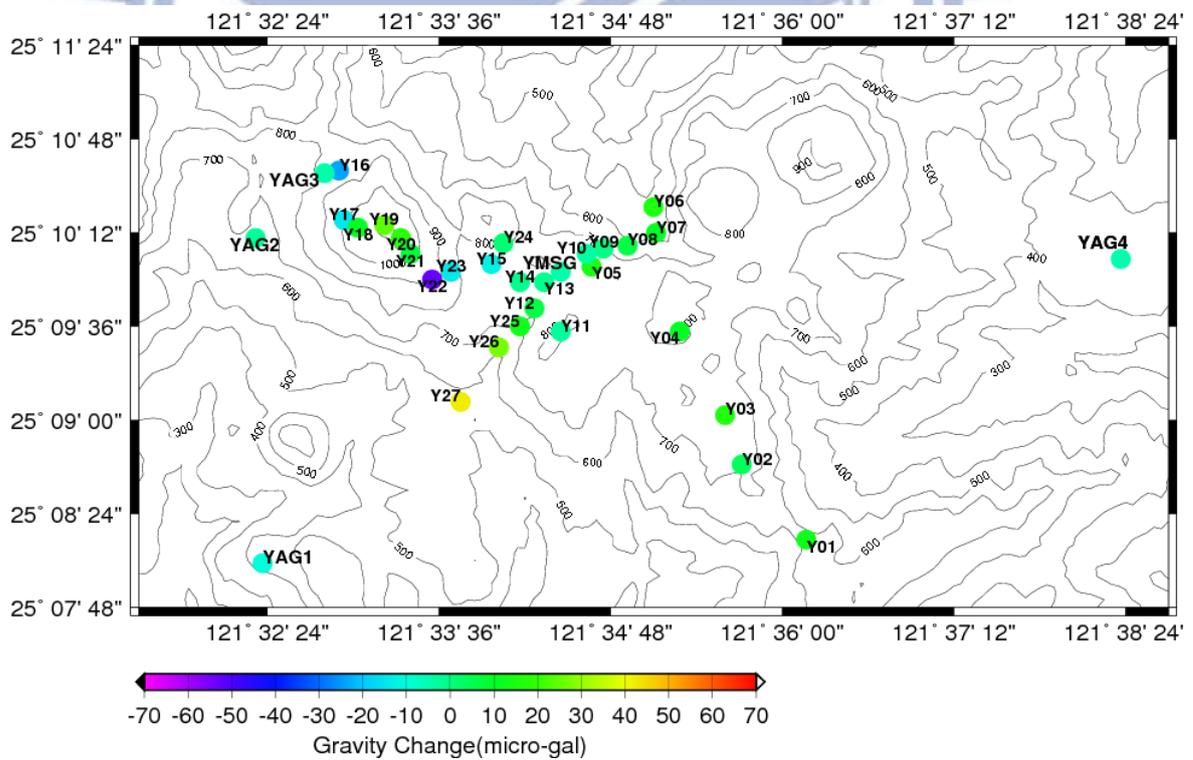


圖6-7 第四期與第一期間( $\Delta T_1^4$ )之 32 個監測站的重力差值( $\Delta g_1^4$ )分佈圖

表6-10 大屯山研究地區共四期重力差值的平均標準差及平均殘差值

	平均殘差值 Average residuals ( $\mu$ gal)	平均標準差 Average standard deviation ( $\mu$ gal)	以第一期為基準的兩期測量之間的平均標準差 the average SD of two surveys ( $\mu$ gal)	以第一期為基準的兩期測量之間的平均重力差值 Average gravity change ( $\mu$ gal)		
第一期 T <sub>1</sub> (4 月)	-3.3	8				
第二期 T <sub>2</sub> (7 月)	-2.4	6	第二至第一期( $\Delta T_1^2$ ) 平均 SD 10	1R: 6.6	$\Delta g_1^2$	1R: -2
				2R: 7		2R: 9
				3R: 7.5		3R: -4.4
				4R: 6.7		4R: -9.9
				5R: 12.5		5R: -9.9
第三期 T <sub>3</sub> (9 月)	-2.1	9	第三至第一期( $\Delta T_1^3$ ) 平均 SD 12	1R: 7.2	$\Delta g_1^3$	1R: 11.8
				2R: 11.1		2R: -16.4
				3R: 8.1		3R: -13.2
				4R: 7.2		4R: -8.5
				5R: 14.2		5R: -22.5
第四期 T <sub>4</sub> (12 月)	-1.7	8	第四至第一期( $\Delta T_1^4$ ) 平均 SD 11.3	1R: 8.2	$\Delta g_1^4$	1R: 2
				2R: 8.4		2R: 6.9
				3R: 8.7		3R: 10.2
				4R: 5.5		4R: -3.5
				5R: 12.5		5R: -4.7

### 6-3-2 應用於大屯山研究區之時變重力變化顯著測試

大屯山研究區的時變重力變化期間之重力差值分為：第二期與第一期間( $\Delta T_1^2$ )的重力差值( $\Delta g_1^2$ )、第三期與第一期間( $\Delta T_1^3$ )的重力差值( $\Delta g_1^3$ )、第四期與第一期間( $\Delta T_1^4$ )的重力差值  $\Delta g_1^4$ 。根據監測期間( $\Delta T_1^2$ 、 $\Delta T_1^3$ 、 $\Delta T_1^4$ )各個監測站的平差處理後的重力標準差及重力值，計算重力差值的顯著性測試(顯著測試詳述於第 5-5 節)，以測試重力變化的顯著與否之結果，若變動顯著測試表示為”是”，代表該測站的重力變化量為明確，若表示為”否”，則代表該測點的重力變化量為不明確；本研究的 95%信心水平之顯著測試結果如表 6-11、表 6-12、表 6-13 所示。

表6-11 第二期與第一期之各監測站的重力差值及 95%信心水平顯著測試結果

測站	第二期減第一期 之重力差值( $\mu\text{gal}$ )	測試因子 T	變動顯著測試 ( $T_c=2.040$ )
Y001	12.8	1.534	否
Y002	4.2	0.391	否
Y003	12.5	1.067	否
Y004	15.0	1.413	否
Y005	23.1	3.377	是
Y006	-2.1	0.131	否
Y007	-5.5	0.368	否
Y008	4.5	0.502	否
Y009	2.4	0.337	否
Y010	-5.7	1.192	否
Y011	-9.5	0.810	否
Y012	-11.0	0.923	否
Y013	-6.2	0.671	否
Y014	-14.4	1.232	否
Y015	-22.6	2.024	否
Y016	-20.2	1.926	否
Y017	-36.9	2.336	是
Y018	-13.9	0.758	否
Y019	7.2	0.381	否
Y020	-0.5	0.029	否
Y021	9.6	0.430	否
Y022	-18.0	0.873	否
Y023	-27.2	1.652	否
Y024	-9.5	1.303	否
Y025	-4.3	0.396	否
Y026	-3.5	0.373	否
Y027	-3.7	0.457	否
YMSG	-3.9	20.104	是
YAG1	5.2	18.784	是
YAG2	-2.8	9.264	是
YAG3	-2.7	14.250	是
YAG4	-0.5	1.423	否

表6-12 第三期與第一期之各監測站的重力差值及 95%信心水平顯著測試結果

測站	第三期減第一期 之重力差值( $\mu\text{gal}$ )	測試因子 T	變動顯著測試 ( $T_c=2.040$ )
Y001	-23.7	1.792	否
Y002	-28.4	1.622	否
Y003	-24.0	1.289	否
Y004	-24.4	1.467	否
Y005	1.0	0.088	否
Y006	44.5	2.751	是
Y007	34.0	2.268	是
Y008	29.1	2.939	是
Y009	23.8	2.790	是
Y010	-13.6	1.771	否
Y011	-44.3	3.233	是
Y012	-24.4	1.755	否
Y013	-3.6	0.374	否
Y014	-15.7	1.288	否
Y015	-18.7	1.564	否
Y016	-21.0	1.716	否
Y017	-44.8	2.524	是
Y018	-32.5	1.557	否
Y019	-35.4	1.572	否
Y020	-43.2	1.949	否
Y021	-1.2	0.050	否
Y022	-37.8	1.672	否
Y023	-21.8	1.188	否
Y024	-9.0	1.035	否
Y025	-10.9	0.969	否
Y026	0.7	0.074	否
Y027	7.2	0.902	否
YMSG	-10.5	58.992	是
YAG1	-10.1	39.446	是
YAG2	6.2	21.907	是
YAG3	-18.8	116.974	是
YAG4	-4.7	13.537	是

表6-13 第四期與第一期之各監測站的重力差值及 95%信心水平顯著測試結果

測站	第四期減第一期 之重力差值( $\mu\text{gal}$ )	測試因子 T	變動顯著測試 ( $T_c=2.040$ )
Y001	12.6	0.909	否
Y002	3.7	0.247	否
Y003	16.2	1.365	否
Y004	10.1	0.959	否
Y005	14.9	2.217	是
Y006	15.2	0.750	否
Y007	10.2	0.542	否
Y008	6.2	0.459	否
Y009	-0.1	0.013	否
Y010	-3.5	0.728	否
Y011	-2.8	0.261	否
Y012	6.2	0.566	否
Y013	-1.2	0.188	否
Y014	-1.3	0.148	否
Y015	-12.5	1.318	否
Y016	-24.1	2.079	是
Y017	-14.6	0.802	否
Y018	10.5	0.478	否
Y019	24.1	0.992	否
Y020	17.7	0.742	否
Y021	7.7	0.313	否
Y022	-53.2	2.351	是
Y023	-14.2	0.814	否
Y024	1.1	0.139	否
Y025	13.1	1.168	否
Y026	27.0	1.883	否
Y027	42.4	3.203	是
YMSG	-4.2	22.395	是
YAG1	-10.1	38.478	是
YAG2	-2.9	9.381	是
YAG3	-4.5	24.797	是
YAG4	-4.7	13.260	是

### 6-3-3 應用於大屯山研究區之時變重力顯著變化分析

大屯山研究區的時變重力變化期間之重力變化，根據共四期監測的時間差 ( $\Delta T_1^2$ 、 $\Delta T_1^3$ 、 $\Delta T_1^4$ ) 之對應的重力差值 ( $\Delta g_1^2$ 、 $\Delta g_1^3$ 、 $\Delta g_1^4$ )，經過 95% 信心水平的顯著性測試的結果(詳述於 6-3-2)，顯著變化的測站較常發生在絕對重力點測站(如表 6-14，表 6-15 及表 6-16)，原因為受到絕對重力點的標準差較小的影響及該重力點的各時期間的變化量大小所致，使經過顯著測試後較易出現顯著變化的現象，並以地形圖顯示(如圖 6-8、圖 6-9 及圖 6-10)，地形圖集中顯示範圍於北緯 25.13 度至 25.19 度，東經 121.525 度至 121.61 度，故此未顯示相距中心測站 YMSG 偏遠的 YAG4 測站。如表 6-14 至表 6-16 及圖 6-8 至圖 6-10 所示，可知顯著變動的測站主要位於以 YMSG 為中心測站的東北方地區，西北方地區及西南方地區路線的測站，並且在西北方地區的變化趨勢(地形圖之左側)與西南方或東北方地區(地形圖之右側)出現不同的趨勢。

在第二期與第一期間( $\Delta T_1^2$ )的重力差值( $\Delta g_1^2$ )呈現為顯著變動的 6 個監測站(YMSG, YAG1, YAG2, YAG3, Y005 及 Y017)，其中以重力變化最大為 Y017 的  $-36.9 \mu\text{gal}$ ，除了兩測站 YAG1 及 Y005 的  $\Delta g_1^2$  分別為  $5.2 \mu\text{gal}$  及  $23.1 \mu\text{gal}$  的正值變化外，其餘測站皆表示為負向變化介於  $-2.7 \sim -36.9 \mu\text{gal}$ ，平均約  $-11.6 \mu\text{gal}$ ，並顯示西北方路線 4R 及 5R 之第二期( $T_2$ )的重力值小於第一期( $T_1$ )的重力值。

在第三期與第一期間( $\Delta T_1^3$ )的重力差值( $\Delta g_1^3$ )呈現為顯著變動的 11 個監測站(YMSG, YAG1, YAG2, YAG3, YAG4, Y006~Y009, Y011 及 Y017)，其中以重力變化最大為 Y017 的  $-44.8 \mu\text{gal}$ ， $\Delta g_1^3$  出現的負向變化介於  $-4.7 \sim -44.8 \mu\text{gal}$ ，平均值約為  $-22.2 \mu\text{gal}$ ，顯示以 YMSG 為中心的西方路線 3R 及 5R 之第三期的重力值小於第一期的重力值；另一方面，在東北方地區路線 1R 之 5 站(Y006~Y009 及 YAG2)的  $\Delta g_1^3$  出現正向變化介於  $6.2 \sim 44.5 \mu\text{gal}$ ，顯示路線 1R 之第三期的重力值大於第一期的重力值。故此， $\Delta T_1^3$  測期的重力差值出現東北方路線(1R)與西邊路線(3R 及 5R)出現不同的變動趨勢。

在第四期與第一期間( $\Delta T_1^4$ )的重力差值( $\Delta g_1^4$ )呈現顯著變動的 9 個監測站

(YMSG, YAG1, YAG2, YAG3, YAG4, Y005, Y016, Y022 及 Y027), 其中以重力變化最大為 Y022 的  $-53.2 \mu\text{gal}$ , 除了兩測站 Y005 及 Y027 的  $\Delta g_1^4$  分別為  $14.9 \mu\text{gal}$  及  $42.4 \mu\text{gal}$  的正值變化外, 其餘的測站出現負向變化介於  $-2.9 \sim -53.2 \mu\text{gal}$ , 平均約  $-14.8 \mu\text{gal}$ , 顯示西北方路線 5R 之第四期重力值小於第一期重力值。

表6-14 監測期間  $\Delta T_1^2$  之各路線(顯著測試為變動的監測站)重力差值與標準差

路線	測站	兩期測量之間的重力差值 ( $\mu\text{gal}$ )	兩期測量之間的標準差 SD ( $\mu\text{gal}$ )	路線	測站	兩期測量之間的重力差值 ( $\mu\text{gal}$ )	兩期測量之間的標準差 SD ( $\mu\text{gal}$ )
1R	YAG2	-2.8	0.3	2R	Y005	23.1	6.9
	YAG3	-2.7	0.2		YMSG	-3.9	0.2
	YMSG	-3.9	0.2				
3R	YMSG	-3.9	0.2	4R	YMSG	-3.9	0.2
	YAG1	5.2	0.3		YAG2	-2.8	0.3
5R	YAG2	-2.8	0.3				
	YAG3	-2.7	0.2				
	Y017	-36.9	15.8				
	YMSG	-3.9	0.2				

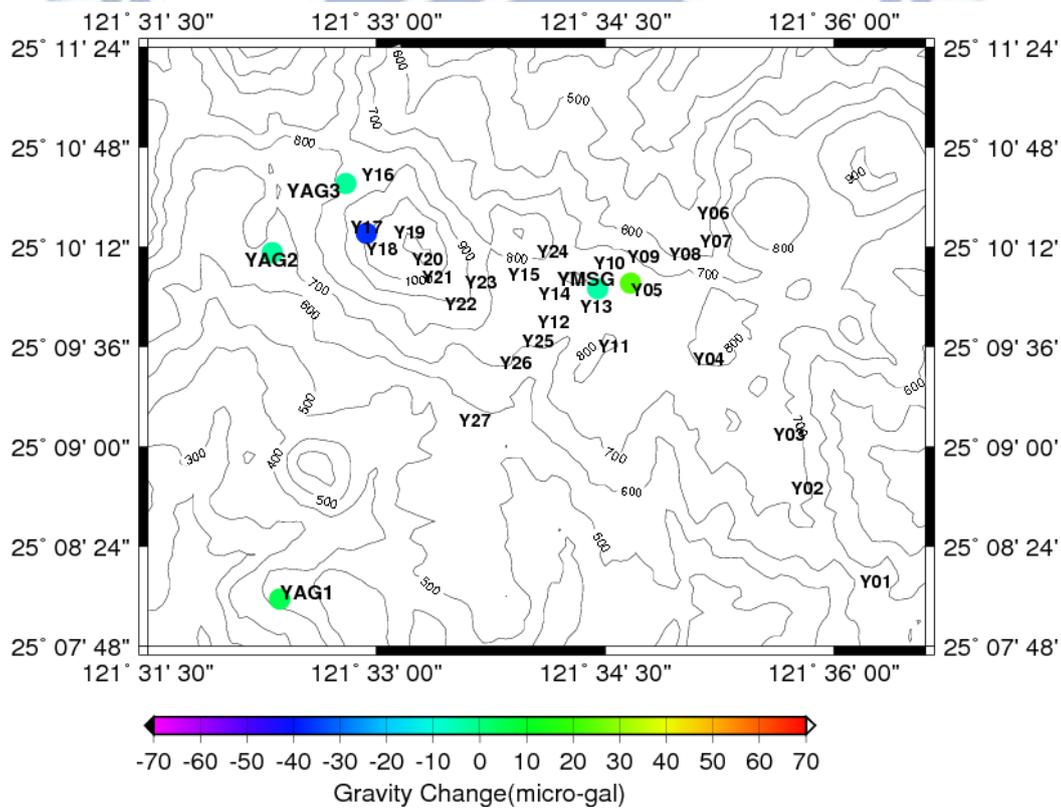


圖6-8 監測期間  $\Delta T_1^2$  的各測站  $\Delta g_1^2$  之地形分佈圖(經過顯著測試為變動的測站)

表6-15 監測期間  $\Delta T_1^3$  之各路線(顯著測試為變動的監測站)重力差值與標準差

路線	測站	兩期測量之間的重力差值 ( $\mu$ gal)	兩期測量之間的標準差 SD ( $\mu$ gal)	路線	測站	兩期測量之間的重力差值 ( $\mu$ gal)	兩期測量之間的標準差 SD ( $\mu$ gal)
1R	YAG2	6.2	0.3	2R	YAG4	-4.7	0.3
	YAG3	-18.8	0.2		YMSG	-10.5	0.2
	Y006	44.5	16.2	3R	YMSG	-10.5	0.2
	Y007	34.0	15.0		Y011	-44.3	13.7
	Y008	29.1	9.9		YAG1	-10.1	0.3
	Y009	23.8	8.5	4R	YMSG	-10.5	0.2
	YMSG	-10.5	0.2		YAG2	6.2	0.3
5R	YAG2	6.2	0.3				
	YAG3	-18.8	0.2				
	Y017	-44.8	17.8				
	YMSG	-10.5	0.2				

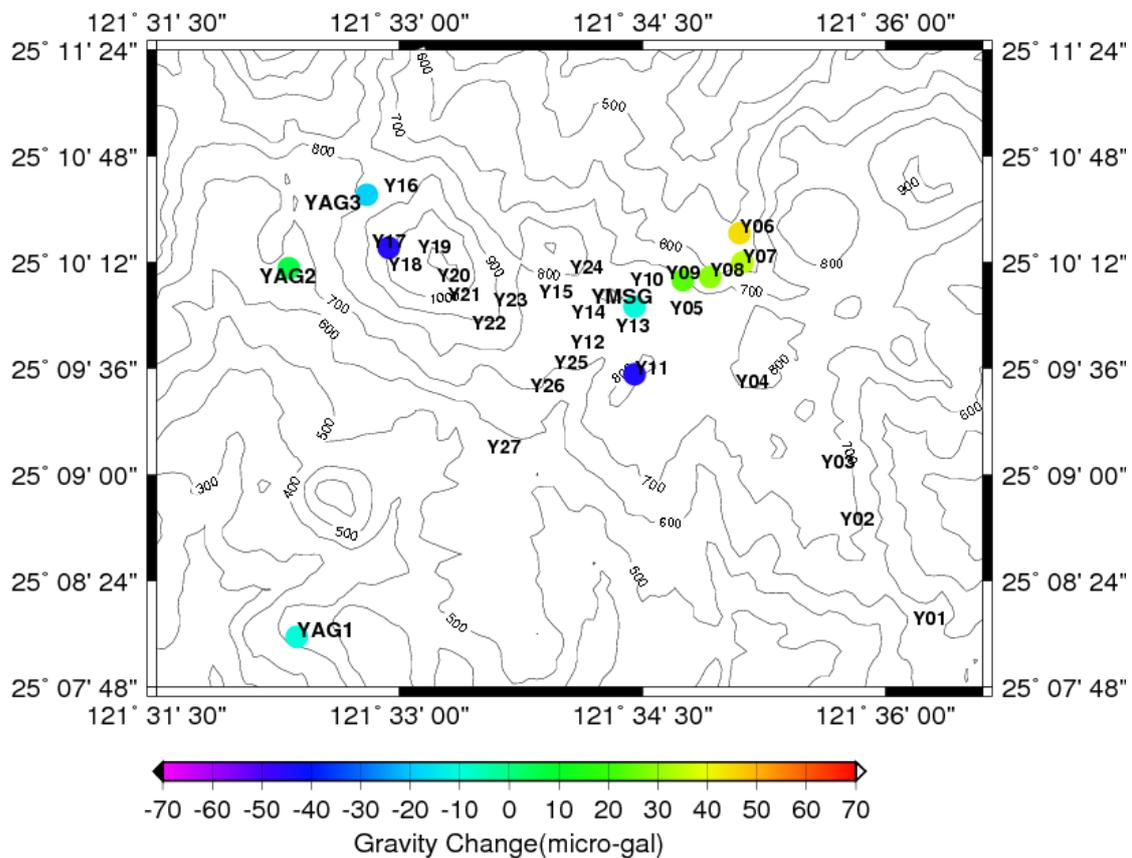


圖6-9 監測期間  $\Delta T_1^3$  的各測站  $\Delta g_1^3$  之地形分佈圖(經過顯著測試為變動的測站)

表6-16 監測期間  $\Delta T_1^4$  之各路線(顯著測試為變動的監測站)重力差值與標準差

路線	測站	兩期測量之間的重力差值 ( $\mu\text{gal}$ )	兩期測量之間的標準差 SD ( $\mu\text{gal}$ )	路線	測站	兩期測量之間的重力差值 ( $\mu\text{gal}$ )	兩期測量之間的標準差 SD ( $\mu\text{gal}$ )
1R	YAG2	-2.9	0.3	2R	YAG4	-4.7	0.4
	YAG3	-4.5	0.2		Y005	14.9	6.7
	YMSG	-4.2	0.2		YMSG	-4.2	0.2
3R	YMSG	-4.2	0.2	4R	YMSG	-4.2	0.2
	Y027	42.4	13.2		YAG2	-2.9	0.3
	YAG1	-10.1	0.3				
5R	YAG2	-2.9	0.3				
	YAG3	-4.5	0.2				
	Y016	-24.1	11.6				
	Y022	-53.2	22.6				
	YMSG	-4.2	0.2				

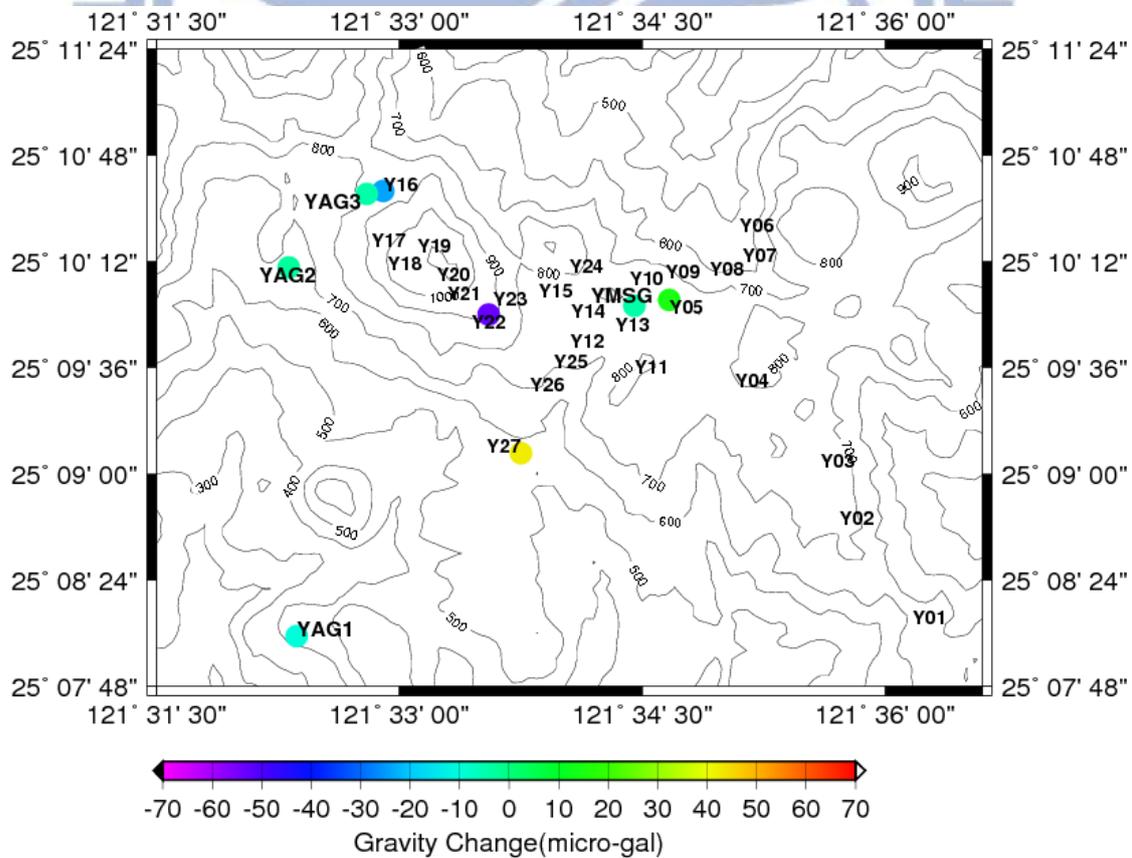


圖6-10 監測期間  $\Delta T_1^4$  的各測站  $\Delta g_1^3$  之地形分佈圖(經過顯著測試為變動的測站)

#### 6-4 應用於大屯山研究區時變重力之超導值變化及水文變動分析

本研究區之擎天崗超導重力儀(SG)與鄰近的絕對重力測站 YMSG、YAG2 及 YAG3 之絕對重力值(各重力值已扣除基準值)之比較(圖 6-11、圖 6-12)。超導重力儀(SG)的監測重力值已進行地球固體潮、海潮、氣壓及極移等環境改正，SG 重力值變動可能受到局部區域的地震或現場環境影響(例如根據中央氣象局資料顯示 10 月 13 日台北市政府東南方 12.8 公里的芮氏規模為 4.2 的地震)及 10 月 8 日 SG 進行清除積雪的維護作業，使 SG 值產生漂移現象，經過漂移改正後，分析 SG 值與 FG5 監測的絕對重力值比較，得知超導重力儀(SG)的監測站所得的重力變化與 FG5 的監測站 YMSG 及 YAG3 與 SG 變化趨勢相同。

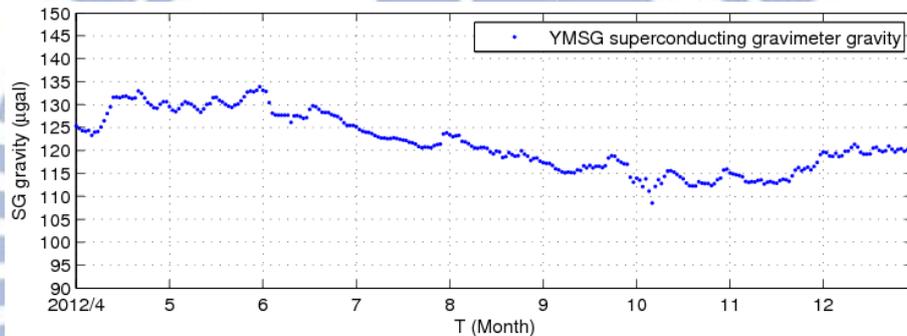


圖6-11 陽明山擎天崗 SG 超導重力儀之監測重力變化圖

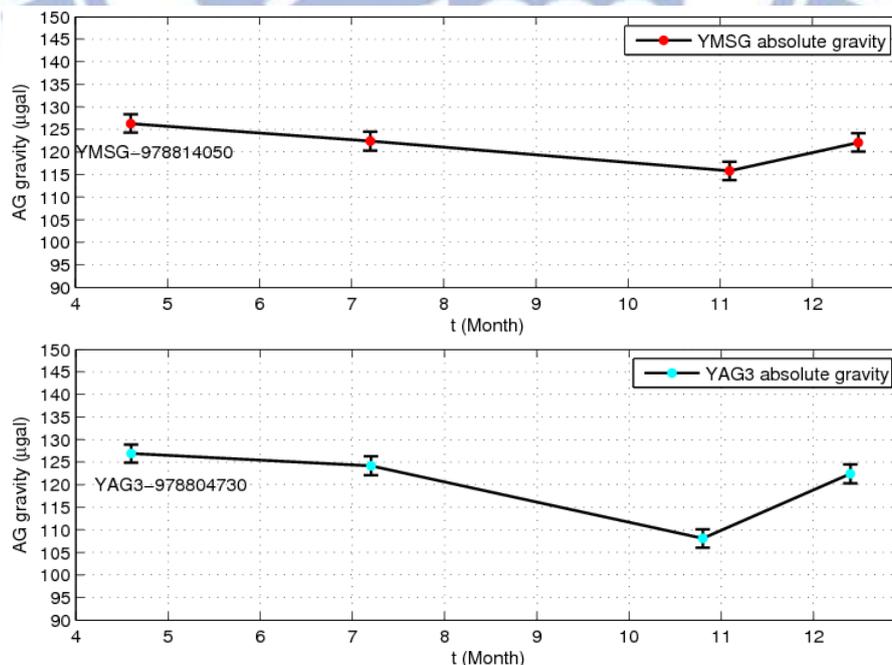


圖6-12 鄰近超導重力站的絕對重力測站(YMSG 及 YAG3)之重力變化圖  
(顯示的重力值已扣除基準重力值的相對重力變化)

大屯山研究區之水井及雨量計分佈位置的地形圖資料(如圖 6-13)，深藍色正方形圖示為水井位置(水井資料由中國文化大學地質學系陳柔飛老師提供)，黃色正方形圖示為雨量計位置(雨量資料由中國文化大學大氣科學系游政谷教授所提供)，紅色及紫色三角形圖示分別絕對重力站和相對重力站。由圖 6-13，顯示出本研究所獲得研究區域的 8 個水井的位置主要分佈以陽明山擎天崗 YMSG 測站為中心的地形圖西南及西北方，而雨量計的位置主要分佈於地形圖的東南方、西南及西北方。

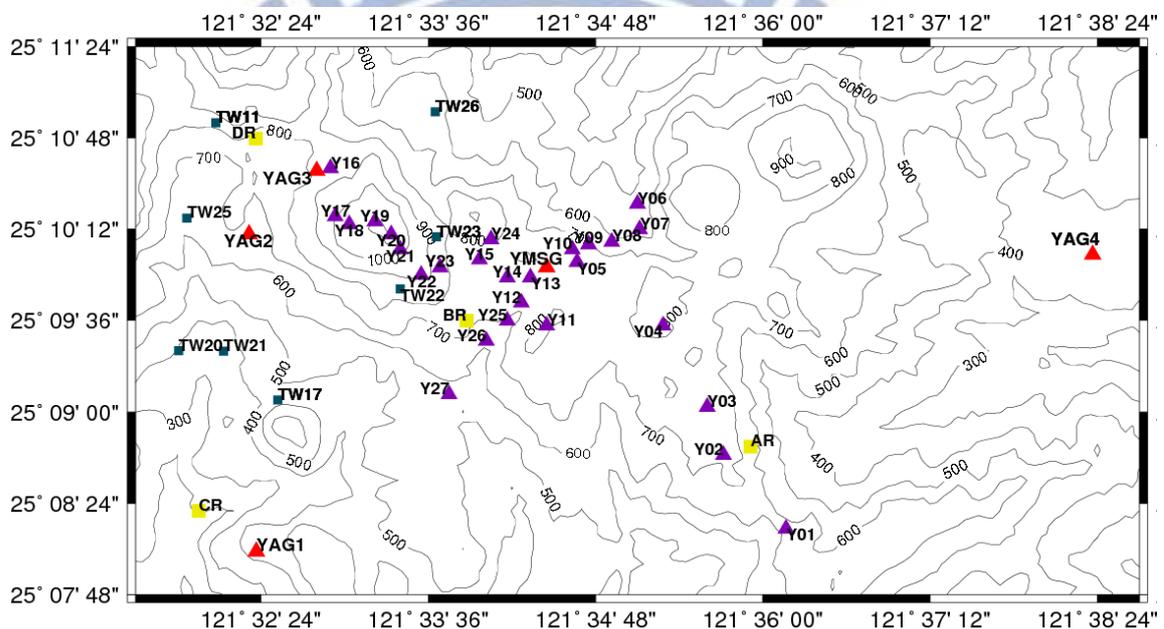


圖6-13 大屯山研究區之絕對重力測站(紅色三角形)、相對重力測站(紫色三角形)、水井(深藍色正方形)及雨量計(黃色正方形)位置地形分佈圖

大屯山研究區之 8 個水井資料中，以 TW23 號為研究區內唯一有安裝連續式自動監測水井水位變化設備的水井，能有效監測每 15 分鐘一筆的水位變動資料，資料經過整合成 1 天 1 筆的水位變化數據，TW23 號水井設置於北緯 25.169 度，東經 121.561 度(約位於 YMSG 測站的西北方)，分析 TW23 水井相對水位變化與鄰近絕對監測站 YMSG、YAG3 的重力變化(圖 6-12)及 YAG2 的重力值變化(圖 6-14)之比較，得知在鄰近的三個絕對重力監測站中以監測站 YAG2 的重力變化趨勢與 TW23 號水井的連續水位變化最為相同，如圖 6-14 所示。

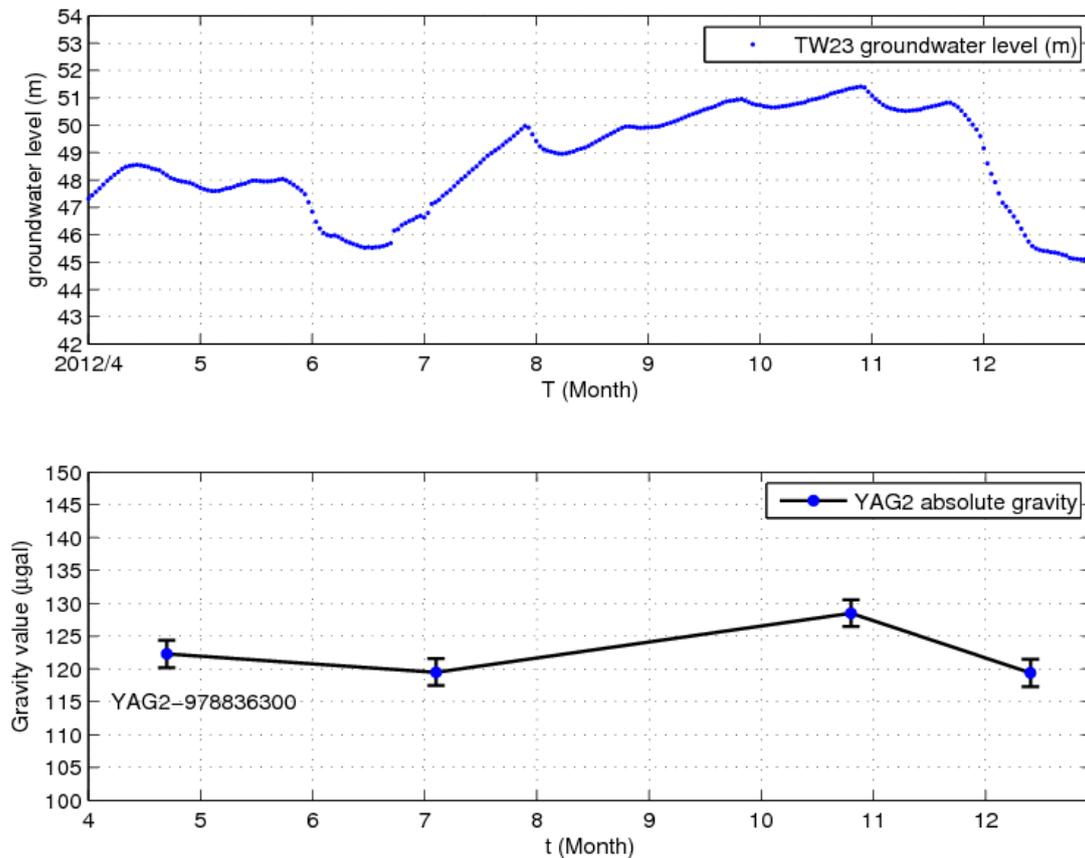


圖6-14 測站 YAG2 的重力變化與 TW23 號水井的水位變化趨勢

大屯山研究區之 8 個監測水井資料，除 TW23 號為連續水位觀測外，其餘 7 個水井的水位以手持式水位尺監測所得，並經過約化至同一的水位變化範圍，以觀測各時期的相對水位變化量，7 個水井的水位變動如圖 6-15 及圖 6-16 所示，以地形圖(圖 6-13)西南方的水井(TW17, TW20, TW21 及 TW22)水位相對變化圖(如圖 6-15)及西北方的水井(TW11, TW25 及 TW26)水位相對變化圖(如圖 6-16)，其中水井 TW11、TW20 及 TW26 缺乏 4 月資料，故此以 5 月為起始時間，經過綜合成表 6-17 及表 6-18 所示，得知本研究區水井水位變化趨勢皆顯示在 $\Delta T_1^4$ 時期為負值，即第一期的水井水位高於第四期的水位，與路線(4R 及 5R)重力差值 $\Delta g_1^4$ 為負值(代表第一期重力值大於第四期重力值)的變化趨勢相同(表 6-16)，並且 TW11 和 TW26 的相對水位變化在 $\Delta T_1^3$ 時期為最大水位負向變化(表 6-18)，符合重力變化以 $\Delta T_1^3$ 時期為最大負值變化(詳述於第 6-3-1)的趨勢。

表6-17 以4月份為基準之水位變化(單位:公尺)

	TW17	TW21	TW22	TW25
4月~7月( $\Delta T_1^2$ )	-1.59	-0.94	-1.17	0.26
4月~9月( $\Delta T_1^3$ )	-1.86	-0.06	-1.07	(4月~10月)-3.23
4月~12月( $\Delta T_1^4$ )	-2.66	-1.44	-1.59	-3.58

表6-18 (缺4月份資料) 以5月份為基準之水位變化(單位:公尺)

	TW11	TW20	TW26
5月~7月( $\Delta \tilde{T}_1^2$ )	-0.12	0.68	-0.49
5月~9月( $\Delta \tilde{T}_1^3$ )	-1.04	0.1	-2.9
5月~12月( $\Delta \tilde{T}_1^4$ )	-0.5	-0.04	-1.23

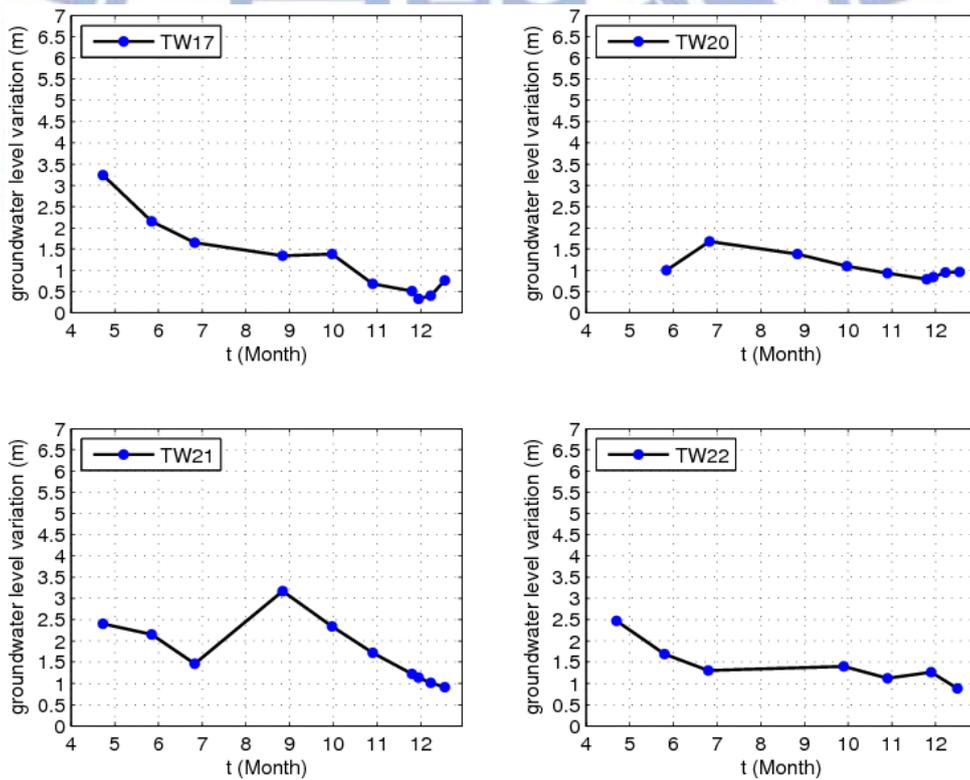


圖6-15 水井(TW17, TW20, TW21 及 TW22)之水位相對變化圖

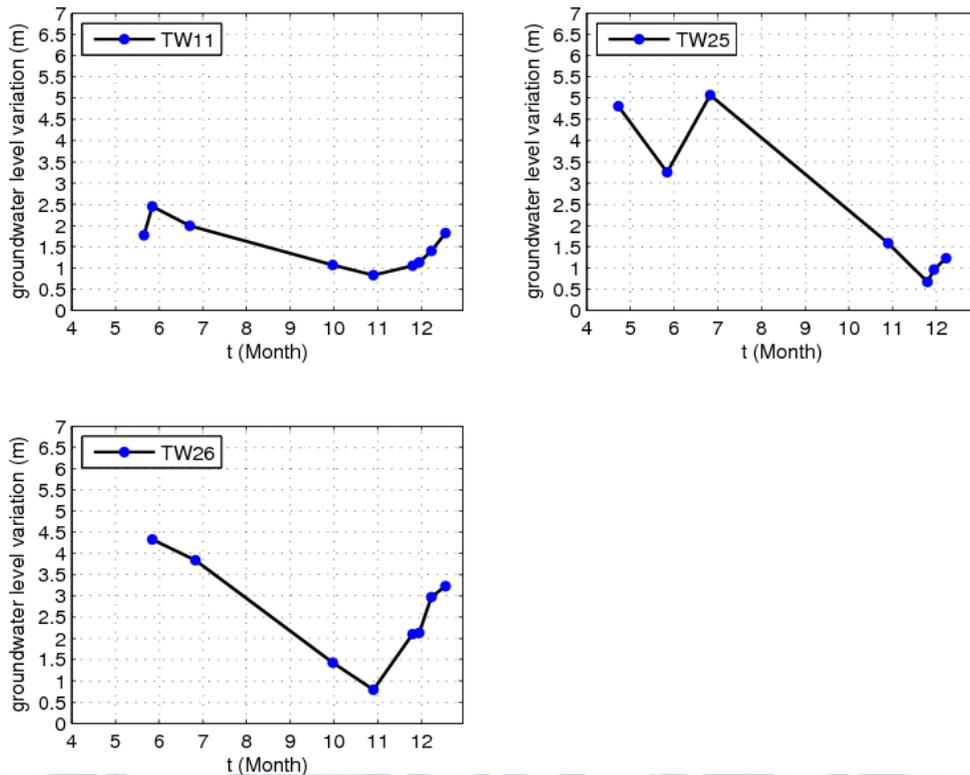


圖6-16 水井(TW11, TW25 及 TW26)之水位相對變化圖

大屯山研究區之 4 個監測雨量計資料分別為代號 AR、BR、CR 及 DR 雨量計(雨量資料由中國文化大學大氣科學系游政谷教授所提供),如圖 6-13 所示雨量計的地形分佈,把雨量計資料之累積雨量(藍色線)及每天雨量(紅色線)之雨量圖,如圖 6-17,圖 6-18,圖 6-19 及圖 6-20 所示,以地形圖(圖 6-13)YMSG 為中心的東南方雨量計 AR, YMSG 站的鄰近東南方雨量計 BR, 西南方雨量計 CR 及西北方雨量計 DR, 其中三個雨量計(AR、BR 及 DR)的累計雨量都超過 3500(mm), 並且以北方雨量計 DR 的累計雨量為最大(4 月至 12 月累計達 4000 mm); 4 個雨量計中的累積雨量以 CR 的雨量計之累積雨量為最小(4 月至 12 月累計約 2100 mm), 顯示東北方地區之雨量大於西南方地區, 可能受到東北季風, 迎風面和背風面雨量不同的影響。各月份雨量表(表 6-19)顯示七月(介於 110~125.5mm)及九月份(介於 155.25~295.5mm)之降雨量皆小於四月降雨量(介於 301~400mm), 與西北路線(4R 及 5R)之第二與第一期的重力差值  $\Delta g_1^2$  為負值的趨勢相同(表 6-14); 並且與西南路線(3R)之第三與第一期的重力差值  $\Delta g_1^3$  為負值的趨勢相同(表 6-15)。

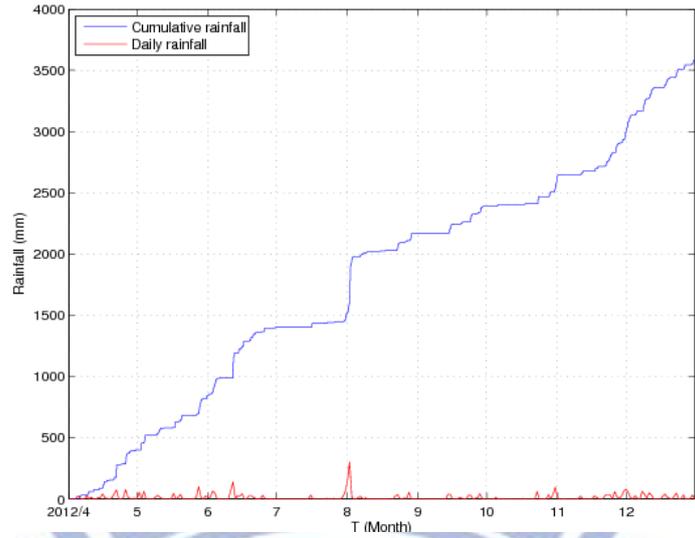


圖6-17 雨量計(AR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖

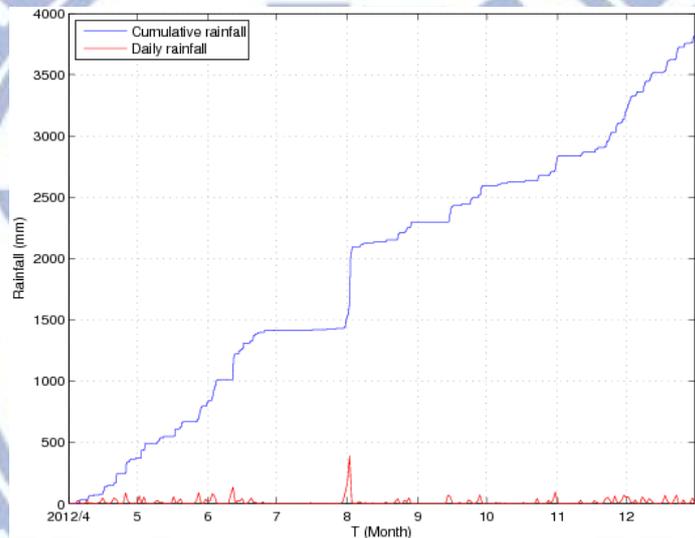


圖6-18 雨量計(BR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖

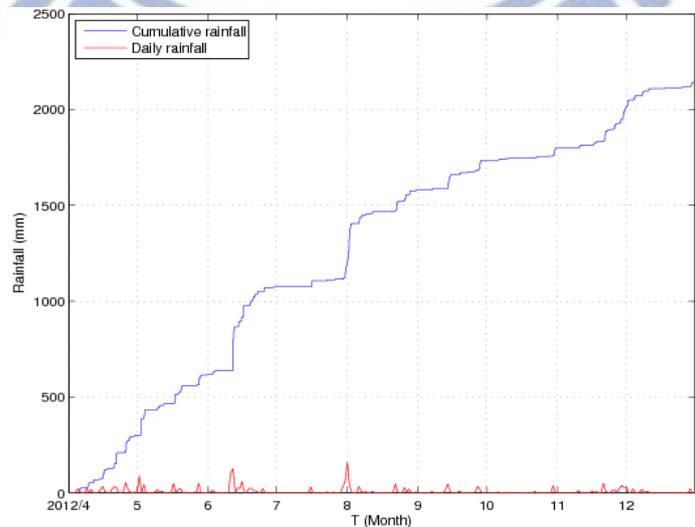


圖6-19 雨量計(CR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖

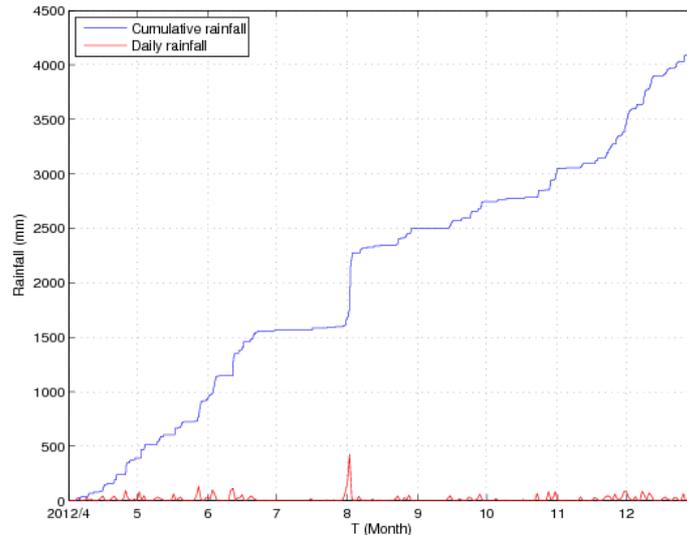


圖6-20 雨量計(DR)的累計雨量(藍色線)及每日雨量(紅色線)之雨量圖

表6-19 四月，七月，九月及十二月之單個月份4個雨量計的雨量累積表(單位: mm)

	AR 雨量計	BR 雨量計	CR 雨量計	DR 雨量計
4 月份	400	369.5	301	390
7 月份	121	117	125.5	110
9 月份	222	295.5	155.25	244.5
12 月份	580	606.5	149.5	681.5

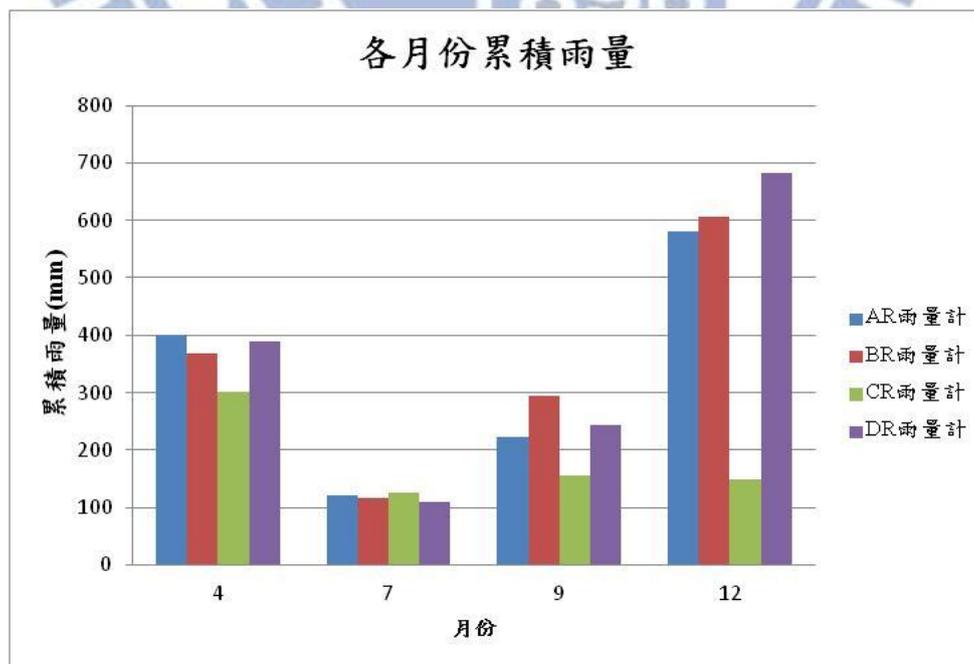


圖6-21 四月，七月，九月及十二月之單個月份4個雨量計的雨量累積圖

## 第七章 結論與建議

本文之研究區設置 5 個絕對點監測站，以加密配置 32 個重力監測站來構成相對重力網的方法，並考量配置各監測點的路線規劃，對研究區進行一年共四期監測之時變重力分析；通過對監測數據的處理，以重力網平差程式 gravnet 平差處理計算，設計本研究區最佳的平差處理模式，並針對新型海潮模式 SGOTL、地球固體潮、大氣壓力改正等環境改正的分析，重力儀觀測數據的篩選處理等的主要議題，分析對精度改善的表現，以及水文變化對時變重力變化的關聯性；以下綜合列出本研究的重要結論及建議。

一、新型的 SGOTL 海潮模式，特別考慮與高程相依，並使用嚴謹的理論公式及數值積分方法，以計算重力觀測值改正量，在本研究的相對重力值經過新型 SGOTL 海潮模式的海潮改正後能改善重力網平差精度，共四期的監測結果，每期平差精度平均提升分別為 3%、1.78%、1.4% 及 6.2%；建議在山區或高程變化大的地區需特別考量運用高程相依的海潮改正模式，以利提高精度需求。

二、在經過兩種(-0.30 $\mu$ gal/hPa 與-0.35 $\mu$ gal/hPa)的大氣導納係數比對後，以-0.35 $\mu$ gal/hPa 的係數來進行氣壓改正後與理論係數-0.30 $\mu$ gal/hPa 的比對，發現第二期監測時期的平差精度平均可提升 1  $\mu$ gal；評估考量第二期的施測環境可能受到杜蘇芮(DOKSURI)颱風的外圍環流影響，導致大氣壓力改正公式的大氣導納係數需作出更動，建議在每次的施測期間，可利用絕對重力儀 FG5 或超導重力儀 SG 等儀器的監測重力值來推算適合該施測時期的大氣導納係數，使大氣壓力改正模式更加精確，以獲得更佳的改正成果。

三、考量為取得穩定的重力儀監測數據，分析相對重力儀 CG-5 的觀測資料，研究以有效的資料篩選處理方法，包括考慮儀器的施測時感測器的溫度變化、儀器的傾斜 X 及 Y 方向的變化考量，經過資料篩選處理後，共四期的監測結果，每期平差後的重力網平差精度分別提升 11.1%、53.8%、10% 和 20% 的成果表現，建議在監測站連續觀測超過 10 筆觀測資料時，需考量對資料進行篩選處理。

四、在平差處理模式的設定方面，設計最佳的平差模式，模型通過以 5 個絕對重力站重力值為約制值，並計算一階之儀器漂移率和計算一階率定函數之長波長系數的設定方式，使本研究區之平差後的四期最佳標準差平均值為 7.75  $\mu\text{gal}$ ，相較於其他平差模式的設定，四期標準差平均值能提升 1.25 $\mu\text{gal}$  ~2.5 $\mu\text{gal}$ 。

五、應用於研究區之時變重力監測，在經過共四期的平差處理後的重力值，以第一期為基準時期，通過第二、三、四期各自與第一期間( $\Delta T_1^2$ 、 $\Delta T_1^3$ 及 $\Delta T_1^4$ )產生的重力差值比較，顯示大屯山研究區以 4 月至 9 月期間 $\Delta T_1^3$ 的平均重力變化量 $|\Delta g_1^3|$ 為最大，表示大屯山研究區以 $\Delta T_1^3$ 時期的重力變化量相較於 $\Delta T_1^2$ 及 $\Delta T_1^4$ 劇烈；其中以經過七星山的路線 5R 的 $|\Delta g_1^3|$ 平均重力變化量達 22.5  $\mu\text{gal}$  為最大。經過 95% 信心水平的顯著測試後 $\Delta T_1^3$ 時期的顯著變動測站(11 個顯著測站)多於 $\Delta T_1^2$ 時期(6 個顯著測站)及 $\Delta T_1^4$ 時期(9 個顯著測站)，並且得知以陽明山擎天崗為中心之西北方地區的變化趨勢與西南方或東北方地區出現不同的變化趨勢；綜合連續時間觀測可得知以監測站 Y016、Y017 及 Y022 為顯著重力值變小的趨向；經過顯著測試分析可知西北方地區路線 5R 出現顯著重力值變小的趨勢，以第二期與第一期的平均重力差值( $\Delta g_1^2$ )約-11.6  $\mu\text{gal}$ ，第三期與第一期的平均重力差值( $\Delta g_1^3$ )約-22.2  $\mu\text{gal}$ ，第四期與第一期的平均重力差值( $\Delta g_1^4$ )約-14.8  $\mu\text{gal}$ 。

六、以大屯山研究區之擎天崗超導重力儀(SG)的重力監測值與絕對重力值進行比較分析，發現除了擎天崗測站(YMSG)與 SG 監測的重力變化趨勢相同外，小油坑測站(YAG3)的重力變化趨向皆與之相同；並且根據研究區地形圖(圖 6-13)的雨量計之累積雨量，其中以研究區地形圖(圖 6-13)的西南方地區的 CR 雨量計之累積雨量為最小(約 2100 mm)，以東北方地區的雨量計(AR, BR 和 DR)之累積雨量為最大(大於 3500 mm)，顯示東北方地區之雨量大於西南方地區，可能受到東北季風，迎風面和背風面雨量不同的影響。配合本研究區所用之水井及雨量計資料，觀測 4 月至 7 月份所得各水井水位變化(最大下降量為 1.17 m)及單月累積雨量(最大減小量為 279 mm)皆出現變小的趨勢，與鄰近監測路線 5R 之重力差值( $\Delta g_1^2$ )為負值的趨向相同；另外，根據水井資料顯示 TW11 和 TW26 水位變化符

合重力變化以 $\Delta T_1^3$ 時期為最大變化量的趨勢，並且水位變化趨勢皆顯示在 $(\Delta T_1^4)$ 時期為負值，即第一期的水井水位高於第四期的水位，與路線(4R及5R)重力差值 $(\Delta g_1^4)$ 的變化趨勢相同。

#### 七、未來研究的方向：

中央研究院地球科學所主題計劃於今2013年新一期大屯山研究區進行新增監測路線，主要以擎天崗(YMSG)至小油坑(YAG3)的擴展路線，新增路線為擎天崗(YMSG)至大屯山助航站(T)，以加密橫跨七星山和大屯山助航站地區的測站，藉以完整各時期大屯山區的重力變動特性。後續可注視本研究區西北方地區的監測站Y016、Y017及Y022為顯著重力值變小的趨向及發展。

以大屯山研究區之擎天崗衛星追蹤站內的超導重力儀(SG)，最小可觀測達1nanogal的精度，可精準量測出該地區的微量重力變化，如潮汐的變化，利用超導重力儀(SG)所監測出的重力值來推算適合各時期變化的大氣導納係數，以提高大氣壓力改正模式的精確度。

在大屯山各重力監測站配合以GPS或水準測量來監測各重力監測路線的高程變化，以用於分析水井水位變化及累積雨量變化所導致高程的變動及重力變動的關聯性。另外，在不同監測時期的重力差值變化，可能受到東北季風的不相同雨量分佈(考量迎風面及背風面的影響)及地下水資源的影響，後續可探討結合水文改正模式，加以確定大屯山研究地區的重力變化趨勢及後續運用經驗正交方程(Empirical Orthogonal Function, EOF)來把資料中最大變異的成份顯示出來，變化較小的資料而不作考慮，來進行分析資料的訊號變化。

## 參考文獻

- 內政部，2012。內政部 101 年度重力基準維護及測量整合服務工作期末報告。
- 交通中央氣象局，2012。氣候監測報告，交通中央氣象局月刊，2012 年 6 月，第四十期，1~16 頁。
- 李莉華，2001。重力及 GPS 基線網之自由基準及加權約制平差，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 殷富，1984。海洋物理學概論，國立編譯館，台北，243~280 頁。
- 高瑞其，2011。台灣超導及絕對重力觀測:重力基準、地體動力及環境變遷之應用，國立交通大學土木工程學系博士論文。
- 高瑞其、黃金維、李瓊武、彭森祥、謝文祺，2009。大氣壓力對超導重力之影響，第 28 屆測量及空間資訊研討會論文，中央大學，台灣。
- 陳南松，2003。地球固體潮與海潮負載對台灣地區衛星追蹤站坐標與重力之影響，國立交通大學碩士論文。
- 彭森祥、葉文凱、李瓊武、梁旭文、楊枝安，2007。相對重力儀 CG-5 儀器校正與評估，內政部國土測繪中心研究人員論文。
- 鄂棟臣、何志堂、王澤民、張勝凱，2007。中國南極長城站絕對重力基準的建立，武漢大學學報資訊科學版，第 32 卷，第 8 期，688~691 頁。
- 黃鉅富，2012。高解析且高程相依之海潮負載效應於近岸超導重力站及衛星追蹤站之研究：重力與位移變量之模式、驗證及改正，國立交通大學土木工程學系博士論文。
- 楊燦堯，2006。大屯火山群是否為活火山？大屯氣動山河。國家公園雙月刊，七月號，26~29 頁。
- 葉義雄、陳光榮、顏宏元，1989。金山斷層之調查研究重力與微震觀測，行政院國家科學委員會防災科技研究報告，台北，7~10 頁。
- 劉冬至、李輝、邢樂林、孫少安、劉子維、項愛民，2007。中國地震重力網絕對

- 重力觀測結果分析，大地測量與地球動力學，第 27 卷，第 5 期，88~93 頁。
- 顏宏元，1991。台灣地區重力異常分布及其在地體構造上之含義，國立中央大學地球物理研究所博士論文。
- 魏祥鴻，2005。增益相對重力測量精度之研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 蘇洵頡，2010。利用超導重力儀訊號偵測地震造成的永久性重力變化，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- Baarda, W., 1968. A testing procedure for use in geodetic network. Netherlands Geodetic Commission, Publications on geodesy, Vol. 2, No.5, Delft.
- Boedecker, G., 2002. World Gravity Standards - Present Status and Future Challenges, *Metrologia*, 39, 429-433.
- Caspary, W.F., 1988. Concept of network and deformation analysis. Monograph 11, School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, p. 183.
- Debeglia, N. & Dupont, F., 2002. Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations, *J. appl. Geophys.*, 50(4),435-454.
- Dehant, V., Defraigne, P. & Wahr, J.M., 1999. Tides for a convective Earth, *J.geophys. Res.*, 104, 1035-1058.
- Farrell, W.E., 1972. Deformation of the earth by surface loads, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, 761-797.
- Hwang, C., Wang, C.G. & Lee, L.H., 2002. Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints, *Comput. Geosci.*, 28(9), 1005-1015.
- Hwang, C., Kao, R., Cheng, C.-C., Huang, J.F., Lee, C.W. & Sato, T., 2009. Results from parallel observations of superconducting and absolute gravimeters and GPS at the Hsinchu station of Global Geodynamics Project, Taiwan, *J. geophys. Res.*,

114(B7), B07406, doi:10.1029/2008JB006195.

Hwang, C. & Huang, J.F., 2012. SGOTL: A computer program for modeling high-resolution, height-dependent gravity effect of ocean tide loading, *Terr. Atmos. Ocean.Sci.*, 23, 219-229, doi: 10.3319/TAO.2011.10.06.02(Oc).

Jacob, T., Bayer, R., Chery, J. & Le Moigne, N., 2010. Time-lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity of a karst aquifer, *J.geophys. Res.*, 115(B6), B06402, doi:10.1029/2009JB006616.

Jiang, Z., Zuo. C., Qiu. Q., & Xu. S, 1988. China gravity basic net 1985. *Scientia Sinica (Series B)*, 31(9), 1143-1152.

Koch, K.-R., 1987. *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*. Springer, New York.

Krieg, L.A., 1981. *Mathematical modeling of the behavior of the LaCoste and Romberg "G" gravity meter for use in gravity network adjustments and data analyses*. Rep. No.321, Ohio State University, Columbus.

LaCoste and Romberg, 2001. *Gravity meter manuals for models G, Lacoste & Romberg Inc.*, Austin, Texas.

LaCoste and Romberg, 2002. *Graviton-EG users's manual, revision 1.8*, Lacoste & Romberg LLC., Austin, Texas.

Lancaster, P. & Tismenetsky, M., 1985. *The Theory of Matrices*, 2nd Edition. Academic Press, New York, p. 570.

Letellier, T., Lyard, F. & Lefevre, F., 2004. The new global tidal solution: Fes2004, in *Proceeding of the Ocean Surface Topography Science Team Meeting*, St. Petersburg, Florida, pp. 4-6.

Matsumoto, K., Takanezawa, T. & Ooe, M., 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.*, 56, 567-581.

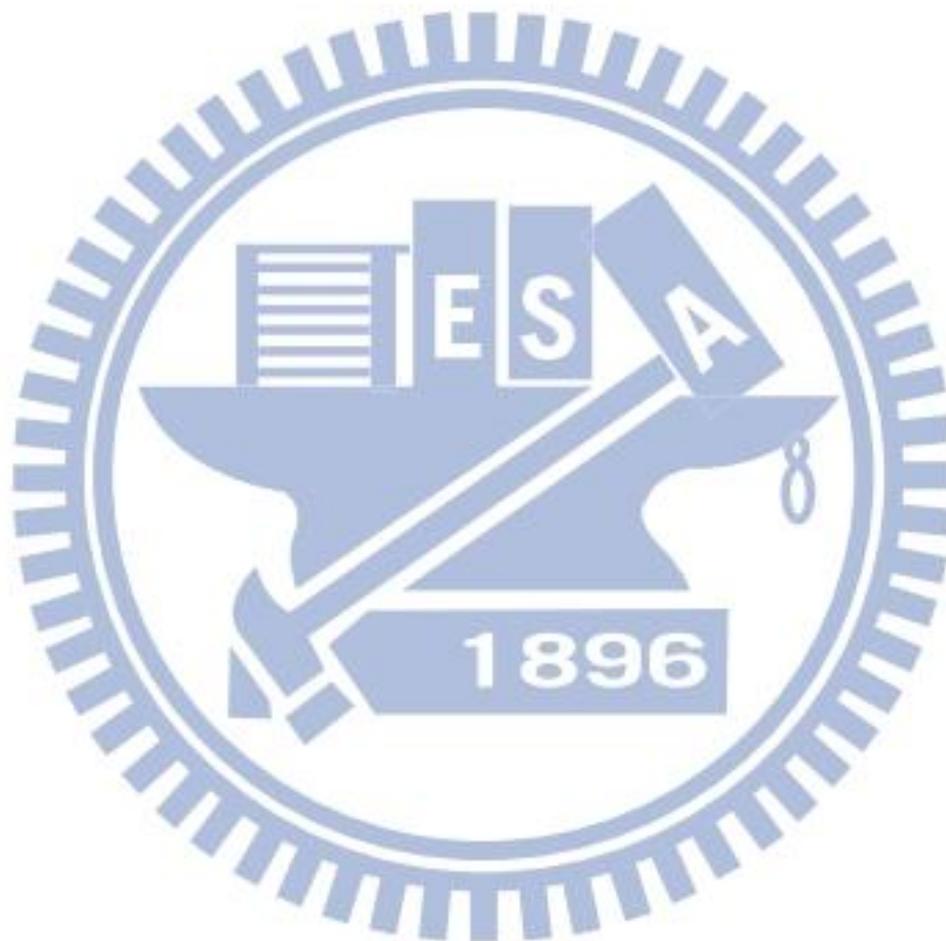
- Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T. & Ooe, M., 2001. GOTIC2: A Program for computation of oceanic tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Japan.*, 47, 243-248.
- Melchior, P., 1983. *The Tides of the Planet Earth*, 2nd ed., Pergamon Press Ltd, Oxford.
- Merlet, S., Kopaev, A., Diament, M., Geneves, G., Landragin, A. & Dos Santos, F.P., 2008. Micro-gravity investigations for the LNE watt balance project. *Metrologia* 45(3), 265-274.
- Merriam, J.B., 1992. Atmospheric pressure and gravity, *Geophys. J. Int.*, 109(3), 488-500.
- Micro-g LaCoste, 2007. "g7 User's Manual", Micro-g LaCoste g Absolute Gravity Data Acquisition and Processing Software, Micro-g LaCoste, Inc., Lafayette, Colorado, EU, <http://www.microglacoste.com/>. Last accessed date: October 2012.
- Micro-g LaCoste, 2006. "FG5 Absolute Gravimeter User's Manual", Micro-g LaCoste, Inc., Lafayette, Colorado, EU, <http://www.microglacoste.com/>. Last accessed date: October 2012.
- Mikhail, E.M., 1976. *Observations and Least Squares*. University press of America, New York.
- Moritz, H. & Mueller, I. I., 1987. *Earth Rotation*. Ungar, New York.
- Mouyen, M., Masson, F., Hwang, C., Cheng, C.-C., Le Moigne, N. , Lee, C. W., Kao, R. & Hsieh, W.-C., 2013. Erosion effects assessed by repeated gravity measurements in southern Taiwan, *Geophys. J. Int.*, (2013)192, 113-136.
- Niebauer, T.M., Sasagawa, G.S., Faller, J.E., Hilt, R. & Klopping, F., 1995. A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 32, 159 - 180. doi:10.1088/0026-1394/32/3/004.
- Pope, A. J., 1976. *The Statistics of Residuals and the Detection of Outliers*. Tech. Rep. TR-Nos-65-Ngs-1, National Ocean Survey, Rockville.

- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. & Vetterling, W. T., 1989. Numerical Recipes, Cambridge Univ. Press, New York.
- Scintrex Limited, 2010. CG5 Scintrex Autograv System, Operation Manual, Scintrex Limited, Concord, Ont., Canada. <http://www.scintrex.com/>. Last accessed date: October 2012.
- Takanezawa, T., Matsumoto, K., Ooe, M. & Naito, I., 2001. Effects of the Long-period Ocean Tide on Earth Rotation, Gravity and Crustal Deformation Predicted by Global Barotropic Model -periods from Mtm to Sa-, J. Geod. Soc. Japan, 47, 545-550.
- Timmen, L., 2003. Precise definition of the effective measurement height of free-fall absolute gravimeters, Metrologia, 40, 62, doi:10.1088/0026-1394/40/2/310.
- Torge, W., 1989. Gravimetry, Walter De Gruyter, Berlin, p. 465.
- TSoft Manual, 2011. TSoft Manual 2.1.8, Van Camp, M. and Vauterin, P., Royal Observatory of Belgium, <http://seismologie.oma.be/TSOFT/Tsman.pdf> , Last accessed date: October 2012.
- Uotila, U. A., 1986. Notes on Adjustment Computations, Part I, Department of Geodetic Science and Surveying, the Ohio State University, Columbus.
- Van Camp, M. and Vauterin, P., 2005. TSoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, Comput. Geosci., 31(5), 631-640.
- Van Camp, M., Williams, S.D.P. & Francis, O., 2005. Uncertainty of absolute gravity measurements, J. geophys. Res, 110, B05406, doi:10.1029/2004JB003497.
- Vanicek, P., and E. Krakiwsky, 1986, Geodesy, the Concepts, Elsevier Sci. Publ. Com., Amsterdam.
- Warburton, R. J., and Goodkind, J. M., 1977. The influence of barometric pressure variations on gravity. Geophys. J. R. astr. Soc., 48, 281-292.
- Wenzel, G., 2002. Etgtab version 3.0. Earth tide prediction program, Tech. Rep.,

Retrieved 2002 April 11 from <http://www1.gik.uni-karlsruhe.de/~wenzel/>

Wessel, P., Smith, W.H.F., 1999. The Generic Mapping Tools (GMT), Technical Reference and Cookbook, Univ. of Hawaii, Hawaii, USA.

Yang, Z., Manabe, S., Yokoyama, K., Jike, T. & Heki, K., 1996. Comprehensive ocean tide loading parameters of sites in East Asia with spherical harmonic method, Gravity Geoid and Marine Geodesy, pp. 343-350.



## 附錄 A

本研究運用的海潮負載重力改正值程式的執行檔 otlprdt.bat，其輸入檔 (site\_file) 的檔內格式如下表 A1，其中序號只作說明用途，輸入檔(site\_file)的檔案內容並不存在序號數值，並以 YMSG 測站的數據示範；序號(1)所標示的檔案內容 Site\_name 為用家可自定的站名；序號(3、5、7、9、11)所標示的檔案內容為用家可自定輸入的數據；序號(2、4、6、8、10)所標示的檔案內容為固定格式定義名稱，順序分別為經緯度、起始結束 UTC 時間與時間間隔、相位選項、11 個分潮的海潮負載之振幅值和相位值；故此，用家只需在序號(1、3、5、7、9、11)所標示的檔案內容進行修改。

表 A1 輸入檔(site\_file)的檔內格式說明

序號	檔案內容
1	Site_name
2	(Longitude, Latitude, Height)
3	121.57429      25.16590      759.60
4	(Start time, End time, Epoch (min))
5	201204180000 201204192300 01
6	(0: Greenwich phase, 1: Local phase)
7	0
8	(M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1 MF MM SSA (mgal/m))
9	
10	(M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1 MF MM SSA (degree))
11	

## 附錄 B

運用 MATLAB 程式語言編寫之大氣壓力重力改正量程式(PresCorr.m)，單位為 m gal，其中輸入檔以本文的研究路線小段 1R1 為例子。PresCorr.m 程式碼的內容如下：

```
clear all
clc
fid1=fopen('C:\1R1.txt'); %輸入檔1R1.txt
a=textscan(fid1, '%s %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f', 'HeaderLines', 1);
a1=a{1};
a2=[a{2:11}];
ht=a2(:,7); %讀出輸入檔1R1.txt中的正高值
pres=a2(:,10); %讀出輸入檔1R1.txt中的氣壓值
pn=1013.25.*(1-(0.0065.*ht./288.15)).^5.2559;
gp=-3.5*(pres-pn).*1e-4; % gp unit: mgal
b=[a2 pn gp];
fid2 = fopen('C:\1R1_p.txt','wt'); %輸出檔1R1_p.txt
fprintf(fid2, '%4.0f %6.0f %6.1f %4.0f %4.0f %6.1f %7.2f %7.2f
%6.1f %7.2f %7.2f %10.6f\n', b);
fclose(fid2);
fclose(fid1);
```

輸入檔(1R1.txt)的內容格式如下

ID	經度(度 分 秒)	緯度(度 分 秒)	正高(m)	溫度	濕度	氣壓(毫巴)
YAG3	121 32 48.0	25 10 35.0	800.685	22.90	95.0	929.00
Y006	121 35 06.0	25 10 22.0	695.569	17.70	95.0	963.00
Y007	121 35 07.0	25 10 12.0	564.555	16.90	86.0	956.00
Y008	121 34 55.0	25 10 07.0	614.558	16.80	85.0	951.00
Y009	121 34 45.0	25 10 06.0	645.568	15.60	85.0	945.00
Y009	121 34 45.0	25 10 06.0	645.568	15.60	85.0	945.00
Y008	121 34 55.0	25 10 07.0	614.558	15.10	85.0	951.00
Y007	121 35 07.0	25 10 12.0	564.555	15.10	85.0	956.00
Y006	121 35 06.0	25 10 22.0	695.569	15.10	85.0	963.00
YAG3	121 32 48.0	25 10 35.0	800.685	21.10	85.0	929.00



## 海潮負載(OTL)的重力改正量的選取程式(OTLselect.m)

Matlab 程式碼如下：

```
clear all
clc
fid1=fopen('C:\OTLchoose\OTL_out4\YMSGN52_out.txt');
a=textscan(fid1, '%f %f %f %f %f %f', 'HeaderLines', 1);
fid2=fopen('C:\OTLchoose\UTCroute4\UrawG5-2.txt');
b=textscan(fid2, '%s %f %f %f %f %f %f');
b1=b{1};
b2=[b{2:6}];
Z=a{6};
target={'YMSG'}; %find the station
L=strcmp(b1, target); %compare and find
[ row, col, v]=find(L==1); %location
ma=(a{3}*24)*60+a{4}*60+a{5}; % minutes
mb=(b{4}*24)*60+b{5}*60+b{6};
[A1,A2]= size(ma);
k=0;
for i=[row(1,1):row(15,1), row(16,1):row(30,1)]
for j=1:A1
if mb(i,1) == ma(j,1)
k=k+1;
c(k,:)= [b2(i,:) Z(j,1)];
else
end
end
end
fid3 = fopen('C:\OTLchoose\otlchooseOUT4\YMSG_5-2.txt', 'wt');
fprintf(fid3, '%4.0f %2.0f %2.0f %2.0f %2.0f %8.4f\n', c');
fclose(fid3);
fclose(fid1);
fclose(fid2);
```

## 附錄 D

### 初部改正整合程式 `correct.f`

`correct.f` 程式為進行觀測資料初部改正整合運算，在完成 `correct.f` 計算後，若要更新數學改正模式之改正後的重力值(本研究的環境改正方法於第四章所詳述)，可以在 `tmp` 資料夾內的輸出資料檔中的第 6 直行數值(改正後的重力值)進行修改。

執行指令(bat檔)：指令檔的括號外為必要指令，括號內為選擇條件。

```
correct -Ifile_list1 -Ofile_list2 -Lfile_position -Twarn.txt [-H] > correct.sta
```

範例指令說明：

`correct.sta`：記錄每條路段的測點數量。

-I：輸入檔案(`file_list1`)為重力觀測值檔案，輸入檔需建立在 `env` 資料夾內。

-O：主要輸出檔案(`file_list2`)，用於後續轉換程式 `arrange.f90` 的輸入檔案。

-L：次要輸出檔案(`file_position`)，程式產生的經緯度坐標檔。

-T：次要輸出檔案(`warn.txt`)，用於初部檢測輸入檔。

-H：在-L 的檔案中加入檔頭內容說明。

在 `correct.f` 程式執行前需要建立如下資料夾及檔案：

(1) 建立 `env` 資料夾用於存放環境資料及坐標資料輸入檔；(2) 建立 `reading` 資料夾用於存放重力值及對應時間的輸入檔，`env` 及 `reading` 檔案內的路線測點名稱需要一致；(3) 建立 `tmp` 資料夾用於存放經過計算後的重力值輸出檔，並自動建立重力值輸出檔的路徑檔(如 `file_list2`)。(4) 程式運算時需要有附屬檔案包括：台灣網格資料檔案 `taiwan_land.01` 及 `twgeoid.grd1`；EOP 參數檔 `polar_motion1.txt`；太陽月球參數檔 `sun_moon_eph.txt`。

本研究的 `correct.f` 指令範例：

```
correct -Ifiles.txt -Ofiles_day -Lpositionday.xy -Twarnday.txt > correctday.sta
```

## 轉換程式 arrange.f90

轉換程式 arrange.f90 為把各站間的重力差值轉換成觀測量檔案格式(.obs)。

執行指令範例(bat檔)：

```
arrange -Ifile_list -Ogravity.obs -Lsummary -Derror_file -Nstation_list  
-Tend_point_name [-Zlist_all -Sstd]
```

指令檔的括號外為必要指令，括號內為選擇條件。

範例指令說明：

必要指令：

- I：輸入檔案(file\_list)為前程式 correct.f 的主要輸出檔案(file\_list2)。
- O：主要輸出檔案(gravity.obs)為轉換成相對重力觀測量檔案格式(.obs)，用於後續平差程式 gravnet.f90 的輸入檔案。
- L：副要輸出檔案(summary)，總結相對重力值的閉合差及觀測重力路線點位名稱。
- D：副要輸出檔案(error\_file)，檔案包含觀測量資料的可能誤差。
- N：副要輸出檔案(station\_list)，檔案包含各監測點位及連接點名稱。
- T：副要輸出檔案(end\_point\_name)，檔案包含孤立的測點名稱。

副要指令：

- Z：副要輸出檔案(list\_all)，檔案包含原始觀測資料及改正後的資料。
- S：自定值，用家自定或運用監測儀器提供的觀測量先驗標準差(內定值為 0.03mgal)。

本研究的arrange.f90指令範例：

```
arrange -Ifiles_day -Ocorr.obs -Lsummary_day-corr.txt -Derror_0.1_day-corr.txt  
-Nstation_list_day-corr.txt -Tname_error_day-corr.txt -Zraw_day-corr.txt
```

## 重力網平差程式 gravnet

重力網平差程式 gravnet (李莉華, 2001; Hwang et al, 2002) 為以相對重力觀測量進行網形平差，可求得重力值及儀器系數。

執行指令(bat檔)：

```
gravnet -Dname1.obs -Nname2 [-Aid -Ccdegree -Fixed_stn_file -Mmodel  
-Pperiod_file -Tdegree -Smjd0 ]
```

指令檔的括號外為平差之必要指令，括號內為平差之選擇條件。

範例指令說明(李莉華, 2001)：

必要指令：

-D 為程式執行所需的輸入資料檔(obs檔)，包括起始點站名(前視)、終點站名(後視)、相對重力差值、起始點之觀測時間(前視mjd)、終點之觀測時間(後視mjd)、該時間皆為Julian date(見Seeber(1993))、起始點讀數(前視讀數)、終點讀數(後視讀數)、觀測值之標準偏差。

-N 為自設的輸出檔案名稱，範例以name2為主檔名，並以不同的副檔名來輸出相關的訊息。輸出的檔案格式包括如下說明：

name2.gra：平差得之重力資料，內容包括編號、重力點名稱、重力值及其標準偏差。

name2.met：平差得之相對重力儀之儀器參數，內容包括儀器漂移率、率定函數之長波長項、週期部分之係數及其個別之標準偏差，使用者要求計算該模式才輸出各係數。

name2.res：粗差測試結果，內容為前視編號、後視編號、觀測量之殘差值、測試值及測試狀態。測試狀態若為accept表示該觀測量不是粗差，若為reject表示該觀測量為粗差。

name2.err：將粗差測試之粗差值列於此檔中。

name2.adj：以自由基準模式解算才輸出此檔，內容為前視編號、後視編號

及相對重力值。

name2.sta：統計相關資料，包括殘差值、未知數標準偏差及儀器精度等。

name2.his：殘差值分佈統計資料，可利用excel圖表功能劃出殘差分佈情形。

建議輸入資料檔(obs檔)名稱name1與平差後的重力資料檔名name2相同，以清楚分類同一個測站的成果。

選擇指令：

-A 指定解算的約制點資料檔，如 -M1 -F [內定值:1]。

-C 率定函數模式之長波長項，階數是根據所給定的cdegree 值。[內定值：無此率定函數模式]。

-F 約制點資料檔，內容包括約制點之站名、重力值及其標準偏差。

-M 平差模式：1 為自由基準，2 為最小約制或加權約制法。[內定值：1]

(1)若-M1 及-F，則平差重力時會以約制點資料中的第一個約制點值來解算。

(2)若-M2 及-F，約制點資料不只一個已知重力值時，則為加權約制法解算。

-P 計算率定函數的週期部分。[內定值：不計算此部分]。

-S 初始時刻以 MJD 為單位。[內定值:內定起算時刻為 1990/1/1,0 hour, 0min, 0 sec]

-T 重力儀漂移率多項式之階數。[內定值：1]

本研究的指令範例(詳述於第六章)：

case 1範例：gravnet -Dcorr.obs -Ncase1 -M1 -FYMSG\_station.fix -T1

case A1範例：gravnet -Dcorr.obs -NcaseA1 -M2 -Ffive\_station.fix -T1

case A2範例：gravnet -Dcorr.obs -NcaseA2 -M2 -Ffive\_station.fix -T1 -C1

case B範例：gravnet -Dcorr.obs -NcaseB -M2 -Ffour\_station.fix -T1

## 作者簡歷

作者：林健輝 (Lam, Kin-Fai)

出生地：澳門

生日：1988 年 1 月 30 日

地址：澳門青洲大馬路逸麗花園第五座 18 樓 AP

E-mail：[nofour9@hotmail.com](mailto:nofour9@hotmail.com) 或 [nofour9@gmail.com](mailto:nofour9@gmail.com)

學歷：

澳門聖若瑟教區中學第五校 高中畢業

國立交通大學 木木工程學系 學士班畢業

國立交通大學 木木工程學系測量及空間資訊組 碩士班

