101 年度臺灣本島近岸船載重力測量作業

期末報告

計畫主持人：黃金維　教授

國立交通大學 土木工程學系

共同主持人：陳國華　副教授

國立台北大學 不動產與城鄉環境學系

委託單位：內政部國土測繪中心

執行單位：國立交通大學

中興測量有限公司

中華民國 101 年 12 月 21 日

摘要

本案蒐集臺灣本島及周遭的重力資料，包括陸地重力資料、船載重力資料、空載重力資料以及衛星測高重力。針對近岸的海上重力，本年度的作業完成了台灣西北部沿海的部分，精度達 2.359 mgal。本案另一工作項目為在西北沿岸與宜蘭山區選擇 40 點水準點做 GPS 的連續 24 小時觀測，利用得到的橢球高與現有的正高資料，可用來檢核大地起伏精度。用蒐集的重力資料計算新的臺灣區域大地起伏模型，在各條檢核線上的精度皆優於 10 公分。針對臺灣西北沿海的檢核線來看，加入本案船載重力後的大地起伏模型精度提升了 1.3 公分，可看出本組重力資料的貢獻。

關 鍵 字：船載重力、大地水準面、全球定位系統

Abstract

This project collects gravity data around Taiwan, including land gravity, shipborne gravity, airborne gravity and satellite altimetry gravity. In 2012, we completed data collection for offshore shipborne gravity around the northwest coast of Taiwan, with a mean accuracy of 2.359 mgal. Another major task is to collect 24-hour continuous GPS observations at 40 leveling benchmarks (BMs) around the northwest coastal area and mountain areas of Ilan. This GPS data are used to compute ellipsoidal heights at the 40 BMs, which are then used to compute geoidal heights (with given orthometric heights) for assessing the accuracy of a new geoid model. The new geoid model is computed using all available gravity data, and has a mean accuracy better than 10 cm. At the BMs along the route in the northwest coastal area, the geoid model accuracy is improved by 1.3 cm by adding the offshore shipborne gravity data, highlighting the value of such data.

Keywords：shipborne gravity, geoid, GPS

目錄

摘要..... I

Abstract..... II

目錄..... III

圖目錄..... VI

表目錄..... IX

第一章 前言..... 1

1-1 計畫緣由 1

1-2 計畫目的 4

1-3 辦理之工作項目 4

第二章 重力資料蒐集 6

2-1 陸測重力資料..... 6

2-2 船載重力資料 9

2-3 空載重力資料..... 17

2-4 測高衛星重力資料..... 25

第三章 近岸船載重力測量 28

3-1 作業範圍 29

3-2 外業觀測 31

3-3 陸上基站規劃..... 33

3-4 船載 GPS 動態定位處理方法與精度分析 37

3-5 船載重力資料處理方法 43

3-6 船載重力測量成果及精度分析 47

第四章 陸上 24 小時 GPS 測量.....54

4-1 點位規劃 54

4-2 GPS 測量外業流程 56

4-3 陸上 GPS 外業觀測資料處理流程 58

4-4 陸上 GPS 觀測資料計算方法 60

4-5 閉合差分析.....64

第五章 大地起伏計算 65

5-1 重力資料整合.....65

5-1-1 協變方函數 67

5-2 大地起伏計算方法.....73

5-3 大地起伏模型精度驗證方法 79

5-4 大地起伏成果及精度驗證.....80

5-5 混合型(HYBRID)大地水準面.....86

第六章 繳交項目 89

第七章 結論與應用 92

7-1 結論.....92

7-2 大地起伏之應用 94

7-3 未來規劃 101

參考文獻.....102

附錄 1 船載交叉點資訊 106

附錄 2 陸上 24 小時 GPS 觀測時段表 108

附錄 3 陸上 24 小時 GPS 測量成果表 110

附錄 4 陸上 24 小時 GPS 觀測閉合差分析表 112

附錄 5 投稿文章 120

附錄 6 期末報告初稿審查意見及修正辦理情形 146

附錄 7 101 年度教育訓練相關文件 154

附錄 8 教育訓練所授大地起伏計算步驟及說明 156

圖目錄

圖 1-1 工作進度甘梯圖 5

圖 2-1 陸測重力點位分布圖(a) 1980~2003 年、(b)2004~2006 年 7

圖 2-2 (左)100 年度、(右)101 年度花東及山區重力施測點位 8

圖 2-3 各離島海域船載重力異常資料分布圖(a)基隆(b)澎湖(c)小琉球 (d)綠島(e) 蘭嶼 12

圖 2-4 1996 年前之船載重力資料分布圖(Hsu et al., 1998).....13

圖 2-5 100 年度近岸船載測量重力異常 15

圖 2-6 空載重力資料分布 18

圖 2-7 平差處理後的空載重力網格 24

圖 2-8 測高海洋重力異常 27

圖 3-1 船載重力處理流程圖 29

圖 3-2 西北近岸船載施測範圍(藍線) 30

圖 3-3 尖再發船體外觀 32

圖 3-4 岸基控制點樁標規格示意圖 34

圖 3-5 岸基控制點埋設規格示意圖 35

圖 3-6 岸基控制點重力觀測 37

圖 3-7 4 支 GPS 天線裝設情形.....42

圖 3-8 重力資料與 GPS 資料時間差.....44

圖 3-9 船載重力實測點與內插點示意圖.....49

圖 3-10 近岸船載測量重力異常.....51

圖 3-11 交叉點重力異常差值（平差前）.....52

圖 3-12 交叉點重力異常差值（平差後）.....53

圖 4-1 24 小時 GPS 規劃點位.....55

圖 4-2 GPS 外業測量.....58

圖 4-3 GPS 資料處理流程圖.....60

圖 4-4 Bernese 軟體計算流程圖.....61

圖 5-1 協變方矩陣.....69

圖 5-2 自由空間重力異常網格.....71

圖 5-3 布格重力異常網格.....72

圖 5-4 N_{ref} 、N_{res}和 N_{rtm} 三種不同頻率的大地起伏.....74

圖 5-5 剩餘地型模型示意圖.....75

圖 5-6 臺灣新大地起伏網格.....78

圖 5-7 大地起伏 N 及橢球高 h 之幾何關係.....79

圖 5-8 大地起伏模型檢核線分布.....82

圖 5-9 Geoid101 與 Geoid101S 的差異分布圖.....85

圖 7-1 施測於陽明山的光達點雲資料(a)橢球高(b)正高.....95

圖 7-2 對應於光達點雲位置上的大地起伏值分布圖.....96

圖 7-3 全台灣地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖(摘錄自廖真如, 2010).....97

圖 7-4 (a) eGPS 點位分布圖 ；(b) eGPS 正高差異分布圖 100

表目錄

表 2-1 陸測重力資料一覽.....9

表 2-2 各離島海域船載重力測量航線資料一覽表.....11

表 2-3 各離島海域船載重力交叉點差異量統計 (單位: mgal).....11

表 2-4 各離島海域船載重力經平差後交叉點差異量統計 (單位: mgal) 11

表 2-5 船載重力資料一覽.....16

表 2-6 空載重力資料一覽.....23

表 2-7 NCTUA 與 Sandwell V18.1 之比較(單位：mgal).....26

表 3-1 船載重力計畫選用船隻—尖再發號.....32

表 3-2 工作日誌表.....33

表 3-3 船載重力測量交叉點差異分析成果（單位：mgal）.....51

表 4-1 測區 24 小時 GPS 規劃點位一覽表.....56

表 4-2 山區 24 小時 GPS 規劃點位一覽表.....56

表 5-1 24 小時 GPS 檢核線.....81

表 5-2 12 小時 GPS 檢核線.....81

表 5-3 大地起伏精度評估與比較(單位: cm).....84

表 5-4 混合型大地起伏檢核成果統計(單位:cm).....88

表 7-1 離島與本島之高程基準差異量(單位:m).....99

表 7-2 追蹤站 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異(單位: m) 100
表 7-3 eGPS 的 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異統計(單位: m) 100

第一章 前言

1-1 計畫緣由

目前臺灣本島西部平原地區已廣布重力點,但沿岸與海洋交接處重力資料尚屬缺乏，且衛星測高資料近岸雜訊多，致近岸附近大地水準面模型精度無法提升，本案係為加強本島近岸船載重力測量，以強化此區帶之大地水準面模型精度。

由於船隻需於近岸潮間帶作業,潮位的高低影響船隻行駛安全。本案測量作業牽涉船載重力測量資料、船隻 GPS 動態測量資料等資料組合分析化算至大地水準面模型,採用之學理技術與資料搜集方法都將影響化算成果之正確性與精度。

本計畫為 3 年期計畫，101 年度為第 2 年，主要辦理臺灣本島西北近岸海域，西南近岸海域已於 100 年度完成，102 年度預定繼續辦理臺灣本島東部近岸海域之近岸船載重力測量作業。

近年來我國在物理大地測量方面有諸多研究及應用，內政部於民國 86 年擬定「國家基本測量控制點建立及應用計畫」,並奉行政院核定自民國 88 年度起至 91 年度止，分四年在臺灣本島施測 2065 個一等水準點，並於一等水準點上加測 GPS 定位及重力測量後，臺灣本島陸地上之重力值觀測及重力成果建置已具初步之基礎。為求強化臺灣地區重力點之分布密度,內政部另於民國 93 年委託學術界辦理「空

載重力測量工作」，以求快速有效的補強山區之重力測量成果；同年度亦委託民間測量公司辦理臺灣地區「一、二等重力測量工作」，在現有均勻分布之 GPS 衛星控制點之架構上，施測約 4500 點之高精度地面重力值，並藉此完成我國重力控制網之布設工作。

由於海洋重力測量資料，可提供做為國家高精度基本測量、海洋資源開發、海面與海底工程設計和施工、船艦精密導航，以及海底地殼活動和海洋潮汐之研究等運用，故海洋重力測量所提供之數據，是極為重要且珍貴之大地觀測資料。因此，內政部於 95 年及 97 年各推行了航高 5000 英呎的低航高空載重力測量工作，範圍分別為臺灣東部海面及西部的海面包括東沙群島，皆委託交通大學完成。

在應用方面，內政部國土測繪中心(以下簡稱國土測繪中心)委託交通大學辦理臺灣本島與離島高程連測計畫，宗旨為將臺灣本島之高程系統 TWVD2001（由基隆平均海水面起算）與各離島之高程系統（由當地平均海水面）連結，計畫所包括之區域為小琉球、綠島、蘭嶼以及澎湖，共為三年期的計畫，已於民國 99 年完工。

除了上面所提的高程連結之外，利用高精度、高密度且分布均勻的重力資料，可以計算出良好的大地起伏，也可有許多應用，例如目前全球各國皆致力於高程現代化的推行，利用 GPS 取代傳統的水準測量。此外大地起伏對於光達以及防災應用上也是非常重要。現今大

地起伏的計算方法已發展得十分成熟，國內外亦有為數眾多的學術論文做相關探討，現今的階段，大地起伏的精度高低最主要乃是取決於重力資料的精度，以及分布的密度。而世界各先進國家無不傾力於增加重力資料的密度。

以亞洲各國舉例，馬來西亞的 MyGEOID 計畫，利用高密度空載重力測量補足境內重力缺乏的地區，以求得良好的大地起伏。日本利用直昇機搭載重力儀，測得日本北陸的能登半島淺水區域的重力並同時分析地理結構。南韓亦有完整空載重力資料，並與美國國家大地測量局(NGS)就空載重力保持合作往來的關係。此外，美國為了獲取更多且分布均勻的重力資料，更推行了大範圍的空載重力測量，以期獲得更佳的大地起伏模型，再搭配衛星定位技術可獲得精度 2cm 以內的高程基準面，名為 GRAV-D 計畫，預估於 2022 年完成。

與其他國家相比，對於重力資料的完整度以及相關的應用，我國雖處於領先位置，但對於臺灣環海周圍的近岸重力，卻缺乏整體規劃的高密度測量資料，雖然有低航高空載資料的輔助，但與船載重力測量相比，若船隻的航速以 10 節計算，飛機的時速快了將近 20 倍，亦即若用同樣的濾波器寬度來處理資料，船載資料的空間解析度可優於空載 20 倍的水準。有如此高空間解析度的資料，除了應用在大地起伏計算上，亦可研究相應的地理構造，無論在實際應用或是科學研究

上，皆能貢獻相當成果。

1-2 計畫目的

本計畫之主要目的為完成臺灣西北海域近岸的船載重力測量，補足過去此地區重力資料不足或精度不好的情形，並將近岸船載資料加入大地起伏計算。其中一工作項目為在臺灣西北沿海地區的 40 點水準點進行高精度的 GPS 的 24 小時測量，將所求得之橢球高減去已知的正高值可得實測的大地起伏值，利用這 40 點實測大地起伏的資料加以判斷本案的船載資料對於大地起伏的貢獻。

1-3 辦理之工作項目

本案應辦理之工作項目如下：

1. 擬定作業計畫書及船載重力測量航程規劃圖
2. 第一期成果繳交：

   作業規劃圖 5 份及電子檔 2 份(含近岸船載重力測量航程規劃圖、陸上 GPS 點位規劃圖及作業計畫書修正版)
3. 教育訓練(課程計畫表、配當表皆在附錄 7 中)
4. 蒐集國內重力測量成果資料並分析
5. 陸上相對重力儀測量
6. 船載重力測量資料蒐集及分析
7. 陸上 GPS 連測外業

8. 第二期成果繳交

船載重力測量成果 2 份及電子檔 2 份。項目包含測線軌跡圖、觀測記錄手簿、工作日誌、GPS 動態定位觀測資料檔(含 Raw Data 及 RINEX Data 檔)、重力觀測資料檔、觀測資料說明等。

9. 精算大地水準面模式

10. 檢核大地水準面模式精度

11. 精算混合型(HYBRID)大地水準面模式，並比較與傳統重力法大地水準面模式之差異與效益。

12. 測量成果資料彙整

13. 期末報告

本團隊辦理至今共完成上述 12 項項目，其內容詳述於之後章節，各項目執行天數及進度整理於圖 1-1：

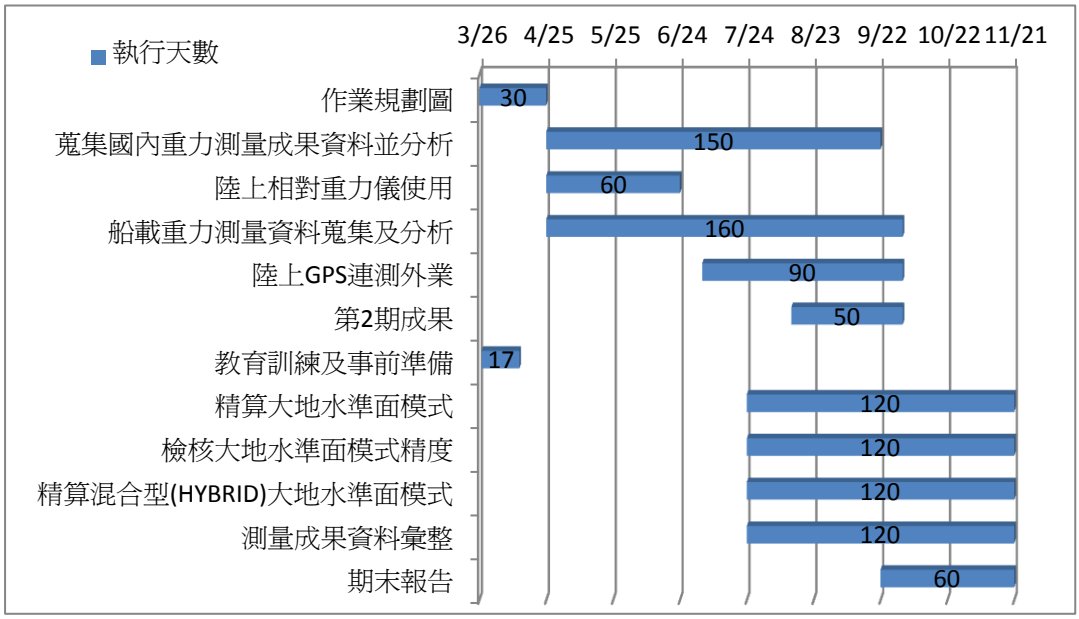


圖 1-1 工作進度甘梯圖

第二章 重力資料蒐集

本章節內容旨在說明本團隊蒐集的各組重力資料，就其年代、分布及精度指標做一敘述，內容涵蓋陸地重力測量、船載重力測量、空載重力測量以及測高重力。

2-1 陸測重力資料

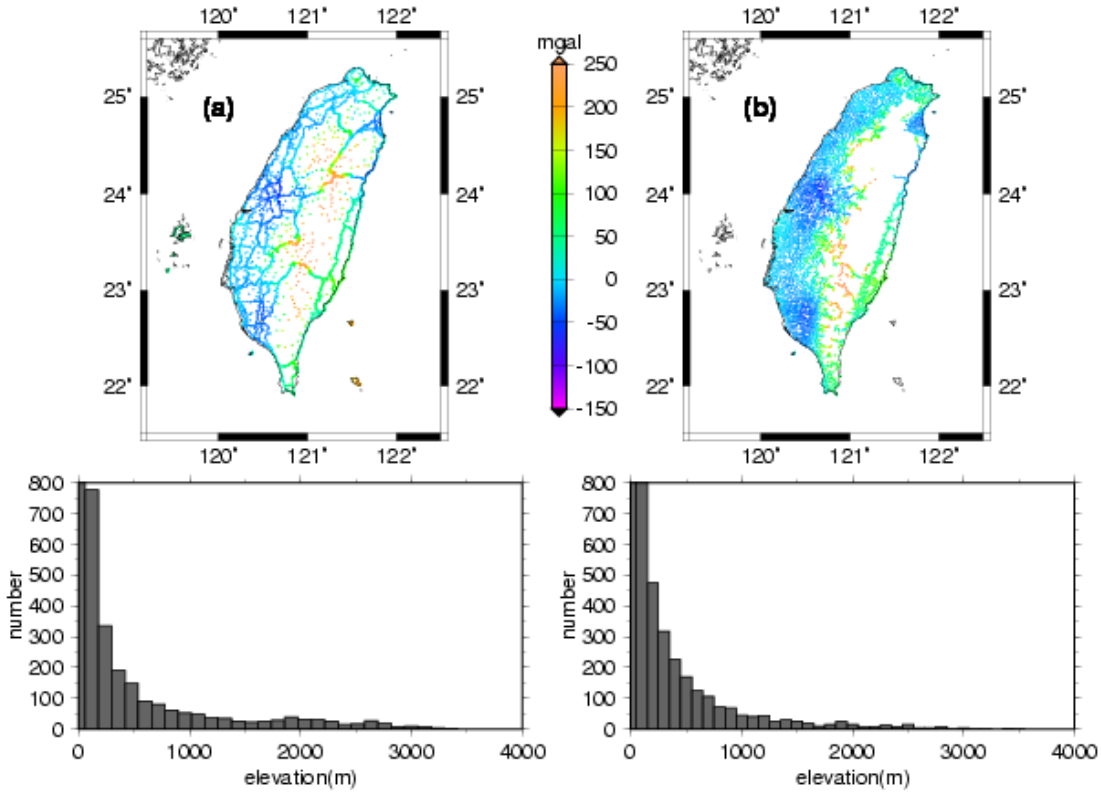
1. 1980~2003 年

現有的陸測重力點為臺灣近 20 年來(1980~2003)，經歷中央研究院(Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)、中國測量工程學會(黃金維等人,1998)、內政部(黃金維, 2001、陳春盛, 2003)等單位所蒐集共 3738 點重力觀測值(表 2-1 中項目 1~4)，重力資料的分布如圖 2-1 (a)所示。此組重力測量主要是沿著水準點及三角點進行測量，施測範圍大部分是在平地，由於山區施測困難，因而只有少部分的資料位於山區，使用儀器為LCR-G形重力儀(LCR,1997)。由於有些重力資料過於老舊，因此除了將所有資料整合化算至相同參考橢球體 GRS80 及坐標系 TWD97 (Hwang and Wang, 2002)，並進行嚴密的環境系統誤差改正及網形平差，再進行後續計算以得到重力異常。

2. 2004~2006 年

內政部委託中興測量有限公司於 2004~2006 年間所辦理的臺灣一、二等重力測量，其中包括 655 個一等重力點，3690 個二等重力

點，並加上 11 點已知重力點做平差約制，本組資料共 4356 點重力觀測值(表 2-1 中項目 5)，重力資料的分布如圖 2-1 (b) 所示。使用的儀器為 L&R Graviton EG 和 Scintrex CG-5 重力儀。重力觀測點大多於平坦地區觀測，重力異常範圍皆約由-60 至 320mgal 進行變化，網形平差後的平均精度約為±0.039mgal。



(a) (b)

圖 2-1 陸測重力點位分布圖(a) 1980~2003 年、(b)2004~2006 年

3. 2011~2012 年

(1)100 年度

100 年度花東及山區重力測量工作成果為國土測繪中心委託中興測量有限公司完成，施測點位分布如圖 2-2(左)，包含 6 個絕對重力

點，7 個一等重力點，及 258 個二等重力點，總計 271 點。經網形平差後的平均精度約為±0.042mgal。

(2)101 年度

依契約書規定，本案亦需加入 101 年度花東及山區重力測量工作成果，此組資料為國土測繪中心委託中興測量有限公司完成，施測點位分布如圖 2-2(右)，包含 7 個絕對重力點，67 個一等重力點，及 316 個二等重力點，總計 390 點。本組資料亦經過平差處理後納入大地起伏計算，網形平差時皆符合統計測試，經網形平差後的平均精度約為±0.044mgal。

本節各組就其施測時間、儀器、數量及精度資料整理於表 2-1。

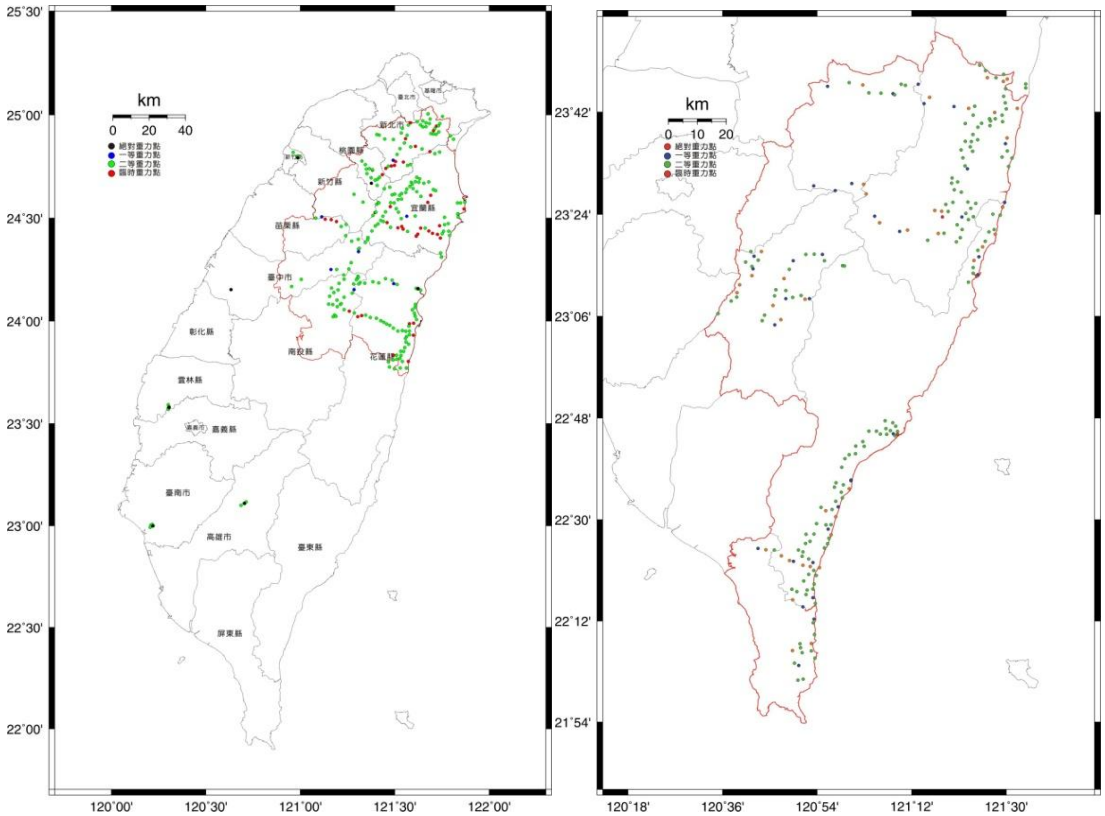


圖 2-2 (左)100 年度、(右)101 年度花東及山區重力施測點位

表 2-1 陸測重力資料一覽

時間	儀器	重力資料數量	平均精度 (mGal)	參考文獻	來源
1980~1987	LCR-G	603	N/A	Yen et al. (1990); Yen et al. (1995)	中央研究院地球科學研究所
I.1986~1988 II.1997~1999	LCR-G	I.276 II.747	N/A	(黃金維等，1998)	中國測量工程學會
2000~2001	LCR-G	1020	0.070	(黃金維，2001)	內政部，一等一級水準點重力資料
2001~2003	LCR-G	1092	0.070	(陳春盛，2003)	內政部，一等二級水準點重力資料
2004~2006	Graviton EG / CG-5	4356	0.039		內政部，臺灣一、二等重力點重力資料
2011	Graviton EG	271	0.042	100 年度花東及山區重力	內政部國土測繪中心
2012	Graviton EG	390	0.044	101 年度花東及山區重力	內政部國土測繪中心

2-2 船載重力資料

1. 各離島海域船載重力測量

本組資料來自 95、96、97 年度臺灣本島與離島高程連測計畫案，

由內政部國土測繪中心提供，資料範圍為基隆、澎湖、小琉球、綠島及蘭嶼進行各離島海域船載重力測量，如圖 2-3 所示，各海域航線數量及里程如表 2-2 所示，測線範圍以各連測點為圓心半徑 50 公里內，南北航線在 0～20 公里內以 2’為間距，20～50 公里以 4’為間距，東西航線以 17 公里為間距(澎湖海域的東西航線在 0~20 公里內以 8.5 公里為間距)，儀器為 L&R Air-Sea Ⅱ(L&R, 2003)及 ZLS-08，並使用單窗寬度約 120-150 秒之高斯濾波器處理，再將各條航線轉彎處的資料拿掉，以及去掉與已知重力網格相比差異量明顯過大的部分資料之後（原因有 GPS 斷訊、測船的劇烈傾斜、船上電力不穩導致重力儀電腦關機），保留有交叉點可供平差的處理的測線，並使用交叉點之重力異常值差異量來評估船載重力整體精度。考慮船速不超過 10 節，重力儀與 GPS 皆為 1Hz 的資料，約每 4 公尺可測得一筆重力資料，經過 120-150 秒單窗寬度之濾波後，船載重力的空間解析度約在 450-600 公尺左右。

表 2-3 進一步的顯示所有各離島海域測區重力觀測量的統計資訊。經過平差改正後可修正每一條航線所測得之船載重力值，將修正後之重力值重新作交叉點分析，得到的結果如表 2-4 所示，我們可以看到在各區域交叉點差異統計皆在合理範圍和國際標準之內(均方根誤差約 3mgal 內)。

表 2-2 各離島海域船載重力測量航線資料一覽表

施測區域	南北航線數	東西航線數	總里程(km)	交叉點數量
基隆海域	21	6	1060	35
小琉球海域	17	5	1160	41
綠島海域	20	7	1680	42
蘭嶼海域	21	7	1710	59
澎湖海域	21	7	1782	60

表 2-3 各離島海域船載重力交叉點差異量統計 (單位: mgal)

施測區域	最大值	最小值	平均值	均方根誤差
基隆	7.55	-11.67	-1.40	4.68
小琉球	14.68	-9.38	-0.39	4.94
蘭嶼	16.92	-18.269	-0.47	8.25
綠島	21.68	-4.81	1.97	6.31
澎湖	3.49	-8.39	-1.33	2.51

表 2-4 各離島海域船載重力經平差後交叉點差異量統計 (單位: mgal)

施測區域	最大值	最小值	平均值	均方根誤差
基隆	5.24	-5.54	0.00	1.63
小琉球	4.74	-4.27	0.00	1.94
蘭嶼	3.29	-5.33	0.00	1.59
綠島	2.06	-2.17	0.00	0.65
澎湖	2.74	-2.73	0.00	0.88

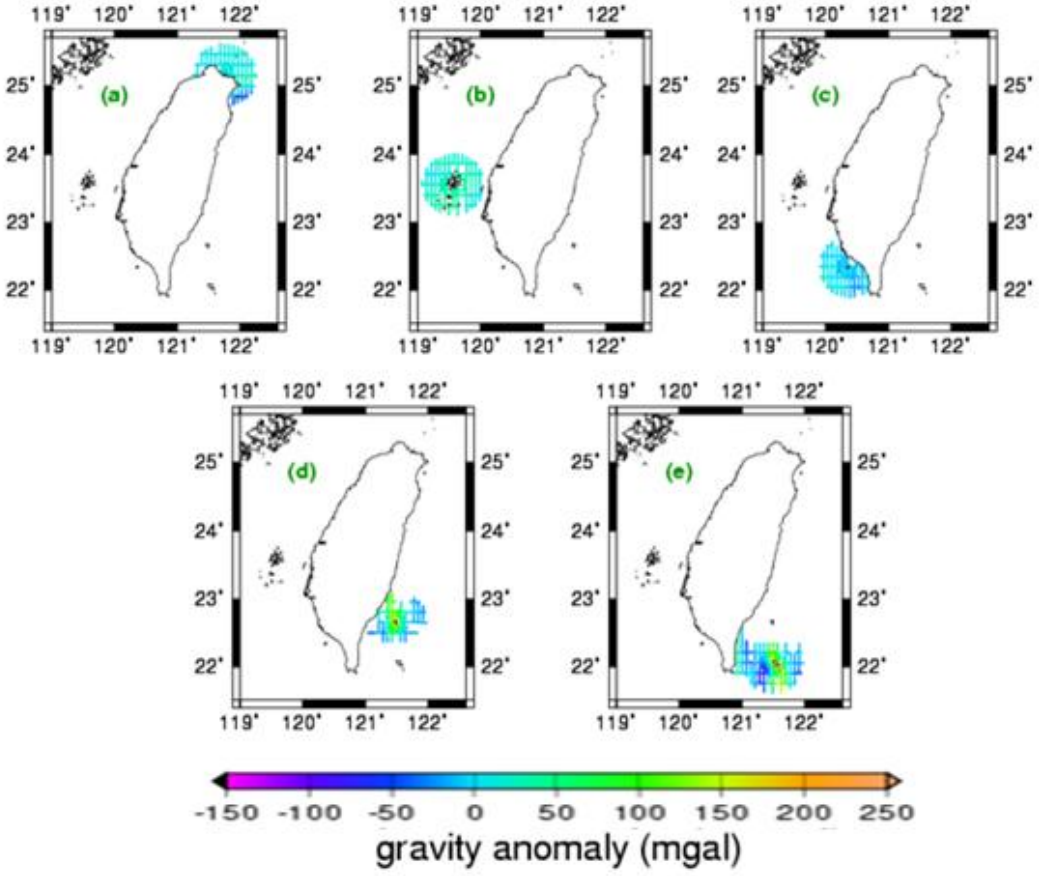


圖 2-3 各離島海域船載重力異常資料分布圖(a)基隆(b)澎湖(c)小琉球

(d)綠島(e) 蘭嶼

2. 臺灣環海船載重力測量

中央大學於 1996 年使用 R/Vl' Atalante KSS30 船載重力儀所蒐集之重力資料(Hsu et al., 1998)及 National Geophysical Data Center(NGDC)所下載之船載重力資料，如圖 2-4 所示，經篩選後共約四千多點。經交叉點精度分析後，R/Vl' Atalante KSS30 資料的交叉點差值的標準偏差為 2.6 mgal，而上述資料統合計算所得之標準偏差則為 11.2 mgal，以上數據皆為經過包括海潮改正等各項改正。

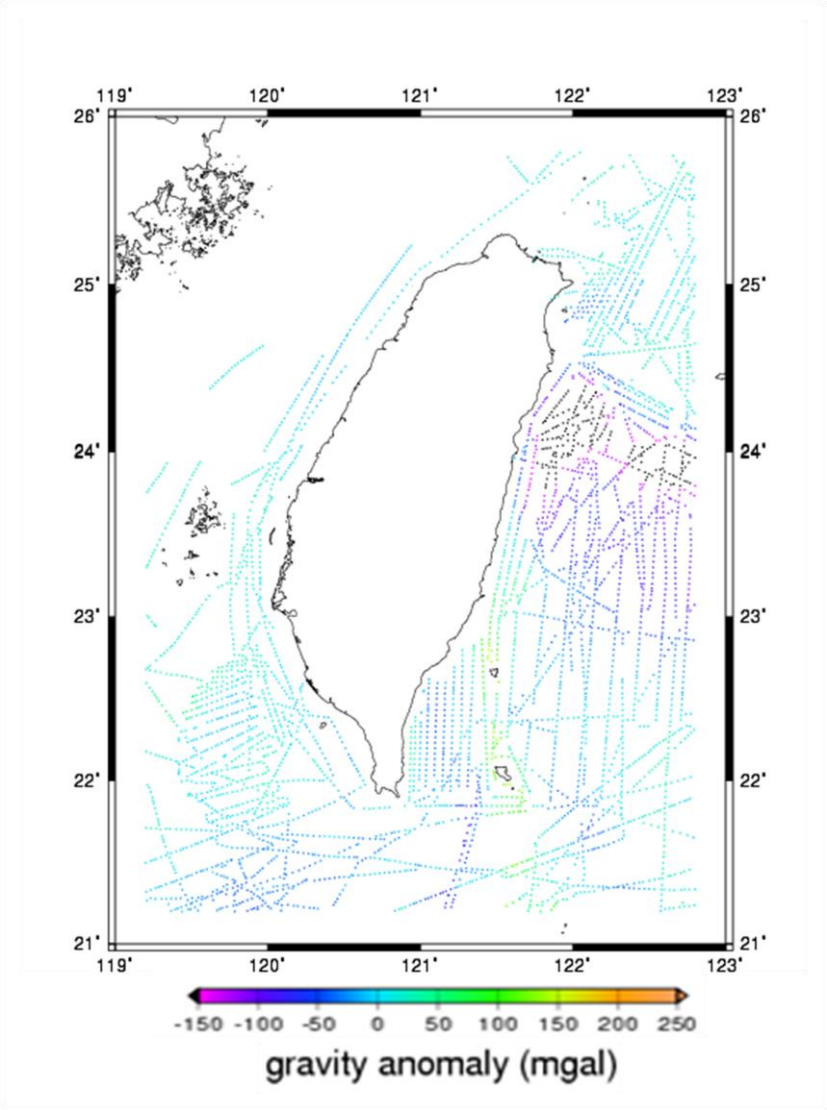


圖 2-4 1996 年前之船載重力資料分布圖(Hsu et al., 1998)

3. 臺灣本島近岸船載重力測量

臺灣近岸船載重力測量自 100 年度開始，該年完成西南沿岸之船載重力，得 45 條航線及 41 個交叉點，總里程約 1479 公里，船載測量重力異常如圖 2-5，利用交叉點分析判斷其精度為 1.336mgal，其濾波寬度同樣使用 120~150 秒之罩窗半徑，相應之空間解析度為 450-600 公尺左右； 本年度在西北部沿岸施測，其施測成果將於第三章詳細說明。

本節各船載資料整理於表 2-5，就其施測時間、儀器、濾波罩窗半徑、精度做一說明。

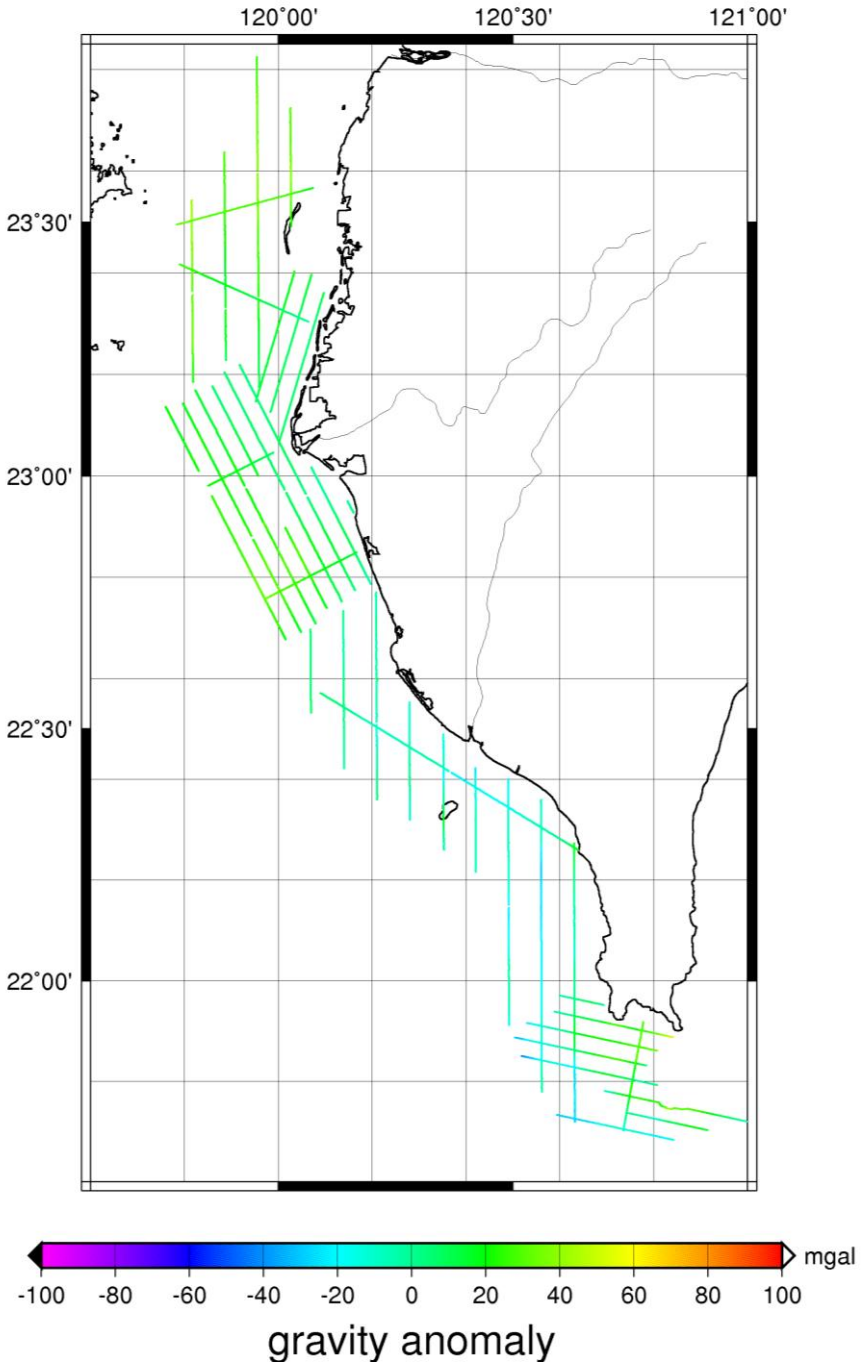


圖 2-5 100 年度近岸船載測量重力異常

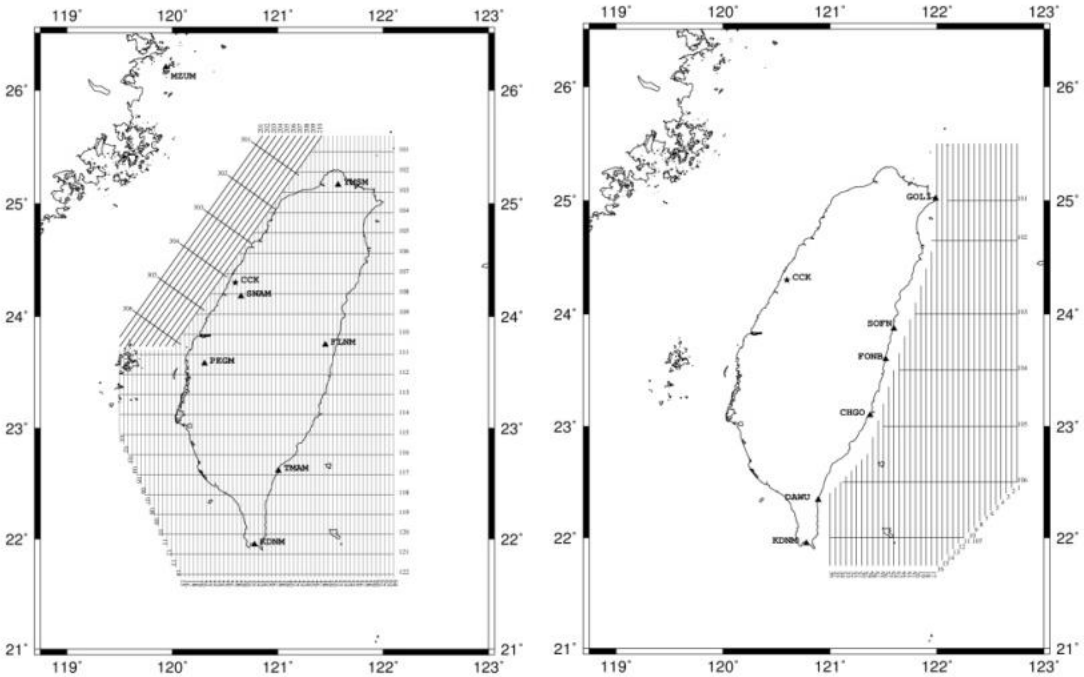
表 2-5 船載重力資料一覽

船載重力資料區域	時間	儀器	重力資料數量	濾波罩窗半徑	交叉點分析精度 (mGal)	參考文獻	備註
臺灣環海	1996 之前	R/Vl' Atalante KSS30	4084	N/A	11.2	Hsu et al. (1998)	本組資料包含 NGDC 重力資料
基隆沿海海域	2006	L＆R S130	1760	120~150 seconds	1.895	95 年度計畫	內政部國土測繪中心
小琉球沿海海域	2006	L＆R S130	1923	120~150 seconds	1.944	95 年度計畫	內政部國土測繪中心
綠島沿海海域	2007～2008	L＆R S130	1737	120~150 seconds	0.653	96 年度計畫	內政部國土測繪中心
蘭嶼沿海海域	2008～2009	ZLS Dynamic Gravimeter	1939	120~150 seconds	1.593	96 年度計畫	內政部國土測繪中心
澎湖沿海海域	2010	ZLS Dynamic Gravimeter	1906	120~150 seconds	0.882	97 年度計畫	內政部國土測繪中心
台灣本島西南部沿岸	2011	ZLS Dynamic Gravimeter	2329	120~150 seconds	1.336	100 年度計畫	內政部國土測繪中心

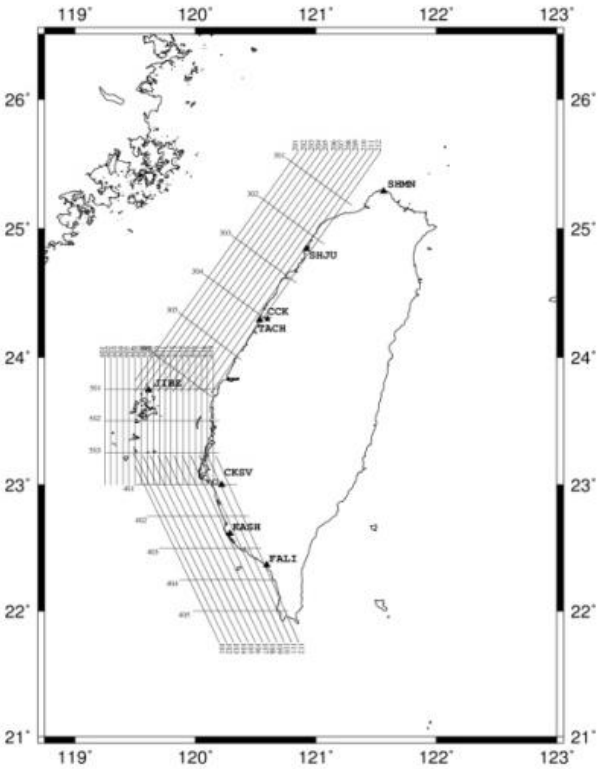
2-3 空載重力資料

1. 說明

臺灣本島為地勢狹長且崎嶇複雜的地形，四周環海，且境內超過70%為高山或丘陵所覆蓋，尤以中央山脈超過三千多公尺之地勢為最，自由空間重力異常最高可達 450mgal，臺灣東部海域地形構造較為複雜且為斷層帶交接處，自由空間重力異常驟降至-250mgal，為臺灣附近重力變化較大的區域，此外還有黑潮經過此區域。臺灣海峽為典型的淺水區域，船載重力資料較為稀少，過去皆以測高重力為主要的重力資料來源，然而此區域的地形較淺，海潮、濕對流層參數無法精確估計(Hwang and Hsu, 2008)，測高波形容易受到複雜地形及近岸陸地的干擾導致測距精度不佳(Deng, 2003)。受限於此地理環境，重力測量工作難以在山區、部分海域及海陸交接處實行，導致重力資料分布不均，因而內政部於 2004~2009 年辦理 3 次空載重力測量工作計畫，如圖 2-6 中之(a) Campaign 1 (空載重力測量工作)、(b) Campaign 2 (臺灣東部海域空載重力測量工作)、(c) Campaign 3 (西部及東沙海域空載重力測量工作)，並由交通大學執行之。



(a) (b)



(c)

圖 2-6　空載重力資料分布

(a) Campaign 1 (空載重力測量工作)

Campaign 1 已於 2005 年 5 月結案(黃金維，2005)。計畫從 2004 年 7 月 6 日第一次施測起，至 2005 年 3 月 21 日為止，共進行了 43 個測量工作天，總時數將近 200 小時，儀器為 L&R Air-Sea Ⅱ(LCR, 2003)。施測航線圖如圖 2-6(a)，南北向航線共 64 條、航線間隔 4.5 公里；東西向航線共 22 條、航線間隔 20 公里；東北-西南向航線共 10 條、航線間隔 5 公里；西北-東南向航線共 6 條、航線間隔 30 公里。測量之航高為 16000 英尺，即約 5156 公尺；航速為每小時 160 海里，約每小時 306 公里。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 306 km/hr，約每 85 公尺測得一筆重力值，並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

(b) Campaign 2 (臺灣東部海域空載重力測量工作)

Campaign 2 主要的測量區域為臺灣東部海域，該海域有地球重要的洋流「黑潮」經過，藉由空載重力測量的方式，取得黑潮流域的重力資料，則有助決定黑潮區域之大地水準面，且若能結合衛星測高資料，則可用於決定黑潮之平均海流與季節、跨年變化，並可作為臺灣本島及離島高程基準連測之重要數據。自 2006 年 3 月 6 日第一次施測起，至 2008 年 8 月初為止，因內政部所提供之飛機故障維修、重力儀儀器調度及天候影響等因素，經展期三次，始完成約 30 個空載

外業測量工作天，飛行總時數約 130 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。施測航線圖如圖 2-6(b)，南北向航線共 36 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 7 條、航線間隔 60 公里。考慮到地形起伏、施測精度、施測時間、飛航安全等因素，飛行航高定為 1620 公尺(5000 英呎)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值，並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

(c) Campaign 3 (西部及東沙海域空載重力測量工作)

Campaign 3 測量區域為臺灣西部海域與東沙群島，除了可補足西部沿岸的重力資料，其成果對於臺灣西部海域大陸棚的研究亦有所貢獻。外業測量工作時程始於 2008 年 12 月 9 日至 2009 年 9 月 13 止，共 27 個工作天，飛行總時數約 115 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。規劃之航線圖如圖 2-6(c)，南北向航線共 54 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 15 條、航線間隔 25 公里。飛行航高定為 1620 公尺(5000 英呎)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

2. 空載重力資料處理

與船載資料相比，因空載重力資料並非如船載資料為貼在海水面

上進行，實際應用時尚須進行向下延續的動作，故對於諸多系統誤差，如 Eötvös 效應所造成的誤差、重力儀的漂移誤差、重力基準誤差、重力參考場的不一致等(Wessel and Watts, 1988)需再特別處理。為了減少測量時產生的系統誤差，發展交叉點平差法模式化每條航線重力異常的偏差值(bias)及漂移值(shift)，雖然成功吸收了部分的系統誤差，然而沿著測線的重力訊號依然存在著帶狀的系統誤差(如圖 2-7 紅圈部分)，造成的原因可能是交叉點太少導致多餘觀測量不足，使得無法非常有效的估計系統誤差。以 Campaign 1 其中一條測線為例，然後將一測高重力網格向上延續至空載資料的高度並內插出相對於空載重力位置的重力異常。向上延續的公式如下:

$$G(u,v)\big|_{z=h} = e^{-2\pi f_r} G(u,v)\big|_{z=0} \tag{2-19}$$

其中 $f_r = \sqrt{u^2+v^2}$ 為徑向頻率(radial frequency)，$G(u,v)\big|_{z=h}$ 和 $G(u,v)\big|_{z=0}$ 分別為重力在 h 高度及海水面上的傅立葉變換，為了修正此偏移量，假設其誤差來源皆由儀器漂移、基站、基準偏移所造成，再假設空載重力系統誤差為時間的二次多項式， 公式如下:

$$\delta g = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 \tag{2-20}$$

其中 d_0 為常差(bias)，t 為自某一參考時刻起算之時間。然後利用最小二乘法求解後，再以平差後的差值來改正原有的空載重力。利用(2-20)式擬合空載重力和測高重力的差值，經平差後，獲得 d_0 、d_1 及 d_2 等係

數分別為 3.347、-0.215 及 0.017，且空載重力和測高重力差值的平均值和標準差從平差前的 4.368 和 2.795mgal 降到平差後的 0.000 和 2.048mgal。

為了後續的重力整合，本研究使用向下延續方法(downward continuation)搭配去除回復法將空載重力異常資料約化至海平面上(Hsiao and Hwang, 2011)，向下延續法的公式如下:

$$G(u,v)\big|_{z=0} = e^{2\pi h f_r} S_G(f_r) G(u,v)\big|_{z=h} \tag{2-21}$$

其中 $S_G(f_r)$： 高斯濾波

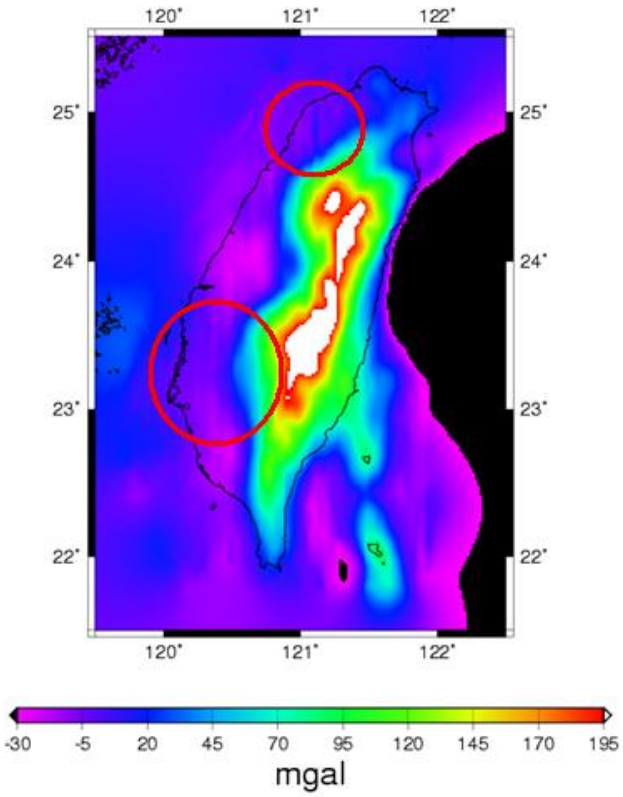
為了使空載重力異常向下延續至海平面後仍然可以得到穩定的結果，先移除透過參考重力場求得之長波長重力分量及透過地形資料求得之短波長重力分量而得到殘餘重力異常，再將此殘餘重力異常透過公式(2-21)向下延續至海平面，再將海平面之長短波長之重力分量回復之。此外，地形重力效應是使用 Gaussian quadrature 逐點計算其重力效應 (Hwang et al., 2003)。Hsiao and Hwang (2011)認為地形重力效應的考量於向下延續的應用中，只有在地勢變化較大的區域才有明顯的效果，海面上之空載重力應用此法進行向下延續反而有可能會使結果變差，因此本研究只有橫跨臺灣中央山脈的 Campaign 1 在其向下延續時才有考慮地形重力效應，然而測區幾乎在海平面上的 Campaign 2 及 Campaign 3 在其向下延續時則並沒有考慮地形重力效

應。

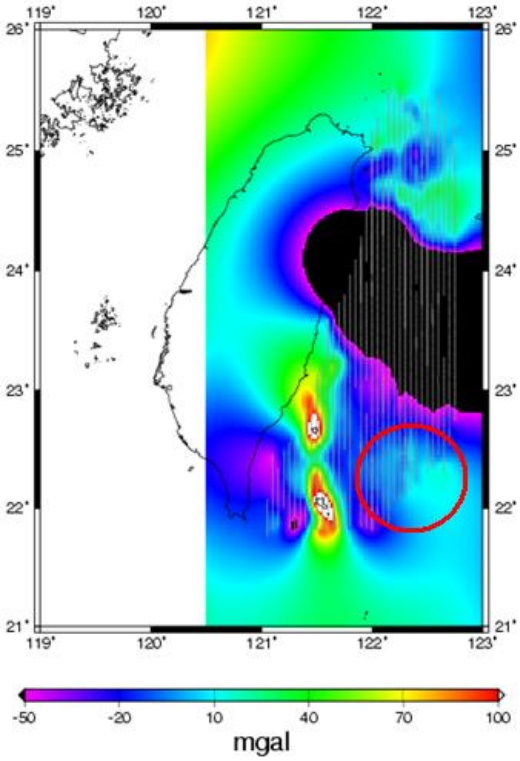
本節各組資料就其施測時間、儀器、單窗濾波半徑及精度整理於表 2-6。

表 2-6 空載重力資料一覽

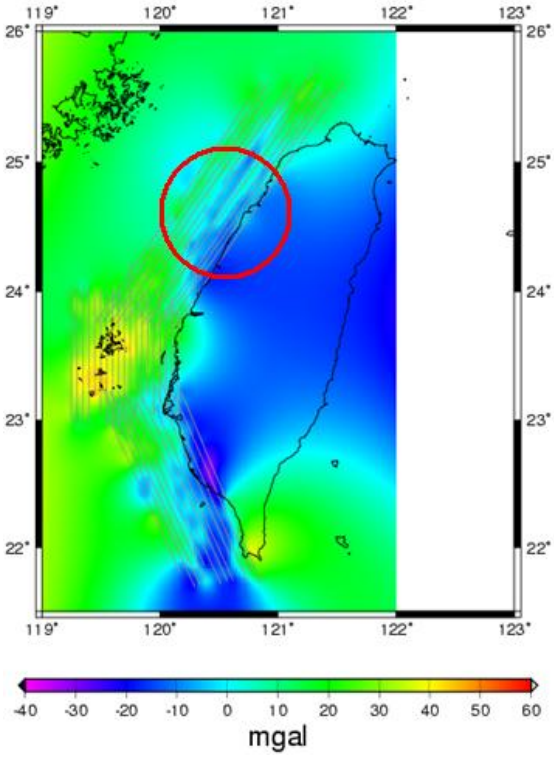
空載重力資料區域	時間	儀器	重力資料數量	濾波單窗半徑	交叉點分析精度 (mGal)	參考文獻	備註
臺灣本島	2004~2005	L＆R S130	1342	150~180 seconds	2.792	空載重力測量工作	內政部，航高:5156公尺
臺灣東部海域	2006~2008	L＆R S130	673	150~180 seconds	2.675	低航高空載重力測量工作	內政部，航高:1620公尺
西部及東沙海域	2008~2009	L＆R S130	575	150~180 seconds	2.573	西部及東沙海域空載重力測量工作	內政部，航高:1620公尺



(a)



(b)



(c)

圖 2-7 平差處理後的空載重力網格

2-4 測高衛星重力資料

為了填補海上及沿岸船載重力資料之不足，本節發展多測高數據反演臺灣附近測高海洋重力異常模型，並比較幾種不同波形重定技術，試圖找出此區域最理想之 retracker 來改善沿岸因波形不佳導致測距精度不良的情形。測高數據分為重複週期與非重複週期數據兩類，重複週期資料包括 Geosat/ERM、ERS–1/35d(1.5-year mean)、ERS–2/35d(2-year mean)和 T/P(5.6-year mean)，並將其週期資料進行平均以減少其噪聲誤差及時變效應，處理細節詳見(Hwang et al., 2006)，而非重複週期資料則為 retracked-Geosat/GM 和 retracked-ERS–1/GM 測高數據。為了決定臺灣附近最理想的波形重定演算法，比較 sub-waveform threshold (Yang et al., 2011)、threshold and beta-5 等波形重定演算法，並採用 Yang et al.(2011)所提出的延軌跡海水面高差異的標準偏差(Standard deviations of differenced SSHs)當作選取指標來評估此研究區最理想的 retracker，以門檻值為 0.2 的 sub-waveform threshold retracker (Yang et al., 2011)為臺灣附近最理想之波形重定演算法。

本案使用 Inverse Vening Meinesz formula (IVM) (Hwang, 1998)搭配去除回復法(remove-compute-restore procedure)來進行 2'×2' 測高海洋重力異常的計算，以 NCTUA 表示(如圖 2-8)。使用的參考重力

場為 EGM08 展開至 2160 階。重力反演的程序是先將 10HZ retraced-Geosat/GM 及 20HZ retraced-ERS-1/GM 之測高觀測數據進行多項式擬合成 2Hz 資料來提高單點精度及計算的效率，取樣的細節可參考 Hwang et al. (2006)，並將所有沿軌跡之海水面高做大地梯度計算，再將其組成南北、東西垂線偏差分量來進行測高海洋重力異常的反演。使用 Hsu (1998)等人所收集的船載重力資料來進行精度評估，結果顯示 NCTUA 的精度與 Sandwell V18.1 (Sandwell and Smith, 2009) 及 DNSC08 (Anderson et al., 2009) 全球重力異常網格精度相當，可以提供大地起伏計算，兩者比較可見表 2-7。

表 2-7 NCTUA 與 Sandwell V18.1 之比較(單位：mgal)

計算模式	最大值	最小值	平均值	標準差
NCTUA	41.75	-33.74	0.99	6.81
Sandwell V18.1	55.76	-33.41	3.63	7.62

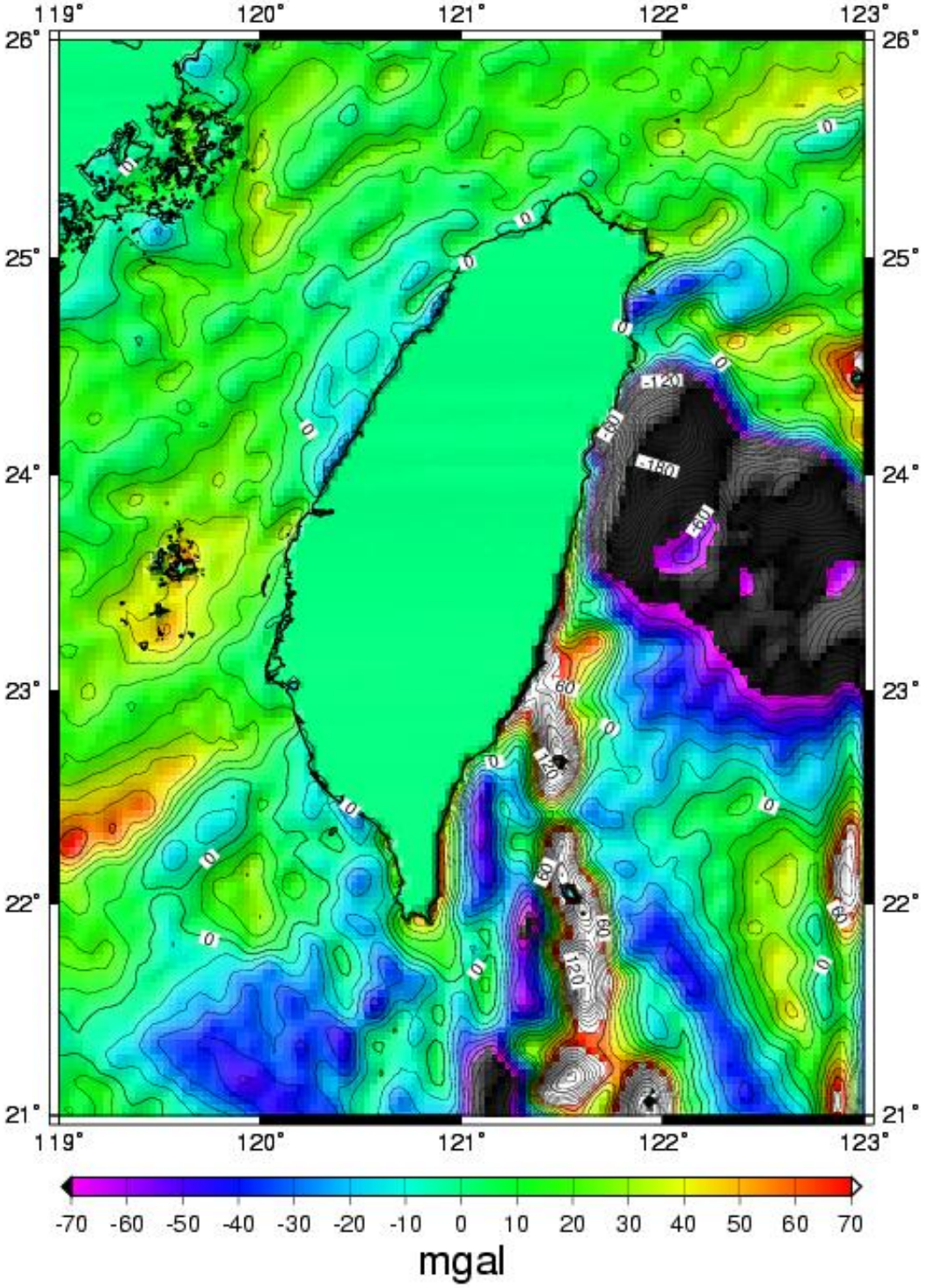


圖 2-8 測高海洋重力異常

第三章 近岸船載重力測量

本章節內容旨在說明近岸船載重力測量作業範圍、外業觀測、陸上基站規劃、船載重力資料及船隻 GPS 動態定位處理方法，並呈現船載重力測量成果及其精度分析。

船載重力的處理流程為處理 GPS 動態資料，求得各時刻的船隻位置，搭配同時刻的重力儀輸出值，可將重力值對應至相應的空間位置。而 GPS 的各項處理，包括取得三維方向的加速度可應用在重力資料的各項改正，例如 *Etövös* 改正或傾斜改正。最後利用主副測線交叉點的差異分析，可評估本組船載資料之精度，再利用一平差模式可吸收其餘包括重力儀零點飄移的誤差，最後可將此組資料加進大地起伏計算，流程如圖 3-1 所示。

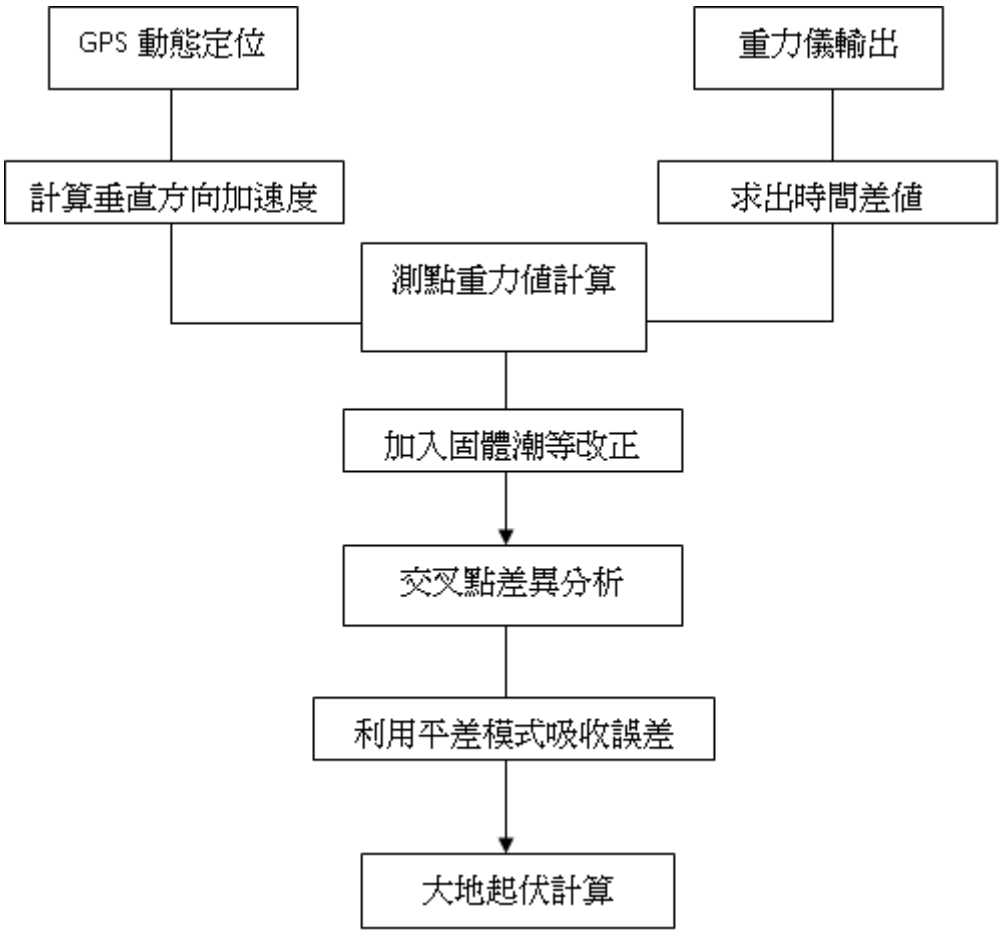


圖 3-1 船載重力處理流程圖

3-1 作業範圍

如下圖 3-2，本案作業範圍原為臺灣西北近岸海域，距岸 12 浬（約 19.6 km）以內所涵蓋之海域（北起富貴角、南迄雲林）。將船速維持在 10 節，以海岸約最低潮位線往外延伸約 1 公里為第 1 條主航線，依此第 1 條主航線再往外延伸間距約 2’（約 3.5km）之主航線，延伸至距約最低潮位線 12 浬（約 19.6 km）左右;副航線應與主航線方向垂直或斜角交叉，間距 15’（約 26km）為原則，各測線延伸至該區範圍外 500 公尺。

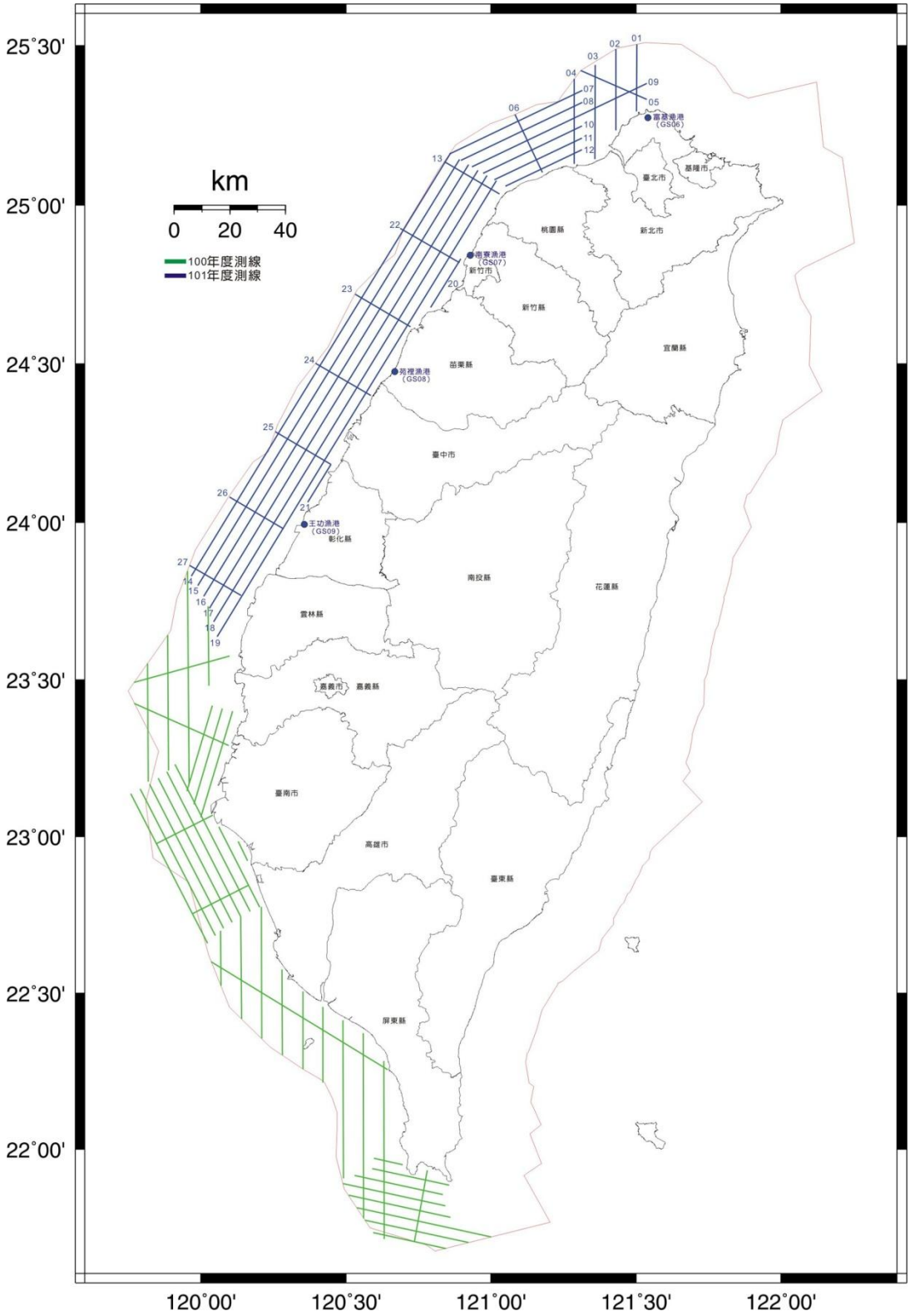


圖 3-2 西北近岸船載施測範圍(藍線)

3-2 外業觀測

1. 前置工作

在考量計畫施測範圍、航線及航期規畫後，針對船隻續航力、連續作業能力、船體穩定度及作業安全等因素，計畫所選用之船隻為 CT2 等級之尖再發號，船隻規格表如表 3-1，船隻外觀如圖 3-3。使用之重力儀與去年度相同，為 ZLS Dynamic Gravimeter；GPS 訊號使用 Trimble5700 接收儀，設定收集 1Hz 資料。並於出航前使用全測儀 Trimble 601M 對各項儀器進行間距與出航前海面高進行測量、記錄。在進行海上觀測作業的同時，也在各岸基控制點(GS06~GS09)進行 GPS 觀測，使用之接收儀同為 Trimble5700，並設定收集 1Hz 資料，以作為船隻 GPS 動態定位之基準站。

2. 實際作業

2012 年 4 月 20 日至新竹重力基準站借用重力儀後，於 2012 年 5 月 14 日將儀器安裝於船隻上，並做初步測試，確定重力儀之控制模組、電源模組、陀螺儀、自動平衡以及儀器本身各項的數據讀取存入都正常之後才決定開始施測。實際船載重力於 2012 年 5 月 14 日開始第 1 次施測起，至 2012 年 5 月 21 日止，共進行了 8 個測量工作天，總時數將近 140 小時。其工作日誌如表 3-2，測線軌跡如圖 3-2(藍線部分)。

表 3-1 船載重力計畫選用船隻—尖再發號

項目	內容
船長(註冊尺度)	10.14 公尺
船寬(註冊尺度)	3.40 公尺
總噸位	15.75 公噸
淨噸位	4.73 公噸
油櫃容量	1600 公升
馬力	279 KW （380 PS）
船殼材質	玻璃纖維強化塑膠

圖 3-3　尖再發號船體外觀

表 3-2 工作日誌表

日期	DOY	航線編號	船載人員	備註
2012/05/14	135	G19-4、G19-3、G19-2、G19-1、G11	廖英哲 任哲宏	G19-4 測線中途閃避防波堤
2012/05/15	136	G11、G6、G4、G3、G5、G1、G2、G9-1、G7	廖英哲 任哲宏	
2012/05/16	137	G7、G8、G9-2、G10、G12、G13、G14-1、G15-1、G16-1、G17-1	廖英哲 任哲宏	G12 測線結束後暫停永安漁港休息
2012/05/17	138	G17-1、G18-、G20、G23、G14-2、G22、G15-2、G16-2、G17-2、G18-2、G18-3	廖英哲 任哲宏	
2012/05/18	139	G18-3、G24、G143、G153、G163、G17-3、G18-4、G17-4、G16-4、G15-4、G14-4、G25、G21	廖英哲 任哲宏	G21 遇淺水區無法施測。測線結束後發現重力儀輸出異常，返回梧棲漁港排除故障
2012/05/19	140	G18-5、G17-5、G16-5、G15-5、G14-5	廖英哲 任哲宏	重力儀故障排除後，於梧棲港出發
2012/05/20	141	G26、G186、G17-6、G16-6、G15-6、G14-6、G27、G19-6	廖英哲 任哲宏	
2012/05/21	142	G19-6、G19-5	廖英哲 任哲宏	返回梧棲港拆卸儀器

3-3 陸上基站規劃

陸上重力基點測定

本年度計畫船隻規劃 4 個港口為母港出發，依地理位置由北至南分別為新北市富基漁港、新竹市南寮漁港、苗栗縣苑裡漁港及彰化縣

王功漁港，於母港將各設置一基準點（GS06~GS09），作為岸基 GPS 主站與重力基準點，並打上控制點鋼標，規格如圖 3-4；除岸基 GPS 主站外，船載重力作業時，將併同國土測繪中心 e- GPS 主站共同作為岸基主站，由北至南共 10 站，分別為 SHMN（石門）、GS10（竹圍國中）、KYIN（觀音）、SHJU（南寮）、HL01（後龍）、TASO（通霄）、TACH（台中港）、VR01（和美）、VR02（二林）及 TASI（台西）。

岸基控制點埋設方式參照三等衛星控制點埋設方式，採鋼標鑽孔式方法埋設，其埋設規格如圖 3-4，裝設完成後則如圖 3-5 所示。

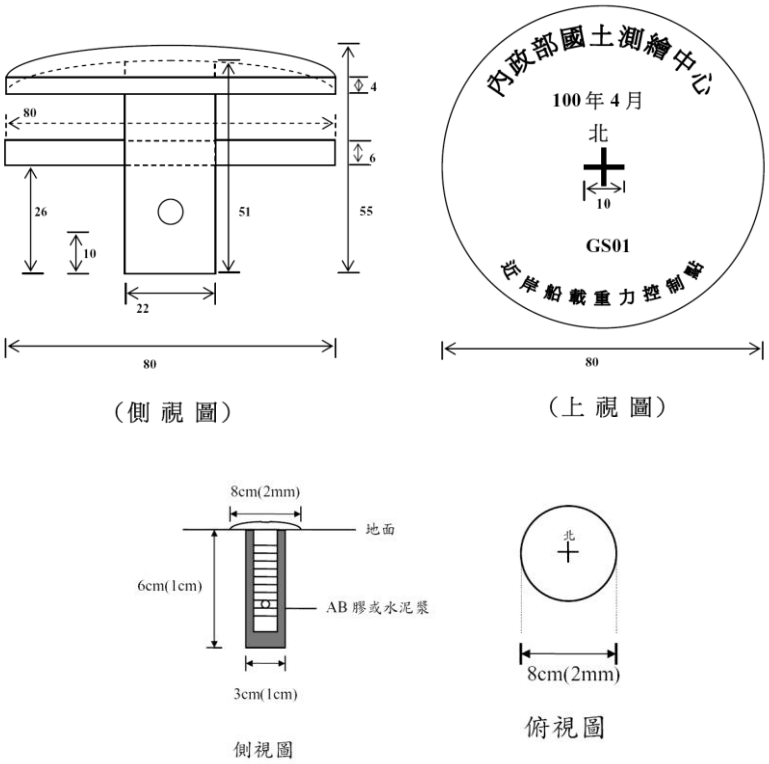


圖 3-4　岸基控制點樁標規格示意圖

圖 3-5　岸基控制點埋設規格示意圖

此外，岸基 GPS 主站將由現有已知重力點以相對重力方式引測重力值，使用 Graviton-EG 相對重力儀施測，預定引測點位分別為 GS06（富基漁港）－2019（老梅國小；一等水準點）、GS07（南寮漁港）－D037（南寮節點；一等水準點）、GS08（苑裡漁港）－1074（苑裡國小；一等水準點）及 GS09（王功漁港）－X111（王功節點；一等水準點）。

（一）使用之相對重力儀

本案使用之相對重力測量儀係利用美國 LaCoste & Romberg Graviton-EG 相對重力儀，為一高精度之精密儀器，其規格如下：

1. 重複性：在完美狀態下： 0.001 mgal；在野外實際量測時：0.003 mgal。
2. 溫度範圍：0°to +45°C （極寒選項下可至-40°C）。
3. 絕對漂移率（每月）：<1.0 mgal。

4. 固體潮改正與氣壓改正：即時修正。

5. 水平方式：自動水平（最高可至 13°傾斜）。

6. 水平感應器：固體陶製品。

7. 電池：野外使用在 25℃ 時超過 8 小時；9 安培小時 AmpHr 膠體電池。

8. 尺寸大小：$21.5\times22\times31cm$ 。

（二）陸上重力測量方法（重力基點化算）

1. 重力測量觀測點位與點位之間應採往、返觀測。

2. 每個點位重力值以每 5 至 10 秒觀測 1 次，連續觀測至少 3 分鐘得 1 筆平均觀測值，以此法觀測得 2 筆平均觀測值。

3. 每筆平均值觀測結束時間與下一筆平均值觀測開始時間至少需間隔 1 分鐘以上。

4. 每測站 2 次重力讀數之最大較差不得大於 0.05mgal。

5. 前後 2 站施測時間間隔以不超過 2 小時為原則。

6. 儀器面板上 RMS Error 值，如其值大於 0.1mgal，應注意環境雜訊（Noise）是否過大導致觀測量差值亦過大。

圖 3-6　岸基控制點重力觀測

3-4 船載 GPS 動態定位處理方法與精度分析

1. 處理方法

船載重力測量本身精度受 GPS 定位精度影響甚大，且若船隻動態定位算得精確，其船載重力值的空間位置亦將精確。本案之船載 GPS 動態定位資料以 TRACK 軟體進行解算，TRACK 為美國麻省理工學院(M.I.T.)發展的 GPS 動態定位計算模組，為架構於 GAMIT 軟體(亦由 M.I.T.所設計)之下的一個演算模組，TRACK 應用卡爾曼濾波(Kalman Filter, KF)進行動態資料解算，KF 主要的原理為結合現在時刻的觀測量以及前一時刻對現在時刻的未知數預測值，以整合推估現在時刻未知數的最佳估計值，並遞迴更新估計值的變方矩陣，直至最終筆觀測資料，其基本方程式詳述如式(3-1)~式(3-5)。

假設目前的計算時刻為 k，根據推估模型，可以經由(k-1)時刻的未知數估計成果預測得到 k 時刻的未知數推估值如(3-1)式：

$$X(k|k-1) = A \cdot X(k-1|k-1) + B \cdot U(k) \tag{3-1}$$

其中，X(k|k-1)即是經由(k-1)時刻的估計結果預測得到的 k 時刻未知數的推估值，X(k-1|k-1)則是(k-1)時刻的未知數最佳估計結果，U(k)為狀態控制矩陣，A、B 分別為對應的係數矩陣。對應於 X(k|k-1)的變方矩陣 P 可以表示如(3-2)式

$$P(k|k-1) = A \cdot P(k-1|k-1)A^T + Q \tag{3-2}$$

其中，P(k|k-1)即是對應於 X(k|k-1)估計結果的變方矩陣，P(k-1|k-1)則為 X(k-1|k-1)的變方矩陣，Q 為狀態控制(或稱預測約制)的變方矩陣，一般稱(3-1)、(3-2)式為 KF 於 k 時刻的預測形式。

接下來，運用 k 時刻的實際量測值，並結合(3-1)、(3-2)式的預測估值，即可以得到 k 時刻的最佳估計量 X(k|k)如(3-3)式：

$$X(k|k) = X(k|k-1) + G(k) \cdot (Z(k) - H \cdot X(k|k-1)) \tag{3-3}$$

其中，Z 為觀測量矩陣，H 為 X(k|k-1)的係數矩陣，G 為 KF 的增益矩陣(Kalman Gain)，其表示式如下：

$$G(k) = \frac{P(k|k-1)H^T}{(H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R)} \tag{3-4}$$

其中，R 為觀測量的變方矩陣。

式(3-3)即為 KF 在 k 時刻的最佳估值，而其對應的變方矩陣 P(k|k)如下：

$$P(k|k) = (I - G(k) \cdot H)P(k|k-1) \tag{3-5}$$

其中 I 為單位矩陣，當進入 k+1 時刻時，P(k|k)即相當於(3-2)式的 P(k-1|k-1)，依序如此遞迴計算至最後一個時刻，並得到最終的點位估算坐標及其對應的變方矩陣，即可獲得對應的精度(即標準差)估值。

本案應用 TRACK 計算模組以相對差分定位方式進行船載 GPS 資料之計算，其動態定位解算的成功率(或稱整數週波未定值 Ambiguity 的求解成功率)與基站的數量以及相對基線的長度有關。基線越長，其受距離長度影響的誤差就越顯著。為有效消除電離層的訊號延遲誤差，本研究以雙頻 L3 觀測量進行相對差分定位。TRACK 亦能分別求解 L1 與 L2 的整數週波未定值，對於超過百公里的相對定位基線，TRACK 另可選擇使用 Melbourne-Wubena wide lane 模組進行 L1-L2 之整數週波未定值求解。本案選擇使用 TRACK 的”relative-rank”演算法，並應用 Chi-squared 統計檢定方式訂定最佳的 L1 及 L2 整數週波未定值之接受門檻，再與次佳解進行比較，藉由統計測試過程決定最終的最佳解。Chi-squared 的統計測試將由以下二種指標決定： (1) LC 線性組合的解；(2) MW-WL average value 寬巷平均值之解。

TRACK 軟體的操作介面為 Linux 系統，其透過 command file 之設定與規劃，包括使用者輸入觀測檔、下載之精密星曆、天線盤型號、

基準站坐標、以及對流層附加參數之選定…等，進行一系列的自動化處理。

TRACK 採用的大氣參數(條件)，乃是採用標準大氣參數，並將其應用於標準氣象改正模式之中，標準大氣參數設定為 溫度 25℃，壓力 1013.25 Mbar, 濕度 50 %。而標準大氣模式未改正完善的部分，將由對流層修正模式之附加參數吸收。

Dodson(1996)研究指出，利用地面氣象資料(如壓力、溫度、濕度…等)代入初始的標準對流層折射誤差修正模式，如 Modified Hopfield、Saastmoinan…等，先進行對流層折射誤差的初步修正，而後選擇適當的歸算函數(Mapping Function)，配合附加適當數量的對流層附加參數(本計畫案每 1 小時附加 1 個)吸收殘留的對流層誤差，這些附加的參數併同待求解的參數(如點位坐標、速度及整週波未定值…等)一起解算，可有效修正對流層折射的誤差量，其在天線盤天頂方向，折射誤差量可從數公尺修正至公分等級，對於提昇 GPS 高程測量的定位精度有顯著效益(Goad and Goodman, 1974)。因此，本計畫使用標準的 Modified Hopfield 改正模式進行對流層折射誤差之修正，在附加修正參數方面，由於靜態資料為位置變化較穩定的資料，所以，採每個測站每 2 小時附加 1 個參數；而在船載 GPS 動態資料部分，相對於岸邊的靜態資料，其位置為動態變化的情況，為更有效提昇並掌握定位

瞬間對流層誤差之修正效益，解算動態資料時，採每 1 小時附加 1 個參數進行解算。Modified Hopfield 改正模式如下：

$$\Delta\vartheta = N_i^{Trop} \cdot \sum_{k=1}^{9}\left(\frac{\alpha_{k,i}}{k}\cdot r_i^k\right)\cdot 10^{-6} \quad , \quad i = 0 \sim 1 \tag{3-6}$$

其中，$\Delta\vartheta$ 為對流層誤差修正量，N_i^{Trop} 、$\alpha_{k,i}$ 、r_i^k 分別為 Modified Hopfield Model 之使用參數。

因此，對觀測站 k 與衛星 i 而言，對流層折射延遲效應之修正量 $\Delta\vartheta_k^i$ 可表示成如下形式：

$$\Delta\vartheta_{k,z=z_k^i}^i = f_{apr}(z_k^i)\cdot\Delta\vartheta_{apr,k,z=0} + f(z_k^i)\cdot\Delta\vartheta_{k,z=0}(t) \tag{3-7}$$

$\Delta\vartheta_{apr,k,z=0}$：為初始模式於測站 k 天頂方向之修正量，如果使用標準的大氣資料(如標準氣壓、平均溫度、濕度等)而未有實際之氣象資料，則此修正量與時間無關，僅與測站的高程有關。

z_k^i：為衛星 i 於測站 k 之天頂距。

f_{apr}：為初始模式的數學模式(Saastamoinen Model 或 Modified Hopfield Model)。

$\Delta\vartheta_{k,z=0}(t)$：為測站 k 在天頂方向 Mapping Function 的附加參數，其與時間有關。

$f(z_k^i)$：為 Mapping Function 的數學函數式(例如：$\frac{1}{\cos(z)}$)。

2. 精度分析

本案計算所有船行航次的 GPS 動態資料，每個時刻均以 4 支 GPS 天線同步搜集資料，裝設情形如圖 3-7 所示，取樣頻率 1Hz。解算時以連續航線為計算單位，可獲得每連續航線的 GPS 動態橢球高及其精度，並輸出估計天頂方向的對流層附加參數值與訊號延遲誤差量，藉此延遲誤差判斷 TRACK 動態解算成果之合理性。

圖 3-7 4 支 GPS 天線裝設情形

對流層延遲誤差由空氣中的乾延遲量與溼延遲量共同組成，乾延遲量由乾燥的氣體所引起，其在天頂方向造成的延遲量約為 2.3 m，約占對流層總延遲量的 90%，乾空氣之密度會隨其表面壓力的改變而變化，由於其變化較為平緩穩定，故可藉由量測大氣的溫度、溼度、壓力將此乾延遲量予以模式化並求解；而溼延遲量則與大氣的水氣分壓有關，由於水氣會隨著時間與空間高度之改變而變化，因此不易利用數學模式予以準確估計，在溼度較高的地區，溼延遲量可高達 35 cm，

故若求解得的對流層總延遲量介於 2~3 m 之間、平面定位精度介於 2~4 cm、高程定位精度介於 5~10 cm 之間，即可視該計算成果為合理的結果。

本案利用 TRACK 軟體進行船載 GPS 動態資料之計算，並以(3-5)式計算估計成果的變方值，得到精度的平均值在南北(N)、東西(E)以及橢球高(h)方向的精度分別介於 ± 1.3~3.2 cm、± 1.2~2.1 cm 以及 ± 2.9~7.1 cm之間，平均精度則分別為± 1.6 cm、± 1.4 cm以及 ± 3.9 cm，皆達到 cm 等級之精度。且因船行軌跡之不可重現性，其評估依據只能藉由軟體內部輸出的精度指標，而上述精度滿足本研究的定位精度需求，可有效提供後續近岸大地起伏模式計算的依據。

3-5 船載重力資料處理方法

1. 時間差值

重力資料與 GPS 資料時間會有不同步的問題，利用一簡單的 correlation 數學式就可以求出兩項資料的時間的差值(Olesen, 2003)，參見 3-8 式，式中 s_1 s_2 為兩不同來源的訊號，皆為時間函數，通過摺積運算後，使 $z(\tau)$ 值最大的 τ 即為我們欲求的時間差，見圖 3-8，其中上圖曲線最頂點處即為最大值。

$$z(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} s_1(t)\cdot s_2(t+\tau)dt,\quad \tau=0,1,2,.....,(n-1)\cdot\Delta T \tag{3-8}$$

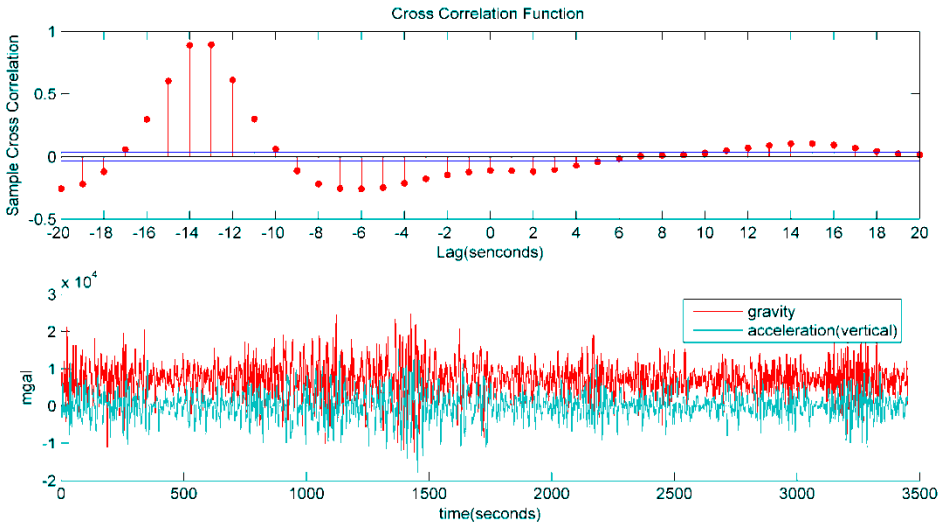


圖 3-8 重力資料與 GPS 資料時間差

2. 測點重力值計算

(a) *Etövös* 改正

過去利用空載重力約化的方法約化船載重力，已可達約 2mgal 之精度，再利用一個良好的潮位模型可將觀測量約化至平均海水面上，可有效提供後續大地起伏之計算。相應之計算公式如下：

$$g_u = g_0 + f_u - f_0 - \dot{v}_u + \left[2w\cos\phi + \frac{v_e}{R_N}\right]v_e + \frac{v_n^2}{R_M} \tag{3-9}$$

其中，

g_0：由岸邊重力基點推得之絕對重力值

g_u：欲得之重力值

f_u：重力儀觀測值

f_0：重力儀之靜態觀測值

$\dot{v}_u$：船隻的鉛垂方向加速度

v_e, v_n：船之東西、南北速度分量

R_N, R_M：卯酉、子午圈曲率半徑

w：地球自轉角速度

ϕ：船隻所在緯度

式(3-9)中的$\left[2w\cos\phi+\frac{v_e}{R_N}\right]v_e+\frac{v_n^2}{R_M}$便為 *Etövös* 改正。

(b)傾斜改正

然而因為船隻航行時的不穩定，重力儀無法始終保持在水平位置，所以應將重力儀量得之值加上一傾斜改正量(off-level correction or tilt correction)，運動姿態感應資料可用於傾斜改正，如下式(Olesen, 2003)：

$$\delta g_{tilt}=(1-\cos\phi_x\cos\phi_y)f_z+\sin\phi_x f_x+\sin\phi_y\cos\phi_x f_y \qquad (3\text{-}10)$$

$$\phi_x=\frac{f_x-q_x}{g};\phi_x=\frac{f_y-q_y}{g} \qquad (3\text{-}11)$$

式中 f 項為重力儀內建之加速度儀所量得之加速度（為運動姿態感應資料），q 項為 GPS 觀測量推求之各方向加速度。

(c) 海潮改正及固體潮改正

由於船載重力是在海上施測，海面上除了因為風浪而產生瞬間海水位之外，還會受到日月的引力而產生長週期的影響。日月潮位引力為海潮之驅動力，除引起海水起伏外，對地表一點產生兩種重力變化，皆須在船載重力計算時加以考慮:（1）由引力產生之重力變化（2）

由地球變形而產生之重力變化，首先，任一點所受地球表面上月球潮位（tidal potential）為（只考慮球諧 2，3 階）：

$$W_m = \frac{1}{2}\frac{GM_m r^2}{R_m^3}\left(3\cos^2\psi_m - 1\right) + \frac{1}{2}\frac{GM_m\, r^3}{R_m^4}\left(5\cos^2\psi_m - 3\cos\psi_m\right) \tag{3-12}$$

所受太陽之潮位為（因較遠，只考慮 2 階）

$$W_s = \frac{1}{2}\frac{GM_s r^2}{R_s^3}\left(3\cos^2\psi_s - 1\right) \tag{3-13}$$

其中：

GM_m：牛頓萬有引力常數乘月球質量（4902.778 km^3/s^2）

GM_s：牛頓萬有引力常數乘太陽質量（1.327124399×10^{11} km^3/s^2）

r：該點與地心之距

R_m：地心與月球中心之距

R_s：地心與太陽中心之距

ψ_m：該點與月球在地心之夾角

ψ_s：該點與太陽在地心之夾角

因直接引力造成之重力變化為：

$$g_t^1 = -\frac{\partial\left(W_m + W_s\right)}{\partial r} = -\frac{GM_m r}{R_m^3}\left(3\cos^2\psi_m - 1\right) - \frac{3}{2}\frac{GM_m r^2}{R_m^4}\left(5\cos^2\psi_m - 3\cos\psi_m\right)$$
$$-\frac{GM_s r}{R_s^3}\left(3\cos^2\psi_s - 1\right) \tag{3-14}$$

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

$$g_t^2 = \left(h - \frac{3}{2}k\right) g_t^1 \tag{3-15}$$

其中 h，k 為 Love number。因 h=0.6，k=0.3，故總重力變化為：

$$g_t = g_t^1 + g_t^2 = \left(1 + h - \frac{3}{2}k\right) g_t^1 = 1.15 g_t^1 \tag{3-16}$$

本案自行設計另一套程式計算（3-16）式之 g_t 值。所需之日、月坐標及 ψ_m, ψ_s 均由 JPL 之 DE200 星曆嚴密計算而得，較之一般之簡易公式，如 Dehlinger，較為準確，該程式適用時間為 1990-2020 年。g_t 之最大值約為 0.3 mgal。

(d) 加入各項改正後所得之重力異常(Δg_F)

加上海潮改正及固體潮改正之後，所得之重力異常如下，公式中潮高需代入一潮位模型，考慮臺灣的地理位置，NAO.99jb model 為最適：

$$\Delta g_F = g - g_t + 0.2566h - \gamma_0 \tag{3-17}$$

式中，g 爲測點的重力值；

g_t 為固體潮改正；

h 為潮高(代入 NAO.99jb 模式所得)，即海潮改正；

γ_0 爲重力測點位置所對應之正常重力值。

3-6 船載重力測量成果及精度分析

評估船載、空載重力精度常用的方法之一為交叉點分析。其原理為，當船行駛過同一地點，所測得之兩重力值應相同。反之，其差異

大小則反應誤差之大小。船載重力與空載、衛星重力測量一般，按某一設計之航線觀測，兩航線（幾近直線）可形成一交叉點。

假設在第 q 條航線上，第 r 點的觀測量為 $g_r^{q'}$，由於測量儀器本身的系統誤差、觀測時的天候、環境等因素，故觀測量在每條航線上存在著此誤差量，包括偏差值(bias)與漂移值(drift)，偏差值可來自每天的作業記錄的人為誤差或是儀器本身尚未穩定就開始觀測，而飄移值則是來自重力儀本身的零點飄移。則觀測量 $g_r^{q'}$ 可如下表示

$$g_r^{q'} = g_r^q + \delta g_r^q \tag{3-18}$$

其中 δg_r^q 為因 bias 和 drift 所引起的誤差，我們可將 δg_r^q 表示為

$$\delta g_r^q = a^q + b^q t_r^q \tag{3-19}$$

其中 a^q, b^q 分別為第 q 條航線上的 bias 和 drift，t_r^q 為第 r 點上的觀測時間減去航線起點起算之時間。利用此數學模式，則我們可決定兩航線 k, l 的交叉點的交叉點 p 差值為

$$\begin{aligned} x_p^{kl} &= \delta g_p^k - \delta g_p^l \\ &= a^k - a^l + b^k t_p^k - b^l t_p^l \end{aligned} \tag{3-20}$$

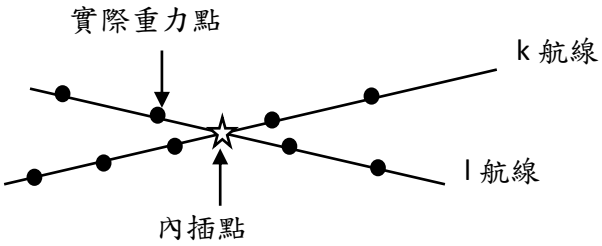


圖 3-9 船載重力實測點與內插點示意圖

由於兩航線的交叉點往往不會就是實際重力點，故比較時應先將重力值內插至兩航線的內插點上，如圖 3-9 所示。根據(3-20)式可組成觀測方程式，對單一觀測量，吾人得

$$v_p^{kl} + x_p^{kl} = a^k + b^k t_p^k - a^l - b^l t_p^l \tag{3-21}$$

k = 1,2……i ; l = 1,2……m;p=1,2.....n

其中 i+m, n 分別為航線數及交叉點數。(3-21)可寫為矩陣形式

$$V + L = AX \tag{3-22}$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} a^1 \\ b^1 \\ a^2 \\ b^2 \\ \vdots \\ a^i \\ b^i \\ a^j \\ b^j \\ \vdots \\ a^m \\ b^m \end{bmatrix}$$

第 k 與 l 條航線在設計矩陣中的列向量為

$$A_p^{ij} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.....0 & 1 & t^i.....0..... & .....0.....-1 & -t^j & 0.....0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

解得 X 矩陣後，將誤差扣除而得改正後重力 g_r^q，利用此模式可吸收包括包括偏差值(bias)與漂移值(drift)的誤差量。

本案的船載重力精度可利用主副測線交叉點差異分析，共有 34 個主副測線交叉點可供精度評估，平差前後成果如下表 3-3，表中顯示本案船載重力測量精度可達 2.359 mgal，如第二章所述及國際上相關資料來看，同樣是利用移動型載具進行的重力測量，船載重力的精度在 3mgal 以內，可見本案的 2.359mgal 的交叉點差異的 RMS 值已到一定水平，相較於過往的資料表現較優(Hsu et al., 1998)，可建立高精度臺灣重力網。

所得重力異常成果如圖 3-10，對照 5-1 節中自由空間重力異常網格可發現兩者變化趨勢相互吻合，表示此次船載重力測量所得之重力異常成果合理。平差前後交叉點重力異常差異值分布如圖 3-11 及 3-12。各交叉點的相關資料列於附錄 1。

表 3-3 船載重力測量交叉點差異分析成果（單位：mgal）

	最大值	最小值	平均值	均方根誤差	標準差
平差前	12.390	-15.560	-0.240	5.984	6.053
平差後	5.420	-6.830	0.001	2.359	2.330

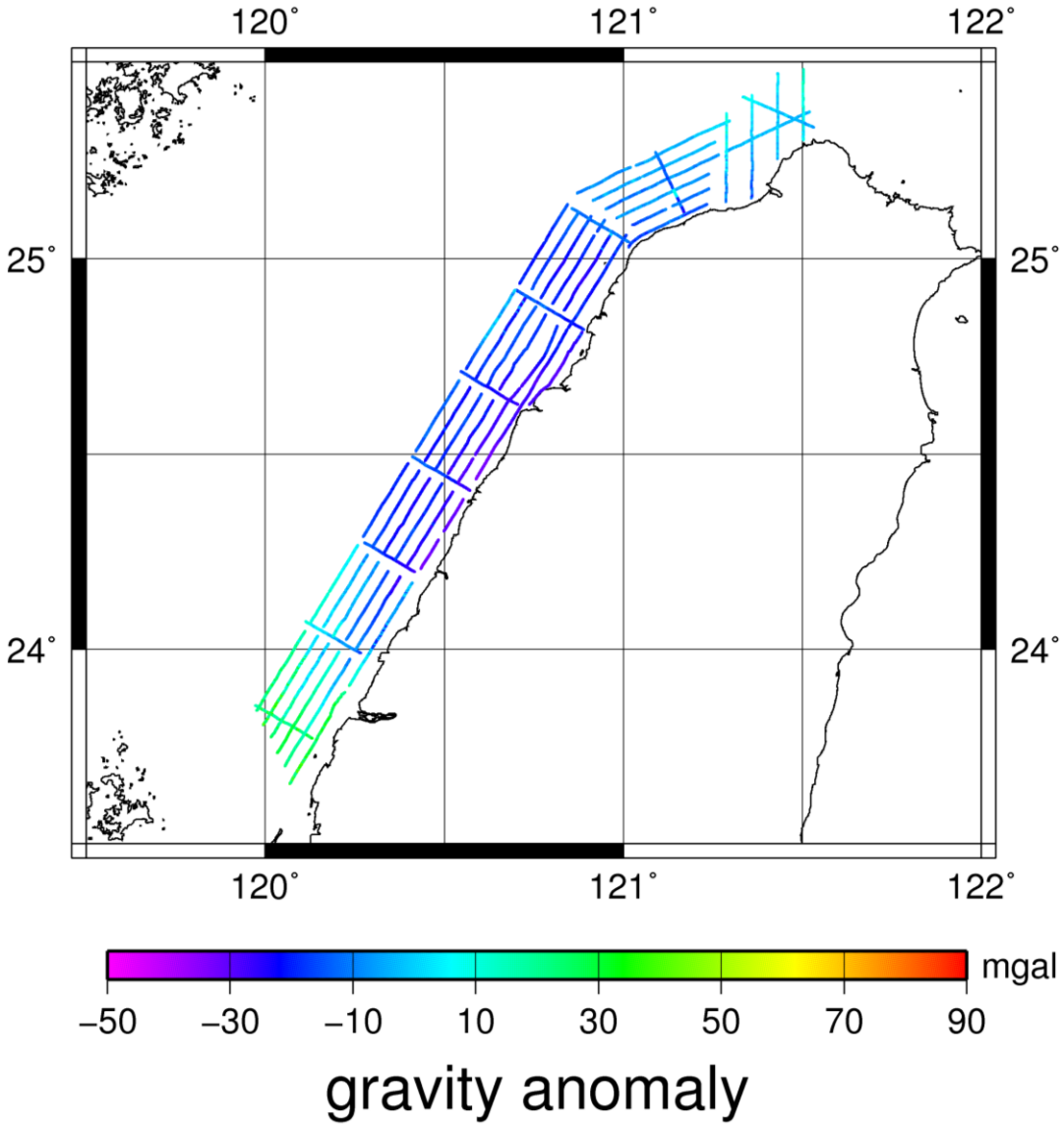


圖 3-10 近岸船載測量重力異常

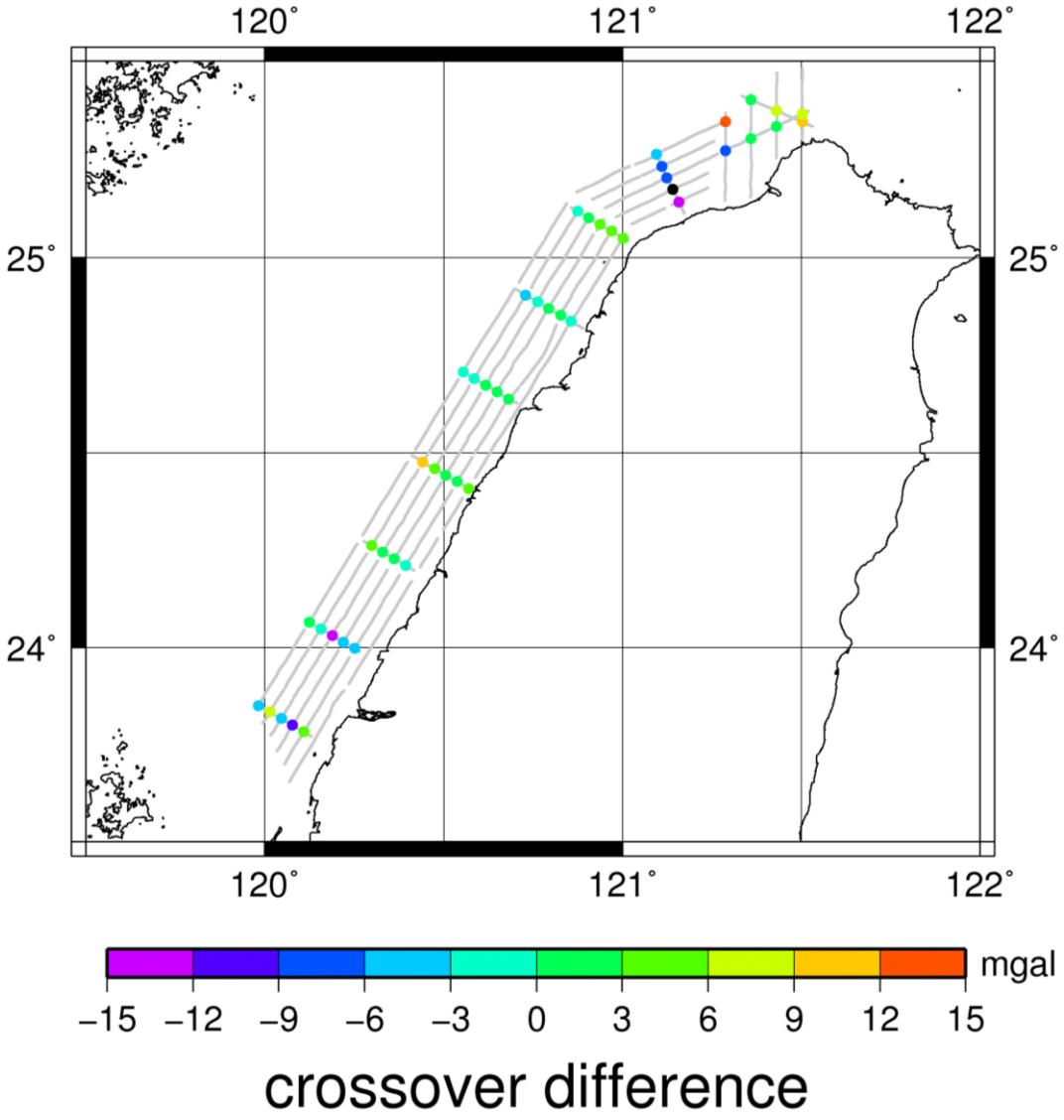


圖 3-11 交叉點重力異常差值（平差前）

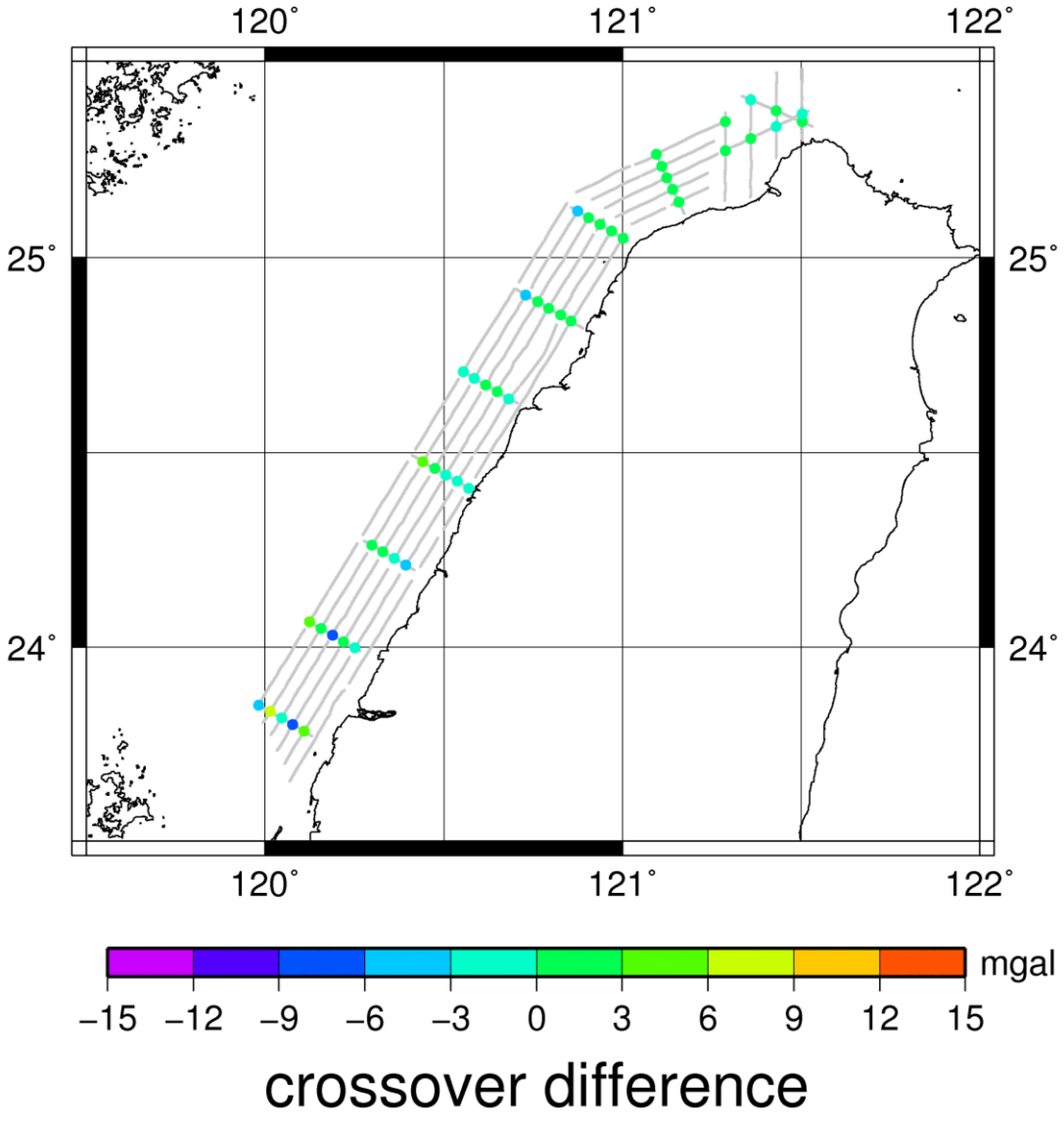


圖 3-12 交叉點重力異常差值（平差後）

第四章 陸上 24 小時 GPS 測量

4-1 點位規劃

本案項目亦包括陸上 24 小時 GPS 測量，目地為檢核大地起伏精度，其分布位置恰適合評估本案船載重力之貢獻。由於 GPS 靜態觀測的持續時間越長，精度表現也會隨之越好，而考量預算後，設定進行 24 小時之連續觀測，此定位精度已可達約 1 公分。24 小時 GPS 測量以本年度範圍中省道臺 17 線、臺 61、臺 15 及臺 2 線上一等水準點 30 點，及山區宜蘭節點（X021）沿臺 7 線、臺 7 甲線及臺 8 線（經梨山）至大禹嶺之一等水準點 10 點，合計共 40 點；施測時若該點有遮蔽，可改選擇該水準點前後點號之水準點進行觀測，若皆不適合的話，則於該點位附近 50 公尺內選擇一空曠地設立臨時點，辦理 GPS 觀測，同時做大地起伏差異量的估計，並作水準測量，將水準高差視為橢球高差，加以修正。

規劃選擇之點位測區範圍 30 點（如表 4-1），北起新北市石門區，南至嘉義縣東石鄉（銜接 100 年度測區），山區範圍 10 點（如表 4-2），北起宜蘭縣宜蘭市，南至花蓮縣秀林鄉；前述點位間相對距離約 10 公里左右，如圖 4-1。

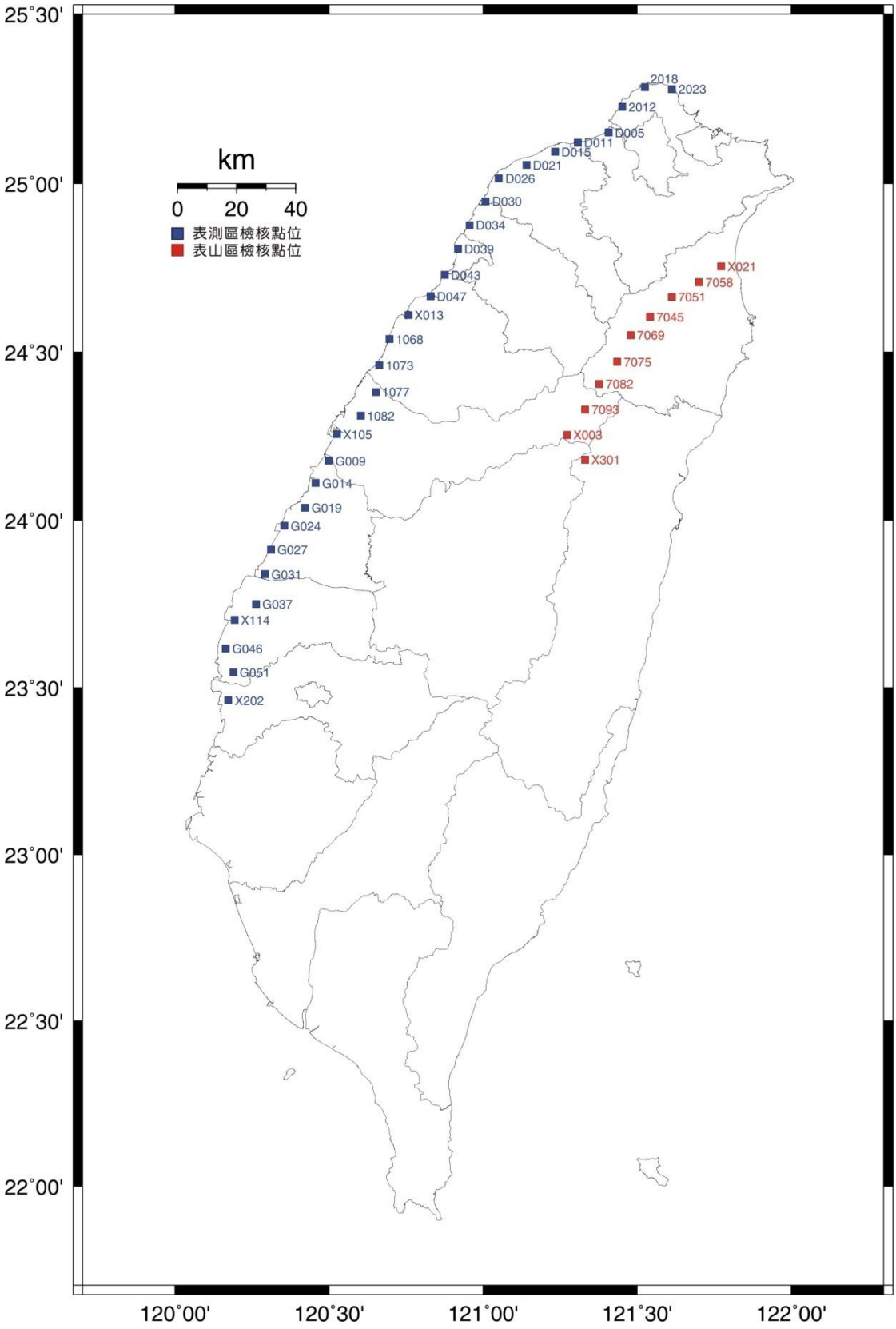


圖 4-1 24 小時 GPS 規劃點位

表 4-1 測區 24 小時 GPS 規劃點位一覽表

序號	點名	點號	序號	點名	點號
1	水流宮	2023	**16**	五南社區	1073
2	白沙灣	2018	**17**	通天路	1077
3	新埔技術學院	2012	**18**	大甲溪橋	1082
4	真慶宮	D005	**19**	台中港節點	X105
5	北頂寮	D011	**20**	全興工業區	G009
6	瓦窯	D015	**21**	山崙社區	G014
7	內湖	D021	**22**	福南村	G019
8	過溪橋	D026	**23**	新寶	G024
9	蚵間國小	D030	**24**	新街橋	G027
10	尚義衛生室	D034	**25**	台西社區	G031
11	浸水橋	D039	**26**	麥寮工作站	G037
12	崎頂	D043	**27**	台西節點	X114
13	渡船頭	D047	**28**	下崙派出所	G046
14	龍港節點	X013	**29**	楂梧派出所	G051
15	友愛靈園	1068	**30**	東石節點	X202

表 4-2 山區 24 小時 GPS 規劃點位一覽表

序號	點名	點號	序號	點名	點號
1	宜蘭節點	X021	**6**	四季道班房	7075
2	上深溝	7058	**7**	星文橋	7082
3	松羅村	7051	**8**	苗圃	7093
4	土場	7045	**9**	梨山節點	X003
5	德荃橋北	7069	**10**	大禹嶺節點	X301

4-2 GPS 測量外業流程

GPS 測量外業作業流程如下：

1. 於測站架設天線，並確實定心、定平。
2. 依指北針調整天線方位，使天線特定標誌指向北方。並量測

天線高度且記錄之。

3. 確實接妥天線與接收儀之電纜及電源電纜。電池正、負極應注意正確接法，以免短路，損及電池或接收儀。

4. 打開接收儀電源，按儀器正常操作程序開機，檢查接收功能及記憶體空間是否足夠。

5. 按計畫觀測時段表內規劃之時段，輸入點號、天線高、時段代號、資料記錄速率，最少接收衛星個數等參數，開始觀測並填寫觀測紀錄表。

6. 以數位相機拍攝 3 張觀測作業情形相片，其中一張拍攝天線高量測情況，應可辨識讀數，一張須可見標石號碼，另一張應儘可能同時可見接收儀、點位標石及週遭環境。

7. 觀測時段結束後關機，並重新量測天線高度，前後兩次天線高之差不應大於 3mm，取平均值做為最後天線高。若前後差值超過 3mm，應查明原因，提出處理意見填寫於觀測紀錄表備註欄。注意光學基座對心是否偏移，若有則估計其偏移量及方向，記載於觀測紀錄表備註欄。

本案之 GPS 外業測量日期為 2012 年 4 月 23 日、4 月 25 日、4 月 30 日、5 月 2 日，計 4 天，採用 10 部 Trimble 5700 接收儀（搭配 Zephyr Geodetic 天線盤）觀測（圖 4-2），實際觀測時段表列於附錄 2。

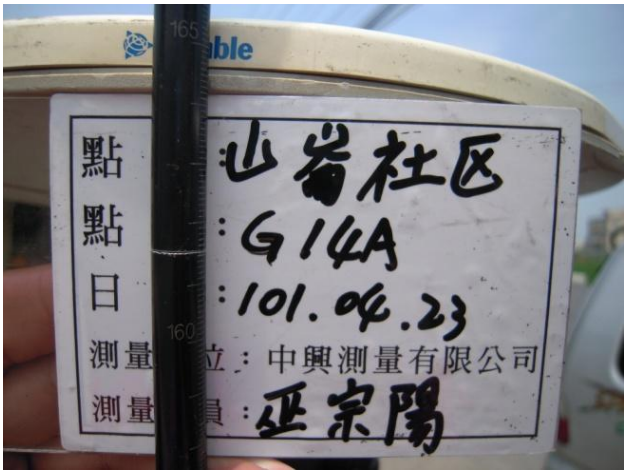


圖 4-2　GPS 外業測量

4-3 陸上 GPS 外業觀測資料處理流程

GPS 測量成果的品質，取決於資料處理過程是否完善，故野外觀測蒐集的資料，應先逐日逐時段處理，求解各基線分量後，再結合全部觀測基線的資料，進行整體網形平差成果分析。本計畫採用 Bernese5.0 軟體，資料處理流程如圖 4-3 所示，並說明分述如後：

1. 對照計畫觀測時段表及觀測紀錄表，確保觀測點位正確，並檢核觀測相片是否相符。

2. 核對下載檔名與儀器儲存檔名是否相同，若否則研判是否儲存錯誤或是下載錯誤。
3. 檢核點號、天線高、觀測時間是否正確，若否則加以註記並於後續進行修正。
4. 確定觀測資料量是否足夠，單點定位是否成功，否則須修正後續觀測計畫進行重測。
5. 第一階段先採用商用軟體 GPSurvey 進行基線試算，確保整個外業觀測成功，若判定觀測失敗，則將觀測失敗的點位配合修正後續觀測計畫進行重測。
6. 資料於各階段均進行備份，並確認觀測無誤後製作實際觀測時段表。接著化算天線高 Rinex（接收儀標準交換格式，Receiver Independent Exchange format）所定義的天線參考點（Antenna Reference Point, ARP）位置。
7. 為配合 Bernese 軟體計算使用，將原始的觀測資料轉換為 Rinex 檔，並檢核檔頭是否有誤，若有錯誤則加以進行修正。
8. 修正 ARP 高度於 Rinex 觀測資料檔檔頭，以使 Rinex 格式檔能為 Bernese 軟體應用計算。
9. 檢核無誤的資料進行同步觀測時間的檢查，避免單站資料雖具有 24 小時觀測量，但同步觀測時間卻不足的問題產生。

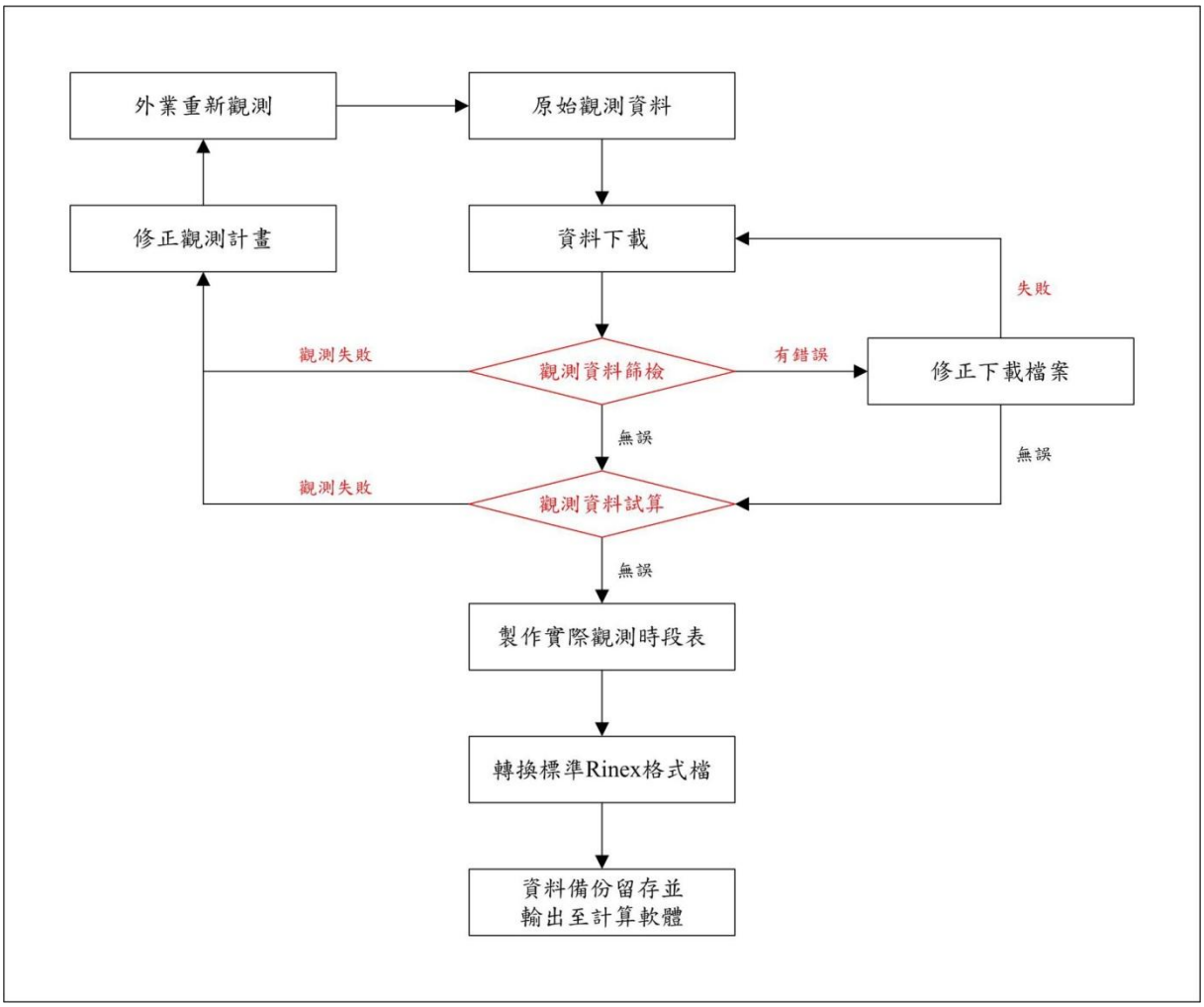


圖 4-3　GPS 資料處理流程圖

4-4 陸上 GPS 觀測資料計算方法

GPS 資料經由初步篩檢後，隨即讀入 Bernese 軟體進行計算，其解算流程如圖 4-4，處理過程分述如後。

1. 相關資料蒐集階段：

衛星的軌道誤差雖可經由相位觀測量二次差降低其影響，但仍可能有殘餘誤差的存在，故本計畫使用精密軌道（星曆）資料以降低軌道誤差的影響，所採用的星曆為 IGS（International GPS Service）提供之

精密星曆(SP3 格式)，以取代接收儀接收的廣播星曆。

應用 Bernese 軟體計算時，須至瑞士伯恩大學天文研究所的伺服器下載最新的參數資訊，共計四個參數檔案：

(1) 地球每天的自轉參數檔案（C04_****.erp；****表西元年）。

(2) 各種不同 GPS 天線盤的相位中心偏移量以及相位中心變化量檔案（Phas_igs.01）。

(3) 標示每一顆衛星的健康狀態檔案(Sat_****.crx;****表西元年)。

(4) 標示著每一顆衛星的重量、天線盤傾角等相關資訊檔案（Satellit.ttt）。

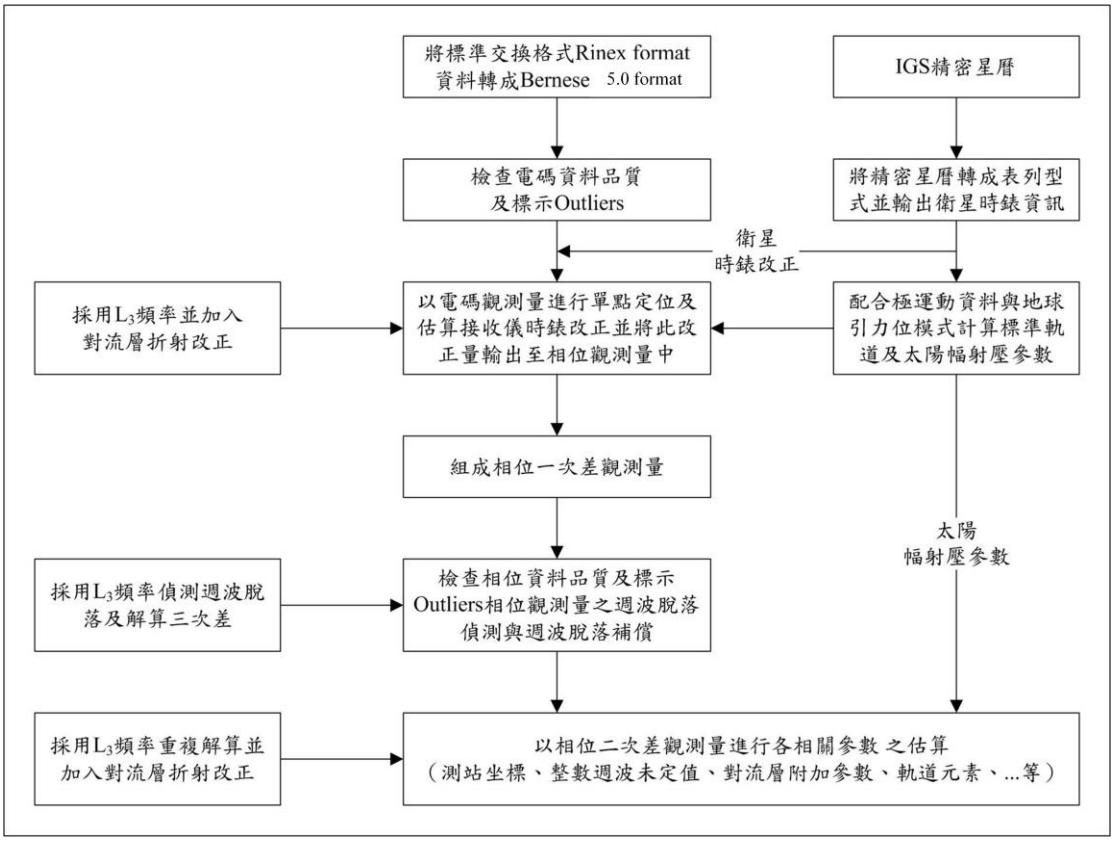


圖 4-4　Bernese 軟體計算流程圖

2. 資料前處理階段（Yang et al., 2001）：

（1） 將標準轉換格式（Rinex）之觀測資料轉成 Bernese 格式。自精密星曆中萃取出各衛星之時錶修正量，以供後續處理之用。

（2） 將精密星曆轉成表列型式，再組成 Bernese 格式之軌道。其中組軌道之原則：利用每天之精密星曆，組成 24 小時之軌道，包括 6 個克卜勒軌道元素和 2 個 ROCK4/42 模式之太陽輻射參數，作為資料修編與後處理之用。

（3） 進行電碼資料之檢查，剔除錯誤觀測量。

（4） 利用電碼資料進行單點定位，計算測站導航坐標及接收儀時間誤差量，並將時間修正於載波相位資料中，使接收儀之時間能準確至 10^{-6}-10^{-7} 秒。

（5） 組成獨立的基線網一次差觀測量，即將所有測站依最短距離（shortest）之原則，組成線性獨立的一次差觀測量。

（6） 利用精密星曆與衛星時錶資料進行資料之修編、週波脫落之補正（cycle slip editing）、時錶差修正、標示錯誤的觀測量或不能使用之觀測量。對於週波脫落之處理，採自動偵測與補償方式。

3. 資料後處理階段：

（1） 軌道部分：採用 IGS 精密星曆，所有軌道參數視為已知，固定之而不加以求解。

（2） 極運動改正：採用 IERS（International Earth Rotation Service）公布值（C04_****.erp；****表西元年），將 UTC 與 UT1 之差值加以修正之，並將坐標值由瞬間之極坐標系修正至 J2000 平均極（CIO）坐標系上。

（3） 引力位模式：採用 GEM-T3（8×8），其中；$C_{21} = -0.17 \times 10^{-9}$，$S_{21} = 1.19 \times 10^{-9}$，$GM = 398600.4415 km^3/s^2$，日、月引力及地球固體潮（solid earth tide）也加以考慮。

（4） 對流層折射改正：採用 Hopfield 模式（Hopfield, 1971），以海平面標準氣象資料，溫度$18°C$，相對溼度 50%，大氣壓力 1013.25mbar，推求各測站的對流層改正起始值，並引用大氣資料進行對流層折射影響量的改正參數。以各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式，加以吸收殘留的對流層折射誤差。

計算時採用仰角 10 度以上的觀測資料，此乃為避免在低仰角觀測時伴隨的較大雜訊（noise and multipath）所造成之影響。

整數週波未定值求解過程，乃先利用實數解求得一精確之坐標（或利用以前計算過之坐標值），然後採用 QIF（Quasi Ionosphere-Free）方法，求得L_1和L_2的整數週波未定值，再組成無電離層（ionosphere free）效應觀測量L_3，並將解得L_1和L_2的整數週波未定值代入無電離層效應之觀測方程式中，開始求解其餘各未知參數。最後，獲得此 40 點之

解算成果列於附錄 3。

4-5 閉合差分析

接著將最小約制平差成果進行閉合差分析，進行此項分析的目的為確保所計算的基線品質。理論上；環線內各坐標分量的三維閉合差應等於零，如不等於零，則純為資料處理所致。因此；環狀閉合差的大小可作為基線處理精度檢查的標準。

而本次計畫閉合差分析的標準，若參照合約規範及衛星控制點的閉合差要求，則其規定如下，閉合差分析成果列於附錄 4，皆滿足下列要求：

1. 閉合圈中之基線源自不同觀測時段數：不得小於 3。
2. 閉合圈中獨立觀測之基線數：不得小於 2。
3. 閉合圈總邊長：不得大於 500 km。
4. X、Y、Z 各坐標分量之閉合差不得大於 2cm。

第五章 大地起伏計算

5-1 重力資料整合

傳統最小二乘配置法假設各種資料之間不存在解析度的差異而且都是 full-band，然而除了陸測重力資料外，其餘都是 band-limited 的重力資料，例如空載重力測量受到氣流的影響導致載具的劇烈震動，因而影響 GPS 定位及重力資料的精度，一般的處理策略是採用低通濾波將高頻的雜訊去除，因而降低空載重力資料的解析度。因此本研究實際考慮空載重力資料的空間解析度並採用有限頻段的最小二乘配置法(Band-limited LSC)搭配去除回復法來整合所有重力資料，除了依照不同空間解析度的重力資料給予不同階數的協方差函數(covariance function)，不同航高的空載重力資料向下延續至海水面也一併由有限頻段的最小二乘配置法來處理。有限頻段的最小二乘配置法公式如下：

$$\Delta\hat{g}_{res}^{MSL} = \begin{pmatrix} C_{\Delta\hat{g}\Delta g^{surface}} & C_{\Delta\hat{g}\Delta g^{1500}} & C_{\Delta\hat{g}\Delta g^{5000}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\Delta g^{surface}} + D_{\Delta g^{surface}} & C_{\Delta g^{surface}\Delta g^{1500}} & C_{\Delta g^{surface}\Delta g^{5000}} \\ & C_{\Delta g^{1500}} + D_{\Delta g^{1500}} & C_{\Delta g^{1500}\Delta g^{5000}} \\ symmetry & & C_{\Delta g^{5000}} + D_{\Delta g^{5000}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta g_{res}^{surface} \\ \Delta g_{res}^{1500} \\ \Delta g_{res}^{5000} \end{pmatrix} \quad (5\text{-}1)$$

其中

$\Delta g_{res}^{surface}$ 是地面重力的殘餘重力異常，

Δg_{res}^{1500} 是 1500 公尺航高空載重力的殘餘重力異常，

Δg_{res}^{5000} 是 5000 公尺航高空載重力的殘餘重力異常，

$C_{\Delta g^{surface}}$ 、$C_{\Delta g^{1500}}$ 及 $C_{\Delta g^{5000}}$ 分別為 地面重力、1500 公尺航高的空載重力與 5000 公尺航高的空載重力各自本身的自動協變方矩陣。

$C_{\Delta\hat{g}\Delta g^{surface}}$ 、$C_{\Delta\hat{g}\Delta g^{1500}}$ 及 $C_{\Delta\hat{g}\Delta g^{5000}}$ 分別為地面重力、1500 公尺航高的空載重力與 5000 公尺航高的空載重力對預估重力值的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^{surface}\Delta g^{1500}}$ 、$C_{\Delta g^{surface}\Delta g^{5000}}$ 及 $C_{\Delta g^{1500}\Delta g^{5000}}$ 分別為地面重力對 1500 公尺航高的空載重力、地面重力對 5000 公尺航高的空載重力以及 1500 公尺航高對 5000 公尺航高的空載重力協變方矩陣。

$D_{\Delta g^{surface}}$ 、$D_{\Delta g^{1500}}$ and $D_{\Delta g^{5000}}$ 分別為地面重力、1500 公尺航高的空載重力以及 5000 公尺航高的空載重力本身的誤差矩陣。

採用 EGM08 展開至 2190 階之參考重力場為重力資料之長波長分量，有限頻段 LSC 計算殘餘重力異常時，取 30 公里為搜尋半徑，任兩重力點最小容許的距離為 1 公里，假設測高重力異常為點資料，並分別指派陸測、船載、空載及測高重力的資料雜訊為 0.04、1.0、3.0 和 5.0 mgal。

整合之前先對各組重力資料進行前處理，於陸測重力的部分，為了避免三組陸測重力資料受到可能存在之系統性的偏移量或資料點位太相近導致整合時造成短波長數據失真等問題的影響，本研究使用

GMT 軟體的 blockmean 指令搭配不同權重對三組陸測重力資料進行濾波處理，分別指派 Land1、Land2 and Land3 的權值為 $1/(0.04)^2$、$1/(0.07)^2$ and $1/(0.5)^2$，執行的範圍為 21°N -26°N x 119°E-123°E，網格間距約為 1km (0.5 minute cell)。船載重力的部分，則一樣使用 blockmean 指令搭配其各自的資料精度來進行濾波處理，執行的範圍為 21°N -26°N x 119°E-123°E，網格間距約為 1km (0.5 minute cell)。

5-1-1 協變方函數

利用最小二乘配置法內插重力異常網格時，必須先分析台灣地區重力異常協變方函數，為了減少地面重力資料長波長誤差的影響，本研究將協方差矩陣中 $n \le 2190$ 的部分採用 EGM08 提供的各項係數的標準偏差 (Pavlis et al., 2012)代入公式(5-2)計算 error degree variances (Hwang, 1989)，其餘更高階的部分則使用 Tscherning-Rapp anomaly degree variance model 4。

$$\delta C_n = \left(\frac{GM}{R_E^2}\right)^2 (n-1)^2 \left(\frac{R_E}{R_B}\right)^{2(n+2)} \sum_{m=0}^{n} \left(\bar{\varepsilon}_{cnm}^2 + \bar{\varepsilon}_{snm}^2\right) \tag{5-2}$$

G 為萬有引力常數，M 為地球質量，$\bar{\varepsilon}_{cnm}^2$ and $\bar{\varepsilon}_{snm}^2$ 是大地位係數的標準偏差、R_E 為平均地球半徑、R_B 為 Bjerhamar's sphere 的半徑。

本研究考慮空載重力資料為有限頻段的重力資料來處理，雖然1500公尺航高及5000公尺航高的空載重力資料的理論可解析的波長(theoretical resolvable wavelength)分別可達約1.3及3公里之空間解析度(Hwang et al., 2007)，然而空載重力資料已使用150秒濾波移除高頻噪聲，因而空間解析度下降為8公里，根據濾波的罩窗半徑來定義空載重力資料有限頻段協方差矩陣的最大階數，透過公式(5-3)(Seeber, 2003)可約換算得$n=2500$。

$$\lambda_z = 111.194 \times \frac{360}{K} = \frac{40030.2}{K} \ (km) \tag{5-3}$$

其餘重力資料(surface gravity data)皆假設不為有限頻段的重力訊號，協方差矩陣的階數可達$n=\infty$。因此，地面重力及空載重力的協變方函數可以分別表示為下:

$$C_{\Delta g \Delta g}^{surface}(P,Q) = \sum_{2}^{2190} \delta C_n s^{n+2} P_n(\cos\Psi_{PQ}) + \sum_{n=2191}^{\infty} \frac{A(n-1)}{(n-2)(n+B)} s^{n+2} P_n(\cos\Psi_{PQ}) \tag{5-4}$$

$$C_{\Delta g \Delta g}^{airborne}(P,Q) = \sum_{2}^{2190} \delta C_n s^{n+2} P_n(\cos\Psi_{PQ}) + \sum_{n=2191}^{2500} \frac{A(n-1)}{(n-2)(n+B)} s^{n+2} P_n(\cos\Psi_{PQ}) \tag{5-5}$$

其中$A=425.28\,\mathrm{mGal}^2$，$B=24$，$s=0.999617$，$\Psi_{PQ}$為P、Q間的球面距離。

下圖 5-1 為顯示地面重力資料與空載重力資料間的協變方函數，分別利用 $n_{max} = \infty$ 與 $n_{max} = 2500$ 的兩種不同方式計算，當中各圖為：(a) 地面重力與地面重力 (b) 1500 公尺航高空載重力與)1500 公尺航高空載重力(c) 5000 公尺航高空載重力 與 5000 公尺航高空載重力 (d) 1500 公尺航高空載重力與地面重力 (e) 5000 公尺航高空載重力與地面重力(f) 1500 公尺航高空載重力與 5000 公尺航高空載重力。而以其圖中(d)為例，在距離約 0.05°(約 5.5 km)內可看兩者差異，即藍色與紅色分開之部分，這部分的協變方函數差異會使得空載所得之成果有所差異，而由本節前段中之敘述可知，在空載的部分選擇 n = 2500 是更貼近實際狀況的。

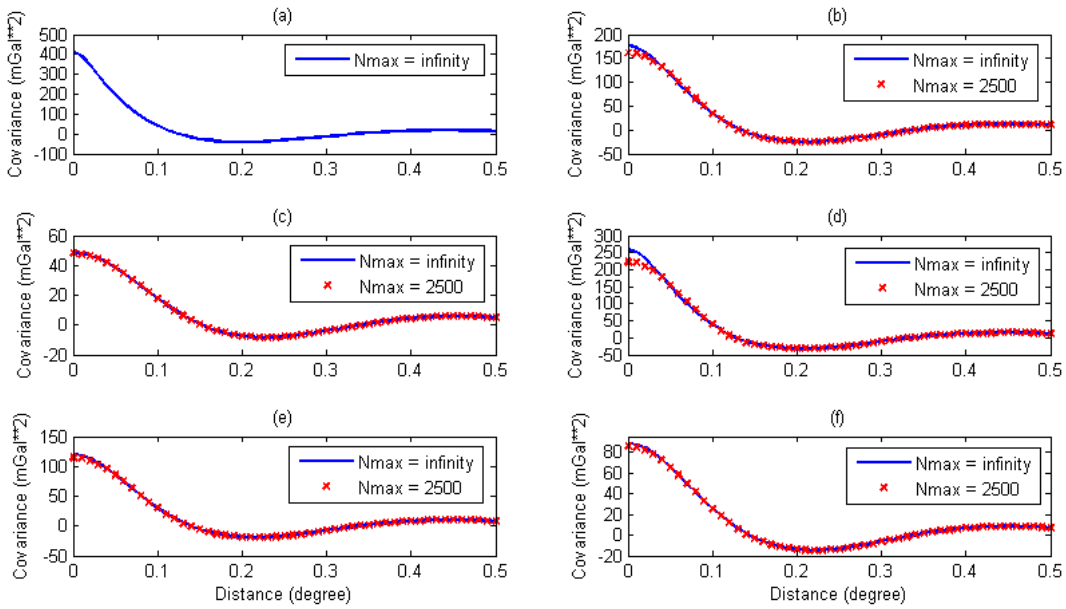


圖 5-1 協變方矩陣

從圖 5-2 可看到台中一帶的自由空間重力異常值較低，而山區明

顯較大，花蓮外海也明顯較低，蘭嶼和綠島重力異常值則較高，這些現象均與臺灣地體構造相符。大致而言，重力異常變化與地形呈現高相關，在地形變化較大之地區，由於重力異常值變化會較為劇烈，重力梯度亦會較大，如中央山脈；相反的，地形變化緩和的區域，重力梯度較小，如西部平原，臺灣海峽等地方。

將自由空間重力異常網格扣除地形效應（terrain effect）可得布格重力異常網格。地形效應計算公式如下（Hwang,2007）：

$$A_T = -(\frac{\partial V}{\partial s})|_{s=h_p} = G\rho\int_x\int_y f(x,y)dxdy \tag{5-6}$$

其中

$$f(x,y) = \frac{1}{[(x-x_P)^2+(y-y_P)^2+(h-h_p)^2]^{1/2}} - \frac{1}{[(x-x_P)^2+(y-y_P)^2+h_p{}^2]^{1/2}}$$

式中 G 是萬有引力常數，ρ 是地質密度(2.67g/cm^3)，此二量皆為常數。

h_P 為計算點 P 的高程

h 為積分範圍內任意點的高程

(x_p, y_p) 為計算點 P 的平面坐標

(x, y) 為積分範圍內任意點的平面坐標

圖 5-3 在臺灣東部布格異常通常為正值，因為板塊碰撞帶(菲律賓板塊與歐亞板塊)底下存在高密度的岩層，而和平海盆底下沉積很厚的沉澱物使得經緯度約 24.2°N，121.8° E 處顯示較低的布格異常。

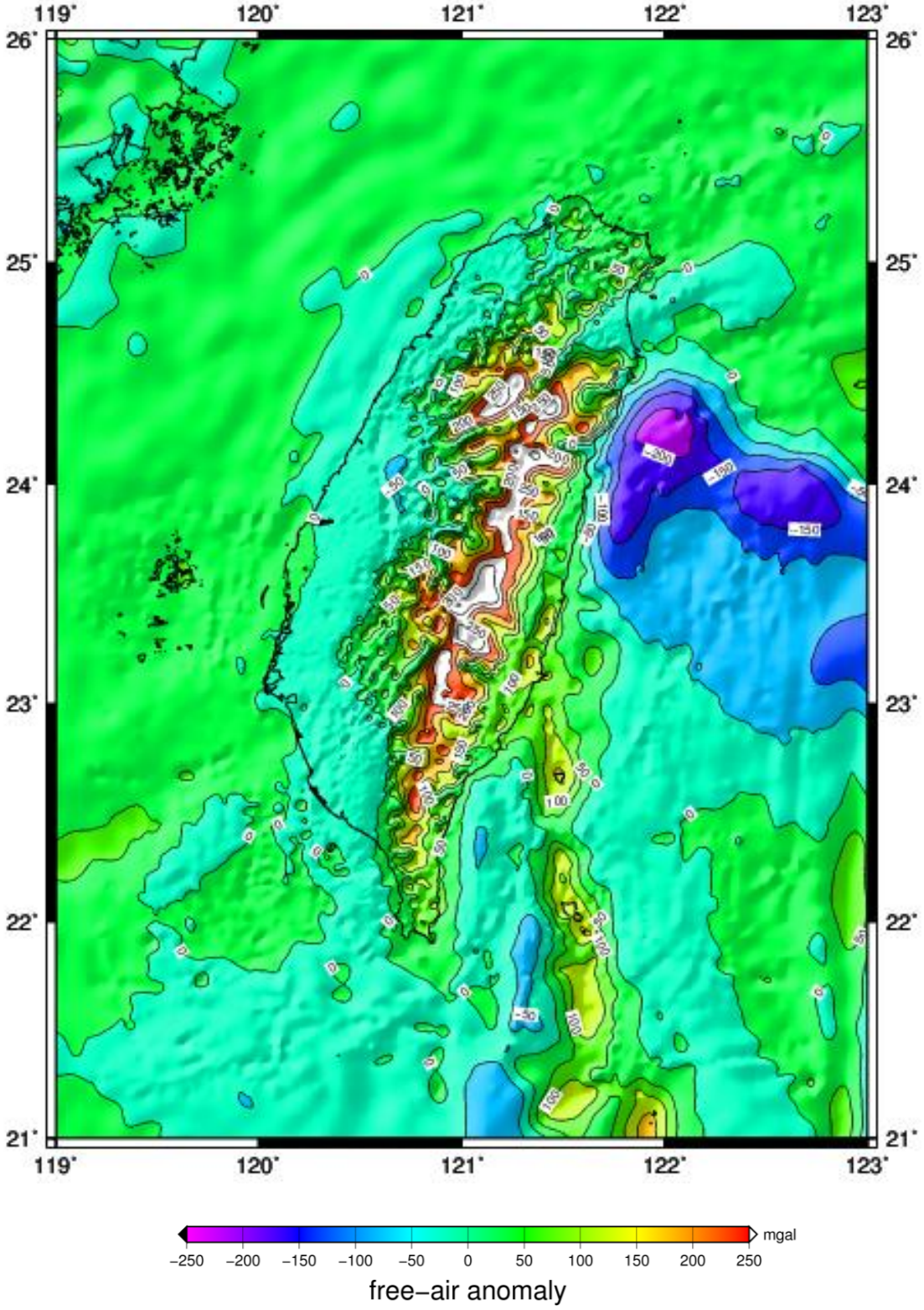


圖 5-2 自由空間重力異常網格

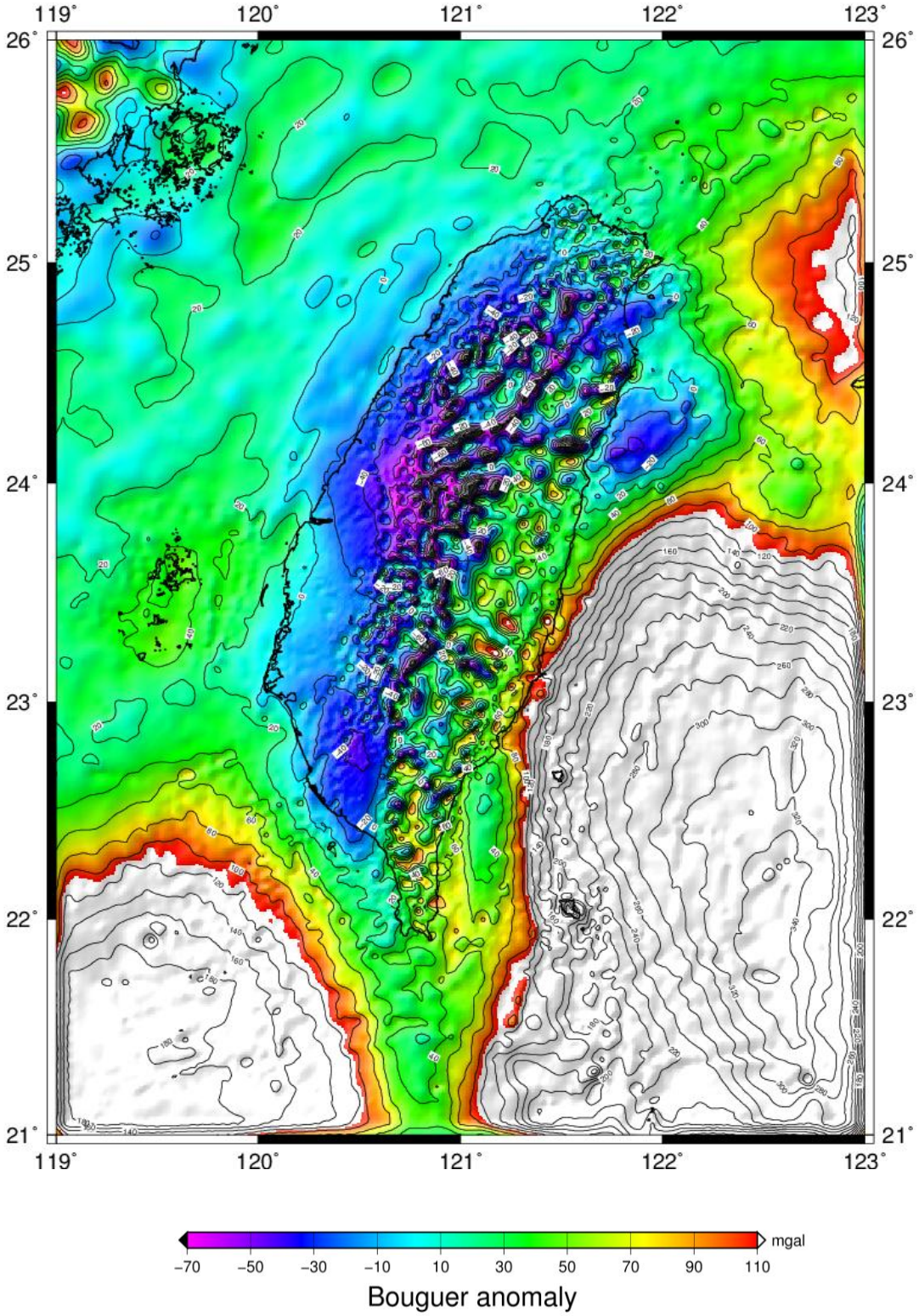


圖 5-3 布格重力異常網格

5-2 大地起伏計算方法

大地起伏計算的方法可分為 Stokes 積分法與最小二乘配置法(Least Squares Collocation, LSC)。 Stokes 積分的優點為可利用快速傅立葉(Fast Fourier Transform, FFT)計算之，可節省大量計算時間；LSC 的優點則是可結合各種不同型態與精度的重力值來計算大地起伏值。基於本案蒐集了包括陸測、船載、空載與測高等不同型態的重力值，LSC 是比較適合用於臺灣大地起伏的計算方法。LSC 的詳細理論可參考 Mortiz(1980)。在 LSC 計算裡，最重要的就是各個量之間協變方函數的決定。本案結合 EGM2008(展開至 2160 階)參考場係數誤差與 Tscherning-Rapp(1974)誤差模型計算協變方函數。LSC 方法在國際上已經發展的非常成熟，世界上第一個達到 cm 級大地起伏計算精度的結果即採用 LSC 法(Denker and Wenzel, 1987)。隨後 Sevilla (1997)，Hwang (1997)，Tscherning et al (2001)也用 LSC 得到許多高精度的大地起伏結果。

本研究使用整合之後的重力資料，用去除回覆法(remove-computation-restore)計算大地起伏，依去除回覆法的原理，可將大地起伏 N 分為參考場大地起伏 N_{ref} 、殘餘大地起伏 N_{res} 與剩餘地形模型(residual terrain model, RTM)大地起伏 N_{rtm}。如圖 5-4 所示，N_{ref} 、N_{res} 和 N_{rtm} 分別表示低頻、中頻與高頻的大地起伏(Low, Intermediate

and High Frequency Geoid)。利用參考場與剩餘地形模型分別來表達大地起伏長、短波長部分，可使 LSC 方法在計算殘餘大地起伏時更精確。

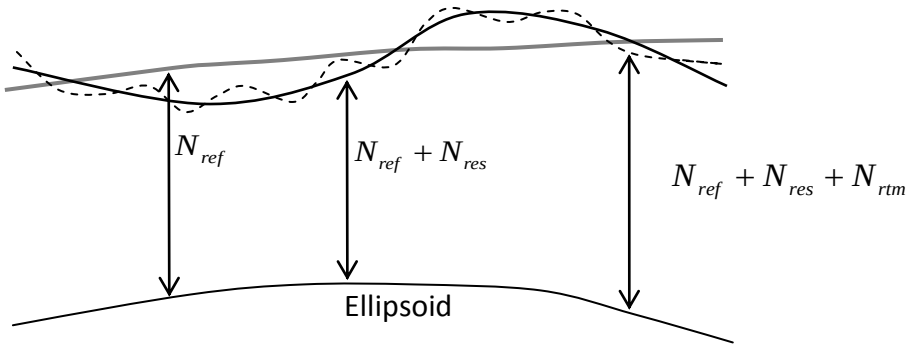


圖 5-4 N_{ref} 、N_{res}和 N_{rtm} 三種不同頻率的大地起伏

故大地起伏 N_{geoid} 可表示為

$$N_{geoid} = N_{ref} + N_{res} + N_{rtm} \tag{5-7}$$

同理，重力異常 Δg 亦可分成參考場重力異常 Δg_{ref} 、殘餘重力異常 Δg_{res} 與剩餘地形模型重力異常 Δg_{rtm}

$$\Delta g = \Delta g_{ref} + \Delta g_{res} + \Delta g_{rtm} \tag{5-8}$$

Δg_{ref} 與 N_{ref} 的計算公式為球諧係數展開式(Spherical Harmonic Expansion)，如下所示(Heiskanen and Moritz, 1967)：

$$\Delta g_{ref} = \frac{GM}{R^2}\sum_{n=2}^{N}(n-1)\sum_{m=0}^{n}\left(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda + \overline{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\overline{P}_{nm}(\sin\phi) \tag{5-9}$$

$$N_{ref} = R\sum_{n=2}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda + \overline{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\overline{P}_{nm}(\sin\phi) \tag{5-10}$$

其中 R 是地球半徑、G 為萬有引力常數、M 是地球質量、$\overline{C}_{nm}$ 與 $\overline{S}_{nm}$ 是

完全正規化之地球引力位球諧係數(fully normalized spherical harmonic coefficients)、$\bar{P}_{nm}$ 是完全正規化之 Legendre 函數、 n 與 m 是階數(degree)及次數(order)。

在剩餘地形模型的計算方面，如圖 5-5 所示，乃計算真實地型面(True Elevation Surface)與平均地形面(Mean Elevation Surface)之間對計算點 P 的效應，剩於地形模型即真實地形與平均地形間的部分(圖 5-5 斜線區域)。在地形變化平緩的地方，此效應量不大，但在地形變化劇烈的地方，此效應量非常明顯。在計算上，真實地形面採用內政部公佈之臺灣地區 9 秒 DEM 模型，平均地形面為應用 6 分的 DEM 模型可得最佳成果(蕭宇伸，2007)。

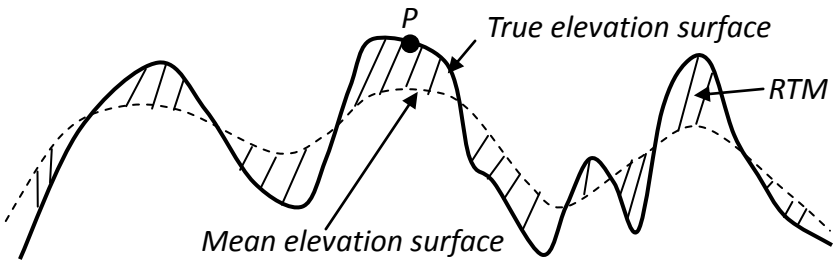


圖 5-5 剩餘地型模型示意圖

剩餘地形模型重力異常Δg_{rtm}與剩餘地形模型大地起伏N_{rtm}的計算公式為 (Forsberg, 1984)：

$$\Delta g_{rtm}\left(x_p, y_p\right) = 2\pi G\rho\left(\bar{h} - \bar{h}_r\right) - c\left(x_p, y_p\right) \tag{5-11}$$

和

$$N_{rtm}\left(x_p, y_p\right) = \frac{G}{\gamma}\int_E \frac{\rho(x,y)\left(h(x,y) - h_r(x,y)\right)}{\sqrt{\left(x - x_p\right)^2 + \left(y - y_p\right)^2}} d_x d_y \tag{5-12}$$

其中$c\left(x_p, y_p\right)$：計算點 P 的地形改正量。

(x, y)：為積分範圍內之任意點平面坐標

$\bar{h}$：DEM 高度。

$\bar{h}_r$：參考 DEM 高度。

ρ：地質密度（採 2.67 g/cm^3）。

$c(x_p, y_p)$與 N_{rtm} 可用 FFT 計算。

利用 LSC 公式，搭配全球參考場係數誤差與 Tscherning-Rapp 誤差模型可計算殘餘大地起伏 N_{res}，公式如下所示：

$$N_{res} = \left(C_{n\Delta g^0}\right)\left(C_{\Delta g^0} + D^0_{\Delta g}\right)^{-1}\left(\Delta g^0_{res}\right) \tag{5-13}$$

其中 Δg^0_{res}：高度 0 公尺的殘餘重力異常。

$C_{\Delta g^0}$：地面重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^0}$：大地起伏與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$D^0_{\Delta g}$：地面重力異常的雜訊。

若將空載重力加入計算，則公式變為：

$$N_{res} = \begin{pmatrix} C_{n\Delta g^0} & C_{n\Delta g^{5000}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\Delta g^0} + D^0_{\Delta g} & C_{\Delta g^0 \Delta g^{5000}} \\ C_{\Delta g^{5000} \Delta g^0} & C_{\Delta g^{5000}} + D^{5000}_{\Delta g} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta g^0_{res} \\ \Delta g^{ag}_{res} \end{pmatrix} \tag{5-14}$$

其中

Δg^0_{res}：高度 0 公尺的殘餘重力異常。

Δg^{ag}_{res}：空中殘餘重力異常。

$C_{\Delta g^0}$：地面重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^{ag}}$：空中重力異常與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^0 \Delta g^{ag}}$：地面重力異常與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^{ag} \Delta g^0}$：空中重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^0}$：大地起伏與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^{ag}}$：大地起伏與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$D^0_{\Delta g}$：地面重力異常的雜訊。

$D^{ag}_{\Delta g}$：空中重力異常的雜訊。

空載重力在應用時,亦可向下延續(downward continuation)至地表面，與地面重力值結合，用(5-7)式計算殘餘大地起伏值，向下延續的方法包括 FFT 和 LSC 等(Hwang et al., 2007；蕭宇伸, 2007)。此外，若測高資料格式為水準面梯度(geoid gradient)，計算時必須與格式為重力異常的重力資料分開，公式為：

$$N_{res} = \begin{pmatrix} C_{n\Delta g^0} & C_{ne} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\Delta g^0} + D_{\Delta g^0} & C_{\Delta g^0 e} \\ C_{e\Delta g^0} & C_e + D_e \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta g^0_{res} \\ e_{res} \end{pmatrix} \tag{5-15}$$

其中

Δg^0_{res}：高度 0 公尺的殘餘重力異常。

e_{res}：殘餘水準面梯度。

$C_{\Delta g^0}$：地面重力異常與地面重力異常之間的協變方矩陣。

C_e：水準面梯度與水準面梯度之間的協變方矩陣。

$C_{e\Delta g^0}$：水準面梯度與地面重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^0 e}$：地面重力異常與水準面梯度之間的協變方矩陣。

$C_{n\Delta g^0}$：大地起伏與地面重力異常之間的協變方矩陣。

C_{ne}：大地起伏與水準面梯度之間的協變方矩陣。

D_e：水準面梯度的雜訊。

$D^0_{\Delta g}$：地面重力異常的雜訊。

將計算得的 N_{res}，加上 N_{ref} 和 N_{rtm}，最後得到一近似大地起伏 $N_{quasi\text{-}geoid}$，接著將 $N_{quasi\text{-}geoid}$ 經過一改正公式進行改正，便可得到真正

的 N_{geoid}。此改正公式為：

$$N_{geoid} \approx N_{quasi\text{-}geoid} - \frac{2\pi G\rho}{\gamma} H^2 \tag{5-16}$$

其中

G：萬有引力常數

ρ：地層密度

H：正高

利用所蒐集到的所有重力資料，加上本案近岸船載重力，利用此節所述之方法所計算出的大地起伏成果如圖 5-6，當中最大值 28.672 公尺、最小值 10.599 公尺、平均值 19.729 公尺、標準差 3.441 公尺。

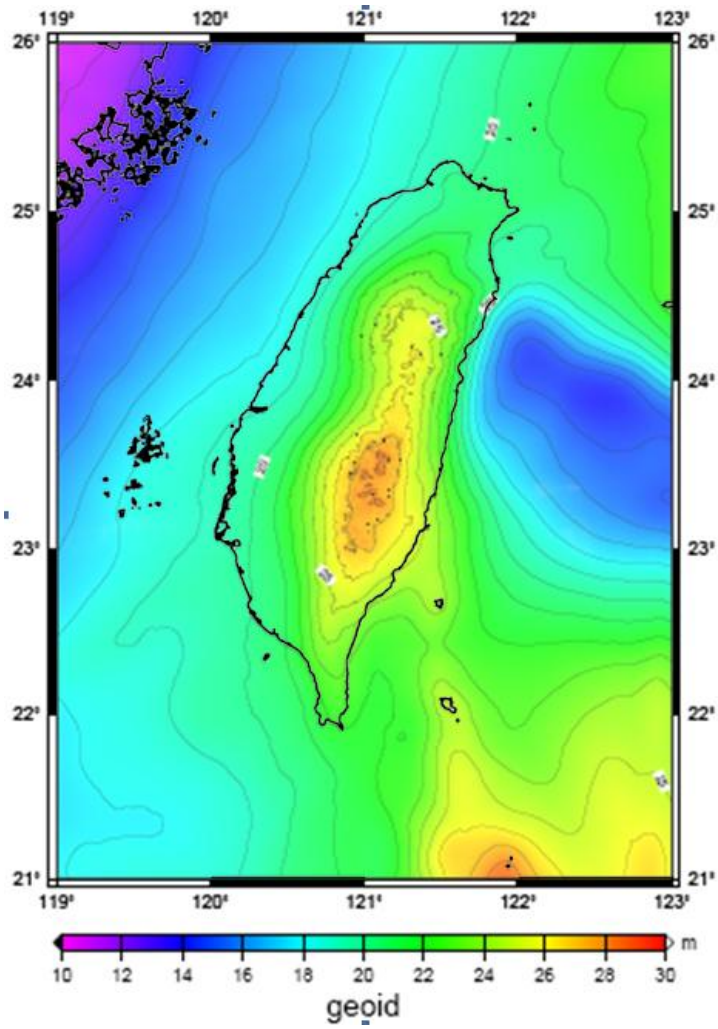


圖 5-6 臺灣新大地起伏網格

5-3 大地起伏模型精度驗證方法

5-2 節中利用所有重力資料所計算出的大地起伏模型(亦稱為重力法或傳統法大地起伏模型)，而重力法大地起伏模型的精度驗證是透過 GPS/水準資料進行檢核，即在水準點上進行 GPS 觀測得到橢球高 h，並與水準點上已有正高 H 相減，即得該水準點上之大地起伏(幾何法大地起伏值或稱之為觀測大地起伏值)。

觀測法大地起伏之單點精度甚高，因此重力法大地起伏模型可與其比較來評估模型精度。由於平均海水面與大地水準面通常存有一常差，如圖 5-7 所示，以及長波長大地起伏模式不完善，較準確的評估方式為比較兩水準點間之觀測法大地起伏與重力法大地起伏值，利用其差值的標準偏差來評估大地起伏精度。

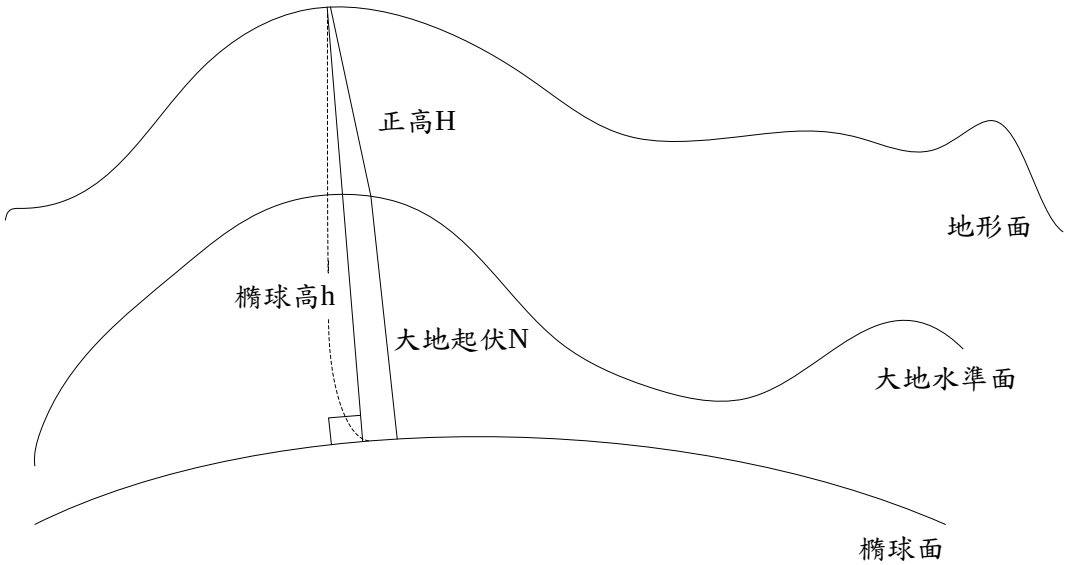


圖 5-7 大地起伏 N 及橢球高 h 之幾何關係

5-4 大地起伏成果及精度驗證

本案如預期規劃中，利用交通大學蒐集的六條 GPS/水準資料作為檢核線，分別為內政部提供的 north、center、south、east 及國科會計畫提供的西北部(台 3 線)和東南部地區(南迴公路、台 9 線)6 條皆為 24 小時 GPS 連續觀測的一等水準點，可做為大地起伏模型精度評估之用。本案規劃的陸上 GPS 測量作業，西北沿岸處 30 點一等水準點上的 GPS 測量，其分布位置位於西北沿海，可有效評估船載重力效益；宜蘭至大禹嶺的 10 個水準點上的 GPS 測量資料亦同時納入做為檢核點，可以更全面性的評估模型精度。

此外，本案另外加入國土測繪中心將提供臺 3 線上、臺 8 線上、臺 20 線上之水準點上 12 小時 GPS 觀測資料共 38 點，一併納入用以檢核模型精度。

1.臺 3 線(台中霧峰烏溪橋至高雄內門)；

2.臺 8 線(大禹嶺至太魯閣節點)；

3.臺 20 線(向陽至富里節點)。

加上 100 年度計畫在西南沿岸所施測的 20 點水準點上搭配 24 小時之 GPS 測量，本案共有 12 條檢核線可供使用，分別為水準正高資料分別搭配 12 或 24 小時不等之 GPS 觀測成果，整理如表 5-1、表 5-2，位置及圖上代號參照圖 5-8，圖中藍色點為現存檢核線，紫色點

為本案工作項目之 24 小時 GPS 測量點位，粉紅色點為測繪中心提供之 12 小時 GPS 測量點位：

表 5-1 24 小時 GPS 檢核線

名稱	詳述	測點數量	備註
North	北部基隆沿海	9	內政部提供
Central	中部山區	10	內政部提供
South	南部地區	9	內政部提供
East	東部地區	10	內政部提供
Tai3	台 3 線上的西北部檢核線	20	國科會計畫
Tai9	南迴公路、台 9 線上的東南部檢核線	15	國科會計畫
SW	分布於西南沿海之檢核線	20	100 年度近岸船載計畫
NW	分布於西北沿岸之檢核線	30	101 年度近岸船載計畫
24hr_Mountain	宜蘭至大禹嶺	10	101 年度近岸船載計畫

表 5-2 12 小時 GPS 檢核線

名稱	詳述	測點數量	備註
12hr_Tai3	臺 3 線上，台中霧峰烏溪橋至高雄	19	國土測繪中心提供
12hr_Tai8l	臺 8 線上，大禹嶺至太魯閣節點	9	國土測繪中心提供
12hr_Tai20	臺 20 線上，向陽至富里節點	10	國土測繪中心提供

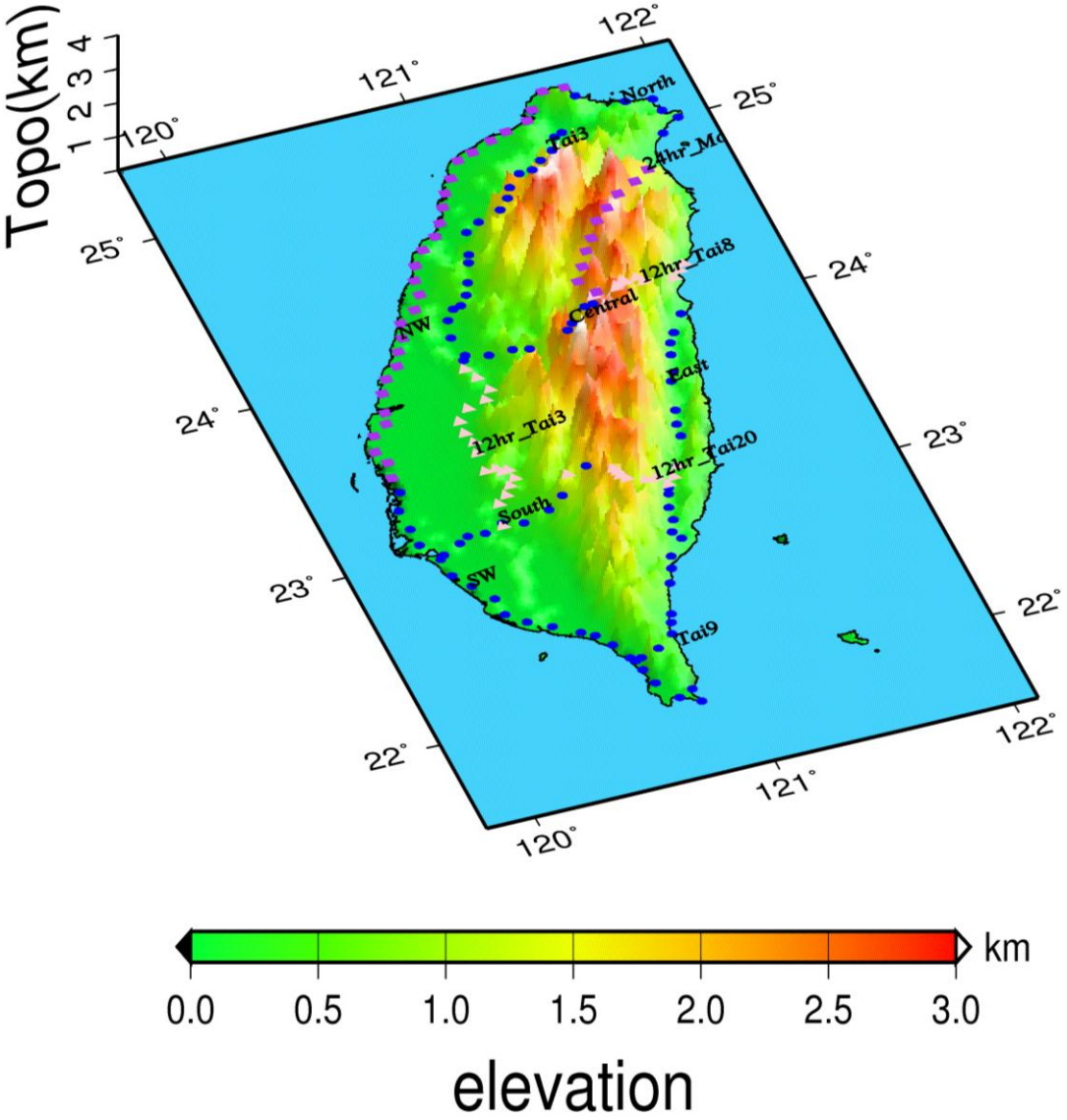


圖 5-8 大地起伏模型檢核線分布

加上本案船載重力測量成果與 101 年度花東山區重力前後的大地起伏精度分析如表 5-3，表中 Geoid101 為未加入本案船載重力與花東山區重力資料前的大地起伏模型，Geoid101S 為加入上述資料後的大地起伏模型。兩模型皆為交大團隊於本年度製作，唯一的差別只有花東山區重力與本案船載重力是否加入的差別。

由表 5-3 我們可以看到，加入本案船載重力之後，從西北沿岸的

30 點檢核點（NW）上，可以看到大地起伏精度提升了 1.3 公分。而加入 100 及 101 年度花東及山區重力資料後，對於相應地區的大地起伏精度亦有提升，如東部檢核線（East）提升了 1.8 公分；路徑經過山區的南部的檢核線（South）精度提升了 3.5 公分；臺九線（Tai9）精度亦提升了 2.5 公分；本年度進行 24 小時 GPS 測量的山區檢核點上（24hr_mountain），由於新增加的重力資料影響，精度提升了 2.4 公分；臺三線由台中霧峰開始至高雄的檢核點上（12hr_Tai3），精度提升了 1.4 公分；位於山區位置的臺 20 線 12 小時 GPS 觀測的檢核點（12_Tai20），精度提升了 1.3 公分。

Geoid101 與 Geoid101S 之間的差異最大值為 16.6cm、最小值為 -20.6cm、平均值為-0.42cm、標準差為 2.36cm，其分布如下圖 5-9，從圖 5-9 可以看到加入花東及山區重力及西北沿岸的船載重力後，對於大地起伏有明顯的影響。

表 5-3 大地起伏精度評估與比較(單位: cm)

路線/圖示	模式	最大值	最小值	平均值	標準差	差異量 (Geoid101S - Geoid101)
North	Geoid101	-16.0	-19.0	-17.9	0.9	0.9
	Geoid101S	-12.8	-18.4	-15.5	1.8	
East	Geoid101	-3.4	-10.0	-3.3	4.4	-1.8
	Geoid101S	-17.1	-24.5	-19.8	2.6	
Central	Geoid101	11.0	-14.3	-4.0	9.2	-1.3
	Geoid101S	-5.1	-29.9	-18.3	7.9	
South	Geoid101	-16.2	-42.8	-32.3	11.0	-3.5
	Geoid101S	-31.1	-50.1	-42.3	7.5	
Tai3	Geoid101	-16.1	-40.4	-26.2	6.7	1.3
	Geoid101S	-21.0	-48.7	-30.8	8.0	
Tai9	Geoid101	-5.7	-32.9	-20.7	6.8	-2.5
	Geoid101S	-18.1	-34.6	-24.8	4.3	
SW	Geoid101	-11.6	-34.9	-23.4	5.9	-0.8
	Geoid101S	-13.8	-33.2	-25.4	5.1	
NW	Geoid101	-12.3	-30.4	-21.2	4.4	-1.3
	Geoid101S	-7.9	-25.6	-18.3	3.1	
24hr_ mountain	Geoid101	29.1	-10.5	7.9	12.2	-2.4
	Geoid101S	15.6	-14.3	-2.1	9.8	
12hr_Tai3	Geoid101	-15.5	-34.5	-25.7	6.4	-1.4
	Geoid101S	-31.8	-47.5	-39.7	5.0	
12hr_Tai8	Geoid101	26.1	-5.7	11.6	9.7	0.7
	Geoid101S	11.8	-20.9	-2.6	10.4	
12hr_Tai20	Geoid101	12.2	-22.7	-0.3	9.6	-1.3
	Geoid101S	-3.7	-27.4	-12.7	8.3	

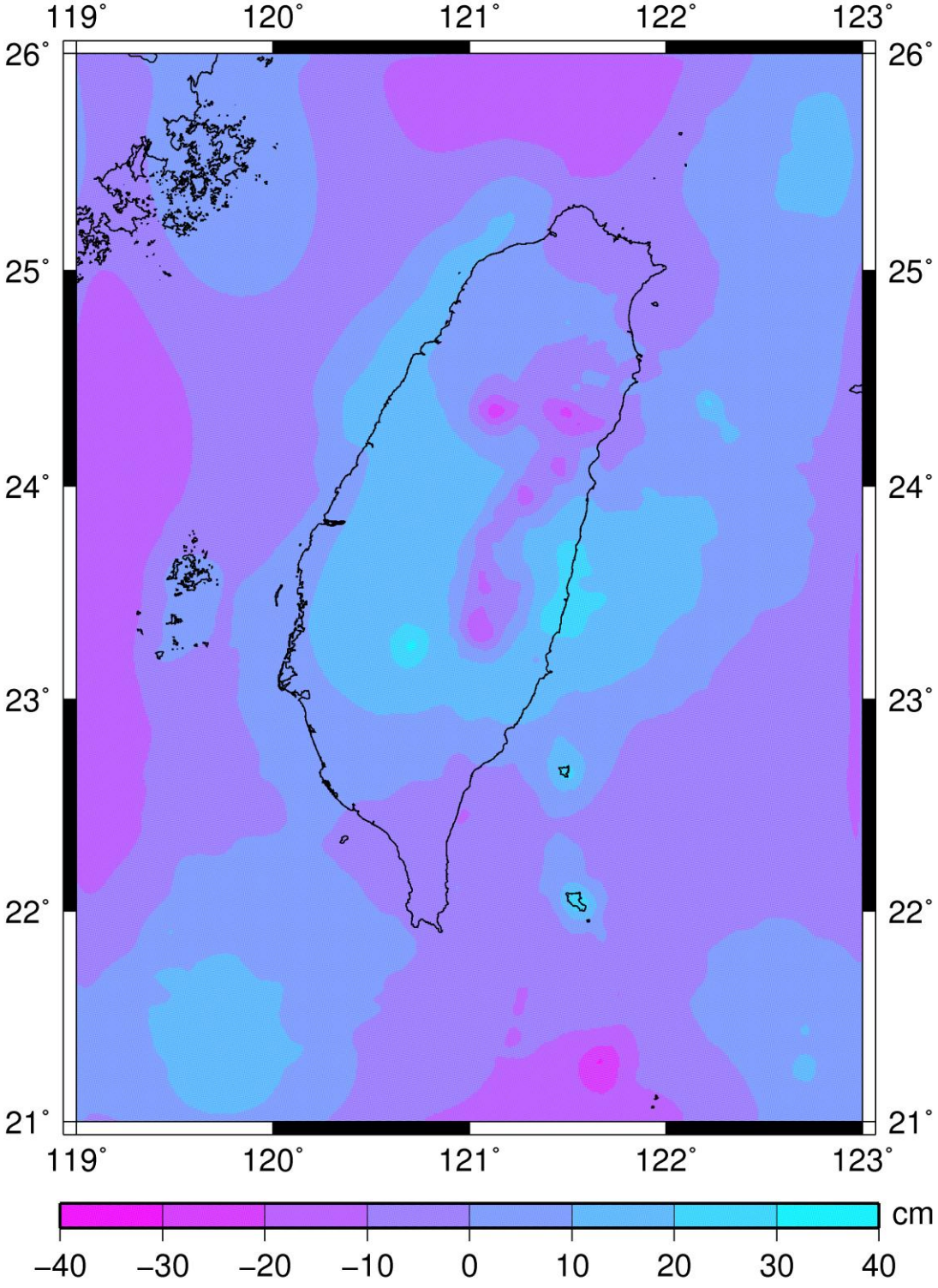


圖 5-9 Geoid101 與 Geoid101S 的差異分布圖

5-5 混合型(HYBRID)大地水準面

重力法大地起伏模型是採用高密度重力資料推演而得，重力即隱含著地球內部真實密度分布等物理資訊，透過重力法區域大地起伏計算成果，能獲得高解析度及優良的區域精度，且可預測大地起伏變化趨勢，然而卻也可能受制於球諧係數的誤差累積產生長波長大地起伏的系統誤差(Smith and Milbert, 1999)。水準點上搭配 GPS 觀測資料可求得觀測法大地起伏值，然而，水準測量所需成本高，由其在山區精密水準測量施測困難，因此山區的觀測法大地起伏值的點為密度低。即使其精度甚高，卻無法完全取代重力法大地起伏計算(Kuroishi et al., 2002)。為了得到一個區域高精度大地起伏模型，結合兩種類型之大地起伏模型之優點，將高精度的觀測法大地起伏修正至重力法大地起伏模型，而得一混合型(Hybrid)大地起伏模型。將實測的大地起伏減去重力法大地起伏後，再組成一修正面，接著將此修正面加入重力法的大地起伏模型，得到修正後的大地起伏模型。組成區域修正面的方法包括最小曲率法與諧和面法。使用最小曲率法與諧和函數法內插時，內插值 z 必須滿足下列偏微分方程式：

$$(1-\mathrm{T})\times \mathrm{L}\big(\mathrm{L}(z)\big)+\mathrm{T}\times \mathrm{L}(z)=0, 0\le \mathrm{T}\le 1 \qquad (5\text{-}17)$$

其中，T 為 tension factor，L 為 Laplace 運算子。當 T=0 時，式 5-17 提供了最小曲率解；T=1 時，提供一諧和面解。

本案中利用除了檢核線資料外，還包含內政部所提供之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料所得之觀測法大地起伏來進行系統性偏移的修正，檢核成果如表 5-4。

表 5-4 中比較重力法大地起伏與混合型大地起伏(Geoid101S-Hybrid)的部分，正值表示混合型優於重力法所得，而負值即表示該檢核線上重力法所得優於混和型成果。由此比較可看出混合型大地起伏基本上是優於傳統重力法大地起伏的，部分表現較差的區域推測其原因為該區之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料成果不佳。

表 5-4 混合型大地起伏檢核成果統計(單位:cm)

路線/圖示	最大值	最小值	平均值	標準差	與重力法大地起伏之比較 (Geoid101S-Hybrid)
North	3.6	-0.5	0.8	1.3	0.5
East	10.9	-0.2	4.0	3.9	-1.3
Central	23.6	-3.6	6.8	10.4	-2.5
South	-0.5	-13.8	-5.1	5.2	2.3
Tai3	0.1	-4.6	-1.5	1.5	6.5
Tai9	9.0	-6.5	0.1	5.2	-0.9
SW	10.0	-7.4	0.1	4.9	0.2
NW	20.6	-12.7	2.0	6.6	-3.5
24hr_mountain	19.8	0.2	3.3	6.1	3.7
12hr_Tai3	13.5	-3.3	1.6	3.7	1.3
12hr_Tai8	1.2	-5.7	0.3	2.1	8.3
12hr_Tai20	8.0	-9.6	0.1	4.1	4.2

第六章 繳交項目

本案已完成合約交付之所有事項，以下為各項成果整理。

(1) 船載重力測量觀測及數據分析

近岸的船載重力測量於本年度 5 月 21 日完成。利用 TRACK 軟體進行船載 GPS 動態資料之計算，得到南北(N)、東西(E)以及橢球高(h)方向的精度分別介於 ± 1.3~3.2 cm、± 1.2~2.1 cm 以及 ± 2.9~7.1 cm 之間，平均精度則分別為± 1.6 cm、± 1.4 cm 以及 ± 3.9 cm，皆達到 cm 等級之精度。船載重力成果利用交叉點分析觀測數據，共有 26 個交叉點可供評估，平差處理後精度可達 2.359 mgal。

(2) 重力資料蒐集

蒐集臺灣已有的陸測重力、船載重力、空載重力及衛星測高重力資料，就其觀測時間、數量、精度等做一整理，並加入 101 年度花東山區重力測量值。利用最小二乘配置法整合臺灣所有重力資料，依照合約內容計算整合後之空間重力異常模型及布格重力異常模型。

(3) 大地水準面模式計算

將整合後的重力資料納入大地起伏網格計算，由於臺灣有許多的重力資料，需考慮不同精度的影響給定不同權值，陸測重力精度最高則給定最高權值，反之測高重力權值最低，利用最小二乘配置法計算，精算出 $1'\times1'$ 解析度的大地起伏模式。

(4)　陸上 GPS 測量成果

完成陸上 40 點 24 小時的 GPS 觀測，其中 30 點分布於西北沿岸，用以評估本年度船載重力資料對大地起伏計算的貢獻；另外 10 點分布於宜蘭至大禹嶺山區，用以評估 100 及 101 年度花東及山區重力資料的貢獻。精度檢核部份按照合約規範，利用閉合差分析確保所計算的基線品質，閉合差分析成果列於附錄 4。

(5)　大地水準面模式精度檢核

利用現存之檢核線並將本案所做之 24 小時 GPS 觀測數據搭配水準資料之 40 個點位一同納入，此外亦加入測繪中心提供之 3 條水準線段搭配 12 小時 GPS 觀測用以做為檢核點(相應之幾何位置及說明見 5-4 節與圖 5-8)，並分析各點位實測大地起伏值與內插至大地起伏模型所得的值的差異，用以評估精度。其中加入了本案船載重力成果之後，在新增的西北部檢核線(表 5-3，NW)上可看出，精度由原先的 4.4 公分提升至 3.1 公分，提升了 1.3 公分；在加入花東及山區重力資料後，在位置相對應的檢核線皆可看見精度的提升(見表 5-3)。

(6)　混合型(HYBRID)大地水準面模式精度檢核

將重力法大地起伏與觀測法大地起伏混合後得混合型(Hybrid)大地起伏，本案中利用除了檢核線資料外，還包含內政部所提供之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料所得之觀測法大地起伏來進行

系統性偏移的修正，其檢核成果顯示出混合型大地起伏基本上是優於傳統重力法大地起伏的，部分表現較差的區域推測其原因為該區之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料成果不佳。

第七章 結論與應用

7-1 結論

在臺灣各種不同種類的重力資料中，陸地重力測量數據目前已有 7 組(表 2-1)，在完成花東山區 100 及 101 年度的重力測量資料後，所求得之山區大地起伏模型的精度有所提升，且更加完整，當中由中央研究院(Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)完成的 603 點重力資料，雖然年代久遠且當時的坐標精度未如現在精確，但由於其分布涵蓋臺灣山區，仍是不可或缺的觀測量。鑒於這兩年的正向成果表現，未來若持續加入新的山區重力測量數據，便可望能逐步完善臺灣陸地重力測量的品質。

陸測重力部分加入了今年度花東及山區重力測量的成果後，經過網形平差後平均精度可達±0.044mgal(表 2-1)。陸上 24 小時 GPS 測量利用閉合差分析進行精度評估，皆達精度需求，成果如附錄 4 所示。

海上重力測量部分，今年延續 100 年度成果，將臺灣西北部沿海 20 公里內的資料完善，根據交叉點分析顯示資料精度達 2.359 mgal(表 3-3)，此部分使得臺灣西部沿海的重力資料完整度及精度都得到了大幅度的進步，相較於過去臺灣的資料，甚或是國際上普遍的認知來看，都已經達到相對較高的水準。而船載 GPS 動態定位知成果分別得到南北(N)、東西(E)以及橢球高(h)方向的精度分別介於 ± 1.3~3.2 cm、

± 1.2~2.1 cm 以及 ± 2.9~7.1 cm 之間，平均精度則分別為± 1.6 cm、± 1.4 cm 以及 ± 3.9 cm，皆達到 cm 等級之精度。

綜合以上各觀測資料，利用觀測法與重力法大地起伏的差值來評估大地起伏模式的精度，結果顯示 100 年度及 101 年度所測得的花東山區重力資料以及西部沿海船載重力資料皆對大地起伏有正向的改善：加入船載重力後，可由西北沿岸的 30 點檢核點看到大地起伏精度提升了 1.3 公分(表 5-3，NW)、加入 100 及 101 年度花東及山區重力資料後，對於相應地區的大地起伏精度亦有提升，如東部檢核線(East)提升了 1.8 公分；路徑經過山區的南部的檢核線(South)精度提升了 3.5 公分；臺九線(Tai9)精度亦提升了 2.5 公分、本年度進行 24 小時 GPS 測量的山區檢核線(24hr_mountain)上，由於新增的重力資料加入後，精度提升了 2.4 公分；臺三線(Tai3)由台中霧峰開始至高雄的檢核點上，精度提升了 1.4 公分；位於山區位置的臺 20 線 12 小時(12hr_Tai20)GPS 觀測的檢核點，精度提升了 1.3 公分。希望在接下來的年度計畫中能達到相同的貢獻。而混合型(Hybrid)大地起伏所得之檢核成果相較於重力法大地起伏，表現更加優異，僅少部分檢核線可能因該區之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料成果不佳造成該部份檢核成果不如預期。

7-2 大地起伏之應用

大地起伏模式可以在防災、監測及高程現代化中有所應用，本節將針對這三種應用進行介紹：

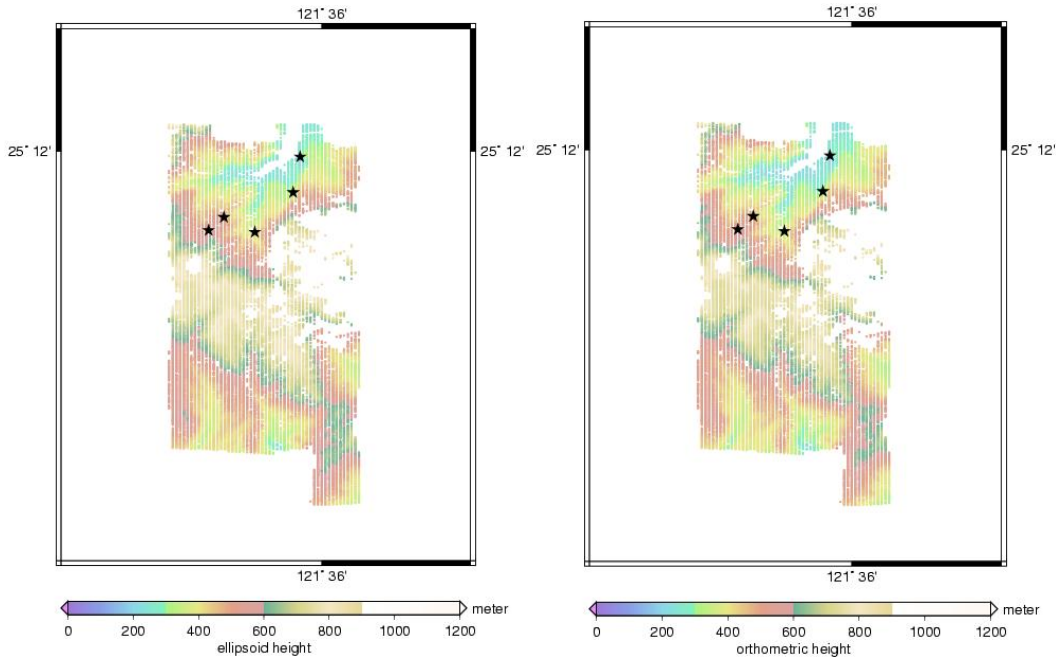
1. 光達應用

近年來大範圍高精度高解析度 DEM 之產製技術中，主動式遙感探測技術已日趨成熟，尤其光達以高頻率發射雷射光速進行掃描，可快速的蒐集地形資訊，於台灣及國際上皆被廣泛的應用。使用光達技術對相同研究區之地形進行重複性的觀測來獲得地表變形資訊的研究很多，例如地層下陷、斷層偵測及邊坡滑動監測等，極端的案例如颱風及地震等天災可能造成的大範圍且快速地形變化也可透過光達技術來進行快速的監測。光達所測得的高程訊息是相對於參考橢球面的橢球高，透過一簡單的轉換關係可直接轉換成正高(H)，轉換公式如下:

$$H = h - N \tag{7-1}$$

其中 h 、 N 分別為橢球高與大地起伏。透過大地起伏模式可於任何位置獲得 N 。舉例來說，圖 7-1(a)、(b)皆為陽明山的光達點雲分布圖，且分別建構於不同高程基準的高程變化，圖 7-1(a)為相對於參考橢球面的橢球高，圖 7-1(b)為相對於大地水準面的正高，圖 7-2 為對應光

達點雲位置上的大地起伏值分布圖，大地起伏值平均約 20 公尺並隨著高程變化。透過經過此研究區的五個一等水準點正高來與光達所測得正高(經過高程轉換)進行精度評估，正高差異約為-4.047 公尺至-0.075 公尺。其中幾點較大差異歸因於光達觀測量的誤差，必須更進一步於光達點雲數據處理上進行改善來減少此差異量。此例在於強調大地起伏模式於光達應用中的重要性。本文發展的大地起伏模式已廣泛的應用於橢球高與正高間的轉換。



(a) (b)

圖 7-1 施測於陽明山的光達點雲資料(a)橢球高(b)正高

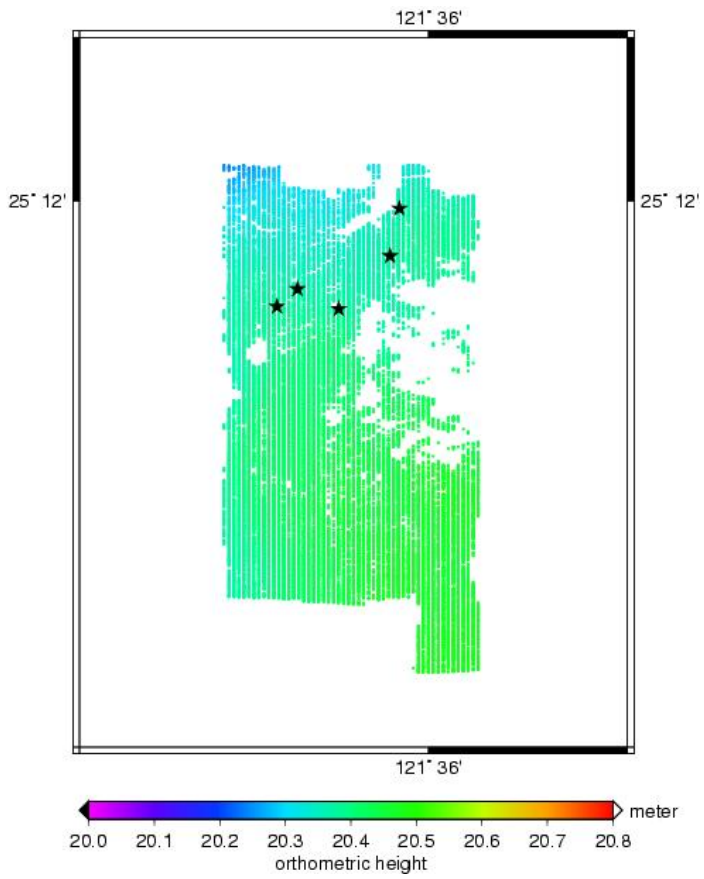


圖 7-2 對應於光達點雲位置上的大地起伏值分布圖

2. 淹水範圍估計

地球的大氣和海洋因溫室效應而造成溫度上升，南、北極及格陵蘭冰層融化使得海水面上升，臨海地勢較低之區域將面臨被淹沒的困境。透過靜態淹水模擬可了解較易受到海水淹沒區域之分布範圍，並以此結果當做防災規畫之依據。由於存在水往低處流的事實，水的流動不僅僅是依據著地形高低，最主要是受到重力等位面的影響，因而實際上淹水與否取決於大地水準面。過去淹水模擬都是直接使用數值高程模型(DEM)當基準，然而此模型之高程基準主要分為橢球高與正

高兩種系統，淹水模擬應選用正高系統之模型。廖真如(2010)結合交通大學發展的大地起伏模式及地形進行地面淹水狀況的推估，使用的數值高程資料為 2000 年太空梭雷達製圖任務(SRTM)於台灣地區之資料，此 SRTM 高程系統建立於 EGM96 模型上，由於此模型僅展開至 360 階，空間解析度不佳，因而將其模型參考面轉換至空間解析度較高之重力大地起伏值(Hwang et al., 2007)。圖 7-3 為全台灣地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖，其結果顯示當橢球高與正高之淹水面積於水深 10 公尺以內所造成的範圍差異很大，因此若使用橢球高模擬會產生低估的情形，採用正高進行淹水模擬才能獲得較正確的資訊。

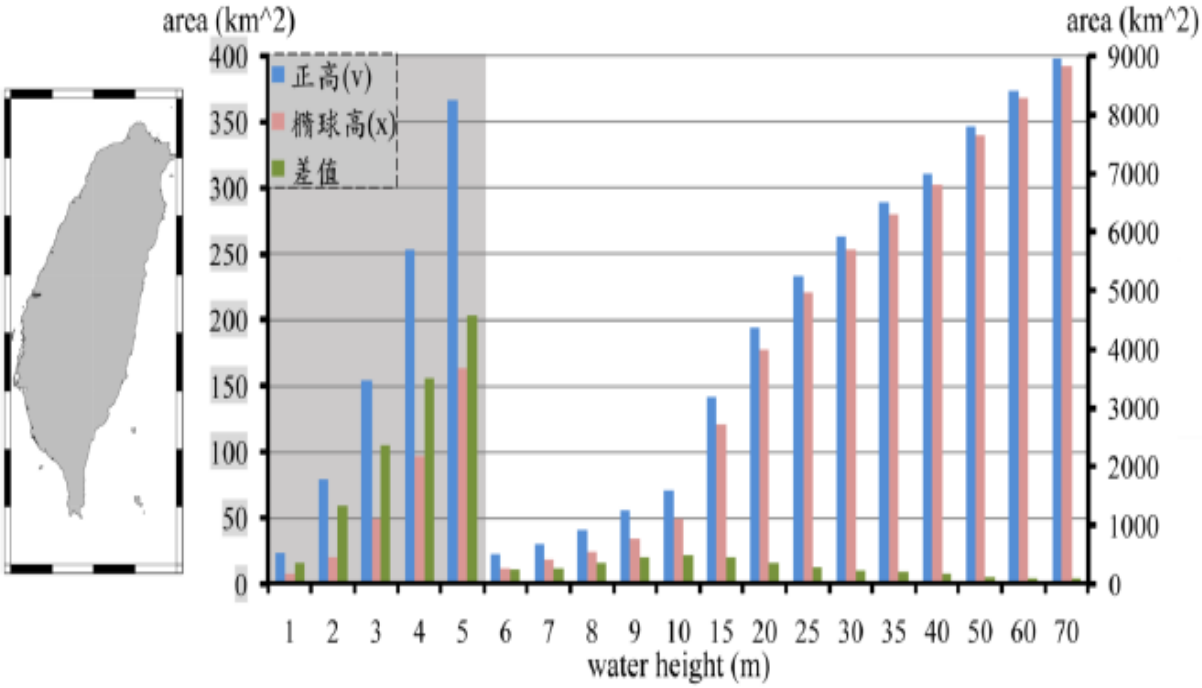


圖 7-3 全台灣地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖(摘錄自廖真如, 2010)

3. 大地起伏模式與高程現代化

提議台灣發展高程現代化需採用本文所發展的大地起伏模式，並擬定台灣高程現代化芻議如下:

I.政府部分:

A. 發展與維護大地水準面模式

i. 蒐集與更新重力資料庫

ii. 使用最新的全球重力參考場模型

iii. 建立全台灣大地起伏模式的誤差模型

iv. 根據地球動力估計大地水準面模式的變化

B. 決定所有 eGPS 站的傳統正高

i. 定義及維護基隆與離島高程基準並決定高程基準差異

ii. 採用傳統水準測量來決定所有 eGPS 的正高，測量規範達最高標準

iii. 利用連續 GPS 決定 eGPS 站垂直速度場

iv. 增加下列 eGPS 軟體的數據處理能力

a. 透過差分 eGPS 站與使用者間的橢球高與大地起伏差來決定兩者間的正高差

b. 利用使用者的 GPS 定位誤差(基線長度或其他等因素)、大地起伏模式誤差模型來估計使用者的正高精度

v. 修正離島與本島之高程基準差異量，表 7-1 為離島與本島之高程基準差異量，其中 Δh 為橢球高差、ΔN 為大地起伏差、ΔH_g 為重力法所得之正高差、ΔH_p 為兩地公告正高之差值(各對應至當地之平均海水面)

表 7-1 離島與本島之高程基準差異量(單位:m)

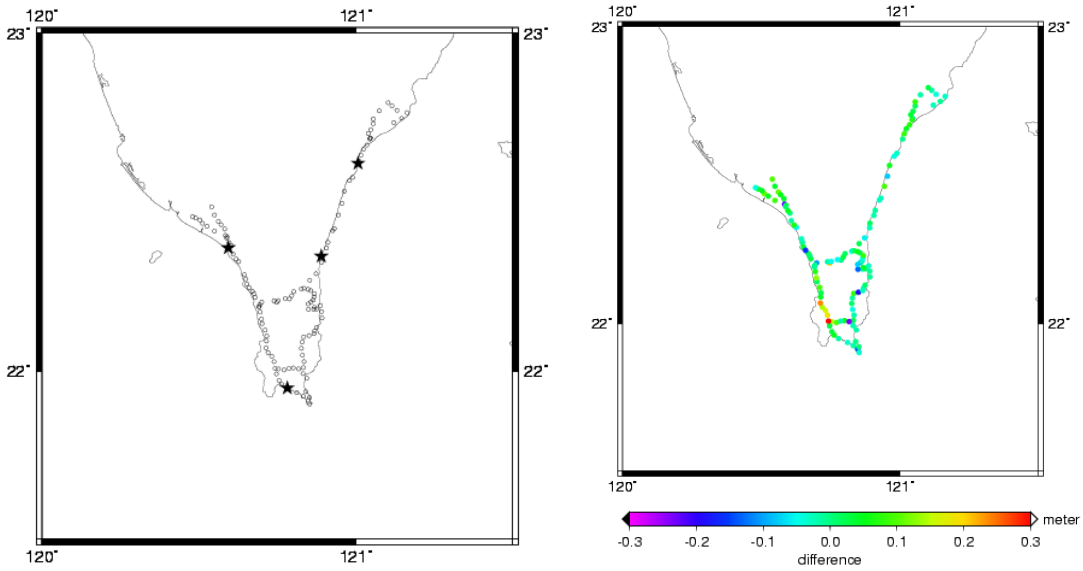
	Δh	ΔN	ΔH_g	ΔH_p	基準差異
琉球-基隆	3.140	0.230	2.910	2.732	0.178
綠島-基隆	6.633	4.062	2.571	2.241	0.330
蘭嶼-基隆	10.977	4.388	6.588	5.715	0.873
澎湖-基隆	-1.231	-2.135	0.904	0.336	0.568

II. 使用者部分:

i. 視所需之橢球高精度來決定所採用的 GPS 定位時間長短；其橢球高精度可另行估計

ii. 使用 eGPS 計算軟體來決定正高及其誤差

以下為一案例之測試,研究區域為恆春半島上之eGPS測量成果，包含 4 個追蹤站及台一線、台九線之水準點，共 126 個點(如圖 7-4 所示)。一等水準點測到 4 個 eGPS 站之 ARP 使用一等水準測量作業規範 sigma = 2.5 mm/SQRT(K)。此外，eGPS 測量之橢球高(eGPS_h)的精度約為 10-15 cm。表 7-2 結果顯示四個追蹤站的水準正高(TWVD2001_H)與本交大團隊模型(Geoid-based_H)所推算的正高差異(TWVD2001_H- Geoid-based_H)約數公分；表 7-3 顯示動態 GPS 橢球高搭配大地起伏模式來推算正高，標準偏差可達 7.7 公分，當中正高差計算方式與表 7-2 相同，為 TWVD2001_H 減去 Geoid-based_H。



(a) (b)

圖 7-4 (a) eGPS 點位分布圖 ；(b) eGPS 正高差異分布圖

表 7-2 追蹤站 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異(單位: m)

點號	點名	eGPS_h	Geoid-based_H	TWVD2001_H	正高差
太麻里	TMAM	58.722	34.632	34.5969	-0.035
大武	DAWU	40.980	17.603	17.6080	0.005
枋寮	FALI	41.650	19.700	19.6860	-0.014
墾丁	KDNM	58.260	36.118	36.1240	0.006

表 7-3 eGPS 的 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異統計(單位: m)

	最大值	最小值	平均值	標準偏差
正高差	0.234	-0.299	-0.011	0.077

7-3 未來規劃

未來的近岸船載重力計畫尚有臺灣東部沿海的部分，依據 100 年及 101 年度的承辦經驗，對未來計畫的施測方式有以下初步規劃：

1. 考慮臺灣氣候特性，為避免於計畫執行期間遇上可能來襲的颱風，應在天候及海象允許的狀況下，施測時間可於四月下旬開始。
2. 施測船隻仍選擇以 CT-2 等級為原則，再依當時、當地狀況進行調整。
3. 船隻在碼頭停靠點的選定應以周圍 200 公尺內有電源供應為原則，以利重力儀待機保持溫度，並應事先與當地居民協調。
4. 在透空且點位不易變動等原則下，24 小時 GPS 測量選點以靠沿岸為原則。
5. 原訂將於 102、103 年度完成之臺灣本島東部沿海海域之近岸船載重力計畫，由於東部海底地形關係，過往已有許多大型測量船隻搜集相較西部沿海海域更加密集之數據(見本文圖 2-4)，故判斷可合併執行，將 2′×2′ 變更為 4′×4′，並於 102 年度完成。

參考文獻

內政部國土測繪中心,「臺灣本島與離島高程連測計畫 95 年度連測作業期末報告」，2007。

內政部國土測繪中心,「臺灣本島與離島高程連測計畫 96 年度連測作業期末報告」，2010。

內政部國土測繪中心,「臺灣本島與離島高程連測計畫 97 年度連測作業期末報告」，2010。

內政部國土測繪中心，「100 年度臺灣本島近岸船載重力測量作業期末報告」，2011。

陳春盛，「一等二級水準點上實施重力測量工作報告書」，內政部，2003。

黃金維、郭重言、儲慶美、甯方璽，臺灣重力網平差及重力資料整合，測量工程，第 40 卷，第三期，第 71-82 頁，1998。

黃金維，「一等一級水準點上實施重力測量工作報告書」，內政部，2001。

黃金維，「空載重力測量工作報告書」，內政部，2005。

黃金維，「低航高空載重力測量工作案期末報告書」，內政部，2008。

黃金維,「西部及東沙海域空載重力測量工作案期末報告書」,內政部，2007。

黃金維，臺灣地區大地起伏模式精度評估報告書，內政部，2003。

黃金維、王成機，臺灣自由空間重力異常網格，測量工程，第 44 卷，第二期，第 1-22 頁，2002。

蕭宇伸，利用空載，地面重力與測高資料計算臺灣大地起伏：研究向上/向下延續與地形效應計算，交通大學土木系博士論文，2007。

Alberts B., Klees R., A comparison of methods for the inversion of airborne gravity data, 2004, J Geodesy, 78: 55-65.

Childers, V., McAdoo, A.D.C., Brozena, J.M., Laxon, S.W., 2001. New grvity data in the Arctic Ocean: comparison of airborne and ERS gravity. Journal of Geophysical Research, VOL. 106, 8871-8866.

Denker H, Wenzel HG (1987) Local geoid determination and comparison with GPS results, B. Geod., 61, pp. 349-366.

Deng X., Improvement of Geodetic Parameter Estimation in Coastal Regions from Satellite Radar Altimetry, PhD. dissertation, Curtin University of Technology, Australia, 2003.

Foster, J.H., Carter, G.S., Merrifield, M.A., Ship-based measurement of sea surface topography, 2009, Geophysical Research Letters, VOL. 36, L11905.

Harlan, R., Eötvös corrections for airborne gravimetry, J. geophysics, Res., 73, pp. 4675-4679, 1968.

Heiskanen WA, Moritz H (1967) Physical Geodesy, W.H. Fredman and company ,San Francisco and London.

Hsu, SK., CS Liu, CT. Shyu, SY. Liu, JC. Sibuet, S. Lallemand, C. Wang and D. Reed., New Gravity and Magnetic Anomaly Maps in the Taiwan-Luzon Region and their Preliminary Interpretation, TAO 9,pp.509-532, 1998.

Hwang C (1997) Analysis of some systematic errors affecting altimeter-derived sea surface gradient with application to geoid determination over Taiwan, J. Geod., 71, pp. 113-130.

Hwang, C and Wang CG (2002) New gravity anomaly grid of Taiwan, Journal of Surveying Engineering, 44 (2), pp. 1-22. (in Chinese)

Hwang C, Hsiao YS, Lin T.L. (2003a). A digital elevation model of Taiwan and accuracy assessment, Cadastre Survey, 22 (2), pp.1-19. (in Chinese)

Hwang, C., Hsiao, Y.S., Shih, H.C., Data reduction in scalar airborne gravimetry: Theory, software and case study in Taiwan, 2006, Computers & Geosciences, 32, 1573-1584.

Hwang, C., Hsiao, Y.S., Shih, H.C., Yang, M., Chen, K.H., Forsberg, R., Olesen, A.V., Geodetic and geophysical results from Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment, 2007, Journal of Geophysical Research, VOL.112, B04407.

Hwang C, Hung WC, Liu CH (2008) Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan High Speed Rail operation. in press, Natural Hazards.

Kuroishi Y, Ando H , Fukuda Y, (2002) A new hybrid geoid model for Japan, GSIGEO2000, Journal of Geodesy, vol. 76 pp. 428-436.

Kuroishi Y, Keller W (2005) Wavelet approach to improvement of gravity field-geoid modeling for Japan. J Geophys. Res. 110 (B3): Art. No. B03402.

LCR, 2003. L&R Model “S” Air-Sea Dynamic Gravity Meter System II, Lacoste & Romberg.

Pope, A. J., The statistics of residuals and detection of outliers, Tech. Rep.NOS65 NGS1, Rockville, 1976.

Smith DA, Milbert DG (1999) The GEOID96 high-resolution geoid height model for the United States, Journal of Geodesy, vol.73, pp.

219-236.

Seeber G (2003) Satellite Geodesy, 2nd ed. De Gruyter, Berlin.

Sevilla M (1997) A high-resolution gravimetric geoid in the Strait of Gibraltar, J. Geod., 71, pp. 402-410.

Torge, W., Geodesy, Walter de Gruyter, Berlin, 2001.

Tscherning, C.C. and R.H. Rapp (1974). Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and the deflections of the vertical implied by anomaly Degree-variance models, Reports of the Department of Geodetic Science, 208, Ohio State University, Columbus.

附錄 1 船載交叉點資訊

經度	緯度	重力異常差值(mGal)
120.875328	25.118467	-0.67
120.905449	25.100960	2.57
120.937747	25.083949	3.32
120.969503	25.067518	5.67
121.001456	25.049765	3.57
120.554654	24.708340	-1.13
120.585955	24.690342	-1.21
120.618353	24.673864	0.21
120.648970	24.657064	2.08
120.681879	24.638846	0.80
120.730190	24.904058	-4.59
120.762439	24.887720	-1.62
120.792913	24.870583	0.05
120.827606	24.852538	0.55
120.856400	24.836889	-0.44
120.442056	24.476488	9.28
120.474575	24.460384	3.37
120.506248	24.443589	2.71
120.537878	24.426655	2.70
120.569874	24.409150	4.75
120.299366	24.263279	5.44
120.330444	24.245385	1.03
120.362681	24.229184	0.14
120.394053	24.211918	-0.91
120.124284	24.065802	0.19
120.156304	24.048757	-2.93
120.188416	24.032144	-13.07
120.219935	24.014783	-4.54
120.251700	23.998177	-4.77
119.982504	23.851167	-5.70
120.014782	23.835405	6.47
120.077880	23.801043	-9.69
120.109918	23.783584	5.08
120.046331	23.818224	-3.22
121.287515	25.273044	-8.47

121.287436	25.346555	12.39
121.359453	25.401546	1.39
121.358703	25.303504	2.72
121.502639	25.345959	9.72
121.502635	25.366519	6.61
121.431141	25.374101	8.62
121.430902	25.334793	1.68
121.157233	25.142155	-12.61
121.094955	25.262595	-3.15
121.110844	25.232996	-7.77
121.124626	25.203797	-8.03
121.140870	25.173321	-15.56

附錄 2 陸上 24 小時 GPS 觀測時段表

24 小時 GPS 實際觀測時段表

101 年度臺灣本島近岸船載重力測量作業實際觀測時段表

時段	2012114A	日期	2012.04.23~04.24	觀測時間	02:10~02:30	
組別	點號	觀測點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距(m)	垂距(m)
1	新寶	G024	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.676	1.676
2	新街橋	G027	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.556	1.556
3	福南村	G019	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.714	1.714
4	山崙社區	G014	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.643	1.643
5	麥寮工作站	G037	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.583	1.583
6	東石節點	X202	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.569	1.569
7	下崙派出所	G046	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.642	1.642
8	楠梧派出所	G051	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.672	1.672
9	西濱大橋	G032	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.761	1.762
10	台西節點	X114	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.590	1.590

時段	2012116A	日期	2012.04.25~04.26	觀測時間	01:50~02:00	
組別	點號	觀測點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距(m)	垂距(m)
1	大甲溪橋	1082	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.589	1.589
2	通天路	1077	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.654	1.654
3	浸水橋	D039	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.701	1.701
4	崎頂	D043	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.790	1.791
5	全興工業區	G009	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.500	1.499
6	渡船頭	D047	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.635	1.635
7	友愛靈園	1068	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.691	1.691
8	龍港節點	X013	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.699	1.699
9	五南社區	1073	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.628	1.628
10	台中港節點	X105	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.651	1.651

時段	2012121A	日期	2012.04.30~05.01	觀測時間	03:00~04:10	
組別	點號	觀測點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距(m)	垂距(m)
1	內湖	D021	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.578	1.578
2	瓦窯	D015	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.680	1.680
3	真慶宮	D005	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.664	1.664

4	集應廟	2011	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.585	1.585
5	白沙灣	2018	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.732	1.733
6	塘背	D025	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.620	1.620
7	尚義衛生室	D034	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.660	1.660
8	蚵間國小	D030	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.629	1.629
9	北頂寮	D011	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.825	1.826
10	水流宮	2023	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.491	1.490

時段	2012123A	日期	2012.05.02~05.03	觀測時間	02:05~02:15	
組別	點號	觀測點號	接收儀型式	天線盤型式	斜距(m)	垂距(m)
1	土場	7045	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.596	1.596
2	德荃橋北	7069	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.595	1.595
3	星文橋	7082	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.657	1.657
4	苗圃	7093	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.714	1.714
5	宜蘭節點	X021	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.662	1.662
6	大禹嶺節點	X301	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.614	1.614
7	松柏村東	8040	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.720	1.720
8	松羅村	7051	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.711	1.711
9	四季蔬菜區	7076	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.737	1.738
10	上深溝	7058	Trimble 5700	Zephyr Geodetic	1.601	1.601

附錄 3 陸上 24 小時 GPS 測量成果表

點號	緯度(dd:mm:ss)、標準差(ss)					經度(dd:mm:ss)、標準差(ss)					橢球高(m)	標準差(m)	正高(m)	備註
G024	N	23	59	1.70682	0.0004	E	120	21	17.36175	0.0004	21.873	0.002	3.181	
G027	N	23	54	46.41038	0.0004	E	120	18	40.22301	0.0004	22.575	0.002	3.71	
G019	N	24	2	16.5265	0.0004	E	120	25	17.62711	0.0004	23.43	0.002	4.665	
G014A	N	24	6	41.18988	0.0004	E	120	27	23.16465	0.0004	23.035	0.002	4.324	副點
G037A	N	23	45	3.26464	0.0004	E	120	15	48.03584	0.0004	24.288	0.002	5.079	副點
X202	N	23	27	42.74831	0.0006	E	120	10	22.53674	0.0006	19.98	0.005	0.381	
G046A	N	23	37	4.16321	0.0004	E	120	9	52.48821	0.0004	20.477	0.002	1.073	副點
G051A	N	23	32	46.72437	0.0004	E	120	11	20.01658	0.0004	19.278	0.002	-0.267	副點
G032	N	23	48	34.41869	0.0004	E	120	16	54.98231	0.0004	26.064	0.002	6.938	
X114	N	23	42	8.95428	0.0004	E	120	11	34.99313	0.0004	19.359	0.003	0.098	
1082	N	24	18	39.53421	0.0004	E	120	36	12.00738	0.0004	82.641	0.003	63.59	
1077A	N	24	22	57.80457	0.0004	E	120	39	7.46112	0.0004	81.569	0.003	62.374	副點
D039A	N	24	48	24.72654	0.0004	E	120	55	5.18478	0.0004	29.899	0.003	10.821	副點
D043	N	24	43	45.5584	0.0004	E	120	52	30.38722	0.0004	28.884	0.003	9.665	
G009A	N	24	10	37.89489	0.0004	E	120	29	58.64498	0.0004	23.607	0.003	4.857	副點
D047A	N	24	39	56.23473	0.0004	E	120	49	46.27799	0.0004	29.283	0.003	10.021	副點
1068	N	24	32	19.22012	0.0004	E	120	41	46.32865	0.0004	39.63	0.004	20.66	
X013	N	24	36	37.55555	0.0004	E	120	45	26.05479	0.0004	36.083	0.002	17.004	
1073A	N	24	27	41.32636	0.0004	E	120	39	48.16979	0.0004	37.172	0.003	16.574	副點

X105	N	24	15	22.52841	0.0004	E	120	31	31.53803	0.0004	23.144	0.002	4.401	
D021	N	25	3	18.05393	0.0004	E	121	8	26.58896	0.0004	57.907	0.003	38.796	
D015	N	25	5	39.96389	0.0004	E	121	14	1.11916	0.0004	34.822	0.002	15.555	
D005A	N	25	9	5.49276	0.0004	E	121	24	28.79177	0.0004	29.876	0.003	10.215	副點
2011	N	25	12	14.38136	0.0007	E	121	26	57.02567	0.0007	77.073	0.004	57.328	
2018	N	25	17	6.5954	0.0004	E	121	31	33.23731	0.0004	25.987	0.002	6.22	
D025A	N	25	1	50.91131	0.0004	E	121	4	13.97451	0.0004	37.944	0.002	18.996	副點
D034A	N	24	52	37.28174	0.0004	E	120	57	22.88226	0.0004	35.016	0.003	16.013	副點
D030A	N	24	56	50.94708	0.0004	E	121	0	28.80369	0.0004	39.892	0.003	20.936	副點
D011	N	25	7	17.03091	0.0004	E	121	18	26.36231	0.0004	30.986	0.002	11.58	
2023	N	25	16	45.55007	0.0004	E	121	36	48.63435	0.0004	25.313	0.002	5.318	
7045	N	24	36	18.41532	0.002	E	121	31	17.34261	0.0025	328.709	0.012	306.119	
7069A	N	24	33	0.78489	0.002	E	121	27	27.67891	0.0015	537.93	0.01	514.519	副點
7082	N	24	24	21.72881	0.003	E	121	21	24.37847	0.003	1552.247	0.027	1527.006	
7093	N	24	19	47.85118	0.0035	E	121	18	37.63474	0.0049	1940.05	0.021	1914.586	
X021	N	24	45	16.92272	0.002	E	121	45	6.77672	0.002	27.609	0.015	7.15	
X301	N	24	10	50.02035	0.0025	E	121	18	36.51684	0.0025	2587.557	0.017	2561.642	
8040	N	24	15	28.99205	0.0039	E	121	15	43.59223	0.0049	2022.164	0.033	1996.51	
7051	N	24	39	51.23747	0.002	E	121	35	31.0891	0.002	189.367	0.011	167.625	
7076	N	24	28	1.52217	0.0015	E	121	24	8.11246	0.0015	967.727	0.009	943.28	
7058	N	24	42	28.08494	0.002	E	121	40	49.85628	0.002	0.002	0.01	49.955	

附錄 4 陸上 24 小時 GPS 觀測閉合差分析表

閉合差分析成果表

序號	閉合圈(組成點號)			閉合圈(組成基線)						閉合圈總邊長(km)	dX(cm)	dY(cm)	dZ(cm)	dX(ppm)	dY(ppm)	dZ(ppm)
				基線名稱	時段代碼	基線名稱	時段代碼	基線名稱	時段代碼		標準:2cm	標準:2cm	標準:2cm	標準:5ppm	標準:5ppm	標準:5ppm
1	VR01	TASI	SHJU	00000025.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000114.SSF	1010425A	290.562	0.5	-0.6	0.7	0.017	-0.021	0.024
2	VR01	TASI	SHJU	00000025.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010425A	00000112.SSF	1010430A	290.562	-1.5	1.4	0.5	-0.052	0.048	0.017
3	VR01	TASI	HL01	00000025.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000129.SSF	1010425A	237.612	-0.8	1.3	1.3	-0.034	0.055	0.055
4	VR01	TASI	VR02	00000025.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000134.SSF	1010425A	108.673	-0.2	0.7	0.5	-0.018	0.064	0.046
5	VR01	TASI	SHMN	00000025.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010430A	00000030.SSF	1010425A	445.757	0.3	-0.5	-0.2	0.007	-0.011	-0.004
6	VR01	TASI	HL01	00000025.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	237.612	-0.4	-0.5	-0.2	-0.017	-0.021	-0.008
7	VR01	TASI	VR02	00000025.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010425A	00000131.SSF	1010430A	108.673	-0.9	0.1	0.6	-0.083	0.009	0.055
8	VR01	TASI	SHMN	00000025.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010425A	00000028.SSF	1010430A	445.757	-1.4	1.3	1.2	-0.031	0.029	0.027
9	VR01	HL01	SHJU	00000027.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000111.SSF	1010425A	182.921	0.8	-0.2	0.3	0.044	-0.011	0.016
10	VR01	HL01	VR02	00000027.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000128.SSF	1010425A	184.307	0.1	1.1	0.1	0.005	0.060	0.005
11	VR01	HL01	TASI	00000027.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000129.SSF	1010425A	237.612	-0.2	1.2	0.0	-0.008	0.051	0.000
12	VR01	HL01	SHMN	00000027.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010430A	00000027.SSF	1010425A	340.746	0.6	-0.2	-0.5	0.018	-0.006	-0.015
13	VR01	HL01	VR02	00000027.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010425A	00000131.SSF	1010430A	184.307	-0.8	1.0	1.1	-0.043	0.054	0.060
14	VR01	HL01	TASI	00000027.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	237.612	-0.5	0.9	1.2	-0.021	0.038	0.051
15	VR01	SHJU	HL01	00000028.SSF	1010423A	00000024.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	182.921	1.2	-1.4	-0.1	0.066	-0.077	-0.005

16	VR01	SHJU	VR02	00000028.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010425A	00000131.SSF	1010430A	237.114	0.7	-0.8	0.7	0.030	-0.034	0.030
17	VR01	SHJU	TASI	00000028.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	290.562	0.9	-0.9	0.8	0.031	-0.031	0.028
18	VR01	SHJU	SHMN	00000028.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000028.SSF	1010430A	341.542	0.1	0.4	1.4	0.003	0.012	0.041
19	VR01	SHJU	HL01	00000028.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000111.SSF	1010425A	182.921	-0.3	1.8	1.1	-0.016	0.098	0.060
20	VR01	SHJU	VR02	00000028.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000113.SSF	1010425A	237.114	0.4	1.2	0.4	0.017	0.051	0.017
21	VR01	SHJU	TASI	00000028.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000114.SSF	1010425A	290.562	0.0	1.3	0.2	0.000	0.045	0.007
22	VR01	SHJU	SHMN	00000028.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	341.542	0.9	0.0	-0.3	0.026	0.000	-0.009
23	VR01	VR02	SHJU	00000029.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000113.SSF	1010425A	237.114	1.0	-0.7	0.6	0.042	-0.030	0.025
24	VR01	VR02	SHJU	00000029.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010425A	00000112.SSF	1010430A	237.114	-0.7	1.2	0.6	-0.030	0.051	0.025
25	VR01	VR02	HL01	00000029.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000128.SSF	1010425A	184.307	-0.2	1.2	1.3	-0.011	0.065	0.071
26	VR01	VR02	TASI	00000029.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000134.SSF	1010425A	108.673	0.1	0.7	0.4	0.009	0.064	0.037
27	VR01	VR02	SHMN	00000029.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	391.612	0.9	-0.6	-0.2	0.023	-0.015	-0.005
28	VR01	VR02	HL01	00000029.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	184.307	0.5	-0.7	-0.1	0.027	-0.038	-0.005
29	VR01	VR02	TASI	00000029.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	108.673	0.3	-0.2	0.8	0.028	-0.018	0.074
30	VR01	VR02	SHMN	00000029.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000028.SSF	1010430A	391.612	-0.5	1.1	1.4	-0.013	0.028	0.036
31	VR01	TACH	SHJU	00000030.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000115.SSF	1010425A	183.784	0.7	-0.5	0.2	0.038	-0.027	0.011
32	VR01	TACH	HL01	00000030.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000130.SSF	1010425A	130.797	-0.6	1.4	0.8	-0.046	0.107	0.061
33	VR01	TACH	VR02	00000030.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000135.SSF	1010425A	93.112	0.1	0.8	0.0	0.011	0.086	0.000
34	VR01	TACH	TASI	00000030.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000136.SSF	1010425A	146.036	-0.3	0.9	-0.1	-0.021	0.062	-0.007
35	VR01	TACH	SHMN	00000030.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010430A	00000031.SSF	1010425A	340.326	0.6	-0.5	-0.7	0.018	-0.015	-0.021

36	VR01	SHMN	SHJU	00000031.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	341.542	0.6	0.4	1.0	0.018	0.012	0.029
37	VR01	SHMN	SHJU	00000031.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000112.SSF	1010430A	341.542	-0.5	1.1	0.3	-0.015	0.032	0.009
38	VR01	SHMN	VR02	00000031.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	391.612	0.0	1.7	0.9	0.000	0.043	0.023
39	VR01	SHMN	TASI	00000031.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000030.SSF	1010425A	445.757	-0.3	1.8	0.8	-0.007	0.040	0.018
40	VR01	SHMN	HL01	00000031.SSF	1010423A	00000110.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	340.746	0.7	-0.8	-0.3	0.021	-0.023	-0.009
41	VR01	SHMN	VR02	00000031.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000131.SSF	1010430A	391.612	0.1	-0.2	0.4	0.003	-0.005	0.010
42	VR01	SHMN	TASI	00000031.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	445.757	0.4	-0.3	0.6	0.009	-0.007	0.013
43	TASI	HL01	SHJU	00000117.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000111.SSF	1010425A	290.303	1.3	-1.0	-0.1	0.045	-0.034	-0.003
44	TASI	HL01	VR01	00000117.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	237.612	0.1	1.7	0.2	0.004	0.072	0.008
45	TASI	HL01	VR01	00000117.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000127.SSF	1010425A	237.612	0.2	-0.4	-0.1	0.008	-0.017	-0.004
46	TASI	HL01	VR02	00000117.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010425A	00000134.SSF	1010430A	238.103	-0.2	1.0	0.4	-0.008	0.042	0.017
47	TASI	HL01	VR02	00000117.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010430A	00000128.SSF	1010425A	238.103	0.6	0.3	-0.3	0.025	0.013	-0.013
48	TASI	HL01	SHMN	00000117.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010430A	00000027.SSF	1010425A	448.348	1.1	-1.0	-0.8	0.025	-0.022	-0.018
49	TASI	SHJU	VR01	00000118.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	290.562	1.5	-0.1	-0.2	0.052	-0.003	-0.007
50	TASI	SHJU	HL01	00000118.SSF	1010423A	00000024.SSF	1010425A	00000129.SSF	1010430A	290.303	1.7	-1.4	-0.8	0.059	-0.048	-0.028
51	TASI	SHJU	VR02	00000118.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010425A	00000134.SSF	1010430A	291.069	1.2	-0.8	0.0	0.041	-0.027	0.000
52	TASI	SHJU	SHMN	00000118.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000030.SSF	1010430A	449.304	0.6	0.4	0.7	0.013	0.009	0.016
53	TASI	SHJU	VR01	00000118.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000112.SSF	1010425A	290.562	0.4	-0.3	0.2	0.014	-0.010	0.007
54	TASI	SHJU	HL01	00000118.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000111.SSF	1010425A	290.303	0.2	1.0	0.7	0.007	0.034	0.024
55	TASI	SHJU	VR02	00000118.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010430A	00000113.SSF	1010425A	291.069	0.8	0.4	0.0	0.027	0.014	0.000

56	TASI	SHJU	SHMN	00000118.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	449.304	1.3	-0.8	-0.6	0.029	-0.018	-0.013
57	TASI	VR02	SHJU	00000119.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010425A	00000114.SSF	1010430A	291.069	-0.3	1.2	-0.2	-0.010	0.041	-0.007
58	TASI	VR02	SHJU	00000119.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000113.SSF	1010425A	291.069	1.4	-1.5	0.2	0.048	-0.052	0.007
59	TASI	VR02	VR01	00000119.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	108.673	0.9	0.6	-0.2	0.083	0.055	-0.018
60	TASI	VR02	VR01	00000119.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000131.SSF	1010425A	108.673	0.4	-0.9	0.3	0.037	-0.083	0.028
61	TASI	VR02	HL01	00000119.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010425A	00000129.SSF	1010430A	238.103	1.0	-0.7	-0.8	0.042	-0.029	-0.034
62	TASI	VR02	HL01	00000119.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000128.SSF	1010425A	238.103	0.3	0.4	0.9	0.013	0.017	0.038
63	TASI	VR02	SHMN	00000119.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000030.SSF	1010430A	445.788	0.0	1.1	0.7	0.000	0.025	0.016
64	TASI	VR02	SHMN	00000119.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	445.788	1.3	-1.4	-0.5	0.029	-0.031	-0.011
65	TASI	TACH	SHJU	00000120.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000115.SSF	1010425A	290.311	1.2	-1.3	-0.2	0.041	-0.045	-0.007
66	TASI	TACH	VR01	00000120.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000133.SSF	1010425A	146.036	0.2	-0.7	-0.2	0.014	-0.048	-0.014
67	TASI	TACH	HL01	00000120.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000130.SSF	1010425A	237.166	0.0	0.6	0.4	0.000	0.025	0.017
68	TASI	TACH	VR02	00000120.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010430A	00000135.SSF	1010425A	146.054	0.6	0.0	-0.4	0.041	0.000	-0.027
69	TASI	TACH	SHMN	00000120.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010430A	00000031.SSF	1010425A	447.074	1.1	-1.3	-1.0	0.025	-0.029	-0.022
70	TASI	SHMN	SHJU	00000121.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	449.304	1.1	-0.4	0.7	0.024	-0.009	0.016
71	TASI	SHMN	SHJU	00000121.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000114.SSF	1010430A	449.304	0.0	1.1	-0.4	0.000	0.024	-0.009
72	TASI	SHMN	VR01	00000121.SSF	1010423A	00000053.SSF	1010430A	00000028.SSF	1010425A	445.757	0.1	0.2	0.8	0.002	0.004	0.018
73	TASI	SHMN	VR01	00000121.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010425A	00000132.SSF	1010430A	445.757	1.1	0.5	-0.4	0.025	0.011	-0.009
74	TASI	SHMN	HL01	00000121.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000027.SSF	1010425A	448.348	0.0	1.6	1.3	0.000	0.036	0.029
75	TASI	SHMN	HL01	00000121.SSF	1010423A	00000110.SSF	1010425A	00000129.SSF	1010430A	448.348	1.3	-0.8	-0.9	0.029	-0.018	-0.020

76	TASI	SHMN	VR02	00000121.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	445.788	0.5	0.9	0.6	0.011	0.020	0.013
77	TASI	SHMN	VR02	00000121.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000134.SSF	1010430A	445.788	0.7	-0.2	-0.2	0.016	-0.004	-0.004
78	HL01	SHJU	VR01	00000127.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	182.921	1.2	-0.5	0.1	0.066	-0.027	0.005
79	HL01	SHJU	VR02	00000127.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010425A	00000128.SSF	1010430A	237.309	0.9	-1.2	0.3	0.038	-0.051	0.013
80	HL01	SHJU	TASI	00000127.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010425A	00000129.SSF	1010430A	290.303	1.1	-1.3	0.4	0.038	-0.045	0.014
81	HL01	SHJU	SHMN	00000127.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000027.SSF	1010430A	214.898	0.3	0.1	0.9	0.014	0.005	0.042
82	HL01	SHJU	VR01	00000127.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000112.SSF	1010425A	182.921	0.4	-1.2	-0.4	0.022	-0.066	-0.022
83	HL01	SHJU	VR02	00000127.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010430A	00000113.SSF	1010425A	237.309	0.7	-0.5	-0.6	0.029	-0.021	-0.025
84	HL01	SHJU	TASI	00000127.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000114.SSF	1010425A	290.303	0.3	-0.4	-0.8	0.010	-0.014	-0.028
85	HL01	SHJU	SHMN	00000127.SSF	1010423A	00000110.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	214.898	1.3	-1.7	-1.2	0.060	-0.079	-0.056
86	HL01	VR02	SHJU	00000128.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010425A	00000111.SSF	1010430A	237.309	-0.6	0.8	0.2	-0.025	0.034	0.008
87	HL01	VR02	VR01	00000128.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000131.SSF	1010425A	184.307	0.4	-1.8	-0.2	0.022	-0.098	-0.011
88	HL01	VR02	VR01	00000128.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	184.307	0.6	0.2	0.2	0.033	0.011	0.011
89	HL01	VR02	TASI	00000128.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000134.SSF	1010425A	238.103	0.4	-1.0	-0.5	0.017	-0.042	-0.021
90	HL01	VR02	TASI	00000128.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010425A	00000129.SSF	1010430A	238.103	0.5	-0.6	0.5	0.021	-0.025	0.021
91	HL01	VR02	SHMN	00000128.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000027.SSF	1010430A	394.657	-0.3	0.8	1.0	-0.008	0.020	0.025
92	HL01	TACH	VR01	00000129.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000133.SSF	1010425A	130.797	0.2	-1.6	-0.7	0.015	-0.122	-0.054
93	HL01	TACH	VR02	00000129.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010430A	00000135.SSF	1010425A	184.696	0.5	-0.9	-0.9	0.027	-0.049	-0.049
94	HL01	TACH	TASI	00000129.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000136.SSF	1010425A	237.166	0.1	-0.8	-1.0	0.004	-0.034	-0.042
95	HL01	SHMN	SHJU	00000130.SSF	1010423A	00000024.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	214.898	1.1	-1.3	0.1	0.051	-0.060	0.005

96	HL01	SHMN	SHJU	00000130.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000111.SSF	1010430A	214.898	-0.3	0.7	-0.1	-0.014	0.033	-0.005
97	HL01	SHMN	VR01	00000130.SSF	1010423A	00000049.SSF	1010430A	00000028.SSF	1010425A	340.746	0.1	-0.7	0.2	0.003	-0.021	0.006
98	HL01	SHMN	VR01	00000130.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010425A	00000127.SSF	1010430A	340.746	0.8	0.1	-0.1	0.023	0.003	-0.003
99	HL01	SHMN	VR02	00000130.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	394.657	0.4	0.0	0.0	0.010	0.000	0.000
100	HL01	SHMN	TASI	00000130.SSF	1010423A	00000109.SSF	1010430A	00000030.SSF	1010425A	448.348	0.1	0.1	-0.1	0.002	0.002	-0.002
101	HL01	SHMN	VR02	00000130.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000128.SSF	1010430A	394.657	0.4	-0.6	0.1	0.010	-0.015	0.003
102	HL01	SHMN	TASI	00000130.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010425A	00000129.SSF	1010430A	448.348	0.7	-0.7	0.3	0.016	-0.016	0.007
103	SHJU	VR02	VR01	00000131.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000131.SSF	1010425A	237.114	-1.0	0.0	0.2	-0.042	0.000	0.008
104	SHJU	VR02	HL01	00000131.SSF	1010423A	00000024.SSF	1010430A	00000128.SSF	1010425A	237.309	-1.2	1.3	0.8	-0.051	0.055	0.034
105	SHJU	VR02	TASI	00000131.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000134.SSF	1010425A	291.069	-0.9	0.8	-0.1	-0.031	0.027	-0.003
106	SHJU	VR02	SHMN	00000131.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	395.469	-0.1	-0.5	-0.7	-0.003	-0.013	-0.018
107	SHJU	VR02	VR01	00000131.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010425A	00000112.SSF	1010430A	237.114	0.4	0.1	-0.1	0.017	0.004	-0.004
108	SHJU	VR02	HL01	00000131.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010425A	00000111.SSF	1010430A	237.309	0.6	-1.2	-0.6	0.025	-0.051	-0.025
109	SHJU	VR02	TASI	00000131.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010425A	00000114.SSF	1010430A	291.069	0.4	-0.7	0.3	0.014	-0.024	0.010
110	SHJU	VR02	SHMN	00000131.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000024.SSF	1010430A	395.469	-0.5	0.6	0.8	-0.013	0.015	0.020
111	SHJU	TACH	VR01	00000132.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000133.SSF	1010425A	183.784	-1.2	0.2	-0.3	-0.065	0.011	-0.016
112	SHJU	TACH	HL01	00000132.SSF	1010423A	00000024.SSF	1010430A	00000130.SSF	1010425A	145.679	-1.5	1.5	0.3	-0.103	0.103	0.021
113	SHJU	TACH	VR02	00000132.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010430A	00000135.SSF	1010425A	237.698	-0.9	0.9	-0.5	-0.038	0.038	-0.021
114	SHJU	TACH	TASI	00000132.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000136.SSF	1010425A	290.311	-1.2	1.0	-0.6	-0.041	0.034	-0.021
115	SHJU	TACH	SHMN	00000132.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010430A	00000031.SSF	1010425A	306.062	-0.3	-0.4	-1.2	-0.010	-0.013	-0.039

116	SHJU	SHMN	VR01	00000133.SSF	1010423A	00000017.SSF	1010430A	00000028.SSF	1010425A	341.542	-1.3	1.1	0.7	-0.038	0.032	0.020
117	SHJU	SHMN	VR02	00000133.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010430A	00000029.SSF	1010425A	395.469	-1.0	1.8	0.5	-0.025	0.046	0.013
118	SHJU	SHMN	TASI	00000133.SSF	1010423A	00000028.SSF	1010430A	00000030.SSF	1010425A	449.304	-1.2	1.9	0.4	-0.027	0.042	0.009
119	SHJU	SHMN	VR01	00000133.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010425A	00000112.SSF	1010430A	341.542	0.6	0.0	-0.3	0.018	0.000	-0.009
120	SHJU	SHMN	HL01	00000133.SSF	1010423A	00000110.SSF	1010425A	00000111.SSF	1010430A	214.898	0.9	-1.3	-0.7	0.042	-0.060	-0.033
121	SHJU	SHMN	VR02	00000133.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000113.SSF	1010430A	395.469	0.2	-0.7	-0.1	0.005	-0.018	-0.003
122	SHJU	SHMN	TASI	00000133.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010425A	00000114.SSF	1010430A	449.304	0.6	-0.8	0.2	0.013	-0.018	0.004
123	VR02	TACH	SHJU	00000134.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010430A	00000115.SSF	1010425A	237.698	0.5	-1.1	-0.3	0.021	-0.046	-0.013
124	VR02	TACH	VR01	00000134.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000133.SSF	1010425A	93.112	-0.6	-0.5	-0.3	-0.064	-0.054	-0.032
125	VR02	TACH	HL01	00000134.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010430A	00000130.SSF	1010425A	184.696	-0.8	0.8	0.3	-0.043	0.043	0.016
126	VR02	TACH	TASI	00000134.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010430A	00000136.SSF	1010425A	146.054	-0.6	0.3	-0.6	-0.041	0.021	-0.041
127	VR02	TACH	SHMN	00000134.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010430A	00000031.SSF	1010425A	393.764	0.3	-1.1	-1.2	0.008	-0.028	-0.030
128	VR02	SHMN	SHJU	00000135.SSF	1010423A	00000027.SSF	1010430A	00000024.SSF	1010425A	395.469	0.4	-0.2	0.5	0.010	-0.005	0.013
129	VR02	SHMN	SHJU	00000135.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000113.SSF	1010430A	395.469	-0.4	1.2	-0.4	-0.010	0.030	-0.010
130	VR02	SHMN	VR01	00000135.SSF	1010423A	00000052.SSF	1010430A	00000028.SSF	1010425A	391.612	-0.7	0.4	0.6	-0.018	0.010	0.015
131	VR02	SHMN	VR01	00000135.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010425A	00000131.SSF	1010430A	391.612	0.6	0.6	-0.5	0.015	0.015	-0.013
132	VR02	SHMN	HL01	00000135.SSF	1010423A	00000108.SSF	1010430A	00000027.SSF	1010425A	394.657	-0.8	1.8	1.1	-0.020	0.046	0.028
133	VR02	SHMN	HL01	00000135.SSF	1010423A	00000110.SSF	1010425A	00000128.SSF	1010430A	394.657	0.8	-0.7	-1.0	0.020	-0.018	-0.025
134	VR02	SHMN	TASI	00000135.SSF	1010423A	00000118.SSF	1010430A	00000030.SSF	1010425A	445.788	-0.6	1.2	0.3	-0.013	0.027	0.007
135	VR02	SHMN	TASI	00000135.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010425A	00000134.SSF	1010430A	445.788	0.5	-0.2	-0.1	0.011	-0.004	-0.002

136	TACH	SHMN	SHJU	00000136.SSF	1010423A	00000029.SSF	1010425A	00000115.SSF	1010430A	306.062	-0.2	1.0	0.0	-0.007	0.033	0.000
137	TACH	SHMN	VR01	00000136.SSF	1010423A	00000054.SSF	1010425A	00000133.SSF	1010430A	340.326	0.8	0.4	0.0	0.024	0.012	0.000
138	TACH	SHMN	HL01	00000136.SSF	1010423A	00000110.SSF	1010425A	00000130.SSF	1010430A	305.070	1.1	-0.9	-0.5	0.036	-0.030	-0.016
139	TACH	SHMN	VR02	00000136.SSF	1010423A	00000119.SSF	1010425A	00000135.SSF	1010430A	393.764	0.4	-0.3	0.2	0.010	-0.008	0.005
140	TACH	SHMN	TASI	00000136.SSF	1010423A	00000120.SSF	1010425A	00000136.SSF	1010430A	447.074	0.8	-0.4	0.4	0.018	-0.009	0.009

附錄 5 投稿文章

國土測繪與空間資訊(Taiwan Journal of Geoinformatics)

新一代台灣大地水準面模式：防災、監測、高程現代化之應用

黃金維[1*]　許宏銳[2]　黃啟訓[2]

摘　要

全球定位系統(GPS)已對傳統的測繪產生革命性的變化，GPS 已廣泛使用於防災及環境監測。許多 GPS 應用中，需利用大地水準面模式(Geoid)將橢球高轉為正高。絕大部分的工程應用使用正高系統，而非橢球高系統。本文收集現有的陸地,海洋及空載重力,並分別對陸測及空載資料進行粗差偵測及系統誤差修正。為了填補中央山區陸測重力資料不足的區域,本文提出一套漸進式整合法將空載重力資料與現有重力資料進行有效的整合並重建山區重力訊號。重力法大地起伏模採用以快速傅立葉變換(Fast Fourier Transform, FFT)為基礎的 stokes 積分理論來計算，過程中搭配傳統去除-計算-回復法，長波長分量使用地球重力模型(Earth gravitational model 2008, EGM08)展開至 720 階，短波長分量則考慮殘餘地形模型(Residual Terrain Model, RTM)。新一代大地起伏模型使用七條”觀測”大地起伏來進行精度評估，這些驗證資料分布於七條主要道路的一等水準點上，由位於山區的 central 及 south 兩條檢核線的結果顯示漸進式整合法可以改善至 5 公分以內的精度，混合型大地起伏模型透過整合重力法及觀測大地起伏計算而得，本文所發展的新一代大地起伏模型已廣泛在產官學界應用於橢球高與正高間的轉換，內文中亦有列舉些應用案例，例如光達(Lidar)產製數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、淹水範圍估計及高程現代化。

關鍵字：大地起伏、正高、全球定位系統、重力異常、高程現代化

[1*]教授，國立交通大學土木工程學系教授，TEL: (03)5712121 #54937，E-mail: cheinway@mail.nctu.edu.tw

[2] 博士候選人，國立交通大學土木工程學系

A New Geoid Model of Taiwan：Applications to Hazard Mitigation, Environmental Monitoring and Height Modernization

Cheinway Hwang　Hung-Jui Hsu　　Chi-Hsun Huang

Abstract

The Global Positioning System (GPS) have revolutionized the conventional surveying and mapping practice, and has been used extensively in hazard mitigation and environmental monitoring. For many GPS applications, it is necessary to transform GPS-derived ellipsoidal height to orthometric heights (OHs) with a Geoid model. The OH system, instead of the ellipsoidal height system, is used in most engineering applications. In this paper, existing land, marine and airborne gravity anomalies are collected and processed to remove data outliers and systematic errors. In order to supplement mountainous regions where only few land gravity data exist, a progressive combination method was applied to merge airborne gravity with land gravity and then to reconstruct the gravity signals over mountainous area. The Stokes formula based on the FFT technique was used to compute the geoid model with the standard remove-computation-restore procedure. The latest global gravity model, EGM08, is used as the long wavelength part of the geoid. The residual terrain model (RTM) contributes to the short wavelength part of the geoid. The new geoid model is evaluated using "observed" geoidal heights at Taiwan's first-order leveling benchmarks along 7 major routes. Results of validation along central and south routes show that the progressive combination method improves the accuracy of mountainous geoidal heights by 5cm. A hybrid geoid model is determined by merging GPS-derived and gravimetric geoidal heights. The geoid model is now widely used in Taiwan for ellipsoidal height-orthometric height conversion. Sample applications in Lidar DEM generation, flood estimation, and height modernization are discussed.

Keywords: Geoid, GPS, Gravity Anomaly, Height Modernization, orthometric height

一、前　言

在海洋中，大地水準面(Geoid)為一近似於平均海水面之等位面，而在陸地上，Geoid 則視質量分佈而定。國際大地測量學會(International Association of Geodesy, IAG)成立了 Geoid 的服務組織，稱 International Geoid Service (IGeS, http://www.iges.polimi.it/)，提供計算 Geoid 的資料及軟體，並經常舉辦國際講習班，IAG 的 Commission 2 (gravity field)，推動許多大型跨國 Geoid 計畫，已經完成歐盟、非洲、東南亞、南美等區域之高精度 Geoid。中國大陸則於 2008-2011 年更新現有(於 1999 年完成)之中國大陸 Geoid 模式。日本最新的 Geoid 模式於 2005 年完成 (Kuroishi and Keller, 2005)，美國最新的 Geoid 模式為 GEOID12A model (理論見 Wang et al., 2012; Roman et al., 2009; 最新 Geoid 網格見 http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/)。美國則正推動全國空載重力，預計若干年後完成一新的美國 Geoid 模式。

Geoid 模式受到重視的原因為(1)新的測繪技術需要 Geoid (2)測繪資料在防災及環境監測之重要性日增。新的測繪科技包括 GPS、Lidar、及 InSAR 等。測繪科技用於防災及監測之例子如 GPS 監測邊坡滑動及地層下陷(Hwang et al., 2008)、GPS 監測大樓震動及沉陷、Lidar 監測大規模邊坡變動及大範圍地層下陷、Lidar 監測海岸線變遷等。新測繪科技應用中，Geoid 扮演重要角色。例如，以 GPS 高控法航測製作 DEM 及 Lidar 方法製作 DEM 時，需要高精度的 Geoid 以推求正高。又如，GPS 水準測量中，需要 Geoid 將橢球高轉為正高。Geoid 在地球物理及板塊理論亦有重要的應用。

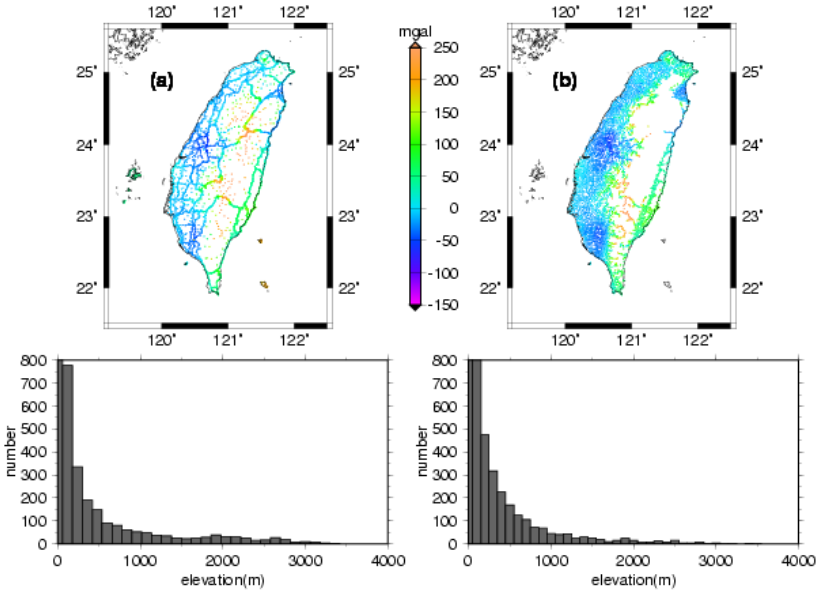
過去(2007 年前)的 Taiwan Geoid 模式(e.g., Hwang et al., 2007)，因資料的密度及精度的增加而逐年改善。Geoid 精度與重力密度及高程相關，在平地約為數公分，在山區(高程>2000m)約為 10-20 公分。然而由於缺乏全面的 Geoid 精度檢核資料，正確的 Geoid 精度與空間的關係無法知悉。最近(自 2002 年起算)，由於國際上的若干重要的衛星重力任務 CHAMP(http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html) 及 GRACE(http://www.csr.utexas.edu/grace/)任務發射，及 2008 年發射的 GOCE (http://www.esa.int/esaLP/ESABQK1VMOC_LPgoce_0.html)任務，大幅提昇 Geoid 的長波長基準。而台灣附近(含離島)的空載、船載、陸測重力，在其空間密度及精度已大幅改善。本文已收集全台灣目前最新的重力資料並對所有資料進行編輯，然後整合所有不同類型重力資料,最後建立台灣目前最新的大地起伏模式，此模式已廣泛被 Lidar、GPS 水準測量、高程現代化發展及其他測繪單位所使用。

二、重力資料

(一)陸測重力資料

現有的陸測重力點為臺灣近二十年來(1980~2006)，由中央研究院 (Yen et al., 1990; Yen et al., 1995) 、中國測量工程學會 (黃金維等，1998) 和內政部國

土測繪中心 (黃金維，2001；陳春盛，2003) 等單位所蒐集，本文依資料蒐集的時間將陸測重力資料區分為兩組，其中一組為 1980~2003 年期間所蒐集的資料，由於此組資料包含不同時期所蒐集的資料，存在系統性的偏差與坐標系統不一致的問題，因此透過嚴密的資料處理及編輯不僅將明顯的粗差去除，所有重力異常資料皆轉換至同一坐標系統且相對於 Geodetic Reference System 1980 (GRS80) (Moritz, 1980b)，共 3641 點重力觀測值，分布如圖 1 (a)所示。另外一組為內政部委託中興測量公司於 2004~2006 年間辦理的臺灣一、二等重力測量，重力異常資料相對於 GRS80 系統，分布如(圖 1 (b))所示，使用的儀器為 Graviton EG 、CG-5 相對重力儀。由於此組不僅資料數據龐大，是一重力觀測量超過一萬筆以上的重力網，且受到部分施測區域為山區及丘陵的限制，資料品質不易維護，因而本文採用 Hwang et al. (2002)提出的加權約制重力網平差來重新偵測並剔除可能存在的粗差並進行重力精度評估，細節將於 2.1.1.1~2.1.1.4 小節討論之。



(a) (b)

圖 1 (a)陸測重力點位分佈圖(1980~2003)； (b)陸測重力點位分佈圖(2004~2006)

1.重力網平差

內政部委託中興測量公司於 2004~2006 年間辦理台灣一、二等重力測量，其中一等重力點採均勻分布成網格狀且須附合於已知點，不像以往內政部所辦理之一等水準點上實施重力測量工作，完全分布在道路線狀，一等點間平均距離約 3km~5km，為配合一等重力網必須附合於已知重力網之前題下，依已知重力點的分布情形將台灣地區大致分成數個區域。而規劃原則依公路路線採由外向內包圍的方式進行，即由平原區（如省道一號公路以西地區）至丘陵區（如省道一號公路至省道三號公路地區）再至山區（如省道三號公路以東地區）的方式，陸續完成分區內各測點之一等重力觀測作業，總計共規劃 241 條測線。

二等重力點之觀測方式與一等重力網相同，二等重力網必須附合於一等重力

網點位上，均採均勻分布成網格狀為觀測原則。二等重力點之點位分佈比一等重力點密集，亦即會有更多的節點，平均約 1.5km~2km 即有一重力點。亦規劃依公路路線採由外向內包圍的方式進行，亦即由平原區至丘陵區再至山區的方式，陸續完成分區內各測點之二等重力觀測作業，總計共規劃 1302 條測線。使用的儀器為 L&R Graviton EG 、Scintrex CG-5 相對重力儀及 FG5 絕對重力儀。

(1)相對重力觀測方程式組成

在進行平差計算時，將原始相對重力觀測值為儀器讀數(z)，經過初步的化算、率定函數、儀器漂移改正及其他環境因素的改正(Torge, 198) 後，組成之觀測方程式如下：

$$l(t)+v=g+N_0+\Delta F(z)+D(t)$$

(1)

其中 t 為觀測時間；$l(t)$ 為約化後之重力觀測值；v 為 $l(t)$ 的殘差；g 為重力值；N_0 為儀器基準(constant bias)；$\Delta F(z)$ 為率定函數；z 為重力儀讀數；單位為計數器單位(CU)；$D(t)$ 為重力儀漂移函數。(1)式中的 $\Delta F(z)$ 及 $D(t)$ 為重力儀器的系統誤差，可以數學模式來模擬，本文中的 $\Delta F(z)$ 使用的數學模型為(Torge, 1989)):

$$\Delta F(z)=\sum_{k=1}^{m}\tilde{Y}_k\tilde{z}^k+\sum_{l=1}^{n}(\tilde{x}_l\cos\omega_l\tilde{z}+\tilde{y}_l\sin\omega_l\tilde{z})$$

(2)

其中 $\tilde{Y}_k,\tilde{x}_l,\tilde{y}_l$ 即為使用者所要改正的係數，ω_l 為讀數的頻率，m,n 趨近於無限大。此外，重力儀的漂移函數可透過多項式擬合:

$$D(t)=\sum_{p=1}^{s}d_p(t-t_0)^p$$

(3)

其中 t_0 為初始時間；s 為多項式的階數，視重力儀特性而定，一般很少超過 2。按(1)式則兩站 i，j 約化後的重力觀測值($\Delta l_{i,j}$)為:

$$\Delta l_{i,j}+v_{i,j}=g_j-g_i+(\Delta F(z_j)-\Delta F(z_i))+(D(t_j)-D(t_i))$$

(4)

其中 $v_{i,j}$ 為 $\Delta l_{i,j}=l_j-l_i$ 的殘差；t_i,t_j 為其觀測時間。(2)式中，儀器基準 N_0 因相減而消除。若有 n 個觀測量，則觀測方程式矩陣可表示為:

$$L^b+V=AX$$

(5)

其中 L^b 為觀測量向量，矩陣大小為 $n+1$；V 為殘差向量，矩陣大小為 $n\times1$；A 為設計矩陣；X 為未知數向量，矩陣大小為 $u\times1$，未知數可能包含重力值 g_i、重力儀率定參數 $\tilde{Y}_k,\tilde{x}_l,\tilde{y}_l$ 及漂移率參數 d_p。

(2)加權約制平差

重力網平差過程中，通常會選定一個或一個以上的固定點做為平差時的控制點，以確保所有的未知點位皆位於同一基準上。加權約制平差之計算模式，是平差前能給控制點一個先驗變方，也就是給控制點一個適當的權值，用來控制平差過程中控制點的誤差量。加權約制平差的數學模式為:

$$L_1^a = F_1(X^a)$$
$$L_X = X^a$$

(6)

設 L_1^b 為 L_1^a 之觀測量，L_2^b 為控制點之值(即 L_X)，利用(6)式，以 L_1^b 和 L_2^b 組成之觀測方程式為:

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \hat{X}^a - \begin{bmatrix} L_1^b \\ L_2^b \end{bmatrix}$$

(7)

其中 $\hat{X}^a = \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix}$，$\hat{X}_1$ 代表其他未知參數的向量，$\hat{X}_2$ 為約制用控制點未知參數之向量，$A_1 = \dfrac{\partial F_1}{\partial X^a}, A_2 = \dfrac{\partial L_X}{\partial X^a}$。重力觀測之權矩陣為 $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_X \end{bmatrix}$，其中 P_l 為觀測量之權值，P_X 為約制用控制點值之權值。利用最小二乘法求解出未知參數之估值 $\hat{X}^a$ 為:

$$\hat{X}^a = \left(A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_X A_2\right)^{-1}\left(A_1^T P_1 L_1^b + A_2^T P_X L_2^b\right)$$

(8)

後驗單位權中誤差為:

$$\hat{\sigma}_0 = \pm\sqrt{\frac{\bar{V}^T P \bar{V}}{n-u+r}}$$

(9)

其中 n 為觀測次數，u 為未知參數的個數，r 為控制點的數目。經誤差傳播得未知參數 $\hat{X}^a$ 之變方-協變方矩陣(variance-covariance matrix)為:

$$\sum_{\hat{X}^a} = \sigma_0^{\,2}(A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_X A_2)^{-1}$$

(10)

其中 σ_0 為先驗單位權中誤差。$\hat{X}^a$ 之後驗變方-協變方矩陣為:

$$\hat{\Sigma}_{x_a} = \hat{\sigma}_0^2 (A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_x A_2)^{-1}$$

(11)

(3)平差模式之整體測試 (Global Model Test)及重力觀測值的粗差偵測

當重力觀測粗差存在於資料中時，是無法以平差的方式來改正，此時所得之平差結果必會不正確。再者，若所使用的數學模式及隨機模式不正確亦會得到錯誤的平差結果。根據下列之條件式，若成立則表示所用之模式是正確且完整的。

$$\chi^2 = \frac{m\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < \chi_c^2(1-\alpha, m)$$

(12)

其中 $\sigma_0^2, \hat{\sigma}_0^2$ 分別為先驗、後驗單位權變方，m 為平差之自由度、$\chi_c^2(1-\alpha, m)$ 為當信心水平為 $(1-\alpha)$，自由度為 m 時之 χ^2 分佈之臨界值。反之，若(12)式不成立即表示:

a. 有粗差存在於重力資料中：檢核所有觀測資料並藉由粗差偵錯之測試進行資料之偵錯及剔除。
b. 數學模式不適當：須針對所使用之模式加以分析並重新修正。
c. 所用之權值不正確：檢核是否有差一個尺度之關係。
d. 先驗權值 $\sigma_0{}^2$ 估計不當。

臨界值 $\chi_c^2(1-\alpha, m)$ 可以近似公式計算(Koch, 1987):

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

(13)

$$x_{1-\alpha} = t - \frac{2.515517 + 0.802853t + 0.010328t^2}{1 + 1.432788t + 0.189269t^2 + 0.001308t^3}, \qquad t = [2\ln(1/\alpha)]^{1/2}$$

(14)

粗差偵側有很多個方法，如 Baarda's Data Snooping 方法、 Pope's τ-Test 方法)等，本文偵錯方式乃採用 Pope's τ-Test 方法，使用此法時需計算殘差之協變方矩陣，加權約制法解算的法方程式如下。首先令 $\overline{N} = A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_X A_2$，$z = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 \end{bmatrix}^T$，則(7)式可表示為：

$$z = [\overline{N}^{-1}(A_1^T P_1 \quad A_2^T P_X) - I]\begin{bmatrix} L_1^b \\ L_2^b \end{bmatrix} = G\begin{bmatrix} L_1^b \\ L_2^b \end{bmatrix}$$

(15)

經誤差傳播即可得殘差之協變方矩陣

$$\sum_z = \hat{\sigma}_0^2 G \begin{bmatrix} P_1^{-1} & 0 \\ 0 & P_X^{-1} \end{bmatrix} G^T = \hat{\sigma}_0^2 \begin{bmatrix} P_1^{-1} - A_1 \bar{N}^{-1} A_1^T & -A_1 \bar{N}^{-1} A_2^T \\ -A_2 \bar{N}^{-1} A_1^T & P_X^{-1} - A_2 \bar{N}^{-1} A_2^T \end{bmatrix}$$

(16)

令 v_i 為第 i 個觀測量之殘差，由 $\sum_z$ 之對角元素開方即可求得 v_i 之標準偏差 σ_{v_i} 。若

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

(17)

則第 i 個觀測量即為粗差。(17)式中 n 為觀測量之數目，τ_c 為當信心水平為 $(1-\alpha/n)$，平差之自由度為1及 m 時之臨界值。平差時若以加權約制解算，則(17)是可測試其約制之值是否合理。若(17)式成立則該觀測量應於資料中剔除再做計算。當殘差之協變方矩陣不易計算且重力觀測量之間彼此為不相關時，可採用下列近似公式：

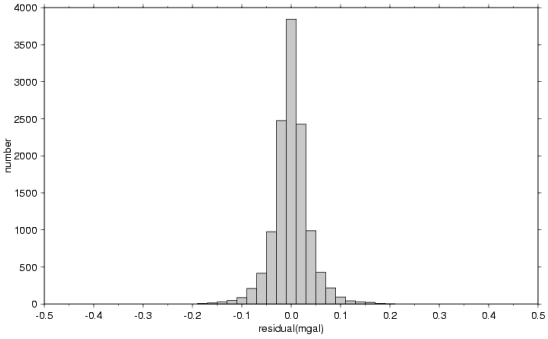
$$\sigma_{v_i} \approx \sqrt{\frac{n-u}{n}} \times \frac{\hat{\sigma}_0}{\sqrt{P_i}}$$

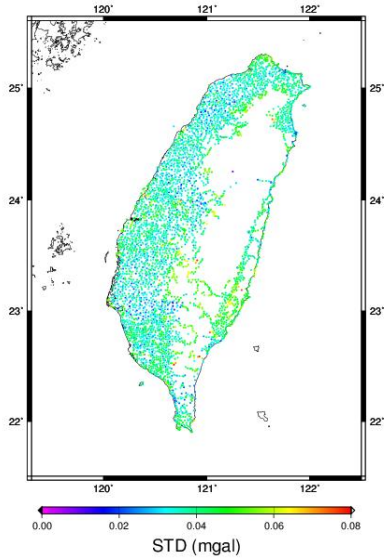
(18)

P_i 為第 i 個觀測量之權值。

(4)成果分析

一、二等相對重力測量的原始觀測數據共有 12435 筆資料，其中約制 11 個已知重力點，反覆進行重力網平差及粗差偵測，移除其中 67 筆測試粗差，最後通過整體測試(Global Model Test) (Hwang et al., 2002)的平差後未知重力點共有 4356 筆，儀器精度估值為 0.0489 mGal，觀測量殘差分布符合常態分布(如圖 2(a)所示)，其最大值、最小值分別為 0.197 mGal 與-0.186 mGal，標準偏差為 0.036mGal。圖 2(b)顯示平差後各未知重力點之中誤差分布圖，其最大值、最小值分別為 0.099 mGal 與 0.003 mGal，均方根為 0.039mGal。





(a) (b)

圖 2 (a)相對重力觀測量殘差之統計直方圖 (b) 未知重力點之中誤差分布圖

(二)船測重力資料

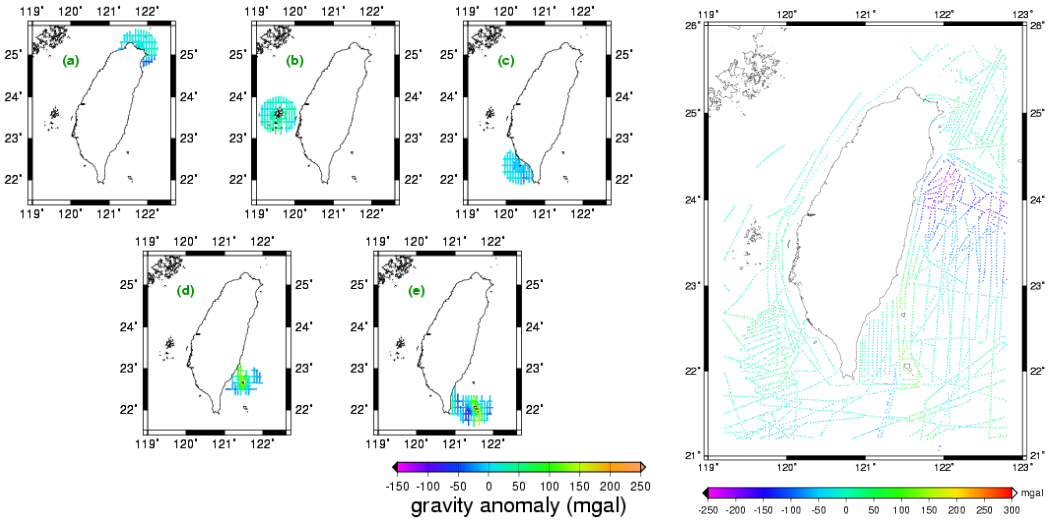
1.近岸船載重力測量

臺灣本島目前是使用以基隆為起算原點的高程系統(TWVD2001)，然而各離島之高程基準則因海域的阻隔均為各自獨立之區域性高程系統，為了改善各離島周圍的大地起伏模型精度進而解決臺灣本島與離島間的高程系統不一致的問題，內政部國土測繪中心於 92 年開始於本島沿岸及離島周圍如基隆、澎湖、小琉球、綠島及蘭嶼進行船載重力測量，如圖 3(a)所示，儀器為 L&R Air-Sea Ⅱ(LCR, 2003)、ZLS Dynamic Gravity Meter，取樣頻率為 1Hz，為了蒐集近岸的重力資料，使用噸數較小的漁船，卻因小型載具易於受到海浪的影響使得重力資料產生噪聲誤差，因而使用罩窗寬度約 120-150 秒之高斯濾波器來消除高頻訊號誤差，使得沿軌跡之空間解析度下降至約 500 公尺。此外，為了提升重力資料的精度，對每一航次進行編輯，將各條航線轉彎處資料拿掉，並使用 linear drift model (Hwang and Parsons, 1995)來吸收交叉點誤差並組成觀測方程式，再利用最小二乘法求解進而改善每一條航線的船測重力精度。

2.臺灣環海船載重力測量

本組重力資料為臺灣環海船載重力資料(如圖 3(b))，主要是取自美國國家地球物理資料中心(National Geophysical Data Center, NGDC) 所下載之船測重力資料，由於資料皆為 1990 年前所蒐集，GPS 定位技術甚差，因而本文以衛星測高資料計算得之海洋重力修正此船測重力資料(Hwang and Parsons, 1996)，修正時假設船測重力系統誤差為時間的線性函數，並以最小二乘法解算每一航次的參數來修正該航次蒐集的重力。而較為靠近岸邊的船測重力資料主要取自中央大學於 1996 年使用 R/Vl' Atalante KSS30 船載重力儀所蒐集之重力資料(Hsu et al., 1998)，

經篩選後共約 4014 點。經交叉點平差後，R/Vl' Atalante KSS30 資料的交叉點差值的標準偏差為 2.6 mGal，全部船測資料則為 11.2 mGal。



(a) (b)

圖 3 (a)近岸船載重力資料分佈圖；(b)臺灣環海船載重力資料分佈圖

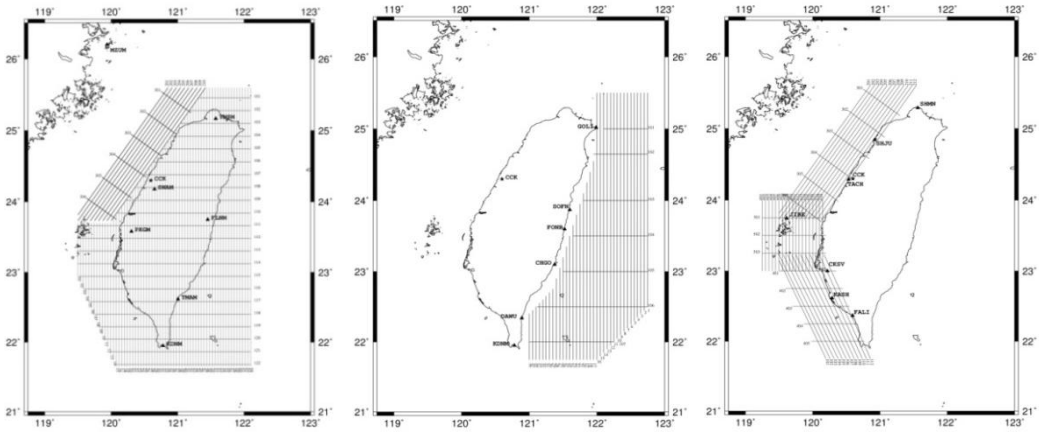
(三)空載重力資料

臺灣本島為地勢狹長且崎嶇複雜的地形，四周環海，且境內超過 70%為高山或丘陵所覆蓋，尤以中央山脈超過三千多公尺之地勢為最，自由空間重力異常最高可達 450mGal，臺灣東部海域地形構造較為複雜且為斷層帶交接處，自由空間重力異常驟降至-250mGal，為臺灣附近重力變化較大的區域，此外還有黑潮經過此區域。臺灣海峽為典型的淺水區域，船測重力資料較為稀少，過去皆以測高重力為主要的重力資料來源，然而此區域的地形較淺，海潮、濕對流層參數無法精確估計(Hwang and Hsu, 2008)，測高波形容易受到複雜地形及近岸陸地的干擾導致測距精度不佳(Deng, 2003)。受限於此地理環境，重力測量工作難以在山區、部分海域及海陸交接處實行，導致重力資料分布不均，因而內政部於 2004~2009 年辦理 3 次空載重力測量工作 (Hwang et al., 2012)，分別為(a) Campaign 1 (island-wide over Taiwan): 平均高度為 5156m，(b) Campaign 2 (Kuroshio Current): 平均高度為 1620m，(c) Campaign 3 (Taiwan Strait and South China Sea): 平均高度為 1620m，如圖 4 所示，並由交通大學執行之。

Campaign 1 已於 2005 年 5 月結案(黃金維，2005)。從 2004 的 7 月 6 日第一次施測起，至 2005 年 3 月 21 日為止，共進行了 43 個測量工作天，總時數將近 200 小時，儀器為 L&R Air-Sea Ⅱ(LCR, 2003)。施測航線圖如圖 4(a)，北向航線共 64 條、航線間隔 4.5 公里；東西向航線共 22 條、航線間隔 20 公里；東北-西南向航線共 10 條、航線間隔 5 公里；西北-東南向航線共 6 條、航線間隔 30 公里。測量之航高為 16000 英尺，即約 5156 公尺；航速為每小時 160 海浬，約每小時 306 公里。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 306 km/hr，約每 85 公尺測得一筆重力值，並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

Campaign 2 主要的測量區域為臺灣東部海域，該海域有地球重要的洋流「黑潮」經過，藉由空載重力測量的方式，取得黑潮流域的重力資料，則有助決定黑潮區域之大地水準面，且若能結合衛星測高資料，則可用於決定黑潮之平均海流與季節、跨年變化，並可作為臺灣本島及離島高程基準聯測之重要數據。自 2006 年 3 月 6 日第一次施測起，至 2008 年 8 月初為止，因內政部所提供之飛機故障維修、重力儀儀器調度及天候影響等因素，經展期三次，始完成約 30 個空載外業測量工作天，飛行總時數約 130 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。施測航線圖如圖 4(b)，南北向航線共 36 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 7 條、航線間隔 60 公里。考慮到地形起伏、施測精度、施測時間、飛航安全等因素，飛行航高定為 1620 公尺(5000 英呎)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值，並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

Campaign 3 測量區域為臺灣西部海域與東沙群島，除了可補足西部沿岸的重力資料，其成果對於臺灣西部海域大陸棚的研究亦有所貢獻。外業測量工作時程始於 2008 年 12 月 9 日至 2008 年 9 月 13 止，共 27 個工作天，飛行總時數約 115 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。規劃之航線圖如圖 4(c)，南北向航線共 54 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 15 條、航線間隔 25 公里。飛行航高定為 1620 公尺(5000 英呎)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。



(a) (b) (c)

圖 4 (a) Campaign 1 ；(b) Campaign 2 ；(c) Campaign 3

空載重力資料含有諸多系統誤差，如 $E\ddot{v}oto\ddot{v}$ 效應所造成的誤差、重力儀的漂移誤差、重力基準誤差、重力參考場的不一致等(Wessel and Watts, 1988)。為了減少測量時產生的系統誤差，發展交叉點平差法模式化每條航線重力異常的偏差值(Bias)及漂移值(Drift)，雖然成功吸收了部分的系統誤差，然而沿著測線的重力訊號依然存在著帶狀的系統誤差(如圖 5)，造成的原因可能是交叉點太少導致多餘觀測量不足，使得無法非常有效的估計系統誤差(Hwang et al., 2007)。以 Campaign 1 其中一條測線為例，然後將一測高重力網格向上延續至空載資料的高度並內插出相對於空載重力位置的重力異常。向上延續的公式如下:

$$G(u,v)\big|_{z=h} = e^{-2\pi f_r} G(u,v)\big|_{z=0}$$

(19)

其中 $f_r = \sqrt{u^2+v^2}$ 為徑向頻率(Radial Frequency)，$G(u,v)|_{z=h}$ 和 $G(u,v)|_{z=0}$ 分別為重力在 h 高度及海水面上的傅立葉變換，為了修正此偏移量，假設其誤差來源皆由儀器漂移、基站、基準偏移所造成，再假設空載重力系統誤差為時間的二次多項式， 公式如下:

$$\delta g = d_0 + d_1 t + d_2 t^2$$

(20)

其中 d_0 為常差(bias)，t 為自某一參考時刻起算之時間。然後利用最小二乘法求解後，再以平差後的差值來改正原有的空載重力。利用(20)式擬合空載重力和測高重力的差值，經平差後，獲得 d_0、d_1 及 d_2 等係數分別為 3.347、-0.215 及 0.017，且空載重力和測高重力差值的平均值和標準差從平差前的 4.368 和 2.795mGal 降到平差後的 0.000 和 2.048mGal。

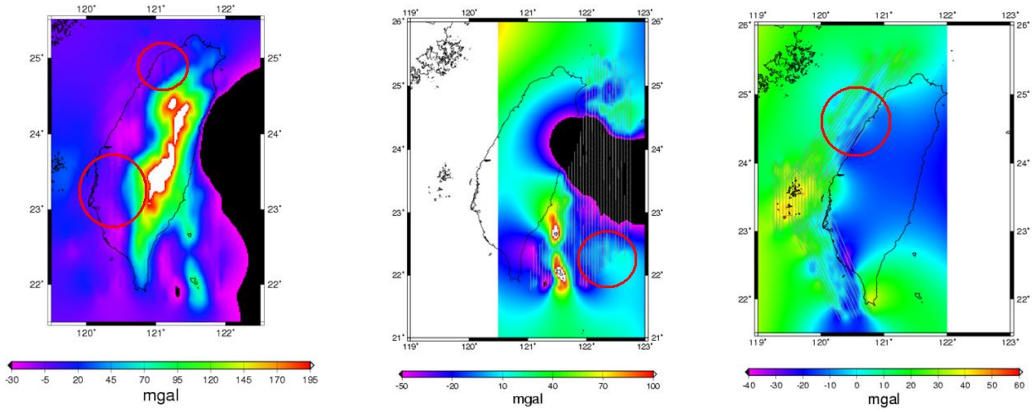
為了後續的重力整合，本文使用向下延續方法(Downward Continuation)搭配去除回復法將空載重力異常資料約化至海平面上(Hsiao and Hwang, 2011)，向下延續法的公式如下:

$$G(u,v)\big|_{z=0} = e^{2\pi h f_r} S_G(f_r) G(u,v)\big|_{z=h}$$

(21)

其中 $S_G(f_r)$： 高斯濾波。

由於向下延續法是一種不穩定的處理過程，可能過度放大訊號的雜訊，尤其是中高頻的部分，因而在執行向下延續法之前，先移除參考重力場之長波長重力分量及由地形資料計算而得之短波長重力分量，再將此殘餘重力異常透過公式(21)向下延續至海平面，最後再將海平面之長短波長之重力分量回復之。地形重力效應是使用 Gaussian quadrature 逐點計算其重力效應 (Hwang et al., 2003)。Hsiao and Hwang (2011)認為地形重力效應的考量於向下延續的應用中，只有在地勢變化較大的區域才有明顯的效果，海面上之空載重力應用此法進行向下延續反而有可能會使結果變差，因此本文只有橫跨臺灣中央山脈的 Campaign 1 在其向下延續時才有考慮地形重力效應，然而，測區幾乎在海平面上的 Campaign 2 及 Campaign 3 在其向下延續時則並沒有考慮地形重力效應。



(a) (b) (c)

圖 5 平差處理後的空載重力網格 (a) Campaign 1 (b) Campaign 2(c) Campaign 3

(四)測高重力資料

為了填補海上及沿岸船載重力資料之不足，本節發展多測高數據反演臺灣附近測高海洋重力異常模型，並比較幾種不同波形重定技術，試圖找出此區域最理想之波形重定演算法(retracker)來改善沿岸因波形不佳導致測距精度不良的情形。測高數據分為重複週期與非重覆週期數據兩類，重複週期資料包括 Geosat/ERM、ERS–1/35d(1.5-year mean)、ERS–2/35d(2-year mean)和 T/P(5.6-year mean)，並將其週期資料進行平均以減少其噪聲誤差及時變效應，處理細節詳見(Hwang et al., 2006)，而非重複週期資料則為 retracked-Geosat/GM 和 retracked-ERS–1/GM 測高數據。為了決定臺灣附近最理想的波形重定演算法，比較 Sub-Waveform Threshold (Yang et al., 2011)、threshold and beta-5 等波形重定演算法，並採用 Yang et al.(2011)所提出的沿軌跡海水面高差異的標準偏差(Standard Deviations of Differenced SSHs)當作選取指標來評估此研究區最理想的波形重定演算法，以門檻值為 0.2 的 sub-waveform threshold retracker (Yang et al., 2011)為臺灣附近最理

想之波形重定演算法。

本文使用 Inverse Vening Meinesz (IVM) formula (Hwang, 1998) 搭配去除回復法(Remove-Compute-Restore Procedure)來進行 2'×2' 測高海洋重力異常的計算，以 NCTUA 表示(如圖 6 所示)。使用的參考重力場為 EGM08 展開至 2190 階(Pavlis et al., 2012)。重力反演的程序是先將 10HZ retraced-Geosat/GM 及 20HZ retraced-ERS-1/GM 之測高觀測數據進行多項式擬合成 2Hz 資料來提高單點精度及計算的效率，取樣的細節可參考 Hwang et al. (2006)，並將所有沿軌跡之海水面高做大地梯度計算，再將其組成南北、東西垂線偏差分量來進行測高海洋重力異常的反演。使用 Hsu et al. (1998) 所收集的船測重力資料來進行精度評估，結果顯示 NCTUA 的精度與 Sandwell V18.1 (Sandwell and Smith, 2009)及 DNSC08 (Anderson et al., 2009) 全球重力異常網格精度相當。

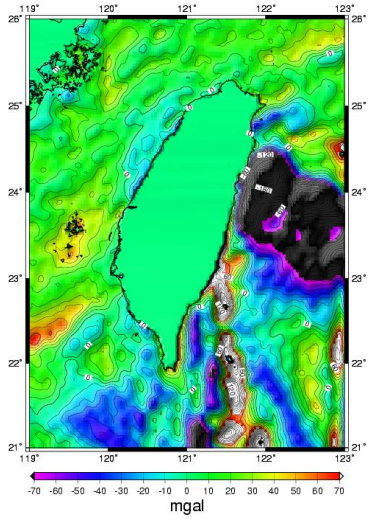


圖 6　測高海洋重力異常圖

三、GPS/Leveling 資料

目前內政部提供在 north、central、south、east 4 條有 24 小時觀測 GPS 的一等水準點，可用為 Geoid 精度評估之用。然而此 4 條水準線並不足以代表台灣全區。考量到現有 GPS/Leveling 資料幾何上的分佈，沿著一等水準路線另外蒐集東南部地區 15 點（南迴公路、台 9 線，Tai9）、西北部地區 20 點(台 3 線，Tai3)及中部地區 15 點(台 18 線，Tai18)的水準點進行 24 小時的 GPS 測量，如圖 7 所示，以作為評估 Geoid 精度之用。再者，若實測大地起伏精度佳，空間密度夠，則可與重力大地起伏合併，而得一混合型(Hybrid) Geoid。若實測大地起伏中，其 GPS 系統與 ITRF 系統一致，則此混合型大地起伏之座標系統自動為 ITRF 系統，而其對應之高程基準與台灣之高程基準(TWVD2001)一致。

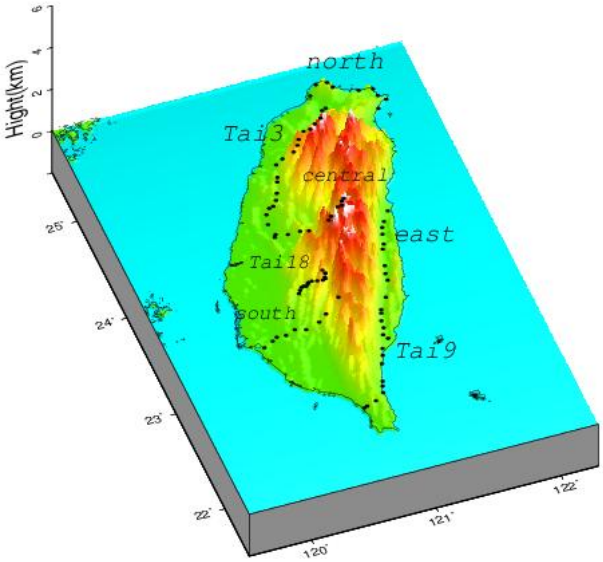


圖 7 大地起伏檢核路線分佈圖

新蒐集的幾條檢核線之 GPS 測量考慮現場透空條件，於透空條件較差的水準點附近進行偏心觀測，尋找透空良好之轉點來穩定 GPS 測量的精度，之後再以水準測量所得到的正高差來當做橢球高差進行高差修正以便得到水準點位上的橢球高，然而如果選擇的轉點距離太遠，則需考慮兩點間大地起伏高差的影響，此處使用 EGM08 展開至 360 之大地起伏模型來計算，公式如下:

$$h_{BM} = h_{ref} + \Delta h_{gps}$$

(22)

$$\Delta h_{gps} = \Delta H_{level} + \Delta N$$

(23)

其中 ΔN 為兩點間的大地起伏高差，ΔH_{level} 為兩點間的水準正高差，Δh_{ref} 為轉點的橢球高。

由於台灣位於板塊交界處，地殼活動頻繁、雲林區域超抽地下水等因素造成某些區域存在速度場變化的問題，尤其是雲林區域及與板塊交接處最為接近的東南區域存在每年變化數公分的情形(如圖 8 所示)，因此本文所蒐集的 GPS/Leveling 資料亦有考慮水準點速度場變化的修正量 (Ching et al., 2011)。

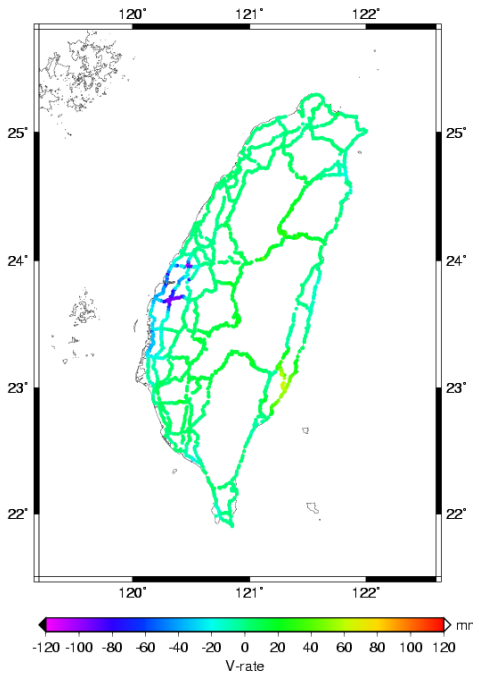


圖 8 台灣一等水準點的垂直速度場變化，2000-2008 (mm/year)

四、重力整合

本文的重力整合策略為事先將所有重力資料分為兩組，其中一組為 包含陸測重力、船測重力、向下延續至海水面之 1500 公尺航高東西部空載重力(campaign 2&3)及測高重力資料，此組資料被稱做 Data A ，如圖 9 所示，另外一組為向下延續至海水面之 5000 公尺航高空載重力資料，並將此組資料根據其對應臺灣地形高度分類成四組資料，對應的地形高度分別為 0-1km、1-2km、2-3km 及 3-4km，其中僅使用對應地形高度超過 1km 以上的空載重力資料，此組資料被稱做 Data B。如此分類的想法是基於考慮 5000 公尺航高空載重力主要是貢獻於重力資料稀少之中央山脈區域，然而其任務涵蓋範圍涉及臺灣全島，為了避免於所有重力資料整合過程中，平地區域之頻帶限制(band-limited)的空載重力資料降低高精度的陸測重力資料，因而採用 ”漸進式整合法(progressive combination)” 將 Data A 與 Data B 進行整合來提升山區大地起伏模型精度。本文主要根據上述的 Data A 及 Data B 兩組資料進行漸進式整合，並且分別測試了四個階段不同重力資料的整合，如下所示:

階段一：使用最小二乘配置法將 Data A 進行網格化，其中假設測高重力網格與向下延續至海水面的空載重力網格為點資料，此外，由於 Data A 包含各種不同空間解析度與精度的重力資料，為了消除各種資料間的不一致性，簡單的採用 GMT 軟體(Wessel and Smith, 1998)所提供的 “blockmedian” 演算法來處理每單一網格內不同的重力資料。最小二乘配置法公式如下所示(Moritz, 1980a)：

$$\Delta\hat{g} = C_{\Delta\hat{g}\Delta g}\left(C_{\Delta g\Delta g} + D\right)^{-1}\Delta g$$

(24)

其中 $\Delta\hat{g}$ 和 Δg 分別為預估值及觀測值的向量。$C_{\Delta g\Delta g}$ 為觀測值間的協變方矩陣，$C_{\Delta\hat{g}\Delta g}$ 為預估值與觀測值之協變方矩陣，D 為觀測值誤差量之間的協變方矩陣. 在此階段中，假設陸測、船測、測高及空載重力資料的精度分別為 0.1, 1.0, 5.0, and 3.0。採用的異常階數變方(anomaly degree variance)為結合 EGM08 模型與 Tscherning and Rapp (1974)所發展的異常階數變方，其中低階的部分為 EGM08 模型展開至 360 階，高階部分為 Tscherning and Rapp (1974)所發展的 T/R 模型裡的模型四。

階段二：整合前，事先將階段一的結果輸出成點資料，然後採用簡單的直接整合法將階段一的結果與對應於地形高度 1-2km 變化的 5000 公尺航高空載重力資料進行整合，如圖 10(b)所示，之後再一次的使用 bockmedian 演算法將兩組資料進行濾波處理，最後再透過最小二乘法配置法進行網格化。

階段三：此組所使用的方法與階段二類似，不同的地方為透過整合輸出成點資料的階段二與對應於地形高度 2-3km 變化的 5000 公尺航高空載重力資料，如圖 10(c)，進行整合。

階段四：此組所使用的方法與階段三類似，不同的地方為透過整合輸出成點資料的階段三與對應於地形高度 3-4km 變化的 5000 公尺航高空載重力資料，圖 10(d)，進行整合。

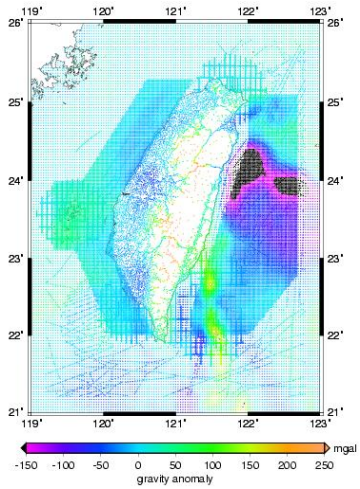
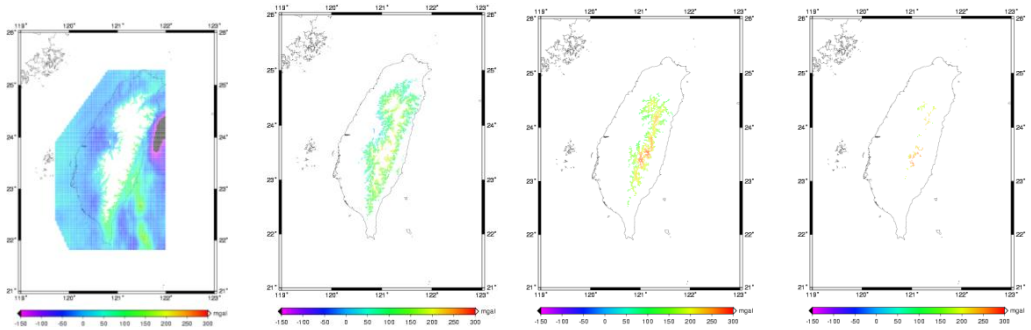


圖 9　Data A 的分布



(a) (b) (c) (d)

圖 10 5000 公尺航高空載重力資料(Data B)對應於地形高度變化的分布情形 (a) 0 km < E < 1km, (b) 1 km < E < 2km, (c) 2 km < E < 3km and (d) 3 km < E < 4km

五、大地起伏計算

由於整合後之重力異常為網格資料，考慮大地起伏模式的計算效率，使用以 FFT 為基礎的 Stokes 公式來計算大地起伏模式，使用的 FFT 方法參考，Hwang et al. (2007)，Hsiao and Hwang (2011)及 Featherstone et al. (1998)。使用 Stokes 積分搭配去除回復法分別將上述四組重力模型進行重力法大地起伏的計算，長波長分量使用 EGM08 模型展開至 720 階，短波長分量則考慮 RTM (Forsberg, 1984)。最後透過七條檢核線進行重力法大地起伏模型的精度評估，表 1 為 4 個不同階段之重力法大地起伏模型與七條檢核線差異的標準偏差，GPS 大地起伏由橢球高減去正高求得。結果顯示隨著整合對應地形高度由低至高的空載資料(圖 10(b)-(c))，不僅於七條檢核線上皆有改善，更成功的改善中橫檢核線(Central)的大地起伏精度至 2 公分。

表1 四個不同階段之重力大地起伏模型與七條檢核線GPS大地起伏的差異量之標準偏差，單位:公尺

	north	east	central	south	Tai3	Tai9	Tai18
階段 1	0.038	0.102	0.130	0.199	0.043	0.153	0.183
階段 2	0.019	0.079	0.063	0.125	0.031	0.105	0.131
階段 3	0.016	0.074	0.020	0.038	0.039	0.098	0.082
階段 4	0.015	0.070	0.020	0.036	0.039	0.097	0.080

六、臺灣混合型 (HYBRID) 大地起伏模型

為了於高程現代化的應用中提供 Global Navigation Satellite System (GNSS) 使用者具信賴的 Geoid 模型來進行橢球高與正高的高程轉換介面，解決重力法大地起伏模型與觀測法大地起伏(GPS/leveling)之系統性的偏移量，吾人利用除了上述的七條檢核線外，還包含內政部所提供之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料，共約兩千點觀測法大地起伏來進行系統性偏移的修正。具體做法為透過這

些觀測法大地起伏的平面位置資訊內差出重力法大地起伏的值，將相對應位置上的所有觀測法大地起伏值與重力法大地起伏值相減，並透過 GMT 軟體中的”surface” 指令將此差異量製作成一網格資料，以此網格資料修正至原重力法大地起伏模型，稱此模型為混合型 (Hybrid) 大地起伏模型，此模型是將階段 4 的結果與所有 GPS/Leveling 資料進行整合，檢核成果如表 2，此表說明此模型的精度。然而，由於 GPS/Leveling 資料分布不夠均勻，因而可能於網格化時產生系統誤差。

表 2 混合型大地起伏與 GPS 大地起伏**的**差異量**統計**(單位:公尺)

Leveling route	Max	Min	Mean	Std dev
north	0.037	0.001	0.015	0.011
east	0.073	0.000	0.028	0.029
central	0.024	0.001	0.010	0.009
south	-0.005	-0.141	-0.052	0.052
Tai3	0.001	-0.042	-0.015	0.014
Tai9	0.114	-0.072	0.004	0.050
Tai18	0.160	0.009	0.077	0.045

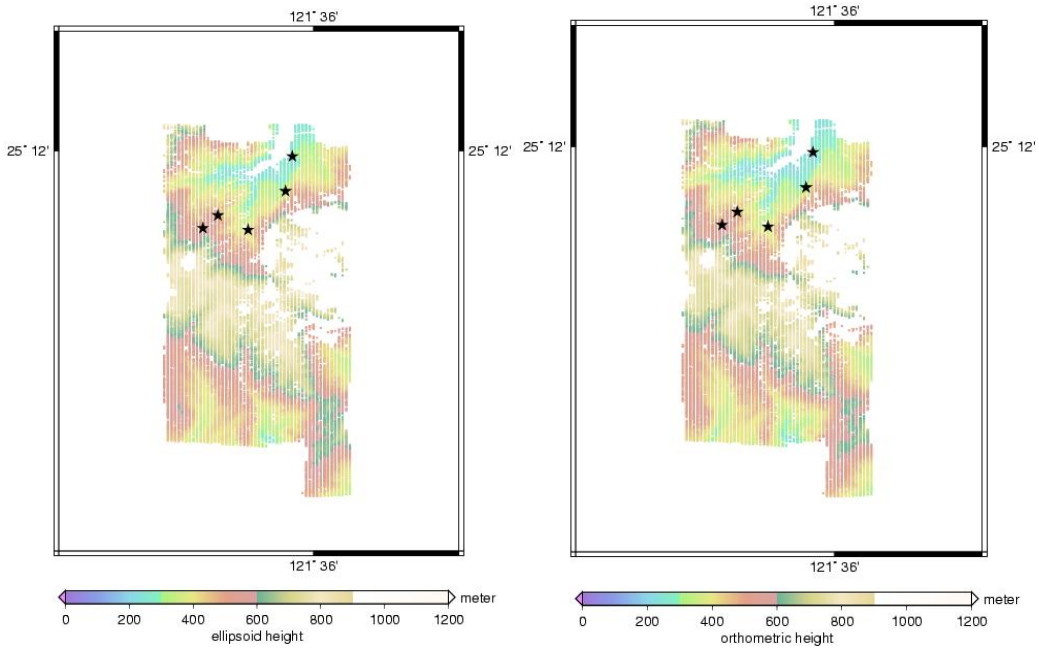
七、大地起伏模式在防災、監測及高程現代化之應用

(一) 光達應用

近年來大範圍高精度高解析度 DEM 之產製技術中，主動式遙感探測技術已日趨成熟，尤其光達以高頻率發射雷射光速進行掃描，可快速的蒐集地形資訊，於台灣及國際上皆被廣泛的應用。使用光達技術對相同研究區之地形進行重複性的觀測來獲得地表變形資訊的研究很多，例如地層下陷、斷層偵測及邊坡滑動監測等，極端的案例如颱風及地震等天災可能造成的大範圍且快速地形變化也可透過光達技術來進行快速的監測。光達所測得的高程訊息是相對於參考橢球面的橢球高，透過一簡單的轉換關係可直接轉換成正高(H)，轉換公式如下:

$$H = h - N \tag{25}$$

其中 h、N 分別為橢球高與大地起伏。透過大地起伏模式可於任何位置獲得 N 。舉例來說，圖 11(a)、圖 11(b)皆為陽明山的光達點雲分布圖，且分別建構於不同高程基準的高程變化，圖 11(a)為相對於參考橢球面的橢球高，圖 11(b)為相對於大地水準面的正高，圖 12 為對應光達點雲位置上的大地起伏值分布圖，大地起伏值平均約 20 公尺並隨著高程變化。透過經過此研究區的五個一等水準點正高來與光達所測得正高(經過高程轉換)進行精度評估，正高差異約為-4.047 m 至-0.075 m。其中幾點較大差異歸因於光達觀測量的誤差，必須更進一步於光達點雲數據處理上進行改善來減少此差異量。



(a) (b)

圖 11 施測於陽明山的光達點雲資料(a)橢球高(b)正高

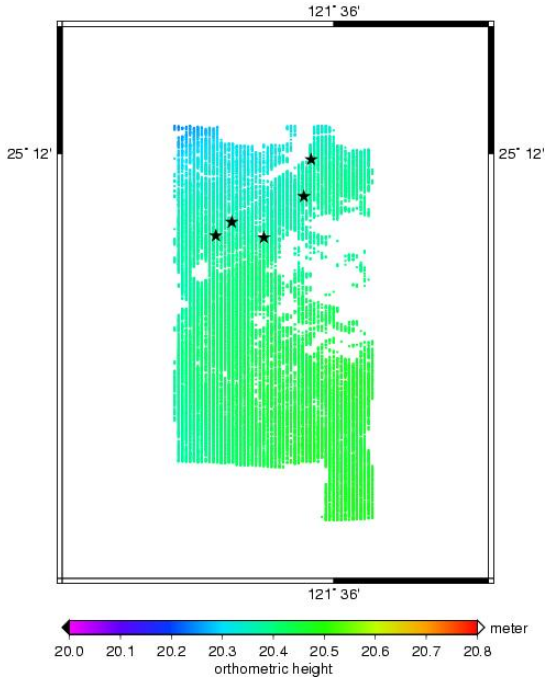


圖 12 對應於光達點雲位置上的大地起伏值分布圖

(二) 淹水範圍估計

地球的大氣和海洋因溫室效應而造成溫度上升，南、北極及格陵蘭冰層融化使得海水面上升，臨海地勢較低之區域將面臨被淹沒的困境。透過靜態淹水模擬可了解較易受到海水淹沒區域之分布範圍，並以此結果當做防災規畫之依據。由於存在水往低處流的事實，水的流動不僅僅是依據著地形高低，最主要是受到重

力等位面的影響，因而實際上淹水與否取決於大地水準面。過去淹水模擬都是直接使用數值高程模型(DEM)當基準，然而此模型之高程基準主要分為橢球高與正高兩種系統，淹水模擬應選用正高系統之模型。廖貞如(2010)結合交通大學發展的大地起伏模式及地形進行地面淹水狀況的推估，使用的數值高程資料為 2000 年太空梭雷達製圖任務(SRTM)於台灣地區之資料，此 SRTM 高程系統建立於 EGM96 上，由於此模型僅展開至 360 階，空間解析度不佳，因而將其參考面轉換至空間解析度較高之重力大地起伏值(Hwang et al., 2007)。圖 13 為全台灣地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖，其結果顯示當橢球高與正高之淹水面積於水深 10 公尺以內所造成的範圍差異很大，因此若使用橢球高模擬會產生低估的情形，採用正高進行淹水模擬才能獲得較正確的資訊。

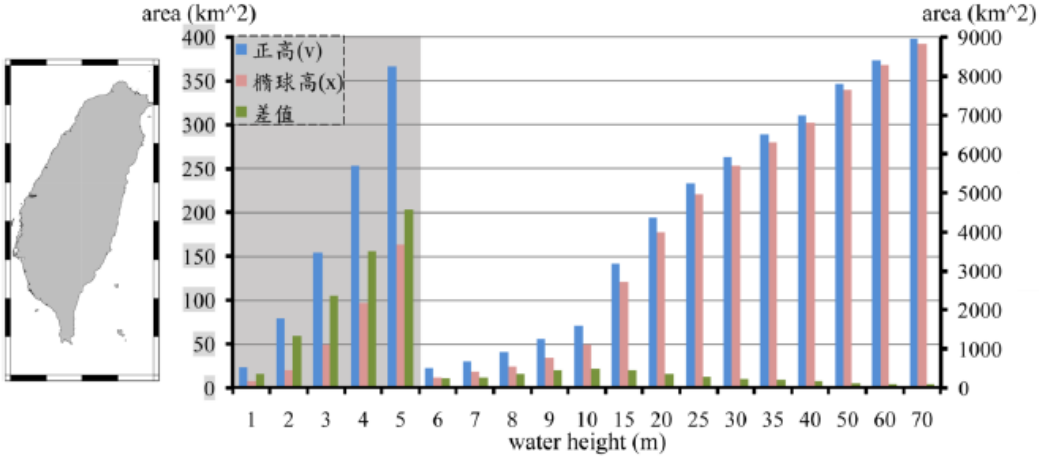


圖 13 全台灣地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖(摘錄自廖貞如, 2010)

(三)大地起伏模式與高程現代化

提議台灣發展高程現代化需採用本文所發展的大地起伏模式，並擬定台灣高程現代化芻議如下:

1.政府部分:

C. 發展與維護大地水準面模式

v. 蒐集與更新重力資料庫

vi. 使用最新的全球重力參考場模型

vii. 建立全台灣大地起伏模式的誤差模型

viii. 根據地球動力估計大地水準面模式的變化

D. 決定所有 eGPS 站(http://www.egps.nlsc.gov.tw/index.html)的傳統正高

vi. 定義及維護基隆與離島高程基準並決定高程基準差異

vii. 採用傳統水準測量來決定所有 eGPS 的正高，測量規範達最高標準

viii. 利用連續 GPS 決定 eGPS 站垂直速度場

ix. 增加下列 eGPS 軟體的數據處理能力

(a) 透過差分 eGPS 站與使用者間的橢球高與大地起伏差來決定兩者間的正高差

(b)利用使用者的 GPS 定位誤差(基線長度或其他等因素)、大地起伏模式誤差模型來估計使用者的正高精度

x. 修正離島與本島之高程基準差異量，表 3 為離島與本島之高程基準差異量 (黃金維，2010)

表 3 離島與本島之高程基準差異量，單位:公尺

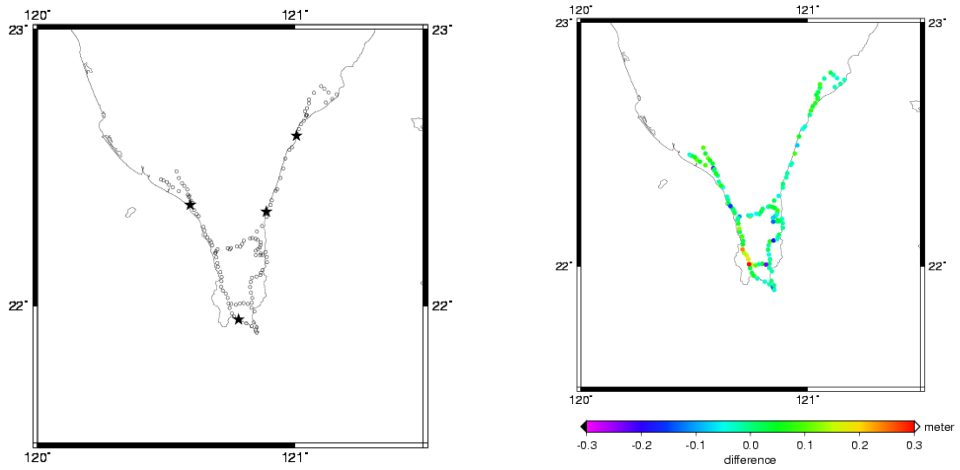
	Δh	ΔN	ΔH_g	ΔH_p	基準差異
琉球-基隆	3.140	0.230	2.910	2.732	0.178
綠島-基隆	6.633	4.062	2.571	2.241	0.330
蘭嶼-基隆	10.977	4.388	6.588	5.715	0.873
澎湖-基隆	-1.231	-2.135	2.492	1.924	0.568

2. 使用者部分:

iii. 視所需之橢球高精度來決定所採用的 GPS 定位時間長短；其橢球高精度可另行估計

iv. 使用 eGPS 計算軟體來決定正高及其誤差

以下為一案例之測試，研究區域為恆春半島上之 eGPS 測量成果，包含 4 個追蹤站及台一線、台九線之水準點，共 126 個點(如圖 14 所示)。一等水準點測到 4 個 eGPS 站之 Antenna Reference Point (ARP) 使用一等水準測量作業規範 sigma = 2.5 mm/SQRT(K)。此外，eGPS 測量之橢球高的精度約為 10-15 cm。表 4 結果顯示四個追蹤站的水準正高與本文模型所推算的正高差異約數公分，表 5 顯示動態 GPS 橢球高搭配大地起伏模式來推算正高，標準偏差可達 7.7 公分。



(a) (b)

圖 14 (a) eGPS 點位分布圖 ；(b) eGPS 正高差異分布圖

表 4:　4 個追蹤站的 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異，單位:公尺

點號	點名	eGPS 橢球高	Geoid-based 正高 [a]	TWVD2001 正高	正高差
太麻里	TMAM	58.722	34.632	34.5969	-0.035
大武	DAWU	40.980	17.603	17.6080	0.005
枋寮	FALI	41.650	19.700	19.6860	-0.014
墾丁	KDNM	58.260	36.118	36.1240	0.006

Geoid-based 正高 [a]: GPS 橢球高搭配大地起伏模式推算的正高

表 5:　eGPS 的 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異統計，單位:公尺

	最大值	最小值	平均值	標準偏差
Geoid-based 正高 -TWVD2001 正高	0.299	-0.234	0.011	0.077

八、結論與建議

臺灣地區因地形特殊，不僅有山地、丘陵及平原地區，還有許多離島分佈於本島周圍，為了因應這樣的地理環境，臺灣有各種不同類型的重力資料，其中陸測重力資料的空間分布及品質更是區域大地起伏模型達到公分級精度的主要條件，重新對陸測重力資料進行網行平差之後，不僅剔除其中 67 筆粗差，平差後重力資料的平均精度約 0.04mGal。受限於陸測重力資料在中央山區蒐集不易，藉由漸進式整合法將空載資料填補至中央山區路測重力資料稀少的區域，已有效改善位於山區的 central 及 south 兩條檢核線的大地起伏模型達約 5 公分以內的精度，然而，礙於現有 GPS/leveling 皆呈線狀分布且分布不均，無法全面評估模型精度。

混合型大地水準面模式的精度為決定高程現代化應用範圍的關鍵項目之一，目前台灣 GPS/Leveling 資料不足且皆為線狀分布，對於評估大地水準面模式整體的精度及台灣混合型大地水準面模式的計算皆嫌不足。反觀台灣目前 e-GPS 系統各測站具有分布均勻且連續觀測的特性，是提供檢核資料的良好工具。建議應全面進行 e-GPS 的正高測量作業，其高精度(cm 級)且分布均勻的特性除了增加此系統服務的多樣化，對於台灣混合型大地水準面模式的發展更有著莫大的幫助。

誌謝

本研究由內政部地政司，內政部國土測繪中心及國科會贊助。本文之大地水準面模式網格可自內政部地政司取得。

參考文獻

黃金維、郭重言、儲慶美、甯方璽，1998，《臺灣重力網平差及重力資料整合》，測量工程，第 40 卷，第三期，頁 71-82。

黃金維，2001，《一等一級水準點上實施重力測量工作報告書》，內政部。

黃金維，2005，《空載重力技術研究工作報告書》，內政部。

黃金維，2010，《臺灣本島與離島高程連測計畫 97 年度連測作業報告書》，內政部國土測繪中心。

陳春盛，2003，《一等二級水準點上實施重力測量工作報告書》，內政部。

廖貞如，2010，從大地水準面及地形推估地面淹水狀況，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

Anderson, O. B., Knudsen, P., and Berry, P. A. M., 2009, The DNSC08GRA global marine gravity field from double retraced satellite altimetry, *Journal of Geodesy*, 84 (3), pp. 191-199.

Ching, K. E., Hsieh, M. L., Johnson, K. M., Chen, K. H., Rau, R. J., and Yang, M. 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *Journal of Geophysical Researc*h, 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242

Deng, X., 2003, *Improvement of Geodetic Parameter Estimation in Coastal Regions from Satellite Radar Altimetry*, PhD. dissertation, Curtin University of Technology: Australia.

Forsberg, R., 1984, A Study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical invers-ion Methods in Gravity Field Modelling, Rept. 355, *Department of Geodetic Science and Surveying*, The Ohio State University：Columbus.

Featherstone, W. E., Evans, J. D., and Olliver, J. G., 1998, A Meissl-modified Vanicek and Kleusberg kernel to reduce the truncation error in gravimetric Geoid computations, *Journal of Geodesy*, 72(3), pp. 154-160.

Hsiao, Y. S., and Hwang, C., 2011, Topography-Assisted Downward Continuation of Airborne Gravity: Application to Geoid Determination in Taiwan, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(4), doi: 10.3319/TAO.2009.07.09.01(T).

Hsu, S.K., Liu, C.S., Shyu, C. T., Liu, S. Y., Sibuet, J. C., Lallemand, S., Wang, C., and Reed, D., 1998, New Gravity and Magnetic Anomaly Maps in the Taiwan-Luzon Region and their Preliminary Interpretation, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9, pp. 509-532.

Hwang, C., and Parsons, B., 1996, An optimal procedure for deriving marine gravity from multi-satellite altimetry, *Geophysical Journal International*, 125, pp. 705-718.

Hwang, C., and Parsons, B., 1995, Gravity anomalies derived from Seasat, Geosat, ERS-1 and TOPEX/POSEIDON altimetry and ship gravity: a case study over the Reykjanes Ridge, *Geophysical Journal International*, 122, pp. 551-568.

Hwang, C., 1998, Inverse Vening Meinesz formula and deflection-Geoid formula: applications to the predictions of gravity and Geoid over the South China Sea, *Journal of Geodesy*, 72, pp. 304-312.

Hwang, C., Wang, C. G., Lee L. H., 2002, Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints, Computers & Geosciences, 28(9):1005-1015, doi: 10.1016/S0098-3004(02)00005-5.

Hwang, C., Wang, C. G., and Hsiao, Y.S., 2003, Terrain correction computation using Gaussian quadrature: effect of innermost zone, *Computers & Geosciences*, 29 (10), pp. 1259-1268.

Hwang, C, and H. Y. Hsu, 2008, Shallow-water gravity anomalies from satellite altimetry: case studies in the East China Sea and Taiwan Strait, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 31 (5), pp. 841-851.

Hwang, C., Guo, J., Deng, X., Hsu, H. Y., and Liu, Y., 2006, Coastal gravity anomaly from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data, *Journal of Geodesy*, 80(4), pp. 204-216.

Hwang, C., Hsiao, Y. S., Shih, H. C., Yang, M., Chen, K. H., Forsberg, R., and Olesen, A. V., 2007, Geodetic and geophysical results from a Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment, *Journal of Geophysical Researc*h, 112, B04407, doi:10.1029/2005JB004220.

Hwang, C., Hung, W. C., and Liu, C. H., 2008, Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan High Speed Rail operation, *Natural Hazards*, 47, pp. 1-16.

Hwang C, H. C. Shih, YS Hsiao, and C.H. Huang, 2012, Airborne gravity surveys over Taiwan Island and Strait, Kuroshio Current and South China Sea: comparison of GPS and gravity accuracies at different flight altitudes, *Marine Geodesy*, 35(3), pp. 287-305,

Kuroishi, Y., and Keller, W., 2005, Wavelet approach to improvement of gravity field-Geoid modeling for Japan, *Journal of Geophysical Research*, 110, B03402 doi:10.1029/2004JB003371.

LCR, 2003, Instruction manul for Lacoste & Romberg model S air-sea dynamic gravity meter system II, Lacoste & Romberg Inc., Austin, Taxes

Moritz, H., 1980a, *Advanced Physical Geodesy*, Karlsruhe: Wichmanns.

Moritz, H., 1980b, Geodetic reference system 1980, *Bulletin Géodésique*, 54(3):395-405, doi: 10.1007/BF02521480

Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., Factor, J. K., 2012, The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research*, 117(4), B04406, doi:10.1029/2011JB008916.

Roman, D., Wang, Y. M., Saleh, J., and Li, X., 2009, National Geoid height Models for the United States: USGG2009 and GEOID09, *ACSM-MARLS-UCLS-WFPS Conference 2009*: Utah, pp. 20-23.

Sandwell, D. T., and Smith, W. H. F., 2009, Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate, *Journal of Geophysical Research*, 114, B01411, doi:10.1029/2008JB006008.

Tscherning, C. C., and Rapp, R. H., 1974, Closed Covariance Expressions for Gravity Anomalies. Geoid Undulations, and the Deflections of the Vertical Implied by Anomaly Degree-Variance Models, *Reports of the Department of Geodetic Science*, 208, Ohio State University.

Torge, W., 1989, Gravimetry, *Walter de Gruyter Berlin*, New York.

Wang, Y. M., Saleh, J., Li, X., and Roman, D. R., 20012, The US gravimetric Geoid of 2009 (USGG2009): model development and evaluation, *Journal of Geodesy*, 86(3), doi: 10.1007s00190-011-0506-7.

Wessel, P., Smith, W. H. F., 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS: Transactions of the American Geophysical Union* 79(47):579, doi: 10.1029/98EO00426

Yang, Y., Hwang, C., Hsu, H. J., Dongchen, E., and Wang, H., 2011, A sub-waveform threshold retracker for ERS-1 altimetry: a case study in the Antarctic Ocean, *Computers & Geosciences*, doi:10.1016/j.cageo.2011.08.017

Yen, H. Y., Yeh, Y. H., Lin, C. H., Yu, G. K., and Tsai, Y. B., 1990, Free-Air Gravity Map of Taiwan and Its Applications, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1, pp. 43-156.

Yen, H. Y., Yeh, Y. H., Lin, C. H., Chen, K. J., and Tsai, Y. B., 1995, Gravity Survey of Taiwan, *Journal of Physics of the Earth*, 43, pp. 685-696.

附錄 6 期末報告初稿審查意見及修正辦理情形

審查委員	審查意見	修正辦理情形
高委員書屏	1.簡報資料 P.16 提及估計成果的變方值，得到精度的平均值分別為：南北(N)、東西(E)以及橢球高(h)方向分別±1.2~8.8cm、±1.2~13.2cm 以及±3.0~47.9cm，由上述數字顯現其標準差區間值皆頗大，尤其在橢球高程部分，可否進一步說明造成之原因?另因其精度不佳，加入本案近岸船載重力資料後，是否造成以「臺灣本島」為主要應用之區域性大地起伏精度能否有效提昇?建議應著重此部分加以說明，並提出比較數據證明之，倘數據有異常也應補充說明之。	此部分為數據誤植，已於期末報告 P.43 修正。
	2.P.75 圖 5-3 各曲面非呈一平面，且橢球高、正高與大地起伏的關係非為鉛直，而是存有垂線偏差，故此圖建議重畫。	已重繪此圖，另圖編號已改為圖 5-7，P.79。
	3.P.80 表 5-3 內建議採中文，如 model 改模式。	已修改 P.84。
	4. P.83 表 Max 值 16.6cm 與 P82 第 2~3 行顯示 10~30 公分不符。	已修改此段敘述 P.83。

甯委員方璽	1.P24「結果顯示 NCTUA 的精度與 Sandwell V18.1 及 DNSC08 全球重力異常網格精度相當」。是否有數據證明，來支持 NCTUA 之精度。	已增列比較表 2-7 於 P.26。
	2.P.50「are the standard deviations of the geopotential coefficients」，此句請刪除。	已刪除。
	3.P.52 倒數第 6 行圖 3-12 請修正為「圖 3-13」及 P53 倒數第 4 行圖 3-13 請修正為「圖 3-14」。	已修改，該部份已移至 5-1 節。
	4.P.66 表 4-3 GPS 測量成果表，可否加註其精度。	已增加並將該表格改置於附錄 3。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
洪委員本善	1.P.35 船隻 GPS 動態定位處理方法採 TRACK 軟體解算時，對流層附加參數每測站每小時附加一個改正參數，然而 P66 在 Bernese 軟體計算對流層折射影響量的改正參數，則設定每測站每 2 小時增加一個改正參數，採 1 或 2 個小時的差異性請說明?	已增加說明於 P.40。
	2.P.36 GPS 動態定位資料，採每個時刻均以 4 支 GPS 天線盤同步搜集資料，此 4 支 GPS 天線盤如何布設於船隻上面，請說明。	已增加圖 3-7 說明分布情形於 P.42。
	3.建議修正部分 (1)P.6 第 6 行請修正為「中國測量工程學會」。 (2)P.29 圖 3-4 內尺寸標示，請增加單位(mm)說明。 (3)P.31(二)陸上重力測量方法-此段落，建議文字重新編排。	(1)已修改。 (2)該部份增加一尺寸解釋圖進行說明，P.34。 (3)已修改。

崔委員國強	1.P.35 本案 GPS 動態定位處理時，標準對流層折射誤差修正模式，採如 Modified Hopfield 改正模式，並引用對流層附加參數(每站每小時附加 1 個參數)的改正方式，請加入其效益分析。	已增加此部分說明於 P.40。
	2.P.47 請加強補充整合陸測、船載及空載重力資料之過程及分析，及各協變方函數對應之詳細公式。	已增加相關說明解釋並改至 5-1 節。
	3.P.53 地形效應計算公式(3-27)，ρ 地質密度採用何值?	已補充說明，該章節已改至 5-1 節，P.70。
	4.P.65 在陸上 24 小時 GPS 測量資料處理時，在對流層折射改正上，採用 Hopfield 模式加上各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式，亦請加入不同情況之效益分析。	已增加此部分說明於 P.40。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
崔委員國強	5.P.71 剩餘地形模型的計算方面，真實地形面乃應用內政部公布之臺灣地區 9 秒 DEM 模型，平均地形面為應用 6 分的 DEM 模型，平均地形面是否曾用 3 分或 9 分的 DEM 模型比較分析過呢。	此問題已有前人(蕭宇伸，2007)研究，本案即參考此文獻，已加列參考文獻於該段落末端，P.75。
	6.P.76 圖 5-4 臺灣新大地起伏網格，請加入量的統計分析如 max、min、mean、RMS 等。	已增加此部分數據於 P.78。
	7.請加強論述「精算混合型(Hybrid)大地水準面模式，並比較與傳統重力法大地水準面模式之差異與效益」。	已增加此部分論述於 5-5 節。

郭委員重言	1.文章多處公式位置不對齊如 P.33。	全文中相關問題皆已修正。
	2. P.6 倒數第 7 行(Hwang and Wang, 2002)。	已修正於 P.6。
	3. P.23 倒數第 6 行請修正為「I」nverse Vening…。	已修正於 P.25。
	4. P.24 請修正為 Hsu (1998)等人。	已修正於 P.26。
	5. P.39 公式(3-10)(3-11)字體請與其他公式相同。	已修正於 P.45。
	6. P.42 倒數 1 行請 K,L 請修正為「k、l」。	已修正於 P.48。
	7. P.50 第 5 行代入公式(9)請更正。	已修正於 P.67。
	8. P.50 倒數第 8 行請刪除「are the standard deviations of the geopotential coefficients」。	已刪除。
	9. P.51 第 1 行公式(10)請更正。	已修正於 P.68。
	10. P.53 倒數第 8 行請修正為 h_P 。	已修正且已更改至第 5-1 節，P.70。
	11.參考文獻格式不一致，例如發表年之位置。	已修正。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
郭委員重言	12. 文章裏有關重力數值表示，其小數點後位數應該統一。	已統一。
	13. P.65：solidearthtide 請更正。	已修正，P.63。
	14. P.82 圖 5-6 標題及 P83 表 5-4 標題 Twgeoid 與 Twgeoid100 請更正。	已修正於 P.85，當中表 5-4 已合併於 P.83 下方敘述文字中。
	15. P.11 建議圖 2-3 中各圖合併成一個圖並放大顯示。	由於圖的合併涉及大量數據的重新編輯計算，且本圖旨在展示資料分布位置，故此圖僅放大顯示但並未合併。P.12
	16. P.15 表 2-4 臺灣環海的「交叉點分析精度(mGal)」11.2，此數值為平差前還是平差後?	已於 2-2 節中第 2 點的文字敘述中說明，P.13。
	17. P41 是否有加入海潮改正，請補充說明。	已加入說明於公式(3-17)之符號說明中，P.47。

鄭主持人彩堂	1. P.4 辦理工作項目中 6 第二期成果繳交，請依合約規定敘明具體工作項目；另教育訓練為本案重要項目之一，請一併將辦理情形（含課程表課、辦理日期等）列入本報告 1-3 及第六章或其他適宜章節。	P.4 部分已更正;已於 1-3 中增列教育訓練項目並將相關課程表等曾至附錄 7。
	2. P.11 表 2-2、表 2-3 與 100 年度均為蒐集 95-97 年臺灣本島與離島高程連測數據,惟其交叉點差異量之最大值、最小值 、平均值及 RMS 均不同，原因為何？請再查明補充敘述。	此部分數據已做更改，見表 2-3、表 2-4。
	3. P.16 表 2-4 船測重力資料一覽(表)中，最後一筆資料似為本案(101 年)新完成成果? 若是，請將本年度辦理情形移至第三章近岸船載重力測量或其他適宜章節介紹，必要時再於第 5 章大地起伏彙整本案所彙整使用之各項重力資料。	已將表 2-4 中 101 年度成果移除，並在第三章中進行完整之說明。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
鄭主持人彩堂	4. P.27 圖 3-2 範圍與本案(台灣西北沿岸)不符，且名稱亦與內容不符，請更正。	此部分因初稿影印時印成黑白色，使得辨識不易，將在修正版時以彩色印出。P.30
	5. P.32 圖 3-6 岸基控制點重力測量，其測量日期為 100 年，請查明是否為本年度使用點位？。	已將圖修正為今年度之點位，P.37。
	6.請依合約規定補充精算混合型大地水準面模式比較傳統重力法之差異及效益分析；另第 7 章亦請依合約要求，增加使大地起伏模型更完善的建議與成果應用。	已將此部分增於 5-5 節；已於增加應用相關部份於 7-2 節。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
業務單位初審意見	1.第一次出現本中心名稱時，請用全名並加(以下簡稱國土測繪中心)，第 2 次以後出現時，再用簡稱。	已修正於 1-1 節。
	2.本報告有船「載」重力及船「測」重力，用語請統一採「船載」。	已統一使用船載。
	3. P.1 倒數第 7、8 行請修正為「102 年度預定繼續辦理臺灣本島東部近岸海域之近岸船載重力測量作業」。	已修改。
	4. P.4 1-3 節辦理之工作項目，請補列「精算混合型大地水準面模式，並比較與傳統重力法大地水準面模式之差異及效益」之項目。	已增列此工作項目於 1-3 節。
	5. P.8、P.9 表 2-1 同一表格,卻分別有彩色及黑白，請統一。	將於修正版印出時統一。
	6. P.15 表 2-4 及 P.22 表 2-5 有關區域、重力資料數量、來源，其表格應採一致性。	各表格項目皆已統一。
	7. P.17 圖 2-6 請放大並以彩色顯示。另有關各空載計畫的敘述，請彙整敘述。	圖 2-6 本身即為黑白配色，敘述部分已重新編排彙整。P.18
	8. P.22 圖 2-7 請放大並以彩色顯示。	已放大，P.24。
	9.本報告中有關本章（節、組）用語，請再檢視修正，(如 P.22，2-4 節，所敘本章，宜修正為本節…)。	全文相關部分已修改。
	10. P.25 第三章有關船測作業的準備工作及各項敘述，例如何時施測、花費多少工作天，以及作業時之注意事項，請補充說明。	已增加此部分說明於 3-2 節。
	11. P.44 倒數第 3 行所述「測量成果如圖 3-9」，應否修正為近岸船載測量重力異常如圖 3-9。請說明。	已更改，圖名變更為圖 3-10，P.50~P.51。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
業務單位初審意見	12. P.51 倒數 4 行所述從 P.52 圖 3-12 可看出差異性如何，請補充說明。以及圖 3-12 標題太冗長應簡略。	已補充說明並進行更改，P.69。
	13. P.56 第四章請先說明此章目的或作用為何?例如為何要做 24 小時 GPS 觀測。	已補充說明於 4-1 第一段，P.54。
	14. P.56 第 7 行請修正為水準點進行觀測，「若該點及前後點位皆不適合的話,於該點位附近 50 公尺內選擇一空曠地設立臨時點…」。	已修正於 P.54。
	15. P.69 請將教育訓練所授大地起伏計算步驟及說明，加強補充說明於第五章。	已將大地起伏計算流程及其說明放於附錄 8。
	16. P.80 表 5-3 請多一欄位敘述提升或降低多少數值(精度)。	已增加此欄位，P.84。
	17. P.86 請參考如 P.123 附錄 4 所述各項應用，請於內文第七章前加強補述各項應用。	已增加應用相關部分於 7-2 節。
	18. P.87 於未來規劃一節，請補充說明 102 及 103 年度合併於 102 年辦理。	已補充相關說明於 P.101。
	19.請參考如 P.122 附錄 4，請在適當章節加強補述「精算混合型(HYBRID)大地水準面模式,並比較與傳統重力法大地水準面模式之差異及效益。	已增加此部分文章於 5-5 節。
	20. P.122 附錄 4 表 2 標題，請修正為混合型大地起伏與「觀測法」大地起伏的差異量統計，並加以說明。	此附錄為期刊投稿文章，修正版期末報告中已重新放上最後被期刊接受之完整修正版文章；期刊投稿文章並非報告內文，故無法更動。

審查委員	審查意見	修正辦理情形
業務單位初審意見	21.若有速度場的因素，那多年後 GPS 檢核點是否能使用嗎? 若如此是否需每年加測檢測點? 5 年後的檢測點是否還能繼續使用。	該部分為已投稿文章，故在此回應：一般說來，地表的變動同時連帶影響橢球高及正高的，因此地表變動對於觀測法的大地起伏值影響很小。除了下陷特別嚴重的區域可能要考慮速度場的因素來修正之外，一般說來，用來檢驗大地起伏精度的 GPS 檢核點可被沿用多年。
	22.文章中出現許多黑體字標題，但未編予小節，請視內容酌予編小節。	全文中相關問題皆已修改。
	23.第七章結論，請加以補充有關經統計、分析或趨勢之看法建議。	已補充相關部分。
	24.業務單位所提之各項文字及數據誤植之錯誤修正項目。	均已修正。

附錄 7 101 年度教育訓練相關文件

表 1、課程計畫表

訓練名稱：大地起伏模型之建置與應用			
訓練目標：學習大地起伏模型建置方法及其相關應用			
訓練人數：6 人/每梯次（計 1 梯次）			
專業課程	時數	講座	備考
物理大地、重力測量原理與應用	3	黃啟訓	
重力資料介紹	2	黃啟訓	
船載/空載重力測量介紹	3	黃啟訓	
船載/空載重力測量資料試算	2	黃啟訓	
船載/空載重力測量資料處理技術	3	黃啟訓	
船載/空載重力測量資料精度分析與重力資料整合	2	黃啟訓	
大地起伏計算流程介紹	3	黃啟訓	
大地起伏計算與精度分析	2	黃啟訓	
總　　計	20	黃啟訓	
訓練梯次： 1 梯次	訓練時間： 4 天		
日期：101 年 4 月			

表 2、課程配當表

日期 時間	**101 年 4 月 9 日（星期 一）**
09:00 ∫ **09:10**	**報　　到**
09:10 ∫ **10:00**	物理大地、重力測量原理與應用
10:10 ∫ **11:00**	物理大地、重力測量原理與應用
11:10 ∫ **12:00**	物理大地、重力測量原理與應用
12:00 ∫ **13:40**	**午　　休**
14:10 ∫ **15:00**	重力資料介紹
15:10 ∫ **16:00**	重力資料介紹
	賦歸
備註	訓練地點：台中市南屯區黎明路 2 段 497 號 5 樓 訓練場地：內政部國土測繪中心 5 樓第二會議室 講師：黃啟訓

附錄 8 教育訓練所授大地起伏計算步驟及說明

註: rem 在 dos 視窗下代表忽略本行敘述，常用在 bat 檔裡敘述指令內容

註:紅字為檔案路徑

註:藍字為 GMT 指令

rem ********** do the long wavelength model **********

產生長波長的重力及大地起伏模型（資料來源為 EGM2008 模型，展開至 2160 階）

program\grd3togrd EGM08_gravity.grd3|xyz2grd -Z -R116/123/20/27 -I0.0025/0.0025 -Glong_g.grd

利用 program 資料夾裡的 grd3togrd.exe 執行檔，將 EGM08_gravity.grd3 轉換成 grd 檔，檔名為 long_g.grd

program\grd3togrd EGM08_geoid.grd3|xyz2grd -Z -R116/123/20/27 -I0.0025/0.0025 -Glong_n.grd

利用 program 資料夾裡的 grd3togrd.exe 執行檔，將 EGM08_geoid.grd3 轉換成 grd 檔，檔名為 long_n.grd

rem **********end**********

rem ********** do the short wavelength model **********

rem calculate the RTM effects of gravity

計算 RTM 效應（短波長）對重力的影響

```
echo 4 t 50 0 21 119 2000 1600 >tmp.txt
echo input\dtm9s.grd3 >> tmp.txt
echo input\dtm6m.grd3 >> tmp.txt
echo short_g.grd3 >> tmp.txt
```

註:echo 指令在 dos 下為將視窗上文字輸入進指定檔案

program\tcfour <tmp.txt

利用 program 資料夾裡的 tcfour.exe 執行檔計算 RTM 效應，真實的地形模型採用 dtm9s.grd3，平均地形模型採用 dtm6m.grd3，最後產生 short_g.grd3 檔案代表 RTM 校應對重力的影響量

program\grd3togrd short_g.grd3|xyz2grd -Z -R119/122.9975/21/25.9975 -I9c -Gshort_g.grd

利用 program 資料夾裡的 grd3togrd.exe 執行檔，將 short_g.grd3 轉換成 grd 檔，檔名為 short_g.grd

calculate the RTM effects of geoid

計算 RTM 效應對大地起伏的影響

```
echo 5 t 50 0 21 119 2000 1600 >tmp.txt
echo input\dtm9s.grd3 >> tmp.txt
echo input\dtm6m.grd3 >> tmp.txt
echo short_n.grd3 >> tmp.txt
program\tcfour <tmp.txt
```

利用 program 資料夾裡的 tcfour.exe 執行檔計算 RTM 效應，真實的地形模型採用 dtm9s.grd3，平均地形模型採用 dtm6m.grd3，最後產生 short_n.grd3 檔案代表 RTM 校應對大地起伏的影響量

```
program\grd3togrd short_n.grd3|xyz2grd -Z -R119/122.9975/21/25.9975 -I9c
-Gshort_n.grd
```

利用 program 資料夾裡的 grd3togrd.exe 執行檔，將 short_n.grd3 轉換成 grd 檔，檔名為 short_n.grd

```
rem ********************end*****************************************

rem ************ do the middle wavelength model ********************
rem do the residual gravity input file
```

計算殘餘重力（真實重力減去長波長重力與短波長重力）

```
program\geoidint -AEGM08_gravity.grd3 -Iinput\
gravity(tws+land2m+ship+alt+near).xyg -Ggravity.lwg -T0
```

將長波長重力網格 EGM08_gravity.grd3 內插至真實重力資料 gravity(tws+land2m+ship+alt+near).xyg 檔的各點位置上

```
program\geoidint -Ashort_g.grd3 -Iinput\ gravity(tws+land2m+ship+alt+near).xyg
-Ggravity.rtmg -T0
```

將短波長重力網格 short_g.grd3 內插至真實重力資料 gravity(tws+land2m+ship+alt+near).xyg 檔的各點位置上

```
program\sub -Ainput\ gravity(tws+land2m+ship+alt+near).xyg -Bgravity.lwg
-Ggravity.g-lwg
program\sub -Agravity.g-lwg -Bgravity.rtmg -Ggravity_temp.rd
program\replace -Ainput\ gravity(tws+land2m+ship+alt+near).xyg -Bgravity_temp.rd
-Ggravity.rd
```

真實重力減去長波長重力與短波長重力，得到殘餘重力 gravity.rd

```
del gravity.lwg gravity.rtmg gravity.g-lwg gravity_temp.rd
```

將計算過程中產生出的不必要檔案刪除

```
rem use the collocg.f to calculate residual geoid
```

program\collocg -Ccov_egm08_to2160.txt -W60 -R119/123/21/26 -I1/1 -Ggravity.rd -Nnoise.grd3 -Smiddle_n.grd3 -D2 -L -O

利用 program 資料夾裡的 collocg.exe 執行檔計算將殘餘重力(gravity.rd)化算為殘餘大地起伏模型，方法為最小二乘配置，解析度為 1 分（-I 設定），計算半徑為 60km（-W 設定），檔案名稱為 middle_n.grd3（-S 設定），用的 covariance table 為 cov_egm08_to2160.txt（-C 設定）

program\grd3togrd middle_n.grd3|xyz2grd -Z -R119/123/21/26 -I1m -Gmiddle_n.grd

利用 program 資料夾裡的 grd3togrd.exe 執行檔，將 middle_n.grd3 轉換成 grd 檔，檔名為 middle_n.grd

rem ********** end **********

rem ********** do the combination **********

grdsample long_n_bursa.grd -I9c -Glong_n9c.grd
grdsample middle_n.grd -I9c -Gmiddle_n9c.grd

利用 GMT 的 grdsample 指令，將各波長的大地起伏 sample 成同一解析度（-I 設定）

grdcut long_n9c.grd -R119/122.9975/21/25.9975 -Glong_n9c_cut.grd
grdcut middle_n9c.grd -R119/122.9975/21/25.9975 -Gmiddle_n9c_cut.grd

利用 GMT 的 grdcut 指令，將各波長的大地起伏化成同一範圍（-R 設定）

grdmath long_n9c_cut.grd middle_n9c_cut.grd ADD short_n.grd ADD = quasi_TWVD.grd

利用 GMT 的 grdmath 指令，將長中短波長的大地起伏模型加起來，得到一個似大地水準面(quasi-geoid)的 grd3 模型，檔名為 quasi_TWVD.grd3

grd2xyz quasi_TWVD.grd -Z|program\grd2grd3 -R119/122.9975/21/25.9975 -I0.0025/0.0025 -Gquasi_TWVD.grd3

將 grd3 檔案轉換成 grd 檔案

rem**********end**********

rem ********** do the quasi correction **********

利用地形資料，將似大地水準面改正至大地水準面

grdcut input\dtm9s.grd -R119/122.9975/21/25.9975 -Gdem9s_cut.grd

grd2xyz dem9s_cut.grd -Z|program\grd2grd3 -R119/122.9975/21/25.9975 -I0.0025/0.0025 -Gdem9s_cut.grd3

program\quasi -Nquasi_TWVD.grd3 -Ddem9s_cut.grd3 -GTWVD.grd3

利用 program 資料夾裡的 quasi.exe 執行檔，利用 dem9s_cut.grd3 的地形資料，做 quasi 將似大地水準面改正至大地水準面，檔名為 TWVD.grd3

```
program\grd3togrd TWVD.grd3|xyz2grd -Z -R119/122.9975/21/25.9975 -I9c
-GTWVD.grd
rem ************************ end************************************


rem ************ Hybrid geoid modle ********************
將實測大地起伏值代入修正重力法大地起伏，產生一 hybrid 大地起伏模型（若
只要純重力法大地起伏，則忽略此段 script）
program\geoidint -ATWVD.grd3 -I1st2nd.xyn    -G1_f_out.txt -T0
program\sub -A1_f_out.txt -B1st2nd.xyn -G1_f_sub.txt
上兩行中的1st2nd.xyn檔案，為自行放入實測大地起伏值，格式為精度、緯度、
實測法大地起伏
surface 1_f_sub.txt -R119/122.9975/21/25.9975 -I0.0025/0.0025 -G1_f_sub.grd -T0.5
grdmath TWVD.grd 1_f_sub.grd SUB = TWVD（Hybrid）.grd
grd2xyz 222.grd -Z|debug\grd2grd3 -R119/122.9975/21/25.9975
-I0.0025/0.0025 –GTWVD（Hybrid）.grd3
rem ************************ end************************************

rem ********* do the test of the geiod accuracy ********************
利用檢核線資料（橢球高-水準正高），評估大地起伏精度
program\geoidint -ATWVD.grd3 -Iinput\test_real.xyn -Gtest_int.xyn -T0
將重力法大地起伏內插至檢核點上
program\sub -Atest_int.xyn -Binput\test_real.xyn -Gtest_temp.xyd
把重力法大地起伏減去觀測法大地起伏
program\geostats -Itest_temp.xyd -GTWVD.xyd
利用 program 資料夾裡的 geostats 程式，將重力法與觀測法的大地起伏差值作統
計分析，評估精度，檔名為 TWVD.xyd
del test_int.xyn test_temp.xyd
刪除不必要的檔案
rem************************ end ************************************
```