

臺灣地區重力資料與大地水準面模式精度分析

The Analysis on Geoid Model with Taiwan Gravity Data

林長青¹
Chang-Ching Lin

林承毅²
Cheng-Yi Lin

李旭志³
Hsu-Chih Lee

摘要

自 69 年起中央研究院地球科學所、中國測量工程學會及內政部等持續在臺灣地區建置重力資料，至 92 年累積近 4,000 筆重力資料，範圍涵蓋西部平原及東部狹長地帶。為強化臺灣地區重力點密度，內政部於 93 年辦理一、二等重力測量工作，施測約 4,500 個重力點；及辦理 16,000 英尺高航高空載重力測量工作，範圍涵蓋臺灣全島；95 及 97 年各推行 5,000 英尺低航高空載重力測量工作，範圍分別為臺灣東部及西部海面。

內政部國土測繪中心於 95-97 年辦理臺灣本島與離島高程連測計畫，施測基隆及各離島方圓 50 公里海域之船載重力測量作業，區域包括小琉球、綠島、蘭嶼及澎湖；於 100-101 年辦理花東及山區重力測量工作，補足離島、花東及山區分布密度，施測 673 個重力點；於 100-102 年辦理臺灣本島近岸船載重力測量作業，完成臺灣環島近岸海上重力測量。依據上開各項重力測量成果，重新計算完成臺灣地區最新的大地水準面模式，經分析檢核，可發現於沿岸及山區大地水準面模式精度皆有提升。

關鍵詞：重力資料、大地水準面模式

Abstract

The Institute of Earth Science Academia Sinica(IESAS), Chinese Society of Survey Engineering(CSSE), Ministry of the Interior(MOI) continued to build the point where each gravity measurement in Taiwan from 1980 to 2003. The cumulative total of nearly 4,000 points cover west plains and eastern strip of Taiwan. In order to strengthen density in Taiwan, MOI conducted "first and second-class gravity measurement work" to measure about 4,500 points in 2004. Airborne gravity survey of 16,000 feet altitude covered the whole island of Taiwan in 2004. Airborne gravity survey of 5,000 feet altitude covered the eastern sea and the western sea of Taiwan in 2006 and 2008.

The National Land Surveying and Mapping Center(NLSC) handled the plan of Taiwan with the off-shore islands elevation survey from 2006 to 2008 to conduct ship gravity survey in the radius of 50 km of Keelung and each off-shore islands. The areas of islands are covered by Liuqiu, Green Island, Lanyu and Penghu. NLSC handled gravity survey work of eastern and mountains to increase density on the off-shore islands, eastern and mountain sampling 673 points from 2011 to 2012. Taiwan inshore ship gravity survey operation will be the completion of Taiwan inshore gravity survey from 2011 to 2013. Based on these results, the latest re-calculation has been done Taiwan geoid model, the accuracies of the geoid model applied in coastal and mountainous areas both increased by analysis checklist.

Keyword: Gravity Value, Geoid Model

¹內政部國土測繪中心 專員，55500@mail.nlsc.gov.tw，04-22522966#204

²內政部國土測繪中心 課員

³內政部國土測繪中心 課長

一、前言

近年來臺灣地區在測定重力以陸地為主，主要為臺灣本島西部平原、東部狹長地帶及離島地區[1][2]，而高山地區尤以中央山脈超過三千多公尺之地勢險峻，交通不便，車輛不易到達且受限於經費因素，故始終未完成高山地區的重力測量，為彌補高山地區重力資料的不足，內政部於 93 年辦理航高 16,000 英尺高航高空載重力測量工作[4]，範圍涵蓋全島，其中中央山脈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，故內政部於 95 年辦理航高 5,000 英尺低航高空載重力測量工作[6]，範圍為臺灣東部海面。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，測高波容易受到複雜地形及近岸陸地的干擾導致測距精度不佳，受限於地理環境，重力測量工作難以在部分海域實行，導致重力資料分布不均，內政部又於 97 年辦理航高 5,000 英尺低航高空載重力測量工作[5]，範圍為臺灣西部海面包括東沙群島。

與空載重力資料相比，因船載重力資料更貼在海水面上施測，所以其精度更高於空載重力資料，但船隻噸位大且行駛緩慢，所需花費成本較大，無法如同空載飛機涵蓋大面積施測，僅選擇海陸交接處實行船測，以彌補此海域測高重力精度不佳之情形。故內政部國土測繪中心(以下簡稱國土測繪中心)於 95~97 年辦理基隆及小琉球、綠島、蘭嶼、澎湖等離島船載重力測量工作[7][8][9]，於 100~102 年辦理臺灣本島近岸船載重力測量工作[10][12]。另為完成高山地區陸上重力測量工作，該中心同時於 100 及 101 年辦理花東及山區重力測量工作[11][13]。綜上所有重力測量，可說已補足臺灣地區完整的重力控制網。本文章主要敘述加入船載重力資料與花東及山區重力資料後，所產生臺灣地區最新的大地水準面模式，經分析檢核後，其精度變化狀況。

二、船載重力測量工作

95~97 年所辦理基隆及各離島船載重力測量工作，其測線範圍以各潮位站附近水準點為圓心，半徑 50 公里內，南北航線在 0~20 公里內以 2 分為間距，20~50 公里以 4' 為間距，東西航線以 17 公里為間距(澎湖海域東西航線在 0~20 公里內以 8.5 公里為間距)，航線圖如圖 1。100~102 年所辦理近岸船載重力測量工作，其測線範圍為最低潮位線往外約 12 哩內，主要航線方向與海岸線平行，在臺灣本島西部海域以 2 分為間距，在臺灣本島東部海域以 4 分為間距，副航線應與主航線方向垂直或斜角交叉，間距以 15 分為原則。今(102)年正辦理臺灣東部近岸船載重力測量工作，目前成果尚未完成，故分析統計數據未列入，航線圖如圖 1。

辦理船載重力測量作業所使用儀器為 L&R Air-Sea II (L&R, 2003) 及 ZLS-08，並使用罩窗寬度約 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 秒罩窗寬度之濾波後，船載重力的空間解析度約在 450-600 公尺左右。

各海域航線資料如表 1，而各海域測區重力資料的統計資訊，經平差改正後可修正每一條航線所測船載重力值，將修正後之重力值重新作交叉點分析，得到結果如表 2 所示，各海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)。

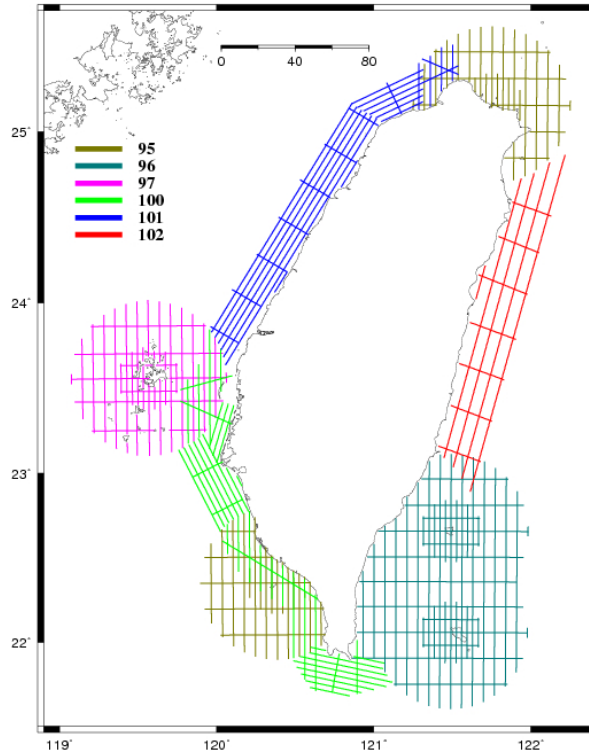


圖 1. 涵蓋全區船測航線圖

表 1. 各海域船載重力測量航線資料一覽表

年度	施測區域	南北航線數	東西航線數	總里程(km)	交叉點數量
		航線數			
95	基隆	21	6	1060	35
95	小琉球	17	5	1160	41
96	綠島	20	7	1680	42
96	蘭嶼	21	7	1710	59
97	澎湖	21	7	1782	60
100	西南近岸	45		1479	41
101	西北近岸	27		1680	34
102	東部近岸	12		1200	29

表 2. 各海域船載重力經平差後交叉點差異量統計(單位：mgal)

年度	施測區域	最大值	最小值	平均值	均方根誤差
95	基隆	5.24	-5.54	0.00	1.63
95	小琉球	4.74	-4.27	0.00	1.94
96	蘭嶼	3.29	-5.33	0.00	1.59
96	綠島	2.06	-2.17	0.00	0.65
97	澎湖	2.74	-2.73	0.00	0.88
100	西南近岸	4.334	-5.269	0.001	1.336
101	西北近岸	5.420	-6.830	0.001	2.330

三、花東及山區重力測量工作

100 年花東及山區重力測量工作，主要辦理臺灣東北部地區及部分臺灣本島絕對重力點與一等重力網聯測，施測點位包含 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 $\pm 0.042\text{mgal}$ ，施測重力點位分布如圖 2 藍色區域。101 年花東及山區重力測量工作，主要辦理臺灣東南部地區及部分臺灣離島絕對重力點與一等重力網聯測，離島含澎湖(澎湖本島、七美、望安)、金門(大、小金門)、馬祖(南、北竿)、蘭嶼及綠島，施測點位包含 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，經網形平差後的平均精度約為 $\pm 0.044\text{mgal}$ ，臺灣東南部地區施測重力點位分布如圖 2 黃色區域。

使用儀器為 L&R Gravition EG，並要求重力測量測線閉合差小於 0.15mgal 、重力測量測段往返閉合差小於 0.15mgal 、重力網環線閉合差小於 0.80mgal 。

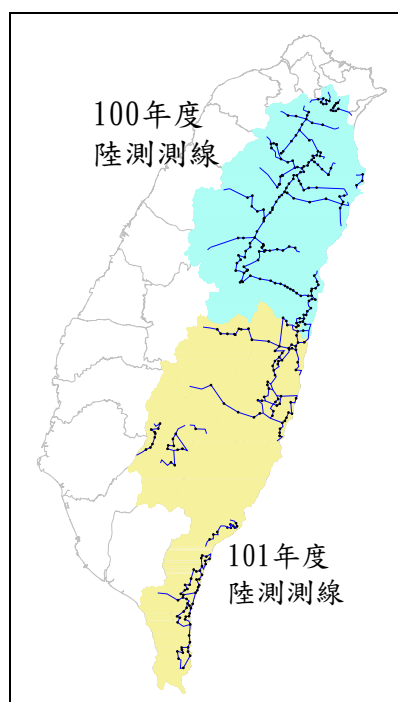


圖 2. 花東及山區施測重力點位分布圖

本計畫 2 年度(100 及 101 年度)工作補足中央山脈地區重力點，為進行重力網平差計算時，則一併彙整近年來所有相對重力測量資料進行計算，資料列表如下：

表 3. 近年辦理重力測量工作一覽表

項次	計畫名稱	主辦單位	辦理時程	辦理數量	說明
1	93 年度離島一等水準點埋設及其水準、衛星定位、重力測量工作	內政部土地測量局	2004~2006	201	辦理澎湖、金門、馬祖、蘭嶼、綠島及小琉球等離島一等水準點的重力資料
2	九十三年度一、二等重力測量工作	內政部	2004~2006	4356	辦理臺灣西部地區及部分東部地區一、二等重力點資料
3	95 年度一等水準點上重力測量檢測工作	內政部國土測繪中心	2007	2198	辦理臺灣地區一等水準點的重力資料
4	100 及 101 年度花東及山區重力測量工作	內政部國土測繪中心	2011~2012	672	辦理臺灣東部、中央山脈地區及澎湖、金門、馬祖、蘭嶼、綠島等離島地區一、二等重力點資料

經整併表 3 內之 4 項計畫，後續進行平差計算時[14]將分為以下 6 個區域進行，各區域範圍及資料來源如下，臺灣本島地區(臺灣本島及離島小琉球)，資料含表 3 內項次 1、2、3、4。澎湖地區(澎湖本島及七美、望安等地區)資料含表 3 內項次 1、4。金門地區(金門本島及列嶼)，資料含表 3 內項次 1、4。馬祖地區(南、北竿)，資料含表 3 內項次 1、4。蘭嶼地區(蘭嶼鄉)，資料含表 3 內項次 1、4。綠島地區(綠島鄉)，資料含表 3 內項次 1、4。各區域網形如圖 3~圖 8。

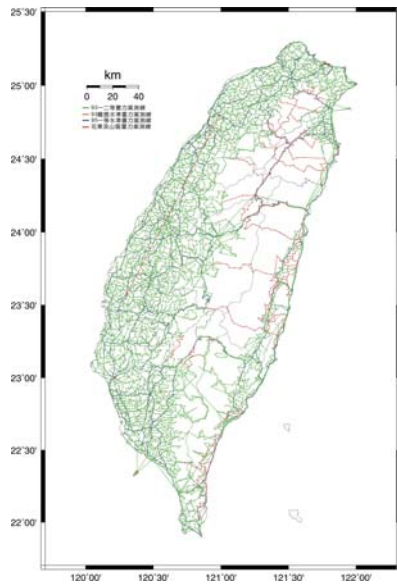


圖 3. 臺灣本島地區重力網形圖

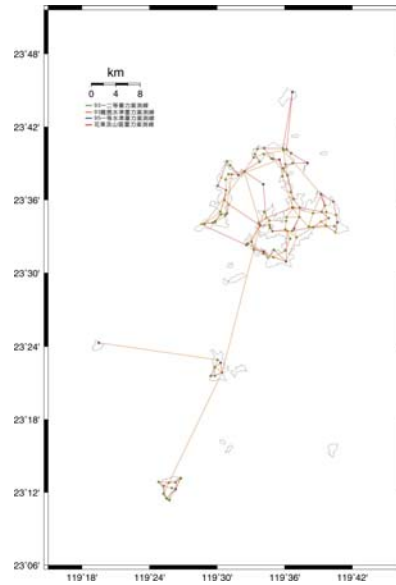


圖 4. 澎湖地區重力網形圖

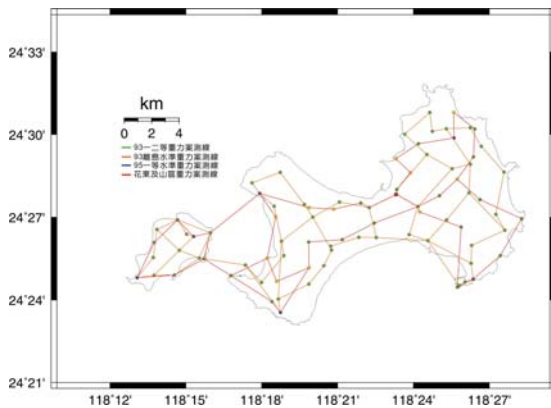


圖 5. 金門地區重力網形圖

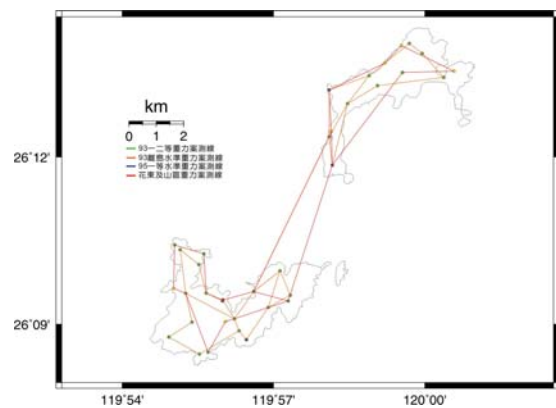


圖 6. 馬祖地區重力網形圖

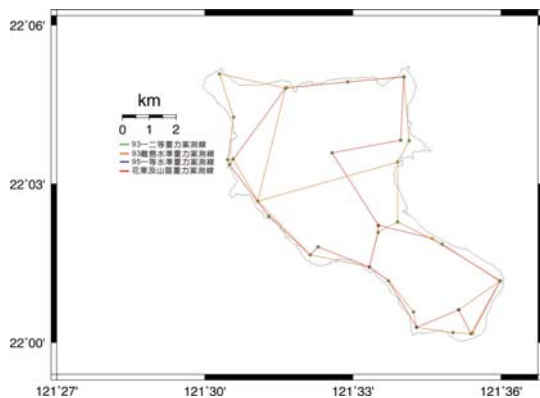


圖 7. 綠島地區重力網形圖

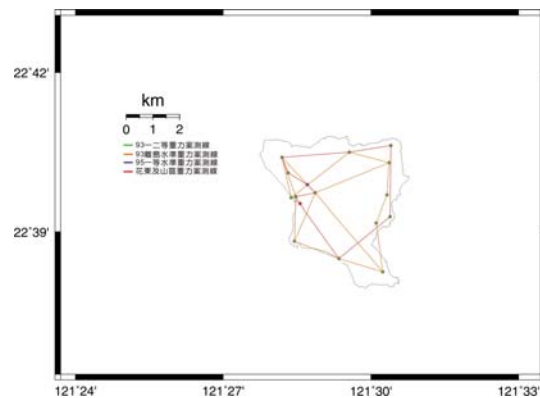


圖 8. 蘭嶼地區重力網形圖

四、檢核線

於一等水準點上辦理陸上 24 小時 GPS 測量，目地為檢核大地水準面精度，其分布位置以適合評估船載重力之貢獻。由於 GPS 靜態觀測持續時間越長，精度表現也會隨之變好，但其精度提升的效益漸趨緩，而考量人事及時間成本後，設定進行 24 小時之連續觀測，此定位精度已可達約 1cm。並選擇點位間相對距離約 10km 左右，對於檢核大地水準面的點位密度應足夠。

(一)100~102 年度辦理近岸船測時，為評估船載重力之貢獻，特地選擇該測區沿岸以相對距離約 10km 左右之一等水準點作為檢核點進行檢核，可有效評估船載重力效益，各年度檢核線簡述如下：

- 1.100 年度選擇西南沿岸處省道臺 17 線與臺 26 線上一等水準點，計 20 點，北起嘉義縣布袋鎮，南至屏東縣恆春鎮，如圖 9 路線代號 SW。
- 2.101 年度選擇西北沿岸處省道臺 17 線、臺 61 線、臺 15 及臺 2 線上一等水準點，計 30 點，北起新北市石門區，南至嘉義縣東石鄉，如圖 9 路線代號 NW；及山區宜蘭節點沿臺 7 線、臺 7 甲線及臺 8 線至大禹嶺之一等水準點，計 10 點，北起宜蘭縣宜蘭市，南至花蓮縣秀林鄉，如圖 9 路線代號 Tai7A，合計 40 點。其中路線代號 Tai7A 主要是檢核 100 年花東及山區重力測量工作施測重力點後所提升的大地水準面精度。
- 3.102 年度選擇東部沿岸處省道臺 9 線、臺 11 線上一等水準點，計 28 個點位，北起三貂角，南至三仙台，如圖 9 路線代號 E。但今(102)年度作業目前成果尚未完成，故大地水準面精度評估與比較數據未列入表 6。

(二)觀測後 GPS 計算進行閉合差分析以滿足下列要求：

- 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 500km。
4. X、Y、Z 各坐標分量之閉合差不得大於 2cm。

(三)以上所述已有 4 條檢核線，另為全面性評估模型精度，則再蒐集 6 條皆為 24 小時 GPS 觀測之檢核線，以及 3 條為 12 小時 GPS 觀測之檢核線，合計 13 條，如圖 9 所示。內政部提供的路線代號 North、Center、South、East 及國科會計畫提供的西北部(台 3 線，路線代號 Tai3)和東南部地區(南迴公路、台 9 線，路線代號 Tai9)6 條皆為 24 小時 GPS 連續觀測的一等水準點，可做為大地水準面模型精度評估之用，檢核線整理如表 4。此外，加入國土測繪中心提供臺 3 線上、臺 8 線上、臺 20 線上(路線代號分別為 12hr_Tai3、12hr_Tai8、12hr_Tai20)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，檢核線整理如表 5。

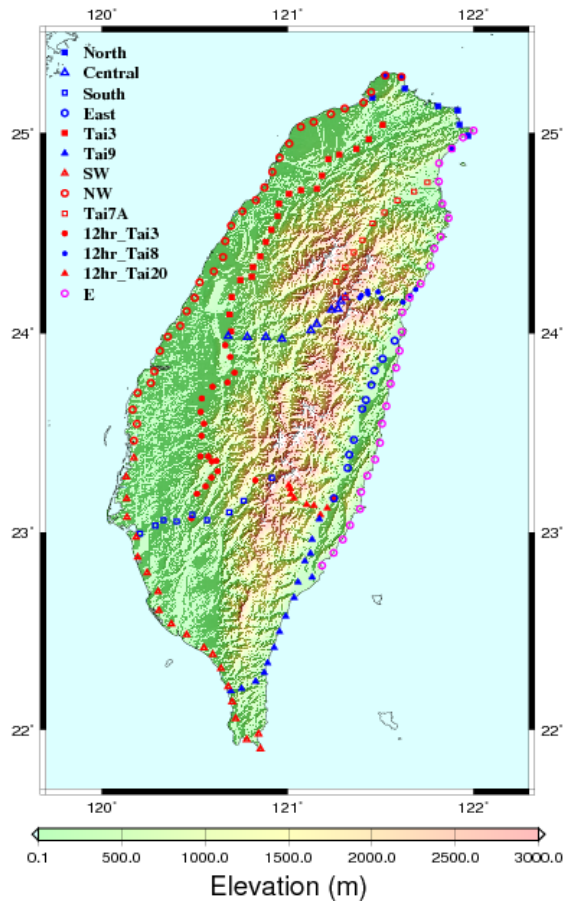


圖 9. 大地水準面模型檢核線分布

表 4. 24 小時 GPS 檢核線

路線代號	說明	測點數量	備註
North	北部基隆沿海	9	內政部提供
Central	台 14 線，芬園至大禹嶺	10	內政部提供
South	台 20 線，台南至埤口	9	內政部提供
East	台 9 線，花蓮至富里	10	內政部提供
Tai3	台 3 線，台北至霧峰	20	國科會計畫
Tai9	南迴公路、台 9 線池上以南	15	國科會計畫
SW	台 26、台 17 線西南沿岸	20	100 年度近岸船載計畫
NW	台 17 線、台 15 線西北沿岸	30	101 年度近岸船載計畫
Tai7A	台 7 甲線宜蘭、梨山至大禹嶺	10	101 年度近岸船載計畫
E	台 11 線東部沿岸	28	102 年度近岸船載計畫

表 5. 12 小時 GPS 檢核線

路線代號	說明	測點數量	備註
12hr_Tai3	台 3 線，台中霧峰烏溪橋至高雄內門	19	國土測繪中心提供
12hr_Tai8	台 8 線，大禹嶺至太魯閣節點	9	國土測繪中心提供
12hr_Tai20	台 20 線，向陽至富里節點	10	國土測繪中心提供

五、精度驗證方法及分析

利用所有重力資料所計算出的大地水準面模型，亦稱為重力法或傳統法大地水準面模型，而重力法大地水準面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(N^{GPS} ：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定位精度甚高，因此重力法大地水準面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，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值(N^{GPS})與重力法大地起伏值($N^{Gravity}$)，利用其差值($N^{GPS} - N^{Gravity}$)的標準偏差來評估大地水準面精度 [2]。

加入 100 至 101 年度船載重力測量成果與花東山區重力測量成果前後的大地水準面精度分析如表 6，表中 Geoid 為未加入重力資料前的大地水準面模型，Geoid101 為加入上述重力資料後的大地水準面模型。

表 6. 大地水準面精度評估與比較(單位: cm)

路線代號	模式	差值($N^{GPS} - N^{Gravity}$)的				標準差差異 (Geoid101- Geoid) (負值代表精度提升)
		最大值	最小值	平均值	標準差	
North	Geoid	-16.0	-19.0	-17.9	0.9	0.9
	Geoid101	-12.8	-18.4	-15.5	1.8	
East	Geoid	-3.4	-10.0	-3.3	4.4	-1.8
	Geoid101	-17.1	-24.5	-19.8	2.6	
Central	Geoid	-2.0	-28.9	-13.1	8.7	-1.6
	Geoid101	-2.0	-26.1	-11.3	7.1	
South	Geoid	-16.2	-42.8	-32.3	11.0	-3.5
	Geoid101	-31.1	-50.1	-42.3	7.5	
Tai3	Geoid	-16.1	-40.4	-26.2	6.7	1.3
	Geoid101	-21.0	-48.7	-30.8	8.0	
Tai9	Geoid	-5.7	-32.9	-20.7	6.8	-2.5
	Geoid101	-18.1	-34.6	-24.8	4.3	
SW	Geoid	-3.9	-36.9	-18.8	8.9	-2.4
	Geoid101	-10.7	-36.6	-21.5	6.5	
NW	Geoid	-12.3	-30.4	-21.2	4.4	-1.3
	Geoid101	-7.9	-25.6	-18.3	3.1	
Tai7A	Geoid	29.1	-10.5	7.9	12.2	-2.4
	Geoid101	15.6	-14.3	-2.1	9.8	
12hr_Tai3	Geoid	-15.5	-34.5	-25.7	6.4	-1.4
	Geoid101	-31.8	-47.5	-39.7	5.0	
12hr_Tai8	Geoid	26.1	-5.7	11.6	9.7	0.7
	Geoid101	11.8	-20.9	-2.6	10.4	
12hr_Tai20	Geoid	12.2	-22.7	-0.3	9.6	-1.3
	Geoid101	-3.7	-27.4	-12.7	8.3	

由表 6 我們可以看到，加入 100 年度西南近岸船載重力之後，從西南沿岸的 20 個檢核點(SW)上，可以看到大地水準面精度提升了 2.4 公分；加入 101 年度西北近岸船載重力之後，從西北沿岸的 30 個檢核點 (NW) 上，可以看到大地水準面精度提

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水準面精度亦有提升，如東部檢核線 (East) 提升了 1.8 公分；路徑經過山區的中部檢核線(Central)提升了 1.6 公分；南部檢核線 (South) 精度提升了 3.5 公分；臺九線 (Tai9) 精度亦提升了 2.5 公分；在臺七甲線進行 24 小時 GPS 測量的山區檢核點上 (Tai7A)，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。由以上數據顯示，在位置相對應的檢核線(表 6 裏 12 條中的 9 條)皆可看見加入重力資料後，對大地水準面模型精度的提升有明顯的效益。

由兩個模式 Geoid 與 Geoid101 之間的差異($N^{Gravity} - N^{Gravity101}$)最大值為 16.6cm、最小值為-20.6cm、平均值為-0.42cm、標準差為 2.36cm，其差異分布如圖 10。倘若標準差數值小的話，代表兩個模式之間變化程度不大，而標準差為 2.36cm 及從圖 10 多處差異量較大來看，加入花東及山區重力及西部近岸的船載重力後，對於大地水準面有明顯的影響了

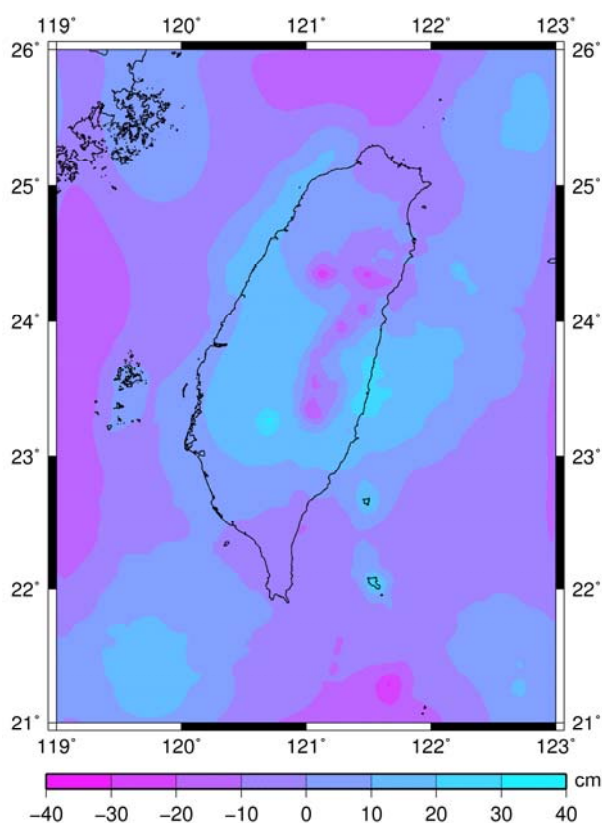


圖 10. Geoid 與 Geoid101 的大地起伏值差異量分布圖

六、結論

國土測繪中心辦理 100-101 年度近岸船載重力測量作業及 100-101 年度花東及山區重力測量工作之重力資料加入大地水準面模型後，由臺灣本島多條檢核路線檢核，發現確實提升了大地水準面模型精度，尤其以往重力點位密度較疏的山區，其精度提升較明顯，而路線代號 North、Tai3、12hr_Tai8 檢核的精度未見提升，North、Tai3 未位於測區範圍內，無法有效評估加入重力資料後的效益，12hr_Tai8 位於中橫東段

峽谷內，有可能 GPS 觀測透空度不好而影響了定位精度，且 3 條檢核精度其數值尚小，整體而言，國土測繪中心補足近岸海域及山區重力密度後，全面提升了臺灣地區大地水準面模型的精度。

大地水準面模型可以在防災、監測及高程現代化中有所應用，如光達應用、淹水範圍估計、建立混合型大地水準面模式，故建議完成 102 年度臺灣東部近岸船載重力測量後，精算最新版臺灣地區大地水準面模型，交由於內政部公布，提供予各界使用。

七、誌謝

感謝內政部提供船載重力儀於各船載重力測量作業使用。

參考文獻

- [1]內政部 (2001) 一等級水準點上實施重力測量工作，工作報告書。
- [2]內政部 (2003) 一等級二級水準點上實施重力測量工作，工作報告書。
- [3]內政部 (2003) 臺灣地區大地起伏模式精度評估，報告書。
- [4]內政部 (2005) 空載重力測量工作，工作報告書。
- [5]內政部 (2007) 西部及東沙海域空載重力測量工作，期末報告書。
- [6]內政部 (2008) 低航高空載重力測量工作，期末報告書。
- [7]內政部國土測繪中心 (2006) 臺灣本島與離島高程連測計畫95年度連測作業，期末報告。
- [8]內政部國土測繪中心 (2007) 臺灣本島與離島高程連測計畫96年度連測作業，期末報告。
- [9]內政部國土測繪中心 (2008) 臺灣本島與離島高程連測計畫97年度連測作業，期末報告。
- [10]內政部國土測繪中心 (2011) 100年度臺灣本島近岸船載重力測量作業，期末報告。
- [11]內政部國土測繪中心 (2011) 100年度花東及山區重力測量工作，工作報告書。
- [12]內政部國土測繪中心 (2012) 101年度臺灣本島近岸船載重力測量作業，期末報告。
- [13]內政部國土測繪中心 (2012) 101年度花東及山區重力測量工作，工作報告書。
- [14]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，第71-82頁。