

臺灣本島與離島高程連測計畫
97年度連測作業

期末報告

承辦單位：國立交通大學土木工程學系

詮華國土測繪有限公司

委託單位：內政部國土測繪中心

主持人：黃金維 教授

共同主持人：吳朝榮 教授

黃立信 副教授

陳松安 副教授

洪志偉 測量技師

日期：中華民國 99 年 11 月

目錄

圖目錄 4

表目錄 8

第一章 前言與文獻回顧	10
1-1 前言	10
1-2 文獻回顧	11
1-3 高程現代化	19
1-4 實際作業進度	21
第二章 連測方法	23
2-1 連測原理	23
2-2 大地測量法與大地起伏	26
2-3 海洋動力法	29
2-3-1 DUPOM 模式	30
2-3-2 POM 模式	33
第三章 潮位資料蒐集與平均海水面分析	38
3-1 潮位資料	38
3-2 平衡潮理論及調和分析	41
3-3 平均海水面	42
第四章 現有重力資料	49

4-1 陸測重力資料	49
4-2 船載重力資料	53
4-3 空載重力資料	54
5000 公尺航高空載重力	54
4-4 測高重力資料	56
第五章 近岸船載重力測量	60
5-1 船載重力測量介紹	60
5-1-1 精度評估方式	63
5-1-2 施測範圍、儀器及測量船隻介紹	66
5-1-3 施測方法介紹	68
5-2 船載重力測量資料處理	72
5-2-1 GPS 資料處理	72
5-2-2 GPS 動態基線解算	73
5-2-3 重力資料處理	77
5-3 成果及精度分析	83
5-3-1 GPS 動態定位精度分析	83
5-3-2 船測重力成果及精度分析	87
5-4 水深測量	90
第六章 大地起伏及垂線偏差計算成果	97

第七章 GPS 連測成果及高程基準差異求定.....	107
7-1 本島—離島(澎湖)高程連測之 GPS 及水準作業	107
7-2 計算成果	111
7-3 本島與離島 (澎湖) 高程基準差異推估：大地法.....	116
7-4 海洋法成果	118
7-4-1 DUPOM 模式成果.....	118
7-4-2 POM 模式成果	121
7-4-3 海洋法成果比較.....	126
7-5 大地法與海洋法之結果比較.....	127
第八章 結論與建議	128
8-1 結論	128
8-2 建議.....	130
參考文獻.....	132
附錄一、重力觀測紀錄表	136
附錄二、儀器校正報告	137
附錄三、GPS 計算參數及偏心點水準測量數據.....	141
附錄四、審查意見辦理情形	144
附錄五、發表論文文稿	151

圖目錄

圖 1-1 本計畫實際工作進度甘特圖	22
圖 2-1 潮位站周圍之幾何關係圖	23
圖 2-2 本島與離島高程之參考系統	24
圖 3-1 基隆、澎湖及將軍潮位站地理位置圖	39
圖 3-2 1991 至 2015 年(a)基隆(c)澎湖(e)將軍周期 8.85 年平衡潮逐時潮位圖，(b)基隆(d)澎湖(f)將軍周期 18.6 年 平衡潮逐時潮位圖.....	46
圖 3-3 1991 至 2007 年(a)基隆(b)澎湖(c)將軍逐時潮位	47
圖 4-1 本島重力點位資料 (a)中研院於 1980 至 1987 年施測 之 603 個重力觀測點(第一組資料)分布圖 (b)中國測量 學會於 1986 至 1988 年施測之 276 個重力觀測點(第二 組資料)分布圖 (c)中國測量學會於 1997 至 1999 年施 測之 747 個重力觀測點(第三組資料)分布圖 (d)內政部 於 2000 至 2001 年施測之 1010 個重力觀測點(第四組資 料)分布圖 (e)內政部於 2002 至 2003 年施測之一等二 級重力觀測點(第五組資料)分布圖(篩選後 1092 點) (f) 內政部於 2008 年公告之 4364 點重力點	51

圖 4-2 離島重力點位資料 (a)金門 (b)馬祖 (c)澎湖 (d) 小琉球 (e)綠島 (f)蘭嶼.....	52
圖 4-3 (a)Hsu 船測重力資料(b)基隆海域 (c)小琉球海域 (d)綠島、蘭嶼海域.....	54
圖 4-4 5000 公尺航高空載重力	56
圖 4-5 NCTUM 之 2' x2' 重力異常.....	57
圖 4-6 台灣及環海自由空間重力異常等值圖，等值間隔為 20 mgal.....	58
圖 5-1 航線系統誤差量偏差值(bias)與漂移值(drift)示意 圖.....	63
圖 5-2 船載重力實測點與內插點示意圖.....	64
圖 5-3 船載重力施測範圍.....	66
圖 5-4 ZLS Dynamic Gravity Meter.....	66
圖 5-5 龍海明陸號測量船隻照片.....	67
圖 5-6 重力值參考高度示意圖.....	69
圖 5-7 重力參考點位分佈圖.....	70
圖 5-8 重力參考基點設置圖.....	71
圖 5-9 Bernese 5.0 處理 GPS 動態基線之流程.....	76
圖 5-10 單條航線輸出資料.....	80

圖 5-11 五個測區 OVERLAP 坐標定位成果	85
圖 5-12 交叉點平差後軌跡重力異常	88
圖 5-13 交叉點重力異常差異值的空間分佈 (平差前) ..	89
圖 5-14 交叉點重力異常差異值的空間分佈 (平差後) ..	89
圖 5-15 水深測量流程圖	90
圖 5-16 Kongsberg EA400P 雙頻單音束測深機.....	91
圖 5-17 Bar Check 檢核情形	92
圖 5-18 潮位站設置圖_澎湖測區	93
圖 5-19 測船姿態變化圖 (資料來源為 99 年 7 月 7 日, 測線 NS10)	94
圖 5-20 水深測量地形圖_澎湖測區	96
圖 6-1、各區重力異常交叉點差值分布圖	98
圖 6-2 台灣新大地起伏網格	100
圖 6-3 大地起伏檢核路線分佈圖(圖中圓形、星形、三角形、 方形黑點分別代表北、中、南、東檢測路線。底圖代表 地形)	102
圖 6-4 布格重力異常網格模型(單位: mgal)	104
圖 6-5 台灣垂線偏差圖 (a)南北方向 (b)東西方向 單位: 秒	105

圖 6-6 天文觀測點分佈圖	106
圖 7-1. GPS 觀測點位置圖	108
圖 7-2 累積計算至第 10 年年平均海水面地形(Jan et al., 2006).....	119
圖 7-3 累積計算至第 10 年每月海面地形(Jan et al., 2006)	120
圖 7-4 巢狀模式系統	121
圖 7-5 數值模式與人造衛星的 SST 相關係數.....	123
圖 7-6 (a)模式模擬之海流 (0~300m) 分布圖 Liang et al. (2003)由船碇式都卜勒流剖儀所得之結果(b)	124
圖 7-7 POM 模式海面地形	125

表目錄

表 1-1 文獻整理.....	12
表 1-2 若干國家的高程基準.....	14
表 3-1 基隆、澎湖及將軍潮位站資訊(中央氣象局)....	40
表 3-2 基隆、澎湖及將軍潮位站異動一覽表(中央氣象局)	40
表 3-3 本研究已收集基隆、澎湖及將軍潮位資料時間段一覽 表.....	40
表 3-4 各潮位站之 Pope τ 統計測試成果及平均海水面.	47
表 5-1 龍海明陸號船體諸元表.....	68
表 5-2 引測成果表.....	70
表 5-3 Bernese 5.0 使用者輸入之檔案.....	72
表 5-4 CODE 和 IGS 軌道之精度比較表.....	73
表 5-5 五個觀測時段之重疊時間.....	83
表 5-6 重疊時段內坐標成果差異量 RMS 值(單位:m)....	86
表 5-7 澎湖測區重力異常之交叉點分析(單位:mgal)....	87
表 6-1、過去三年大地起伏模型所用到的重力資料.....	97
表 6-2、各區經平差改正後重力異常交叉點差值統計表 (mgal).....	98

表 6-3	長波長大地起伏模式精度評估 (單位：公尺) ..	99
表 6-4	各點之點號、點名及種類對照表(皆為一等一級水準 點).....	101
表 6-5	最新大地起伏精度分析結果(unit: meter)...	103
表 6-6	天文觀測點檢核垂線偏差的值(單位：秒).....	106
表 7-1	GPS 觀測各點使用儀器及天線盤之型號.....	107
表 7-2	以北港為中心星形網形各觀測點位高程計算結果(單 位：m)	112
表 7-3	最後幾何高程成果	113
表 7-4	各觀測點之大地起伏值	114
表 7-5	各觀測點位正高值與高程基準表	114
表 7-6	將軍與基隆兩水準點計算估計大地起伏值精度 .	115
表 7-7	基隆起算推算基隆到澎湖平均海水面地形差異 (單 位：m)	116
表 7-8	將軍起算推算基隆到澎湖平均海水面地形差異 (單 位：m)	116
表 7-9	DUPOM 10 年 Mean SST 網格資料 (單位：cm) ..	126
表 7-10	POM 24 年 Mean SST 網格資料 (單位：cm) ...	126

第一章 前言與文獻回顧

1-1 前言

高程基準 (vertical datum) 是陸地上高程測量的依據，理論上可用大地水準面或是橢球面為基準，實際上可用單個潮位站上的長期平均海水面，也可以用多個潮位站之平均海水面 (Rapp and Balasubramanis, 1992). 因決定絕對大地起伏面是困難的，故實際上一般取潮位站定義之平均海水面作高程基準 (或是零高程點)。用此方法定義之該參考面會被垂直地殼變動和在此潮位站平均海水面變化所影響。高程基準系統與下列課題相關(Heck and Rummel, 1990; Rapp and Balasubramania, 1992)：

1. 用一致性的高程基準，才能比較由大地測量法與海洋法所決定之長距離海面坡度 (sea surface slope)。
2. 不同高程基準帶會引起重力異常資料庫之系統誤差。
3. 衛星測高任務之測高儀率定時，需要全球統一之高程基準。
4. 不同的時間和空間尺度海水面變化監測需要一個全國唯一、且一致性之高程基準。
5. 國家製圖需統一之高程基準。
6. 工程應用時，平均海水面與高程基準之等位面之關係必須清楚。

內政部於 90 年、92 年完成台灣本島一級、一等二級水準測量，復於 93 年完成澎湖、金門、馬祖、小琉球、蘭嶼、綠島等離島一等水準測量。台灣本島水準測量成果係以基隆潮位站平均海水面為高程起算點，構成 2001 台灣地區高程基準(TWVD2001)。各離島之高程基準則因海域的阻隔，未能採用台灣本島之 TWVD2001 高程基準，而係以各離島潮位站觀測推算之平均海水面作為高程起算點，因此目前各島均為各自獨立之區域性高程系統成果。若能完成台灣本島與各離島高程連測，則可得將全國水準網均歸算到 TWVD2001。

本案宗旨即為連結台灣本島與澎湖之間高程系統及分析連結精度。本案將收集潮位資料、重力資料、GPS 測量資料、海洋等多種資料，辦理台灣本島與澎湖高程基準連測作業。

1-2 文獻回顧

高程基準的求定影響了大地測量的結果的定義。這是大地測量最重要的問題之一。對於像是幅員廣大的國家(例如美國)，或是國土被海洋隔開的國家，就會發生高程基準不一致的問題。有很多方法可以求定基準不一致的情形。如同我們所知，高程基準需建立在一等位面上，而利用重力資料推求等位面乃是其基本精神，在此精神下，許多國家用了不同方法進行高程基準連結的計畫，吾人選擇了列出幾篇具有代表性的論文或報告，詳述如下，並整理如表 1-1。

表 1-1 文獻整理

連結案例	方法	精度
Heck and Rummel (1990)	大地法與海洋法	並未提到
Pan and Sjoberg (1998)	大地法	可達 6 公分
European vertical reference Frame 2000 (EVRF2000)	大地法	並未提到
Jekeli (2000)	大地法	並未提到
Featherstone (2000)	大地法	並未提到
Arabelos and Tscherning (2001)	大地法	可達 6 公分
莫志明等人 (2004)	大地法	並未提到
Ihde and Sanchez (2005)	大地法	並未提到
Bursa et al. (2007)	大地法	並未提到

1. Heck and Rummel (1990)，利用四種方法求定高程基準，分別是(1)海洋法(2)衛星測高結合地轉流(3)重力測量結合水準測量(4)求定大地邊界值
2. Pan and Sjoberg (1998)，利用 35 個潮位站及地表的重力資料來連結波羅的海周圍國家的高程基準，精度可達 6 公分。
3. Bursa et al. (2007)，利用 T/P 測高衛星資料與 EGM96 重力模型來求定 W0(全球高程參考系統)，並求出 W0 與各地區高程基準的差異。
4. Jekeli (2000)，回顧高程與高程基準的基本定義，並詳細討論如何求定當地高程基準面

5. Ihde and Sanchez (2005)，討論利用潮位站資料、衛星測高以及重力資料以建立全球的高程參考系統。
6. Featherstone (2000)，求定澳洲的大地起伏模型 AUSGeoid98 並利用此大地起伏模型與 1013 筆高程資料，加上潮位站的資料來連結澳洲跟幾個島嶼間的高程基準。
7. Arabelos and Tscherning (2001)，研究中提到，利用 GOCE 衛星任務可得到一個用來連接高程基準的全球大地起伏模型，並利用此大地起伏模型求定阿姆斯特丹與紐約的高程基準差異，精度可達 6 公分。
8. European vertical reference Frame 2000 (EVRF 2000)，這是歐盟與國際大地測量學會 (IAG) 其中的工作團隊所定出的一個高程基準，利用下列三點定出 EVRF2000:(1)高程原點設在荷蘭的 NAP (Normaal Amsterdams Peil)，(2)NAP 的等位面，(3)UELN 的高程平差網。
9. 莫志明等人 (2004)，研究中國大陸與香港間之高程基準差異，其結論為青島和香港間之高程基準差異為 0.44 公尺
10. 國際大地測量學會 (IAG) 也鼓勵全球高程基準之連結，
(<http://www-ceg.eng.ohio-state.edu/~cjekeli/vertical.html>)
11. 表 1-2 為若干國家的高程基準及原點。以美國為例，它的高

程基準為 NGVD29 (National Geodetic Vertical Datum 1929 , <http://www.ngs.noaa.gov/TOOLS/Vertcon/vertcon.html>), 為 1929 年時取 21 個美國境內的潮位站和 5 個在加拿大境內的潮位站之平均海水面的平均值來確定, 1973 修正過一次, 目前其境內所用的高程基準 NAVD88 為 1988 年設置。又中國大陸於 1956 年, 取青島潮位站 1950~1956 年的平均海面做為國家統一的基準, 稱為 1956 黃海高程基準; 1987 年決定採用新的高程基準, 以 1952~1979 年的資料, 對青島潮位站重新進行計算, 取 19 年為一週期共 10 組資料之平均值, 稱為 1985 國家高程基準(胡明城、魯福, 1994)。

表 1-2 若干國家的高程基準

國家	高程基準	原點
Australia	Australian Height Datum AHD(71), also AHD Tasmanian datum; http://www.auslig.gov.au/geodesy/datums/ahd.htm	Johnston Geodetic Station H=566.30 m Australian Geodetic Datum (AGD) 1966: =25 ° 56' 54.5515" S =133 ° 12' 30.0771" E (datum

		constrained to 30 tide gauges around the coast)
Austria	Adriatic Sea	Pegel Triest/1875 (in Italy) =45 ° 41' N =13 ° 50' E
Canada	Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928 (CGVD 1928)	constrained to 4 tide gauges on East coast and 2 tide gauges on West coast
China	National Height Datum of 1985	Qingdao tide gauge station
Czech Republic	Height System Balt after Adjustment (normal heights)	Kronshtadt
Denmark	DVR90	G.M.902 H=5.5700 m =56.15724277 °N =10.21235152 °E
Estonia	BHS 77 (The Normal Baltic Height System)	Kronstadt Tide Gauge Station 1825 - 1840 (epoch 1832.5)
Finland	N60 Orthometric heights, classical geoid, tidal	Helsinki tide gauge; mean sea

	correcion to the mean geoid. Heights are reduced to the epoch 1960.0 using uplift values computed from repeated precise leveling.	level 1960.0 =60.154° N = 24.957° E
Germany	related to Normaals Amsterdam Piel (NAP)	3614-00005 (Wallenhorst) H=94.45127 m =52 ° 20'59" N =8 ° 0'55" E
Hungary	Uniform National Height System (EOMA 1980)	Nadap H=173.1638 m (above Baltic Sea level)
Ireland	"Malin Head" Vertical Datum	Malin Head Fundamental Bench Mark
Italy	Genova 1942	Genova Tide Gauge =44 ° 24' 42" N =8 ° 55' 28" E
Japan	Mean Sea Level of Tokyo bay (normal orthometric heights soon to be replaced by Helmert orthometric heights)	Japanese Vertical Datum Bench Mark H=24.4140 m Tokyo Datum: =35 ° 40' 28" N =139 ° 45' 3"

		E
Luxembourg	Nivellement Général du Luxembourg (NG95)	Normaals Amsterdam Piel (network attached by adjustment to German network)
Norway	NN1954	D40N0055, Tregde H=11.2047 m EUREF89: =58 °00' 25.468" N =7 °33' 18.508" E N=40.936 m
Poland	Kronstadt 1986	tide gauge at Kronstadt
Portugal	Cascais 1938	=38 °41' 20" N =9 °24' 50" W
Slovenia	Slovenian Vertical Network (1875)	Molo Sartorio (Trieste) H=3.352 m =45 °38' 50.5" N =13 °45' 30.5" E
South Africa	South African Land Leveling	Cape Town

		Harbour (BM 1) H=3.5897 m Hartebeesthoek94 (WGS84): =33 ° 54' 24.32" S =18 ° 25' 10.68" E
Switzerland	National Height System 1902 (LN02)	Repère Pierre du Niton (RPN), Geneva, derived from the tide gauge in Marseilles (France) H= 373.600 m =46.2051317 ° N =6.1549370 ° E
USA	North American Vertical Datum of 1988 (NAVD88)	Father Point (Pointe-au-Père) Rimouski, Québec =48 ° 28' N =291° 31' E

1-3 高程現代化

現今大地測量的理論及技術日益發展，單純利用重力資料所求得的重力法大地起伏模型已經是公分級的精度，GOCE 衛星任務的資料眼看也將能夠被應用，未來的大地起伏精度可望再更上層樓。那麼，傳統耗時費力的水準測量，是不是還具有原先的重要性？抑或可被 GPS 定位技術取代，這當中最重要的關鍵就在於大地起伏的計算是否可以達到令人滿意的水準。如何利用先進的技術訂定一現代化的高程基準來取代傳統的水準測量，已是世界上廣泛研究的課題。

以美國為例，當地的高程基準為 1988 年設置的 NAVD88，之後隨著重力資料的增加及技術的演進，美國的重力法大地起伏模型（USGG2003：US Gravimetric Geoid of 2003）的全區精度可達 8.4 公分；隨著 EGM08 的更新，目前最新的 USGG2009(尚未公佈)全區精度可達 6.3 公分，且在山脈分佈較廣的州境內的精度有顯著且令人滿意的提升，例如，華盛頓州從 USGG2003 的 15 公分精度提升至 8 公分，內華達州從 13 公分提升至 8 公分，北卡羅來納州從 9 公分提升至 4 公分，全區除了加州以外，精度皆優於 10 公分。

美國大地測量局(National Geodetic Survey)為了獲取更多且分佈均勻的重力資料，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，搭配衛星定位技術獲得精度在 2 公分內的高程基準，

名為 GRAV-D 計畫。

GRAV-D 計畫涵蓋項目眾多，除了空載重力測量之外，還預計增購可移動的絕對重力儀 A-10，以及設立一如同我國十八尖山的重力基準站，並且研究更佳的大地起伏計算技術，同時對現有的資料作一整體的平差及過濾，整個計畫預估完成日期為 2022 年；相比之下，台灣已有相當豐富且密集的重力資料，且包含完整且不同姿態的空載重力資料組，另外尚有船測資料、衛星測高資料，以及本計畫內完成的近岸船載重力測量，我國在推動高程現代化的基礎上，在世界上已經處於領先的位置。吾人期許在未來幾年內，台灣便能順利推動高程現代化，並收到其帶來的實際上的效益。

1-4 實際作業進度

本案執行過程中，主要外業為海上重力測量，在東北季風吹拂之季節因風浪過大，每年適宜出海施測的日期為四月到八月之間，適逢颱風季節之情況下，天氣穩定情況成為海上重力測量影響最大因素。且受 96 年度工作案展延影響，需將 96 年度測區(綠島、蘭嶼)優先施測完畢，至 97 年度測區(澎湖)實際施測時已 99 年 7 月。因此 97 年度工作案於 99 年 10 月完成歷經 30 個月，當中含 96 年度外業優先施測及無法施測的東北季風季節造成 97 年度測區延宕施測約 22 個月，在執行單位及相關單位協助下，實際執行工作的月數約為 13 個月，本案實際作業進度列於圖 1-1。

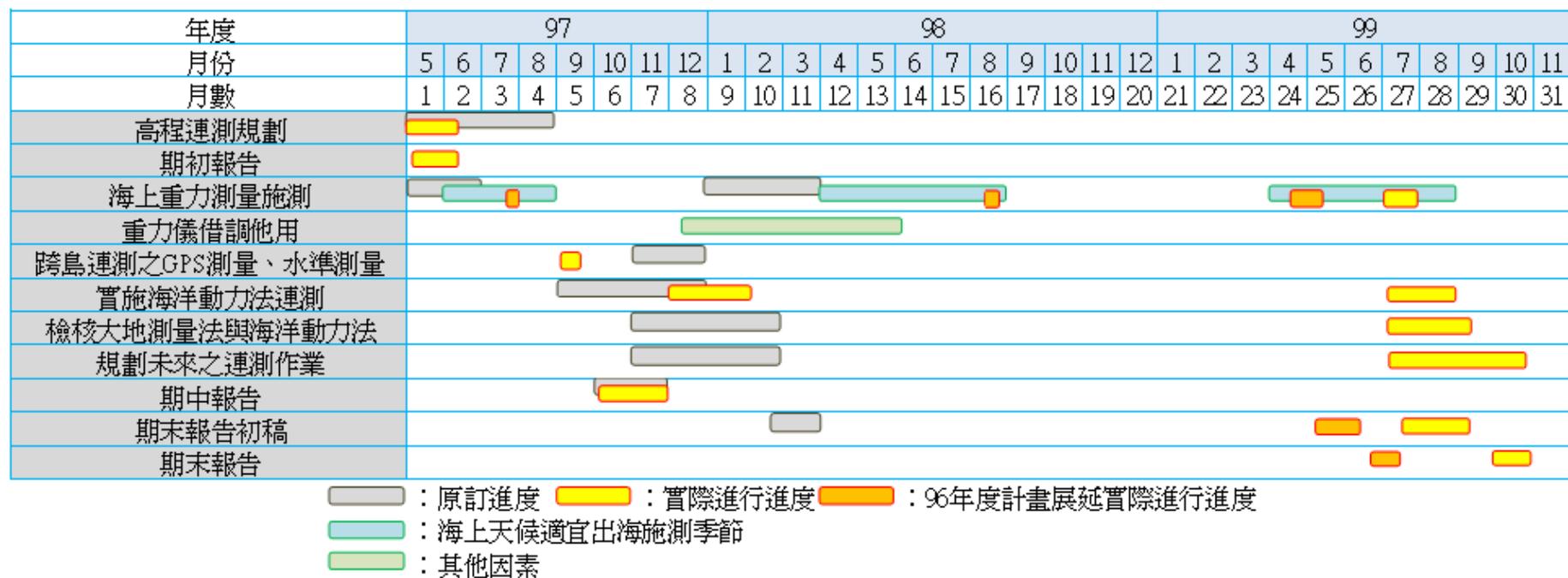


圖 1-1 本計畫實際工作進度甘特圖

第二章 連測方法

2-1 連測原理

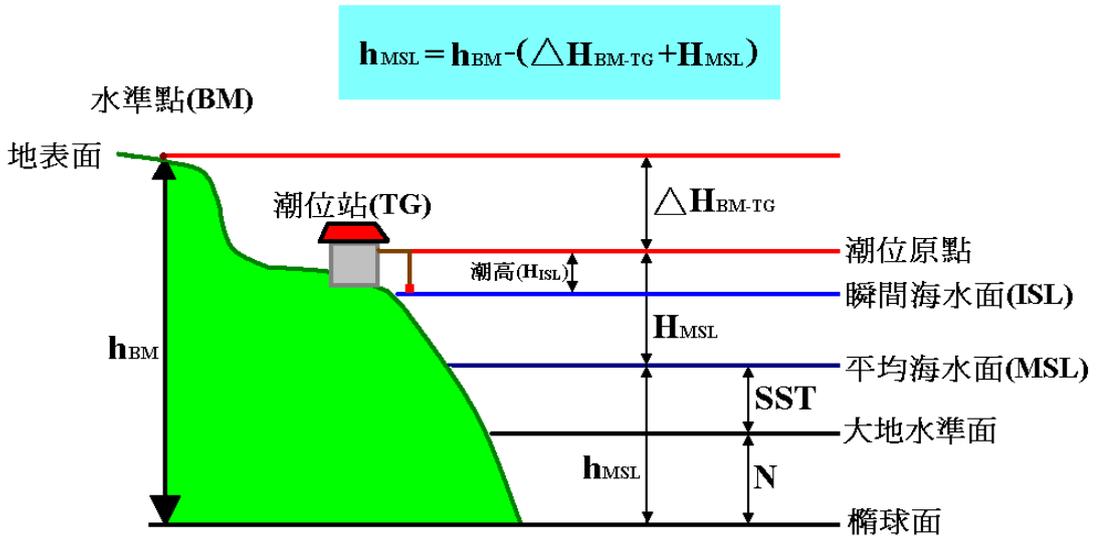


圖 2-1 潮位站周圍之幾何關係圖

圖 2-1 表達台灣潮位站附近之重要參數之幾何關係。其中 BM 為連測水準點，其正高自當地平均海水面起算，即 $H_{BM} = \Delta H_{BM-TG} + H_{MSL}$ ，其中 ΔH_{BM-TG} 為 BM 與潮位參考點(原點)之高差， H_{MSL} 為潮位原點與平均海水面之高差(本量由潮位資料計算而得)。平均海水面與橢球面之差值(h_{MSL})可由 BM 點之橢球高(h_{BM} ，由 GPS 實測而得)、 H_{MSL} 及 ΔH_{BM-TG} 求得，即 $h_{MSL} = h_{BM} - (\Delta H_{BM-TG} + H_{MSL}) = (N + \delta N) + SST$ 。大地起伏(N)可由重力資料求得，而海面地形(SST)以 h_{MSL} 及 N 求得，即 $SST = h_{MSL} - N$ ，SST 之幾何定義為自大地水準面起算之平均海水面高度(反重力方向為正)。

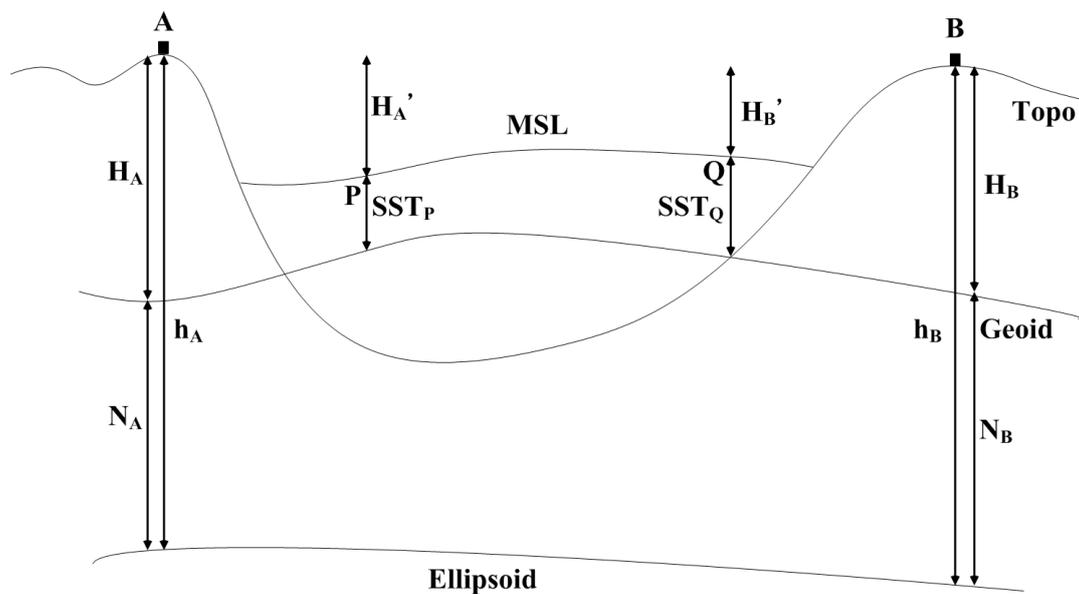


圖 2-2 本島與離島高程之參考系統

有許多方法可決定高程基準差異，見 Heck and Rummel (1990) 和 Rapp and Balasubramanis (1992) 的文獻回顧。這些方法可分為兩類：第一類方法基於大地測量的理論，第二類方法基於海洋學的理論。第一類方法需要重力資料和空間定位科技（如 GPS），第二類方法則需要不同深度面的海洋資料。

高程基準之問題如圖 2-2 所示。圖 2-2 中，A、B 兩點為本島、離島之連測站，A 為本島之水準點（即基隆），B 為離島之水準點，P 點為鄰近 A 點之潮位站刻畫 MSL 之點位，Q 點為鄰近 B 點之潮位站刻畫 MSL 之點位，Ellipsoid 為橢球面，Geoid 為大地水準面，MSL 為平均海面。 H_A, H_B 為大地水準面起算至 A、B 兩點之正高； h_A, h_B 為

橢球面起算至 A、B 兩點幾何高高程； N_A, N_B 則為 A、B 兩點起算之大地起伏值。 SST_P 為 P 點起算之海面地形（平均海水面至大地水準面之高程）， SST_Q 為 Q 點起算之海面地形。由圖 2-2 所示，A、B 兩點之正高高差可由下式表達

$$\Delta H_{AB} = (h_B - h_A) - (N_B - N_A) \quad (2-1)$$

則 B 點之正高可由下式求得：

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB} \quad (2-2)$$

(2-1) 式中 h_A, h_B 可由衛星 (GPS) 方法求得，而 N_A, N_B 則可由重力方法求得，這相當於使用 GPS 和重力方法決定一長距離之高程差異。在本案中，因兩個水準點為海所區隔，所以我們稱之為跨海水準。在大地測量法定海面地形時，海面地形差異計算如下：

$$\Delta SST_{PQ} = (h_Q - N_Q) - (h_P - N_P) = SST_Q - SST_P \quad (2-3)$$

ΔSST_{PQ} 即為本島與離島之高程基準差異。在本法中， h_P, h_Q 為 P 點和 Q 點之平均海水面橢球高，可利用鄰近點位以 GPS 量測橢球高，及直接水準引測至 P 和 Q 點上。在本案中，我們將使用潮位資料計算在至 P 和 Q 點的平均海水面在圖 2-2 中，A 和 B 點之正高以 P 和 Q 點定義之平均海水面起算，而 P 和 Q 間之海面地形值差異即為高程基準差異，因此，本案的目的有二：

1.利用大地測量法，直接以 GPS 及大地起伏求取本島之一水準點（亦為水準原點）與離島之一水準點之正高差，而將本島之高程 (at A)引到離島 (at B)。在離島地區高程網平差中，可固定 B 點的正高，則離島地區之高程系統將自動與本島之高程系統 (TWVD2001)一致。

2.利用大地測量法和海洋動力法，求基隆潮位站與離島潮位站定義平均海水面之海面地形差異。這將用於決定高程基準差異，及判斷離島是否將使用二個高程基準。例如，當本島與離島高程基準差異超過 50 公分時，則在製圖或工程應用時，建議使用離島高程基準，而且必須建立離島和本島 (TWVD2001) 間的高程轉換程序。

下面章節將針對本案相關方法及資料做一說明。

2-2 大地測量法與大地起伏

本案採用的大地起伏計算方法為去除回覆法 (remove-restore techniques)，並採用最小二乘配置法 (Least Squares Collocation, LSC) 計算殘餘大地起伏。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} 與剩餘地形模型大地起伏 N_{rm} ，如 2-4 式

$$N = N_{ref} + N_{res} + N_{rm} \quad (2-4)$$

殘餘重力異常 Δg_{res} 可利用下式求得

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{ref} - \Delta g_{rm} \quad (2-5)$$

其中 Δg 為重力點的重力異常、 Δg_{ref} 為重力點參考場重力異常、 Δg_{rm} 為重力點剩餘地形模型重力異常。在計算參考場重力異常與大地起伏的部分，目前交大採用最新的 EGM08 係數，配合球諧係數展開式展開至 2160 階計算之，解析度可到 5'x5'。在剩餘地形模型(RTM)方面，大地起伏與重力異常計算將用 FFT(Fast Fourier Transform)，配合農林航測所 3 秒解析度數值地形模型計算之。計算得參考場與剩餘地形模型重力異常之後，可獲得殘餘重力異常。利用 LSC 公式，搭配 Tscherning-Rapp 協變方模型計算殘餘大地起伏 N_{res} ，公式如下所示

$$N_{res} = \left(C_{n\Delta g^0} \right) \left(C_{\Delta g^0} + D_{\Delta g^0} \right)^{-1} \left(\Delta g_{res}^0 \right) \quad (2-6)$$

其中 Δg_{res}^0 ：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。

$D_{\Delta g^0}$ ：地面重力異常的雜訊。

若將空載重力加入計算，則公式變為

$$N_{res} = \begin{pmatrix} C_{n\Delta g^0} & C_{n\Delta g^{5000}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\Delta g^0} + D_{\Delta g}^0 & C_{\Delta g^0 \Delta g^{5000}} \\ C_{\Delta g^{5000} \Delta g^0} & C_{\Delta g^{5000}} + D_{\Delta g}^{5000} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta g_{res}^0 \\ \Delta g_{res}^{5000} \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

其中

Δg_{res}^0 : 高度 0 公尺的殘餘重力異常。

Δg_{res}^{5000} : 高度 5000 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。

$C_{\Delta g^{5000}}$: 空中重力異常與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^0 \Delta g^{5000}}$: 地面重力異常與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$C_{\Delta g^{5000} \Delta g^0}$: 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。

$C_{n\Delta g^{5000}}$: 大地起伏與空中重力異常之間的協變方矩陣。

$D_{\Delta g}^0$: 地面重力異常的雜訊。

$D_{\Delta g}^{5000}$: 空中重力異常的雜訊。

將計算得的 N_{res} ，加上 N_{ref} 和 N_{rim} ，最後得到一 quasi-geoid，quasi-geoid

與 geoid 之間的差別為，

$$N_{geoid} \approx N_{quasi-geoid} - \frac{2\pi G \rho}{\gamma} H^2 \quad (2-8)$$

G 為萬有引力常數， ρ 為地層密度，H 為正高。利用(2-8)式，可得到

最後的大地起伏模型。

2-3 海洋動力法

現代的海洋動力學，一般是依據流體力學中，描述海水粒子在一個旋轉框架(rotating framework)中受力後加速度的狀態，依此建立動量方程式(Momentum Equations)，並根據海洋流體質量守恆(Mass Conservation)、能量守恆(Energy Conservation)、流體靜力方程(Hydrostatic Equation)等原理，建立三維動力海洋模式來模擬真實的海洋現象。

在海洋動力學中，平均海水面與大地水準面並不一致，其差異主要是因為大洋流(地轉流)、海水密度變化和海底地形特徵所引起的，此外還有一些隨時間變化的海洋動力現象所引起的附加差異，總和的差異量即為海面地形(SST)，SST 可以從海洋動力模式中求得：

$$\zeta = \frac{P}{\rho_0 g_0} \quad (2-9)$$

式中 P 為靜態平衡壓力， ζ 為 SST (ζ)， ρ_0 為平均海水密度 (約 1.03 g/cm^3)， g_0 為海面重力 (約 9.8 m/s^2)。

由於海洋動力模式通常使用完整的三維方程式，需同時求解三度空間的動量、溫度、鹽度、狀態及連續方程式，所涉及的變數相當多，需要複雜的資料及計算，雖然近年來計算機的速度不斷地增快，水深、風場、鹽溫等海洋資料的空間解析度及精度也不斷地提升，但仍有其限制。因此全球各海洋研究單位針對其需求與目的，基於資料的

解析度及精度，分別對於海洋動力模式中的各項方程式或資料有不同的假設，或發展出自己的方程式或模式，也因此全球目前有許多海洋動力模式可供計算使用，如國內中央大學水文所的 DUPOM(Duo Grid Pacific Ocean Model)、美國普林斯頓大學的 POM(Princeton Ocean Model)、美國國家海洋合作計畫所開發的 ECCO(Estimating the Circulation and Climate of the Ocean)...等。

本案嘗試計算多年(至少二年以上)之月平均(24 筆以上)海面地形(SST)，再計算長期 SST 平均差異值，以求得兩連測站之 SST 差值，並將海洋動力模式及大地法所獲得的結果進行分析比較。在此就 DUPOM 與 POM 兩種海洋動力模式之基本方程及求解模式進行簡介。

2-3-1 DUPOM 模式

DUPOM 是中央大學水文所最新開發之海洋模式 (Jan et al., 2006)，Jan et al.(2006)參考 DieCAST(Dietrich Center for Air Sea Technology)海洋模式(Dietrich and Kao, 1994)，自行發展 DUPOM 模式，其基本方程(Governing Equations)如下所示；

(1)質量守恆(Conservation of Mass)

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2-10)$$

式中； $V=(u,v,w)$ 為速度向量

u,v,w 分別為 x,y,z (x 為東西方向, y 為南北方向, z 垂直) 方向之速度。

(2) 水平動量方程式(Horizontal Momentum Equations)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla_u \cdot V + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla_h \cdot A_h \nabla_h u + \frac{\partial}{\partial z} (A_v \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (2-11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla_v \cdot V - fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla_h \cdot A_h \nabla_h v + \frac{\partial}{\partial z} (A_v \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (2-12)$$

式中； t ：時間

$f=2\omega \sin\phi$ ：科氏力參數(Coriolis Parameter)

ϕ ：緯度

ρ_0 ：平均密度(Mean Density)

p ：壓力(Pressure)

A_h 、 A_v ：分別為水平方向及垂直方向之渦動黏滯性 (Eddy Viscosity)， $A_h=10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(3) 純量守恆 Conservation of Scalar

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot SV + \nabla_h \cdot K_h \nabla_h S + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial S}{\partial z}) \quad (2-13)$$

式中； S ：鹽度(Salinity)

K_h 、 K_v ：分為水平方向及垂直方向之渦動擴散性(Eddy Diffusivity)， $K_h=10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(4) 流体静力方程式(Hydrostatic Equation)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -(\rho - \bar{\rho})g \quad (2-14)$$

式中； $\bar{\rho}$ ：深度 z 之水平方向平均密度

g ：重力加速度。

(5) 状态方程式(Equation of State)

$$\rho = \rho(S, T) \quad (2-15)$$

式中； T ：位势温度(Potential Temperature)

S ：盐度。

此模式适用于北太平洋(North Pacific Ocean)，空间解析度为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 其垂直层共 26 层，模式所需之海深资料为 ETOPO2 海深资料库及台湾国家海洋科学研究中心(National Center for Ocean Research, NCOR)海深资料库所组成，模式之空间解析度于东亚海(East Asian Seas)采较精细之 $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ，并以 Levitus 气候学(Climatology)资料(内含温度及盐度资料)及 Hellerman 风应力(Wind Stress)来驱动模式。

2-3-2 POM 模式

我們利用一個巢狀的三維原始方程式數值海洋模式系統來探討臺灣東岸海面地形 (SST) 之時間變化，此海洋動力數值模式系統包含了兩個模式，一為大範圍但解析度較粗的北太平洋模式 (North Pacific Ocean Model, NPO Model)，另一為解析度較佳的東亞邊緣海模式 (East Asian Marginal Seas Model, EAMS Model)。兩模式都是以普林斯頓海洋模式 (Princeton Ocean Model, POM；詳細介紹可參照 Mellor, 2004) 為基礎發展而成的，此模式在垂直方向採用 sigma 座標，具有格點在垂直方向連續的特性。

POM 模式是美國普林斯頓大學所發展的三維動力海洋模式系統，自 1970 年代開始發展以來，歷經多位學者專家共同合作研發改進後，現階段它已經成為全世界最多國家(70 國)且最多海洋數值模式學者(超過 2100 人)使用的三維海洋動力模式。其基本方程如下所示，下列之方程式均為 σ 坐標轉換後之形式：

(1)連續方程式(Continuity Equation)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (2-16)$$

式中 $\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}$ ：垂直坐標軸， $-1 < \sigma < 0$ ；

H 為海底地形深度(向下為正)

η 為海面高度 SST(向上為正)

z 為水深(向上為正)

(當 $z = \eta$ 時, $\sigma = 0$; 當 $z = -H$ 時, $\sigma = -1$)

D : 總水深($H + \eta$)

U, V : 水平方向之速度

ω : 垂直 σ 坐標面之垂直速度

(2) 水平動量方程式(Momentum Equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' + F_x \end{aligned} \quad (2-17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' + F_y \end{aligned} \quad (2-18)$$

式中 f : 科氏力參數

g : 重力加速度

ρ_0 : 參考密度

ρ' : $\rho - \rho_{mean}$

ρ_{mean} 是在 z 坐標下之面平均密度, 即只隨 z 改變;

(此 ρ' 之作用在於減少壓力梯度誤差)

K_M : 垂直的動黏滯係數

F_x, F_y : 水平之黏滯項

(3) 狀態方程式(Equation of State)

$$\rho = \rho(T, S) \quad (219)$$

式中 ρ : 位密度(Potential Density)

T : 位勢溫度(Potential Temperature)

S : 鹽度

(4) 流体靜力方程式(Hydrostatic Equation)

$$\rho g D = - \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (2-20)$$

式中 p : 壓力

(5) 溫度守恆方程式(Conservation Equation of Temperature)

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (2-21)$$

式中 K_H : 垂直的擴散係數

R : 短波輻射通量(Short Wave Radiation Flux)

(6) 鹽度守恆方程式(Conservation Equation of Salinity)

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (2-22)$$

(7) 紊流動能方程式(Turbulence Kinetic Energy Equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_q \end{aligned} \quad (2-23)$$

式中 $\frac{q^2}{2}$: 紊流動能

l : 紊流尺度

K_q : 垂直的紊流擴散係數

B_1 : 經驗常數

(8) 紊流尺度方程式(Turbulence Length Scale Equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] + E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} \tilde{W} - \frac{Dq^3}{B_1} + F_l \end{aligned} \quad (2-24)$$

式中 \tilde{W} : wall proximity function

R : 短波輻射通量(Short Wave Radiation Flux)

E_1, E_3 : 經驗常數

F_T, F_S, F_q, F_l : 水平之擴散項

此模式在南中國海(South China Sea)空間解析度為 $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ ，在臺灣海峽(Taiwan Strait)此模式之空間解析度可提升至 3~10km，其垂直方向分為 26 層，在表面數層及底部數層可採用較高之解析度，本模式之初始條件可採用較大範圍之東亞邊緣海(East Asian Marginal Seas, EAMS)(Wu and Hsin, 2005)模式的輸出結果，本模式之邊界條件亦可採用 EAMS 模式，以單向巢狀箱合之方式提供每日之溫度、鹽度、速度等資料，並使用 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)的海表面溫度。模式積分時所受之表面外力為風應力(wind stress)，可使用 QuickSCAT/NCEP 混合衛星風場資料，提供模式計算時所需之表面外力。

第三章 潮位資料蒐集與平均海水面分析

3-1 潮位資料

依據中央氣象局網站 (<http://www.cwb.gov.tw/V4/index.htm>) 公佈之海象觀測資訊得知基隆(Keelung)、澎湖(Penghu)及將軍(Jiangjyun)潮位站，其地理位置分佈如圖 3-1，各潮位站管理單位分屬基隆港務局及中央氣象局等單位，各潮位站之觀測時間段，受潮位站設置時間不同、更換地點及更換儀器等因素影響，可從數年至數十年之久，本團隊將基隆、澎湖及將軍潮位站之位置與相關資訊整理如表 3-1。基隆、澎湖及將軍潮位站之觀測時間等相關資訊整理如表 3-2，基隆潮位站之位置或儀器架設至少更迭 6 次以上。本研究已蒐集基隆、澎湖及將軍逐時(hourly)潮位資料如表 3-3，基隆於 2001-2003 年無潮位記錄；澎湖 1991 年資料斷斷續續，資料品質很差；將軍於 2001 年 9 月至 2001 年 12 月無潮位記錄，2002 年資料斷斷續續，資料品質很差。

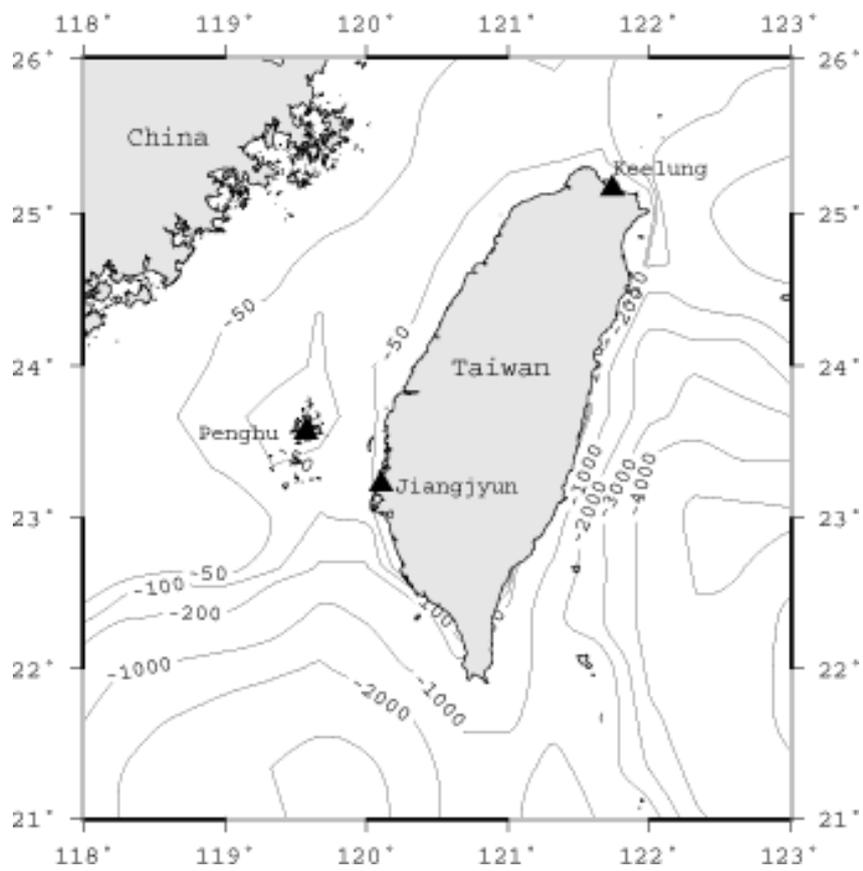


圖 3-1 基隆、澎湖及將軍潮位站地理位置圖

表 3-1 基隆、澎湖及將軍潮位站資訊(中央氣象局)

站名	經度	測站位置	所屬單位:	儀器	解析度
	緯度				
基隆	121°45'05"E	基隆市基隆港西 33 號碼頭	基隆港務局	Aquatrak 4100 series 超音波式	1mm
	25°09'18"N				
澎湖	119°34'41"E	澎湖縣馬公港	中央氣象局	Lundahl DCU-11 超 音波式	1mm
	23°33'42"N				
將軍	120°04'39"E	台南將軍漁港	中央氣象局	Aquatrak 4100 series 超音波式	1mm
	23°12'38"N				

表 3-2 基隆、澎湖及將軍潮位站異動一覽表(中央氣象局)

站名	測站代碼	觀測時間段(月/年)	所屬單位
基隆	1514	3/1946-6/1947	中央氣象局
	1513	6/1947-7/1981	中央氣象局
	1512	5/1946-12/1990	中央氣象局
	1511	1/1991-3/1995	基隆港務局
	151	3/1995-12/2000	基隆港務局
	1516	1/2004-10/2008	基隆港務局
澎湖	1351	3/1955-6/1991	中央氣象局
	135	6/1991-11/2007	中央氣象局
	1356	11/2007-10/2008	中央氣象局
將軍	146	10/1979-8/2001	水利署
	1176	1/2002-10/2008	中央氣象局

表 3-3 本研究已收集基隆、澎湖及將軍潮位資料時間段一覽表

站名	測站代碼	觀測時間段(月/年)	所屬單位	備考
基隆	1511	1/1991-3/1995	基隆港務局	
	151	3/1995-12/2000		
	1516	1/2004-12/2009		
澎湖	1351	1/1991-6/1991	中央氣象局	
	135	7/1991-11/2007		
	1356	12/2007-12/2009		
將軍	146	1/1991-8/2001	水利署	
	1176	1/2002-12/2009	中央氣象局	

3-2 平衡潮理論及調和分析

地球上任一地點，其於任一時刻之平衡潮位能(potential) V_t 可由下式表之(Doodson, 1921, Godin, 1972)：

$$V_t = \sum_i^3 [G_i(\varphi) \sum_{jklmn}^{-6,+6} A_{ijklmn} \times \cos(iT + js + kh + lp + mN' + np') + G_i'(\varphi) \sum_{jklmn}^{-6,+6} B_{ijklmn} \times \sin(iT + js + kh + lp + mN' + nP')] \quad (3-1)$$

其中， G_i 及 G_i' 為杜森大地係數(geodetic coefficients of Doodson)， i, j, k, l, m, n 為杜森編碼， A_{ijklmn} 及 B_{ijklmn} 為分潮係數， T 為平太陰時， s 為月亮平黃經， h 為太陽平黃經， p 為月亮近地點平黃經， N' 為負月亮昇交點平黃經， P' 為太陽近地點平黃經。因此；平衡潮位 Z_t^e ：

$$Z_t^e = \frac{V_t}{g} \quad (3-2)$$

其中， g 為重力值。

調合分析 (harmonic analysis) 之原理簡述如次；潮汐為一種周期函數，理論上可將潮位觀測資料分解成無數個不同周期之分潮（分潮數目視潮位觀測資料之取樣間隔及觀測時間長短而定），每一分潮為時間調合函數，因此；任意一時刻之潮位 Z_t (劉文俊、吳文耀，1996)：

$$Z_t = Z_0 + \sum_{i=1}^M f_i A_i \cos[(V_0 + u)_t + \omega_i t - k_i] \quad (3-3)$$

其中， Z_0 為平均海平面(mean sea level)， M 為分潮總數， f_l 為分潮修正係數(factor of reduction)， A_l 為分潮振幅， $(V_0+u)_l$ 為分潮起始時間之平衡引數(equilibrium argument)， ω_l 為分潮角速度， k_l 為分潮相位角 (phase angle)， A_l 及 k_l 為分潮調合常數 (harmonic constants)。本團隊可藉由最小二乘法(least square adjustment)求解平均海平面，於解算過程中可依瑞利準則 (Rayleigh comparison criterion) 及現有潮位資料時間段長短來決定加入解算之分潮數目，調合分析藉由最小二乘法求解之詳細步驟請參閱 (Foreman, 1977)。

3-3 平均海水面

大地測量對平均海水面之定義為「若於海岸選擇適當地點，長期觀測水位之升降，實施所謂驗潮工作，取得月球之黃交點周期（約十九年期）之驗潮結果，求出潮位站處之平均位置」(聯勤測量署, 1978；Gill and Schultz, 2001；Torge, 2001)。美國海洋大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)取 19 年潮位資料之算數平均值為平均海水面，並將相關平均海水面資料提供給國家大地測量(National Geodetic Survey, NGS)機構，進一步定義出北美高程基準 88(North American Vertical Datum of 1988, NAD88)(Gill and Schultz, 2001)。根據管津霖等(1996)之研究，如潮位站之觀測資料為逐時潮位時間序列，則取一天之逐時觀測值的平均值得日平均海水面，取一個

月之逐時觀測值（或日平均海水面）平均值得月平均海水面，取一年之逐時觀測值平均值或逐月平均值得年平均海水面，取多年之逐時觀測值平均值或逐年平均值得長期年平均海水面，此舉可消除長周期之潮汐影響（例如；周期 8.85 年之月球近地點變化及周期 18.6 年之月球黃交點變化），但潮位站資料如果少於 18.6(或 8.85 年)年，可用平衡潮理論求解此量 (Doodson, 1921)。

本研究由 (3-1)及 (3-2)式計算 1991~2015 年三個潮位站之周期 8.85 年及 18.6 年平衡潮潮位如圖 3-2 所示，對周期 8.85 年平衡潮而言，基隆於 1997-1998 年及 2006-2007 年，其平衡潮位達最高，約 0.04mm，於 1992-1993 年及 2001-2002 年，其平衡潮位達最低，約 -0.04mm；澎湖於 1997-1998 年及 2006-2007 年，其平衡潮位達最高，約 0.05mm，於 1992-1993 年及 2001-2002 年，其平衡潮位達最低，約 -0.05mm；將軍於 1997-1998 及 2006-2007，其平衡潮位達最高，約 0.05mm，於 1992-1993 年及 2001-2002 年，其平衡潮位達最低，約 -0.05mm。對周期 18.6 年平衡潮而言基隆於 1997-1998 年，其平衡潮位達最高，約 4mm，於 2006 年，其平衡潮位達最低，約 -4mm；澎湖於 1997-1998 年，其平衡潮位達最高，約 5mm，於 2006 年，其平衡潮位達最低，約 -5mm；將軍嶼於 1997-1998 年，其平衡潮位達最高，約 5mm，於 2007 年，其平衡潮位達最低，約 -5mm。

本研究以表 3-3 所列各潮位站之實測潮位資料計算平均海水面，首

先以 Pope τ 統計測試剔除異常值(outlier)(Pope, 1976)；

$$\tau = \frac{|V_i|}{\hat{\sigma}_i} > \tau_{\beta;1;n-2}, \quad (3-4)$$

其中； V_i 為潮位殘差(residual)、 $\hat{\sigma}_i$ 殘差後驗標準偏差 (posterior standard deviation)、 β 為信心水準(confidence level)，本研究採用 95% 信心水準、 n 為潮位數目、 $\tau_{\beta;1;n-2}$ 為臨界值(critical value)，執行統計測試時，如潮位滿足式(3-4)，則為異常值，本研究採遞回方式剔除所有異常值，並將各年統計測試結果列於表 3-4 之第三及四欄位，基隆於 1998 年(缺 5-9 月潮位資料)、1999 年(缺 1-5 月潮位資料)及 2005 年(缺 2-6 月潮位資料)實測潮位數目最少(約半年觀測資料)，1997 年及 1999 年被剔除之潮位數目最多(約 40 個)；澎湖無被剔除之潮位；將軍於 1996 及 1998 年被剔除之潮位數目最多(2 個)。

本團隊將通過 Pope τ 統計測試之潮位資料扣除平衡潮影響，繪製成圖 3-3，由圖得知於夏季時潮位較高，並以式(3-3)採最小二乘法求解得各年之平均海水面分列於表 3-4 之第 5 欄位，基隆潮位站於 1998 年、1999 年及 2005 年實測潮位數目最少(約半年觀測資料)，故其平均海水面於此時間段內呈現偏低或偏高之不穩定現象，1991~2007 年間，各年年平均海水面於 99.7cm 上下波動。澎湖潮位站從 1991 年 7 月-2007 年都設置於同一地點(測站代碼 135)，1991 年因潮位資料約 3000 筆左右，故無法合理解算平均海水面，年平均海

水面之變化範圍從 61cm 至 89cm，其中 2006 年最高(88.65cm)，1993 年最低(61.97cm)，各年年平均海水面於 75.32cm 上下波動。將軍潮位站，2002 年因潮位資料約 1000 筆左右，故無法合理解算平均海水面，年平均海水面之變化範圍從 22cm 至 36cm，其中 2006 年最高(35.84cm)，1993 年最低(22.79cm)，各年年平均海水面於 28.86cm 上下波動。各年平均海水面之標準偏差列於表 3-4 之第 6 欄，對基隆而言，除 1998 年(標準偏差 3.8mm)外，其餘每年平均海水面之標準偏差小於 2mm；澎湖除 1995 年(標準偏差 2.2mm)外，其餘每年平均海水面之標準偏差小於 2mm。將軍除 1995 年(標準偏差 2.8mm)外，其餘每年平均海水面之標準偏差小於 2mm。

中央氣象局提供各站之逐時潮位，如無特殊因素，其每年之資料數應為 8760(或 8784)筆，但受儀器是否故障等因素影響可能低於此數目，若資料殘缺，則潮位年平均值可能呈現偏高及偏低之現象(因無法消除季節性影響)。而過少的潮位資料(1991 年澎湖 3000 筆，約 4 個月資料；2002 年將軍 1000 筆，約 2 個月資料)，其所得之潮位年平均值的代表性，更是存疑，故不予採用。台灣各潮位站之潮位年平均值除受潮位站異動及儀器更換影響外，其亦受日、月等天體引力影、氣象、海流及聖嬰現象等因素影響而變動，若欲深入探討影響潮位年平均值變動之因素，則須收集相關氣象及海象資料，並進一步分析，才可得知各潮位年平均值主要受何種因素之影響而變動。各潮

位站資料每年的平均值若有變動較大的情形，皆是因為更換儀器或變動等，本案按照合約規範，蒐集並計算潮位資料，但在高程基準連測的部分，並未應用此潮位計算的成果，這點必須在此加強說明，以免有造成誤會或混淆的情形。

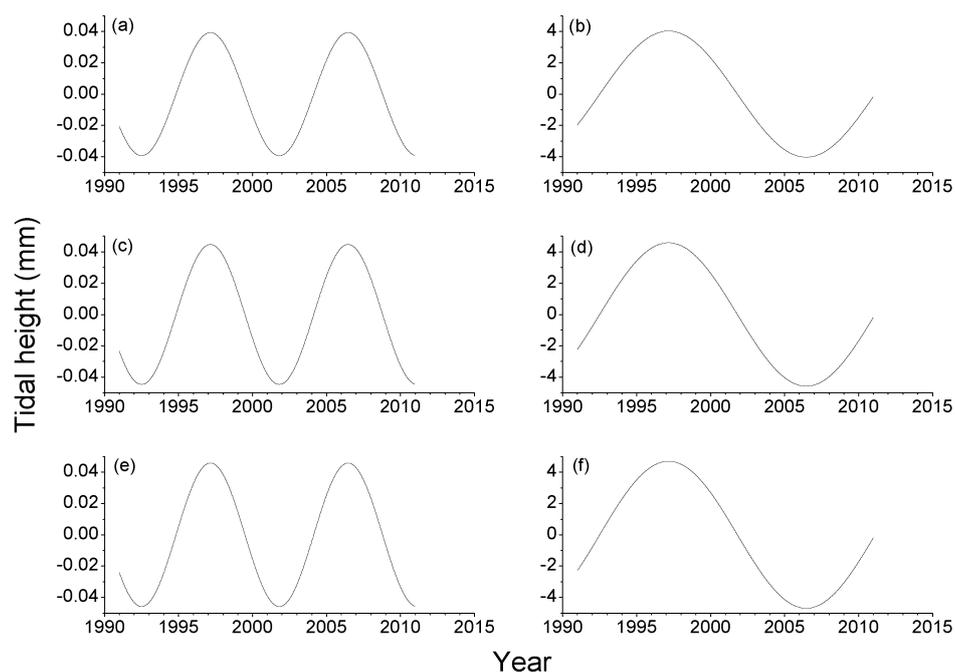


圖 3-2 1991 至 2015 年(a)基隆(c)澎湖(e)將軍周期 8.85 年平衡潮逐時潮位圖，(b)基隆(d)澎湖(f)將軍周期 18.6 年平衡潮逐時潮位圖

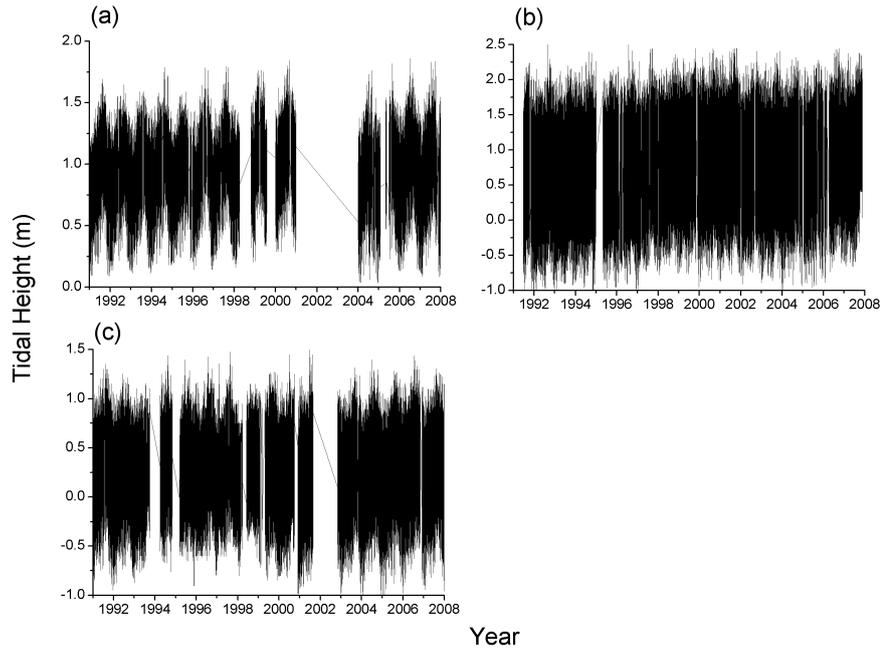


圖 3-3 1991 至 2007 年(a)基隆(b)澎湖(c)將軍逐時潮位

表 3-4 各潮位站之 Pope τ 統計測試成果及平均海水面

潮位站	年	通過統計測試潮位數目	被剔除潮位數目	潮位計平均讀數(cm)	標準偏差 (cm)
基隆	1991	8735	26	94.67	0.16
	1992	8436	23	96.12	0.07
	1993	8361	10	94.17	0.15
	1994	8403	30	98.78	0.14
	1995	7574	34	98.42	0.14
	1996	7716	20	100.10	0.09
	1997	8326	42	101.27	0.16
	1998	4003	5	90.88	0.38
	1999	4692	41	115.66	0.14
	2000	8233	24	108.19	0.08
	2004	8283	10	90.29	0.10
	2005	3968	0	105.36	0.06
	2006	8703	21	100.99	0.13
2007	8123	7	100.93	0.18	

澎湖	1992	8763	0	61.99	0.09
	1993	8743	0	61.97	0.11
	1994	8567	0	65.48	0.12
	1995	5400	0	64.45	0.22
	1996	7433	0	68.49	0.12
	1997	8075	0	72.25	0.15
	1998	8407	0	78.89	0.12
	1999	8195	0	83.43	0.14
	2000	8658	0	81.85	0.09
	2001	8590	0	84.50	0.12
	2002	8137	0	77.25	0.13
	2003	8538	0	77.11	0.12
	2004	7990	0	77.29	0.09
	2005	7316	0	73.44	0.16
	2006	6983	0	88.65	0.18
2007	7286	0	88.00	0.13	
將軍	1991	8448	0	29.07	0.15
	1992	8760	0	24.46	0.06
	1993	6551	0	22.79	0.15
	1994	5136	0	33.95	0.15
	1995	7288	0	29.92	0.18
	1996	8435	2	29.62	0.12
	1997	8605	0	31.32	0.17
	1998	7074	2	30.58	0.28
	1999	6814	0	31.10	0.13
	2000	7316	0	23.44	0.16
	2001	5830	0	24.87	0.14
	2003	8466	0	27.44	0.13
	2004	8684	0	28.46	0.07
	2005	8681	0	28.26	0.14
	2006	7985	0	35.84	0.13
2007	8488	0	30.65	0.13	

第四章 現有重力資料

目前台灣重力資料依性質可分為陸測重力、船載重力、空載重力、船測重力及衛星測高重力等，以下針對目前所蒐集之重力與組成重力網格之方法作一介紹。

4-1 陸測重力資料

現有的陸測重力資料包括了由中央研究院 (Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)、中國測量學會 (黃金維 等, 1998) 和內政部 (黃金維, 2001; 陳春盛, 2003) 等單位歷時十年蒐集共約四千多點陸測重力點，目前最新的陸測重力資料為內政部於 2008 年公告的四千多點陸測重力點。以下將逐一介紹各組重力資料(圖 4-1)：

- (1)第一組資料為中央研究院地球科學研究所為研究台灣地區地殼及上部地函構造，自 1980 至 1987 年間選擇適當的測量基準點進行全省重力觀測，其基準點包含水準點、三角點及五千或一萬分之一航照圖的標高點，歷時七年共完成 603 個分布均勻的重力觀測點，含有經度、緯度及自由空間重力異常值。各觀測站間平均距離約為七公里，其中有 308 個測點分布在資料較缺乏的山區。
- (2)第二組資料是以 LCR-G (LCR, 1997)型重力儀於民國 75 年 10 月至民國 77 年 6 月間施測，由中國測量學會所提供，含有經度、緯度、高程、絕對重力和自由空間重力異常，總共有 276 筆資料。

- (3)第三組資料為 1997 年至 1999 年中國測量學會於台灣地區施測重力值 747 點，分別於第一年度及最後一年度各施測 150 點，第二年度施測 400 點。
- (4)第四組資料乃內政部於 2000 年到 2001 年間委託交大土木系於一等一級水準點上實施重力測量而得，共含 6 個絕對重力點、10 個一等重力點及 1010 個一等一級水準點之重力值。施測時使用 LCR-G 型重力儀，且進行嚴密的環境系統誤差改正及網形平差。這些重力點的精度約為 0.04 mgal。
- (5)第五組資料乃接續一等一級水準點重力測量之後，於 2002 年到 2003 年間辦理一等二級水準點上之重力測量工作，施測時使用 LCR-G 型重力儀，共施測 1189 個點，且同樣進行嚴密的環境系統誤差改正及網形平差。這些重力點的精度約為 0.04 mgal。
- (6)第六組資料為內政部於 2008 年完成的 4364 個重力點，歷時三年的工作時間，使用的儀器為 L&R Gravition EG 和 Scintrex CG-5 重力儀，本案累計檢測已知重力點位 19 點，施測一等重力點 655 點及二等重力點 3,690 點，共計施測 4,364 個重力點。

除了本島之外，本案團隊亦收集了離島(金門、馬祖、澎湖、小琉球、蘭嶼、綠島)的重力資料(圖 4-2)，均位於一等水準點上。這些資料皆是由是內政部交由內政部國土測繪中心辦理之成果。

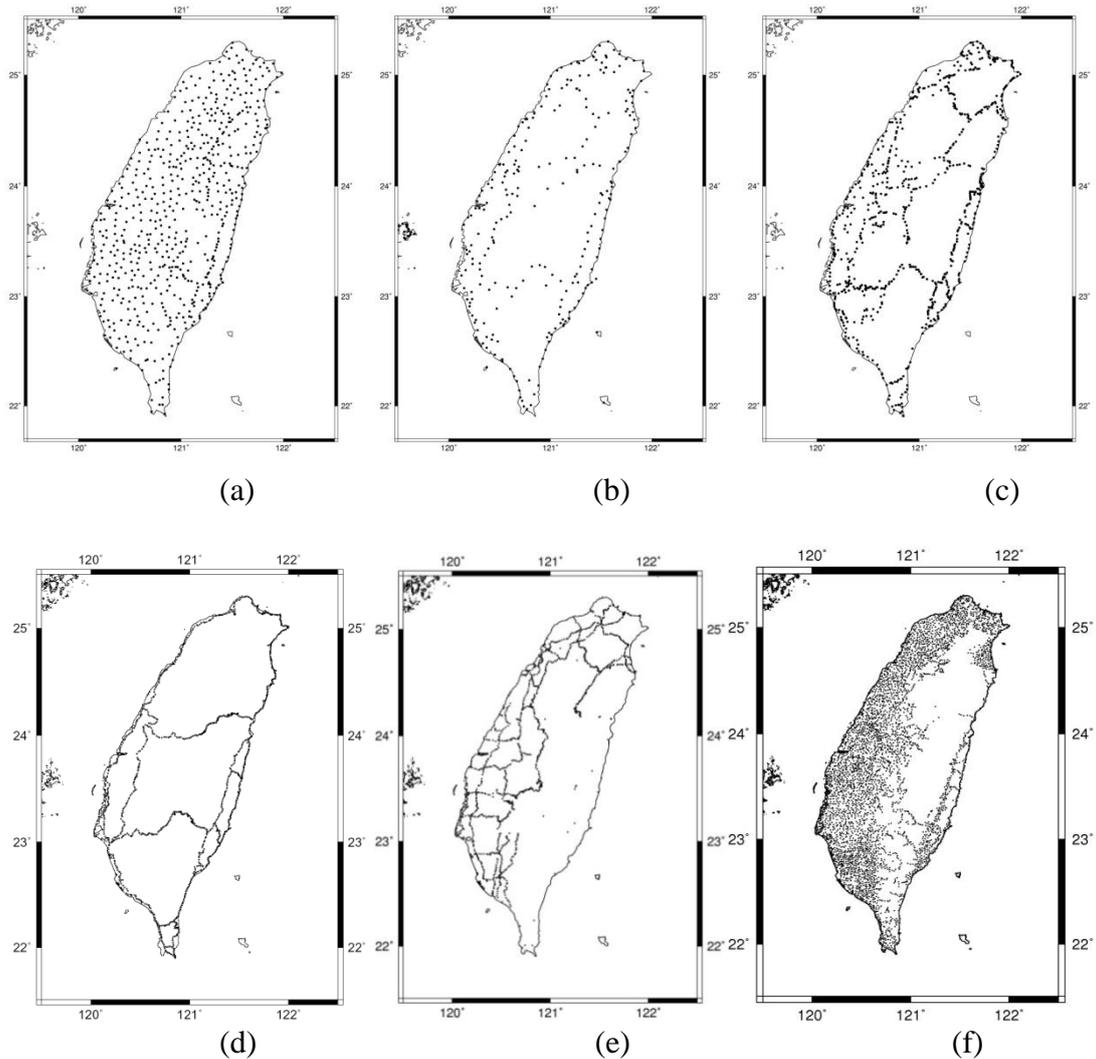
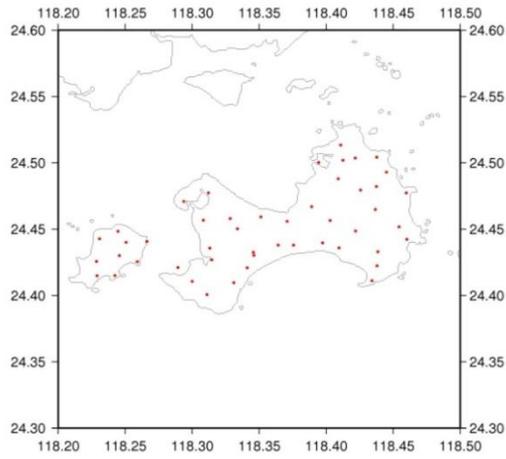
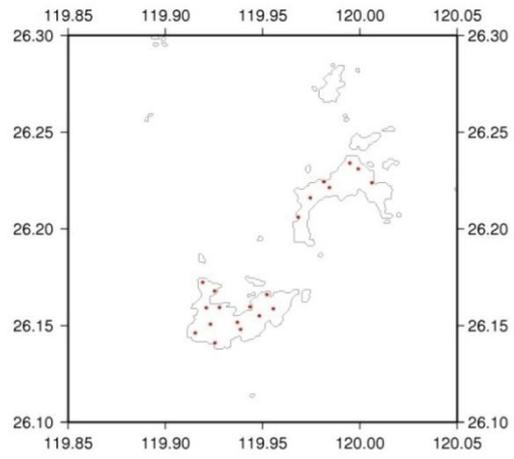


圖 4-1 本島重力點位資料 (a)中研院於 1980 至 1987 年施測之 603 個重力觀測點(第一組資料)分布圖 (b)中國測量學會於 1986 至 1988 年施測之 276 個重力觀測點(第二組資料)分布圖 (c)中國測量學會於 1997 至 1999 年施測之 747 個重力觀測點(第三組資料)分布圖 (d)內政部於 2000 至 2001 年施測之 1010 個重力觀測點(第四組資料)分布圖 (e)內政部於 2002 至 2003 年施測之一等二級重力觀測點(第五組資料)分布圖(篩選後 1092 點) (f)內政部於 2008 年公告之 4364 點重

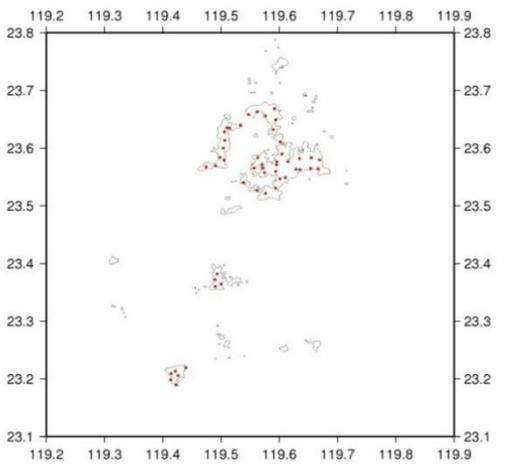
力點



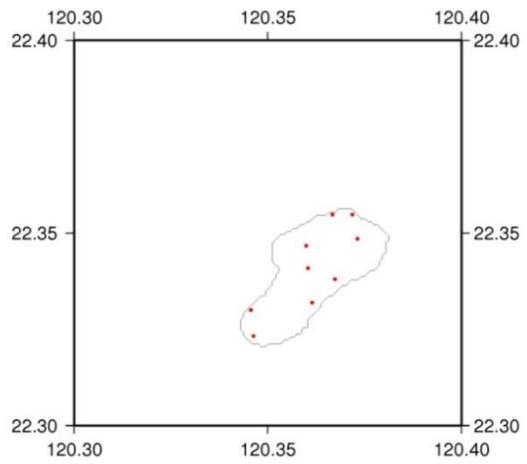
(a)



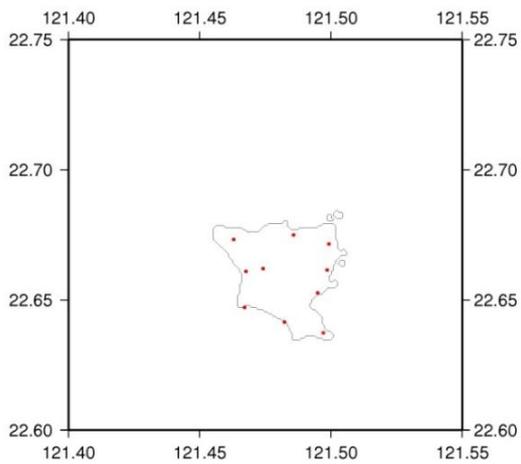
(b)



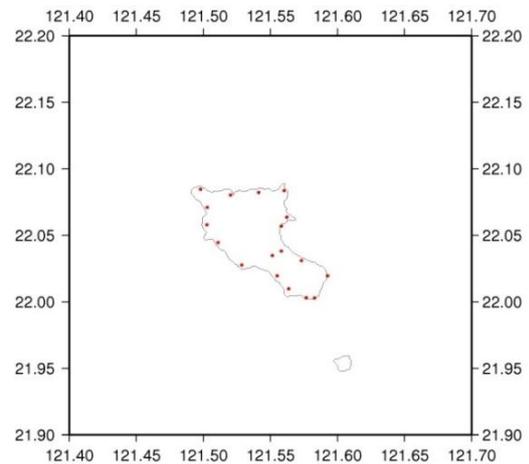
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 4-2 離島重力點位資料 (a)金門 (b)馬祖 (c)澎湖 (d)小琉球 (e)綠島 (f)蘭嶼

4-2 船載重力資料

(1) 船載重力資料取自於 Hsu et al.(1998)，此資料來源為美國國家海洋與大氣機構(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)於 1997 年利用 R/VI' Atalante KSS30 船載重力儀所獲得的重力值，經篩選後共約 5 千多點(圖 4-3(a))。經交叉點精度分析後，R/VI' Atalante KSS30 資料之交叉點差值的標準偏差為 2.6 mgal，而全部的船測資料之標準偏差則為 11.2 mgal。

(2) 為了提升基隆及離島周圍海域的重力精度及空間解析度，吾人增加 95、96 年度計畫之基隆、小琉球、綠島及蘭嶼之近岸船測重力(圖 4-3(b)(c)(d))，並使用罩窗寬度為 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此次船測重力整體精度，各近岸船測重力異常之交叉點差異值統計如表 6-2 所示，交叉點差異值分布圖如圖 6-1 所示。

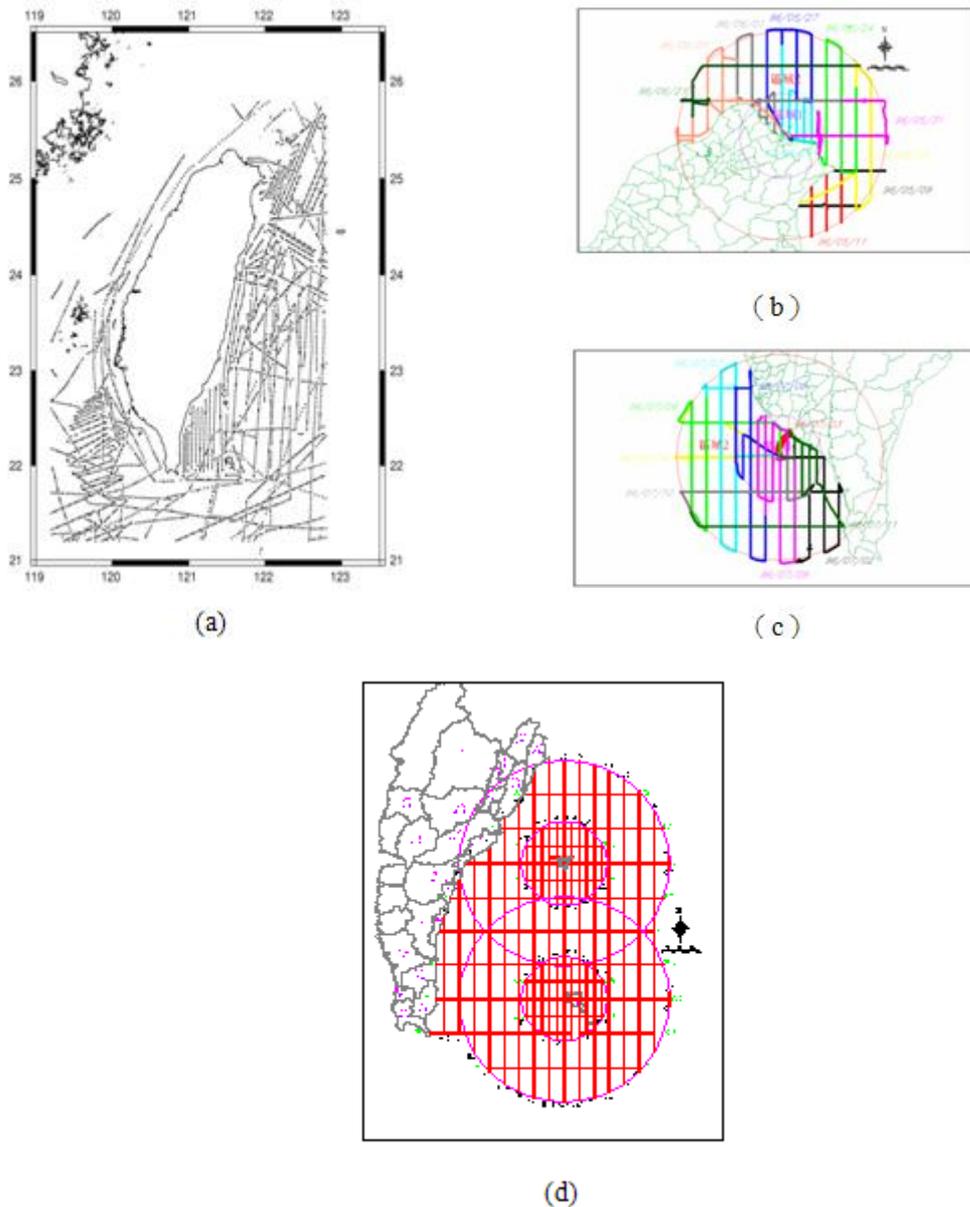


圖 4-3 (a)Hsu 船測重力資料(b)基隆海域 (c)小琉球海域 (d)綠島、蘭
嶼海域

4-3 空載重力資料

5000 公尺航高空載重力

內政部於 2004 年辦理台灣『空載重力測量工作』計畫，並由交通大學執行之，此計畫已於 2005 年 5 月結案(黃，2005)。計畫從 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 (L&R, 2003)。施測航線圖(圖 4-4)，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 5000 公尺；航速為每小時 160 海哩，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。利用交叉點分析評估其施測結果，得到之標準偏差為 3.5 mgal (黃，2005)，扣除一些在天候不佳所測得的重力值後，標準偏差變為 2.9 mgal (Hwang et al., 2007)。為了後續的重力檢核，需要將空載重力資料利用向下延續方法(downward continuation)，將空載資料至 5000 公尺高度約化為海平面之重力異常。

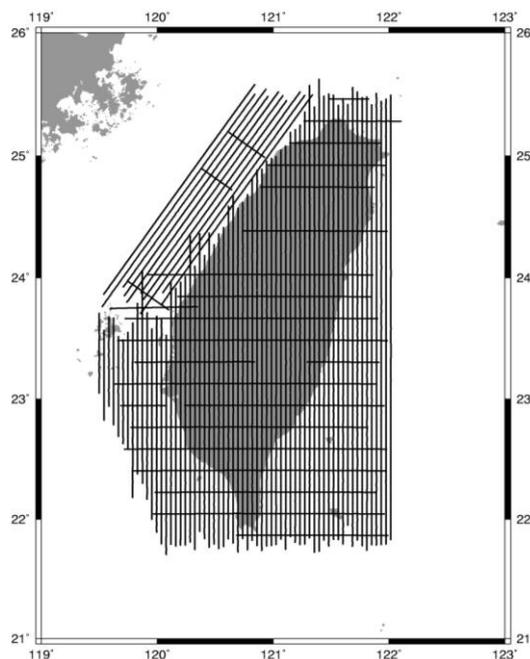


圖 4-4 5000 公尺航高空載重力

4-4 測高重力資料

若衛星測高脈衝不是發射在開放海域(open ocean)之中，脈衝接觸至海水面時同時接觸陸地或接觸到複雜海水面都有可能導致天線收到之脈衝有著複雜訊號，需要進行波形重定的處理。其波形重定演算法有 β 參數演算法、門檻值演算法及改良型門檻值演算法(劉祐廷, 2005)。

本組測高重力資料則是交通大學土木所利用 Geosat/GM、ERS-1/GM、Geosat/ERM、ERS-1/35d、ERS-2/35d、TOPEX/POSEIDON 等四種重複軌道衛星，結合波形重定方法計算台灣附近海洋重力異常(如圖 4-5)；採用的參考場為 360 階之 EGM08，計算策略為去除回覆法，首先得到沿軌跡的殘餘大地梯度值，進而利用最小二乘配置法搭配得到。考慮到不同海深之不同波形重定的表現和不同潮汐模型的影響，給出整體的精度比較，結果顯示改良型門檻值演算法與 Nao99 潮汐模型為佳。為了得到臺灣地區的最佳重力場，使用修正法(draping)將測高重力與陸測、船載、空載等地面重力進行整合，並將該重力場與地面所有重力之差異統計，結果為 5.79mgal。

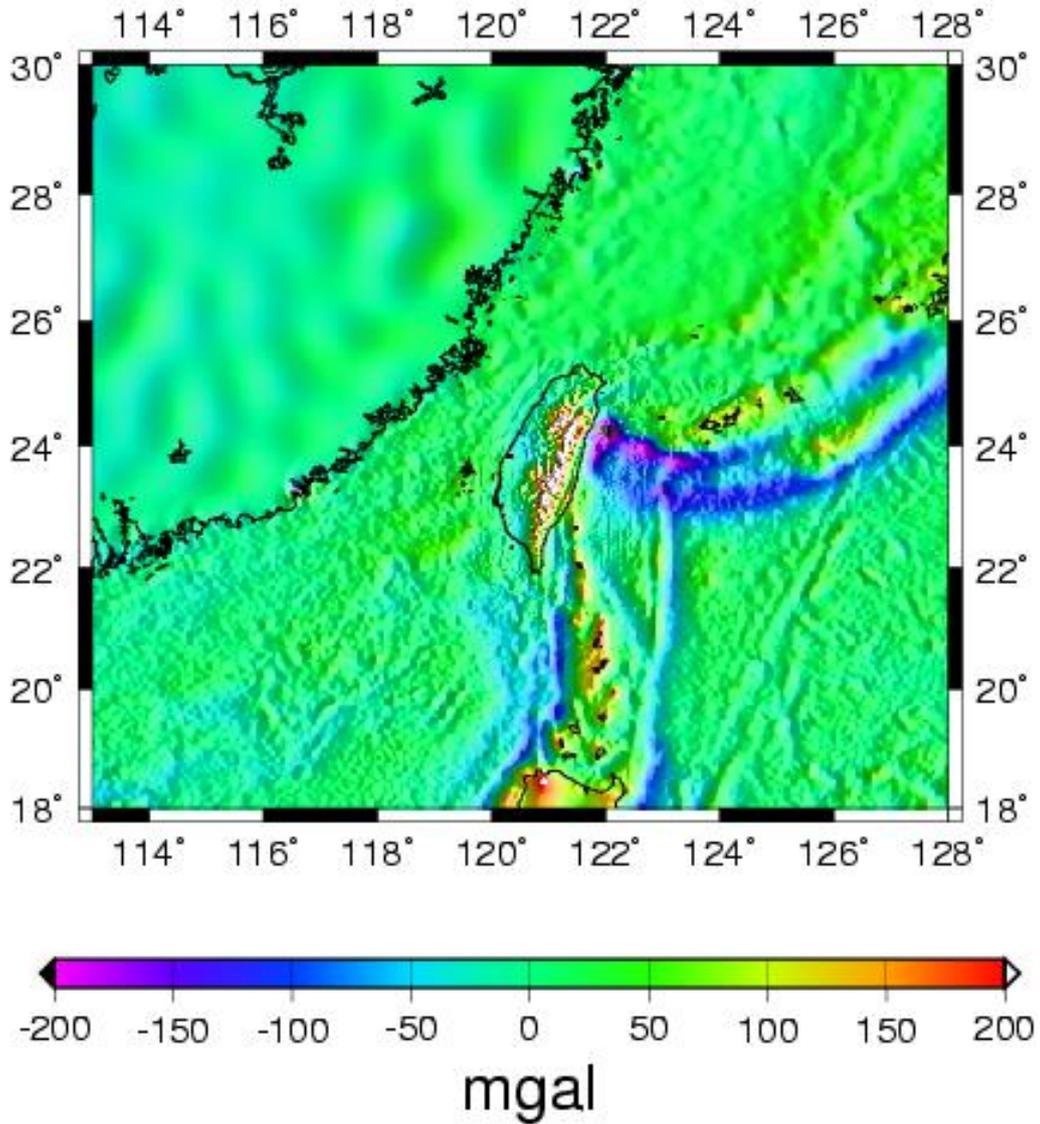


圖 4-5 NCTUM 之 2' x2' 重力異常

吾人可將上述所有陸測、船測、空載及測高重力資料，利用最小二乘配置法(Least Square Collocation, LSC)，組成自由空間重力異常網格，結果如圖 4-6。

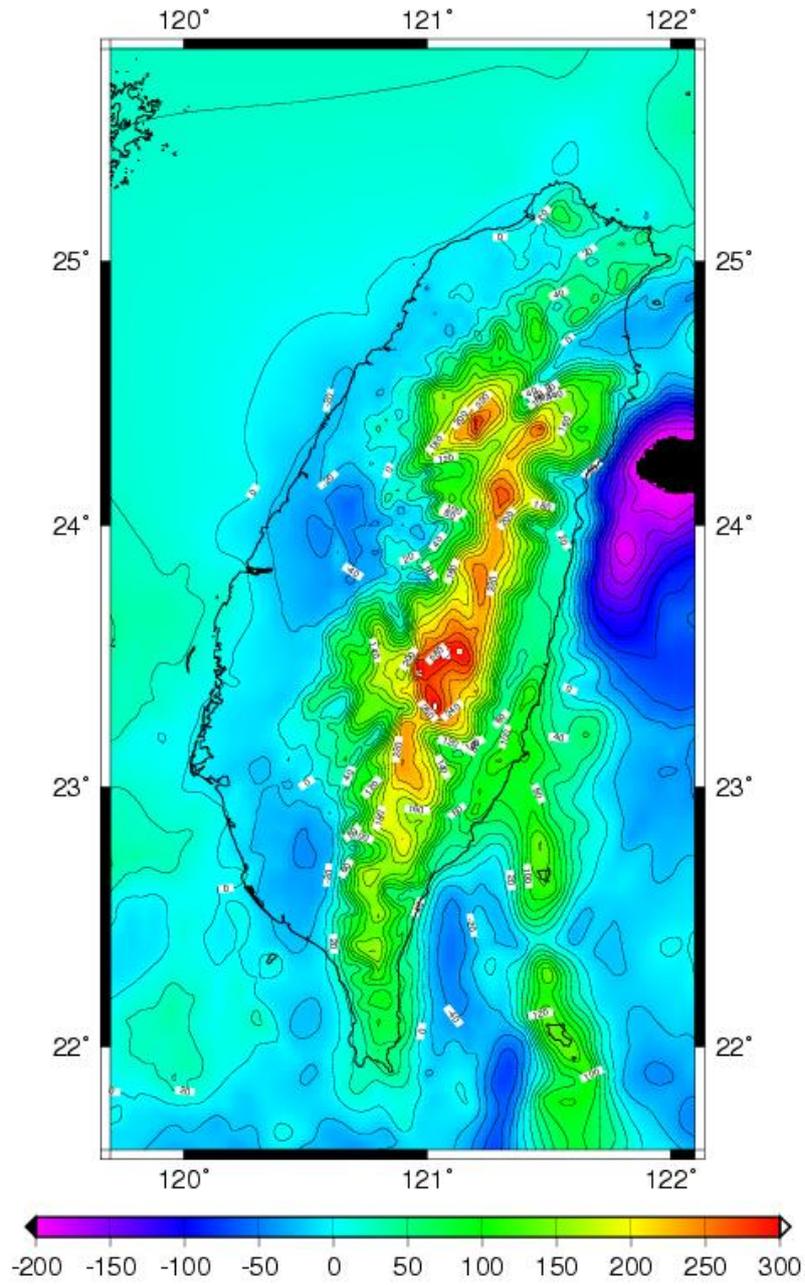


圖 4-6 台灣及環海自由空間重力異常等值圖，等值間隔為 20 mgal

第五章 近岸船載重力測量

5-1 船載重力測量介紹

由於船載重力測量是在測量平台不斷運動狀態下所進行的一種動態測量，這也是船載重力測量有別於陸地重力測量的最大特點，因此當海上測量平台受海浪起伏、風、流、壓等擾動因素的干擾時，海洋重力觀測值難免遭受諸如水平加速度、垂直加速度、交叉耦合（cross-coupling）以及 Eötvös 效應等多向干擾加速度的影響。

海測重力若與較為熟知的陸測重力相較，二者之間的特性差異可概略整理如下：

1. 陸地重力測量是採測點型式之離散點測量，可按需求均勻布設測點；海洋重力測量則是採測線型式之連續點測量，由於測線與測線間並無測點，故無法滿足均勻布點之要求，僅能在測線上取算任意密度之測點資料。
2. 陸地重力測量可在固定位置上埋設點位，故其坐標測定不需與重力測量同時進行，數據處理時也無同時處理之必要；海洋重力測量則因為無法在海上建立每個測點之固定標點，故重力測量需與測點定位同步實施，數據處理時也需一併加以處理。
3. 陸地重力測量可依需要對同一測點進行重複觀測，重力測量誤差僅與儀器觀測相關，平差時可依據多餘觀測來求取最或是值，並獲取精度評估量；海洋重力測量則因為無法保證在同一測點上進

行重複觀測，只有主副測線之交叉點上才會產生多餘觀測，該交叉點上不符值之來源除儀器誤差外，還包含定位誤差所引起之不符值，且其重力精度評估量僅能是整個測網之精度，而非各個測點之精度值。船載重力測量誤差之大小可由交叉點（crossover point）之重力值差異量求得(Prince and Forsyth, 1984)。相應公式整理如下：

- 海洋空間重力異常值計算

$$\Delta g_F = g - g_s + 0.2566 h - \gamma_0 \quad (5-1)$$

式中， g 為測點的絕對重力值；

g_s 為固體潮改正；

h 為潮高；

γ_0 為重力測點位置所對應之正常重力值。

本案使用船載重力儀 L&R Air-Sea Gravity System II 為純量式重力儀。向量式重力測量的觀測模式如下(Schwarz and Li, 1996)：

$$\mathbf{g} = \dot{\mathbf{v}} - (2\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P})\mathbf{v} - \mathbf{f} \quad (5-2)$$

其中，

\mathbf{g} ：重力向量

\mathbf{v} ：船速度向量

$\dot{\mathbf{v}}$ ：船加速度向量

$\boldsymbol{\Omega}$ ：地球自轉的角速度矩陣

\mathbf{P} ：船行駛的角速度矩陣

\mathbf{f} ：重力儀量得之加速度向量

(5-2)式中的 $(2\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P})\mathbf{v}$ 項是屬於 *Etöivös* 改正，*Etöivös* 效應是當船行駛時，會產生離心加速度與 Coriolis 加速度(科氏力)，進而影響重力的量測值(Torge, 1989)，故此效應的影響必須去除。更詳細的 *Etöivös* 改正可參考(Harlan, 1968)。若將(5-2)式分成東西方向、南北方向、垂直方向等三維的純量表達式，則如下表示(Olesen, 2003)：

$$g_e = \dot{v}_e - f_e + \left[2w \cos \phi + \frac{v_e}{R_N + h} \right] \cdot [v_u + v_n \tan \phi] \quad (5-3)$$

$$g_n = \dot{v}_n - f_n + \left[2w \cos \phi + \frac{v_e}{R_N + h} \right] \cdot \tan \phi \cdot v_e + \frac{v_n v_u}{R_M + h} \quad (5-4)$$

$$g_u = \dot{v}_u - f_u - \left[2w \cos \phi + \frac{v_e}{R_N} \right] v_e - \frac{v_n^2}{R_M} \quad (5-5)$$

其中，

g_e, g_n, g_u ：東西方向、南北方向、鉛垂方向重力

$\dot{v}_e, \dot{v}_n, \dot{v}_u$ ：船分別沿東西方向、南北方向、鉛垂方向加速度

f_e, f_n, f_u ：重力儀量得之東西方向、南北方向、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 ：船所在緯度

h ：船離地表高度

若只考慮垂直方向的重力分量(5-5)式，即為純量式重力觀測模式。從 5-3 式到 5-6 式中，船的位置、速度、加速度都必須靠全球定位系統(Global Positioning System, GPS)定位技術求得，故 GPS 定位在船載重力測量裡扮演非常重要的角色。

5-1-1 精度評估方式

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。船載重力與航測一般，按某一設計之航線觀測，兩航線（幾近直線）可形成一交叉點。由於上述誤差因素，在交叉點之兩重力值不太可能相同，此時需要進行交叉點平差，其原理與衛星測高(altimetry)交叉點平差相似。

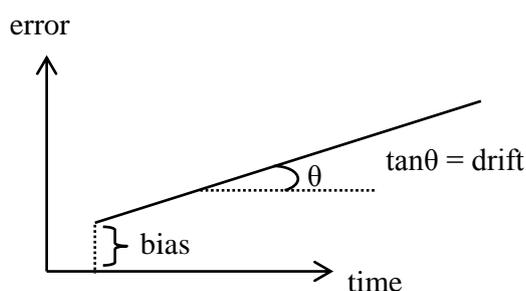


圖 5-1 航線系統誤差量偏差值(bias)與漂移值(drift)示意圖

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)(圖 5-1)，則觀測量 g_r^q

可如下表示

$$g_r^q = g_r^q + \delta g_r^q \quad (5-6)$$

其中 δg_r^q 為因 bias 和 drift 所引起的誤差，此量依圖 5-1 所示，我們可將 δg_r^q 表示為

$$\delta g_r^q = a^q + b^q t_r^q \quad (5-7)$$

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，則我們可決定第兩航線 K, L 的交叉點的交叉點 P 差值為

$$\begin{aligned} x_p^{kl} &= \delta g_p^k - \delta g_p^l \\ &= a^k - a^l + b^k t_p^k - b^l t_p^l \end{aligned} \quad (5-8)$$

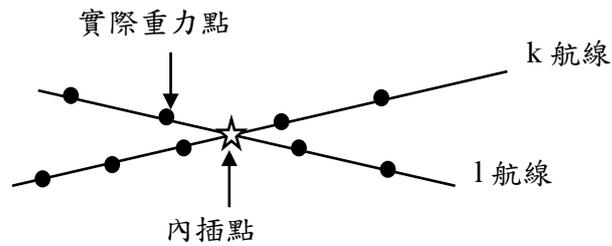


圖 5-2 船載重力實測點與內插點示意圖

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 5-2 所示。根據(5-8)式可組成

觀測方程式，對單一觀測量，吾人得

$$v_p^{kl} + x_p^{kl} = a^k + b^k t_p^k - a^l - b^l t_p^l \quad (5-9)$$

$$k = 1, 2, \dots, i; l = 1, 2, \dots, m; p = 1, 2, \dots, n$$

其中 $i+m, n$ 分別為航線數及交叉點數。(5-9)可寫為矩陣形式

$$V + L = AX \quad (5-10)$$

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

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

解得 X 矩陣後，將誤差扣除而得改正後重力 g_r^q 。

5-1-2 施測範圍、儀器及測量船隻介紹

本案之船載重力測量作業以澎湖馬公港圓心，半徑 50 公里內所涵蓋海域，如圖 5-3。本案使用船載重力儀為 ZLS Dynamic Gravity Meter，如圖 5-4。

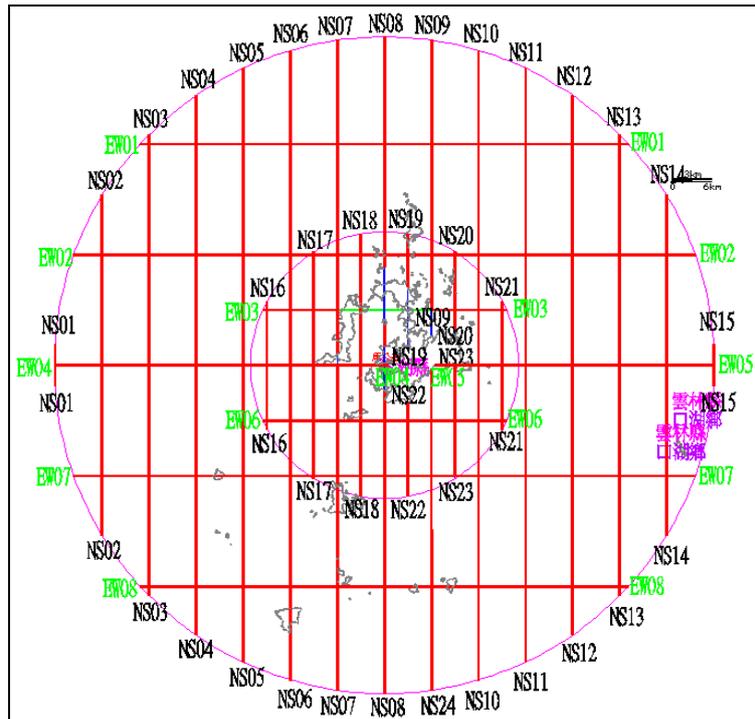


圖 5-3 船載重力施測範圍



圖 5-4 ZLS Dynamic Gravity Meter

本次計畫施測澎湖地區周邊海域常有暗礁及淺灘，當地船隻較為了解其位置分佈及環境，故在澎湖當地湖西鄉龍門港租賃龍海明陸號漁船，對船隻及人員的安全較有保障，船體諸元及相關照片如圖 5-5 及表 5-1。



圖 5-5 龍海明陸號測量船隻照片

表 5-1 龍海明陸號船體諸元表

項目	內容
船長(註冊尺度)	14.32 公尺
船寬(註冊尺度)	3.49 公尺
船體	F.R.P 船殼
噸位	總噸位:19.19 噸 / 淨噸位:5.76 噸
動力	六缸柴油引擎，螺旋推進器
馬力	380 匹
油量	8495 公升
乘員	8 名
吃水深	2 公尺
航速	12 節(浬/時)

5-1-3 施測方法介紹

船載重力乃是一相對重力測量，為求重力之參考值，首先於測船停靠碼頭鄰近位置建立一個重力參考點位，並使用相對重力儀 (Graviton-EG) 進行其重力參考值之測定，引測點為港區鄰近之一等重力點。另於相對重力施測時，港區重力參考點位置處之重力梯度值，亦可同時加以測定，以作為重力值化算之用。在重力觀測資料之化算過程中，水平及垂直距離偏移量必須先行加以測定，以求提供最佳之重力成果精度。以圖 5-6 為例，d 是 GPS 天線沿測船船體中心線方向量至重力儀投影至甲板位置之左右平移與前後平移二個水平距離，其可配合航向資訊以進行 GPS 天線至重力儀坐標位置之化算使

用，唯對小型測船而言，此項偏移量或可因量小而不計；而 h_1 與 h_2 二個垂直距離量之組合，會是 GPS 天線所定出高度值化算至重力儀高度之運用資料，其可在重力觀測量計算時，提供重力異常值化算之所需，該值可在儀器架設完成後量測一次即可。另對 h_3 與 h_4 二個垂直距離量之組合而言，其目的在透過與水面高度差之量測，以決定甲板與重力參考點於施測起始時刻之高度差 (h_4-h_3)，並透過 h_2 來建立重力儀相對於重力參考點之高度差 ($h_2-h_4+h_3$)，進而引入重力梯度值來決定重力儀架設處之重力值。另水深測量所蒐集之當地潮位站資料，可用來決定圖中之 h_5 ，亦可用來配合水深測量值（以平均海水面為基準）來進行重力異常相關量之計算。測船於測量期間之 GPS 動態定位作業，若重力參考點之透空度良好，則可該點將視為差分基站而架設 GPS 接收儀，以接收雙頻之相位觀測量。

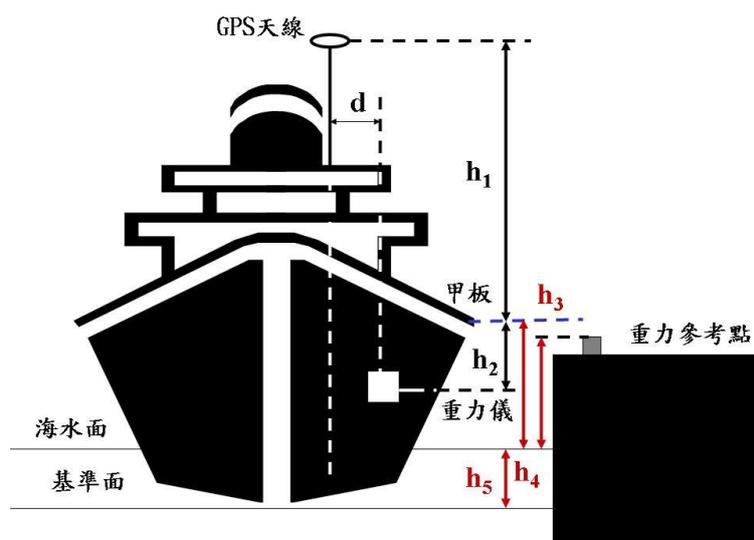


圖 5-6 重力值參考高度示意圖

本次澎湖測區將重力參考基點設置於龍門漁港(BM1)，由鄰近內政部一等重力點(澎湖氣象站)往返引測後所得重力值列於表 5-2，其點位分布位置如圖 5-7 所示，實際設置點位如圖 5-8 所示。引測路線為：澎湖氣象站→龍門漁港(BM1)→澎湖氣象站。

表 5-2 引測成果表

點號	重力值(mGal)	標準差(mGal)
龍門港 BM1	978901.29621	0.02289
澎湖氣象站	978896.71001	0.01776

(※P.S.澎湖氣象站重力值觀測日期：2009/11/14)



圖 5-7 重力參考點位分佈圖



龍門港重力基點(BM1)

圖 5-8 重力參考基點設置圖

5-2 船載重力測量資料處理

5-2-1 GPS 資料處理

本案所使用的 GPS 資料處理工具為瑞士伯恩大學天文研究所研發的 Bernese 5.0 軟體，進行 GPS 觀測資料處理時，所需輸入之檔案分為使用者輸入與一般參數兩種。使用者輸入檔案為使用者欲處理之觀測資料、GPS 星曆、.....等。一般參數之檔案為 Bernese 軟體進行資料處理時，各個程式將會使用到的相關參數檔案，若欲更新一般參數檔案，可至伯恩大學 FTP 站 <ftp://ftp.unibe.ch/>，以「anonymous」登入，便能下載。表 5-3 為一般參數檔案相關說明。

表 5-3 Bernese 5.0 使用者輸入之檔案

檔案類型	內容	網址
GPS 觀測資料	接收儀接收之 GPS 觀測資料	
*.sp3	IGS 精密星曆	http://igscb.jpl.nasa.gov/compositions/prods_cb.html
*.EPH	CODE 精密星曆	ftp://ftp.unibe.ch/ →aiub/CODE/2010/
*.CLK	廣播星曆時錶改正	ftp://ftp.unibe.ch/ →aiub/CODE/2010/
*.ERP	地球自轉參數	ftp://ftp.unibe.ch/ →aiub/CODE/2010/
ITRFCODE.STA	IGS 站資訊檔	ftp://ftp.unibe.ch/ →aiub/BSWUSER50/STA/
ABBREV.ABB	地面固定站站名縮寫檔	
*.CRD	地面固定站坐標檔	
*.FIX	地面固定站站名	

目前提供 GPS 星曆較佳的有兩個國際機構，分別為 CODE (Center for Orbit Determination in Europe)和 IGS (International GNSS Service) 其軌道精度比較如表 5-4，對於 Bernese 5.0 定位軟體在高精度 GPS 定軌的程序中，高精度的 GPS 精密星曆與高精度的 GPS 時錶改正更是扮演著關鍵的角色，本案使用由 IGS 發布的 GPS 時錶改正、IGS 精密星曆和 IGS 地球自轉參數做為 Bernese 5.0 定位軟體的輸入檔案。

表 5-4 CODE 和 IGS 軌道之精度比較表

Orbit Type	Quality	Delay of Availability	Available at
Broadcast orbits	~2 m	Real-time	Broadcast message
CODE Ultra Rapid Orbits	<10 cm	Real-time	CODE through FTP
CODE Rapid Orbits	<5 cm	After 12 hours	CODE through FTP
CODE Final Orbits	<5 cm	After 5-11 days	CODE , IGS Data Centers
IGS Ultra Rapid Orbits(pred)	~10 cm	Real-time	IGS Data Center and CBIS
IGS Ultra Rapid Orbits(obs)	<5 cm	After 3 hours	IGS Data Center and CBIS
IGS Rapid Orbits	<5 cm	After 17 hours	IGS Data Center and CBIS
IGS Final Orbits	<5 cm	After ~13 days	IGS Data Center and CBIS

5-2-2 GPS 動態基線解算

Bernese 5.0 動態基線解算流程的主要架構如圖 5-9 所示，將原始觀測資料轉成 Bernese 使用格式之階段，先將船載的 GPS 資料進行電碼觀測量之平滑化(Smoothing)處理，藉此過濾含有較大誤差的電碼資料，此舉將有利於獲得較高精度之單點定位成果，提昇各觀測時刻之動態定位坐標精度，但亦會降低觀測量之總數乃其所衍生之缺點，關

於電碼觀測量平滑化處理的細節，請參考 Bernese 5.0 操作手冊相關說明。一般而言，經平滑化處理後的電碼觀測資料，其單點定位之精度可自公尺等級提昇至公分等級，對於高品質動態定位起始坐標之獲得大有助益。

GPS 動態解算流程，大致上分成 GPS 觀測資料預處理與參數估計兩部分，在資料預處理方面 Bernese 軟體操作流程分為六個步驟，各步驟對應於使用之程式，依序為：

RXOBV3→PRETAB→ORBGEN→CODSPP→SNGDIF→MAUPRP。

並採用無電離層線性組合 L3。其說明如下：

1. GPS 觀測資料格式轉換 (RXOBV3)：將 RINEX 標準格式之 GPS 觀測資料轉換成 Bernese 軟體自訂之格式，並將 GPS 觀測資料分為電碼觀測量及相位觀測量。
2. 建立 GPS 衛星標準軌道(1) (PRETAB)：將 GPS 精密星曆格式轉換成 Bernese 軟體自訂的表列格式，並輸出 GPS 時錶差。
3. 建立 GPS 衛星標準軌道(2)(ORBGEN)：配合地球自轉參數、章動參數、地球固體潮、海潮、地位係數等，建立 Bernese 自訂的標準軌道格式。
4. 單點定位 (CODSPP)，此步驟將計算兩次：
第一次先使用靜態估計(STATIC)，目的為利用電碼觀測量進行概略的測站坐標解算，將接收儀與 GPS 時同步，並估計接

收儀的時錶差改正量，將其存入相位觀測量中，以供後續計算使用。

第二次則是動態估計(KINEMATIC)，目的為後續再估計動態座標時，可給予船載 GPS 動態位置初始值，初始值的好壞將影響動態定位的解算精度。

5. 組成一次差觀測量 (SNGDIF)：由使用者輸入的 GPS 觀測資料來組成載波相位一次差差分資料。
6. 週波脫落補償 (MAUPRP)：進行檢查相位觀測資料品質並標示粗差，週波脫落偵測與週波脫落補償。
參數估計方面，則由程式 GPSEST 來執行。
7. 參數估計 (GPSEST)：以相位二次差觀測量進行各相關參數之解算，如：測站坐標、整數週波未定值、對流層附加參數、……等。

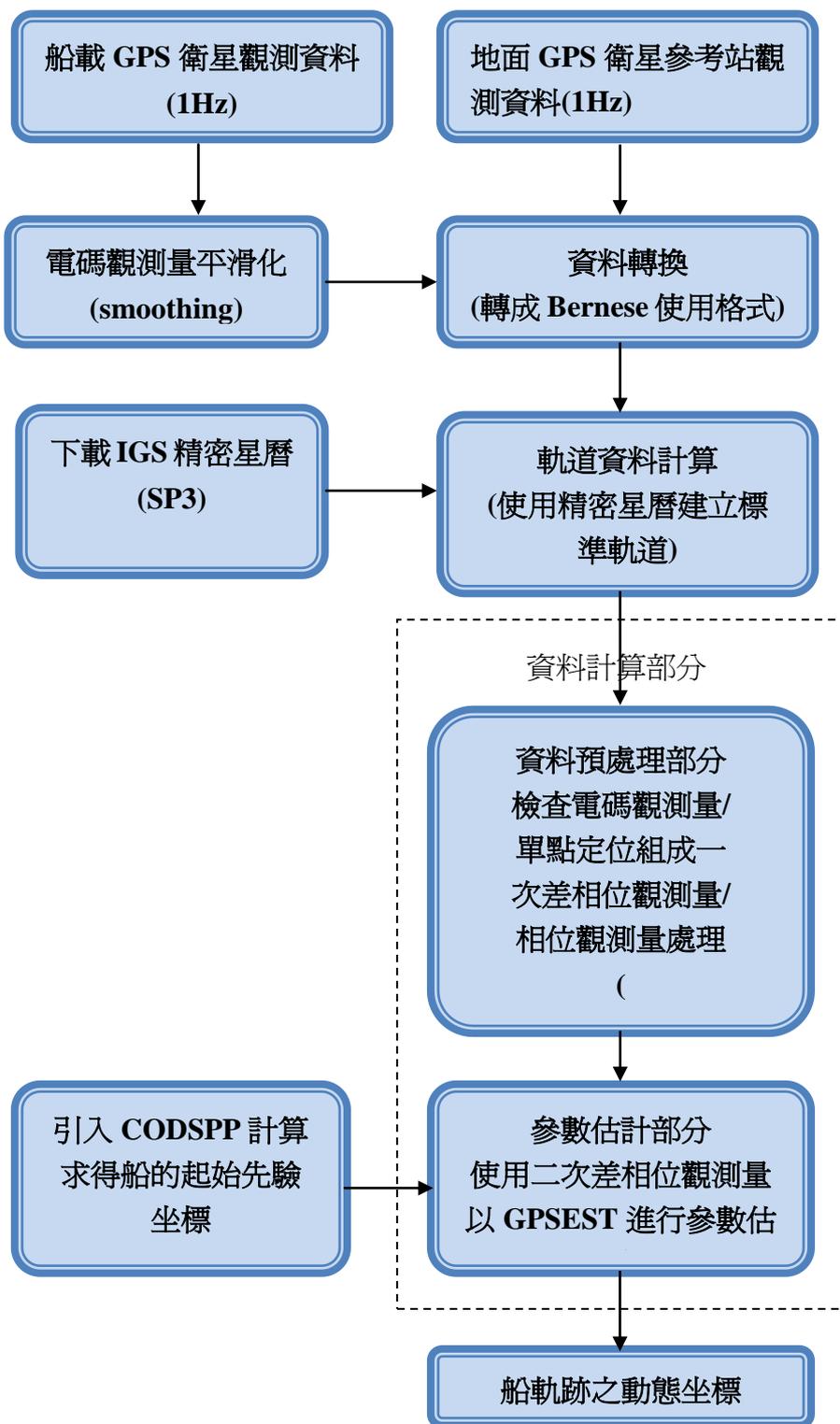


圖 5-9 Bernese 5.0 處理 GPS 動態基線之流程

5-2-3 重力資料處理

一般來說，船載重力測量的誤差來源主要包括以下五個方面：

(1) 與重力儀本身測量過程有關的誤差，包括儀器固有誤差、外界干擾所引起的誤差、溫度係數改正引起的誤差及儀器零點飄移改正誤差。為了消除這些誤差來源，在施測前已經過重力儀的水平氣泡檢驗、零位增益檢查調整、K 值檢驗等等，並設計重力觀測紀錄表用來記錄每次航行後的彈簧張力、重力讀數、機械讀數等值，可用來做飄移改正。

(2) *Etövös* 改正不精確所引起的誤差。*Etövös* 效應是當船行駛時，會產生離心加速度與 Coriolis 加速度(科氏力)，進而影響重力的量測值。在東西方向的測線中，*Etövös* 改正數的數量級往往比測得的重力異常本身的數量級為高，此誤差往往是船載或空載重力測量的主要誤差源。由於船體定位及航速的不精確，進而影響 *Etövös* 改正的精度，因此良好的 GPS 資料成果可以有效的消除這部分所帶來的影響。

(3) 定位不精確所引起的誤差。此誤差是由於定位不精確，使得測得的重力異常成果並非定位座標處的重力異常，而是相鄰海域某處的絕對重力值減去現定位座標處的正常重力值所得到的重力異常，因此本項誤差也有賴於良好的 GPS 定位成果來消除。

(4) 空間改正誤差。此誤差量級較小，約為 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5 \text{mgal}$ ，乃是由於重力儀系統的高度不準確所引起，大多來自船體載荷的消耗使得吃

水變淺所引起的系統誤差，以及波浪所引起的偶然誤差。波浪所引起的偶然誤差經過濾波處理後可以消除，船體吃水深淺亦會在每次航程後紀錄重力儀至水面高度，用來消除此項誤差。

(5) 與重力基點有關的誤差。來自於自己知重力點引測至重力基點時產生的誤差，吾人做相對重力引測時往返共做了 3 測回，目的就是為了消除此項誤差。

其餘誤差還有重力儀觀測時間與 GPS 時間的偏差量所產生的誤差，由於重力儀每一筆觀測資料的時間記錄為根據重力儀上電腦的時間，而 GPS 定位資料的時間為 GPS 時，此兩系統於船載重力施測時，不可避免的會產生非同步的現象，即此兩個系統存在著一常差 (shift)，由於船測重力時船體的垂直方向加速度與重力儀之觀測值為高相關(Olesen, 2003)，可利用此特性找出重力儀觀測時間相對於 GPS 時間的常差，首先計算出兩訊號在遲滯 τ 時之相關度，其數學模式如下：

$$Z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2(t + \tau) dt \quad (5-11)$$

$$\tau = 0, 1, 2, \dots, (n-1) \cdot \Delta T$$

式中 $s_1(t)$ 為第一個訊號於 t 時刻的相位； $s_2(t + \tau)$ 為第二個訊號於 $t + \tau$ 時刻的相位； n 為總筆數； ΔT 為觀測間隔

當(5-11)式中，讓 $Z(\tau)$ 為最大之 τ 值即為所求之常差。

本案所使用之船測計算軟體為本校自行開發，使用 FORTRAN 語言，將各項設定值寫入批次檔後計算，設定值包括時間、日期、濾波器種類、濾波罩窗寬度、base reading 值（用來做儀器飄移改正）等等，並可將輸出成果與已知的重力異常網格互相比較，檢視各條航線精度。程式並顯示測線與已知重力異常網格值差異的最大最小值、STD 值與 RMS 值以供檢視精度。同時為了瞭解每條航線的充分資料，程式亦輸出了 CC（交叉耦合）改正、原始重力值及 *Etövös* 改正值，此外還有沿軌跡、垂直軌跡所測得的 GPS 加速度以及重力儀上的加速儀所測得的加速度做比較（如圖 5-10），吾人也可由此判斷那個時間段的重力測量結果不具可信值而必須剔除。

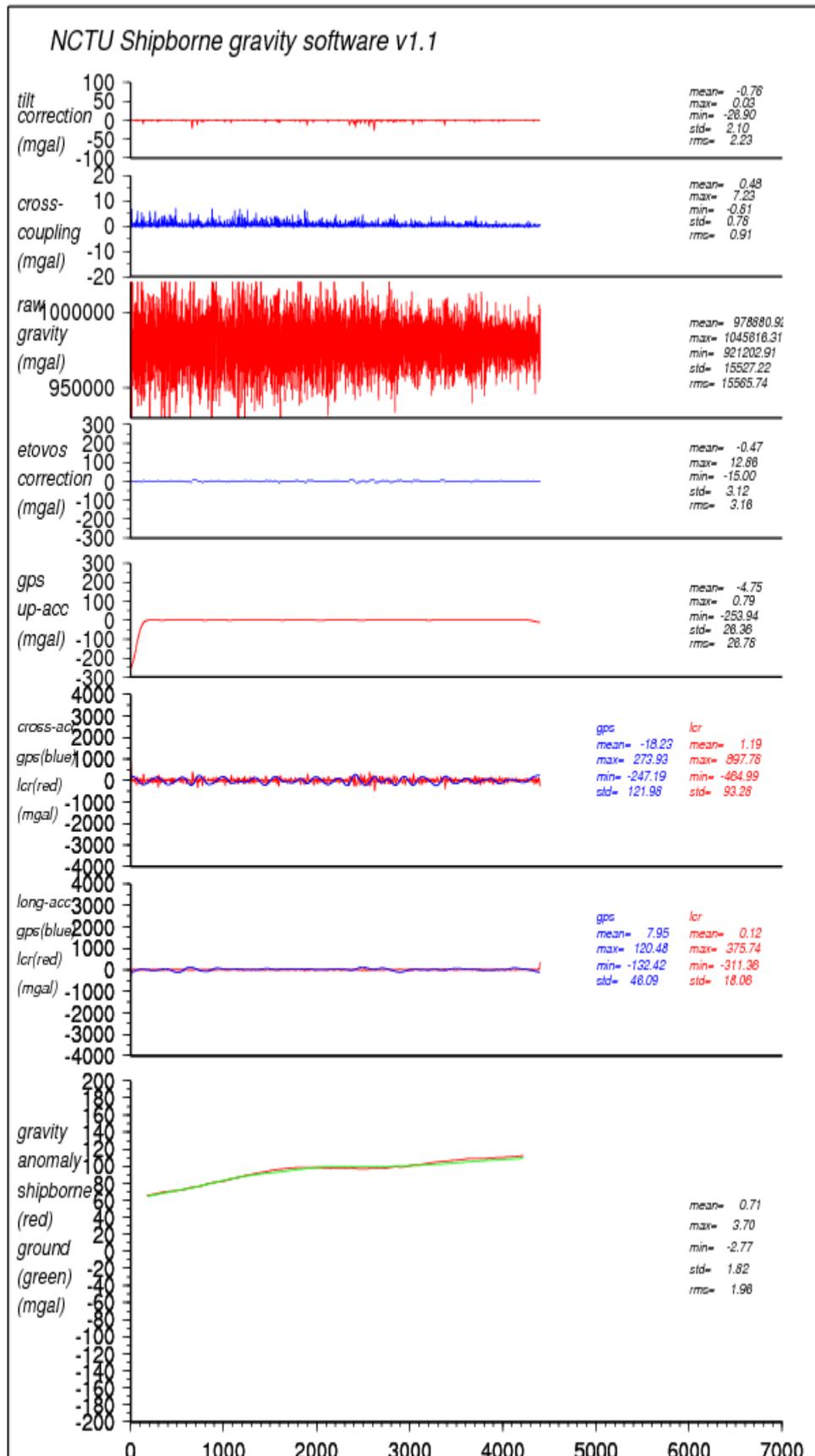


圖 5-10 單條航線輸出資料

另外吾人嘗試將固體潮改正加入這次的計算中，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：

(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)：

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

所受太陽之潮位為 (因較遠，只考慮 2 階)

$$W_s = \frac{1}{2} \frac{GM_s r^2}{R_s^3} (3 \cos^2 \psi_s - 1) \quad (5-13)$$

其中：

GM_m ：牛頓萬有引力常數乘月球質量 ($4902.778 \text{ km}^3 / \text{s}^2$)

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

r ：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：

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

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：

$$g_t^2 = \left(h - \frac{3}{2}k \right) g_t^1 \quad (5-15)$$

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

$$g_t = g_t^1 + g_t^2 = \left(1 + h - \frac{3}{2}k \right) g_t^1 = 1.15 g_t^1 \quad (5-16)$$

本案自行設計另一套程式計算 (5-16) 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。

此外，此程式還考慮了潮高改正，利用 5' × 5' 的 NOA99.JB 潮位模型，內插出每個時間點的潮高，將所測得的重力值利用自由空間改正，再考慮海水質量所帶來的影響量（海水密度為 1.03 gm/cm³），整體的改正為 -0.2656H (mgal)（此處的 H 等於潮高），便可將每一測點所測得的重力異常值約化至平均海水面上。

5-3 成果及精度分析

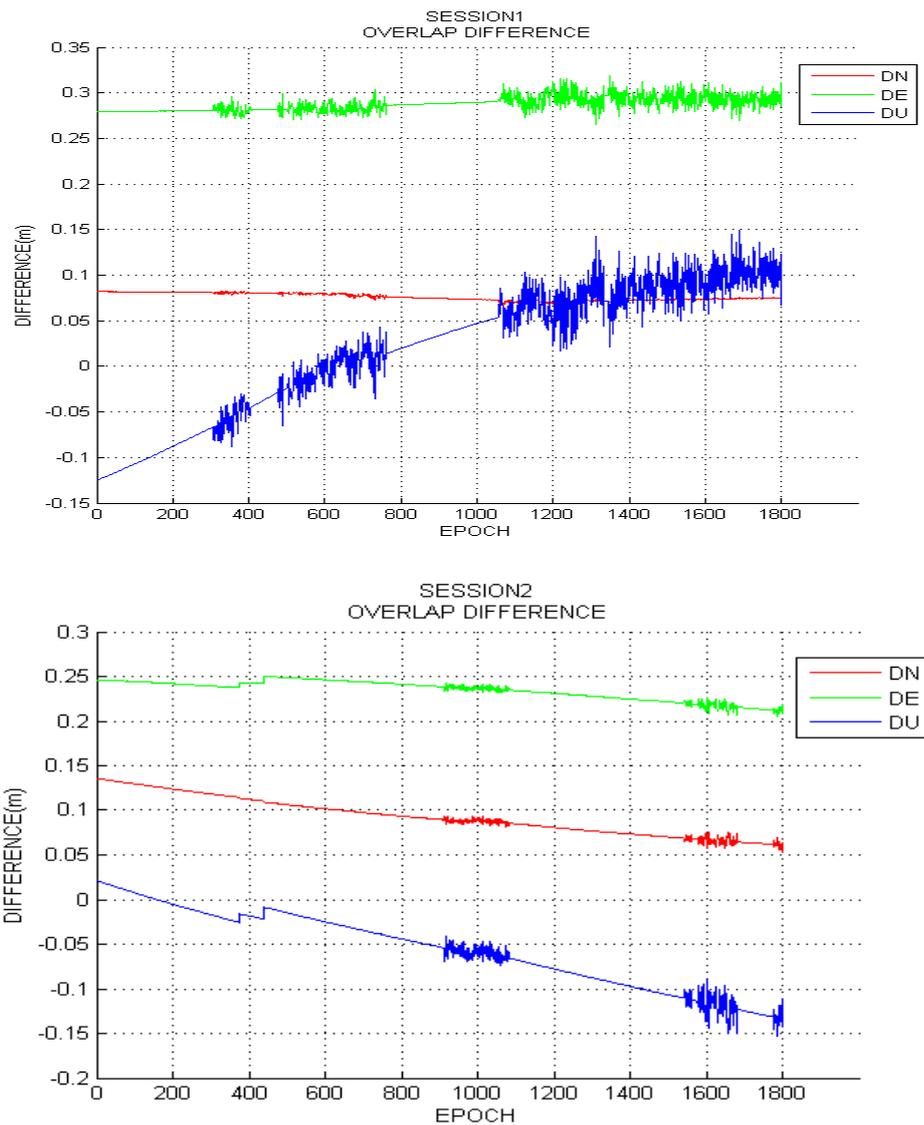
5-3-1 GPS 動態定位精度分析

為了解本案使用之船載重力 GPS 動態基線定位技術的是否可靠及穩定，因此選擇五個觀測時間區段，進行船隻動態定位之重疊分析(Overlap Analysis)，藉單一觀測時間區段切割為時段 A 及時段 B，分別進行動態基線定位解算，再相互比較兩時段解算之成果，而此兩個時間段刻意在頭尾重疊了 30 分鐘(觀測量 1800 筆)，計算在相同時刻之下瞬時三維坐標成果差異量之 RMS 值，即可將其視為一精度參考指標，顯示在動態解算過程中的估計穩定程度。重疊分析觀測時間區段，以避開船隻進出港口以及在海面上船隻動力停止漂流之時段為原則，在 2010 年 7 月 4 日至 7 月 20 日澎湖地區船載外業當中隨機選擇五個觀測時間區段，統計如表 5-5。

表 5-5 五個觀測時段之重疊時間

Session	日期	時段 A	時段 B
1	7 月 8 日	02:00-03:30	03:30-04:30
2	7 月 12 日	17:00-18:30	18:00-19:30
3	7 月 13 日	12:00-13:30	13:00-14:30
4	7 月 15 日	06:00-07:30	07:00-08:30
5	7 月 19 日	15:00-16:30	16:00-17:30

將五個測段利用觀測時間區段 A、B 內重疊時間 1800 秒的求解坐標定位坐標，其定位成果如圖 5-11，計算相同時刻下兩時間段的坐標差值 ΔN 、 ΔE 、 ΔU ，並以此差值計算 ΔN 、 ΔE 、 ΔU 之 RMS 值，以此來檢驗本案使用之船載動態基線定位技術是否穩定，統計如表 5-6。



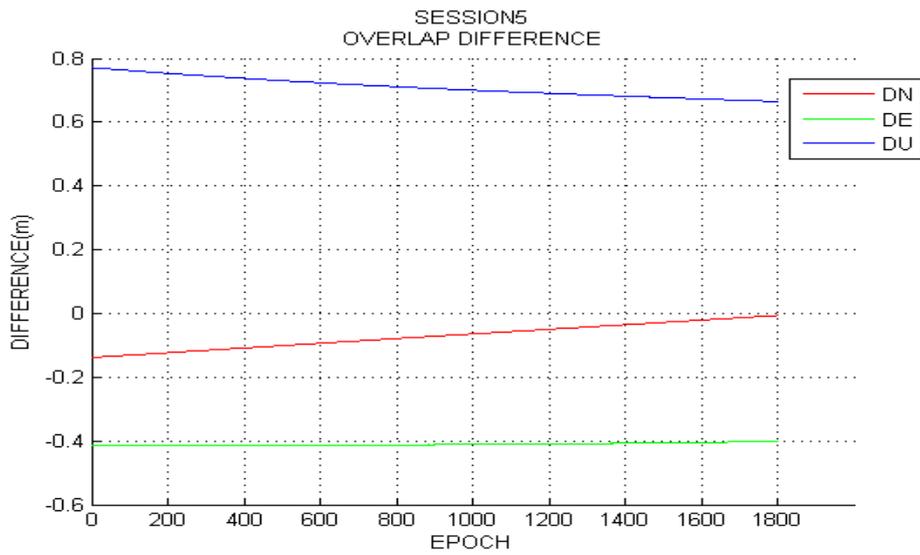
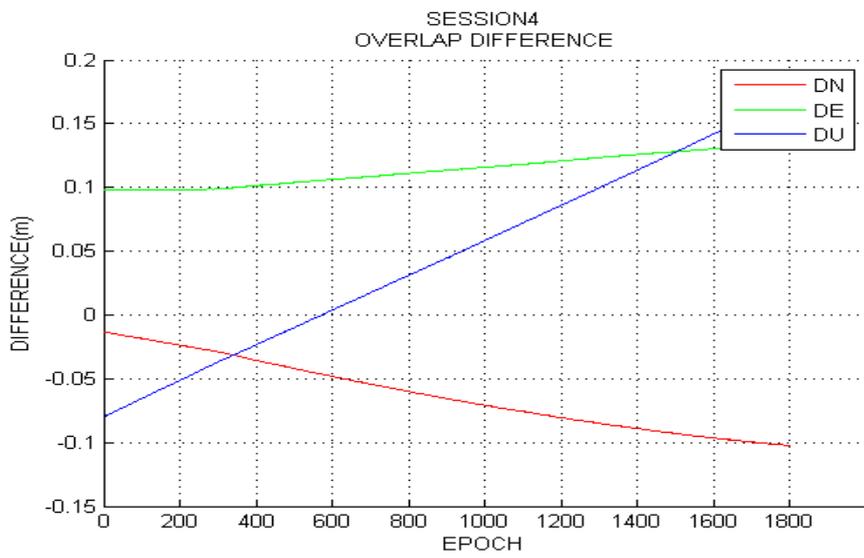
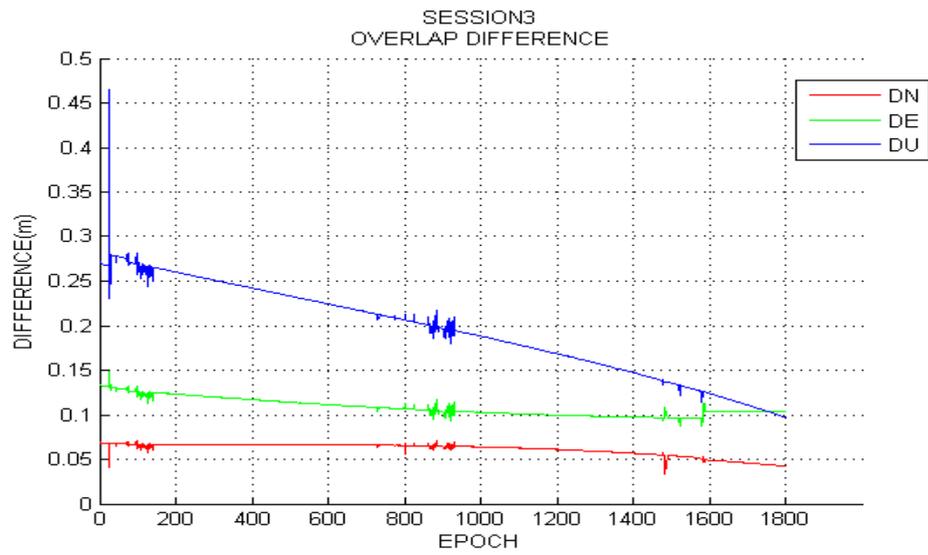


圖 5-11 五個測區 OVERLAP 坐標定位成果

表 5-6 重疊時段內坐標成果差異量 RMS 值(單位:m)

Session	$\sigma\Delta N$		$\sigma\Delta E$		$\sigma\Delta U$	
	STD	RMS	STD	RMS	STD	RMS
1	0.0038	0.0762	0.0079	0.2875	0.0699	0.0723
2	0.0210	0.0954	0.0107	0.2349	0.0428	0.0699
3	0.0070	0.0617	0.0097	0.1088	0.0509	0.2009
4	0.0271	0.0681	0.0118	0.1145	0.0718	0.0847
5	0.0380	0.0813	0.0035	0.4103	0.0300	0.7105

由上表可得知，利用重疊的觀測時段進行動態基線定位解算，比較重覆時刻之差異量，來觀察軟體解算的穩定程度。統計得到各方向差異量的 RMS 值均在公分至公寸等級，顯示本案使用的 Bernese 5.0 衛星定位軟體，及所採用的動態基線解算流程，在觀測資料可估計的情況下，呈現尚稱穩定的狀態，不會因為 GPS 觀測資料中斷，造成坐標發散至無法繼續求解或成果差異變大的情況。

船載定位因為海浪影響船身晃動程度較大，影響觀測貼近海面之衛星，造成接收衛星顆數不穩定，有可能因此影響解算成果，若將船載 GPS 動態定位成果與空載 GPS 動態定位成果比較，可發現船載之重疊分析 RMS 值普遍比空載來的稍大，但在相同量級以內，亦顯示出雖然定位成果沒有比空載動態定位好，但解算還是有相當的穩定程度。綜言之，船載 GPS 動態解算在觀測資料品質的維護上，無法與空載 GPS 和地面靜態觀測資料來比擬，若欲使用 GPS 觀測資料來求解船行之軌跡，選擇較大的船身做為收集資料之載具，避免船身過大的晃動，選擇適宜的天氣出海，來確保 GPS 觀測資料的品質。並且

在後處理工作上，針對觀測資料不佳的段落進行資料預處理，來設法提升船載動態基線定位之成果。

5-3-2 船測重力成果及精度分析

如之前所提，吾人用交叉點之重力異常值差異量來評估此次船測重力整體精度。經過高斯濾波器處理，罩窗寬度為 150 秒，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，澎湖測區有 60 個交叉點，得到的成果如表 5-7。

表 5-7 澎湖測區重力異常之交叉點分析(單位:mgal)

澎湖	Max	Min	Mean	Std	RMS
平差前	3.490	-8.389	-1.333	2.149	2.514
平差後	2.737	-2.734	0.000	0.875	0.882

圖 5-12 為測線上沿軌跡的重力異常，由於澎湖地區的地理位置分佈複雜，船隻不得不避開暗礁及島嶼，故有些航線會較為不完整。整體趨勢與地體構造相符，靠近陸地的測線重力值較大；圖 5-13 及 5-14 分別為平差前後的為交叉點重力異常差值的空間分佈，共有 60 個交叉點可供精度評估，分析出來的整體精度可算是有相當水準，平差前

的 RMS 值為 2.514mgal；平差後的 RMS 值達到 0.882mgal。

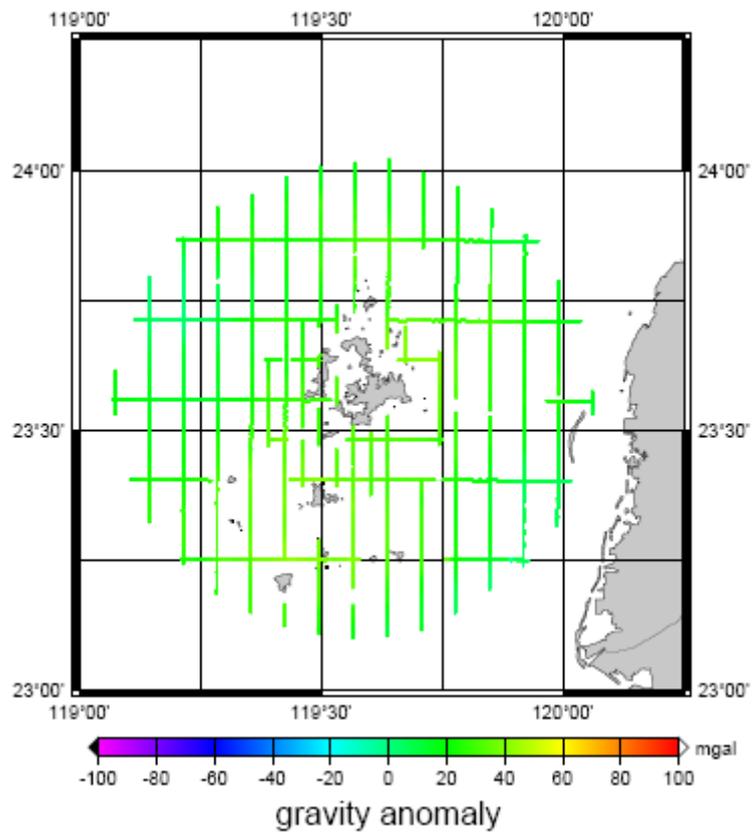


圖 5-12 交叉點平差後軌跡重力異常

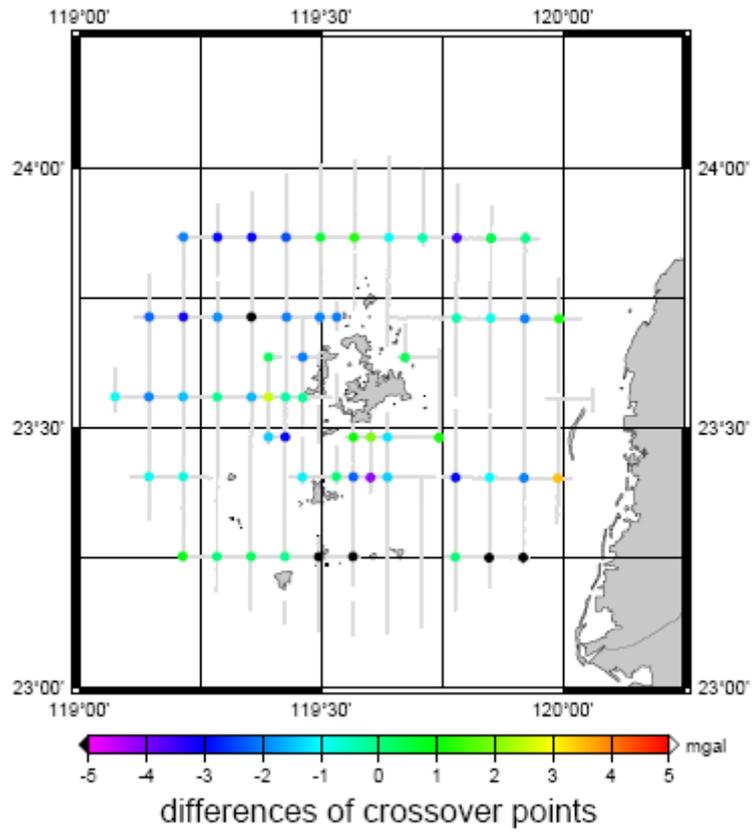


圖 5-13 交叉點重力異常差異值的空間分佈 (平差前)

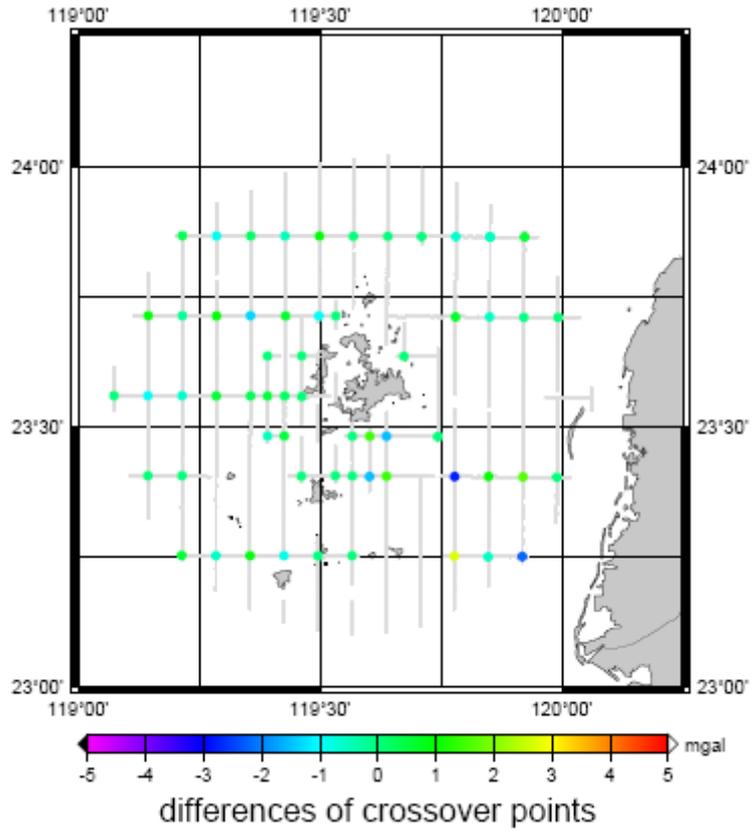


圖 5-14 交叉點重力異常差異值的空間分佈 (平差後)

5-4 水深測量

於重力測量時同步進行。水深測量採單音束水深測量方式。使用 Kongsberg EA400P 雙頻單音束測深機、GPS 衛星定位系統定位，配合姿態感應器及電羅經、潮位儀等儀器。作業項目及流程如圖 5-15 所示：

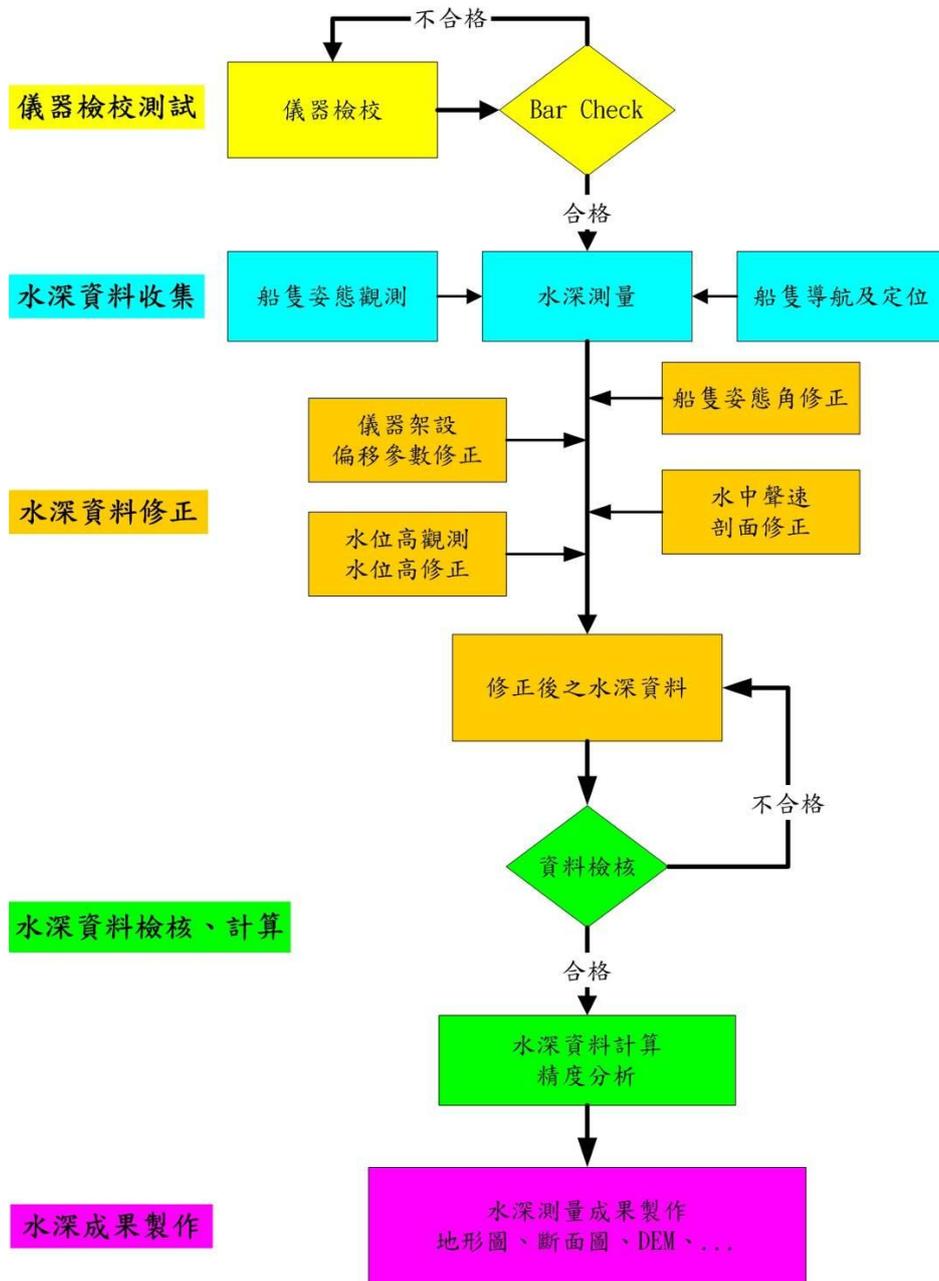
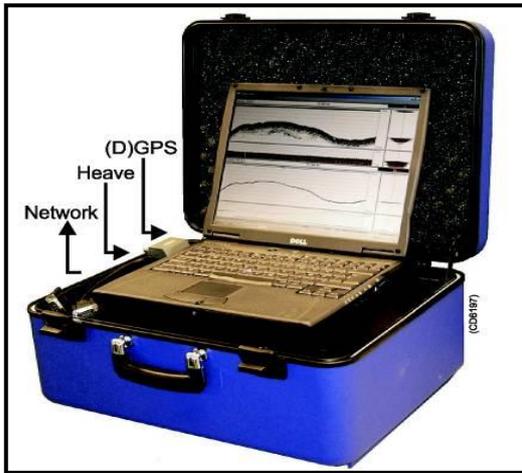


圖 5-15 水深測量流程圖

本案使用 Kongsberg EA400P 雙頻單音束測深機(如圖 5-16)，其儀器特性如下:



- 聲納頻率:38kHz、200kHz
- 測深範圍:600m(200kHz)、2100m(38kHz)
- 解析度: 1cm
- 測深精度:1cm(200kHz)、5cm(38kHz)

圖 5-16 Kongsberg EA400P 雙頻單音束測深機

(1) Bar Check 率定測試

1、單音束測深機架設完成後，在測深作業前施行檢校板檢核 (Bar Check)，以檢核儀器之正確性。檢校區選擇在港區內，因港區內風浪平穩才可施作 Bar check。率定時先以聲速剖面儀量測水中聲速剖面值，求取平均聲速值設定於測深機內，再依不同深度釋放檢校板並讀取測深機之讀數，檢校板之釋放深度以測深儀音鼓面為基準，每 1m 測定一次，製作成檢校記錄表，檢視儀器精度是否在合理範圍內。

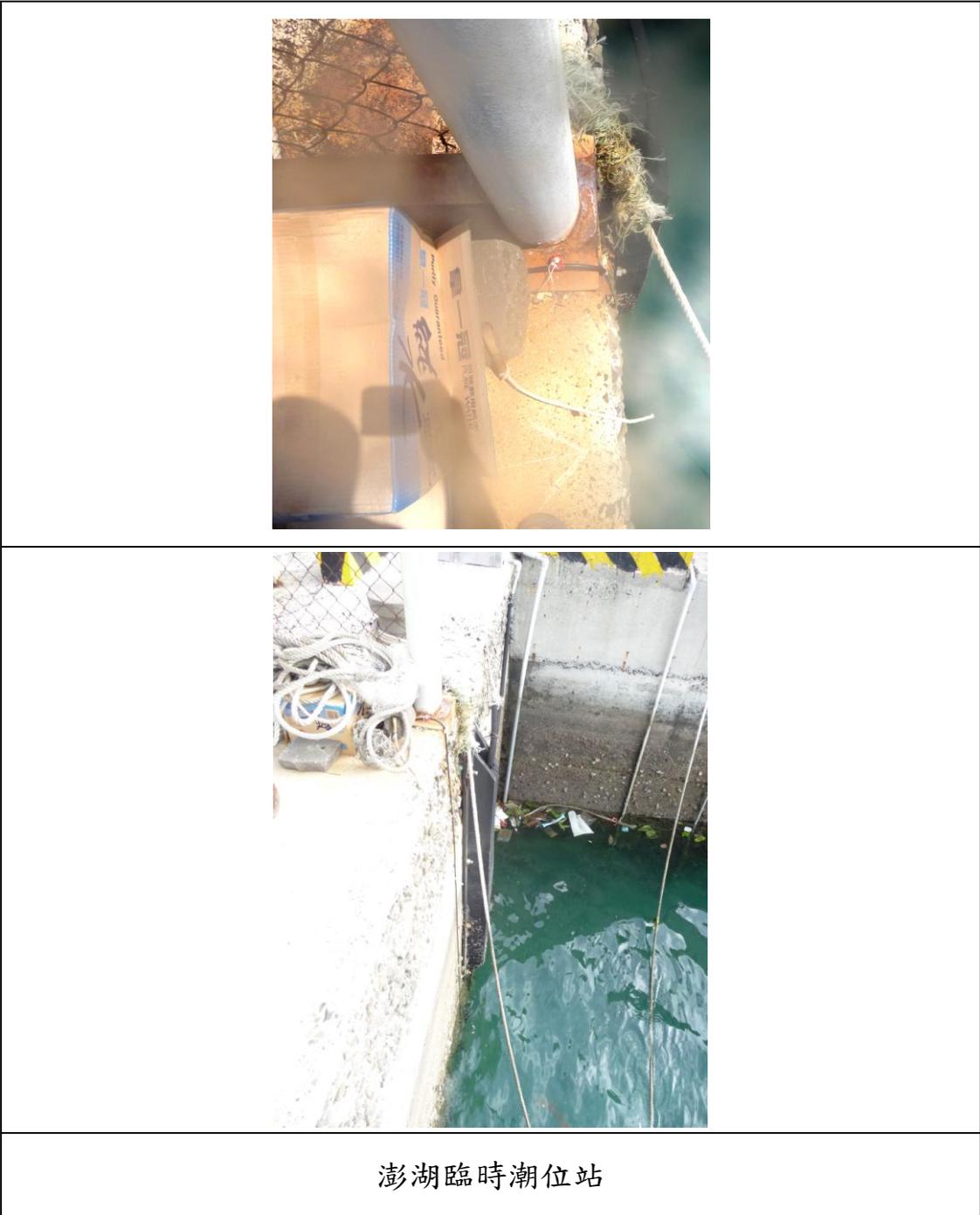
2、因港區水深應在 20m 以內，考量在船上進行 Bar check 檢校時仍會有船隻晃動問題而影響檢校精度，故容許誤差在 $\pm 0.2\text{m}$ 內應為合理範圍。



圖 5-17 Bar Check 檢核情形

(2) 潮位觀測

依每次作業的範圍，在測區內選擇風浪及淤沙影響最小處設置驗潮儀。由於漁港內受風浪影響較小，因此均選擇在港內設置。澎湖測區潮位站位於龍門漁港臨時潮位站，如圖 5-18。其高程基準以直接水準方式從控制點引測，施測精度同高程控制測量，惟觀測站所在位置若不便施測直接水準，則可採全測站電子測距經緯儀以間接高程方式施測。潮位紀錄則使用自動驗潮儀，每 6 分鐘自動記錄一筆潮位資料，輔以搭配人工檢測比對以確保資料的正確性。



澎湖臨時潮位站

圖 5-18 潮位站設置圖_澎湖測區

(3) 船隻姿態角觀測

使用 TSS DMS3-05 姿態感應器，經連接電腦可記錄測船之前後傾斜(Pitch)，左右搖擺(Roll)之角度及上下起伏的高度(Heave)。本次作業各姿態角的最大振幅範圍如圖 5-19:

- Heave:±1 公尺以內
- Pitch:±10°以內
- Roll:±15°以內

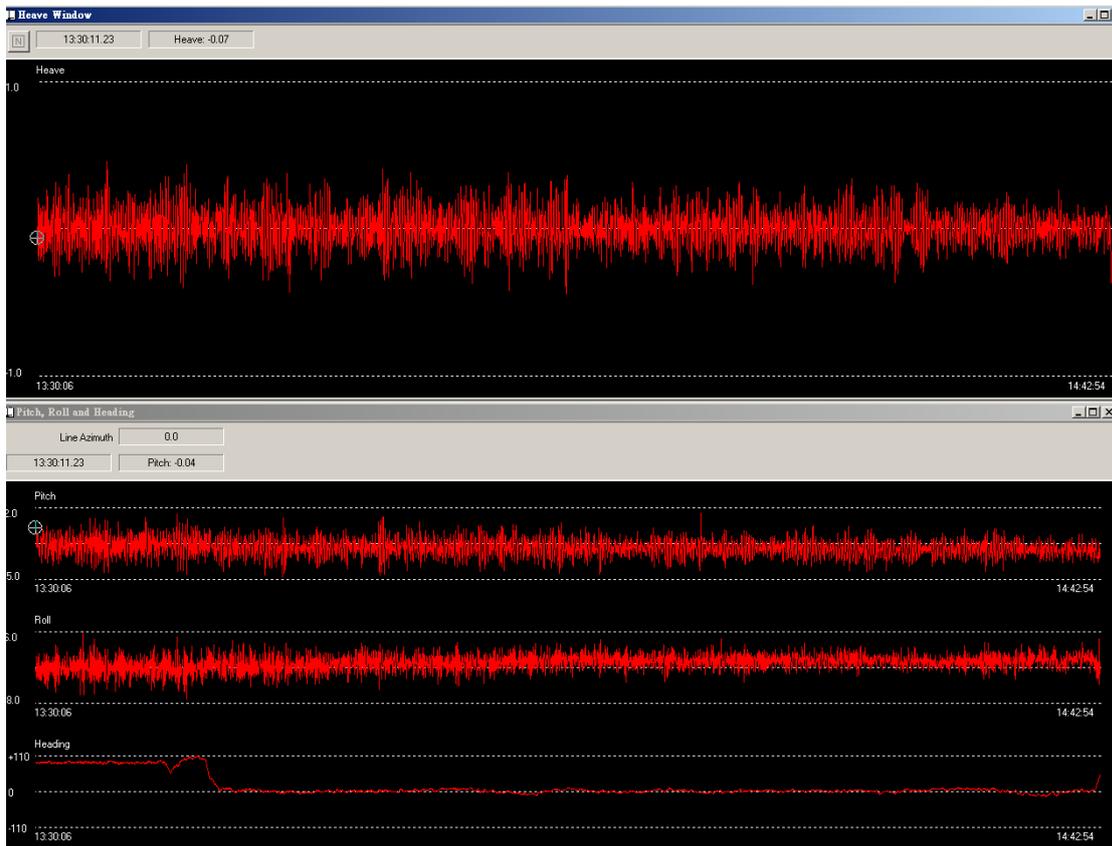


圖 5-19 測船姿態變化圖

(資料來源為 99 年 7 月 7 日，測線 NS10)

(4) 水深測量資料處理

- 1.先逐一對單一測線初步篩除可疑的水深資料，如訊號品質不佳的水深值、異常的水深值及定位品質不佳的水深點。
- 2.加入各項修正資料，包含潮位資料、聲速剖面資料、儀器架設偏移參數、船隻湧浪補償資料及率定資料等，需經檢核無誤後才加入水深資料的修正計算，可得到歸算後的水深資料。
- 3.本次澎湖測區所測得的水深地形如圖 5-20 所示，其水深值除了讓我們瞭解海底地形之外，亦可用來計算海洋的布格重力異常，對於範圍內海洋的地質可有進一步瞭解。

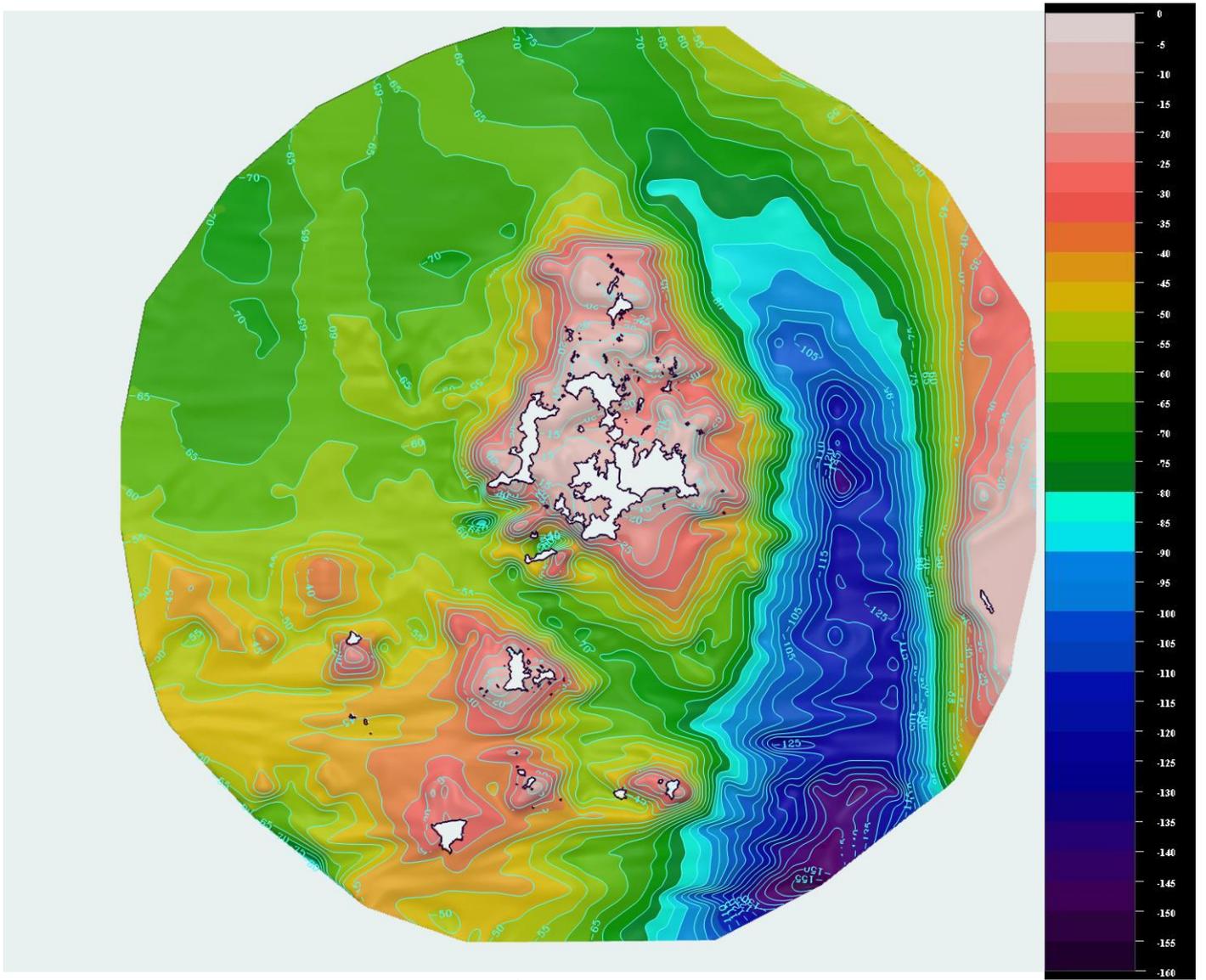


圖 5-20 水深測量地形圖_澎湖測區

第六章 大地起伏及垂線偏差計算成果

過去三年度連測作業(95、96 及 97)於計算大地起伏的方法都相同，以 LSC 計算殘餘的大地起伏模型，並加回長波長的參考場與短波長的 RTM 效應。差別最大的是在新增加的重力資料，以下針對這三年份不同的重力資料做一整理如表 6-1 所示，相同的部分就不再贅述，例如地面重力資料都相同，唯一差別就只在是否加入內政部 2008 年公佈之 4364 重力點。東部 1500 公尺航高空載重力資料並未涵蓋澎湖近岸船測重力收集的測區，所以 97 年度沒有加上此組資料。此外一併將過去於基隆、小琉球、綠島、蘭嶼、澎湖收集之近岸船測重力資料的收集範圍及成果分析整理如表 6-2、圖 6-1 所示

表 6-1、過去三年大地起伏模型所用到的重力資料

	參考場模型	地面重力資料	空載重力資料	船測重力資料	測高重力資料
95 年度 TWgeoid	EIGEN-GL 04C 係數展 開至 360 階	未加入 2008 年內政部公 佈之資料	未加入空 載重力資 料	1. Hsu et al.(1998) 2.基隆、小琉球近岸 重力	KMS02 之資料組
96 年度 TWgeoid	EGM08 展 開至 2160 階	加入 2008 年 內政部公佈 之資料	1. 5000 公 尺航高空 載重力 2. 1500 公 尺航高空 載重力	1. Hsu et al.(1998) 2.基隆、小琉球、綠 島、蘭嶼之近岸重力	NCTUM 之資料組

97 年度 TWgeoid	EGM08 展 開至 2160 階	加入 2008 年 內政部公佈 之資料	5000 公尺 航高空載 重力	1. Hsu et al.(1998) 2.基隆、小琉球、綠 島、蘭嶼與澎湖之近 岸重力	NCTUM 之資料組
------------------	-------------------------	---------------------------	-----------------------	---	---------------

表 6-2、各區經平差改正後重力異常交叉點差值統計表 (mgal)

	基隆	小琉球	綠島	蘭嶼	澎湖
均方根誤差	1.63	1.94	0.65	1.59	0.87

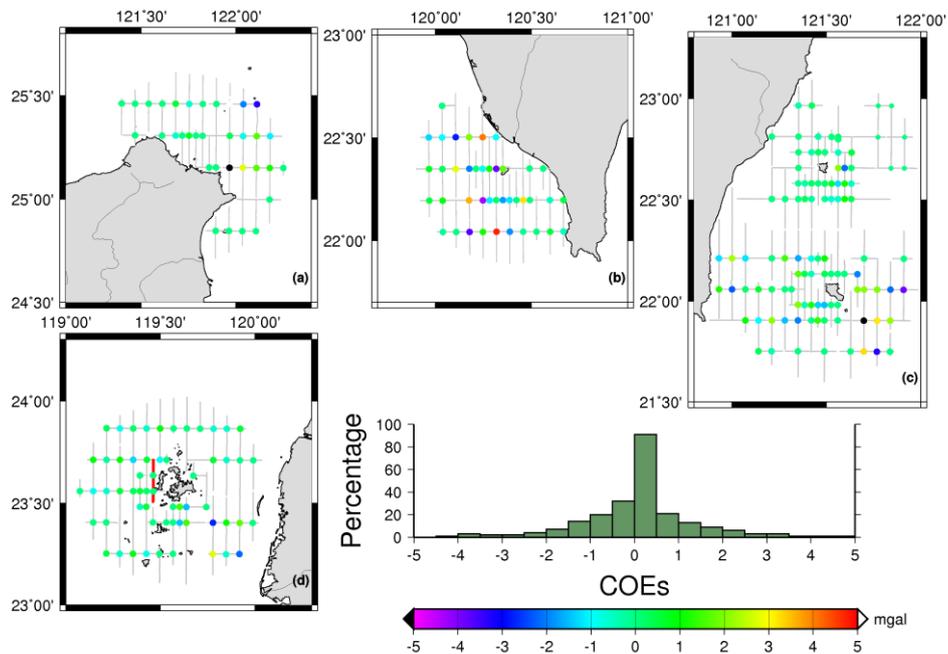


圖 6-1、各區重力異常交叉點差值分布圖

EGM08 參考重力場乃是一個解析度甚高且廣泛應用的全球模型，展開至 2160 階相應於 5'x5' 之空間解析度。單純利用 EGM08 計算的長波長的大地起伏與台灣大地起伏模型 (Twgeoid) 相比，我們可

以看出來其精度在非山區處皆與本地的大地起伏模型差異不大，可見已達相當等級（表 6-3），而 RTM 效應我們可利用兩種不同解析度的 DEM 來模擬平均地形面與真實地形面，可用 FFT 方法計算之。

精算出的大地起伏計算結果如圖 6-2 所示，中央山脈的大地起伏較高，最高可達 28 公尺，而花蓮外海一帶則偏低，僅約 12、13 公尺，整體而言，台灣大地起伏值約介於 18 至 28 公尺之間。以台灣僅約 3 萬 6 千平方公里的面積，此大地起伏的變化量是相當大的。

表 6-3 長波長大地起伏模式精度評估（單位：公尺）

Leveling route	model	Max	Min	Mean	Std dev
北部	Twgeoid	-0.0128	-0.279	-0.178	0.045
	EGM08	-0.068	-0.163	-0.113	0.032
東部	Twgeoid	-0.227	-0.336	-0.284	0.033
	EGM08	-0.245	-0.380	-0.313	0.047
中部	Twgeoid	-0.203	-0.564	-0.340	0.144
	EGM08	0.755	-0.219	0.207	0.411
南部	Twgeoid	-0.417	-0.626	-0.483	0.059
	EGM08	0.040	-0.386	-0.280	0.125

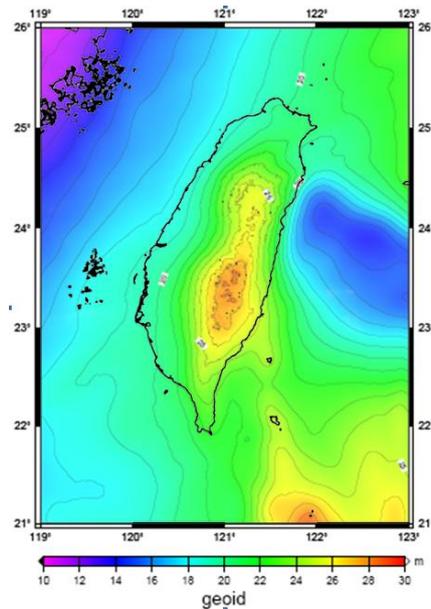


圖 6-2 台灣新大地起伏網格

爲了測試大地起伏的精度，中興測量公司與國土測繪中心，曾篩選 38 點對空通視良好的一等一級水準點(圖 6-3)，進行 24 小時的 GPS 觀測並利用 Bernese 5.0 軟體處理解算，加上其毫米等級的水準正高精度，故這 38 個點具有高精度的大地起伏值，非常適合用於檢核大地起伏精度。此 38 個檢核點分為四段路線，依序分佈於台灣北部、東部、中部、南部四處，依序為第一段為北部濱海路線，分佈在台北縣北部，由埤島社區沿台 2 線由台北縣往西至宜蘭縣橋板湖；第二段為台 9 線花東路段，分佈在花蓮縣，由吉安新站開始，沿台 9 線往南至富里節點；第三段為中橫路段，分佈在南投縣、花蓮縣，由草屯節點開始，沿台 14 線、台 8 線往東至大禹嶺節點；第四段為南橫路段，分佈在台南縣市、高雄縣，由台南節點開始，沿台 20 線往東至高雄縣。詳細各點之點號、點名及種類參考表 6-4。

在比較時，將各測試路線上各點位之實測大地起伏值與內插至重力大地起伏模型所得的值相減，可得到兩者之差值，藉由分析此差值的統計結果，可得重力法大地起伏的精度。

表 6-4 各點之點號、點名及種類對照表(皆為一等一級水準點)

點號	點名	點號	點名
2010	埤島社區	C045	清境農場
2018	白沙灣	C056	鳶峰
2023	水流宮	C060	雪地救護站
2043	忠孝宮	C065	小風口
2052	龍洞港	J005	開運橋
2057	鹽寮海濱公園	J008	玉新加油站
2065	鶯歌石	J012	湖底橋
2072	橋板湖	J019	四埔橋
9106	吉安新站	J025	供德宮
9112	壽豐車站	J035	妙通寺
9115	溪口社區	J043	桃源鄉運動場
9120	公路公園	J063	台 20 線 134K 處
9128	大興	X004	光復節點
9138	舞鶴北迴公園	X006	埔里節點
9143	太平溪橋	X015	金山節點
9147	玉里大橋	X115	草屯節點
C013	雙冬	X210	台南節點
C021	茅埔	X301	大禹嶺節點
C038	凌雲山莊	X306	富里節點

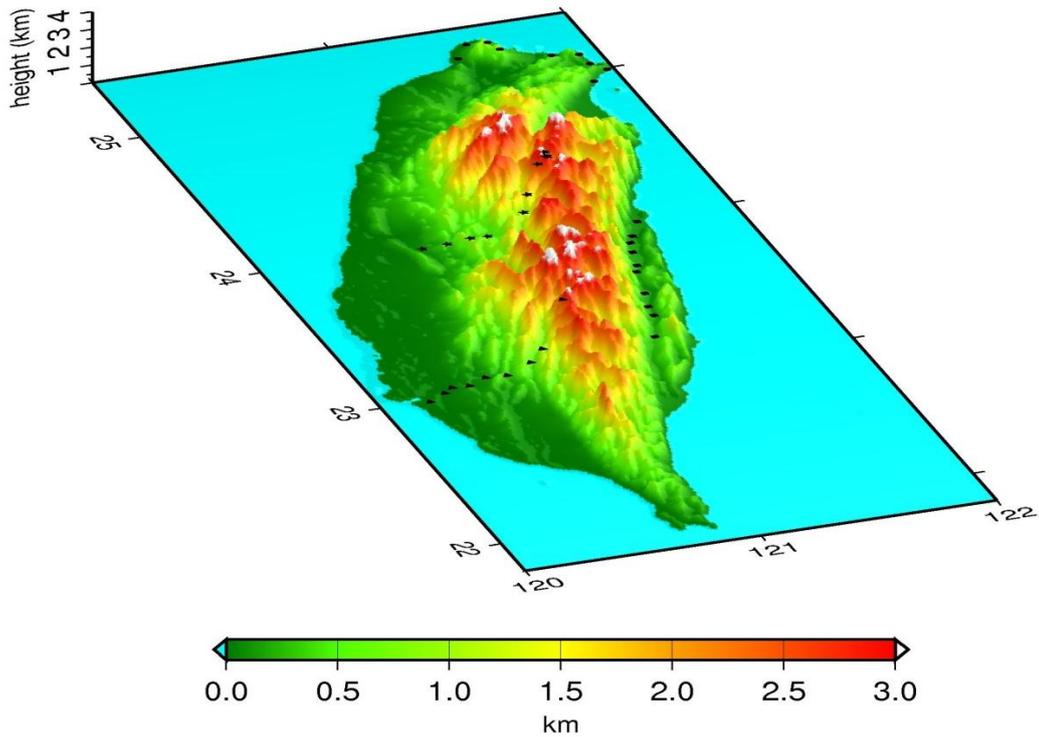


圖 6-3 大地起伏檢核路線分佈圖(圖中圓形、星形、三角形、方形黑點分別代表北、中、南、東檢測路線。底圖代表地形)

用 4 條水準路線所檢核的大地起伏精度如表 6-5 所示，整合了最新的重力資料並經過編輯處理後所計算出來的大地起伏模型。由表中可發現，整體精度平均，就算在山區的部分精度也不超過 10 公分。

表 6-5 最新大地起伏精度分析結果(unit : meter)

Leveling route	Max	Min	Mean	Std dev
北部	-0.151	-0.226	-0.196	0.026
東部	-0.119	-0.391	-0.248	0.079
中部	-0.020	-0.289	-0.131	0.087
南部	-0.232	-0.398	-0.323	0.061
全區	-0.020	-0.398	-0.222	0.097

大地起伏值 N 又可和地球半徑 R 、經度 λ 、緯度 ϕ 推導成 (6-1)、(6-2) 式

$$\xi = -\frac{dN}{ds_{\phi}} = -\frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial \phi} \quad (6-1)$$

$$\eta = -\frac{dN}{ds_{\lambda}} = -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial N}{\partial \lambda} \quad (6-2)$$

式中之 ξ 和 η ，則為垂線偏差之南北、東西分量。

利用現有資料計算 (6-1)、(6-2) 式，所得之的布格重力異常網格模型及垂線偏差模型分別為下圖 6-4、6-5。由圖 6-5 所示，台灣地區的東西方向垂線偏差值，較南北方向此垂線偏差值為大。為了檢核此垂線偏差的精度，吾人選擇台灣八個天文觀測點(如圖 6-6)，八點皆已天文觀測的方法得到南北、東西方向垂線偏差值(Hwang, 1997)，故精度頗高。吾人將此天文觀測值，減去此八點內插到此南北與東西向

垂線偏差網格內的值，結果如表 6-6 所示。由表中看出，大部分的差值均不及 1 秒，但也有一些較大的差值，約達 4~6 秒。

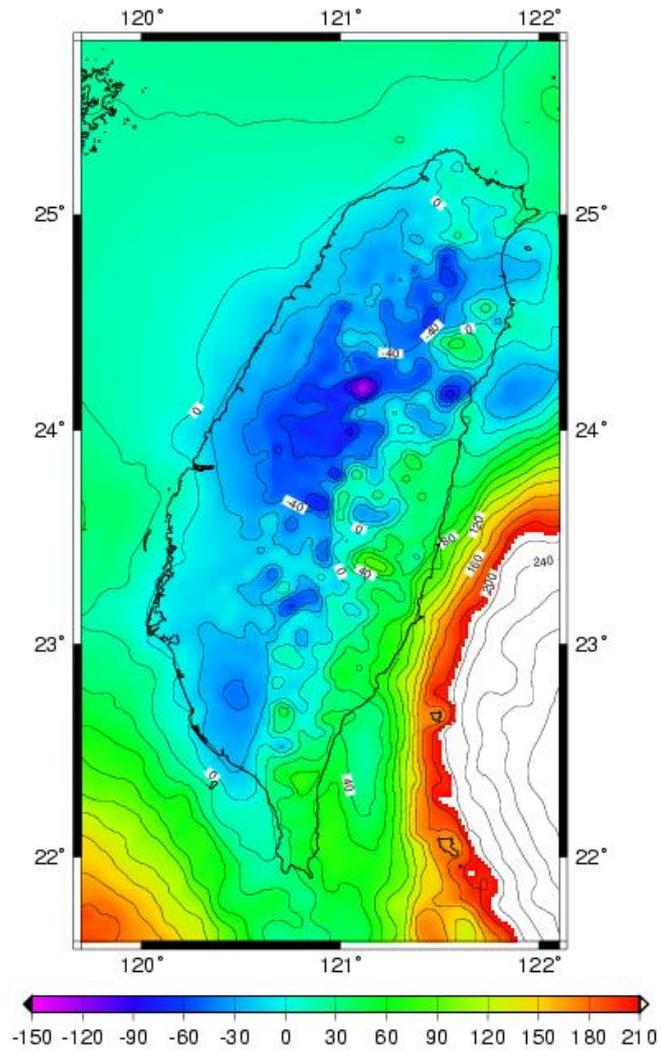


圖 6-4 布格重力異常網格模型(單位: mgal)

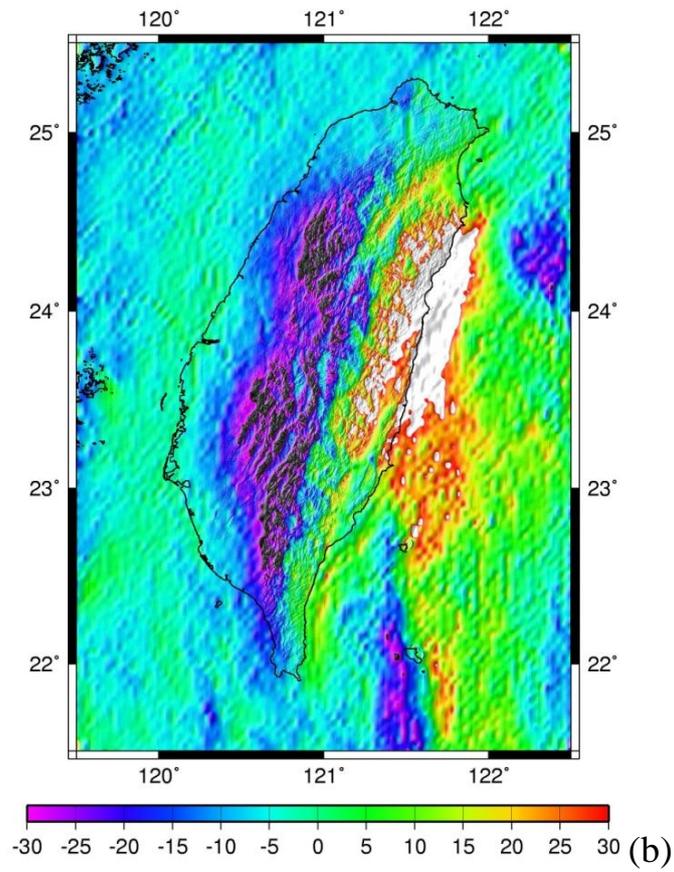
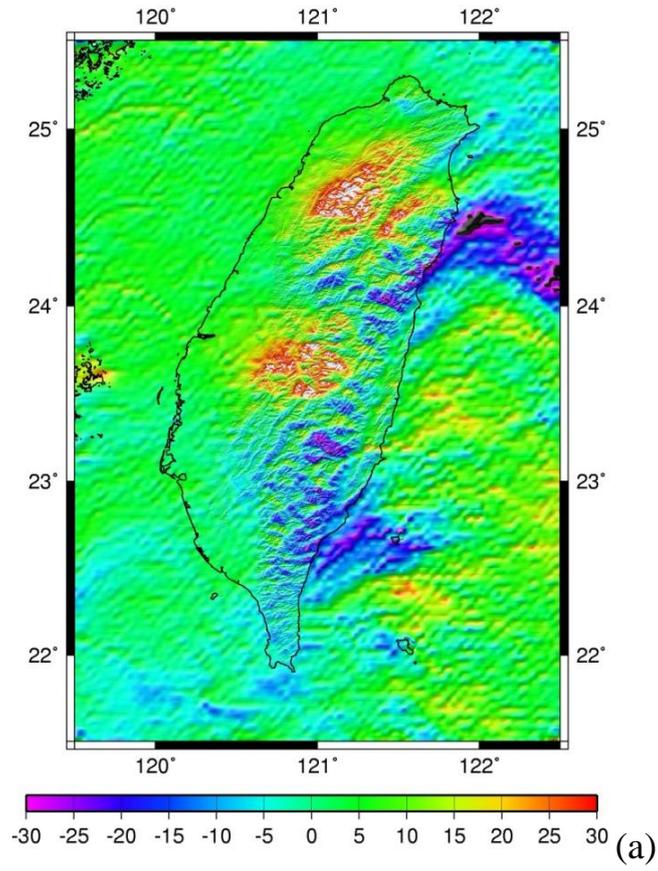


圖 6-5 台灣垂線偏差圖 (a)南北方向 (b)東西方向 單位：秒

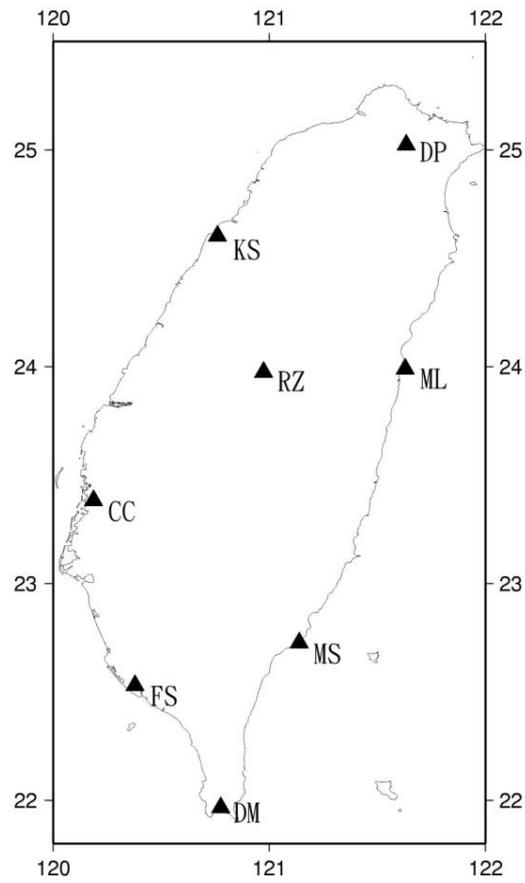


圖 6-6 天文觀測點分佈圖

表 6-6 天文觀測點檢核垂線偏差的值(單位：秒)

	南北方向差	東西方向差
DP	-3.16	0.30
KS	1.71	-0.94
ML	-4.33	1.78
CC	2.25	-2.14
MS	-0.27	5.08
FS	0.17	-0.45
DM	1.16	-2.19
RZ	4.11	-1.92

第七章 GPS 連測成果及高程基準差異求定

7-1 本島—離島(澎湖)高程連測之 GPS 及水準作業

1. GPS 前置作業

本研究小組先選擇三點水準點，加入本期離島高程連測作業。此三點分別為：(1)TG01：基隆潮位站水準點，內政部供提水準資料；(2)TG32：將軍潮位站水準點，內政部供提水準資料；(3)PF01：澎湖潮位站之鄰近一等水準點；

表 7-1 為 GPS 觀測各點時所使用儀器及天線盤之型號，圖 7-1 則為各觀測點之位置圖。

表 7-1 GPS 觀測各點使用儀器及天線盤之型號

觀測時間	觀測點	儀器型號	天線盤型號	測站形式
97 年 9 月 9 日~11 日	TG01A	TRIMBLE 5700	TRM41249	外業擺站 (靜態觀測)
	TG32	TRIMBLE 5700	TRM41249	外業擺站 (靜態觀測)
	PF01A	TRIMBLE 5700	TRM41249	外業擺站 (靜態觀測)

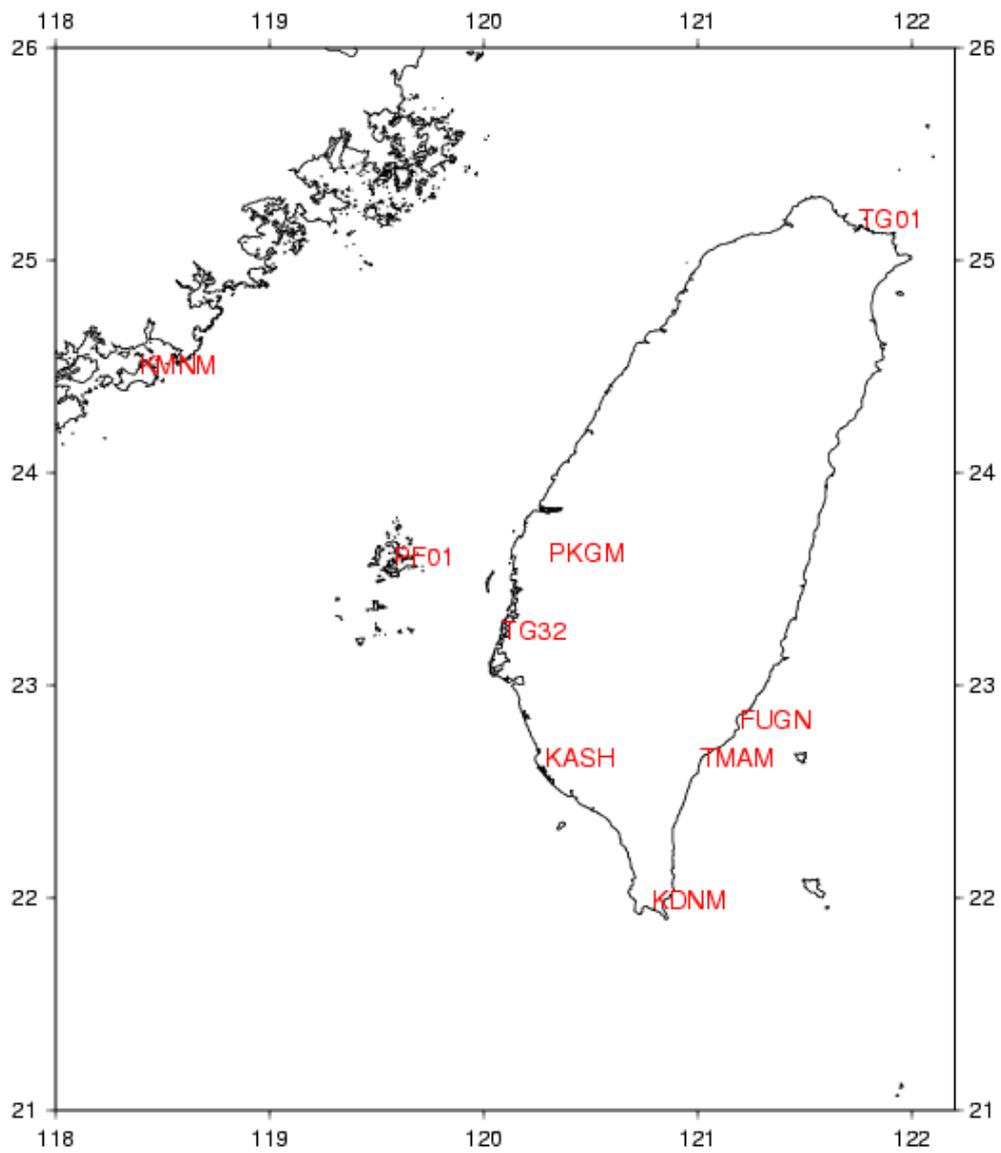


圖 7-1. GPS 觀測點位置圖

2. 利用本島 TG01 與 TG32 兩點連測資料，估算大地起伏模式之精度

本計畫以交大目前最新的大地起伏模式（見第 6 章），做為大地法連測所需要的大地起伏模式。

$H_{TG\ 32}$ 、 $H_{TG\ 01}$ 為 TG32 與 TG01 兩點正高高程，兩者之水準正高高程差可由下式求得

$$\Delta H^{Level} = H_{TG\ 32} - H_{TG\ 01} \quad (7-1)$$

$h_{TG\ 32}$ 、 $h_{TG\ 01}$ 為利用 GPS 法求得 TG32 與 TG01 兩點橢球高高程，兩者之橢球高高程差可由下式求得

$$\Delta h = h_{TG\ 32} - h_{TG\ 01} \quad (7-2)$$

$N_{TG\ 32}$ 、 $N_{TG\ 01}$ 為利用大地位模式計算之 TG32 與 TG01 兩點大地起伏值，兩者之大地起伏差值可由下式求得

$$\Delta N = N_{TG\ 32} - N_{TG\ 01} \quad (7-3)$$

結合 (2) 與 (3) 式，則可求得下式

$$\Delta H^{GPS} = \Delta h - \Delta N \quad (7-4)$$

此為 GPS 求得之正高差。在 (7-4) 公式中， ΔH^{GPS} 之精度取決於 Δh 、 ΔN 兩者，三者之誤差關係可用下式表達：

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta N}^2 \quad (7-5)$$

如果 GPS 觀測時間夠長（大於 24 小時），橢球高差之誤差應在公分以下，因而 ΔH^{GPS} 之誤差大部分來自大地起伏模式。故 ΔH^{GPS} 與 ΔH^{Level} 之差異反應大地起伏模式之誤差大小。

3. 利用 NCTU 大地位模式，估計基隆—澎湖高程基準差異

由 (7-2) 及(7-3)式之推導，同理可得下式

$$\Delta H_{TG\ 01,PF\ 01} = \Delta h_{TG\ 01,PF\ 01} - \Delta N_{TG\ 01,PF\ 01} \quad (7-6)$$

(7-6) 公式亦可轉換為下式

$$H_{PF\ 01}^{KL} = \Delta H_{TG\ 01,PF\ 01} + H_{TG\ 01} \quad (7-7)$$

此為基隆平均海水位起算，由 GPS 觀測和大地位模式計算而得之 PF01 正高。該高程在與當地平均海水面起算而得之正高比較，即可求得兩地之海面地形差(即高程基準差異)。

7-2 計算成果

1. GPS 計算結果

97年9月9日至11日，本研究小組分別在基隆(TG01A)、將軍(TG32)、澎湖(PF01A)三地擺站，結合內政部提供高雄(KASH)及富岡(FUGN)固定站資料，同時做GPS觀測，並由內政部地政司衛星測量中心之網站 (<http://www.moidlassc.gov.tw/>)，申請包含鳳林(欠缺)、墾丁(KDNM)、金門(KMNM)、馬祖(MZUM)、北港(PKGM)、太麻里(TMAN)、東沙(欠缺)、陽明山(欠缺)等衛星追蹤站三日之觀測資料。本次計算係以位處歐亞板塊之金門座標(KMNM)為固定站，以北港為中心星形網形方式決定計算各觀測點位高程(黃立信，2008)。此次觀測數據，以Bernese5.0軟體計算之為主，計算參數見附錄C，計算成果如表7-2所示。

表 7-2 以北港為中心星形網形各觀測點位高程計算結果（單位：m）

時間	點名	9/9 橢球高	9/10 橢球高	9/11 橢球高	附註
97	PF01A	20.8637	20.8641	20.8472	副點
	KDNM	58.2685	58.2888	58.2626	
	TG32	22.0140	22.0017	21.9938	
	MZUM	60.2277	60.2296	60.2118	
	PKGM	42.7571	42.7588	42.7533	
	TG01A	22.8885	22.8819	22.8691	副點
	TMAM	58.7399	58.7388	58.7292	
	KMNM	49.1151	49.1151	49.1151	
	KASH	25.6203	25.6254	25.6254	
	FUGN	31.2134	31.2251	31.2209	

本次作業基本上取最後幾何高程取三天觀測值平均而得。在 97 年離島與本島 GPS 連測作業，改善了觀測點位環境，以在同一區域，大地水準面為同一起伏值的原則下，將原來在一等水準點上的觀測點位，在同一區域尋找對空通視良好，避免對衛星訊號遮蔽的環境下，訂立一副點，並進行高精度之水準測量，連結水準點與觀測副點之高程，有效的使用 GPS 來觀測各待測點之水平方向與高程；因為水準點與副點距離甚短，所以兩點之間的 $\Delta N \approx 0$ ，故 $\Delta h \approx \Delta H$ 可視為成立。此次作業因為原點位 GPS 作業環境不佳而訂立副點的觀測點位有基隆 (TG01A)、澎湖 (PF01A)，在副點和水準點位做精密水準測量，將 GPS 觀測之幾何高程歸算至水準點上。

而基隆(TG01)之幾何高程計算如下所示，

$$TG01A(h)-TG01(h)=0.859(m)$$

TG01 之幾何高程為

$$TG01A-0.859=22.8798-0.859=22.0208 (m)$$

台南將軍之 GPS 觀測站直接擺在 TG32 水準點上，故可直接沿用平均之幾何高程值及內政部公告之正高高程值加以計算。

而澎湖(PF01)之幾何高程計算如下所示，

$$PF01A(h)-PF01(h)=0.068 (m)$$

PF01 之幾何高程為

$$PF01A-0.068=20.8583-0.068=20.7903 (m)$$

相關水準點與副點之精密水準作業記簿，請參見附錄三。所有觀測點位最後輸出幾何高程結果如表 7-3 所示。

表 7-3 最後幾何高程成果

觀測點名	GPS 橢球高(m)	觀測點名	GPS 橢球高(m)
基隆 (TG01)	22.0208	將軍 (TG32)	22.0032
高雄 (KASH)	25.6237	澎湖 (PF01)	20.7903
太麻里 (TMAN)	58.7360	北港 (PKG N)	42.7564
墾丁 (KDNM)	56.2733	富岡 (FUGN)	31.2198

2. 估算 NCTU 大地位模式之精度

本次使用的大地起伏網格進行比較，為 08twgeoid.grd3 (詳見第 6 章)，將所製作之 NCTU 大地起伏網格值帶入各觀測點位大地坐標後，取得各觀測點之大地起伏值，其結果如表 7-4 所示。

表 7-4 各觀測點之大地起伏值

觀測點名	緯度	經度	大地起伏值(m)
基隆 (TG01)	25°09'18.47929"N	121°45'03.49225"E	20.287
澎湖 (PF01)	23°33'57.75757"N	119°34'38.85996"E	18.152
將軍 (TG32)	23°12'44.62069"N	120°04'59.39854"E	19.343

台灣高程系統 TWVD 2001 使用基準為基隆潮位站，使用直接水準測量佈設於台灣本島各地，但由於台灣離島水準基準皆是使用當地潮位站進行潮位化算，表 7-5 為各觀測點位正高值與高程基準表。

表 7-5 各觀測點位正高值與高程基準表

觀測點名	正高值 (m)	水準點高程基準
基隆 (TG01)	1.588277	基隆潮位站平均海水面為零公尺起算
將軍 (TG32)	2.52898	基隆潮位站平均海水面為零公尺起算
澎湖 (PF01)	1.92388	馬公漁港之區域平均潮位面為零公尺起算

公式 $H = h - N$ ，利用幾何法正高求得方法為橢球高減去大地起伏，以相同島嶼推估同一高程基準，運用同一系統兩點觀測點橢球高、大地起伏值、及同一大地水準面起算正高，兩觀測點之橢球高差減去大地起伏差，公式 $\Delta H = \Delta h - \Delta N$ ，以理論上來說正高差值 ΔH 將會

是零，但由於大地起伏精度的依據來源為重力資料的多寡，因此 ΔH 多為大地起伏值影響，給予正高來源為內政部公佈，由於來源可靠在此視為真值，為求大地起伏精度給予兩個已知值，在此忽略 GPS 誤差，利用基隆與台南在同一高程系統觀測點位推估大地起伏差推算精度，可由表 7-6 得知結果，由兩地推估得知研究中所計算的大地起伏差為 1.46cm，但這邊必須特別說明的是，這並不代表整體的大地起伏精度，只是單純就這兩點的案例來做討論，整體的大地起伏精度仍須參考第六章的說明。

表 7-6 將軍與基隆兩水準點計算估計大地起伏值精度

點位	H (正高)	h (幾何高)	N (大地起伏)	ΔH^{level}	Δh	ΔN	ΔH^{GPS}	$\Delta H^{level} - \Delta H^{GPS}$
TG32	2.529	22.0032	19.343	0.941	-0.0176	-0.944	0.9264	0.0146
TG01	1.588	22.0208	20.287					
單位：m								

7-3 本島與離島（澎湖）高程基準差異推估：大地法

推估台灣本島與離島的高程基準差異，由於離島高程系統皆為當地潮位站的平均海水面獲得，但是離島與本島的平均海水面並不相同，因此，本島與離島的所定義的高程基準並不一致。海面地形是由大地起伏算至平均海水面的值，兩島間不同的平均海水面相對於大地起伏的差異值為海面地形差 Δ_{SST} 。表 7-7 及 7-8 乃是利用 GPS 連測成果及台灣區域大地起伏模式推算之海面地形差。表 7-7 可看到基隆起算由基隆推算澎湖平均海水面差異 56.8 cm；表 7-8 可看到將軍起算由基隆推算澎湖平均海水面差異 58.3 cm；

表 7-7 基隆起算推算基隆到澎湖平均海水面地形差異（單位：m）

點位	h	N	Δh	ΔN	ΔH	本島水準 正高 $H_{TG\ 01}$	$H_{PF\ 01}$ 正高（本 島系統 TWVD 推 算）	$H_{PF\ 01}$ 正 高（離島 系統）
PF01	20.7903	18.152	-1.2305	-2.135	0.9045		2.492	1.924
TG01	22.0208	20.287				1.588		
							$\Delta_{SST} = 0.568$	

表 7-8 將軍起算推算基隆到澎湖平均海水面地形差異（單位：m）

點位	h	N	Δh	ΔN	ΔH	本島水準 正 $H_{TG\ 32}$	$H_{PF\ 01}$ 正高（本 島系統 TWVD 推 算）	$H_{PF\ 01}$ 正 高（離島 系統）
PF01	20.7903	18.152	-1.2129	-1.191	-0.0219		2.5071	1.924
TG32	22.0032	19.343				2.529		
							$\Delta_{SST} = 0.583$	

由上述方式得知台灣本島與各離島間之平均海水面差異及大地起伏的精度，予以加入 GPS 精度，方可給予平均海水面差異修正，由多年前文獻所探討的 GPS 精度問題得知，GPS 的觀測量大於六小時及優良的觀測環境下，方可獲得不錯的相對定位精度[4]，本研究

97 年 GPS 觀測點位坐標計算，所有觀測點位內部精度皆低於一公分，根據公式 $\Delta H = \Delta h - \Delta N$ ，由於 Δh 和 ΔN 獲得方式並無相關性根據誤差傳播定理可得 $\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta N}^2$ ，其中 ΔH 的精度是根據 Δh 和 ΔN 而來，得知大地起伏精度為 $\sigma_{\Delta N} = 1.46 \times \sqrt{2}$ cm，GPS 精度為 $\sigma_{\Delta h} = \sqrt{2}$ cm，代入 $\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta N}^2$ 求得 $\sigma_{\Delta H} = 2.06$ cm。

將估算出之 $\sigma_{\Delta H}$ 標準偏差修正於先前推估平均海水面地形差異，推估澎湖與本島平均海水面地形差異結果呈現於表 7-7 及表 7-8。其中倒數第二欄 H_{PF01} 正高(本島系統 TWVD 推算)為大地法推算之 PF01 的 TWVD2001 高程，最後一欄 H_{PF01} 正高(離島系統)為以澎湖平均海水面起算之 PF01 的高程，將此兩欄之值相減便是海面地形差異結果。基隆起算之平均海水面地形差異 56.8 ± 2.06 cm；將軍起算之平均海水面地形差異 58.3 ± 2.06 cm。

7-4 海洋法成果

海洋法的結果雖不如大地法精準，但不至於在整體趨勢上會有離譜的誤差。世界上也有相關的應用，例如美國國家大地測量局(NGS)在評估墨西哥灣(Gulf Mexico)周圍的大地起伏精度時，亦也使用了美國國家海洋大氣總署(NOAA)所計算的DOT模式，此模式也是建立在海洋法的精神上(Patchen, 2006)。本案利用DPOM與POM兩模式計算之成果如下。

7-4-1 DUPOM 模式成果

本案以DUPOM東亞海(East Asian Seas)空間解析度 $1/8^{\circ} \times 1/8^{\circ}$ 之模式(Jan et al., 2006)計算，並以DUPOM模式累積計算至第10年之結果作為分析資料。第10年年平均海水面地形及每月海面地形，如圖7-2及圖7-3，圖中白色部份表無資料，台灣海峽之海面地形呈現東高西低及南高北低現象，台灣海峽之海面地形比台灣東部海域低，海面地形正值隨季節會出現於台灣西南海域及東部海域。

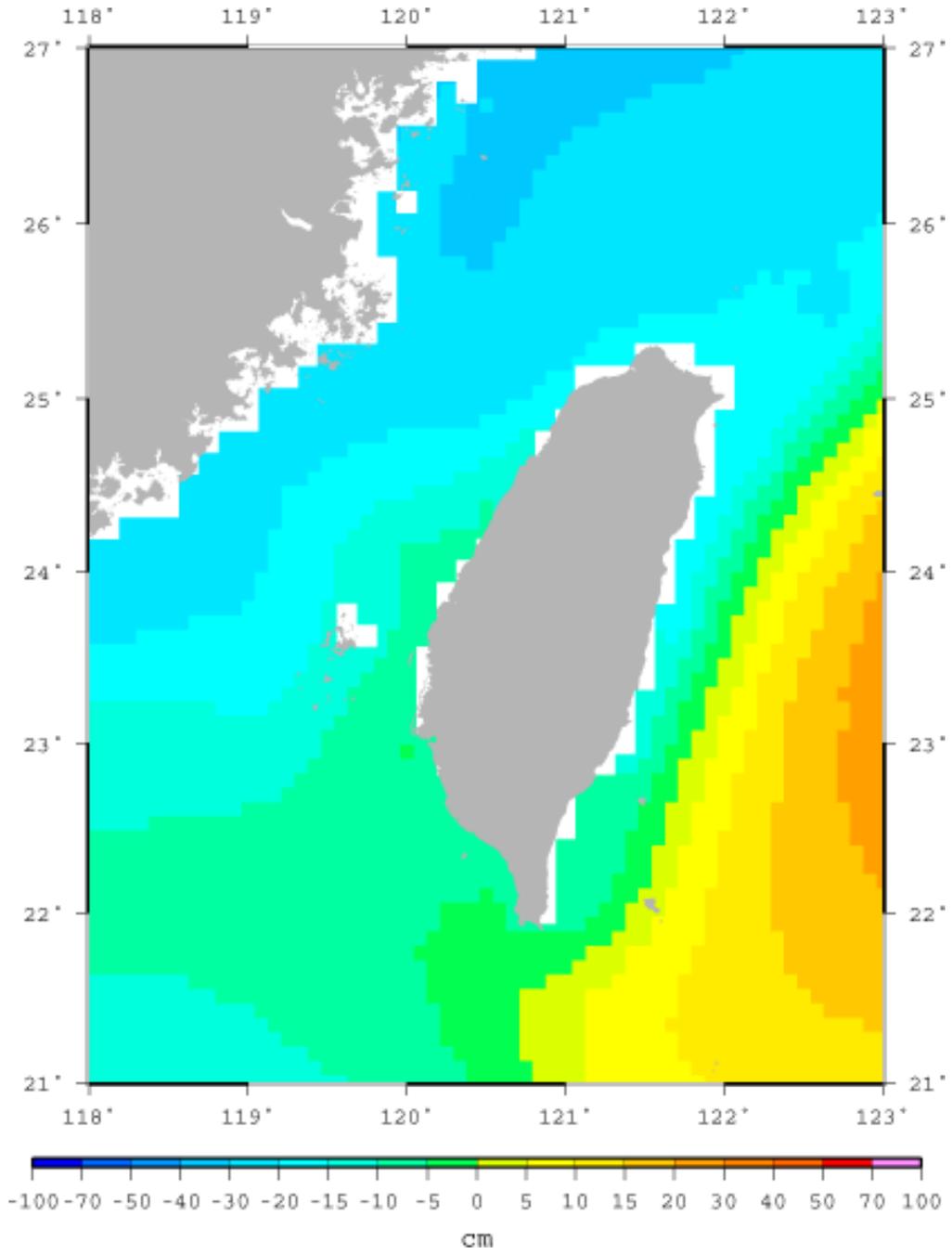


圖 7-2 累積計算至第 10 年年平均海水面地形(Jan et al., 2006)

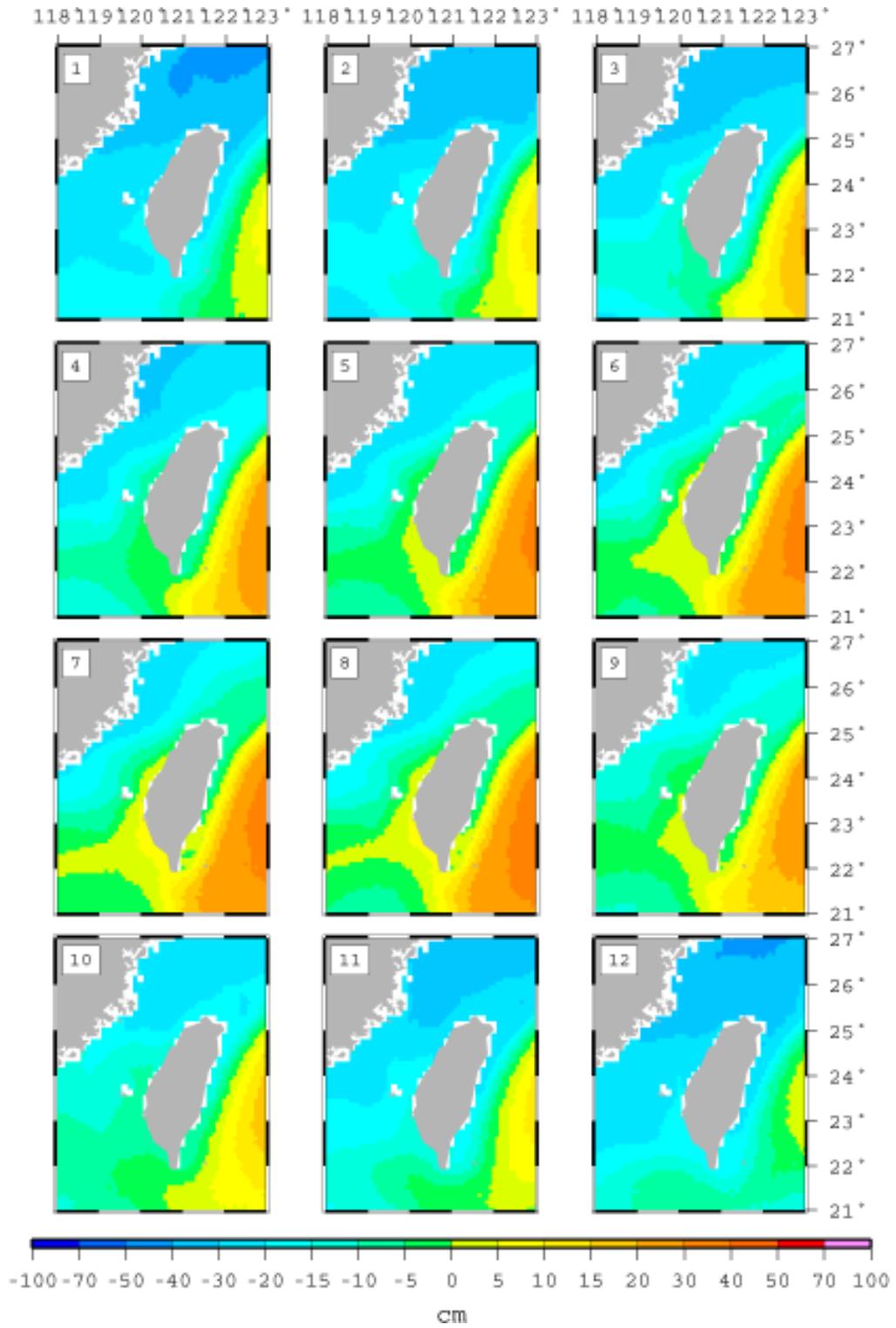


圖 7-3 累積計算至第 10 年每月海面地形(Jan et al., 2006)

7-4-2 POM 模式成果

北太平洋模式之模式範圍為 16°S 到 60°N，99°E 到 77°W (如圖 7-4a 所示)，其水平方向採非均勻解析度，赤道附近最低(約 40 公里)，北邊界最高 (約 20 公里)，垂直方向包含了 26 個 sigma 層。東亞邊緣海模式範圍為 0 到 42°N，99°E 到 140°E，包含黑潮的上游及下游區，南海 (South China Sea)，東海 (East China Sea)，但不包含黑潮續流區 (如圖 7-4b 所示)；此模式之水平解析度為 1/8 度，垂直方向亦有 26 個 sigma 層。在模式地形的使用方面，在台灣附近採用國家海洋科學研究中心 (National Center for Ocean Research) 第 5 版之數值地形資料，其它區域則是採用 ETOPO5 之海洋地形資料。

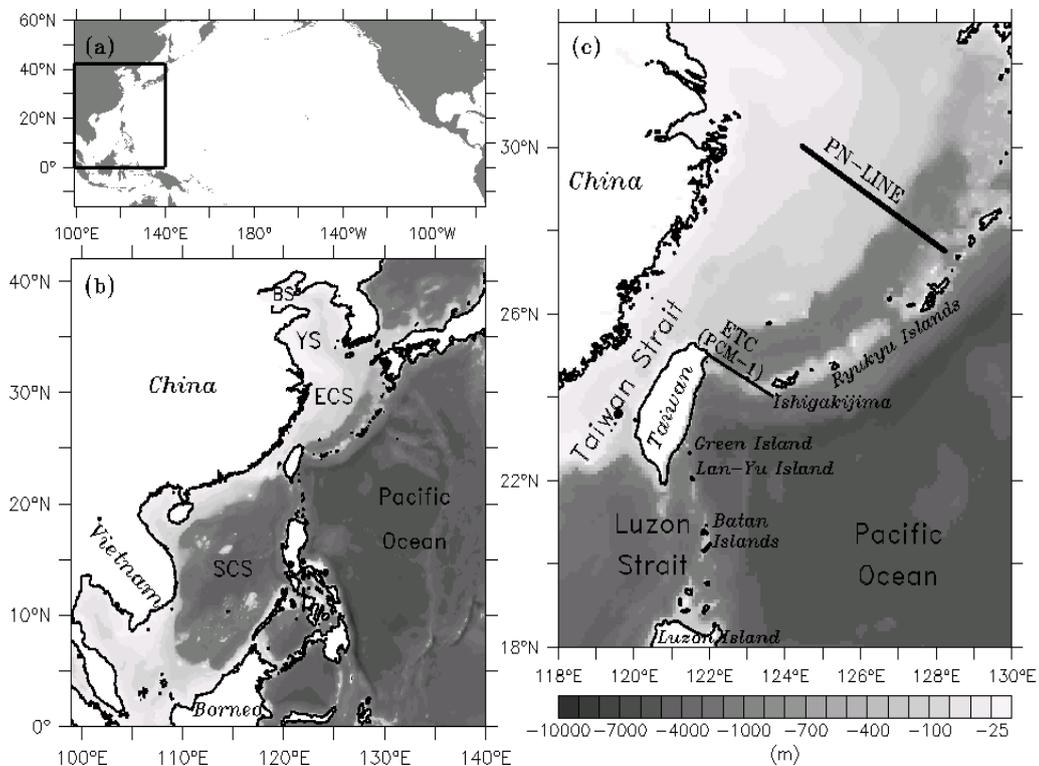


圖 7-4 巢狀模式系統

在開口邊界條件方面，利用單向巢狀嵌套（one-way nesting）方式提供北太平洋模式之資料至東亞邊緣海模式之邊界條件，包含：海面高度場、2 維與 3 維之速度場、溫度場以及鹽度場。模式使用之表面外力取自 NCEP/NCAR（National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research）之海面風場資料以及 AVHRR（Advanced Very High Resolution Radiometer）之海面溫度資料。

模式先利用氣候平均風場及海面溫度場驅動 50 年，再利用每日 4 筆之風場資料，繼續驅動模式由 1941 年至 2005 年。而海面溫度資料在 1982 年以前是使用 NCEP/NCAR 資料（每日 4 筆，2.5 度解析度），1982 年以後則是使用最佳化內插之資料（每週 1 筆，1 度解析度）。此研究採用東亞邊緣海模式 1982~2005 年（共 24 年）之資料來探討臺灣東岸海面地形（SST）之時間與空間的變異性。東亞邊緣海模式的設定與驗證可以參照（Wu and Hsin, 2005; Wu et al., 2008; Hsin et al., 2008）。

圖 7-5 是將 EAMS 數值模式 10 年平均（1993~2002）的海面地形（SST）與人造衛星（Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, AVISO）的 SST，兩者作統計相關研究，可以發現兩者的相關係數相當高，在臺灣東部海域都在 0.7 以上，表示數值模式可以真實地模擬出臺灣附近海域的 SST。

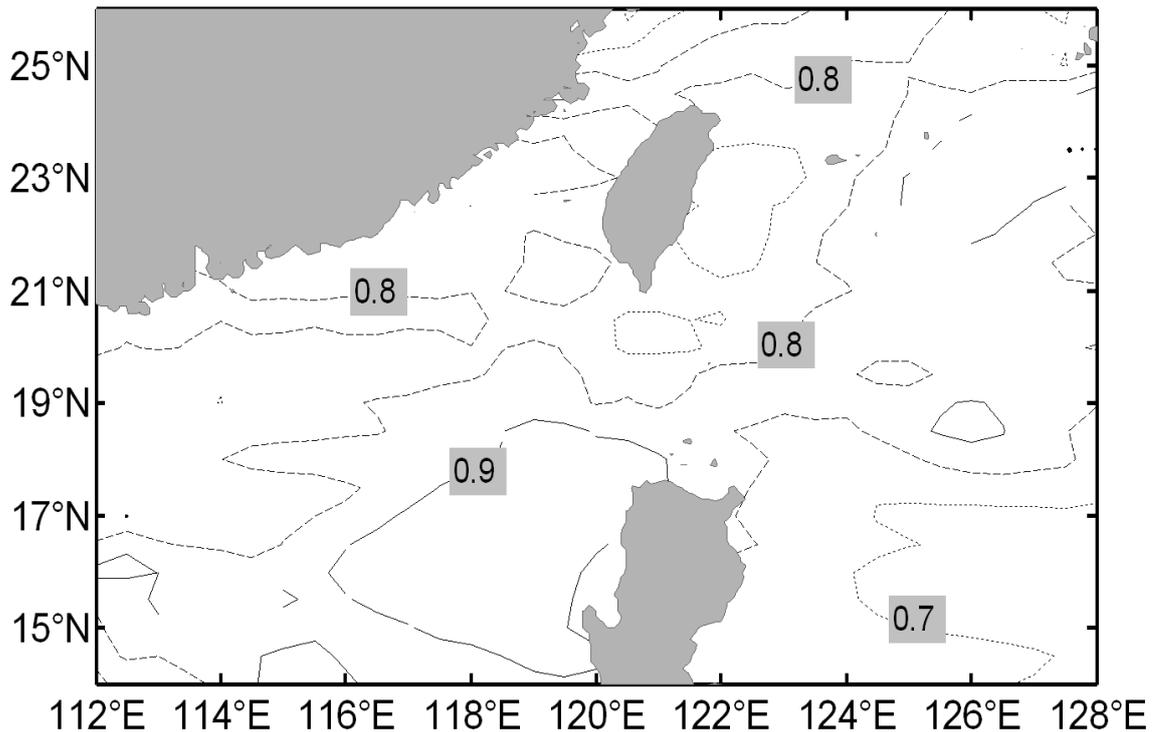
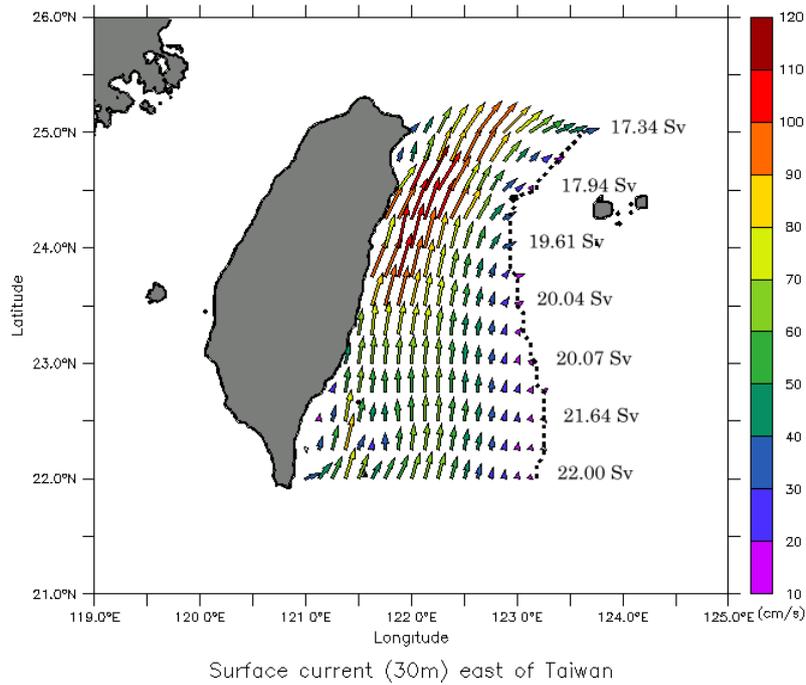
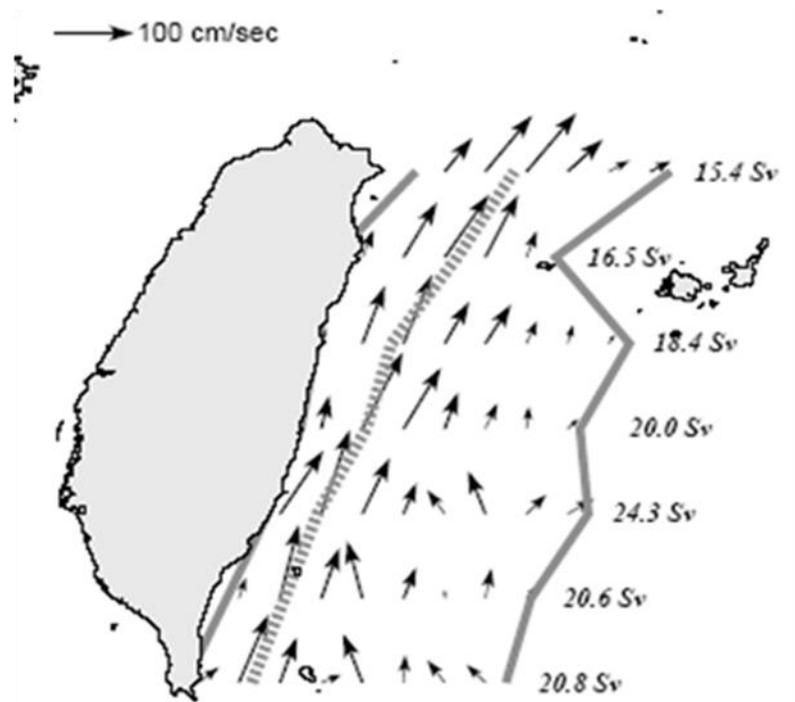


圖 7-5 數值模式與人造衛星的 SST 相關係數

另外，我們也比較了東部海域的海流流況（數值模式要能夠模擬出正確的 SST，才有可能模擬出正確的海流），圖 7-6 是東部海域黑潮的時空分布、路徑變化與流量，我們的模擬重現了黑潮的流場型態，不管是流速、流幅、主軸位置、垂直流場分布等都跟有限的觀測相當一致，此模式模擬之 0~300 m 流量值不管在趨勢或是量值上均與 Liang et al. (2003) 由船碇式都卜勒流剖儀所得之結果一致 (Hsin et al., 2008)。



(a)



Sb-ADCP survey (1991-2000),
Liang et al.(2003), DSR II

(b)

圖 7-6 (a)模式模擬之海流 (0~300m) 分布圖 Liang et al. (2003)由船

碇式都卜勒流剖儀所得之結果(b)

以 POM 模式 1982-2008 年 27 年之計算成果作為分析資料，每年輸出 1 個 Mean SST 網格檔，網格解析度 $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ，如圖 7-7。

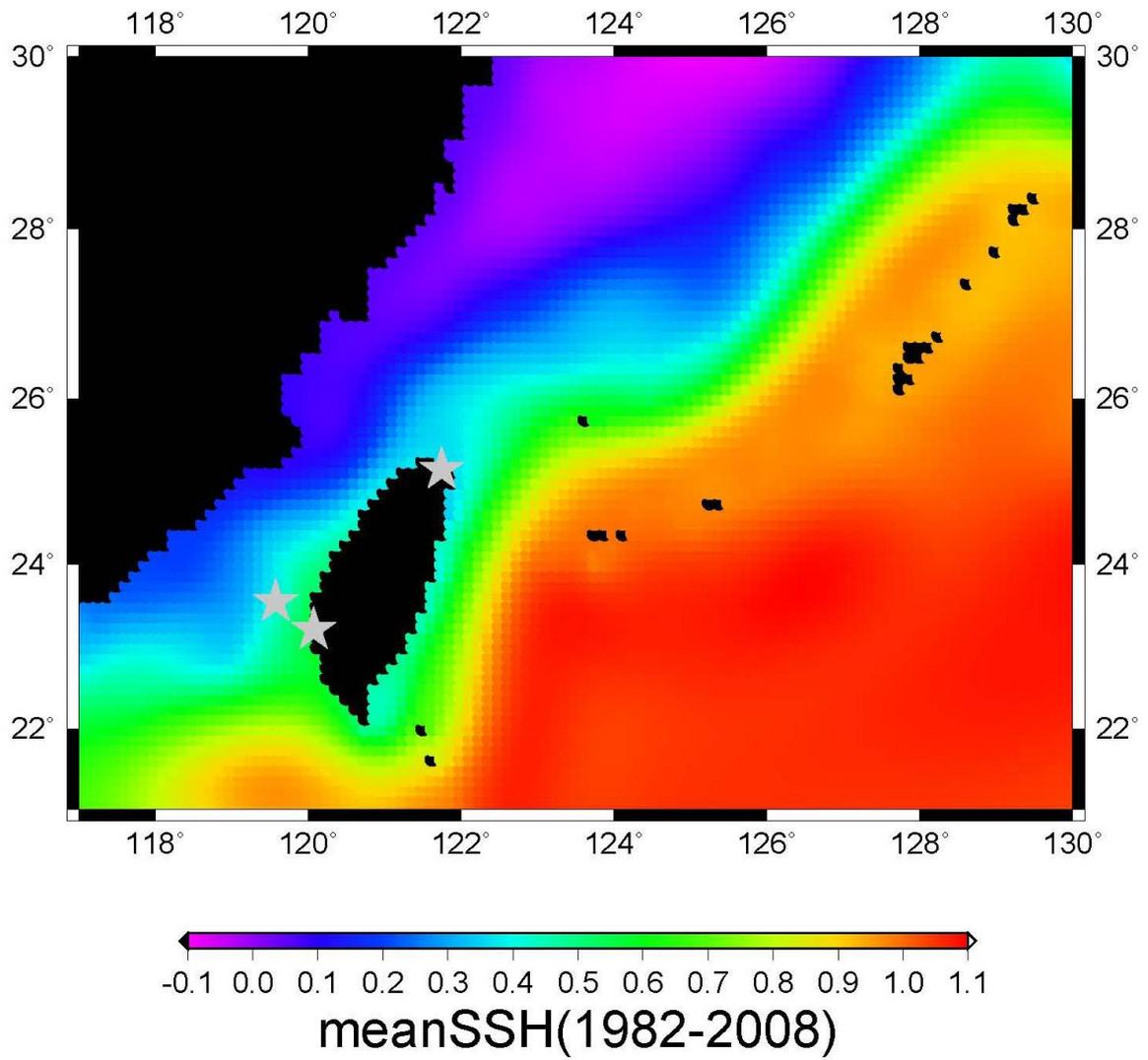


圖 7-7 POM 模式海面地形

7-4-3 海洋法成果比較

表 7-9 DUPOM 10 年 Mean SST 網格資料 (單位: cm)

	10 年平均 值 (cm)	標準 差 (cm)	Mean SST 之 差值 以基隆為準 (cm)	標準 差 (cm)
TG01-A(基隆)	-34.71	19.18	0	
PF01(澎湖)	-24.23	14.42	10.47	24.00
TG32(將軍)	-11.45	19.08	23.26	27.05

表 7-10 POM 24 年 Mean SST 網格資料 (單位: cm)

	24 年平均 值 (cm)	標準 差 (cm)	Mean SST 之 差值 以基隆為準 (cm)	標準 差 (cm)
TG01-A(基隆)	36.59	6.00	0	
PF01(澎湖)	41.25	7.48	4.66	7.93
TG32(將軍)	55.24	5.08	18.65	18.86

由 DUPOM 10 年及 POM 24 年 Mean SST 網格資料的成果來看，兩者海洋法的成果皆有相同趨勢，且澎湖與將軍兩站的 Δ SST 結果非常接近，分別為 12.78 cm(=-11.45-(-24.23))與 13.99 cm(=55.24-41.25)。

特別要說明的是，海洋法所計算之標準差並不具有精度的意義，因為潮汐本來就有隨著時間變化的趨勢(天文潮及各種分潮)，並不是每一年的潮汐平均值都在同一個平面上，因此海洋法所計算之標準差僅代表這段期間內各時段潮汐對於平均值擺動的程度有多大而已。

7-5 大地法與海洋法之結果比較

以上各節所述之大地法及海洋法產生結果有相當大的差異，海洋法(DUPOM 及 POM)顯示澎湖的 SST 值比基隆高約 4-10 公分(表 7-9 及 7-10)，而大地法的結果為 56.8 公分(表 7-7)，兩者的差異可能原因為：

1. 海洋法在近岸的精度及解析度較差，尤其澎湖處於台灣海峽中間且四周分佈許多小島及暗礁，DUPOM 及 POM 模式在此處之解算成果有可能較差。
2. 就大地法而言，其結果受到 GPS、大地起伏精度及澎湖、基隆之平均海水面定義所影響。本研究之 GPS 測高精度優於 1 公分，大地起伏精度在基隆及澎湖附近約數公分，因此，若大地法所求之 SST 值(56.8 公分)含有較大之不確定性(相對於海洋法 4-10 公分)，則其主要起源應是平均海水面定義所引起。由表 3-4 得知，2007 年之澎湖年平均讀數(88cm)與 1992 年之值(62cm)之差異為 26cm，相對而言，基隆及將軍之年均海水面之各年差異均少於 10cm，因此澎湖之平均海水位之定義(由當時之潮位資料及計算法而定)可能有誤差，此誤差將貢獻一部分之 SST 誤差。

第八章 結論與建議

8-1 結論

本計畫已完成合約交付之所有事項，以下為各項成果整理。

(1) 潮位資料蒐集與平均海水面分析

『基隆潮位站於 1998 年、1999 年及 2005 年實測潮位數目最少(約半年觀測資料)，故其平均海水面於此時間段內呈現偏低或偏高之不穩定現象，1991~2007 年間，各年年平均海水面於 99.7cm 上下波動。澎湖潮位站從 1991-2007 年都設置於同一地點(測站代碼 135)，1991 年因潮位資料約 3000 筆左右，故無法合理解算平均海水面，年平均海水面之變化範圍從 61cm 至 89cm，其中 2006 年最高(88.65cm)，1993 年最低(61.97cm)，各年年平均海水面於 75.32cm 上下波動。將軍潮位站，2002 年因潮位資料約 1000 筆左右，故無法合理解算平均海水面，年平均海水面之變化範圍從 22cm 至 36cm，其中 2006 年最高(35.84cm)，1993 年最低(22.79cm)，各年年平均海水面於 28.86cm 上下波動』。

(2) 重力資料蒐集

蒐集台灣已有的陸測重力、船測重力空載及衛星測高重力資料，考慮各項資料之範圍及精度，對其各項做一篩選處理並決定是否加入大地起伏計算。整合一資料庫，結合台灣所有重力資料，包括不同高度的空載重力資料以供使用。澎湖近岸的船測重力已按照合約規定完

成，利用交叉點平差分析，精度在平差處理之前為 2.51mgal，平差處理過後可達 0.88mgal。

(3) 大地起伏模式

本團隊利用現有的重力資料計算大地起伏網格，空載重力的向下延續方法改進後其資料也成功用來加入大地起伏計算。由於台灣有許多的重力資料，需考慮不同空間解析度造成精度的影響給定不同權值，利用最小二乘配置法計算。本計畫所計算出的大地起伏模式在將軍附近之精度為 1.46 公分(表 7-6)，於全島其精度優於 10 公分(表 6-3)。

(4) 大地測量法

由基隆推算之澎湖-基隆(本島)之高程基準差異分別為 $56.8 \pm 2.1\text{cm}$ ，此值可由將軍推算之高程基準差異($58.3 \pm 2.1\text{cm}$)佐證。大地法結果與期中報告相差約 8 公分，其主要原因推估為加入了近岸船測重力的資料，造成大地起伏模式的差異，其中船測重力的精度達相當水準，故此結果十分可信。

(5) 海洋法

由 DUPOM 及 POM 模型推得澎湖-基隆之高程基準差異分別為 10.47cm 及 4.66cm。就大地法結果分析，由於 GPS 測量及大地起伏模式均有公分級之精度，且由基隆及將軍連測站推求之澎湖-基隆之

高程基準差異非常接近(約 56 公分),可見大地法結果之可靠程度;然而海洋法產生之高程基準差異約為 10 公分,兩種方法所求之值達 40 餘公分之差異,此差異初步推斷是當初定義澎湖高程基準即當地平均海水面的過程有瑕疵,有可能是利用不足時間的潮位資料推求之平均海面產生的偏差值,抑或當中潮位資料存在誤差或潮位儀基準變動,潮位資料的誤差來源極有可能為儀器損壞或是位置變動,亦有可能是儀器的更換,這些需各潮位站的負責單位詳加記錄並公布才有辦法知道,若當初並無紀錄其變動值,只能有待做潮位的率定觀測,找出各潮位站潮位資料的基準值跟平均海水面的差異,若未來有後續計畫,本團隊可提供資料及協助驗證其值。

8-2 建議

(1) 潮位資料及平均海面

建議貴單位能協助訂立規範,要求各潮位站換站及基準點更動應詳實記錄並公布。對於日後做連測工作或是各項科學研究皆有很大助益。並建議可計畫每年在各潮位站做一潮位率定的測量工作,並做 GPS 觀測,監測各潮位站是否有變動的情形。

(2) 重力資料蒐集及大地起伏

目前台灣的重力資料可算是相當密集,並有各種不同解析度及不同蒐集方式,如何組合這些資料已是一個廣泛被研究的課題,本團隊

目前利用不同的觀測精度給定不同權值，再帶入最小二乘配置的計算，另外世界上亦有其他不同方法，例如在頻率域或是利用小波在不同的定義域做結合。此外，世界上大地起伏的計算方式亦不斷更新及發表，台灣的大地起伏求定仍可有不進進步的空間。

(3) 高程連測

由於水準資料及超過 48 小時的 GPS 觀測已可達到相當精度，連測的最大誤差來源乃是大地起伏模型所提供的，目前本島的大地起伏精度可由 38 個檢核點評估，但離島的大地起伏精度則很難掌控，建議貴單位在未來能計畫在各離島點實施高精度的 GPS 觀測，以估算離島的大地起伏精度，亦能評估近岸船載測量的貢獻程度。

參考文獻

- 中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/V4/index.htm>。
- 內政部，離島潮位站資料蒐集及分析工作總報告書，2003。
- 內政部國土測繪中心，台灣本島與離島高程連測計畫 95 年度連測作業期末報告，2006。
- 胡明城、魯福，現代大地測量學，測繪出版社，北京，1994。
- 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，台灣重力網平差及重力資料整合，測量工程，第 40 卷，第 3 期，P.71-82，1998。
- 黃金維，一等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，台灣地區大地起伏模式精度評估報告書，內政部，2003。
- 莫志明、王建華、羅志才、郭志和、徐菊生、卓力格圖，中國大陸和香港高程基準面重力位差的測定，大地測量與地球動力學，第 24 卷，第 1 期，P.36-40，中國國家地震局，武漢，2004。
- 管津霖、管錚、翟國君，海面地形與高程基準，P.148，測繪出版社，北京，1996。
- 劉文俊、吳文耀，台灣海域潮汐特性之初步分析，P.104，交通部中央氣象局，1996。
- 劉祐廷，使用波形重定提升 Geosat/GM 測高精度與重力異常：以台灣近海為例，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2005。
- 聯勤測量署，大地測量手冊，P.177，1978。
- Arabelos, D., and C.C. Tscherning, Improvements in height datum transfer expected from the GOCE mission, J Geod, 75, 308-312, 2001.

- Burša M., S. Kenyon, J. Kouba, Z. Šíma, V. Vátrt, V.E. Vitek, and M. Vojtíšková, The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system, *J Geod*, 81,103-110, 2007.
- Dietrich, D.E. and D-S. Ko, A Semi-Collocated Ocean Model Based on the SOMS Approach. *International J. Num. Methods in Fluids*, 19, 1103-1113, 1994.
- Doodson, A.T., The Harmonic Development of The Tide Generating Potential, *Proc. Roy. Soc. A*, 100, 1921.
- Ekman, M., and J. Mäkinen, Mean sea surface topography in the BalticSea and its transition area to the North Sea: A geodetic solution and comparisons with oceanographic models, *J. Geophys. Res.*, 101, pp.11993-11999, 1996.
- Featherstone, W.E., Towards the unification of the Australian height datum between mainland and Tasmania using GPS and AUSGeoid98, *GEom Res Australia*, 3305, 2000.
- Foreman, M.G.G., Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction, Pacific Marine Science Report, 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 1977.
- GAMBLE, Sea surface heights error budgets and recommendations for future mission, Volume 1 - Basic procedures, EVRI-CT-2001-20009, 2003.
- Gill, S. K., and J. R. Schultz, Tidal Datums and Their Applications, NOAA, 2001.
- Godin, G., The Analysis of Tides, University of Toronto, 1972.
- Harlan, R., Eötvös corrections for airborne gravimetry, *Journal of geophysical Research*, vol. 73, pp. 4675-4679, 1968.
- Godin, G., The Analysis of Tides, University of Toronto, 1972.
- Heck, B., and R. Rummel, Strategies for solving the vertical datum problem. In H Sunkel and T. Baker (eds.), *Sea Surface*

- Topography and the Geoid, IAG Symposium No. 104, pp. 116-128, Springer, Berlin, 1990.
- Hsin, Y.C., C.R. Wu, and P.T. Shaw, Spatial and Temporal Variations of the Kuroshio East of Taiwan, 1982-2005: A numerical study, *Journal of Geophysical Research*, 113, C04002, 2008.
- Hsu, S.K., C.S. Liu, C.T. Shyu, S.Y. Liu, J.C. 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., Y.S. Hsiao, H.C. Shin, M. Yang, K.H. Chen, R. Forsberg, and A. V. Olsesen, Geodetic and geophysical results from a Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment, *J. Geophys. Res.*, 112, DOI:10.1029/2005JB004220, 2007.
- Ihde J., and L. Sanchez, A unified global height reference system as a basis for IGGOS, *J Geodynamics*, 40, 400-413, 2005.
- Jan, S., D.E. Dietrich, Y.H. Tseng, and Y. Yang, Development of a Low-dissipation, High-computational-efficiency Duo Grid Pacific Ocean Model (DUPOM), *Eos Trans. AGU*, 87(36), *Ocean Sci. Meet. Suppl.*, Abstract OS46F-15, 2005.
- Jekeli, C., Heights, the geopotential and vertical datum, Rep 459, Dept of Geod Sci and survey, The Ohio State University, Columbus, 2001.
- Lehmann, R., Altimetry±gravimetry problems with free vertical datum, *J Geod*, vol. 74, 327-334, 2000.
- Liang, W.D., T.Y. Tang, Y.J. Yang, M.T. Ko, and W.S. Chuang, Upper-ocean currents around Taiwan, *Deep-Sea Res.*, Part II, 50, 1085 – 1105, 2003.
- Mellor, G.L., User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, 53 pp., Program in Atmos.

- and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton NJ, 2004.
- NOAA, Tidal Datums and Their Applications, NOS CO-OPS1, Silver Spring, Maryland, 2000.
- Patchen R., Personal Communication, 2006.
- Pope, A.J., The statistics of residuals and detection of outliers, Tech. Rep. NOS65 NGS1, Rockville, 1976.
- Pan, M., and L.E. Sjöberg, Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models with application to Fennoscandia, *J Geod*, 72, 64-70, 1998.
- Rapp R.H., and N. Balasubramania., A Conceptual Formulation Of a World Height System, Report No. 421, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, 1992.
- Torge, W., Geodesy, Walter de Gruyter, Berlin, 2001.
- Tscherning, C.C., and R.H. Rapp, 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, The Ohio State University, Columbus, 1974.
- Wu, C.R., and Y.C. Hsin, Volume transport through the Taiwan Strait : a numerical study, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(2), 377-391, 2005.
- Wu, C.R., H.F. Lu, and S.Y. Chao, A numerical study on the formation of upwelling off northeast Taiwan, *Journal of Geophysical Research*, 113, C08025, 2008.

附錄一、重力觀測紀錄表

澎湖

日期		DG	ST	右	左	水位
7月3日		2552.5	2552.5	181	187	291
7月4日		2556.5	2556.5	188	182	194
7月5日		2552.7	2553	188	182	300
7月7日		2552.6	2552.5	182	186	290
7月9日		2552.4	2552.2	186	190	219
7月10日	出港	2552.2	2552.6	187	188	326
7月11日	進港	2553.8	2553.7	189	190	370
7月12日	出港	2551.1	2551	187	187	132
7月13日						
7月14日	進港	2553.1	2552.8	198	191	155
7月15日	出港	2553.4	2553.5	180	187	275
7月15日	進港	2554	2553.9	180	187	296
7月16日	出港	2553.9	2554.1	181	188	287
7月17日	進港	2554.8	2554.7	183	190	173
7月18日						
7月19日	出港	2554.7	2554.7	182	192	261
7月20日	進港	2555.4	2555.4	192	192	165

(※註：DG 為重力值，ST 為彈簧張力。)

附錄二、儀器校正報告

國家度量衡標準實驗室	
報告編號:	B960989
報告日期:	96.11.05

<h1>校正報告</h1>	
TAF Calibration Laboratories Taiwan	

報告日期: 96 年 11 月 05 日
報告編號: B960989

儀器名稱: 雷射定位儀
廠牌型號: Tremble / 5700
儀器字號: 0220338615
送校單位: 國立交通大學土木工程系

以上儀器經本實驗室校正, 結果如內文。
本報告含封套/裡紙及 4 頁內文, 分離使用無效。



中華民國
國家度量衡
標準實驗室
校正專用



段家瑞
國家度量衡標準實驗室主任

國家度量衡標準實驗室
經濟部標準檢驗局委託財團法人工業技術研究院辦理

E60-P-01-18 1/2

校正報告

TAF

Calibration Laboratory
Taipei, Taiwan

報告日期: 96年11月05日

報告號碼: B960990

儀器名稱: 衛星定位儀
 品牌型號: Trimble / 5700
 儀器序號: 0220345790
 送檢單位: 國立交通大學土木工程學系

以上儀器經本實驗室校正, 結果如內文。
 本報告合封內附表 4 頁內文, 分送使用單位。



段家瑞
 國家度量衡標準實驗室主任

國家度量衡標準實驗室

經濟部標準檢驗局委託財團法人工業技術研究院辦理

校正報告 TAF

Calibration Laboratory
NMB

報告日期：96年11月05日

證照編號：B960991

儀器名稱：衛星定位儀	
廠牌型號：Trimble	/ 5700
儀器字號：0220338818	
送檢單位：國立交通大學土木工程學系	

1. 如儀器經本實驗室校正，結果如內文。
2. 本報告合用存根及 4 頁內文，分發說明無效。



段家瑞
國家度量衡標準實驗室主任

國家度量衡標準實驗室
經濟部標準檢驗局委託財團法人工業技術研究院辦理

校正報告 TAF

Calibration Laboratory
No.481

報告日期：96年11月05日

報告編號：B960988

儀器名稱：衛星定位儀	
廠牌型號：Trimble	/ 5700
儀器序號：0220316030	
送校單位：國立交通大學土木工程學系	

以上儀器經本實驗室校正，結果如內文。
本報告含封套裡及 4 頁內文，分發使用無效



段家瑞
國家度量衡標準實驗室主任

國家度量衡標準實驗室
經濟部標準檢驗局委託財團法人工業技術研究院辦理

附錄三、GPS 計算參數及偏心點水準測量數據

參數	檔案	說明
General constants	CONST.	用於計算物理與天文參數
Satellite information	SATELLIT.	AIUB 提供之最新 GNSS 衛星資訊
Satellite problems	SAT_2008.CRX	標示不正常或排除之衛星訊息
Receiver information	RECEIVER.	用於差分定位(P1-P2 or P1-C1)的接收儀資訊
Phase center offsets	PHAS.01	IGS (and EUREF)天線相位中心改正參數
GPS-UTC seconds	GPSUTC.	時間參數
Precise ephemeris	igs14982.sp3	使用於計算之精密星歷
Pole file	C04_2008.ERP	軌道參數
Subdaily pole model	IERS2000	半日潮資訊
Nutation model	IAU2000	章動模式
Reference system	J2000	參考標準曆元
Planetary ephemeris file	DE200	行星星曆
Coeff. of Earth potential	JGM3	地位係數
Ocean tides file	OT_CSRC	海潮係數
Troposphere	HOPFIELD	對流層改正模式

基隆 GPS 於 TG01A 臨時點觀測，水準測量由 TG01 水準點測至 TG01A 臨時點。

TG01A				
儀器高：1.620				
後視：TG01 前視：TG01A				
	尺上讀數		高程差	
	前視	後視	+	-
TG01		1.945	0.508	
T3	1.437	1.289		0.015
T2	1.304	1.351		0.001
T1	1.352	1.682	0.368	
TG01A	1.000		0.876	0.016
			0.860	
TG01A		1.225		0.370
T1	1.595	1.391	0.007	
T2	1.384	1.284	0.013	
T3	1.271	1.436		0.509
TG01	1.945		0.020	0.879
				-0.859
TG01		1.893	0.508	
T3	1.385	1.266		0.015
T2	1.281	1.330		0.004
T1	1.334	1.614	0.370	
TG01A	1.244		0.878	0.019
			0.859	
TG01A		1.267		0.368
T1	1.635	1.306	0.020	
T2	1.304	1.295	0.018	
T3	1.277	1.404		0.508
TG01	1.912		0.020	0.876
				-0.856
			0.859	

澎湖於 PF01A 臨時點上觀測，水準測量由 PF01 水準點測至 PF01A 臨時點。

PF01A				
儀器高：1.590				
後視：PF01 前視：PF01A				
	尺上讀數		高程差	
	前視	後視	+	-
1	1.592	1.661	0.069	
1'	1.660	1.591		0.069
2	1.592	1.661	0.069	
2'	1.660	1.593		0.067
3	1.565	1.631	0.066	
3'	1.633	1.565		0.068
4	1.564	1.630	0.066	
4'	1.634	1.565		0.069
			0.068	

附錄四、審查意見辦理情形

審查委員	審查意見	修正辦理情形
張 委 員 嘉 強	1. 本案合約所列之工作項目、執行期程及時程延誤之說明等，建議增列敘述於第 1 章中。	新增 1-4 實際作業進度文字敘述及圖 1-1。
	2. 有關合約工作項目二(三)，表 3-4 所呈現之澎湖潮位站平均海水面資料異常特性，請增列可能原因。	已於 3-3 P.45 最後一段增列可能原因
	3. 有關合約工作項目四計算澎湖潮位站水準點 TWVD2001 高程，P117 表 7-7 與表 7-8 之成果應據以呈現相關 TWVD2001 高程。	推估澎湖與本島平均海水面地形差異結果呈現於表 7-7 及表 7-8。並補充文字說明於 P.117、118。
	4. 本案依合約規定所發表之論文，請於期末報告修本版增列於附錄中。	已將發表論文： 第二十九屆測量及空間資訊研討會 題目：GPS 船載海水面高測量 增列至附錄四。
	5. P129 第八章結論，請補充臺灣本島與離島高程系統日後進行連測統合之整體規劃等建議。	已將第八章結論列於 8-1，增加建議於 8-2。
侯 委 員 進 雄	1. 本案按其工作項目，建議報告撰寫將資料蒐集整理與實際操作執行兩項分別多予著墨。	資料之蒐集及整理在各章皆有著墨，對於船載重力測量部分亦有詳加交代。另外本團隊按照合約規定有提供教育訓練，詳細報告各項資料蒐集及整理情形，並對於各項計算工作（大地起伏及船測重力化算）提供所有計算程式，且有實際操作及教學。此外，本團隊會將整個三年度的計畫做一總報告書整理，將會著重在各項資料的蒐集以及實際的操作處理。

	<p>2.建議報告中加強描述執行此計畫的目的及有無對未來測量工作時具體之助益。</p>	<p>已在第一章中交代此計畫目的，並提出此項工作在世界各國皆是一個待克服之問題，除了大地測量之範疇，統一的高程基準在工程及製圖上也是必須的。此外，本項研究工作亦是高程現代化的基礎，吾人期許台灣在未來幾年內便能開始推動並執行高程現代化，與世界接軌。P12. 1-2 文獻回顧第一段修改如下： 有很多方法可以求定定義的基準差異的情形，如同我們所知，高程基準需建立在一等位面上，因此利用重力資料推求等位面乃是其基本精神，在此精神下，許多國家用了不同方法...</p>
	<p>3.P43 倒數第 2 行潮位資料約 3000 筆，無法合理解算平均海水面及 P46 第 2 行潮位資料約 1000 筆，無法合理解算平均海水面，為何無法合理解算平均海水面?請略加解釋。</p>	<p>已於 3-3 P.46 中最後一段加入說明。</p>
	<p>4.P105 GPS 計算以金門(KMNM)為固定站，惟表 7-2 中 KMNM 之橢球高為不同值，其原因為何?請說明。</p>	<p>本研究在 P113 所述之 GPS 計算確實是以金門 (KMNM)為固定站，原表 7-2 為舊資料，已修訂之。</p>
	<p>5.P131 倒數第 2 行「當中潮位資料存在誤差或潮位儀基準變動，建議有關單位釐清」，是否當初的潮位估算時錯誤，而這錯誤無法釐清，請略加敘述真正可能的原因。</p>	<p>已於 8-1(5)加入敘述說明</p>
<p>饒</p>	<p>1.基隆、澎湖及將軍三站潮位計年平均讀數變動大於 10cm，是否合理，此現象對高程基準的誤差如何估計?三站的逐年變化不一致，資料是否可靠?</p>	<p>請參閱劉啟清委員所提意見 2，劉委員已說明此變動之合理性。另已於 3-3 P.46 中最後一段加入說</p>

委員 瑞 鈞	此變化有何涵義？請加以說明。	明。
	2.在重力測量方面，不同時段、不同單位測量之鄰近點位(例如中央山脈中北段)重力測量值之比較結果為何？中央山脈中北段之高 Bouguer 值可靠度為何？	圖 6-3 布格重力異常網格模型已改正，成果與國家海洋科學研究中心成果圖趨勢相近。 不同時間所、不同儀器所測量出的重力值的確有可能會有差異，當中甚至也存在著人為誤差，但利用 collocation 計算大地起伏時，會將這些誤差考慮在內，並在利用 RCR 方法時也考慮了長波長的參考場的誤差，故這些不同時間段的重力測量差值的影響可忽略。
	3.參考文獻格式有些不一致，部分參考文獻重複，請予以修正。	參考文獻已重新檢查修正。
	4.是否可提供 1991 年~2007 年或 2009 年各站潮位資料之連續紀錄時間序列，替代年平均。	根據合約，本團隊須於報告中提供潮位年平均值。另三站之時序圖已加入為圖 3-3。
王 委 員 成 機	1.第 8 章結論中，可否增加建議一節，對於本案未來應如何做，加以敘述。	已將第八章結論列於 8-1，增加建議於 8-2。
	2.P128，大地法之結果為 50cm，而表 7-7、7-8 為 56.8cm 或 58.3cm，其數字的呈現不一致。	P128 修正為 56.8cm。
	3.P117 倒數第 2 行 可看到…平均海水面差異 55.1cm，與 P110 表 7-7，56.8cm 不一致。	P117 修正為 56.8cm。
	4.P114 段落排版方式不易閱讀，此節請重新分段編排。	P114 已重新排版。
	5.P47 圖 3-2 之單位是否有誤，請檢核。	經本團隊再次檢核，其所標示之單位為正確標示(因周期 8.85 年及 18.6 年之平衡潮，其振幅非常小)。

劉 委 員 啟 清	<p>1. DUPOM 法與 POM 法二者所算出來的 ΔSST 在澎湖與將軍兩站的差異都是 12.78cm(-11.45-(-24.23))與 13.99cm(55.24-41.25)非常的接近，因此表示海洋法在台灣海峽與較遠的外海，在參考上可能有模型上的困難，但在較近的站反而相當的好。故海洋法澎湖與將軍間的差異，值得參考。</p>	感謝委員寶貴意見，並將委員此意見補充於 P.127。
	<p>2. 有關澎湖計算平均海水面因潮位資料欠缺的問題，請參考本人在去年為中心所計算台灣各主要潮位站的平均海水面資料，若參考基隆與高雄潮位站的月平均、年平均、18.6 年平均，可有下列的結論：</p> <p style="padding-left: 40px;">月平均：在一年中的變化約 15~20cm，在 1950~2008 年的變化 40~50cm。</p> <p style="padding-left: 40px;">年平均：約在 20~25cm，基隆高雄有相同趨勢。</p> <p style="padding-left: 40px;">18.6 年平均小於 10cm，若去掉長期趨勢，則約 5cm，而在富岡、蘇澳開放海岸，則 18.6 年平均都小於 5cm。</p> <p>因此，建議可用同時期的年平均或月平均來比較可能可以得到較正確的結果。</p>	感謝委員寶貴意見。
曾 課 長 耀 賢	<p>1. 第 8 章結論(4)大地測量法成果，建議以由基隆推算之澎湖-基隆之高程基準差異 56.8cm 為其成果，由將軍推算之高程基準差異則可作為佐證資料。</p>	<p>第 8 章結論(4)大地測量法成果敘述改為：由基隆推算之澎湖-基隆(本島)之高程基準差異分別為 56.8±2.1cm，此值可由將軍推算之高程基準差異(58.3±2.1cm)佐證。</p>
	<p>2. 大地法與海洋法之 ΔSST 有明顯差異(約 30 幾公分)，推論澎湖之 LMSL 可能需查明，前提是海洋法可靠可信，這點建議應有更多論述與可靠資料佐證支撐。</p>	<p>已補充劉啟清委員之意見一於 P.126，已說明海洋法成果有參考價值。海洋法精度雖然沒有大地法來得精確，各項參數的給定、不同時間段的資料甚至求解方法的差異都會</p>

		<p>影響其結果，不過其精神在給定一個可供參考的趨勢，而結果顯示此值與大地法的結果相差甚多，故本團隊仍建議澎湖之當地平均海面(LMSL)有待查明。</p> <p>並於 7-4 P.119 做文字及參考文獻補充。</p> <p>其餘相關論述在 7-4-1 與 7-4-2 皆有說明，P.123 列出參考文獻並指出在台灣東部海洋法與衛星測高之結果相關係數亦達 0.7 以上。</p>
	<p>3.本案增測了大量海上重力，應對大地起伏模式有貢獻，除在第 8 章(4)敘述大地法結果與期中報告相差約 8cm，其主要原因為加入近岸船測重力的資料，是否尚有其他方法及數據加以印證及論述。</p>	<p>因為目前大地起伏的精度只能利用台灣本島的檢核點評估，而本案的海面重力對於本島上的大地起伏影響有限，如同吾人所建議的，未來希望有關單位能進行各離島水準點的 GPS 測量，俾以評估大地起伏在離島的精度，如此亦能顯著看出本案的近岸船測重力所帶來的貢獻。</p>
<p>劉 召 集 人 正 倫</p>	<p>1.P55 委託台大所辦理的船測，由於精度不佳，並未加入大地起伏計算中，而 96 年度連測作業與本案文字敘述相同，但船測作業區域不同，敘述是否應修正？</p>	<p>已修正文字敘述，且本案 95 及 96 年度的船測作業區域也與此組資料涵蓋之範圍重疊，故此組資料並未加入大地起伏的計算中。</p>
	<p>2.P60 所述 NGDC 資料，是否有採用此資料，建議加以敘述。</p>	<p>於 4-4 最後一行加以敘述。</p>
	<p>3.P104 表 6-3 最新大地起伏精度分析，如東部的標準差，95 年為 0.057m 而 97 年為 0.079m，可否說明此數據變大的差異。</p>	<p>97 年的大地起伏計算加入了內政部最新公佈的 4000 多點的重力值(中興測量實施)，而標準差變大的原因很多，有可能是新加入的重力資料存在誤差，或</p>

		是大地起伏算法上的差異產生影響，亦或是各項重力資料的結合方式不甚完美，故大地起伏計算一直是仍可待研究的課題，本團隊也會在計算方法上更做精進，本案雖然已經完結，但不代表所有的工作就這樣結束。高程基準的連結一直會是一個可待精進的研究課題。
業 務 單 位 初 審 意 見	1. P3 請補充目錄 7-2 計算成果… 105、7-3…109 及 7-4…111	已修正。
	2. P5 及 P46 圖 3-2、P5 及 P51 圖 4-1 請將最後句點刪除	已修正。
	3. P7 圖 6-2 請修正為：大地起伏檢核 路線分佈圖(圖中圓形、星形、三角 形、方形黑點分別代表北、中、南、 東檢測路線，底圖代表地形)	已修正。
	4. P10 請補充表目錄表 7-9…119 及 7-10…119	已修正。
	5. P15 第 7 行「為」重複贅字，「他」 改為中國大陸	已修正，文字稍作修飾。
	6. P20 第 4 行請改為未來的大地起伏 精度可望「再」更上層樓	已修正。
	7. P20 第 7 行令人滿意的水準，何謂 令人滿意的水準，請作文字修正	P20 以美國 USGG2003 至 USGG2009 提升之精度為 參考，並增加文字敘述。
	8. P43 3-3 請修正為平均海「水」面， 並請針對本報告所有相關文字，修正 為…海「水」面	已修正平均海水面，海面 地形等則維持原文字。
	9. P55 4-2 標題請增加為船載重力「資 料」，4-3 標題增加為空載重力「資 料」，4-4 標題增加為 NGDC 船測重力 「資料」	已修正。
	10. P71 倒數第 5 行「所將運用之」是 否刪除，或者有較好的文字敘述	已刪除。
	11. P77 第 7 行「步驟對應…依序為：」	已修正。

	請靠左縮排	
	12. P95 圖 5-17 與 96 年度連測作業之圖相同，請更換辦理 97 年度連測作業時之 Bar Check 檢核情形之照片	已修正。
	13. P114 倒數第 2 行所述大地坐標，請於適當處列出大地坐標值	本文已在修訂表 7-4 時，加入各點之大地座標值。
	14. P128 倒數第 2 及 3 行，請補充為約 4-10 公分(表 7-9 及 7-10)及約 50 公分(表 7-7 及 7-8)	已修正。
	15. P137 附錄一表格內「DG」及「ST」代表意思為何?請予以加註。	已加註，DG 為重力值，ST 為彈簧張力值。

附錄五、發表論文文稿

第二十九屆測量及空間資訊研討會

題目：GPS 船載海水面高測量

作者：陳逸如 陳國華 黃啟訓 黃金維

Topic: Sea surface heights around Taiwan from shipborne GPS
measurements

Authors: Yi-Ju Chen, Kwo-Hwa Chen, Chi-Hsun Huang, Cheinway Hwang

GPS船載海水面高測量

Sea surface heights around Taiwan from shipborne GPS measurements

陳逸如¹ 陳國華² 黃啟訓³ 黃金維⁴

Yi-Ju Chen, Kwo-Hwa Chen, Chi-Hsun Huang, Cheinway Hwang

摘要

本研究嘗試應用精密單點定位(precise point positioning, PPP)技術於船載測高動態定位作業，與動態差分定位(Kinematic relative positioning, KRP)成果比較。以(1)靜態站定位測試、(2)海水面高交叉點差異值分析 (3) SSH 與 DNSC08 海水面高程值差異值，共三種方法進行 PPP 及 KRP 定位方法精度評估。研究以 2007 年五月至八月台灣鄰近海域船載重力測量作業蒐集的 GPS 相位觀測資料(取樣間隔為 1 秒)為數據。研究工具於 PPP 部分，使用 Bernese 5.0 及 GRAFNAV GPS 後處理軟體；於 KRP 部分，使用 Bernese 5.0、GRAFNAV、以及 MIT 研發之 GAMIT 動態定位模組 TRACK。本文亦探討 PPP 與 KRP 在船載測高技術的限制及發展潛力。

關鍵詞：船載測高、精密單點定位、海面高

Abstract

In this study, such ship-based SSHs are made possible using the 1-Hz GPS data collected in the campaigns of shipborne gravity from May to August, 2007. Precise point positioning (PPP), which uses zero differenced phase observables, is experimented for GPS positioning to determine SSHs, and its performance is compared with that of kinematic relative positioning (KRP). The computer packages Bernese and GRAFNAV are used for PPP, while Bernese, GRAFNAV, and TRACK are used for KRP. The accuracy of such GPS-derived SSHs is assessed by (1) static tests, (2) crossover difference analysis, (3) comparison with DNSC08 model. This paper will also present the limitation and the potential of ship-based altimetry.

Keyword: Ship-based Altimetry, Precise Point Positioning, Sea Surface Heights (SSHs)

1 國立交通大學土木工程學系 碩士生

2 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系 副教授

3 國立交通大學土木工程學系 博士生

4 國立交通大學土木工程學系 教授

一、前言

精密單點定位(precise point positioning, PPP)技術由蒐集高精度軌道及時錶資訊進行動態定位解算，具可獨立彈性作業、不受基線長度影響、不需基準站資料等優點。船載測高無近岸雷達波波形不佳之問題，為一近岸海面高(sea surface heights, SSH)測量以及海洋重力測量之潛力技術。本研究以台灣鄰近海域船載重力測量作業蒐集的GPS觀測資料(取樣間隔為1 秒)為實驗數據，以精密單點定位以及動態基線定位方式計算與衛星測高相當性質的海面高(sea surface height, SSH)。SSH 將可應用於反衍地球重力場，提供大地測量、海洋及地球科學研究之用。

本研究於精密單點定位研究工具使用(1)瑞士伯恩大學天文研究所研發之Bernese 5.0 GPS處理軟體，以精密單點定位處理流程解算、及(2)由加拿大Waypoint研發之GRAFNAV GPS後處理軟體，進行精密單點定位解算。

而差分定位方法研究工具包含(1)Bernese 5.0 動態基線解算流程 (2)GRAFNAV GPS後處理軟體、及(3)MIT研發之GAMIT動態定位模組TRACK，進行動態基線運算。

精度分析包含 (1)使用動態定位模式進行靜態站坐標解算，了解動態定位解算精度及軟體內部之解算穩定度；(2)以海面高交叉點位置差異分析，評估PPP及動態基線方法解算出的座標精度；(3)將海面高度與DNSC08的海面高度值進行比較，以GPS觀測值與參考場之高度差異量作為評估本研究成果的另一項參考指標。最後，本文依照實驗所得之各項成果評估PPP與動態差分可達之定位精度，探討PPP及KRP兩者在船載測高上展現的特性及改善方法。

二、船GPS動態定位方法

2.1 相對定位：動態差分定位

本研究使用單參考站後處理動態差分定位，以單一固定站作為相對定位的參考點，與移動站進行二次差分解算，對於隨時改變位置的移動載體，單基準站與載體組成基線解算較不會有資料量過於龐大的問題。當距離不遠時，二次差分能夠消除對流層以及電離層等影響，但當基線長度增加，大氣層所可能產生之誤差將不能被有效消除，與距離相關之誤差也會提升，使得長基線定位精度下降。

2.2 絕對定位：精密單點定位

精密單點定位使用零次差分技術，為單一接收站、無基線、無參考座標加入解算，且定位成果建立在全球座標系統上的絕對定位方法。由於待測點單點獨立運算而無幾何的優勢，整數週波未定值訂定解算上需要較長的收斂時間，超過20~60分鐘的良好品質連續觀測、以及足夠且幾何分布良好的衛星，對PPP的解算是不可或缺的(Kjørsvik et al., 2009)。若使用經過篩選後品質較佳的GPS資料經過疊代計算，並使用精度較高的起始動態坐標，以求解較精確的對流層附加修正

參數、週波未定值以及接收儀時錶誤差，則PPP將可獲得數公分至1、2 公分等級的動態定位結果，研究指出目前定位精度於靜態定位成果能達到公分級，動態定位成果能達到公分級。(Cove and Santos, 2004)

使用雙頻GPS接收儀，接收儀和衛星之間的電碼及載波相位觀測量Li (i=1,2) 可列出2-1與2-2式，2-1式為使用電碼(code)，2-2式為使用載波相位(phase)觀測量組成的PPP觀測方程式(Shen and Gao, 2002)；各誤差項引入觀測方程式中，詳細內容如表2-1：

$$P(Li) = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion/Li} + d_{multi/P(Li)} + \varepsilon(P(Li)) \quad (2-1)$$

$$\Phi(Li) = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion/Li} + \lambda_i N_i + d_{multi/\Phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(Li)) \quad (2-2)$$

表 1 (2-1~2-2)式符號說明

符號	說明	符號	說明
i	頻率識別號(i=1或2)	dtrop	對流層遲滯，單位(m)
P(Li)	虛擬距離觀測量，單位(m)	dion/ Li	Li 電離層遲滯，單位(m)
$\Phi(Li)$	載波相位觀測量，單位(m)	λ_i	Li 波長，單位(m)
ρ	真幾何距離，單位(m)	Ni	Li 之整數週波未定值，單位為(cycle)
c	光速，單位(m/s)	dmulti / P(Li)	虛擬距離觀測量之多路徑效應，單位(m)
dt	衛星鐘誤差，單位(s)	dmulti / $\Phi(Li)$	載波距離觀測量之多路徑效應，單位(m)
dT	接收儀鐘誤差，單位(s)	ε	觀測之雜訊，單位(m)
dorb	衛星軌道誤差，單位(m)		

找出誤差來源並進而找到方法處理誤差，則是PPP定位成果能否提升的關鍵。影響PPP動態定位精度的主要誤差有衛星軌道誤差、衛星時錶誤差、接收儀時錶誤差、電離層延遲誤差、對流層延遲誤差以及整數未定值(ambiguity)求解誤差等。上述大多數的誤差預期可於模式處理中消除，如：引入品質佳的軌道資訊與衛星時錶改正量；接收儀時錶差以及對流層延遲誤差由預估獲得；電離層延遲誤差可以使用雙頻的接收儀產生無電離層線性(free-ionospheric delay, L3)，或是使用更為完善的模式進行處理(Trehn, 2006)。其他誤差模式例如：海潮改正、固體潮改正、大氣改正...等，根據觀測狀況以及研究需要引入，詳細討論於2.3節，以期得到最佳的定位成果。最後進行最小二乘估計將粗差剔除，獲得測站坐標、接收儀時錶差、天頂向對流層延遲量、精度指標等未知數。

2.3 改正模式

本研究使用NAO.99Jb模型進行海潮改正。固體潮部份在靜態站測試環節使用Dehant V.參考IERS2003(Watson, 2003)所編撰固體潮模型solid.exe進行固體潮

改正，測試經固體潮改正後成果有無提升。本研究航行船速控制在3 m/s左右，故船速對海面高影響忽略不計，但針對風浪等環境誤差，所有計算出的海面高資料使用Gaussian filter進行濾波，以期平滑化後能夠消除船行進間姿態角因風浪影響而擺幅過大等高频誤差。實驗使用60秒以及120秒罩窗進行濾波，並比較交叉點分析之海水面高精度，由於實驗發現120秒罩窗所得海水面高精度比60秒罩窗於平差後RMS值改善約一公分，於是選定為處理本次實驗資料的罩窗大小。以120秒為例，濾波完的海水面高資料，可保持波長長度大於400米的訊號以進行資料分析。圖1為GPS動態成果產出後使用的改正模式及分析流程圖。

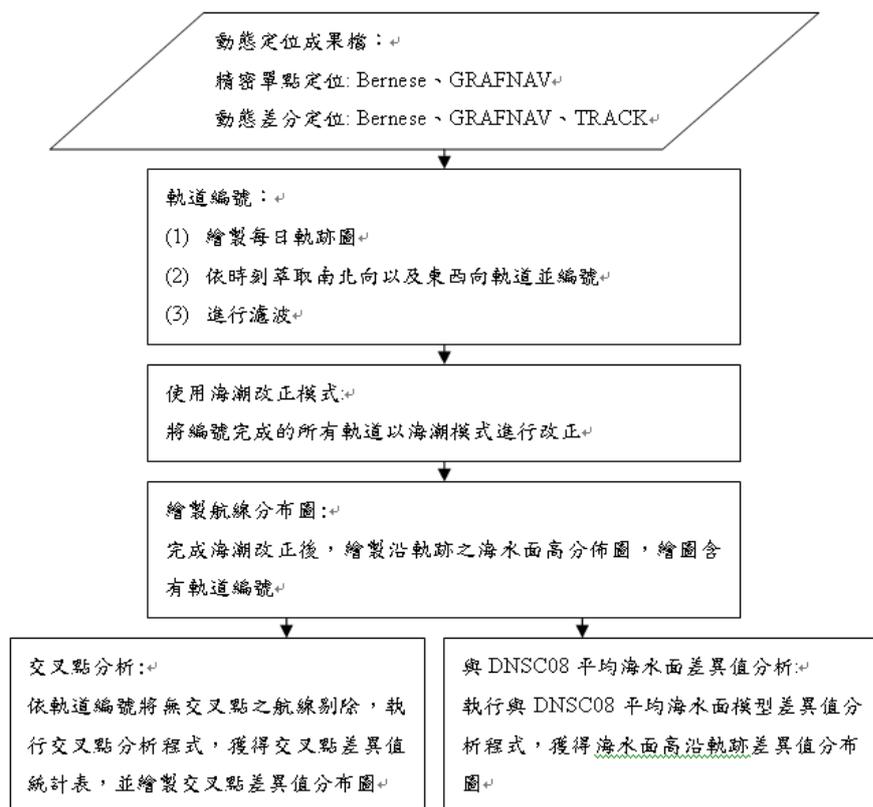


圖1 GPS動態定位成果產出後所使用之改正模式及精度分析流程

2.3 船載海面高測量

船載測高與衛星測高的目的之一致，主要為測定海洋大地水準面與海洋地形等資訊。如圖2所示，衛星測高的原理為應用衛星測高儀取得瞬間海水面至衛星之間的高度，在選定一固定的參考橢球體之後，經過海潮改正，則可以獲得海水面與參考橢球體之間的海面高度(SSH)，應用此海面高度以及海洋大地水準面之模式，即可以推算海洋地形(sea surface terrain, SST)，N為大地起伏值，如(2-3)式所示：

$$SST = SSH - N \quad (2-3)$$

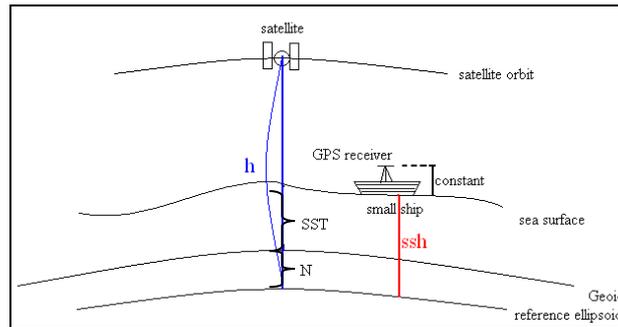


圖2 船載海面高測量與衛星測高原理圖

三、成果分析

3.1 研究資料說明

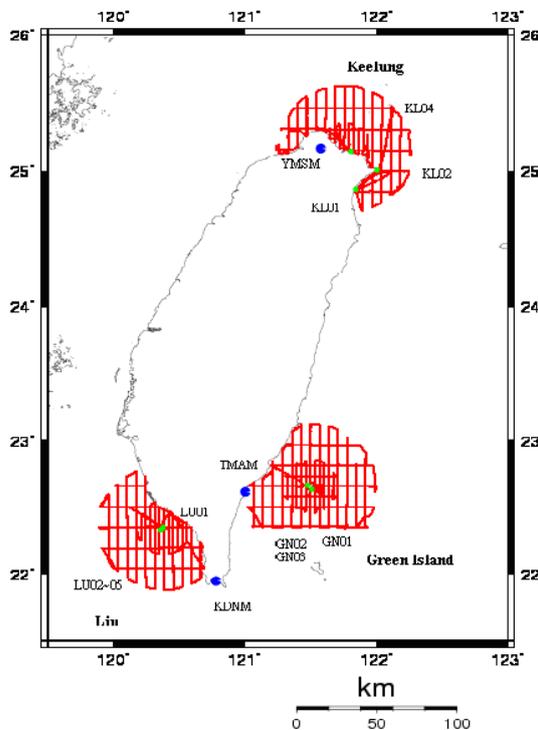


圖3 本研究三區船行分布圖

左圖3為本研究三區船行分布圖。施測範圍為基隆、小琉球、綠島三區，施測路線以Bernese PPP解算成果繪製出圖，紅色線條為以Bernese PPP所解算出1Hz之基隆、小琉球、綠島地區船行軌跡圖；藍點為實驗所選之內政部國家衛星追蹤站，依圖上顯示由北到南依序為陽明山、太麻里、墾丁衛星追蹤站；綠點為實驗架設之1Hz臨時岸邊固定站，搭配測區及出海時段所架設，基隆有KL01、KL02、KL04共三次架點、小琉球有LU01~LU05共五次架點、綠島有GN01~GN03共三次架點，圖上綠點為各岸邊站分布位置。施測日期為2007年五月至八月。

3.2 靜態定位測試

研究首先使用動態定位解算程序解算固定站之靜態座標，目的為試驗動態模組所能提供的最佳定位成果。由於座標的動態解算精度約為靜態的2~3倍，可由此預期動態定位解算精度以及軟體內部之解算穩定度。

由表2結果，在動態差分流程中，TRACK KRP定位精度較Bernese KRP為佳。而短基線又比長基線有更佳的精度表現，映證動態基線解之誤差與基線長度相關。Bernese PPP的定位精度不受基線長度影響，其定位精度與長基線近似約6~8公分，有替代長基線動態差分定位的潛力。

表2、2007年DOY171 三固定站使用Bernese PPP、Bernese KRP、TRACK KRP靜態測試之RMS 值

Stations	method	Length of baseline (km)	RMS (m)
YMSM	Bernese PPP	0	0.084
KDNM	Bernese PPP	0	0.063
TMAM	Bernese PPP	0	0.084
YMSM- KDNM	TRACK KRP	330	0.076
YMSM- KDNM	Bernese KRP	330	0.082
KDNM-TMAM	TRACK KRP	50	0.036
KDNM-TMAM	Bernese KRP	50	0.044

3.3 交叉點分析

由於船載 GPS 動態定位為一連續點的測量，海面上並沒有固定之標點可進行重覆施測以評估其定位精度，只能藉由船行軌跡中，兩兩交叉航線交叉點的定位結果得到多餘觀測量，進行差異值分析。

五種解算方法解算出之海面高交叉點差異的 RMS 值如表 3 所示。PPP 二種方法之精度，平差後 RMS 值可達約 2~16 公分，Bernese PPP 的交叉點海面高差異分布圖如圖 5 所示，平差模式對定位精度有明顯提升，可改善交叉點上的誤差，使 Bernese PPP 平差後成果可應用於動態定位。理論上，KRP 許多定位誤差會被差分模式消除，精度會比 PPP 來得好，本研究在小琉球地區，GRAFNAV 及 Bernese 的成果都有展現 KRP 比 PPP 好的特質；以國家基準站 30 秒一筆解算出 TRACK 成果，也展現 KRP 比 PPP 精度更佳的结果。基隆地區由於岸邊站資料品質問題，造成 KRP 解算航線較破碎，PPP 可順利將全區求解，有不受基站影響之優勢；而綠島地區 1Hz 的 KRP 同樣因為基準站資料品質以及西邊航線資料品質問題使得精度不佳，PPP 不受岸邊站影響解算亦展現相對優勢。

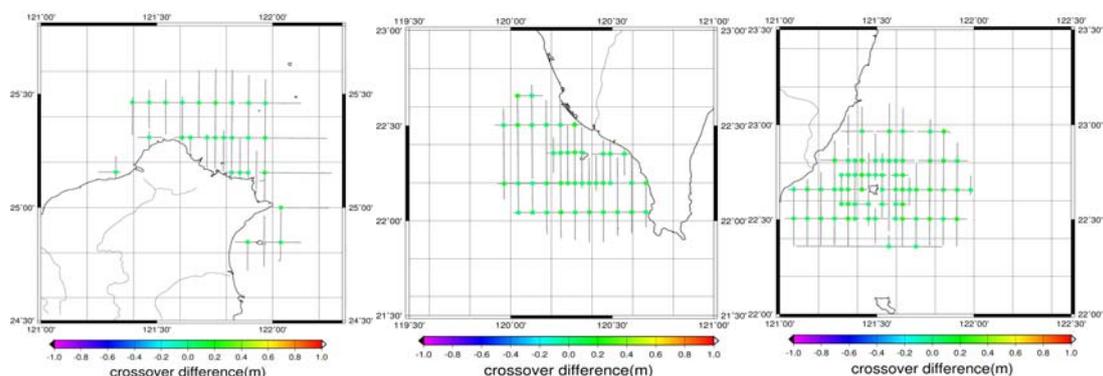


圖5 交叉點海面高差異分布圖(Bernese PPP結果)，由左至右依序為基隆、小琉球、綠島

表3、五種解算方法解算出之海面高交叉點差異的RMS值 (單位：m)

軟體	基隆	小琉球	綠島
Bernese PPP 1Hz	0.018	0.136	0.165
GRAFNAV PPP 1Hz	0.049	0.063	0.163
GRAFNAV KRP 1Hz	N/A	0.047	0.243
Bernese KRP 1Hz	0.112	0.106	0.371
TRACK KRP 30sec	0.058	0.087	0.109

3.4 與平均海水面模式(DNSC08 MSS)比較結果

各軟體及解算方法與 DNSC08 海面高差異量平差後標準偏差值如表 5。GRAFNAV PPP 與 GRAFNAV KRP 之標準偏差最小且一致，解算成果最穩定，其 PPP 與 KRP 在基隆與小琉球地區標準偏差可達約 10~14 公分，但其中 KRP 在基隆與綠島地區受觀測資料與岸邊站資料品質影響，基隆無法解算出完整航線、綠島地區標準偏差較大約 51~60 公分。

於 1Hz 的 PPP 部分，Bernese PPP 的標準偏差在基隆及小琉球地區，比其餘方法大許多，此現象在比較內部精度之交叉點分析並未出現，反映在比較外部精度的此處，應為隱含有差分可消除的系統誤差(如：差分可降低之對流層延遲誤差)是 Bernese PPP 尚未克服，但 GRAFNAV PPP 已克服的。Bernese 由於預估參數的吸收，內部精度有達到一定水平，然而可能因起始座標給定不夠準確或對流層參數於流程中預估不佳，在成果與其他模型比較時，出現外部精度的歧異。

表 5、各軟體及解算方法與 DNSC08 海面高差異量平差後標準偏差值比較表(m)

		基隆	小琉球	綠島
DNSC08	Bernese PPP 1Hz	0.623	0.563	0.383
	GRAFNAV PPP 1Hz	0.138	0.110	0.505
	GRAFNAV KRP 1Hz	0.100(平差前)	0.105	0.599
	Bernese KRP 1Hz	0.134	0.583	0.503
	TRACK KRP 30sec	0.175	0.203	0.319

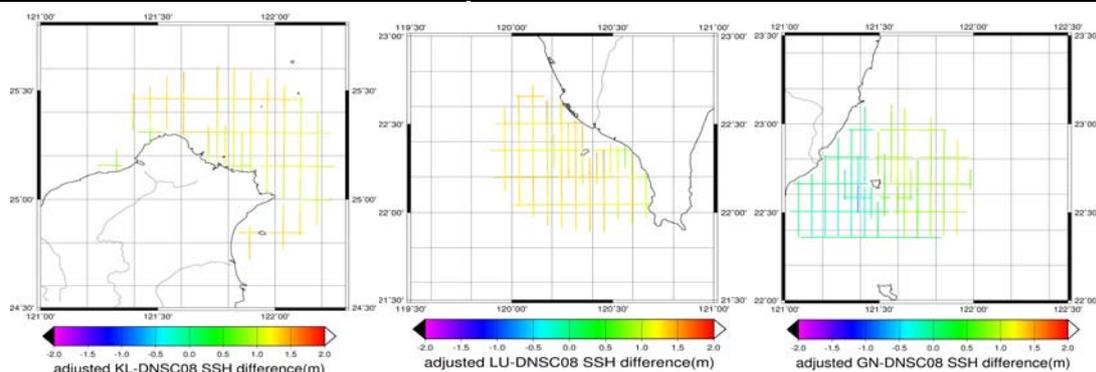


圖 6、GRAFNAV PPP 海水面高與 DNSC08 殘餘值圖，由左至右依序為平差後之基隆、小琉球、綠島

四、結論

一、 船載測高透過 PPP 及 KRP 定位在本研究中獲得成果。定位精度的提昇首先仰賴觀測資料的品質穩定良好且長時間連續觀測。改正模式及平差模式的選定及運用亦對定位精度有所提升。

二、 由靜態測試成果發現，PPP 處理流程與動態基線解算之成果，於超過百公里之長基線部分精度量級接近，Bernese PPP 對長基線動態定位有替代潛力。

三、 由交叉點海面高分析結果，以 PPP 方法解算，平差後 Bernese PPP 與 GRAFNAV PPP 二者 RMS 值接近，約 4~16 公分，又有無基線解算等優點，值得未來研究應用；動態差分定位之 Bernese KRP 流程 RMS 約 11~37 公分、GRAFNAV KRP 約 5~24 公分、TRACK KRP 約 6~11 公分。在小琉球地區，軟體 Bernese 以及 GRAFNAV 二者皆呈現 KRP 較 PPP 為優的成果，基線解在觀測品質良好的情況下仍有一定的定位優勢，但在受到基站資料品質影響解算的地區 PPP 則能夠以無基線方式求得成果；使用 30 秒一筆的國家基準站有完整的解算成果，RMS 降低，唯無法呈現資料高頻變化。

四、 由海面高與 DNSC08 殘差分析成果，GRAFNAV PPP 與 GRAFNAV KRP 解算三區之標準偏差最小且一致，解算成果最穩定。而 Bernese PPP 的標準偏差比其餘方法大的現象在比較內部精度之交叉點分析並未出現，反映在比較外部精度的原因應為隱含有差分可消除的系統誤差是 Bernese PPP 尚未克服，但 GRAFNAV PPP 已克服的。Bernese 由於預估參數的吸收，內部精度有達到一定水平，然而可能因起始座標給定不夠準確或對流層參數於流程中預估不佳，在成果與其他模型比較時，出現外部精度的歧異，顯示流程還有待改善之處。

參考文獻

- Cove, K. M. and Santos, M. C., 2004, An analysis of carrier phase differential kinematic GPS positioning using DynaPos, GPS Solutions, Vol. 8, pp. 210-216.
- Kjørsvik, N.S., Øvstedal, O., Gjevstad, J.G.O., 2009, Kinematic precise point positioning during marginal satellite availability, Observing our Changing Earth, International Association of Geodesy Symposia.
- Shen, X. and Gao, Y., 2002, Kinematic Processing Analysis of Carrier Phase based Precise Point Positioning. The University of Calgary, Canada.
- Trehn, E., 2006, GPS Precise Point Positioning An Investigation in Reachable Accuracy. Master thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Watson, C., Tregoning, P., Coleman, R., 2006, The impact of solid earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series, Geophysical Research Letters, 33 (L08306). pp. 1-4.