

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

新一代台灣大地水準面模式：防災、監測、測繪之應用

A New Geoid Model of Taiwan for Hazard Mitigation,
Environmental Monitoring and Surveying

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC 97-2221-E-009-130-MY3

執行期間： 98年8月1日至100年10月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：黃金維

計畫參與人員：許宏銳、施巨昶、魏祥鴻、劉雅琦、洪偉嘉
、羅元旻、姚鎧凱、覃美芳、吳夢伶、陳逸如

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告 完整報告

中 華 民 國 100 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

新一代台灣大地水準面模式：防災、監測、測繪之應用

A New Geoid Model of Taiwan for Hazard Mitigation,
Environmental Monitoring and Surveying

計畫編號：NSC 97-2221-E-009-130-MY3

執行期限：98 年 8 月 1 日至 100 年 10 月 31 日

執行單位：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：黃金維

計畫參與人員：許宏銳、施巨昶、魏祥鴻、劉雅琦、洪偉嘉
、羅元旋、姚鐙凱、覃美芳、吳夢伶、陳逸如

摘要

全球定位系統(GPS)已對傳統的測繪產生革命性的變化，GPS 已廣泛使用於防災及環境監測。許多 GPS 應用中，需利用大地水準面模式(geoid)將橢球高轉為正高。絕大部分的工程應用使用正高系統，而非橢球高系統。新的測繪科技光達(Lidar)先測得地面橢球高，再以 geoid 將之轉為地面正高。新的航測數值高程模式(DEM) 製作則先以 GPS 點為高程資料求橢球高，再以 geoid 求正高。美國及加拿大正考慮以 geoid 模式及 GPS 重新定義國家高程基準並發展高程現代化。Geoid 日增的重要為本計畫的主要原動力，本計畫收集現有的陸地，海洋及空載重力，加以除錯及求出系統誤差，並定出其解析度及隨機誤差。由重力衛星任務求得之全球重力模式 EGM08 為 geoid 長波長部分之用，並搭配傳統去除-計算-回復法於 geoid 計算。新一代大地水準面模式使用七條”觀測”大地起伏來進行精確度評估，這些驗證資料分布於七條主要道路的一等水準點上，整合型大地起伏模型透過整合重力法及觀測大地起伏計算而得，本計畫所發展的新一代大地水準面模式已廣泛在產官學界應用於橢球高與正高間的轉換，內文中亦有列舉些應用案

例，例如光達產製正高 DEM、淹水範圍估計及高程現代化。

關鍵字：大地水準面、重力異常、全球定位系統、高程現代化、光達

Abstract

The Global Positioning System (GPS) have revolutionized the conventional surveying and mapping practice, and has been used extensively in hazard mitigation and environmental monitoring. For many GPS applications, it is necessary to transform GPS-derived ellipsoidal height to orthometric heights (OHs) with a geoid model. The OH system, instead of the ellipsoidal height system, is used in most engineering applications. The emerging new technology Lidar first determines ellipsoidal heights of the surface, which are then converted to OHs with a geoid model. A new trend in photogrammetric determination of elevations is to first employ GPS height control in the mapping of elevations and then obtain OHs with a geoid model. A geoid model, together with GPS, is now under consideration in USA and Canada to define a new national vertical datum for height modernization. In this project, existing land, marine and airborne gravity anomalies are collected and analyzed to remove data outliers and systematic errors. The spatial resolutions and data noises are determined. New land gravity data collected over 2008-2011 are merged with the existing gravity data in an optimal manner. A high-resolution digital elevation model (DEM) is used to model the short-wave length part of the new geoid. The latest global gravity model, EGM08, is used as the long wavelength part of the geoid. For the geoid determination, the standard remove-computation-restore procedure is employed. The new geoid model is evaluated using “observed” geoidal heights at Taiwan’s first-order leveling benchmarks along 7 major routes. A hybrid geoid model is determined by merging observed and gravimetric geoidal heights. This geoid model is now widely used in Taiwan for ellipsoidal height-orthometric height conversion. Sample applications in Lidar DEM generation, flood estimation, and height modernization are given in this report.

Keywords: gravity anomaly, geoid, GPS, height modernization, lidar

1. 背景

在海洋中，大地水準面(geoid)為一近似於平均海水面之等位面，而在陸地上，geoid 則視質量分佈而定。國際大地測量學會(IAG)成立了 geoid 的服務組織，稱 International Geoid Service (IGeS, <http://www.iges.polimi.it/>)，提供計算 geoid 的資料及軟體，並經常舉辦國際講習班，IAG 的 Commission 2 (gravity field)，推動許多大型跨國 geoid 計畫，預期完成歐盟、非洲、東南亞、南美等區域之高精度 geoid。中國大陸則於 2008-2011 年更新現有(於 1999 年完成)之中國大陸 geoid 模式。日本最新的 geoid 模式於 2005 年完成 (Kuroishi and Keller, 2005)，美國最新的 geoid 模式為 USGG2009(Wang et al., 2009; Roman et al., 2009) 。美國則正推動全國空載重力，預計若干年後完成一新的美國 geoid 模式。

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

過去(2007 年前)的 Taiwan geoid 模式(如 Hwang et al., 2007)，因資料的密度及精度的增加而逐年改善。Geoid 精度與重力密度及高程相關，在平地約為數公分，在山區(高程>2000m)約為 10-20 公分。然而由於缺乏全面的 geoid 精度檢核資料，正確的 geoid 精度與空間的關係無法知悉。最近(自 2002 年起算)，由於國際上的若干重要的衛星重力任務 CHAMP(http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html) 及

GRACE(<http://www.csr.utexas.edu/grace/>)任務發射，及 2008 年發射的 GOCE (http://www.esa.int/esaLP/ESABQK1VMOC_LPgoce_0.html)任務，大幅提昇 geoid 的長波長基準。而台灣附近(含離島)的空載、船載、陸測重力，在其空間密度及精度已大幅改善。本計畫執行期間 (2008-2011)已收集全台灣目前最新的重力資料並對所有資料進行編輯，然後整合所有不同類型重力資料,最後建立台灣目前最新的大地水準面模式，此模式已廣泛被光達、GPS 水準測量、高程現代化發展及其他測繪單位所使用。

2. 重力資料

2.1 陸測重力資料

現有的陸測重力點為臺灣近二十年來(1980~2006)，由中央研究院 (Yen et al., 1990; Yen et al., 1995)、中國測量工程學會 (黃金維等, 1998) 和內政部國土測繪中心 (黃金維, 2001; 陳春盛, 2003) 等單位所蒐集，本研究依資料蒐集的時空將陸測重力資料區分為兩組，其中一組為 1980~2003 年期間所蒐集的資料，由於此組資料包含不同時期所蒐集的資料，存在系統性的偏差與坐標系統不一致的問題，因此透過嚴密的資料處理及編輯不僅將明顯的粗差去除，所有重力異常資料皆轉換至同一坐標系統且相對於 Geodetic Reference System 1980 (GRS80) (Hwang, 2002)，共 3641 點重力觀測值，分布如 (圖 2.1 (a)) 所示。另外一組為內政部委託中興測量公司於 2004~2006 年間辦理的臺灣一、二等重力測量，其中包括 655 個一等重力點及 3690 個二等重力點，並約制其中 19 個絕對重力點，經過資料編輯與網形平差後之平均精度約為 0.05mgal，重力異常資料皆相對於 GRS80 系統，分布如(圖 2.1 (b))所示，使用的儀器為 L&R Graviton EG、Scintrex CG-5 相對重力儀及 FG5 絕對重力儀。

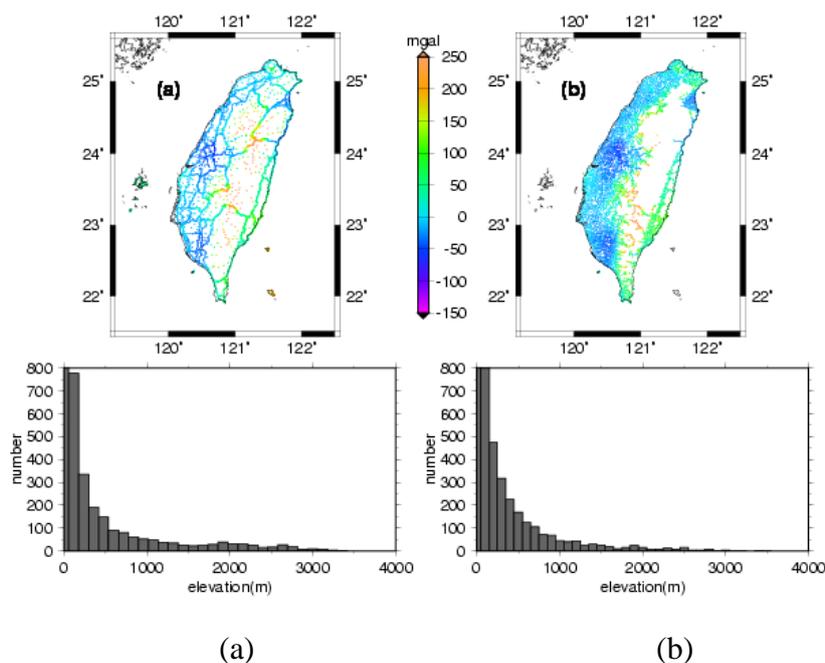


圖 2.1 (a)陸測重力點位分佈圖(1980~2003)； (b)陸測重力點位分佈圖
(2004~2006)

2.1.1 重力網平差

內政部委託中興測量公司於 2004~2006 年間辦理台灣一、二等重力測量，其中一等重力點採均勻分布成網格狀且須附合於已知點，不像以往內政部所辦理之一等水準點上實施重力測量工作，完全分布在道路線狀，一等點間平均距離約 3km~5km，為配合一等重力網必須附合於已知重力網之前題下，依已知重力點的分布情形將台灣地區大致分成數個區域。而規劃原則依公路路線採由外向內包圍的方式進行，即由平原區（如省道一號公路以西地區）至丘陵區（如省道一號公路至省道三號公路地區）再至山區（如省道三號公路以東地區）的方式，陸續完成分區內各測點之一等重力觀測作業。總計共規劃 241 條測線，測線分布情形如圖 2.2(a)。

二等重力點之觀測方式與一等重力網相同，二等重力網必須附合於一等重力網點位上，均採均勻分布成網格狀為觀測原則。二等重力點之點位分佈比一等重力點密集，亦即會有更多的節點，平均約 1.5km~2km 即有一重力點。亦規劃依

公路路線採由外向內包圍的方式進行，亦即由平原區至丘陵區再至山區的方式，陸續完成分區內各測點之二等重力觀測作業。總計本次計畫共規劃 1302 條測線，測線分布情形如圖 2.2(b)。使用的儀器為 L&R Graviton EG、Scintrex CG-5 相對重力儀及 FG5 絕對重力儀。

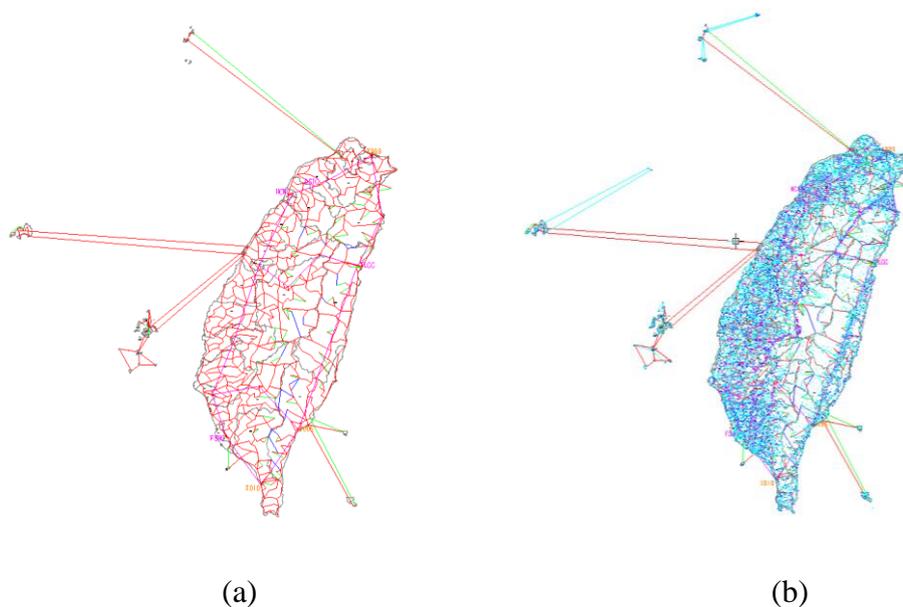


圖 2.2 (a) 一等重力網測線規劃分布圖；(b) 二等重力網測線規劃分布圖

2.1.1.1 相對重力觀測方程式組成

在進行平差計算時，將原始相對重力觀測值為儀器讀數(z)，經過初步的化算、率定函數、儀器漂移改正及其他環境因素的改正(Torge, 1989)後，組成之觀測方程式如下：

$$l(t) + v = g + N_0 + \Delta F(z) + D(t) \quad (2-1)$$

其中 t 為觀測時間； $l(t)$ 為約化後之重力觀測值； v 為 $l(t)$ 的殘差； g 為重力值； N_0 為儀器基準(constant bias)； $\Delta F(z)$ 為率定函數； z 為重力儀讀數；單位為計數器

單位(CU)； $D(t)$ 為重力儀漂移函數。(1)式中的 $\Delta F(z)$ 及 $D(t)$ 為重力儀器的系統誤差，可以數學模式來模擬，本研究中的 $\Delta F(z)$ 使用的數學模型為(Torge, 1989):

$$\Delta F(z) = \sum_{k=1}^m \tilde{Y}_k \tilde{z}^k + \sum_{l=1}^n (\tilde{x}_l \cos \omega_l \tilde{z} + \tilde{y}_l \sin \omega_l \tilde{z}) \quad (2-2)$$

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

$$D(t) = \sum_{p=1}^s d_p (t - t_0)^p \quad (2-3)$$

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

$$\Delta l_{i,j} + v_{i,j} = g_j - g_i + (\Delta F(z_j) - \Delta F(z_i)) + (D(t_j) - D(t_i)) \quad (2-4)$$

其中 $v_{i,j}$ 為 $\Delta l_{ij} = l_j - l_i$ 的殘差； t_i, t_j 為其觀測時間。(2)式中，儀器基準 N_0 因相減而消除。

若有 n 個觀測量，則觀測方程式矩陣可表示為:

$$L^b + V = AX \quad (2-5)$$

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

2.1.1.2 加權約制平差

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

$$\begin{aligned} L_1^a &= F_1(X^a) \\ L_x &= X^a \end{aligned} \quad (2-6)$$

設計矩陣為 $A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$ ，其中 $A_1 = \frac{\partial F_1}{\partial X^a}$ ， $A_2 = \frac{\partial L_x}{\partial X^a}$ 。觀測方程式的權矩陣為

$$P = \begin{bmatrix} P_l & 0 \\ 0 & P_x \end{bmatrix}，其中 P_l 為觀測量之權值，P_x 為約制用控制點值之權值。設 L_1^b 為 $L_1^a$$$

之觀測量， L_2^b 為控制點之值(即 L_x)，利用(2-6)式，以 L_1^b 和 L_2^b 組成之觀測方程式為：

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \hat{X}^a - \begin{bmatrix} L_1^b \\ L_2^b \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中 $\hat{X}^a = \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix}$ ， \hat{X}_1 代表其他未知參數的向量， \hat{X}_2 為約制用控制點未知參數之

向量。利用最小二乘法求解出未知參數之估值 \hat{X}^a 為：

$$\hat{X}^a = (A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_x A_2)^{-1} (A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_x A_2) \quad (2-8)$$

後驗單位權中誤差為:

$$\hat{\sigma}_0 = \pm \sqrt{\frac{\bar{V}^T P \bar{V}}{n - u + r}} \quad (2-9)$$

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

$$\sum_{\hat{X}^a} = \sigma_0^2 (A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_x A_2)^{-1} \quad (2-10)$$

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

$$\hat{\Sigma}_{x_a} = \hat{\sigma}_0^2 (A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_x A_2)^{-1} \quad (2-11)$$

其中 $\hat{\sigma}_0$ 為後驗單位權中誤差。

2.1.1.3 平差模式之整體測試 (global model test)及粗差偵測

當粗差存在於資料中時，是無法以平差的方式來改正，此時所得之平差結果必會不正確。再者，若所使用的數學模式及隨機模式不正確亦會得到錯誤的平差

結果。根據下列之條件式，若成立則表示所用之模式是正確且完整的。

$$\chi^2 = \frac{m\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} < \chi_c^2(1-\alpha, m) \quad (2-12)$$

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

- (1) 有粗差存在於資料中：檢核所有觀測資料並藉由粗差偵錯之測試進行資料之偵錯及剔除。
- (2) 隨機模式不適當。
- (3) 數學模式不適當：須針對所使用之模式加以分析並重新修正。
- (4) 所用之權值不正確：檢核是否有差一個尺度之關係。
- (5) 先驗權值 σ_0^2 估計不當。

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

$$\chi_c^2(1-\alpha; m) = m \left[\chi_{1-\alpha} \left(\frac{2}{9m} \right)^{1/2} + 1 - \frac{2}{9m} \right]^3 \quad (2-13)$$

$$\chi_{1-\alpha} = t - \frac{2.515517 + 0.802853t + 0.010328t^2}{1 + 1.432788t + 0.189269t^2 + 0.001308t^3}, \quad t = [2 \ln(1/\alpha)]^{1/2} \quad (2-14)$$

粗差偵側有很多個方法，如 Baarda's data snooping 方法、Pope's τ -test 方法)等，在本次作業偵錯方式乃採用 Pope's τ -test 方法，使用此法時需計算殘差之協變方矩陣，加權約制法解算的法方程式如下：

首先將(2-7)式表示為：

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \left[\bar{N}^{-1} (A_1^T P_1 \quad A_2 P_x) - I \right] \begin{bmatrix} L_1^b \\ L_2^b \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} L_1^b \\ L_2^b \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

令 $\bar{N} = A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_X A_2$ ， $z = [V_1 \ V_2]^T$ 經誤差傳播即可得殘差之協變方矩陣

$$\sum_z = \hat{\sigma}_0^2 G \begin{bmatrix} P_1^{-1} & 0 \\ 0 & P_X^{-1} \end{bmatrix} G^T = \hat{\sigma}_0^2 \begin{bmatrix} P_1^{-1} - A_1 \bar{N}^{-1} A_1^T & -A_1 \bar{N}^{-1} A_2^T \\ -A_2 \bar{N}^{-1} A_1^T & P_X^{-1} - A_2 \bar{N}^{-1} A_2^T \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

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

$$\frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}} > \tau_c \left(1 - \frac{\alpha}{n}; 1, m \right) \quad (2-17)$$

則第 i 個觀測量即為粗差。(2-17)式中 n 為觀測量之數目， τ_c 為當信心水平為 $(1 - \alpha/n)$ ，平差之自由度為 1 及 m 時之臨界值。平差時若以加權約制解算，則(17)是可測試其約制之值是否合理。若(2-17)式成立則該觀測量應於資料中剔除再做計算。當殘差之協變方矩陣不易計算時，可採用下列近似公式：

$$\sigma_{v_i} \approx \sqrt{\frac{n-u}{n}} \times \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_i}} \quad (2-18)$$

但其先決條件是觀測量之間彼此為不相關。 P_i 為第 i 個觀測量之權值。

2.1.1.4 成果分析

一、二等相對重力測量的原始觀測數據共有 12435 筆資料，其中約制 11 個已知重力點，反覆進行重力網平差及粗差偵測，移除其中 67 筆測試粗差，最後通過整體測試(global model test)的未知重力點共有 4356 筆，儀器精度估值為 0.0489 mGal，觀測量殘差分布符合常態分布(如圖 2.3(a)所示)，其最大值、最小值分別為 0.197 mGal 與 -0.186 mGal，標準偏差為 0.036mGal。平差後各未知重力

點之中誤差分布圖如圖 2.3(b)所示，其最大值、最小值分別為 0.099 mGal 與 0.003 mGal，均方根為 0.039mGal

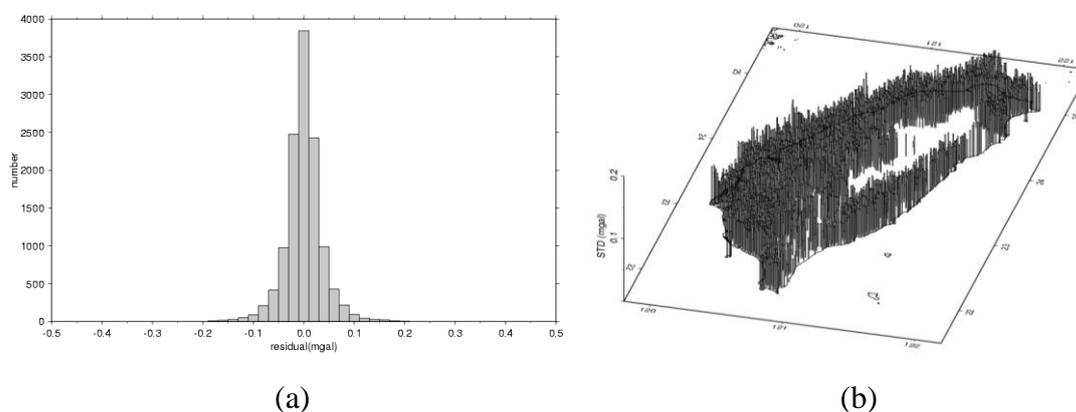


圖 2.3、(a)相對重力觀測量殘差之統計直方圖 (b) 未知重力點之中誤差分布圖

2.2 船測重力資料

2.2.1 近岸船載重力測量

臺灣本島目前是使用以基隆為起算原點的高程系統(TWVD2001)，然而各離島之高程基準則因海域的阻隔均為各自獨立之區域性高程系統，為了改善各離島周圍的大地起伏模型精度進而解決臺灣本島與離島間的高程系統不一致的問題，內政部國土測繪中心於 92 年開始於本島沿岸及離島周圍如基隆、澎湖、小琉球、綠島及蘭嶼進行船載重力測量，如圖 2.4(a)所示，儀器為 L&R Air-Sea II (LCR, 2003)、ZLS Dynamic Gravity Meter，取樣頻率為 1Hz，為了蒐集近岸的重力資料，使用噸數較小的漁船，卻因小型載具易於受到海浪的影響使得重力資料產生噪聲誤差，因而使用罩窗寬度約 120-150 秒之高斯濾波器來消除高頻訊號誤差，使得沿軌跡之空間解析度下降至約 500 公尺。此外，為了提升重力資料的精度，對每一航次進行編輯，將各條航線轉彎處資料拿掉，並使用 linear drift model 來吸收交叉點誤差並組成觀測方程式，再利用最小二乘法求解進而改善每一條航線的船測重力精度。

2.2.2 臺灣環海船載重力測量

本組重力資料為臺灣環海船載重力資料(如圖 2.4 (b))，主要是取自 National Geophysical Data Center (NGDC)所下載之船測重力資料，由於資料皆為 1990 年前所蒐集，GPS 定位技術甚差，因而本文以衛星測高資料計算得之海洋重力修正此船測重力資料(Hwang and Parsons, 1996)，修正時假設船測重力系統誤差為時間的線性函數，並以最小二乘法解算每一航次的參數來修正該航次蒐集的重力。而較為靠近岸邊的船測重力資料主要取自中央大學於 1996 年使用 R/VI' Atalante KSS30 船載重力儀所蒐集之重力資料(Hsu et al., 1998)，經篩選後共約 4 千多點。經交叉點平差後，R/VI' Atalante KSS30 資料的交叉點差值的標準偏差為 2.6 mgal，全部船測資料則為 11.2 mgal。

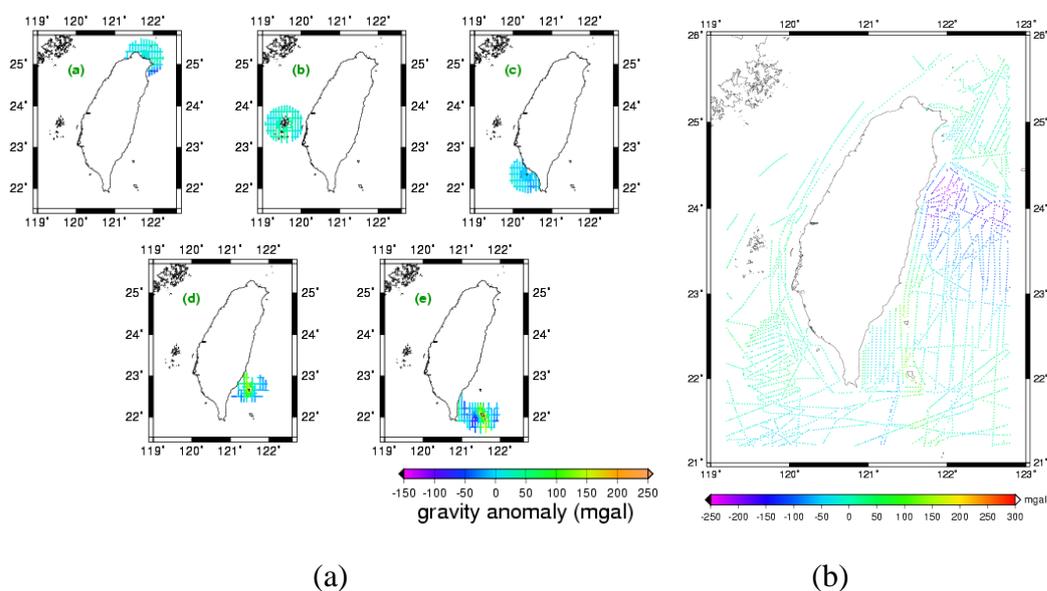


圖 2.4 (a)近岸船載重力資料分佈圖；(b)臺灣環海船載重力資料分佈圖

2.3 空載重力資料

臺灣本島為地勢狹長且崎嶇複雜的地形，四周環海，且境內超過 70% 為高山或丘陵所覆蓋，尤以中央山脈超過三千多公尺之地勢為最，自由空間重力異常最高可達 450mgal，臺灣東部海域地形構造較為複雜且為斷層帶交接處，自由空間重力異常驟降至-250mgal，為臺灣附近重力變化較大的區域，此外還有黑潮經過此區域。臺灣海峽為典型的淺水區域，船測重力資料較為稀少，過去皆以測高重力為主要的重力資料來源，然而此區域的地形較淺，海潮、濕對流層參數無法精

確估計(Hwang and Hsu, 2008)，測高波容易受到複雜地形及近岸陸地的干擾導致測距精度不佳(Deng, 2003)。受限於此地理環境，重力測量工作難以在山區、部分海域及海陸交接處實行，導致重力資料分布不均，因而內政部於 2004~2009 年辦理 3 次空載重力測量工作計畫，分別為(a) Campaign 1 (island-wide over Taiwan): average altitude is 5156m, (b) Campaign 2 (Kuroshio Current): average altitude is 1620m, (c) Campaign 3 (Taiwan Strait and South China Sea): average altitude is 1620m，如圖 2.5 所示，並由交通大學執行之。

Campaign 1 已於 2005 年 5 月結案(黃金維, 2005)。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 (LCR, 2003)。施測航線圖如圖 2.5(a)，北向航線共 64 條、航線間隔 4.5 公里；東西向航線共 22 條、航線間隔 20 公里；東北-西南向航線共 10 條、航線間隔 5 公里；西北-東南向航線共 6 條、航線間隔 30 公里。測量之航高為 16000 英尺，即約 5156 公尺；航速為每小時 160 海浬，約每小時 306 公里。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 306 km/hr，約每 85 公尺測得一筆重力值，並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

Campaign 2 主要的測量區域為臺灣東部海域，該海域有地球重要的洋流「黑潮」經過，藉由空載重力測量的方式，取得黑潮流域的重力資料，則有助決定黑潮區域之大地水準面，且若能結合衛星測高資料，則可用於決定黑潮之平均海流與季節、跨年變化，並可作為臺灣本島及離島高程基準聯測之重要數據。自 2006 年 3 月 6 日第一次施測起，至 2008 年 8 月初為止，因內政部所提供之飛機故障維修、重力儀儀器調度及天候影響等因素，經展期三次，始完成約 30 個空載外業測量工作天，飛行總時數約 130 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。施測航線圖如圖 2.5(b)，南北向航線共 36 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 7 條、航線間隔 60 公里。考慮到地形起伏、施測精度、施測時間、飛航安全等因素，飛行航高定為 1620 公尺(5000 英尺)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公

尺能測得一筆重力值，並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

Campaign 3 測量區域為臺灣西部海域與東沙群島，除了可補足西部沿岸的重力資料，其成果對於臺灣西部海域大陸棚的研究亦有所貢獻。外業測量工作時程始於 2008 年 12 月 9 日至 2008 年 9 月 13 止，共 27 個工作天，飛行總時數約 115 小時，儀器為純量式 L&R Air-Sea Gravity System II 重力儀。規劃之航線圖如圖 2.5(c)，南北向航線共 54 條、航線間隔 5 公里；東西向航線共 15 條、航線間隔 25 公里。飛行航高定為 1620 公尺(5000 英尺)，航速以不超過 280 km/hr 為原則。每秒觀測一筆資料(1Hz)，若配合飛機航速 280 km/hr，約每 77 公尺能測得一筆重力值並使用單窗寬度約 150-180 秒之高斯濾波器處理。

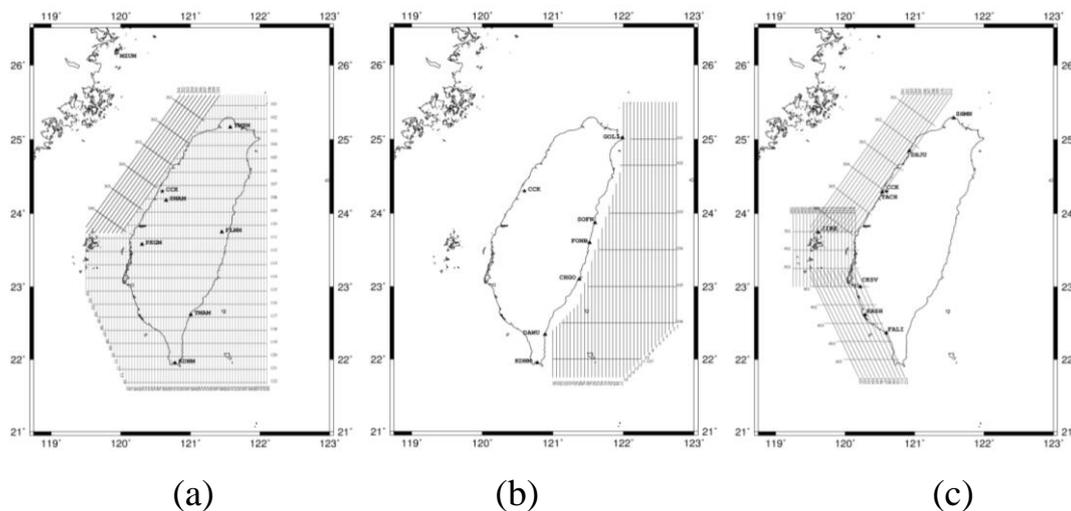


圖 2.5 (a) Campaign 1 ; (b) Campaign 2 ; (c) Campaign 3

空載重力資料含有諸多系統誤差，如 *Evotov* 效應所造成的誤差、重力儀的漂移誤差、重力基準誤差、重力參考場的不一致等(Wessel and Watts, 1988)。為了減少測量時產生的系統誤差，發展交叉點平差法模式化每條航線重力異常的偏差值(bias)及漂移值(shift)，雖然成功吸收了部分的系統誤差，然而沿著測線的重力訊號依然存在著帶狀的系統誤差(如圖 2.6)，造成的原因可能是交叉點太少導致多餘觀測量不足，使得無法非常有效的估計系統誤差。以 Campaign 1 其中一條測線為為例，然後將一測高重力網格向上延續至空載資料的高度並內插出相對於

空載重力位置的重力異常。向上延續的公式如下：

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

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

$$\delta g = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 \quad (2-20)$$

其中 d_0 為常差(bias)， t 為自某一參考時刻起算之時間。然後利用最小二乘法求解後，再以平差後的差值來改正原有的空載重力。利用(2-20)式擬合空載重力和測高重力的差值，經平差後，獲得 d_0 、 d_1 及 d_2 等係數分別為 3.347、-0.215 及 0.017，且空載重力和測高重力差值的平均值和標準差從平差前的 4.368 和 2.795mgal 降到平差後的 0.000 和 2.048mgal。

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

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

其中 $S_G(f_r)$ ：高斯濾波

為了使空載重力異常向下延續至海平面後仍然可以得到穩定的結果，先移除透過參考重力場求得之長波長重力分量及透過地形資料求得之短波長重力分量而得到殘餘重力異常，再將此殘餘重力異常透過公式(2-21)向下延續至海平面，再將海平面之長短波長之重力分量回復之。地形重力效應是使用 Gaussian

quadrature 逐點計算其重力效應 (Hwang et al., 2003)。Hsiao and Hwang (2011)認為地形重力效應的考量於向下延續的應用中，只有在地勢變化較大的區域才有明顯的效果，海面上之空載重力應用此法進行向下延續反而有可能會使結果變差，因此本研究只有橫跨臺灣中央山脈的 Campaign 1 在其向下延續時才有考慮地形重力效應，然而，測區幾乎在海平面上的 Campaign 2 及 Campaign 3 在其向下延續時則並沒有考慮地形重力效應。

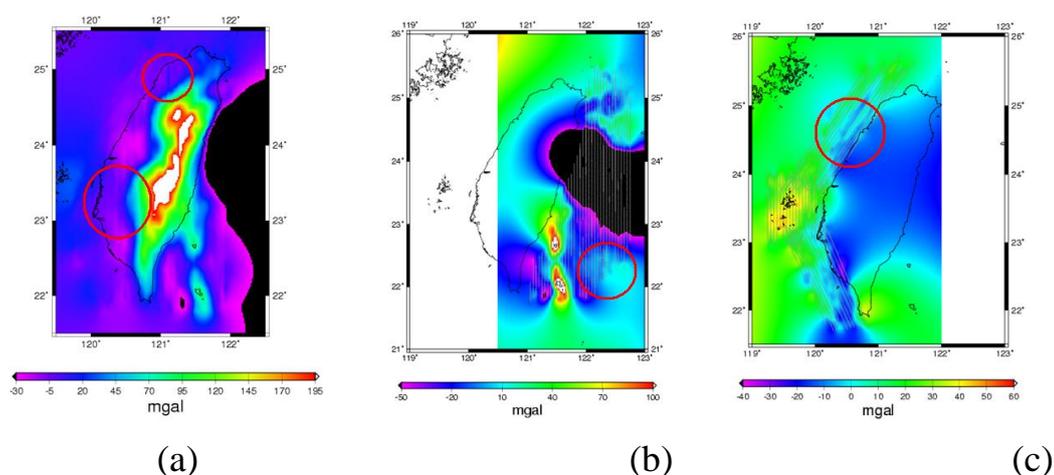


圖 2.6 平差處理後的空載重力網格 (a) Campaign 1 (b) Campaign 2(c) Campaign 3

2.4 測高重力資料

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

0.2 的 sub-waveform threshold retracker (Yang et al., 2011)為臺灣附近最理想之波形重定演算法。

本計畫使用 inverse Vening Meinesz formula (IVM) formula (Hwang, 1998) 搭配去除回復法(remove-compute-restore procedure)來進行 2'x2' 測高海洋重力異常的計算，以 NCTUA 表示(如圖 2.7)。使用的參考重力場為 EGM08 展開至 2190 階。重力反演的程序是先將 10HZ retraced-Geosat/GM 及 20HZ retraced-ERS-1/GM 之測高觀測數據進行多項式擬合成 2Hz 資料來提高單點精度及計算的效率，取樣的細節可參考 Hwang et al. (2006)，並將所有沿軌跡之海水面高做大地梯度計算，再將其組成南北、東西垂線偏差分量來進行測高海洋重力異常的反演。使用 Hsu et al. (1998) 所收集的船測重力資料來進行精度評估，結果顯示 NCTUA 的精度與 Sandwell V18.1 (Sandwell and Smith, 2009)及 DNSC08 (Anderson et al., 2009) 全球重力異常網格精度相當。

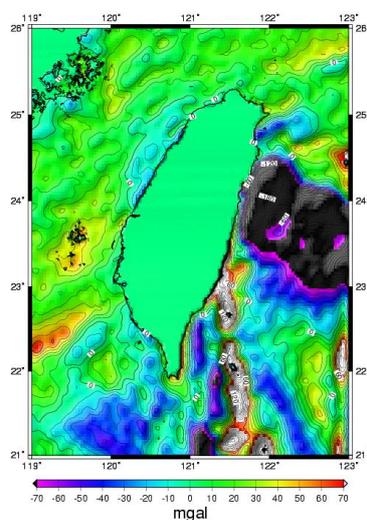


圖 2.7 測高海洋重力異常圖

3. GPS/Leveling 資料

目前內政部提供在 north、center、south、east 4 條有 24 小時觀測 GPS 的一等水準點，可用為 geoid 精度評估之用。然而此 4 條水準線並不足以代表台灣全區。本計畫執行至目前，考量到現有 GPS/Leveling 資料幾何上的分佈，沿著一

等水準路線特別增加東南部地區 15 點（南迴公路、台 9 線，Tai9）、西北部地區 20 點(台 3 線，Tai3)及中部地區 15 點(台 18 線，Tai18)的水準點進行 24 小時的 GPS 測量，如圖圖 3.1 所示。以作為評估 geoid 精度之用。再者，若實測大地起伏精度佳，空間密度夠，則可與重力大地起伏合併，而得一混合型(hybrid) geoid。若實測大地起伏中，其 GPS 系統與 ITRF 系統一致，則此混合型大地起伏之座標系統自動為 ITRF 系統，而其對應之高程基準與台灣之高程基準 (TWVD2001)一致。

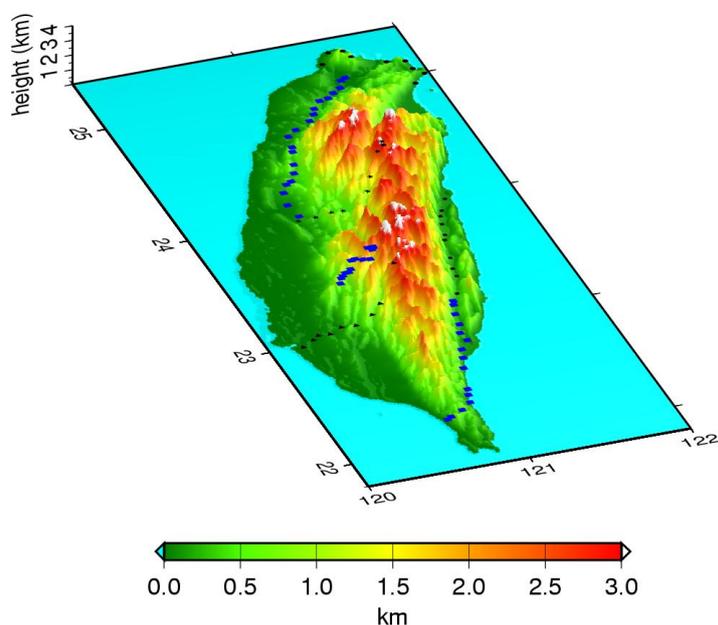


圖 3.1、大地起伏檢核路線分佈圖，圖中黑色點分布代表已存在之檢測路線，底圖代表地形，藍色點分布代表為新增的檢核點

衡量本計劃預算與檢核點的幾何分布及透空條件，選擇其中透空條件較差的一等水準點進行偏心觀測，尋找透空良好之轉點來穩定 GPS 測量的精度，並以水準測量所得到的正高差來當做橢球高差進行高差修正以便得到水準點位上的橢球高，然而如果選擇的轉點距離太遠，則需以下公式進行修正:

$$h_{BM} = h_{ref} + \Delta h_{gps} \quad (3-1)$$

$$\Delta h_{gps} = \Delta H_{level} + \Delta N \quad (3-2)$$

由於台灣位於板塊交界處，地殼活動頻繁、雲林區域超抽地下水等因素造成某些區域存在速度場變化的問題，由其是雲林區域及與板塊交接處最為接近的東南區域存在每年變化數公分的情形(如圖 3.2 所示)，因此於本計畫執行期間所蒐集的 GPS/Leveling 資料亦有考慮水準點速度場變化的修正量 (Ching et al., 2011)。

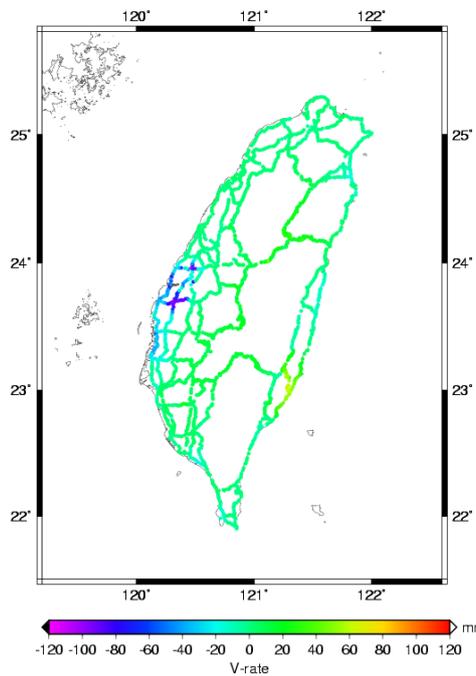


圖 3.2、台灣一等水準點的垂直速度場變化，2000-2008 (mm/year)

4. 重力整合

本計畫所採用的重力整合策略為事先將所有重力資料分為兩組，其中一組為包含陸測重力、船測重力、向下延續至海水面之 1500 公尺航高東西部空載重力 (campaign 2&3)及測高重力資料，此組資料被稱做 Data A，如圖 4.1 所示，另外一組為向下延續至海水面之 5000 公尺航高空載重力資料，並將此組資料根據其對應臺灣地形高度分類成四組資料，對應的地形高度分別為 0-1km、1-2km、2-3km

及 3-4km，其中僅使用對應地形高度超過 1km 以上的空載重力資料，此組資料被稱做 Data B。如此分類的想法是基於考慮 5000 公尺航高空載重力主要是貢獻於重力資料稀少之中央山脈區域，然而其任務涵蓋範圍涉及臺灣全島，為了避免於所有重力資料整合過程中，平地區域之頻帶限制(band-limited)的空載重力資料降低高精度的陸測重力資料，因而採用 ”漸進式整合法(progressive combination)”將 Data A 與 Data B 進行整合來提升山區大地起伏模型精度。本研究主要根據上述的 Data A 及 Data B 兩組資料進行漸進式整合，並且分別測試了四個階段不同重力資料的整合，如下所示：

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

$$\Delta\hat{g} = C_{\Delta\hat{g}\Delta g} \left(C_{\Delta g\Delta g} + D \right)^{-1} \Delta g \quad (4-1)$$

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

階段二：整合前，事先將階段一的結果輸出成點資料，然後採用簡單的直接整合法將階段一的結果與對應於地形高度 1-2km 變化的 5000 公尺航高空載重力資料進行整合，如圖 4.2(b)所示，之後再一次的使用 bockmedian

演算法將兩組資料進行濾波處理，最後再透過最小二乘法配置法進行網格化。

階段三：此組所使用的方法與階段二類似，不同的地方為透過整合輸出成點資料的階段二與對應於地形高度 2-3km 變化的 5000 公尺航高空載重力資料，如圖 4.3(c)，進行整合。

階段四：此組所使用的方法與階段三類似，不同的地方為透過整合輸出成點資料的階段三與對應於地形高度 3-4km 變化的 5000 公尺航高空載重力資料，圖 4.4(d)，進行整合。

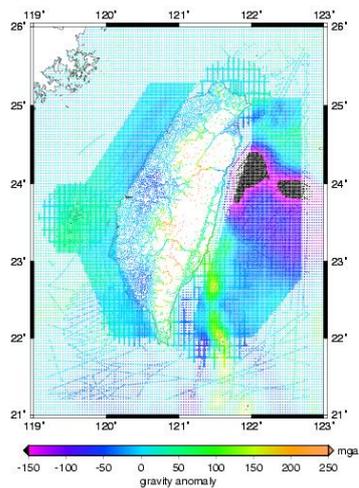


圖 4.1、Data A 的分布

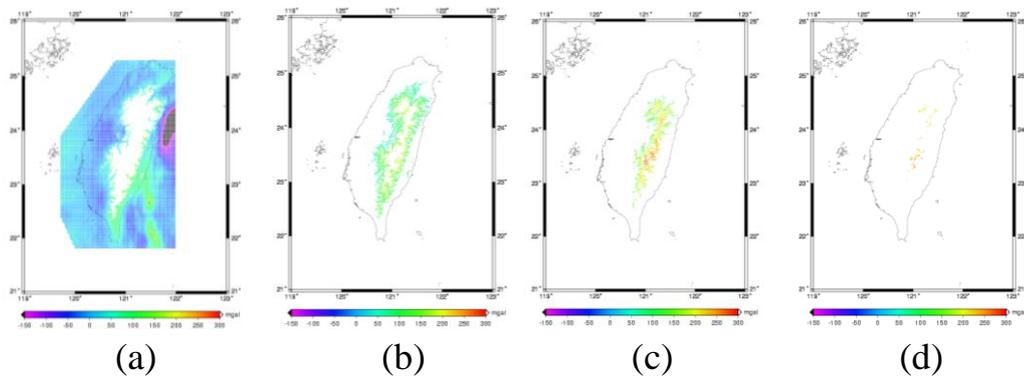


圖 4.2、5000 公尺航高空載重力資料(Data B)對應於地形高度變化的分布情形
(a) $0 \text{ km} < E < 1 \text{ km}$, (b) $1 \text{ km} < E < 2 \text{ km}$, (c) $2 \text{ km} < E < 3 \text{ km}$ and (d) $3 \text{ km} < E <$

5. 大地起伏計算

由於整合後之重力異常為網格資料，考慮大地水準面計算效率，使用以 FFT 為基礎的 Stokes 公式來計算大地水準面模式，本計畫所使用的 FFT 方法參考 Hwang et al. (2007)及 Hsiao and Hwang (2011)。本計畫使用 Stokes 積分搭配去除回復法分別將上述四組重力模型進行重力法大地起伏的計算，長波長分量使用 EGM08 模型展開至 720 階，短波長分量則考慮殘餘地形模型(RTM) (Forsberg, 1984)。最後透過七條檢核線進行重力法大地起伏模型的精度評估，表 5.1 為 4 個不同階段之重力法大地起伏模型與七條檢核線差異的標準偏差，結果顯示隨著整合對應地形高度由低至高的空載資料(圖 4.2(b)-(c))，不僅於六條檢核線上皆有改善，更成功的改善中橫檢核線(Central)的大地起伏精度至 2 公分。

表 5.1 四個不同階段之重力法大地起伏模型與七條檢核線的差異統計，單位:公尺

	north	east	central	south	Tai3	Tai9	Tai18
階段 1	0.038	0.102	0.130	0.199	0.043	0.153	0.183
階段 2	0.019	0.079	0.063	0.125	0.031	0.105	0.131
階段 3	0.016	0.074	0.020	0.038	0.039	0.098	0.82
階段 4	0.015	0.070	0.020	0.036	0.039	0.097	0.80

6. 臺灣混合型 (HYBRID) 大地起伏模型

為了於高程現代化的應用中提供 Global Navigation Satellite System (GNSS) 使用者具信賴的 Geoid 模型來進行橢球高與正高的高程轉換介面，解決重力法大地起伏模型與觀測法大地起伏(GPS/leveling)之系統性的偏移量，吾人利用除了上述的 6 條檢核線外，還包含內政部所提供之一等一級、一等二級水準點上之 GPS 資料，共約兩千點觀測法大地起伏來進行系統性偏移的修正。具體做法為透過這些觀測法大地起伏的平面位置資訊內差出重力法大地起伏的值，將相對應位置上的所有觀測法大地起伏值與重力法大地起伏值相減，並透過 GMT 軟體中的”surface”指令將此差異量製作成一網格資料，以此網格資料修正至原重力法大地起伏模型，稱此模型為混合型 (hybrid) 大地起伏模型，此模型是將階段 4

的結果與所有 GPS/Leveling 資料進行整合，檢核成果如表 6.1，此表說明此模型的精度。然而，由於 GPS/Leveling 資料分布不夠均勻，因而可能於網格化時產生系統誤差。

表 6.1 混合型大地起伏檢核成果統計(單位:公尺)

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

透過整合臺灣各種不同類型的重力資料，一個 1'x1'自由空間重力網格已經建立起來，此重力網格不僅擁有最新的陸測重力資料，透過整合空載重力資料，山區及東西部沿海的重力訊號也更為詳細。考慮對應不同高度的 5000 公尺航高空載重力資料，測試了 4 個不同階段的大地起伏模型，結果顯示空載重力資料可以改善山區的大地起伏精度。

7. 推廣 geoid 在防災、監測及測繪之應用

7.1 光達應用

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

$$H = h - N \quad (7-1)$$

其中 h 、 N 分別為橢球高與大地起伏。透過大地水準面模式可於任何位置獲得 N 。舉例來說，圖 7.1(a)、圖 7.1(b)皆為陽明山的光達點雲分布圖，且分別建構於不同高程基準的高程變化，圖 7.1(a)為相對於參考橢球面的橢球高，圖 7.1(b)為相對於大地水準面的正高，圖 7.2 為對應光達點雲位置上的大地起伏值分布圖，大地起伏值平均約 20 公尺並隨著高程變化。透過經過此研究區的五個一等水準點正高來與光達所測得正高(經過高程轉換)進行精度評估，正高差異約為 -4.047 m 至 -0.075 m。其中幾點較大差異歸因於光達觀測量的誤差，必須更進一步於光達點雲數據處理上進行改善來減少此差異量。此例在於強調大地水準面模式於光達應用中的重要性。本計畫發展的大地水準面模式已廣泛的應用於橢球高與正高間的轉換。

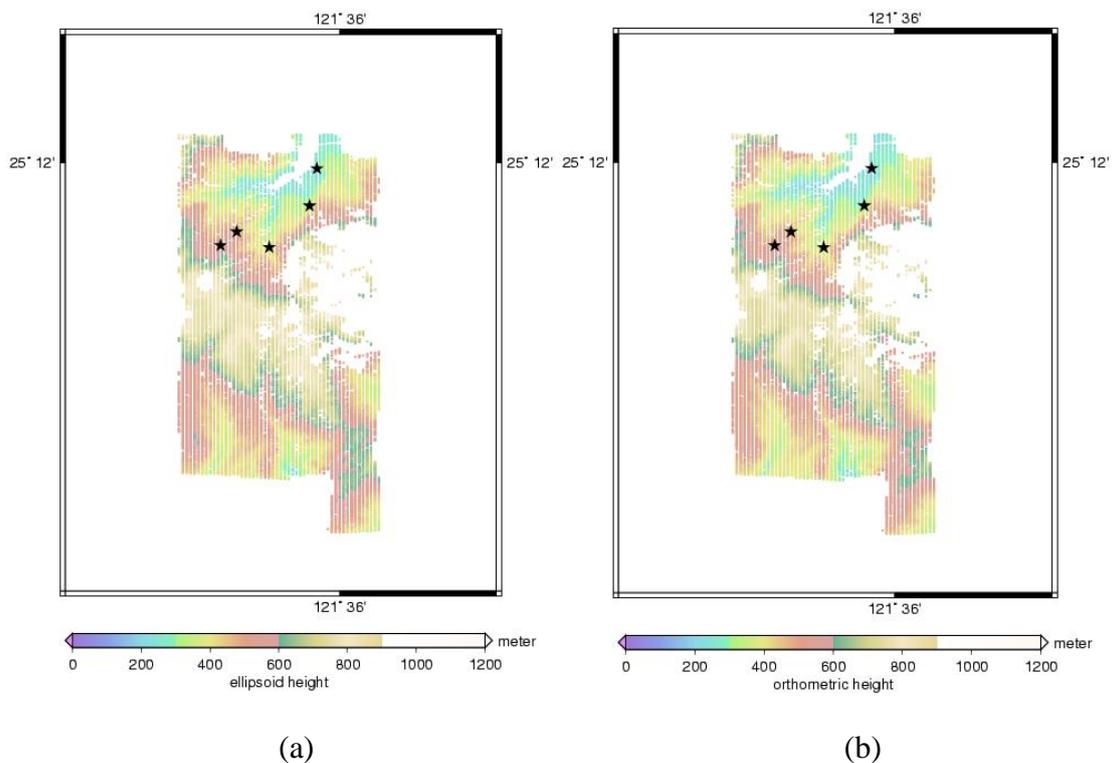


圖 7.1、施測於陽明山的光達點雲資料(a)橢球高(b)正高

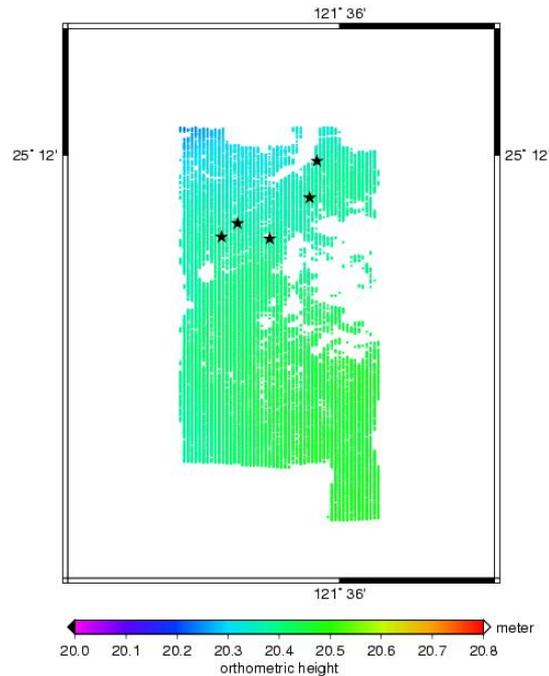


圖 7.2、對應於光達點雲位置上的大地起伏值分布圖

7.2 淹水範圍估計

地球的大氣和海洋因溫室效應而造成溫度上升，南、北極及格陵蘭冰層融化使得海面上升，臨海地勢較低之區域將面臨被淹沒的困境。透過靜態淹水模擬可了解較易受到海水淹沒區域之分布範圍，並以此結果當做防災規畫之依據。由於存在水往低處流的事實，水的流動不僅僅是依據著地形高低，最主要是受到重力等位面的影響，因而實際上淹水與否取決於大地水準面(geoid)。過去淹水模擬都是直接使用數值高程模型(DEM)當基準，然而此模型之高程基準主要分為橢球高與正高兩種系統，淹水模擬應選用正高系統之模型。廖真如(2010)結合交通大學發展的大地水準面模式及地形進行地面淹水狀況的推估，使用的數值高程資料為 2000 年太空梭雷達製圖任務(SRTM)於台灣地區之資料，此 SRTM 高程系統建立於 EGM96 上，由於此模型僅展開至 360 階，空間解析度不佳，因而將其參考面轉換至空間解析度較高之重力大地起伏值(Hwang et al., 2007)。圖 7.3 為全台灣

地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖，其結果顯示當橢球高與正高之淹水面積於水深 10 公尺以內所造成的範圍差異很大，因此若使用橢球高模擬會產生低估的情形，採用正高進行淹水模擬才能獲得較正確的資訊。

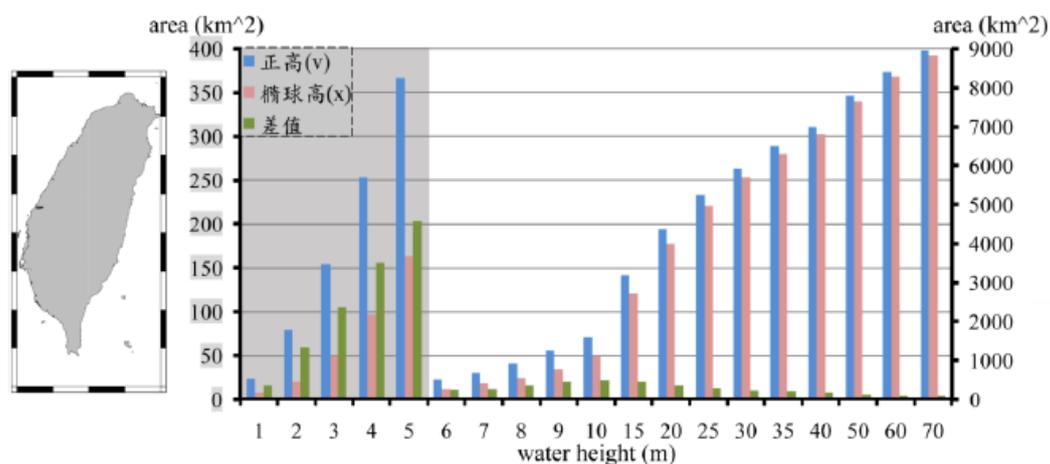


圖 7.3、全台灣地區正高與橢球高之不同高度的淹溢面積統計表及其長條圖(摘錄至(廖真如, 2010))

7.3 測繪及高程現代化

提議台灣發展高程現代化需採用本計畫所發展的大地水準面模式，並擬定台灣高程現代化芻議如下：

I. 政府部分：

1. 發展與維護大地水準面模式
 - 蒐集與更新重力資料庫
 - 使用最新的全球重力參考場模型
 - 建立全台灣大地水準面模式的誤差模型
 - 根據地球動力估計大地水準面模式的變化

2. 決定所有 eGPS 站的傳統正高
 - 定義及維護基隆與離島高程基準並決定高程基準差異
 - 採用傳統水準測量來決定所有 eGPS 的正高，測量規範達最高標準

- 利用連續 GPS 決定 eGPS 站垂直速度場
- 增加下列 eGPS 軟體的數據處理能力
 1. 透過差分 eGPS 站與使用者間的橢球高與大地起伏差來決定兩者間的正高差
 2. 利用使用者的 GPS 定位誤差(基線長度或其他等因素)、大地水準面模式誤差模型來估計使用者的正高精度
- 修正離島與本島之高程基準差異量

表 7.1: 離島與本島之高程基準差異量，單位:公尺

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

II. 使用者部分:

1. 視所需之橢球高精度來決定所採用的 GPS 定位時間長短；其橢球高精度可另行估計
2. 使用 eGPS 計算軟體來決定正高及其誤差

以下為一案例之測試，研究區域為恆春半島上之 eGPS 測量成果，包含 4 個追蹤站及台一線、台九線之水準點，共 126 個點(如圖 1 所示)。一等水準點測到 4 個 eGPS 站之 ARP 使用一等水準測量作業規範 $\sigma = 2.5 \text{ mm}/\text{SQRT}(K)$ 。此外，eGPS 測量之橢球高的精度約為 10-15 cm。表 7.2 結果顯示四個追蹤站的水準正高與本計畫模型所推算的正高差異約數公分，表 7.3 顯示動態 GPS 橢球高搭配大地水準面模式來推算正高，標準偏差可達 7.7 公分。

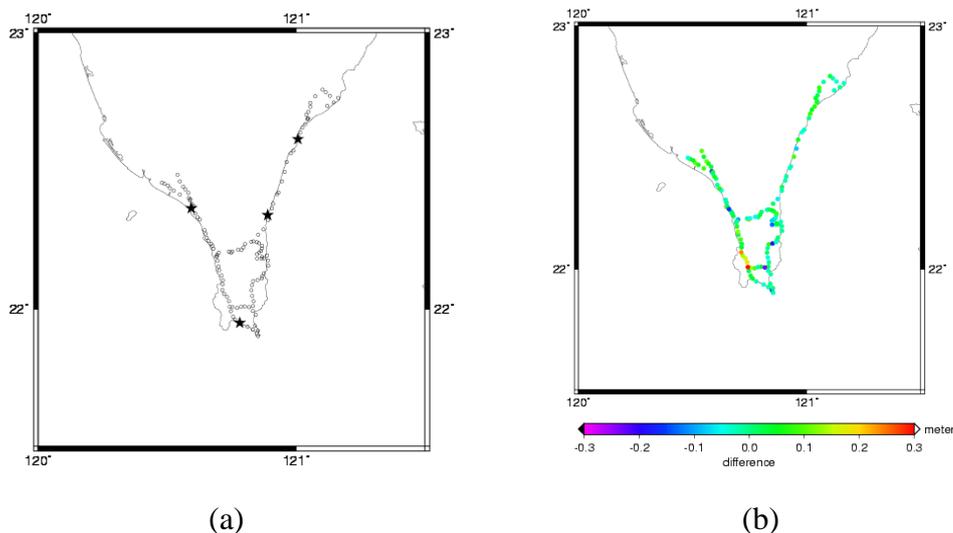


圖 7.4、(a) eGPS 點位分布圖；(b) eGPS 正高差異分布圖

表 7.2: 4 個追蹤站的 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異，單位:公尺

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

表 7.3: eGPS 的 Geoid-based 正高與 TWVD2001 正高之差異統計，單位:公尺

	最大值	最小值	平均值	標準偏差
Geoid-based_H -TWVD2001_H	0.299	-0.234	0.011	0.077

7.4 其他應用(中國大陸案例)

近幾年來中國大陸利用高精度區域性擬大地水準面於工程上應用的例子很多，例如：

(1) 建橋工程(Bridge engineering)

- A. 2008 年，青島海灣大橋的擬大地水準面運用 Helmert's 2nd condensation 理論進行計算，使用了 1364 點重力資料，採用的參考重力場為 EIG04C，重力法擬大地水準面結合 15 個高精度 GPS/Leveling 資料的精度約為 0.004m。

- B. 於建設港珠澳大橋時，Li et al. (2009)計算橫跨香港-珠海-澳門區域的擬大地水準面的，使用了 106 點重力資料及 3" X 3" SRTM 的數值地形資料，採用結合 GGM02C 與 WDM94 全球重力場模型作為參考重力場，使用 Stokes 公式搭配 Helmert's 2nd condensation 理論來進行擬大地水準面的計算，重力法擬大地水準面與 16 個高精度的 GPS/Leveling 比較後精度約為 0.016m，其混合型擬大地水準面(整合 GPS/Leveling 後)的精度約為 0.006m。於大尺度跨海大橋建設的應用中，透過結合高精度區域性擬大地水準面與 GPS 技術來決定高程，已經變成中國目前最新的趨勢。

(2) 公路工程(Highway engineering)

- A. Li et al. (2009)計算了橫跨義烏-明水-駱駝涓子(Yiwu-Mingshui-Luotuojuanzi)三個城市的區域性擬大地水準面來輔助應用於公路工程的建設，使用了 3360 點重力資料及 7 個高精度的 GPS/Leveling 資料，採用 EGM08 作為參考重力場，重力法擬大地水準面的精度約為 0.040m
- B. 應用於綿竹-茂縣(Mianzhu-Maoxian)公路建設所計算的區域性擬大地水準面使用了 576 點重力資料及 20 點 GPS/Leveling 資料，參考重力場為 EIGEN04C，重力法擬大地水準面與混合型擬大地水準面精度分別約為 0.045m 與 0.015m (Li et al., 2009)。

(3) 災區重建(Disaster area reconstruction)

- A. 為了提供 2008 年汶川 (Wenchuan)地震災區擬大地水準面模型作為災區快速重建的資源，汶川災區的擬大地水準面分別使用 2997 點重力資料及 122 個高精度的 GPS/Leveling 資料進行計算，採用的參考重力場為 EIGEN04C，重力法擬大地水準面與混合型擬大地水準面精度分別約為 0.045m 與 0.015m

B. 2010 年，玉樹地震災區的擬大地水準面分別使用了 729 個重力資料與 7 個高精度的 GPS/Leveling 資料進行計算，採用的參考重力場為 EIGEN03C，重力法擬大地水準面的精度約為 0.046m。

中國國家測繪局(National State Bureau of Surveying and Mapping , SBSM)認為汶川、玉樹兩個災區的區域性擬大地水準面模型可作為災區快速重建進行基本測繪的資源。於災區重建的應用上，汶川災區的大地水準面提供了高精度的高程參考面來進行基本的測繪工作，相較於傳統的水準測量，不僅耗費大量人力、物力且相當沒有效率，反觀結合 GPS 與高精度的擬大地水準面模型既經濟又有效率。

8. 結論

本計畫已成功發展公分級精度的台灣新一代大地水準面模式，此模型目前被廣泛的應用在橢球高與正高之間的轉換如下：

- 本計畫的大地水準面模式已被內政部(<http://www.gps.moi.gov.tw/sscenter/>)、國土測繪中心 (<http://www.nlsc.gov.tw>) 及中央地調所 (<http://www.moeacgs.gov.tw/>)核定為橢球高與正高轉換的官方模式，特別是在光達的應用
- 台灣大部分的測量公司使用本計畫所發展的大地水準面模式進行高程轉換
- 台灣目前擁有七台光達儀器，且台灣光達產業被預估為約每年有 1 億台幣產值，本計畫所發展的大地水準面模式在光達產製正高 DEM 應用上為不可或缺的資料
- 台灣高程現代化計畫目前正在執行中，本計畫所發展的大地水準面模式將與 eGPS 配合應用在的高程現代化
- 應用本計畫所發展的大地水準面模式及 GPS、水準及驗潮站的資料，估計台灣本島及離島間的高程基準差異

本計畫發表之相關著作:

(1) Referee journal papers

Hwang, C, TC Cheng, CC Cheng, and WC Hung, Land subsidence using absolute and relative gravimetry: a case study in central Taiwan, Survey Review, Vol. 42, No.315, pp. 27-39, 2010. (IF=0.452)

Guo, JY, YG Gao, C Hwang, and JL Sun, A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans, SCIENCE CHINA-EARTH SCIENCES, Vol. 53, No. 4, pp. 610-616, 2010. (IF=1.245)

Hsiao, YS, and C Hwang, Topography-Assisted Downward Continuation of Airborne Gravity: Application to Geoid Determination in Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO), Vol.21, No.4, pp. 627-637, 2011. doi: 10.3319/TAO.2009.07.09.01(T) (corresponding author) (IF=0.643)

Yang, Y, C Hwang, HJ Hsu, D E, and H Wang, A sub-waveform threshold retracker for ERS-1 altimetry: a case study in the Antarctic Ocean, Computers & Geosciences, Vol. 54, No.1, pp. 113-118, 2011. (corresponding author) (IF=1.632)

Hwang, C, HC Shih, YS Hsiao and CH Huang, Airborne gravity surveys over Taiwan Island and Strait, Kuroshio Current and South China Sea: comparison of GPS and gravity accuracies at different flight altitudes, Marine Geodesy, in press, 2011.

(2) Conference papers

黃金維, 許宏銳, 盧郁芳, 陳彥欉, 2010。結合多衛星測高與地面重力資料之整合重力場, 第二十八屆測量及空間資訊研討會, 中央大學, 中壢。

黃金維, 許宏銳, 2010。新台灣重力及水準面模式, 第二十九屆測量及空間資訊研討會, 台北大學, 台北。

揚名, 黃金維, 陳國華, 許宏銳, 吳曉雯, 2011。大地起伏模型對於台灣地區發展高程

現代化的貢獻，第三十屆測量及空間資訊研討會，中興大學，台中。

Hwang, C, Observation and analysis of gravity data for earth science application: from static to moving platform, International Geomatics Forum, Qingdao, China, May 28-30, 2009. (keynote speech)

Huang, CH, HC Shih, and C Hwang, A study on the combination of airborne, altimetry and terrestrial gravity data for geoid determination, International Workshop on Gravity, GPS and Satellite Altimetry Observations of Tibet, Xingjiang and Siberia, Urumuqi, Xingjiang, China, August 20-22, 2009.

Hsu, HJ, C Hwang, YF Lu, YD Chen, A new hybrid gravity field from multi-satellite altimetry and surface gravity data, Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, June 22-25, 2010

Cheng, C., R Kao, N Hsieh, and C Hwang, Monitoring the gravity changes of seismic deformation by the absolute gravimetric network, 2nd Asia Workshop on Superconducting Gravimetry, Taipei, 2010

Hsu, HJ, C Hwang, and Y Yang, Optimal combination of space-borne, airborne, shipborne and land-based gravity for geoid modeling in Taiwan, Second International Symposium of the International Gravity Field Service, University of Alaska, Fairbanks, Sep 20-22, 2010.

Huang, CH, and C Hwang, Data processing for near-shore marine gravity survey with a small vessel, Second International Symposium of the International Gravity Field Service, University of Alaska, Fairbanks, Sep 20-22, 2010.

Hwang, C, CH Huang, HJ Hsu, YS Hsiao, and HC Shih, Regional geoid of Taiwan from kinematic and static gravity: consideration of real gravity gradient and height datum difference, International Union of Geodesy and Geophysics, Melbourne, Australia, June 28- July 7, 2011.

Hsu, HJ, C Hwang, and Y Yang, Integrated marine gravity field in the south-china sea from multi-satellite altimetry and shipborne gravity. International Union of Geodesy and Geophysics, Melbourne, Australia, June 28- July 7, 2011.

11. Reference

內政部國土測繪中心 e-GPS 即時動態定位系統入口網站：

<http://www.egps.nlsc.gov.tw/index.html>

- 黃金維、郭重言、儲慶美、甯方璽，1998，臺灣重力網平差及重力資料整合，測量工程，第 40 卷，第三期，第 71-82 頁。
- 黃金維，2001，一等一級水準點上實施重力測量工作報告書，內政部。
- 黃金維，2005，空載重力技術研究工作報告書，內政部。
- 曾清涼、楊名、劉啟清、余致義、林宏麟，2001，一等一級水準網測量督導查核工作總報告書，國立成功大學衛星資訊研究中心，臺南。
- 曾清涼、楊名、劉啟清、余致義、林宏麟，2003，一等二級水準網測量督導查核工作總報告書，國立成功大學衛星資訊研究中心，臺南。
- 陳春盛，2003，一等二級水準點上實施重力測量工作報告書，內政部。
- 陳俊勇、張全德、張鵬，2007，對中國高程控制往現代化工作的思考，武漢大學學報-信息科學版，第 32 卷，第 11 期。
- Anderson, O.B., Knudsen, P., and Berry, P.A.M., 2009. The DNSC08GRA global marine gravity field from double retraced satellite altimetry, *J. Geod.*, 84 (3), 191-199, DOI:10.1007/s00190-009-0355-9
- Amos, M.J., and Featherstone, W.E., 2009. Unification of New Zealand's local vertical datums: iterative gravimetric quasigeoid computations, *J. Geod.* 83(1): 57-68, doi: 10.1007/s00190-008-0232-y
- Ching, K.-E., Hsieh, M.-L., Johnson, K. M., Chen, K.-H., Rau, R.-J., and Yang, M. 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *J. Geophys. Res.*, 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242
- Claessens, S.J., Hirt, C., Amos, M.J., Featherstone, W.E., and Kirby, J.F., 2011. The NZGEOID09 model of New Zealand, *Survey Review* 43(319): 2-15, doi: 10.1179/003962610X12747001420780
- Deng, X., 2003. Improvement of Geodetic Parameter Estimation in Coastal Regions from Satellite Radar Altimetry, PhD. dissertation, Curtin University of Technology, Australia.
- Forsberg, R., 1984. A Study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical inversion Methods in Gravity Field Modelling, Rept. 355, Dept.

- of Geod. Sci. and Surv., The Ohio State University, Columbus.
- Featherstone, W.E., Evans, J.D., and Olliver, J.G., 1998. A Meissl-modified Vanicek and Kleusberg kernel to reduce the truncation error in gravimetric geoid computations, *J. Geod.*, 72(3): 154-160, doi: 10.1007/s001900050157
- Geographical Survey Institute Long-Term Plan for Basic Survey, http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30008.html
- Heiskanen, W.A., and Moritz, H., 1967. *Physical Geodesy*, W.H. Fredman and company, San Francisco and London.
- Hsiao, Y.S., and Hwang, C., 2011. Topography-Assisted Downward Continuation of Airborne Gravity: Application to Geoid Determination in Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol.21, No.4., doi: 10.3319/TAO.2009.07.09.01(T)
- Hsu, S.K., Liu, C.S., Shyu, C.T., Liu, S.Y., Sibuet, J.C., Lallemand, S., Wang, C., and Reed, D., 1998. New Gravity and Magnetic Anomaly Maps in the Taiwan-Luzon Region and their Preliminary Interpretation, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 9, 509-532.
- Hwang, C., and Parsons, B., 1996. An optimal procedure for deriving marine gravity from multi-satellite altimetry, *Geophys. J. Int.*, 125, 705-718,
- Hwang, C., 1998, Inverse Vening Meinesz formula and deflection-geoid formula: applications to the predictions of gravity and geoid over the South China Sea, *J. Geod.*, 72, 304-312.
- Hwang, C., and Wang, C.G., 2002. New gravity anomaly grid of Taiwan, *J. Surv. Eng.*, 44 (2), 1-22. (in Chinese)
- Hwang, C., Wang, C.G., and Hsiao, Y.S., 2003. Terrain correction computation using Gaussian quadrature: effect of innermost zone, *Comp. Geosci.*, 29 (10), 1259-1268.
- Hwang, C., and HY Hsu, 2008, Shallow-water gravity anomalies from satellite altimetry: case studies in the East China Sea and Taiwan Strait, *J. Chinese Inst. Eng.*, 31 (5), 841-851.
- Hwang, C., Guo, J., Deng, X., Hsu, H.Y., and Liu, Y., 2006. Coastal gravity anomaly from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of

- airborne gravity data, *J. Geod.*, 80 (4), 204-216, DOI10.1007/s00190-062-0052-x.
- Hwang, C., Hsiao, Y.S., Shih, H.C., Yang, M., Chen, K.H., Forsberg, R., and Olesen, A.V., 2007. Geodetic and geophysical results from a Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment, *J. Geophys. Res.*, 112, B04407, doi:10.1029/2005JB004220.
- Hwang, C., Hung, W.C., and Liu, C.H., 2008. Results of geodetic and geotechnical monitoring of subsidence for Taiwan High Speed Rail operation. *Natural Hazards*, 47, 1-16.
- Kuroishi, Y., and Keller, W., 2005. Wavelet approach to improvement of gravity field-geoid modeling for Japan. *J Geophys. Res.* 110 (B3): Art. No. B03402.
- Li, J., Ning, J., Chao, D., and Jiang, W., 2009. Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 using GPS/leveling and gravity data in China. *Newton's bulletin*, No.4, p.252-275. LCR, 2003, Instruction manual for Lacoste & Romberg model S air-sea dynamic gravity meter system II, Lacoste & Romberg Inc., Austin, Texas.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., and Factor, J.K., 2008. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. Presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18.
- Moritz, H., 1980. *Advanced Physical Geodesy*, Karlsruhe: Wichmann, Abacus Press.
- Roman, D., Wang, Y.M., Saleh, J., and Li, X., 2009. National Geoid height Models for the United States: USGG2009 and GEOID09, ACSM-MARLS-UCLS-WFPS Conference 2009, 20-23 FEB 2009, Salt Lake City, UT.
- Sandwell, D.T., and Smith, W.H.F., 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate, *Journal of Geophysical Research*, 114, B01411, doi:10.1029/2008JB006008.
- Tscherning, C.C., and Rapp, R.H., 1974. Closed Covariance Expressions for Gravity Anomalies. Geoid Undulations, and the Deflections of the Vertical Implied by Anomaly Degree-Variance Models, Reports of the Department of Geodetic

Science, 208, Ohio State University.

Wang, Y.M., Saleh, J., Li, X., and Roman, D.R., 2009. The US gravimetric geoid of 2009 (USGG2009): model development and evaluation, *J. Geod.*, DOI 10.1007/s00190-011-0506-7.

Wessel, P., and Watts, A.B., 1998. On the accuracy of marine gravity measurements, *J. Geophys. Res.*, 93, 393-413.

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

Yen, H.Y., Yeh, Y.H., Lin, C.H., Yu, G.K., and Tsai, Y.B., 1990. Free-Air Gravity Map of Taiwan and Its Applications, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 1, 43-156.

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