

陸海交界處大地起伏建模精度探討：以臺灣東部為例

楊致逸¹ 蕭宇伸^{2*}

摘要

本研究以臺灣東部花蓮清水斷崖沿岸為研究區，探討數值地形模型(DEM)、數值海底地形模型(DBM)空間解析度與海岸線定位精度對陸海交界處重力法大地起伏建模之影響。研究採用 GSHHG 與人工數化海岸線，結合不同解析度 DEM-DBM，於去除-回復架構下，以剩餘地形模型及最小二乘配置法建立大地起伏模型，並以 GNSS/水準觀測資料進行精度檢核。結果顯示，GSHHG 海岸線於斷崖海岸與實際海岸線存在明顯差異，易造成海岸附近地形遮罩與改正誤差；人工數化海岸線可提升陸海邊界一致性與模型穩定性。解析度比較顯示，3"×3" DEM-DBM 之整體精度優於 9"×9"與 1"×1"。研究結果指出，精確海岸線與適當地形解析度為提升陸海交界區大地起伏建模品質之關鍵。

關鍵詞：數值高程模型、數值海底地形模型、大地起伏建模、陸海交界區

1. 前言

在地球科學與空間資訊領域中，大地水準面為關鍵參考面，廣泛應用在高程系統中橢球高轉成正高的高程轉換依據。尤其不進行傳統水準測量的條件下，準確大地起伏模型更成為高程基準現代化不可或缺的資料來源，應用涵蓋海平面變遷監測、工程測量與地殼變形等多個領域。然而在地形變化劇烈的區域，例如臺灣東部的花蓮沿海，地形於短距離內自高山急遽過渡至深海，組成複雜的陸海交界帶，使得大地起伏建模面臨極大挑戰。在此類區域中，除了重力資料外，地形的準確性對大地起伏建模成果有顯著影響，而數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)與數值海底地形模型(Digital Bathymetric Model, DBM)於陸海銜接區域的準確性，應是關鍵。

大地起伏模型的計算方法大致可分為三類：重力法、幾何法與天文大地法(Heiskanen & Moritz, 1967)。重力法依據大地起伏與重力異常之物理關係推算地形改正與起伏量，為臺灣最主要之大地起伏建模方法，近年來臺灣大地起伏模型計算均採用之，

例如許宏銳(2014)、內政部(2023、2025)等；在幾何法方面，是透過 GNSS 橢球高與水準正高之差值得到觀測大地起伏值，其精度頗高，然而此方法難以完整建構大地起伏面，故一般較常應用於檢核重力法大地起伏模型之成果；在天文大地法方面，則依靠垂線偏差與天文測量資料獲得大地起伏資訊，目前在國際上已經非常少用此法。大地起伏無論採用上述何種方法進行建模，在地形變化劇烈的地區，都需要精確的 DEM 進行地形相關改正。臺灣重力法大地起伏建模方面，崔國強 (1995) 早期採用 Stokes 積分法建立臺灣地區重力法大地起伏模型，Hwang (1997) 進一步導入最小二乘配置法(Least-Squares Collocation, LSC)獲得臺灣重力法大地起伏模型；Hwang & Hsiao (2003)亦使用 LSC 法，結合剩餘地形模型(Residual Terrain Model, RTM)理論，計算臺灣重力法大地起伏模型，RTM 原理為考慮研究區位細微地形對大地起伏模型的影響，故必須採用研究區位的 DEM 進行計算；內政部於 2005 年推動之空載重力測量作業(內政部, 2005)亦採用 RTM + LSC 結構納入建模流程，驗證該大地起伏模型在平地可達公分級精度；目前內政部公告的臺灣大地

¹ 國立中興大學水土保持學系 碩士

² 國立中興大學水土保持學系 副教授

* 通訊作者, E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw

收到日期：民國 114 年 07 月 30 日

修改日期：民國 114 年 09 月 03 日

接受日期：民國 115 年 02 月 16 日

起伏模型 TWHYGEO2014，採用 Stokes 積分法與最小二乘配置 LSC 法計算，而在 RTM 方面，採用內政部 3 秒× 3 秒以及 9 秒× 9 秒網格之 DEM (<https://www.nlsc.gov.tw/cp.aspx?n=1551>)，亦達平地公分級精度。近年來國際上採用 RTM + LSC 方法計算大地起伏的研究包括 Yildiz (2012)、Willberg *et al.* (2019)、Bucha *et al.* (2019)、Vu *et al.* (2019) 和 Jiang *et al.* (2020)等，也均獲得良好的成果。

無論採用 Stokes 或 LSC 計算方法，地形的準確度與解析度均非常重要，Hwang *et al.* (2006) 探討 RTM 技術(如稜柱積分與 Gaussian 積分法)對模型準確度之影響，指出地形遮罩與積分區域設定對山區與海岸區模型精度有關鍵性貢獻。地形遮罩即海陸地形融合前，依據海岸線位置所製作的 0/1 檔地形，積分區域設定即積分時，計算半徑之選擇。在大地起伏建模中，陸海交界地區長期被視為誤差高度集中的敏感區域。該區域常受限於 DEM 與 DBM 融合精度不一致、海岸線定義模糊等問題，進而影響地形遮罩生成與地形改正的準確性 (Hwang *et al.*, 2020)。隨著 DEM 空間解析度的提高，模型對邊界幾何與積分設計的敏感度亦隨之增加，使得邊界積分不足與遮罩不連續問題更為明顯 (Kuhn *et al.*, 2009)。Forsberg (1984) 在建立 RTM 理論時即指出，陸海交界不連續的地形將對 Stokes 積分產生邊界震盪效應。後續研究如 Omang & Forsberg (2000) 比較 Helmert 壓縮法與 RTM 方法在海岸區的表現，指出若高頻地形起伏未妥善處理，模型將產生局部偏移現象。由上述文獻可得知，在高解析度大地水準面建模中，海岸線定義與地形遮罩的準確性，已成為影響陸海交界區建模穩定性與誤差分布的關鍵因素。因此，針對海岸線進行人工數化修正與精細遮罩製作，是提升地形改正精度及重力場模型可靠度的重要研究方向。然而，針對 DEM - DBM 在陸海交界區之精度評估與海岸線誤差對地形改正與大地起伏模型精度的影響，國內外相關研究仍相對有限。本文以臺灣花蓮東部變化最為劇烈的清水斷崖、海岸山脈為研究區域，首先蒐集內政部 20 m DEM 與 50 m DBM，再分別搭配

Hierarchical High-resolution Geography, GSHHG)海岸線及人工數化海岸線，產製不同海岸線、不同空間解析度的 DEM-DBM 連續模型，接著以 LSC+RTM 方法計算各測試例的大地起伏模型，最後利用 GNSS/水準測量檢核點分析各測試例的準確性，具體步驟如圖 1 所示。

2. 研究方法

2.1 海岸線

海岸線的取得是本研究中建立高精度陸海邊界模型的關鍵步驟，其目的在於提升 DEM 與 DBM 融合時之邊界一致性。本文海岸線分為 GSHHG 與人工數化，GSHHG 取自通用製圖工具 (Generic Mapping Tools, GMT) 6.5.0 軟體 (Wessel *et al.*, 2019)，而人工數化海岸線是以 google earth 衛星影像作為底圖，於岸線明顯之海陸交界處，以人工點選方式逐點標示實際海岸線位置，點距約 10 m 以確保曲線連續。完成點選後，再利用 GMT 6.5.0 將點位連線形成向量化岸線。

2.2 大地起伏模型計算與精度評估

2.2.1 重力法大地起伏模型計算原理

本研究重力法大地起伏計算步驟採用去除-回復法 (Remove-Compute-Restore, RCR) (Forsberg, 1984)，RCR 是由長波長(低頻)、中波長(中頻)和短波長(高頻)所組成。長波長使用全球大地位模式計算出長波長重力異常與大地起伏，短波長則採用 RTM 計算出短波長重力異常與大地起伏，將重力異常扣除長波長和短波長重力效應後，以 LSC 計算中波長大地起伏，再將長波長和短波長大地起伏加回，得到似大地起伏，最後進行似大地起伏改正，得到最終重力法大地起伏。詳細計算過程如下內政部 (2005)：

$$\Delta N_{quasi} = \Delta N_{long} + \Delta N_{res} + \Delta N_{short} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta g = \Delta g_{long} + \Delta g_{res} + \Delta g_{short} \dots \dots \dots (2)$$

其中 ΔN_{quasi} 為似大地起伏； Δg 為重力異常； ΔN_{long} 為長波長的大地起伏； Δg_{long} 為長波長的重力異常； ΔN_{short} 為短波長的大地起伏； Δg_{short} 為短波長的重力異常； ΔN_{res} 為中波長的大地起伏； Δg_{res} 為中波長的重力異常。 Δg_{long} 與 ΔN_{long} 是採用全球大地位模式搭配球諧係數展開式進行計算。全球大地位模式為一個高解析度地球重力位模型，是透過多種重力觀測資料的整合並以球諧展開方法計算，而球諧係數展開式公式如下(Heiskanen & Moritz, 1967)：

$$\Delta g_{long} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=2}^N (n-1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta N_{long} = R \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \dots\dots\dots (4)$$

其中 φ 和 λ 分別為緯度和經度； G 為萬有引力常數； R 為地球平均半徑； M 為地球質量； $\bar{C}_{nm}$ 及 $\bar{S}_{nm}$ 為完全正規化之地球引力位球諧級數； $\bar{P}_{nm}$ 為完全正規化 Legendre 函數； n 和 m 則分別代表階數(degree)和次數(order)。

在短波長計算方面，RTM 需要一個平滑的平均

高程面作為基準(如圖 2 所示)，以刻劃地形中短波長成分的變化。RTM 的核心概念在於分離出地形高頻變化所對應的重力擾動，進而補償傳統建模方法在處理高頻重力效應上的不足。特別是在高山地區或地形劇烈起伏的區域，若僅依賴全球重力位模型與區域重力觀測資料，往往難以充分捕捉地形快速變化所引起的短波長重力訊號。這些高頻成分主要源自地表形狀的微細變化，亦即所謂的地形效應，若未妥善補償，將對大地水準面模型產生系統性偏差。透過 RTM 方法結合高解析度 DEM，可有效強化地形改正在短波長頻段的表現，進一步提升複雜地形區域大地水準面模型的精度與穩定性。

RTM 方法計算的短波長大地起伏 N_{short} 所採用之公式如下 (內政部，2005)：

$$N_{short}(x_p, y_p) = \frac{G\rho}{\gamma} \int_x \int_y \int_{h_{ref}}^h \frac{dxdydz}{\sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z-h_p)^2}} \dots\dots\dots (5)$$

其中 G 為萬有引力常數、 γ 為正常重力、 ρ 為地質密度、 h 代表真實高程表面高程、 h_{ref} 代表參考高程表面高程。RTM 方法計算的短波長重力異常 Δg_{short} 公式如下(內政部，2005)：

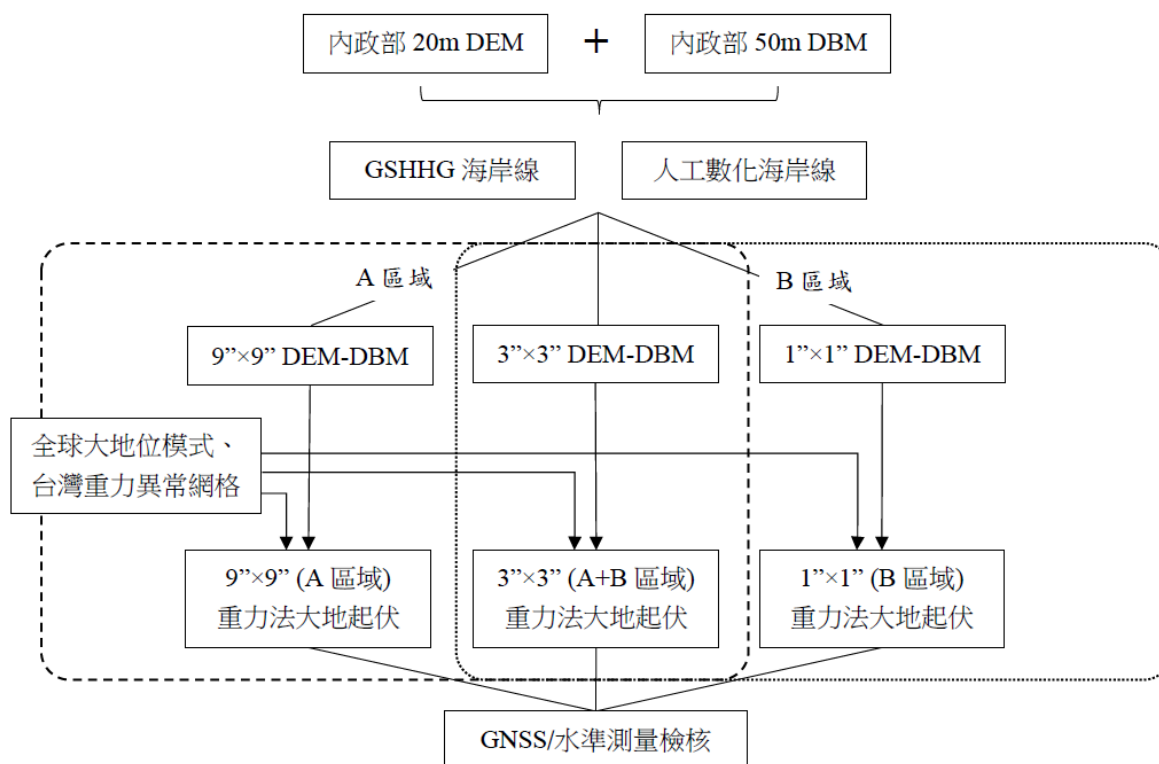


圖 1 研究流程圖

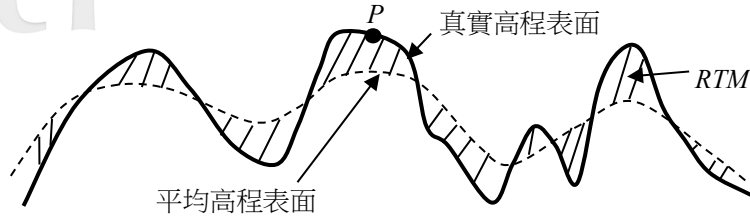


圖 2 RTM(斜線區域)示意圖，表示真實高程表面和平均高程表面之間的差異

$$\Delta g_{short}(x_p, y_p) = 2\pi G\rho(h - h_{ref}) - c(x_p, y_p) \dots (6)$$

其中 $c(x_p, y_p)$ 為地形改正量。

在中波長計算方面，是大地起伏模型計算的核心。LSC 是一種基於統計推估原理的重力場建模方法，該方法結合隨機場理論與最小二乘法，具有處理觀測資料來源多樣且精度不一致以及空間分布不均的能力。此計算公式的核心在於透過協方差函數建立觀測資料與待估場變數之間的統計相關性 (Tscherning & Rapp, 1974)。透過此協方差模型，能有效選取觀測數據，並在考慮誤差與資料相關性的情況下推估未知重力場量。LSC 在中波長大地起伏 N_{res} 計算如下(內政部，2005)：

$$N_{res} = (C_{N\Delta g})(C_{\Delta g} + D_{\Delta g})^{-1}(\Delta g_{res}) \dots \dots \dots (7)$$

其中 $C_{N\Delta g}$ 為大地起伏-重力異常間的協方差矩陣； $C_{\Delta g}$ 為重力異常間的協方差矩陣； $D_{\Delta g}$ 為重力異常誤差變異數的對角矩陣； Δg_{res} 為中波長的重力異常。最後將似大地起伏改正量 $\frac{2\pi G\rho}{\gamma}H^2$ 加上，最後得到重力法大地起伏模型，公式如下：

$$N_{grav} = N_{quasi} - \frac{2\pi G\rho}{\gamma}H^2 \dots \dots \dots (8)$$

其中 N_{quasi} 為似大地起伏模型。 N_{grav} 為最終之重力法大地起伏模型。

2.2.2 精度評估方法

本文大地起伏模型精度的評估方法是利用研究區域內 GNSS/水準測量點位，內插到重力法大地起伏模型中，並比較 GNSS/水準測量觀測大地起伏值與重力法大地起伏值的差值。在 2023 年內政部之垂直基準面時變精度檢核評估工作案中(內政部，2023)，有使用臺灣本島的 14 條特選路線作為檢核大地起伏模型精度的依據。這些路線的點位均為一

等水準點，且 GNSS 觀測時間介於 12 小時到 24 小時之間，故具有高精度的觀測大地起伏值，且這些點位已經考量坐標框架變動與地殼形變速度場問題，已經修正 GNSS 和水準測量不同時期量測結果的一致性與準確性(內政部，2025)。本文所使用的 GNSS/水準測量點位，均為該計畫使用之點位。

3. 實驗區域與實驗資料

3.1 實驗區域

本研究針對臺灣東部清水斷崖、海岸山脈等地進行大地起伏模型精度影響之探討，該區域為陸海交界處中地形最為劇烈變化之區域。清水斷崖擁有山區海拔逾 3,000 m 的高山，於短距離內陡降至鄰近海域深度超過 1,000 m 之海底，具顯著的高程落差與複雜的地貌形態。此一劇烈起伏的地形條件提供了理想的環境，以分析地形效應對大地起伏與重力異常模型的影響，特別適合探討在陸海交界帶進行地形改正與模型評估之相關議題。研究區域如圖 3 所示，分為 A 區域和 B 區域。A 區域涵蓋中央山脈臨太平洋、以及大部分海岸山脈地區，B 區域僅聚焦在清水斷崖地區。

3.2 實驗資料

數值地形模型資料陸地部分使用內政部 2024 年全台 20 m DEM，如圖 4(a)所示。數值海洋模型則是使用內政部所提供的 50 m DBM，如圖 4(b)所示，此模型由內政部水深資料庫(CARIS Bathymetry DataBASE, BDB)、國科會航跡資料及海洋學門資料庫之 200 m 網格資料組合而成。本研究結合陸地 20 m DEM 及海洋 50 m DBM，根據不同海岸線選擇、不同空間解析度選擇產製數個 DEM-DBM 地形模型加以分析。

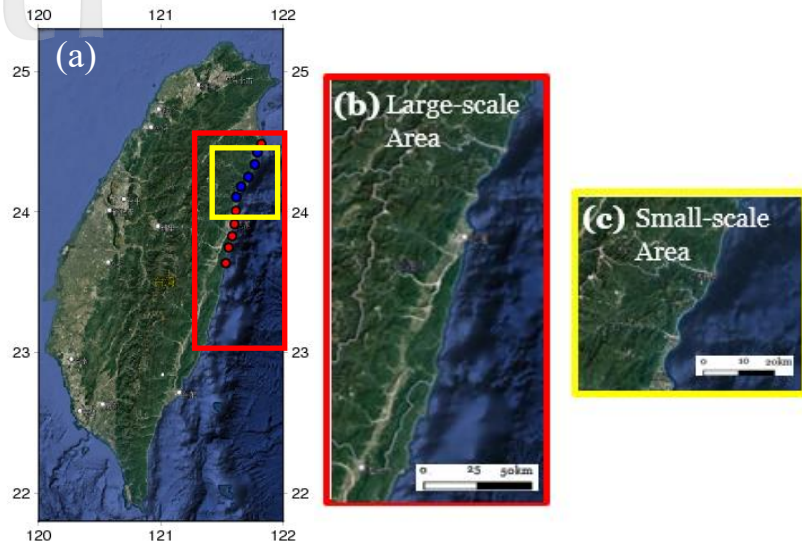


圖 3 (a) 全台衛星影像圖，紅色與藍色圓點為 GNSS/水準測量檢核點，其中紅色框為 A 區域，黃色框為 B 區域；(b) A 區域衛星影像圖；(c) B 區域衛星影像圖

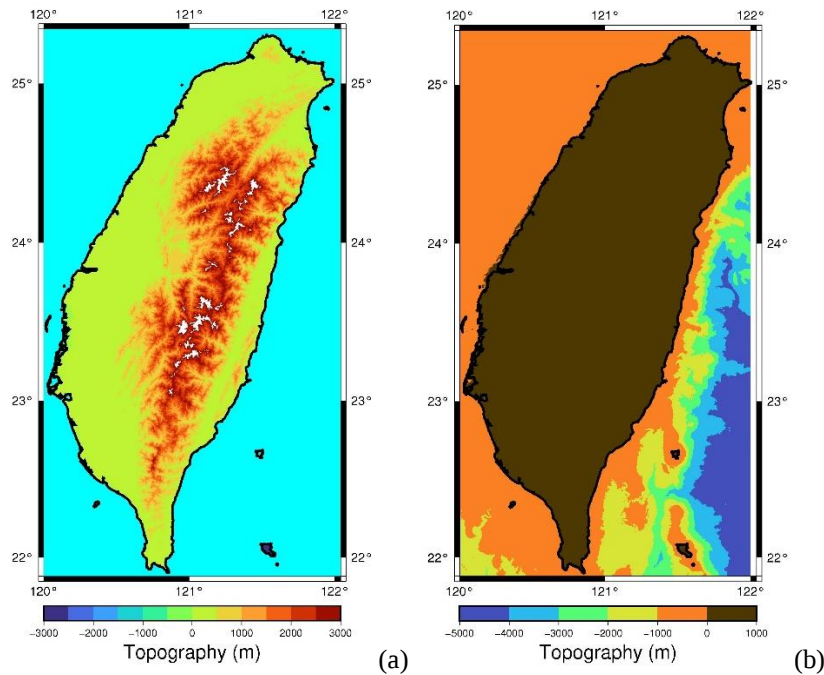


圖 4 (a) 內政部 2024 年全台 20 m DEM；(b) 內政部 50 m DBM

在長波長大地起伏計算方面，本研究使用應用最廣泛之 EGM2008 模型(Pavlis *et al.*, 2012)作為參考依據。EGM2008 球諧展開最高可達 2190 階，本研究使用 360 階來計算長波長重力異常 Δg_{long} 與長波長大地起伏 ΔN_{long} ，作為 RCR 模型中「去除」階段之基準，有助於提升後續區域模型的精度與穩定性，僅採用 360 階主要考量其對應之空間尺度約為 50 – 60 km，符合長波長重力場的典型定義，亦為區域重力與大地水準面研究中常用之分界尺度(內政部，2025)。本研究重力異常網格如圖 5 所

示，包含既有的臺灣陸測重力、船測重力及衛星測高重力組合而成，包括臺灣本島重力異常網格(內政部，2025)、最新全球海洋重力異常模型(Sandwell *et al.*, 2021)、2006 年至 2013 年的臺灣近岸船測重力資料(Hwang *et al.*, 2014)等。由圖 5 可以發現臺灣與周邊海域重力異常介於 -300 mgal 至 +300 mgal 以上。

在用於檢核重力法大地起伏模型成果的 GNSS/水準測量檢核點位置如圖 3(a)所示。A 區域和 B 區域的 GNSS/水準測量檢核點分別為 11 點(圖 3(a)紅點加藍點)和 5 點(圖 3(a)藍點)，這些位置均

具有高精度的觀測大地起伏值。觀測大地起伏值指某一地點大地水準面相對於參考橢球面之垂直距離，為建立幾何法大地起伏模型及檢核模型精度的重要依據。本研究所採用 GNSS/水準資料，乃一等一級水準點上靜態觀測 12~24 小時 GNSS。故大地起伏觀測值精度非常高，且已經考量坐標框架變動與地殼形變速度場之影響(內政部，2025)。

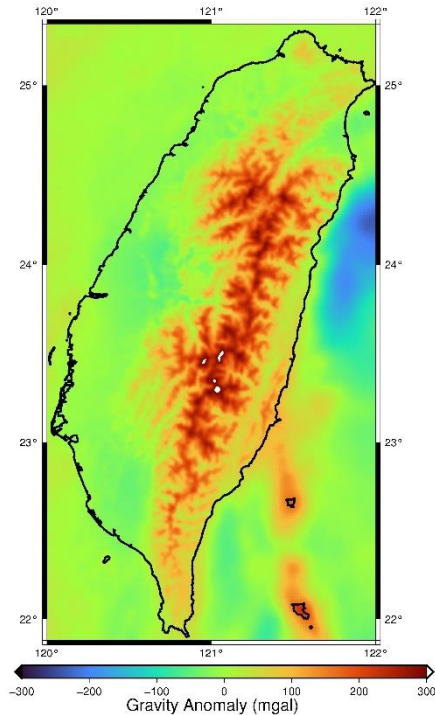
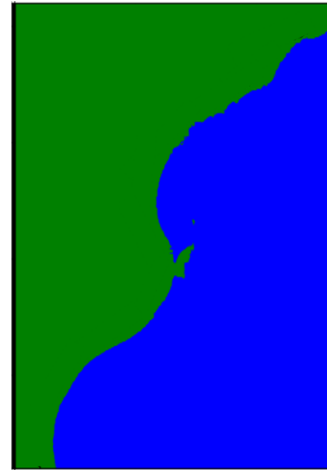


圖 5 臺灣重力異常模型

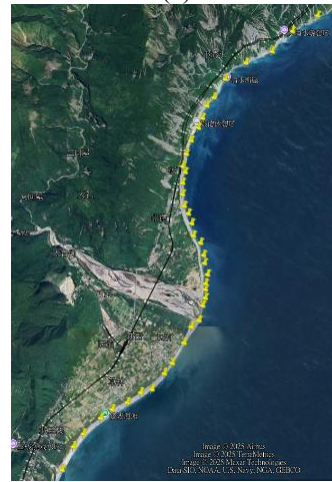
4. 實驗流程

4.1 海岸線邊界範圍

本研究大地起伏建模須整合 DEM 與 DBM，以進行後續大地起伏建模計算。為建立連續的陸海統一地形模型，必須先確認海岸線位置，本文採用的海岸線分成 GSHHG 海岸線和人工數化海岸線。GSHHG 海岸線方面，GMT 6.5 軟體具有 GSHHG 資料庫，故本研究是從 GMT 6.5 取得，圖 6(a)顯示 B 區域 GSHHG 海岸線位置；人工數化海岸線方面，是以人工方式在 google earth 衛星影像中點選實際海岸線位置，再進行數化處理，圖 6(b)顯示 B 區域中人工點選的位置。



(a)



(b)

圖 6 (a) B 區域中 GSHHG 海岸線，其中綠色為陸地、藍色為海洋，綠藍色交界處為 GSHHG 海岸線；(b) B 區域中 google earth 衛星影像中點選實際海岸線的範圍。黃色點為手動點選真實海岸線的位置

4.2 數值地形模型

本研究蒐集內政部陸地 20 m DEM 與海洋 50 m DBM，接著使用 GMT6.5.0 中的程式 grdlandmask 製作出陸地和海洋的 0/1 檔地形，圖 7 顯示分別採用 GSHHG 海岸線，製作陸地數值為 1 海洋為 0(圖 7(a))、和陸地數值為 0 海洋為 1(圖 7(b))的全台地形。接著分別將兩個 0/1 檔地形與陸地 DEM 及海洋 DBM 相乘，結果如圖 7(c)、(d)所示。圖 7(c)為陸地地形為 DEM 值，海洋地形為 0，而圖 7(d)海洋地形為 DBM 值，陸地地形則為 0。接著將新計算之陸地模型和海洋模型合併融合，其結果如圖 7(e)所示。圖 7(e)代表以 GSHHG 海岸線融合陸地 20 m DEM 與海洋 50 m DBM 的全台地形成果。本研究

依據使用之海岸線資料類型(GSHHG 或數化海岸線)、融合後地形的空間解析度、不同研究區域等，分為 8 個大地起伏模型計算的 Case，如表 1 所示。Case 1 到 4 屬於 A 區域，DEM-DBM 解析度有 9"x

9"與 3"x3"兩種；Case 5 到 8 屬於 B 區域，DEM-DBM 解析度有 3"x3"與 1"x1"兩種。9"x9"、3"x3"和 1"x1"對應到的空間解析度分別為 270 m、90 m 與 30 m。

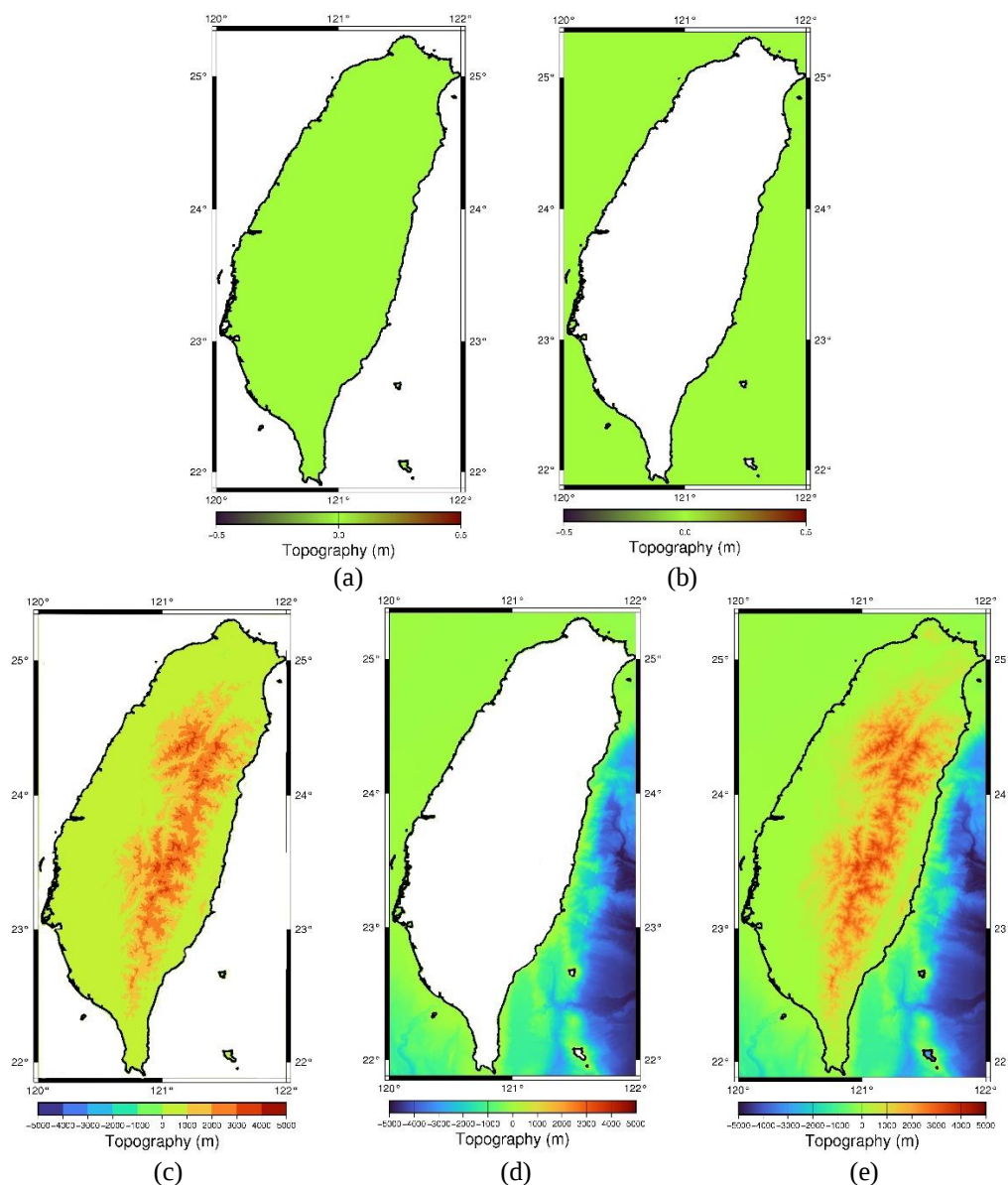


圖 7 (a)陸地數值為 1 海洋為 0 之地形；(b)陸地數值為 0 海洋為 1 之地形；(c)陸地為 20m DEM，海洋地形為 0 之地形；(d)海洋為 50m DBM，陸地地形為 0 之地形；(e) 陸地和海洋地形融合後的地形

表 1 研究測試例(Case)分類

Case	研究區域	DEM-DBM 空間解析度	海岸線
1	A 區域	270 m (9"x9")DEM-DBM	GSHHG
2	A 區域	270 m (9"x9")DEM-DBM	數化海岸線
3	A 區域	90 m (3"x3")DEM-DBM	GSHHG
4	A 區域	90 m (3"x3")DEM-DBM	數化海岸線
5	B 區域	90 m (3"x3")DEM-50 m DBM	GSHHG
6	B 區域	90 m (3"x3")DEM-50 m DBM	數化海岸線
7	B 區域	30 m (1"x1")DEM-DBM	GSHHG
8	B 區域	30 m (1"x1")DEM-DBM	數化海岸線

4.3 大地起伏模型

本研究採用 RCR 架構處理長波長、中波長與短波長大地起伏計算成果，並將三者合併建立完整的大地起伏模型。首先以全球重力場模型 EGM2008 進行球諧展開，計算出研究區域之長波長重力異常 ΔG_{long} 與長波長大地起伏 ΔN_{long} 。接著使用 RTM 方法搭配不同解析度之 DEM(9"x9"、3"x3"、1"x1")計算短波長重力異常 ΔG_{short} 與短波長大地起伏貢獻 ΔN_{short} ，有效補償地形變化劇烈區之高頻訊號。中波長部分則利用以 LSC 進行計算，將已去除長波與短波效應後之重力異常資料，建立協方差矩陣，推估中波長大地起伏 ΔN_{res} 。三組波長最終進行網格加總，建立完整的似大地起伏模型。最後藉由似大地起伏改正得到最終大地起伏模型。圖 8 為利用此方法計算得到的全臺灣與周邊海域的重力法大地起伏模型(空間解析度 30"x30")。本文的 8 個 Case 的重力法大地起伏計算，皆採用此步驟計算完成。

5. 結果與討論

5.1 海陸交接處精度分析

圖 9 顯示 B 區域 GSHHG 海岸線與人工數化海岸線(由 Google Earth 高解析影像數化而得)之差異。比較結果顯示，GSHHG 海岸線在臺灣地區，尤其於東部花蓮清水斷崖等地形起伏劇烈區域，與實際海岸線位置存在顯著偏差。與人工數化海岸線相比，其最大平面誤差可達約 700 m。此一偏差主要源自 GSHHG 海岸線資料之空間解析度限制，使其難以精確描述高起伏、近乎垂直之斷崖型海岸地形；此外，在地形變化快速的區域，海陸交界線本身即具有不連續與不穩定特性，進一步降低海岸線定位的準確性。以 A 區域 9"x9" DEM-DBM 為例，圖 10 呈現分別採用 GSHHG 海岸線與人工數化海岸線進行 DEM-DBM 融合後之差值分布情形。結果顯示，海岸線鄰近區域的 DEM 高程誤差最為明顯，最大差值約達 ± 100 m，且誤差主要集中於陡峭斷崖與海陸轉換帶，顯示海岸線定位精度對 DEM-

DBM 融合成果具有關鍵影響。

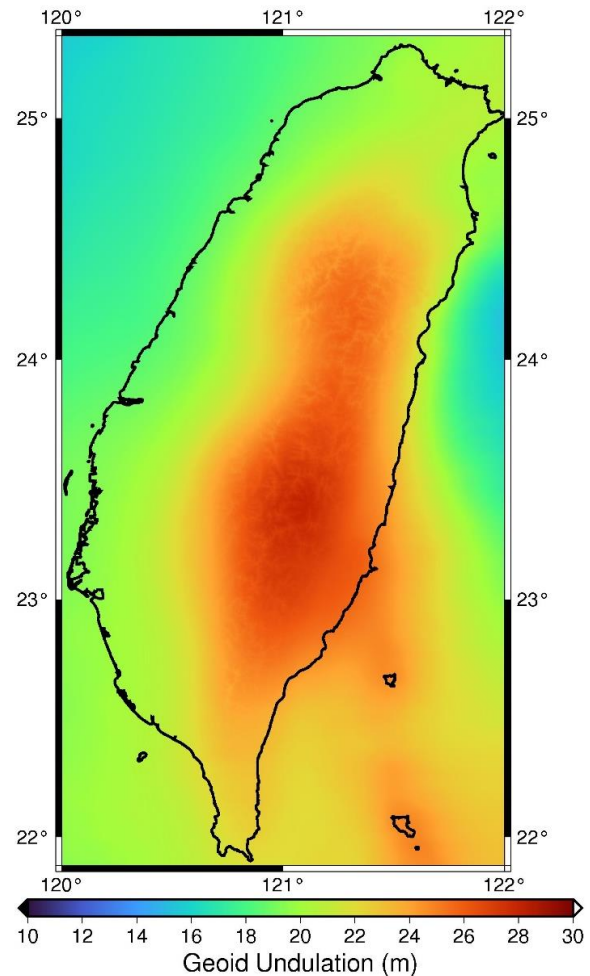


圖 8 重力法大地起伏模型

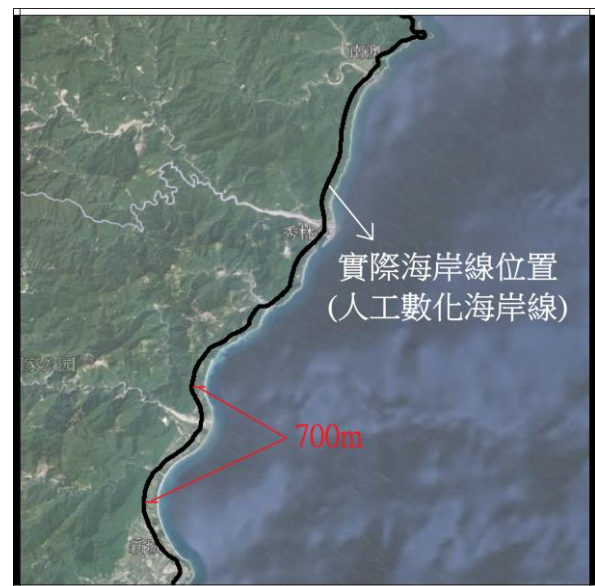


圖 9 B 區域 Google Earth 衛星影像圖。黑色線為 GSHHG 海岸線，海陸交界處即為實際海岸線(人工數化海岸線)位置

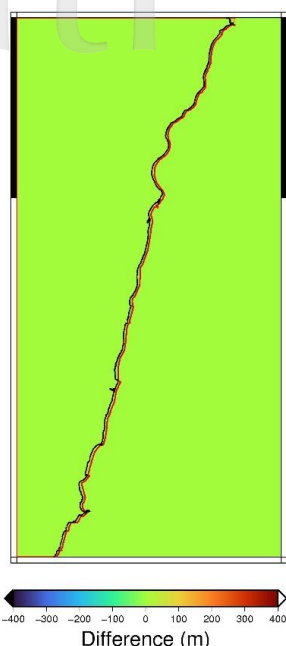


圖 10 GSHHG 海岸線與人工數化海岸線進行 DEM-DBM 融合後之差值

5.2 A 區位(Case 1~4)

圖 11 呈現 Case 1 與 Case 2 之相關成果。由圖 11(a)可觀察到，採用 GSHHG 與人工數化海岸線所產製之 DEM-DBM，在大地起伏模型計算結果上的差異主要集中於海岸線鄰近區域，顯示海陸邊界定位精度對 DEM-DBM 融合成果具有顯著影響，其中在地形起伏劇烈之清水斷崖一帶，兩者差異可超過 5 cm。此現象反映出在陡峭斷崖與快速地形轉換區域，海岸線微小的平面位移即可能導致 DEM 與 DBM 高程配置明顯不同，進而影響後續重力與大地起伏計算結果。圖 11(b)與圖 11(c)分別為 Case 1 與 Case 2 之大地起伏模型與 GNSS/水準測量成果之檢核結果，兩圖皆以重力法大地起伏模型作為底圖，並以柱狀長條圖呈現各檢核點重力法大地起伏與觀測大地起伏值(GNSS/水準測量)之差值絕對值。由 11 個檢核點之統計結果可知，兩案例在標準偏差表現上相當接近，顯示整體模型穩定性相似，惟 Case 2 之標準偏差略小於 Case 1，顯示在相同空間解析度條件下，採用人工數化海岸線仍可帶來輕微但一致的精度提升。在 Case 3 與 Case 4

之比較結果(圖 12)中，可發現大地起伏模型之最大差距同樣集中於海陸交界且地形變化劇烈之區域，最大差異亦接近 5 cm，顯示海岸線定位誤差在不同解析度條件下皆會對局部大地起伏成果造成影響。由圖 12(b)與圖 12(c)之 GNSS/水準測量檢核結果可知，Case 3 與 Case 4 之標準偏差表現亦相近，但 Case 4 整體仍略優於 Case 3，呈現與 Case 1、Case 2 相同的趨勢。所有 Case 1 至 Case 4 之檢核成果彙整於表 2。

整體而言，無論於 9"×9" 或 3"×3" 空間解析度條件下，使用人工數化海岸線所建立之 DEM-DBM，其大地起伏計算成果均略優於使用 GSHHG 海岸線者，整體改善幅度約為 2–3 mm。進一步比較 Case 1–2 與 Case 3–4 可發現，採用空間解析度 3"×3" 之 Case 3–4，其成果明顯優於採用 9"×9" 解析度之 Case 1–2，標準偏差由約 0.32 m 降至約 0.19 m。由於 9"×9" 格網單元約對應 270 m 的空間解析度，於海陸邊界及地形變化複雜區域時，地形與海岸線細部特徵易在重取樣與平均化過程中被過度平滑，進而削弱 DEM-DBM 對真實地形變化的描述能力，導致大地起伏計算成果精度降低。

另外值得注意的是，人工數化海岸線於大地起伏模型中的改善效果，主要應集中於海陸交界且地形變化劇烈之區域；然而，本研究所採用之 GNSS/水準測量檢核點位置，並未剛好落在上述大地起伏差值較大的區域，因此即使人工數化海岸線能有效改善海岸線鄰近區域之 DEM-DBM 表現，其優勢在整體統計指標(如標準偏差)上仍不易被充分反映，導致 Case 2 與 Case 4 相較於 Case 1 與 Case 3 的精度提升幅度僅呈現為數毫米(mm)等級。

表 2 GNSS/水準測量點位檢核成果(Case 1~4)

統計值	最大值	最小值	平均值	標準偏差
Case	(m)	(m)	(m)	(m)
1	0.921	-0.031	0.329	0.317
2	0.908	-0.033	0.328	0.315
3	0.424	-0.304	0.190	0.164
4	0.425	-0.033	0.191	0.161

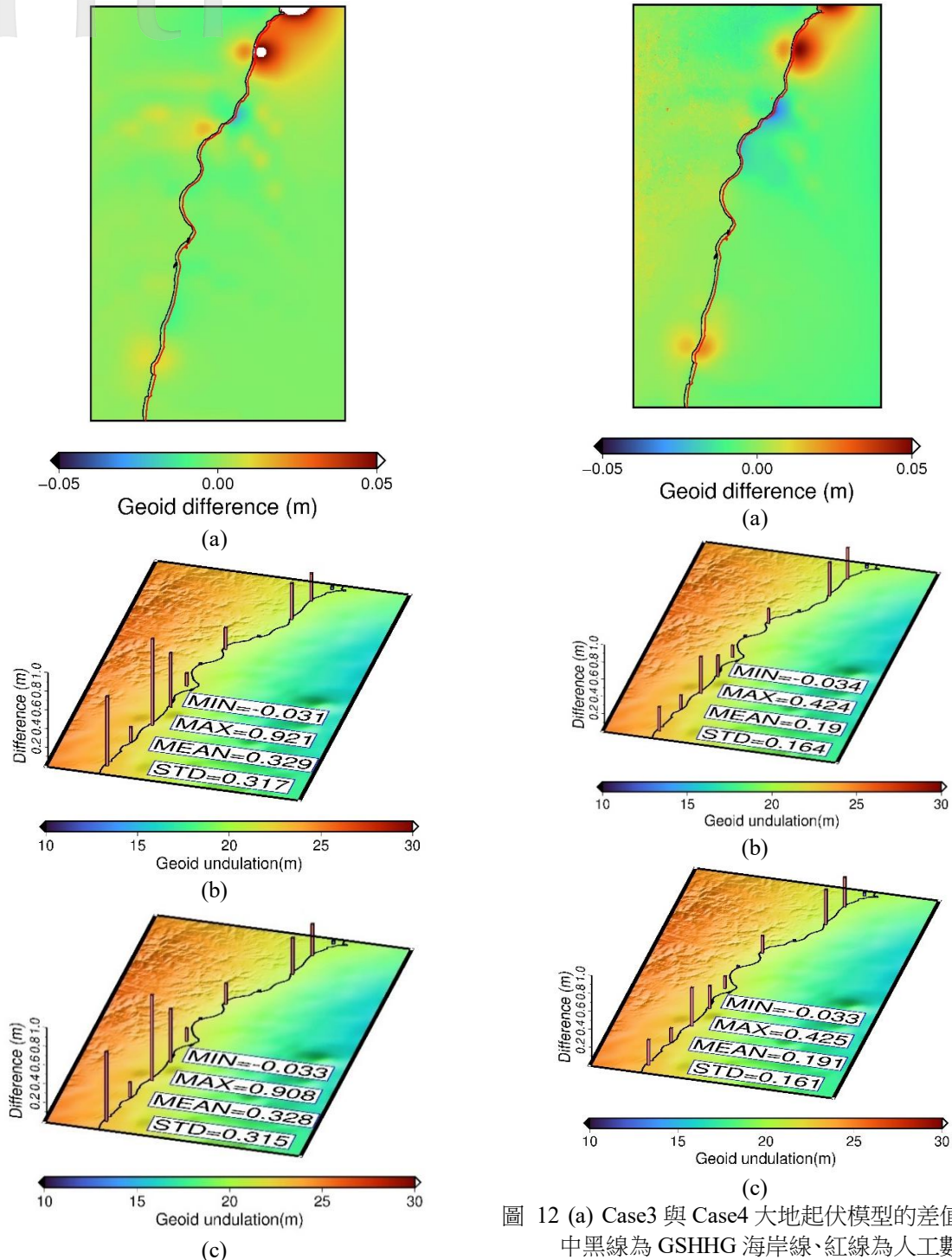


圖 11 (a) Case1 與 Case2 大地起伏模型的差值，其中黑線為 GSHHG 海岸線、紅線為人工數化海岸線；(b) Case 1 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果；(c) Case 2 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果。圖(b)與(c)柱狀長條圖顯示差值絕對值

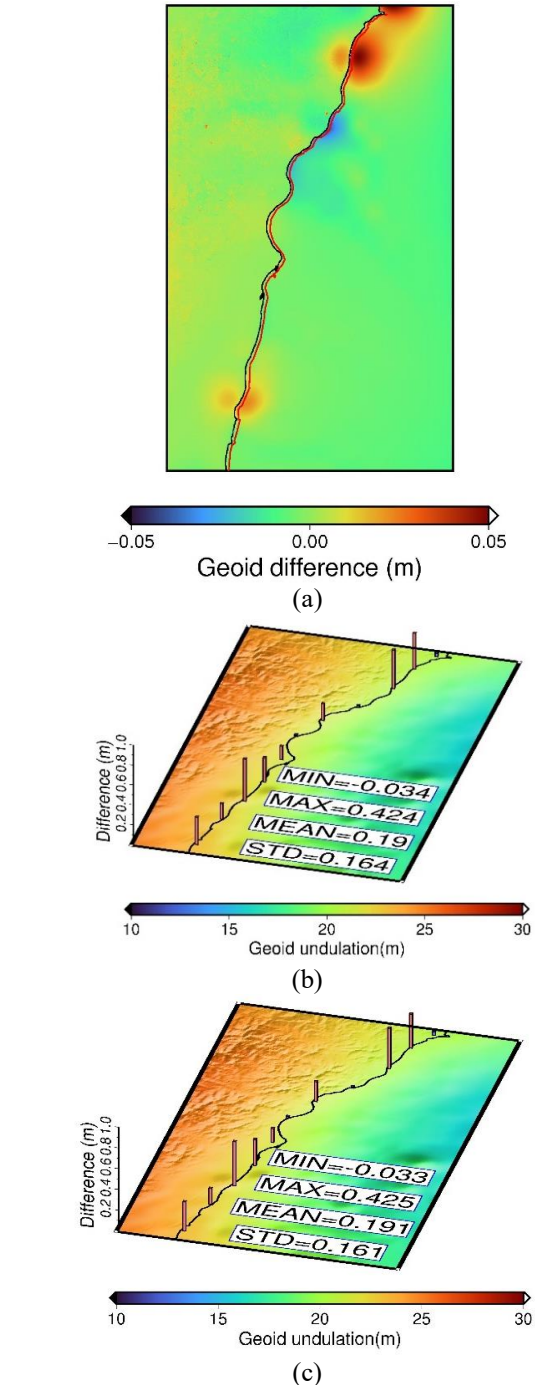


圖 12 (a) Case3 與 Case4 大地起伏模型的差值，其中黑線為 GSHHG 海岸線、紅線為人工數化海岸線；(b) Case3 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果；(c) Case 4 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果。圖(b)與(c)柱狀長條圖顯示差值絕對值

5.3 B 區位(Case 5~8)

為進一步探討地形的空間解析度與海岸線精度對大地起伏模型在海陸交界處的影響，本研究於面積較小的 B 區域進行高解析度建模分析。該區域

聚焦於清水斷崖地形劇烈變化帶，分別測試空間解析度 $3'' \times 3''$ 與 $1'' \times 1''$ 解析度之 DEM-DBM 組合，搭配 GSHHG 與人工數化海岸線進行比較。圖 13 為 Case 5 與 Case 6 的相關成果，由圖 13(a)可發現 GSHHG 和人工數化海岸線所產製之 DEM-DBM，在計算大地起伏模型上，差異主要集中於海岸線周圍，其中清水斷崖區差異達將近 5 cm。圖 13(b)和 13(c)為 Case 5 和 Case 6 的大地起伏模型和 GNSS/水準測量檢核成果，底圖均為大地起伏模型計算成果，圖中柱狀長條圖顯示重力法大地起伏模型和觀測大地起伏值(GNSS/水準測量)之間的差值絕對值。由圖 13(b)和 13(c)可發現，若由 5 個檢核點的統計標準偏差來看，成果相近，但 Case 6 略優於 Case 5。

在 Case 7 和 Case 8 的比較方面(圖 14)，可發現大地起伏模型最大差距依然在海陸交界地形變化劇烈處，差距最大亦將近 5 cm。若由圖 14(b)和 14(c) GNSS/水準測量檢核成果標準偏差來看，Case 7 和 Case 8 成果也相近，但 Case 8 還是略優於 Case 7。Case 5 到 8 的檢核成果整理於表 3。整體而言，使用人工數化海岸線 DEM-DBM 的大地起伏計算成果，還是略優於使用 GSHHG 海岸線 DEM-DBM 的大地起伏計算成果，大約改善 2~3 mm。另外若比較 Case 5~6 和 Case 7~8，可看出採用空間解析度 $3'' \times 3''$ 的 Case 5~6，成果明顯優於採用空間解析度 $1'' \times 1''$ 的 Case 7~8，標準偏差從約 0.28 m 降到約 0.15 m。儘管高解析度 DEM 能更精細描述地形細部，但其所包含的大量高頻地形訊號及量測誤差，並不完全對應於真實的重力場變化。當使用 $1'' \times 1''$ DEM-DBM 進行大地起伏計算時 (Case 7~8)，高頻地形雜訊在 RTM 積分過程中被放大，導致計算結果不穩定且精度降低。相較之下， $3'' \times 3''$ DEM 透過自然的空間平均效果，有效抑制高頻雜訊，使得大地起伏計算成果顯著改善。

如同 A 區域，B 區域顯示在 Case 6 與 Case 8 中，人工數化海岸線對大地起伏成果所帶來的整體精度提升幅度並不顯著，其原因並非海岸線改進本身效果有限，而是受限於 GNSS/水準測量檢核資料的空間配置。B 區域內所使用的 5 個檢核點位置，與大地起伏差異最為集中的清水斷崖沿岸區域並

未完全重疊，導致模型於海陸交界處所產生的局部改善，無法在統計評估指標中充分展現。因而在標準偏差比較結果上，Case 6 與 Case 8 相較於 Case 5 與 Case 7 僅呈現有限的數值差異。

表 3 GNSS/水準測量點位檢核成果(Case 5~8)

統計值	最大值	最小值	平均值	標準偏差
Case	(m)	(m)	(m)	(m)
5	0.390	0.016	0.240	0.159
6	0.389	0.018	0.243	0.155
7	1.730	1.075	1.425	0.284
8	1.729	1.073	1.430	0.275

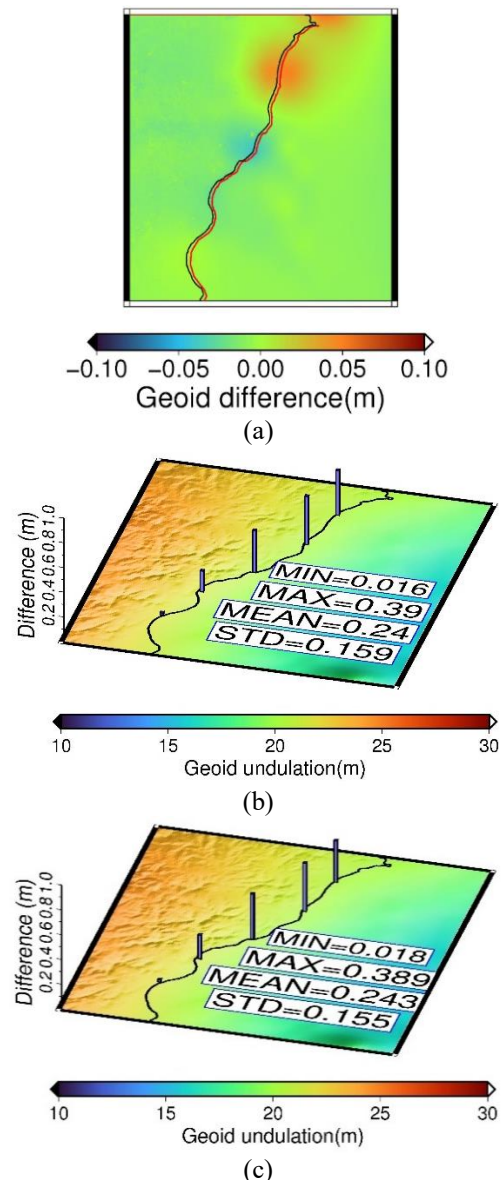


圖 13 (a) Case 5 與 Case 6 大地起伏模型的差值，其中黑線為 GSHHG 海岸線、紅線為人工數化海岸線；(b) Case 5 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果；(c) Case 6 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果。圖(b)與(c)柱狀長條圖顯示差值絕對值

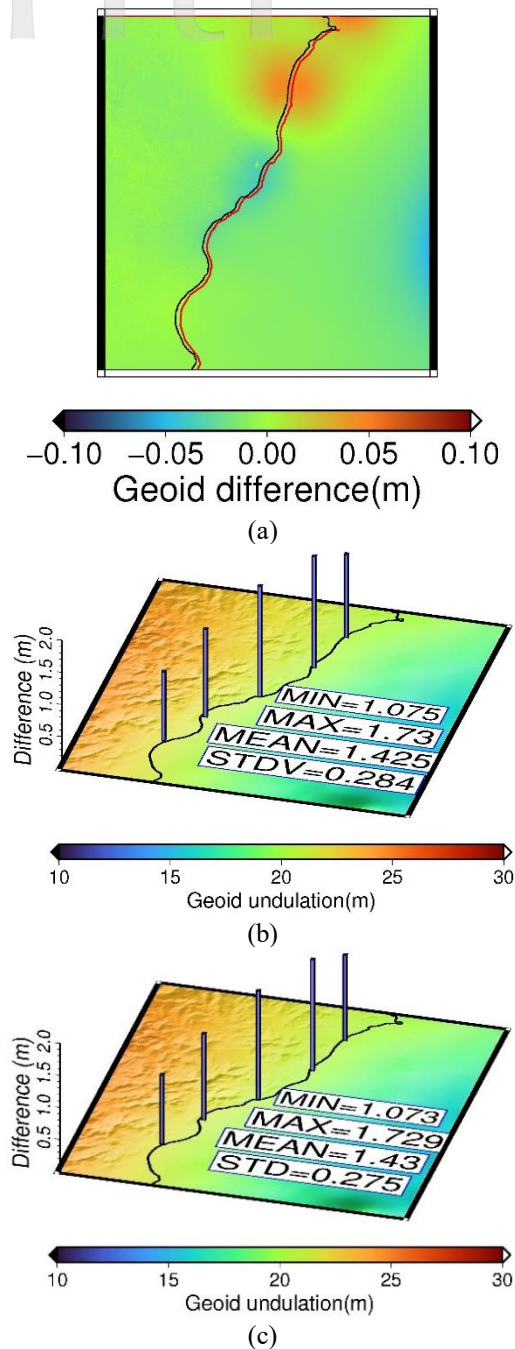


圖 14 (a) Case 7 與 Case 8 大地起伏模型的差值，其中黑線為 GSHHG 海岸線、紅線為人工數化海岸線；(b) Case 7 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果；(c) Case 8 大地起伏模型與 GNSS/水準測量點位檢核成果。圖(b)與(c)柱狀長條圖顯示差值絕對值

6. 結論與建議

本研究以臺灣東部花蓮沿岸為研究對象，聚焦於地形起伏極為劇烈的清水斷崖一帶，探討不同 DEM、DBM 空間解析度以及海岸線定位精度，對

陸海交界處大地起伏建模成果所造成的影響。研究過程中結合 RCR 架構下之 RTM 與 LSC 方法進行大地起伏建模，並以 GNSS/水準測量資料作為外部檢核依據，使得不同資料組合對模型精度與穩定性的影響得以具體量化與比較。分析結果顯示，海岸線定位誤差在陸海交界區域中扮演相當關鍵的角色，對大地起伏模型的局部表現具有直接影響。以全球通用的 GSHHG 海岸線資料而言，其在地形相對平緩的區域仍能維持良好的一致性；然而在清水斷崖等屬於斷崖型海岸的地區，與實際海岸線之間仍存在數百公尺等級的平面差異。此類偏差會在 DEM 與 DBM 融合階段反映為邊界位置的不確定性，進而影響地形遮罩的建立，使地形改正誤差集中於海岸線附近，並在大地起伏模型中形成明顯的局部差異。相較之下，透過高解析度衛星影像進行人工數化的海岸線，能較貼近實際海陸邊界位置，使 DEM-DBM 融合後的地形連續性較為合理，並在各測試案例中呈現出穩定且一致的精度改善趨勢。在地形資料的空間解析度方面，研究結果顯示，提高 DEM-DBM 的解析度確實有助於改善地形起伏劇烈區域的大地起伏建模成果，但其改善效果並非隨解析度提升而持續增加。由 A 區域與 B 區域的比較可知，3"x3"解析度在模型穩定性與 GNSS/水準檢核結果上，整體表現明顯優於 9"x9"解析度，顯示解析度過低時，海陸交界處的地形細節容易在平滑化過程中被削弱。然而，當解析度進一步提高至 1"x1"時，模型精度反而出現下降，其主要原因在於高解析度 DEM 所包含的大量高頻地形訊號與量測雜訊，未必能對應實際的重力場變化，並在 RTM 積分過程中被放大，導致大地起伏計算結果變得不穩定。此一現象顯示，在地形劇烈變化的陸海交界區域中，解析度的選擇需兼顧訊號表現與雜訊控制，而非單純追求更細的網格尺度。此外，本研究亦觀察到，人工數化海岸線所帶來的改善效果，主要集中於海陸交界及斷崖等地形快速轉換的局部區域；然而，由於 GNSS/水準測量檢核點多分布於內陸或地形相對平緩的區域，並未完全涵蓋大地起伏差異最為顯著的沿岸帶，使得岸線精化在整體統計指標(如標準偏差)上的反映僅呈現毫米等級差

異。這也說明，檢核點的空間配置對模型評估結果具有實質影響，若僅依賴整體統計量進行判斷，可能低估模型在關鍵地形區域中的實際改善幅度。

綜合上述成果，本研究建議在未來進行陸海交界大地起伏建模時，應優先確保海岸線定位的幾何正確性，並於地形劇烈變化區域適度採用人工或半自動化方式精化海岸線資料。在地形資料解析度選擇上，建議採用約 3"x3"等級之 DEM-DBM，以兼顧地形細節表現與模型穩定性，避免因過高解析度導致高頻雜訊主導計算結果。整體而言，本研究成果可作為臺灣及其他山坡地形起伏海岸區域進行精密大地水準面建模之重要參考。

參考文獻

- 內政部，2023。垂直基準面時變精度檢核評估工作方案。[Ministry of the Interior, 2023. Project for Accuracy Assessment and Verification of Time-Variant Vertical Datum. (in Chinese)]
- 內政部，2025。大地起伏模型精進維護工作方案。[Ministry of the Interior, 2025. Project for Geoid Model Improvement and Maintenance. (in Chinese)]
- 崔國強，1995。臺灣地區數值大地水準面模型計算之研究，國立中央大學地球物理學系博士論文。[Tsuei, G.C., 1995. The investigation of digital geoid model over Taiwan, PhD Dissertation, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 許宏銳，2014。最佳化重力資料處理及整合以建構公分級臺灣大地起伏模式，國立交通大學土木工程學系博士論文。[Hsu, H.-J., 2014. Optimizing gravity data processing and combination for cm-geoid modeling in Taiwan, PhD Dissertation, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- Bucha, B., Hirt, C., Yang, M., Kuhn, M., and Rexer, M., 2019. Residual terrain modelling (RTM) in terms of the cap-modified spectral technique: RTM from a new perspective, *Journal of Geodesy*, 93: 2089-2108, DOI: 10.1007/s00190-019-01303-4.
- Forsberg, R., 1984. A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modelling, PhD Dissertation, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Columbus, USA, DOI: 10.21236/ADA150788.
- Heiskanen, W.A., and Moritz, H., 1967. *Physical Geodesy*, W.H. Fredman and company, San Francisco, CA, USA.
- Hwang, C., 1997. Analysis of some systematic errors affecting altimeter-derived sea surface gradient with application to geoid determination over Taiwan, *Journal of Geodesy*, 71: 113-130, DOI: 10.1007/s001900050080.
- Hwang, C., and Hsiao, Y.S., 2003. Orthometric corrections from leveling, gravity, density and elevation data: a case study in Taiwan, *Journal of Geodesy*, 77: 279-291, DOI: 10.1007/s00190-003-0325-6.
- Hwang, C., Ellmann, A., and Hsiao, Y.S., 2006. Toward a one-cm geoid in Taiwan: Contribution of airborne gravity data and high-resolution DEM, in *Proceedings of the International Workshop on Height Systems, Geoid and Gravity of the Asia-Pacific*, Ulaanbaatar, Mongolia.
- Hwang, C., Hsu, H.J., Chang, E.T., Featherstone, W.E., Tenzer, R., Lien, T., Hsiao, Y.S., Shih, H.C., and Jai, P.H., 2014. New free-air and Bouguer gravity fields of Taiwan from multiple platforms and sensors, *Tectonophysics*, 611: 83-93, DOI: 10.1016/j.tecto.2013.11.027.
- Hwang, C., Hsu, H.J., Featherstone, W.E., Cheng, C.C., Yang, M., Huang, W.H., Wang, C.Y., Huang, J.F., Chen, K.H., Huang, C.H., Chen, H.C., and Su, W.Y., 2020. New gravimetric-only and hybrid geoid models of Taiwan for height modernisation, cross-island datum connection and airborne

- LiDAR mapping, *Journal of Geodesy*, 94: 83, DOI: 10.1007/s00190-020-01412-5.
- Jiang, T., Dang, Y., and Zhang, C., 2020. Gravimetric geoid modeling from the combination of satellite gravity model, terrestrial and airborne gravity data: A case study in the mountainous area, Colorado, *Earth Planets Space*, 72: 189, DOI: 10.1186/s40623-020-01287-y.
- Kuhn, M., Featherstone, W.E., and Kirby, J.F., 2009. Complete spherical Bouguer gravity anomalies over Australia, *Australian Journal of Earth Sciences*, 56(2): 213-223, DOI: 10.1080/08120090802547041.
- Omang, O.C.D., and Forsberg, R., 2000. How to handle topography in practical geoid determination: Three examples, *Journal of Geodesy*, 74: 458-466, DOI: 10.1007/s001900000107.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., and Factor, J.K., 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4): B04406, DOI: 10.1029/2011JB008916.
- Sandwell, D.T., Harper, H., Tozer, B., and Smith, W.H.F., 2021. Gravity field recovery from geodetic altimeter missions, *Advances in Space Research*, 68(2): 1059-1072, DOI: 10.1016/j.asr.2019.09.011.
- Tscherning, C.C., and Rapp, R.H., 1974. Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and deflections of the vertical implied by anomaly degree variance models, Reports of the Department of Geodetic Science, No.208, Ohio State University, Columbus, OH, USA.
- Vu, D.T., Bruinsma, S., and Bonvalot, S., 2019. A high-resolution gravimetric quasigeoid model for Vietnam, *Earth Planets Space*, 71: 65, DOI: 10.1186/s40623-019-1045-3.
- Wessel, P., Luis, J.F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W.H.F., and Tian, D., 2019. The generic mapping tools version 6, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11): 5556-5564, DOI: 10.1029/2019GC008515.
- Willberg, M., Zingerle, P., and Pail, R., 2019. Residual least-squares collocation: Use of covariance matrices from high-resolution global geopotential models, *Journal of Geodesy*, 93: 1739-1757, DOI: 10.1007/s00190-019-01279-1.
- Yildiz, H., 2012. A study of regional gravity field recovery from GOCE vertical gravity gradient data in the Auvergne test area using collocation, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56: 171-184, DOI: 10.1007/s11200-011-9030-8.

Accuracy Assessment of Geoid Modeling at the Land-Sea Interface: A Case Study of Eastern Taiwan

Zhi-Yi Yang¹ Yu-Shen Hsiao^{2*}

Abstract

This study investigates the effects of Digital Elevation Model (DEM) and Digital Bathymetric Model (DBM) resolutions, as well as coastline positioning accuracy, on gravimetric geoid modeling across the land–sea interface along the Qingshui Cliff coast in eastern Taiwan. Two coastline datasets, namely the Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography (GSHHG) database and manually digitized coastlines, were combined with DEM-DBM datasets of different spatial resolutions. Under the remove–compute–restore framework, gravimetric geoid models were constructed using the Residual Terrain Model and Least-Squares Collocation methods, and their accuracy was evaluated using GNSS/leveling-derived geoid heights. The results show that the GSHHG coastline deviates noticeably from the actual shoreline in cliff-type coastal areas, leading to terrain masking and correction errors near the coast. In contrast, manually digitized coastlines improve boundary consistency and model stability. Resolution comparisons further indicate that the 3"×3" DEM-DBM provides better overall accuracy than the 9"×9" and 1"×1" models. These findings suggest that accurate coastline definition and appropriate terrain resolution are essential for improving geoid modeling in complex land–sea transition zones.

Keywords: DEM, DBM, Geoid Modeling, Land–Sea Transition Zone

¹ Master, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University

² Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University

* Corresponding Author, E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw

Received Date: Jul. 30, 2025

Revised Date: Sep. 03, 2025

Accepted Date: Feb. 16, 2026