

第八章 地球重力場之比較分析

8.1 重力場模型之表達方式

在 CHAMP 和 GRACE 之前，由太空得到地球重力場之長波長部分是從很多的地球軌道衛星之各種追蹤觀測量測而得，這些觀測量的年代和品質有相當大的不同，且無法涵蓋全球，使得由衛星導得之重力場精度及解析度皆有所限制，波長頂多到 1000 km，至於短波長部分由於誤差太大以致不能使用，僅可偵測到較長波長之地球重力場訊號，因此，地球重力場之中、短波長必須靠地面重力、船載及空載重力資料補充，雖然這些資料亦是不同時期且品質不一，又無法全球涵蓋[GFZ homepage, 2005]。

自從 CHAMP 衛星於 2000 年 7 月發射升空，在地球重力場之求解，進入另一嶄新的時代，因為從此以後，地球重力場可僅由單一衛星求得，這種演進是由於 CHAMP 衛星載有很好的儀器設備：HL-SST 技術追蹤 GPS 衛星提供一精確且精度均勻的衛星軌道，酬載之加速度儀量測作用在衛星表面上之非引力部分，而且還有一組恒星敏感器測定衛星在慣性坐標系之姿態資料。

GRACE 衛星於 2002 年 3 月 17 日升空，執行一個雙星任務，在 HL-SST 追蹤部分與 CHAMP 相同，但所攜帶之加速度儀式經過改良，除此之外在兩顆衛星之間之 LL-SST 追蹤部分利用一 K 波段測距系統精密地量測距離變化率，在兩顆僅距約 220 km 之 GRACE 衛星量測距離變化率，可說是直接量測到地球重力場之中、短波長，因此衛星重力場可提供更詳細地球資訊，而未來的地球重力場模型可利用更長時間段且更先進之處理方法和模式，期待得到更高之解析度和精度。

這些嶄新的重力場模型可提供研究固體地球科學家能夠更精確地以較小之解析度推論地球內部結構，海洋科學家可以整合重力場和由衛星測高所得之海水面高，可更細緻地研究全球海洋環境，如此一來，能夠使我們對地球動力系統（固體地球、海洋、大氣）之處理過程有更進一步的了解，因而使我們對氣候變化和天然災害（如地震）有更好的分析與預測。

為比較各重力場模型之特性及精度，吾人先說明重力場模型的表達方式。地球重力場通常以一系列之球諧函數表示，重力場模型只能展開到有限的階數 N ，

其展開之最高階數與在地球表面上之波長關係式如下：

$$\lambda = \frac{360^\circ}{N} = \frac{2\pi R}{N}, \text{ R 表地球平均半徑}$$

但一般空間解析度是以半波長表示，即

$$\text{空間解析度} = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi R}{N}$$

表 8-1 重力場展開之最大階數與波長分類及空間解析度關係[Seeber, 1993]

	長波長	中波長	短波長	較短波長
波長 λ, km	>8000	>1000	>200	<200
最大階數 N	<5	<36	<200	>200
空間解析度 km	>4000	>500	>100	<100

重力場模型的誤差除了截尾誤差，每個重力場係數有相應的中誤差 $\sigma_{C_{nm}}, \sigma_{S_{nm}}$ ，在CHAMP衛星以前國際上最好的引力場模型的中誤差約在 10^{-9} 量級，重力場模型精度的表達方式一般是以大地起伏誤差來呈現，每一階“ n ”，所有的係數的誤差的貢獻是：

$$\sigma_n = \sqrt{\sum_{m=0}^n \sigma_{C_{nm}}^2 + \sum_{m=1}^n \sigma_{S_{nm}}^2}$$

其相應的大地水準面高度誤差為：

$$\sigma_n(\text{geoid}) = \sigma_n \times r_0$$

r_0 是地球平均半徑

同樣地，重力場模型的誤差也可用重力異常來表示。

8.2 CHAMP 及 GRACE 重力場模型之比較

至目前為止，由德國 GFZ 發布之由 CHAMP 衛星導得之地球重力場模型有 EIGEN-1S，EIGEN-2，EIGEN-3P，EIGEN-CHAMP03S 四種，由 GRACE 衛星導得之地球重力場模型有 EIGEN-GRACE01S，EIGEN-GRACE02S，EIGEN-CG01C 三種[Bettadpur, S., 2004]。另外由美國德州大學空間研究中心 (CSR) 利用 GRACE 衛星導得之地球重力場模型有 GGM01S，GGM01C，GGM02S，GGm02C 四種[CSR, 2005]。茲分述如下：

一、 由 CHAMP 衛星資料導得之地球重力場模型

(一) EIGEN-1S

EIGEN-1S 是德國 GFZ 第一個利用 CHAMP 衛星資料解算之地球重力模型，資料時間段是由 2000 年 7 月 30 日至 8 月 10 日及 9 月 24 日至 12 月 31 日之間 88 天 CHAMP 衛星資料、GPS 資料及加速度儀資料，但並非純用 CHAMP 衛星資料，而是包括 GRIM5-1S 模型之法方程式、Lageos-1、Lageos-2、starlette 衛星資料所導得之帶諧係數約制，並加入 Lageos-1、Lageos-2、starlette 和 stella 雷射資料，雖然最高階次展開至 119 階次，但僅前 100 階次是完整的，也就是說該模型所能提供之重力場空間解析度約 165 km，由於該模型僅採用衛星資料，因此完全可靠之階次僅達 35 階。

(二) EIGEN-2

EIGEN-2 是由德國 GFZ 提出第一個純由 CHAMP 衛星資料解算之地球重力場模型，並未加入其他衛星資料，時間段為 2000 年 7 月 30 日至 12 月 31 日及 2001 年 9 月 2 日至 12 月 31 日共 6 個月的 CHAMP GPS 資料及加速度儀資料，最高階次可展開到 140 階，但僅前 120 階是完整的，即空間解析度為 140 km，完全可靠之階次為 40 階次，較高階次係利用法方程式之正規化 (regularization) 技術。此模型當空間解析度 1100 km 時，大地起伏及重力異常精度各優於 10 cm 及 0.5 mGal。

(三) EIGEN-3P

EIGEN-3P 是 EIGEN-3S 之先期重力場模型，亦是純由 CHAMP 衛星之 GPS 衛星追蹤資料及加速度儀資料求得，時間段從 2000 年 7 月至 2003 年 6 月整整 3 年的資料。與 EIGEN-2 模型比較不僅資料量多 6 倍，而且加速度儀校正參數亦不同，又法方程式正規化亦不同，是從 65 階開始而非 30 階次，雖展開至 140 階，但完全可靠只列 65 階次。此模型當空間解析度半波長 400 km 時大地起伏及重力異常精度優於 10 cm 及 0.5 mGal。

(四) EIGEN-CHAMP03S

EIGEN-CHAMP03S 是 EIGEN-3P 之最後版本，但其時間段較 EIGEN-3P 少最初 3 個月資料，是將所有法方程式重新均勻一致的處理及利用改良之加速度儀校正參數，而法方程式之正規化從 60 階次開始，展開到 140 階次，但完整階次

至 120 階次，但僅前 60 階次是可靠的，存在空間解析度半波長 400 km 時大地起伏及重力異常精度為 5 cm 及 0.5 mGal。解算時 \bar{C}_{20} 不含永久潮，另 C_{00} ， $\dot{\bar{C}}_{10}$ ， $\dot{\bar{C}}_{20}$ ， $\dot{\bar{C}}_{30}$ ， $\dot{\bar{C}}_{40}$ 不求解但固定到其初始值；且 \bar{C}_{10} ， \bar{C}_{20} ， \bar{C}_{30} ， \bar{C}_{40} 參考時間為 1997 年 1 月 1 日。 C_{21} ， S_{21} 六個月求解一次。

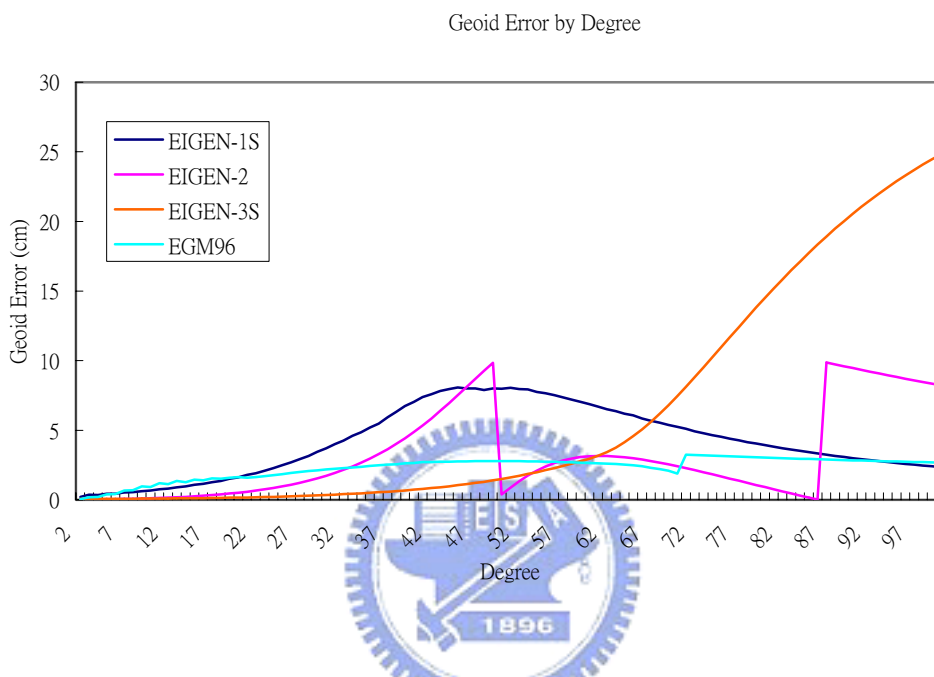


圖 8-1 CHAMP 資料解算之重力場模型大地起伏誤差

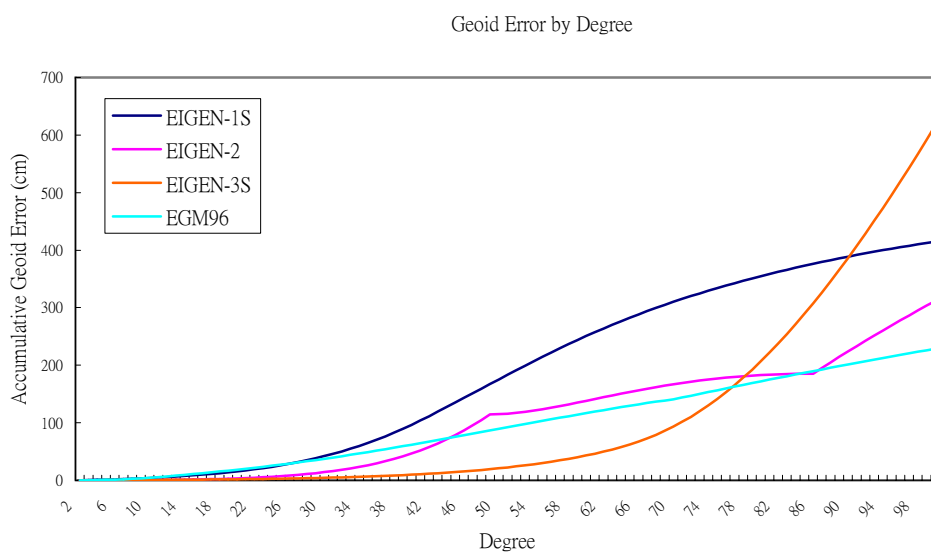


圖 8-2 CHAMP 重力場模型大地起伏累積誤差

由圖 8-1，8-2 可知 EIGEN-1S 在前 20 階精度比 EGM96 高，EIGEN-2 在 35 階相當可靠且比 EGM96 精度好，EIGEN-3S 精度提升很多，至 60 階相當可靠，但 60 階後精度大大降低。

二、由 GRACE 衛星導得之地球重力場模型

(一) EIGEN-GRACE01S

EIGEN-GRACE01S 是由德國地球科學中心 (GFZ) 解算並於 2003 年 7 月 25 日發表，所使用之資料包括 GRACE GPS、K 波段距離變化率、加速度儀及姿態角資料，並未加入其它衛星資料及地面重力資料，純由 GRACE 衛星資料計算而得，時間段為 2002 年 8 月至 2002 年 11 月共 39 天；但求解過程中 70 階以上是採用 Kaula 約制條件但賦予很小的權，EIGEN-GRACE01S 最高展開至 140 階次，但前 120 階次是完整的，根據分析，前 90 階次可說是完全可靠的。此模型在半波長 360km 時大地起伏之誤差約 1cm，又此模型在半波長 1000km 時，其精度比 CHAMPEIGEN-2 高 5 倍，比 CHAMPEIGEN1S 高 50 倍。

(二) EIGEN-GRACE02S

EIGEN-GRACE02S 是由 110 天之 GRACE 追蹤資料計算而得之中波長地球重力場，此模型在半波長 1000km 之解析度情況下大地起伏之精度比 1mm 還佳，精度比 CHAMPEIGEN-2 還高一個數量級，比 EIGEN-1S 高 100 倍。

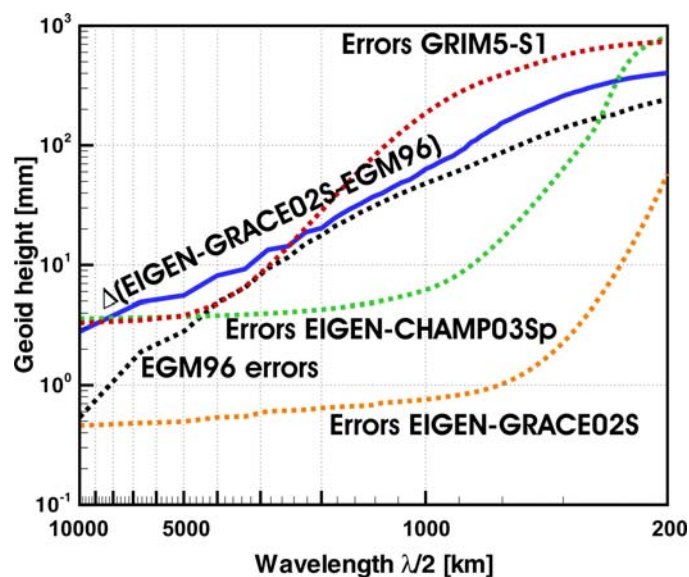


圖 8-3 GRACE02S 與 EIGEN-03S EGM96 精度比較

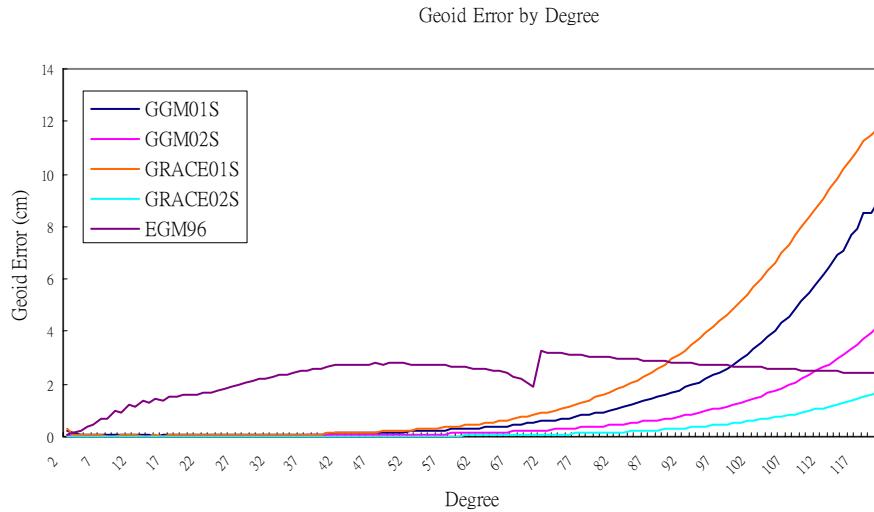


圖 8-4 純由 GRACE 資料解算之重力場模型大地起伏誤差

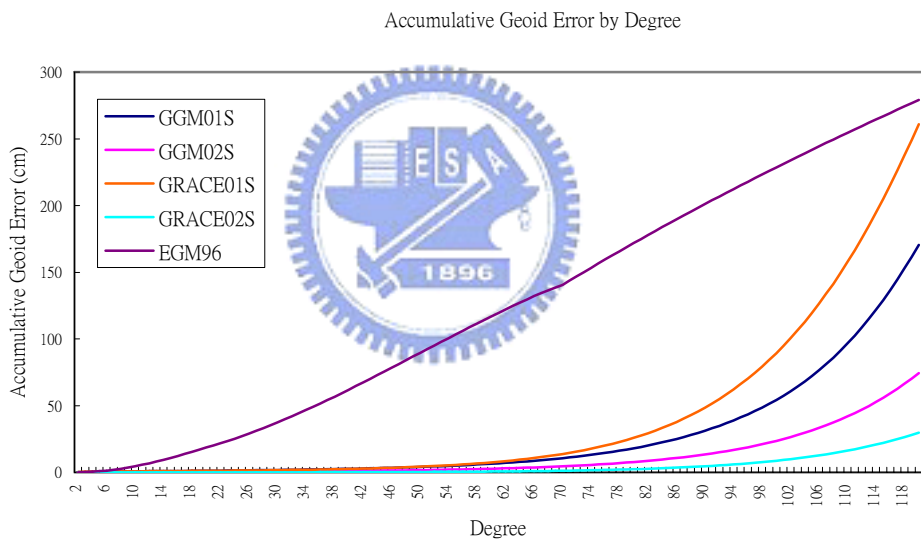


圖 8-5 純由 GRACE 資料解算之重力場模型大地起伏累積誤差

由圖 8-4，8-5 可知 GRACE 因為是雙星計畫，有 K 波段距離變化率、加速度儀等資料，使得僅利用衛星資料，不加地面資料時，在中、長波長（90 階以內）精度都比利用 20 幾年各種衛星資料、地面資料解算之 EGM96 精度都要高出許多。

未來之 GRACE 重力場利用改進的處理方法和計算模式將可進一步增加重力場精度，邁向任務要求之精度以便能夠可靠地解決氣象和地球物理引起之隨時間變化之微小訊號。這些訊號是由海洋質量、大氣質量分布之季節性或年度變化，大範圍陸地地下水如南極冰及格陵南冰層之厚度所引起的。

隨著 GRACE 衛星預期的 5 年任務生命的完成，由於冰、水質量平衡的趨勢和由於冰河後期彈跳所引起之週期性重力訊號將很有可能從太空發現，而且高解析度的全球重力場模型可由衛星、衛星測高及地面重力資料而得，如 EIGEN-CG01C。

(三) EIGEN-CG01C

EIGEN-CG01C 係利用 CHAMP860 天資料、GRACE 200 天資料及 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 地面重力資料計算而得之高精度高解析度之全球重力場模型，解算至 360 階共有 130317 個係數，其中 GRACE 200 天是由 2002 年 4 月、5 月、8 月、11 月及 2003 年 4 月、5 月、8 月、10 月、11 月，而 CHAMP 860 天是從 2000 年 10 月至 2003 年 6 月的資料，在大地起伏及重力異常之解析度可達 100 km。CG01C 是結合 CHAMP、GRACE 及衛星測量及地面重力資料所計算而得，應用一個特別的帶寬組合方法以便保存從衛星資料在低頻帶的高精度，並利用平滑技術取得自地面重力資料的高頻資訊。與之前 CHAMP 或 GRACE 全球高解析度重力場模型比較，CG01C 的精度在空間解析度 400 km 波長時可提高一個數量級；在大地起伏可達 4cm，重力異常可達 0.5mGal，而此模型總體來說其精度在大地起伏和重力異常分別為 20 cm 和 5 mGal，而且從最近發布之極地附近之重力異常得到很大助益。一般來說，在海洋地區之精度比在陸地上之精度要好。

下列地面重力資料用以組合到 CHAMP 及 GRACE 之法方程式中，資料分布如下（圖 8-6） [GFZ homepage, 2005]：

- 1.北極地區重力計畫（ArcGP）重力異常，緯度大於 64° 。
- 2.NRCan 重力異常，北美地區。
- 3.AWI 重力異常，南極州之兩個小地地區。
- 4.NIMA 衛星測高重力異常（包括標準偏差）。
- 5.利用 CLS01 衛星測高海水面高度之大地起伏和由 ECCO 模擬之海水面地形 SST。
- 6.NIMA 地面重力異常：包括標準偏差，幾乎涵蓋全陸地，但南極及少數小區域除外。
- 7.NIMA 船載重力異常：在水深小於 2000 米之區域。圖中岸邊至白線區域。

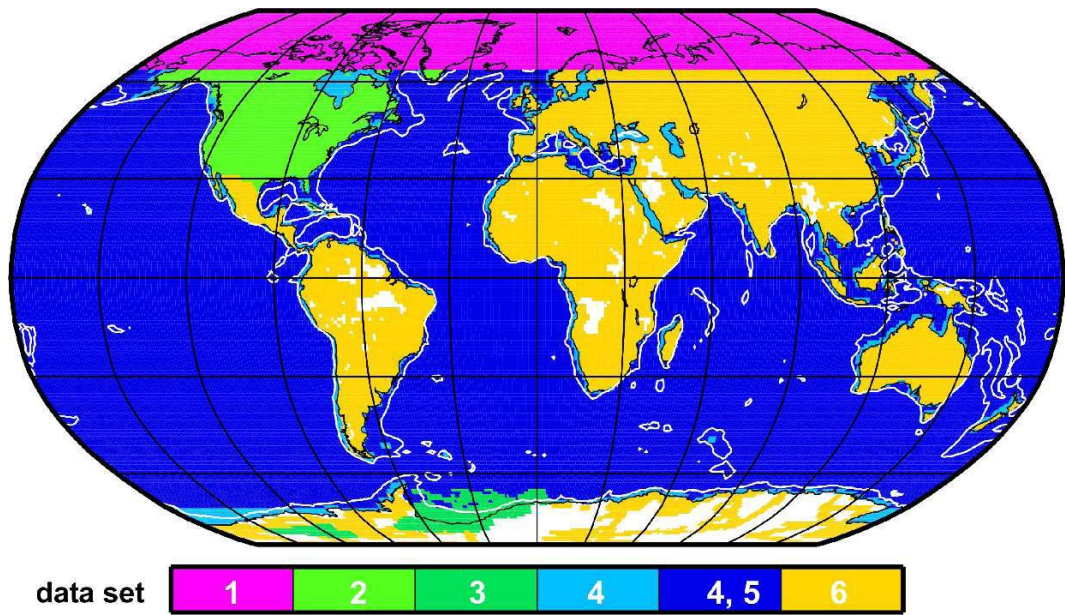


圖 8-6 CG01C 結合的地面資料全球區域分布

在 CG01C 模型中 \bar{C}_{21} , \bar{S}_{21} 地位係數表示使用資料期間之平均值 (即在 IERS 系統中平均極位置) 因為 GRACE 資料在長波長部分有很大的改善, 因此計算時間段擴充從 2002 年 4 月到 2003 年 11 月, 但 $\dot{\bar{C}}_{21}$, $\dot{\bar{S}}_{21}$ 亦無解算。

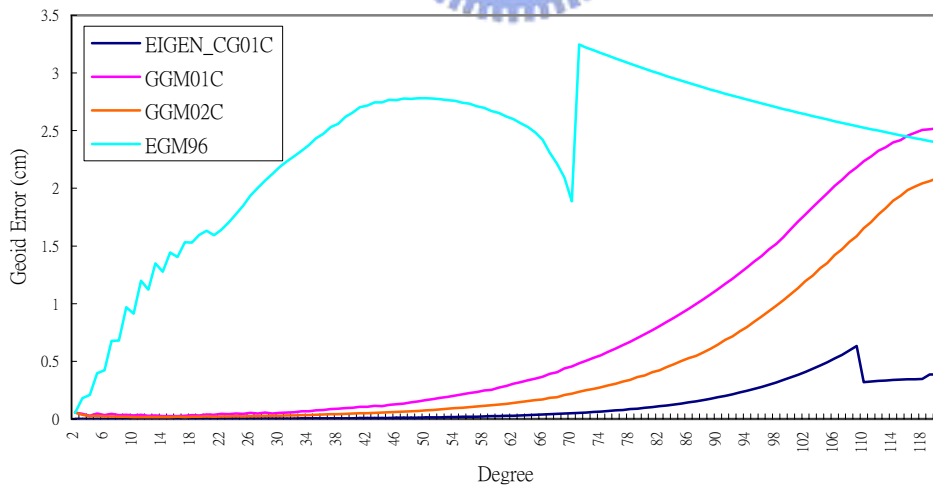


圖 8-7 CHAMP、GRACE 結合面資料大地起伏誤差

Geoid Error by Degree

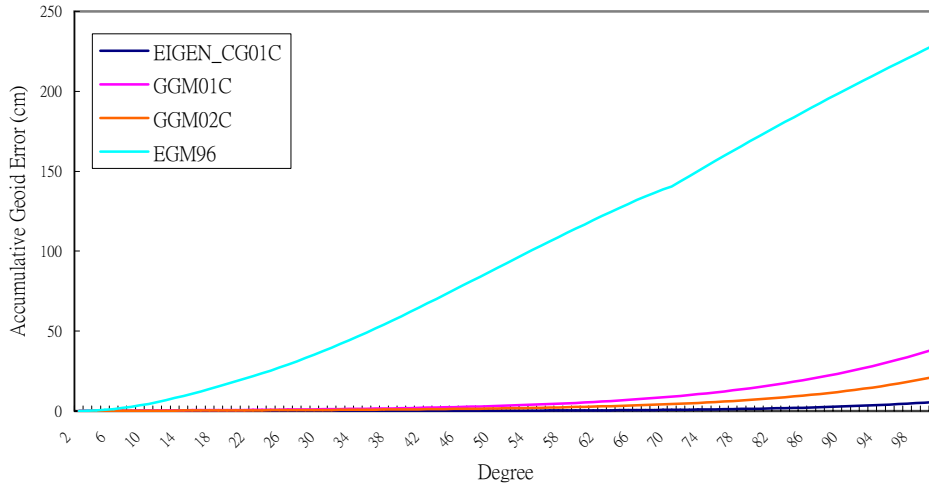


圖 8-8 CHAMP、GRACE 結合地面資料大地起伏累積誤差

由圖 8-7、8-8 可知，如果將 GRACE，CHAMP 兩種衛星資料再加上地面資料會使精度大大提高，足見衛星重力測量已開創重力測量之新紀元，未來 GOCE 再加入，將會使由太空觀測地球重力時變更加精細。

(四) GGM01S

GGM01S 係由美國德州大學空間研究中心解算 111 天 GRACE 資料，自 2002 年 8 月至 11 月資料，包括 K 波段距離變化率、姿態角及加速度儀資料，不加 Kaula 約制，沒有其他衛星資料也沒有地面重力資料甚至沒有任何先驗條件資料，最高階次展開至 120 階而完全可靠的階次可達 95 階次，解算時海潮模式係 CSR4.0，而固體潮係 IERS96 彈性地球模式，預估之參數包括 (1) 每天 2 個弧段之初始狀態 (2) 每天加速度儀之偏移 (biases) 和一個尺度因子 (3) KBR 偏移、GPS 整數解及天頂延遲。

(五) GGM01C

GGM01C 係 GGM01S 結合 TEG4 重力場而產生的，解算至 200 階，圖 8-9 是 GGM01S 與 EGM96 各計算至 70 階所造成之大地起伏誤差，由圖中可知由於 GRACE 資料之全球性及一致性，所提昇之大地起伏誤差在陸地與海洋上並無區別，而 EGM96 二者差別很大，GGM01S 到 70 階時 (空間解析度 300 km) 誤差約 2cm，而到 90 階 (空間解析度 200 km) 為 6 cm。

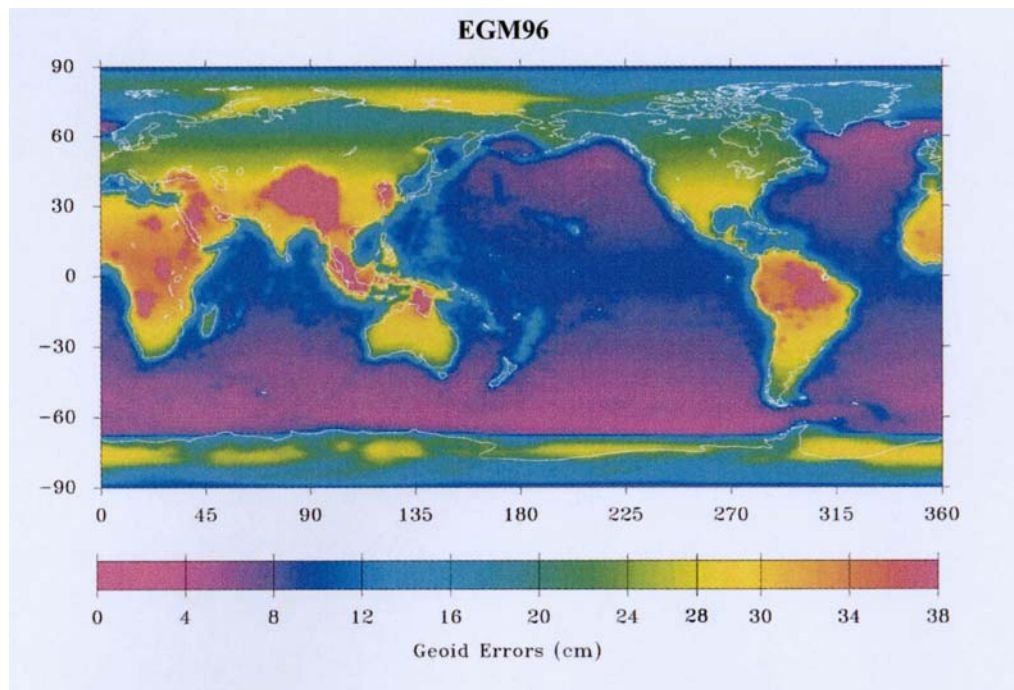
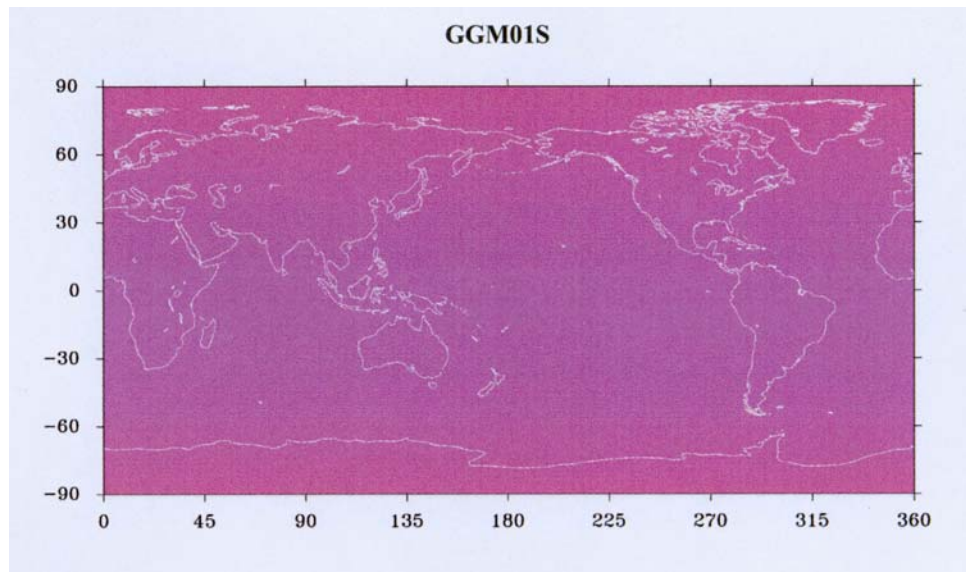


圖 8-9 GGM01S 與 EGM96 各計算至 70 階所造成之大地起伏誤差

(六) GGM02S

GGM02S 係由 CSR 解算，利用 GRACE 衛星資料自 2002 年 4 月至 2003 年 12 月共 363 天，資料包括 KBR、姿態角及加速度儀資料，仍不加 Kaula 約制，沒有其他衛星重力資料，沒有地面重力資料，也無任何先驗條件資料。GGM02S 解算至 160 階，可靠之階次至 120 階次，解算參數同 GGM01S，唯一不同的是 GGM02S 解算加速度儀尺度比是每月解算一個尺度比，而 GGM01S 僅解算一個尺度因子。

(七) GGM02C

GGM02C 是 GGM02S 係利用 TEG4 變方協變方 (200 階) 結合地面重力資料, 除此之外 \overline{C}_{20} 約制於 EGM96 之長時期之平均值, GGM02C 解算至 200 階且皆可保留完全正確的訊號, 亦可利用 EGM96 200 階以上之係數平滑地擴充至 360 階次。

圖 8-10 是利用 GGM02S 70 階次之變方—協變方預估大地起伏誤差全球分布圖, 由於 GRACE 衛星重力資料之全球性及均勻性存在陸上及海上所造成之大地起伏誤差並無差異。

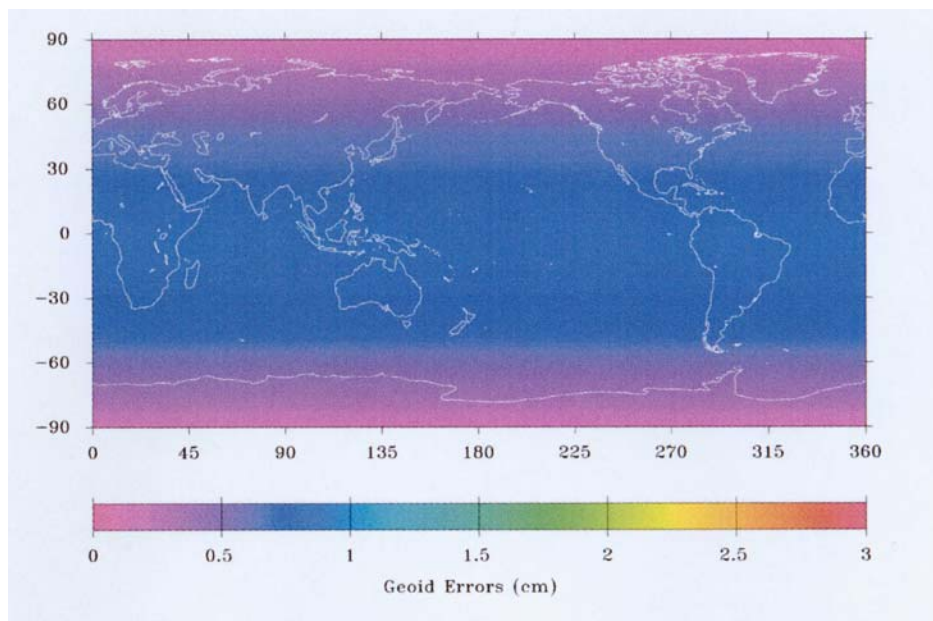


圖 8-10 利用 GGM02S 70 階次之變方—協變方預估大地起伏誤差全球分布圖

8.3 本研究解算之平均地球重力場

本研究案僅使用 CHAMP、GRACE 軌道, 加速度儀資料僅當非保守力來扣除, 而 GFZ 在解算重力場時觀測量有 GPS 追蹤資料、K 波段資料、加速度儀及姿態角資料, 且其是利用動力法求解, 解算精度較高但資料處理較繁雜計算量也很龐大。本研究解算之方法及流程前章已說明, 此處不再贅述, 僅說明解算七天資料時地位係數精度約 10^{-8} , 解算一個月精度可提升一個數量級達 10^{-9} , 全年資料一起解時又可再提升。本研究係採每 7 天為一弧段, 解算地位係數, 並儲存其法方程式及參數, 最後再累加法方程式一起解算, 可節省由觀測量組法方程式計算時間, 又本法快速又便利, 不像動力法如 NASA 的 GEODYN 或 GFZ 的 EPOS 軟

體複雜難懂、速度又慢。依累加法方程式方式，本文共解算三種重力場模型，將 CHAMP 一年資料一起解算一平均地球重力場 WCG_CHAMP，另將 GRACE-A、GRACE-B 各 4 個月之資料整合一起解算得 2003 年 7 月~2003 年 10 月之平均重力場為 WCG_GRACE，最後將 CHAMP 及 GRACE 所有資料一起解算得 WCG_CHAMP+GRACE 重力場模型。

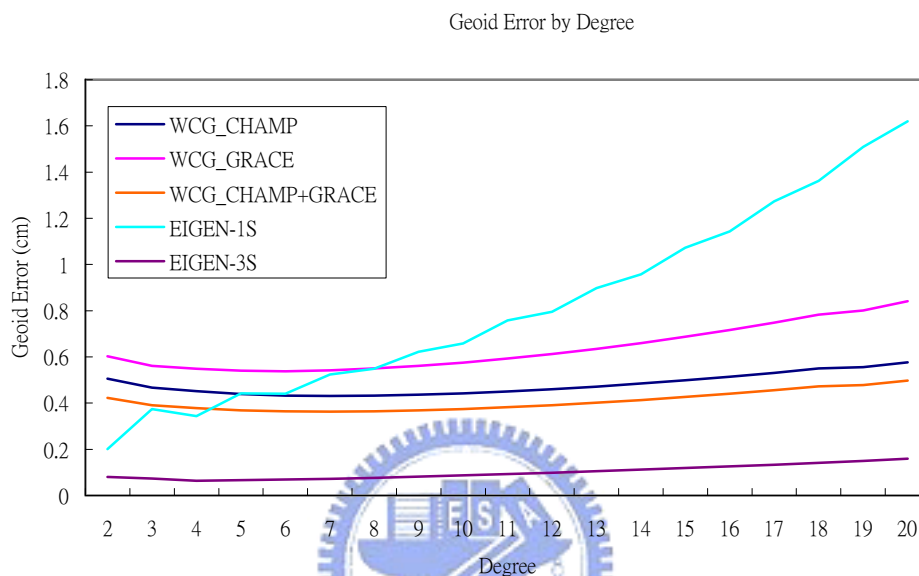


圖 8-11 本文解算之重力場與 CHAMP 重力場大地起伏誤差

由圖 8-11 及 8-12 分析可知，本文將 CHAMP 及 GRACE 資料聯合解算之重力場時，重力場之精度比個別資料解算時精度較高，在 8 階以上本文解算之三種模型皆比 EIGEN-1S 精度高，在圖 8-1 中 EIGEN-1S 在 20 階以內比 EGM96 精度高，所以在空間解析度 1000Km 時，本文求解之重力場模型精度比 EGM96 高。

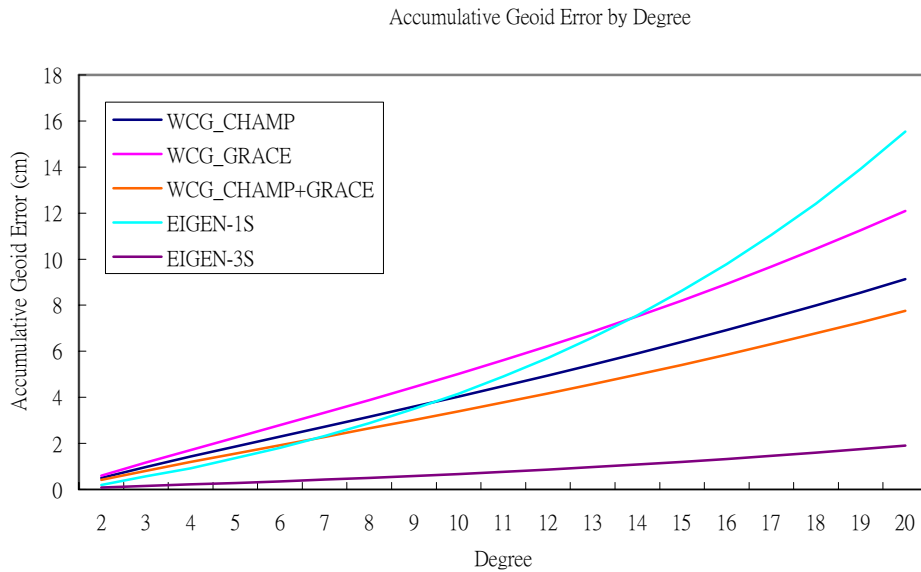


圖 8-12 本文解算之重力場與 CHAMP 重力場大地起伏累積誤差

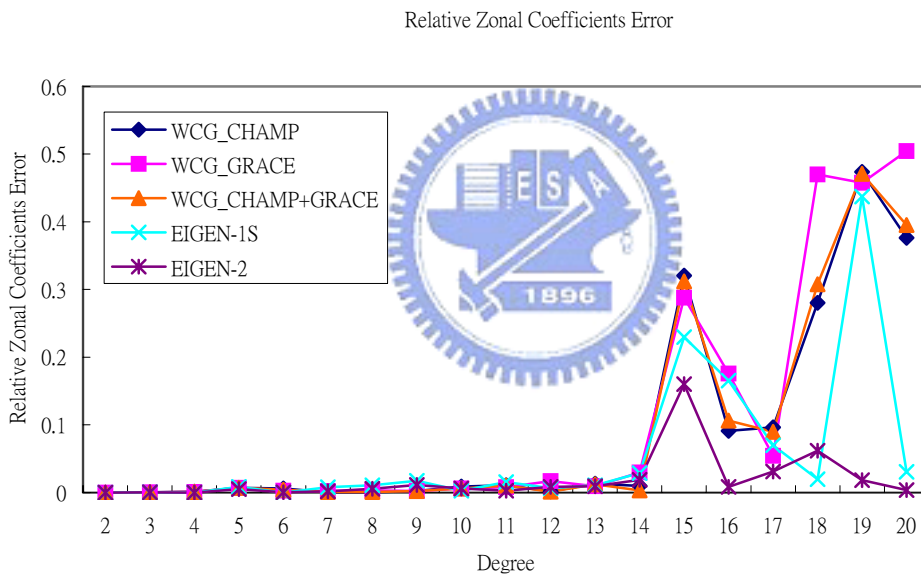


圖 8-13 本文解算之重力場與 CHAMP 重力場帶諧係數相對誤差

由圖 8-13 可知各模型前 14 階帶諧係數相對精度都相當高，但各模型在 15、19 階相對誤差都明顯較大，乃因其為共振項，較難求解。

表 8-2 及圖 8-16、圖 8-17、圖 8-18 說明本文利用 CHAMP 資料解算至 20 階的重力場 WCG_CHAMP 與 GFZ 解算重力場之大地起伏差，最大差異約在 1 公尺左右，差值之 RMS 值為 25cm。最大差值皆發生在南北兩極，其它地方大約在 20cm 左右。

表 8-3 說明本文解算之重力場與 GFZ 重力場之重力異常之差異，最大差異約 2.7mGal，差異之 RMS 值為 0.7mGal，最大差異仍是在南北極，這是因為

CHAMP 傾角僅 87° ，在南北極資料會有極溝 (plar gab)，且資料品質較差。

表 8-4、8-5 及圖 8-20、圖 8-21 為本文利用 GRACE 資料解算之重力場模型與 GFZ 公佈之重力場模型大地起伏及重力異常之差異，大地起伏最大差值約 90cm 左右，RMS 為 26cm，重力異常最大差異 2.7mGal，RMS 為 0.7mGal，情形同 CHAMP。最大差異仍發生在南北極，尤其是北極，本文求解之模型與 GRACE 四種模型，大地起伏及重力異常之最大、最小差異皆發生在相同地區。

表 8-6 為本文解算之重力場模型及 CHAMP、GRACE 之各種重力場模型精度之比較，CG01C 為目前最佳之重力場模型，其精度比 EGM96 高一數量級。

GFZ 之 GRACE02S 雖不加入地面重力資料，在空間解析度 200Km 時，大地起伏誤差僅 5mm，可見 GRACE 衛星之對地球重力場之貢獻，EIGEN-3S 在 60 階以後呈現極不穩定，在空間解析度 200Km (N=100) 時誤差最大。在本文求解之 WCG_CHAMP、WCG_GRACE 及 WCG_CHAMP+GRACE 三種地球重力場模型之大地起伏誤差，在空間解析度 1000km 時，分別為 6mm、8mm 及 5mm，可知觀測量愈多，精度愈高，也說明 CHAMP 及 GRACE 軌道品質一致。

由本文研究可知，直接加速度法理論方法正確，用於探討重力場時變極為快速、便利，在衛星定軌及地球重力場之求法是屬於兩步法之第二步，因此本法解算精度之關鍵在於衛星軌道之精度及其它擾動力模式之正確，未來 COSMIC 任務中，可以本研究之直接加速度法來探求重力場之時變。

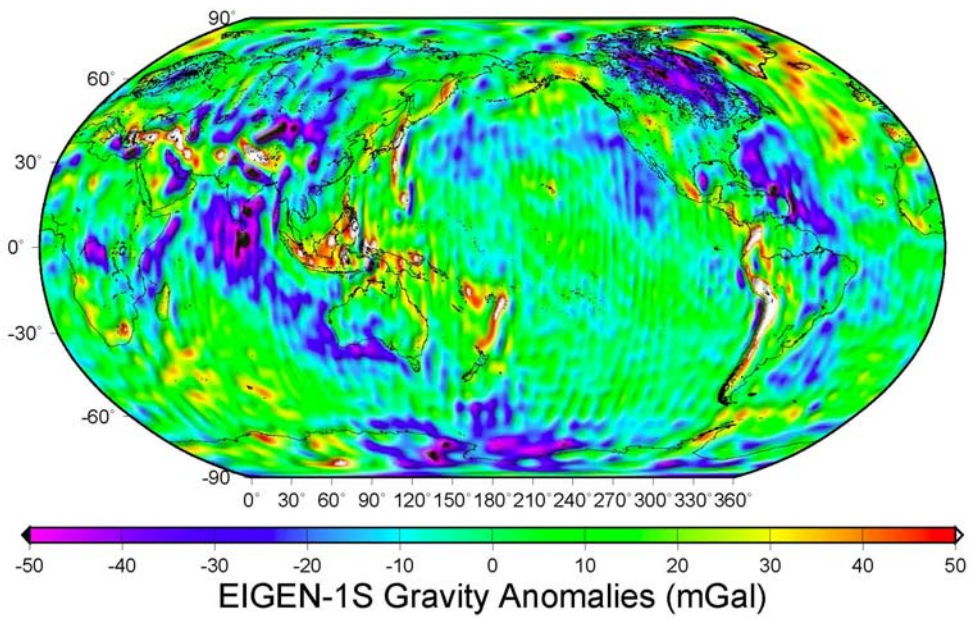
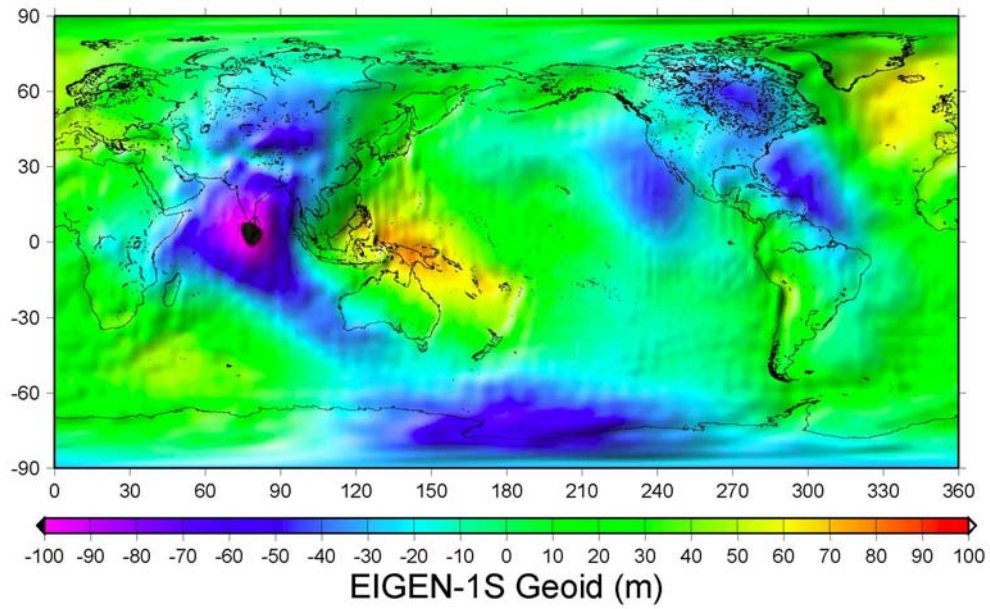


圖 8-14 EIGEN-1S 重力場模型展開至 100 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖）

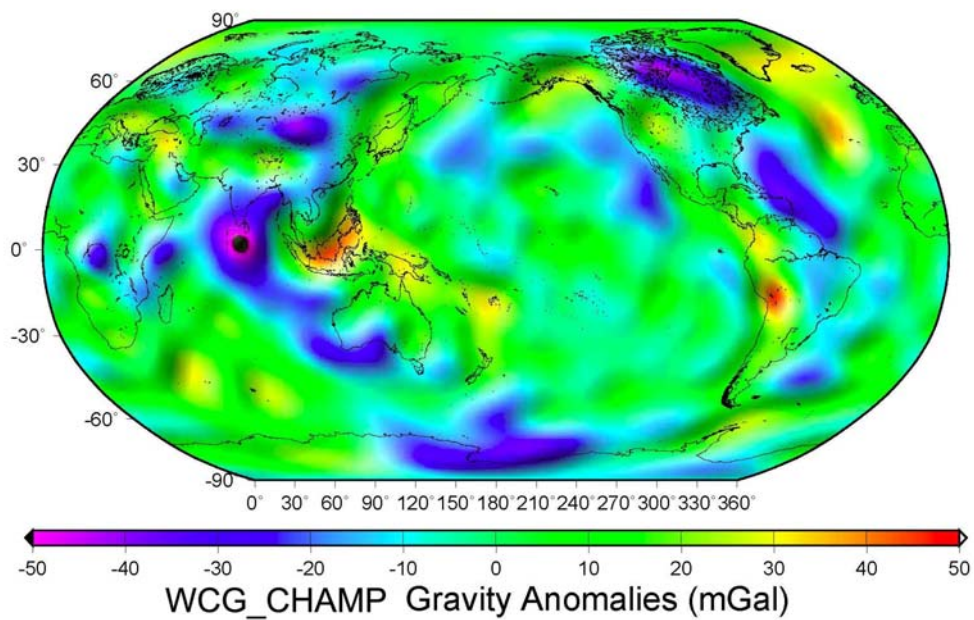
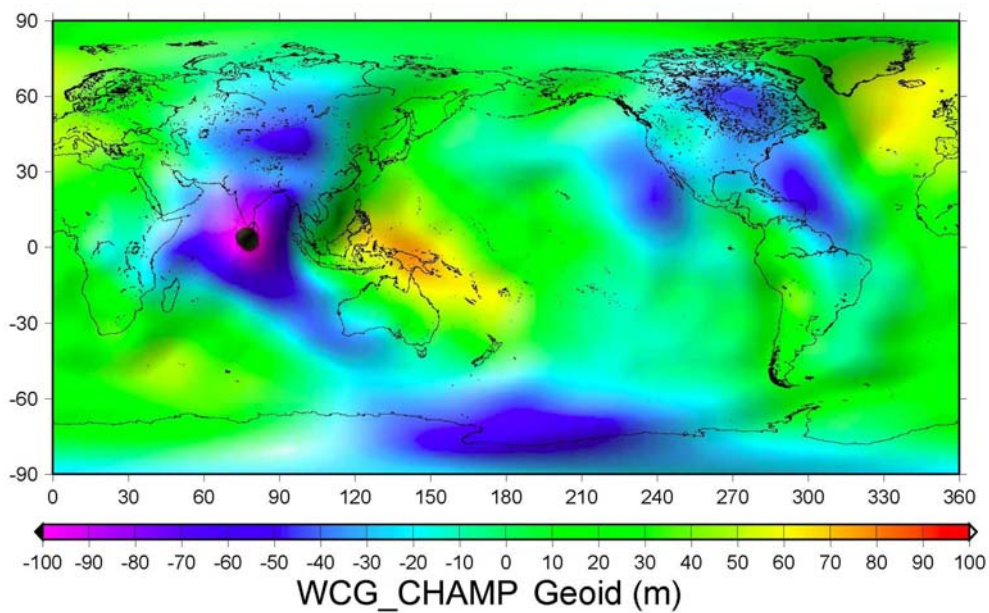


圖 8-15 本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型展開至 20 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖）

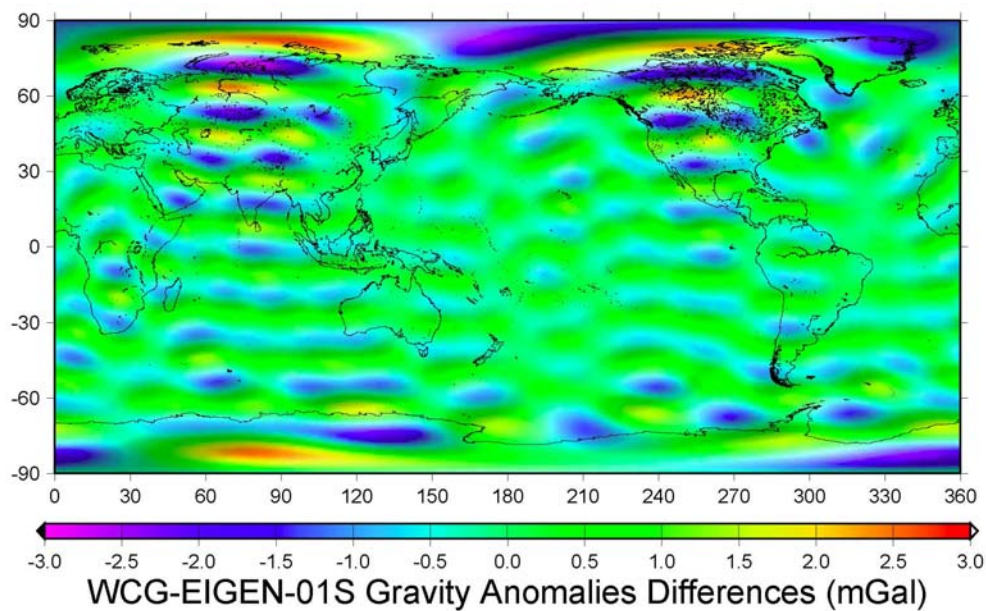
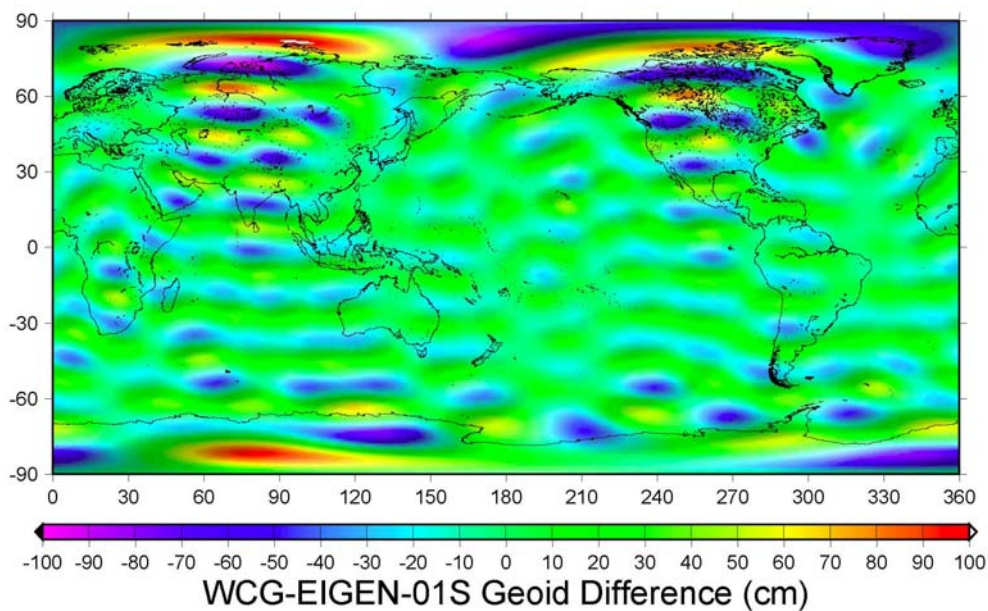


圖 8-16 本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型與 EIGEN-01S 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖）

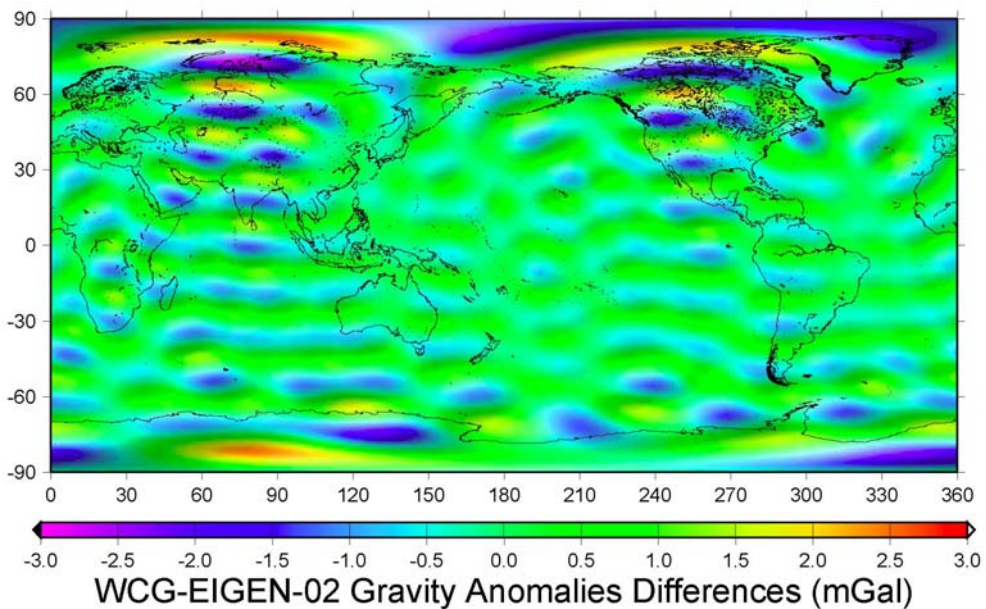
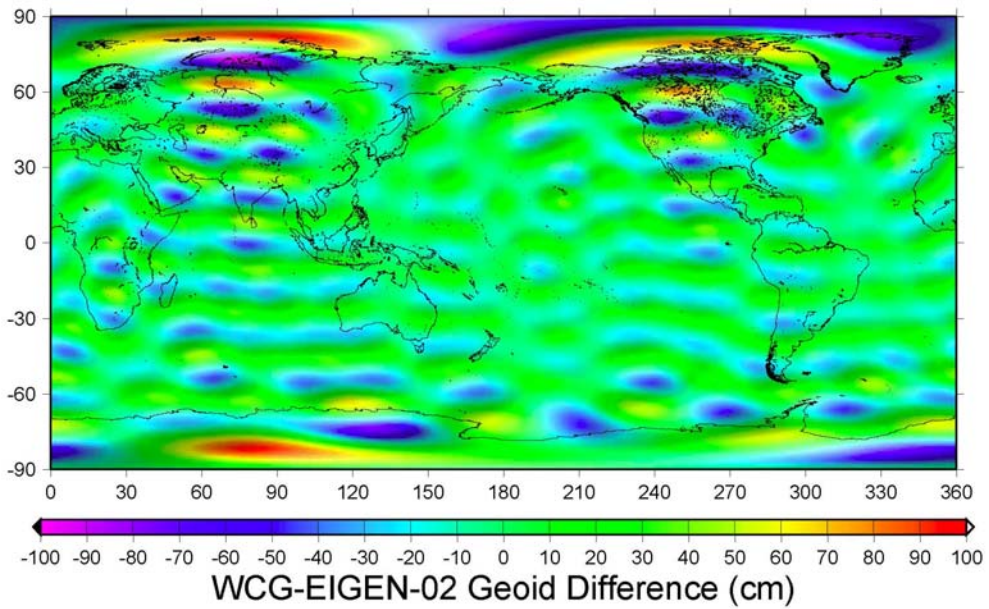


圖 8-17 本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型與 EIGEN-2 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖）

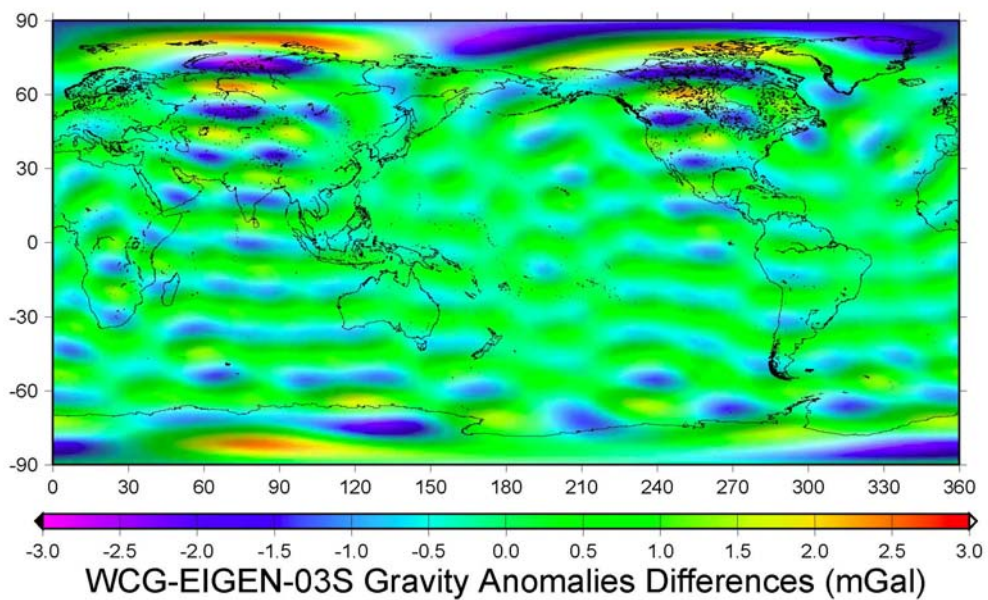
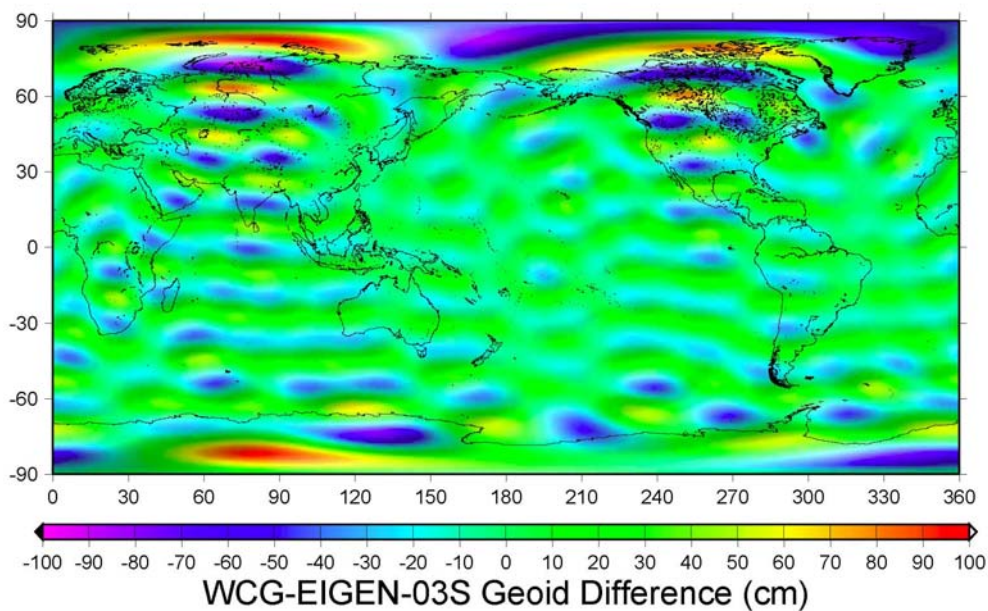


圖 8-18 本文利用 CHAMP 資料計算之重力場模型與 EIGEN-03S 各展開至 20 階之大地起伏差值（上圖）及重力異常差值（下圖）

表 8-2 本文 WCG_CHAMP 模型與 CHAMP 公布模型的大地起伏差值比較結果

重力場模型 大地起伏 差值(cm)	WCG_CHAMP to EIGEN-01S(20)	WCG_CHAMP to EIGEN-2(20)	WCG_CHAMP to EIGEN-03S(20)
最大差值	101.0	97.9	98.2
經度 (deg)	97.0	82	96.5
緯度 (deg)	81.5	-82	81.5
最小差值	-97.2	-96.0	-95.0
經度 (deg)	78.5	77	77.5
緯度 (deg)	72.5	72.5	72.5
平均差值	-0.25	-0.08	-0.15
差值之 RMS	26.0	25.5	25.8



表 8-3 本文 WCG_CHAMP 模型與 CHAMP 公布模型的重力異常差值比較結果

重力場模型 重力異常 差值(mGal)	WCG_CHAMP to EIGEN-01S (20)	WCG_CHAMP to EIGEN-2 (20)	WCG_CHAMP To EIGEN-03S (20)
最大差值	2.70	2.54	2.62
經度 (deg)	101.5	97.5	97.5
緯度 (deg)	81.0	81.5	81.5
最小差值	-2.81	-2.80	-2.78
經度 (deg)	78.5	77	78.0
緯度 (deg)	72.5	72.5	72.5
平均差值	-0.023	-0.024	-0.024
差值之 RMS	0.73	0.71	0.72

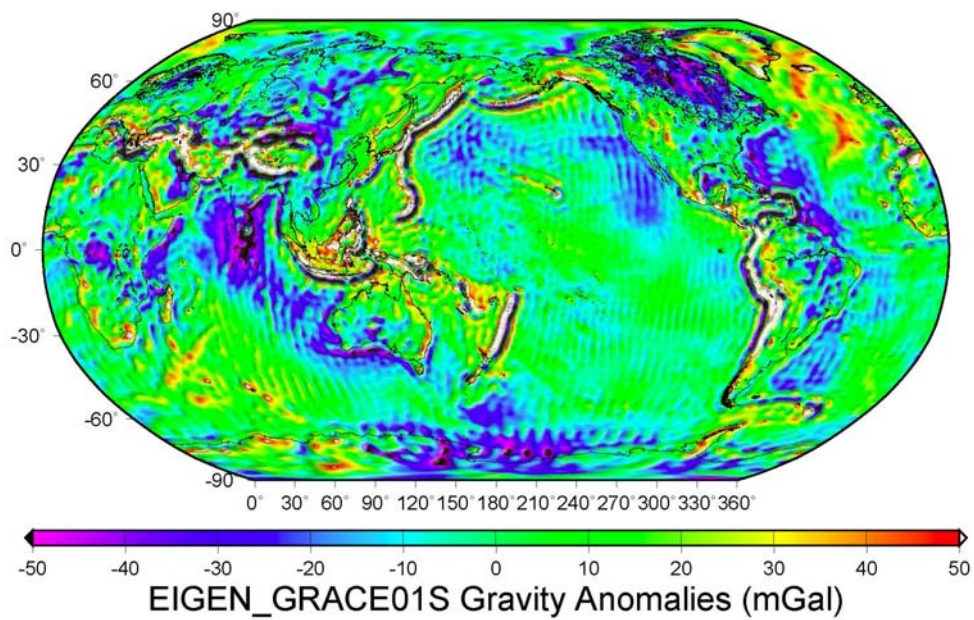
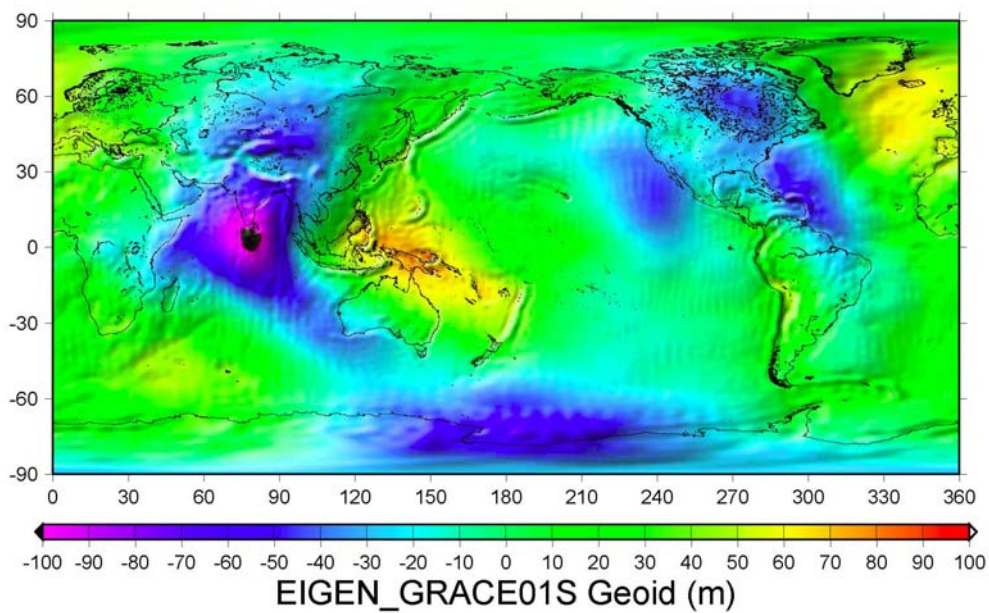


圖 8-19 EIGEN-GRACE01S 重力場模型展開至 100 階之大地起伏 (上圖) 及重力異常 (下圖)

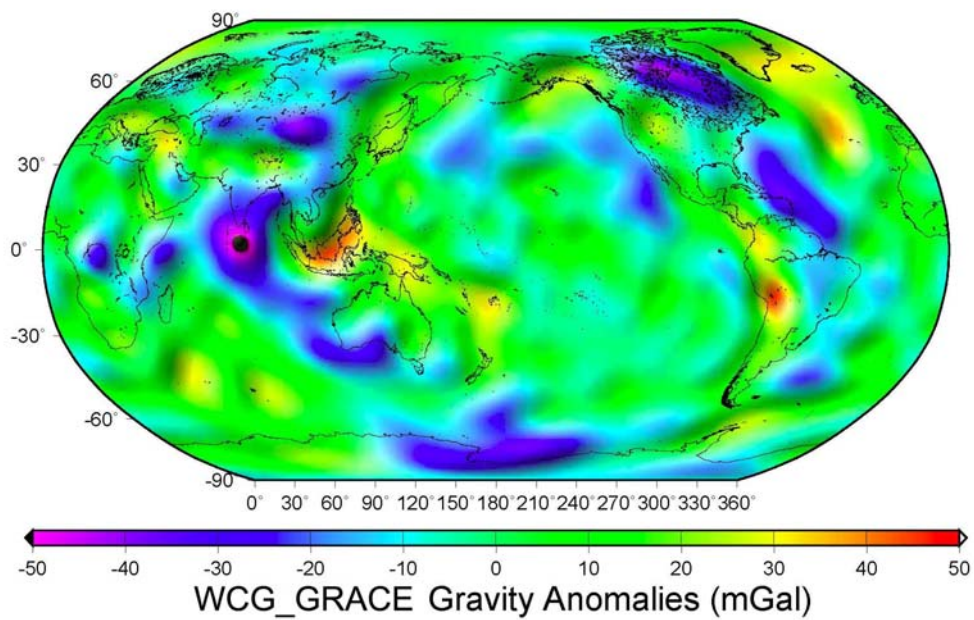
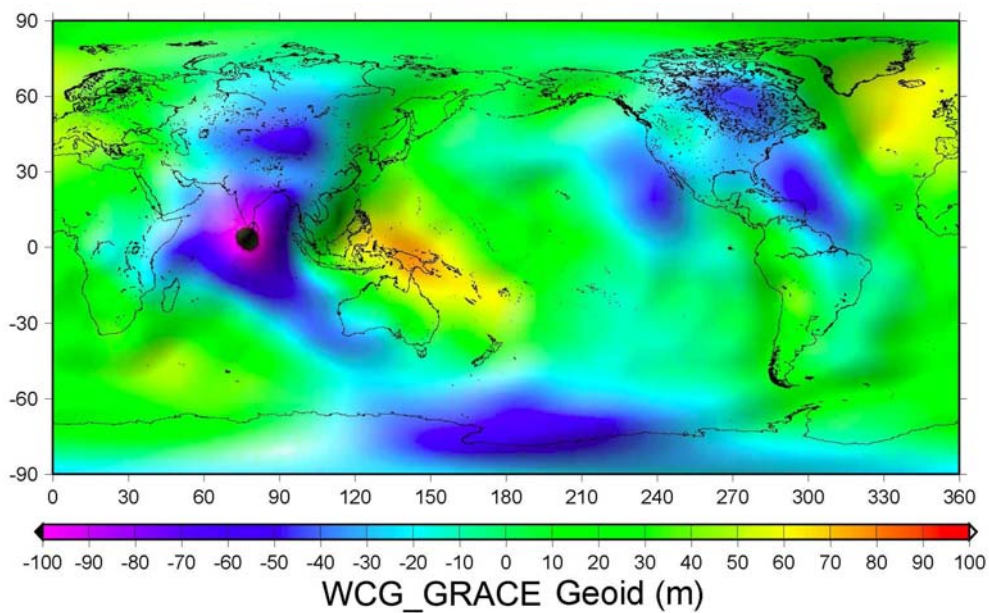


圖 8-20 本文利用 GRACE 資料計算之重力場模型展開至 20 階之大地起伏（上圖）及重力異常（下圖）

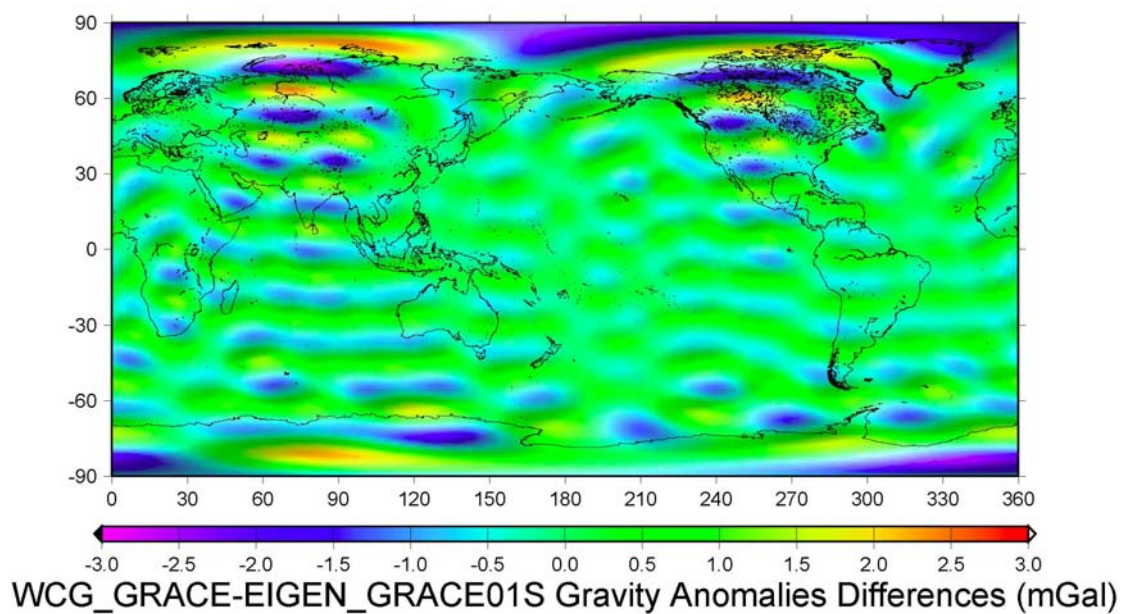
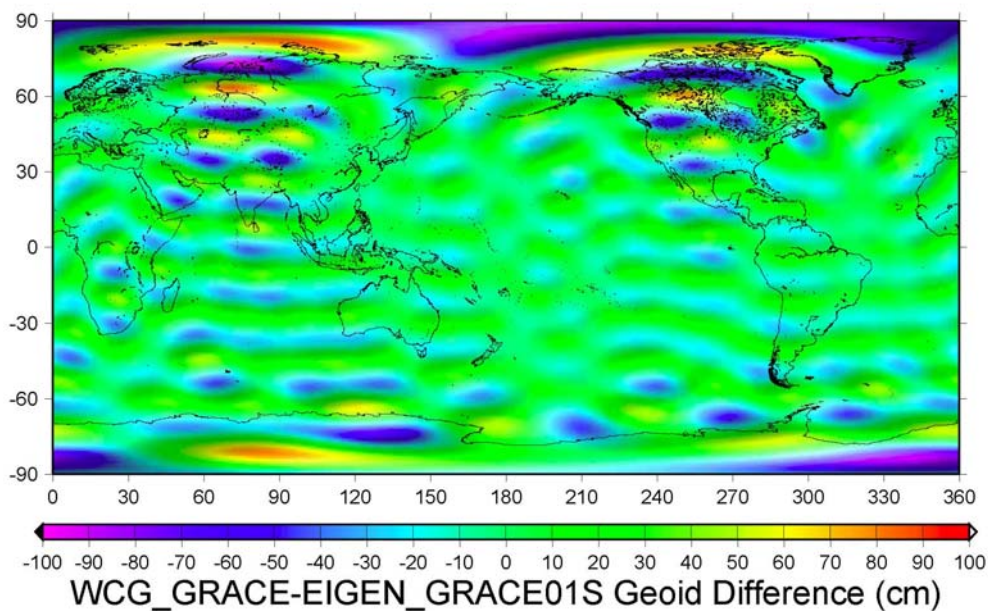


圖 8-21 本文利用 GRACE 資料計算之重力場模型與 EIGEN-GRACE-01S 各展開至 20 階之大地起伏差值 (上圖) 及重力異常差值 (下圖)

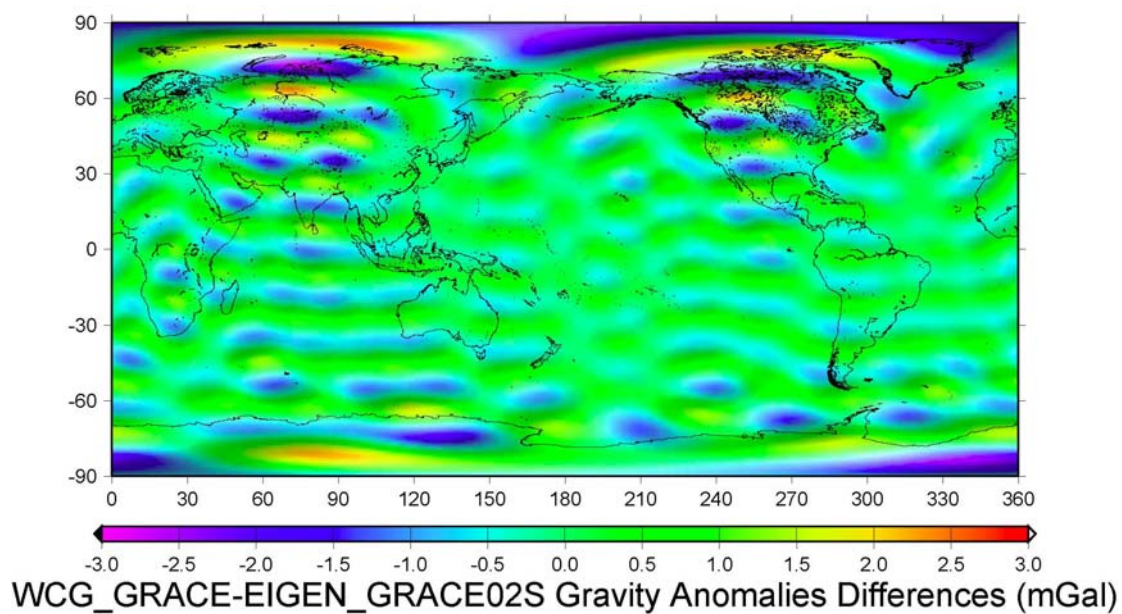
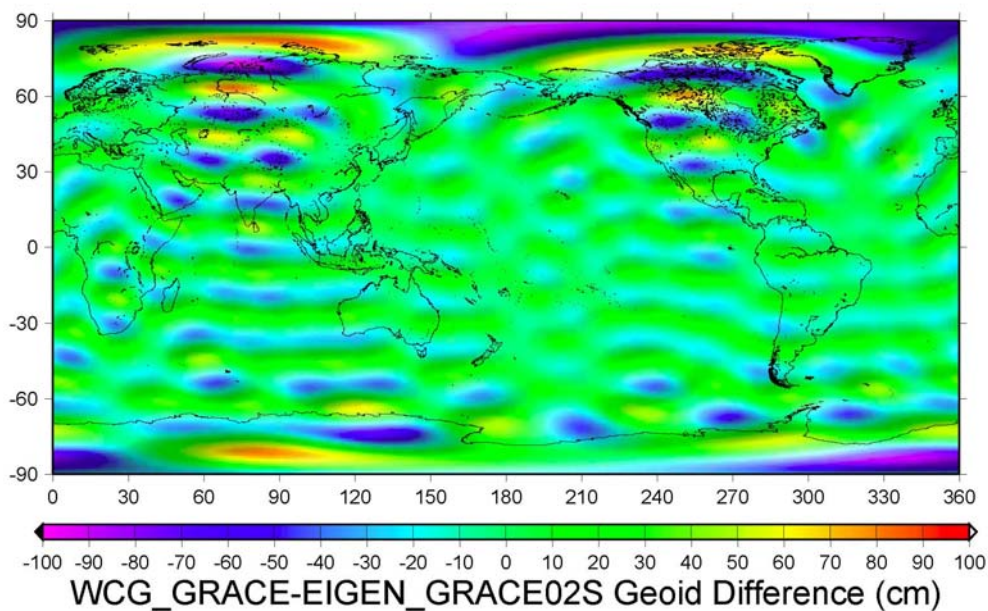


圖 8-22 本文利用 GRACE 資料計算之重力場模型與 EIGEN-GRACE-02S 各展開至 20 階之大地起伏差值 (上圖) 及重力異常差值 (下圖)

表 8-4 本文 WCG_GRACE 模型與 GFZ 公布模型的大地起伏差值比較結果

重力場模型 大地起伏 差值(cm)	WCG_GRACE to GGM01S (20)	WCG_GRACE To GGM01S (20)	WCG_GRACE To EIGEN- GRACE01S (20)	WCG_GRACE To EIGEN- GRACE02S (20)
最大差值	90.6	91.5	85.4	85.2
經度 (deg)	101.5	101.5	101.5	101.5
緯度 (deg)	81.0	81.0	81.0	81.0
最小差值	-90.5	-90.1	-95.5	-95.7
經度 (deg)	77.0	77.0	77.0	77.0
緯度 (deg)	72.5	72.5	72.5	72.5
平均差值	-0.55	-0.29	-1.88	-1.91
差值之 RMS	25.9	25.9	26.1	26.1



表 8-5 本文 WCG_GRACE 模型與 GFZ 公布模型的重力異常差值比較結果

重力場模型 重力異常 差值(mGal)	WCG_GRACE to GGM01S (20)	WCG_GRACE To GGM02S (20)	WCG_GRACE To EIGEN- GRACE01S (20)	WCG_GRACE To EIGEN- GRACE02S (20)
最大差值	2.44	2.44	2.44	2.44
經度 (deg)	102.0	102.0	102.0	102.0
緯度 (deg)	81.0	81.0	81.0	81.0
最小差值	-2.71	-2.72	-2.73	-2.73
經度 (deg)	77.0	77.0	77.0	77.0
緯度 (deg)	72.5	72.5	72.5	72.5
平均差值	-0.044	-0.044	-0.046	-0.047
差值之 RMS	0.72	0.72	0.72	0.72

表 8-6 各種重力場模型空間解析度及精度之比較

重力場模型	解算最大階數 (n)	空間解析度 (km)	大地起伏誤差 (解析度 200km 時) (cm)
EGM96	360	56	2.7
EIGEN-CG01C	360	56	0.4
GGM01C	200	100	1.6
GGM02C	200	100	1.1
GGM01S	120	167	3.0
GGM02S	160	125	1.3
GRACE01S	140	143	5.2
GRACE02S	150	133	0.5
EIGEN-1S	100	200	2.3
EIGEN-2	120	167	8.2
EIGEN-3S	120	167	24.8
WCG_CHAMP	20	1000	0.6
WCG_GRACE	20	1000	0.8
WCG_CHAMP+ GRACE	20	1000	0.5

註：WCG_CHAMP、WCG_GRACE 及 WCG_CHAMP+ GRACE 大地起伏誤差係空間解析度為 1000km 時