

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以超導及衛星重力決定黑潮時變：氣候變遷對海洋環流及 海水位的影響 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 100-2611-M-009-001-
執行期間：100年08月01日至101年07月31日
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：黃金維
共同主持人：吳朝榮

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 10 月 29 日

中文摘要：超導重力儀為以 1 Hz 之取樣頻率獲得重力觀測量之整合性重力感測裝置。超導重力儀 T48 於 2006 年設置在新竹國家重力基準站，T49 則於 2012 年設置在陽明山衛星追蹤站。超導重力儀可偵測測站周圍因質量重新分佈引起的重力變化，其精度可達 1 ngal 等級。為萃取因黑潮質量改變造成之重力變化，需使用最佳環境改正模式進行環境改正。亞熱帶逆流 (Subtropical Counter Current, STCC) 區域的中尺度渦漩向西移動，會與黑潮產生交互作用。本研究模擬渦漩在不同半徑、位置與形狀下，計算渦漩造成海水質量移動對新竹超導站與陽明山超導站之重力效應。GRACE 提供之全球重力場已廣泛應用於氣候變遷與海洋質量重新分佈之相關議題，本研究發展 GRACE 區域解配合最新的 CSR-RL05，利用 CSR-RL05 提供 60 階之地位係數(2004 年 1 月至今)估算黑潮路徑之海洋質量變化。蒐集 Topex/Poseidon、Jason-1 與 Jason-2 的 pass240 於台灣東部近 20 年之海面高觀測資料(Sea surface height)，配合台灣東部黑潮流域的大地水準面模型(Geoid)，計算黑潮軸心位置、軸心流速、流量與寬度隨時間之 20 年變化量。

中文關鍵詞：黑潮、渦漩、超導重力儀、GRACE、衛星測高

英文摘要：The superconducting gravimeter (SG) is a sensor that detects gravity change with 1Hz sampling rate. Since 2006, a SG (T48) has been installed at Hsinchu. The second SG (T49) has been installed at the GPS permanent tracking station of Mt. Yangming satellite tracking station. SG can detect gravity change due to the mass re-distribution and achieve level of precision of one ngal (periodic signal). Because gravity change from a SG is a combination of many sources, the signal from Kuroshio change is weak. In order to pick up the gravity change due to Kuroshio change, we use optimal models to correct gravity signals. The mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent (STCC) propagate westward and interact with the Kuroshio Current in many ways. We simulation some eddies with different radii, centers and shapes, and compute the gravity effect on T48 and T49 due to the eddies. Global gravitational field provided by GRACE has been used for climatic change studies in connection to oceanic mass re-distribution. We develop a regional solution to estimate the oceanic

mass change along the current' s path using recent GRACE product CSR-RL05 which provides the geopotential coefficients to the maximum degree and order 60 monthly since January, 2004. We also collect sea surface height data from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Jason-2 (1992 to present). With a proper geoid model over the Kuroshio Current, we determine the long-term changes in sea level, volume transport and width over the Kuroshio Current area.

英文關鍵詞： Kuroshio, mesoscale eddies, Superconducting gravimeter, GRACE, satellite altimeter

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

期中進度報告

期末報告

以超導及衛星重力決定黑潮時變：氣候變遷對海洋環流及海水位的影響

Temporal variation of Kuroshio Current from superconducting and satellite gravimetry: impact of climate change on ocean circulations and sea level

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2611-M-009-001-

執行期間：100年8月1日至101年7月31日

執行機構及系所：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：黃金維

共同主持人：吳朝榮

計畫參與人員：劉雅琦、連紫猗、Natthachet Tangdamrongsub、施宣昶

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 ____ 份：

移地研究心得報告

出席國際學術會議心得報告

國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開查詢

中 華 民 國 101 年 10 月 31 日

目錄

目錄.....	II
中文摘要.....	III
英文摘要.....	IV
一、研究背景.....	1
二、重力資料.....	2
2.1 超導重力資料.....	2
2.2 GRACE 衛星重力資料.....	2
2.3 測高重力資料.....	3
三、以超導重力儀偵測黑潮質量變遷.....	4
3.1 超導重力環境改正.....	4
3.1.1 超導重力率定.....	5
3.1.2 大氣壓力改正.....	5
3.1.3 極移改正.....	6
3.1.4 地下水及土壤濕度改正.....	6
3.1.5 低雜訊模型.....	7
3.2 模擬渦漩對超導站之重力訊號.....	8
四、以 GRACE 之區域解探討黑潮中尺度之質量變化.....	13
五、以衛星測高資料探討黑潮區域跨年變化.....	16
六、結果與討論.....	19
參考文獻.....	19

中文摘要

超導重力儀為以1 Hz之取樣頻率獲得重力觀測量之整合性重力感測裝置。超導重力儀T48於2006年設置在新竹國家重力基準站，T49則於2012年設置在陽明山衛星追蹤站。超導重力儀可偵測測站周圍因質量重新分佈引起的重力變化，其精度可達1 ngal等級。為萃取因黑潮質量改變造成之重力變化，需使用最佳環境改正模式進行環境改正。亞熱帶逆流(Subtropical Counter Current, STCC)區域的中尺度渦旋向西移動，會與黑潮產生交互作用。本研究模擬渦旋在不同半徑、位置與形狀下，計算渦旋造成海水質量移動對新竹超導站與陽明山超導站之重力效應。GRACE提供之全球重力場已廣泛應用於氣候變遷與海洋質量重新分佈之相關議題，本研究發展GRACE區域解配合最新的CSR-RL05，利用CSR-RL05提供60階之地位係數(2004年1月至今)估算黑潮路徑之海洋質量變化。蒐集Topex/Poseidon、Jason-1與Jason-2的pass240 於台灣東部近20年之海面高觀測資料(Sea surface height)，配合台灣東部黑潮流域的大地水準面模型(Geoid)，計算黑潮軸心位置、軸心流速、流量與寬度隨時間之20 年變化量。

關鍵字：黑潮、渦旋、超導重力儀、GRACE、衛星測高

Abstract

The superconducting gravimeter (SG) is a sensor that detects gravity change with 1Hz sampling rate. Since 2006, a SG (T48) has been installed at Hsinchu. The second SG (T49) has been installed at the GPS permanent tracking station of Mt. Yangming satellite tracking station. SG can detect gravity change due to the mass re-distribution and achieve level of precision of one ngal (periodic signal). Because gravity change from a SG is a combination of many sources, the signal from Kuroshio change is weak. In order to pick up the gravity change due to Kuroshio change, we use optimal models to correct gravity signals. The mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent (STCC) propagate westward and interact with the Kuroshio Current in many ways. We simulate some eddies with different radii, centers and shapes, and compute the gravity effect on T48 and T49 due to the eddies. Global gravitational field provided by GRACE has been used for climatic change studies in connection to oceanic mass re-distribution. We develop a regional solution to estimate the oceanic mass change along the current's path using recent GRACE product CSR-RL05 which provides the geopotential coefficients to the maximum degree and order 60 monthly since January, 2004. We also collect sea surface height data from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Jason-2 (1992 to present). With a proper geoid model over the Kuroshio Current, we determine the long-term changes in sea level, volume transport and width over the Kuroshio Current area.

Keywords: Kuroshio, mesoscale eddies, Superconducting gravimeter, GRACE, satellite altimeter

一、研究背景

在海洋環流中，北赤道洋流(North Equatorial Current)因東北信風作用下使海水由東向西流，流至接近菲律賓東部海岸時會分為南、北兩支流，向北流的支流即為黑潮的初始點。臺灣東部海域為黑潮由南往北流經之區域，臺灣氣候與周圍海洋變化息息相關，藉由觀測黑潮與海水位時變性探討氣候變遷成為地球科學與大地測量領域中之重點。

觀測黑潮之時變性一般可就其傳輸量、海流速度等方面探討，如 Wunsch (2008)以頻譜分析估計北大西洋在多時間尺度(multi-year timescales)的傳輸量為 $\pm 20 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}$ ，因缺乏長期三維海洋環流觀測量，使分析海洋對氣候變遷造成之效應不確定性。Gilson 與 Roemmich (2002)分析 8.5 年(1993 中期~2001)黑潮紀錄，針對台灣東南部沿海黑潮上游部分估計平均與時變之地轉傳輸量(geostrophic transport)。Hwang 與 Kao (2002)使用 TOPEX/Poseidon 地面軌跡與精密大地起伏模式探討黑潮路徑、最大流速、傳輸量與寬度在季節與年間之變化。在資料蒐集方面，海研一、二、三號均裝設船碇式都卜勒流剖儀(Ship-Board Acoustic Doppler Current Profiler, Sb-ADCP)，利用 Sb-ADCP 蒐集 1991~2010 年航跡上各深度(< 300 m)之流速，海研五號於 2012 年啟用，未來將提供更多實測資料。

GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)衛星重力任設計於研究氣候變遷，藉由每月提供之球諧係數計算重力場變化。許多研究發現對 GRACE 重力場觀測海底壓力(ocean bottom pressure)與海洋流變化相關(Köhl et al., 2012; Chambers and Willis, 2008)。Wouters 與 Chambers (2010)發現在泰國灣之海底壓力有季節性與年間變化，此結果與衛星測高和海洋預估模型的結果一致。GRACE 之空間解析度較低(數百公里)，偵測臺灣東部海域之黑潮質量變化較困難，為彌補 GRACE 空間解析度的不足，可配合臺灣新竹國家重力基準站與陽明山衛星追蹤站的兩部超導重力儀之高精度記錄予以驗證。

二、重力資料

2.1 超導重力資料

超導重力儀(Superconducting Gravimeter, 簡稱 SG)為目前全球靈敏度最高之整合性重力感測裝置,其取樣頻率為 1Hz,精度可達 1nGal(10^{-9} m/s^2)。內政部分別於 2006 年與 2008 年將 SG-048 與 SG-049 設置於新竹十八尖山國家重力基準站之大地測量與地動監測實驗室(Laboratory of Geodesy and Geodynamics, 簡稱 LOGG)進行長期觀測。為監測大屯火山群活動訊號,於 2012 年 2 月將 SG-049 移至內政部陽明山擎天崗衛星追蹤站(YMSM),目前兩部超導重力儀之現況如圖 2-1 所示。為有效管理超導重力儀之數據,設定資料每日回傳於本實驗室之資料庫,並定期上傳至全球地球動力計畫(Global Geodynamic Project, GGP)。



圖 2-1、(上)SG-048 於新竹國家重力基準站；(下) SG-049 於陽明山擎天崗衛星追蹤站

2.2 GRACE 衛星重力資料

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 於 2002 年 3 月 17 日開始運行,可用於觀測地球重力場變化。GRACE 由兩顆微衛星(micro satellites)組成,如圖 2-2 所示,兩顆衛星位於同一近極軌道面運行且相距約 200 公里,距離地面高度約 400 公里。GRACE 主要酬載 K 波段測距系統(K-band ranging system, KBR)與加速度儀,由 KBR 量測獲得精度為一微米(μm)之兩衛星間距離,加速度儀記錄由非引力造成的擾動力,藉由解算 5 秒一筆之原始觀測量可得地球重力位

(Tangdamrongsub et al., 2012)。GRACE研究中心如GFZ(GeoForschungs Zentrum)、JPL(Jet Propulsion Laboratory)與CSR(Center for Space Research)發布Level 1與Level 2資料，Level 1資料包含酬載之GPS接收儀與KBR數據，Level 2包含各月份之重力球諧係數。

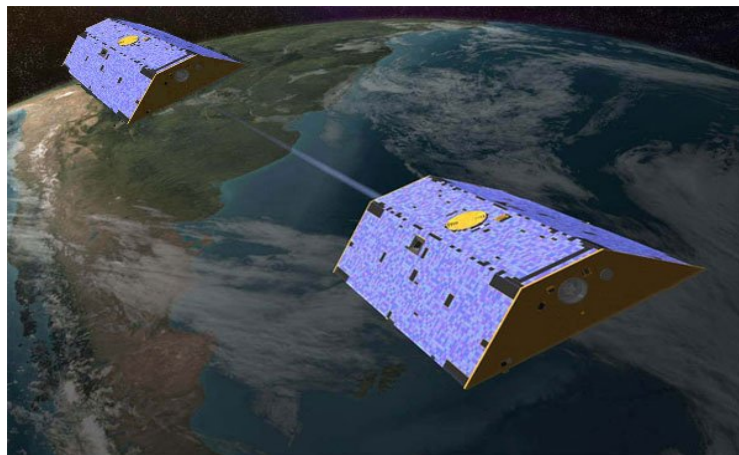


圖 2-2、GRACE 衛星示意圖(圖片來源：NASA earth observatory)

2.3 測高重力資料

本研究之衛星資料採用 Radar Altimeter Database System (RADS)提供的海平面資料庫，RADS 提供之數據經過衛星資料交叉校正(cross-calibrated)與標準化等處理程序，所採用之衛星為 Topex/Poseidon (T/P)、Jason-1 與 Jason-2，三衛星相關資訊如表 2-1 所示。蒐集近 20 年 Topex/Poseidon、Jason-1 與 Jason-2 於台灣東部之海面高觀測資料(Sea surface height, SSH)，衛星軌道中的 pass240 如圖 2-3 所示通過台灣東部海域，洽與黑潮路徑形成正交，並利用資料時間解析度為 10 天之特性探討黑潮之時變性。

表 2-1、衛星任務資訊 (資料來源：AVISO)

衛星	研制單位	發射日期	傾角(度)	時間解析度(天)
T/P	NASA/CNES	1992.08.10		
Jason-1	NASA/CNES	2001.12.07	66	10
Jason-2	NASA/CNES/ Eumetsat/NOAA	2008.06.20		

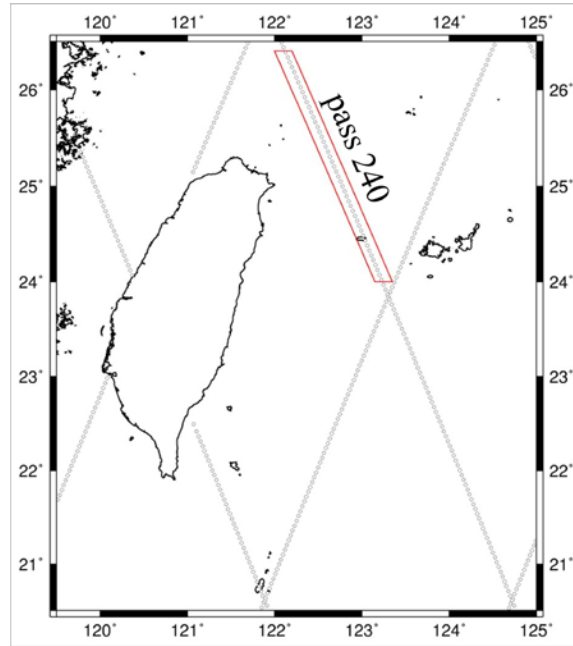


圖 2-3、衛星軌道分佈圖，pass240 通過臺灣東部海域，紅色框內為本研究使用之海面高觀測資料

三、以超導重力儀偵測黑潮質量變遷

3.1 超導重力環境改正

由於超導重力儀的輸出信號為電壓值，需經重力率定轉換為重力單位，因重力訊號含有週期及非週期性訊號，故將超導重力訊號進行潮位分析，以獲得固體潮及海潮負載的振幅及延遲相位。以超導重力儀內部之壓力計做為大氣壓力改正依據，將大氣對重力之影響量移除，參考 IERS 公佈的之極坐標，將極移運動對重力之影響量移除，並利用測站之土壤濕度、雨量等實測資料進行地下水與土壤濕度改正，超導資料處理流程如圖 3-1。

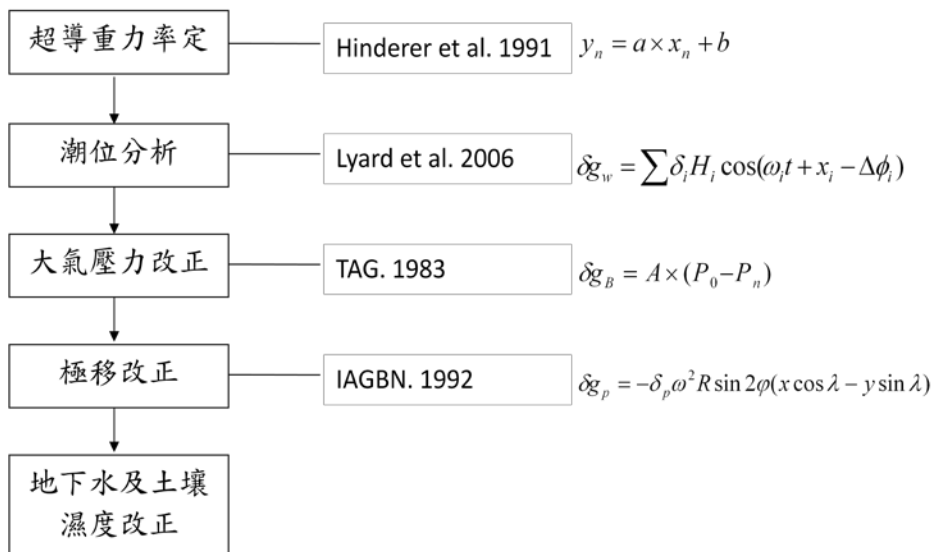


圖 3-1、超導資料處理流程

3.1.1 超導重力率定

由於超導重力儀之原始輸出為電壓伏特值，需進行超導重力率定以求定率定因子(calibration factor)，將原始數據轉換為重力單位。超導重力儀與絕對重力儀進行同步觀測，因觀測時所受的環境影響量一致，在線性轉換時可視為相同，本研究中的轉換式(Hwang et al., 2009)如下：

$$g(t) = f_c V(t) + b - st \quad (3-1)$$

其中， t 為觀測時間； g 為絕對重力儀讀數； V 為超導重力儀讀數； f_c 為率定因子； b 為平移量； s 為趨勢量。SG-048 之率定因子採用 $-75.96 \pm 0.07 \mu\text{Gal}/V$ (Hwang et al., 2009)，本研究針對 SG-049 位於陽明山擎天崗衛星追蹤站之率定因子進行兩次同步觀測，依最小二乘法求解率定因子為 $-74.69 \pm 0.26 \mu\text{Gal}/V$ 。

3.1.2 大氣壓力改正

除上述之固體潮與海潮負載外，一般大氣壓力變化量對測站產生之牛頓吸引力與大氣效應會影響重力值約數個 μgal ，計算大氣壓力效應如下(Hwang et al., 2009)：

$$\delta g_b = f_a (P_a - P_n) \quad (3-2)$$

其中，

$$P_n = 1013.25 \left(1 - \frac{0.0065 h_m}{288.15}\right)^{5.2559} \quad (3-3)$$

式中， f_c 為導納係數(admittance)(新竹站為 $-0.35 \mu\text{Gal hPa}^{-1}$ ，陽明山站為 $-0.30 \mu\text{Gal hPa}^{-1}$)； P_a 為超導重力儀對大氣壓力之觀測值； h_m 為測站正高(新竹站為 87.6m，陽明山站為 759.6 m)。圖 3-2 為新竹超導重力(上)與陽明山超導重力(下)大氣壓力對測站之重力變化量。

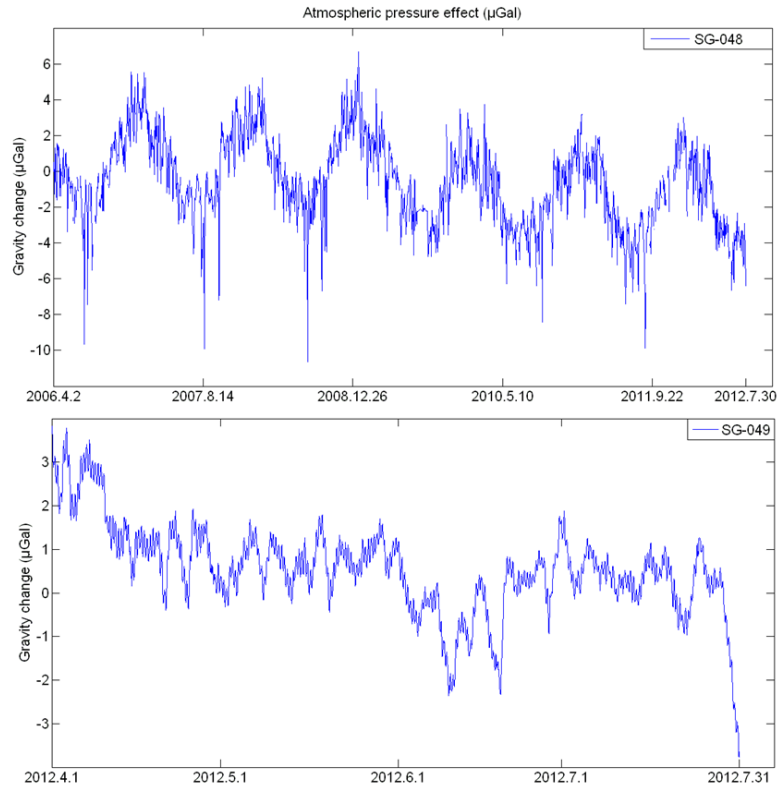


圖 3-2、新竹超導站(上)與陽明山超導站(下)受大氣壓力造成之重力變化

3.1.3 極移改正

極移改正是由重力基準站到地球旋轉軸距離的改變而引起的離心加速度變化所做的補償，計算極移改正量根據參考公式(Torge, 1989):

$$\delta g_p = -1.164 \times 10^8 \omega R \sin 2\varphi (x_p \cos \lambda - y_p \sin \lambda) \quad (3-4)$$

其中， ω 為地球旋轉角速度； R 參考橢球體長半徑； φ 與 λ 分別為大地緯度與大地經度； x_p 與 y_p 為測站在 IERS 系統之極座標。

3.1.4 地下水及土壤濕度改正

將重力觀測資料扣除固體潮、海洋負載、大氣壓力效應與極移效應後，影響重力最大之效應為水文引起之重力變化。水文效應中可分地方性之牛頓吸引力與全球性之水文負載效應。一般地方性之水文效應較大，如法國史特拉斯堡(Strasbourg)的超導重力儀記錄之地方性水文效應為全球性之兩倍(Longuevergne et al., 2009)。為有效估算水文效應對重力之影響量，本研究參考 Kazama et al. (2009)與 Creutzfeldt et al. (2010)利用水利及土壤物理性質估算水文變化量。

依據國家重力基準站之土壤鑽探資料將水文效應分為砂土層(地表至地下七公尺)、岩石層(界於砂土層與地下水位面)與地下水層三部分，分別使用(3-5)式至(3-7)式估算砂土層、岩石層與地下水層含水量變化對重力之影響量。

$$g_s(t) = -G\rho_w \iiint \theta \frac{(z - z_0)}{r^3} dz dx dy \quad (3-5)$$

$$g_r(t) = -G\rho_w \iint (Sp(z) - Gr(z)) \frac{(z - z_0)}{r^3} dx dy \quad (3-6)$$

$$g_w(t) = -G\rho_w \iint (n - S_r) \delta H(z) \frac{(z - z_0)}{r^3} dx dy \quad (3-7)$$

式中， G 為牛頓萬有引力常數； ρ_w 為地下水密度； θ 為土壤濕度； z 為該土壤濕度高程； z_0 為超導站高程； r 為該土壤濕度點位與超導站之距離； Sp 為土壤滲透量(soil percolation)； Gr 為地下水補注量(groundwater recharge)； n 為孔隙率； S_r 為重力作用下單位體積飽和土壤保留之水體積與單位體積之比值。圖 3-3 分別表示砂土層、岩石層與地下水層含水量變化對重力之影響量，隨著各土層與測站之距離越遠，其影響重力之效應越低，砂土層為水文效應中影響量最大者。

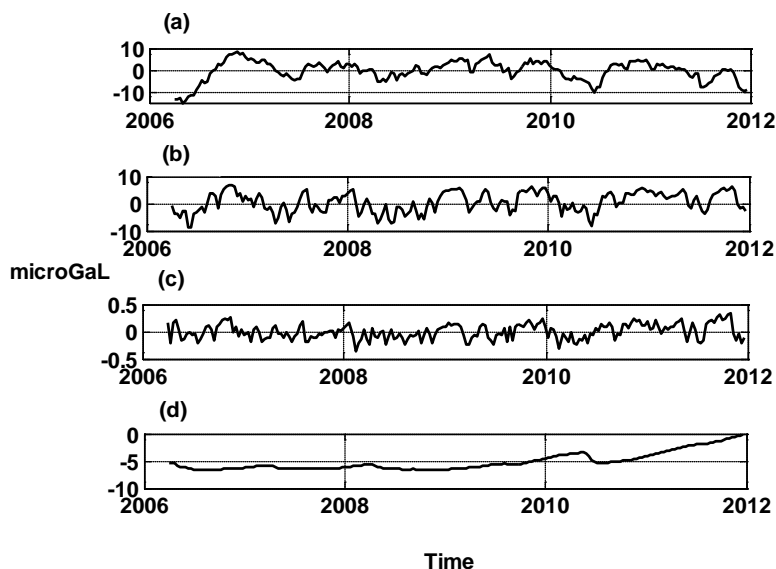


圖 3-3、(a)超導重力扣除地球固體潮、海潮負載、大氣壓力與極移效應後之重力值；(b)砂土層含水量之重力效應；(c)岩石層含水量之重力效應；(d)地下水位變化造成之重力效應

3.1.5 低雜訊模型

低雜訊模型(New Low Noise Model, NLNM)是用於評估超導重力品質之參考模型(Rosat et al. 2003)，為地震紀錄的背景雜訊統計而得。選取五天超導重力儀記錄穩定、周圍訊號安靜的時段，將超導重力訊號經上述之環境改正後，計算剩餘訊號的功率譜密度(power spectral densities, PSDs)。圖 3-4 表示 SG-048 與 SG-049 之 PSD 並與 NLNM 相比較，當剩餘訊號之 PSD 大於 NLNM 時，代表測站的噪訊強度(noise level)比地震儀理論的噪訊強度大。

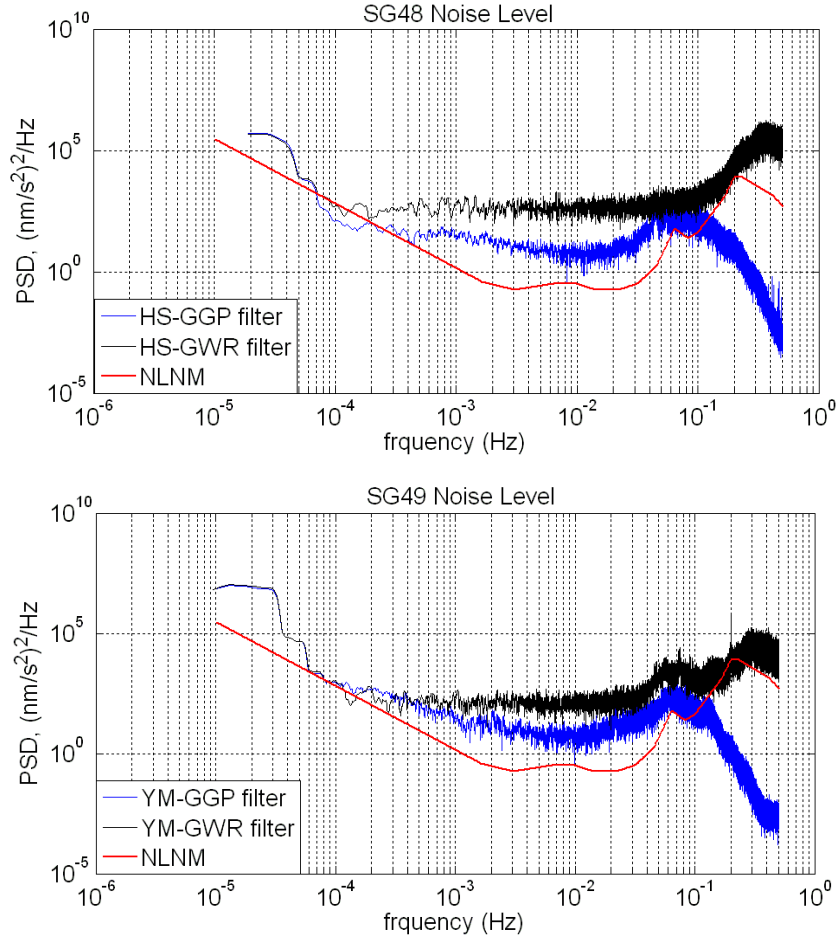


圖 3-4、新竹超導站(上)與陽明山超導站(下)功率譜密度與 NLNM 比較

3.2 模擬渦漩對超導站之重力訊號

由於亞熱帶逆流(Subtropical Counter Current, STCC)區域的中尺度渦漩大多集中於22°N(Hwang et al., 2004)，當渦漩向西移動至臺灣東部海岸會與黑潮產生年際變化之交互作用。本研究模擬季節性渦漩之遷徙，計算渦漩造成海水質量移動對新竹超導站與陽明山超導站造成之牛頓吸引力與彈性負載變化。渦漩大小與形狀則以橢球高斯函數(elliptical Gaussian function)模擬如下：

$$f(x, y) = a \exp[b_{20}(x - x_0)^2 + b_{11}(x - x_0)(y - y_0) + b_{02}(y - y_0)^2] \quad (3-8)$$

其中，

$$b_{20} = \frac{\cos^2 \theta}{2\sigma_x^2} + \frac{\sin^2 \theta}{2\sigma_y^2} \quad (3-9)$$

$$b_{11} = -\frac{\sin 2\theta}{4\sigma_x^2} + \frac{\sin 2\theta}{4\sigma_y^2} \quad (3-10)$$

$$b_{02} = \frac{\sin^2 \theta}{2\sigma_x^2} + \frac{\cos^2 \theta}{2\sigma_y^2} \quad (3-11)$$

式中渦漩位置 (x_0, y_0) 有最大振幅 a ； θ 為渦漩旋轉角度。

利用 SGOTL (SG ocean tide loading) 模式 (Hwang, C. and J. F. Huang 2012) 計算各渦漩對新竹超導站與陽明山超導站造成的牛頓吸引力與彈性負載變化，如圖 3-5 所示。SGOTL 模式考慮與測站高程相依之海潮負載格林函數 (Green's function)，除可將測站外的渦漩質點進行引力源積分，亦可藉由格林函數與海水面上渦漩質量重新分佈進行積分計算。

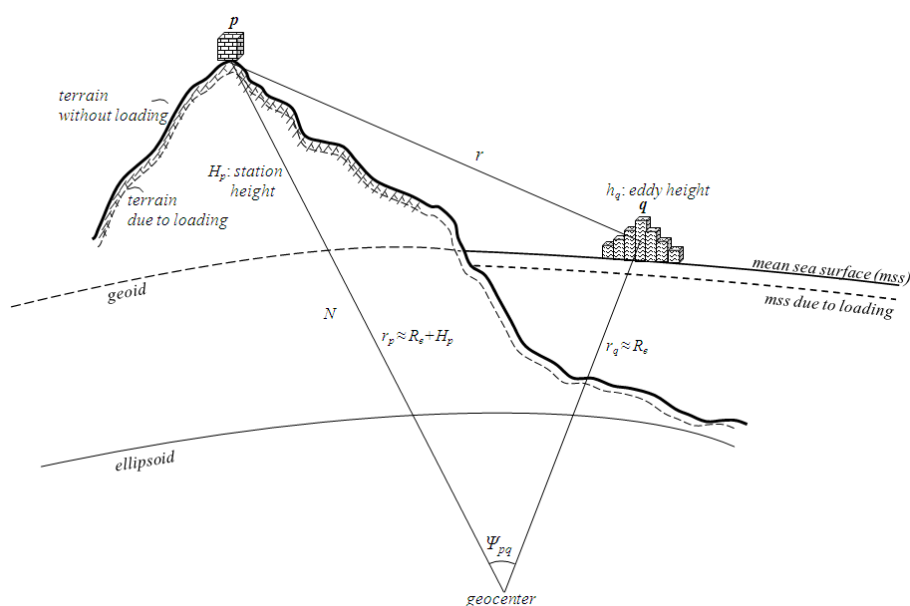


圖3-5、測點與渦漩質點間產生海潮負載效應關係之示意圖

計算牛頓引力時，將渦漩剖面簡化為數個水積木， T 為各渦漩質點 q 對任意測站 p 造成的直接引力位，將 T 取負向垂直梯度計算可得牛頓引力效應對重力之影響量 Δg_N ，如(3-12)式與(3-13)式：

$$T(r_p, \phi_p, \lambda_p) = \iint_D \frac{Gdm_q}{r} = G \iint_D \frac{\rho_w h_q R_e^2}{\sqrt{R_e^2 + r_p^2 - 2R_e r_p \cos \psi_{pq}}} d\sigma_q \quad (3-12)$$

$$\Delta g_N(H_p, \phi_p, \lambda_p) = -\frac{\partial T}{\partial r_p} = -\frac{\partial T}{\partial H_p} = G\rho_w \iint_D h_q K_N(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-13)$$

其中，

$$K_N(H_p, \psi_{pq}) = \frac{s - u}{(1 - s^2 - 2su)^{3/2}} \quad (3-14)$$

式中， ϕ_p, λ_p 分別為 q 點之緯度與經度； ψ_{pq} 為渦漩質點 q 與任意測站 p 間的球距角度； h_q 為渦漩質點 q 高於平均海面(mean sea level)之渦漩高度； ρ_w 為海水密度(設定為 1030 kg/m^3)； R_e 為測站 p 點高斯球面之平均半徑； r_p 為測站 p 點至地心間的距離，近似於 $R_e + H_p$ (H_p 為 p 點正高)； G 為牛頓萬有引力常數； D 指以整個球體為範圍之球積分域； dm_q 為積分單位； s 為 $(R_e + H_p)/R_e$ ； u 為 $\cos\psi_{pq}$ 。

由於地球為彈性體，地球彈性效應(elastic effect)為當渦漩之荷重會造成海床變形與重力位改變，使渦漩垂直位移與改變之全球重力位對測站 p 點之影響，地球彈性效應 Δg_L 之計算式如下：

$$\Delta g_L(H_p, \phi_p, \lambda_p) = u_r \frac{\partial g}{\partial H_p} - \frac{\partial(\delta V)}{\partial H_p} = G\rho_w \iint_D h_q K_L(H_p, \psi_{pq}) d\sigma_q \quad (3-15)$$

其中，

$$K_L(H_p, \psi_{pq}) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R_e}{R_e + H_p} \right)^{n+2} G_n(\psi_{pq}) \quad (3-16)$$

$$G_n(\psi_{pq}) = [2h_n' - (n+1)k_n'] P_n(\cos\psi_{pq}) \quad (3-17)$$

式中， h_n' 與 k_n' 為第 n 階之負載洛夫數(Love numbers)，其餘參數之定義如(3-12)式。

以下模擬渦漩兩種不同路徑，其一路徑假設季節性渦漩由東向西流動，如圖 3-6，緯度固定為 24.5° ，以每 4° 經度向西移動，根據渦漩長軸大小、中心位置不同分別對新竹超導站(SG-048，圖中標示為HS)與陽明山站(SG-049，圖中標示為YM)之牛頓吸引力與彈性負載變化結果如表3-1所示。由表3-1可知，當渦漩越接近測站時，所受牛頓引力與彈性負載效應越大，牛頓引力最大可達數百 ngal 量級，彈性負載效應量級相對較小。

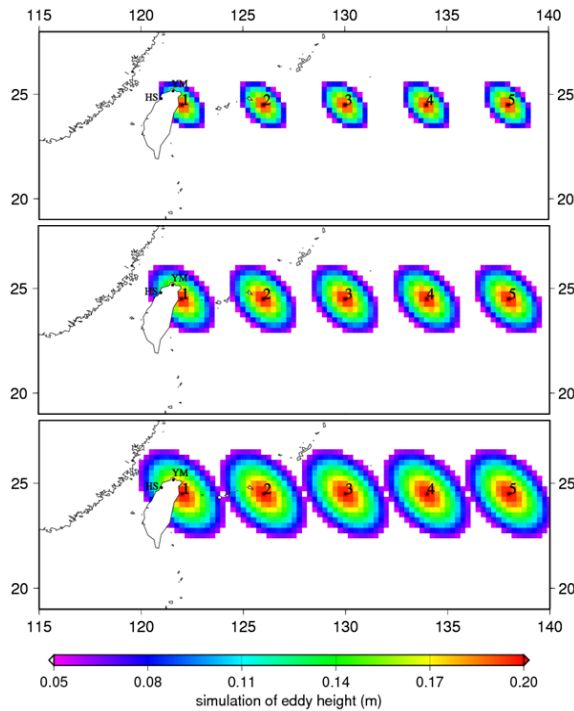


圖 3-6、模擬渦漩大小與路徑示意圖(路徑一)

表 3-1、路徑一之牛頓效應與彈性負載效應

長軸半徑 (km)	位置	新竹超導站(ngal)		陽明山超導站(ngal)	
		牛頓引力	彈性負載效應	牛頓引力	彈性負載效應
300	1	20.45	-1.58E-02	128.52	-2.10E-02
	2	5.48	-4.25E-03	6.45	-4.79E-03
	3	3.02	-2.75E-03	3.27	-2.85E-03
	4	2.10	-2.31E-03	2.21	-2.34E-03
	5	1.60	-2.11E-03	1.66	-2.13E-03
400	1	45.79	-2.91E-02	195.37	-3.56E-02
	2	10.99	-8.50E-03	13.02	-9.66E-03
	3	6.03	-5.42E-03	6.52	-5.64E-03
	4	4.20	-4.56E-03	4.43	-4.65E-03
	5	3.21	-4.15E-03	3.33	-4.20E-03
500	1	68.41	-4.26E-02	241.89	-4.92E-02
	2	18.03	-1.42E-02	21.59	-1.65E-02
	3	9.91	-8.93E-03	10.73	-9.20E-03
	4	6.84	-7.49E-03	7.20	-7.64E-03
	5	5.24	-6.81E-03	5.45	-6.89E-03

註:渦漩中心位置 1-5 之經緯度分別為(122.0,24.5)、(126.0,24.5)、(130.0,24.5)、(134.0,24.5)、(138.0,24.5)

除上述的渦漩路徑外，亦模擬另一條渦漩路徑(如圖 3-7)，此路徑仿造黑潮由臺灣東南方流至東北方，模擬渦漩在長軸半徑相同、旋轉角度不同之情況下，各渦漩受牛頓吸引力與彈性負載變化，其結果如表 3-2 所示，為方便看出各渦漩對測站之效應，特繪製圖 3-8。由圖 3-7 與圖 3-8 得知，當渦漩之長軸半徑為 300 公里，最靠近超導陽明山站(位置 2)之牛頓引力可達數十 ngal 量級，其中因陽明山站靠近海洋且高程較高，其量值較新竹站大。

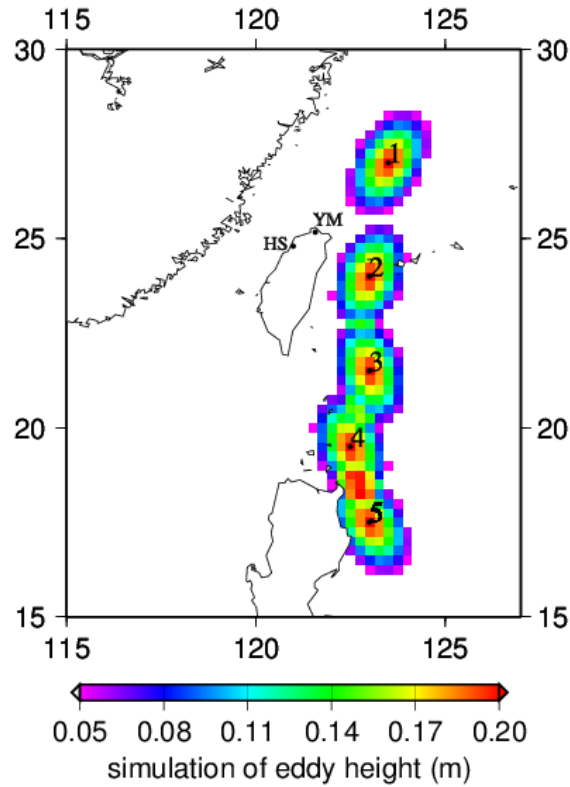


圖 3-7、模擬渦漩大小與路徑示意圖(路徑二)

表 3-2、路徑二之牛頓效應與彈性負載效應

長軸半徑 (公里)	位置	新竹超導站(ngal)		陽明山超導站(ngal)	
		牛頓引力	彈性負載效應	牛頓引力	彈性負載效應
300	1	11.53	-6.49E-03	24.44	-9.00E-03
	2	17.50	-1.02E-02	31.64	-1.24E-02
	3	9.62	-5.47E-03	10.02	-5.32E-03
	4	6.56	-3.81E-03	6.40	-3.66E-03
	5	4.76	-3.04E-03	4.66	-2.98E-03

註:渦漩中心位置 1-5 之經緯度分別為(123.5,27.0)、(123.0,24.0)、(123.0,21.5)、(122.5,19.5)、(123.0,17.5)

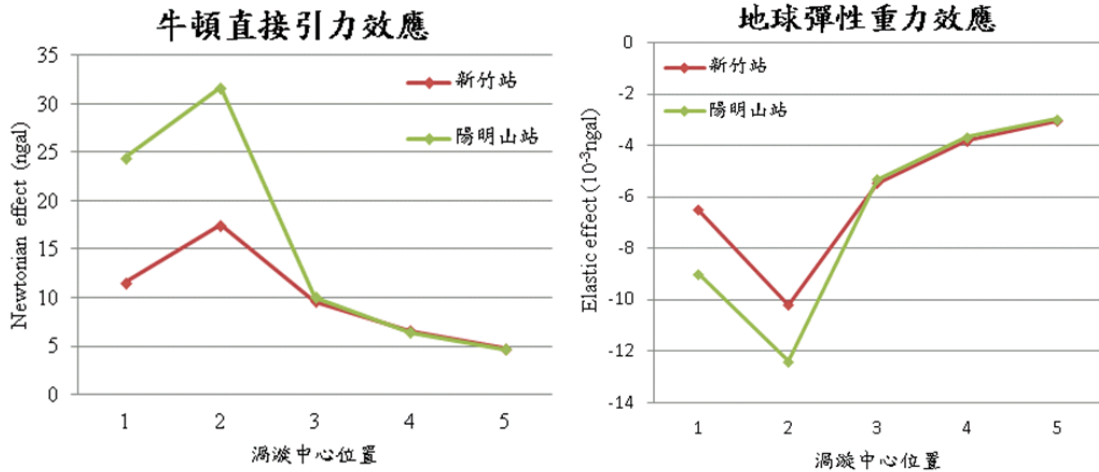


圖 3-8、路徑二對新竹超導站與陽明山超導站之牛頓效應與彈性負載效應比較圖

四、以 GRACE 之區域解探討黑潮中尺度之質量變化

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)於 2002 年開始運行，可用於觀測地球重力場變化。GRACE 由兩顆微衛星(micro satellites)組成，兩者於同一近極軌道面運行且相距約 200 公里，距離地面高度約 400 公里。GRACE 主要酬載 K 波段測距系統(K-band ranging system, KBR)與加速度儀，由 KBR 量測可得精度為一微米(μm)之兩衛星間距離，加速度儀可記錄非引力引起之擾動力，藉由解算 5 秒一筆之原始觀測量可得地球重力位(Tangdamrongsub et al., 2012)。

本研究以美國德州大學奧斯汀分校太空研究中心(Center for Space Research, CSR)提供之重力場模型做初步分析，根據地轉流方程式計算地轉流之速度分量如下：

$$u = -\frac{\gamma}{fR} \frac{\partial h}{\partial \phi} \quad (4-1)$$

$$v = \frac{\gamma}{fR \cos \phi} \frac{\partial h}{\partial \lambda} \quad (4-2)$$

其中， u 、 v 分別代表東西向與南北向之速度分量；科氏力(Coriolis)參數為 $f = 2\omega_e \sin \phi$ ， ω_e 為地球自轉角速度； γ 為地球平均重力(Torge, 2001)； ϕ 、 λ 分別為緯度與經度； R 為平均地球半徑； h 為平均動力高(mean dynamic topography, MDT)。平均動力高即為相對於大地水準面之平均海面高，可藉由平均海水面(mean sea surface, MSS)扣除大地水準面獲得。本研究依(4-1)式、(4-2)式計算之地轉流之速度分量，其中平均動力高是依 DTU10 為平均海水面與 EGM2008 為重力場模型計算而得。上述之地轉流計算成果如圖 4-1 所示，圖中可明顯顯示黑潮之路徑，推估乃因所使用之 EGM2008 重力場模型結合陸測重力資料、船載重力資料及測高重力資料等，為目前提供解析度最高之重力場模型。

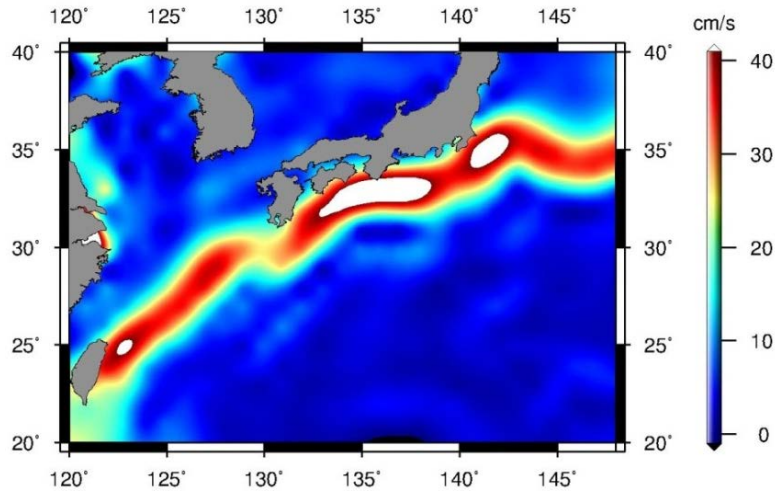


圖 4-1、以 DTU10 為平均海水面與 EGM2008 為重力場模型獲得之地轉流

為了解 GRACE 是否亦能探討黑潮中尺度之變化，本研究以 ITG-Grace2010s 模型取代 EGM2008，ITG-Grace2010s 為 2002 年 8 月至 2009 年 8 月之 GRACE 平均重力場，以地位係數(geopotential coefficients) 展開至 180 階之形式提供。由 DTU10 提供之平均海水面與 ITG-Grace2010s 提供之平均重力場，因兩模式之差異所含的誤差無法直接計算獲得地轉流，其誤差來源主要來自於 GRACE，其一為 GRACE 之解析度較低，其二為地位係數展開至 180 階。為避免此兩項誤差，先使用 350 公里半徑的高斯濾波將平均動力高平滑化，經高斯濾波處理後之平均動力高如圖 4-2(左)所示，再將經高斯濾波後之平均動力高依(4-1)式、(4-2)式計算地轉流之成果如圖 4-2(右)所示。將圖 4-2(右)與圖 4-1 相比較，雖以 ITG-Grace2010s 模型為平均重力場所計算之地轉流在表現黑潮流速上較不明顯，但亦可觀察黑潮之路徑，推測因 GRACE 資料以高斯濾波後造成 GRACE 訊號失真。

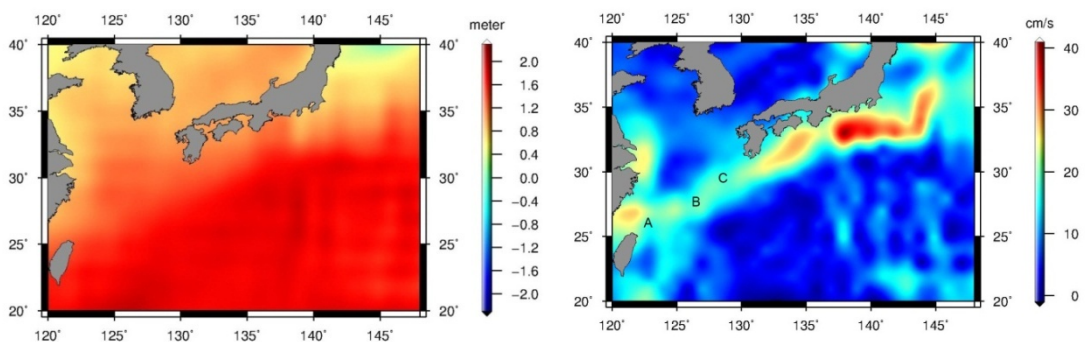


圖 4-2、以 DTU10 為平均海水面與 ITG-Grace2010s 為平均重力場所得之平均動力高(左圖)計算之地轉流(右圖)，平均動力高使用 350 公里半徑的高斯濾波。

為進一步了解沿黑潮流徑之海洋質量變化，本研究採用 CSR-RL05 所提供自 2004 年 1 月起，每個月一筆之地位係數，其階數展開至 60 階。取 2004 年 2 月至 2012 年 4 月之地位係數計算地球重力場，將第一階係數與第二階係數分別以 Swenson et al.(2008)及衛星雷射測距(satellite laser ranging, SLR)量測(Cheng and

Tapley, 2004)取代。將各月份的重力場扣除平均重力場後，因 GRACE 含有高頻雜訊，在資料預處理時需使用濾波。本研究採用與 Tangdamrongsub et al. (2011) 相同之 500 公里半徑的高斯濾波與 P5M12 的去除條紋雜訊(de-stripping)濾波，並使用 Paulson et al. (2007)提供之冰期後回跳改正模式。

由於海洋訊號較陸地訊微弱一至兩個量級，濾波會造成陸地上訊號傳播至海洋，稱之為洩漏效應(leakage effects)。為改正洩漏效應，本研究按 Chambers (2006) 提出之步驟分別獲得陸地與海洋訊號後，將陸地之洩漏訊號視為改正量。在 GRACE 資料處理時為避免混疊效應(aliasing effect)，將短期與非引力引起之大氣與海洋質量變化扣除，本研究需將此扣除之質量變化再予以恢復。CSR-RL05 除提供重力場資訊，另外提供兩產品供本研究使用，一為海洋質量變化(標示為 GAC)，使用於將海洋上訊號恢復，二為海底壓力模式(標示為 GAD)，可與研究中推算之海洋質量變化相比較。本研究推算之海洋質量變化是依最小二乘法擬合 bias、trend、semi-annual 與 annual 計算，因 S2 與 K2 分潮之週期分別為 161 天與 1400 天，亦將此二分潮之訊號震盪效應扣除，成果如圖 4-3 所示。在緯度 25° N ~30° N 區域可看出年變化的黑潮路徑，但高於 30° N 區域則較不明顯，推估因水文訊號沿日本東部海岸由陸地洩漏至海洋。為進一步探討黑潮路徑上之質量變化，於圖 4-2(右)分別標示 A、B、C 三個位置，並比較此三處海底壓力模式與 GRACE 計算之差異，因 GRACE 含有高頻雜訊，故將 GRACE 使用三個月之低通濾波處理，比較成果如圖 4-4 所示，在 A、B、C 三個位置分別計算兩者之相關係數皆高於 0.5。即便本研究使用之 GRACE 資料不滿 10 年，但在 A 點與 B 點亦可看出十年間之變化，此論點未來需使用較長之時間序列驗證。表 4-1 為 A、B、C 三位置之估計參數，表中三點之趨勢值與 Nicholls 與 Cazenave (2010)提出之全球趨勢值 1.7~3.3 mm/yr 相近。

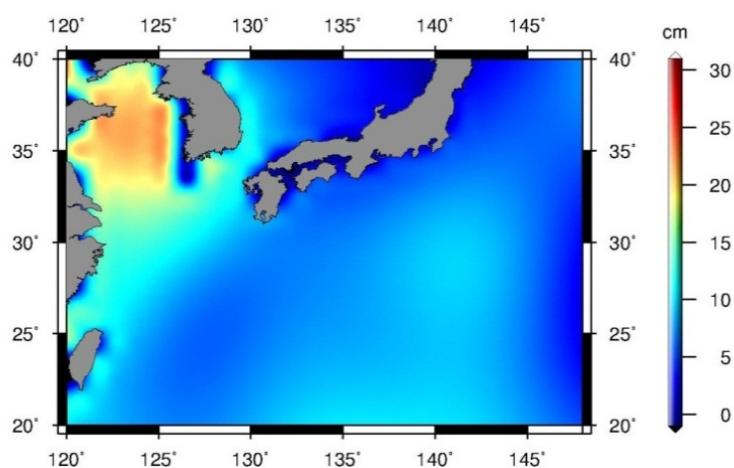


圖 4-3、由 GRACE 2004 年 2 月至 2012 年 4 月計算之海洋質量之年變化成份(annual component)

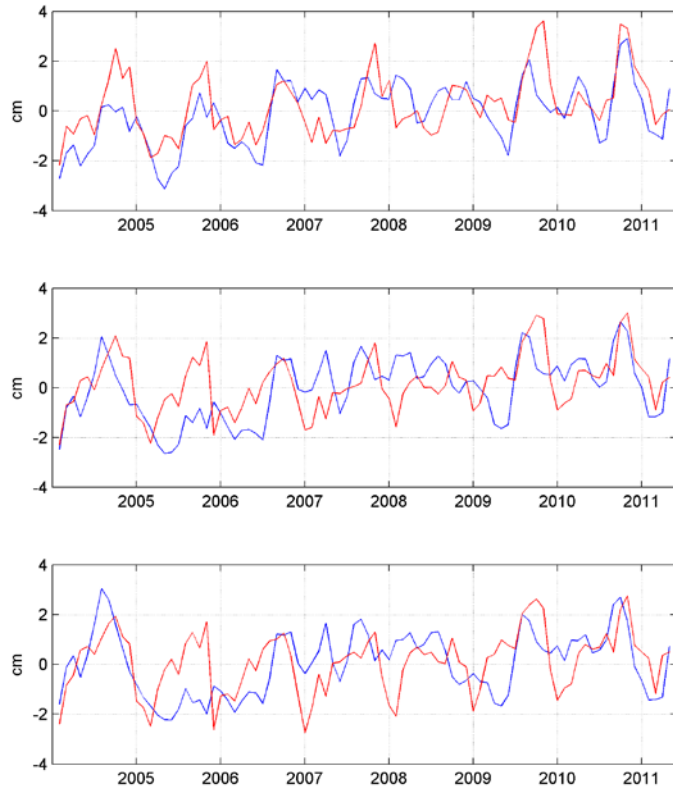


圖 4-4、A(上)、B(中)、C(下)三位置之海洋質量變化，藍線為經低通濾波後之 GRACE，紅線為海底壓力模式。

表 4-1、A(上)、B(中)、C(下)三位置由 2004 年 2 月至 2012 年 4 月推導之海洋質量參數

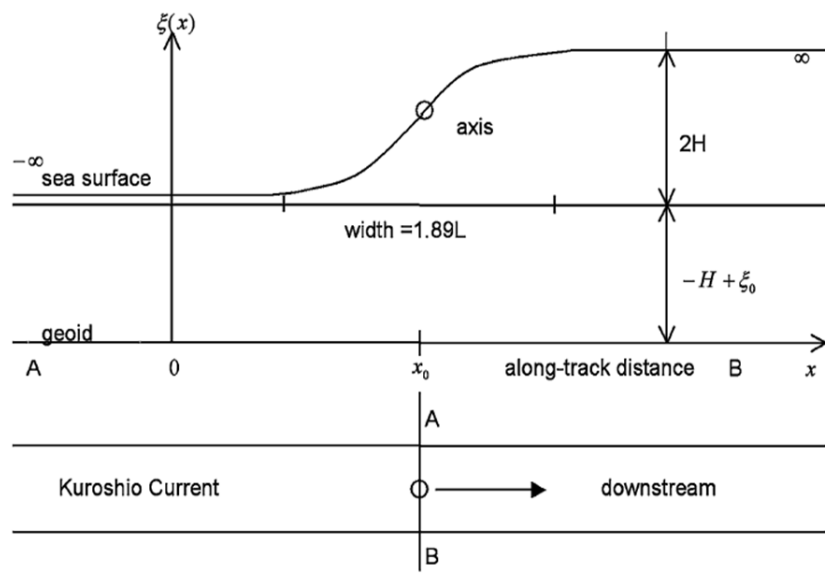
		Trend(cm/yr)	Annual amp (phase) (cm, degree)	Semi-annual amp (phase) (cm, degree)
A	GRACE	0.26 ± 0.04	1.08 ± 0.34 (-155.45)	0.66 ± 0.34 (55.92)
	Model	0.18 ± 0.16	1.17 ± 0.14 (-164.25)	0.65 ± 0.14 (118.45)
B	GRACE	0.26 ± 0.04	0.80 ± 0.34 (174.26)	0.58 ± 0.34 (35.22)
	Model	0.16 ± 0.02	0.99 ± 0.14 (154.78)	0.64 ± 0.14 (117.97)
C	GRACE	0.15 ± 0.04	0.84 ± 0.34 (153.02)	0.57 ± 0.34 (30.28)
	Model	0.13 ± 0.02	1.18 ± 0.15 (132.75)	0.65 ± 0.15 (114.97)

五、以衛星測高資料探討黑潮區域跨年變化

Hwang(1996)以及 Hwang 與 Kao(2002)皆曾利用 Topex/Poseidon 觀測量配合當時大地水準模型(Geoid)估算黑潮路徑、最大流速、傳輸量與寬度之變化，探討黑潮季內(intraseasonal)、半年(semi-annual)、一年(annual)、兩年(biennial)與跨年(interannual)變化。為探討更長時間之黑潮特性，本研究採用衛星測高儀

Topex/Poseidon、Jason-1 與 Jason-2，如圖 2-3 將台灣東部之海面高觀測資料(sea surface height, SSH) pass240 之時間序列延續至近 20 年，期待藉由長時間觀測能進一步獲得黑潮十年或二十年之變化。

將上述之海面高觀測資料結合台灣東部黑潮流域的大地水準面模型，產生沿地面軌跡的海水動力高(dynamic height)。依 Hwang 與 Kao(2002)之方法利用測高資料 10 天重複軌道之特性，配合一正切雙曲線公式(hyperbolic tanh function)，以最小二乘配置法計算黑潮軸心位置、軸心流速、傳輸量與寬度隨時間之變化量，計算黑潮參數之原理如圖 5-1 所示。



T/P, Jason-1, Jason-2 pass

圖 5-1、以正切雙曲線公式(5-2 式)擬合黑潮橫斷面 A-B，並沿 A-B 軌跡配合衛星測高資料推導動力高(修改自 Hwang and Kao, 2002)

首先配合大地水準面模型計算動力高，如(5-1)式：

$$\xi = h - N \quad (5-1)$$

式中， ξ 為動力高； h 為海面高； N 為大地起伏。沿軌跡之海面高切過黑潮時之動力高 ξ 可近似為(5-2)式：

$$\xi(x) = H \tanh\left(\frac{x - x_0}{L}\right) + \xi_0 \quad (5-2)$$

式中，利用最小二乘法求解未知參數 H 、 x_0 、 L 與 ξ_0 ， $2H$ 為黑潮之 height jump，可用以計算上層海洋傳輸量，計算式如(5-3)式； x_0 為黑潮流沿軌跡之主軸位置； $1.89L$ 為黑潮流沿軌跡之寬度； ξ_0 為未知常數。

$$\text{volume transport} = 2 \frac{g}{f} H \eta \quad (5-3)$$

將中心軸定義為黑潮中心最大速度之位置，中心軸速度 $v(x_0)$ 計算式如下：

$$v(x_0) = \frac{gH}{fL} \quad (5-4)$$

式中， g 為正常重力；科氏力(Coriolis)參數為 $f = 2\Omega \sin \phi$ ， Ω 為地球自轉角速度 ($\Omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$)， ϕ 為緯度； η 為上層海水平均深度。

由(5-1)式至(5-4)式計算成果展示於圖 5-2，圖中分別為黑潮傳輸量(上)、寬度(中)與軸心流速(下)隨時間變化，紅、綠、藍分別表示由 Topex/Poseidon、Jason-1 與 Jason-2 pass240 沿軌跡海水動力高所推導。配合世界海洋環流實驗(World ocean circulation experiment, WOCE)之海洋合作探測計畫，其中的 PCM-1 測線在台灣東部海域約緯度 24° N 進行黑潮剖面傳輸量觀測，可用於檢核本研究推導之黑潮傳輸量，而圖 5-2 由 pass240 推導之傳輸量與 PCM-1 觀測之傳輸量變化大致相同。

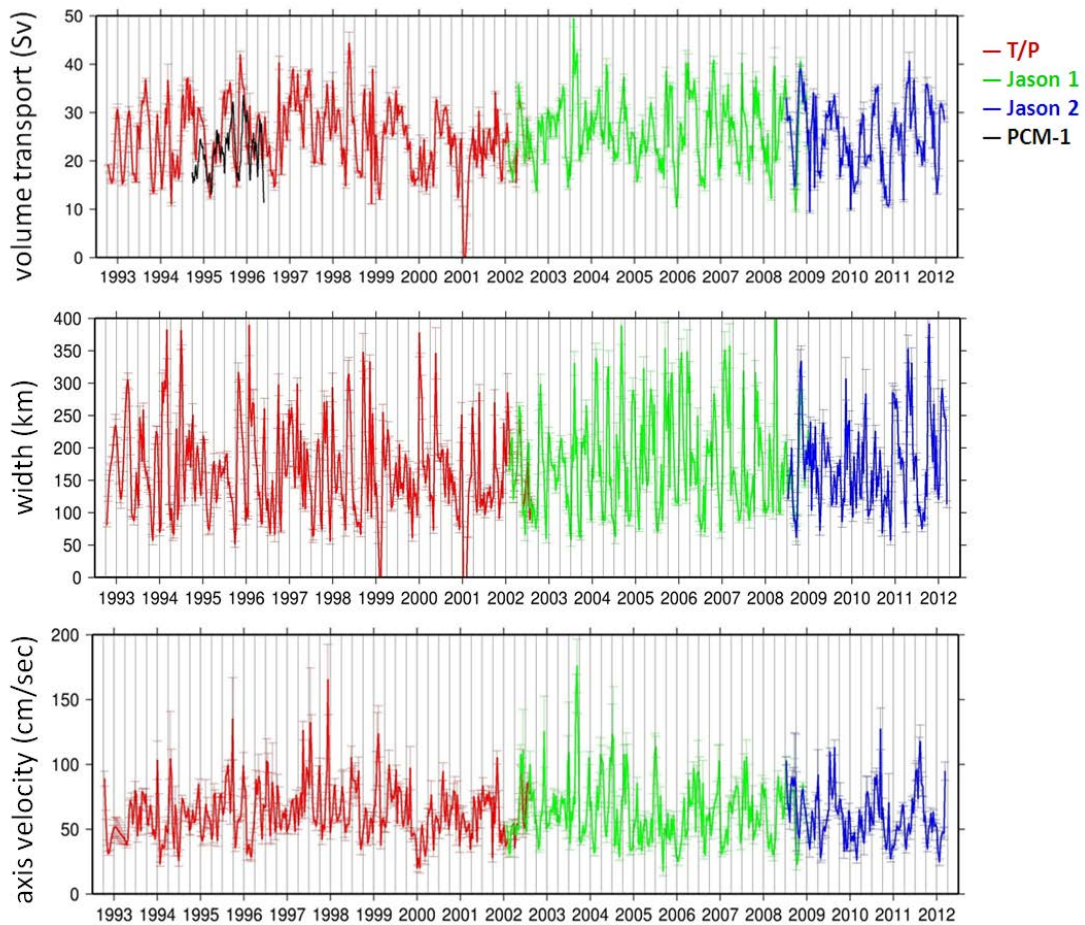


圖 5-2、黑潮之傳輸量(上)、寬度(中)與軸心流速(下)之時間序列

六、結果與討論

- 為獲得黑潮引起之海洋重力訊號，超導重力儀需進行最優化之環境改正。本文模擬渦漩不同路徑對兩部超導重力儀產生之重力效應，在陽明山衛星追蹤站可達最大量級數百 ngal。
- 利用 GRACE 之區域解估算黑潮中尺度之質量變化，使用 GRACE 最新產品 CSR-RL05 可於台灣東部黑潮地區估算黑潮海洋質量之年變化特性。
- 由 TOPEX、Jason-1 與 Jason-2 獲得黑潮 1993 年至 2012 年之傳輸量、寬度與軸心流速，由計算成果顯示黑潮具有季節性變化與年變化特性。

本計畫研究成果發表於：

- Tangdamrongsub, N, C Hwang, CK Shum, and L Wang, Regional surface mass anomalies from GRACE KBR measurements: application of L-curve regularization and a priori hydrological knowledge, in press, *Journal of Geophysical Research-solid earth*, 2012. (in press)
- 以超導重力及衛星重力探討黑潮時變，高雄，2012 年 4 月 10 日，2012 海洋科學年會暨國科會海洋學門成果發表會

正在撰寫：

- Impact of a precise geoid model in studying space-time variations of the Kuroshio Current: a case study in the Kuroshio northeast of Taiwan

參考文獻

- Chambers, D. P. (2006), Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17603, doi:10.1029/2006GL027296.
- Chambers, D. P., and J. K. Willis (2008), Analysis of large-scale ocean bottom pressure variability in the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, 113, C11003, doi:10.1029/2008JC004930.
- Cheng, M. and B.D. Tapley (2004), Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years, *J. Geophys. Res.*, 109, B09402, doi:10.1029/2004JB003028.
- Creutzfeldt, B., A. Güntner, H. Thoss, B. Merz, and H. Wziontek (2010), Measuring the effect of local water storage changes on in situ gravity observations: Case study of the Geodetic Observatory Wettzell, Germany, *Water Resour. Res.*, 46, W08531, doi:10.1029/2009WR008359.
- Gilson, J. and D. Roemmich (2002), Mean and Temporal Variability in Kuroshio Geostrophic Transport South of Taiwan (1993-2001), *J. Oceanogr.*, 58, 183-195.
- Hwang, C. (1996), A study of Kuroshio's seasonal variabilities using a gravimetric-altimetric geoid and TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. geophys. Res.*, 101, 6313-6335.
- Hwang, C. and R. Kao (2002), TOPEX/POSEIDON-derived space-time variations of Kuroshio Current: applications of a gravimetric geoid and wavelet analysis. *Geophys. J. Int.*, 151, 835-847.

- Hwang, C., C.-R. Wu, and R. Kao (2004), TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: Kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy, *J. Geophys. Res.*, 109, C08013, doi:10.1029/2003JC002026.
- Hwang, C., R. Kao, C.-C. Cheng, J.-F. Huang, C.-W. Lee, and T. Sato (2009), Results from parallel observations of superconducting and absolute gravimeters and GPS at the Hsinchu station of Global Geodynamics Project, Taiwan, *J. Geophys. Res.*, 114, B07406, doi:10.1029/2008JB006195.
- Hwang, C. and J. F. Huang (2012), SGOTL: A computer program for modeling high-resolution, height-dependent gravity effect of ocean tide loading, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 219-229, doi: 10.3319/TAO.2011.10.06.02(Oc)
- Kazama, T. and S. Okubo (2009), Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: Theory and application to Asama Volcano, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, B08402, doi:10.1029/2009JB006391
- Köhl, A., F. Siegmund, and D. Stammer (2012), Impact of assimilating bottom pressure anomalies from GRACE on ocean circulation estimates, *J. Geophys. Res.*, 117, C04032, doi:10.1029/2011JC007623.
- Longuevergne, L., Boy, J. P., Florsch, N., Viville, D., Ferhat, G., Ulrich, P., Luck, B. and Hinderer, J. (2009), Local and global hydrological contributions to gravity variations observed in Strasbourg, *J. Geodyn.*, 48, 189-194.
- Nicholls R. J. and A. Cazenave (2010), Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* , 328: 1517-1520. doi:10.1126/science.1185782.
- Paulson, A., S. Zhong and J. Wahr (2007), Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data, *Geophys. J. Int.*, 171, 497-508.
- Rosat, S., J. Hinderer, D. Crossley and L. Rivera (2003), The search for the Slichter mode: Comparison of noise levels of superconducting gravimeters and investigation of a stacking method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 140, 183-202.
- Swenson, S., D. Chambers, and J. Wahr (2008), Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output, *J. Geophys. Res.*, 113, B08410, doi:10.1029/2007JB005338.
- Tangdamrongsub N, C. Hwang and Y. C. Kao (2011), Water storage loss in central and south Asia from GRACE satellite gravity: correlations with climate data, *Natural Hazards*, 59, 747-769, doi:10.1007/s11069-011-9793-9.
- Tangdamrongsub N, C. Hwang, C. K. Shum and L. Wang (2012), Regional surface mass anomalies from GRACE KBR measurements: application of L-curve regularization and a priori hydrological knowledge. *J. Geophys. Res.* (in press)
- Torge, W. (1989), Gravimetry, de Gruyter, Berlin.
- Torge W (2001) Geodesy, 3rd edition. Walter de Gruyter, Berlin, New York.

- Wouters, B. and D. Chambers (2010), Analysis of seasonal ocean bottom pressure variability in the Gulf of Thailand from GRACE, *Global Planet. Change*, 74, No. 2, pp. 76-81.
- Wunsch, C. (2008), Mass and volume transport variability in an eddy-filled ocean, *Nat. Geosci.*, 1, 165-168.

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/10/29

國科會補助計畫	計畫名稱: 以超導及衛星重力決定黑潮時變: 氣候變遷對海洋環流及海水位的影響
	計畫主持人: 黃金維
	計畫編號: 100-2611-M-009-001- 學門領域: 衛星海洋學
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：黃金維		計畫編號：100-2611-M-009-001-					
計畫名稱：以超導及衛星重力決定黑潮時變：氣候變遷對海洋環流及海水位的影響							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	3	0	100%	人次	下載資料，資料預處理
		博士生	3	0	100%		資料解算與分析
博士後研究員		0	0	100%			
專任助理		0	0	100%			
國外	論文著作	期刊論文	1	2	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
博士後研究員		0	0	100%			
專任助理		0	0	100%			

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

本計畫成果發表於期刊論文：

in press: 一篇

撰寫中: 一篇

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

1. 本研究強調結合 GRACE, 超導重力儀, 衛星測高等觀測量, 探討黑潮在海洋環流中的變化性, 提供一新方法進行海洋觀測.

2. 學術研究貢獻: 將 GRACE 以區域解方式觀測海洋中尺度之質量變化.

蒐集 20 年之衛星測高資料計算黑潮軸心位置、軸心流速、傳輸量與寬度隨時間之變化量.

利用臺灣兩部超導重力儀提供 1Hz 之高精度之重力訊號, 從中萃取由海水質量變化引起之重力效應.