

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 以衛星測高及重力決定台灣東部黑潮之流場及其時變(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2611-M-009-001-

執行期間：94年08月01日至95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

計畫參與人員：郭金運、施#20120；昶

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 5 月 30 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 以衛星測高及重力決定台灣東部黑潮之流場及其時變(1/3) Determination of velocity field of kuroshio east of Taiwan and its temporal variation using satellite altimetry and gravity data(1/3)

計畫編號：NSC 94-2611-M-009-001

執行期限：94年8月1日至95年7月31日

主持人：黃金維

國立交通大學土木工程學系

計畫參與人員：施亘昶、郭金運 國立交通大學土木工程學系

蕭宇伸、曾子榜 國立交通大學土木工程學系

### 一、中文摘要

本計畫重點在使用重力及衛星測高資料計算台灣以東之黑潮流場。內政部已於2004年收集部分黑潮區之空載重力資料，而2005年後將會增加空載重力在黑潮區之涵蓋範圍。利用現有黑潮區之地面重力及空載重力資料，使用最小二乘配置建立黑潮區的水準模式。此外，使用的衛星測高資料將來自 Geosat、ERS-2、ENVISAT、T/P 及 Jason-1 任務。利用所有的測高資料及高精度、高解析度之水準面模式，可計算台灣東部黑潮區之平均流場，且與現在海流資料相比較。本計畫亦在所有衛星在黑潮區之軌跡交叉點處，計算海流之南北及東西分量。海流在交叉點之時間序列將被組成來研究流場之時間變化。交叉點的海流可用以研究黑潮入侵南海、東海及黑潮在到達宜蘭海脊前分流等現象。

### Abstract

This project aims to study the geostrophic current field of the Kuroshio Current east of Taiwan using gravity and satellite altimetry data. Airborne gravity data east of Taiwan is now available due to the effort of Ministry of the Interior, Taiwan and the coverage of data will be further extended

after 2005. Using existing terrestrial gravity and airborne gravity data, a detailed geoid model over the Kuroshio area east of Taiwan will be computed using the least-squares collocation approach. Satellite altimetry data to be used are from the Geosat, ERS-2, ENVISAT, T/P and JASON-1 missions. Altimetry data quality will be improved using waveform retracking, filtering and outlier rejection techniques. With a high-resolution, high-precision geoid model, the 2-D mean velocity field of the Kuroshio east of Taiwan will be computed and will be compared with historical data. The east and north components of current velocity at a crossover point of two satellite ground tracks will be computed for all altimetry missions. Time series of velocity at crossover points will be formed to see temporal variations of currents. Certain crossover points offer opportunity to investigate phenomena such as the intrusion of the Kuroshio to the South China Sea, the intrusion of the Kuroshio to the East China Sea and the branching out of the Kuroshio to the east before reaching the I-Lan Ridge.

**Keywords:** Kuroshio,,

## 二、緣由與目的

台灣海域海流分析情形是台灣海洋學家最關心的課題之一。台灣東部黑潮海流狀況更是海洋學家極欲知道之流域。Liang et al (2003)編輯台灣的海流圖，基本上都使用點資料，且取樣時間至少超過一年。然而跨年的流場變化無法獲得。衛星測高可用決定海流，Fu and Cazenave(2001)一書對測衛星高決定海流之方法及問題有詳細之描述。衛星測高決定海流時，必須使用大地水準面(geoid)。決定 geoid 則需要重力資料。最近由於 GRACE 衛星及 Champ 衛星之昇空，長波長重力場之精度方面獲得大幅度之提昇；在短波長之重力部分，由於台灣空載重力(黃金維,2004)之施測，已經完成黑潮部分之重力測量。在2005年內政部又規劃在黑潮地區，做較高的空間解析度之空載重力測量，且內政部亦規劃用船載方式在黑潮區之部分區域取得重力資料。若結合衛星測量和地面重力測量，可在黑潮流域定出精度非常高之 geoid 面，進而用長時間(大於 10 年)之衛星測高資料，推求黑潮之海流及其時間變化。

## 三、資料和方法

### 3.1 空載重力測量工作

九十三年度進行台灣地區「空載重力測量工作」，目前其涵蓋的區域如圖 3-1 所示。內政部已安排於九十四年度在台灣東部海域實行空載重力測量工作，並以台灣領域範圍內的東部海域部分為主，目前此測量工作案正施測中，約完成百分之十八的外業工作。

### 3.2 衛星測高資料

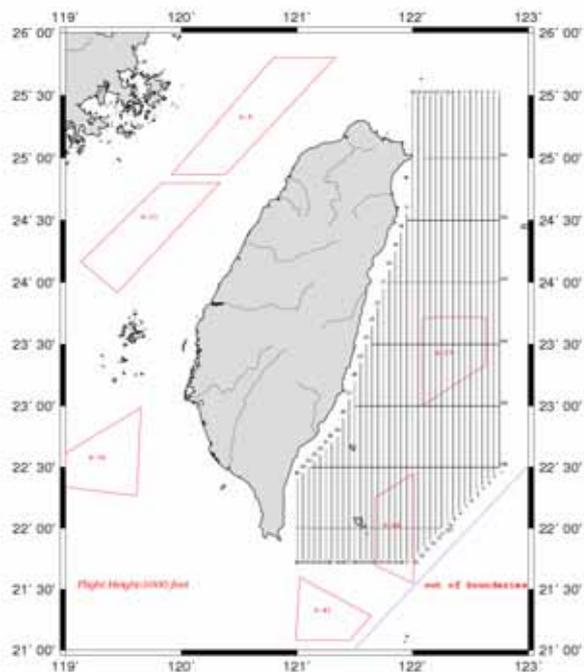


圖 3-1 航線規劃圖

任意海水質元受到四種力的作用，即重力  $g$ ，壓力梯度  $P$ ，摩擦力  $f$  和 Coriolis 力  $C$ 。根據 Newton 第二定律，則有

$$\rho a = g + P + f + C \quad (1)$$

式中， $\rho$  為海水質元的密度， $a$  為海水質元運動加速度。

定義  $xyz$  坐標系： $z$  軸沿鉛垂線方向，背離地心為正； $x$  軸指向東為正， $y$  軸指向北為正，構成右手正交坐標系。因此， $xy$  平面在質元的任意小的領域內是一個重力位等位面。在  $xyz$  中描述海流速度，分別用  $u, v, w$  表示沿三個軸的速度分量。

重力是地球引力和離心力的合力，其方向為  $-z$ 。壓力梯度是由海水溫度、鹽度、密度、深度等形成的海面傾斜，造成位能上的差異。摩擦力不僅可以使得風吹海面，形成波浪和海流，而且是海水之間動能交換和海水動能轉換為熱能的重要機制。

Coriolis 力並不是真正的力。在旋轉地球表面，在重力、壓力梯度和摩擦力的作用下，質元加速運動。但對質元運動的觀測和描述都是在一個固定的參考系中進行的，沒有考慮地球的旋轉。因此，為了真

正描述質元的運動，利用 Coriolis 力補償地球旋轉造成的運動。

如果海流是水平流動，即在一個等位面內流動，那麼 Rossby 數就遠遠小於 1，同時風力和其它摩擦力就十分小，可以忽略不計它們的影響。因此，在水平面內，壓力和 Coriolis 力就形成平衡，可得地轉平衡方程

$$fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

式中， $f = 2\Omega \sin \varphi$ ，稱為 Coriolis 參數， $\Omega$  為地球自轉角速度， $\varphi$  為緯度； $p$  為壓力； $\rho = \rho(p, S, T)$  為海水密度，是壓力  $p$ 、鹽度  $S$  和溫度  $T$  的函數。滿足地轉方程(2)和(3)的海流稱為地轉流。在海洋地轉平衡中的力是很小的，一般都小於  $10^{-4} \text{N/kg}$ ，但也大於洋流的其它受力 [Knauss, 1997]。壓力梯度和 Coriolis 力決定了大部分洋流，大部分主要洋流都近似滿足地轉平衡方程，如灣流、南極極地流、秘魯流、黑潮、加利弗尼亞流等 [Apel, 1990; Colling, 2001]。

對於地轉流，在垂直方向，海洋近似為流體靜力平衡，因此

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho$$

根據地轉方程(2)和(3)，地轉流的表面速度主要決定於海面傾斜。因為海面傾斜，在水準面上就形成流體靜力壓力，產生水平壓力梯度。設動力高度為  $\zeta$ ，海面傾斜在  $x$  和  $y$  方向的分量為  $\xi$  和  $\eta$ ，那麼

$$\xi = \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \eta = \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (4)$$

代入式(2)和(3)，

$$fv = g\xi \quad (5)$$

$$fu = -g\eta \quad (6)$$

衛星測高給出的海面高 (Sea Surface Height, SSH) 是海面和大地水準面之間的

距離，這是一種絕對觀測，SSH 的變化不完全是地轉流的貢獻，也有地球物理的作用，如潮汐、大氣壓變化、溫度的季節性變化等。為了計算地轉流的速度，需要將地球物理的作用從 SSH 中刪除。這樣就可以利用衛星測高結果計算地轉流的速度。

由(5)和(6)可知，只要知道海面傾斜，就可以計算地轉流的速度  $v$  和  $u$ 。在衛星測高中，同一衛星的上升弧段和下降弧段以及不同衛星弧段的地面軌跡會產生交叉點。如圖 3-2 所示，以交叉點  $O$  為原點，建立  $xyz$  坐標系。根據衛星測高觀測，可以計算沿上升弧段方位角  $\alpha_a$  和下降弧段方位角  $\alpha_d$  的海面傾斜  $i_a$  和  $i_d$ ，那麼由圖 3-2 中關係，可得

$$i_a = \eta \cos \alpha_a + \xi \sin \alpha_a \quad (7)$$

$$i_d = \eta \cos \alpha_d + \xi \sin \alpha_d \quad (8)$$

由上兩式解得  $\xi$  和  $\eta$ ，

$$\xi = \frac{i_a \cos \alpha_d - i_d \cos \alpha_a}{\sin(\alpha_a - \alpha_d)} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{-i_a \sin \alpha_d + i_d \sin \alpha_a}{\sin(\alpha_a - \alpha_d)} \quad (11)$$

代入式(5)和(6)，可得地轉流速度  $v$  和  $u$ ，

$$v = \frac{g}{f} \frac{i_a \cos \alpha_d - i_d \cos \alpha_a}{\sin(\alpha_a - \alpha_d)} \quad (12)$$

$$u = -\frac{g}{f} \frac{-i_a \sin \alpha_d + i_d \sin \alpha_a}{\sin(\alpha_a - \alpha_d)} \quad (13)$$

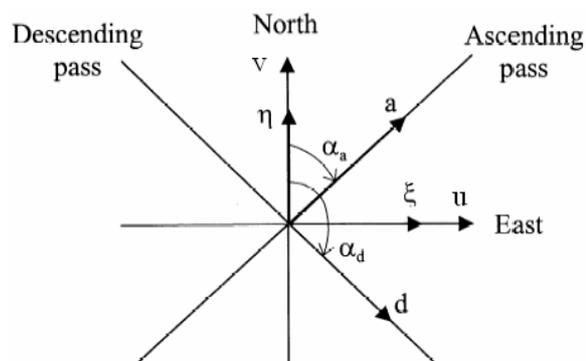


圖 3-2 地面軌跡交叉點

海面傾斜是由衛星測高觀測的海面高  $h$  和大地水準面高  $N$ ，通過數值微分得到的，即

$$i = \frac{\Delta(h-N)}{\Delta s} \quad (14)$$

式中， $\Delta s$  為計算海面傾斜端點之間的水平距離。設海面傾斜的中誤差為  $m_i$ ，距離中誤差為  $m_s$ ，海面高中誤差為  $m_h$ ，大地水準面高的中誤差為  $m_N$ ，那麼根據式 (14)，由誤差傳播定律，可得

$$m_i^2 = \left[ \frac{\Delta(h-N)}{(\Delta s)^2} \right]^2 m_s^2 + \frac{2}{(\Delta s)^2} (m_h^2 + m_N^2) \quad (15)$$

對於 TOPEX/Poseidon 的 1Hz 的數據，相鄰點之間的距離不到 7km，海面傾斜一般為  $10^{-7}$  量級，因此可以忽略  $m_s$  的影響。圖 3-3 給出了不同的  $\Delta s$ ， $m_N$  和  $m_h$  對應的海面傾斜精度。TOPEX/Poseidon, ERS-1/2 和 Jason-1 等獲得海面高的精度約為 2-5cm [Fu et al, 1994; Fu et al, 2001; Martin, 2004]。從圖 3-3 中可以看出，不但需要高分辨率、高精度的大地水準面模型，而且只有當  $\Delta s$  在 50km 以上，海面傾斜精度才有可能達到  $10^{-7}$  量級。因此，必須對上升或者下降弧段的沿跡海面高進行濾波，濾波尺度一般應在 50km 以上。

設上升和下降弧段的海面傾斜為等精度  $m_i$ ，方位角計算也是等精度  $m_\alpha$ ，根據誤差傳播定律，由式 (12) 和 (13) 可得地轉流速度分量  $v$  和  $u$  的精度  $m_v$  和

$$m_v^2 = \left( \frac{g}{f} \right)^2 \frac{\cos^2 \alpha_a + \cos^2 \alpha_d}{\sin^2(\alpha_a - \alpha_d)} m_i^2 + \left( \frac{g}{f} \right)^2 \left[ \frac{\cos^2 \alpha_d [i_d - i_a \cos(\alpha_a - \alpha_d)]^2 + \cos^2 \alpha_a [i_a - i_d \cos(\alpha_a - \alpha_d)]^2}{\sin^2(\alpha_a - \alpha_d)} \right] m_\alpha^2 \quad (16)$$

$$m_u^2 = \left( \frac{g}{f} \right)^2 \frac{\sin^2 \alpha_a + \sin^2 \alpha_d}{\sin^2(\alpha_a - \alpha_d)} m_i^2 + \left( \frac{g}{f} \right)^2 \left[ \frac{\sin^2 \alpha_d [-i_d + i_a \cos(\alpha_a - \alpha_d)]^2 + \sin^2 \alpha_a [-i_a + i_d \cos(\alpha_a - \alpha_d)]^2}{\sin^2(\alpha_a - \alpha_d)} \right] m_\alpha^2 \quad (17)$$

由於海面傾斜比較小，因此上兩式中的右邊第二項，即方位角計算精度的影響可以忽略不計。以 TOPEX/Poseidon 為例，圖 3-4 給出了不同緯度和不同海面傾斜精度下的  $m_v$  和  $m_u$  的結果比較。緯度對於  $v$  和  $u$  精度的影響不同。緯度越低，緯度對  $v$  的影響越大，接近衛星軌道傾角時，緯度的影響越來越小。緯度越低和接近衛星軌道傾角，緯度對  $u$

$m_u$  分別為

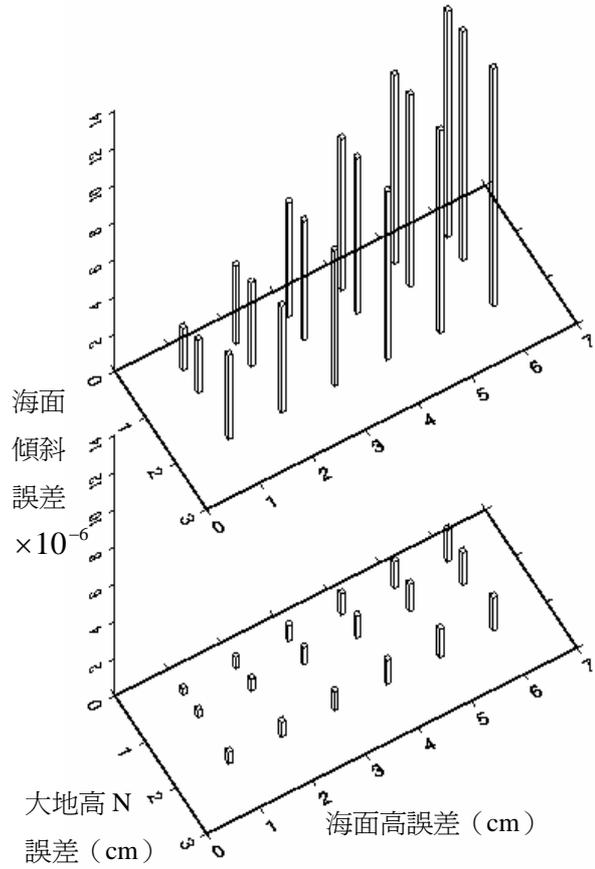


圖 3-3 不同海面高誤差和大地高誤差對應的海面傾斜誤差 (a:  $\Delta s = 7\text{km}$ ; b:  $\Delta s = 50\text{km}$ )

的影響越大，特別是接近衛星軌道傾角，對  $u$  精度影響突然增大，在中緯度地區，緯度對  $u$  的影響越小。海面傾斜精度越差，計算的地轉流速度南北和東西分量的精度越差。只有當海面傾斜的精度達到  $10^{-7}$  時，才有可能得到精度優於  $10\text{cm/s}$  的地轉流速度。

台灣四面環海，東鄰太平洋，離岸距離約  $10\text{-}20\text{km}$ ，海深就下降到  $4000\text{m}$ ，有著名的太平洋西岸流—黑潮流過。

T/P 衛星是由美國 NASA 與法蘭西 CNES 聯合的海洋地形試驗衛星，於 1992 年 8 月 10 日發射升空，在海洋學、大地測量學和地球物理等領域得到了廣泛的應用。Jason-1 是 T/P 的後繼衛星，於 2001 年 12 月 7 日發射。在 Jason-1 發射的初期，Jason-1 和 T/P 處於同一軌道，採用一前一後模式飛行，進行 Jason-1 測高計的檢校，之後，T/P 偏移原來軌道，兩個衛星並行飛行，使得兩個衛星地面相鄰軌跡赤道間距約為  $1.42\text{degree}$ ，這樣就擴大了衛星觀測，增加了更多的交叉點。圖 3-5 給出了台灣周邊海域 T/P 和 Jason-1 的地面軌跡，在台灣東部黑潮經過之地，有交叉點 A 和 B，在台灣西北處有交叉點 C。A 是 T/P 上升弧段 (Pass 127) 和 Jason-1 的下降弧段 (Pass 164) 的交點，B 是 T/P 的上升弧段 (Pass 127) 和下降弧段 (Pass 240) 的交點，C 是 Jason-1 的上升弧段 (Pass 51) 和 T/P 的下降弧段 (Pass 240) 的交點，T/P 的地面軌跡 Pass 127 基本上與黑潮的流向一致。本文利用 2002-2005 的 T/P (Cycle 367-480) 和 Jason-1 (Cycle 24-137) 的 GDRs，進行地球物理和環境改正，計算沿軌跡海面高，進行 Gauss 濾波，濾波尺度為  $50\text{km}$ 。以交通大學計算的台灣最新大地水準面模型計算大地水準面起伏，由衛星測高得到的海面高減去大地水準面起伏，就得到 A, B, C 三點的動力高。該大地水準面模型地面重力測量、船測重力、航空重力、衛星測高、數

字地形，使用最小二乘配置法計算的最新高精度模型，經過 GPS/水準修正后，大地水準面起伏標準差達到了  $3\text{cm}$  的精度。

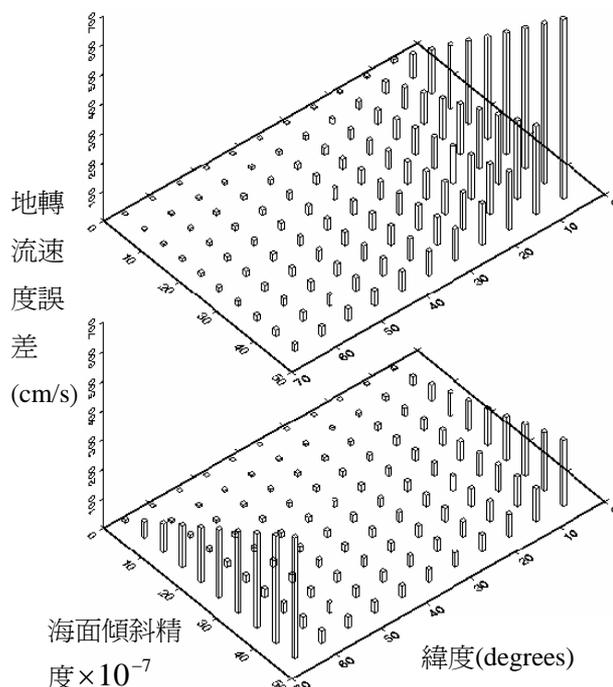


圖 3-4 以 T/P 為例，不同緯度和不同海面傾斜精度對應的地轉流速度計算精度 (a: v; b: u)

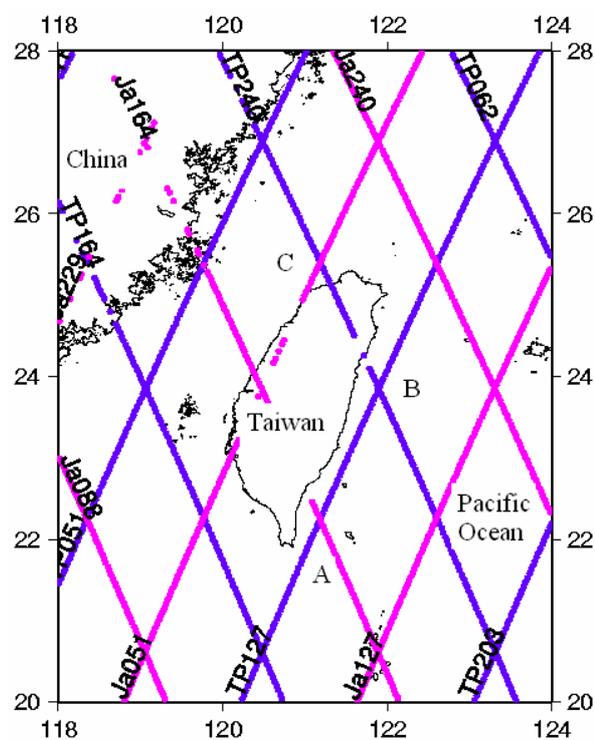


圖 3-5 台灣周邊 Topex/Poseidon (TP) 和 Jason-1 (Ja) 地面軌跡分布和交叉點(圖中的數字表示地面軌跡的 pass)

## 四、成果

### 4.1 大地水準面

本計算結合三種重力資料，分別為地面重力資料、空載重力資料以及衛星測高資料。地面重力資料分為陸測與船測兩種資料，陸測重力點為台灣近二十多年來所蒐集共 3 千多點陸測重力點位。船測資料則取自 Hsu et al.(1998)，共約 4 千多點。測高重力資料則是丹麥國家測量局(KMS)在 2002 年所計算得，約每兩分一點重力值，共約 1 萬多點。本研究的計算方法均為去除回覆法 (remove-restore techniques)，採用最小二乘配置法 (Least Square Collocation, LSC) 計算之。在長波長部分 (long wavelength) 計算部分，採用 GGM02C (GRACE 衛星任務產生之重力模型) 與 EGM96 球諧係數混合計算 (2-200 階取自 GGM02C, 200-360 階取自 EGM96)。短波長 (short wavelength)，即剩餘地形效應 (residual terrain model, RTM) 部分，採用 3 秒解析度且有海底地形之 DEM，計算之大地起伏模型如圖 4-1 所示。

在大地起伏精度測試方面，吾人將利用內政部所提供的檢測路線，來檢核此大地起伏精度，總計三十八點，每一點皆有高精度的水準正高與橢球高(黃，2003)。檢核方式為將此三十八個水準檢核點經緯度內插大地起伏的模型，得到每一點內插後的大地起伏值，與本身實測大地起伏比較其差值之標準偏差。檢核結果如表 1 所示。

### 4.2 交叉點分析

圖 4-2 為台灣周圍海域之海流平均流場示意圖，經過利用衛星測高資料計算圖 3-5 中之 A、B、C 三點之地轉流速度與方位角，得到如圖 4-3、4-4、4-5 之成果，且與圖 4-2 之平均海流方向相符。

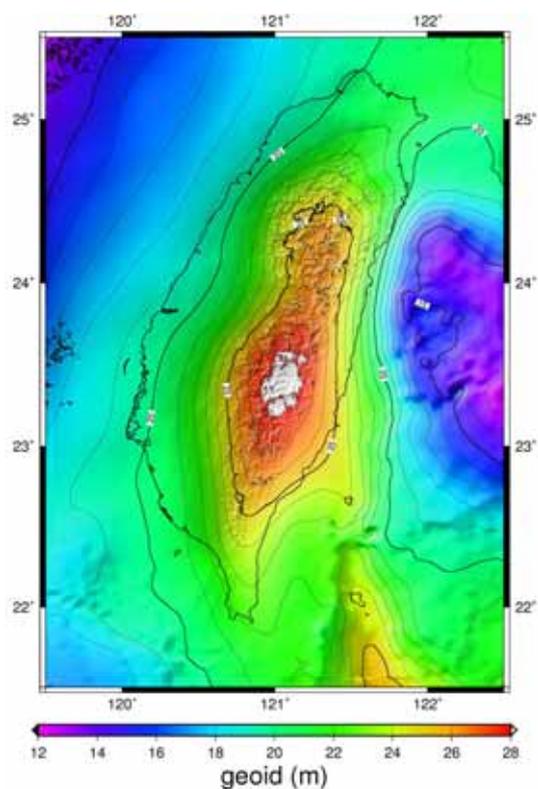


圖 4-1 台灣大地起伏模型

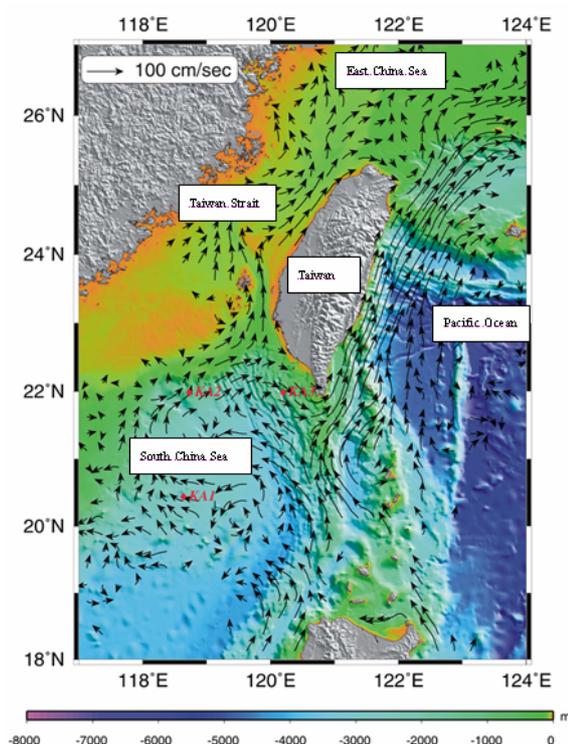


圖 4-2 台灣周圍海域之海流平均流場

表 4-1 大地起伏檢核成果統計表。單位：公尺

	北部檢核點	中部檢核點	南部檢核點	東部檢核點
標準偏差	0.002	0.116	0.190	0.055

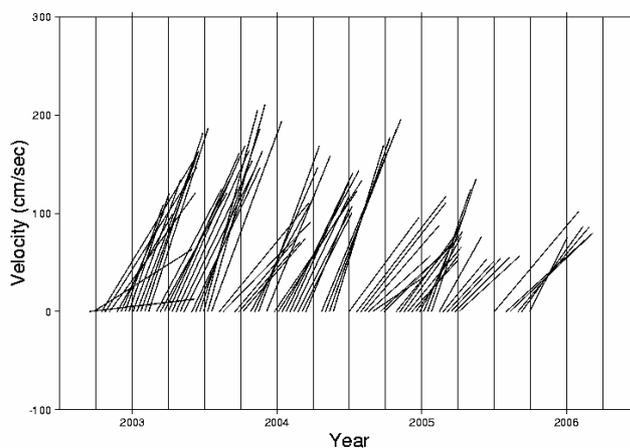


圖 4-3 Point A (mean velocity=133cm/s, azimuth=30.57degree)

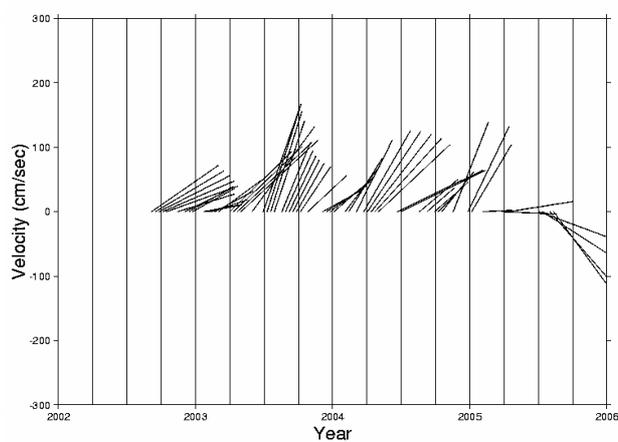


圖 4-5 Point C (mean velocity=82cm/s, azimuth=62degree)

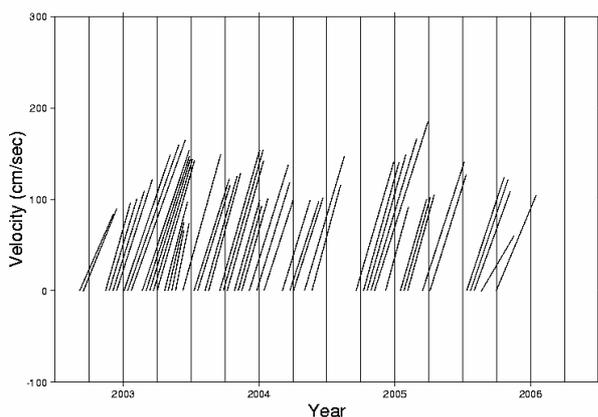


圖 4-4 Point B (mean velocity=127cm/s, azimuth=17.09degree)

## 五、結論

初步成果發表在：

- Ocean current velocities around Taiwan from TOPEX/POSEIDON and Jason-1 satellite altimetry: contribution of airborne gravity data. Taiwan, March 20-22 2006. 台灣國科會海洋學門 95 年度成果發表會
- Surface geostrophic velocity from crossover of satellite altimetry. International workshop on coast and land applications of satellite altimetry, Beijing, July 21-22, 2006.
- Satellite altimeter as an ocean current meter: contribution of marine geoid and airborne gravimetry. WPGM06, Beijing, July 24-27 2006.

## 參考文獻

黃金維(2004)空載重力測量工作, 內政部報告書

- Bell, R. E., V. A. Childers., R. A. Arko., D. D. Blankeship. and J. M. Brozena (1999). Airborne gravity and precise positioning for geologic applications, *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 15281-15292.
- Childers, V. A., D. C. McAdoo, J. M. Brozena and S. W. Laxon (2001). New gravity data in the Arctic Ocean: Comparison of airborne and ERS gravity, *J. Geophys. Res.*, 106, pp. 8871-8886.
- Deng, X., W. Featherstone, C. Hwang, and P. Berry, Waveform retracking of ERS-1, *Marine Geodesy*, Vol. 25, No. 4, 2002.
- 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.
- Forsberg, R., and D. Solheim (2000). Geoid of the Nordic/Baltic region from surface/airborne gravimetry and GPS drapping, IAG international symposium on Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000, session 9.
- Forsberg, R., K. Keller, S. M. Hvidegaard and A. Olesen (2003). European airborne gravity and lidar survey in the Arctic Ocean, ESAG-2002 final report, Denmark.
- Fu, L.L. and E. Rodriguez (2004). High-Resolution Measurement of Ocean Surface Topography by Radar Interferometry for Oceanographic and Geophysical Applications, American Geophysical Union, San Francisco.
- Fu, L.L. and A. Cazenave (editors) (2001) *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. Academic Press, San Diego.
- Gill, A.E. (1982) *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, San Diego.
- Hsu S.K., C.S. Liu, C.T. Shyu, S.Y. Liu, J.C. Sibuet, S. Lallemand, C.S. Wang, D. Reed, (1998), New gravity and magnetic anomaly maps in the Taiwan-Luzon region and their preliminary interpretation, *TAO*, 9, pp.509-532.
- Hwang, C., and S. -A. Chen (2000). Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/POSEIDON altimetry, *Journal of Geophysical Research*, 105 (C10), pp. 23943-23965.
- Kearsley, A. H. W., R. Rorsberg, A. Olesen, L. Bastos, K. Hehl, U. Meyer and A. Gidskehaug, (1998). Airborne gravimetry used in precise geoid computations by ring integration, *J. Geod.*, 72, pp.600-605.
- Liang, W.-D., T.Y. Tnag, Y.J. Yang, M.T. Ko, and W.-S. Chuang (2003). Upper-ocean currents around Taiwan, *Deep-sea Res. II*, 50, pp.1085-1105.
- Mortiz, H.(1980). *Advanced Physical Geodesy*, Abacus Press, New York.
- Olesen, A. V., R. Rorsberg., K. Keller and A. Gidskehaug (2000). Airborne gravity survey of Lincoln Sea and Wandel Sea, North Greenland, *Phys. Chem. Earth. Solid. Earth. Geodes.*, 25, pp.25-29.
- Olesen, A. V., I. N. Tziavos and R. Rorsberg (2001). New airborne gravity data around Crete-first results from the CAATER Campaign, IAG 3rd Meeting of the International

Gravity and Geoid Commission, Session 1.

- Picot N., K. Case, S. Desai and P. Vincent (2001). AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC).
- P. Novak, M. Kern, K. -P. Schwarz, M. G. Sideris, B. Heck, S. Ferguson, Y. Hammada and M. Wei (2003). On geoid determination from airborne gravity, *J Geod*, 76, pp. 510-522.
- Scharroo, R. and J. Lilibridge (2003). Final Report to the ENVISAT RA-2/MWR Cross-Calibration/Validation Team, NOAA Laboratory for Satellite Altimetry.
- Sproule, D.M., A. H. W. Kearsley and M. B. Higgins (2000). Impact of BRAGS'99 airborne gravimetric data on geoid computations in Australia, and possibilities for utilisation of bathymetric Information, Presented at: IAG Conference on Gravity, Geoids and Geodynamics 2000 (GGG2000).
- Verdun, J., E. E. Klingele, R. Bayer, M. Cocard, A. Geiger and H. G. Kahle (2003). The alpine Swiss-French airborne gravity survey, *Geophys. J. Int*, 152, pp. 8-19.
- Wei, M., and K. P. Schwarz (1998). Flight test results from a strapdown airborne gravity system, *J. Geod.*, 72, pp. 323-332.