

臺灣地區實施海底大地測量可行性先期研究

Feasibility Study of Conducting Seafloor Geodetic Survey in Taiwan

陳鶴欽¹ 余水倍² 陳宏宇³ 曾耀賢⁴ 劉正倫⁵

He-Chin Chen Shui-Beih Yu Horng-Yue Chen Yao-Hsien Tseng Jeng-Lun Liu

摘要

海底大地測量技術係結合海上動態 GPS 與海下音波定位的方式，可以量測到海底地殼板塊變形情形及精確量測海底控制點的坐標，由地殼變形資料評估隱沒帶孕育大地震之潛能，獲知完整的板塊邊界變形型態及更精確的板塊相對運動速度，對於我國的防震減災工作有實質效益。實施數年多次的海底大地測量觀測，可由地殼變形資料評估隱沒帶孕育大地震之潛能，獲知完整的板塊邊界變形型態及更精確的板塊相對運動速度，對於我國的防震減災工作有實質效益。而板塊邊界變形及其運動對國家測量控制網的影響，亦可獲得較正確的評估。在臺灣海域精確量測的海底控制點坐標資料，可用於檢核現有海底地形圖的精度，有助於未來我國領海及經濟海域的探測與資源開發。本研究初步成果顯示，18 小時長距離動態測試整體精度約 20-30 公分，規劃台灣地區約設置 20 個海底控制點。

關鍵詞：海底大地測量、海底控制點、動態 GPS、海下音波定位

Abstract

The seafloor geodesy that combining kinematic GPS and acoustic ranging techniques can be employed to monitor crustal deformation on the ocean floor and precisely measure the coordinates of seafloor control points. Crustal deformation data from repeated surveys of seafloor control points can be used to evaluate the possibility of a major earthquake in the subduction zone. The information of velocity of plate motion is very important for the seismic risk analysis in Taiwan and resulting in reducing the seismic disaster and loss. The impact of plate motion and plate boundary deformation on the national control network can be better assessed. The result of study shows that kinematic GPS accuracy is about 20-30cm and install about 20 seafloor control points.

Keyword: Seafloor geodesy, Seafloor control point, Kinematic GPS, Acoustic ranging

¹ 國立成功大學地球科學研究所 博士候選人/內政部國土測繪中心 專員
23012@mail.nslc.gov.tw

² 中央研究院地球科學研究所 研究員

³ 中央研究院地球科學研究所 研究副技師

⁴ 內政部國土測繪中心 課長

⁵ 內政部國土測繪中心 副主任

一、前言

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處，周圍有兩大弧溝隱沒系統：在台灣東邊，菲律賓海板塊沿著琉球海溝向北隱沒於歐亞板塊之下；在台灣南方，歐亞板塊則沿馬尼拉海溝向東隱沒於菲律賓海板塊之下。兩者交互交叉，構成台灣地區主要的板塊構造單元 (Angelier *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 1998)。

此兩大板塊在臺灣東部陸上與近海處以碰撞和隱沒形式交互作用，此乃臺灣地區大地構造主要動力來源，整個碰撞隱沒區域之地殼變形劇烈，應力變化、累積極為快速，地震非常頻繁；對生活在台灣的居民生命財產威脅很大，而且造成坐標系統快速變化，不利於國家坐標系統的維護及後續工程應用。

近年臺灣普遍應用GPS在基本控制點檢測及地殼變形觀測作業上，這些GPS大地監測網多布設在大部分屬於歐亞板塊的臺灣島上，東邊菲律賓海板塊除海岸山脈外，則大多位處深海，不易觀測。在臺灣東部及外海附近，恰好有兩大板塊交會，地理條件對板塊邊界研究而言是全球首屈一指的優勢環境，可以應用海底大地測量觀測技術，發展遠距高精度GPS及海下音波定位等多感測器觀測方法，彌補海域大地測量觀測資料之不足，達到對板塊運動造成地震的先期預警效果，並對地震可能造成災害有防震減災的目的，更進一步可了解板塊運動對國家基本控制網框架的影響。

內政部國土測繪中心執行「臺灣地區實施海底大地測量可行性先期研究」作業，主要在蒐集國內外海底大地測量實施現況、目的與效益及規劃國內未來辦理海底大地測量之海域海底地形研析、選址條件、布設地點、可能布設數量，及其他可能相關必須蒐集資料、未來臺灣地區辦理海底大地測量可行性評估、及海上中長距離動態定位與海下音波定位成果聯合處理技術之研發，提升發展海底大地測量觀測之能力。

二、海底大地測量方法概述

海底大地測量是一種結合動態 GPS 測量及水下音波定位技術，測定海底控制點坐標的觀測方法(圖 1)。投置在海底之三個精密音波回應器 (Transponder) 形成的三角形中心，可視為一個海底控制點。音波回應器陣列儘量佈設成正三角形，其外接圓半徑，即三角形中心 (內心) 至各回應器的距離，約等於當地的海水深度。在數公里的小範圍內，海水的音波速度構造大致呈水平分層。因此，從音波回應器陣列中心正上方海面觀測之陣列中心水平位置，與音波速度的時間變化無關；音波速度隨時間的變化只影響陣列中心的垂直位置。

由固定於船體或浮台的音波轉換器 (Transducer) 發出音波訊號至海底音波回應器的往返走時，可測定回應器的相對位置。使用精密音波轉換及回應器，往返走時的量測解析度可達數微秒 (μsec)，相當於數毫米 (mm) 的距離解析力。另藉由船上或浮台的 GPS 測量儀與陸上 GPS 參考站的聯測，及船上 GPS 天線與音波轉換器的相對位置關係，可推算音波發射及接收瞬間之音波轉換器大地坐標。船或浮台的姿態可由固定於其上的三個 GPS 接收儀，或其他姿態測定儀器獲知。

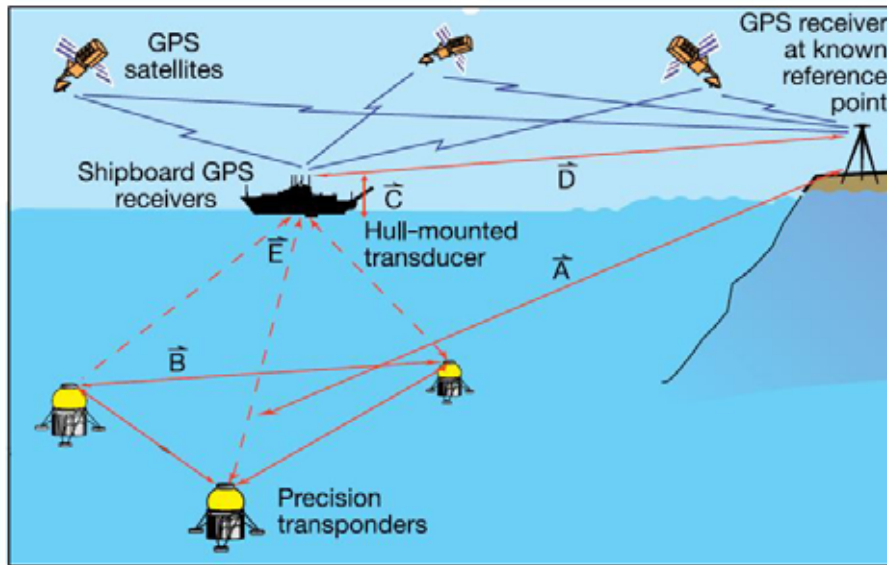


圖 1、海底大地測量是一種結合動態 GPS 測量及水下音波定位技術，測定海底控制點坐標的觀測方法。由固定於船體或浮台的音波轉換器 (Transducer) 發出的音波訊號至海底音波回應器 (Transponder) 的往返走時，可測定回應器的相對位置。另藉由船上的 GPS 測量儀與陸上 GPS 參考站的聯測，及船上 GPS 天線與音波轉換器的相對位置關係，可推算音波發射及接收瞬間之音波轉換器大地坐標。(Gagnon et al., 2005)

音波測距的部分是利用音波轉換器和設置在海底的音波回應器之間的音波信號來測定往返的傳播時間。每個音波回應器及主要信號中包含了身分驗證碼，由身分驗證碼可得知訊號來源。音波轉換器和音波回應器所造成的聲訊，會依距離及接收訊號位置而增強，因此音波轉換器和音波回應器的距離不會影響訊號雜訊比。從多次的音波信號的送受信中以最小二乘可推定音波回應器的位置和海中的音速構造的時間變化。

國外相關文獻(Spiess et al., 1998; Gagon et al., 2005; Fujita et al, 2006; Kido et al., 2006; Ikuta et al., 2008) 顯示水平精度最佳者可達 1 cm，但須觀測甚長時間 (約 120 小時)，一般為 5-7 cm；垂直精度為 10-16 cm。依此觀測精度，在快速地殼變動的地區 (3 cm/yr 以上)，每年觀測 2 次以上，持續進行 3-5 年，應能獲得可靠而有意義之科學成果。

三、臺灣地區辦理海底大地測量可行性評估

3.1 海底控制點佈設原則及佈設點位規劃

根據結合 GNSS 動態定位測量及海下音波定位技術之海底大地測量原理與方法、國外相關參考文獻揭示之實測精度與經驗、及台灣附近海域之海底地形、大地構造、地殼運動與變形、海流與海況、和漁船作業方式等資訊，提出海底控制點的選址佈設原則如下：

- (1) 考慮該海域的地質構造及地殼變形速率，在不同的構造區佈設音波回應器陣列。地殼變形速率為 3 cm/yr 以上，方可在數年內觀測到可靠的成果。

- (2) 站址須避開海底峽谷、河流出海口附近、及地形陡峭易崩塌地區，以免音波回應器遭沉積物覆蓋而失去作用。
- (3) 佈設地點海水深度不得小於 500 m，避免則音波回應器受底拖漁船破壞。
- (4) 預定佈設地點附近的海底地形平坦，且無厚度大於 0.3 m 的鬆軟沉積物。在使用海洋研究船的情況下，投置地點之鬆軟沉積物厚度資料，可由回聲測深記錄的判讀，獲知沉積物種類與厚度 (e.g., Hong and Chen, 2000)。
- (5) 考慮該海域 GNSS 動態測量可有效精確定位的離岸距離，以台灣東部及南部海域為例，最好距台灣海岸線或離島不超過 180 km。

台灣海峽及北部海域，水深大多小於 200 m，佈設於海底之音波回應器易遭底拖漁船干擾或破壞。且地殼變形速率緩慢，以目前海底大地測量精度而言，現階段較不適合實施長期海底大地測量。因此，本研究之規劃僅包含台灣東部及南部海域。依此原則，圖 2 所示為使用三維視覺動態資料展示軟體選擇的未來施放 20 個海底音波回應器位置(紅色三角形)。站址水深介於 1100 m 至 5430 m 之間，與最近 GPS 連續觀測站的距離則自 17 km 至 178 km 不等。

3.2 海底大地測量作業所需之工程技術、儀器設備、經費及人力

(一) 工程技術

海底大地測量作業所需之工程技術包括：如何設計一個有足夠強度但又能降低水中航行阻力的音波轉換器支桿、將音波轉換器支桿及 GNSS 天線等固定於船

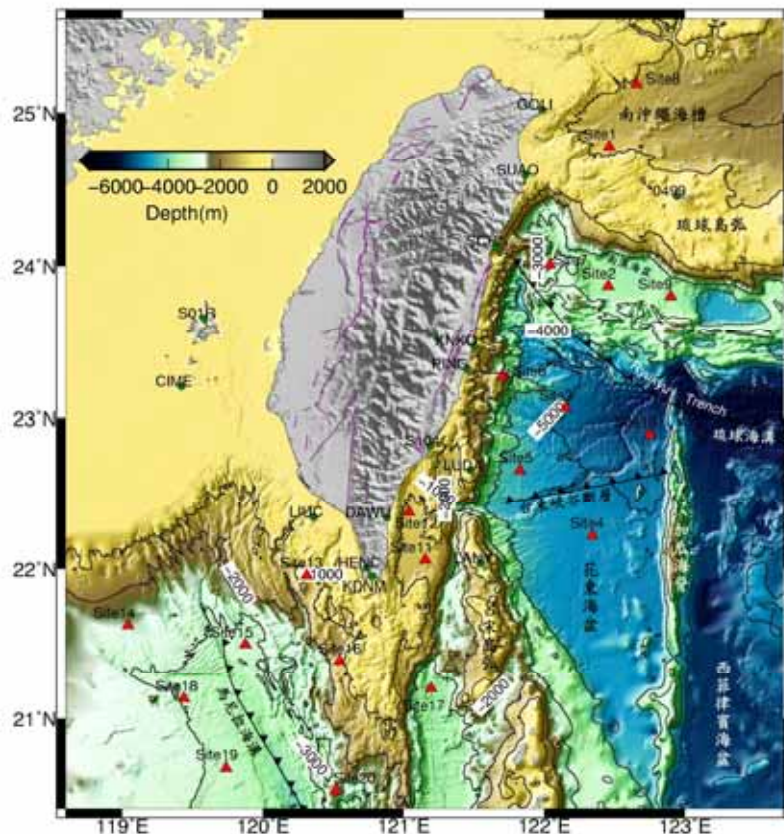


圖 2、使用三維視覺動態資料展示軟體選擇的施放海底音波回應器位置。

上而不發生局部變形或位移的夾具、船拖浮台的設計製作、精密 GNSS 動態定位技術、及海下音波定位技術等。這些技術在幾次海域實地外業測試中，已透過自行設計及逐漸改進的方式，獲得一些寶貴經驗，可傳承給後續的作業團隊。精密 GNSS 動態定位目前採用 Bernese v.5.0 軟體及商用 GrafNav 動態定位軟體；前者僅能處理取樣間隔 1 秒之資料，且須藉其他軟體先計算各時刻之較佳起始坐標值，但因屬科學軟體可獲得較精確之結果。後者之動態解算能力佳，但精度略差。

(二)儀器設備

海底大地測量所需儀器設備包括海底音波回應器陣列（一個海底控制點由三個回應器組成）、音波轉換器、船上音波訊號接收記錄器、高精度雙頻 GNSS 衛星接收儀及天線一至四組、溫鹽深儀（CTD）、捲揚機、及監控音波定位與導航用之筆記型電腦 3 部。如船上裝有精密運動感應器（Motion sensor）或衛星羅盤（精度須小於 0.2° ），則雙頻 GNSS 衛星接收儀及天線只須一組。衛星接收儀最好採用新型可同時接收三頻（L1, L2, L5）GPS 訊號、GLONASS 衛星及 Galileo 衛星系統之訊號，以增加觀測量，提昇定位精度。船上音波訊號接收器及溫鹽深儀的規格須考慮其可接收音波訊號的距離及量測深度。一般用於投置在 1000-5000 m 水深的海底音波回應器，不適合用在較淺的海域。如需在數百公尺水深的海域投置音波回應器，則須研發其他類型的儀器。

衛星接收儀除記錄高取樣率（1 秒及 0.2 秒）之觀測資料，須能同時輸出 1 PPS 時間訊號及 NMEA 導航訊息，以提供音波訊號接收記錄器及船舶導航監控之用。捲揚機須使用強韌之釣魚線，長度依 CTD 量測深度而定。以台灣附近海域的音波速度變化情形而言，建議至少應能量測水深 2000 m 以上。

(三)人力及經費

海底大地測量出海作業航行及施測時間一般都超過 30 小時（以租用漁船為例），且在作業中有時須重複拆卸及安裝音波轉換器支桿，頗為耗費體力，最好有兩組人力（每組 2~3 人）輪流工作，故出海作業人力共須 4-6 人。此外，GNSS 衛星動態定位及音波定位資料處理工作屬於內業作業，可由兩人分攤此項工作。如觀測點數及次數不多，亦可由一人負責全部資料處理工作。海底大地測量作業所需經費，依觀測之海底控制點數目及觀測次數而定。照規劃之 20 個海底控制點，以每年每一點觀測 2 次估算，每年作業所需經費共 7,520,000 元。儀器及軟體設備費屬於一次性投資，共需 67,290,000 元；其中海底音波回應器陣列需 60,000,000 元。

3.3 海底大地測量作業之可能工作項目及程序

依據本研究經驗顯示，辦理海底大地測量作業之工作項目及程序如下：

- (一) 海底控制點選址作業規劃。
- (二) 儀器與軟體設備採購及測試。

- (三) 勘查出海作業船舶及港口。
- (四) 勘選適當之現有 GNSS 連續觀測站，做為陸上參考站。
- (五) 海底音波回應器投置及觀測作業。
- (六) GNSS 衛星動態定位及船舶或浮台姿態計算。
- (七) 音波定位資料處理與分析。
- (八) 結合歷年觀測資料，估算海底控制點之運動速度，研究板塊邊界變形。

3.4 海底大地測量可能應用方向及預期效益

海底控制點的設置費用頗為昂貴，觀測作業耗力又費時。國內外相關研究文獻顯示目前海底大地測量的應用，以觀測鄰近陸地海域之地殼變形為主。台灣東部海域位處菲律賓海板塊與歐亞板塊之邊界，有活躍的碰撞與隱沒交互作用，地殼變形快速，地震活動頻繁。沿著台灣東部海岸及龜山島、綠島、與蘭嶼等離島都已設有一些 GPS 或 GNSS 連續觀測站，可做為陸上參考站，且有詳細的海底地形及海洋地球物理探測資料，在此開展海底大地測量觀測研究計畫，具有相當的優勢。

台灣南部海域在大地構造上屬於馬尼拉海溝—呂宋島弧系統，南海/桑達板塊向東隱沒於菲律賓海板塊下方，但在接近台灣時，海溝之地形特徵已不明顯，轉成較為分散的變形帶，其與台灣西部變形帶前緣及高屏脫逸構造運動的關連性值得探究；故也是未來值得實施海底大地測量的重點地區之一。至於台灣海峽及北部海域，水深大多小於 200 m，且地殼變形速率緩慢，較不適合實施長期的海底大地測量作業以觀測地殼變形。

在琉球弧溝系統及馬尼拉海溝—呂宋島弧系統兩個隱沒帶實施數年的海底大地測量觀測作業，能直接測得其聚合速率，由地殼變形資料可評估其孕育大地震之潛能，並獲知較完整的板塊邊界變形型態及更精確的板塊相對運動速度。對於我國的防震減災工作，將有實質助益。而板塊邊界變形及其運動對國家測量控制網的影響，亦可獲得較正確的評估。在台灣東部及南部海域精確量測的海底控制點坐標資料，可用於檢核現有海底地形圖的精度，有助於未來海洋探測及資源開發。若要在台灣海峽及北部海域等淺海地區測設海底控制點，應考慮發展能回收且較經濟的海底音波回應器系統，重複使用可大幅度減少作業成本。

四、海域實地外業測試

本研究由中研院地球所向日本海洋電子株式會社採購與名古屋大學團隊相同型式的音波轉換器 (Transducer) 一組(型式：SMS-101)及海底音波回應器 (Transponder) 陣列三組(型式：SMB-201)。於 2008 年 8-10 月交貨。每一陣列由 3 個回應器組成，在海底佈設成一正三角形，其邊長與佈設地點之海水深度相當。海域實地外業測試時，使用船或船拖浮台進行觀測。

海底音波回應器是和船上音波控制記錄器及音波轉換器之間使用水中音波，於海面及海底間實施可達 1 cm 精度的精密測量。音波回應器設置於海底，從船上

音波轉換器送受的超音波信號來決定其位置。超音波的往返時間測量能達到的 $10 \mu\text{sec}$ 精度。同時，3 個音波回應器有 3 種各自固定碼，能相互對應來自船上音波轉換器的通訊信號。睡眠狀態時音波回應器的耗費電力為 $10 \mu\text{A}$ ，測量時為 20mA 以下，電池壽命可使用於 10 年以上的長期觀測。再者，其構造耐壓性優良，能耐的住於深海底做測量，耐電蝕性也很好。其中海底音波器及音波控制記錄器可觀測距離為 $6,000 \text{m}$ ，以符合台灣附近海域的深度。

4.2 海底大地測量實測經驗傳承

歷經實際的外海測量，在長距離的動態定位及載體姿態的計算中，幾點經驗及結果可提出：

1. 由於 GPS 接收儀事先固定於浮台載具上，且考慮防水的因素，觀測期間盡量保持儀器的密封，而造成無法監視儀器是否正常運作，影響動態姿態的解算，因此在實際的測量中必須注意此問題，於實測前、中、後，必須特別注意 GPS 接收儀，是否正常運作。
2. 比較 TTC 及 Bernese v5.0 解算的相對位置成果，南北向的差異為 $-0.109 \pm 0.066 \text{m}$ ，東西向的差異為 $0.013 \pm 0.047 \text{m}$ ，而高程向為 $0.032 \pm 0.034 \text{m}$ ，此結果顯示，兩動態測站的相對位置，雖僅 20m ，但差異達 20cm ，顯示 TTC 不適用於長距離動態的計算。
3. 比較長距離動態定位軟體的精度得知，在長距離動態定位的解算中，CSRS-PPP 約有 10cm 精度的成果，可提供相當好的近似坐標，GrafNav 在剛開始測量的一小時前，在南北向的誤差達 20cm ，而一個和多個參考站的結果，也會造成 $2 \sim 6 \text{cm}$ 的差異。
4. 採樣率為 1秒 及 0.2秒 資料在不同時刻由 GrafNav 計算的比較結果，兩者於不同時期會有數公分的誤差，但 0.2秒 資料可提供較詳細的動態定位成果，值得繼續探討。

由實際的海底大地測量觀測經驗，對於未來野外觀測及資料處理的具體建議，由儀器的選定、安置及計算，可列舉敘述如下：

1. 由於動態定位的成果，是用來計算音波轉換器發射訊號的中心，進而求取海底音波回音器的位置，因此動態定位精度的優劣，直接影響整體量測的成果，再加上海底大地測量網位於外海近百公里，所以衛星接收儀及天線組，建議使用大地型雙頻或三頻儀器，以確保後續資料處理的穩定性。
2. 音波轉換器載體的動態姿態求解，是用來修正訊號發射瞬時的中心位置，為利於天線相位中心的改正及資料解算的便利，衛星接收儀及天線組建議使用同型儀器。
3. 安置移動載體上的衛星接收天線應力求穩固，始能完整顯現移動載體的動態位置及姿態。在此計畫中，關於接收天線及音波轉換器的安置，因不同載體的安置地方及固定位置均不相同，亦花費相當多的精力，歷經數次的修改，以求野外觀測的品質。

4. 儀器載體的起始方位及姿態，是提供訊號發射瞬時中心修正的重要參數，因此在野外作業前應事先量取儀器載體的起始方位，及音波轉換器位置的偏差量，以利實際動態定位與姿態的求定。
5. 對於中長距離動態定位的解算，本研究團隊以 Bernese v5.0 計算軟體為主，訊號於動態時的跳週偵測及補償，是影響後續計算精度的主因，而原始觀測資料，受接收儀時錶誤差及大氣延遲的影響，使得動態時的跳週偵測及補償，無法正確的運作，因此本研究發現，如起始的近似坐標達 10 cm 級的精度，可提高此解算軟體的效益，與 GrafNav 的結果比較，可達公分級的精度。
6. 起始動態近似坐標的獲得，可經由其他計算軟體，亦可引進加拿大空間參考系統(Canadian Spatial Reference System, CSRS)的精確單點定位(PPP)免費提供的動態概略近似坐標。

2008 年 10 月的宜蘭外海與花蓮外海第一次海底大地測量觀測作業，因漁船未照規劃路線航行或海研一號可提供的觀測作業時間有限，有效用於音波定位的測點總數偏少；且由於第三個音波回應器故障，實際只有兩個回應器的音波觀測資料，最後結合 GPS 與音波定位的成果精度只達數十公分或公尺級。2009 年 3 月花蓮外海的第二次觀測，完成第三個海底音波回應器的投置作業，且總觀測時間長達 18 小時。但因船引擎雜訊太大，只能使用關掉引擎，讓船隨海流漂移的部分資料做音波定位工作。全部漂流資料約 1000 筆，其中訊雜比較大者（交叉相關係數大於 0.7）約佔 70~80%。整體定位精度較前兩次佳（約 20~30 cm），但尚未能達到與國外相關文獻相當的精度（5~7 cm）。

在 OCDASAN 資料處理軟體中，音波走時資料係採自動化判讀的方式獲得。有時因訊號中的雜訊太大或水面反射波的干擾，會有誤判的情形，使得逆推結果的殘差較大。其他導致目前測試結果精度不佳的原因包括觀測量不夠多、測點幾何分佈不均勻、及音波轉換器夾具有擺動情形（花蓮外海 2009 年 3 月觀測）等。未來在觀測程序及資料處理方面，仍有極大的改進空間。

五、結論與建議

在執行本研究的一年期間內，獲得以下幾點初步結論與建議：

- （一）蒐集國外有關海底大地測量之相關研究及應用文獻 6 篇，水平精度最佳者可達 1cm，但須觀測甚長時間（約 120 小時），一般為 5-7 cm；垂直精度為 10-16 cm。依此觀測精度，在快速地殼變動的地區（3 cm/yr 以上），每年觀測 2 次以上，持續進行 3-5 年，應能獲得可靠而有意義之科學成果。
- （二）台灣東部海域位處菲律賓海板塊與歐亞板塊之邊界，有活躍的碰撞與隱沒交互作用，台灣南部海域在大地構造上屬於馬尼拉海溝—呂宋島弧系統。兩海域地殼變形快速，地震活動頻繁，且已有詳盡海底地形、海流、及地球物理探測資料，是未來實施海底大地測量具有優勢的重點地區，故規劃 20 個海底音波回應器陣列的投置地點。

- (三) 台灣海峽及北部海域，水深大多淺於 200 m，佈設於海底之音波回應器易遭底拖漁船干擾或破壞。且地殼變形速率緩慢(小於 3mm/yr)，以目前海底大地測量精度而言，現階段較不適合實施長期海底大地測量。若要在台灣海峽及北部海域等淺海地區測設海底控制點，應考慮發展能回收且較經濟的海底音波回應器系統，重複使用可大幅度減少作業成本。
- (四) 自行設計的船拖浮台及船上固定音波轉換器與 GPS 天線裝備，經實地測試後再加以改進，已可使用海釣船於未來海底大地測量實際作業；可彌補海研一、二號船期的不足。
- (五) 陸上 GPS 動態定位實驗結果顯示：名古屋大學研究團隊提供之動態測試資料，150 公里的動態定位平面精度優於 2 公分，而高程精度小於 10 公分。以適合於台灣地區海底大地測量的基線長(約 80 至 150 公里之間)為例，台灣測試場的動態測量資料精度南北向約為 -2 ± 14 mm、東西向為 -28 ± 33 mm、高程向為 7 ± 43 mm；與名古屋大學測試的成果相當。
- (六) 在長距離動態定位的解算中，CSRS-PPP 約有 10 cm 精度，可提供好的近似坐標，GrafNav 在剛開始測量的一小時前，在南北向的誤差達 20 cm，而與 Bernese 多參考站結果比較，也有 2~6 cm 的差異。
- (七) 2009 年 3 月花蓮外海的第二次觀測，完成三個海底音波回應器的投置作業，總觀測時間長達 18 小時。結合 GPS 與音波定位的整體精度約 20~30 cm，尚未能達到與國外相關文獻相當的精度 (5~7 cm)，未來在觀測程序及資料處理方面，仍有極大的改進空間。
- (八) 照規劃之 20 個海底控制點，每年每點觀測 2 次估算一年所需作業經費共 7,520,000 元。儀器及軟體設備費屬於一次性投資，共需 67,290,000 元。
- (九) 海底大地測量執行期間建議分兩階段進行，第一階段為期 4 年，可分年編列預算，每年採購 5 組音波回應器陣列，並進行投置與觀測作業。因此，工作量會逐年加重。第二階段亦為期 4 年，每年定期實施已建立之 20 個海底控制點的觀測作業，並進行資料解算與成果分析工作。
- (十) 台灣東部及南部海域兩個隱沒帶實施數年的海底大地測量觀測，可由地殼變形資料評估隱沒帶孕育大地震之潛能，獲知完整的板塊邊界變形型態及更精確的板塊相對運動速度，對於我國的防震減災工作有實質效益。而板塊邊界變形及其運動對國家測量控制網的影響，亦可獲得較正確的評估。在台灣海域精確量測的海底控制點坐標資料，可用於檢核現有海底地形圖的精度，有助於未來海洋探測及資源開發。

誌謝

中央研究院地球科學研究所安藤雅孝教授及陳新壹、蘇宣翰、王福全等三位先生協助海底大地測量作業，蔡宜純、余美君及童忻等三位小姐協助音波定位及 GPS 資料處理工作；台灣海洋大學黃雯苓小姐協助以三維視覺動態資料展示軟體繪製海底地形剖面，日本靜岡大學 Ryoya Ikuta 博士指導海底大地測量資料處理軟

體(OCDASAN)之使用，中央氣象局地震測報中心及內政部國土測繪中心提供陸上 GPS 連續觀測站資料，作者謹致真摯謝忱。本研究由內政部國土測繪中心資助經費，計畫編號：NLSC-97-16。

參考文獻

- Angelier, J., H. T. Chu, and J. C. Lee, 1997, Shear concentration in a collision zone: kinematics of the active Chihshang Fault, Longitudinal Valley, eastern Taiwan, *Tectonophys.*, 274, 117–144.
- CSRS-PPP, Canadian Spatial Reference System:
(http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/index_e.php).
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo, 2006. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265-276.
- Gagnon, K., Chadwell, C.D., and Norabuena, E., 2005. Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements, *Nature*, 434, 205-208.
- Hong, E. and Chen, I.S., 2000. Echo characters and sedimentary processes along a rifting continental margin, northeast of Taiwan. *Cont. Shelf Res.* 20, 599-617.
- Ikuta, R., Tadokora K., Ando M., Okuda T., Sugimoto S., Takatani K., Yada K., and Besana. G.M., 2008. A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2006JB004875.
- Kido, M., Fujimoto, H., Miura, S., Osada, Y., Tsuka, K., and Tabei, T., 2006. Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii peninsula earthquake, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, *Earth Planets Space*, 58,911-915.
- Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, S. B. Yu, and J. C. Hu, 1998, Plate-boundary strain partitioning along the sinistral collision suture of the Philippine and Eurasian plates: Analysis of geodetic data and geological observation in southeastern Taiwan, *Tectonics*, 17(6), 859–871.
- Spieß, F.N., Chadwell, C.D., Hildebrand, J.A., Young, L.E., Purcell, Jr. G.H., and Dragert, H., 1998. Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth Planet. Inter.* 108, 101-112.