

行政院環境保護署

103 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

運用地層剖面儀進行河口底泥物理性質之空間變異研究

期末報告

主 辦 單 位： 行政院環境保護署

計畫執行單位：國立台灣大學／海洋研究所

計畫主持人：黃千芬 助理教授

計畫執行期間：102年11月25日起至

103年11月24日

中 華 民 國 103 年 11 月 印製

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

計畫成果自評表

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：

本研究之執行根據原先規劃內容，以建議的聲學方法（包括側掃聲納、地層剖面儀）進行了關渡水域之河床表層底泥物理性質之遙測，並輔以現場底泥採樣。結果顯示由地層剖面儀所估算之反射係數值所對應的土壤顆粒屬性與現場土壤採樣之分布吻合，且佐以高頻側掃聲納影像可以解析覆蓋於河床上之細質沉積物。此研究所發展的遙測方法可為未來進行底泥物性快篩的工具。

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 篇； ☐ 未發表之文稿 篇； ☒ 撰寫中 1 篇； ☐ 無

專利：☐ 已獲得 件； ☐ 申請中 件； ☒ 無

技轉：☐ 已技轉； ☐ 洽談中； ☒ 無

其他：（100 字為限）

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

用聲學遙測方式，可進行大範圍的探測，能省去許多人力、時間成本，所得到的資料也能夠有效提供給底泥整治專家進行參考。

中文摘要

為了能快速且大範圍的探測河川底泥性質，本研究專案引進地球物理遙測技術－變頻聲納海底地層剖面儀 (Chirp sonar sub-bottom profiler) 輔以雙頻側掃聲納 (dual-frequency side-scan sonar)，於淡水河口進行河床底泥質地分佈調查。地層剖面儀調查結果發現，該水域之反射係數資料顯示於河道兩側之河床部分區域被泥砂所覆蓋，屬於泥質粉砂沉積，此結果與底泥樣本分析結果吻合；而沿河道軸水深較深處，地層剖面儀資料顯示為礁岩，但現場底泥樣本分析結果卻屬於泥質或粉砂質沉積物，推測該處長年受河流沖刷，因而露出硬質的岩盤，唯抓泥器採集到的土樣僅為覆蓋在硬岩上的軟泥，未能反映聲波遙測所算出的反射係數分佈。本研究除了使用由地層剖面儀自身所提供的反射係數資訊來估算底泥的質地，也自行發展計算反射係數的方式。此計算方式主要修正了在河床上沉積物產生再懸浮現象，地層剖面儀所得到的反射係數資訊會低於實際值的問題。建議未來在使用地層剖面儀作表層沉積物分類時，需要參考高頻側掃聲納所表現的地表逆散射回訊，並以表層沉積物的厚度以解讀量測得的反射係數值所對應的沉積物性質。

英文摘要

The project investigates the acoustic surveying tools, including the chirp subbottom profiling system (SBP) and the dual-frequency side-scan sonar (SSS), to map the distribution of river sedimentary environments. The experimental sites were in the river mouth of Keelung and Tamsui Rivers. The results show that, near the relatively flat area on both sides of Tamsui River, the values of reflection coefficient (RC) measured by the SBP are between -20 to -10 dB. The SBP information indicates that the sediment is dominated by sand and silt in various amounts, which is consistent with the analysis of the *in-situ* grab samples. In the deeper water area the lower RCs are observed, indicating a rocky riverbed. However, the SBP information is less correlated with the grab samples. The reason might be that the deeper areas are eroded by the river flow and the bedrock is exposed with few amount of sand/silt deposited. In addition, the study uses the multiple reflections to develop an algorithm for calculating the RCs. The values of RC are corrected for the case when the sediments are resuspended from the riverbed. We find that integrating the information provided by SBP along with higher-frequency SSS can make better interpretation of the acoustic data for inference of the sediment types.

第一章 前言

傳統上海床/河床底質沉積物的量測均使用現場定點底泥採樣的調查方式，以獲得底泥的物理性質，然此方法因海/水上作業不易，難以進行大範圍的水域的探測。鑑此，近年來海洋地球物理領域已快速發展聲納儀器，利用聲波於海水傳播的特性與訊號處理的技術進行地層遙測以提升探勘效率。許多利用聲納系統來探討海洋環境的海洋地球物理儀器，能夠記錄高解析度的海床聲學特性，利用此來探討不同的海床沉積物是否會有不同的聲學特性。

本研究專案將引進地球物理聲學遙測技術－變頻聲納海底地層剖面儀 (Chirp sonar sub-bottom profiler) 以及側掃聲納儀 (Side scan sonar) 進行河川底泥物理性質之大範圍調查。變頻聲納海底地層剖面儀主要可提供高解析度底床淺層沉積物垂直面資訊，該資訊不僅可以直接解讀底泥厚度，經過後續資料分析，透過底泥聲學性質與物理性質間的關係式，即可估算底泥物理性質（如平均粒徑、孔隙度、滲透率、密度等），其中底泥顆粒大小與重金屬含量有密切關係，同時，這些物理性質也可提供水動力模式模擬場址的底泥分佈情形，以及因顆粒再懸浮等機制而造成的二次污染。其主要原理是利用不同的底質會產生不同的音傳損耗，當聲波由海水入射至海床時，聲波的能量有些會傳過界面，有些能量會穿透，有些則會反射，因此不同底質的聲學性質對音傳會產生不同的影響。而側掃聲納利用後向散射能量之大小與影像的紋理在空間上的分布來辨識調查區域內之沉積物表層特性以及目標物之判釋，可應用在海床構造調查、尋找目標物、監測海底特殊物、水下考古 [Lafferty et al., 2006;]等。其作業原理是將音鼓放置於流線型載具兩側向海底釋放聲波，藉由海床之粗糙度(roughness)與海床表面底質所造成後向散射 (backscattering) 聲波能量強度的不同，依施測航線之時間序列記錄，經處理後即能得到海底地貌的資訊。

現今所廣泛使用的聲學儀器為變頻聲納海底地層剖面儀，不僅能提供當地沉積或侵蝕作用及沉積物傳送路徑等資訊，更可以直接反映當地的地形和沉積構造，呈現海床下地層剖面的細微變化，對於底泥的研究幫助很大而且被普遍的應用。變頻聲納的設計的特色是因為發射訊號的獨特性，兼顧了高頻和低頻外，就算受到其他低頻雜訊的干擾，也可以於訊號處理時，將具有同性質的訊號挑選出來，達到最大的訊雜比 (SNR; Signal to Noise Ratio)，可以產生高解析的底質剖面影像，還可以運用所記錄底泥的

反射係數做海底沉積物聲學分類辨識出目標海床的物理性質[LeBlanc et al., 1992a]。許多前人在聲納研究上已經也利用許多的實驗得到的數據，利用這些經驗公式歸納出許多海床的聲學反射性質和海床的物理特性的特徵的關係，包括孔隙率、密度和平均粒徑大小等等[Shumway, 1960; Fass, 1969; Hamilton, 1970; Hamilton, 1972; LeBlanc et al., 1980; Hamilton, 1982; LeBlanc et al., 1986; Schock et al., 1989; Schock et al., 1990; Leblanc et al., 1992a; LeBlanc et al., 1992b]。其估算底泥平均粒徑大小的主要原理是因為不同的底質會產生不同的音傳損耗，當聲波由海水入射至海床時，聲波的能量有些會穿透，有些則會反射，因此由各層底泥的反射波可估算出底泥的反射係數，進而根據經驗公式即可推斷出底泥的平均粒徑大小[LeBlanc, 1992a; 臧振華等，2011]。側掃聲納儀可迅速且有效的獲得大範圍調查區內海床表面之地貌、構造等特性之變化，搭配地層剖面儀的資料，將能夠提供額外資訊以供判斷底泥的性質。

本研究已於基隆河與淡水河口進行變頻聲納地層剖面儀與側掃聲納調查，並輔以現場底泥採樣。並利用測線上的聲學資料估算底泥之平均粒徑與底泥厚度（視該區域底泥分層厚度而定）來建構底泥空間分佈，此資訊可提供河川整治時所需移除的底泥量以及作業規劃。

第二章 研究目的

本研究專案之目的為發展聲學技術進行河川底泥物理性質（包括平均粒徑、孔隙率與厚度等）之遙測，以瞭解河川底泥的分佈情形。由於底泥顆粒吸附重金屬的多寡與底泥顆粒粒徑大小有密切關係，一般而言粒徑小的底泥容易吸附較多的重金屬；此資訊也可提供給水動力模式的參數建立，在受水動力影響下，模擬河川底泥的分佈情形，找出底泥聚集處，或是該處底泥會被自然沖刷走，無需進行整治；或是因吸附在底泥顆粒上的污染物，與孔隙水發生交換後，或底泥顆粒再懸浮於水體中，向河流釋放污染物，形成二次污染；底泥厚度將可用來評估底泥整治工程進行需移除的底泥量。為能夠快速的了解底泥粒徑大小，本研究以聲學遙測方法，進行大範圍海床底泥的平均粒徑大小調查，以快速篩選出重金屬污染的高危險區域，並根據聲學方法所得結果，配合其他領域進行分析（如粒徑小表示容易吸附較多的重金屬），以決定各河川的整治優先順序，並由底泥的分佈情形，選用適當的底泥挖泥疏浚工具，再根據該區域底泥之厚度，乘上該區域之面積，可進行底泥整治工程進行需移除底泥量的估算。本研究以淡水河與基隆河交接處的關渡河口進行先行性的試驗場址，將聲學遙測結果與現場採樣結果進行比較，以評估聲學遙測方法於臺灣河川底泥識別之可行性，並建立聲學調查方法之作業流程，以應用於未來模場試驗場址。

一般海床底泥的調查方法有以下三種：

1. 水下攝像：利用光學儀器的水下觀測系統（如底拖照相/即時影像觀測系統、ROV、AUV 等），來進行水下攝影或拍照，直接得到海床表面之影像、型態等資訊。
2. 樣本採樣：利用採樣儀器設備（如抓斗式採泥器、活塞岩心採樣器、箱型岩心採樣器、重力岩心採樣器等）來蒐集採樣樣本，回實驗室進行顆粒分析、化學分析得到底質的物化性質資訊。
3. 聲學分析：利用聲納系統發出的聲波至海床後回傳所接收到的聲學訊號，根據訊號能量的強弱以及影像的紋理來辨識底質的種類。

其中，水下攝像和底泥樣本採樣所花費的時間、金錢和人力都較多，因為海上作業的關係，不但調查速率緩慢且不穩定，並且僅能定點式進行調查，不利於大範圍的海域調查；其優點是能依照所得到的採樣樣本或攝像影像所顯示的資訊，準確地辨識出底泥種類。聲學分析方法可以用拖行的方式

隨著航線作業，不斷地採集資料，且探測範圍較廣，能進行線狀或面狀的全面性探測，在短時間內完成大範圍海域調查。與水下攝像和底泥樣本採樣相較下，聲學遙測方法有較高之探勘效率，可於較短時間內提供河川底泥空間分佈，以提供底泥整治位置的優先順序之參考。

第三章 文獻探討

國內針對底泥聲學性質的研究，一開始早期有臺大海洋所陳民本老師針對臺灣海域的沉積物取樣，去量取沉積物之聲學性質 [Chen et al, 1988]。之後俞何興、洪奕星和劉家瑄分別利用 3.5 kHz 聲納反射資料以回聲特徵或頻譜比對法去探討海床底質聲學參數或環境分類[任國治, 1994]。利用聲學資料推估地聲參數的研究方法，是海洋聲學很重要的應用研究，本專案主持人於攻讀博士學位期間以水下訊號處理及其在地聲性質之反算為探討主題，利用亞洲國際聲學實驗 (ASIAEX) 在東海所進行地聲反算實驗之資料，分析海床底泥聲學性質。從貝氏學派之統計分析法 (Bayesian statistics)，嚴謹地探討在反算問題中有關量測資料與地聲模式之不確定性，對反算地聲參數準確度的影響[Huang, 2004, 2006a, 2006b]。再者，用反算結果所得之地聲資訊，作成最佳的傳遞損失預測，進行聲納效能評估。另，臺大工科學和海洋工程所也有關於地音參數反算的研究，考慮在海洋的聲音傳播接觸海床時，會由海床的物理特性產生各種物理機制，例如散射、反射及吸收等。然而，造成這些機制是因海床內部的特性所造成，像是速度、密度及吸收率等特性。由於底質採樣的不便利性。近期也有研究使用臺大海研所所擁有的變頻聲納 EdgeTech SB-0512i 地層剖面儀系統於臺灣東北海域進行探測，並利用蒐集之資料配合 Hamilton 經驗公式進行底質地音參數反算[蔡明格, 2011]。但整體來說，國內討論使用變頻聲納來探討反射係數和底泥粒徑大小的研究較少見，且大部份的應用均為大洋。

國外學者 Baldwin (1985)利用 3.5 kHz 聲納數位資料做頻譜分析，著重在訊號頻率分析的部分，再與岩心資料所得的孔隙率、顆粒粒徑大小、阻抗等數據比對，推估其反射係數和衰減係數，結果發現有反射訊號出現的區域基本上是聲波阻抗較高的區域，同時擁有較低的孔隙率以及較大的平均粒徑。Davis 等(1996)使用側掃聲納的後向散射訊號進行分析，將側掃聲納後向散射強度資料與平均粒徑、碳酸鹽的表層沉積物樣本比較，發現相對後向散射訊號強度與沉積物粒徑大小及成分有關；在與測區的採樣資料比對後，得到平均粒徑、碳酸鹽沉積物含量和散射訊號強度有關，顯示淘選度以及粒徑大小是影響判定沉積物的主要因素。近年來，Schock (2004)利用變頻聲納在大洋南海地區所量測到的反射回訊資料，透過聲學反射係數與底泥性質的關係，藉由 Biot 模式提供了估算底泥物理性質的基礎。由 Biot 模式所得到底泥物理性質（如滲透性、孔隙率等），經由 Kozeny-

Carman 關係式可計算得到底泥的粒徑大小。在 1992 年，LeBlanc 等人則提出了底泥物理性質與聲學參數的關係數，透過底泥反射係數與孔隙率關係式，以及孔隙率與底泥粒徑關係，可以快速的從地層剖面儀量測的反射係數計算出底泥的種類與分布情形。在其研究進行量測 9 個測站中，由變頻聲納地層剖面儀所量測的孔隙度與實際採樣所得孔隙度，兩者數值相近；以聲學資料估算的海床聲阻抗值與採樣樣本量測的結果也一致，如表 1 所列，是本研究理論建立主要的參考文獻之一。

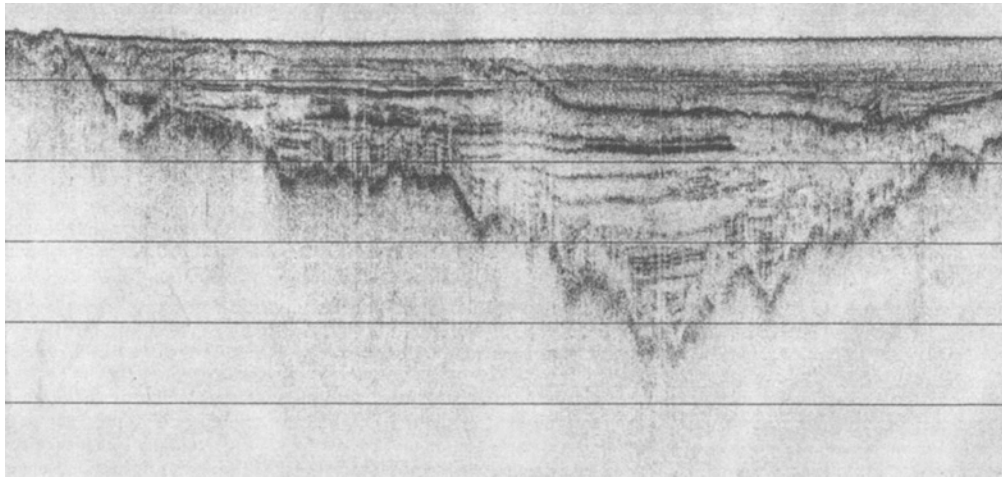


圖 1 典型地層剖面儀資料 [LeBlanc, 1992a]

表 1 由地層剖面儀聲學資料估算底泥性質與現場底泥採樣之比較

Station # (sediment)	Density (bulk) (kg/m ³)	Density (grain) (kg/m ³)	Porosity		Velocity (m/s)	Impedance	
			(core)	(chirp) [Eq. (8)]		(core) (10 ⁶ kg/m ² s)	(chirp)
1 Silt	1630	2800	0.67	0.66	1466	2.39	2.39
2 Silt	1420	2670	0.76	N/A	1458	2.07	N/A*
3 Sand	2040	2680	0.40	N/A	1720	3.51	N/A*
4 Silt	1540	2640	0.69	0.68	1472	2.27	2.32
5 Sand	2030	2690	0.41	0.39	1645	3.34	3.48
6 Sandy silt	1660	2680	0.63	0.58	1494	2.48	2.64
7 Sand	2080	2710	0.39	0.38	1703	3.54	3.54 ^b
8 Sand	2000	2660	0.42	0.39	1679	3.36	3.48
9 Silt	1540	2640	0.69	0.45	1424	2.19	3.17

* Data lost at this site.

^b Calibration site.

資料來源：LeBlanc, 1992a

除了用在理論公式的建立之外，地層剖面儀也能用在實際河川探測的應用上。在實際應用方面，Nitsche 等人在 1998 年至 2003 年之間，於 Hudson River 進行了多次的地層剖面儀、側掃聲納、多音束測深儀等聲學遙測儀器的收集資料。依照側掃聲納所接收到的後向散射強度，搭配地層剖面儀的地層資訊，以及說音束測深儀的地形資料，分辨出河川侵蝕區以及沉積區的地區 [Nitsche, 2004]。其所使用的變頻地層剖面儀系統為

EdgeTech SB-424 型，使用頻率為 4~16 kHz，以提供海床沉積物的結構。所使用的側掃聲納是 EdgeTech DF-1000 型，其主要頻率在 100 kHz 及 384 kHz，根據沉積物的密度，兩種頻率所探測的深度不同，分別是 1~3 cm 與 0.2~1 cm。所使用的多音束測深儀是使用 Simrad EM-3000 淺海型，以提供更詳細的地形資料。除了聲學儀器外，一共採取了超過 500 個底泥樣本，並採集超過 300 支岩心資料。所採取的樣本經過晾乾、稱重後，以 63 μ m 的篩子進行分離，透過 Sedigraph 系統以 X-ray 進行粒徑分析。

由地層剖面儀收集的底泥反射回訊資料，搭配側掃聲納收集的後向散射能量資料，以及現場底泥採樣分析結果，得到 Hudson River 河口區域的底泥分布情形，如圖 2。圖中圓餅圖是現場採樣經粒徑分析的結果，以灰階數值 0~255 表示側掃聲納所接收的能量強度，黑色表示後向散射強度最大（灰階值為 0），而白色表示後向散射強度為零（灰階值 255）。此區段潮汐為半日潮，流速約 0.5 m/s。由現場採樣結果顯示，此河段的底泥以泥沙、粘土為主，根據 Wentworth 的分類 [Wentworth, 1922]，其平均粒徑 Φ 值落在 6~6.5 附近，關於 Φ 值的定義，將於第四章詳加說明。在河道縮窄的兩旁，例如在 Montrose 採樣點，該處的河床有些許的砂礫。若僅使用側掃聲納，將無法詳細分辨河床的底泥形式。但是，若能搭配地層剖面儀與多音束測深儀，將能提供更多的海底底質細節，進而能夠更完整的了解底泥種類與運動方式。

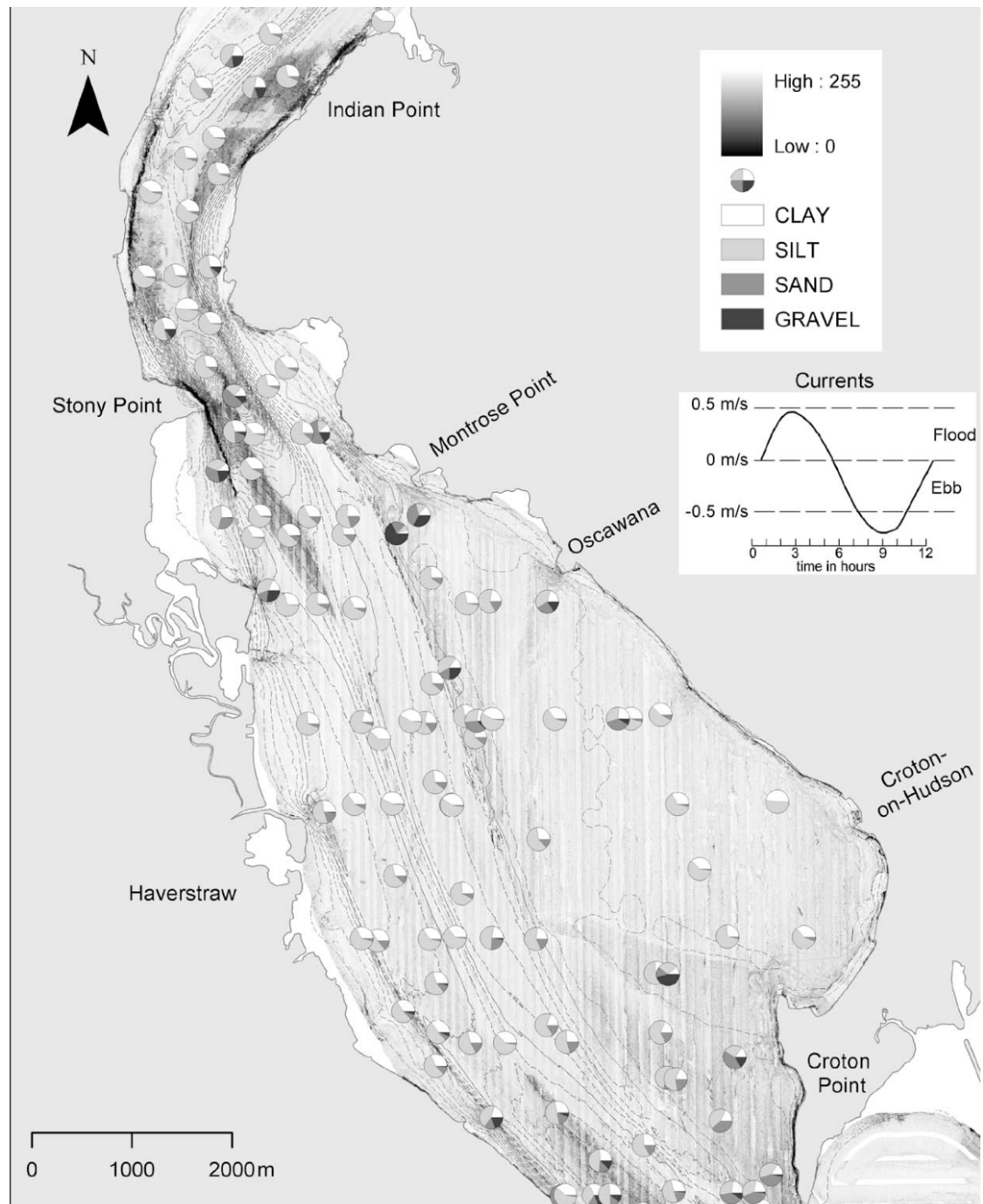


圖 2 側掃聲納收集底泥後向散射強度（以 256 階灰階影像表示）與現場採樣粒徑分析結果 [Nitsche, 2004]

由側掃聲納收集的聲學資料，搭配現場採樣分析結果，可以得到灰階數值相對應的底泥平均粒徑大小，如圖 3 所示。

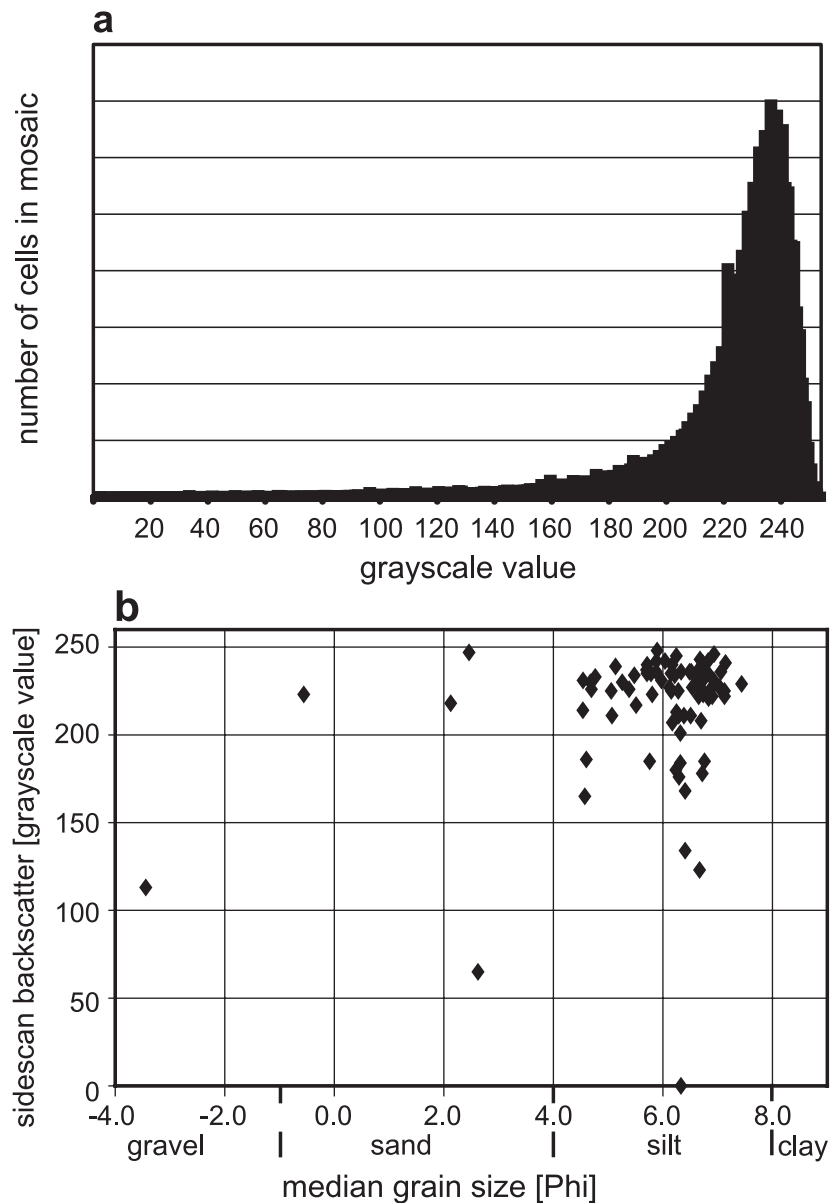


圖 3 (a) 側掃聲納後向散射強度（以 256 階灰階影像表之）統計；(b) 灰階值與底泥中數粒徑大小對應圖[Nitsche, 2004]

利用這些聲學資料，從側掃聲納獲得的河床地貌，以地層剖面儀收集底層底泥沉積狀況與底泥性質，用多音束測深儀建立河床地形，繪出 Hudson River 河床的底泥運動情形。收集的聲學資料經判讀後，根據海床粗糙度的不同，依側掃聲納的回訊強度可將探測區域分為三大類，分別是 (1) 粗糙度較低，後向散射較弱的沉積區；(2) 粗糙度較高，後向散射較強的侵蝕區；(3) 地貌呈現波動狀的動態區。搭配地層剖面儀的資料，可細分

為共 8 種型態，分別是：在沉積區依據底層厚度分為厚、薄、未定區（無資料）；在侵蝕區可分為沖刷、岩床、截斷與非沉積區，如圖 4 所示，8 種顏色分別表示此河域的底泥運動型態，可看出在河道中央部分大多是沉積區，而河道兩側多為侵蝕區。此研究是本計劃實際採樣規劃主要的參考文獻之一。本研究除了使用變頻聲納地層剖面儀當做主要聲學遙測儀器之外，將搭配側掃聲納進行河川地貌的資料收集，以期能夠在取得臺灣河川地區的底泥分布情形的同時，也能夠了解河川底泥的沉積與侵蝕區段。

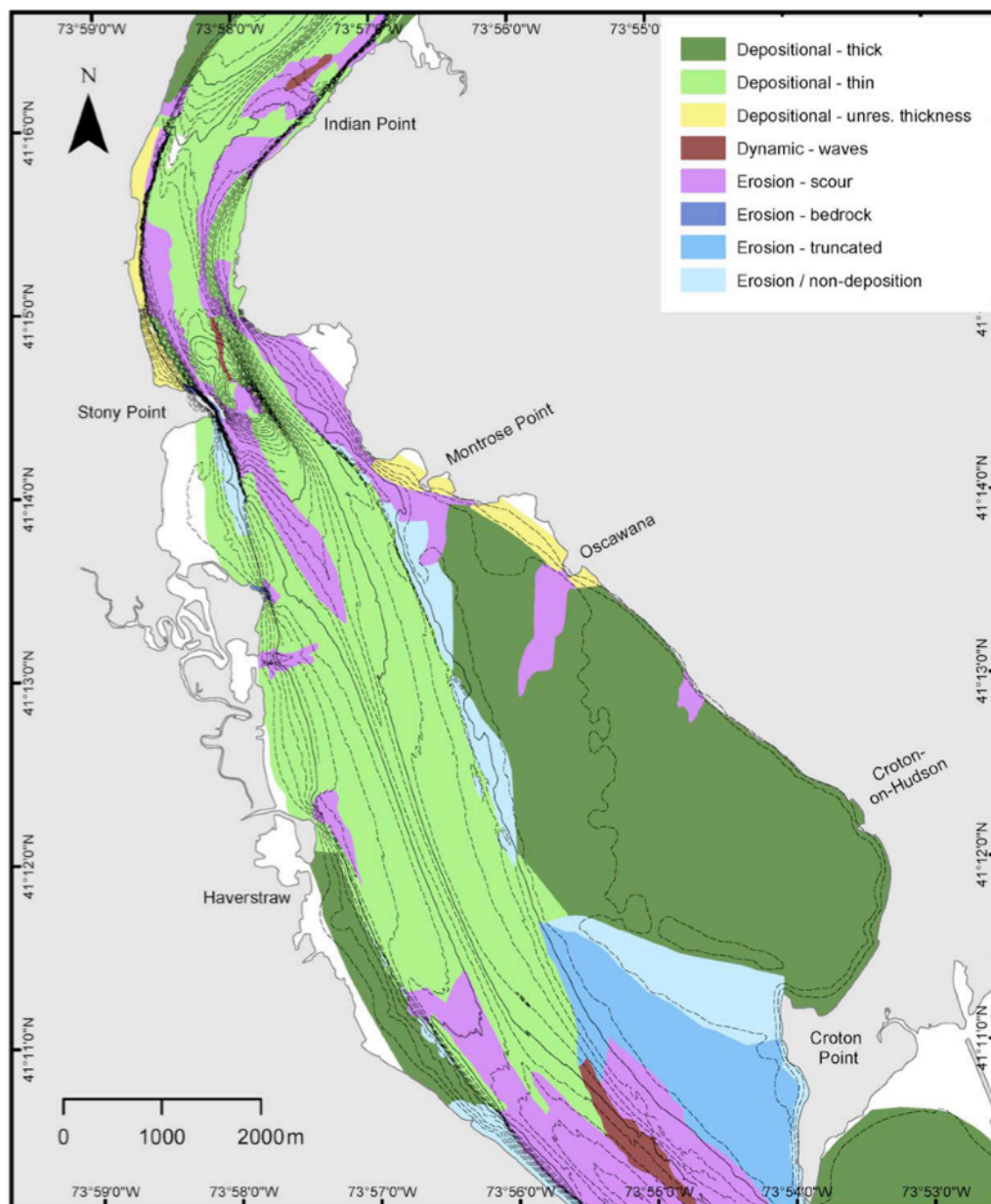


圖 4 透過聲學資料以及現場採樣，分辨出底泥在各個區段的沉積狀況。依照沉積、侵蝕狀況不同，共分為 8 種型態[Nitsche, 2004]

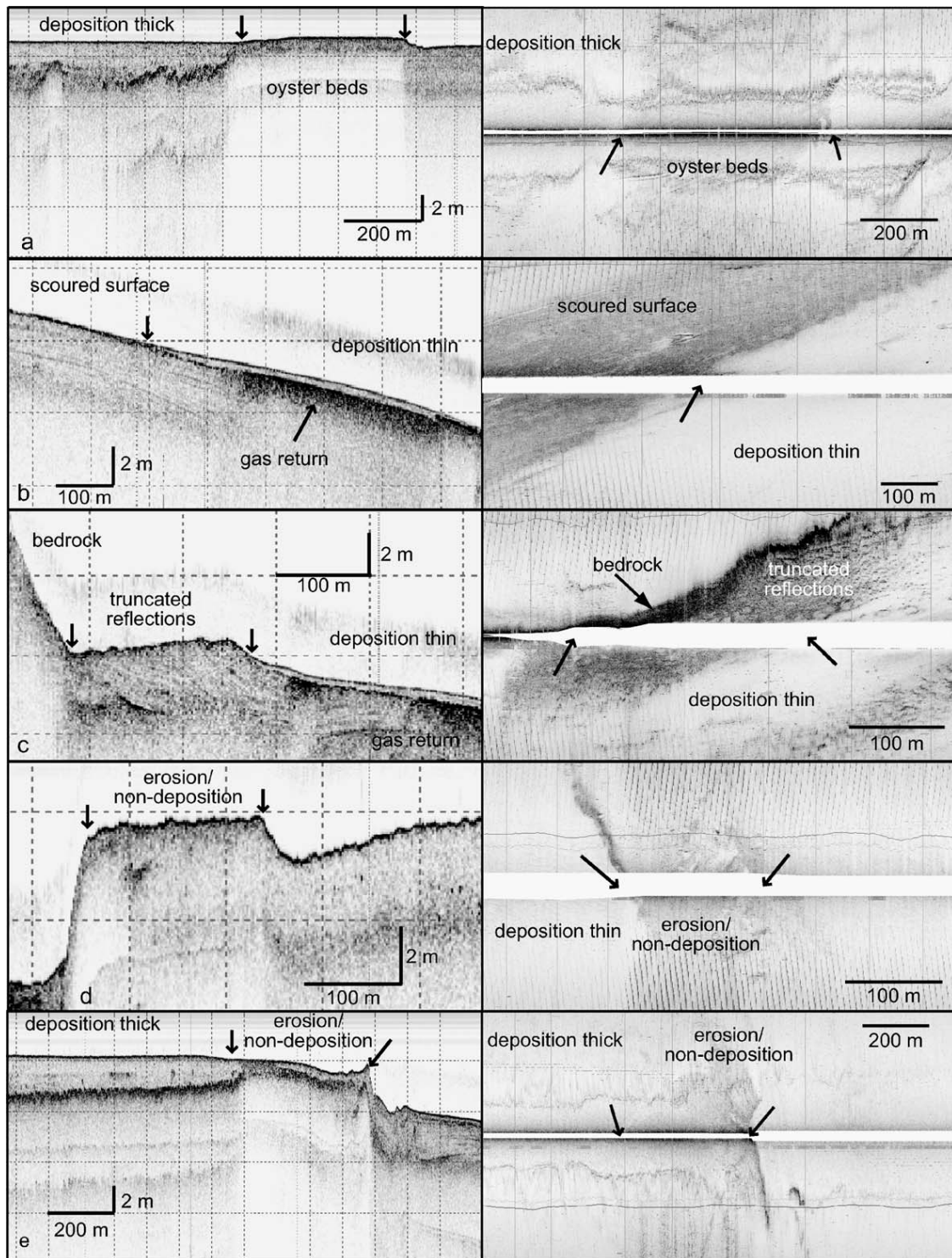


圖 5 (左) 地層剖面儀與 (右) 側掃聲納收集資料；根據收集的聲波回訊資料，將底泥分為(a)厚沉積區；(b)冲刷區與淺沉積區；(c)由左至右分別是岩床區、截斷區以及淺沉積區；(d) 侵蝕非沉積區；(e)厚沉積區與侵蝕非沉積區 [Nitsche, 2004]

第四章 研究方法與過程

本研究主要是使用變頻聲納地層剖面儀進行調查，由來自地層之聲學回訊估算底泥厚度與海床反射係數以獲得底泥物理性質。變頻聲納地層剖面儀是專門觀察海底地層剖面現況的一種儀器，運用高解析度地層剖面儀進行底床淺層反射震測。主要功能是海底地層組織結構描繪，海底掩埋物探測，並對震測資料予於處理、解釋、繪圖，藉以了解地層特性與層化之現象與分佈。為提高聲學儀器對海床的探測能力，一般所使用的地層剖面儀以拖曳式為主，在安全範圍內儘量接近海床進行底泥調查。

地層剖面儀的顯像原理（見圖 6）是利用聲波在海床下岩層中傳遞時，因介質不同，其聲阻抗變化，使得部分能量反射回來，經由接收器接收後，再由轉換器轉換成電子訊號，而訊號經繪圖機畫成圖像。雖然儀器只能收集正下方一定範圍的地層訊號，但如果適當安排施測的航線，即可推知整個探測區域內海床下地層的連續分佈情況。

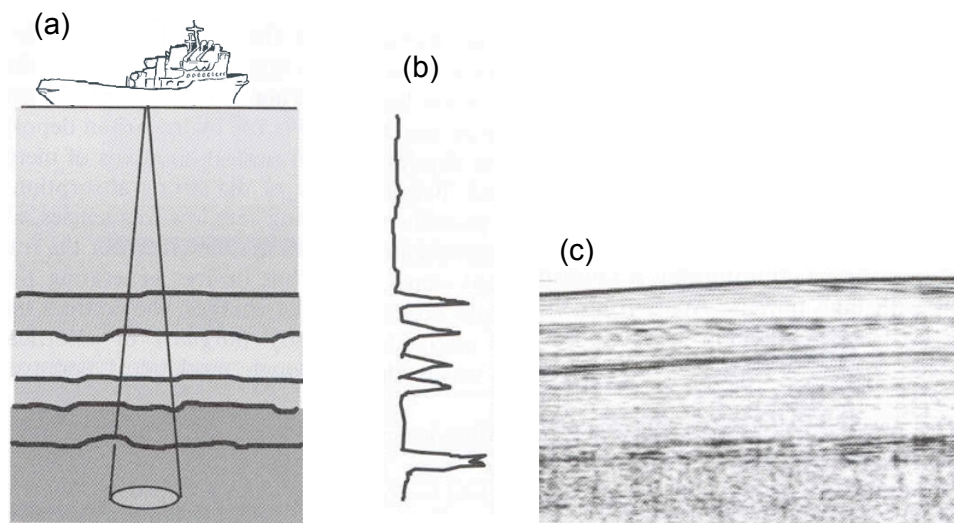


圖 6 地層剖面儀之探測原理，以船載式地層剖面儀為例說明：(a) 聲能轉換器產生之高能量聲波，透過水層入射至海床下地層；(b) 若地層之聲波阻抗值（聲速與密度之乘積）有明顯差異時，部分聲能在此地層不連續面發生正向反射返回接收器，另一部分聲能繼續向深層傳播，來自不同深度之回訊因傳播距離不同而依序紀錄於接收器上；(c) 沿航線下之地層剖面：將航線上不同位置之聲波發射後接收器所得訊號並排依序繪出 [Lurton, 2010]

4.1 變頻聲納於底泥厚度之解析度

地層剖面儀其主要的功能是提供高解析度底床淺層沉積物垂直面（剖面）資訊，同時可進行底床地層剖面層化分析。聲納在垂直向解析度可從時間與空間的關係來看，聲納在某一時刻所接收到的回波對應空間中的一目標物，如圖 7 所示。若脈沖寬度為 T ，聲速為 c ，在時間 $t=0$ 時發射。於 $t=t_0$ 時，接收到距離 $ct_0=2$ 的第一個目標物脈衝回波訊號前緣。於 $t=t_0+T$ 時，距離 $c(t_0+T)/2$ 處的第二個目標物脈衝回波訊號也回到接收器。為了明確區分兩個目標物的回訊，兩個目標物之間必須有超過 $cT/2$ 的距離差。因此，其最小可分辨的距離為

$$\delta z = \frac{cT}{2} \quad (1)$$

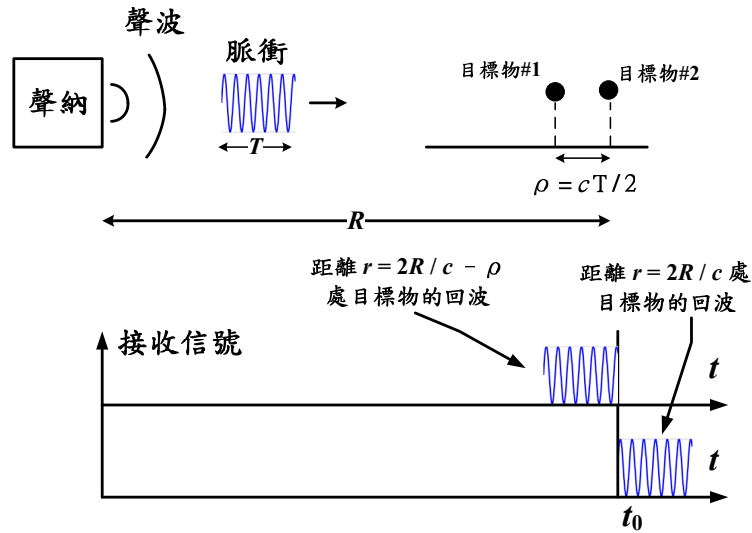


圖 7 聲納垂直向解析度示意圖

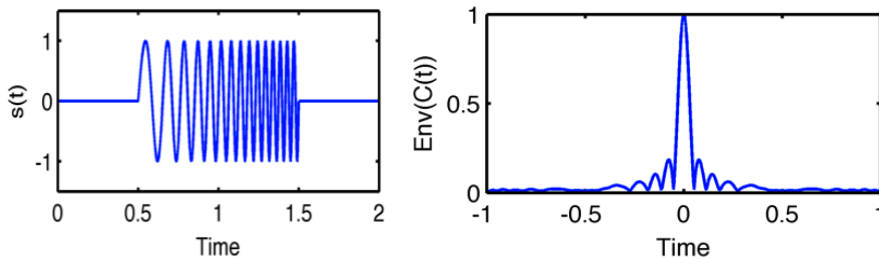


圖 8 原始線性調頻信號（左）與經匹配濾波處理後信號（右）

變頻聲納地層剖面儀發射線性頻率調變訊號，藉由脈衝壓縮技術（如圖 8 所示）壓縮脈沖寬度，以提高垂直向解析度，假設頻帶寬度為 BW

(可得其脈衝寬度為 $T=1/BW$)，垂直向解析度由聲納信號的頻帶寬度或脈衝寬度決定，即

$$\delta z = \frac{c}{2BW} \quad (2)$$

由上式可知，若有較大的頻帶寬度或較小的脈衝寬度則具有較好的距離向分辨力。脈衝壓縮乃針對寬頻訊號設計而成的，其可使發射波形頻寬和波形的時間寬度解耦合，從而使這兩個參數可以獨立進行。因此使用脈衝壓縮技術，可採用較大的頻寬提升垂直向分辨力；並可使用較長的時間寬度獲得較大功率，使聲納探測距離增長。

4.1.1 底泥厚度修正：P 波速度量測

由於地層剖面儀測量底泥厚度的原理是藉由聲波傳播至明顯聲阻抗變化之界面，所產成回波訊號的時間延時進行厚度估算，而非直接量測深度。因此本研究將輔以現場箱型岩芯的採樣，量測聲波在沉積物的 P 波速度，以轉換時間延時成為深度。

4.2 Hamilton 經驗公式法

4.2.1 底泥平均粒徑與孔隙度之關係

一般而言，底泥的平均粒徑大小 (d) 以 Wentworth 的分類表示，如表 3，其定義底泥的平均粒徑大小以 Φ 表示，計算方式為資料來源 [Wentworth, 1922]：

$$\Phi = -\log_2 d \quad (3)$$

在此分類底下， Φ 值可介於 -8 至 10 之間；當 $8 < \Phi \leq 10$ 時，歸類於粘土，當 $4 < \Phi \leq 8$ 時，歸類於淤泥，當中可細分為粗泥、淤泥、細泥、極細泥；當 $-1 < \Phi \leq 4$ 時，歸類為砂，其中又可細分成極粗砂、粗砂、砂、細砂、極細砂等。一般而言，底泥的種類介於砂到粘土之間 ($1 \leq \Phi \leq 9$)。

Hamilton 在 1970 至 1971 年的研究利用大量的太平洋底泥樣本，分析所得底泥物理性質如表 2 所示，並建立底泥物理性質的關係式。根據其所取得的資料，底泥的平均粒徑與底泥孔隙度 (n ; porosity) 存在一相關性，可以式(4)表之，以此經驗公式所計算的底泥粒徑大小誤差在 1Φ 之內 [Hamilton, 1971]：

$$n = 31.05 + 5.52\Phi, \quad (1 \leq \Phi \leq 9) \quad (4)$$

由於底泥的平均粒徑與孔隙度之間的關係相當複雜。理論上，在均質底泥層中，底泥的孔隙度與粒徑大小的關係應為一致，但在實際上，當顆粒大小變小，其顆粒間摩擦力、黏滯性會增加，因此平均粒徑與孔隙度之間的關係相當複雜。根據 Hamilton 於 1970 年的報告利用聲波正向反射回訊資料，見表 4，聲學遙測方法雖有其誤差（小於一單位粒徑值 Φ 的誤差），但應可辨識出不同底質種類。

由於 Hamilton 的經驗公式是以海洋沉積物資料所建立，與臺灣河川有所不同，本研究將根據此經驗公式模型【式(4)】，找出臺灣河川底泥的孔隙度，並以現場採樣的分析結果作為修正，以建立適用臺灣河川環境的經驗公式。

表 2 Hamilton 在 1971 年於太平洋所量測的底泥物理性質

Sediment Type	Measured*			Computed			
	n , per cent	ρ , g/cm ³	V_p , m/sec	κ , dynes/cm ² $\times 10^{10}$	σ	μ , dynes/cm ² $\times 10^{10}$	V_s , m/sec
<i>Continental terrace (shelf and slope)</i>							
Sand							
Coarse	38.6	2.03	1836	6.6859	0.491	0.1289	250
Fine	43.9	1.98	1742	5.6877	0.469	0.3212	382
Very fine	47.4	1.91	1711	5.1182	0.453	0.5035	503
Silty sand	52.8	1.83	1677	4.6812	0.457	0.3926	457
Sandy silt	68.3	1.56	1552	3.4152	0.461	0.2809	379
Sand-silt-clay	67.5	1.58	1578	3.5781	0.463	0.2731	409
Clayey silt	75.0	1.43	1535	3.1720	0.478	0.1427	364
Silty clay	76.0	1.42	1519	3.1476	0.480	0.1323	287
<i>Abyssal plain (turbidite)</i>							
Clayey silt	78.6	1.38	1535	3.0561	0.477	0.1435	312
Silty clay	85.8	1.24	1521	2.7772	0.486	0.0773	240
Clay	85.8	1.26	1505	2.7805	0.491	0.0483	196
<i>Abyssal hill (pelagic)</i>							
Clayey silt	76.4	1.41	1531	3.1213	0.478	0.1408	312
Silty clay	79.4	1.37	1507	3.0316	0.487	0.0795	232
Clay	77.5	1.42	1491	3.0781	0.491	0.0544	195

n , porosity; ρ , bulk saturated density; V_p , compressional-wave velocity; κ , bulk modulus (see text); σ , Poisson's ratio (equation 9); μ , rigidity (shear modulus, see equation 8); V_s , shear-wave velocity (equation 6).

* At 23°C, 1 atm; for other properties see Hamilton [1970a].

資料來源：[Hamilton, 1971]

表 3 Wentworth 底泥分類表

Φ	PHI - mm CONVERSION $\Phi = \log_2 (d \text{ in mm})$ $1 \mu\text{m} = 0.001\text{mm}$	Fractional mm and Decimal inches	SIZE TERMS (modified from Wentworth, 1929)	SIEVE SIZES		Intermediate diameters of natural grains equivalent to sieve size	Number of grains per mg		Settling Velocity (Quartz, 20°C)		Threshold Velocity for traction cm/sec	
				ASTM No. (U.S. Standard)	Tyler Mesh No.		Quartz spheres	Natural sand	Spheres (Gibbs, 1971) Crushed (Ruby)		(Nevin, 1946)	(modified from Hjulstrom, 1939)
-8	256	10.1"	BOULDERS									
-7	128	5.04"	COBBLES								200	in flow of 1m depth
-6	64.0	2.52"		2 1/2"	2"							
-5	53.9		very coarse	2.12"								
-4	45.3			1 1/2"	1 1/2"							
-3	33.1	1.26"		1 1/4"	1.05"							
-2	32.0		coarse	1.06"								
-1	26.9			3/4"	.742"							
0	22.6	0.63"		5/8"	.525"							
1	17.0		medium	7/16"	.371"							
2	16.0			3/8"	.265"							
3	13.4	0.32"		5/16"								
4	11.3		fine	4	4							
5	9.52	0.16"		5	5							
6	8.00		very fine (granules)	6	6							
7	6.73			7	7							
8	5.66	0.08"		8	8							
9	4.76		very coarse	10	10							
10	4.00			12	12							
11	3.36	1		14	14							
12	2.83		coarse	16	16							
13	2.38			18	18							
14	2.00			20	20							
15	1.63		medium	25	24							
16	1.41			30	28							
17	1.19			35	32							
18	1.00		fine	40	35							
19	.840	1/2		45	42							
20	.707			50	48							
21	.545		very fine	60	65							
22	.500			70	80							
23	.420	1/4		80	100							
24	.354		coarse	100	115							
25	.297			120	150							
26	.250			140	170							
27	.210		medium	170	200							
28	.177			200	250							
29	.149	1/8		230	270							
30	.125		fine	270	325							
31	.105			325	400							
32	.088		very fine									
33	.074	1/16										
34	.062											
35	.053		coarse									
36	.044											
37	.037	1/32										
38	.031		medium									
39												
40	.016	1/64										
41			fine									
42	.008	1/128										
43			very fine									
44	.004	1/256										
45	.003		Clay/Silt boundary for mineral analysis									
46	.002	1/512										
47	.001	1/1024										

資料來源：Wentworth, 1922

表 4 大陸棚區上不同沉積物的聲阻抗與其正向反射係數與反射損失大小【修改自 Hamilton (1970)與 Lurton (2010)】

Sediment Type	Φ	ρc		R		BL (dB)	
		mean	std	mean	std	mean	std
Sand							
Coarse	1	3.7347	-	0.4098	-	7.8	-
Fine	2	3.4433	0.04	0.3749	0.005	8.6	0.12
Very fine	3	3.2645	-	0.3517	-	9.1	-
Silty sand	4	3.0633	0.05	0.3228	0.008	9.9	0.2
Sandy silt	5	2.4201	-	0.2136	-	13.5	-
Sand-silt-clay	6	2.4939	0.059	0.2504	0.01	12.1	0.36
Clayey silt	7	2.1989	0.026	0.1767	0.012	15.2	0.66
Silty clay	8	2.1571	0.024	0.1586	0.005	16.1	0.29

ρc = 沉積物聲阻抗， $\text{g} \cdot \text{m}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec} \times 10^3$

R = 正向反射係數值

BL = 正向反射係數損失，dB

mean = 平均值；std = 標準差

4.2.2 底泥孔隙度與正向反射係數之關係

孔隙度為混合物中空隙體積與整體體積的比值，在水中，空隙的部份會被水填充，因此可寫成[LeBlanc, 1992a]：

$$n = \frac{\rho_g - \rho_w}{\rho_g - \rho_b} \quad (5)$$

其中 ρ_b 是底泥的體積密度， ρ_w 是底水的密度， ρ_g 是底泥中的顆粒密度， n 是底泥的孔隙率。

對於在彈性介質中可壓縮波的波速，可以下式表之：

$$c_b = \left(\frac{1/\beta_b + 4\mu/3}{\rho_b} \right)^{1/2} \quad (6)$$

其中 β_b 是底泥在含水情況下的體積壓縮性， μ 是剛性模數，在微小壓力擾動下，體積壓縮性與孔隙度成線性關係。

在絕熱過程中，介質的體積壓縮性被定義為在壓力改變下，其單位體積的改變量：

$$\beta_b = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (7)$$

在含水的情況下，底泥的體積壓縮性可以分解成底泥內部各介質的線性組合，也就是：

$$\beta_b = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = -\left(\frac{V_w}{V} \left(\frac{1}{V_w} \frac{\partial V_w}{\partial p} \right) + \frac{V_g}{V} \left(\frac{1}{V_g} \frac{\partial V_g}{\partial p} \right) \right) = -(\beta_w n + \beta_g (1-n)) \quad (8)$$

其中 β_w 是底水的壓縮性， β_g 是底泥中顆粒部分的壓縮性。因此，底泥的聲學阻抗可藉由上述式子整理後得到：

$$Z_b = \rho_b c_b = Z_w \left(\frac{n + \rho_R (1-n)}{n + \beta_R (1-n)} + \frac{4}{3} \mu \beta_w [n + \rho_R (1-n)] \right) \quad (9)$$

式中 $\rho_R = \rho_g / \rho_w$ ，是底泥的顆粒密度與水密度比，其值大約是 2~3，其中底水密度是 1025 kg/m³；式中 $\beta_R = \beta_g / \beta_w$ 是底泥的顆粒壓縮性與底水壓縮性的比值，其值介於 0~1，其中底水壓縮性根據文獻，大約是 $42.94 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ；式中 $Z_w = (\rho_w / \beta_w)^{1/2}$ 是底水的聲學阻抗，其值約 $1.549 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ；以上所描述的 ρ_g , ρ_w , β_g , β_w 參數值是建立在 1 大氣壓下，溫度是 23°C 的環境下所量測到的數據 [Hamilton et al., 1956]。因此，底泥的聲速經上述式子整理後可得：

$$c_b = c_w \left(\frac{1}{\left[n + \beta_R (1-n) \right] \left[n + \rho_R (1-n) \right]} + \frac{4/3 \mu \beta_w}{\left[n + \rho_R (1-n) \right]} \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中底水的聲速為 $c_w = \sqrt{1/\beta_w \rho_w}$ ，其值約為 1504 m/s。

式(9)與式(10)連結了孔隙度、剛性模數與聲阻抗值以及聲速之間的關係。在一個已知的環境下，它假設了 ρ_R , β_R 幾乎是個常數，因此在表底層中，孔隙度與剛體模數為計算聲阻抗值的主要因子。在此假設剛性模數為：

$$\mu = \mu_0 (\rho_b / \rho_w - 1)^\eta \quad (11)$$

其中是 μ_0 剛性係數，取決於沉積環境，其值大約是 $5 \times 10^{15} \text{ N/m}^2$ ；而式中的 $(\rho_b / \rho_w - 1)$ 表示在單位體積的底泥中剛性體（顆粒）的量值； η 是任意指數能量常數，其值約為 1。

接著透過底泥的反射係數與聲學阻抗的關係式：

$$R = \frac{Z_b - Z_w}{Z_b + Z_w} \quad (12)$$

若能取得反射係數，便能反推回底泥的孔隙率。Faas 用四組不同的密度與聲速資料，用最小平方擬合法，找出了反射係數與孔隙率的經驗公式[Faas, 1969]：

$$R = 0.6468 - 0.6456n, \quad (0.35 \leq n \leq 0.85) \quad (13)$$

根據不同的堆積環境，經驗公式的係數需要經過校正。Hamilton 根據其在太平洋上採集大量的樣本，經過實驗分析的數據與現場量測的數據整理後，總結出典型海底沉積物的性質，如表 2。Hamilton 將海床分為三種不同的堆積型態，分別是大陸棚、深海丘陵與深海平原，根據三種不同的堆積環境整理了三種經驗公式，分別如下[Hamilton, 1971]：

$$R = 0.6692 - 0.666n; \text{大陸棚} \quad (14)$$

$$R = 0.6199 - 0.607n; \text{深海丘陵} \quad (15)$$

$$R = 0.6461 - 0.646n; \text{深海平原} \quad (16)$$

根據前人整理的經驗公式，我們可由地層剖面儀取得反射係數資料後，透過經驗公式快速的計算出底泥的孔隙度，接著根據孔隙度與底泥平均粒徑大小關係式得到底泥粒徑資訊。由於文獻建立之經驗公式乃適用於大洋的環境，本計劃將採集臺灣河川的底泥樣本，需修正經驗公式的係數，以找出適用於臺灣水文環境下的經驗公式。

4.3 Biot 模式法

除了由反射係數與孔隙度的經驗公式求得孔隙度之外，Schock 提出使用 Biot 模式經由疊代的方式，找出反射係數與孔隙度的關係式[Schock, 2004]；透過 Kozeny-Carmon 方程式描述底泥的平均粒徑大小(d)與底泥孔隙度(n)及滲透性(κ , permeability)具有相關性[Hovem, 1979]：

$$\kappa = \frac{d^2 n^3}{36K(1-n)^2} \quad (17)$$

其中 K 為權重係數。若底泥粒徑多呈現圓管狀，則 $K=2$ ；當粒徑大多呈現球狀，則 $K=5$ 。

根據 Schock 研究[Schock, 2004]，使用 Biot 模式找出平均粒徑大小的計算流程如圖 9 所示：

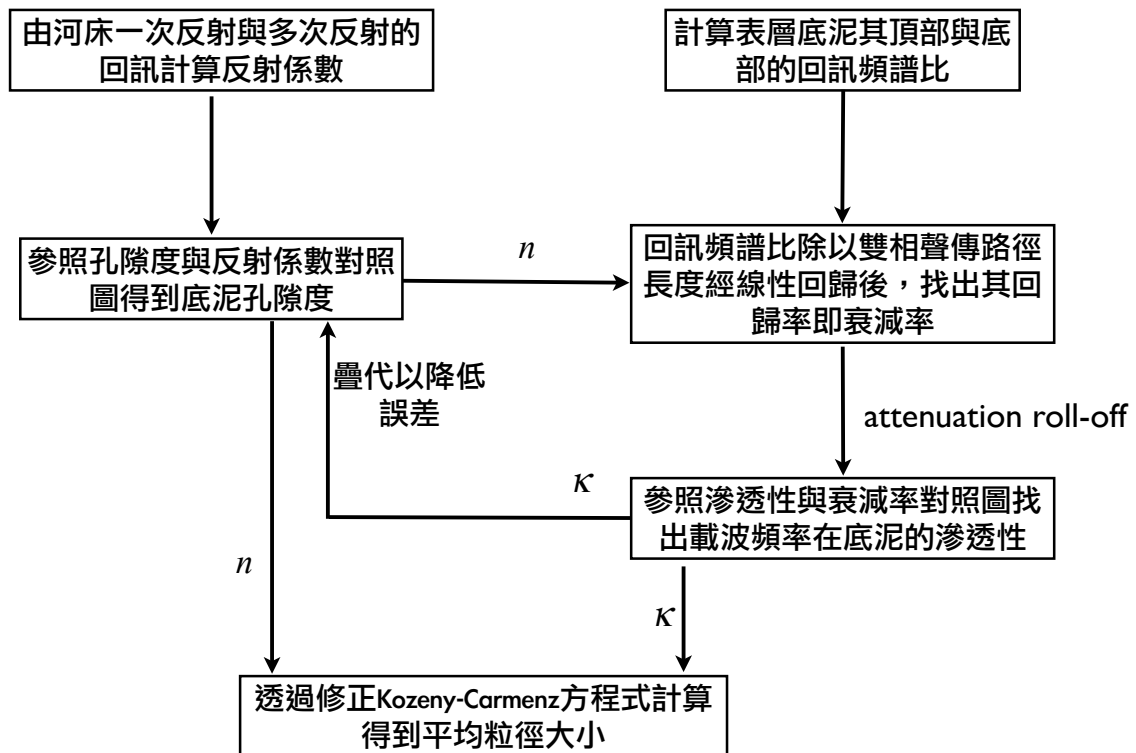


圖 9 平均粒徑大小計算流程圖。 n 是底泥的孔隙度， κ 是底泥的滲透性

首先，由地層剖面儀所得到的底泥表面反射係數，參照 Biot 模式計算得到的孔隙度與反射係數對照圖（如圖 10，當反射係數為 -9 dB 時，其相對應的孔隙度為 0.389 [Schock, 2004]），以得到初始的孔隙度；

因不同沉積物的聲學性質（聲阻抗）不同將產生明顯分層，此分層將導致各界面的反射係數差異，由聲波回訊資料即可找出河床表層與次表層的位置，並找出底下次表層的反射係數。透過河床表面以及河床次表層的回訊頻譜比 (spectral ratio)，除以聲波在河床表層傳遞的雙向路徑長度，一般而言是兩倍的表層底泥厚度，透過線性迴歸可找出衰減率隨頻率的變化（斜率），即為表層底泥對於不同發射頻率的衰減率 (attenuation roll-off)，其單位表示為 dB/m/kHz。透過 Biot 模式可計算得到聲源中心頻率其衰減率與滲透性的關係圖（如圖 11，顯示在中心頻率為 6 kHz 時，當衰減率為 0.3155 dB/m/kHz 時，其相對應的滲透性為 $4.96 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ [Schock, 2004]），便可由衰減率對應出中心頻率對於底泥的第一代滲透性 κ 。

取得初始的孔隙度與滲透性參數後，透過數值疊代方式，得到第一次疊代、第二次疊代的孔隙度與滲透性，並將其帶入 Kozeny-Carmon 方程式

中，直到計算的粒徑大小收斂至某值後以降低誤差，最後在將其透過式(17)即能得到底泥的粒徑大小資訊[Schock, 2004]。

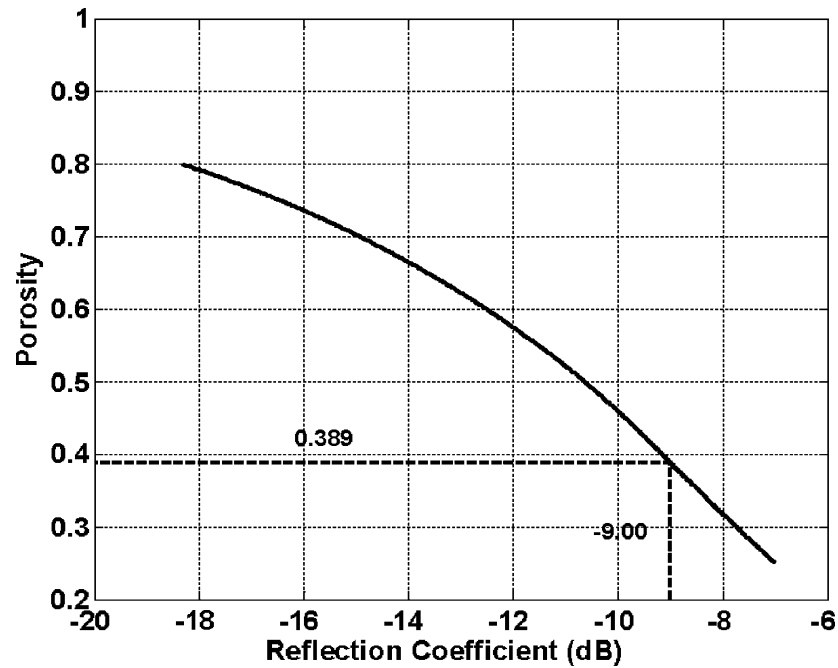


圖 10 由 Biot 模式計算出孔隙度與反射係數的關係圖[Schock, 2004]

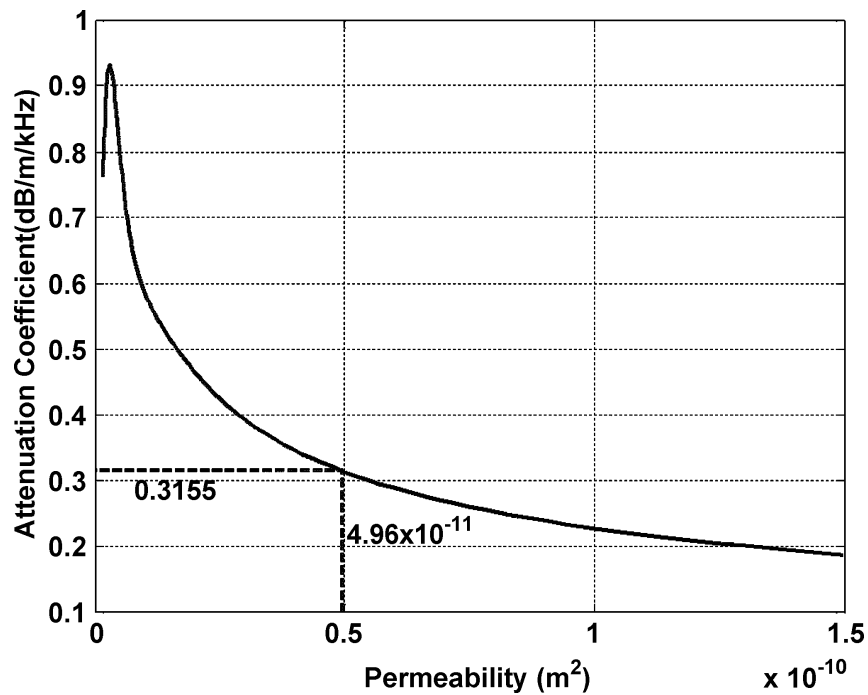


圖 11 由 Biot 模式計算得到衰減率與滲透性的關係圖[Schock, 2004]

4.4 量測反射係數 R

藉由河床垂直反射的回波強度，將訊號經球面擴散修正後，其來自河床一次射回波的頻譜可表示為

$$B_1(f) = \frac{1}{2r_1} X(f) H_s(f) X^*(f) R(f) \quad (18)$$

其中 r_1 是聲源（地層剖面儀）與河床間的距離， $X(f)$ 是發射訊號的頻譜， $H_s(f)$ 是系統傳遞函數（或稱之為格林函數）， $R(f)$ 即河床與水界面的反射係數，定義為

$$R(f) = \frac{P_r(f)}{P_i(f)} \quad (19)$$

P_r 與 P_i 分別代表在河床與水界面的反射聲波與入射聲波的頻譜。若假設水面平滑如鏡，則河水與空氣界面的反射係數為 -1，此時聲波經由多重反射（傳播路徑為聲源-河床-水面-河床-聲源）的頻譜可表示為

$$B_2(f) = -\frac{1}{2r_2} X(f) H_s(f) X^*(f) R^2(f) \quad (20)$$

其中 r_2 為聲源與河床距離再加上水深。將式(20)與式(18)相除，即可得河床與河水界面的反射係數，如下式

$$R(f) = -\frac{r_2 B_2(f)}{r_1 B_1(f)} \quad (21)$$

在獲得反射係數後，便能透過經驗公式(12)找出底泥的孔隙度，再透過式(4)得到底泥平均粒徑大小的資訊；或是利用 Biot 模式，由反射係數找出對應的孔隙度與滲透性，用數值疊代的方式收斂找出平均粒徑大小。

4.4.1 地層剖面儀器校正

使用地層剖面儀進行調查前，需進行校正作業。由於孔隙率或粒徑大小之估算乃基於聲波反射係數的大小，而多數的地層剖面儀並不會記錄所發射訊號，因此需要藉由校正作業，以得到良好的資料品質。本計劃參考 Edgetech 公司建議的校正方法並進行適當的修改，將拖魚反轉並下放至不同水深以量測反射波的能量（如圖 12），扣除幾何擴散損失後，即可推算並校正發射訊號之強度。但此校正方法必須是在水面非常平靜的情況下，

才能有得到良好的效果。當海況不佳時，可參考國外利用特製金屬球當目標物，來進行校正工作。(Staton and Chu, 2008)

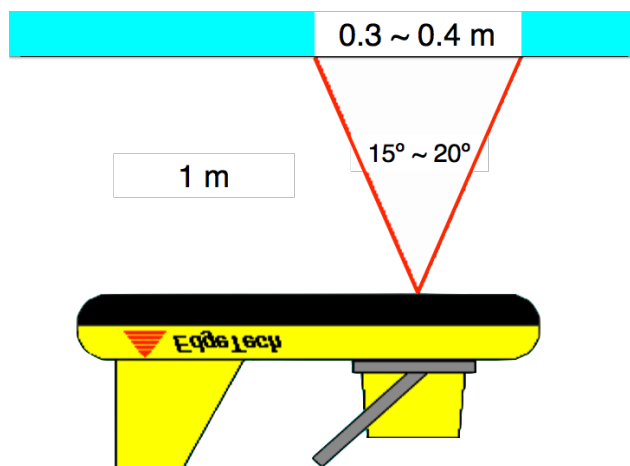


圖 12 依不同深度進行地層剖面儀之校正（圖示為距海面 1 公尺時，聲束所涵蓋之範圍）

4.4.2 反射係數誤差修正

在實際海域環境進行探測時，為求得較正確的反射係數，我們必須考慮以下因素進行修正：

多層介質的傳遞

針對底泥分層的情況，如果要計算次層的反射係數，要去討論聲阻抗值往海床下方傳遞或隨深度的變化量，因此我們必須修正聲波經過參考層面的各個反射係數值 R_n 為

$$R_n = \frac{A_n R_{n-1}}{A_{n-1} (1 - R_{n-1}^2)} \quad (22)$$

A_n 為第 n 個界面的反射的振幅。

擴散損失 (Spreading Loss)

對聲波而言，海底為可穿透界面，所以在長距離傳播的過程中，聲波不斷的傳入海床而消散能量。有關於淺海聲學的傳播，已經有不少理論模式，而且仍然不斷的發展當中，但是，理論模式的預測與實際量測，仍難獲致滿意的結果，最主要的因素在於傳播模式的複雜性。在淺海聲學中，所有的環境因素都很重要，這些因素包括海面、水體、海底的海洋學相關

參數。然而，這些相關參數不僅在時間上而且在空間上都具有多變性，以致無法獲致詳細的資料，不足以正確的模擬聲波傳播所需的相關性質。

聲波在海水中有很好的穿透性，但是海洋環境的複雜，使聲波在海水傳播時能量可能會吸收或消散，海水對高頻聲波有很強的吸收性，而只有對低頻的聲波具有較高的穿透性。除此之外，還有其他海洋環境因素也會對聲波造成能量衰減。本研究只討論聲波在海水傳播時，因為點波源球體擴散的傳播路徑而導致的能量損失，也是最基本的問題。聲波在海水中傳播時，當聲源將聲波射入水中而產生聲波且開始傳播時，首先面臨的就是幾何擴散 (geometric spreading) 的問題。以點聲源所產生之全方向擴散，當一定量的聲能經由傳播擴散而散佈在越來越大的球面上時，這種因幾何擴散所產生的傳輸損失，我們必須在所收得的資料進行修正，以計算較正確的反射係數值。聲波在經過水層和往下各個層次能量會不斷減少，其關係為：

$$p(x, \omega) = p(0, \omega) e^{-\alpha x} \quad (23)$$

p 為聲壓， α 衰減係數， x 為行進距離， ω 為角頻率。

以聲波在介質中傳播時，伴隨聲波的能量可以用聲強 (sound intensity) 表示，單位為分貝 (dB)，代表能量傳播的大小與方向，為一向量。聲強的定義為單位時間垂直於波陣面之單位面積中，聲波所輸送的平均能量，其定義如下式：

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v(t) dt \quad (24)$$

式中 I 為聲強， v 為介質粒子速度。根據聲阻抗定義，壓力與粒子速度比，也就是造成單位粒子速度所需施加的壓力：

$$Z = \frac{p}{v} \quad (25)$$

Z 是聲阻抗值。透過式(25)以及聲強的基本定義，式(24)可整理為：

$$I = \frac{p^2}{Z} = Z v^2 = \frac{a^2 Z}{\omega^2} = \frac{P_{ac}}{A} \quad (26)$$

式中 a 為角加速度， ω 是角速度； P_{ac} 為聲功率，單位時間聲源輸出的總能量， A 為單位面積。在本計劃中，聲波傳遞僅從海表至海床，因此將聲源視為球面波擴散，從式(26)則可以得到在距離 r 處的聲強為：

$$I_r = \frac{P_{ac}}{A} = \frac{P_{ac}}{4\pi r^2} \quad (27)$$

從式(26)與式(27)可知，聲強大小與聲壓平方成正比，聲強與距離平方成反比：

$$I \propto p^2 \propto \frac{1}{r^2} \quad (28)$$

故可得聲壓跟距離成反比：

$$p \propto \frac{1}{r} \quad (29)$$

此修正適用在聲線是直線的聲波傳播現象。而地層剖面儀探測使用的是垂直入射的聲波回訊資料，故適用此修正，因此，我們使用此關係修正能量衰減關係。

至此已了解如何從聲學資料反推回底泥的物理參數，接下來開始介紹探測時的儀器與流程。

4.5 使用儀器介紹

本計畫會租用船隻到社子島外在基隆河和淡水河的交會處水域作業，所使用的船顯示在圖 13 上。分天分段使用不同的儀器設備收集聲波資料和採集土樣，所使用的儀器設備說明如下。

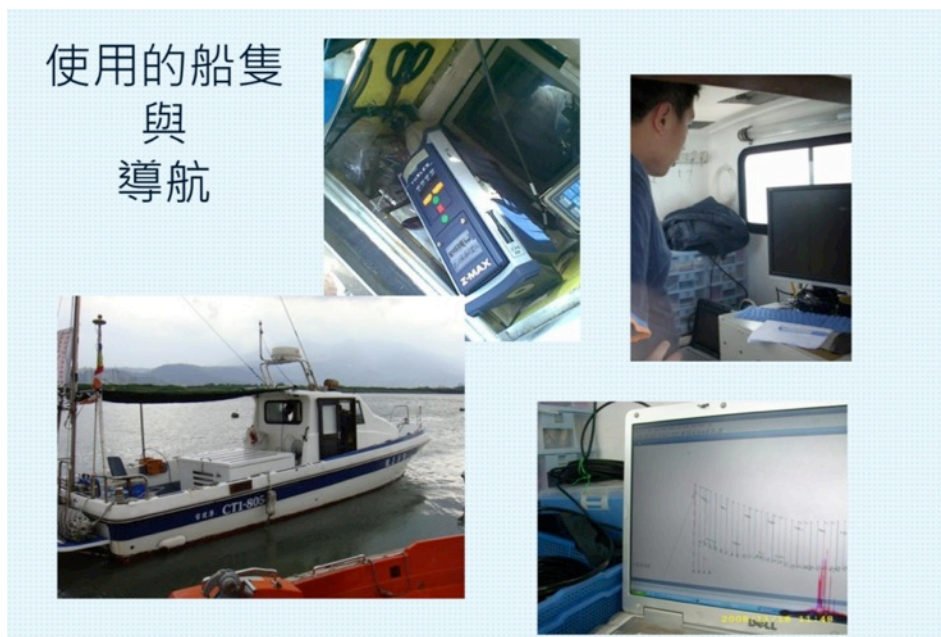


圖 13 本計畫作業的船隻和導航設備

4.5.1 全球衛星定位系統

定位使用全球衛星定位系統做船隻導航，作業完成後採樣點或測點位置會以差分定位法修正之，使定位精度增進為 2 公尺（95%信賴水準），作業當中會將 GPS 定位天線連接於整組設備的正上方，並將它的定位點和測點儀器位置（如音鼓）的相對幾何距離位置紀錄以作為定位點的修正參數。目的是使得聲波達到的位置和採樣的位置盡量落在同一點位上，以供比較。本案所使用的是 Thales Group DG14（圖 14）型衛星接收儀，同時可接收 12 顆 GPS 衛星，它可將衛星定位相關數值輸出至電腦供差分定位處理之用。



圖 14 Thales Group DG14 GPS

4.5.2 側掃聲納

側掃聲納利用後向散射能量之大小與影像的紋理在空間上的分布來辨識調查區域內之表床底質特性以及目標物之判釋。本計劃預計使用側掃聲納 EdgeTech 4200 控制系統與拖魚，如圖 15，其具有 300 kHz 及 600 kHz 雙音頻聲波，計畫施測時會同時接收兩種頻率訊號，利用兩訊號的回聲強弱作分析，來判斷底質的物理特性；施測時拖魚距海床高度保持量測斜距的 10%~20%，使得聲波的中央能量軸落在受測區域範圍的中央區。



圖 15（左）EdgeTech 4200 側掃聲納拖魚；（右）EdgeTech 701-DL 聲納控制器

4.5.3 地層剖面儀

本計劃選擇使用的地層剖面聲源系統為變頻式聲納發射器 (chirp)，所使用的設備為美國 EdgeTech 公司所製造的 3100P 數位變頻震測儀，拖魚型號為 SB-216S，如圖 16。該儀器頻率範圍為 2~16 kHz，作業為顧及系統數位化的動態範圍，選擇中頻段 2~12 kHz 施測，此頻率聲波對硬礁岩床不具穿透力，但在粗砂中可達 6 公尺，泥層中可達 80 公尺。



圖 16 (左) EdgeTech SB-216S 拖魚；(右) X-star 數位變頻震測儀控制器

4.5.4 底泥採集系統

本計劃所使用的抓泥器如圖 17 所示；當下放置海床後依一般泥質底質的狀況可抓取表面約 30 公分左右的土樣，若在礁石區則可能僅能抓取些許碎屑。

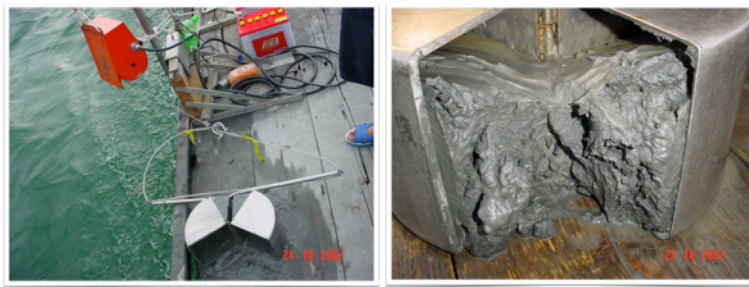


圖 17 抓泥器

4.6 資料處理流程

4.6.1 地層剖面儀震測資料

從現場收集震測資料需經過下列處理步驟，才可獲得地層資訊：

1. 資料轉換：為了增加處理效率，將磁帶內的資料，利用程式於工作站內逐次並逐檔的每個震測測點資料轉換於硬碟內，並利用網路將轉換

完成的 SEGY 震測資料格式傳到到其他工作電腦。

2. 剖面資料處理：利用軟體 SBI 處理震測資料，包含定位資料校正、影像強度增益、資料展示、底泥層厚度辨識、以及目標物標示等。
3. 繪圖：將剖面資料依據其空間位置與航跡的分布，逐條以固定方向將震測剖面展示，並標訂說明該疑似目標物的位置繪製成平面與剖面圖。
4. 反射訊號處理：將 SEGY 所記錄的反射訊號利用 Matlab 繪製分佈情況，協助判斷海床淺層沉積物的位置和計算反射係數。

4.6.2 側掃聲納資料

側掃聲納系統可以利用聲波抵達海床反射回來的聲波振幅強弱來調查海床的底質特性，原來它的使用目的是用來觀察在海床上是否有特殊的線性強後向散射影像，去搜查坐落在海床的外來目標物，或查詢對施工有礙的障礙物位置。資料收集後本計畫先會使用 Triton Perspective Mosaic One 側掃聲納處理模組，它能將訊號做增益、做訊號強度平衡和對每一側線影像作空間的拼圖。

4.6.3 底泥採樣資料

1. 當船行進到所設置的採樣點位置時，將採泥器用繩索綁好後，慢慢放入水中進行採樣，採樣完成後再將採泥器拉上來，將採泥器採得之樣本置放於大型容器內，並分放至標有該處採樣點編號的乾淨置物袋中；
2. 將所有沉積物樣本儲放於乾淨之大型儲物箱中，以供日後進行對照之用；於實驗室進行粒徑分析。

4.7 採樣實驗

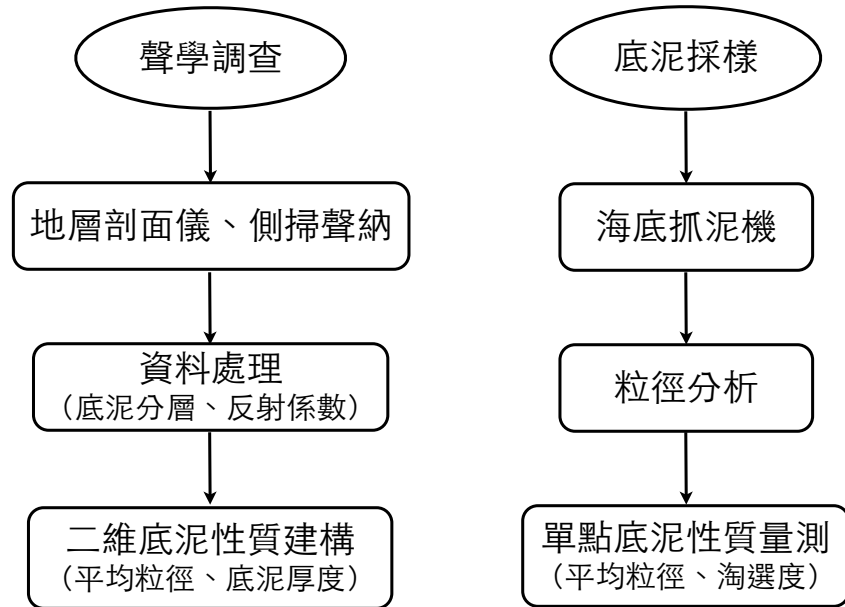


圖 18 聲學遙測與現場底泥採樣調查方法之流程圖

4.7.1 工作範圍

本計劃於關渡進行現場探測（如圖 19），共可分為三區，藍色框為變頻地層剖面儀預定作業區（A 區），長約 1.1 公里，寬約 0.6 公里；黃色框（B、C 區）為側掃聲納調查區，分別為長約 0.4 公里，寬約 0.25 公里（B 區）與長約 0.4 公里，寬約 0.3 公里（C 區），規劃探測區域的水深如圖 20，整體而言，此處水深介於 4~10 公尺。因此處位於淡水河與基隆河交接處，來自兩條河流的底泥會在此處混合，提供底泥空間分佈的多樣性。



圖 19 以關渡為聲學遙測之可行性評估調查場址，共可分為三區，分別是藍框的地層剖面儀調查區（A 區）、與黃框的側掃調查區（B、C 區）



圖 20 本計畫測量範圍的水深分布圖 [宋國士, 2008]

4.7.2 工作內容規劃

變頻聲納地層剖面儀調查

全區域之變頻聲納規劃測線如圖 21 上白色的測線，測線間距為 30 公尺，原則上測線方向垂直水道方向，接近水岸，顧及船行及儀器安全問題，水深小於 1~2 公尺深度就會轉向不進行調查；但為增加作業區域，會在滿潮時後施測。規劃測線數共約有 35 條，總里程約 20.5 公里。使用頻率為 2~12 kHz 之聲波。

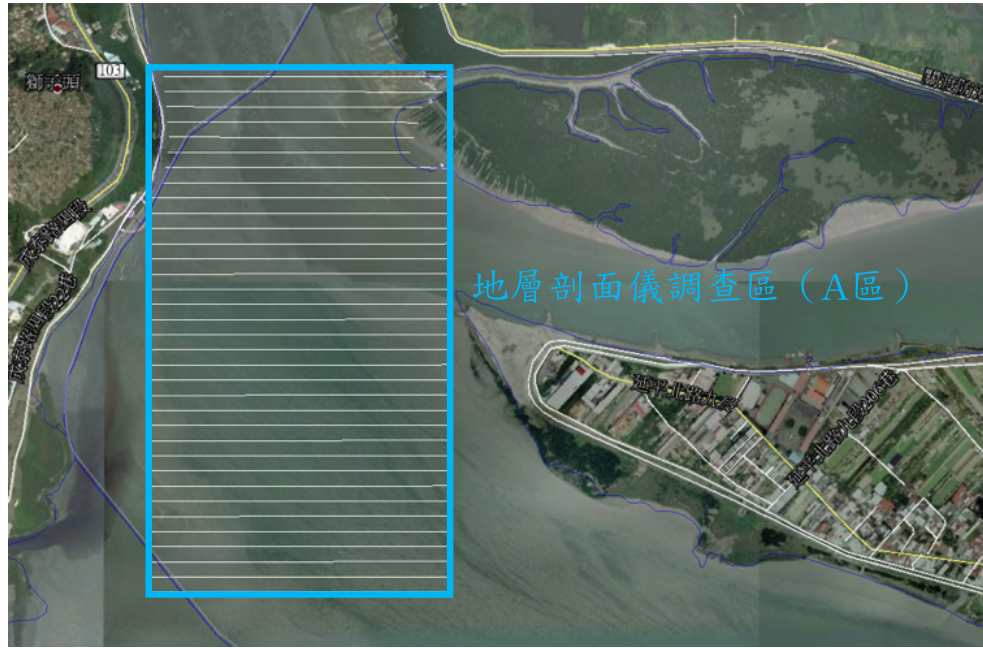


圖 21 變頻聲納淺層地層剖面調查規劃測線示意圖

側掃聲納調查

B、C 區之側掃聲納規劃測線如圖 22 上白色的測線，為達到更好的調查效率，測線規劃參考水深地形之考量，因為區域水深都在 10 公尺以下，配合側掃聲納儀器之斜距設定，每頻道的測距設定為 25 公尺，測線間距為 25 公尺，使得到的聲波影像對區域的涵蓋率有 20%。兩區測線方向盡量垂直等深線，使拖魚兩側的反射聲波強度不受地形坡度的影響；其規劃測線數如下：B 區約有 16 條，里程約 4 公里；C 區約有 16 條，總里程約 4.5 公里，總里程約 8.5 公里。

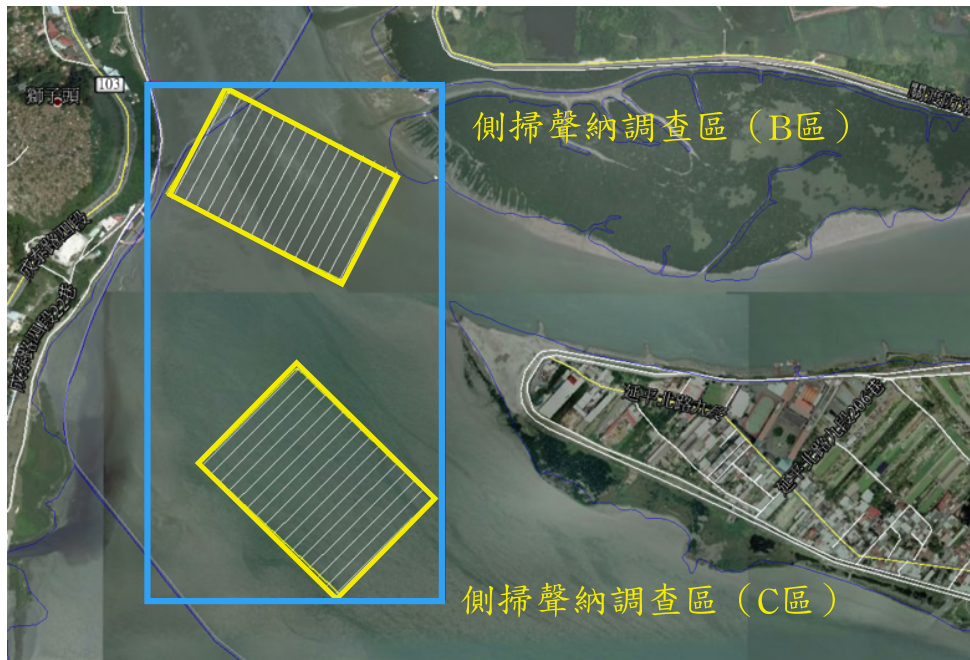


圖 22 側掃聲納地貌影像調查規劃測線示意圖

底泥採樣調查

全區域之底泥採樣調查規劃原則以 150 公尺為間距，共有 32 個點位。本次採樣區域如圖 23 上標示白色星型的位置，預計利用抓泥器進行採樣。



圖 23 底泥採樣調查規劃示意圖

4.7.3 資料分析

首先我們用側掃聲納來初勘調查區域河床表面沉積物面狀的物理特性分佈，由於聲波訊號和河床接觸時，因為入射角均不為零，而且越遠離測線，聲波走時愈大，入射角度越大，因此不適合用來計算聲波束蔭下的反射能量值。側掃聲納作業情況如所圖 24 所示，其原理是由拖魚在水中拖行時，向兩側發射高頻信號，並接收後向散射信號，藉由後向散射信號的強弱，可獲得水下海床面底質或粗糙度資訊。在過去研究，認為後向散射能量、聲波的波長與底床的粗糙度有對應關係，因此拿來和底泥的顆粒度大小做對比，以估算底床的材質。

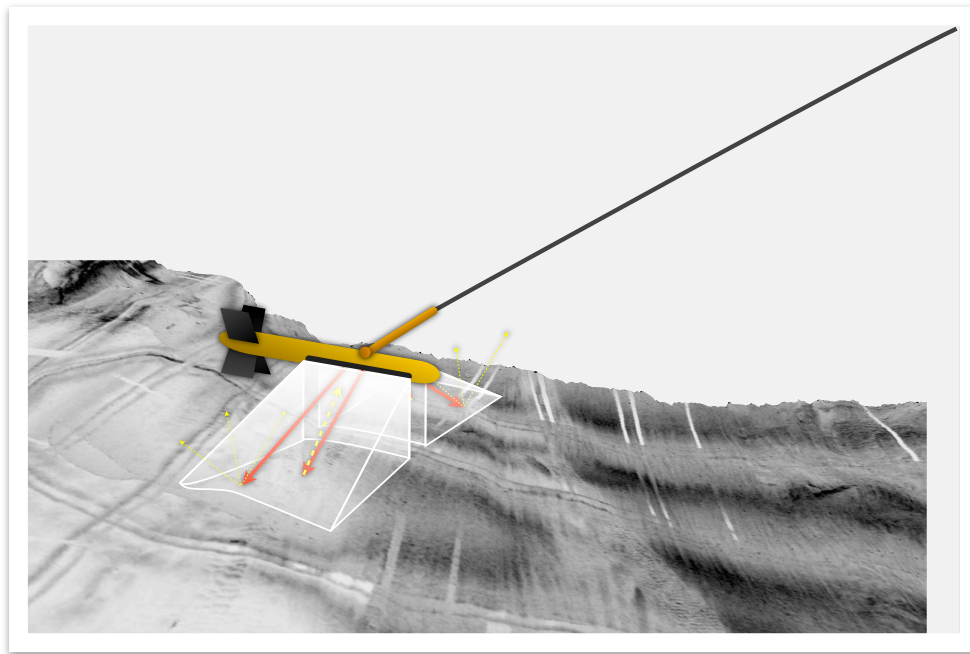


圖 24 側掃聲納作業示意圖

Davis 等人在墨西哥灣陸棚上的研究指出[Davis, 1996]，在地形平坦，且海床底泥在沒壓密的狀況下，底泥的顆粒大小將會是決定後向散射能量的主要因子；對於砂質顆粒，粗顆粒沉積物會比細顆粒沉積物造成較強的後向散射能量（圖 25）。

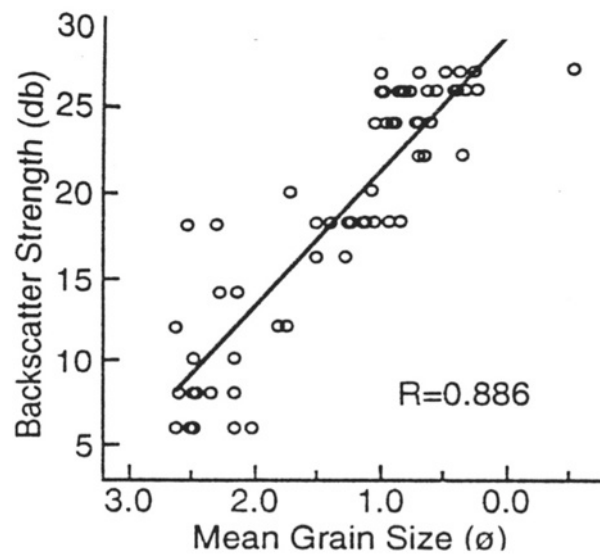


圖 25 墨西哥灣陸棚上海床沉積物顆粒大小（水平軸）和側掃聲納所收到的後向散射值（垂直軸）的關係圖 [Davis, 1996]

但是 Goff 等人指出，即使底泥內僅有極少量的粗顆粒 (>4 mm) 物質或貝殼類的雜質，都會使上述正向關係失常（圖 26） [Goff, 2004]。

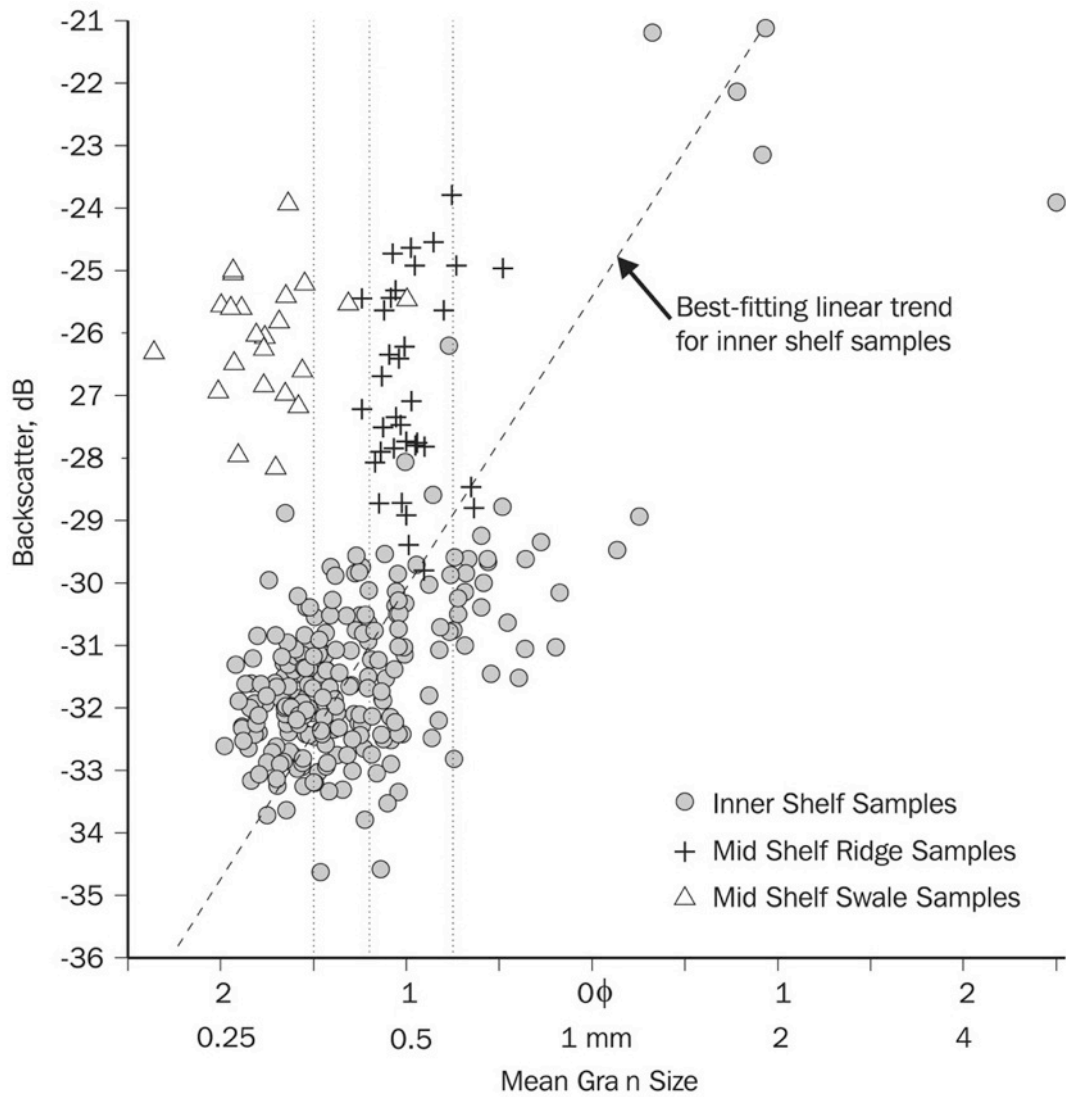


圖 26 美國紐澤西外海大陸棚上海床沉積物顆粒大小（水平軸）和側掃聲納所收到的後向散射值（垂直軸）的關係圖 [Goff, 2004]

因此，本計畫中將使用兩種頻率的聲波進行調查，以了解不同頻率聲波受不同底質的影響，這是因為在不少研究中有發現聲波頻率對沉積物的屬性有不同的反應存在，如圖 27。

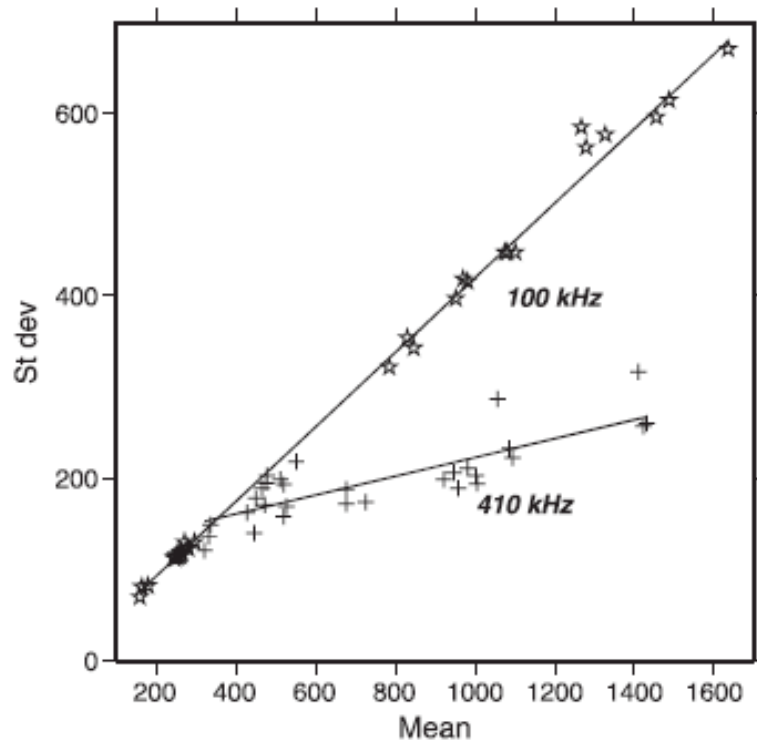


圖 27 不同頻率的聲波對於不同的海床底質，它們的平均粒徑和淘選度之正相關會出現不同的線性關係 [Davis, 1996]

將依照側掃聲納資料的結果，區分調查區域內不同性質的河床沉積物分佈，然後和地層剖面儀結果作驗證。本計畫所發射的聲波頻率設在 2~12 kHz，所以所測得的地層解析能力可小於 1 公尺。作業時，我們必須把聲波發射/接受器（型號 SB-216S）放置在水中距離河床數公尺遠，藉發射一串長度的聲波。發射後，幾乎同時去接收其反射訊號，這串反射訊號在處理器內會利用已知形狀的發射波形，做交互相關處理，然後重新編寫成 SEG-Y 的震測資料，資料檔同時也會記錄定位用的 GPS 訊號，放在收集電腦儲存在磁碟內。

接著分析資料內反射回波的能量強度，以計算反射係數。當我們讓聲波行進方向和海床垂直，將收到的海床訊號回傳最大振幅和波源最大振幅的比值，再扣掉聲波行進時的能量損失，即是測量到反射係數[Ha et al., 2010]。由測得的反射係數套用經驗公式去推算該處底泥的物理參數（包括孔隙率和平均粒徑大小等）。研究結果也證實這些參數間的關係，雖然不一定每次都相當準確，但多會落在一個正相關的區間內，差異性主要來自於建立經驗公式的沉積環境與本計劃調查環境相異所致。因為近十年來的研究成果發現，反射係數的測量值和由海床底泥土樣的分析比對結果，不一

定都會符合過去研究經驗公式的預測值，如果想準確的利用聲學去辨識海床底泥特性，除了對地層剖面儀計算所得的反射係數結果作校正外，還必須根據不同的沉積環境做實驗；因為正確的程序是必須根據不同的目標區域，去建立個別區域的聲學參數模型才可行。因此，本計畫選擇在社子島的淡水河水域，藉由區域內密集的底泥採樣樣品，在做完它們的粒徑等參數分析後，除研究出適當的聲波校正程序外，並建立此實驗區域的聲學參數模型。

4.8 甘特圖

年月 工作項目	4	5	6	7	8	9	10	11	備註
建立相關理論模式	✓ ✓	✓ ✓							
現場調查（因氣候與儀器故障因素無法於原先規劃時間內完成）									
側掃聲納		==	==		== ✓	== ✓	== ✓		
底泥採樣		==	==		== ✓				
地層剖面儀		==	==		== ✓	==== ✓	== ✓		
期中報告					※				
聲學資料分析				==	==	==	==		
						✓	✓	✓	✓
現場採樣分析				==	==	==	==		
					✓	✓			
聲學資料與現場採樣之比較						==	==	==	
						✓	✓	✓	✓
期末報告							※		
工作進度估計百分比	15%	30%	30%	30%	70%	85%	100%	100%	
預定查核點	期中	完成聲學儀器調查底泥粒徑大小的相關理論與計算方法							
	期末	進行現場調查與底泥採樣，將聲學儀器所調查的資料進行分析，並與現場底泥樣本驗證，並完成調查區域之二維底泥空間變異研究。							

== 原先計劃進度；=== 修正後計劃進度；✓ 已完成進度

第五章 結果與討論

5.1 現場底泥採樣平均粒徑與淘選度分析結果

本研究根據 Shepard 沉積物分類方法進行現場土樣分類，該方法是由 Francis P. Shepard 於 1954 年通過對比當時存在的若干分類方法後提出的 [Shepard, 1954]。該學者認為研究沉積物需要用沉積物的各種特徵來描述，而任何沉積物樣品中砂-粉砂-黏土含量都是固定不變的，因此可以依據沉積物中砂、粉砂和黏土的比值來對沉積物進行分類。砂、粉砂和黏土是根據沉積物的中值粒徑劃分的，其界線分別是 1/16 mm 和 1/256 mm。利用砂、粉砂和黏土作為三角形的 3 個頂點來反映之間的比例關係，以決定沉積物類型，其分類圖解如圖 28(a)所示。其三角形中央區域定義為“砂-粉砂-黏土”來概括三者含量均高於 20 % 而低於 60 % 的沉積物，其他沉積物類型則分佈均勻、對稱分佈，構成規則的沉積物的分類邊界，如此可以在圖解中劃分任何具體的沉積物類型。Shepard 分類將沉積物劃分為 10 種類型。這種沉積物分類方法由於較好的簡潔性及易記性而被廣泛應用。

為了驗證聲學遙測的方法，於現場底泥採樣部分，原先規劃 32 個採樣點，其中編號 12、13、17、18、22、27、31、32 共 8 個點位，因水深太淺，船隻無法進入，未收集土樣。因此，共收集 24 個土樣，見圖 28 (b)。由這些土樣的平均粒徑和淘選度分析結果（表 5），發現大部分土樣的淘選度非常差（除 15 站為 poorly sorted 外，其他站均為 very poorly sorted），表示很多在此區域的沉積物顆粒大小分佈不集中。由表 6 可知，除了土樣 1、2、21、29、30 外，都以砂粒為主，使得這 5 站土樣的平均粒徑最細， Φ 均大於 5（其中 21 站為 6.55），屬於中度粉砂顆粒。此外，這些細顆粒沉積物都落在調查區域的最東北和西南角落，除 21 號為泥質粉砂，細者都稱為砂質粉砂【圖 28 (a)】；次細的沉積物稱為粉砂質砂粒沉積物，主要分佈於作業區域的北部（4~7 站），即基隆河出口或淡水河過關渡橋往南河道變寬的地方，以及東南側靠河的東岸區域，這些沉積物的平均粒徑 Φ 值為 4~5，屬於非常細的砂或粗粉砂。至於其他位於測區的中央部分，都稱為砂，平均粒徑 Φ 值介於 1~3 間，兩河匯流處顆粒最粗不到 2，以粒徑值稱之為中砂（顏色很黑，其樣貌請參照附錄 E）。

表 5 土樣顆粒分析的結果(1)，每一列指出每個相對樣本在重量 5%，16%，25%，50%，75%，84%，95%的百分比值，用來計算樣本的平均粒徑(mean)和淘選度(sorting)的值(Φ)。

Samp. No.	5	16	25	50	75	84	95	mean	sorting
1	1.91022	3.54855	5.71777	24.9893	62.3806	77.485	108.077	5.72	2.91
2	1.94062	3.62388	5.84543	25.4	72.3418	92.0826	142.196	5.62	3.10
3	3.88158	19.7196	74.5326	229.726	341.526	404.149	560.494	3.03	3.59
4	3.01546	9.5699	22.3478	66.4521	98.645	113.402	142.731	4.59	2.78
5	2.68607	13.4149	57.0228	113.142	147.378	162.775	193.194	3.99	3.08
6	1.93718	4.74095	16.4302	206.503	312.223	363.229	474.784	3.82	3.97
7	1.81322	3.5979	6.55359	118.791	266.63	332.985	488.131	4.26	4.04
8	15.2017	178.885	239.352	375.226	527.572	605.612	783.719	1.54	2.84
9	3.30687	27.7248	126.611	224.216	325.898	384.73	525.6	2.90	3.66
10	7.08419	129.402	212.625	305.578	407.963	466.973	609.184	1.92	3.21
11	18.9066	194.611	238.245	329.089	454.161	529.786	716.524	1.63	2.62
14	4.0703	24.4946	65.3662	173.872	265.962	321.347	488.931	3.17	3.45
15	94.0387	264.925	321.238	443.962	583.6	660.222	854.138	1.23	1.59
16	2.4342	5.34906	9.84282	46.4731	137.176	181.011	279.479	4.81	3.42
19	2.73634	8.56041	22.0503	62.9028	109.143	137.956	193.958	4.57	3.07
20	9.60748	144.397	208.894	294.342	387.71	441.786	577.317	1.91	2.95
21	1.83058	2.91522	4.06114	9.93668	26.8518	41.667	86.8528	6.55	2.78
23	2.50988	6.00317	12.3854	64.387	159.995	395.542	645.362	4.23	4.00
24	3.21134	12.6015	38.3092	223.488	320.732	369.645	493.005	3.30	3.63
25	2.93953	9.57986	23.8676	82.459	122.798	140.061	173.909	4.38	2.94
26	2.45539	5.17444	8.96706	31.0531	86.0756	120.367	208.983	5.22	3.21
28	3.15232	10.9307	24.9855	86.1516	174.898	214.68	301.401	4.09	3.29
29	2.33583	4.80394	8.39172	34.7632	80.2499	98.1566	132.539	5.30	2.91
30	1.97409	3.40292	5.08399	16.9542	55.8586	77.9047	133.53	5.92	3.04

表 6 土樣顆粒分析的結果(2)，每一列表示樣本在不同顆粒大小區間內的重量百分比，顆粒大於 62.5 μm 為砂(sand)，小於 4 μm 為黏土(clay)，之間為粉砂(silt)。

Samp. No.	<4um	4-63um	63-125um	125-250um	250-500um	500-1000um	1000-2000um	Clay	Silt	Sand
1	18.2	57.2	22.2	2.4	0	0	0	18.20	57.20	24.60
2	17.8	52.3	22.5	7.1	0.3	0	0	17.80	52.30	29.90
3	5.19	18.41	7.1	24.3	37.2	7.4	0.4	5.19	18.41	76.40
4	7.61	39.69	42.1	10.6	0	0	0	7.61	39.69	52.70
5	8.15	18.55	32	41.1	0.2	0	0	8.15	18.55	73.30
6	14.1	17.2	5.9	23.2	36	3.599	0.001	14.10	17.20	68.70
7	17.7	26.1	7	21.3	23.4	4.48	0.02	17.70	26.10	56.20
8	1.88	6.6	2.72	15.6	44.3	27.7	1.2	1.88	6.60	91.52
9	6.24	13.26	5.3	32.6	36.4	5.9	0.3	6.24	13.26	80.50
10	2.92	9.48	3.3	18.1	54	12.1	0.1	2.92	9.48	87.60
11	1.78	5.6	2.51	18.21	52.8	17.9	1.2	1.78	5.60	92.62
14	4.89	19.51	13.5	33.6	23.9	4.5	0.1	4.89	19.51	75.60
15	1.01	3.4	1.23	8.46	47.1	36.6	2.2	1.01	3.40	95.59
16	11.7	43.8	16.6	21	4.5	2.4	0	11.70	43.80	44.50
19	8.71	41.39	30.2	18.9	0.8	0	0	8.71	41.39	49.90
20	2.53	7.57	4.1	21.5	54.6	9.69	0.01	2.53	7.57	89.90
21	24.6	65.9	8.2	1.28	0.02	0	0	24.60	65.90	9.50
23	10.7	38.8	20.4	9.1	10.3	10.4	0.3	10.70	38.80	50.50
24	6.75	21.85	6.8	21.6	38.3	4.5	0.2	6.75	21.85	71.40
25	7.83	32.27	36.1	23.7	0.1	0	0	7.83	32.27	59.90
26	11.9	55	18	12.1	2.7	0.3	0	11.90	55.00	33.10
28	7.02	33.48	22	27.6	9	0.9	0	7.02	33.48	59.50
29	13	52.1	28.2	6.698	0.002	0	0	13.00	52.10	34.90
30	19.6	58.5	16.1	5	0.8	0	0	19.60	58.50	21.90

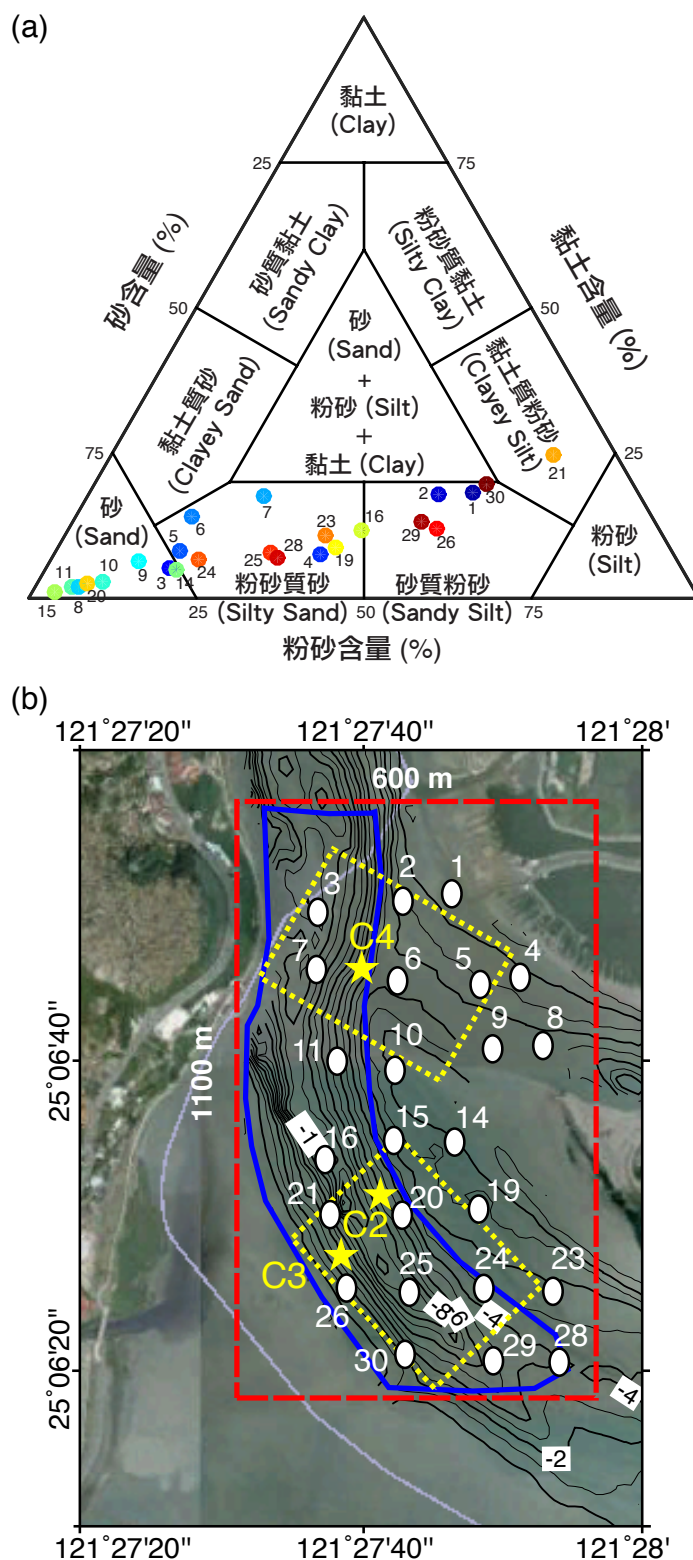


圖 28 (a) Shepard 沉積物三角形質地分類圖 [Shepard, 1954]，圖中之彩色點表示各點位土樣屬性。(b) 調查區域圖。藍線框為地層剖面儀施測範圍，黃虛線為側掃聲納施測範圍，白點為土樣採樣點。

5.2 地層剖面儀反射係數估算結果與土樣分析結果之比較

所搜集之地層剖面儀資料以反射波的能量強度計算反射係數，再以反射係數估算表層底泥之聲學性質（海床的阻抗值）。利用地層剖面儀施測，量測聲波垂直入射海床的回波訊號，將收到的回波訊號求出最大訊號之振幅和聲源輻射之振幅的比值，再扣掉聲波行進時的能量損失，即為反射係數值 (Ha et al., 2010)。

在探測程序中，所獲得的反射係數值有兩種：其一為 3100P 型變頻聲納系統內部所計算的值，其程序必須經過聲波的振幅校正（校正方法請見 4.4.1、校正過程見附錄 B）後，於現場作業時，其數值就會直接記錄於資料檔案內；其二為以每一筆訊號的回訊時間序列，通常是將收到自海床回訊的最大振幅和波源最大振幅的比，再扣掉聲波行進時的能量損失，以可推算的反射係數值。

由於 3100P 系統所收集到的資料已經過處理，無法取得聲源輻射的能量強度，只能求得自海床/河床訊號回訊的振幅值。因此本研究以接收到的與河床一次反射振幅值 A_1 和複反射波振幅值 A_2 來推算反射係數 R （見圖 29）。而且，對複反射振幅值 A_2 需考慮聲波因行進距離的增加所造成的傳播損失 (TL)，以補償其能量。在此，假設聲波歷經球面擴散損失， $TL = 20\log x$ ，其中 x 為聲波行進的距離。由圖 29 可知，一次反射聲波振幅 A_1 於水體中行進 $2h_1$ 距離後抵達接收器，而複反射聲波（聲源-河床-水面-河床-聲源），多行進了 $2h_0 + h_1$ 的距離，其訊號強度為 A_2 。

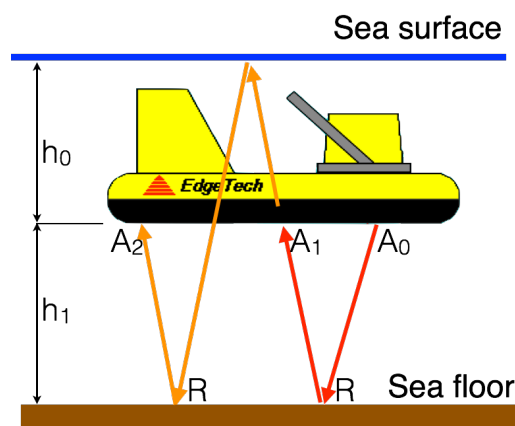


圖 29 聲波在水中傳播路徑示意圖。其中， A_0 為地層剖面儀聲源輻射之聲波強度， A_1 為聲波第一次從河床反射的回波強度， A_2 為聲波經一次河床反射、再經海面反射、最後自河床反射之回波訊號強度（即所謂的複反射訊號強度），音鼓在觸發時離水面 h_0 的深度，離河床為 h_1 的距離。

本現場探測作業，音鼓發射 2~12 kHz 的聲波，其音束寬度（定義為一半能量處）約為 20 度。所以我們將音損縮小比例要將它發射時的聲音集中的面積和球型面積相比，以圓周長度對角度作積分（半徑長為 $r \sin \theta$ ，而 r 為聲波行進距離， θ 為聲波的半音束寬），能量損失會比球面傳遞減小 66 倍，反射係數的計算如下：定義 $H = 2h_0 + h_1$ 和 $A = A_2 / A_1$

若 h_1 和 $H \geq \sqrt{66}$ 公尺

$$R = A \times H \times h_1 / 66 \quad (30)$$

若 $h_1 < \sqrt{66}$ 公尺（音鼓靠近海床時）

$$R = A \times H / \sqrt{66} \quad (31)$$

若 $H < \sqrt{66}$ 公尺

$$R = A \quad (32)$$

根據上述資料分析程序，本計畫在社子島的淡水河水域進行聲學實驗，以計算反射係數 R ，並藉由水域內的沉積物採樣樣品，進行粒徑分析。利用它們的顆粒屬性（砂土、粉砂土、粘土等）和平均粒徑值，來了解底泥物理性質與聲學性質（反射係數）之間的關聯性。

我們在第一次作地層剖面儀探測時，因有很大區域（特別是東側靠社子島水域）水深很淺（小於 2 公尺），為了避免拖曳魚的音鼓撞海底，音鼓在淺拖時產生較高雜訊，於實驗室進行後續資料處理時，發現資料品質太差，無法進行進一步的處理；因此，將調查區域縮減至水深大於 3 公尺的範圍，其重新規劃之區域範圍見圖 30。總共實施 26 條東西向跨越水道的短測線（編號 W01~26）和 6 條平行水道的長測線（編號 N01~04 和 NL01~02）。

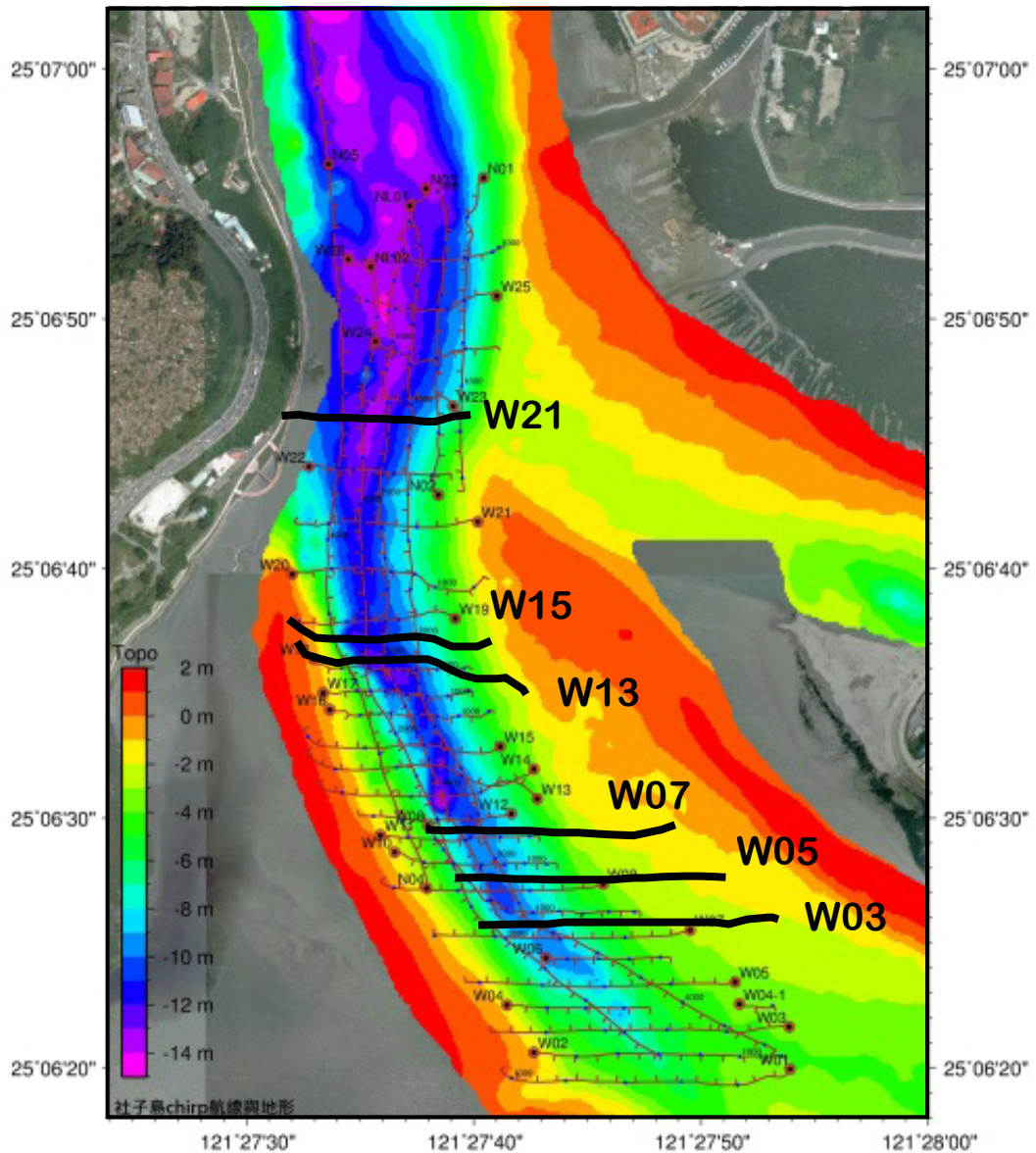


圖 30 修正後地層剖面儀測線圖。顏色表示水深變化，冷色系為深水處。區域內水深最大為 14 公尺，測線位在淡水河的河道軸位置。清晰的測線圖請參見附錄 F。

圖 31 顯示由地層剖面儀直接輸出的反射係數 R 值（單位為 dB）之空間分布。圖中顯示沿河道軸線（位置較深處）區域， R 值最大（或 dB 值越接近零），表示在該區聲波反射所得到的能量最強，這區的 R 值都在 -3 dB 到 -6 dB 之間，其他地方除了在測區的東北角 R 值也在 -3 dB 到 -6 dB 之間外， R 值皆降至 -10 dB 到 -20 dB 之間，其間夾雜了零星小塊區域，如在西岸有比較強的反射能量（-6 dB 到 -10 dB）；在東岸有最弱的反射能量（ < -20 dB）。

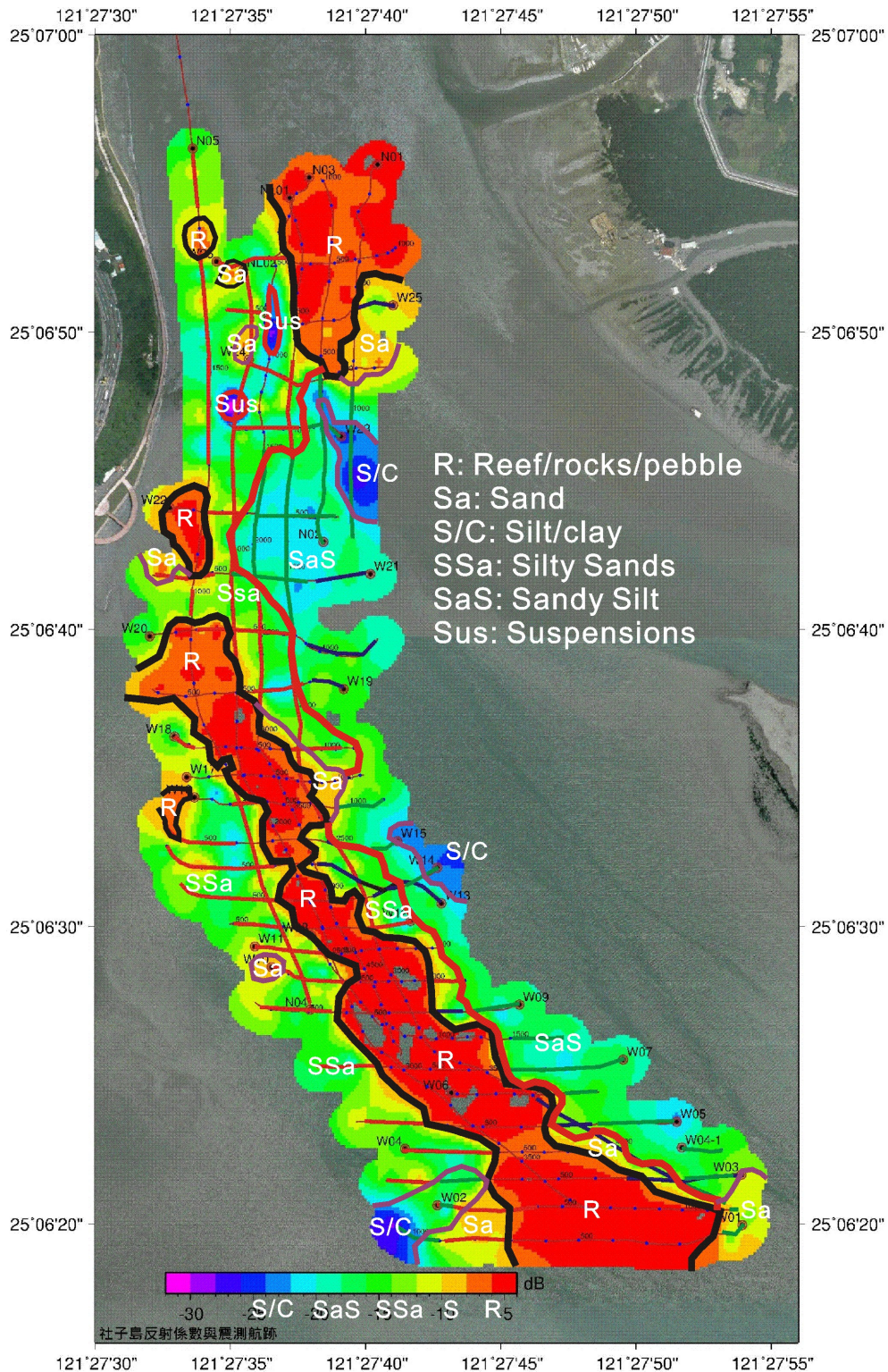


圖 31 使用 3100P 記錄系統估算的反射係數 R 值分佈圖與和床底質質地分類。

為了瞭解現場土樣所得之物理性質與底泥聲學性質間的相關性，圖 32 將土樣算出的平均粒徑（左）和淘選度值（右）的等值線疊加在 3100P 系

統估算的反射係數 R 值分佈圖上。圖中顯示兩者間相關性低，反而在比較細砂粒沉積的地方（測區的南北兩端），聲波反射能量強的區域（介於 -3 dB 到 -6 dB 之間），平均粒徑 Φ 值都大於 4，推估可能與聲學探測區域內的土樣數目太少有關。

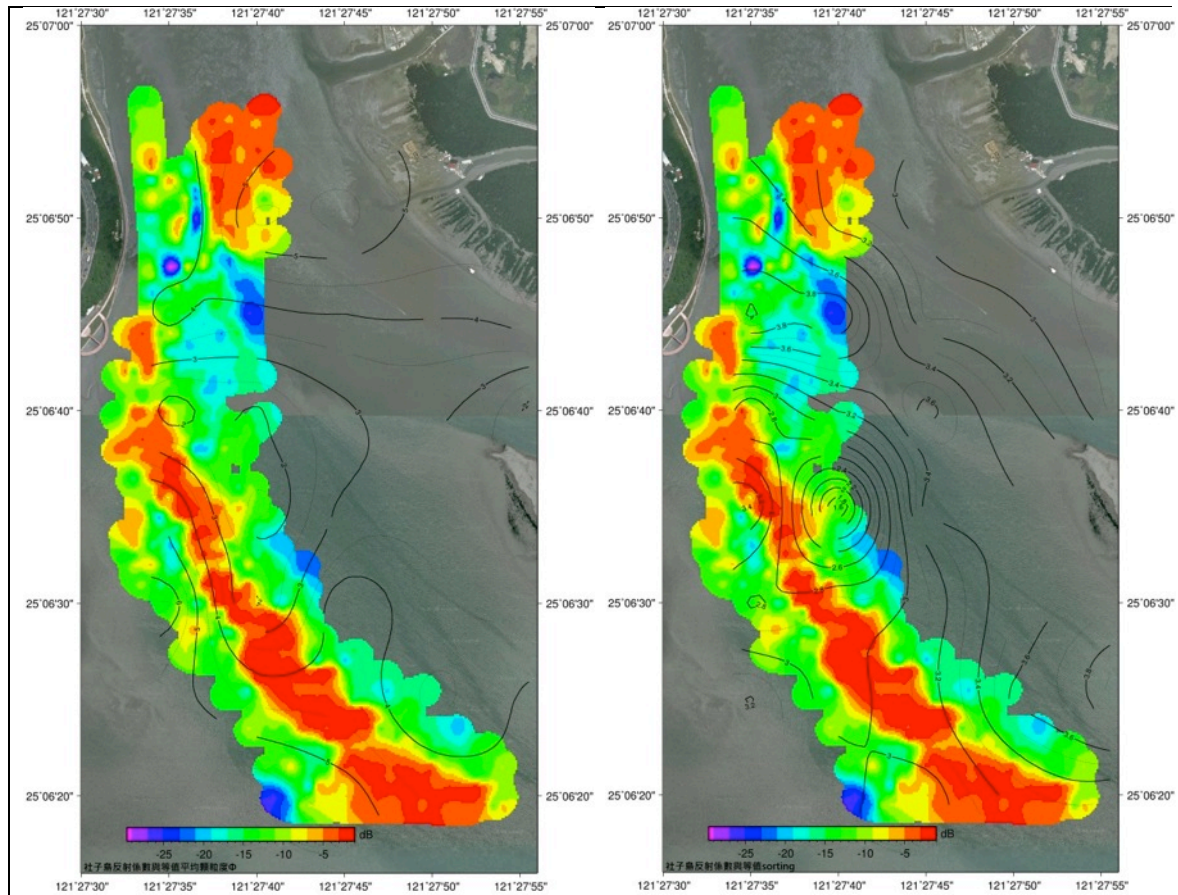


圖 32 調查區域使用 3100P 聲納系統所估算的反射係數（色階）和平均粒徑等值線圖（左圖）、淘選度等值線圖（右圖）的關係

由土樣分析（圖 28）結果，可知聲學調查區域內，只有靠西側的土壤樣本在區內，由北向南，編號分別為 3（砂），7（粉砂質砂），11（砂），16（砂質粉砂/粉砂質砂），21（黏土質粉砂），25（粉砂質砂），和最南側的三站【28（粉砂質砂）和 29、30（兩者都為砂質粉砂）】。但在相互比對後，結論是在比較細質的南部粉砂區，聲波反射能量強；在比較粗質的北部砂區，聲波反射能量反而弱（參照表 4）。

由於以上量測結果與聲傳理論不合：根據理論，沉積物顆粒越粗，應會有較高的聲能由河床反射回音鼓，因此其 R 值應會越接近 0 dB（全反射時為 0 dB），為探討此問題，我們用每一筆炸測回訊時間序列資料，利用

複反射的能量以推算反射係數值【如式(30) ~ (32)】。圖 33 為利用上述計算式所得的結果，圖上展現每 10 個炸點位置的震波形貌（直藍線）和震幅擷取位置處（上面紅線為河床震波起始處，下方紅線為複反射波震波起始處），所得到的 R 值由圖上棕色直方柱的長短表示，越長反射回來的能量越少或 dB 值越小（越偏負）。所有測線的分析結果圖詳見附錄 F，此處僅探討其中 6 條測線結果（圖 34 ~ 圖 39），測線位置請見圖 31。

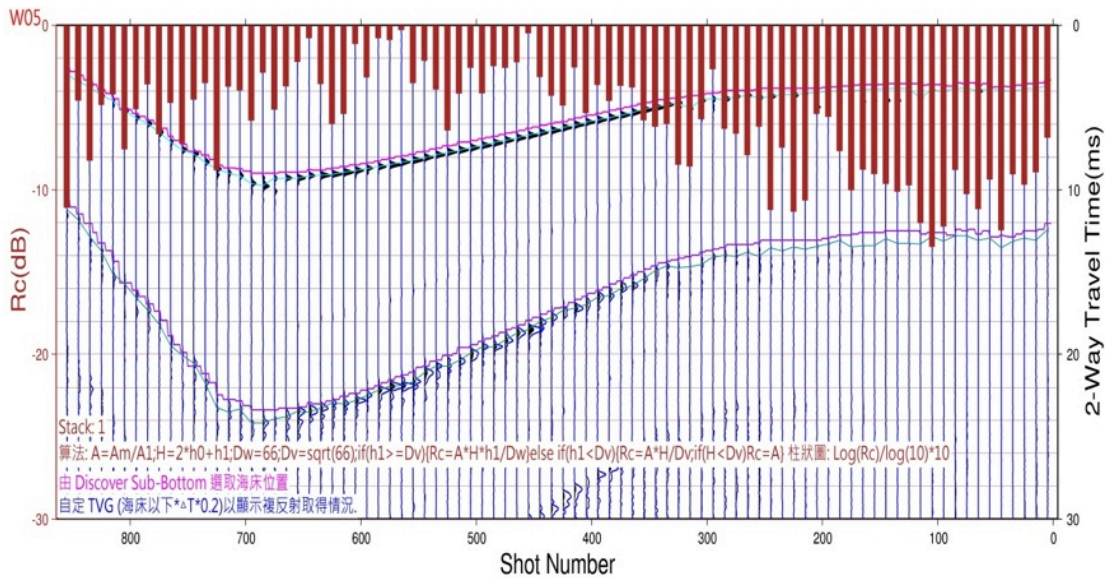


圖 33 測線 W05 的聲波圖，橫軸為炸點編號（炸點位置可和測線圖對應），其聲波走時為雙程走時，參考右方 Y 軸，單位為毫秒，單位為，上方的棕色方柱長度為自行計算的反射係數值 (R , in dB)，其向下延伸長度代表 R 值的大小，數值參考左邊 Y 軸，單位為 dB。

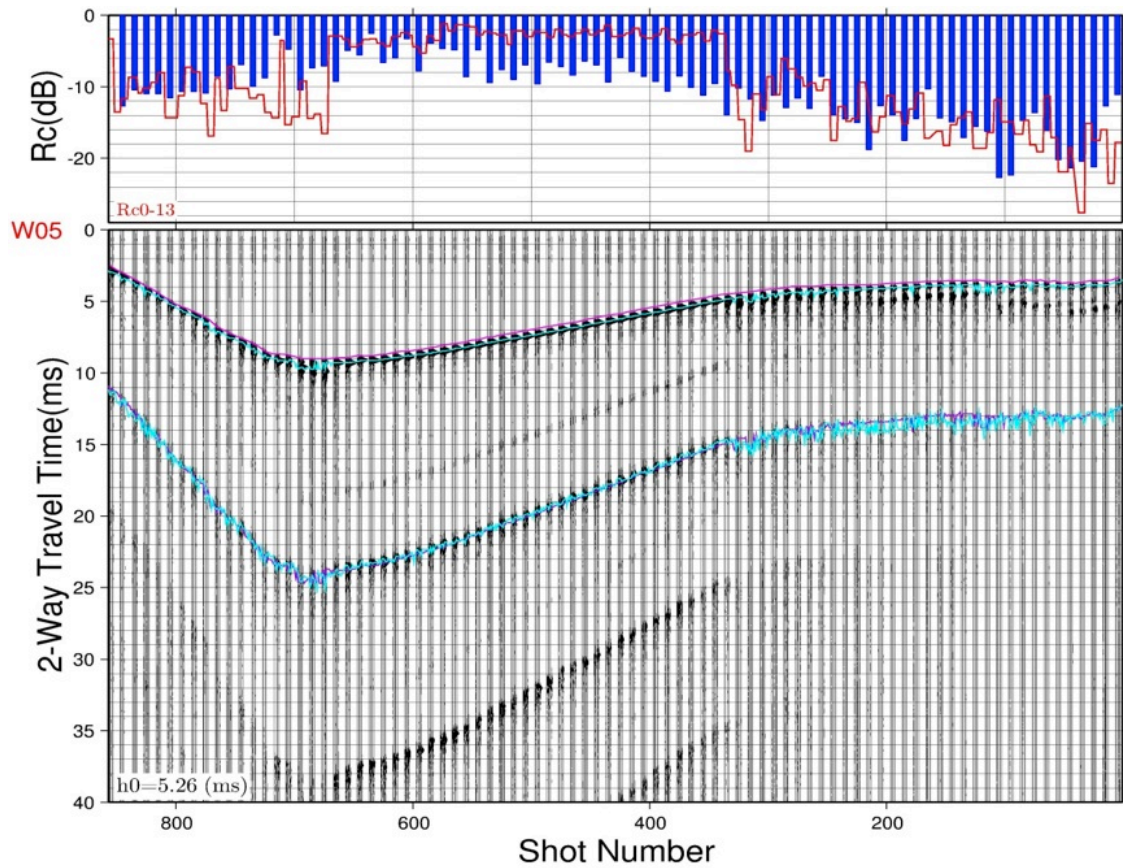


圖 34 測線 W05 反射係數沿測線變化圖（上）、聲波展示圖（下）。上圖的紅色鋸齒線表示由 3100P 測量的 R 值的變化趨勢，用與自行計算的反射係數值（方柱值）作比較；下圖中紅線位置為河床線，緊鄰的下方藍線為位在河床的聲波最強位置線，最下方的藍線為聲波複反射處訊號振幅最強的位置；橫軸為炸點編號（炸點位置可和測線圖對應），其聲波走時為雙程走時，參考左方 Y 軸標註，單位為毫秒。

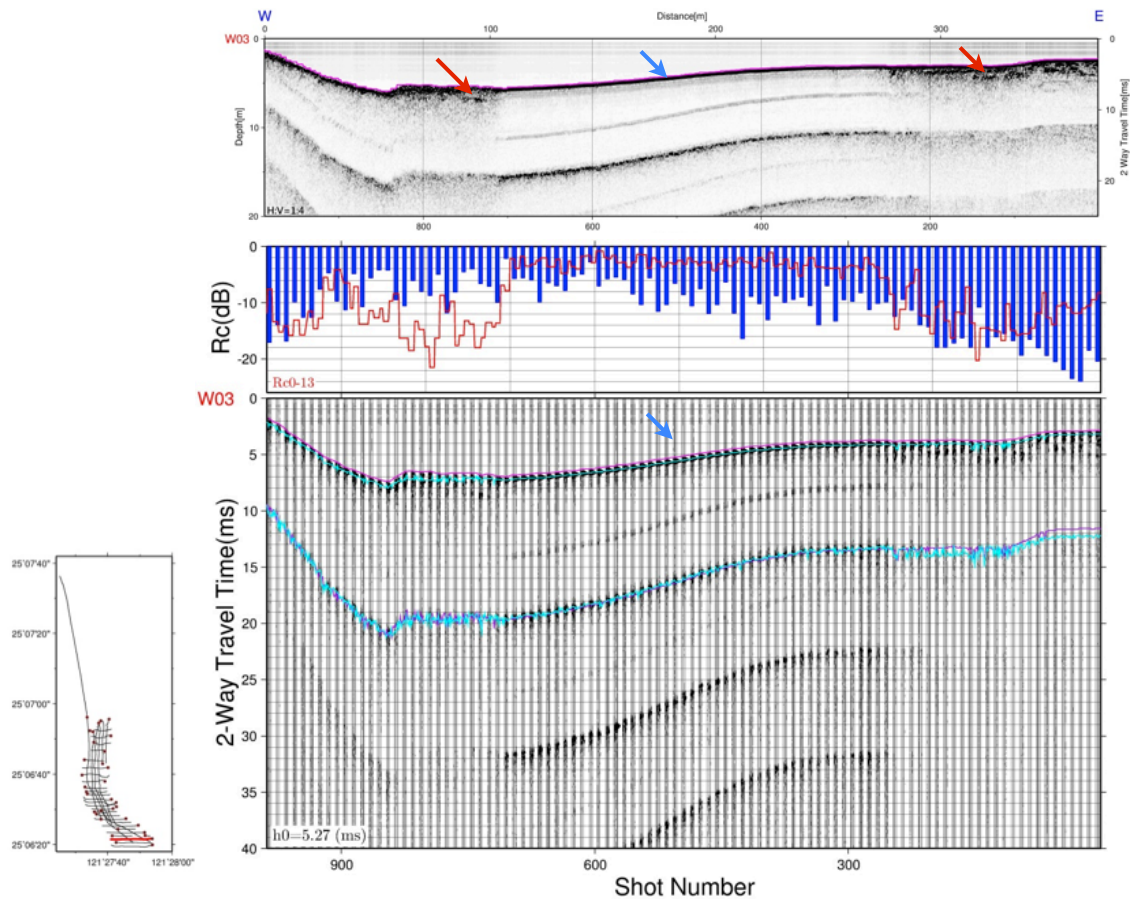


圖 35 位於測區南側測線 W03 的地層剖面圖（上）、反射係數沿剖面的變化（中）、聲波展示圖（下）。聲波圖解釋見圖 34；左下方的插圖為測線圖，圖中紅線指出本測線的位置；所有圖的橫軸為炸點編號，最上方的地層剖面圖其右邊縱軸為聲波雙程走時，單位為毫秒，以聲速 1500 m/sec 計算的深度值參考左邊 Y 軸，單位為公尺。藍色箭頭為 R 值為約 -3 dB 的硬質河床位置，其兩側硬層起伏較大，上覆有薄約 1 公尺厚的泥砂層（紅色箭頭）。所以其兩側的反射係數降小至少低於 -10 dB。

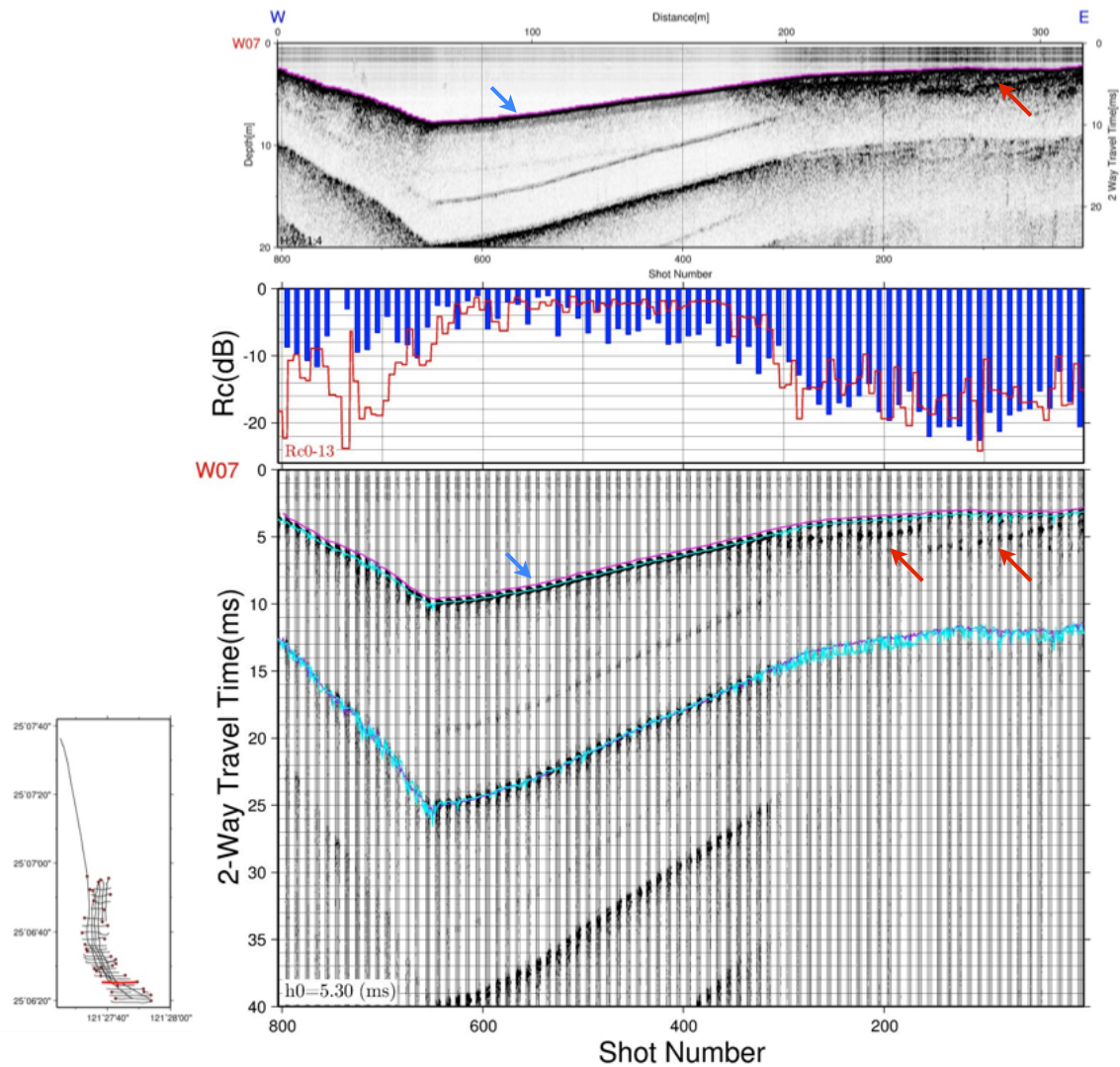


圖 36 測線 W07 的地層剖面圖（上）、反射係數沿剖面的變化圖（中）、聲波展示圖（下）。聲波圖解釋見圖 34；左下方的插圖為測線圖，圖中紅線指出本測線的位置；所有圖的橫軸為炸點編號，最上方的地層剖面圖其右邊縱軸為聲波雙程走時，單位為毫秒，以聲速 1500 m/sec 計算的深度值參考左邊 Y 軸，單位為公尺。圖上藍色箭頭表示 R 值為 -3 dB 左右的硬床位置，往東側（圖右方）延伸到較軟的泥砂層（厚度約 2~3 公尺，位置由紅箭頭指示）下方。

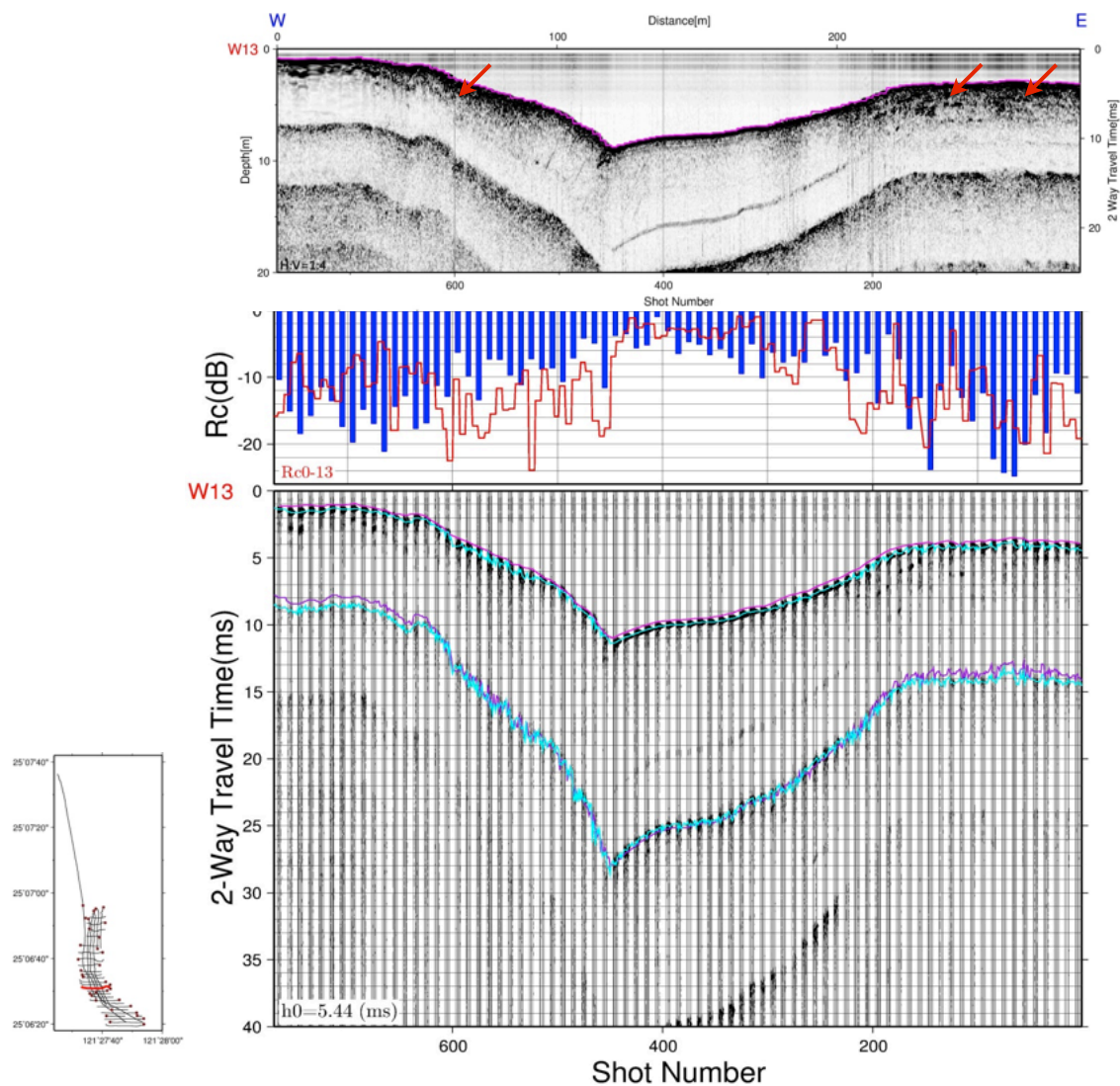


圖 37 測線 W13 的地層剖面圖（上）、反射係數沿剖面的變化（中）、聲波展示圖（下）。上圖中紅色箭頭表示河床下沉積物硬度比中央處深處河床的硬度（反射係數-3 dB）軟，地表下的沉積物分布凌亂，分層不明顯屬於淘選差的泥砂沉積物。

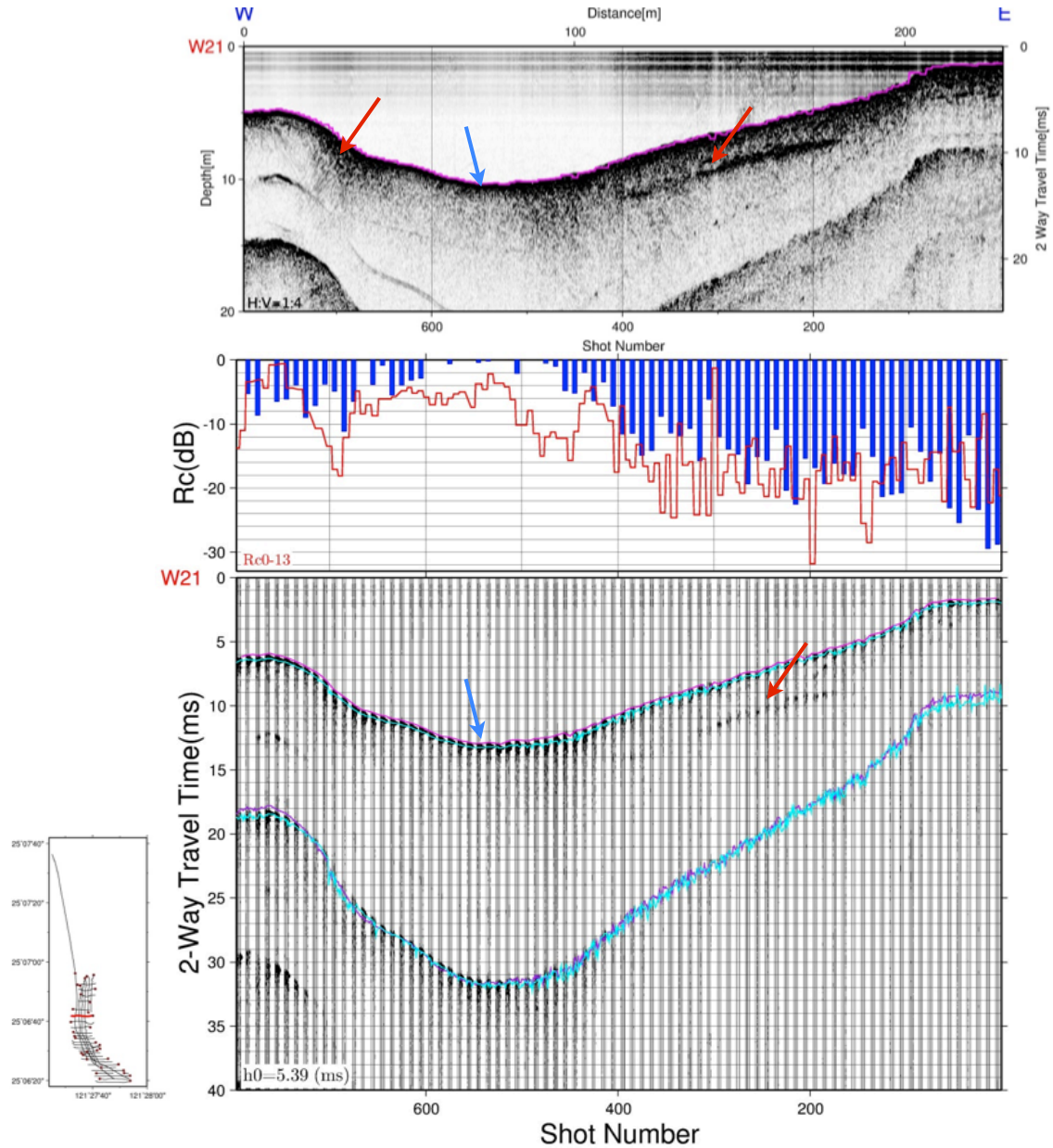


圖 38 測線 W21 的地層剖面圖（上）、反射係數沿剖面的變化（中）、聲波展示圖（下）。上圖中央深水處河床為硬質的物質（反射係數大於-3 dB），可能為礁岩床，東側（右側）紅箭頭為含有泥砂值沉積物最厚，至少有 3~4 公尺。

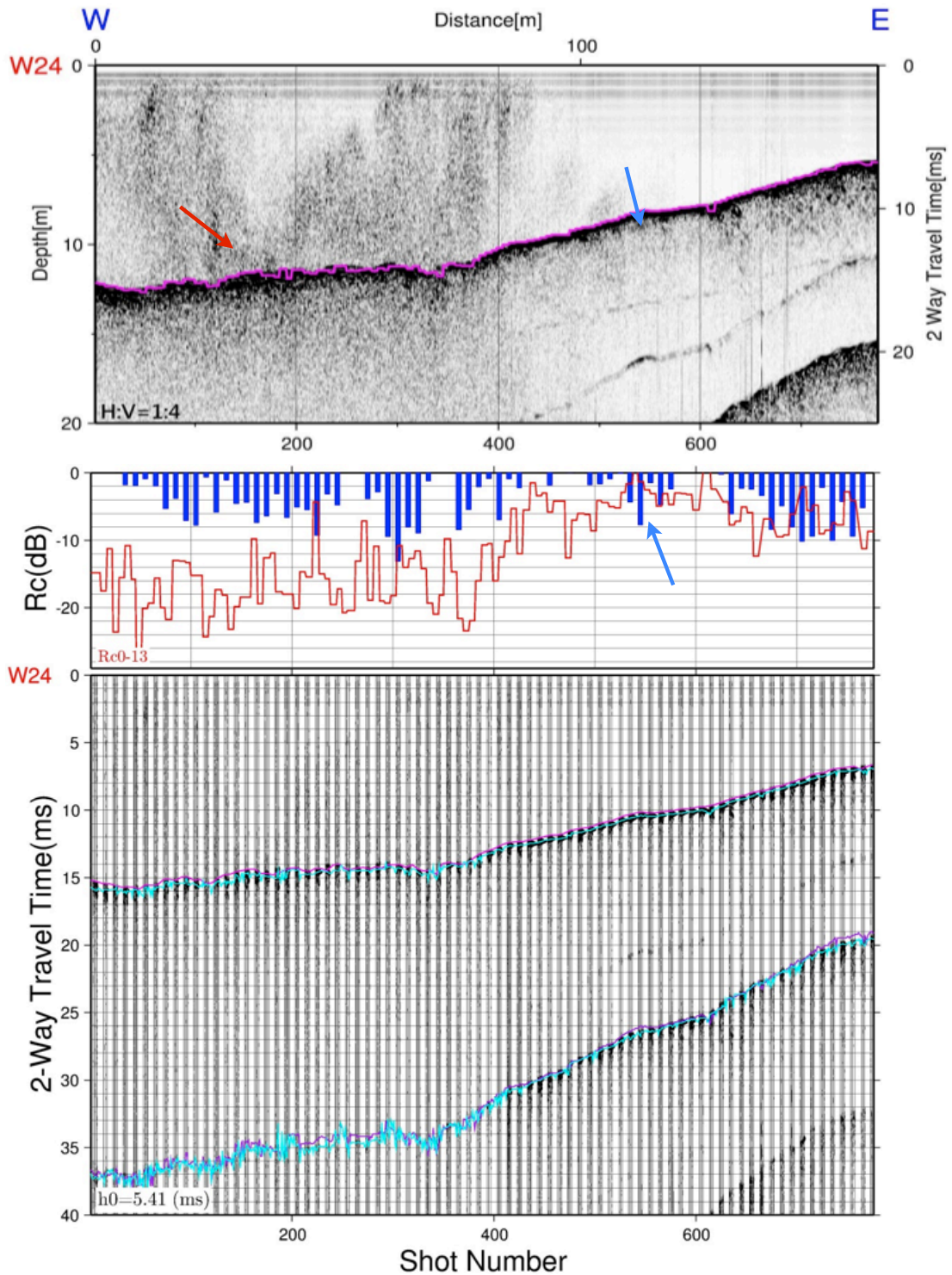


圖 39 位於淡水河和基隆河匯流處西岸測線 W24 的地層剖面圖（上）、反射係數沿剖面的變化（中）、聲波展示圖（下）。上圖東側水深較淺區為硬質的地質（反射係數約 -3 dB），可能為礁岩床，西側紅色箭頭指示處河床受水流影響，泥質底泥再懸浮於水層中，3100P 所量到的反射係數於是特別低（和自行計算的值差異大）。

由地層剖面儀探測結果，可歸納以下幾點發現：

1. 自行發展的反射係數估算的反射係數值與 3100P 現場估算數值有正向的關係，吻合度高。
2. 沿河道軸水深較深處，河床質地的物性一致，且河床平滑。聲波在此區域穿透力低，即大部分的聲波能量被反射回來。以 3100P 現場估算的反射係數值均落在-3 dB 附近，變化不大，表示其土質比砂土硬。可能因該處長年受河流沖刷，露出硬質的岩盤所致。
3. 沿河道軸水深較深處，自行發展的反射係數值偏低 (<-3 dB)，於-3 dB 到-6 dB 間變化。推估其原因可能是由於我們的計算複反射能量時，因水面反射之聲波能量受散射影響而衰減，導致入射波能量的高估，致使反射係數值低於實際值。
4. 在河道的兩側，河床部分區域被泥砂所覆蓋（圖 36～圖 38），在地形平坦處，兩種計算方法所得之反射係數值越一致，數值大多在-20 dB ~ -10 dB 之間，由 Hamilton (1970)的結論，反射係數 dB 值較大者屬於粉砂質、砂或砂質粉砂，較小者（通常 <-15 dB）屬於泥質粉砂沉積，這個結論與土壤顆粒屬性的分析結果（圖 28）吻合。
5. 若河床上沉積物再懸浮（圖 39），則 3100P 所得的反射係數值很低，甚至會小於-20 dB；但自行發展的計算式的估算值則不會有此問題，其原因為在計算最大振幅時，選取條件設定在河水-河床界面處沉積處的回波訊號。
6. 在河軸位置，測得之聲學反射係數值顯示該區底質屬於礁岩，但土樣分析結果顯示為很細的泥質或粉砂值沉積物，表示我們用抓泥器所採到的是薄薄覆蓋在硬岩上的軟泥，如樣本 21 是唯一坐落在 8 公尺的河軸處（圖 28），為所有樣本中顆粒最小的沉積物。我們因此相信在河軸硬河床上的土樣不能反映聲波遙測所算出的反射係數值分布，未來在使用地層剖面儀作表層沉積物分類時，需要參考聲納所表現的地層剖面，以表面沉積層的厚薄來辨別所估算的反射係數值，其對應界面的回波強度或平均粒徑。

5.3 側掃聲納影像與地層剖面儀結果之比較

在此利用側掃聲納影像以驗證反射係數值的分布是否與影像強弱有關。

圖 40 區域為在兩河匯流處（區域位置見圖 22），有反射係數值資料的區

域在側掃聲納影像圖的西側，圖 40 上圖為 600 kHz 的高頻側掃聲納影像結果，其波長為 2.5 mm，表示如果區域表層粗糙度在 0.8 mm 附近（屬於粗砂沉積物），會有最強的散射能量為接收器接收，在影像上會有較暗的灰點狀影像出現；下圖為 300 kHz 的低頻聲納訊號結果，其波長為 5 mm，表示如果區域表層粗糙度在 1.6 mm 附近（屬於細礫石沉積物）。

在北邊的側掃聲納探測區域，地層剖面儀探測結果顯示其表面沉積層為硬質底床，於圖 40 中所觀察到的很低 R 值（紅色等值線）應是懸浮層所致，側掃聲納圖上沒有看到明顯的散射能量，表示該區河床沒有粗砂的表面沉積，此結果與反射係數值一致；另外，亦發現側掃聲納影像中反映出河床上有紋路的區域（如北側和最西側），於該處反射係數值就顯得較高接近 -10 dB，代表這些地方河床上比較沒有泥質沉積覆蓋或被河流揚起的懸浮物。

位於南邊的側掃聲納區，由影像圖（圖 41）可以很明顯看到河軸深處的區域河床光滑，回散射能量最低，該區域的反射係數值分布具有區域代表性，都是屬於反射係數值接近 -4 dB 的地方，故也代表該處底質的特異環境，表示側掃影像和地層剖面儀的結果呈現相同指標。但，由於地層剖面儀使用的聲波頻率比側掃聲納低幾十倍，所以側掃聲納（尤其是 600 kHz 訊號）得到覆蓋在硬岩床表面薄泥沉積物所回來的弱訊號，與地層剖面儀穿過泥層所回來的強訊號不同。另外在河谷軸外側河床，特別在河道東側，側掃聲納明顯看到河床上出現沉積物移動生成的不規則小型含泥的砂質波痕，表示該處河床是被細質的沉積物所覆蓋。

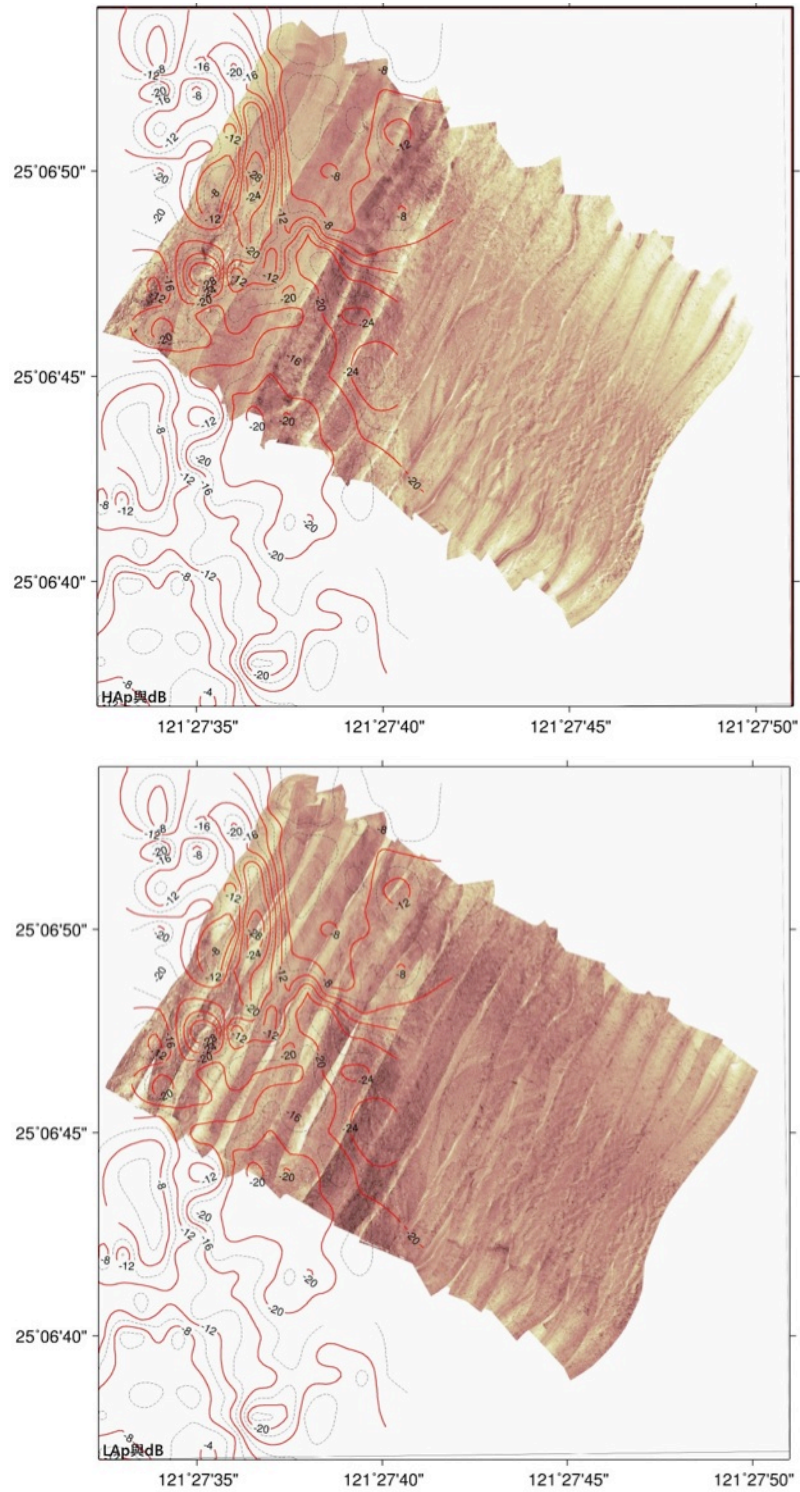


圖 40 北邊水域之側掃聲納影像圖：（上）高頻影像，（下）低頻影像。暗色表示較強的回聲影像訊號，上圖的紅色等值線數值為 R 值，單位為 dB。

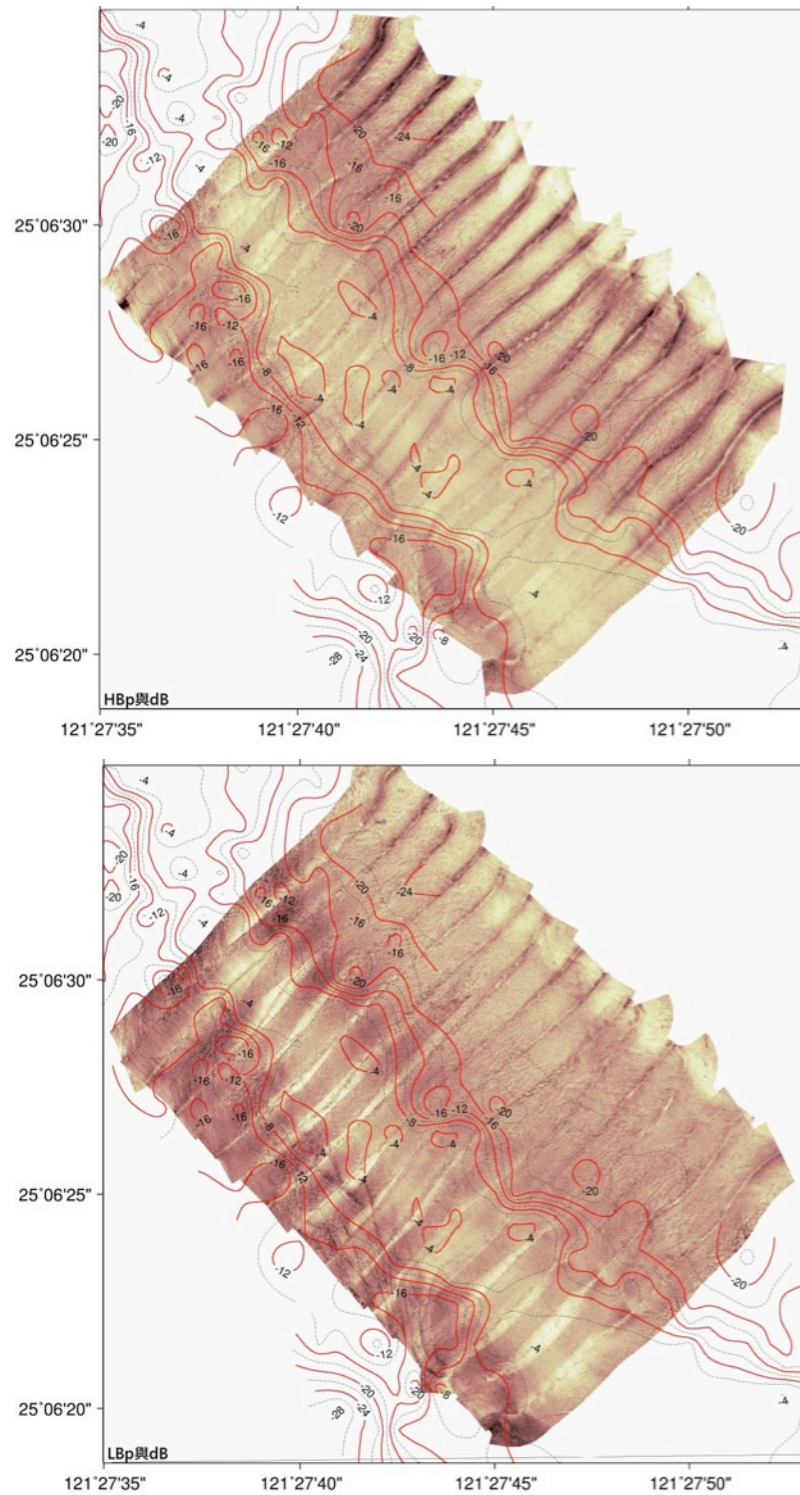


圖 41 南側水域之側掃聲納影像圖：上圖為高頻影像，下圖為低頻影像

第六章結論與建議

綜合以上分析結果，本研究之結論如下：

1. 沉積物的物理性質（如平均粒徑、孔隙率等）與聲學性質（正向反射係數）之間的相關複雜。本研究發現當沉積物的淘選度佳時，即沉積物顆粒分佈較集中的情況下，平均粒徑 Φ 值較具代表性，且該值與反射係數（ R , dB）值間呈正比關係。

2. 有關沉積物屬性 (sediment type) 的估算，本研究依沉積物之砂、粉砂、黏土的比值來對沉積物進行分類，結果顯示聲學遙測所獲得之河床沉積物屬性與現場土樣採樣分析結果一致。

3. 若表層底泥的厚度與使用波形所提供的空間解析度一致，則測得的反射係數值反映了表層底泥的總體聲學性質（聲阻抗）。若表層底泥厚度較聲波解析度小時，則反射係數值主要受次底層底泥的聲阻抗影響，其值反映次底層底泥的性質。

根據本團隊多次利用地層剖面儀執行海/河床調查的經驗，聲學遙測方法不適用於水深太淺的環境，若水深太淺，則地層剖面儀/側掃聲納的拖魚容易在探測過程中撞到河床，將造成儀器損傷。本研究證明了運用地層剖面儀於河口區域探測底泥性質的可行性，此技術可應用在河海工程上，提供快速且大範圍的底泥性質探勘，以利工程的進行。

參考文獻

1. Baldwin, K. C., LeBlanc, L. R., and Silva, A. J., 1985. Analysis of 3.5 kHz acoustic reflection and sediment physical properties, *Ocean Eng.*, 12, 475-492.
2. Chen, M.P, Shieh, Y.T and Chyan, J.M., 1988. Acoustic and physical properties of surface sediments in the northern Taiwan Strait. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 21, 92-118.
3. Davis, K.S., et al., 1996. Acoustic backscatter and sediment textural properties of inner shelf sands, northeastern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters*. 16(3), 273-278.
4. EdgeTech, *Discover X-STAR Sub-bottom Profiler Processor Software: Technical & User's Manual*, 2003.
5. Fass, R.W., 1969. Analysis of the relationship between acoustic reflectivity and sediment porosity. *Geophysics*. 34 (4), 546-553.
6. Goff, J.A., et al., 2004. Seabed characterization on the New Jersey middle and outer shelf: correlatability and spatial variability of seafloor sediment properties, *Marine Geology*. 209, 147-172.
7. Ha, H.K., Maa, J.P.Y., and Holland, C.W., 2010, Acoustic density measurements of consolidating cohesive sediment beds by means of a non-intrusive 'Micro-Chirp' acoustic system: *Geo-Marine Letters*, v. 30, 585-593.
8. Hamilton, E.L., Shumway, G., Menard, H.W., and Shipek, C.J., 1956. Acoustic and other physical properties of shallow water sediments off San Diego. *Journal of the Acoustical Society of America*. 28, 1-15.
9. Hamilton, E.L., 1970. Reflection coefficients and bottom losses at normal incidence computed from Pacific sediment properties. *Geophysics*. 35 (6), 995-1004.
10. Hamilton, E.L., 1971. Elastic Properties of marine sediments, *J. Geophysics. Res.*, 76, 579-604.

11. Hamilton, E.L., 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediment. *Geophysics*. 37, 620-646.
12. Hamilton, E.L., and Bachman, R.T., 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *Journal of the Acoustical Society of America*. 72 (6), 1891-1904.
13. Hovem, J. M., and Ingram., G. D., 1979. Viscous attenuation of sound in saturated sand. *Journal of the Acoustical Society of America*. 66(6): 1807–1812.
14. Huang, C.-F. and Hodgkiss, W. S., 2004. Matched field geoacoustic inversion of low frequency source tow data from the ASIAEX East China Sea experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29: 952–963.
15. Huang, C.-F., Gerstoft, P. and Hodgkiss, W. S., 2006. Uncertainty analysis in matched-field geoacoustic inversions. *Journal of the Acoustical Society of America*. 119(1): 197–207.
16. Huang, C.-F., Gerstoft, P. and Hodgkiss, W. S., 2006. Validation of statistical estimation of transmission loss in the presence of geoacoustic inversion uncertainty. *Journal of the Acoustical Society of America*. 120(4): 1932–1941.
17. Lafferty, B., Quinn, R., and Breen, C., 2006. A side-scan sonar and high-resolution chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of Lower Lough Erne, northwestern Ireland. *Journal of Archaeological Science*, 33(6):756–766.
18. LeBlanc, L.R., Middleton, F.H., Nacci, V.A., and Cohn, R.F., 1980. Correlation between estuarine sea-floor acoustic reflection signatures and engineering sediment measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*. 68 (4), 1135-1141.
19. LeBlanc, L.R., Schock, S.G., and Mayer, L., 1986. Sediment attenuation measurements using high-resolution chirp sonar. *Geophysics*. 51 (7), 1517.
20. LeBlanc, L.R., Mayer, L.A., Rufino, M., Schock, S.G., and King, J., 1992a. Marine sediment classification using the chirp sonar, *Journal of the*

- Acoustical Society of America. 91 (1), 107-115.
21. LeBlanc, L.R., Panda, S., and Schock, S.G., 1992b. Sonar attenuation modeling for classification of marine sediments, *Journal of the Acoustical Society of America*. 91(1), 116-126.
 22. Lurton, X. *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer, New York, 2010.
 23. Nitsche, F.O., Bell, R., Carbotte, S.M., Ryan, W.B.F., Flood, R., 2004. Process-related classification of acoustic data from the Hudson River Estuary, *Marine Geology* 209(1-4): 131-145.
 24. Shepard, F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios, *Journal of Sedimentary Petrology* 24 (3): 151-158.
 25. Schock, S.G., LeBlanc, L.R., Mayer, L.A., 1989. Chirp sub-bottom profiler for quantitative sediment analysis, *Geophysics* 54 (4), 445-450.
 26. Schock, S.G., LeBlanc, L.R., 1990. Chirp sonar: new technology for sub-bottom profiling, *Sea technol.* 31, 35-43.
 27. Schock, S.G., 2004. Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using chirp sonar data and the Biot model. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 29, 1218-1230.
 28. Schock, S.G., 2004. A method for estimating the physical and acoustic properties of the sea bed using chirp sonar data. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 29(4), 1200-1248.
 29. T. K. Stanton and D. Chu. Calibration of broadband active acoustic systems using a single standard spherical target. *J. Acoust. Soc. Am.*, 124(1):128–136, 2008.
 30. Shumway, G., 1960. Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method. *Geophysics*. 25, 451-467.
 31. Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*. 30(5): 377-392.
 32. 宋國士、王崇武、楊明恩，2008，台北市河域水上運動整合發展之研

- 究。台北市政府體育處。
33. 任國治，1994，由 3.5 仟赫聲納數位化訊號探討聲波在海床表層沉積物中的衰減性質。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文。
 34. 劉金源，2002，海洋聲學導論－海洋聲波傳波與粗糙面散射之基本原理。國立中山大學：共321頁。
 35. 劉家瑄，邱瑞焜，2005，連續變頻聲納在海洋環境調查上之應用，海洋及水下科技季刊，第十五卷，第二期。
 36. 蔡明格，2011，臺灣東北海域反算底質音響參數分析研究，國立臺灣大學工科海洋工程研究所碩士論文。
 37. 臧振華、劉金源等團隊成員，2011，臺灣附近海域水下文化資產第二階段普查計畫（99-101 年度）第二年度調查計畫成果報告，臺中：文建會文化資產籌備處委託執行。
 38. 江定遠，2013，變頻聲納對海床表面底質分類的應用研究，國立臺灣大學海洋研究所碩士

附錄 A 關渡底泥採樣調查實驗紀錄關渡採樣調查實驗紀錄

時間：2014/8/14

地點：淡水關渡

天氣：晴朗炎熱

人員：臺灣大學－黃千芬、宋國士、陳彥翔（拍照）、全球公司－蔡尚儒、方永吉、羅家興、呂宴陞

儀器：側掃聲納、抓泥器、GPS 衛星定位系統

實驗規劃：



圖 42 底泥採樣調查點位示意圖

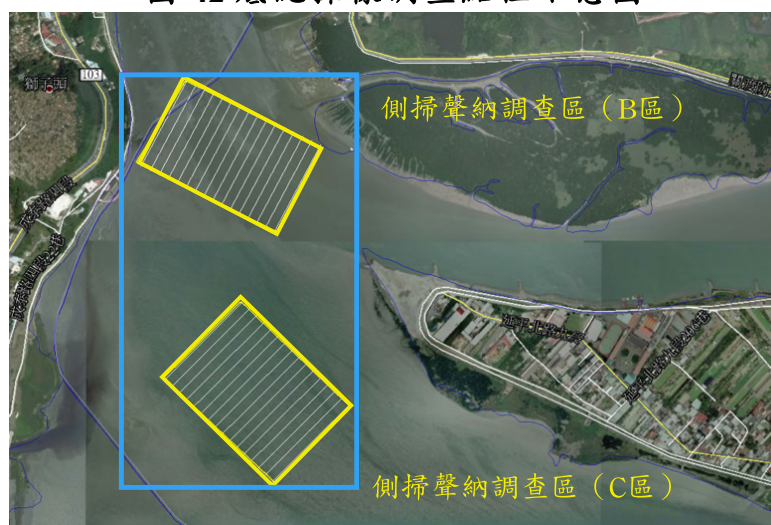


圖 43 側掃聲納調查規劃測線

實驗紀錄：

9：30 船長抵達關渡碼頭，作業人員把儀器搬上船。包含側掃聲納拖魚與主機、抓泥器、發電機（供側掃聲納）、GPS 系統以及淺水裝備。



圖 44 （左）20140814 實驗船隻；（右）搬運發電機



圖 45 （左上）側掃聲納與抓泥機；（右上）側掃聲納準備作業；
（下）GPS 衛星定位系統準備作業

9：50 抵達採樣點位點位 03。一開始，使用抓泥機進行採樣，其原理是利用重量，在下沉到河床時的撞擊力，使得固定張開抓泥機用的卡榫給鬆開，讓抓泥機合起來抓取底泥。但是因水深淺，導致抓泥機下沉無法穩定的鬆開卡榫，必須嘗試多次才能成功抓取底泥，一來恐會擾亂底泥表層，二來抓泥機很重，即使有三人合力施放也感吃力，當抓泥機成功抓取底泥時，其重量又更加重。因此僅第一站使用抓泥機採取樣本。

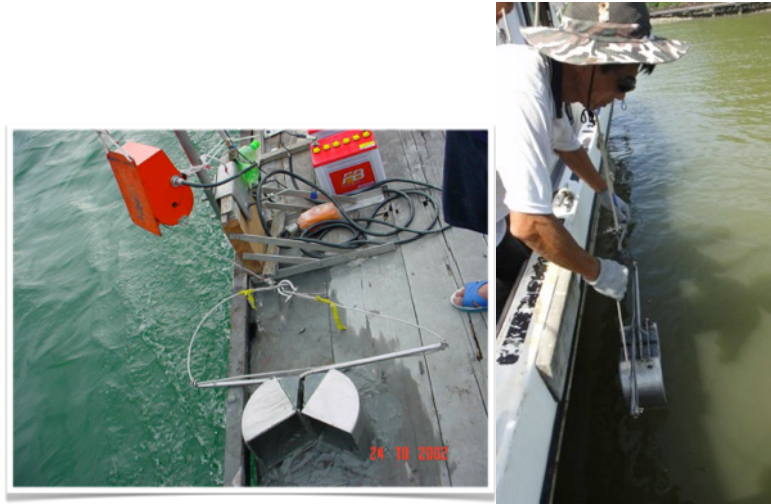


圖 46 原預計使用的抓泥機，因沒有機器協助，人力無法拉起，因此放棄使用，之後更改為使用底拖式取底泥樣本

10：00 抵達點位點位 07。在此使用由船長提供的底拖式採樣網。首先將網子倒蓋讓它下沉，並在繩子中間掛上浮球。接著船長會駛離該點拖行網子，讓底泥進入網子當中。因浮球作用，網子會隨即上浮，不會與周圍底泥混合。在取完底泥樣本之後，進行網子清洗作業，以免混入上一個採樣點的



圖 47（左）拖行時將浮體固定在繩子上，讓網子在脫離採樣點位之後，因船速使得網子浮起來，避免混到周圍底泥；（右）拖行時的樣子



圖 48（左）使用底拖式的網子進行底泥採樣；（右）每採一個點位後進行清洗作業

10：03 抵達點位 11，進行採樣。因拍照人員協助採樣，沒有拍照。

10：10 抵達點位 16，進行採樣。

10：16 抵達點位 21，進行採樣。

10：21 抵達點位 26，進行採樣。

10：26 使用底拖式採樣（點位 30）

10：30 小插曲：飛魚直接飛到陳彥翔的臉上，抓起後放生



圖 49 野生的飛魚

10：34 抵達點位 29，底拖式採樣。

10：37 抵達點位 28，底拖式採樣。

10：41 抵達點位 23，底拖式採樣。

10：47 抵達點位 24，底拖式採樣。

10：52 抵達點位 25，底拖式採樣。

10：58 抵達點位 20，底拖式採樣。

11：03 抵達點位 19，底拖式採樣。

11：09 抵達點位 15，底拖式採樣。

11：14 抵達點位 14，底拖式採樣。

11:19 抵達點位 10，底拖式採樣。

11:26 抵達點位 9，底拖式採樣。點位 10 與 09；因陳彥翔操作抓泥網，而替換人員因手無力休息中，因此沒有抓泥時的照片。

11：30 抵達點位 8，底拖式採樣。

11：35 使用底拖式採樣（點位 04）

11：39 抵達點位 5，底拖式採樣。

11：45 抵達點位 6，底拖式採樣。

11：50 抵達點位 2，底拖式採樣。

11：54 抵達點位 1，底拖式採樣。

詳細點位資訊（含 GPS、水深、時間等）見附錄 E：土樣的形貌照片。

12:00 底泥樣本採集完成，部分點位因為水深過淺，無法採集。接著開始進行側掃聲納資料收集。依照原先規劃的側線，依序跑完兩個區域的資料收集。



圖 50 實驗所使用的側掃聲納



圖 51 從船側身下放側掃聲納



圖 52 側掃聲納拖行狀態

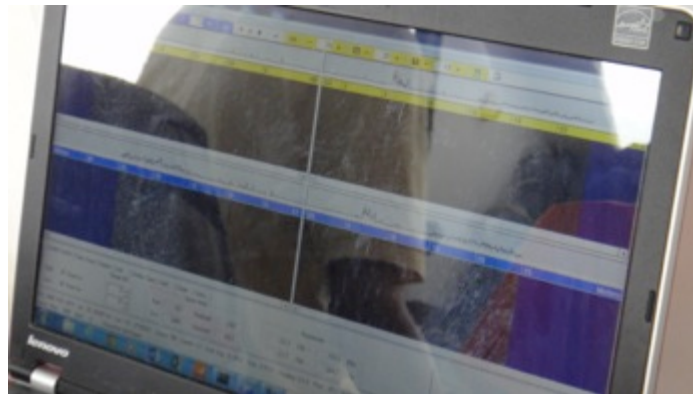


圖 53 同步記錄與顯示的側掃聲納操作主機



圖 54 操作人員



圖 55 回收側掃聲納作業

附錄 B 碧砂漁港儀器校正記錄

時間：2014/9/19

地點：基隆碧砂漁港



圖 56 儀器校正位置示意圖

天氣：氣溫 27°—33°，多雲時陰陣雨

人員：臺灣大學—黃千芬、宋國士、陳彥翔（拍照）、楊橋、全球測繪公司—劉佩琨、羅家興

儀器：地層剖面儀

實驗目的：

為了能量測正確的反射係數，需要將地層剖面儀進行校正。校正方式為將地層剖面儀上下顛倒的放入水中，在水面是平靜的情況下，其接收到來自水面的正向反射波可當做是全反射情況，藉由調整地層剖面儀距離水面的深度，來了解實際操作儀器時，在不同水深情況下，該如何校正反射係數。

實驗紀錄：

10:10 分：將地層剖面儀倒放，並利用吊車將其吊起，使用水平儀來確保地層剖面儀放入水中時其底部（現在為朝上的部分）是水平的狀態。



圖 57 藉由調整連結吊車吊臂的帶子來控制地層剖面儀的狀態



圖 58 因地層剖面儀前端置有負重物，以利正常施放時不會受水流影響而翻轉，因此重量並不平均，所以難以平衡儀器。

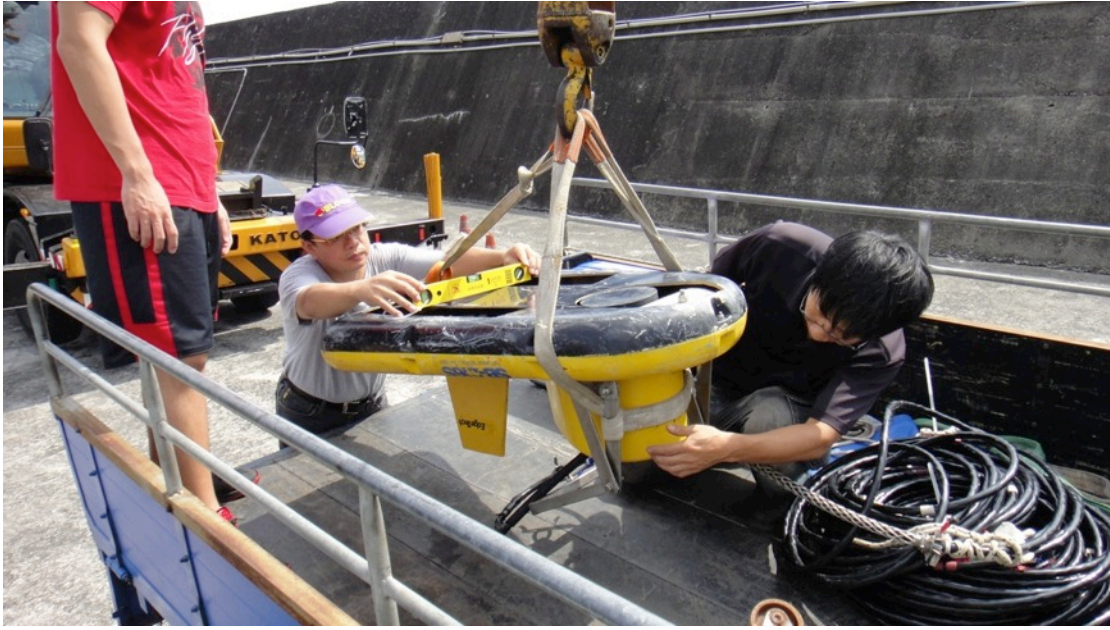


圖 59 除了前後平衡外，左右也需要進行調整



圖 60 確認地層剖面儀的平衡狀態

10:26 完成地層剖面儀的平衡校正後，利用吊車將地層剖面儀放入水中。



圖 61 藉由吊車將地層剖面儀吊起，並放入水中。為確保儀器纜線的安全，因此劉博士與操作員逐步延伸纜線。



圖 62 儀器逐漸接近水面，此時水面相當平靜，估計水面波高約 1-3 公分

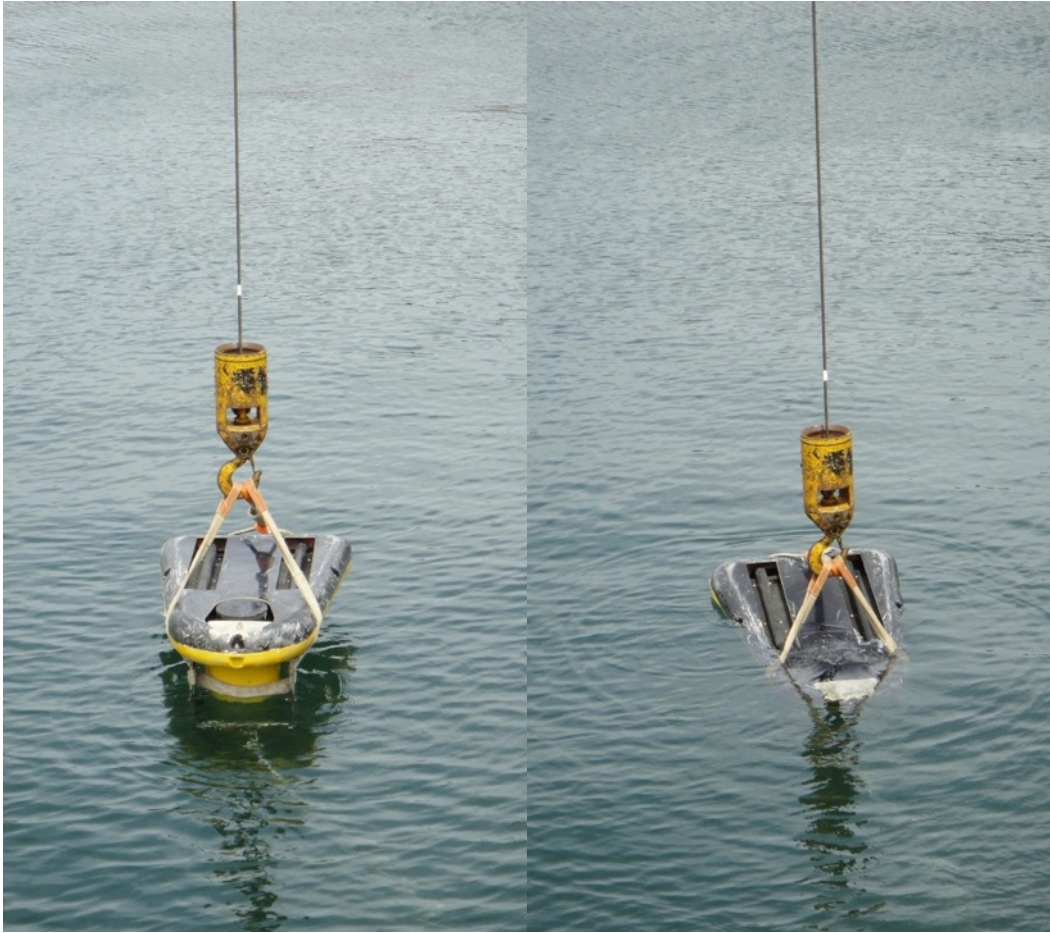


圖 63 (左) 逐漸接近水面；(右) 因前端負重物影響，導致儀器下水後的平衡被打亂，需要重新調整

10:29 重新調整地層剖面儀的平衡，再次利用吊車將地層剖面儀放入水中。



圖 64（左）調整後的儀器平衡狀態，使前端稍微翹起，這樣進入水中後因負重會下沉較多，使得儀器在水中是平衡狀態；（右）儀器進入水中後呈現平衡狀態

10:31 準備地層剖面儀操作主機



圖 65（左）地層剖面儀操作主機；（右）實際操作的電腦畫面

10:45 將地層剖面儀下放至離水面 1 公尺處，進行反射係數量測



圖 66 利用在吊車剛纜上所做的距離記號（白色標籤），將儀器下放至離水面 1 公尺處

10:50 將地層剖面儀下放至離水面 4 公尺處，進行反射係數量測



圖 67 利用在吊車剛纜上所做的距離記號（白色標籤），將儀器下放至離水面 4 公尺處

11:17 因調整地層剖面儀的下放深度至 2 公尺，故將地層剖面儀吊起，重新標籤深度

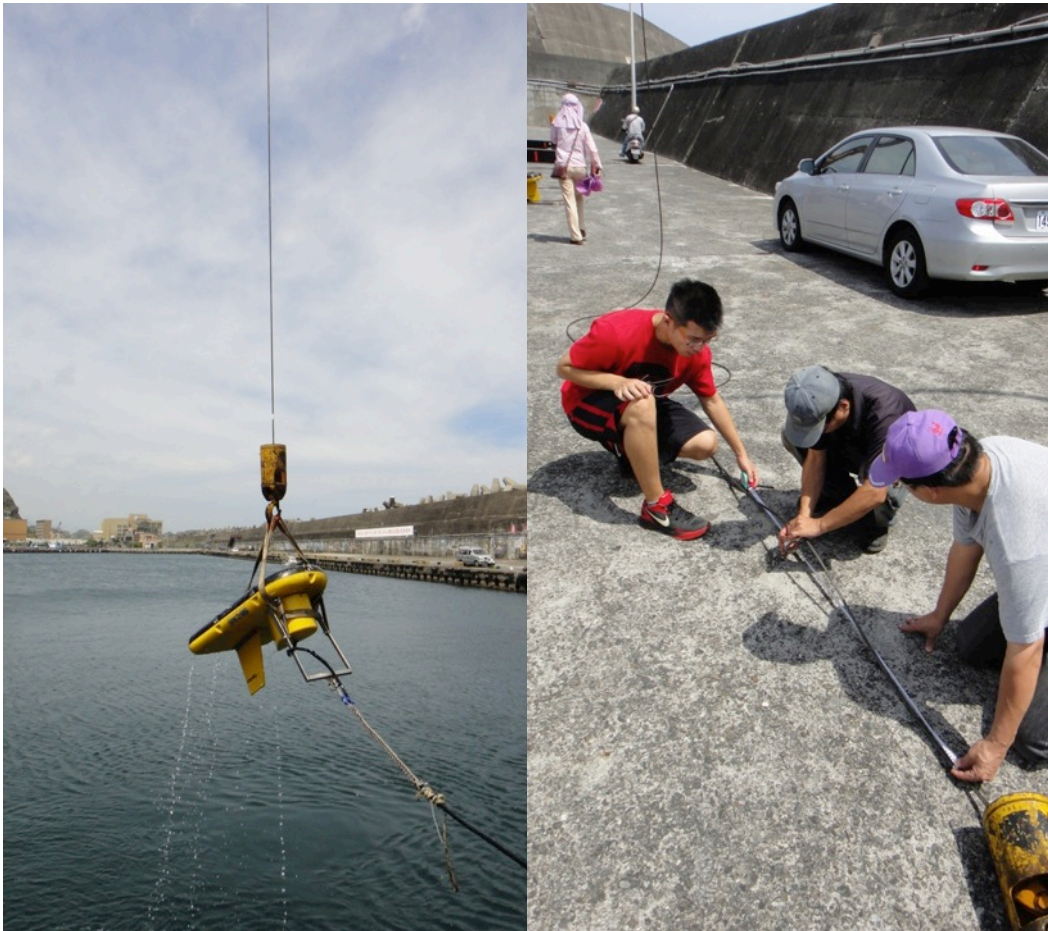


圖 68（左）吊起地層剖面儀的情況；（右）重新在吊車纜線上標記距離

11:21 重新下放地層剖面儀至離水面 2 公尺處，以模擬實際在關渡操作時的水深



圖 69（左）重新下放地層剖面儀；（右）下放至離水面 2 公尺處

11:22 根據不同水深（離水面的距離），進行反射係數的校正。而風隨著時間逐漸增大（鳳凰颱風），使得水面波高逐漸增高，實驗結束時估計波高約 5 公分。

※ 詳細實驗參數見表 7。

11:55 完成調查，回收儀器作業



圖 70 把地層剖面儀從水中吊起，此時水面因受風吹影響，水面波高估計約 5 公分



圖 71 (左) 邊將儀器吊起，邊收拾儀器纜線；(右) 將儀器吊至車上

表 7 SBP 校正參數紀錄

時間	深度 (m)	波形	反射係數校正值	發射聲波能量 %
10:49	4	1	40	1
10:58	4	1	0	1
11:00	4	2	0	1
11:02	4	2	40	1
11:03	4	3	0	1
11:05	4	3	40	1
11:23	2	1	0	50
11:26	2	1	30	50
11:29	2	2	0	50
11:31	2	2	30	50
11:33	2	3	0	50
11:35	2	3	30	50
11:40	4	1	0	50
11:41	4	1	30	50
11:43	4	2	0	50
11:45	4	2	30	50
11:47	4	3	0	50
11:48	4	3	30	50

附錄 C 關渡 SBP_SS 實驗記錄

時間：2014/9/25

地點：淡水關渡

天氣：晴朗炎熱，偶爾有雲

人員：臺灣大學－黃千芬、宋國士、陳彥翔（拍照）、全球公司－劉佩琨、
蔡尚儒、方永吉、羅家興

儀器：地層剖面儀(Sub-Bottom Profiler, SBP)、側掃聲納(Sidescan Sonar, SS)、GPS 衛星定位系統

路徑規劃：

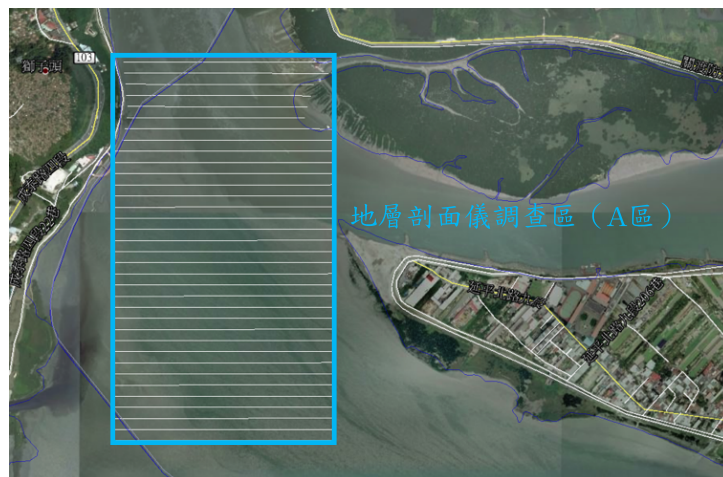


圖 72 地層剖面儀規劃側線

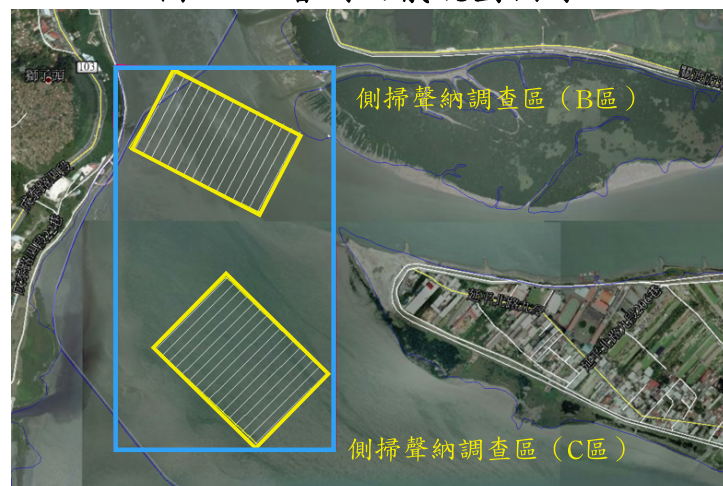


圖 73 側掃聲納調查規劃測線

實驗紀錄：

9：00 作業人員把儀器搬上船。包含地層剖面儀拖魚與主機、側掃聲納拖魚與主機、發電機、GPS 系統。



圖 74 本次實驗船隻

(a)



(c)



(b)



圖 75(a)地層剖面儀；(b)側掃聲納；(c)GPS 衛星定位系統

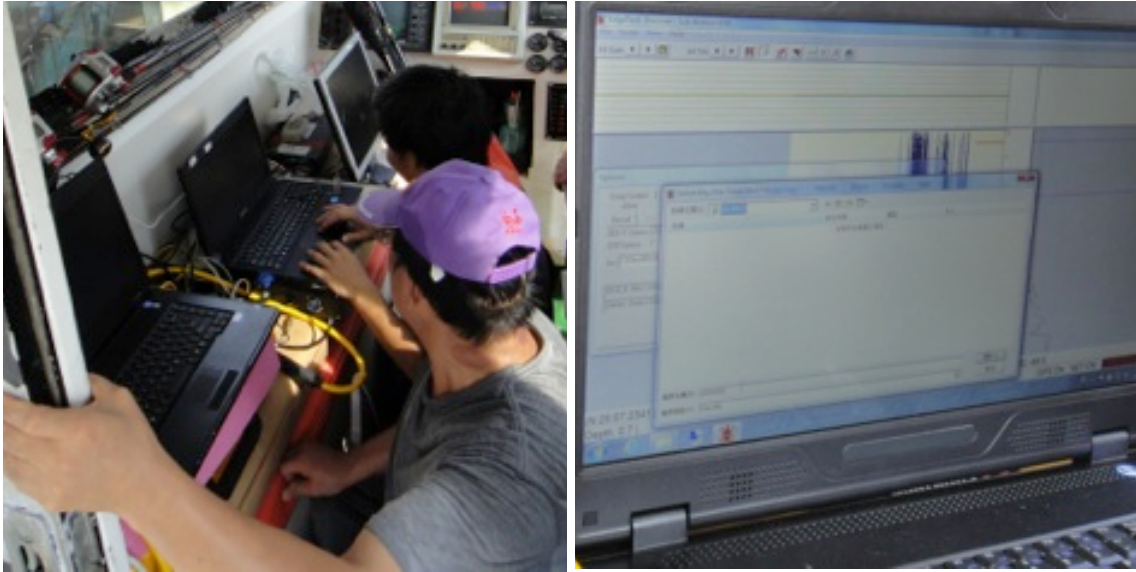


圖 76 船內儀器主機準備中



圖 77 地層剖面儀下水準備

9:33 地層剖面儀 SBP 準備工作完成，並準備下放至離水面 3 公尺。並移動至最北邊的測線，準備開始跑測線。



圖 78 地層剖面儀下水

9:45 抵達最北邊測線，從北而南依序為測線 1、測線 2 測測線 36。因主要為測量表層底泥的反射係數，不需要使用太大的能量，故儀器 power 設定為 50，經由先前校正測試，反射係數校正參數設定為 30。

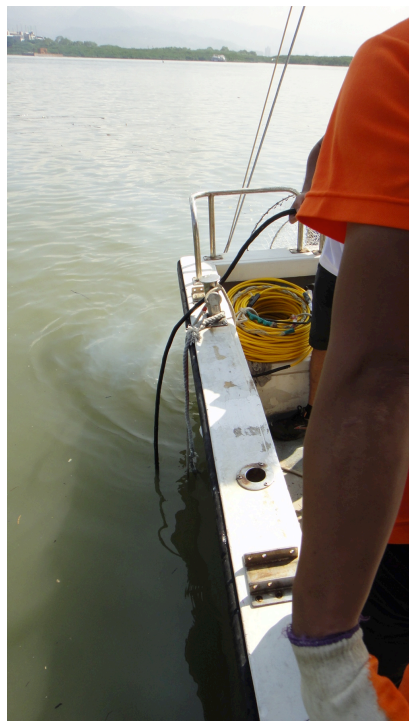


圖 79 執行測線 1

9：53 因水深過淺，SBP 容易觸底，故將其位置改為水下 2 公尺。同時為避免螺旋槳噪音，將 SBP 移至船側中央處，並以水深較深的測線 3 進行測試。



圖 80 將 SB 移至船側中央處，深度為水下 2 公尺

9：57 收到的訊號不好，重跑一次測線 3。

10：04 SBP 仍然會觸底，因此改為水面下 1 公尺，重跑測線 3。

10：09 訊號仍然有問題，推測是船中央底部的測深機干擾，改為水面下 0.5 公尺，重跑測線 3。

10：14 訊號改善，返回跑測線 2。

10：18 跑測線 4。

10：21 跑測線 1。

10：25 跑測線 5。因訊號異常，懷疑勾到漂流物，拉起 SB，並進行清除。



圖 81 清除 SBP 上勾到的漂流物

10：29 重跑測線 5。

10：33 以 3-4 分鐘一條測線的速度，依序跑完剩下的測線。

12：47 完成 SBP 調查作業。



圖 82 SBP 回收情形

13：16 準備 SS 儀器，經評估後，決定固定在離船頭約 1/3 處的左舷，深度為水下 1.5 公尺。



圖 83 SS 儀器準備情形與施放情形



圖 84 因直接用纜線進行拖曳作業，以短繩固定纜線於船側；檢查纜線吃力狀況



圖 85 監看 SS 作業時纜線狀況

14：45 完成 SS 兩區域調查作業。

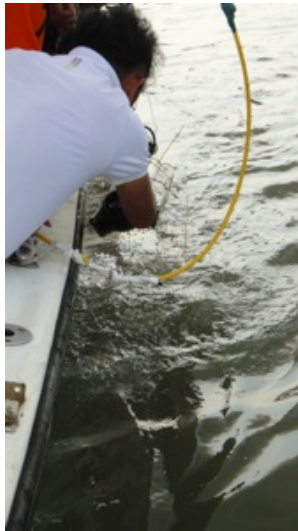


圖 86 回收 SS 作業

附錄 D 關渡 SBP 實驗記錄

時間：2014/10/09

地點：淡水關渡

天氣：陰時陣雨

人員：臺灣大學－宋國士、黃千芬、陳彥翔（拍照）、全球公司－劉佩琨、蔡尚儒、方永吉、羅家興

儀器：地層剖面儀 (Sub-Bottom Profiler, SBP)、GPS 衛星定位系統

實驗紀錄：

10：40 作業人員把儀器搬上船。包含地層剖面儀拖魚與主機、發電機、GPS 系統，搬運完成後駛離碼頭。

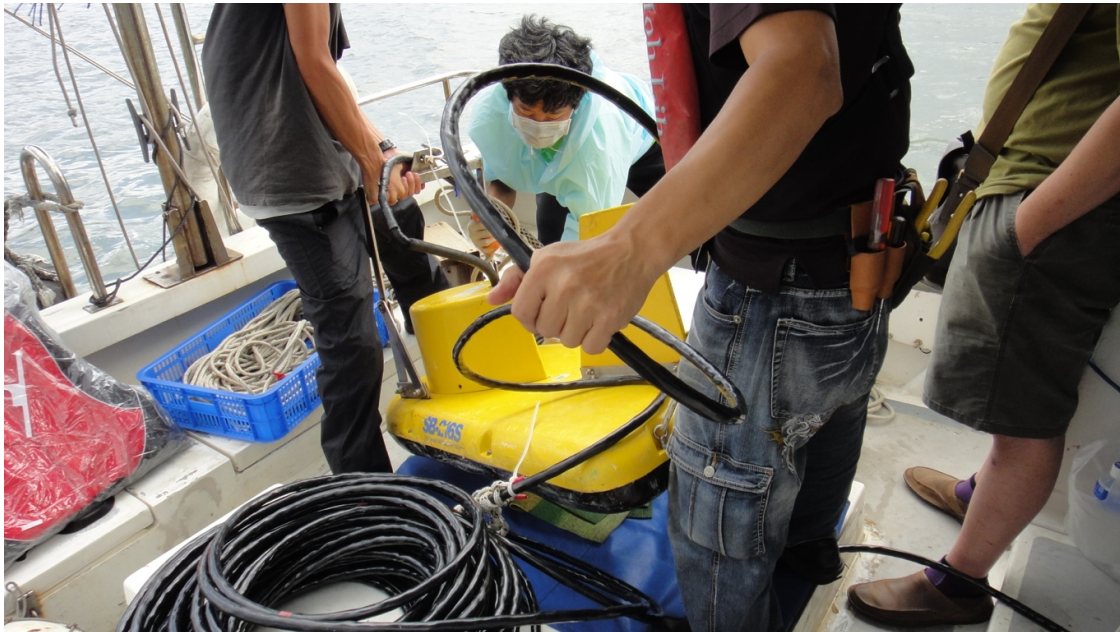


圖 87 地層剖面儀

10：47 於船左舷後側施放地層剖面儀，並開始跑中央測線。



圖 88 於船左舷後側施放地層剖面儀

10:50 為了讓拖魚在船跑測線時，能在船的左後方，藉由在拖魚的兩側分別用兩條長度不同的繩子固定，因此在移動時，為了讓兩條繩子平均受力，因此儀器會稍微往船的外側偏，希望能降低船引擎發出的噪音。

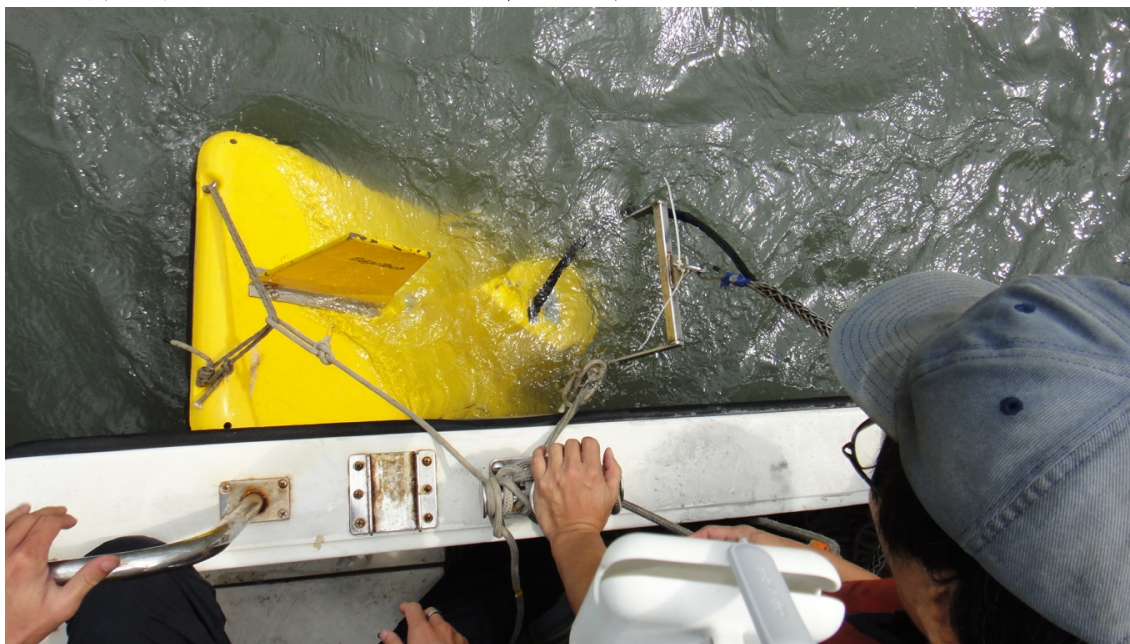


圖 89 先將拖魚固定在船側，討論該如何固定



圖 90 因無法從拖魚的其他地方找出合適的固定點，只好從拖魚右側底部拉一條繩子固定



圖 91 將拖魚以兩條繩子固定：中央纜線以及右側底部

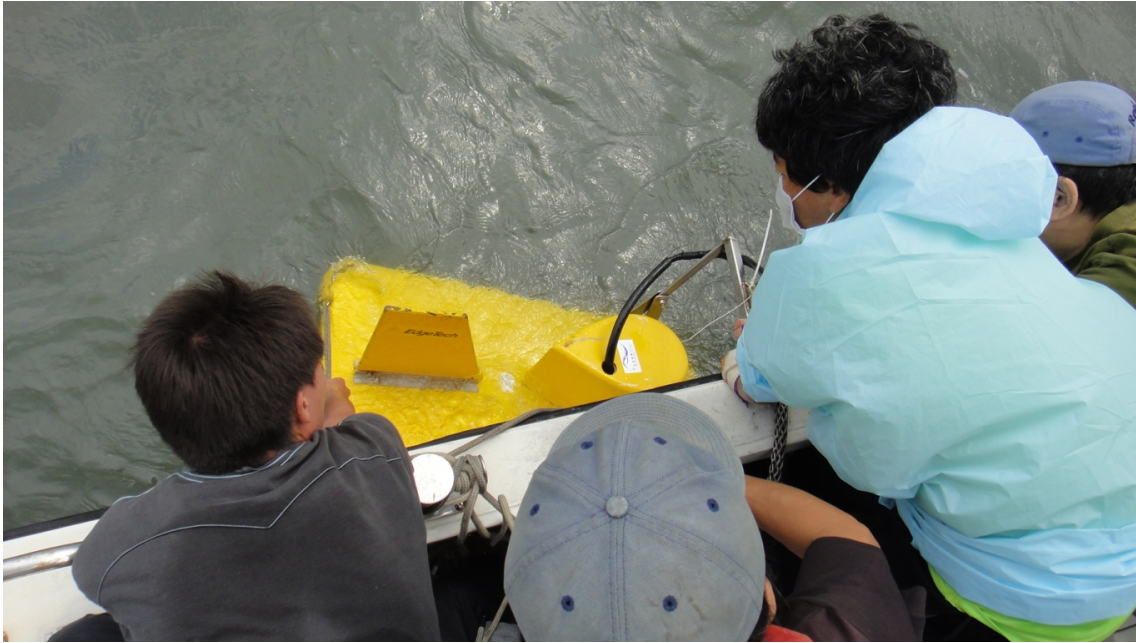


圖 92 因拖魚行進時仍在船後方，並沒有如預期的往船的左後方移動，因此在討論以及調整兩條繩子的長度，藉此調整繩子受力情形

11:23 因無適合的固定點，即使拖魚稍微往船左後側漂，但是受到繩子影響，導致拖魚在行進時會稍微翻轉，使得音鼓不是垂直往下打，因此資料品質並不好，最後決定在中間掛上浮球，並拉長佈放距離，使拖魚於船後約 30 公尺處，而浮球與拖魚距離 3 公尺。地層剖面儀功率參數設定為 90，反射係數校正參數設定為 30。



圖 93 加裝浮球在纜線上以及拖行狀況

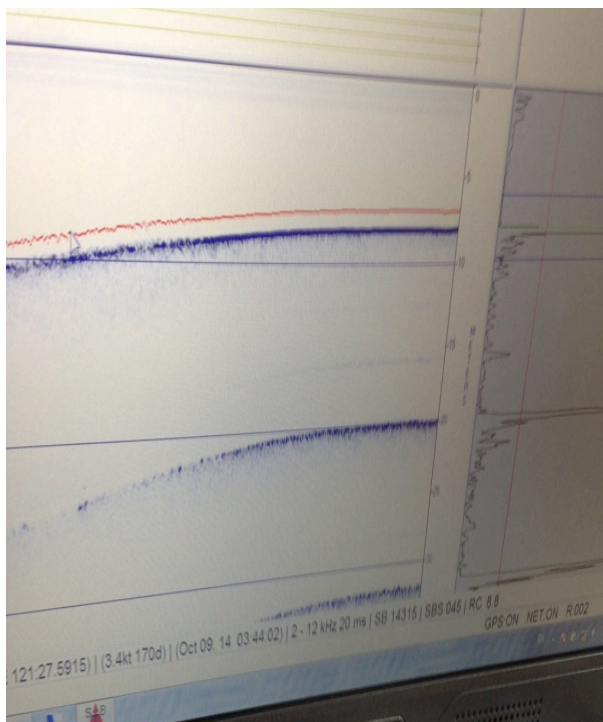


圖 94 以後拖方式所得到的資料，可明顯看出一次與二次反射的回訊



圖 95 拖行途中容易勾到漂流物，需要將拖魚拉回進行清理

14：40 跑完測線，進行回收作業。

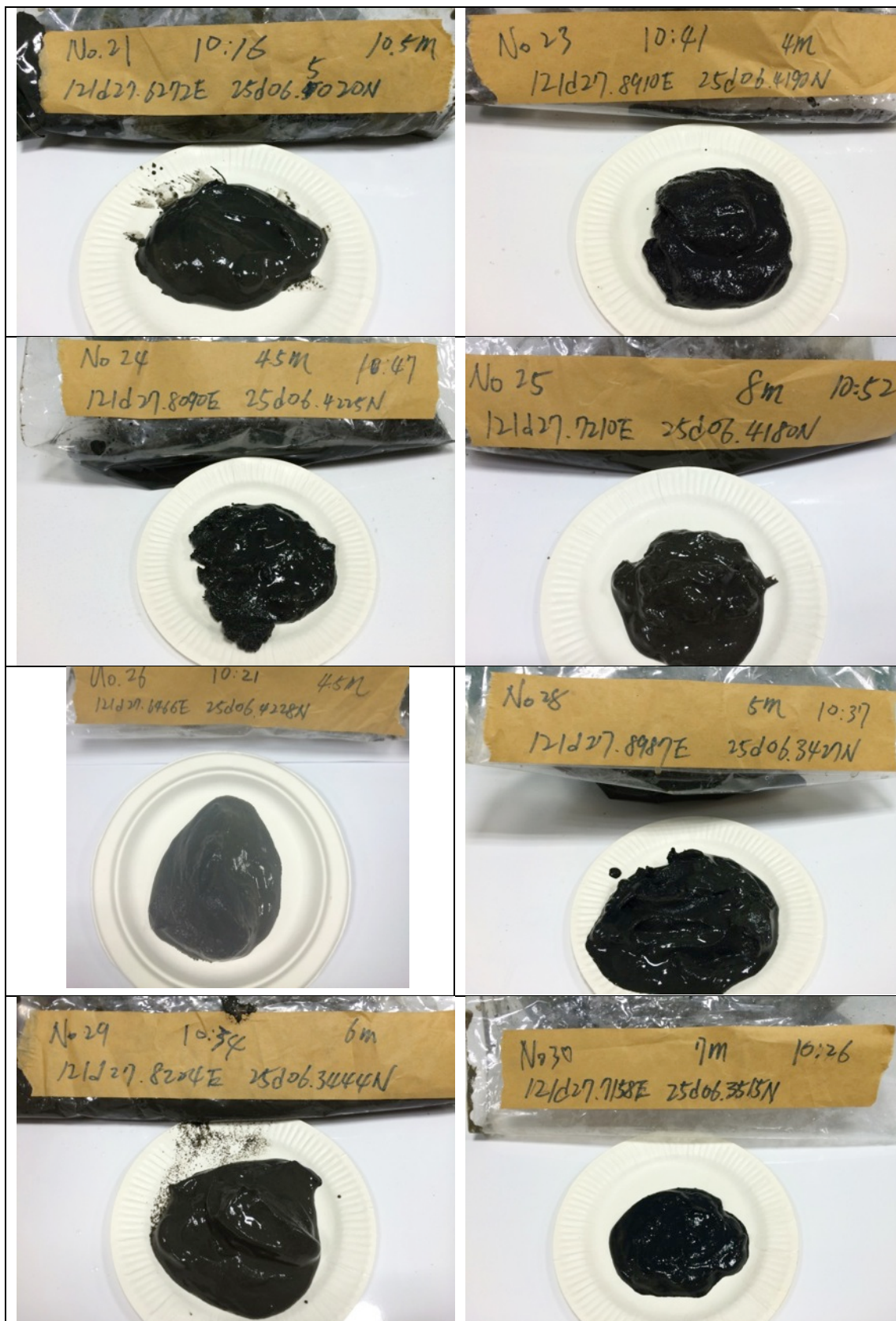


圖 96 回收拖魚

附錄 E 土樣的形貌照片







附錄 F SBP 震測資料

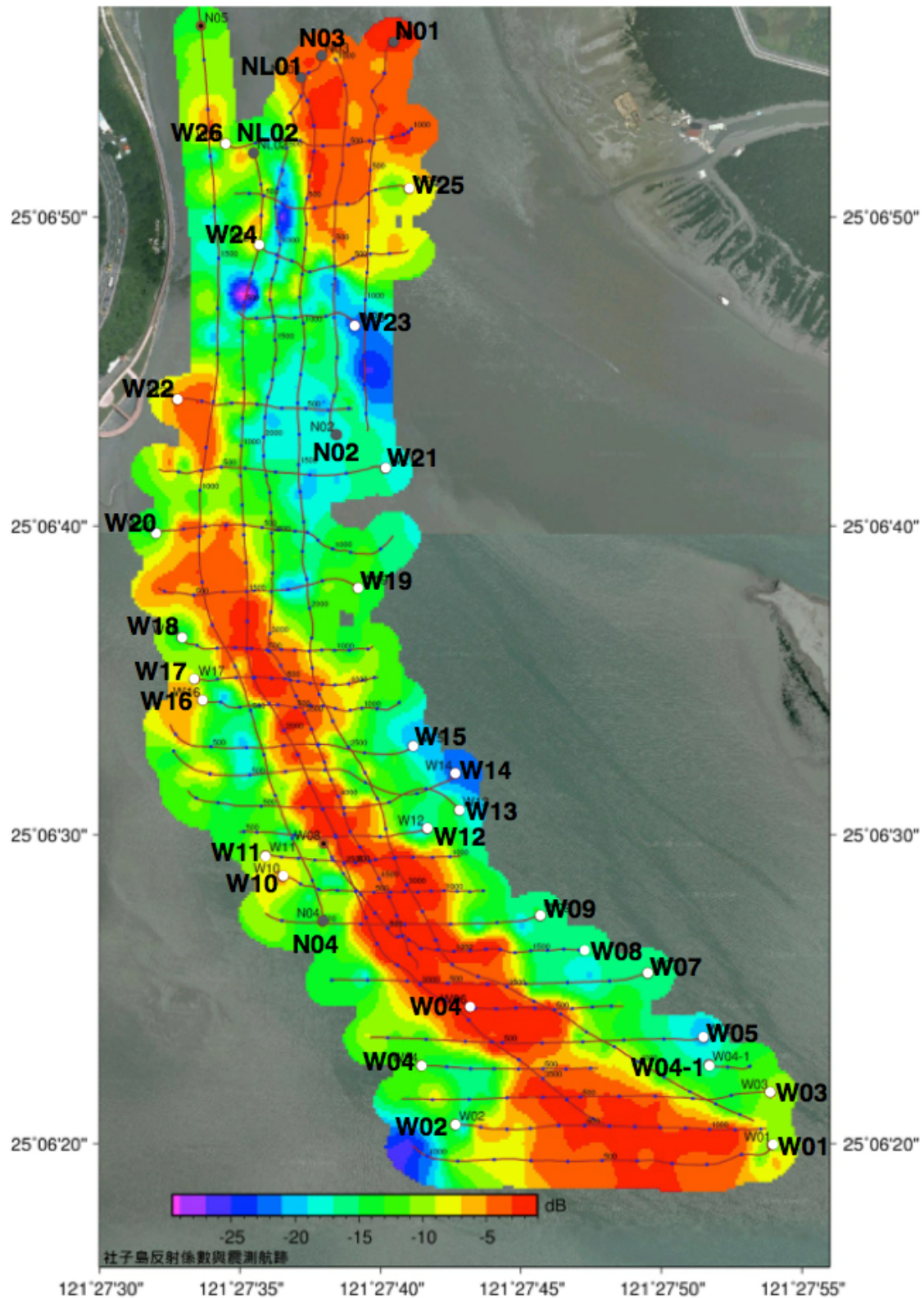


圖 97 2014/10/9 反射震測實驗之測線圖。底圖為反射係數圖，圖上向為淡水河下游關渡。測線位在淡水河靠南岸的河谷軸位置。

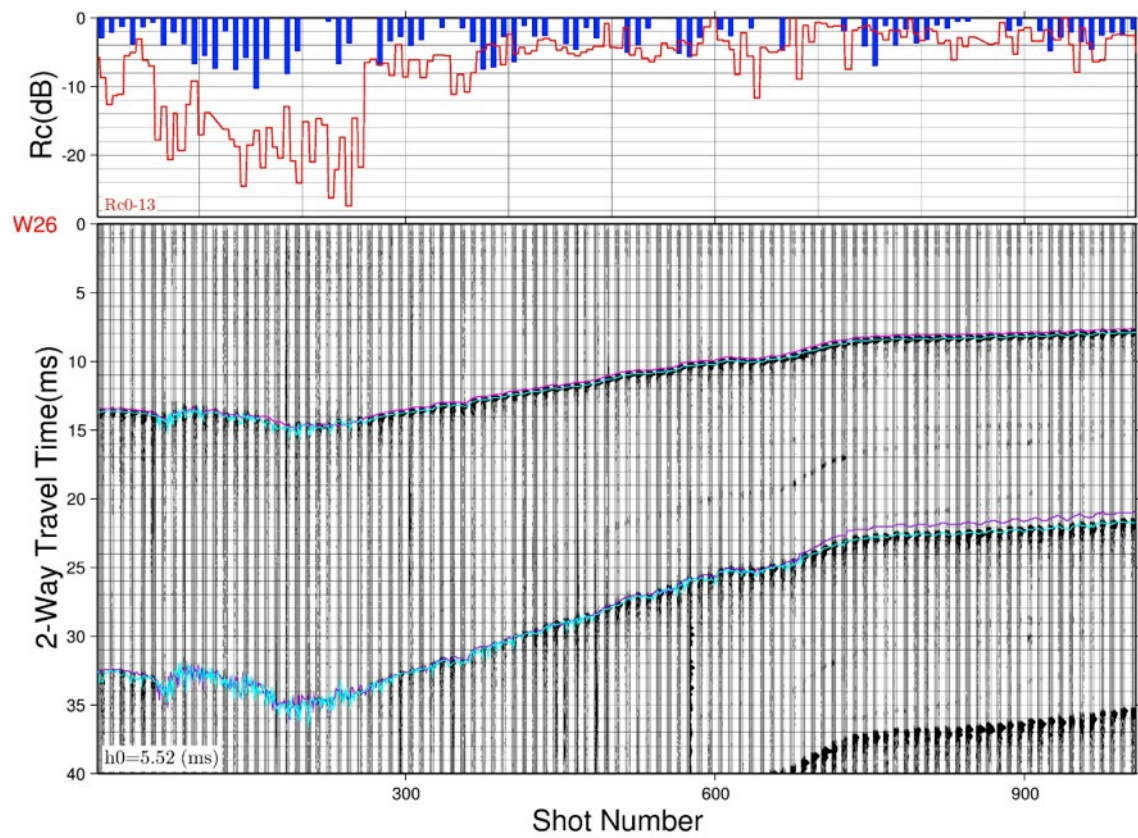


圖 98 測線 W26

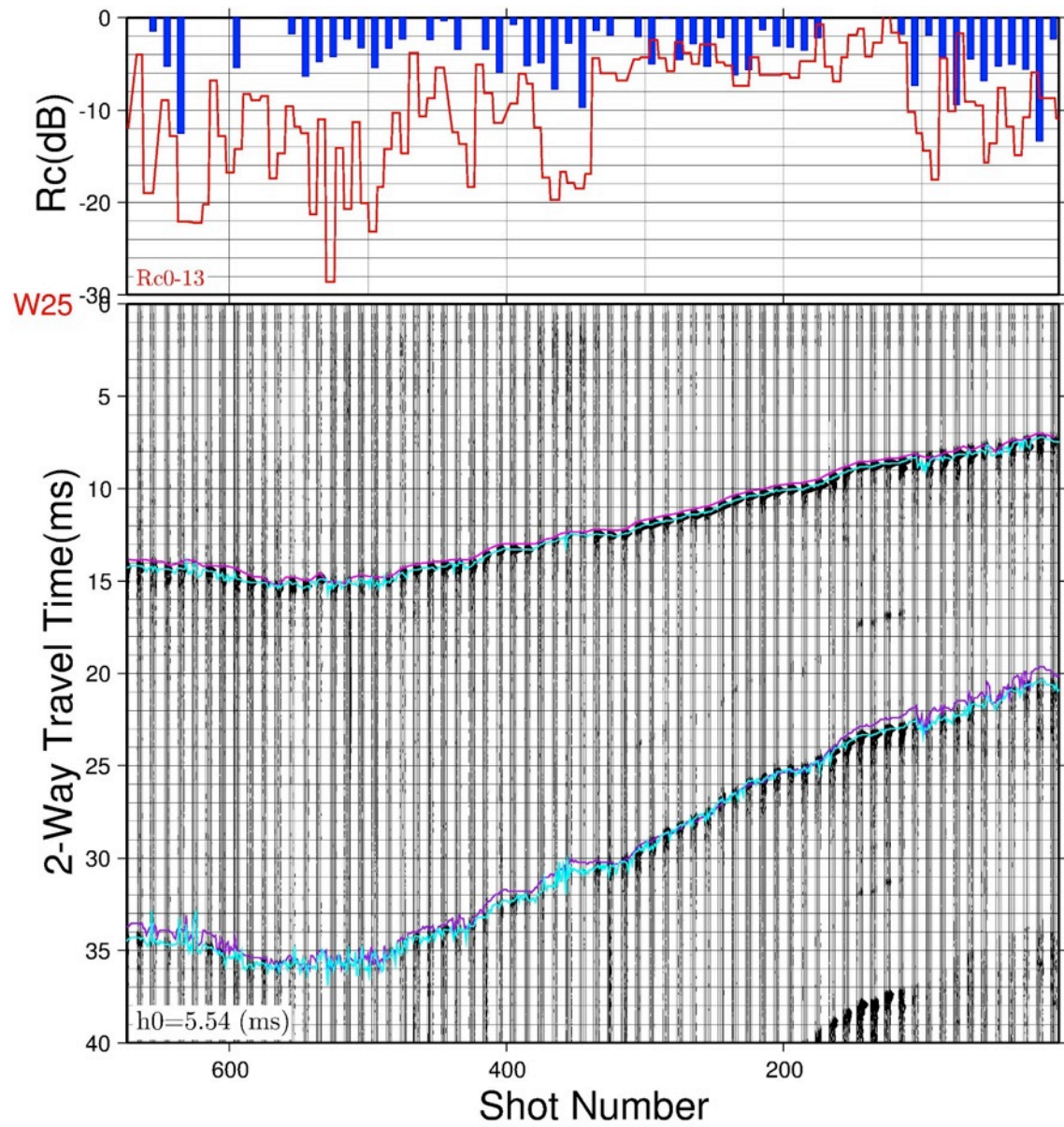


圖 99 測線 W25

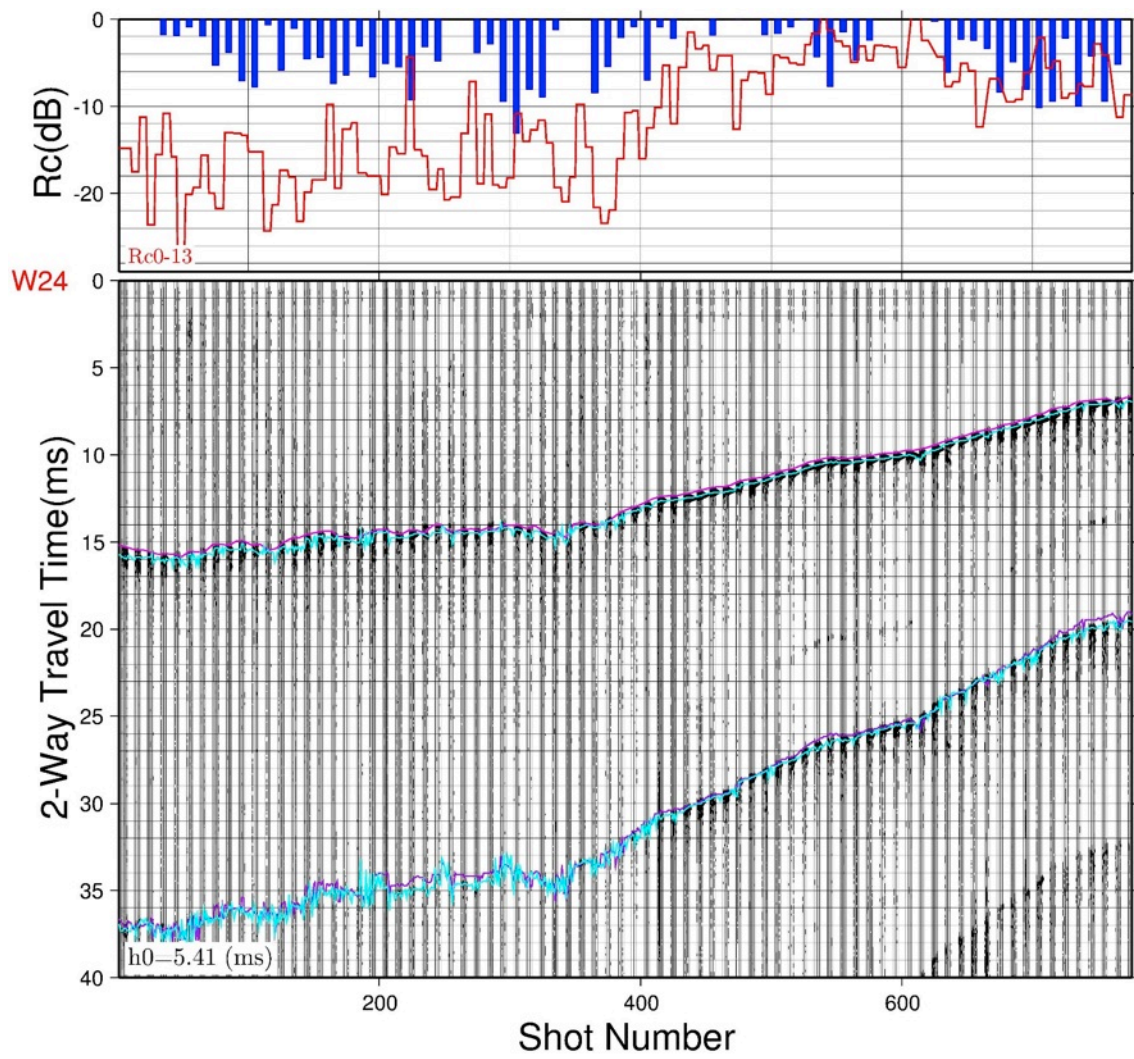


圖 100 測線 W24

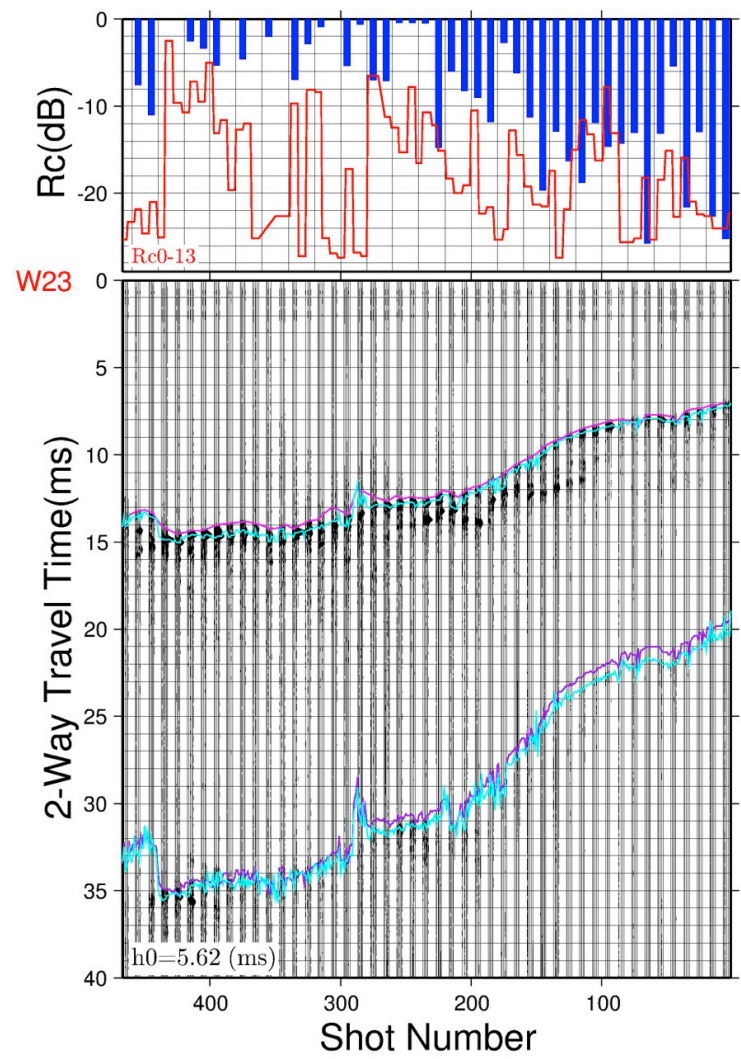


圖 101 測線 W23

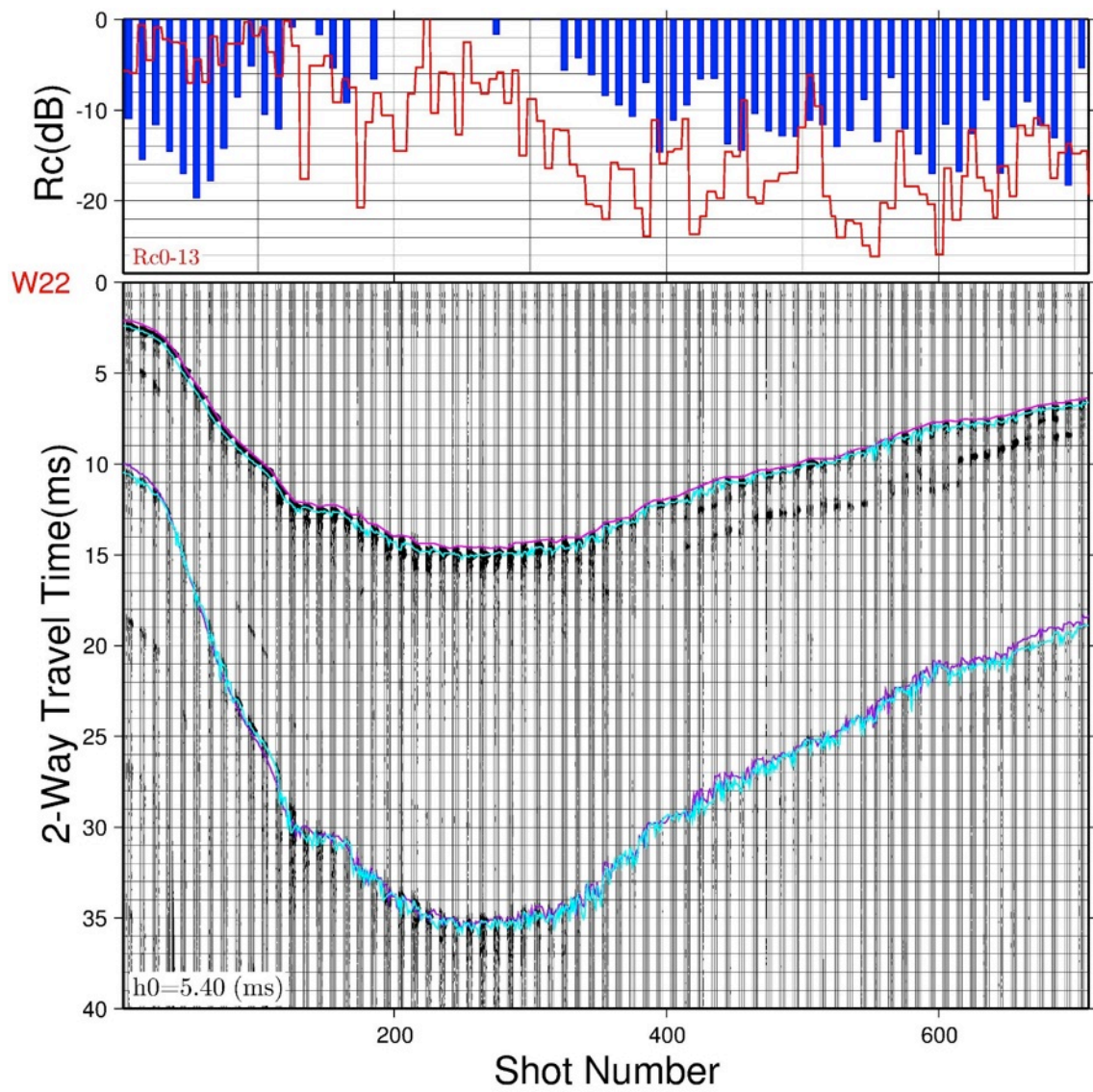


圖 102 測線 W22

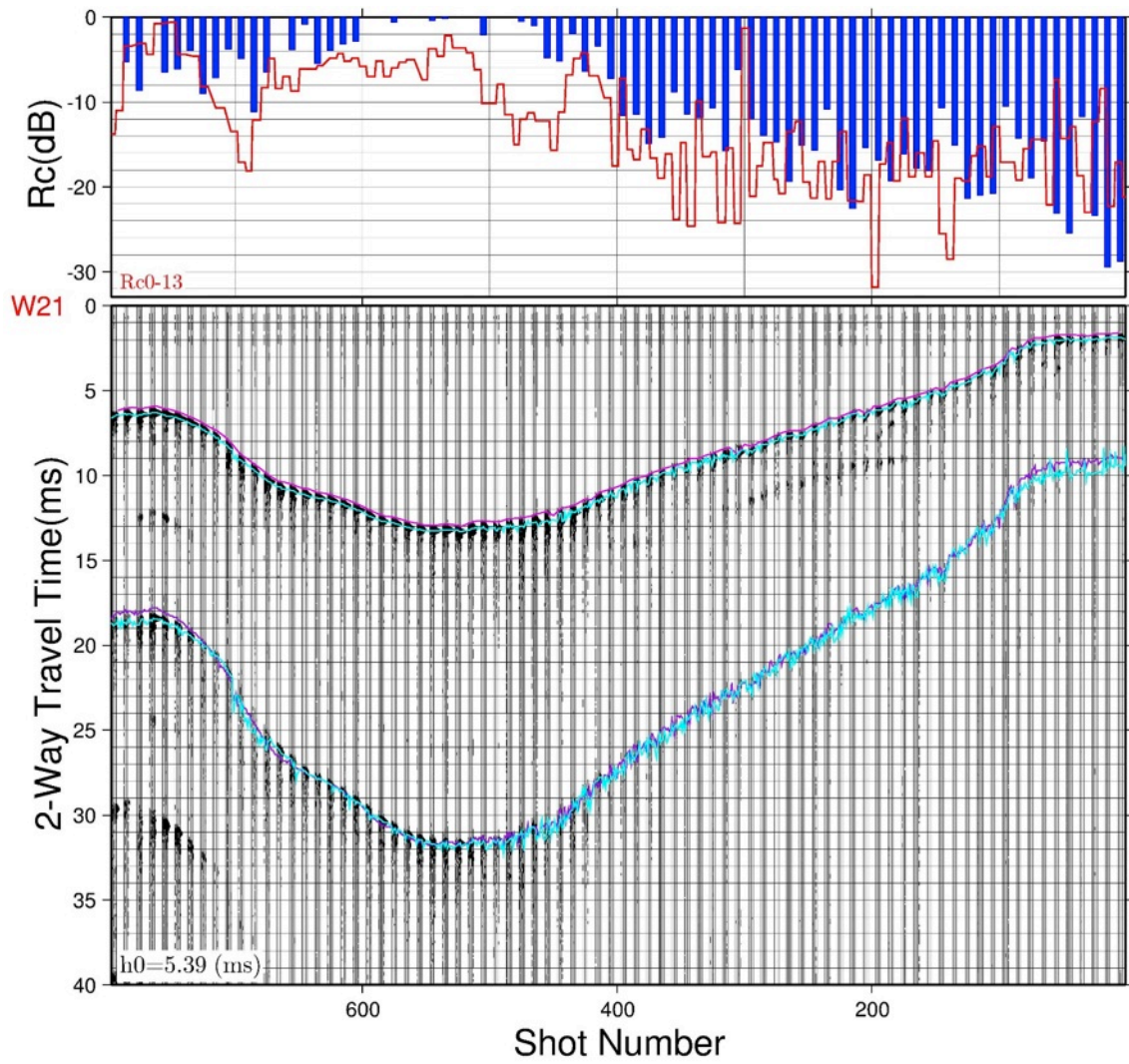


圖 103 測線 W21

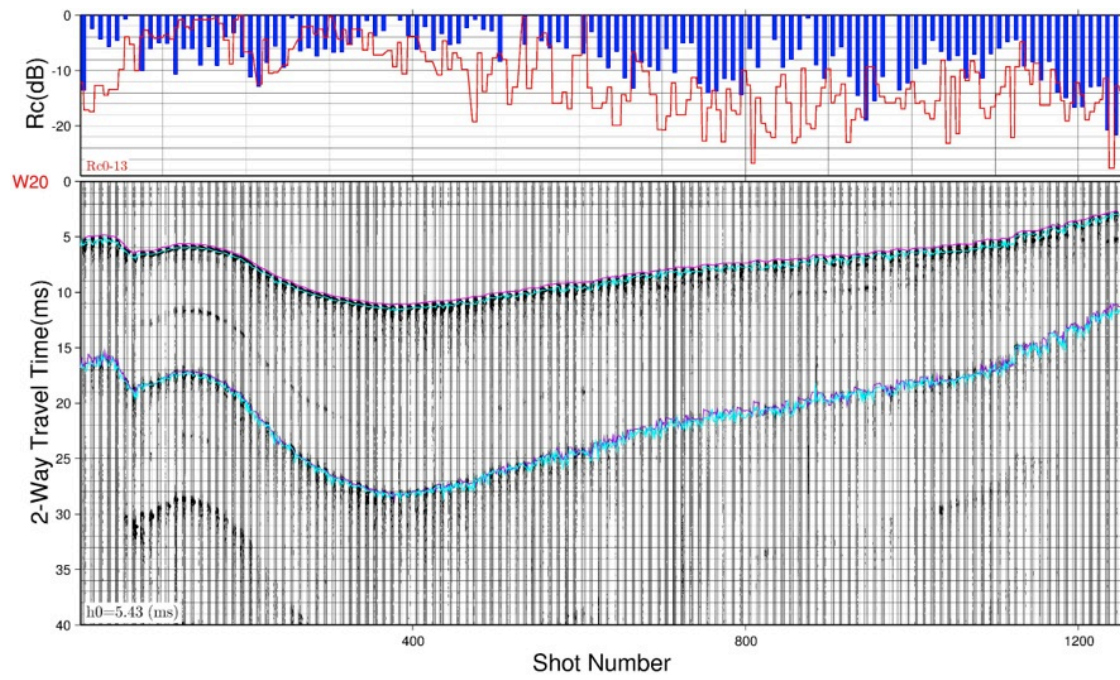


圖 104 測線 W20

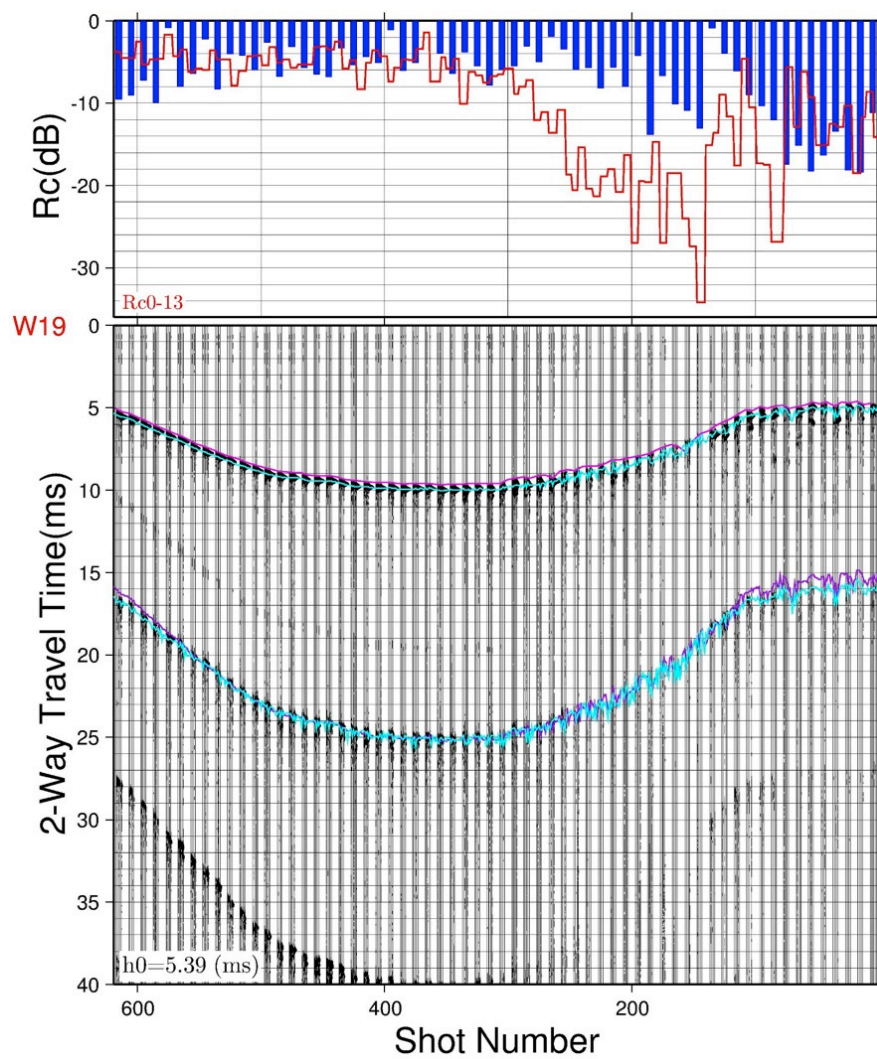


圖 105 測線 W19

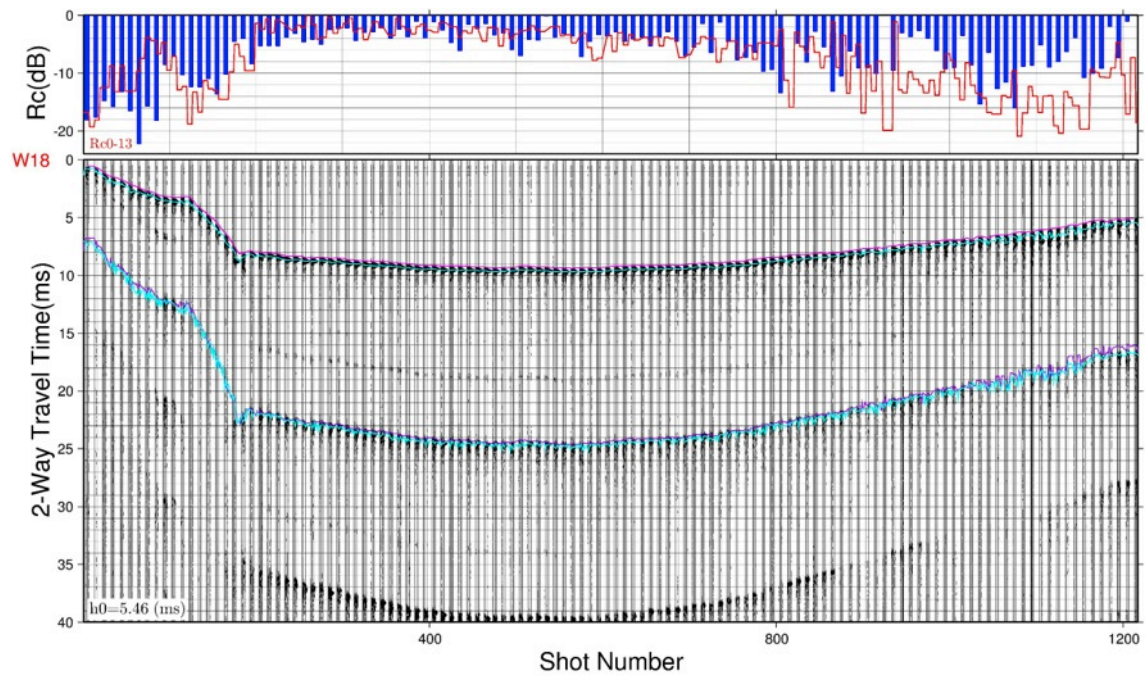


圖 106 測線 W18

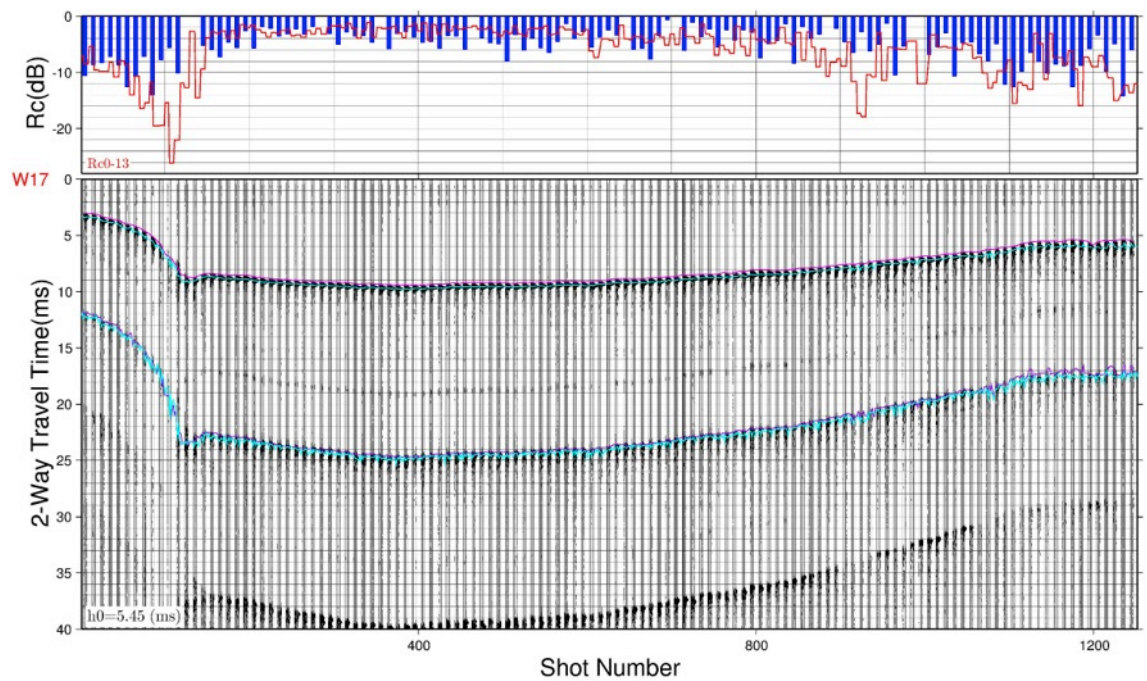


圖 107 測線 W17

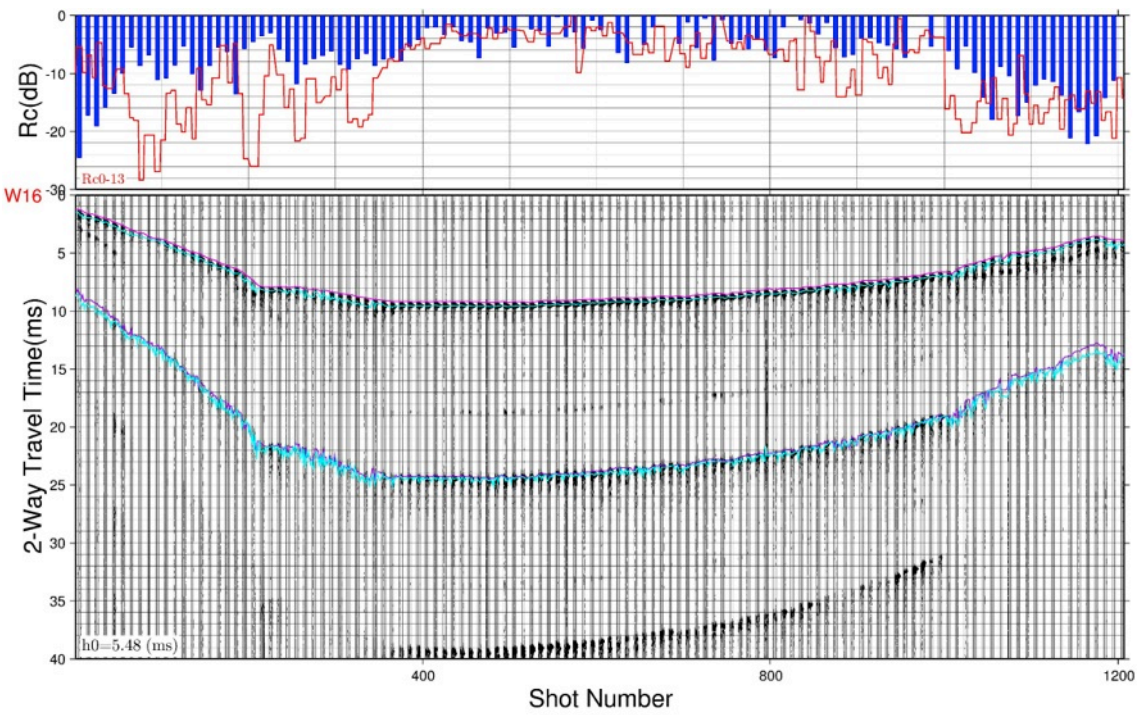


圖 108 測線 W16

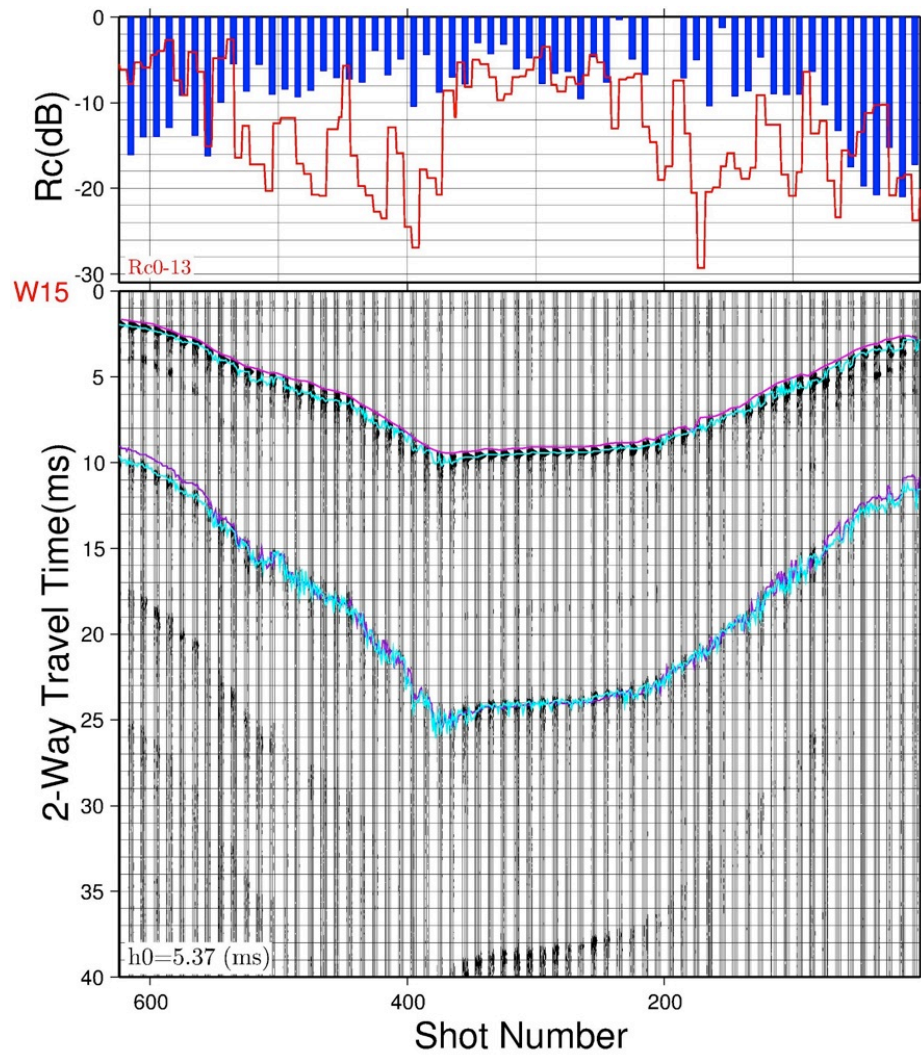


圖 109 測線 W15

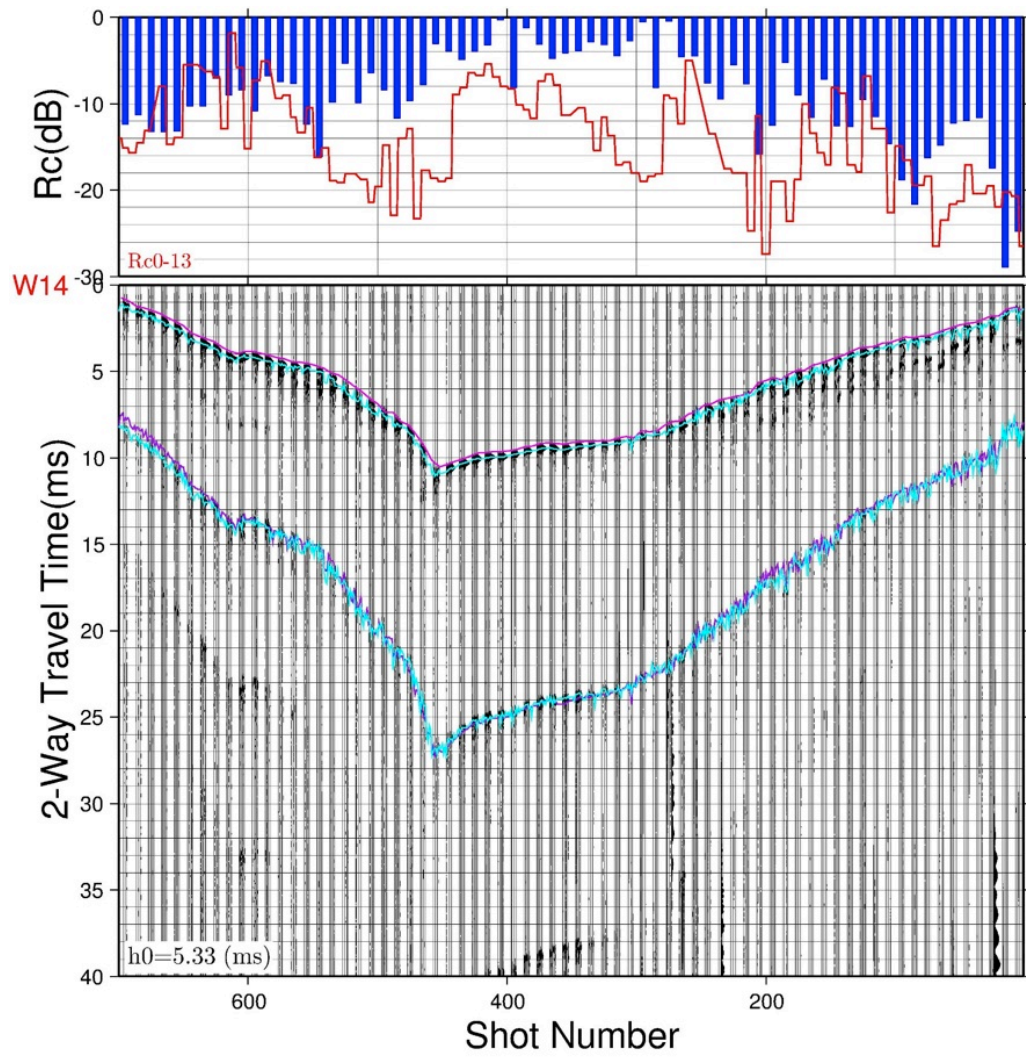


圖 110 測線 W14

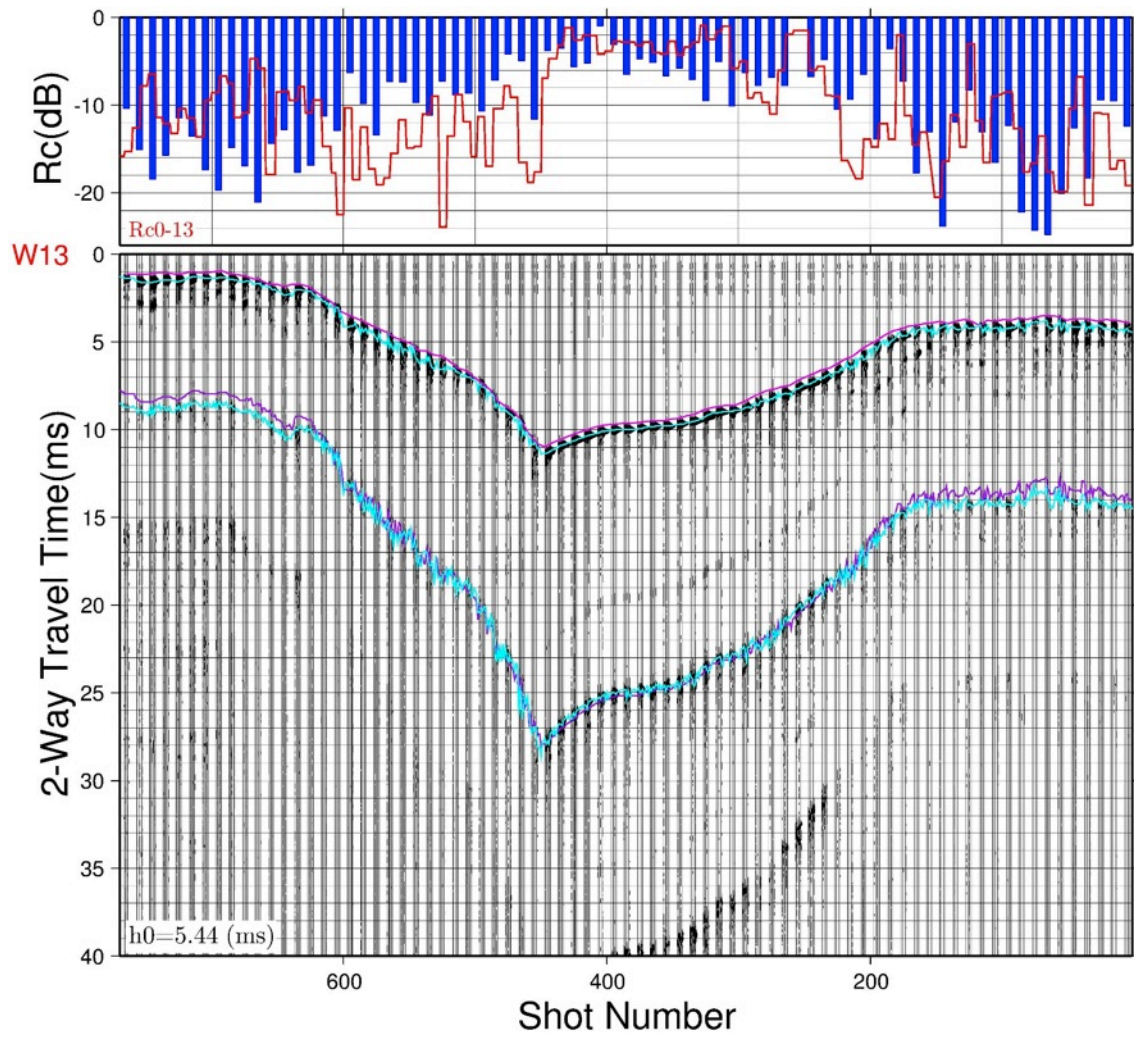


圖 111 測線 W13

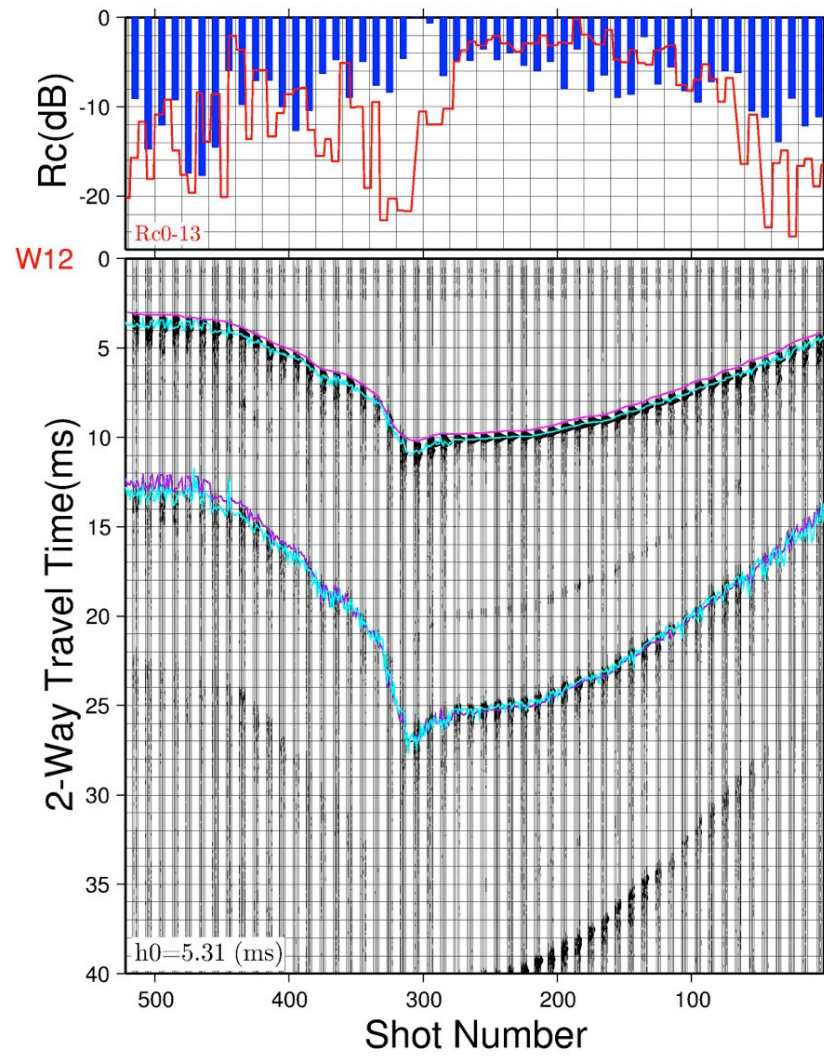


圖 112 測線 W12

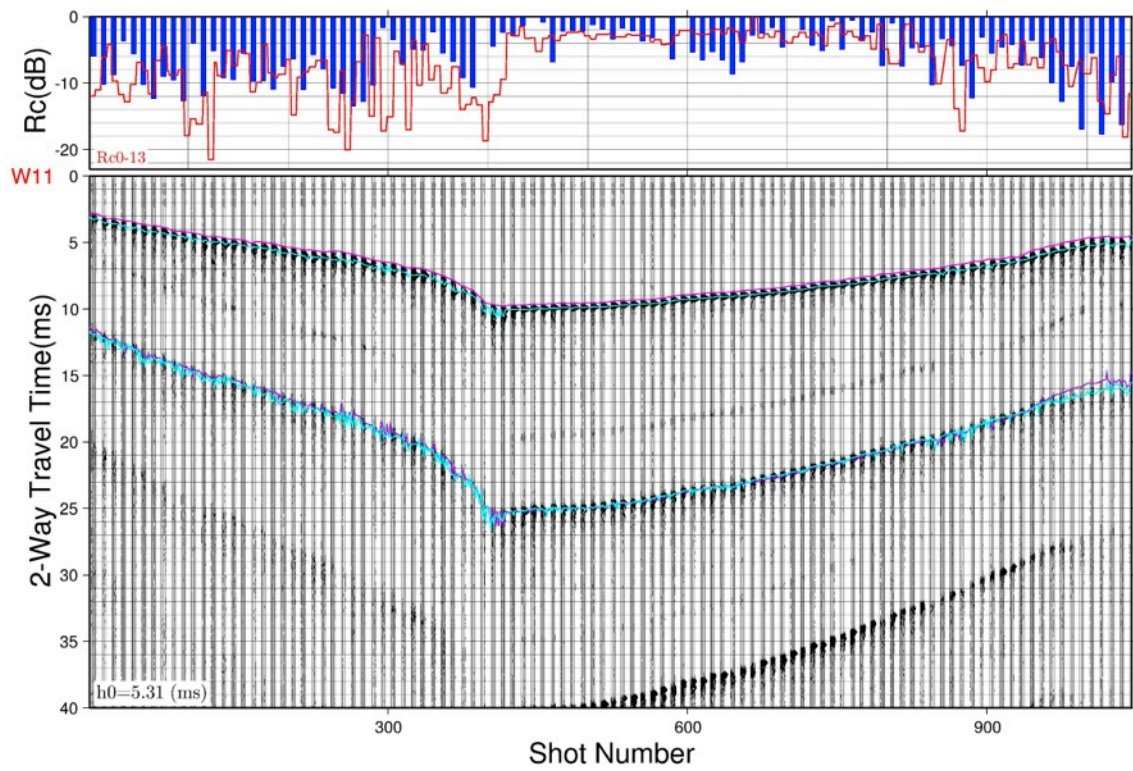


圖 113 測線 W11

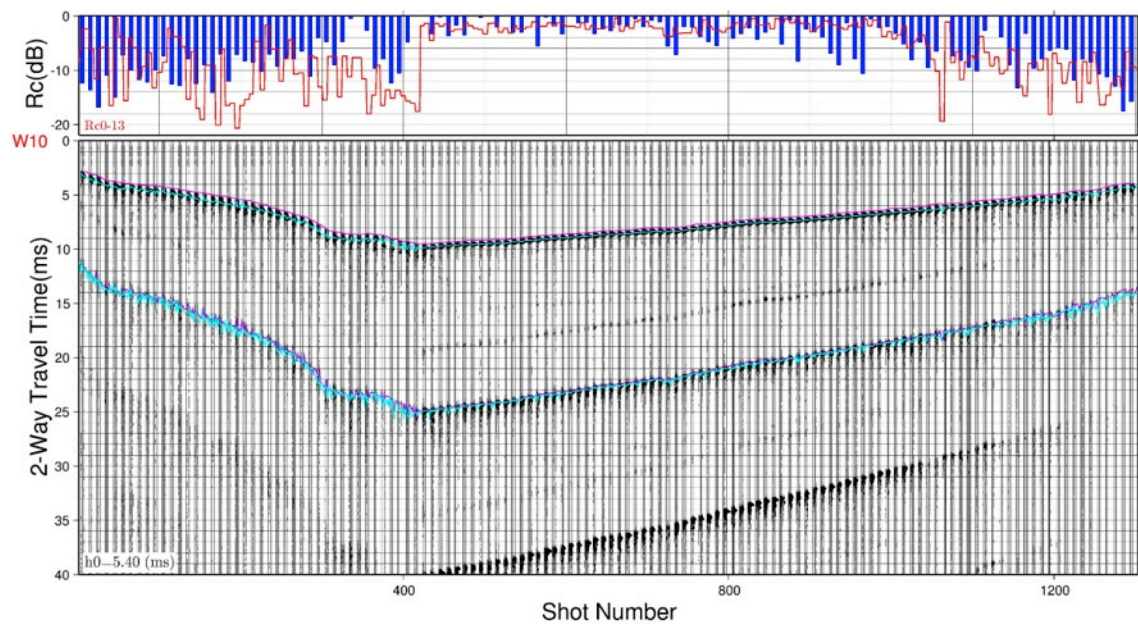


圖 114 測線 W10

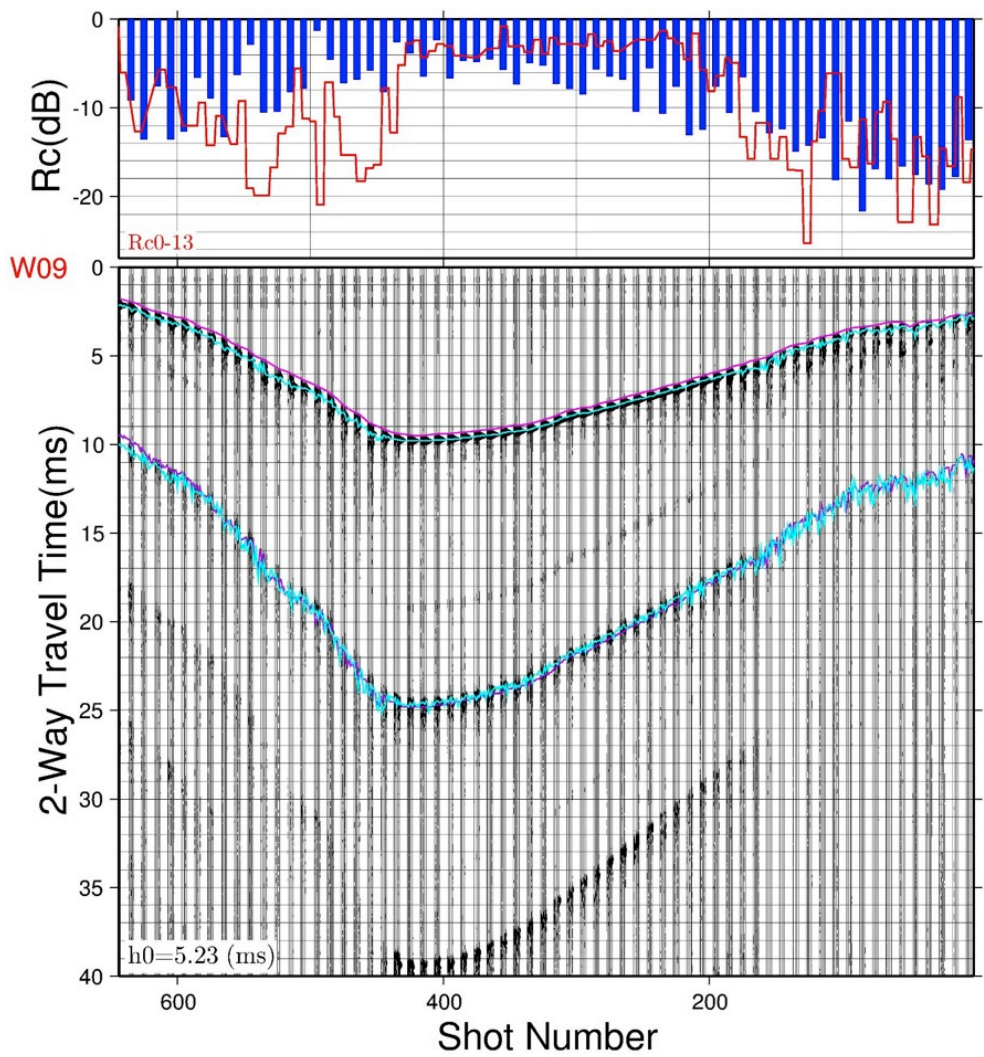


圖 115 測線 W09

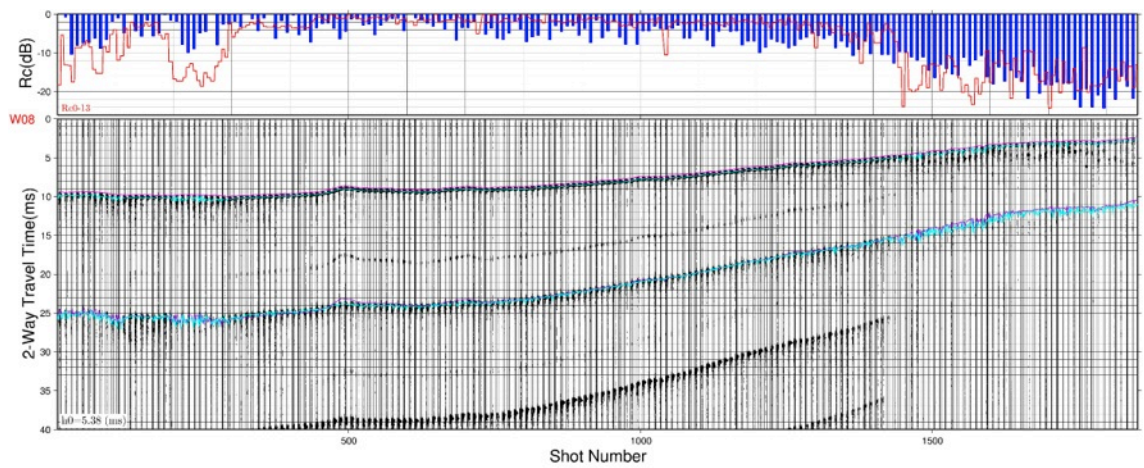


圖 116 測線 W08

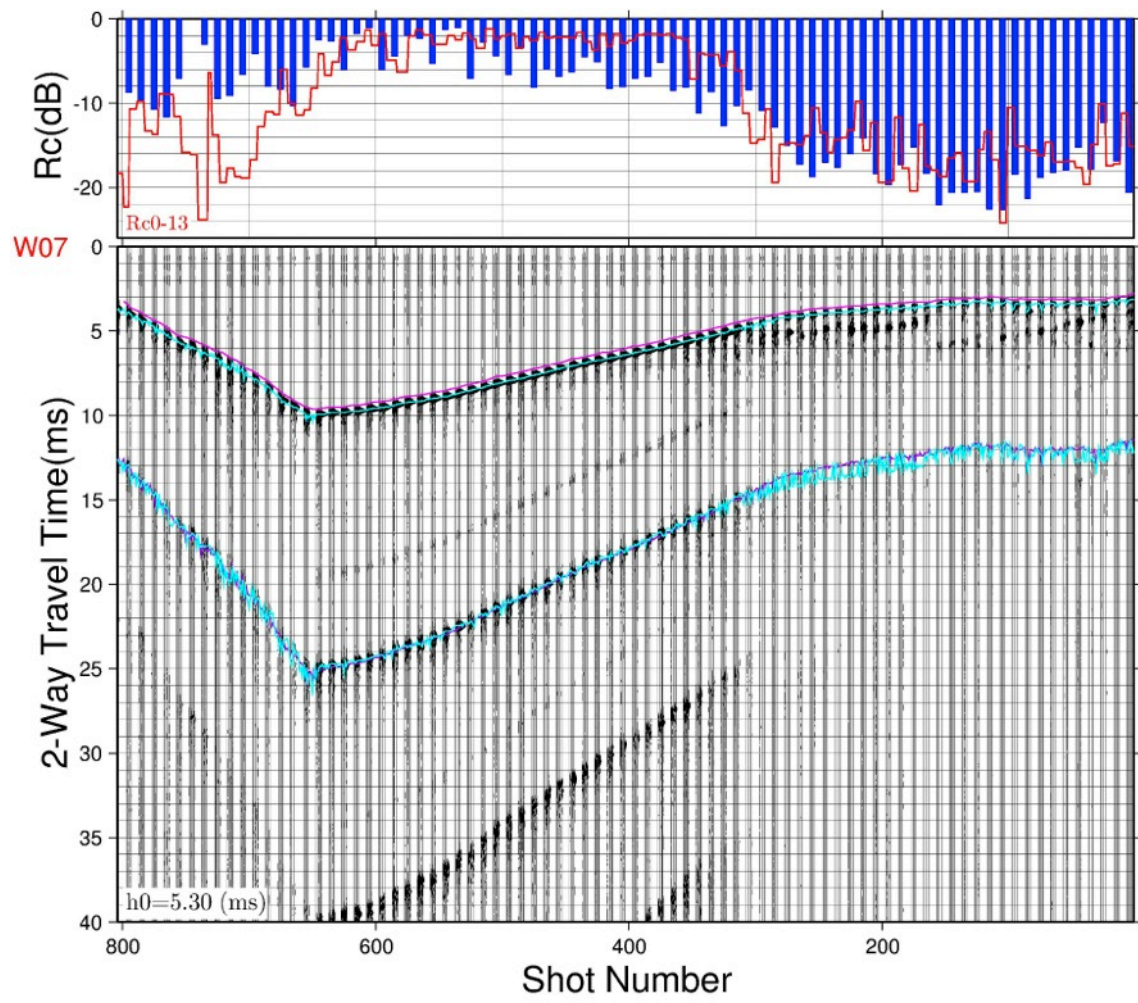


圖 117 測線 W07

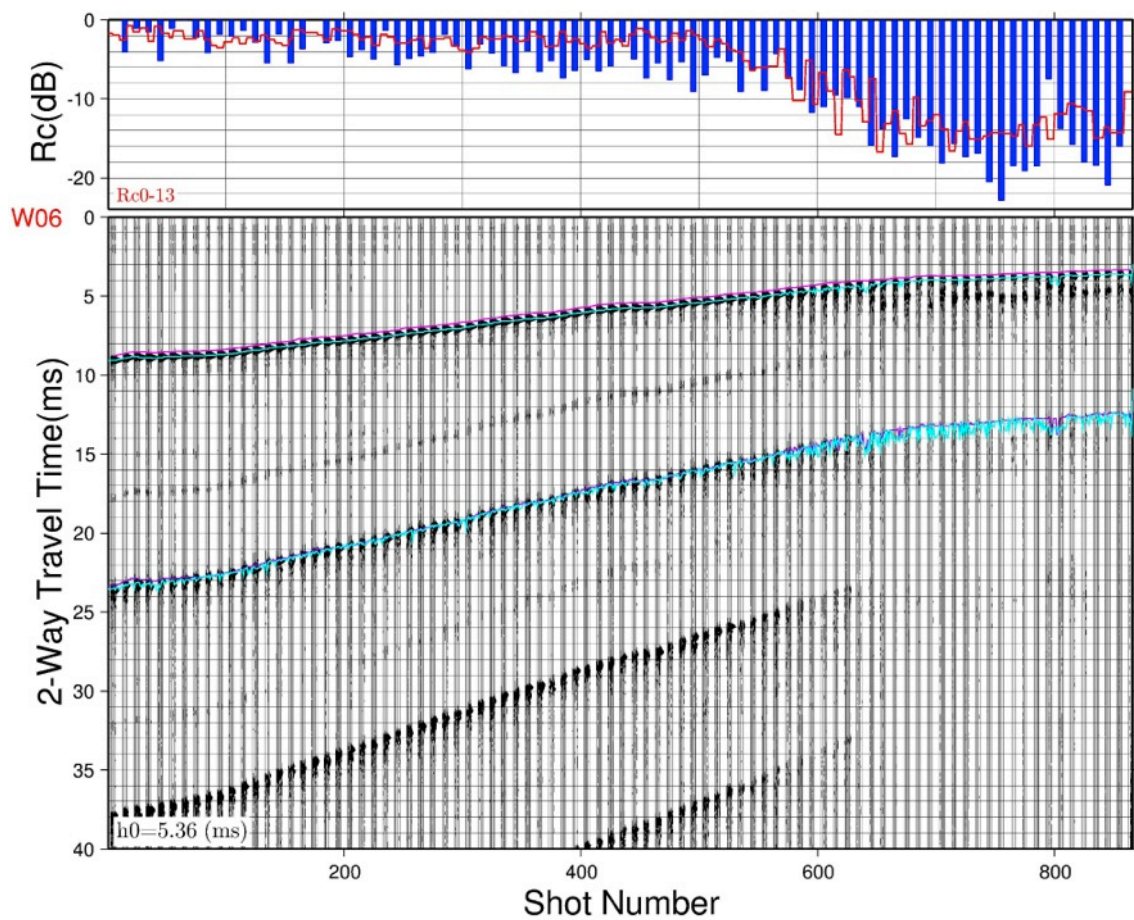


圖 118 測線 W06

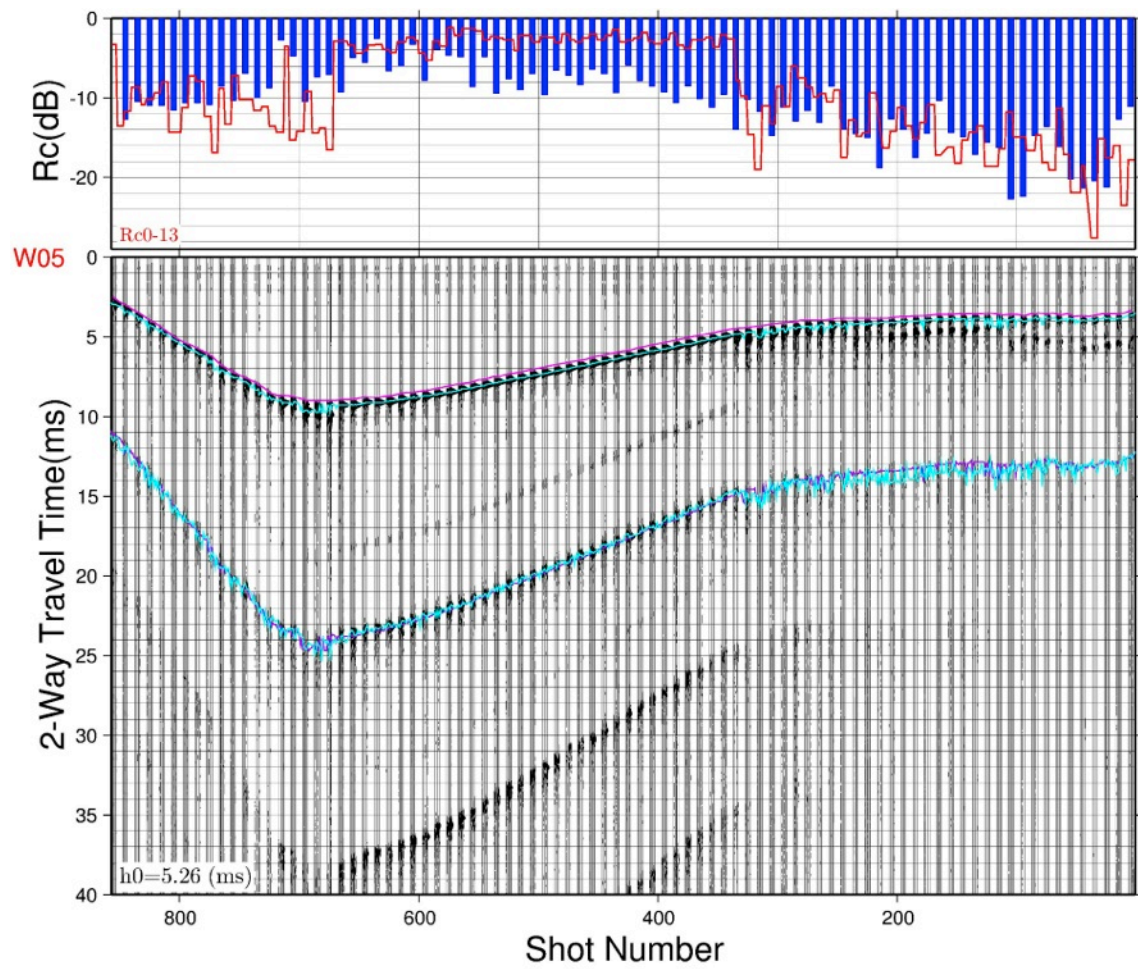


圖 119 測線 W05

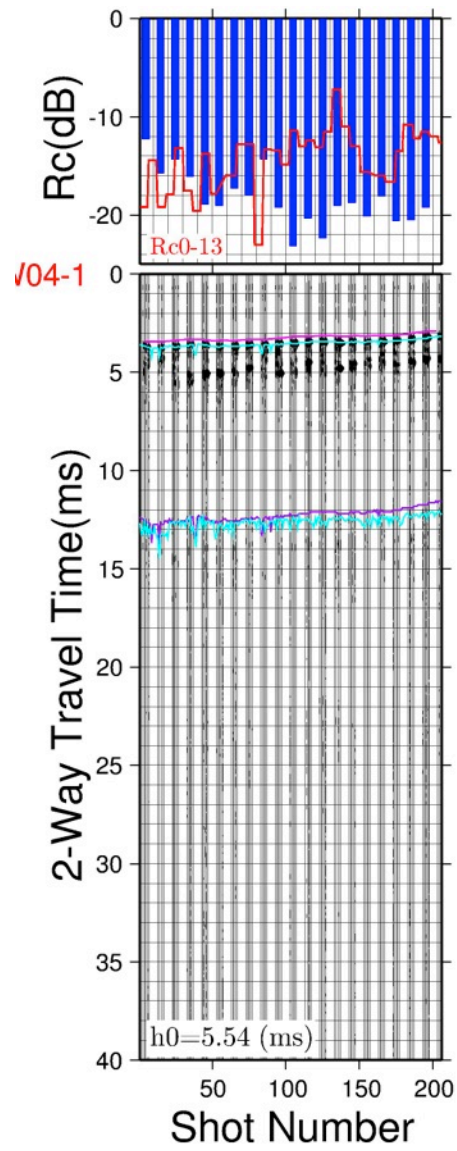


圖 120 測線 W04-1

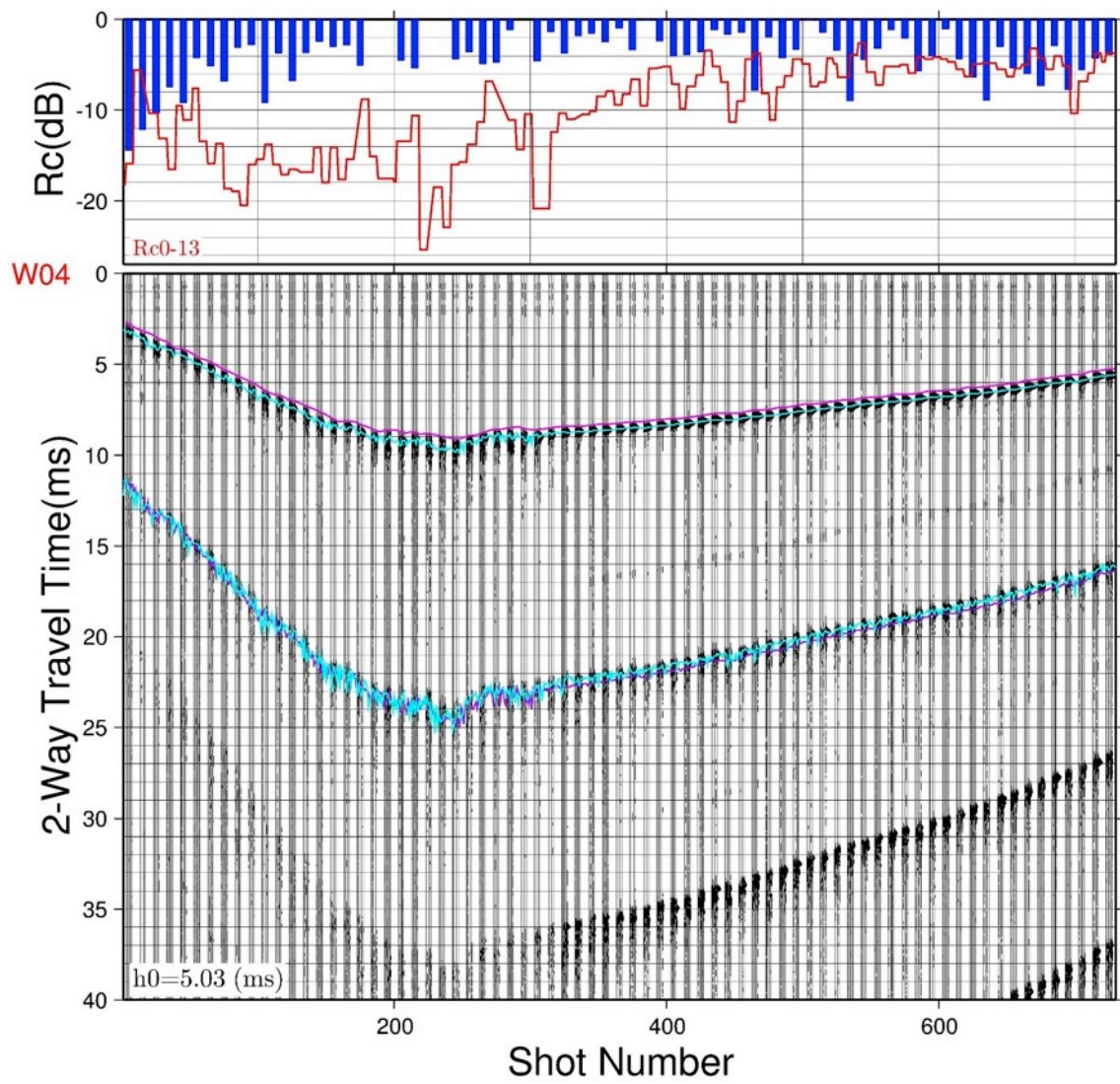


圖 121 測線 W04

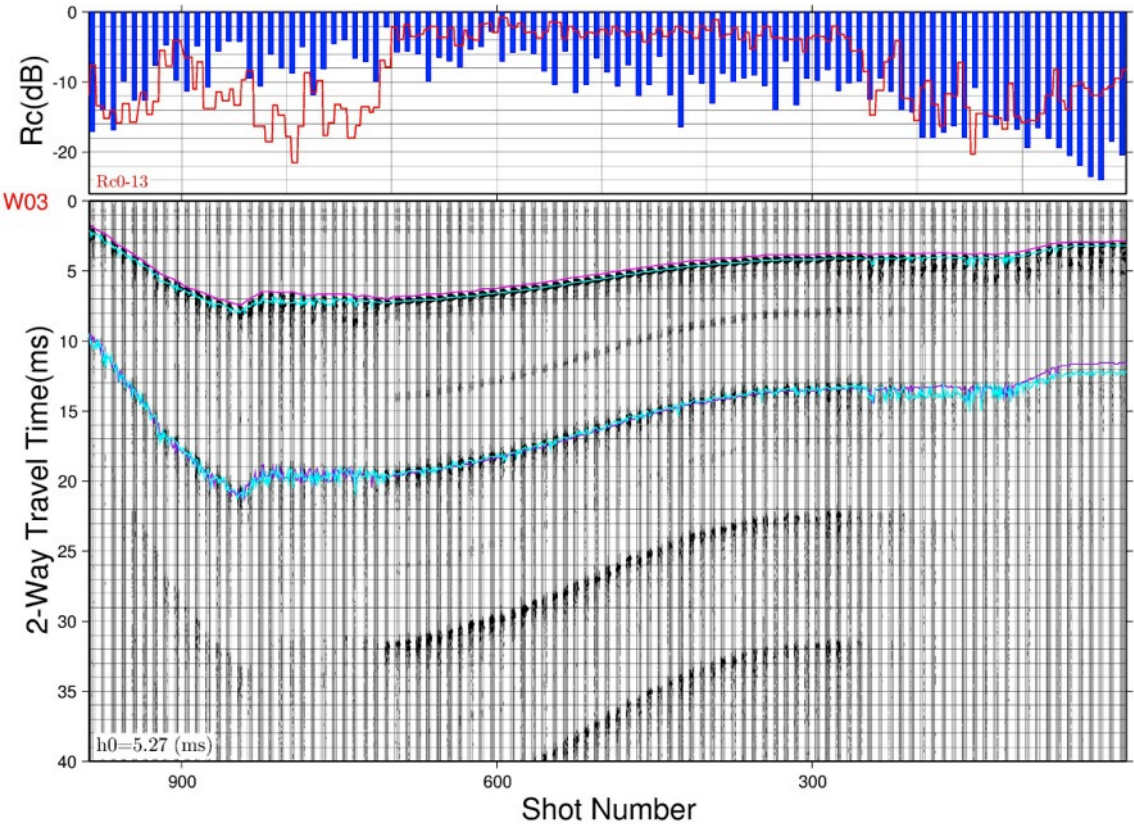


圖 122 測線 W03

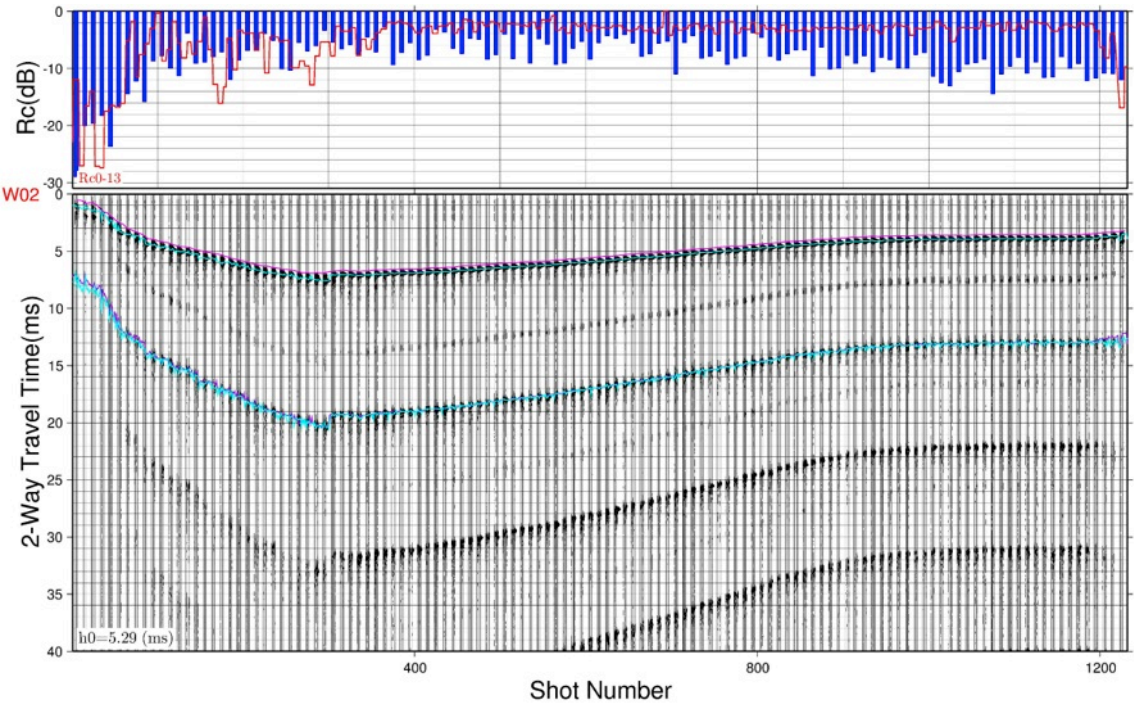


圖 123 測線 W02

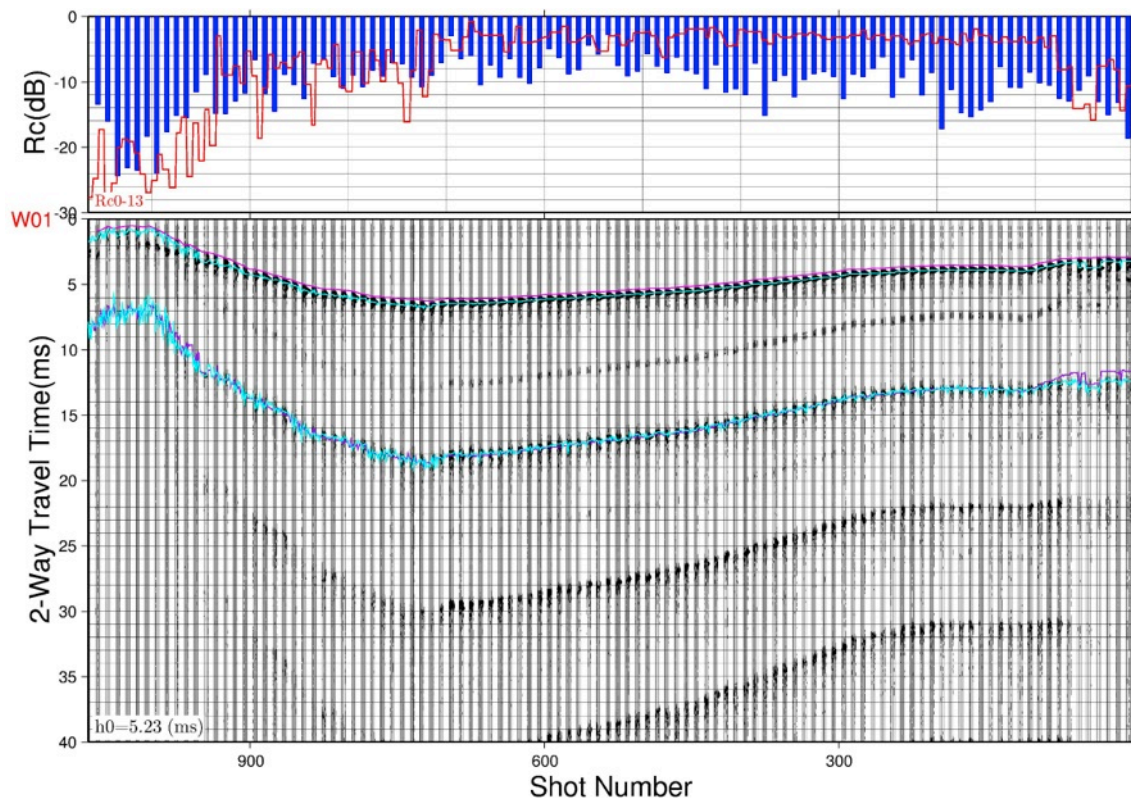


圖 124 測線 W01

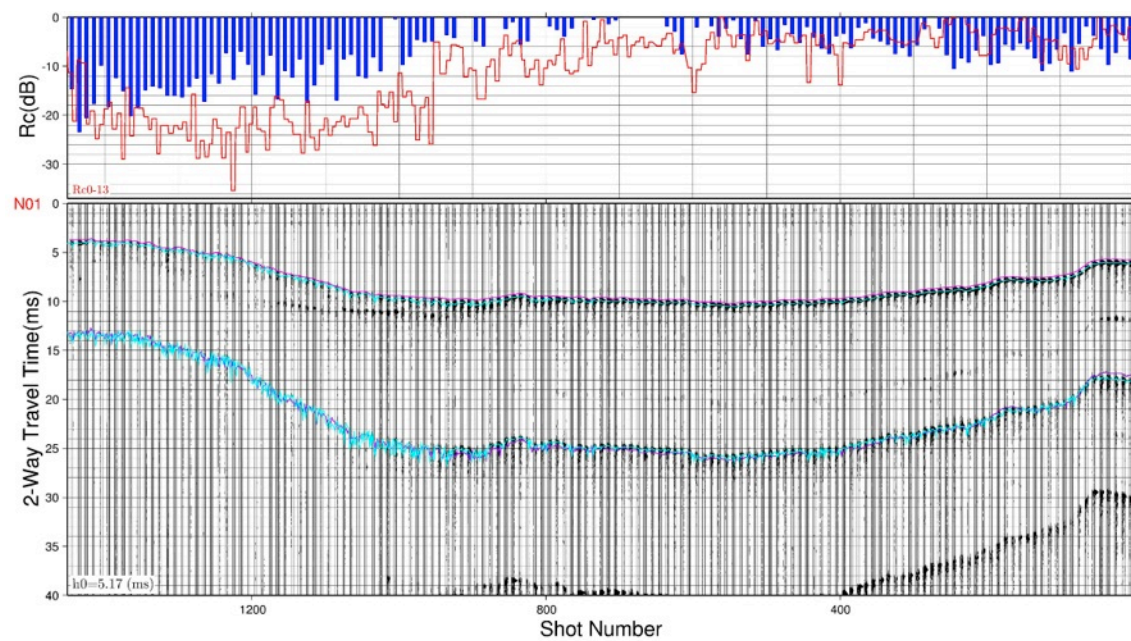


圖 125 測線 N01

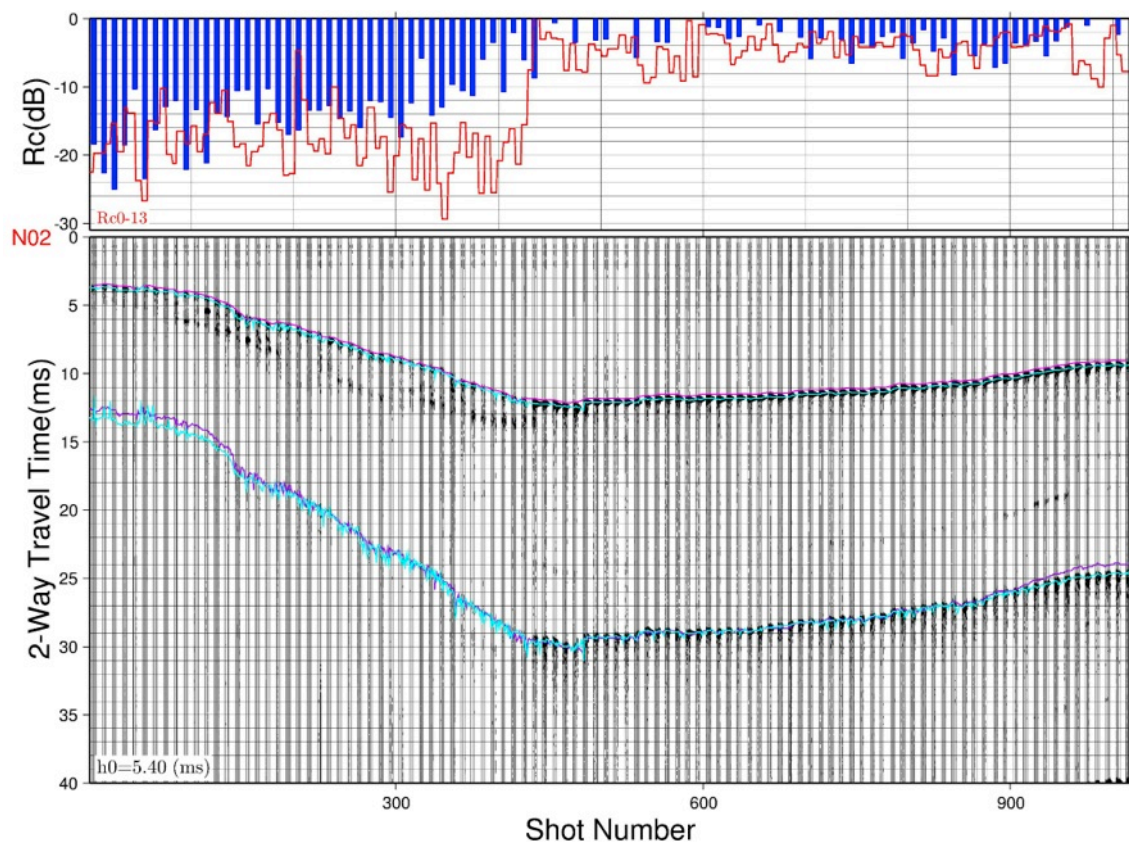


圖 126 測線 N02

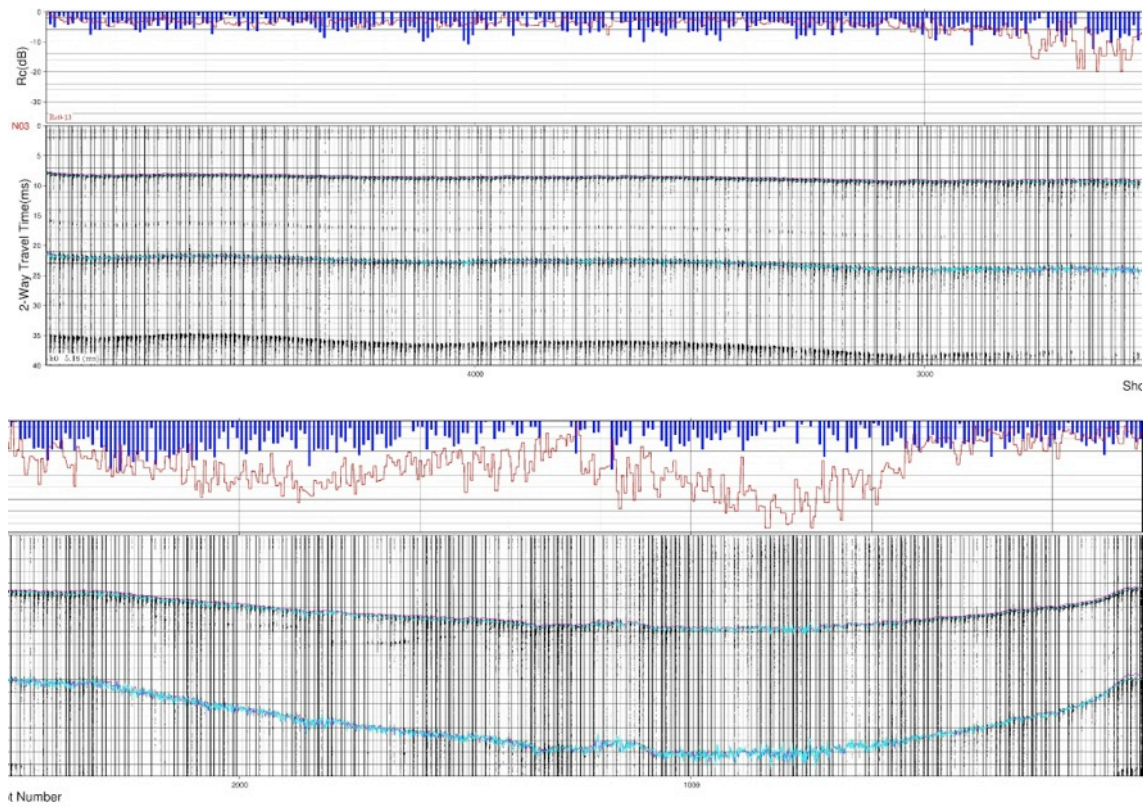


圖 127 測線 N03

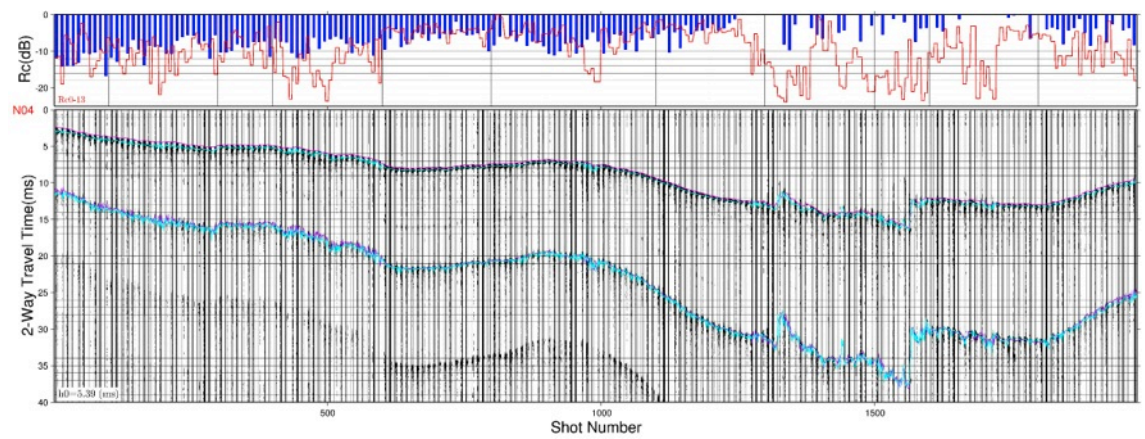


圖 128 測線 N04

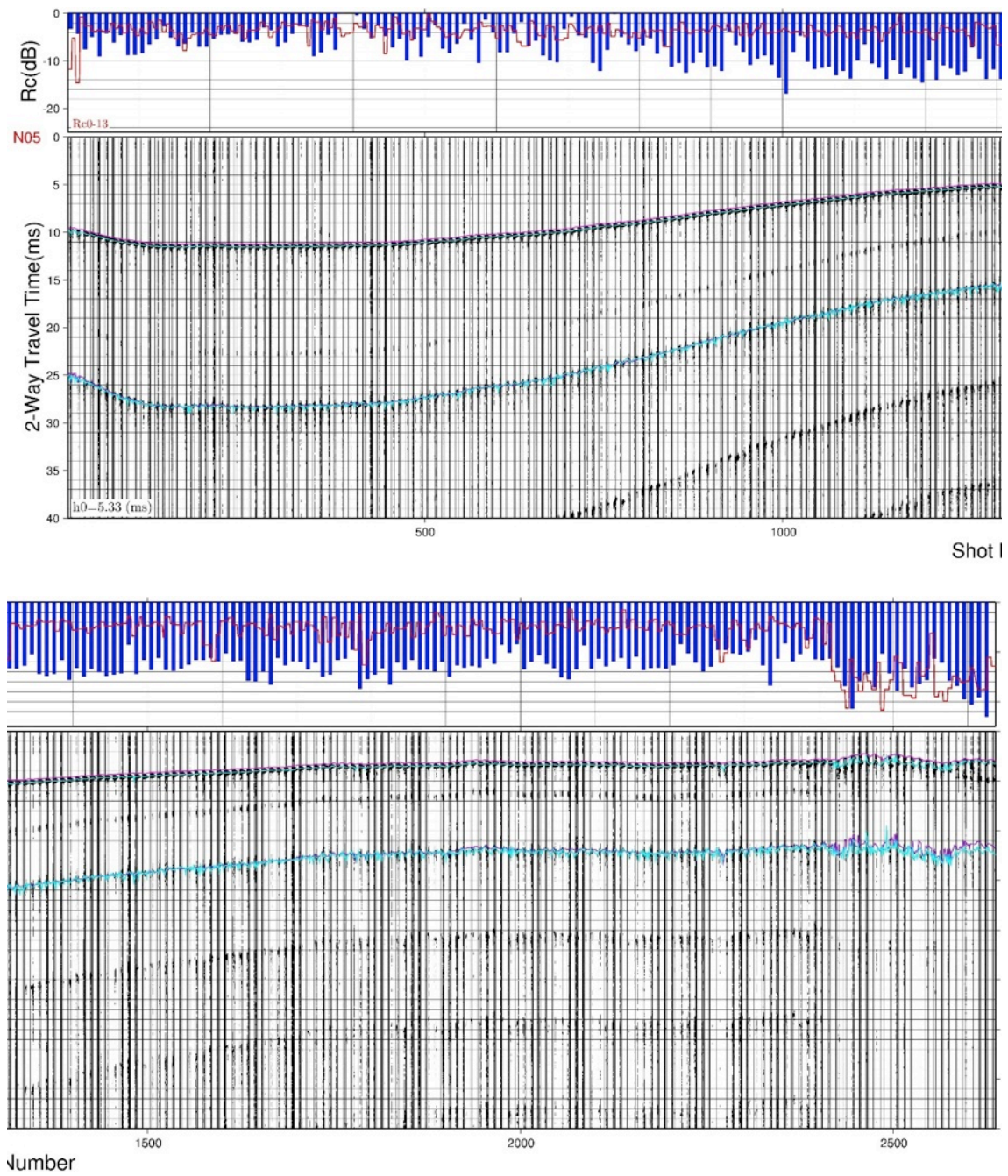


圖 129 測線 N05

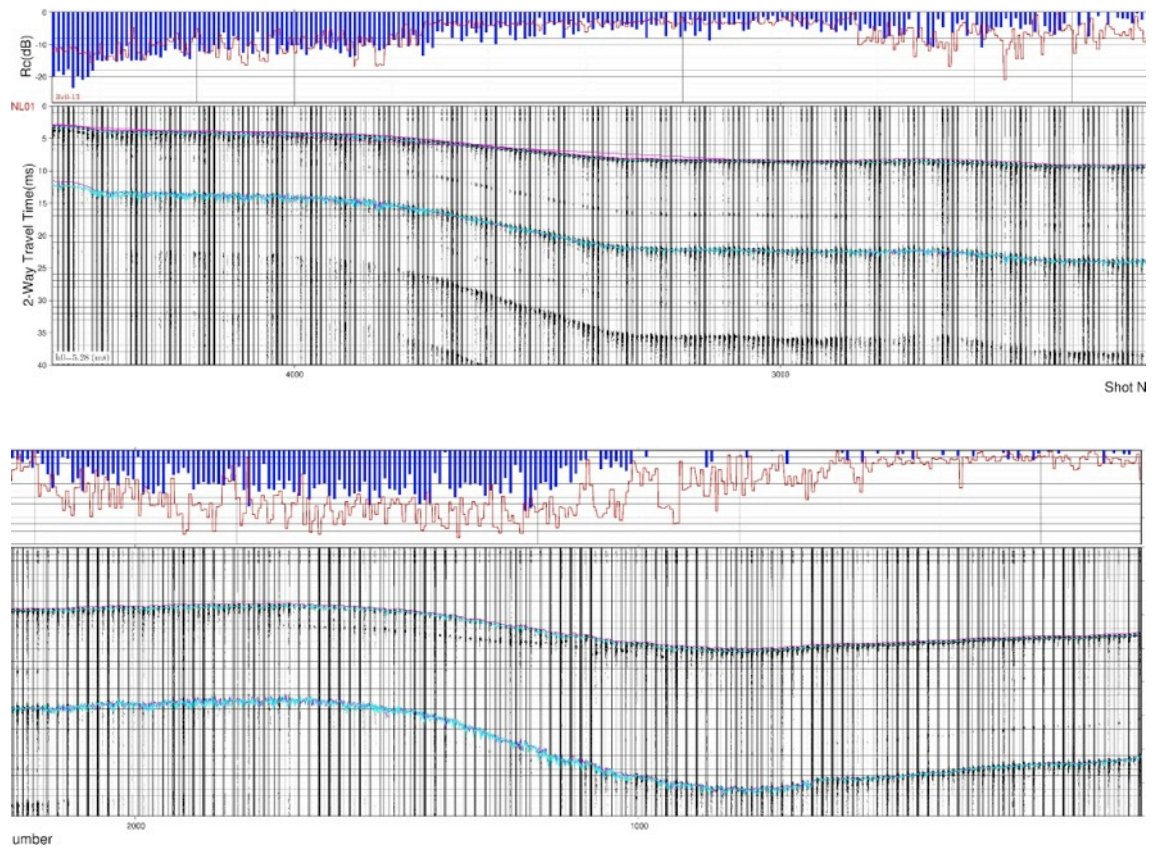
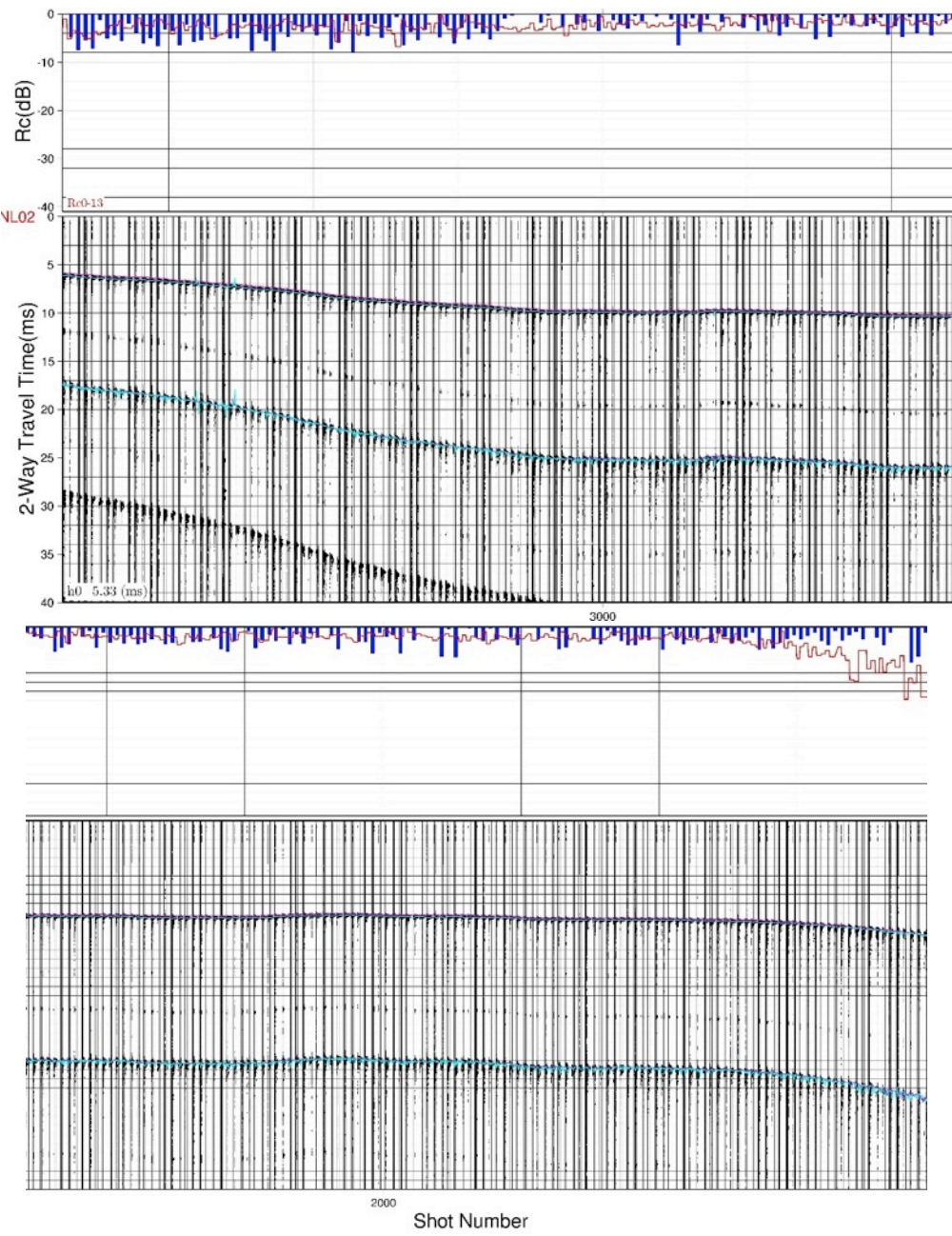


圖 130 測線 NL01



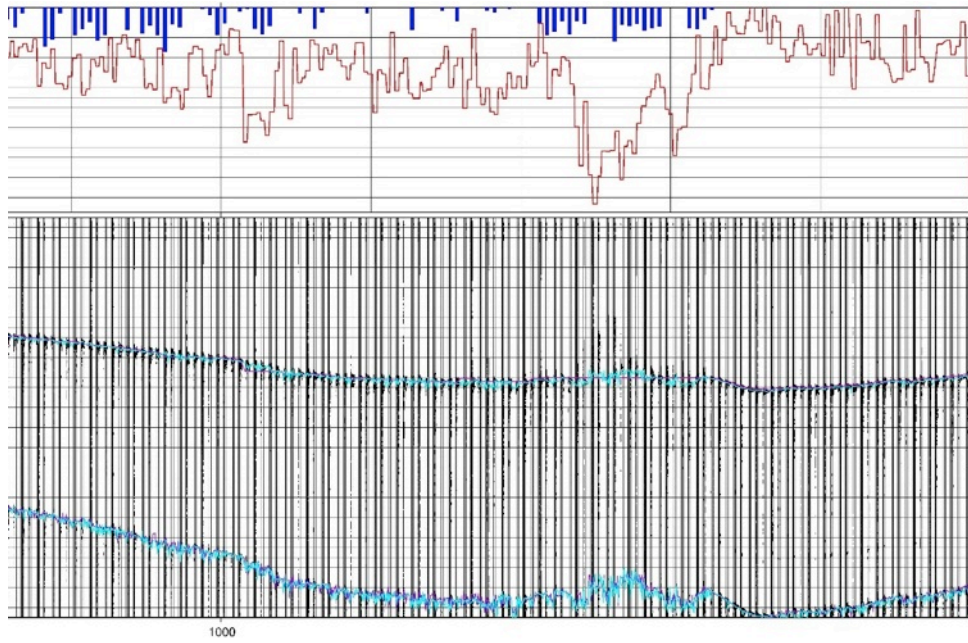


圖 131 測線 NL02