

地形與震測地層剖面分析於離岸風電場址調查之應用

楊懿丞^{1*} 許鶴瀚² 吳俊鼎³ 溫修敏⁴
陳姿婷⁵ 連政佳⁶ 洪瑋廷⁶ 劉家瑄⁷

摘要

本研究介紹各種地球物理調查技術與其原理，並將其應用於彰濱外海第29區離岸風電潛力場址之地質調查，藉由分析不同聲源訊號資料，提供不同深度與解析度的地質資訊，並研究末次冰期不整合面、最大海漫面以及現生沙波移動之基底面等三個具指標意義之地層邊界，且描繪調查區域內之沙波厚度特徵。對於離岸風電場址之穩定性而言，開發區的地質特性，特別是淺層因沉積物移動造成的沙波地形起伏變化為臺灣海峽風機挑戰之一，因此在風場開發區域內，海床下地層的地質特性、沙波構造之分布以及沙波活動範圍等便為應注意的地質議題。透過不同的反射震測及多音束水深資料，瞭解現生地形及海床下地層特徵，並分析調查區內沙波地形及沈積特性之變化，將能進一步掌握彰濱外海離岸風電潛力場址之地質特性。

關鍵詞：反射震測，底質聲納，多音束水深，沙波，離岸風電，彰濱外海

1. 前言

我國積極推動離岸風力發電之開發及設置，經濟部已於2012年7月公告並啟動「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，並於2016年底完成首座離岸風電示範機組的設置，並已在2019年底完成首座商轉離岸風場。在政府政策積極投入離岸風場開發的背景之下，在不同階段也曾吸引了許多國內外開發商投入，例如：全球最大的離岸風場開發商丹麥的沃旭能源(Ørsted)、加拿大北陸電力(NPI, Northland Power Inc.)、新加坡玉山能源、丹麥哥本哈根

基礎建設基金(CIP, Copenhagen Infrastructure Partners)、澳洲麥格理(Macquarie Capital)、德國達德能源(WPD)、德國安能(EnBW)、日本JXTG能源株式會社(JXTG Nippon Oil & Energy)等等。而本地開發商則曾包含了臺電、中鋼、上緯、遠東、永傳、等等，可見我國風能發電的潛力極具開發價值且正積極開發中。然在開發風力潛能廠址之前，建立地質模型以確保離岸風機建設工程安全是必要評估，而應用海洋地質與地球物理調查技術評估廠址穩定性，是除了海域鑽井外，還能由淺至深地檢驗的地層與構造之分布，且具有效率的調查方法。本研

¹ 國立臺灣大學海洋中心 研究專員

² 臺大海洋研究所 助理教授與海洋中心 助理研究員

³ 臺大海洋中心 研究助理與美國加州大學聖地牙哥校區史貴普斯海洋研究所 博士生

⁴ 臺大海洋中心 研究專員與宸訊科技股份有限公司 GIS分析師

⁵ 臺大海洋研究所 博士後研究員

⁶ 臺大理學院貴重儀器中心 技術員

⁷ 臺大海洋中心 研究員與海洋研究所 名譽教授

*通訊作者電話: 02-33661814, E-mail: zirconpyrite@gmail.com

收到日期: 2019年08月31日

修正日期: 2020年07月16日

接受日期: 2020年08月03日

究藉由分析不同聲源訊號資料，展示不同解析度與深度的成果，以作為離岸風電開發之參考。

2. 調查技術

本研究利用聲學方法建立水深與地層剖面資料，以檢驗地形、地層與構造特徵的分布。此類技術原理為利用聲源釋放聲波能量，聲源能量在經過海床及地層時，因其組成介質不同或不均質，以至於不同反射層及介質的彈性係數以及密度等物理特性會有所差異。此差異會造成聲波能量在沉積物或不同性質之岩層中產生傳遞、折射以及反射等現象，隨後利用接受器收集這些不同特性的反射資料，並根據勘查目標進一步處理分析，再透過聲速資訊進行聲波走時及深度的轉換，便可取得海床深度及其下的地層資訊。

其中不同聲源訊號具有不同的頻率範圍(Frequency，單位時間內波的重複次數，單位為赫茲)，地層剖面之解析度與所使用之聲源頻率有關，聲源頻率越高越能提高剖面解析度，但相對穿透深度會降低，因此地層剖面技術能提供不同解析程度與穿透深度，依照其聲源形式(圖1)，從高解析(高頻、低能量)到高穿透深度(低頻、高能量)的需求，可大致分為多音束及單音束水深聲納、底質聲納剖面(sub-bottom profiling)、單爆式(uniboom/boomer)聲源、火花式放電(sparker)聲源、時差式空氣槍(GI-gun)、數十至數百立方英吋高壓空氣量的小型空氣槍組以及以大能量(數千立方英吋高壓空氣量)的大型空氣槍陣列。因此不同頻率之聲源訊號被廣泛地應用於海域地層調查中，取得更進一步的地質資訊。例如，以海床地形特徵為調查目標，聲源應選擇高頻之水深聲納作為聲源訊號(如：多音束測深儀)，方能更切合且有效率調查海底表面地形起伏變化。若以高解析淺部地層為調查目標，則以火花式放電聲源或時差式空氣槍(GI Gun)作為聲源訊號較為適合。

除了不同的聲源技術外，在海域地形與地層調查中，經常面臨海況不佳而產生環境隨機雜訊或是伴隨主要反射出現的海底地層複反射(Multiple，週期性訊號，非真實地層反射之響應)等各式問題，這些雜訊如果過於強烈，便會抑制地層剖面真實訊號之品質，因此對於雜訊辨識與處理便是聲學資料處理中重要的工作之一，例如針對週期性雜訊之資料處理，解迴旋處理即是一重要之步驟，藉由壓縮震測基本漣波，使聲源訊號趨向丁型波，如此所收集記錄之訊號較能移除週期性雜訊之效應，完整響應底部地層介面之反射係數(Yilmaz, 2001)。故因應不同調查目標，選擇適合的探測儀器以及建立適合之資料處理流程，方能達到調查需求，並得以完善之地質解釋與模型，以下簡介各種不同聲源訊號之特性及適用目的。

2.1 水深聲納

水深測量早期是利用人工牽引測深錘(Leadline)測量水深，其資料以單點取樣測量海床深度，測量數值可能精準，但耗時且無法完全覆蓋調查區域，因此，在1930年代後，水深聲納系統被開發且應用於收集海床深度資料。收集海床深度資料的聲納系統主要有兩種：單音束測深儀(Single-Beam Echo Sounders)與多音束測深儀(Multi-Beam Echo Sounders)。收集資料的方式，前者由船底垂直向下發射聲波，後者則是由船底以扇形面的方式(聲源面積大，更有效率)向下發射聲波，得到當時船位置下方的海床深度，兩者相比，多音束測深儀更容易獲得大面積及解析度高的水深資料，但儀器設備之成本高於單音束測深儀許多。多音束測深儀之聲源依據其調查區域之水深變化範圍適用不同型號。大致分為淺水(200公尺內)、中程水深(至2,000公尺)、深水用(至5,000公尺左右)及全水深(至12,000公尺左右)的測深儀，一般而言，淺海用測深儀較深水用儀器之測深頻率較高且音鼓尺寸較小，而現代的儀器設計更進一步特化聲源與接受器陣列的角度設計，透過跨大測

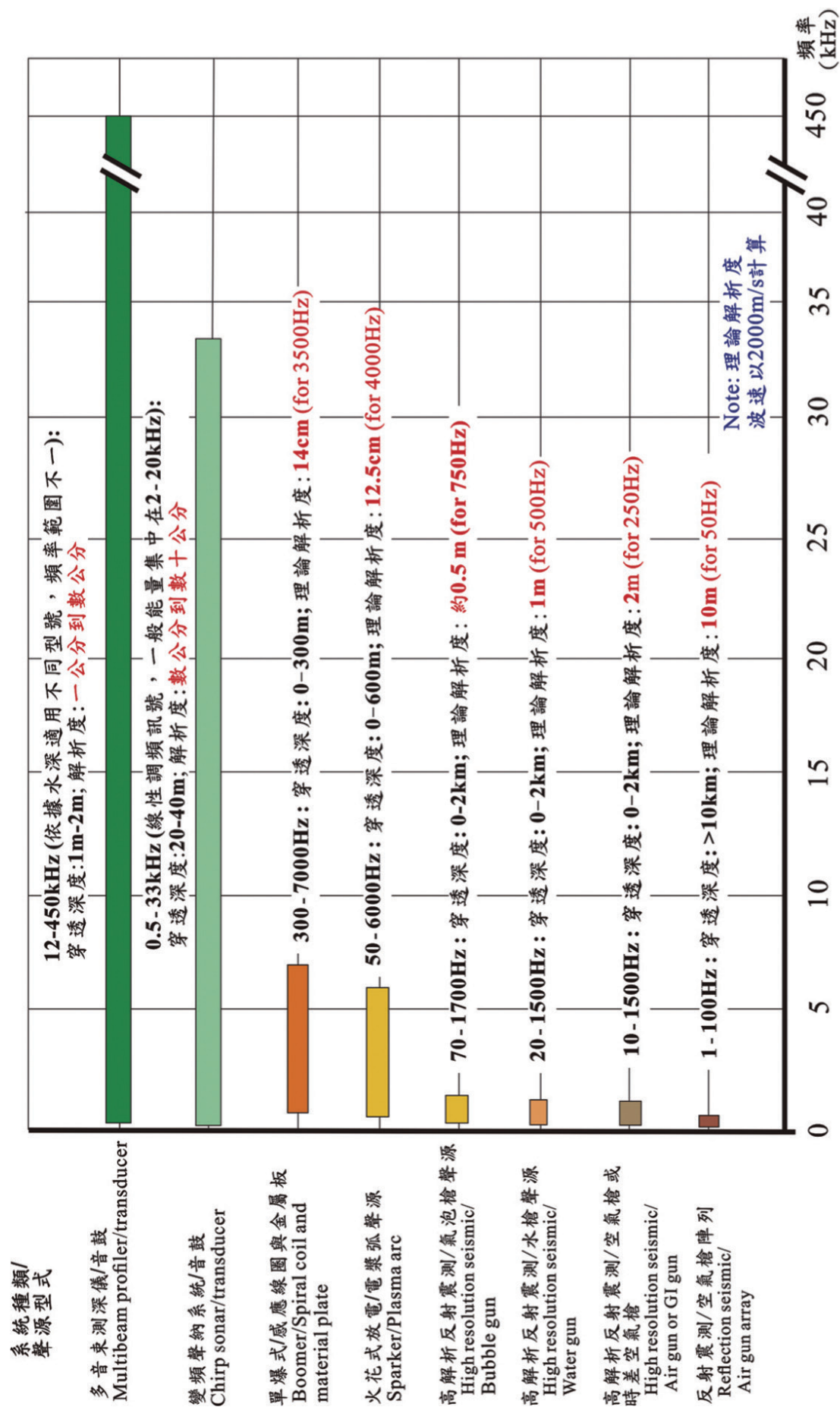


圖1 不同地層調查技術系統之聲源形式、穿透深度、訊號頻率以及解析度(本研究繪製)

掃的面積範圍，以提升作業效率，所收集的水深資料之後，可再進一步整編成數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，藉以展示海床地形變化(圖2a和2b)，甚至水層中的水團特性。

2.2 底質聲納(sub-bottom profiling)

底質聲納是一種高解析度的地層剖面調查工具，根據訊號特性，可分為單頻式與變頻式聲納兩種。早期底質聲納剖面儀是以12 kHz的聲波作為聲源，但在1960年代後，由於發現

3.5 kHz的訊號有較好的穿透深度與反射特徵，也成為另一種廣為使用的單頻式聲納聲源。1980年代後，隨著電腦運算能力及訊號處理技術的進步，連續變頻聲納可藉由訊號頻率隨著訊號擊發時間的改變，加上訊號自對比方法(*autocorrelation*，即自相關運算，找出一訊號自我最相似之時間與空間對應)(*Klauder et al., 1960*)，因此結合不同頻率訊號的優勢，變頻式聲納不僅解析力更為提高，也能兼顧一定的訊號穿透深度(數公尺至數十公尺深)，對於觀察海床特徵以及底質細微變化，例如對海水面升

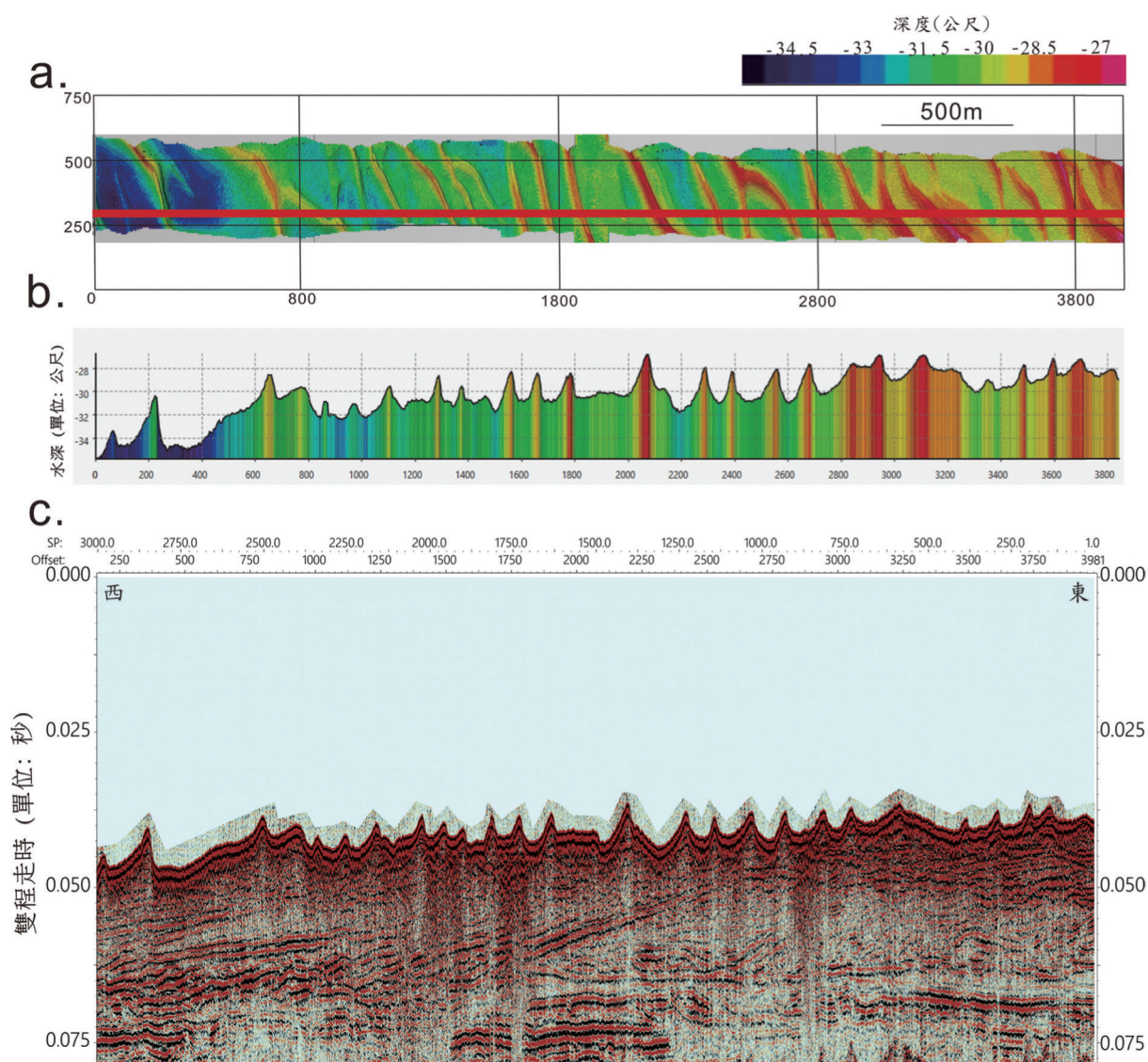


圖2 沙波特徵在多音束水深剖面儀以及火花式放電聲源地層剖面例子(本研究繪製)。(a.) 水深數值高程模型。以2(a)左下點為座標參考點，間距單位為公尺。以平均海水面作為深度基準點。(b.) 沿本圖(a.)紅線方向(西向東)擷取之海床深度剖面。(c.) 鄰近區域之火花式放電聲源地層剖面，縱軸為雙程走時，單位: 秒。

降造成之冰期不整合面岩性變化的了解(圖3)起到相當大的幫助(邱瑞焜與劉家瑄, 2005)。

2.3 單爆式(Boomer)及火花式(Sparker)放電聲源

單爆式及火花式放電聲源的地層剖面調查技術則大多應用在淺地層目標的海事工程調查工作中，此種調查方法為最常見之離岸風電場址穩定性探勘調查項目之一。單爆式及火花式放電聲源此兩種方法均是使用高壓電作為能量來源，前者是利用感應電圈輸入高壓電流至以鋁或銅為材質的金屬板中，使金屬板產生震盪進而產生機械性的聲波；後者則是在強電場的作用下，用高壓電極所組成的電漿弧瞬間汽化周圍的水體，進而產生的爆裂聲作為聲源。這兩種聲源可產生出數百至數千赫茲(圖1)的訊號，可提供高解析度的地層剖面(圖2c和圖4)，其穿透深度(數公尺至百餘公尺)較底質聲納為深，但相較於以空氣槍作為聲源的反射震測調查技術要淺上許多，大多僅用在淺部地層的調查工作中，故也可將此種技術所收集來的資

料視為底質剖面的一種，因此，在研究海床特徵，如沙波、海床線形與淺層地層的關係的議題(圖1、圖4)，單爆式聲源與火花式放電聲源與更高解析之聲納剖面儀資料可為一適當的調查技術。

2.4 時差式空氣槍(GI Gun)與陣列式空氣槍(Air Gun)

利用空氣槍作為聲源的地層剖面調查技術，依其所接受的訊號形式，又可分為折射或反射震測。根據聲源的不同設計，多頻道反射震測(MCS, multi-channel seismic)調查又大致分成高解析震測、常規震測以及深部震測三種。前者是以數十立方英吋高壓空氣量的小型空氣槍，利用數十至一千赫茲左右的較高頻震波訊號，探測數百到數公里深的地層(圖1)，再透過震波聲源訊號的優化，發展出了時差式空氣槍(GI-gun)，藉由10-30 ms內的兩次擊發，抵銷第一次炸射時氣泡爆開引起的回壓現象，得以有效降低氣泡脈衝的干擾(bubble pulse，為短周期複反射之一種，此種訊號通常會緊隨著真

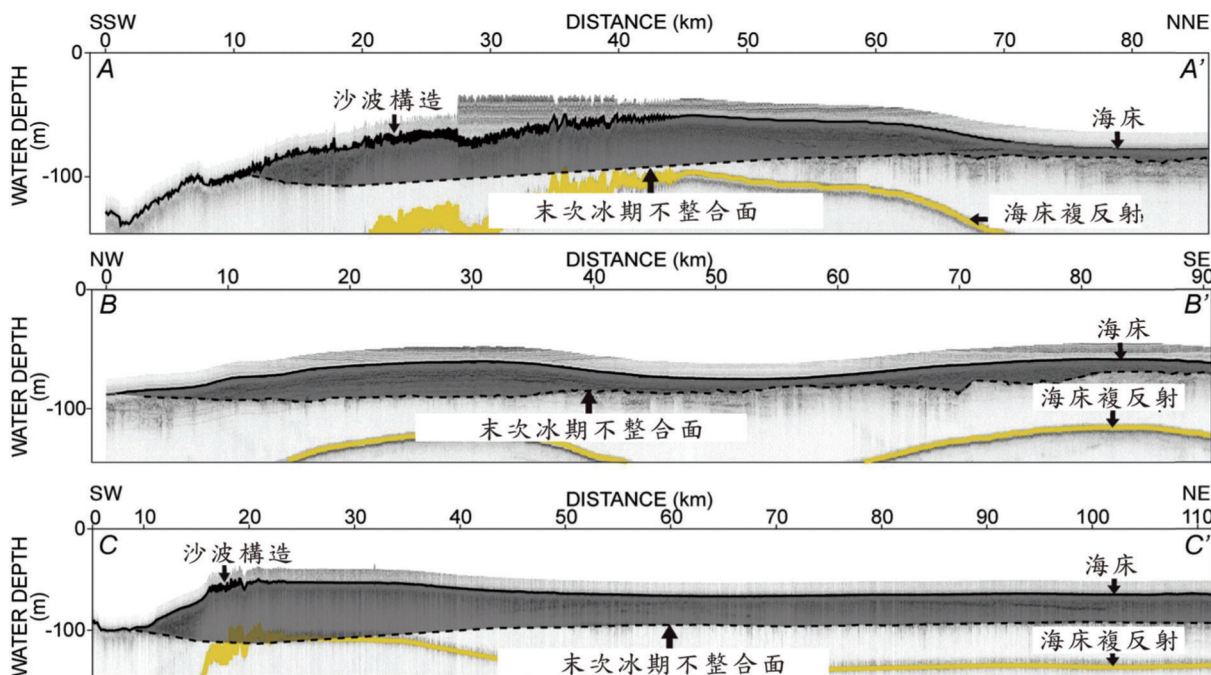


圖3 臺灣海峽底質剖面資料範例(Chang *et al.*, 2015)。顯示海床及其底質細微特徵(如：海床表面沙波之分布及底質之反射訊號強弱)。高解析之底質剖面更能顯示近代海水升降造成之不整合面，如末次冰期不整合面。

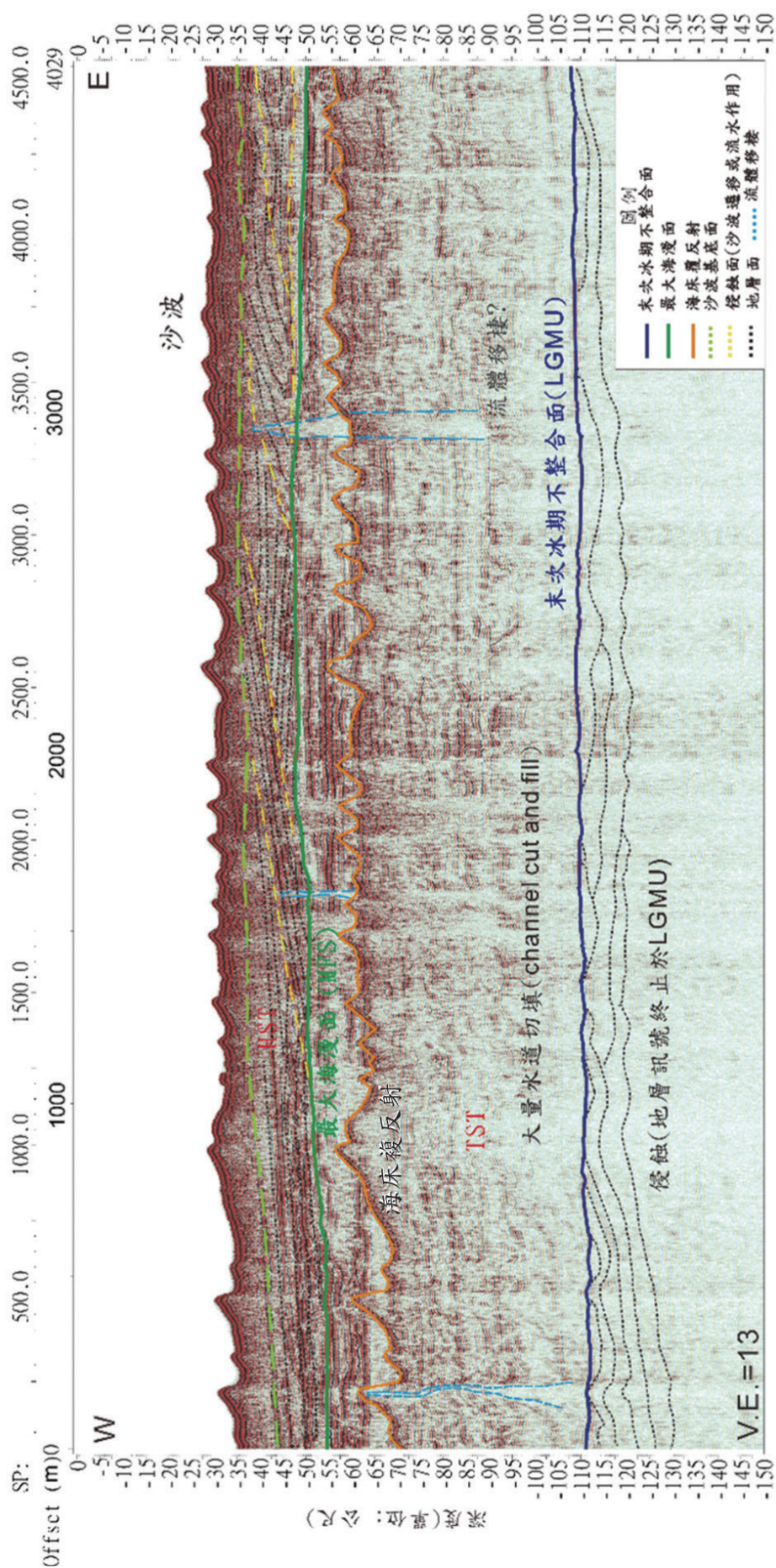


圖4 臺灣海峽彰濱外海離岸風電場址火花式放電聲源地層剖面例子(本研究繪製)。縱軸為深度，單位：公尺。此圖東西向剖面，左為西，右為東。

實訊號之後，影響地層之解析度)，以提高訊號訊雜比進而取得較佳的震測影像。常規震測則大多是利用單支空氣槍或數支空氣槍，以數百立方英吋高壓空氣量發出數十至數百赫茲的訊號(圖1)作為聲源。而第三種深部震測技術，是用大型空氣槍陣列，以數千立方英吋高壓空氣量之大能量，發出數赫茲至數十赫茲為主的較低頻訊號，一般都藉由長支距(數公里至十多公里)的信號電纜或海床聽音器陣列記錄訊號，也需要較複雜的訊號處理技術(許鶴瀚等，2016)。後兩種震測剖面調查技術，則大多是用來探測數公里至數十公里深的地層，也常用於盆地分析、構造調查及油氣探勘工作中。現今也從早期的二維震測剖面，廣泛的擴展到三維震測影像、甚至跨入四維的時空變化資訊，以更完整的掌握地下構造以及其變化(許鶴瀚等，2016)。因此，若以研究海域地質，舉凡海床高程特徵、地下地層出露分布概況、斷層活動範圍等研究議題(圖5)，多頻道反射震測調查為經濟且有效率之方法之一。而近來隨著聲源技術的發展，兼顧高解析度及穿透力的空氣槍也逐漸開發，讓地層剖面的調查技術應用得以更全面。

3. 研究方法

研究團隊於臺灣海峽彰濱外海離岸風電潛力場址區域，收集了數千公里的高解析多頻道反射震測地層剖面、火花式放電與底質聲納淺地層剖面以及單、多音束地形資料。研究團隊在完成不同地層剖面資料以及水深資料的處理工作後，在淺部地層中，透過震測地層學及層序地層學的分析方法，並結合海底地形及地震記錄的分析成果，在海水面變遷系統架構下，由淺入深，針對不同深度的地層，經由震測相以及反射特徵的分析工作，針對彰濱外海的離岸風電潛力場址區域建立了區域地質模型，進而評估調查區域內沈積與構造活動特性，以探討可能的穩定基盤面以及地質構造活動所帶來

的潛在風險。

層序地層學理論基礎認為沈積物的堆積主要控制為海水面升降變化，而且海水面的升降變化大致會以循環的方式重複呈現，因此沈積物堆積的情形就可以加以預測。當海水面降低時，侵蝕基準面下降，沈積物便能沈積到陸棚以下的環境，形成了低水位體系域(lowstand system tract, LST)；當海水面上升時，沈積環境改變，將形成一海進面(transgressive surface)；而隨著海水面的上升，納積空間漸增，便會形成以退覆積為主的海進體系域(transgressive system tract, TST)；當海水面達到最高時，沈積環境達到最深，將出現一最大海漫面(maximum flooding surface)，海水面高度大致穩定，納積空間無法再增加，便會出現以前積為主的高水位體系域(highstand system tract, HST) (Posamentier *et al.*, 1988)。

藉由層序地層學的概念主要在剖面中先將具有地質意義的層序邊界(sequence boundary)定義出來，由於層序邊界所代表的地質意義為沈積環境的改變或沈積物供應來源的改變，甚至反映了地體構造活動的歷史，因此在定義出不同的層序邊界後，研究團隊便可以於剖面中推測可能的沈積環境變化，而沈積環境(如：流速、沉積空間、沉積物的供應量等因素)改變會造成沈積物的顆粒大小、沈積物堆疊方式、物理性質皆會有所變化，因此可由震測剖面中觀察地層之間的接觸關係(進覆、下覆、侵蝕截切等)或強反射層來界定層序邊界。界定層序邊界之後，藉由觀察震測相(Seismic facies)，若為同一震測相代表有相似震波特性和振幅，但其震波特性與相鄰的反射層特性不同，一般而言，會以振幅、頻率、反射連續性、相的外部輪廓與相的內部組態描述之，不同的震測相能推測不同的岩層物理性質。以振幅而言，振幅的大小能指示速度、密度的交界、地層的間隔以及流體的含量；以反射面的頻率而言，可用來推測地層間隔大小與地層中流體的含量；以反射連續性而言，可以反映地層的連續性與沈積的過程

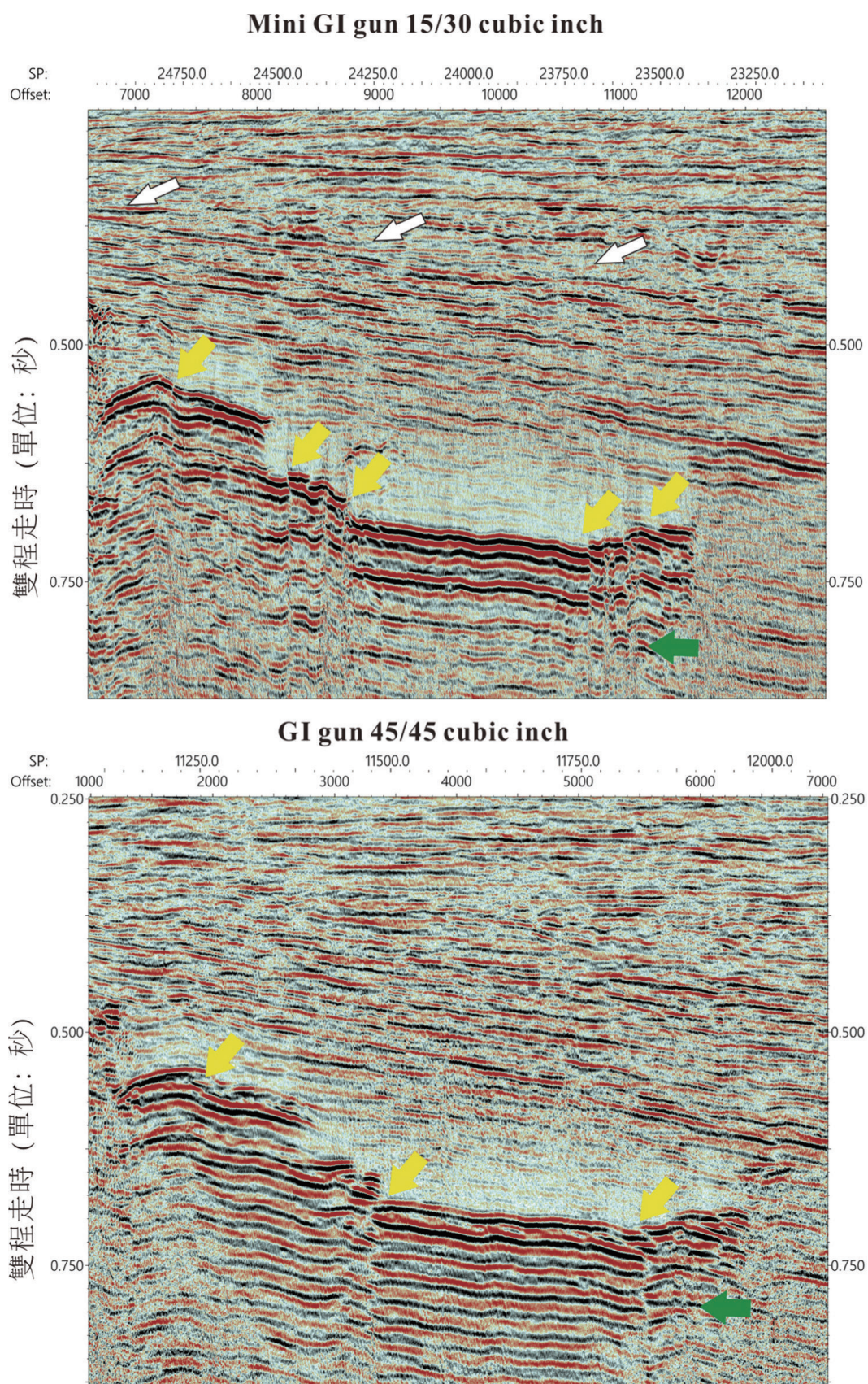


圖5 臺灣海峽不同聲源震測系統所收集之鄰近剖面例子與比較(本研究繪製)。黃色箭頭標示地層錯動特徵，顯示正斷層構造。白色箭頭標示地層訊號終止特徵，如圖所示聲源訊號不同造成地層剖面解析度不同之現象。綠色箭頭顯示訊號穿透深度不同，造成振幅強度不同現象。震測剖面縱軸為雙程走時，單位: 秒。

(Sangree and Widmier, 1979)。透過這些震波特性的分析來解釋地層的資訊，進而推測該岩層的沈積環境。

針對現代的水深地形特徵，本研究利用傅

立葉轉換進行現代的地形特徵空間分析，將3維空間的地形空間-振幅(波高)域資料轉換至波數-能量域進行分析(圖6)，轉換公式(張憲國等，2015)如式(1)：

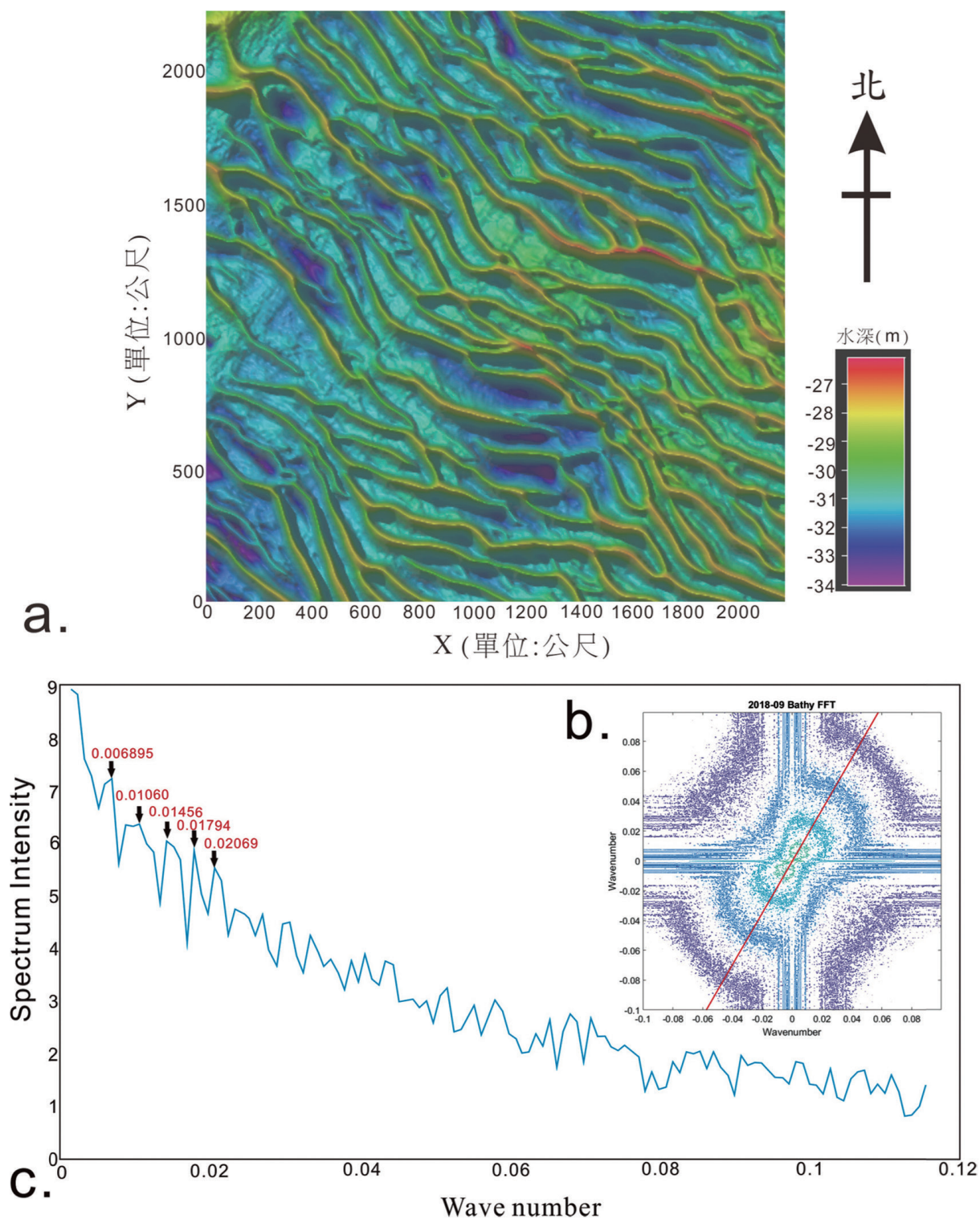


圖6 (a.)研究地區聲納剖面儀水深特徵(b.)水深特徵2維傅立葉分析(振幅單位: dB)(c.)沿北北東-南南西方向擷取之波數剖面(本研究繪製)。

$$F(k_x, k_y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[-2\pi i \left(\frac{k_x x}{M} + \frac{k_y y}{N} \right) \right] \quad (1)$$

其中 $f(x, y)$ 代表 $M \times N$ 大小的影像，屬於空間域， $F(k_x, k_y)$ 是經轉換至波數域的結果影像， $i = \sqrt{-1}$ 為單位虛數， (x, y) 是卡式座標， (k_x, k_y) 為空間波數在 x 及 y 的分量，其為波長的倒數，最後由下列兩式(式2、式3)可推算出波長(L)與入射角(θ)。

$$L = \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{k_y}{k_x} \right) \quad (3)$$

藉由此地形特徵空間之分析方法，我們可以得知在調查區域範圍內沙波地形之波長變化，圖6b水深特徵二維傅立葉分析可見中心點為最低頻(低波數)之位置，能量從中心點幅散向外，越往外頻率(波數)越高，顏色越藍則表示振幅越大。紅線標註高頻能量集中之方向(北北東-南南西)。沿此北北東-南南西度切出之二維傅立葉轉換後頻譜圖之剖面，如圖6b中紅線，振幅值經正規化(normalization)處理，圖中數字顯示判讀出主要之訊號峰值此方法排除了在資料分析過程中，因主觀選取測線方向及長度所造成分析差異，進而可能導致的解釋偏差之影響，對於客觀評估離岸風電潛力場址內的沙波特性能有進一步的幫助。

4. 研究成果

4.1 現代海床沙波特徵

本研究經地形特徵空間分析其結果顯示離岸風電潛力場址29區之海床沙波特徵，沙波延伸方向為西北西-東南東向(圖6a)，而沙波大多沿北北東-南南西方向間隔分布，而頻譜分析的結果顯示高頻訊號在北北東-南南西(30/210)

度的方向上具有對稱性，此方向便可視為調查區域中沙波構造的走向(即垂直沙波構造走向的方向)，也應為沙波移動的變化方向，頻譜分析的結果與地形定性上的解釋呈現一致。而進一步於頻譜中擷取北北東-南南西(30/210)度的波數剖面，並將影像進行正規化(normalization)處理，在第一象限剖面(圖6)，可讀出0.006895、0.01060、0.01456、0.01794、0.02069等幾個主要峰值，其中又以0.006895之峰值變化最大，能量最高，再進一步換算其波長，分別對應145、94、68、55、48公尺波長的地形變化訊號，而145公尺波長的訊號最突出。

就調查區域內的地形資料進行半定量的分析，可發現調查區域內500公尺的範圍內約有3至4個沙波構造發育，在局部區域沙波波長較短，每500公尺約有4至6個沙波構造發育，並可在部分測區內，發現波長較長的沙波構造(每500公尺約有2至3個沙波發育)，顯示頻譜分析的成果也符合半定量的解釋成果。總體而言，本研究區域內之沙波大致呈現西北西-東南東向、波向為30/210度、波高在1.5-8公尺，主要(多數)波長約在145公尺、另有48-94公尺的較小型沙波發育。本研究所調查之區域沙波波長特徵，波高(振幅)等資訊為同一時間點所收集之資訊，如能針對同一區域，不同時節收集相同類型的資料進行比對，如此更能對離岸風電場址長期之海底地形特徵之變化量全面了解，對於風電之長期運維更有貢獻性。

4.2 地層剖面特徵

經由震測層序地層學的分析，本研究在多組震測剖面中辨識出區域性的層序邊界，其深度分別為：海水面下深度105公尺至110公尺深處之不整合面以及海水面下深度50公尺至55公尺深處之整合面(圖7，藍線及綠線)。海水面下深度105公尺至110公尺深處的反射，為一個強反射且為一個侵蝕截切面，在此反射面以下的地層訊號振幅呈現中一弱的反射，且局部連續性佳的地層反射訊號終結至此反射面之下(圖

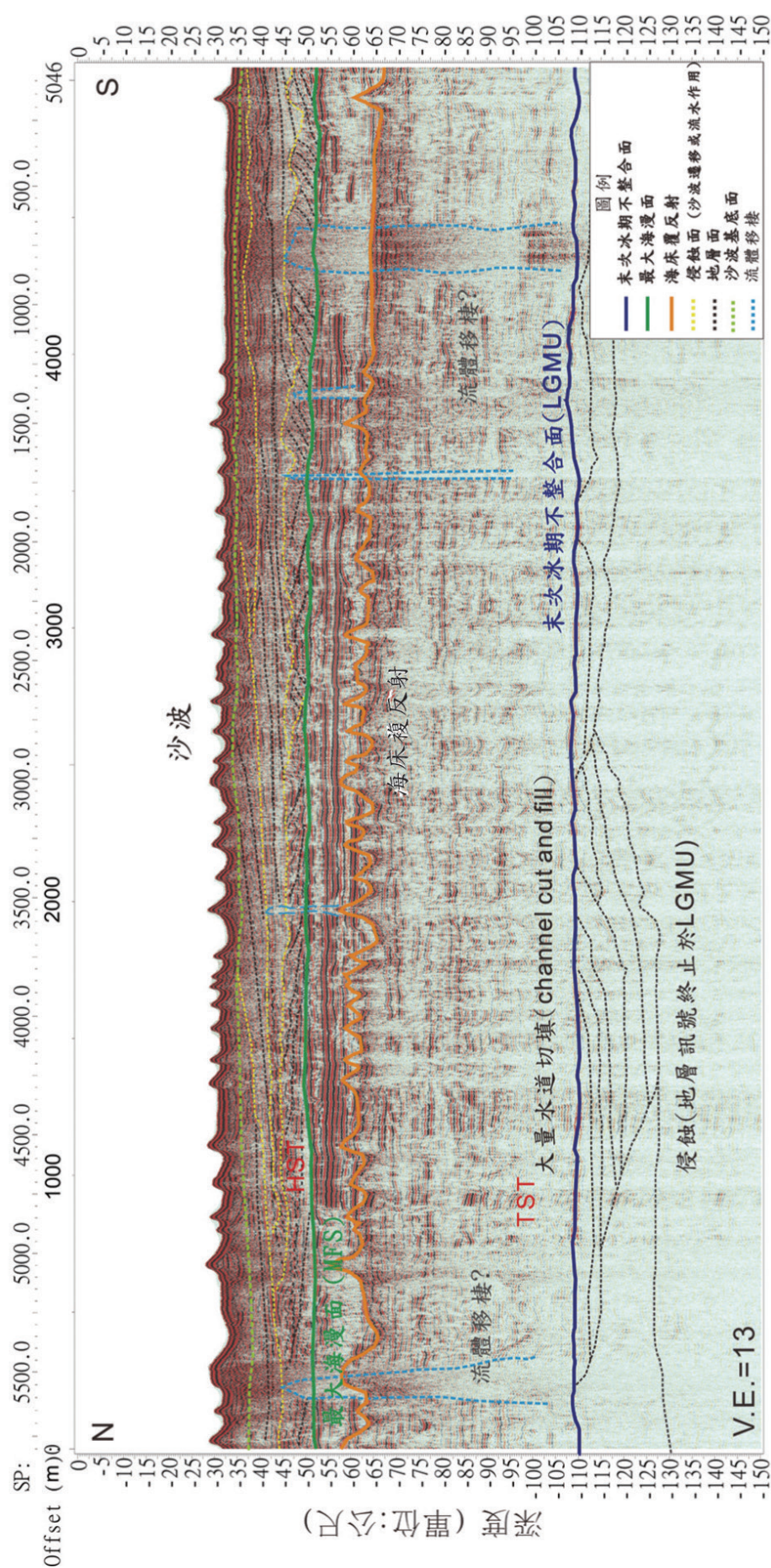


圖7 彰濱風場區域內南北向Sparkcr剖面解釋(本研究繪製)。深藍色線為末次冰期不整合面；綠色線為最大海漫面；橘黃色為海床複反射位置；黃色虛線為局部侵蝕面位置；黑色虛線為地層面位置；淺藍色虛線為有流體移棲處，縱軸為深度，單位：公尺。

7, SP:3500、深度110公尺處), 因此根據其震測相特徵及深度分布認定此截切下覆訊號的強反射面為一區域性的不整合面—末次冰盛期不整合面(Last Glacier Maximum Unconformity, LGMU), 其形成原因, 是由於冰河時期, 海水位面低, 使得海床暴露於空氣之中而造成地層被侵蝕所遺留下來較老、被壓密較久, 或岩性較硬的物質, 因上述的沉積物物理特性使得在震測剖面中能呈現較強的反射訊號。

在海水面下深度50公尺至55公尺深處之整合面, 在該整合面之下地層的震測相振幅介於強—中的反射訊號, 連續性介於連續—半連續之間, 反射訊號大致平行, 且在深度55至110公尺之間出現叢丘狀(hummocky), 伴隨振幅忽強忽弱的震測相特徵(圖7)。另一方面, 在該整合地層面之上地層的震測相振幅強、連續性極佳、反射訊號介於平行—似平行之間, 並廣泛出現以斜狀震測相為主的震測訊號, 根據此地層面之上下地層震測相特徵, 本研究解釋其成因應為海水面升降循環過程中, 因海面上升形成的最大海漫面(Maximum Flooding Surface, MFS), 此時海水面已到達最高峰, 在最大海漫面以上的地層為高水位體系域(HST), 此時期因納積空間不再增加, 但沈積物仍不斷供應, 使得在海漫面以上沈積物的堆疊方式開始形成向海方向的前積(progradation)的形態, 然而其成因係屬於水下三角洲的前緣堆積(foreset, 前積層), 亦或是潮流系統往復水流之搬運或再搬運作用形成, 其成因複雜與多元值得深究, 但從叢丘狀震測相地出現表示此處沉積環境的營力的複雜性。最大海漫面為海水面升降而造成之岩性變化之界面, 為整合面, 但反射震測資料反映地層之沉積物物理性質之變化(如: 反射介面之阻抗), 其垂直方向得解析度與震波之波長相關, 因此地層之岩性變化較難以觀察, 唯一可確定的是最大海漫面以上之地層觀廣泛觀察到斜狀震測相特徵, 符合層序地層學之模型。

再越往淺部, 地層方向更為錯綜複雜, 在

最大海漫面以上的震測地層層序內能辨識出一系列局部出現的不整面(圖7, 深度40-50公尺處, 黃色虛線, 其成因可能為沙波遷移或其他流水作用形成之侵蝕面)。在此些局部出現之不整合面之上, 一廣泛分布於調查區域內之不整合面亦被辨識出(圖8, 深度30-40公尺, 淺綠色線), 本研究發現在此不整合面之上, 現生沙波構造廣泛分布, 且現生沙波之內部交錯層理訊號終結至此面上, 因此將此面視為現生沙波移動影響之最底邊界, 本研究稱之為沙波基底面。沙波基底面的深度隨著上覆海床沙波形貌而變化, 綜合水深資料沙波波長之分析, 又可分為兩翼對稱之沙波與兩翼不對稱之沙波。

兩翼對稱之沙波分布較密集, 波長約48至95公尺, 而兩翼不對稱之沙波, 其波長約為150至250公尺。在兩翼對稱之沙波底部, 其基底面較淺(深度約35公尺深, 圖8), 而兩翼非對稱之沙波底部, 其基底面深度約40公尺深(圖8)。在經過不同地層剖面交叉比對後, 研究區域內之沙波基面深度範圍大致為在海面下33公尺到42公尺之間, 沙波之厚度則在1公尺到15公尺左右, 在研究區域內之北部以及西部深度較深, 其代表沙波之厚度為西厚東薄, 北部沙波厚度略厚於南部地區(圖9)。總體而言, 此區域之沙波厚度在數公尺至數十公尺之範圍內。沙波基底面的辨識, 有助於評估離岸風機場址之海床穩定性, 藉由了解沙波基底面之深度位置及其分布, 解析沙波在垂直方向上移動之影響範圍, 然受限於未有良好的年代控制資訊, 以現有資料分析結果而言, 沙波的形成年代為臺灣海峽進入高水位時期後期, 之後因沈積及侵蝕作用造成一地形略有起伏的沙波基底面, 之後因潮流作用在此基底面上, 使得現生沙波特徵在海床表面得以觀察到, 但其確切的開始發育年代, 以及其生長與變動的速率, 仍需其他的定年資料方能佐證。

除了主要地層邊界與沙波構造外, 在地層剖面中還可以觀察到一系列長條狀、振幅極低、無法辨視內部反射訊號的反白帶(圖7, 藍

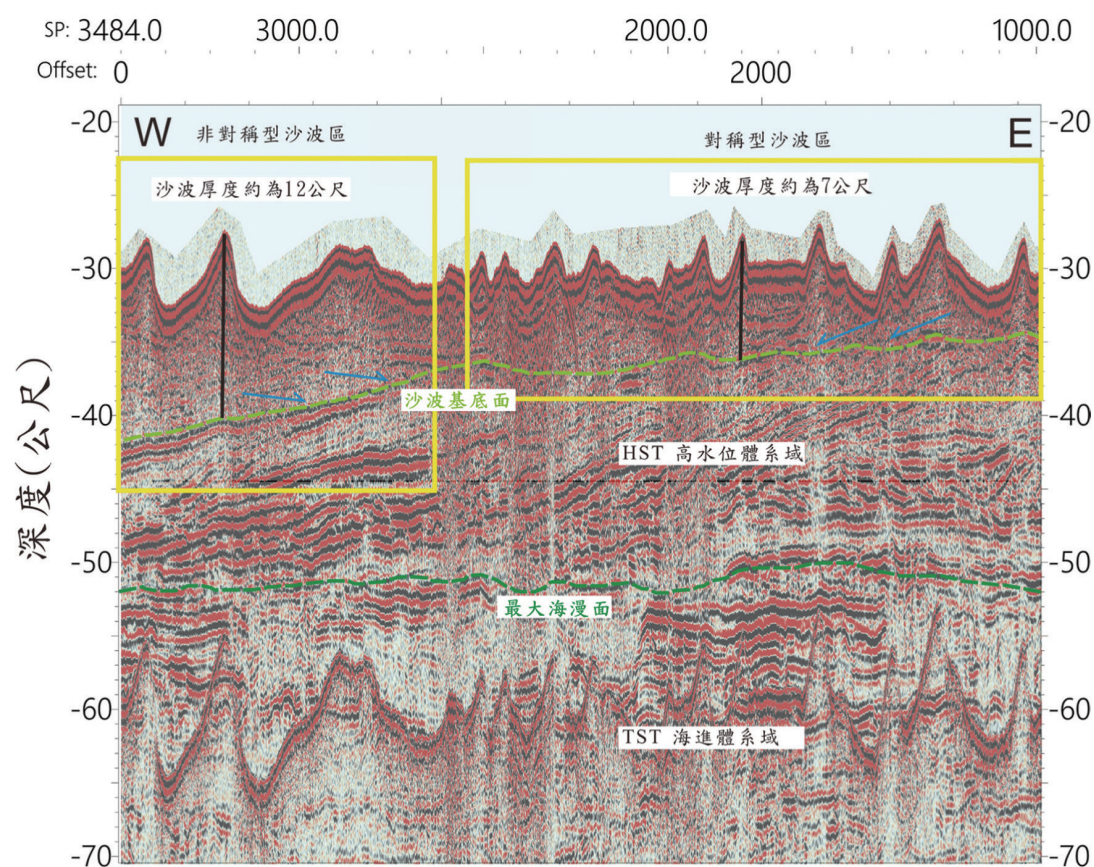


圖8 對稱型沙波與非對稱型沙波基底面深度特徵(本研究繪製)。縱軸為深度，單位：公尺。

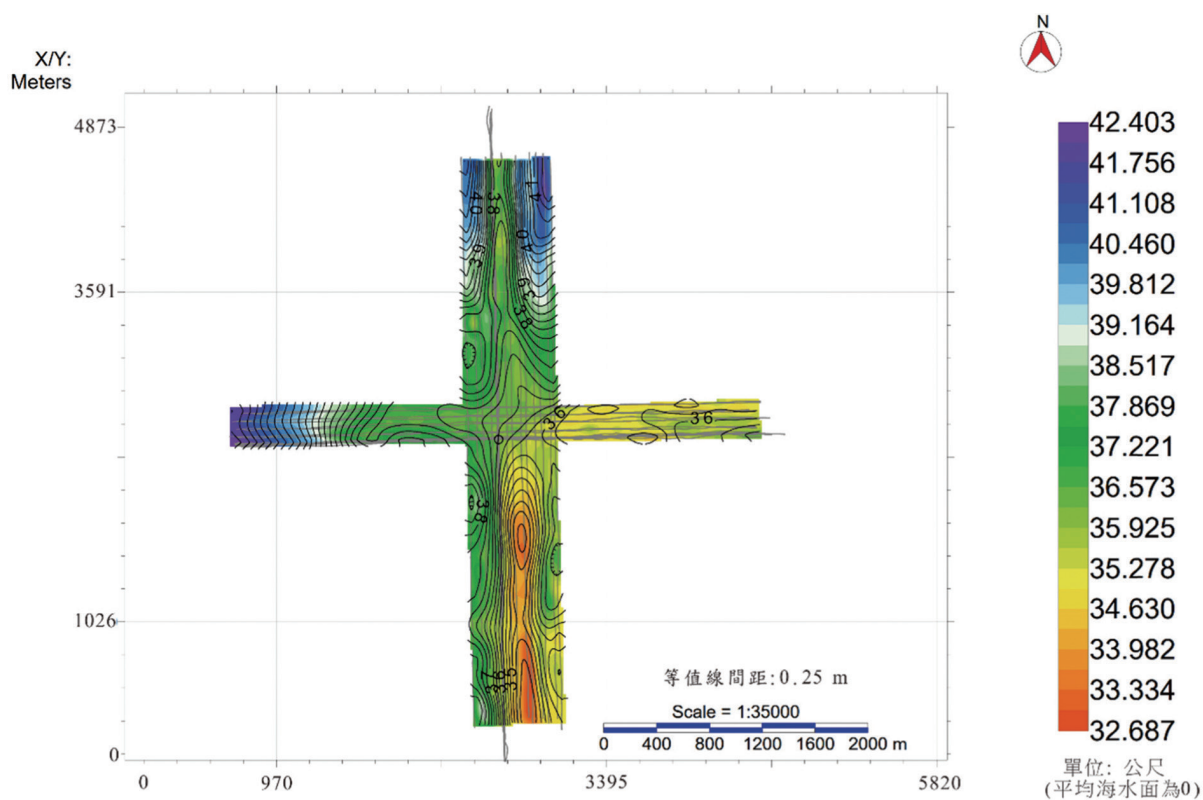


圖9 調查區域內沙波基底深度分布圖(本研究繪製)。本圖以平均海水面作為深度基準點，調查區域內之北部以及西部，沙波基底面深度較深，以深藍色表示之。

色虛線)。這些反白帶通常會由深部延續至淺部地層，使局部地層的反射訊號連續性變成較差，由於流體與地層之聲學阻抗不同造成震測相上之差異，因此本研究根據此反白帶特徵解釋可能為流體移棲造成的效應，當地層中的含水量過高，受到地震或其他擾動容易造成沉積層液化，而地層中的流體移棲很容易提高含水量，導致形成液化的高危險區，因此流體移棲亦為風機建設時應評估之面向之一，不同聲源性質之地球物理資料有其探勘限制，利用高解析淺部地層剖面資料觀察目標地層、流體移棲等地質特徵，再利用大聲源能量之深部震測剖面接續追蹤深部訊號，除水平方向之分布能兼顧外，更能有效率且準確地了解地質構造之垂直分布概況。

5. 結 論

本文介紹了不同地球物理調查技術與資料，其中包括多音束水深聲納、底質聲納剖面儀、火花式放電聲源以及空氣槍聲源等不同的聲源型式系統，並簡介了其聲源特性，如頻率、穿透性等性質及其可被應用的範圍。根據不同技術的調查結果，本文分析了彰濱外海離岸風電潛力場址之淺部地層架構以及現生海床之沙波特徵。利用震測層序地層學之分析震測相配合海水面上升及下降之概念，本研究在彰濱外海風電潛力場址區域辨識出末次冰期不整合面、最大海漫面、沙波基底面三個主要之地層邊界，其中沙波基底面之深度分布範圍在研究區域內之北部以及西部深度較深，沙波之厚度為西厚東薄，北部沙波厚度略厚於南部地區，且此區域之沙波厚度在數公尺至數十公尺之範圍內，並透過對沙波基底面之了解，界定出現生沙波移動影響之地層範圍。

此外針對高解析的地形資料，本研究使用傅立葉分析應用於海床之沙波特徵分析，透過海床傅立葉分析法，高頻的能量訊號大多沿北北東—南南西方向分布，此方向便可視為調查

區域中沙波的移動方向。綜合而言，本研究區域內之沙波大致呈現西北西-東南東向、波向為30/210度、波高在1.5-8公尺，多數波長約在145公尺、另有48-94公尺的較小型沙波發育。透過地層剖面及海床傅立葉分析法，本研究對淺部地層及海床沙波特徵進行分析，其分析結果，如沙波基底深度與沙波厚度可提供離岸風電場址海床穩定性之評估與風機基樁深度、風機管線分布等工程問題提供參考價值。

謝 誌

本論文所用資料為科技部「國家能源型計畫-離岸風機水下基礎設計暨維護決策資料庫與展示平台開發」(計畫編號：MOST 107-3113-E-006-011)、能源局離岸風場區塊開發海域環境建構計畫(計畫編號：106-D0601)及臺灣世曦工程顧問股份有限公司「雲彰隆起離岸風電潛力場址海域斷層構造分析」(計畫編號：08925)，由臺灣大學海洋中心及海洋研究所與成功大學水利及海洋工程學系以及環球測繪有限公司共同執行、收集，在此特別感謝臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組邱協棟技術師、馬玉芳、謝欣崧技術員於海上作業時之種種辛勞，謹致謝忱。

參考文獻

- 邱瑞焜與劉家瑄，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15卷，第46-50頁。
- 許鶴瀚、劉家瑄、邱協棟、陳姿婷、馬玉芳、塗書琳、韓為中、陳松春與謝欣崧，2016。臺灣西南海域天然氣水合物調查之震測技術發展。經濟部中央地質調查所特刊，第30號，第181-199頁。
- 張憲國、鄭義霖與陳蔚瑋，2015。應用二維經驗模態分解及快速傅立葉轉換於衛星影像推算海域地形之研究。第37屆海洋工程研

討會論文集，頁545-550。

- Chang, J.H., H. H. Hsu, C. C. Su, C. S. Liu, H. T. Hung and S. D. Chiu, 2015. Tectono-sedimentary control on modern sand deposition on the forebulge of the Western Taiwan Foreland Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 66, 970-977.
- Klauder, J. R., A. Price, S. Darlington and W. J. Albersheim, 1960. The theory and design of chirp radars. *The Bell System Technical Journal*, 39, 745-808.
- Posamentier, H.W., M. T. Jervey and P.R. Vail, 1988. Eustatic controls on clastic deposition I—conceptual framework. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM)*, No. 42.
- Sangree, J.B., & J. M. Widmier, 1979. Interpretation of depositional facies from seismic data. *Geophysics*, 44(2), 131-160.
- Yilmaz, O., 2001. *Seismic data analysis-Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists.

Marine Seismic Techniques for Offshore Changhua Wind Farm Site Investigation

Eason Yi-Cheng Yang^{1*} Ho-Han Hsu² Jyun-Nai Wu³ Siou-Min Wun⁴
Tzu-Ting Chen⁵ Cheng-Chia Lien⁶ Wei-Ting Hung⁶ Char-Shine Liu⁷

ABSTRACT

This paper presents 4 types of marine seismic survey techniques which all have been employed for offshore wind farm (OWF) site investigation in the Taiwan Strait. These four techniques are high resolution multi-channel seismic reflection survey, sparker seismic survey, boomer and chirp sonar sub-bottom profiling. We discuss their benefits, limitations and applications on OWF site. Sedimentary and stratigraphic characteristics are revealed in different degrees through different geophysical methods. Three regional unconformities, including last glacier maximum unconformity, maximum flooding surface, and sand wave basal surface are identified in the survey area. Morphological changes and movements of sand waves are important issues in engineering design for turbine installation and operation. We demonstrate the distribution of sand wave basal surface and seafloor surface. These results can provide essential information evaluating geological background for turbine installation and wind farm operation in the future.

Keywords: reflector seismic image, sub-bottom profile, multibeam, offshore wind farm, sand wave, Fourier Analysis.

¹ Specialist, Ocean Center, National Taiwan University (NTU).

² Assistant Research Fellow, Institute of Oceanography and Assistant professor, Ocean Center, NTU.

³ Research Assistant, Ocean Center NTU and Ph. D. student, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, USA.

⁴ Research Assistant, Ocean Center, NTU and GIS Analyst, Environmental Management Consultants Technologies.

⁵ Postdoctoral researcher, Institute of Oceanography, NTU.

⁶ Technician, Marine Instrument Center, NTU.

⁷ Professor Emeritus, Institute of Oceanography and Research fellow, Ocean Center, NTU.

* Corresponding Author, Phone: +886-2-33661814, E-mail: zirconpyrite@gmail.com

Received Date: August 31, 2019

Revised Date: July 16, 2020

Accepted Date: August 3, 2020