

國立台灣大學理學院地質科學研究所

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master thesis



台灣宜蘭及緬甸西海岸地區之極端事件沉積物

辨認與探討

Identification of extreme sedimentary event deposits in

Yilan, Taiwan, and the western coast of Myanmar

蔡元祿

Yuan-Lu Tsai

指導教授：徐澔德 博士

Advisor: J. Bruce H. Shyu, Ph.D.

中華民國 106 年 6 月

June, 2017

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

台灣宜蘭及緬甸西海岸地區之

極端事件沉積物辨認與探討

Identification of extreme sedimentary event deposits
in Yilan, Taiwan, and the western coast of Myanmar

本論文係蔡元祿君 (R03224212) 在國立臺灣大學地質
科學研究所完成之碩士學位論文，於民國 106 年 6 月 30 日
承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

徐沁德

(簽名)

黃致展

(指導教授)

王

是

謝新煒

鄧辰毅

致謝



本文得以完成，首先要感謝的是我的指導老師徐濤德教授，以及提供給我此機會的太田陽子教授，因為有兩位教授的協助，本研究才得以在宜蘭平原進行調查工作。感謝王昱學長、姜宏偉學長以及王崇哲學長，於緬甸的野外工作中，教了我許多相關知識。此外，要感謝口試委員游能悌教授、顏君毅教授、王昱學長以及黃致展學長的建議與指導，讓我明白本文之錯誤所在，並且找出自己的盲點。

從進入地質系至今已有 7 年的時間，以大二及大三不同老師開設的不同野外課程為契機，使我對地質領域產生興趣，也才有機會念碩士班。也感謝 B99 同學在出野外時的各種幫助，跟大家一起出野外是很快樂的。

同時要感謝 Bruce Lab 的夥伴們，徐濤德老師、興麟學姊、玉秀、崇哲、怡蓉、小希、小杜、奕維、秦念祺、小班、陳承鴻、蔡原閔、蔡佳欣、劉司捷、袁宇威、殷瑤萱、吳侯與陳展懋。Lab 的大家於 meeting 時給的建議，幫助了我很多。感謝怡蓉很久之前的 ArcGIS 教學，讓我在處理資料時，輕鬆許多。感謝崇哲於緬甸的剖面繪製、RTK 以及 Total Station 使用之教學，讓我之後能夠更快速地上手這些儀器，以及更快速地繪製出地形剖面。感謝玉秀總是能把野外帳務處理的相當完美。感謝黃台豐技師與多位地主及政府機關聯絡並取得許可，及協調挖掘機之相關事項。感謝有幫我出野外的黃奕彰學長、楊詠然學長、蔡佳欣、袁宇威、劉司捷及陳展懋。感謝陳彥如協助搜尋龍德地區可架設 RTK 基站的位置。感謝幫我修改論文的劉司捷、袁宇威、殷瑤萱、吳侯、鐘萱與陳展懋。感謝 Thingazar 旅行社幫我們安排緬甸野外的各種事項。感謝 Wai Phyo 在緬甸幫我們尋找挖掘槽溝之人手。感謝吳泰宗總是能夠租給我們需要的車型。

於 Bruce Lab 中，最辛苦的還是我的指導教授徐濤德老師，在挖掘結果並非期待時，給予鼓勵並且指導我研究前進之方向，使我得以寫出本論文。在老師的帶領之下，逐漸了解到作學術的方法，也了解到了學術的嚴謹。在 Bruce Lab 的

三年多，真的跟老師以及同學們學到了很多，每天也都過得很開心。

最後要感謝的是我的家人，謝謝你們的支持，讓我能夠進入地質系，並且念碩士班畢業，謝謝你們。



摘要



宜蘭平原位於台灣東北部，其東南側為琉球海溝。琉球海溝於 1771 年曾經發生規模超過 7.4 的地震，產生明和海嘯，明和海嘯於石垣島東南側搬動重量超過 700 公噸之海嘯石。由於台灣宜蘭海岸地區與石垣島距離僅約為 250 公里，此海嘯事件可能也曾對宜蘭海岸地區造成過影響。而在緬甸西海岸地區，西臨巽它海溝，於 1762 年亦曾發生規模至少 8.5 的大地震。故本研究探討此兩區域的海岸極端沉積事件記錄，並藉由這些紀錄探討古海嘯是否曾對此兩區域之海岸環境造成影響。

藉由前人發表之海嘯沉積物記錄，可以發現一些共通的特性，例如：找到海嘯沉積物的位置都位於沿岸砂脊後方地勢較低處，因平時波浪無法翻越沿岸砂脊，只有在海嘯來時，有可能將淺海與沿岸砂脊上的沉積物，帶至後方地勢較低處堆積。此種事件堆積層最關鍵的特徵為：海相事件沉積物不規則地覆蓋在陸相沉積物（例如土壤或泥）上，侵蝕造成之邊界相當明顯。

本研究利用槽溝挖掘，觀察並記錄兩區域的沉積物組成、分佈以及特徵，推測此兩區域之海岸環境變化，以及是否有受到事件之影響，並搭配碳-14 定年、鉍-137 分析及矽藻分析，試圖了解這些事件之來源及發生年代。在蘭陽溪以北的土圍(TW)槽溝中，發現一砂層覆蓋在泥層上，邊界明顯，根據前人研究及其他槽溝結果，本研究推測為古宜蘭河之地區性氾濫事件所沉積。蘭陽溪以南地區的龍德(LD)槽溝中發現一砂層覆蓋在一有機層上，邊界明顯且不規則，推測可能代表一大水事件，但就目前資料仍無法得知此事件確切來源。在緬甸西海岸卡帕裏海攤附近地區，發現一灰色砂土層覆蓋在富含植物碎屑之有機層上，邊界明顯，根據附近地形以及矽藻分析之結果，本研究推測為沙嘴發育或潟湖被沉積物填滿之過程。

由於本研究之研究區域內沿岸砂脊沉積物與河流沉積物來源及組成相同，因此無法直接利用沉積物組成直接判斷事件來源。若未來須利用類似方法研究極端

事件沉積物，則需事先確認可分辨不同來源之沉積物，作為沉積物來源之直接證據。



關鍵字：海嘯、極端沉積事件、宜蘭、緬甸、槽溝

Abstract



The Yilan Plain in northeastern Taiwan is located west of the Ryukyu Trench. In AD 1771, a M7.4 earthquake occurred near the Ryukyu Trench, and generated a tsunami which moves a ~700 tonnes boulder on the southern part of the Ishigaki Island, only 250 km away from the Yilan Plain. Therefore, we suggest that tsunami poses potential threats to the Yilan Plain. Offshore western Myanmar, a ~M8.5 earthquake occurred in 1762 on the nearby Sunda Trench. The 2004 Sumatra Tsunami also reached approximately 3 m high along the western coast of Myanmar according to local residents. These observations also point out the potential for future tsunami hazard along the rapidly developing western Myanmar coast. Therefore, we attempted to search for geological record of previous extreme sedimentary events in these two areas in this study.

We excavated several pits in our two study areas to observe the deposits, collected samples, and used C-14 dating, Cs-137 analyses and diatom analyses to help us understand the age and sedimentary environment of the deposits. In the northern Yilan Plain, we found a 25 cm thick sand layer covering a mud layer with a sharp and horizontal boundary. We infer that this sand layer deposited during a fluvial flooding event. In southern Yilan Plain, we found another sand layer covering a black mud layer with a sharp and irregular boundary. This clearly indicates a high-energy depositional event, but the source of such an event remains unknown. In trenches excavated along the western coast of Myanmar, we found a gray sand layer covering an organic mud layer that has abundant plant debris with a sharp boundary. We infer that the gray sand layer also indicates an event. This event may be a fluvial flooding event or a beach ridge propagation event.

Our results show that extreme sedimentary event deposits are present in both of our

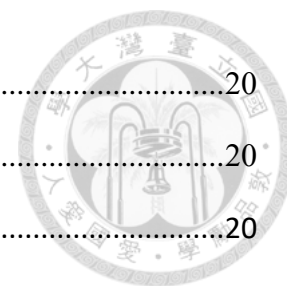
study areas. However, in both of our study areas, sediments from beach ridges and sediments from rivers have the same sources. Therefore, we cannot use the composition of event layer sediments to define the sources. Thus, we are still unsure whether some of the event sources are fluvial or marine. More data are needed to further understand the details of these events.

Key words: tsunami, extreme sedimentary event, Yilan, Myanmar, trench

目錄

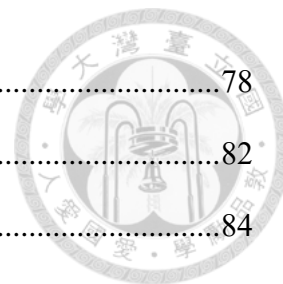


第一章 研究動機與目的	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
第二章 研究區域地質背景	5
2.1 宜蘭平原區域地質概況	5
2.1.1 地質及地形介紹	5
2.1.2 沿岸砂脊分佈	5
2.2 緬甸若開邦海岸地區地質概況	9
2.2.1 地形及地質介紹	9
2.2.2 沿岸砂脊分佈	9
第三章 前人研究及研究方法	11
3.1 海嘯沉積物相關研究	11
3.1.1 日本地區	11
3.1.2 泰國西南沿海地區	11
3.1.3 台灣地區	12
3.2 槽溝挖掘	12
3.2.1 挖掘地點選取	12
3.2.2 挖掘方法	14
3.2.3 樣本採集	16
3.3 地形測量	16
3.4 樣本分析	17
3.4.1 碳-14 定年法	17
3.4.2 銻-137 分析	18
3.4.3 矽藻分析	18



第四章 研究結果	20
4.1 宜蘭平原北部（蘭陽溪以北）.....	20
4.1.1 槽溝位置	20
4.1.2 挖掘概況	21
4.1.3 土圍(TW)槽溝挖掘結果	29
4.2 宜蘭平原南部（蘭陽溪以南）	31
4.2.1 槽溝位置	31
4.2.2 龍德地區地形剖面	32
4.2.3 龍德(LD)槽溝挖掘結果	34
4.2.4 沉積物岩芯結果	36
4.3 緬甸若開邦海岸地區	39
4.3.1 挖掘位置選取結果	39
4.3.2 挖掘概況	40
4.3.3 Pit 6 附近地形剖面	51
4.3.4 Pit 6 挖掘結果.....	52
第五章 討論	54
5.1 宜蘭平原北部（蘭陽溪以北）事件來源	54
5.2 宜蘭平原南部（蘭陽溪以南）事件來源	56
5.3 緬甸若開邦海岸地區事件來源	56
5.4 沉積物來源分辨	59
5.5 與前人研究之比較	59
第六章 結論	61
參考文獻	62
附錄	65
附錄 1、RTK-GPS 測量原始資料.....	65

附錄 2、碳-14 定年原始資料.....	78
附錄 3、銫-137 分析原始資料.....	82
附錄 4、矽藻分析原始資料.....	84
附錄 5、鈾釷定年原始資料.....	85



圖目錄



圖 1-1、宜蘭平原及石垣島位置.....	3
圖 1-2、巽它大型逆衝帶自 17 世紀至今發生之地震位置及其規模	4
圖 2-1、宜蘭平原與其周邊地層之分佈	6
圖 2-2、本研究於蘭陽溪以北區域繪製之沿岸砂脊分佈	7
圖 2-3、本研究於蘭陽溪以南地區繪製之沿岸砂脊分佈	8
圖 2-4、印緬山脈及若開邦海岸地區外海島嶼位置	10
圖 3-1、本研究初步於宜蘭平原地區選定之挖掘位置	13
圖 3-2、卡帕裏海岸位置	15
圖 3-3、RTK-GPS 測量原理示意圖	17
圖 4-1、蘭陽溪以北地區挖掘之槽溝位置	20
圖 4-2、GG 槽溝照片及地層柱.....	21
圖 4-3、DF T1 之地層柱及槽溝照片。	23
圖 4-4、DF T2 之地層柱及槽溝照片	24
圖 4-5、YGG 之地層柱及槽溝照片	26
圖 4-6、BTG 之地層柱及槽溝照片	27
圖 4-7、DSG 槽溝照片及地層柱	28
圖 4-8、土圍地區槽溝之地層柱及樣本分析結果	30
圖 4-9、龍德地區槽溝及鑽井位置圖	31
圖 4-10、龍德地區測量結果及剖面圖	33
圖 4-11、龍德地區槽溝照片及地層柱	35
圖 4-12、宜蘭平原南部龍德地區所鑽取之沉積物岩芯詳細位置	36
圖 4-13、宜蘭平原南部龍德地區沉積物岩芯 Bh1 地層柱.....	37
圖 4-14、宜蘭平原南部龍德地區沉積物岩芯 Bh2 地層柱.....	38
圖 4-15、緬甸若開邦海岸地區槽溝大致位置	39

圖 4-16、Pit 1 至 Pit 3 槽溝之挖掘位置及地形剖面	41
圖 4-17、Pit 1 槽溝之照片、地層柱以及定年結果	42
圖 4-18、Pit 2 及 Pit3 槽溝照片	43
圖 4-19、Pit 4 及 Pit 5 槽溝之挖掘位置及附近之地形剖面	45
圖 4-20、Pit 4 之槽溝照片及地層柱	46
圖 4-21、Pit 8 槽溝挖掘位置以及附近之地形剖面	47
圖 4-22、Pit 8 槽溝照片以及地層柱	48
圖 4-24、Pit 9 之槽溝照片以及地層柱	50
圖 4-25、緬甸若開邦海岸地區之 Pit 6 附近地形剖面	51
圖 4-26、Pit 6 槽溝挖掘及樣本分析結果	53
圖 5-1、宜蘭河河道位置	55
圖 5-2、Pit 6 附近區域之沉積環境變化	58

表目錄

表 4-1 宜蘭平原地區挖掘之槽溝名稱、深度及沉積物組成	21
表 4-2 緬甸若開邦海岸地區之槽溝名稱、挖掘深度及沉積物組成	40

第一章 研究動機與目的



1.1 研究動機

近數十年來，全球各國對極端事件的重視程度日增，其中最受注目的即是海嘯。21 世紀迄今僅十餘年，全球已發生兩次重大的海嘯事件，分別是 2004 年印尼蘇門答臘(Sumatra)海嘯以及 2011 年日本東北(Tohoku)海嘯。此兩海嘯事件對於當地造成相當嚴重的生命以及財產的損失。海嘯之起源可能為震央於海底之大地震、海底山崩或隕石撞擊(Sørensen et al., 2012)，上述之兩海嘯事件，為大型逆衝帶(megathrust)之地震所引起(Gahalaut et al., 2006; Fujiwara et al., 2011)。此外，除了以上兩個 21 世紀迄今發生的海嘯外，自 19 世紀以來，太平洋地區有歷史紀錄之海嘯多達 23 次(Bolt, 2006)，可見太平洋地區都有海嘯的潛在威脅。台灣宜蘭平原地區沿海直接面對太平洋，平原區有將近一半面積海拔高度低於 10 公尺且大多數人口居住在平原地區，另外宜蘭地區人口數於西元 2016 年已超過 45 萬人（來源：內政部統計資料），是急需知道是否存在海嘯風險之區域。此外緬甸西海岸地區之卡帕裏海灘(Ngapali beach)為今日為緬甸知名度假勝地之一，根據當地人的說法，2004 蘇門答臘海嘯於卡帕裏海灘附近之上溯高達到 3 公尺(Than Tin Aung et al., 2006)。從上所述可得知此兩地區有海嘯之風險，必須在災害發生前擬定對策，以確保當地居民以及遊客的安全。

然而，現今對於古海嘯之研究，大多集中於日本地區(Shishikura et al., 2007; Fujiwara et al., 2000; Fujiwara et al., 2007; Tanigawa et al., 2014)。其他環太平洋及印度洋周邊位處大型逆衝帶附近之區域，雖然存在海嘯之潛勢，但古海嘯之研究較少，大多區域甚至無法明確指出是否曾經被海嘯襲擊，因此需要更多對於古海嘯之研究。本研究因此選定宜蘭平原以及緬甸若開邦海岸地區進行極端沉積事件之研究，期望藉由這類沉積事件紀錄，對此兩區域可能之古海嘯和其他極端沉積事件有更多了解。



1.2 研究目的

台灣宜蘭沿海地區鄰近琉球海溝(Ryukyu Trench)，琉球海溝於西元 1771 年的八重山地震(Yaeyama Earthquake)時，產生明和海嘯(Meiwa Tsunami)，此海嘯於石垣島(Ishigaki Island)東南側搬動了重量超過 700 公噸的海嘯石（牧野清，1981）。由於台灣宜蘭沿海地區，與石垣島距離僅有 250 公里（圖 1-1），推測宜蘭沿海地區有可能也受到了明和海嘯之影響，因此本研究將於宜蘭平原尋找可能之海嘯紀錄。

緬甸西海岸地區鄰近巽它大型逆衝帶(Sunda Megathrust)於緬甸外海地區歷史紀錄唯一的大地震為西元 1762 年的阿拉干(Arakan)地震(Oldham, 1883)。前人研究表示阿拉干地震規模約為 8.5，且於外海最大的兩島嶼蘭裏島(Ramree Island)及基督島(Cheduba Island)上，觀察到同震抬升(co-seismic uplift)之證據，推測造成該地震之斷層位於外海地區(Wang et al., 2013)。綜合以上敘述，地震當時於海底應有同震抬升，有引發海嘯之可能。巽它大型逆衝帶於蘇門答臘地區從 17 世紀至今已發生多次規模大於 7 之地震（圖 1-2），且根據本研究與當地居民之訪談，2004 蘇門答臘海嘯於緬甸若開邦(Rakhine State)海岸之上溯高可達約 3 公尺。由此可見，本研究認為緬甸若開邦地區可能受到過海嘯之襲擊。

由於本研究認為台灣宜蘭沿海以及緬甸西海岸地區，有受到海嘯威脅之潛勢，因此將利用挖掘槽溝之方法，探討此兩地區是否有受到海嘯事件之影響。若有，則可進一步探討這些事件的發生時間、影響範圍、上溯高以及再發週期等細節。

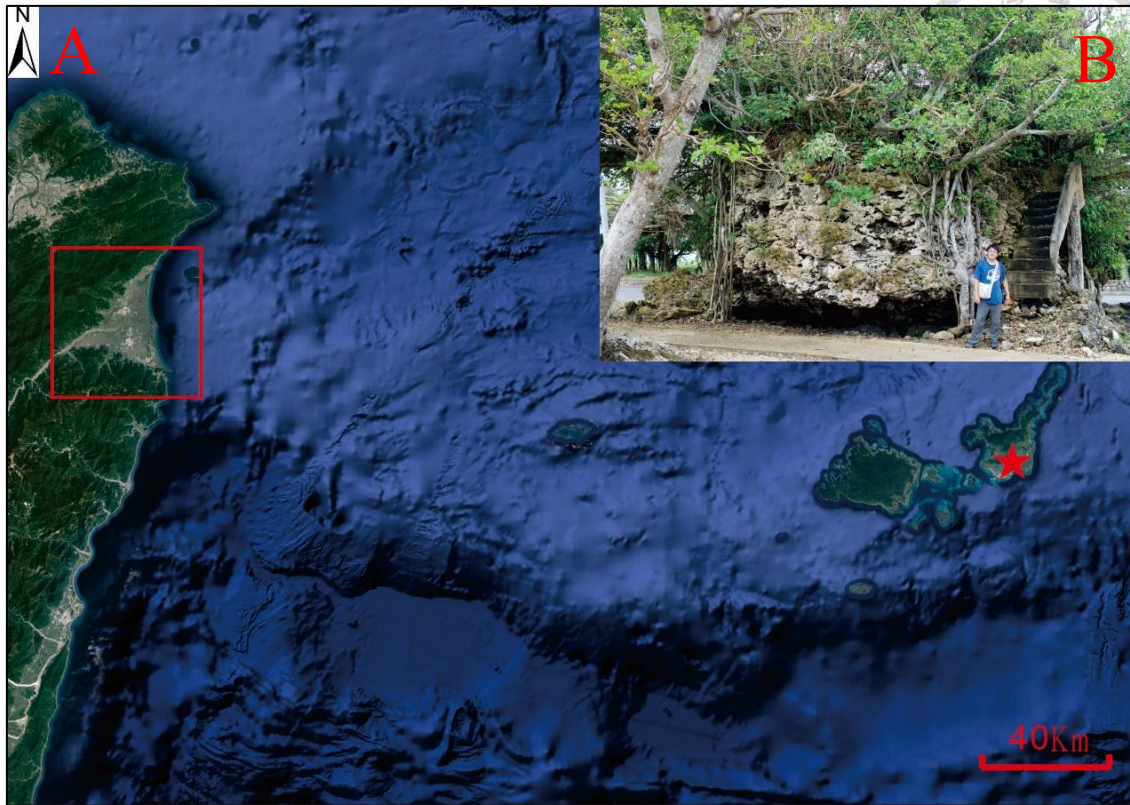


圖 1-1、宜蘭平原及石垣島位置。紅框處為宜蘭平原，星號為石垣島海嘯石位置，海嘯石大小如 B 圖所示。海嘯石三軸長度約為 12.5、10.5 及 10.3 公尺，現今海拔高度約為 7.3 公尺。牧野清(1981)指出該海嘯石於西元 1771 年明和風暴中有被搬動，推測當時海嘯影響範圍甚大。(底圖取自 Google Earth)

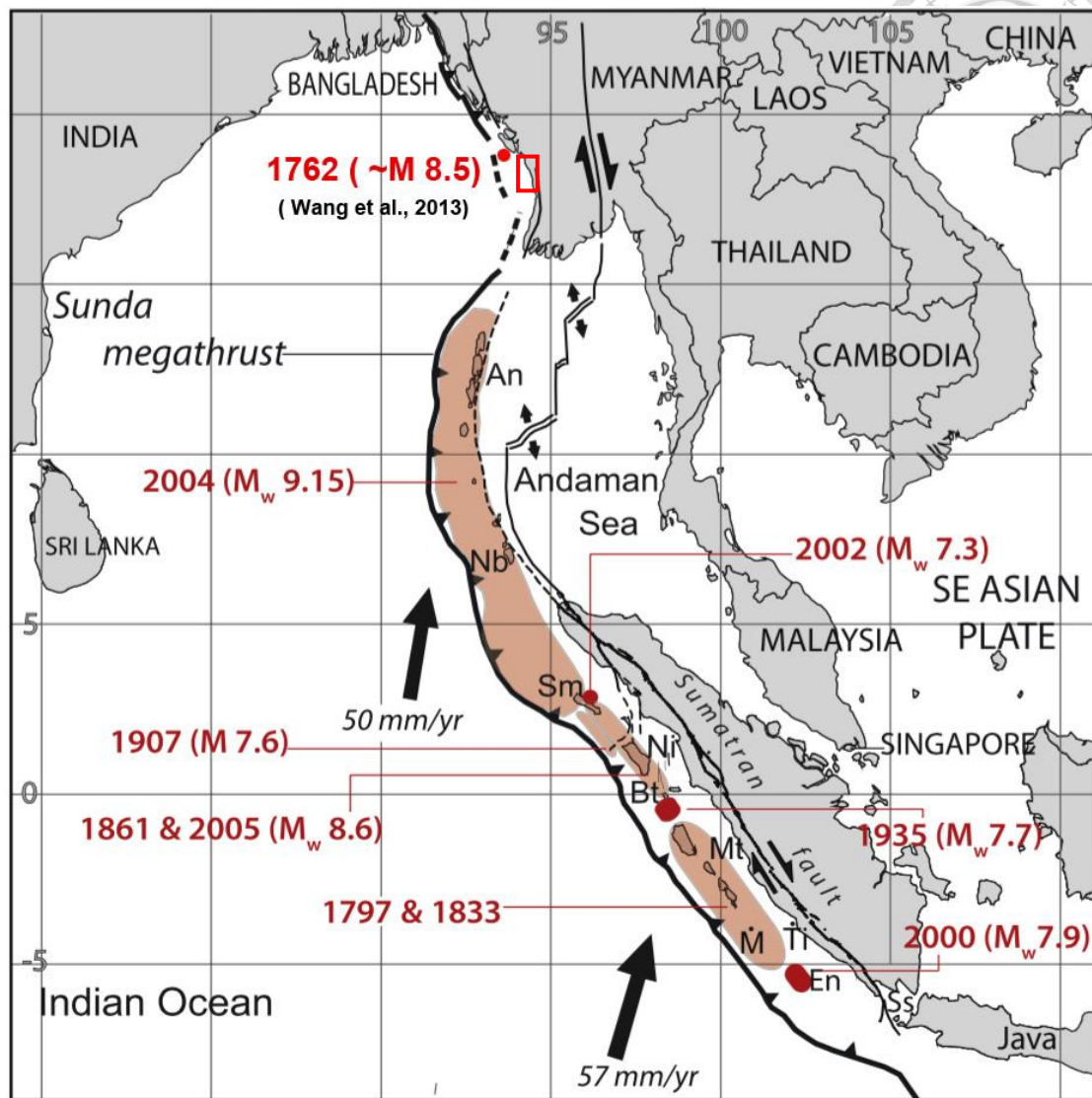


圖 1-2、巽它大型逆衝帶自 17 世紀至今發生之地震位置及其規模。根據 Wang et al. (2013)，緬甸西海岸外海地區於 1762 年發生規模約為 8.5 的地震。因此本研究選定紅框處為研究區域。(修改自 Natawidjaja et al., 2007)

第二章 研究區域地質背景



2.1 宜蘭平原區域地質概況

2.1.1 地質及地形介紹

宜蘭平原平均海拔高 7.38 公尺，平均坡度為 1 度，為一個平緩的沖積平原（蘇清泉，2011）。平原大致呈現三角形狀，海岸線方向大致為南北向，外海小島僅有一個（龜山島）。平原開口朝東側，外海正東方為沖繩海槽(Okinawa Trough)，東南方為琉球海溝，1771 年明和及海嘯為琉球海溝發生之地震所引起(Nakamura, 2009)，為宜蘭平原可能的海嘯來源。

陸上部份，宜蘭平原西北側為雪山山脈(Hsuehshan Range)，南側為中央山脈(Central Range)最北段，主要河流為蘭陽溪(Lan-Yang River)，其他河流則包括宜蘭河(Yilan River)、冬山河(Dong-Shan River)、竹安溪(Chu-An River)及新城溪(Shin-Chen River)。宜蘭平原主要沉積物來源，以雪山山脈及中央山脈之地層為主。雪山山脈於宜蘭平原附近主要出露之地層為大桶山層、乾溝層、四稜砂岩及西村層，岩性以硬頁岩、板岩、千枚岩以及變質砂岩為主；中央山脈在宜蘭平原附近主要出露地層為廬山層，岩性以硬頁岩、板岩和千枚岩為主，見圖 2-1（何春蓀，1986）。因宜蘭地區沉積物來源主要是硬頁岩、板岩、千枚岩及變質砂岩，故河砂主要組成亦為這些岩性的岩石之碎屑。

2.1.2 沿岸砂脊分佈

於宜蘭平原沿海內緣，有平行海岸線之沿岸砂脊(beach-ridges)分佈，其分佈特徵大致以蘭陽溪為界。蘭陽溪以北沿岸砂脊只有一條，高度大致為 5~15 公尺，推測為現生之沿岸砂脊，蘭陽溪以北之沿岸砂脊分佈如圖 2-2；蘭陽溪以南沿岸砂脊數量較多，可達 4 至 5 條，皆大致與海岸線平行，每條砂脊之高度及總長度由海岸往陸地遞減，即是越往陸地地區，砂脊保存狀況越差，蘭陽溪以南之

沿岸砂脊分佈如圖 2-3。這些沿岸砂脊為河流或風的堆積造成（蘇品如等，2009），砂脊之沉積物與沖積平原之沉積物來源相同，皆是源於中央山脈及雪山山脈之沙，組成同樣以硬頁岩、板岩、千枚岩及變質砂岩之碎屑為主。

宜蘭平原沿海區域除河流出海口外都有沿岸砂脊分佈，在沿岸砂脊後方（即西側）有許多平行海岸線方向之河川，也有數個濕地分佈於此，為排水不良之區域，因此形成沼澤(swamp)環境，平時沉積物主要以泥為主。

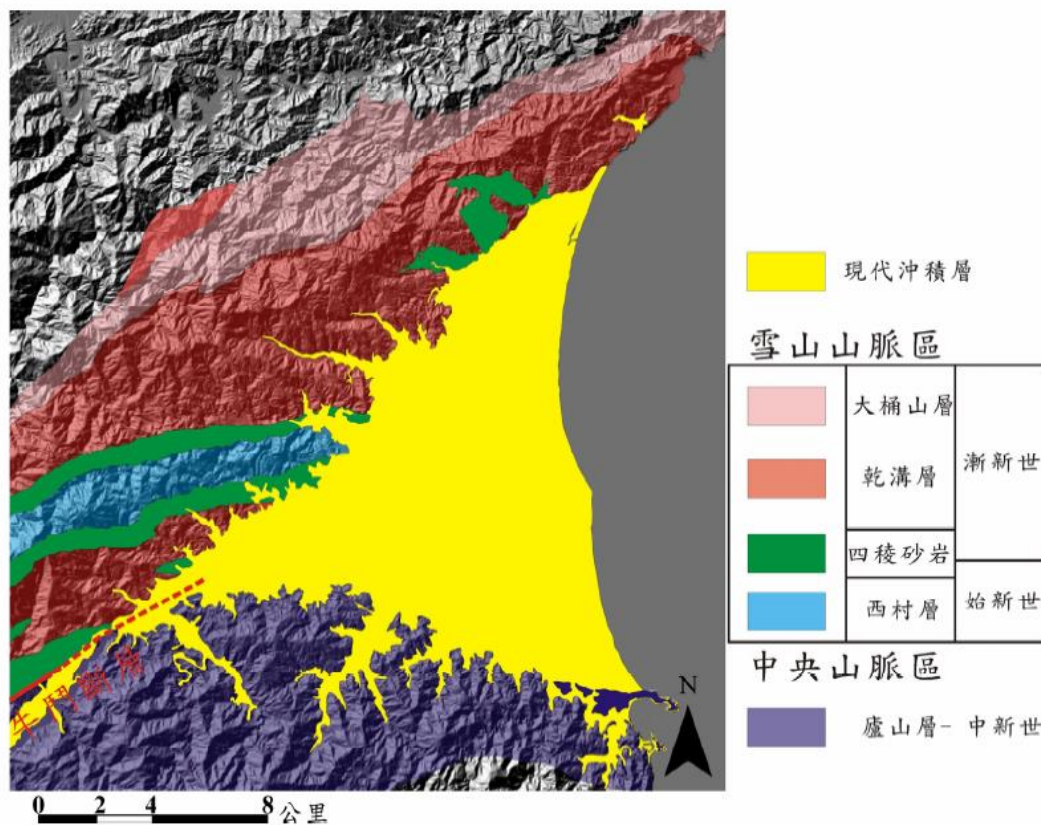


圖 2-1、宜蘭平原與其周邊地層之分佈。宜蘭平原河川多數源於圖例中之地層，因此沖積平原之沉積物主要來源同為圖例中之地層（蘇清泉，2011）。

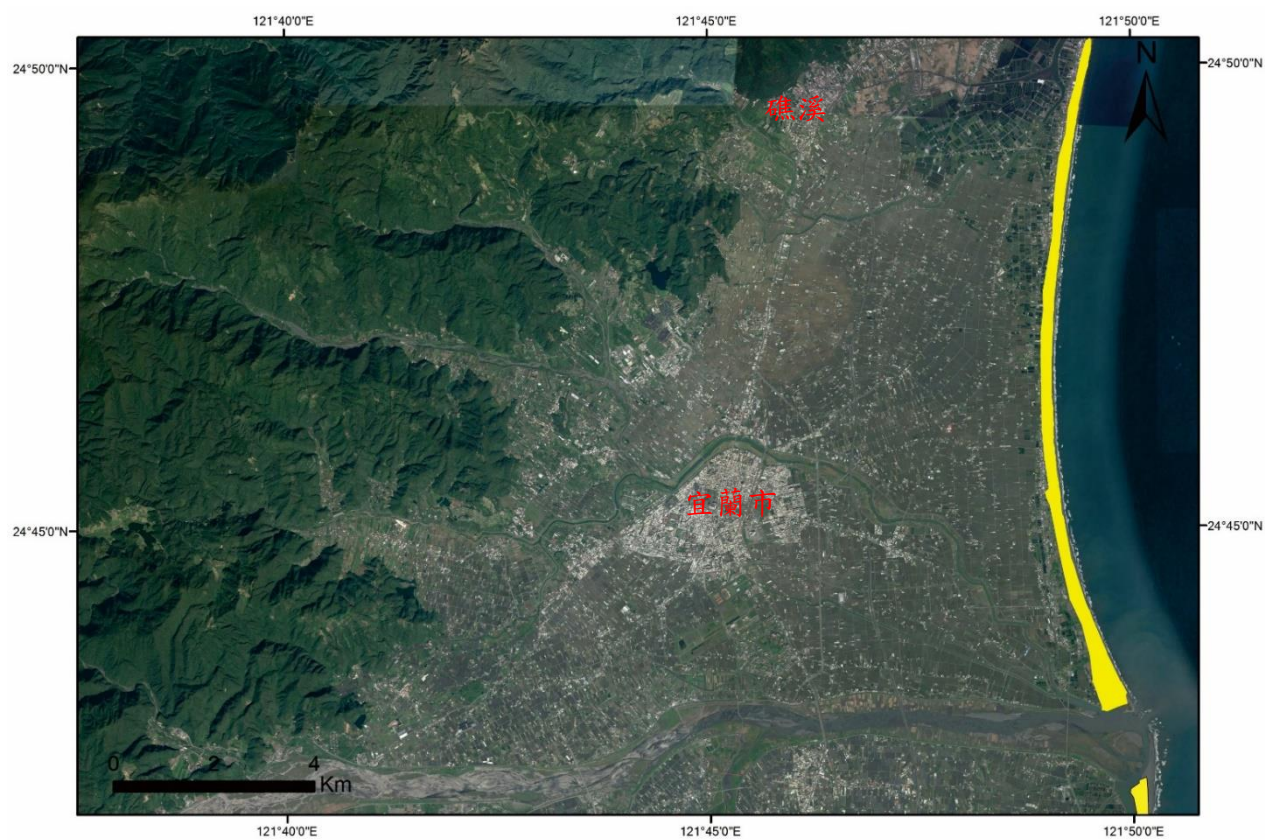


圖 2-2、本研究於蘭陽溪以北區域繪製之沿岸砂脊分佈。由圖中可以發現整個蘭陽溪以北區域，沿岸砂脊只有最靠近海岸的一條。(底圖取自 Google Earth)

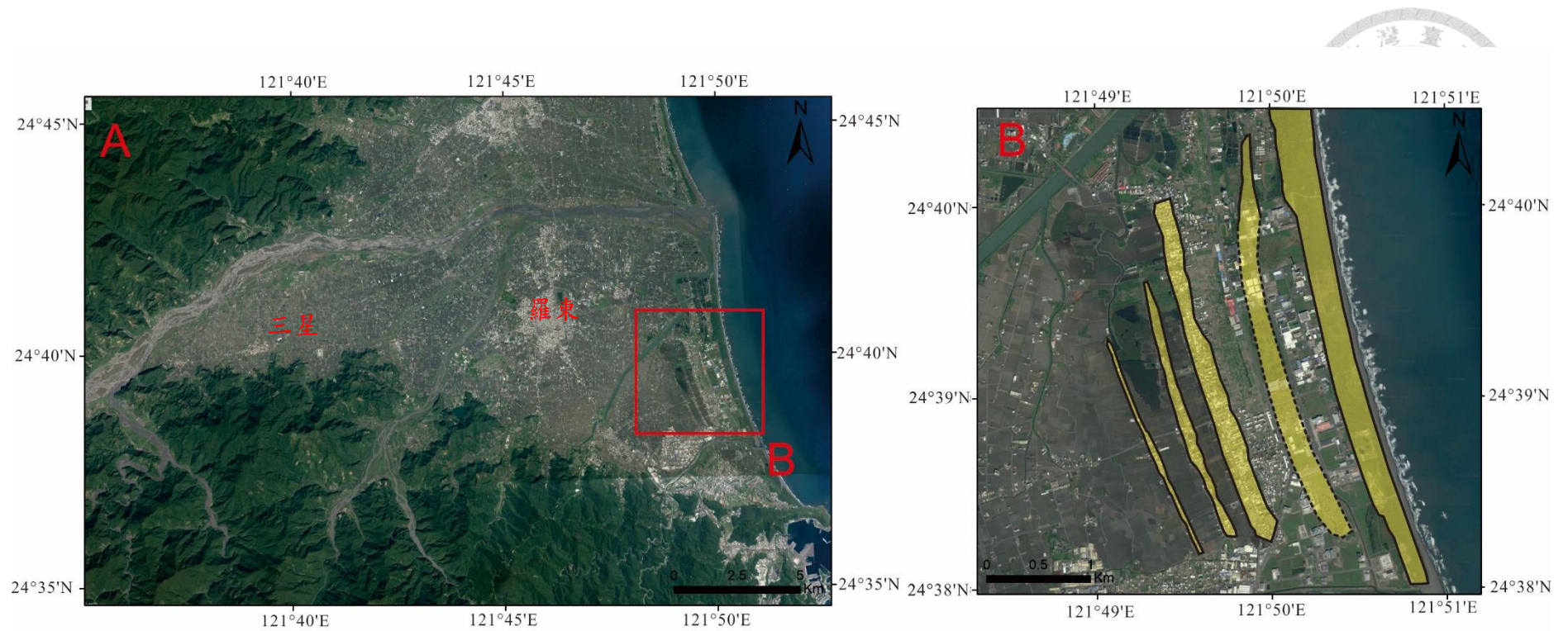


圖 2-3、本研究於蘭陽溪以南地區繪製之沿岸砂脊分佈。A 圖為蘭陽溪南岸大區域 Google Earth 影像，沿岸砂脊主要分佈在紅框處，如 B 圖所示。從 B 圖可以發現，沿岸砂脊越向內陸，長度越短且寬度越窄。(底圖取自 Google Earth)



2.2 緬甸若開邦海岸地區地質概況

2.2.1 地形及地質介紹

若開邦位於緬甸西海岸地區，外海最大之島嶼為蘭裏島以及基督島，位置如圖 2-4 所示。海岸線特徵大致以蘭裏島為分界，蘭裏島以北之潮汐水道(tidal channel)錯綜複雜，甚至可延伸到數十公里遠的印緬山脈(Indo-Burman Ranges)邊緣。蘭裏島以南區域潮汐水道分佈相對較少，海岸線較為平直，且有數個灣口(bay)，其開口方向直接面對孟加拉灣。

若開邦沿海地區緊鄰印緬山脈，印緬山脈主要岩性包括白堊紀(Cretaceous)至新進紀(Neogene)的濁流岩(turbidites)和混同層(melange)。混同層中之岩塊(block)包含輝長岩(gabbro)、枕狀玄武岩(pillow basalt)、蛇紋岩(serpentinite)、燧石(chert)、石灰岩(limestone)以及片岩(schist, Brunnschweiler, 1966; Mitchell, 1993; Bender, 1983; Acharyya, 2007; Maurin and Rangin, 2009)。若開邦向西流注入孟加拉灣的河川，皆發源於此山脈，因此可以推測沿岸之沖積平原沉積物主要也以上述岩性之碎屑組成。

2.2.2 沿岸砂脊分佈

緬甸若開邦沿海地區之沿岸砂脊，僅有最靠海側之一條，推測為現生，可能是沿岸流或風的影響所形成之沿岸砂脊。此外，於整個若開邦沿海地區，並未發現其他位在較內陸地區之沿岸砂脊。

若開邦沿海地區之沿岸砂脊主要分佈於蘭裏島以南之海岸，且海岸邊出現有沖積平原處。因砂脊處地勢較高，不易積水，故聚落多半位於沿岸砂脊上，且聚落分佈方向與沿岸砂脊相同，為平行海岸線方向。由於若開邦沿海區域廣大，河流數量多，且部分沿海地區並無沖積平原，沿岸砂脊並非呈現連續性的分佈。每段沿岸砂脊之高度皆不同，約在 2.5 到 10 公尺之間。

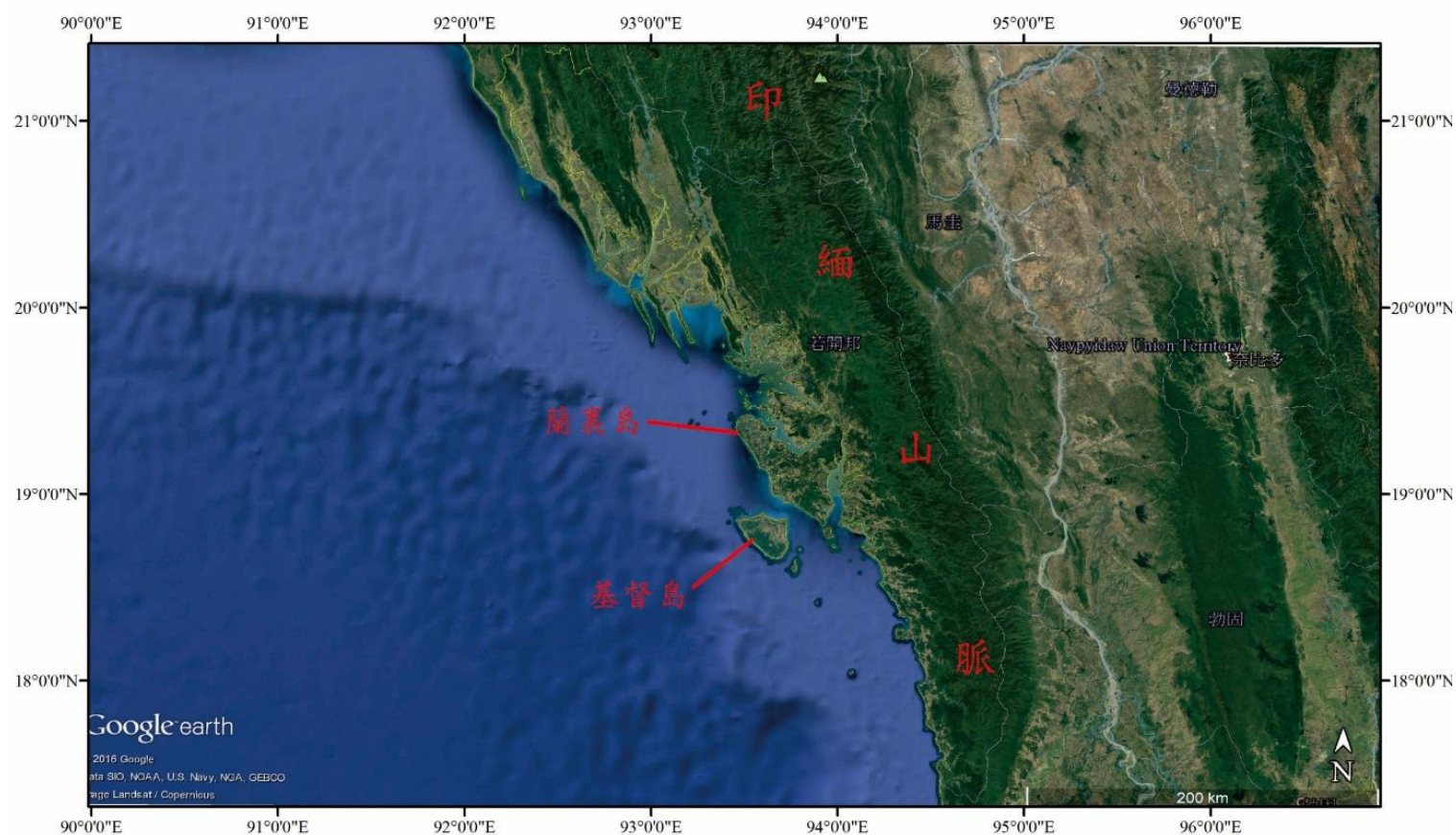


圖 2-4、印緬山脈及若開邦海岸地區外海島嶼位置。其中最大兩個島嶼為蘭裏島(Ramree Island)及基督島(Cheduba Island)。由圖中
可得知，若開邦向西注入孟加拉灣之河流，主要源於印緬山脈。(底圖取自 Google Earth)

第三章 前人研究及研究方法



3.1 海嘯沉積物相關研究

3.1.1 日本地區

對於海嘯沉積物的研究，最早主要以日本地區為主，Shishikura et al. (2007)在日本宮城(Miyagi)縣的石卷(Ishinomaki)平原，找到了五次海嘯堆積物。他們選定的位置為沿岸砂脊發育良好處，在兩砂脊中間的脊間低地(inter-ridge lowland)，挖掘槽溝以及利用 geoslicer 尋找可能的海嘯沉積物。根據 Shishikura et al. (2007)的結果，此類海嘯事件沉積物的主要特徵為事件沉積物（即是沿岸砂脊的砂）覆蓋在以泥碳質為主的粉砂層上，邊界相當明顯。事件沉積物頂部由砂層漸變成泥碳質為主的粉砂層，直到下一次事件來臨。極少部分事件堆積物內有找到指示快速沉積的火焰狀構造(flame structure)。

年代部分，Shishikura et al. (2007)主要使用泥碳質粉砂層內的碳樣本，利用碳-14 定年，並搭配火山灰之年代來決定這些事件之可能發生年代。

3.1.2 泰國西南沿海地區

於泰國西南沿海的帕通島(Phra Thong Island)上，Jankaew et al. (2008)同樣選定脊間低地及利用槽溝挖掘的方式，發現除了 2004 蘇門答臘海嘯沉積之海嘯沉積物外，還有兩層 2004 年以前的海嘯沉積物，顯示該地區海嘯不只發生一次。由於 2004 年以前之海嘯沉積物分佈比 2004 年之海嘯沉積物更深入內陸地區，他們認為產生 2004 年之前的海嘯事件之地震規模需要比 2004 年蘇門答臘地震的規模 8.5 還大，產生的海嘯才有可能造成此一分佈型態。

事件沉積層內不易發現碳樣本，即使發現碳樣本，大部分也都為經過搬運，非現地樣本，其年代無法代表事件年代。因此 Jankaew et al. (2008)採集事件沉積物上下之泥層內的樹皮或樹葉碎片，利用碳-14 定年求取海嘯事件之年代範圍。



3.1.3 台灣地區

於台灣北部金山地區，Yu et al. (2016)利用沉積物岩芯分析，找到兩次疑似海嘯事件之堆積物。他們所選定的鑽孔位置大部分位於障蔽沙洲(barrier sand dune)後方之海階上。此處發現之海嘯沉積物特徵為海相的事件石英砂層覆蓋於安山岩質河流沉積物上，邊界明顯。該研究中的年代同樣是利用事件上下層的碳-14 定年決定，得到兩事件年代分別介於 17 到 18 世紀之間以及 19 世紀。再對比歷史紀錄推測較年輕的事件應該是西元 1867 年的基隆海嘯事件。

3.2 槽溝挖掘

3.2.1 挖掘地點選取

在選取挖掘地點之前，需要先參考該地區沿岸砂脊之分佈狀況，尋找砂脊後方，或兩砂脊中間地勢較低處，作為可能挖掘的地點。然而若僅利用以上條件，可挖掘的地點幾乎會是整個平原地區，因此本研究於宜蘭平原以及緬甸西海岸兩地區，分別利用不同條件來選取最後挖掘之地點。

宜蘭平原蘭陽溪以北地區，因沿岸砂脊僅有一條，砂脊後方至山前緣都是可選擇的挖掘區域；蘭陽溪以南區域，因砂脊數量較多，故可選定的挖掘區域主要在兩條砂脊中間之脊間低地。然而因宜蘭平原已廣泛開發，大部分區域為農田、魚塭或房舍，在開發時已有許多回填。因此本研究先利用 Google Earth 影像，搜尋影像上看似未被開發之區域，再至現場踏勘，調查該地是否被回填，以及是否為地勢相對低之區域，若未被回填且地勢相對較低，則列為可能可挖掘之區域。本研究最初在宜蘭選定之挖掘位置，如圖 3-1 所示。選定挖掘位置後，還需要聯絡該土地地主取得同意，才能進行挖掘。然而，本研究選定之挖掘位置大多地籍複雜，不易取得開挖許可。最後於宜蘭地區僅有 8 處可實際進行槽溝挖掘，詳細挖掘位置及結果見第四章。

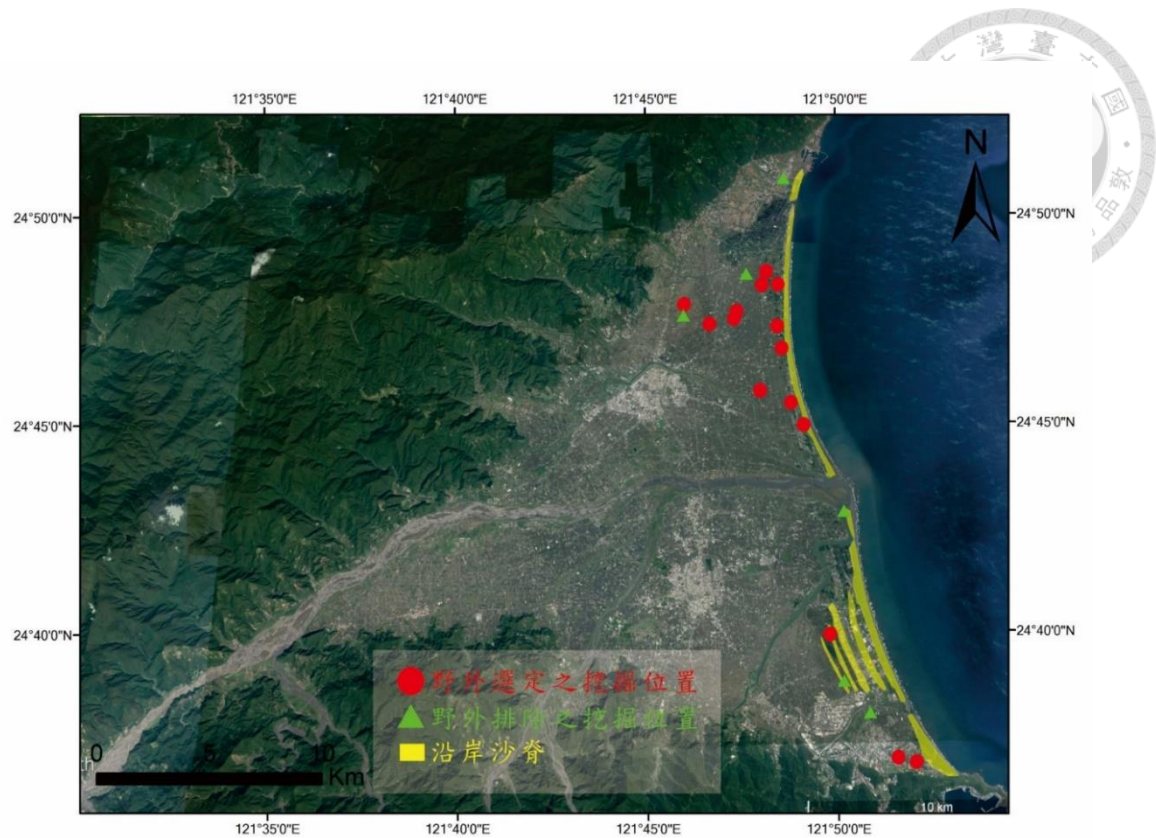



圖 3-1、本研究初步於宜蘭平原地區選定之挖掘位置。其中，綠色三角形處為現場調查後，因為人工回填或地勢過高而排除之位置。紅色圈處為初步認為可挖掘之位置，黃色為沿岸砂脊之分佈。(底圖取自 Google Earth)



緬甸西海岸若開邦沿海地區，因抵達不易，無法如宜蘭地區一般進行先期踏勘之工作，且可住宿之地點僅有一處，因此本研究之挖掘區域，主要在住宿地點之卡帕裏海灘附近，且利用車輛可當日往返之區域，見圖 3-2。優先選取灣口內之海岸，由於海嘯為長波長之波浪，在灣口處會有波高放大之效果，推測於灣口處，且有沿岸砂脊之位置最容易發現海嘯沉積物。由於海嘯並非小區域之事件，因此於灣口附近較平直之海岸，亦可能會受到影響，因此於平直海岸，且有沿岸砂脊之位置，也有堆積海嘯沉積物之可能性。本研究於若開邦沿海地區詳細之挖掘位置及結果詳述於第四章。

3.2.2 挖掘方法

本研究於台灣宜蘭地區，選定挖掘位置後，利用挖掘機進行槽溝挖掘。槽溝之長寬受限於取得挖掘許可之土地大小，挖掘機施工以及挖出之土方堆疊都需要空間，因此實際可挖掘面積，僅有取得挖掘許可面積之半或甚至更少。本研究於宜蘭地區挖掘之數個槽溝，長度約為 2~5 公尺，寬度約為 2~3 公尺。挖掘深度部分，宜蘭地區的挖掘深度約為 1~2 公尺之間，原因為在此區域，挖掘至此深度後，地下水即會湧出，使得挖掘無法繼續進行。

若開邦沿海地區，因開發程度較低且行程安排不確定性較多，使用挖掘機相對困難，因此本研究於若開邦地區使用人力進行槽溝挖掘，於若開邦地區挖掘之數個槽溝，長度約為 0.5~2 公尺，寬度約為 0.5~1 公尺，挖掘深度受限於人力以及該處底質影響，介於 0.5~2 公尺之間。

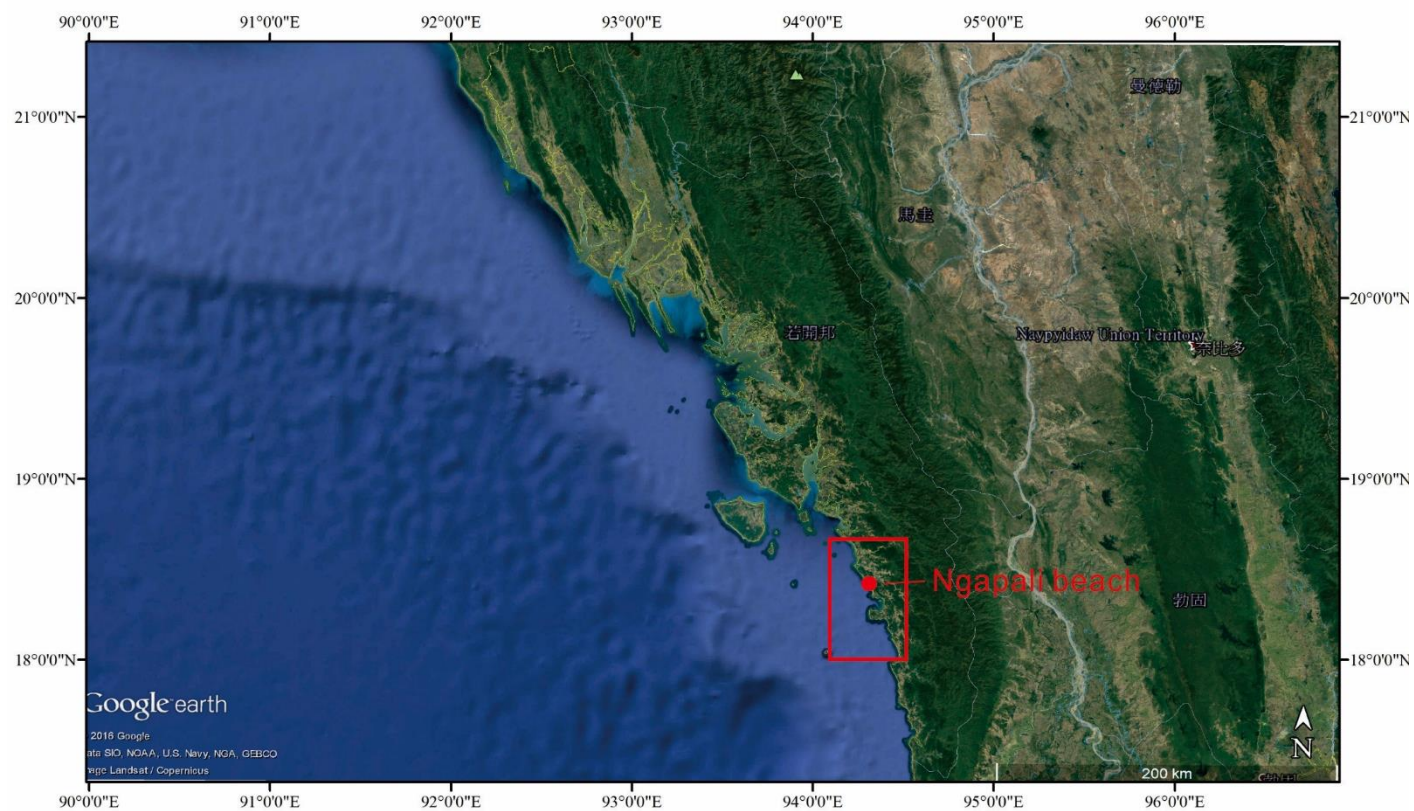


圖 3-2、卡帕裏海岸位置。紅圈處為卡帕裏海灘，紅框處附近使用車輛可當日往返之區域，本研究之挖掘位置皆位於紅框內，詳細挖掘位置見第四章（底圖取自 Google Earth）。



3.2.3 樣本採集

於宜蘭及若開邦地區，採集樣本之方法及種類均相同。本研究採集之樣本主要為碳樣本、珊瑚、貝殼及沙樣。碳樣本主要包括樹葉、樹皮、樹根、種子以及其他無法辨認之碳塊，採集的方法為發現樣本並記錄位置後，利用金屬製刮刀或湯匙將樣本視大小放入玻璃瓶或塑膠夾鏈袋中。珊瑚及貝殼樣本則是直接裝入麻布袋；沙樣則是利用金屬製鏟子，將 0.2~2 公斤之沙樣本裝入塑膠夾鏈袋。

野外結束後，將採集之樣本置入烘箱中，並用攝氏 50 度烘乾兩天，並依據樣本大小更換至適合的容器中保存，以進行後續分析。

3.3 地形測量

本研究主要測量目標為通過槽溝且垂直海岸線之剖面，透過該剖面可以得知沿岸砂脊高度及形狀、挖掘位置、事件沉積物之高度及沿岸砂脊後方低地之地形，有助於推測事件之來源。

為得知海岸線剖面，本研究使用 RTK-GPS (Real Time Kinematics-Global Positioning System)進行測量，RTK-GPS 可分為基站(base)以及移動站(Rover)兩部分，基站及移動站兩者都接收 GPS 訊號，基站同時發射無線電波讓移動站接收，再利用校正得知移動站的瞬時(Real Time)位置及高程，示意圖 3-3。利用 RTK-GPS 得到的資料經緯度座標，高度為橢球高，將得到的高度與當地平均海水面校正後，即可繪製出槽溝附近之地形剖面。

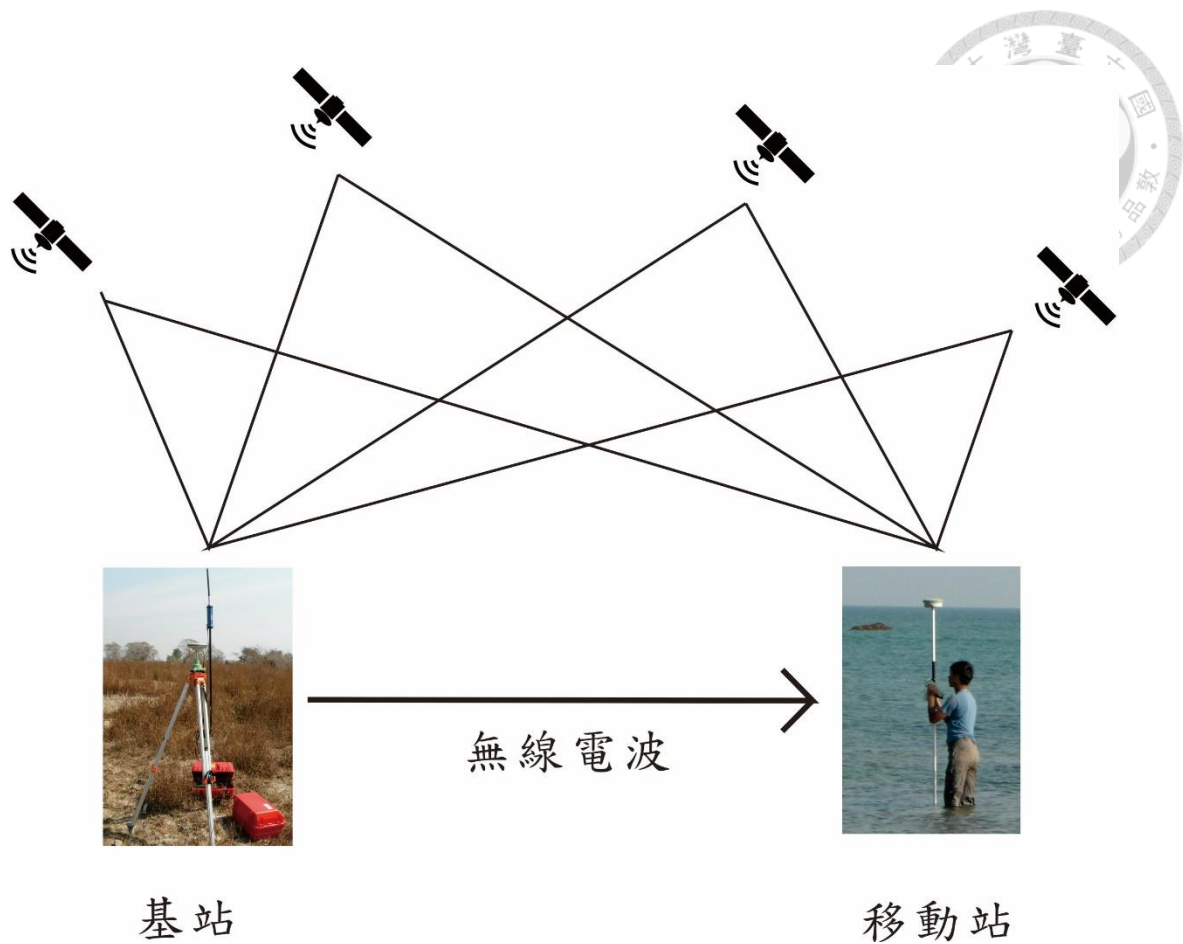


圖 3-3、RTK-GPS 測量原理示意圖。基站與移動站皆接收 GPS 訊號，基站將資訊以無線電波方式傳送至移動站，移動站透過 GPS 以及無線電波接收之資料，計算出瞬時位置。

3.4 樣本分析

3.4.1 碳-14 定年法

碳-14 定年法主要是測定樣本內碳-14 同位素與大氣中之碳-14 同位素之比例，再利用碳-14 之半衰期 5730 年來得知樣本年代。其原理為生物體在未死亡前，體內之碳-14 會藉由呼吸或其他作用與大氣中的碳-14 交換，因此未死亡的生物體其碳-14 含量應與大氣中碳-14 含量相同。然而在生物體死亡後，碳-14 於生物體內形成封閉系統，無法與大氣交換，碳-14 於是開始衰變，因此測定樣本內碳-14 與大氣中碳-14 之比例，即可得知生物體死亡年代。

此外，因大氣中碳-14 來源為宇宙射線（中子）撞擊氮-14 而產生出碳-14，且碳-14 在大氣中也會衰變，比例並非維持穩定，且於 16 世紀工業革命後，開始有地層中的碳被排放至空氣中，因此在得到放射性碳年代(radiocarbon age)後，需校正成日曆年代(calendar age)，以排除大氣中碳-14 量並非固定之變因。

本研究於宜蘭及緬甸地區之槽溝內採集之碳樣本，記錄其採樣資訊（位置、深度、樣本種類、保存狀況）後，送至美國 Beta Analytic 公司進行加速器質譜儀 (Accelerated mass spectrometry, AMS)分析並得到年代。


3.4.2 銫-137 分析

銫(Cesium)為鹼金族(alkali metal)元素之一，較穩定的狀態為銫-133。本研究分析之銫-137 為人造之放射性同位素，主要在西元 1950 年核子試爆後被釋放到大氣中，其半衰期約為 30.1 年(Unterweger et al., 1992)。

本研究之銫-137 分析，只分析樣本中之銫-137 是否高於背景值，並未進一步計算銫-137 之含量。本研究共分析 3 個銫-137 樣本，每個樣本為大約 0.2~0.3 公斤之沙，烘乾後放入容器中，再利用 γ 射線能譜儀(Gamma-Ray Spectrometry)測定 48 小時，得到資料繪製出能譜後，觀察是否有銫-137 所對應之 661.7 keV。若有銫-137 之峰值，代表該沉積物可能是 1950 年以後所堆積；若無銫-137 之峰值，則可能是 1950 年之前所堆積。本研究之銫-137 分析為委託國立台灣大學孔燕翔 (Alexander Kunz)博士測定。

3.4.3 矽藻分析

矽藻分析主要是分析沉積物中所含矽藻(diatom)之種類，以得知該種矽藻為海洋環境(marine environment)、半鹹水環境(brackish environment)或淡水環境(freshwater environment)，了解沉積物中所含之矽藻的生活環境，以推知沉積物之沉積環境，有助於判斷事件沉積物之來源。



本研究進行矽藻分析之樣本，為 15~20 公克之沙樣。烘乾後取約 20 毫克，加入一滴次氯酸鈉(sodium hypochlorite)溶液於乾的沙樣上，用以去除有機物碎屑。30 分鐘後用蒸餾水(distilled water)潤洗該溶液，潤洗後再放入離心機，以 1300rpm 離心 8 分鐘，再將 1.0 毫升之樣本放上玻片，以攝氏 60 度烘乾後，再利用油浸式顯微鏡(oil-immersion microscope)觀察(Sawai, 2001)。本研究之矽藻分析為委託日本產業技術綜合研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST, Japan)的澤井祐紀(Yuki Sawai)博士協助分析。

第四章 研究結果



4.1 宜蘭平原北部 (蘭陽溪以北)

4.1.1 槽溝位置

初步挖掘地點選定後，需要與地主聯繫並取得許可，方可進行槽溝挖掘之作業。本研究於宜蘭平原蘭陽溪以北地區，總共挖掘 7 個，如圖 4-1 所示。槽溝之命名最初使用編號，而後發現編號命名容易混淆，因此改用附近之地名命名槽溝。蘭陽溪以北的 7 個槽溝，其中 5 個槽溝與沿岸砂脊之距離少於 1 公里，分別是公館(GG)、大福(DF T1、DF T2)、玉尊宮(YGG)及補天宮(BTG)。另外 2 個與沿岸砂脊距離則大於 2 公里，分別是東聖宮(DSG)以及土圍(TW)。

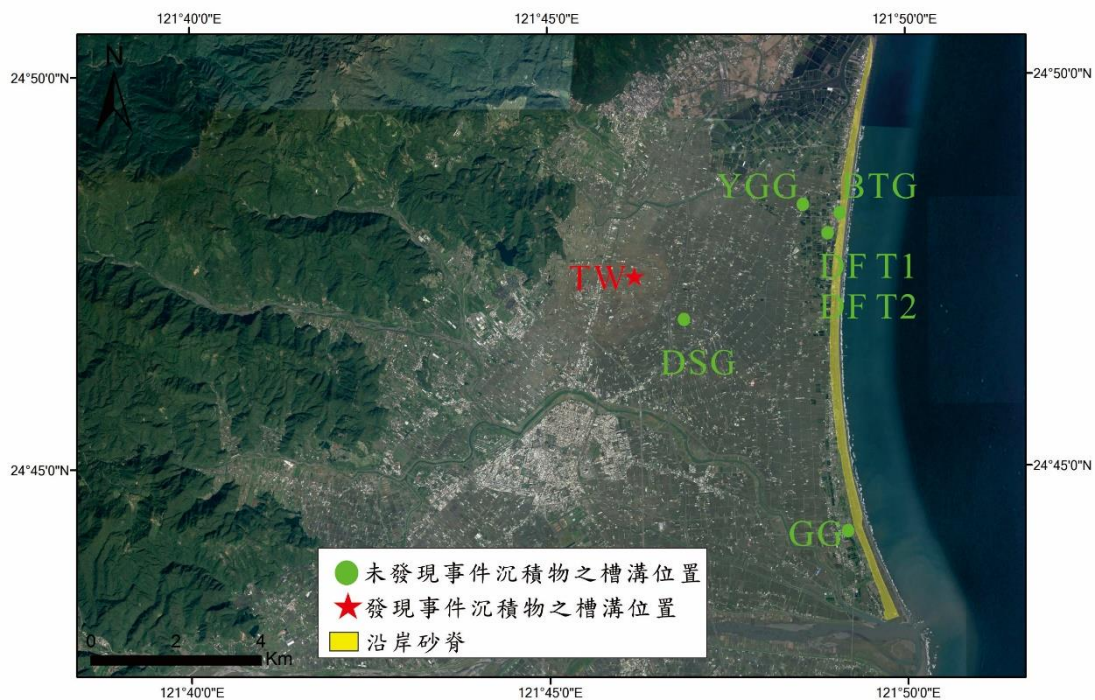


圖 4-1、蘭陽溪以北地區挖掘之槽溝位置。星號為有發現事件沉積物之槽溝位置，綠色圓圈為其他未發現事件堆積物之槽溝位置。其中 DF（大福）挖掘槽溝 2 處。



4.1.2 挖掘概況

本研究於宜蘭平原蘭陽溪以北地區共挖掘 7 個槽溝，其深度及沉積物大致組成如表 4-1 所示。

表 4-1 宜蘭平原地區挖掘之槽溝名稱、深度及沉積物組成。

槽溝名稱	挖掘深度	沉積物組成（自地表向下）
GG	1.1m	砂層
DF T1	1.5m	人工回填、泥層、砂層
DF T2	1.8m	人工回填、泥層、砂層
YGG	1.9m	人工回填、泥層、砂層
BTG	2.1m	人工回填、砂層
TW	1.0m	人工回填、泥層、砂層、泥層、砂層

於宜蘭壯圍鄉公館（簡稱 GG）地區之槽溝，挖掘深度約為 1.1 公尺。挖掘位置附近幾乎沒有開發，因此幾乎未發現人工回填。此槽溝之挖掘結果顯示，從地表附近至深度約 1.1 公尺處，全為砂層。推測可能是已被侵蝕之古沿岸砂脊的一部分。於 GG 槽溝中，並未採集樣本，詳細地層柱及槽溝照片見圖 4-2。

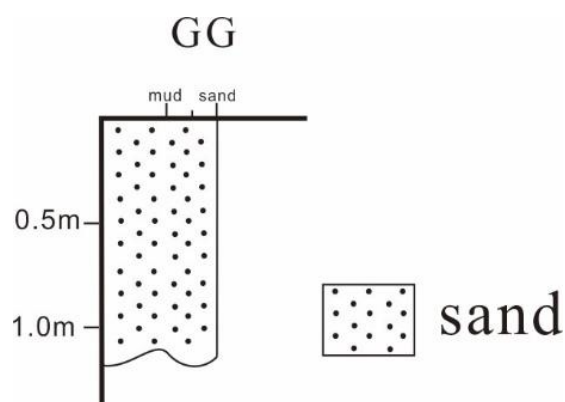



圖 4-2、GG 槽溝照片及地層柱。



於宜蘭縣壯圍鄉大福（簡稱 DF）地區，共挖掘 2 個槽溝，分別將其命名為 DF T1 及 DF T2，深度分別為約 1.5 公尺及 1.8 公尺。此兩槽溝挖掘結果類似，自地表由上而下分別是人工回填、泥層及砂層，無明顯之沉積環境變化。挖掘至最底下砂層後，因地下水湧出使得挖掘無法繼續進行。兩槽溝於人工堆積物厚度及泥層厚度略有不同，根據當地居民說法，挖溝處以前為魚塢，推測可能是在回填時造成的差異。另外於 T1 處砂層頂部附近，有許多約 1 至 3 公分的泥塊，推測可能是上方泥層在沉積時，因下方砂層相對較鬆散，造成上方的泥因重力而掉入下方砂層中。大福地區兩槽溝之地層柱，DF T1 見圖 4-3；DF T2 見圖 4-4。

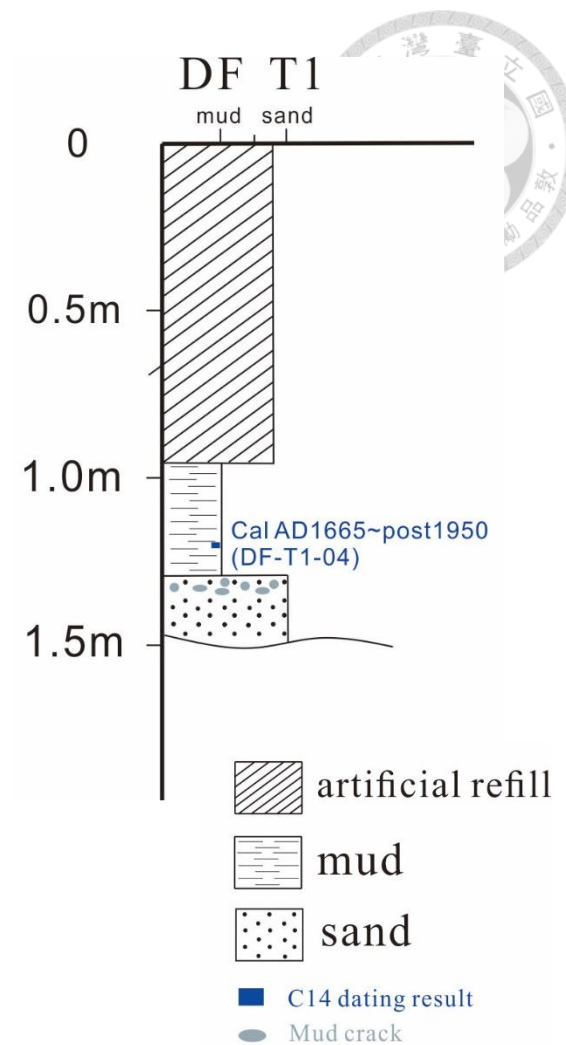
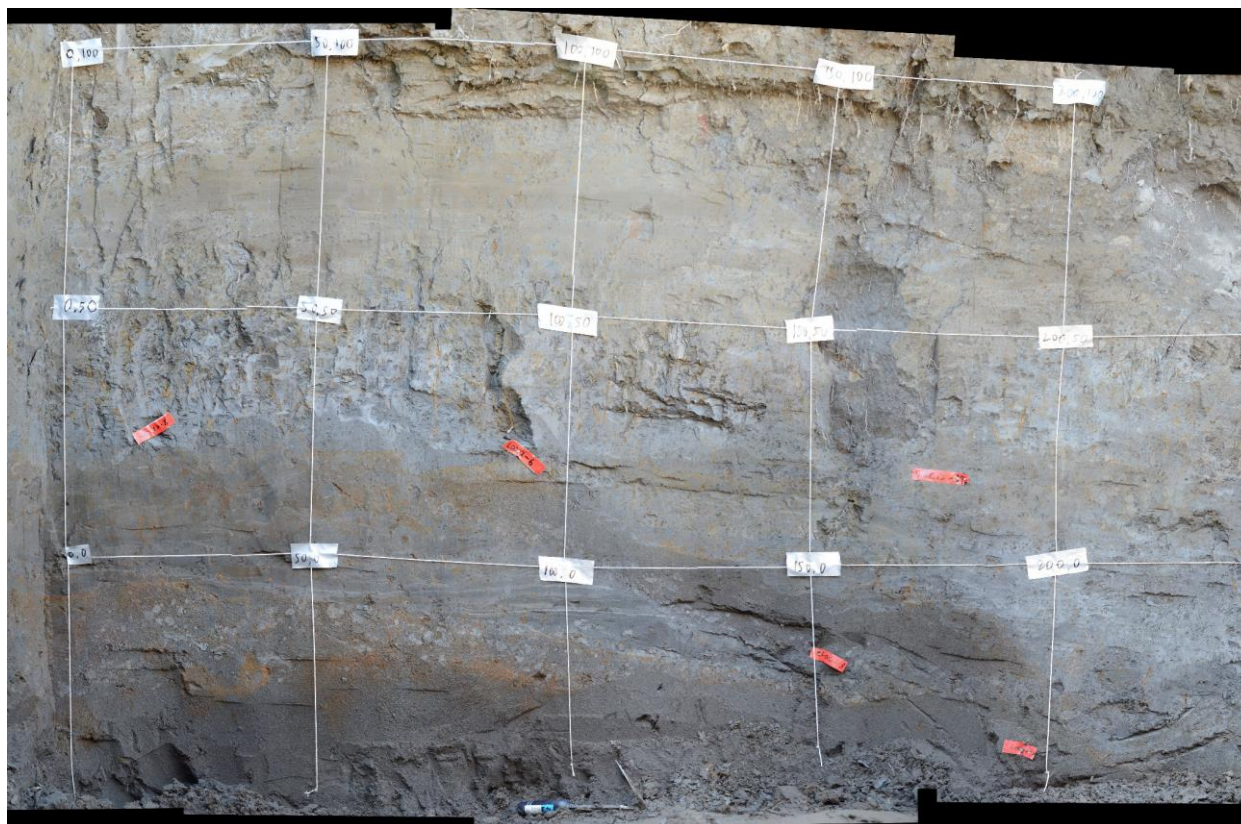



圖 4-3、DF T1 之地層柱及槽溝照片。



於宜蘭縣壯圍鄉玉尊宮（簡稱 YGG）附近地區之槽溝，深度約為 1.9 公尺。此處槽溝約有 1 公尺左右之人工回填，人工回填底下為約 90 公分之泥層，無明顯沉積環境變化。挖掘至深約 1.9 公尺後，因地下水湧出而無法繼續挖深。此槽溝之特徵為並沒有挖到砂層，而是挖到相當厚的泥層。YGG 附近槽溝之照片及地層柱，見圖 4-5。

於宜蘭縣壯圍鄉補天宮（簡稱 BTG）附近地區之槽溝，深度約為 2.1 公尺。BTG 附近之槽溝，其人工回填約厚 1.3 公尺，為所有槽溝中最厚者。於人工回填底下，深度約 1.3 到 2.1 公尺處為砂層。挖掘至 2.1 公尺處，因腹地不足而無法繼續挖深。推測只挖到砂層之原因，可能是挖掘到已被侵蝕之古沿岸砂脊之位置。於本槽溝砂層中，有一泥透鏡體，推測是一水塘之形成與乾涸的過程所產生之沉積物。BTG 附近之照片及地層柱，見圖 4-6。

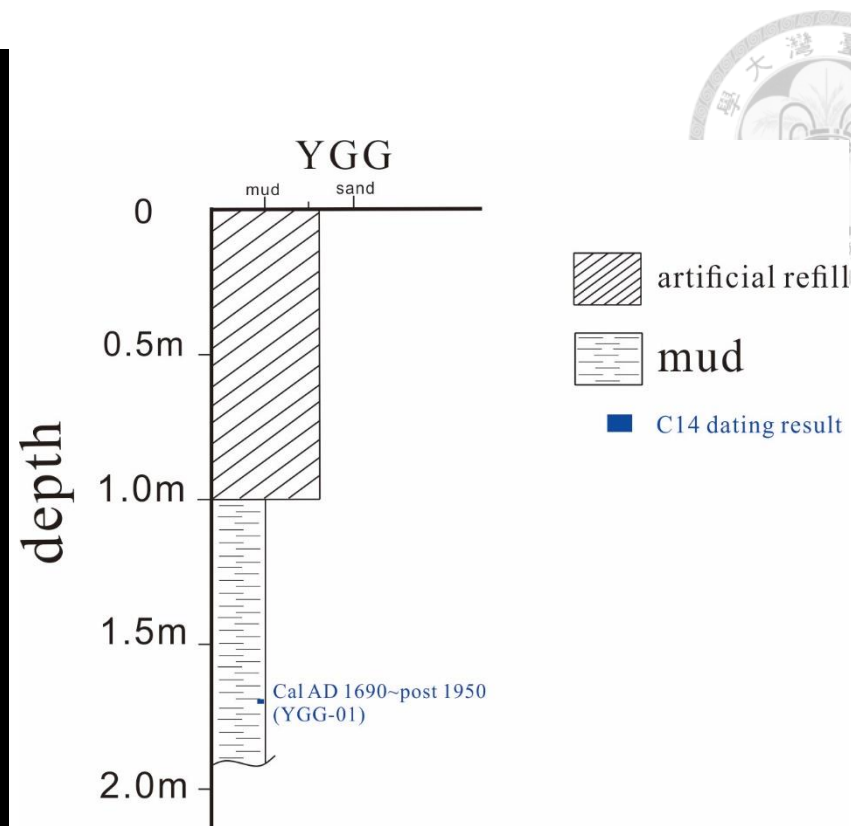


圖 4-5、YGG 之地層柱及槽溝照片。

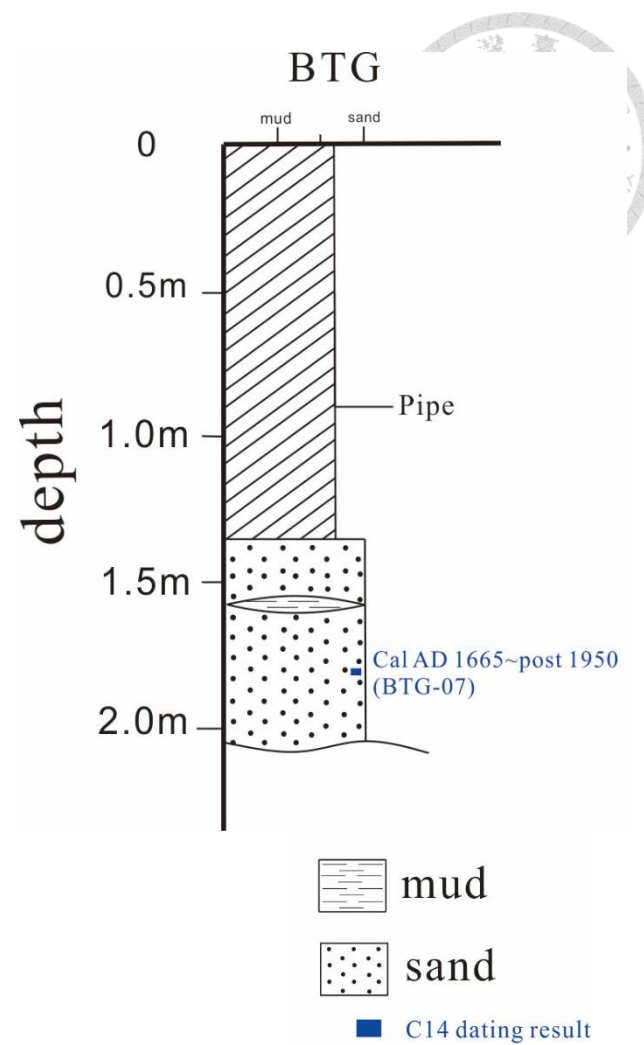


圖 4-6、BTG 之地層柱及槽溝照片。

於宜蘭縣壯圍鄉東聖宮（簡稱 DSG）附近之槽溝，深度約為 1.3 公尺。此槽溝從地表面由上而下分別為人工回填（厚約 30 公分）、泥層（厚約 50 公分）及砂層，至挖掘深度約 1.3 公尺後，因地下水湧出而無法繼續挖深。於砂層頂部附近有一薄層灰色泥，向兩側尖滅。此外，本研究於此槽溝泥層之底部及頂部各分析一個碳-14 樣本，於泥層底部之年代為 Cal BC 5965~5750；於泥層頂部之年代為 Cal AD 1670~post 1950。泥層底部之樣本年代過老，本研究推測可能是原本較老的樣本被搬運到此處堆積所造成。東聖宮附近之照片及地層柱，見圖 4-7 所示。本研究推測最底部之砂層為河道沉積物，中間之泥層為沼澤之沉積物。

於土圍(簡稱 TW)所挖掘之槽溝，為蘭陽溪以北地區唯一有發現事件堆積物之槽溝，因此進行較詳細之探討，詳細之地層分析結果，見章節 4.1.3。

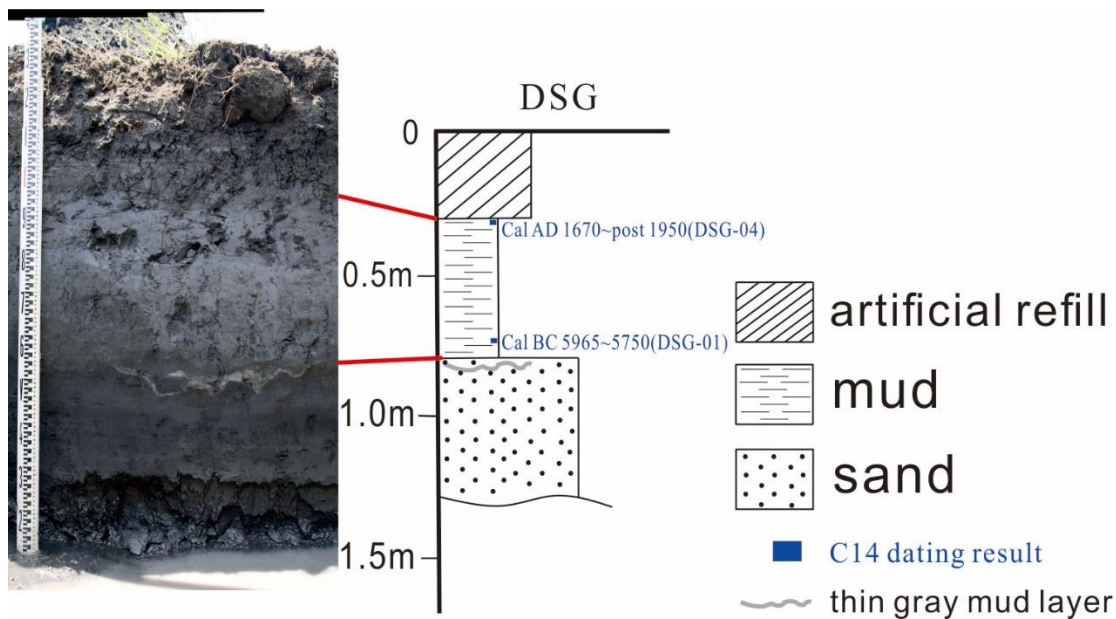


圖 4-7、DSG 槽溝照片及地層柱。推測中間泥層為沼澤之沉積物。泥層底部之樣本為較老之碳樣本，再次被搬運後堆積所形成。



4.1.3 土圍(TW)槽溝挖掘結果

本研究於宜蘭縣礁溪鄉土圍地區，挖掘之槽溝長約 3 公尺，寬約 2 公尺，挖掘深度約為 1.0 公尺。土圍之槽溝中，最靠近地表面之 20 公分為人工回填，深度 20 至 45 公分為泥層，45 至 60 公分為砂層，60 至 90 公分為泥層，90 公分至槽溝底部為砂層，挖掘至最底部砂層後，因地下水湧出使得挖掘無法繼續進行。20 至 45 公分之泥層與 45 至 60 公分之砂層，其邊界明顯且水平，推測該邊界可能代表侵蝕作用。此外於 45 至 60 公分深之砂層中，發現疑似旋捲構造(convolution structure)，可能代表快速沉積，推測該砂層為事件堆積物，詳細討論見第五章。於土圍槽溝中，一共採取 7 個樣本，其中有 6 個為碳質物，另外 1 個則為砂樣。本研究於 45~60 公分之砂層以及 60~90 公分之泥層各分析一個碳-14 樣本，同時於 45~60 公分之砂層採取一砂樣，進行銫-137 以及矽藻分析，土圍地區槽溝之地層柱及樣本分析結果，見圖 4-8。

本研究於 60 至 90 公分深之泥層中所採集之碳物質樣本，其碳-14 校正年代為 Cal BC 6250~6105，因宜蘭平原地區處張裂環境，沉積速率快(陳文山，2000)，推測此樣本為較老的碳，再次被搬運到此處沉積。事件堆積物之砂層中，採集之碳植物樣本，碳-14 定年校正後年代為 Cal AD 1670~post 1950。另外於事件堆積物之砂層深度約 60 公分處所採集之砂樣本，分析其銫-137 以及矽藻種類。其銫-137 之分析之結果為背景值，也就是沒有偵測到銫-137 的存在，推測樣本可能是西元 1950 年以前堆積。矽藻分析結果則為未發現，推測可能是快速沉積造成。

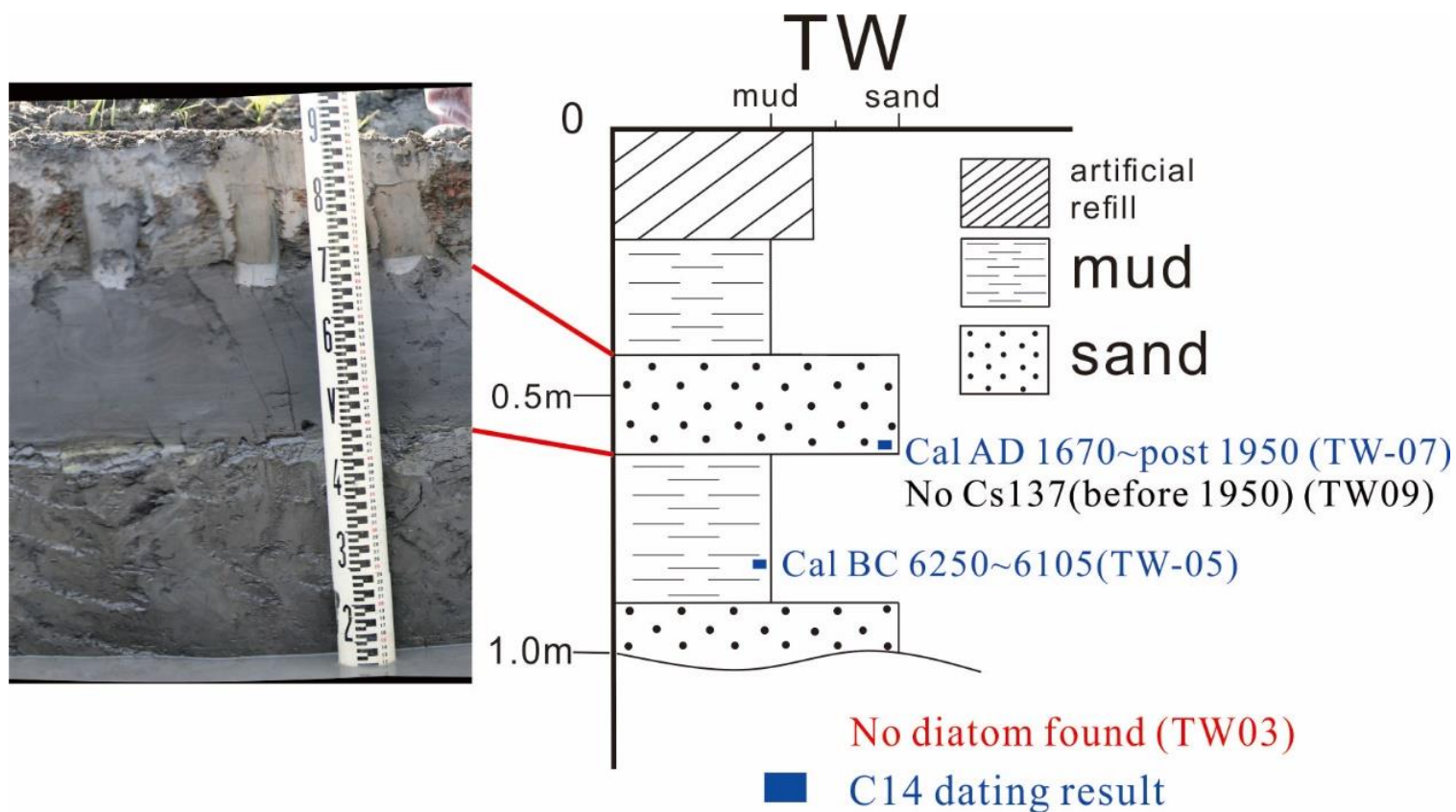


圖 4-8、土圍地區槽溝之地層柱及樣本分析結果。本研究推測深度 45 至 60 公分之砂層為事件沉積物。



4.2 宜蘭平原南部（蘭陽溪以南）

4.2.1 槽溝位置

於宜蘭平原蘭陽溪以南地區初步選定之挖掘位置，多數都未能獲得地主之許可，故無法進行挖掘。因此本研究於宜蘭平原南部地區之槽溝挖掘位置僅有一處，於五結鄉龍德地區。此外，於槽溝南方約 120 公尺處，有鑽兩口井取沉積物岩芯，兩井取芯深度均為地表至深度 10 公尺處。詳細槽溝及鑽井位置，如圖 4-9 所示。

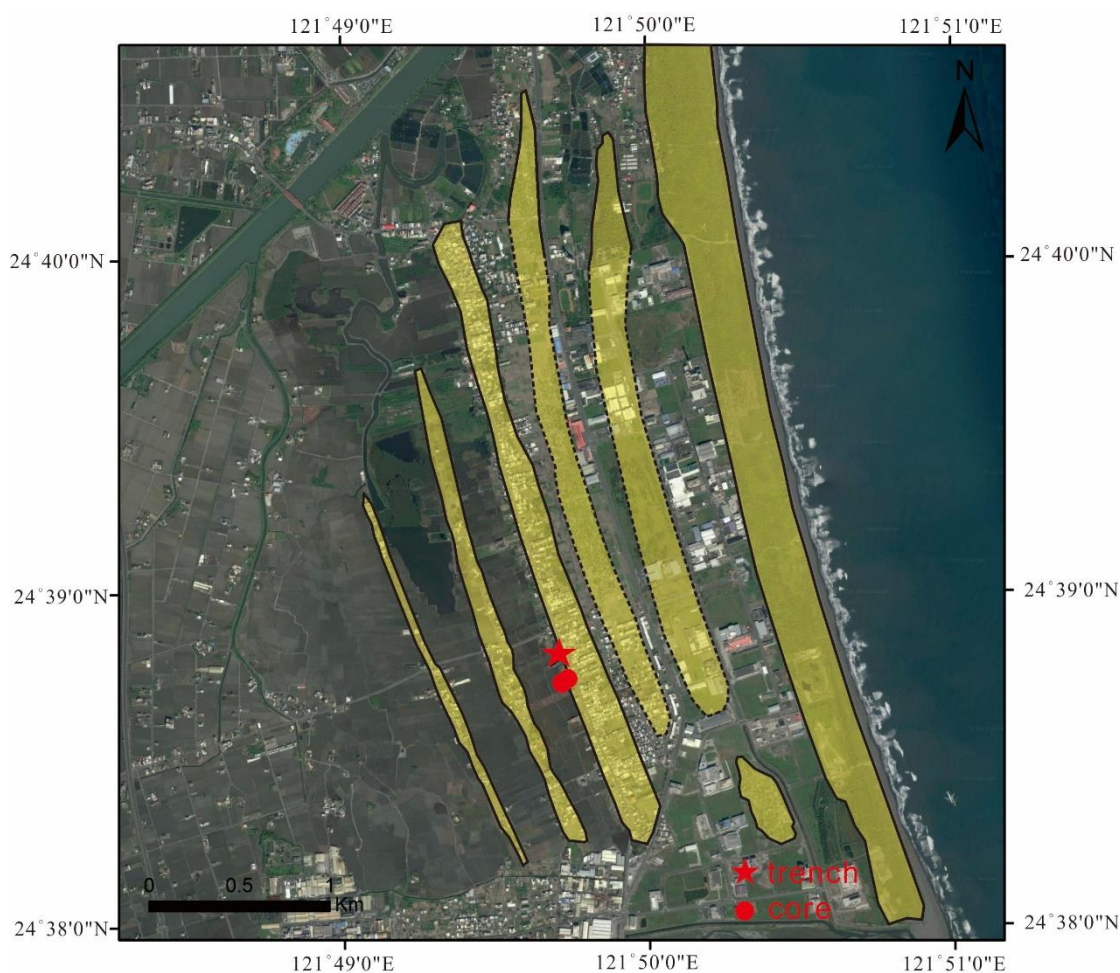


圖 4-9、龍德地區槽溝及鑽井位置圖。星號為槽溝挖掘位置，圓圈為鑽井位置。

黃色區域為本研究所繪製之沿岸砂脊分佈。



4.2.2 龍德地區地形剖面

宜蘭平原蘭陽溪以南地區，如第二章所述，沿岸砂脊保存較良好，然而因聚落及工業區之開發，利用 Google Earth 影像判斷沿岸砂脊位置時，易受人為開發影響，導致判斷錯誤。因此本研究利用 RTK-GPS 測量最西側之沿岸砂脊至海岸線之地表剖面。再利用內政部設置之一等水準點（編號 2087）進行座標校正。

於宜蘭平原蘭陽溪以南地區，沿岸砂脊主要走向大致為 $N20^{\circ}W$ ，繪製之剖面方向與沿岸砂脊垂直，也就是 $N70^{\circ}E$ 之方向。再以最西側之測量點為原點，建立各測量點相對於原點之座標。將各測量點座標投影至 $N70^{\circ}E$ 方向，為水平軸；校正後之高度座標為垂直軸，繪製龍德地區之地形剖面，如圖 4-10 所示。測量之原始資料見附錄 1。

根據繪製之剖面結果，本研究認為宜蘭平原蘭陽溪以南地區，可能有 5 至 6 條沿岸砂脊，其中，剖面水平位置 1500 到 2200 公尺處，由於受到工業區開發影響，原始的砂脊和脊間低地地形已被削平，因此本研究利用工業區東西兩側之沿岸砂脊及脊間低地之分佈推測其原始狀況。較靠近海岸線之沿岸砂脊高度較高，海拔高約 5 至 9 公尺；最遠離海岸線之 2 條沿岸砂脊高度最低，海拔高約為 2 至 3 公尺。本研究所挖掘之龍德槽溝，地表面海拔高約為 1.49 公尺，位於其中一個脊間低地內。此外，本研究之岩芯鑽取位置，因沿岸砂脊各處寬度不同，從結果推測選定之岩芯鑽取位置位於沿岸砂脊上，沉積物岩芯主要以砂為主，詳細沉積物岩芯結果，見章節 4.2.4。

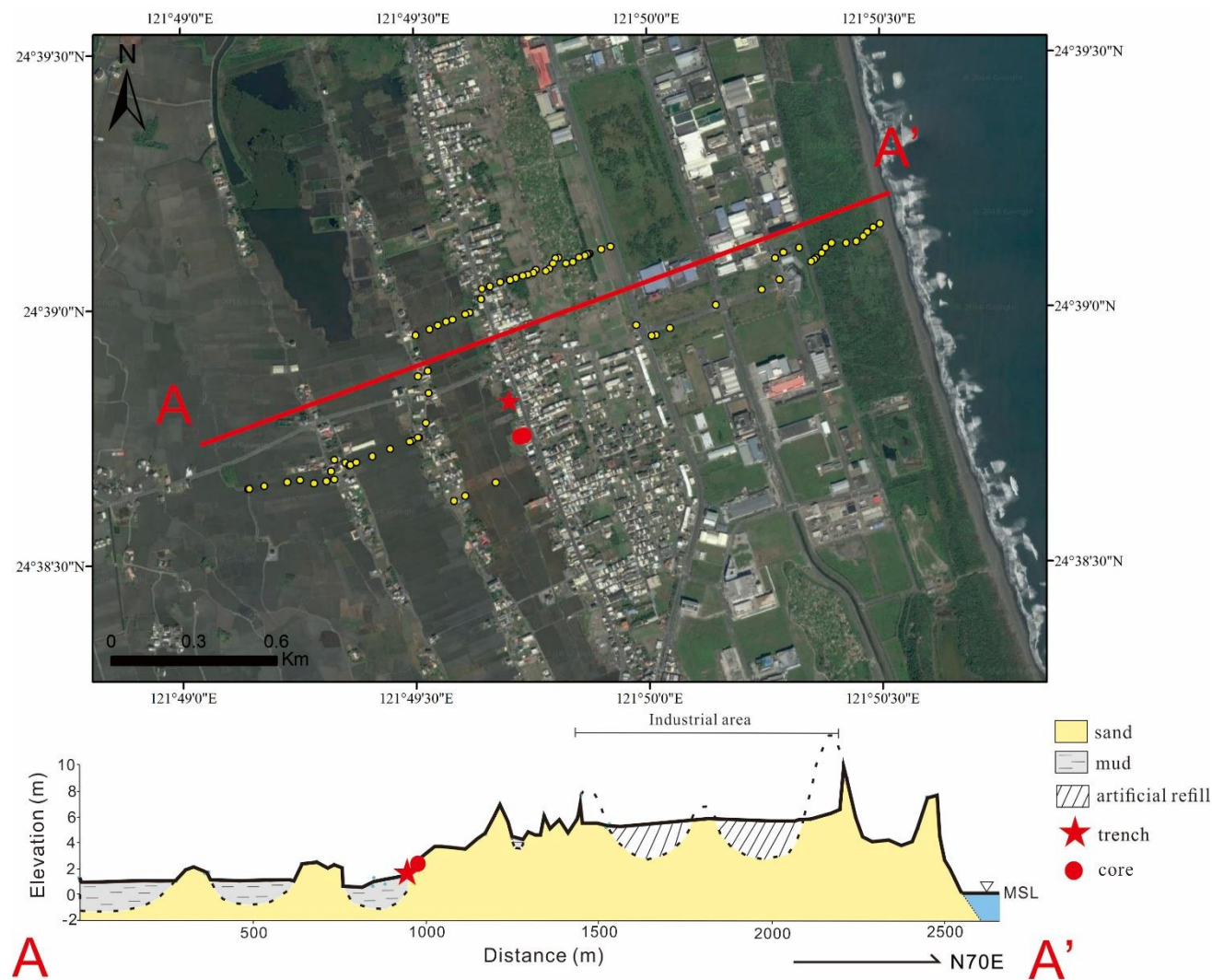


圖 4-10、龍德地區測量結果及剖面圖。剖面為投影至 N70°E 之方向，剖面於 0~1000 公尺處有 3 個脊間低地，剖面約 1500~2200 公尺處為利澤工業區，目前已完全開發，本研究利用工業區兩側沿岸砂脊之幾何特徵，推測開發時可能同時有削平沿岸砂脊和填平脊間低地等人為干擾，造成現今測量到之平坦地貌（測量原始資料見附錄 1）。



4.2.3 龍德(LD)槽溝挖掘結果

本研究於五結鄉龍德地區挖掘之槽溝，長約 2 公尺，寬約 1.5 公尺，挖掘深度約為 1.3 公尺。本槽溝中，地表至深約 40 公分處為人工回填、深度約 40 公分至 65 公分處為砂層、深度 65 公分至 100 公分為泥層。上述之砂層與泥層，兩層之邊界明顯且不規則，推測此邊界代表一侵蝕作用。100 公分至深約 130 公分之槽溝底部為砂層，挖掘至此砂層後因地下水湧出，無法繼續挖深。

於龍德槽溝中共採集碳質物樣本 11 個，砂樣 1 個（採於 40 至 65 公分之砂層）。其中 8 個碳質物樣本採集於深 65 至 100 公分之泥層中，2 個碳質物樣本採集於深 40 至 65 公分之砂層中，1 個碳質物樣本採集於人工回填中。

於上述採集之樣本中，於砂層中選擇 1 個，泥層中選擇 2 個樣本，送至位於美國之 Beta Analytic 公司進行碳-14 定年。於 65 至 100 公分深泥層中之 2 個樣本，定年並校正後，其年代相近，分別是 Cal AD 1645~post1950 及 Cal AD 1655~post1950。於 40 至 65 公分深之砂層中之樣本，定年並校正後，其年代為 Cal AD 1425~1470。從以上敘述可以發現，較老的碳樣本覆蓋在較年輕的碳樣本上，又因較老之碳樣本採於快速沉積之砂層，因此本研究推測該樣本為原本較老的碳，再次搬運並沉積所造成之結果。

於 40 至 65 公分之砂層中，本研究採集之砂樣本，分別進行銨-137 及矽藻種類分析。銨-137 測定結果為背景值，推測該砂層為 1950 年以前沉積。矽藻分析之結果則是以淡水環境之種屬為主。詳細槽溝照片及地層柱如圖 4-11 所示。

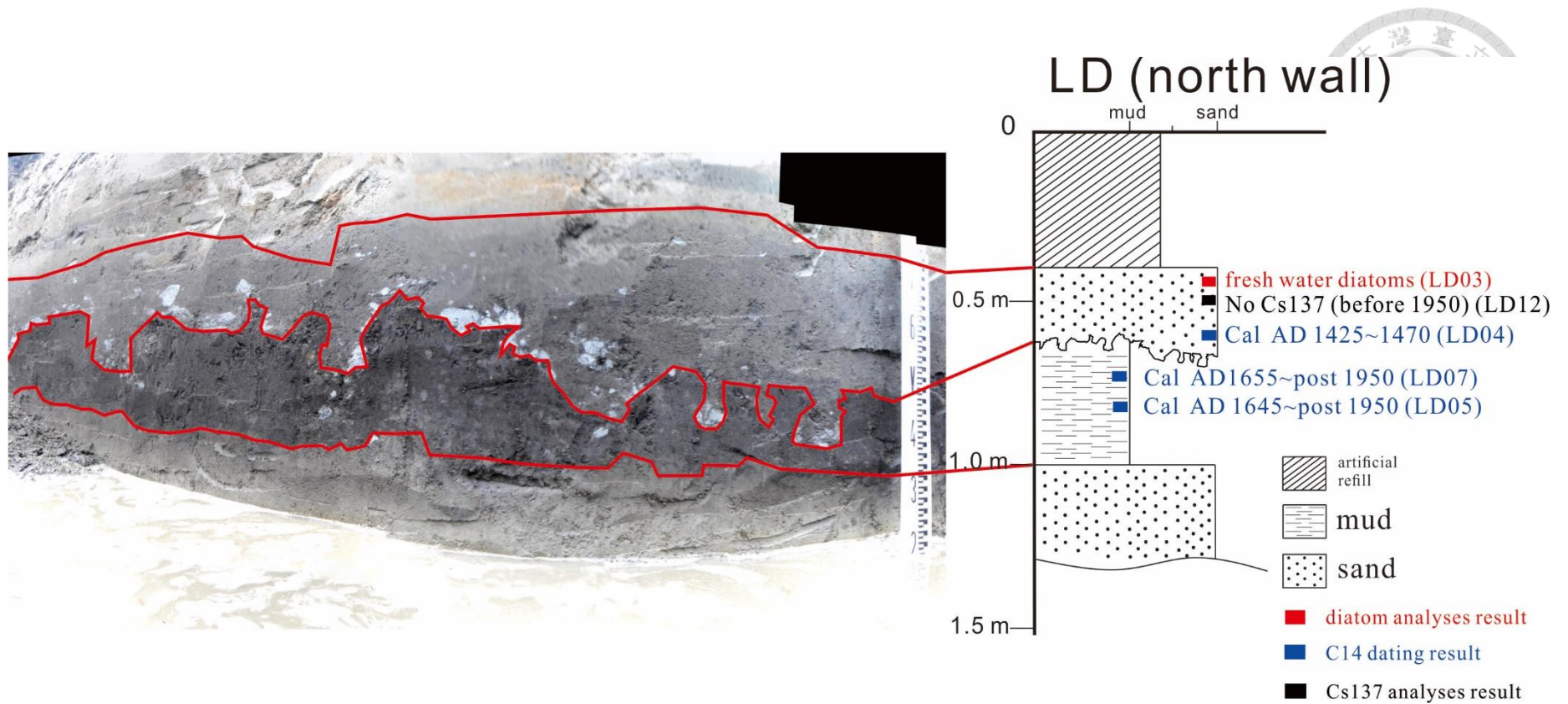


圖 4-11、龍德地區槽溝照片及地層柱。可發現 40 至 65 公分深之砂層與 65 至 100 公分深之泥層邊界明顯且不規則，推測該砂層為快速沉積形成。另外，由碳-14 定年及銫-137 分析，推測 40 至 65 公分深之砂層沉積年代為西元 1655 至西元 1950 之間。



4.2.4 沉積物岩芯結果

本研究於龍德所挖掘之槽溝南方約 120 m 處，鑽有兩口沉積物岩芯，取芯深度為 0 至 10 m，分別命名為 Bh1 及 Bh2，其詳細位置，見圖 4-12。

兩沉積物岩芯中，主要組成為砂層，砂層中偶有礫石，並未發現泥層的存在，推測此兩岩芯之挖掘位置於沿岸砂脊上，因此結果幾乎全為砂層，僅於 B1 之深 0.3m 至 1.1m 處有礫石層。Bh1 岩芯之地層柱，見圖 4-13；Bh2 岩芯之地層柱，見圖 4-14。



圖 4-12、宜蘭平原南部龍德地區所鑽取之沉積物岩芯詳細位置。Bh1 位於較西側，Bh1 與 Bh2 距離水平約為 7 公尺。高度部分，Bh2 之地表位置較 Bh1 之地表位置高約 5.6 公分。

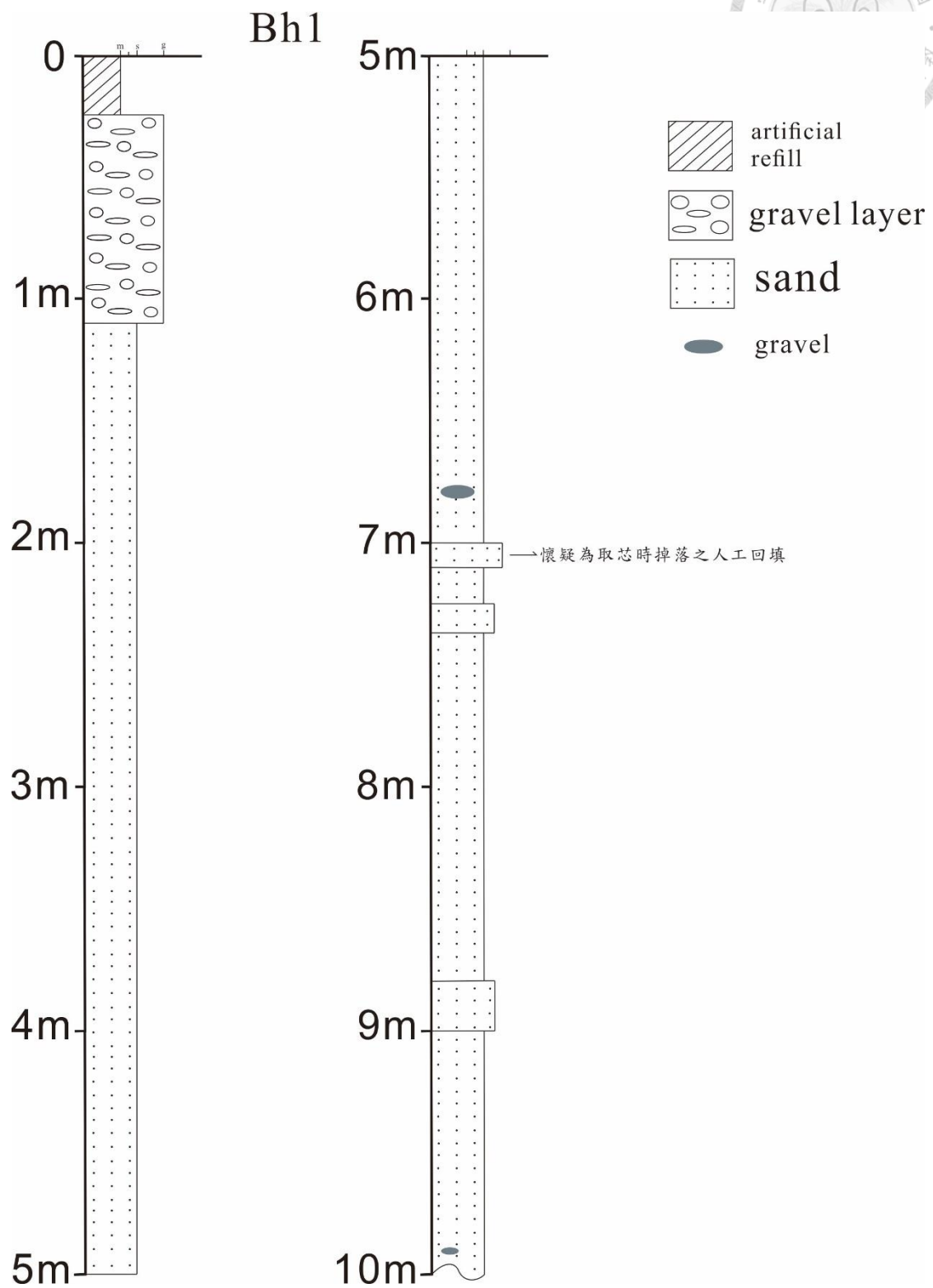


圖 4-13、宜蘭平原南部龍德地區沉積物岩芯 Bh1 地層柱。

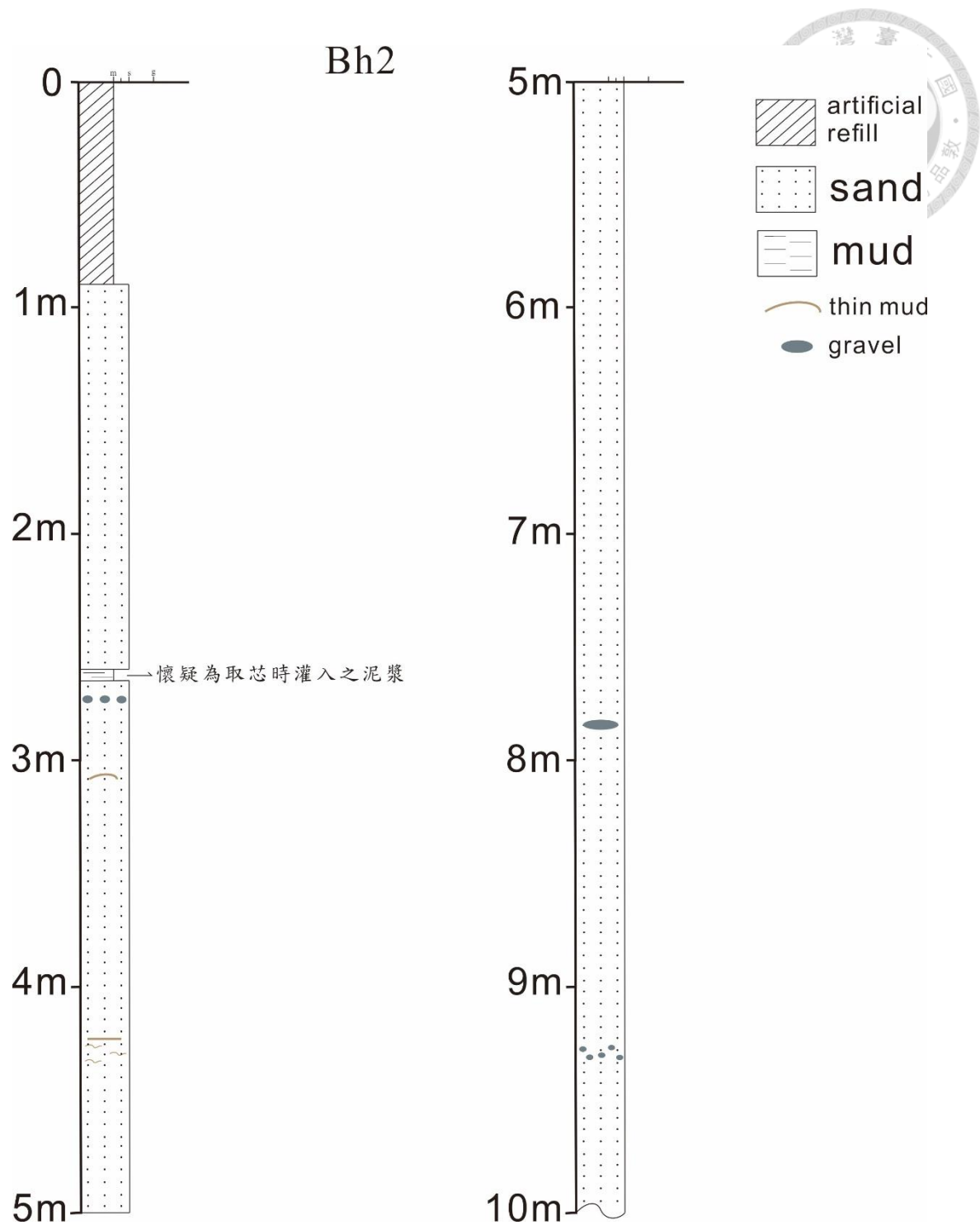


圖 4-14、宜蘭平原南部龍德地區沉積物岩芯 Bh2 地層柱。



4.3 緬甸若開邦海岸地區

4.3.1 挖掘位置選取結果

本研究於緬甸之挖掘地點選取原則，在 3.2.1 節中已有描述。依據 3.2.1 節描述之原則，本研究於緬甸若開邦卡帕裏海灘周邊地區共選擇 5 個沿岸砂脊後方之區域進行挖掘，於每個區域，視當日開挖狀況挖掘槽溝 1 至 3 個，故本研究於卡帕裏海灘周邊地區共挖掘槽溝 9 個，大致位置如圖 4-15 所示。

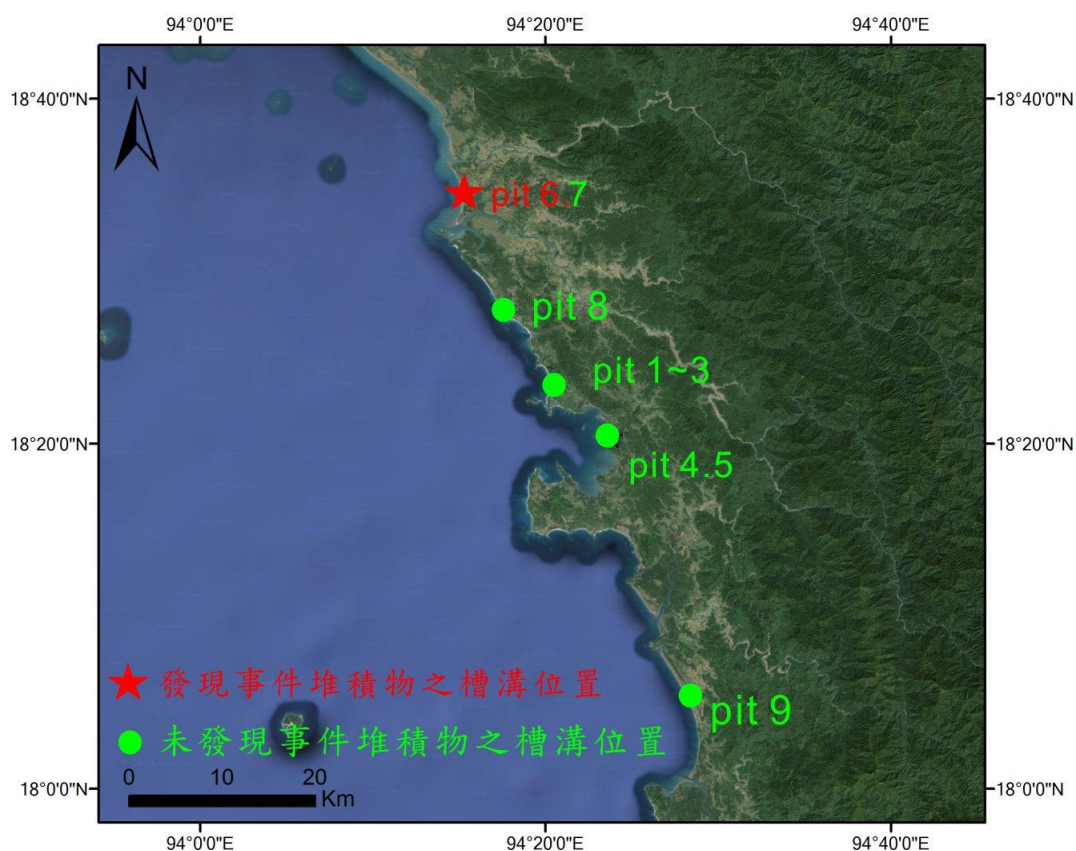
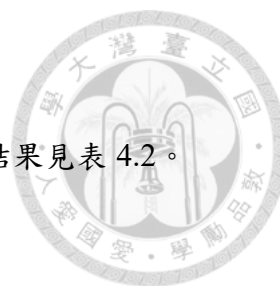


圖 4-15、緬甸若開邦海岸地區槽溝大致位置。其中 Pit 6 為有發現事件堆積物之槽溝。



4.3.2 挖掘概況

本研究於緬甸若開邦海岸地區所挖掘之槽溝，深度及挖掘結果見表 4.2。

表 4-2 緬甸若開邦海岸地區之槽溝名稱、挖掘深度及沉積物組成

槽溝名稱	挖掘深度	沉積物組成（自地表向下）
Pit 1	0.9 m	土壤層、砂層、珊瑚碎屑
Pit 2	0.9 m	土壤層、砂層
Pit 3	1.1 m	土壤層、砂層
Pit 4	1.7 m	土壤層、砂層
Pit 5	1.5 m	土壤層、砂層
Pit 6	1.5 m	土壤層、褐色細砂層、灰色粗砂層、泥層
Pit 7	0.5 m	土壤層、泥層
Pit 8	1.0 m	土壤層、砂層、灘礫層
Pit 9	1.2 m	土壤層、砂層、砂泥混合層

Pit 1、Pit 2 以及 Pit 3 為最靠近卡帕裏海灘之槽溝，挖掘位置之海拔高度約為 1.1 至 1.2 公尺，其詳細位置及地形剖面見圖 4-16。Pit 1 槽溝中，從地表至深約 15 公分為土壤層，深度 15 公分至 75 公分為砂層，於該層中有一碳樣本，深度約為 40 公分，年代為 Cal AD 1655~post 1950。深度 75 公分至 85 公分為珊瑚碎屑層，該層內有發現原地生長(*in situ*)之珊瑚。本研究於該層內分別採集碎屑及原地生長之珊瑚定年。其中碎屑珊瑚之鈾釷(U-Th)年代為 6920 ± 30 (y BP)，原地生長之珊瑚鈾釷年代為 6791 ± 22 (y BP)。綜合以上結果，本研究推測 75 至 85 公分深之珊瑚碎屑為中全新世(Middle Holocene)高海面時生長及堆積，深度 15 至 75 公分深之砂層為近 400 年內之堆積物，較可能是河流或沿岸砂脊堆積所形成。Pit

1 之照片、地層柱及定年結果見圖 4-17。Pit 2 及 Pit 3 為 Pit 1 南方挖掘之槽溝，由於此兩槽溝組成全為砂夾雜些許泥，並無明顯之沉積物組成的上下差異，因此並無詳細之紀錄，Pit 2 及 Pit 3 之照片見圖 4-18。

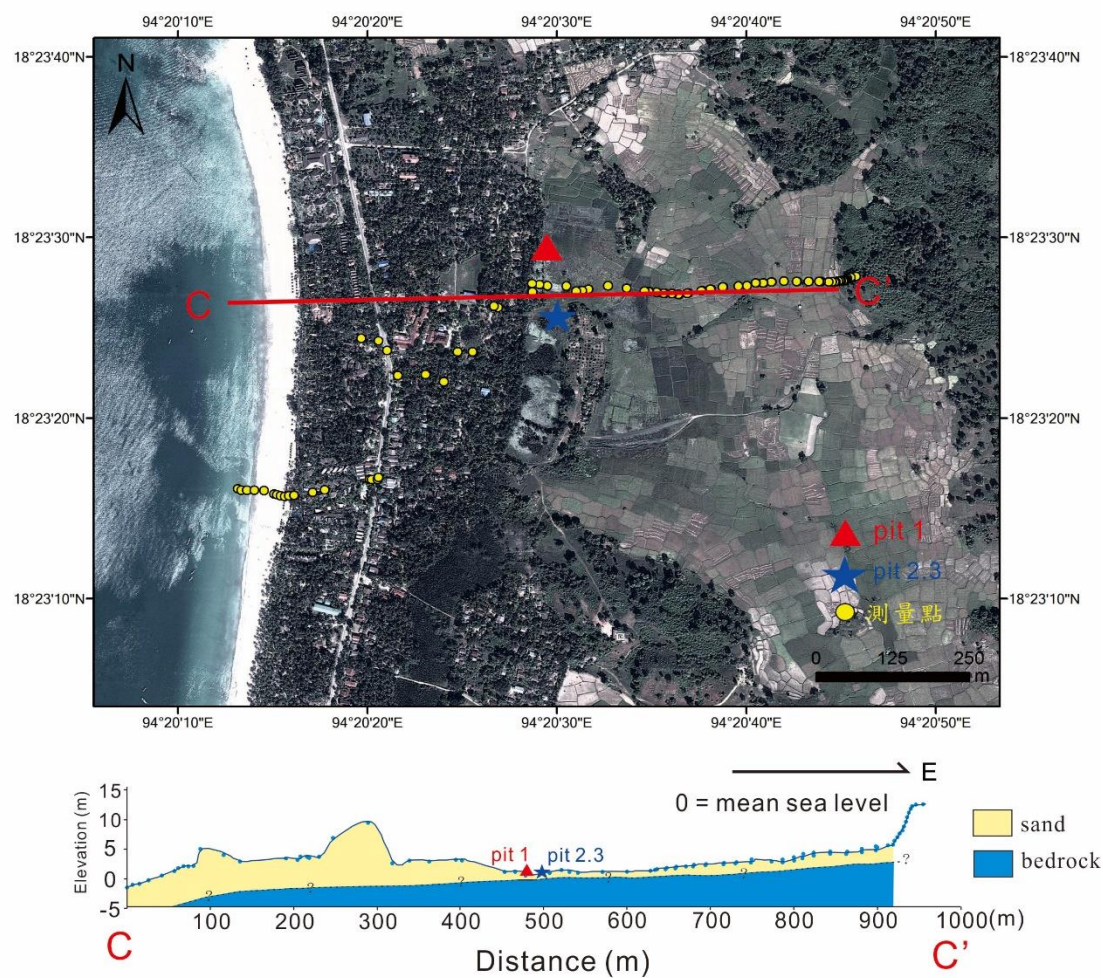


圖 4-16、Pit 1 至 Pit 3 槽溝之挖掘位置及地形剖面（原始測量數據見附錄 1）。

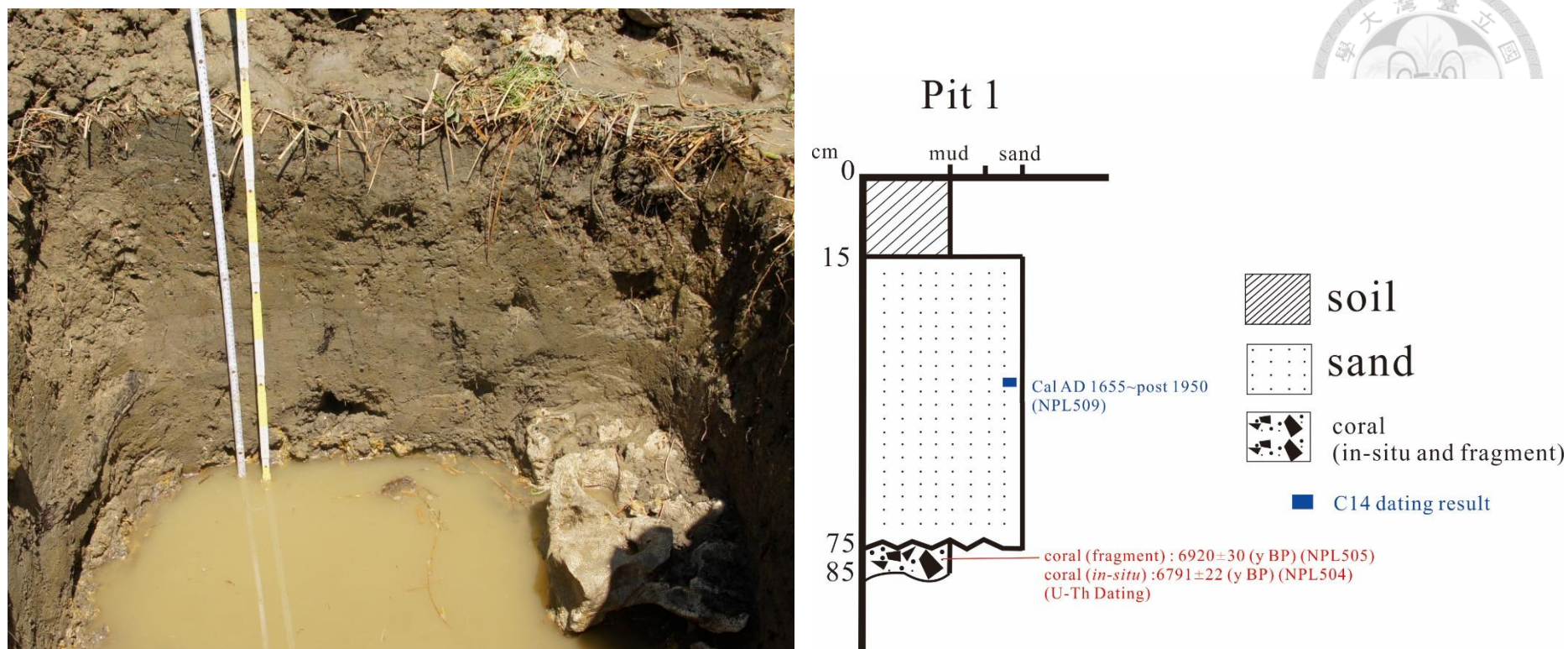


圖 4-17、Pit 1 槽溝之照片、地層柱以及定年結果。推測照片右下方之珊瑚為現地生長，非碎塊。



圖 4-18、Pit 2 及 Pit3 槽溝照片。A 為 Pit 2 槽溝、B 為 Pit 3 槽溝，圖中量尺每一顏色為 10 公分。

Pit 4 及 Pit 5 位於卡帕裏海灘南方之海灣內，槽溝挖掘位置高度約為 1.6 至 1.7 公尺，附近地形剖面見圖 4-19。Pit 4 之挖掘結果為：地表至深度約 50 公分處為土壤層，深度 50 至 142 公分處為褐色砂層，深度 142 公分至 170 公分（槽溝底部）為灰色砂層，且頂部有許多植物碎屑，Pit 4 之槽溝照片以及地層柱，見圖 4-20。Pit 5 由於整個槽溝在土壤層以下都是黃褐色細砂，並無明顯沉積物之變化，因此沒有詳細之紀錄結果，僅在深度約 140 公分處採得一碳樣本，定年結果為 Cal 1670~ post1950。

Pit 6 及 Pit 7 位於卡帕裏海灘北方一小灣口內，於 Pit 6 槽溝中有發現沉積環境之變化，因此本研究有針對 Pit 6 附近地形及挖掘結果有較詳細之分析。Pit 6 附近地形剖面，見章節 4.3.3；Pit 6 分析結果，見章節 4.3.4。Pit 7 則是位於 Pit 6 東南方約 5 公尺處，挖掘深度約 50 公分，挖掘至地下水水面而無法繼續挖深。於 Pit 7 中並未發現明顯之沉積環境變化，因此並未作詳細之地層柱繪製。

Pit 8 位於卡帕裏海灘北方海岸處，挖掘位置附近之海岸線較為平直，並非位於海灣內（詳細挖掘位置及附近地形剖面見圖 4-21）。Pit 8 之挖掘深度約為 1 公尺，詳細挖掘結果如下：地表至深度 20 公分處為土壤，深度 20 公分至 50 公分處為砂層，該砂層中含有貝殼碎屑，深度 50 公分至深度 100 公分（槽溝底部）為灘岩 (beach rock)，粒徑為粗砂至礫，且含有大量貝殼碎片。Pit 8 之槽溝照片地層柱見圖 4-22。根據剖面及挖掘結果推測，Pit 8 應是挖於被侵蝕之沿岸砂脊上。

Pit 9 位於卡帕裏海灘南邊之海灣內，挖掘位置之海拔高度約為 1 公尺，槽溝詳細挖掘位置及附近地形剖面見圖 4-23。詳細挖掘結果為：地表至深度約 35 公分處為土壤層；深度 35 公分至 55 公分為砂層，粒徑向上變細；深度 55 至 70 公分為細砂層，有少量碳質物碎屑；深度 70 至 120 公分（槽溝底部）為砂泥混合層，含有大量植物碎屑，底部有交錯層(cross bedding)。槽溝照片及地層柱見圖 4-24。

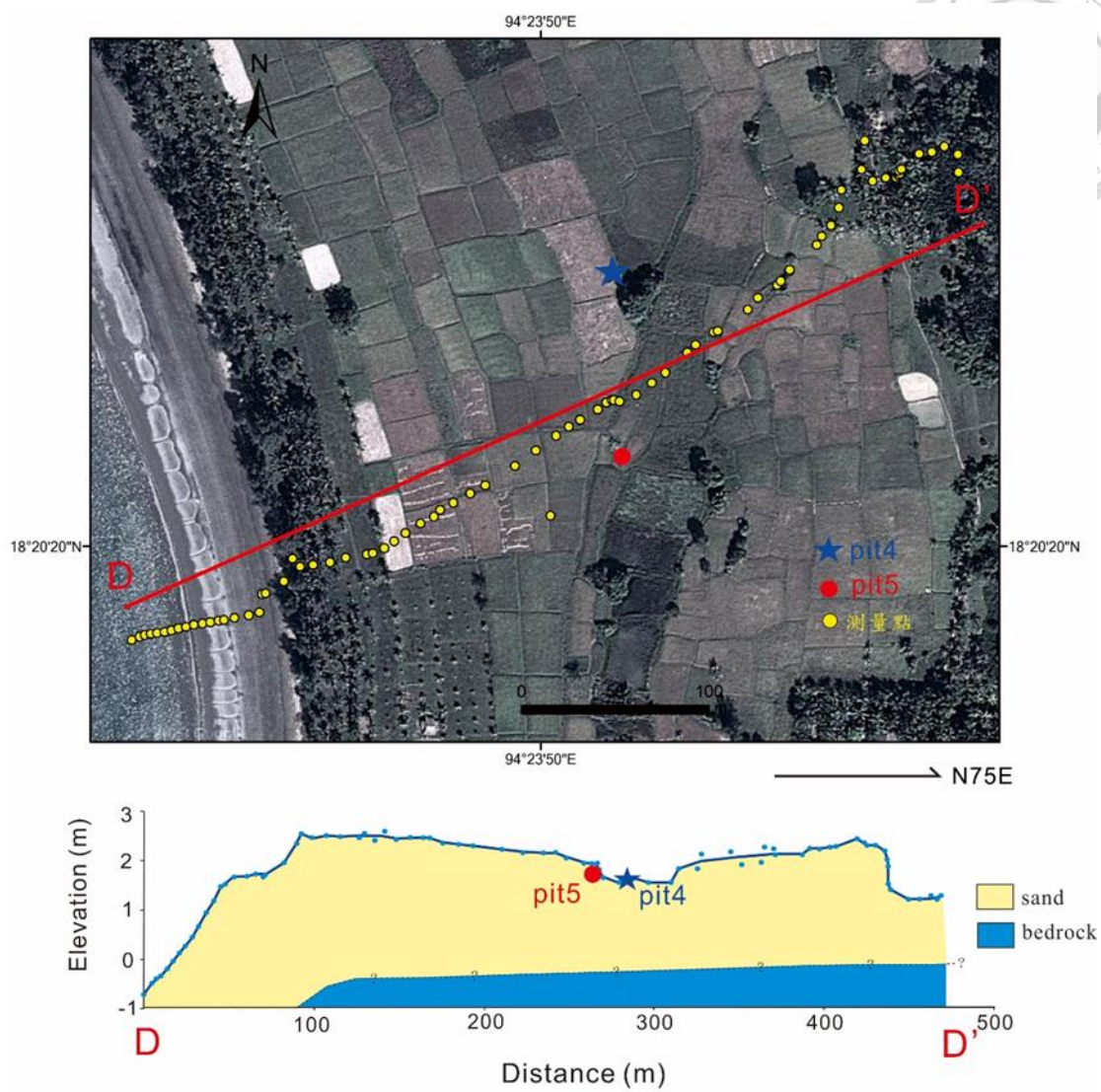


圖 4-19、Pit 4 及 Pit 5 槽溝之挖掘位置及附近之地形剖面（原始測量數據見附錄 1）。

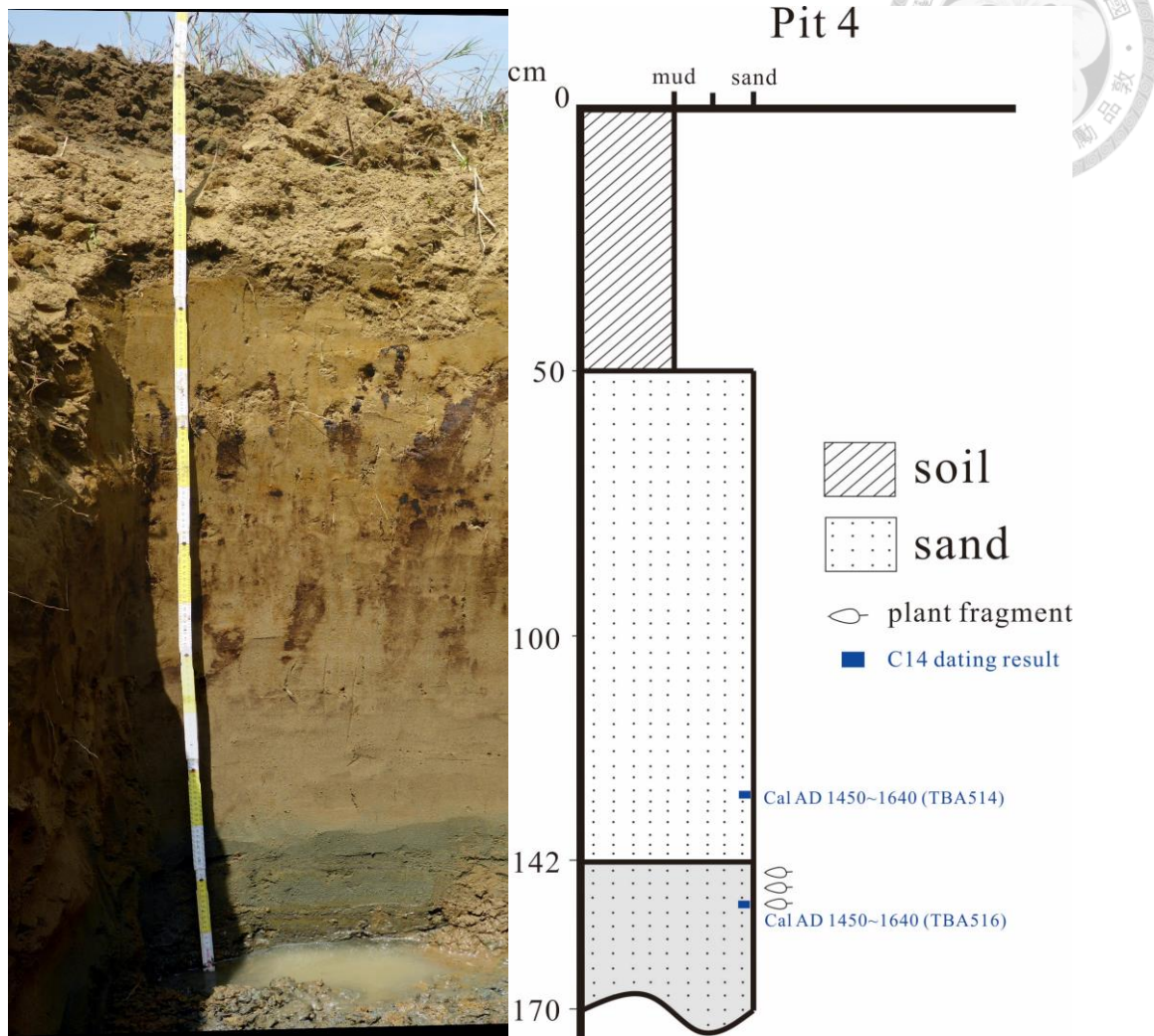


圖 4-20、Pit 4 之槽溝照片及地層柱。

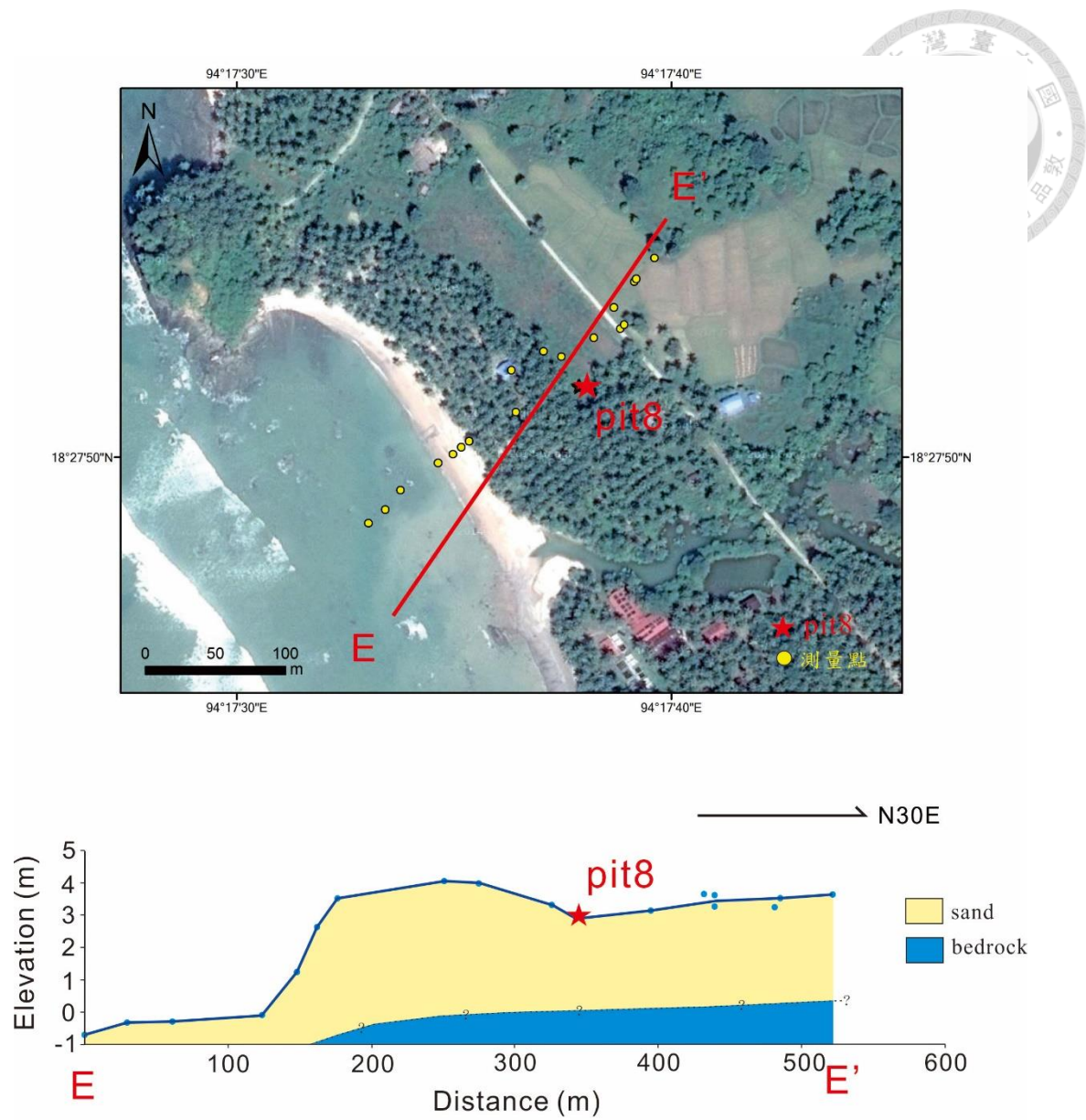


圖 4-21、Pit 8 槽溝挖掘位置以及附近之地形剖面（原始測量數據見附錄 1）。

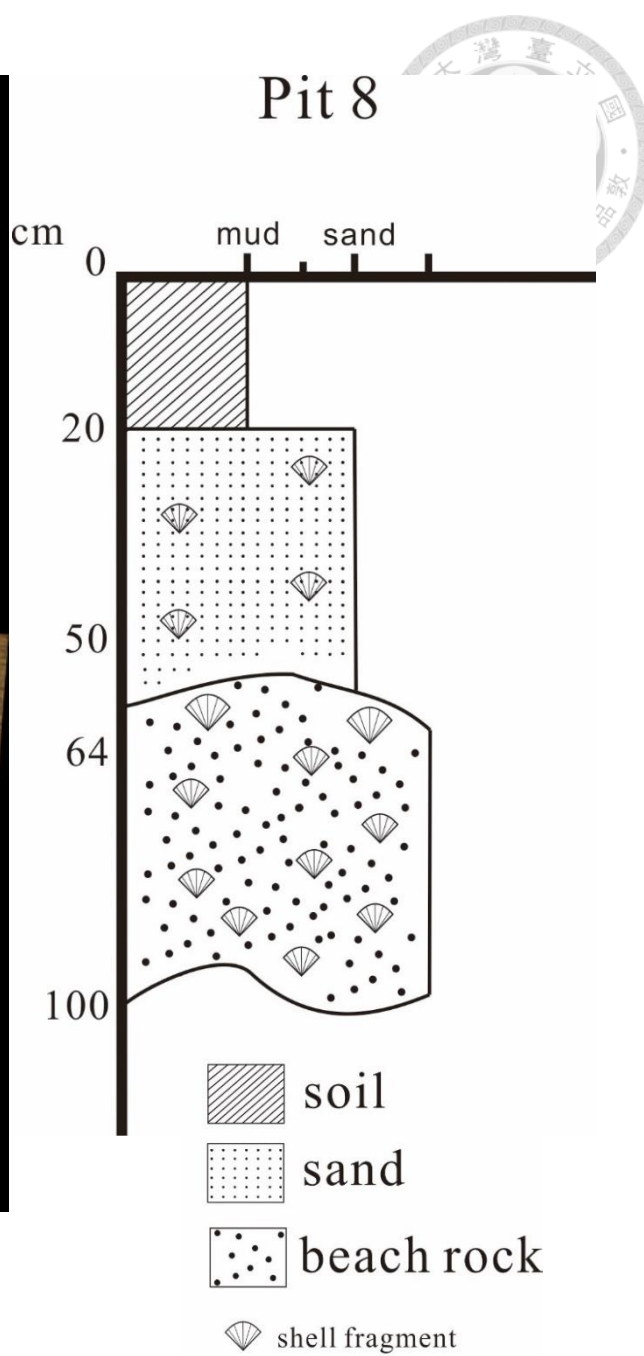
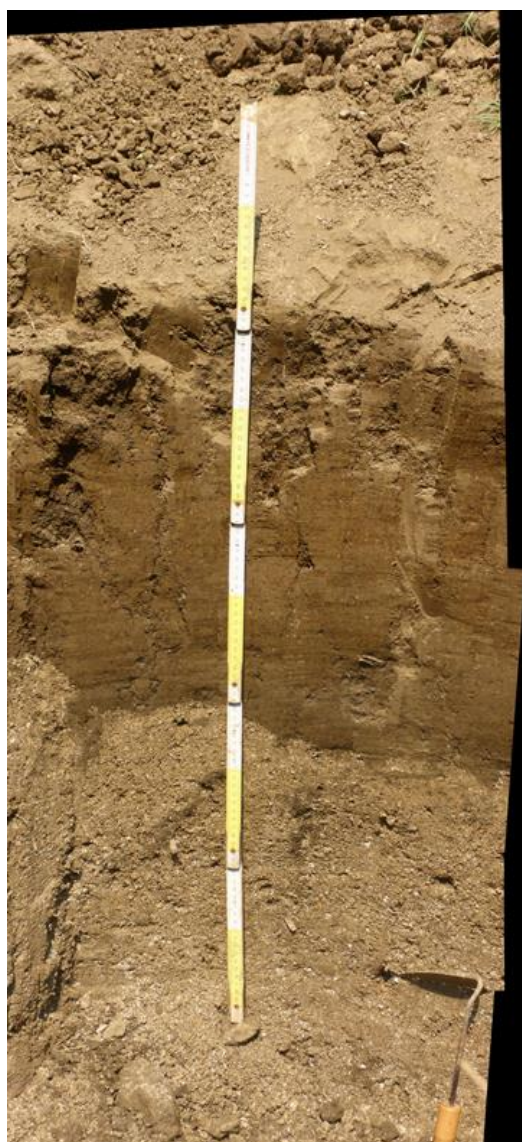


圖 4-22、Pit 8 槽溝照片以及地層柱。

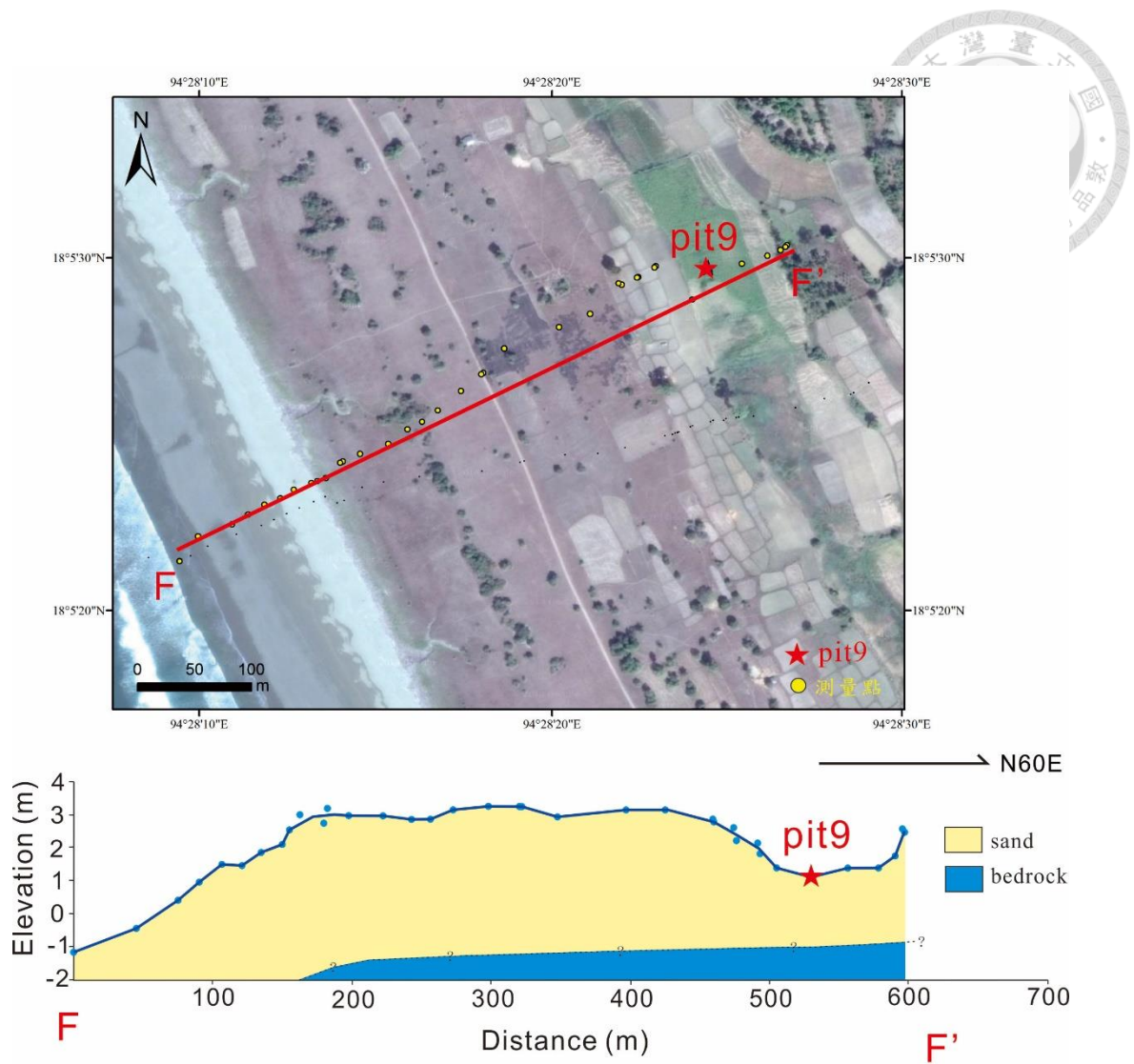


圖 4-23、Pit 9 槽溝挖掘位置以及附近之地形剖面（原始測量數據見附錄 1）。

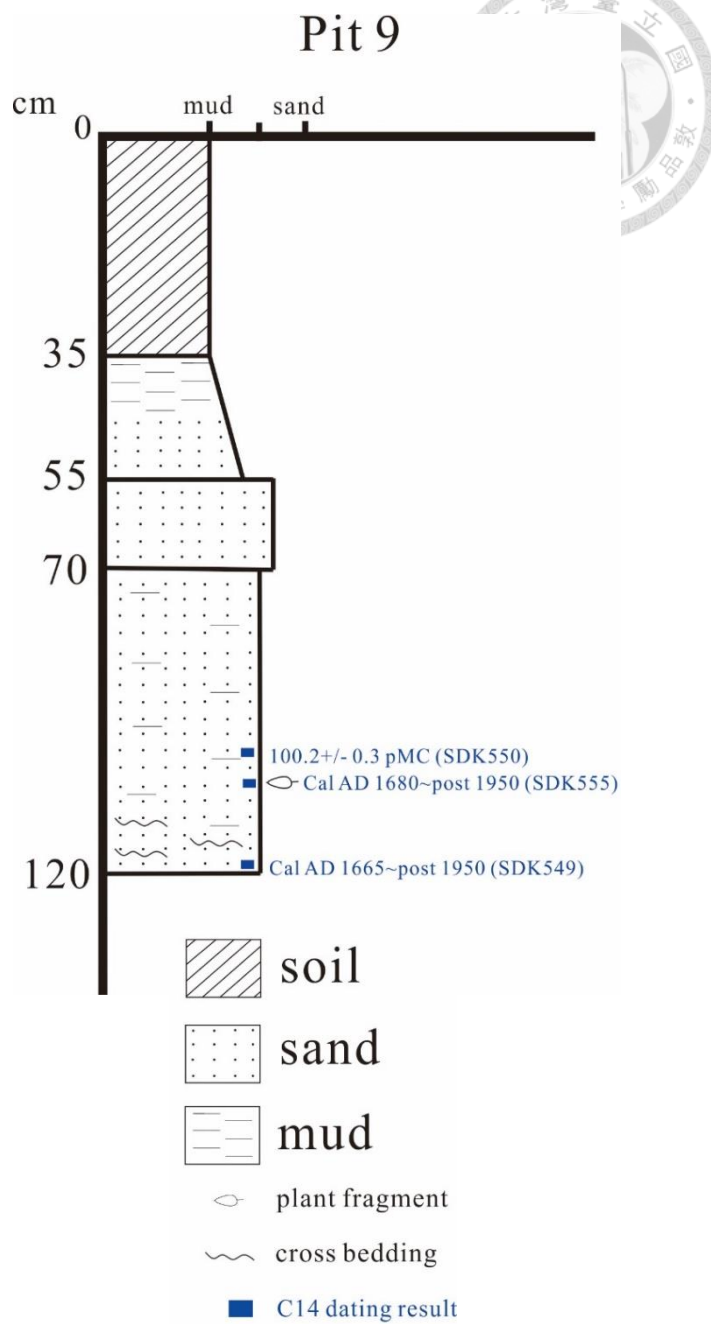
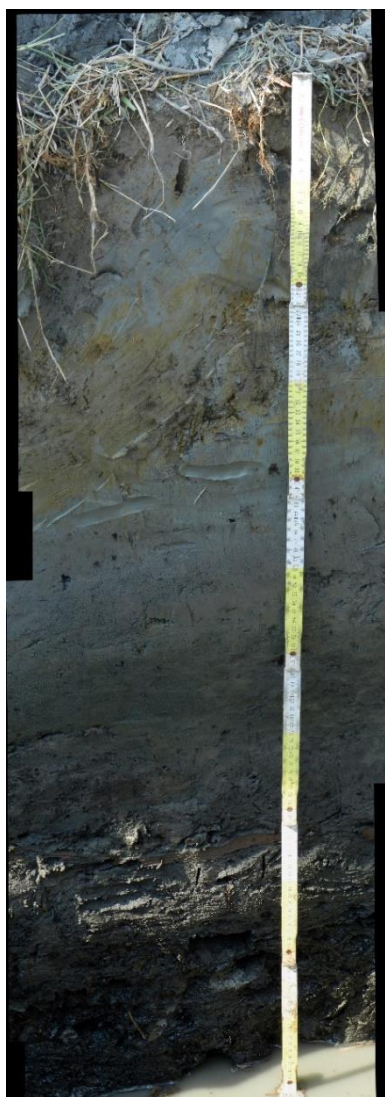


圖 4-24、Pit 9 之槽溝照片以及地層柱。

4.3.3 Pit 6 附近地形剖面

圖 4-15 為 Pit 6,7 附近之地區，本研究利用 RTK-GPS 測量通過沿岸砂脊至砂脊後方低地之地形面。根據測量結果，此處之沿岸砂脊高度約 4 公尺（基準點為當地之平均海水面），本研究所挖掘之槽溝位於沿岸砂脊後方，海拔高度約為 0.5 公尺以內。此外，我們於該處詢問當地居民，並測量居民所指出之 2004 蘇門答臘海嘯於該處到達的最大高度，測量後繪製於剖面圖上。結果顯示 2004 蘇門答臘海嘯於此處之上溯高約為 3 公尺。詳細 Pit 6 附近之地形剖面，如圖 4-25 所示。

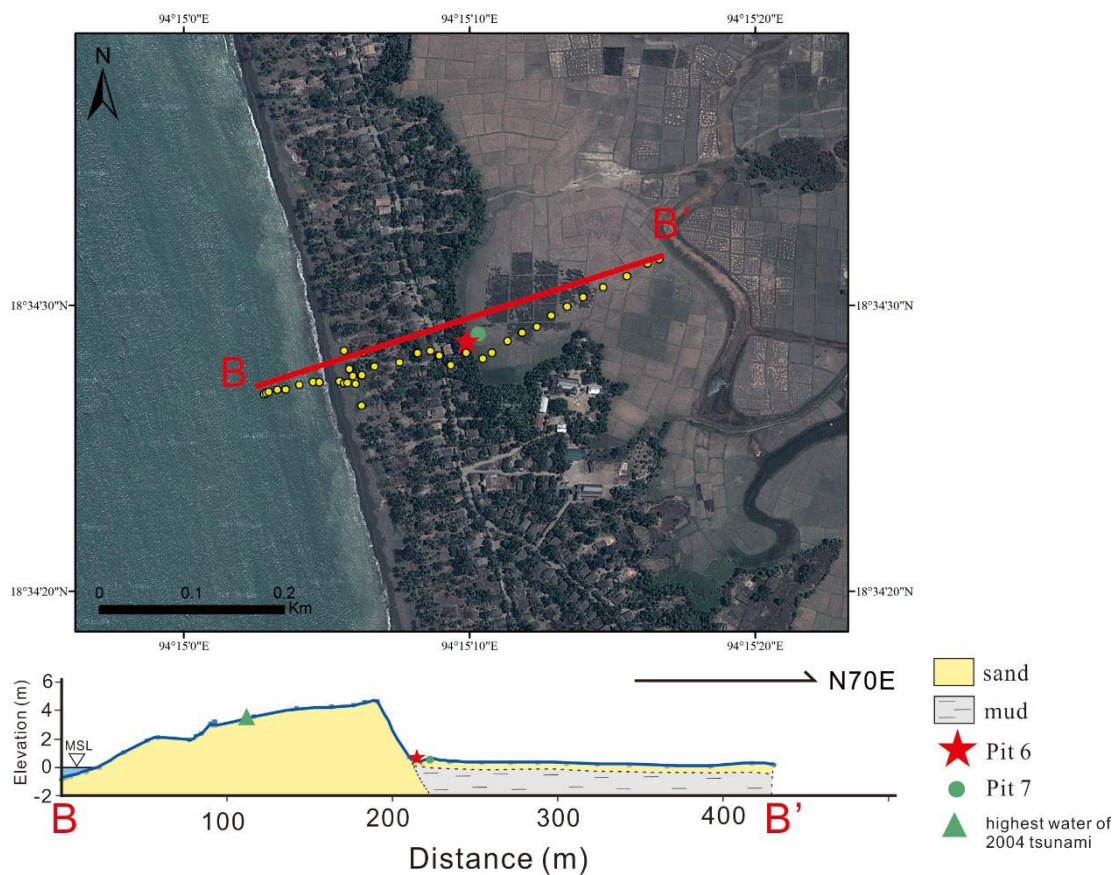


圖 4-25、緬甸若開邦海岸地區之 Pit 6 附近地形剖面。剖面投影方向為 N70°E，高度 0 處為當地之平均海水面，綠色三角形位置為當地居民表示 2004 蘇門答臘海嘯最高影響之位置（原始測量資料見附錄 1）。



4.3.4 Pit 6 挖掘結果

本研究於 Pit 6 挖掘之槽溝，長約 1.8 公尺，寬約 0.4 公尺，挖掘深度為 1.5 公尺。於 Pit 6 由地表向下為，深度 0 至 13 公分為土壤層，深度 13 至 61 公分為砂層，顏色以黃褐色及灰色為主，深度 61 至 73 公分為灰色粗砂層，粒徑較深度 13 至 61 公分之砂層大，深度 73 公分至 153 公分（槽溝底部）為泥層，該泥層最頂部有許多植物碎屑(plant fragments)。深度 73 至 153 公分之泥層與深度 61 至 73 公分之灰色砂層，兩者邊界明顯且不規則，推測深度 61 至 73 公分之灰色砂層為事件沉積物，詳細沉積過程之討論見第五章。

於 Pit 6 槽溝中，本研究共採集 9 個碳質物樣本及 7 個砂樣本，碳質物樣本主要採集於 73 至 153 公分之泥層及 61 至 73 公分之砂層中，沉積物樣本則是從深度 13 公分至 86 公分各深度都有採集。

於採得之樣本中，本研究於深度 61 至 73 公分砂層中，頂部與底部各選定一個碳質物定年，底部樣本之定年結果為 Cal AD 1665~ post 1950；頂部樣本之定年結果為 Cal AD 1685~ post 1950。另外，雖然本研究於各深度都有採集砂樣本，但僅在深度約 20 至 25 公分處所採集之砂樣，樣本量足夠進行銨-137 之分析，故此槽溝之銨-137，為分析 20 至 25 公分深之砂樣，其結果為有銨-137 對應之峰值，推測該砂層為 1950 年以後沉積。矽藻分析部分，分析於深度 80 公分（泥層內）、63 公分（灰色粗砂層內）、35 公分及 15 公分採集之樣本，結果如下：深度 80 公分之樣本為海洋及半鹹水環境之矽藻；深度 63 公分之樣本為半鹹水至淡水環境；深度 35 公分之樣本以及深度 15 公分之樣本為淡水環境。詳細之槽溝挖掘及銨-137 和矽藻分析結果，見圖 4-26。

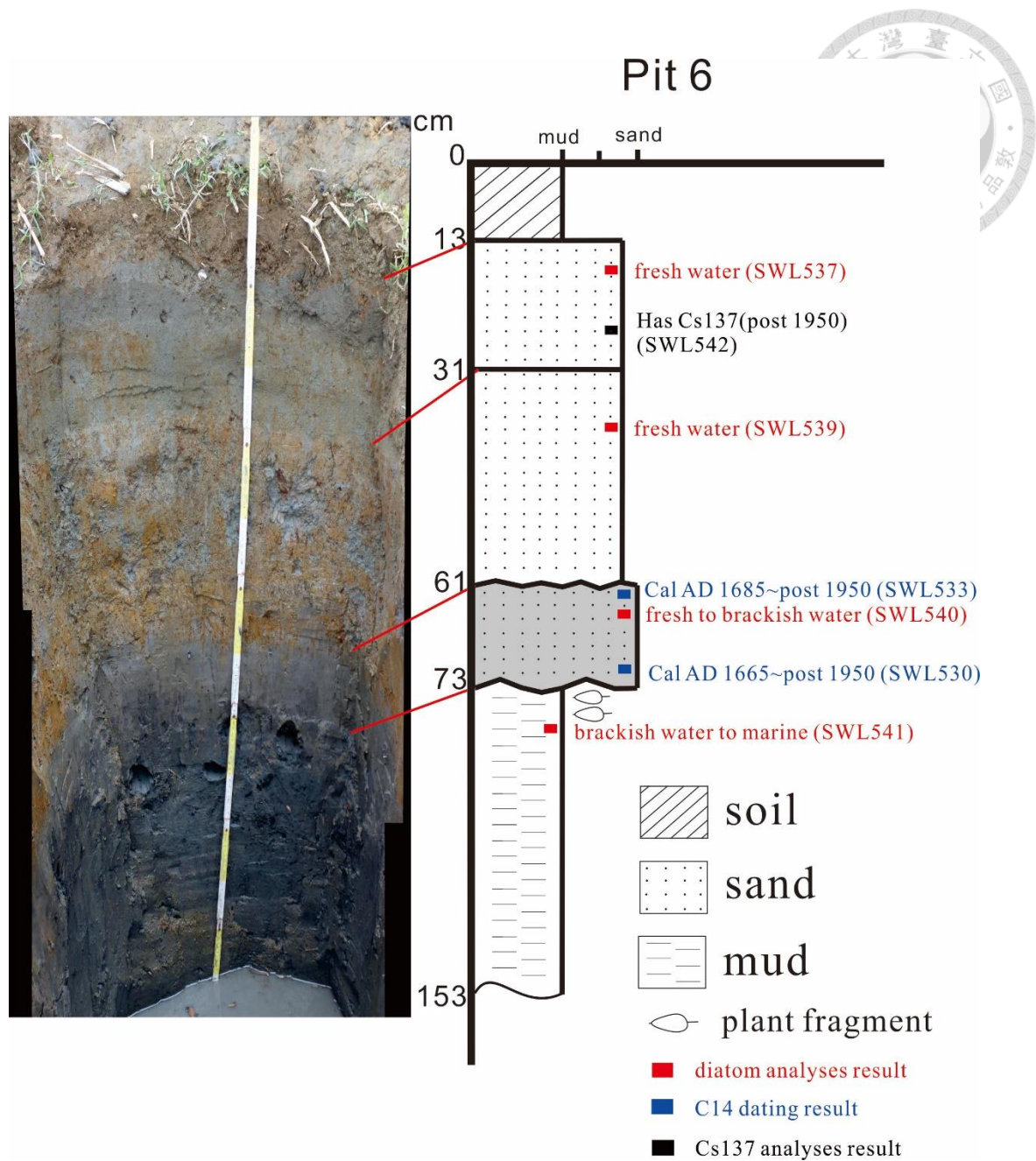


圖 4-26、Pit 6 槽溝挖掘及樣本分析結果。本研究推測深度 61 至 73 公分之灰色砂層為事件堆積層。詳細事件原因，見第五章討論部分。

第五章 討論



5.1 宜蘭平原北部（蘭陽溪以北）事件來源

本研究於宜蘭平原蘭陽溪以北地區之土圍(TW)槽溝中，發現一砂層，其深度為 45 至 60 公分。此砂層上下皆為泥層，邊界明顯（詳細地層柱見圖 4-3），推測此砂層為事件堆積物。土圍槽溝位置距離海岸約 5 公里，為宜蘭平原北部所挖掘之數個槽溝中，與海岸距離最遠之槽溝（宜蘭平原北部挖掘位置見圖 4-1），且其他距離海岸較近之槽溝，都未發現類似之事件沉積物。根據以上敘述，本研究推測土圍槽溝中所發現之事件沉積物，其來源為內陸地區。於宜蘭平原中內陸地區之事件來源，較可能為河流氾濫事件沉積。利用碳-14 定年及鉍-137 分析之結果，推測該事件發生於西元 1670 至西元 1950 年之間。

結合西元 1904 年之台灣堡圖及前人研究（黃致展，2016；張政亮，2001）之結果，本研究推測於土圍槽溝所挖掘到的事件沉積物，為宜蘭河氾濫所造成。宜蘭河在西元 1904 年台灣堡圖中，於宜蘭市北方分為兩條支流，一條與現今宜蘭河河道相似，向南流於蘭陽溪出海口附近入海；另一條則是向北流，從現今竹安溪出海口附近出海。根據本研究之結果及 1904 年之台灣堡圖，繪製出事件當時宜蘭河河道分佈，為圖 5-1A，現今之宜蘭河河道分佈為圖 5-1B。本研究推測於土圍槽溝中所挖掘到的事件，為宜蘭河在圖 5-1A 時的其中一次氾濫事件所堆積。

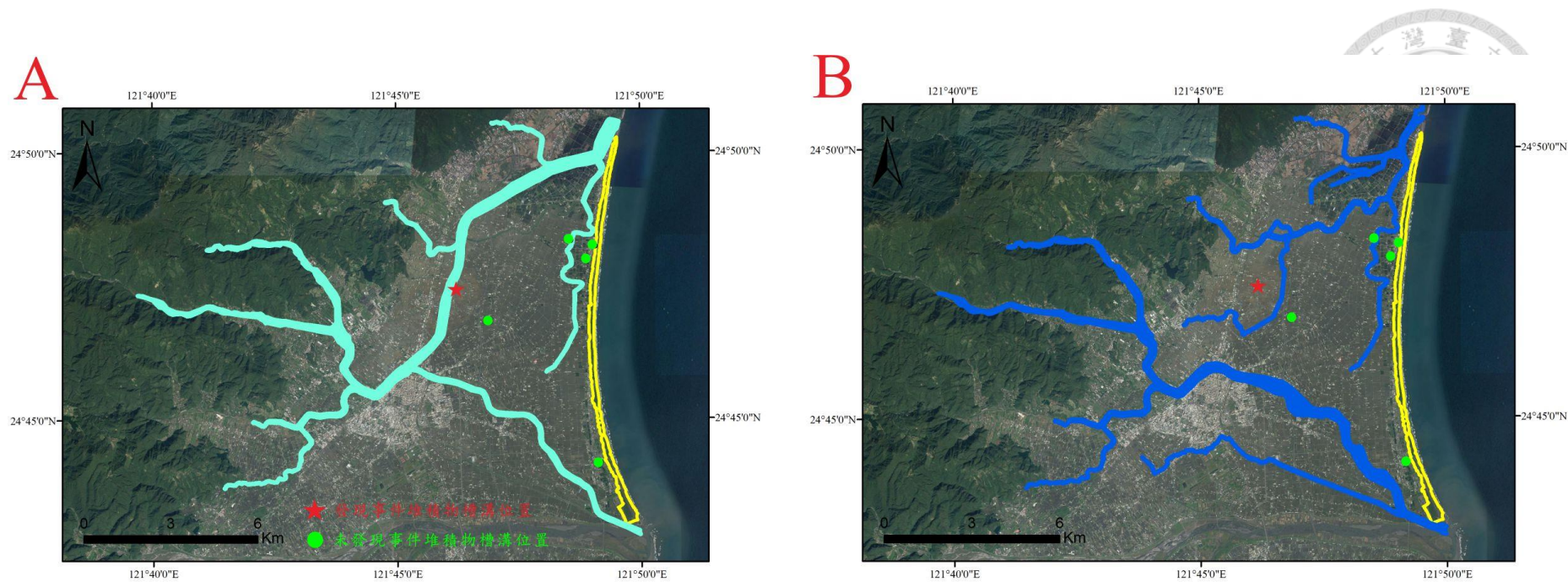


圖 5-1、宜蘭河河道位置。A 為根據本研究之結果以及參考西元 1904 年之台灣堡圖所繪製出之古宜蘭河河道，B 為宜蘭河現今之河道。推測本研究於土圍槽溝中所發現之事件堆積物，為宜蘭河河道在 A 圖之分佈時，所發生之氾濫事件堆積形成。



5.2 宜蘭平原南部（蘭陽溪以南）事件來源

本研究於宜蘭縣五結鄉龍德(LD)地區所挖掘之槽溝，於深度 40 至 65 公分處發現一砂層覆蓋於泥層上，邊界相當明顯且不規則，此外於邊界附近有許多白色泥塊，可能是該砂層快速沉積時所形成（圖 4-5）。綜合以上敘述，本研究推測該深度 40 至 65 公分砂層為事件沉積物。根據事件沉積物下方之泥層內碳樣本碳-14 定年結果，及事件沉積物內砂樣本之鉀-137 分析，推測該事件沉積物於西元 1655 年至西元 1950 年之間沉積。

宜蘭平原南部於冬山河以南，新城溪以北地區，沿岸砂脊保存良好，從圖 4-6 之地形剖面中，可以發現 4 至 6 條沿岸砂脊。保存良好之沿岸砂脊，代表沿岸砂脊形成後，並未受到河流之侵蝕。此外，該區域在 1904 年之台灣堡圖中並無河道通過，冬山河及新城溪河道也無明顯之變化，故本研究認為龍德地區近百年來並無受到河道變遷之影響，因此本研究假設龍德地區之事件來源可能為沿海地區。

然而於事件沉積物中之砂樣本，矽藻分析結果卻顯示為淡水環境矽藻（見圖 4-6），此結果與前段敘述不符，且於宜蘭平原南側並無其他槽溝挖掘結果，因此本研究目前無法進一步推論龍德槽溝所發現之事件之可能來源，未來仍需更多資料，才能進行更詳細之討論。

5.3 緬甸若開邦海岸地區事件來源

於緬甸若開邦地區之 Pit 6 槽溝（詳細位置見圖 4-7 及圖 4-8），在深度 61 至 73 公分處發現一層灰色砂層，該砂層下方為泥層，邊界明顯，且泥層頂部富含植物碎屑，因此推測深度 61 至 73 公分之砂層為事件堆積層。從碳-14 定年結果及鉀-137 分析，該事件發生年代為西元 1665 年以後（詳細槽溝照片及地層柱見圖 4-9）。

從 Pit 6 槽溝地層柱中（圖 4-9）可以發現，矽藻所指示的沉積環境從下到

上，呈現由海洋變為半鹹水，再變為淡水之環境。另配合 Pit 6 附近之地形特徵，本研究推測 Pit 6 所挖掘到之事件，為一潟湖逐漸被填滿之過程中，發生之沙嘴發育或河流氾濫事件。

本研究利用 Pit 6 附近之地形特徵，以及 Pit 6 沉積物由下至上的特性，繪製了 Pit 6 周邊區域的沉積環境演化圖（圖 5-2）。圖 5-2A 時，Pit 6 位置仍處於淺海環境，主要沉積物為泥，此時之沿岸砂脊最北端仍位於 Pit 6 挖掘位置南方。圖 5-2B 時，沿岸砂脊向北延伸，此時 Pit 6 之位置西側已有沿岸砂脊，Pit 6 位置變為潟湖之環境，深度淺，可能受潮汐之影響，沉積物仍以泥為主。推測此時 Pit 6 附近之海水已受河流之影響，因此有半鹹水環境之矽藻，而 Pit 6 泥層頂部之植物碎屑應為此時沉積。

Pit 6 所挖掘到之事件，推測為沙嘴發育或河流氾濫事件，發生於圖 5-2B 及 5-2C 之間。過程中 Pit 6 位置被灰色事件砂層覆蓋，同時因事件所帶來之沉積物量極大，造成圖 5-2B 之潟湖被沉積物填滿，進入氾濫平原之環境，同時沿岸砂脊繼續向北延伸，形成圖 5-2C 之狀況。因沿岸砂脊繼續向北延伸，且該河流平時之侵蝕能力，不足以將沿岸砂脊侵蝕，最終河流無法由此處入海，形成圖 5-2D，也就是現今之狀況。

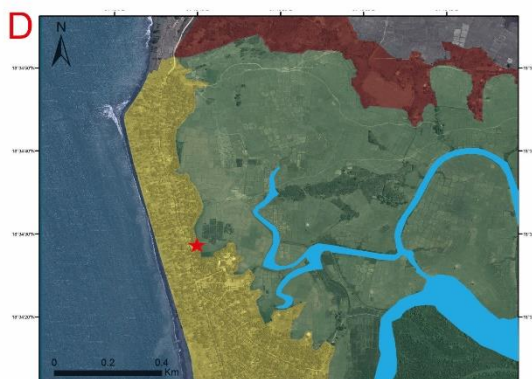
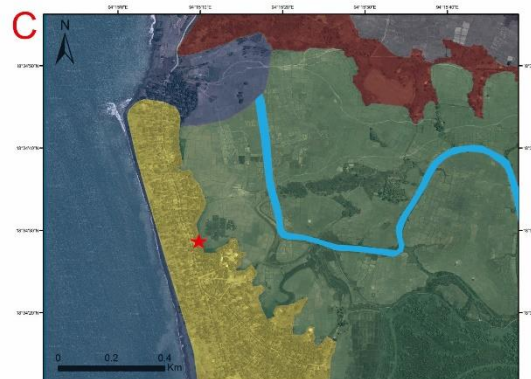
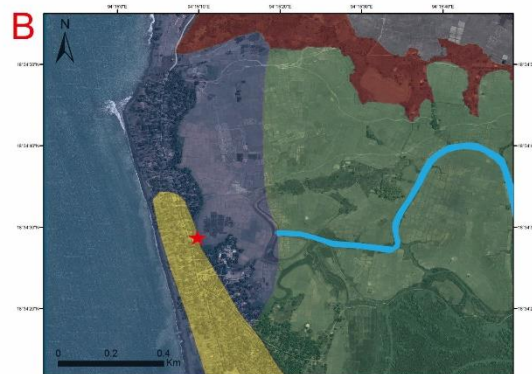


圖 5-2、Pit 6 附近區域之沉積環境變化。其中圖 D 為現今之狀況。Pit 6 槽溝中發現之事件，推測為一沙嘴發育或河流氾濫事件，發生於圖 B 以及圖 C 之間，詳細敘述請見內文。



5.4 沉積物來源分辨

本研究於宜蘭平原北部、宜蘭平原南部以及緬甸若開邦海岸地區皆有發現事件沉積物，且事件沉積物都為砂層。對於沉積事件的來源，於宜蘭平原北部主要利用槽溝的位置和其他槽溝的挖掘結果推測；宜蘭平原南部主要利用沿岸砂脊之保存狀況以及矽藻分析結果推測；若開邦海岸地區主要也是利用矽藻分析結果推測。綜合以上敘述，可以發現所有事件沉積物，皆是利用附近地形以及矽藻分析結果推測來源，並非直接利用沉積物之組成或性質來判斷事件來源，其原因為：於宜蘭平原地區，沿岸砂脊之形成原因為河流或風成堆積（蘇品如等，2009），因此組成沿岸砂脊之沙，與河流所沉積之沙為相同來源，兩者皆是以雪山山脈及中央山脈為來源的硬頁岩、板岩、千枚岩以及變質砂岩之碎屑組成。

於緬甸若開邦海岸地區，並未有前人研究說明沿岸砂脊之形成原因，因此本研究假設若開邦地區之沿岸砂脊形成原因與宜蘭相同，為河流或風成堆積。故組成沿岸砂脊之沙，與附近河流所沉積之沙亦應為相同來源，皆是源自印緬山脈之混同層（組成見章節 2.2.1）之碎屑。

由此可見，本研究所選之宜蘭平原以及緬甸若開邦沿海地區，事件沉積物之組成碎屑，不論是由上游河流所帶來，或是由沿岸受暴風或海嘯而帶來，其組成都應十分類似，因此無法只利用沉積物之組成判斷事件來源。

5.5 與前人研究之比較

相對的，Yu et al. (2016)研究台灣北部金山平原地區的沉積物，成功的利用沉積物組成來探討事件的來源。金山地區河流之上游為大屯山，河流之沉積物含有安山岩碎屑。金山平原海岸之沉積物，則是有矽質碎屑(siliciclastic)之石英質(quartzose)堆積物。因河流沉積物與沿岸砂脊沉積物組成不同，Yu et al. (2016)利用元素比例分析，分辨事件之來源為海岸或內陸地區。此外因金山地區有海嘯襲擊之歷史紀錄，且現有之觀測資料顯示颱風造成之暴潮在金山平原地區不超過 2

公尺高，因此 Yu et al. (2016)認為於金山地區所挖掘到之事件堆積為海嘯沉積物。

然而，本研究區域之河流沉積物與沿岸砂脊之沉積物來源相同，故沒有直接證據可指示事件沉積物之來源為海岸或內陸地區，且於宜蘭地區以及緬甸若開邦海岸地區，皆因歷史紀錄並不完整，沒有記載海嘯襲擊之歷史紀錄，使本研究目前仍無法以海嘯事件解釋所挖掘之事件沉積物，但亦無法排除海嘯之可能性。

若未來需要利用與本研究類似之方法進行海嘯沉積物之調查，需事先了解該地區河流沉積物與沿岸砂脊沉積物之性質。例如確認該地區來自河流與來自沿岸砂脊之沉積物，可以利用沉積物分析或化學分析分辨出兩者之不同，如此便可作為直接證據說明該事件之來源。

第六章 結論



根據本研究於宜蘭平原及緬甸若開邦海岸地區之研究結果，可得到以下結論：

1. 本研究於宜蘭平原北部（蘭陽溪以北）挖掘槽溝 7 個；宜蘭平原南部（蘭陽溪以南）挖掘槽溝 1 個，鑽取沉積物岩芯 2 口；緬甸若開邦海岸地區挖掘槽溝 9 個。其中於宜蘭平原北部土圍地區、宜蘭平原南部龍德地區及緬甸若開邦卡帕裏海灘附近地區，分別各有一個槽溝發現事件沉積物。
2. 宜蘭平原北部之事件沉積物，沉積於西元 1670 年至 1950 年間。發現之槽溝位於土圍，為距離海岸最遠之槽溝，且其他距離海岸較近之槽溝均無發現類似之事件沉積物，因此本研究推測該事件沉積物為宜蘭河河道過去的氾濫事件所堆積。
3. 宜蘭平原南部之事件沉積物，沉積於西元 1655 年至西元 1950 年間，發現之槽溝位於龍德地區，槽溝附近沿岸砂脊保存良好，代表未受到河流之侵蝕。然而矽藻分析結果為淡水矽藻，此兩敘述所指示之來源不同，且宜蘭平原南部並無其他槽溝協助判斷，因此目前尚無法進一步確認事件之來源。
4. 緬甸若開邦海岸地區之事件沉積物，堆積於西元 1685 年以後。矽藻所指示的環境由下而上呈現從海洋變為半鹹水，再變為淡水之環境。配合槽溝附近地形特徵，推測所挖掘到之事件沉積物，為潟湖逐漸填滿的過程中，所發生之沙嘴發育或河流氾濫事件所沉積。
5. 由於宜蘭平原北部、宜蘭平原南部及緬甸若開邦海岸地區之沿岸砂脊沉積物來源，與鄰近河流之沉積物來源相同，故本研究目前無法利用事件沉積物之組成，判斷事件來源。
6. 若未來需利用槽溝挖掘或沉積物岩芯鑽取之方法，調查海嘯沉積物，則需事先了解該地區河流沉積物與沿岸砂脊之性質，並確認可利用沉積物分析或化學分析分辨出不同來源之沉積物，作為沉積物來源之直接證據。

參考文獻

英文部分

Acharyya, S.K., Collisional emplacement history of the Naga-Andaman ophiolites and the position of the eastern Indian suture. *Journal of Asian Earth Sciences* 29 (2007) 229-242.

Bender, F., *Geology of Burma*. Gebruder Borntraeger, Berlin (1983) 293 pp.

Bolt, B.A., *Earthquakes 2006 Centennial Update*, Fif. Ed., W.H. Freeman and Company (2006) 390 pp.

Brunnschweiler, R.O., On the geology of the Indoburman ranges. *Journal of Geological Society of Australia* 13 (1966) 137-194.

Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi, Y. Kaneda, The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science* 334 (2011) 1240-1240.

Fujiwara, O., F. Masuda, T. Sakai, T. Irizuki, K. Fuse, Tsunami deposits in Holocene bay mud in southern Kanto region, Pacific coast of central Japan, *Sedimentary Geology* 135 (2000) 219-230.

Fujiwara, O., T. Kamataki, Identification of tsunami deposits considering the tsunami waveform: An example of subaqueous tsunami deposits in Holocene shallow bay on southern Boso Peninsula, Central Japan, *Sedimentary Geology* 200 (2007) 295-313.

Gahalaut, V.K., B. Nagarajan, J.K. Catherine, S. Kumar, Constraints on 2004 Sumatra-Andaman earthquake rupture from GPS measurements in Andaman-Nicobar Islands, *Earth and Planetary Science Letters* 242 (2006) 365-374.

Jankaew, K., B.F. Atwater, Y. Sawai, M. Choowong, T. Charoentitirat, M.E. Martin, A. Prendergast, Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand, *Nature* 455 (2008) 1228-1231.

Maurin, T., C. Rangin, Structure and kinematics of the Indo Burmese Wedge: recent and fast growth of the outer wedge. *Tectonics* 28 (2009) TC2010, doi: 10.1029/2008TC002276.

Mitchell, A.H.G., Cretaceous-Cenozoic tectonic events in the western Myanmar (Burma)-Assam region. *Journal of Geological Society* 150 (1993) 1089-1102.

Nakamura, M., Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami, *Geophysical Research Letters* 36 (2009) L19307, doi: 10.1029/2009GL039730

Natawidjaja, D.H., K. Sieh, J. Galetzka, B.W. Suwargadi, H. Cheng, R.L. Edwards, M. Chlieh, Interseismic deformation above the Sunda Megathrust recorded in coral microatolls of the Mentawai islands, West Sumatra, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112 (2007) B02404, doi: 10.1029/2006JB004450.

Oldham, T., Catalogue of India earthquakes, *Memoirs of the Geological Survey of India* 19(3) (1883) 163-215.

Sawai, Y., Episodic emergence in the past 3000 years at the Akkeshi Estuary, Hokkaido, northern Japan, *Quaternary Research* 56 (2001) 231-241.

Sørensen, M. B., M. Spada, A. Babeyko, S. Wiemer, G. Grünthal, Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea, *Journal of Geophysical Research* 117 (2012) B01305 doi: 10.1029/2010JB008169.

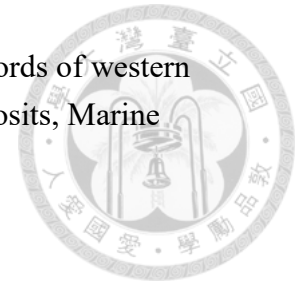
Tan Tin Aung, Y. Okamura, K. Satake, Win Swe, Tint Lwin Swe, Hla Saw, Soe Thura Tun, Paleoseismological field survey along the western coast of Myanmar, *Annual Report on Active Fault and Paleoequake Researches* 6 (2006) 171-188.

Tanigawa, K., Y. Sawai, M. Shishikura, Y. Namegaya, D. Matsumoto, Geological evidence for an unusually large tsunami on the Pacific coast of Aomori, Northern Japan, *Journal of Quaternary Science* 29 (2014) 200-208.

Unterweger, M.P., D.D. Hoppes, F.J. Schima, New and revised half-life measurements results, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* A312 (1992) 349-352.

Wang, Y., J.B.H. Shyu, K. Sieh, H.-W. Chiang, C.-C. Wang, Thura Aung, Y.-N. N. Lin, C.-C. Shen, Soe Min, Oo Than, Kyaw Kyaw Lin, Soe Thura Tun, Permanent upper plate deformation in western Myanmar during the great 1762 earthquake: Implications for neotectonic behavior of the northern Sunda megathrust, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (2013) 1277-1303.

Yu, N.-T., J.-Y. Yen, W.-S. Chen, I.-C. Yen, J.-H. Liu, Geological records of western Pacific tsunamis in northern Taiwan: AD 1867 and earlier event deposits, *Marine Geology* 372 (2016) 1-16.



中文部分

何春蓀(1986)台灣地質概論，台灣地質圖說明書，增訂第二版，經濟部中央地質調查所出版，共 163 頁。

陳文山(2000)沈積物與沈積環境分析及地層對比研究－蘭陽平原，台灣地區地下水觀測網第二期計畫水文地質調查研究八十九年度報告，共 1 冊。

張政亮(2001)游移於蘭陽平原上的蟠龍－從平原特性談宜蘭河河道的變遷，宜蘭河生命史討論會論文集：故鄉的河慢慢流，第 139- 165 頁。

黃致展(2016)利用 X 光螢光掃描技術探討蘭陽源匯系統人與環境之互動關係，國立台灣大學地質科學研究所博士論文，共 133 頁。

蘇品如、紀宗吉、曾俊傑、黃國榕(2009)宜蘭蘭陽溪下游井下岩芯沉積環境分析，經濟部中央地質調查所 97 年度研究發展報告，共 75 頁。

蘇清泉(2011)蘭陽平原末次冰期以來沉積環境變遷與構造作用特性，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 129 頁。

日文部分

宍倉正展、澤井祐紀、岡村行信、小松原純子、Than Tin Aung、石山達也、藤原治、藤野滋弘(2007)石卷平野における津波堆積物の分布と年代，活断層・古地震研究報 7, 31-46.

牧野清(1981) 改訂増補 八重山の明和大津波，城野印刷，462 pp.

附錄



附錄 1、RTK-GPS 測量原始資料

AA'剖面

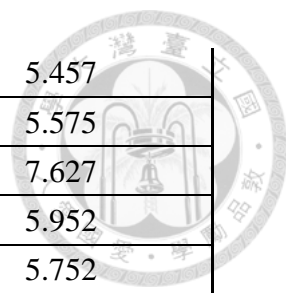
測量日期：2017/04/08

座標系統：TWD97

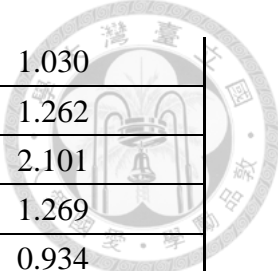
單位：公尺

控制點：內政部一等水準點，編號 2087

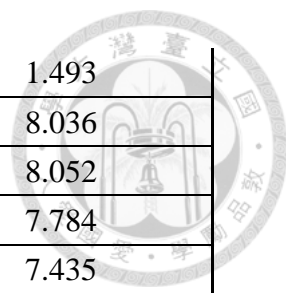
point ID	Easting	Northing	height
1	335193.548	2727573.798	7.661
2	335168.698	2727559.918	7.457
3	335174.868	2727552.138	8.054
4	335178.348	2727553.348	8.038
5	335167.458	2727546.768	7.781
6	335147.528	2727541.948	5.087
7	335132.748	2727527.678	4.051
8	335107.558	2727508.588	3.727
9	335071.598	2727503.538	4.166
10	335017.978	2727503.768	4.126
11	334996.478	2727487.188	4.412
12	334982.418	2727466.568	5.947
13	334961.478	2727449.678	8.944
14	334955.018	2727443.248	9.851
15	334944.898	2727437.148	6.535
16	334900.998	2727485.828	6.270
17	334843.658	2727468.678	5.830
18	334813.718	2727447.948	5.727
19	334829.308	2727370.548	5.660
20	334765.228	2727334.698	5.649
21	334599.298	2727279.278	5.811
22	334433.208	2727194.748	5.433
23	334382.938	2727169.308	5.496
24	334367.398	2727167.998	5.256
25	334311.518	2727205.658	5.189
26	334217.378	2727489.498	5.397



27	334184.208	2727480.778	5.457
28	334142.778	2727464.358	5.575
29	334137.228	2727460.798	7.627
30	334132.368	2727462.128	5.952
31	334125.978	2727457.788	5.752
32	334104.108	2727450.808	4.710
33	334081.878	2727434.838	5.706
34	334057.238	2727428.138	5.079
35	334030.338	2727449.538	6.057
36	334018.948	2727447.118	4.599
37	334010.158	2727428.188	4.580
38	333996.358	2727409.158	4.823
39	333984.018	2727400.658	4.261
40	333947.178	2727405.438	4.459
41	333939.218	2727395.048	5.576
42	333918.768	2727388.028	6.854
43	333900.348	2727383.368	5.997
44	333875.378	2727375.848	4.641
45	333854.338	2727369.278	4.258
46	333819.138	2727361.208	3.505
47	333782.038	2727345.758	3.572
48	333753.558	2727336.428	3.666
49	333750.238	2727299.278	3.663
50	333707.828	2727250.268	2.498
51	333692.128	2727244.538	1.497
52	333646.478	2727224.708	1.257
53	333623.678	2727217.638	0.755
54	333593.068	2727204.138	0.662
55	333564.088	2727190.728	0.519
56	333513.158	2727168.648	0.616
57	333556.748	2727039.998	2.052
58	333520.478	2727020.928	2.058
59	333501.088	2727027.668	0.788
60	333560.628	2726959.578	2.282
61	333549.258	2726850.978	2.435
62	333523.958	2726798.588	2.370



63	333500.098	2726787.198	1.030
64	333500.698	2726787.728	1.262
65	333507.508	2726791.478	2.101
101	332906.483	2726612.463	1.269
102	332911.463	2726613.403	0.934
103	332965.993	2726622.993	0.967
104	333048.063	2726637.293	1.034
105	333094.603	2726644.793	1.003
106	333145.393	2726632.913	1.034
107	333189.803	2726641.423	1.076
108	333218.583	2726646.843	1.985
109	333207.273	2726676.963	1.882
110	333218.533	2726717.833	2.106
111	333258.983	2726707.743	1.628
112	333272.703	2726698.033	1.737
113	333277.033	2726699.713	1.164
114	333297.983	2726708.223	1.088
115	333356.173	2726730.973	1.077
116	333421.513	2726756.533	1.114
117	333491.283	2726783.783	1.084
118	333500.713	2726787.763	1.265
119	333507.493	2726791.443	2.099
120	333521.293	2726797.933	2.376
121	333652.543	2726570.173	2.492
122	333692.643	2726587.753	2.222
123	333702.523	2726590.983	1.239
124	333753.483	2726613.923	1.080
125	333782.603	2726627.443	1.004
126	333803.213	2726636.793	1.290
127	333832.213	2726650.653	1.220
128	333796.603	2726774.803	1.269
129	333839.113	2726796.003	1.361
130	333864.183	2726813.083	1.562
131	333855.803	2726771.353	2.292
132	333888.523	2726789.463	2.746
133	333927.203	2726805.793	3.951



134	333850.783	2726925.213	1.493
201	335174.932	2727552.071	8.036
202	335178.262	2727553.421	8.052
203	335167.482	2727546.761	7.784
204	335195.082	2727571.731	7.435
205	335204.042	2727574.361	4.385
206	335207.782	2727577.251	3.674
207	335217.682	2727578.841	2.571
208	335231.272	2727583.581	1.960
209	335242.222	2727585.921	1.296
210	335260.172	2727583.721	0.315

BB'剖面

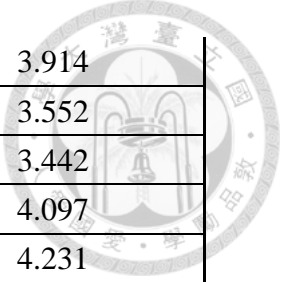
測量日期：2015/03/15

座標系統：UTM 6° (WGS84)

Zone：46Q

單位：公尺

point ID	Easting	Northing	height
1	631984.239	2054166.557	-0.824
2	631986.169	2054168.048	-0.695
3	631988.913	2054169.221	-0.634
4	631997.867	2054171.555	-0.288
5	632006.222	2054171.941	0.006
6	632020.265	2054177.25	1.047
7	632034.202	2054180.386	1.893
8	632040.821	2054180.191	2.110
9	632061.211	2054181.085	1.921
10	632066.216	2054179.177	2.197
11	632069.586	2054179.628	2.349
12	632076.297	2054183.133	3.194
13	632077.997	2054178.589	3.192
14	632084.272	2054155.049	3.052
15	632071.472	2054194.477	2.919
16	632065.908	2054214.191	2.946
17	632075.277	2054186.993	3.963



18	632084.085	2054187.938	3.914
19	632097.048	2054197.218	3.552
20	632085.501	2054212.281	3.442
21	632122.666	2054201.771	4.097
22	632141.301	2054212.105	4.231
23	632154.399	2054214.416	4.345
24	632163.765	2054209.421	4.541
25	632191.052	2054212.728	0.677
26	632207.946	2054206.697	0.587
27	632217.228	2054212.966	0.406
28	632233.451	2054225.645	0.347
29	632248.364	2054234.869	0.343
30	632263.367	2054241.207	0.343
31	632277.949	2054253.377	0.279
32	632294.185	2054263.066	0.202
33	632310.879	2054273.379	0.193
34	632331.169	2054283.903	0.103
35	632355.293	2054296.160	0.084
36	632376.654	2054309.938	0.294
37	632388.591	2054314.862	0.186
38	632175.588	2054199.310	4.571
39	632191.946	2054223.272	0.756
40	632192.270	2054224.242	0.655
41	632191.853	2054225.570	0.796
42	632190.918	2054225.121	0.668
43	632191.258	2054223.905	0.691
44	632199.300	2054224.506	0.477
45	632199.357	2054225.374	0.446
46	632200.135	2054225.424	0.446
47	632200.192	2054224.483	0.459

CC'剖面

測量日期：2015/03/13

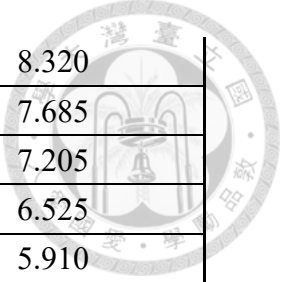
座標系統：UTM 6° (WGS84)

Zone：46Q

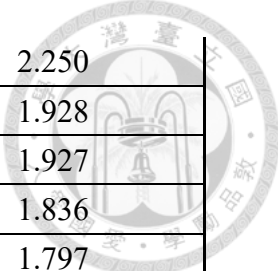
單位：公尺



Point ID	Easting	Northing	height
1	641230.706	2033611.021	-1.324
2	641230.653	2033611.081	-1.524
3	641230.577	2033611.075	-1.536
4	641234.818	2033610.945	-1.287
5	641240.252	2033608.874	-0.936
6	641248.853	2033608.846	-0.662
7	641260.176	2033609.261	-0.062
8	641275.442	2033608.784	0.761
9	641290.760	2033602.492	1.556
10	641295.341	2033601.356	1.883
11	641301.281	2033599.719	2.253
12	641301.336	2033599.733	2.227
13	641307.617	2033598.670	2.204
14	641313.731	2033599.828	2.203
15	641321.998	2033600.640	5.117
16	641350.494	2033606.028	4.192
17	641369.606	2033610.392	2.991
18	641438.763	2033629.117	3.377
19	641441.761	2033628.529	3.812
20	641451.109	2033628.999	3.797
21	641452.654	2033632.372	3.739
22	641452.677	2033632.334	3.740
23	642189.225	2033979.730	12.65
24	642181.946	2033978.030	12.48
25	642175.973	2033976.305	12.31
26	642174.788	2033974.032	11.95
27	642173.124	2033972.912	11.21
28	642171.596	2033972.468	10.56
29	642169.440	2033972.042	9.747
30	642167.107	2033972.149	8.961



31	642164.649	2033971.968	8.320
32	642161.846	2033971.415	7.685
33	642158.959	2033970.059	7.205
34	642156.021	2033970.157	6.525
35	642153.090	2033970.291	5.910
36	642147.758	2033969.609	5.691
37	642135.165	2033970.734	5.490
38	642133.226	2033970.934	5.653
39	642132.743	2033970.811	4.989
40	642116.470	2033970.572	5.086
41	642115.913	2033970.706	4.584
42	642098.540	2033970.513	4.691
43	642097.889	2033970.836	4.390
44	642078.420	2033971.283	4.570
45	642078.059	2033971.263	4.285
46	642058.866	2033969.380	4.510
47	642058.375	2033969.114	4.035
48	642046.092	2033967.227	4.249
49	642045.417	2033967.245	3.702
50	642035.058	2033967.597	3.852
51	642034.542	2033967.261	3.215
52	642021.342	2033962.812	3.392
53	642020.928	2033962.543	2.870
54	642007.694	2033962.118	3.067
55	641983.741	2033960.447	3.303
56	641983.210	2033960.212	2.909
57	641965.452	2033956.207	2.899
58	641964.188	2033955.960	2.792
59	641951.319	2033953.742	2.787
60	641950.100	2033953.494	2.633
61	641929.811	2033949.493	2.556
62	641928.465	2033949.44	2.505
63	641915.295	2033947.035	2.557
64	641914.282	2033947.488	2.306
65	641905.956	2033948.674	2.352
66	641904.721	2033948.638	2.225



67	641893.336	2033949.09	2.250
68	641891.787	2033949.190	1.928
69	641881.932	2033950.194	1.927
70	641880.711	2033950.301	1.836
71	641870.069	2033951.557	1.797
72	641868.733	2033951.530	1.620
73	641863.188	2033952.020	1.537
74	641861.803	2033952.116	1.414
75	641834.631	2033956.774	1.314
76	641834.577	2033956.788	1.312
77	641805.212	2033961.438	1.252
78	641775.687	2033954.918	2.498
79	641765.544	2033952.359	2.704
80	641756.035	2033951.400	2.923
81	641730.658	2033907.723	2.460
82	641729.514	2033907.773	2.450
83	641729.391	2033906.493	2.457
84	641730.557	2033906.55	2.411
85	641712.524	2034024.745	2.530
86	641711.014	2034024.973	2.614
87	641710.905	2034023.444	2.585
88	641712.533	2034023.415	2.566
89	641741.264	2033960.168	2.539
90	641711.746	2033960.467	2.481
91	641699.643	2033961.833	2.663
92	641687.575	2033963.742	2.612
93	641688.192	2033949.741	2.627
94	641635.866	2033922.951	4.621
95	641629.267	2033924.951	4.676
96	641597.034	2033847.138	4.427
97	641573.144	2033846.726	4.584
98	641552.54	2033795.736	4.020
99	641523.856	2033808.18	10.94
100	641481.131	2033806.033	8.298
101	641464.177	2033848.249	5.225
102	641450.643	2033864.571	5.201

103	641424.361	2033868.919	4.882
104	641712.23	2034024.34	2.012



DD'剖面

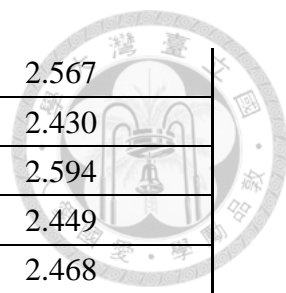
測量日期：2015/03/14

座標系統：UTM 6° (WGS84)

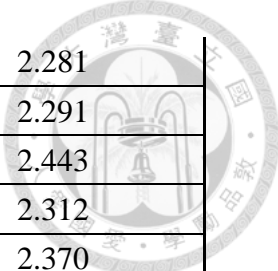
Zone：46Q

單位：公尺

point ID	Easting	Northing	height
1	647433.747	2028194.743	-0.696
2	647437.748	2028196.755	-0.472
3	647440.266	2028197.694	-0.380
4	647443.241	2028198.160	-0.318
5	647446.423	2028198.592	-0.180
6	647450.208	2028199.212	-0.017
7	647453.782	2028200.030	0.133
8	647457.190	2028201.148	0.280
9	647461.135	2028201.998	0.459
10	647465.050	2028203.095	0.678
11	647469.448	2028203.953	0.956
12	647473.370	2028204.661	1.193
13	647477.483	2028205.394	1.479
14	647480.269	2028205.861	1.537
15	647485.449	2028206.938	1.672
16	647492.736	2028208.445	1.699
17	647498.040	2028209.921	1.722
18	647499.487	2028219.645	1.672
19	647501.250	2028220.054	1.724
20	647510.377	2028226.552	1.952
21	647514.747	2028238.448	2.359
22	647518.580	2028234.385	2.549
23	647525.081	2028235.264	2.484
24	647533.542	2028236.799	2.518
25	647541.637	2028239.189	2.487
26	647552.319	2028241.196	2.479



27	647555.294	2028241.793	2.567
28	647560.910	2028244.538	2.430
29	647566.083	2028248.277	2.594
30	647571.651	2028252.454	2.449
31	647579.248	2028257.630	2.468
32	647585.981	2028261.389	2.469
33	647589.166	2028264.820	2.465
34	647595.751	2028268.813	2.373
35	647604.270	2028273.875	2.329
36	647611.737	2028278.011	2.323
37	647626.784	2028288.347	2.225
38	647637.191	2028296.794	2.177
39	647647.427	2028304.669	2.182
40	647653.797	2028309.502	2.180
41	647659.517	2028313.304	2.066
42	647668.371	2028318.869	1.952
43	647672.590	2028322.449	1.962
44	647675.408	2028323.851	1.951
45	647676.534	2028323.772	1.825
46	647679.336	2028323.106	1.667
47	647687.852	2028326.562	1.562
48	647695.482	2028332.830	1.649
49	647702.499	2028338.462	1.565
50	647713.402	2028349.097	1.561
51	647717.473	2028353.174	1.849
52	647726.673	2028360.004	1.854
53	647728.637	2028360.591	2.145
54	647743.800	2028372.083	2.194
55	647748.895	2028378.372	1.923
56	647758.656	2028385.299	1.970
57	647760.294	2028387.375	2.278
58	647764.407	2028392.418	2.244
59	647764.887	2028393.319	2.138
60	647778.322	2028406.559	2.14
61	647781.041	2028411.228	2.260
62	647785.688	2028417.112	2.251



63	647789.371	2028426.529	2.281
64	647790.779	2028435.934	2.291
65	647800.711	2028446.796	2.443
66	647802.288	2028462.219	2.312
67	647806.515	2028440.664	2.370
68	647813.033	2028442.493	2.308
69	647818.388	2028442.452	2.215
70	647819.612	2028443.569	2.034
71	647820.048	2028444.700	1.879
72	647819.632	2028446.175	1.538
73	647820.921	2028447.045	1.416
74	647829.715	2028455.440	1.228
75	647836.270	2028456.265	1.230
76	647842.448	2028459.319	1.291
77	647849.363	2028455.219	1.305
78	647849.702	2028445.638	1.235
79	647680.729	2028293.358	1.719
80	647681.533	2028294.525	1.731
81	647682.551	2028293.842	1.697
82	647681.774	2028292.660	1.735
83	647676.394	2028390.640	1.735
84	647676.045	2028393.071	1.684
85	647675.075	2028393.016	1.709
86	647675.382	2028390.491	1.753

EE'剖面

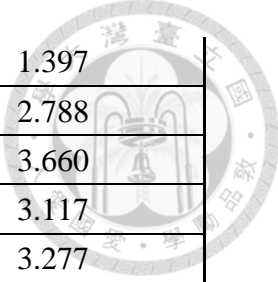
測量日期：2015/03/16

座標系統：UTM 6° (WGS84)

Zone：46Q

單位：公尺

point ID	Easting	Northing	height
1	636475.534	2041950.503	-0.546
2	636486.888	2041960.369	-0.150
3	636497.164	2041974.117	-0.134
4	636522.157	2041993.567	0.067



5	636532.320	2041999.704	1.397
6	636537.761	2042004.857	2.788
7	636543.218	2042009.158	3.660
8	636605.020	2042069.404	3.117
9	636626.727	2042083.040	3.277
10	636644.627	2042089.423	3.826
11	636647.170	2042092.335	3.756
12	636640.142	2042104.409	3.414
13	636653.806	2042122.757	3.391
14	636655.097	2042124.866	3.685
15	636667.366	2042139.679	3.785
16	636574.539	2042030.050	4.207
17	636571.307	2042059.707	4.140
18	636592.972	2042073.116	3.468
19	636618.053	2042048.220	3.121
20	636617.010	2042047.645	3.133
21	636616.520	2042048.937	3.151
22	636617.520	2042049.272	2.914

FF'剖面

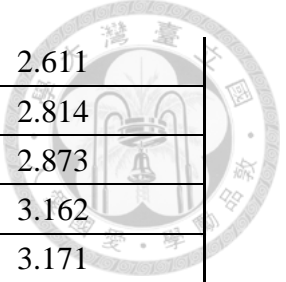
測量日期：2015/03/17

座標系統：UTM 6° (WGS84)

Zone：46Q

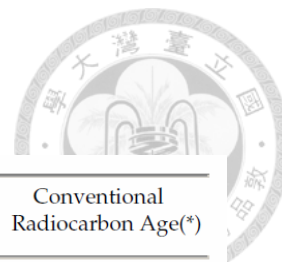
單位：公尺

point ID	easting	northing	height
43	655982.249	2000961.482	2.479
44	655980.995	2000960.056	2.579
45	655976.728	2000957.319	1.752
46	655965.916	2000952.274	1.398
47	655944.609	2000945.116	1.389
48	655917.885	2000938.200	1.117
49	655903.427	2000913.394	1.395
50	655872.910	2000942.373	1.847
51	655871.923	2000941.313	2.154
52	655858.645	2000932.857	2.237

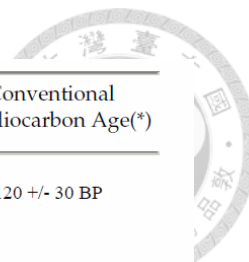


53	655857.455	2000932.250	2.611
54	655844.545	2000926.216	2.814
55	655842.186	2000927.220	2.873
56	655818.337	2000900.444	3.162
57	655792.702	2000888.564	3.171
58	655747.230	2000869.577	2.962
59	655730.008	2000848.267	3.270
60	655728.140	2000847.057	3.280
61	655711.434	2000832.421	3.270
62	655692.268	2000815.019	3.145
63	655679.470	2000805.122	2.892
64	655667.179	2000798.475	2.860
65	655651.013	2000785.648	2.986
66	655627.739	2000776.778	2.970
67	655613.459	2000770.105	3.212
68	655611.264	2000768.813	2.779
69	655599.430	2000755.629	3.004
70	655592.313	2000752.585	2.556
71	655587.256	2000750.996	2.135
72	655572.762	2000745.160	1.884
73	655561.511	2000737.404	1.458
74	655548.391	2000731.737	1.514
75	655534.924	2000722.943	0.985
76	655521.680	2000714.558	0.430
77	655493.405	2000703.849	-0.422
78	655452.413	2000684.836	-1.136
79	655916.723	2000942.094	1.082
80	655916.992	2000940.983	1.067
81	655915.317	2000940.426	1.085
82	655914.905	2000941.512	1.070

附錄 2、碳-14 定年原始資料



Sample Data	Measured Radiocarbon Age	13C/12C Ratio	Conventional Radiocarbon Age(*)
Beta - 391969 SAMPLE : BTG-07 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (charred material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1665 to 1780 (Cal BP 285 to 170) and Cal AD 1795 to 1895 (Cal BP 155 to 55) and Cal AD 1905 to Post 1950 (Cal BP 45 to Post 0)	180 +/- 30 BP	-27.4 o/oo	140 +/- 30 BP
Beta - 391970 SAMPLE : DF-T1-04 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1665 to 1785 (Cal BP 285 to 165) and Cal AD 1795 to 1890 (Cal BP 155 to 60) and Cal AD 1905 to Post 1950 (Cal BP 45 to Post 0)	250 +/- 30 BP	-31.4 o/oo	150 +/- 30 BP
Beta - 391971 SAMPLE : DF-T2-03 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (plant material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1650 to 1685 (Cal BP 300 to 265) and Cal AD 1730 to 1810 (Cal BP 220 to 140) and Cal AD 1925 to Post 1950 (Cal BP 25 to Post 0)	220 +/- 30 BP	-26.1 o/oo	200 +/- 30 BP
Beta - 391972 SAMPLE : DSG-01 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (organic sediment): acid washes 2 SIGMA CALIBRATION : Cal BC 5965 to 5955 (Cal BP 7915 to 7905) and Cal BC 5900 to 5750 (Cal BP 7850 to 7700)	6960 +/- 30 BP	-25.2 o/oo	6960 +/- 30 BP



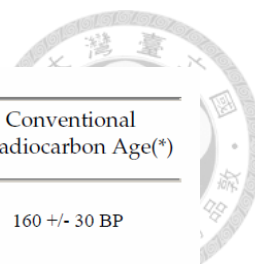
Sample Data	Measured Radiocarbon Age	13C/12C Ratio	Conventional Radiocarbon Age(*)
Beta - 391973 SAMPLE : DSG-04 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (charred material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1670 to 1780 (Cal BP 280 to 170) and Cal AD 1800 to 1940 (Cal BP 150 to 10) and Post AD 1950 (Post BP 0)	150 +/- 30 BP	-26.6 o/oo	120 +/- 30 BP

Beta - 391974 SAMPLE : TW-05 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (organic sediment): acid washes 2 SIGMA CALIBRATION : Cal BC 6250 to 6205 (Cal BP 8200 to 8155) and Cal BC 6190 to 6185 (Cal BP 8140 to 8135) and Cal BC 6165 to 6160 (Cal BP 8115 to 8110) and Cal BC 6140 to 6105 (Cal BP 8090 to 8055)	7360 +/- 30 BP	-25.4 o/oo	7350 +/- 30 BP
---	----------------	------------	----------------

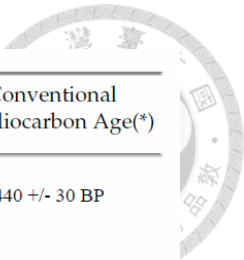
Beta - 391975 SAMPLE : TW-07 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (plant material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1670 to 1780 (Cal BP 280 to 170) and Cal AD 1800 to Post 1950 (Cal BP 150 to Post 0)	190 +/- 30 BP	-28.5 o/oo	130 +/- 30 BP
--	---------------	------------	---------------

Beta - 391976 SAMPLE : YGG-01 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1690 to 1730 (Cal BP 260 to 220) and Cal AD 1810 to 1920 (Cal BP 140 to 30) and Post AD 1950 (Post BP 0)	120 +/- 30 BP	-28.2 o/oo	70 +/- 30 BP
---	---------------	------------	--------------

Sample Data	Measured Radiocarbon Age	d13C	Conventional Radiocarbon Age(*)
Beta - 416609 SAMPLE : NPL509 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1655 to 1695 (Cal BP 295 to 255) and Cal AD 1725 to 1815 (Cal BP 225 to 135) and Cal AD 1835 to 1840 (Cal BP 115 to 110) and Cal AD 1855 to 1865 (Cal BP 95 to 85) and Cal AD 1920 to Post 1950 (Cal BP 30 to Post 0)	210 +/- 30 BP	-26.6 o/oo	180 +/- 30 BP
Beta - 416611 SAMPLE : SDK549 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (charred material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1665 to 1785 (Cal BP 285 to 165) and Cal AD 1795 to 1890 (Cal BP 155 to 60) and Cal AD 1905 to Post 1950 (Cal BP 45 to Post 0)	190 +/- 30 BP	-27.3 o/oo	150 +/- 30 BP
Beta - 416612 SAMPLE : SDK550 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid COMMENT: The reported result indicates an age of post 0 BP and has been reported as a % of the modern reference standard, indicating the material was living about the last 60 years or so ("pMC" = percent modern carbon).	70 +/- 20 BP	-30.7 o/oo	100.2 +/- 0.3 pMC
Beta - 416613 SAMPLE : SDK555 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1680 to 1735 (Cal BP 270 to 215) and Cal AD 1755 to 1760 (Cal BP 195 to 190) and Cal AD 1800 to 1935 (Cal BP 150 to 15) and Post AD 1950 (Post BP 0)	180 +/- 30 BP	-29.9 o/oo	100 +/- 30 BP



Sample Data	Measured Radiocarbon Age	d13C	Conventional Radiocarbon Age(*)
Beta - 416614 SAMPLE : SWL530 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1665 to 1710 (Cal BP 285 to 240) and Cal AD 1720 to 1890 (Cal BP 230 to 60) and Cal AD 1910 to Post 1950 (Cal BP 40 to Post 0)	170 +/- 30 BP	-25.5 o/oo	160 +/- 30 BP
Beta - 416615 SAMPLE : SWL533 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1685 to 1735 (Cal BP 265 to 215) and Cal AD 1805 to 1930 (Cal BP 145 to 20) and Post AD 1950 (Post BP 0)	130 +/- 30 BP	-27.7 o/oo	90 +/- 30 BP
Beta - 416616 SAMPLE : TBA514 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (charred material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1450 to 1640 (Cal BP 500 to 310)	410 +/- 30 BP	-28.3 o/oo	360 +/- 30 BP
Beta - 416617 SAMPLE : TBA516 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1450 to 1640 (Cal BP 500 to 310)	430 +/- 30 BP	-29.5 o/oo	360 +/- 30 BP
Beta - 416618 SAMPLE : TBA522 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (wood): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1670 to 1780 (Cal BP 280 to 170) and Cal AD 1800 to Post 1950 (Cal BP 150 to Post 0)	150 +/- 30 BP	-26.0 o/oo	130 +/- 30 BP



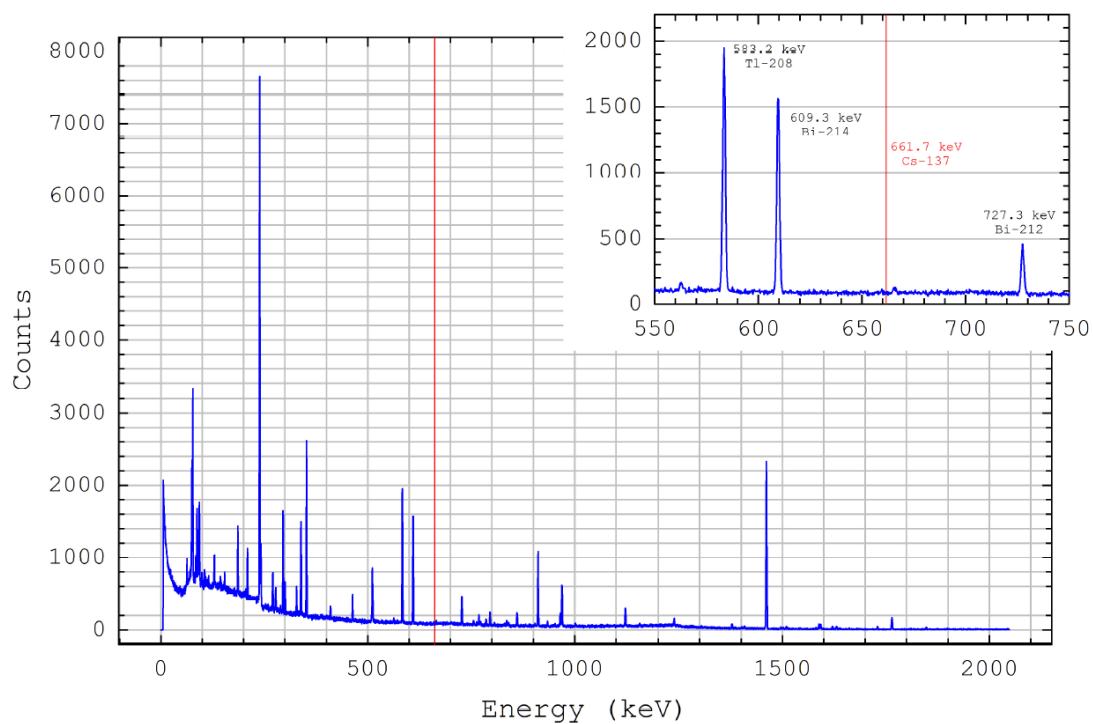
Sample Data	Measured Radiocarbon Age	d13C	Conventional Radiocarbon Age(*)
Beta - 428528 SAMPLE : LD04 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (organic sediment): acid washes 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1425 to 1470 (Cal BP 525 to 480)	370 +/- 30 BP	-20.9 o/oo	440 +/- 30 BP
Beta - 428529 SAMPLE : LD05 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (charred material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1645 to 1680 (Cal BP 305 to 270) and Cal AD 1735 to 1800 (Cal BP 215 to 150) and Cal AD 1935 to Post 1950 (Cal BP 15 to Post 0)	0 +/- 30 BP	-11.3 o/oo	220 +/- 30 BP
Beta - 428530 SAMPLE : LD07 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (plant material): acid/alkali/acid 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1655 to 1695 (Cal BP 295 to 255) and Cal AD 1725 to 1815 (Cal BP 225 to 135) and Cal AD 1835 to 1840 (Cal BP 115 to 110) and Cal AD 1855 to 1865 (Cal BP 95 to 85) and Cal AD 1920 to Post 1950 (Cal BP 30 to Post 0)	50 +/- 30 BP	-16.9 o/oo	180 +/- 30 BP
Beta - 428531 SAMPLE : LD11 ANALYSIS : AMS-Standard delivery MATERIAL/PRETREATMENT : (organic sediment): acid washes 2 SIGMA CALIBRATION : Cal AD 1430 to 1485 (Cal BP 520 to 465)	320 +/- 30 BP	-18.1 o/oo	430 +/- 30 BP

附錄 3、銫-137 分析原始資料

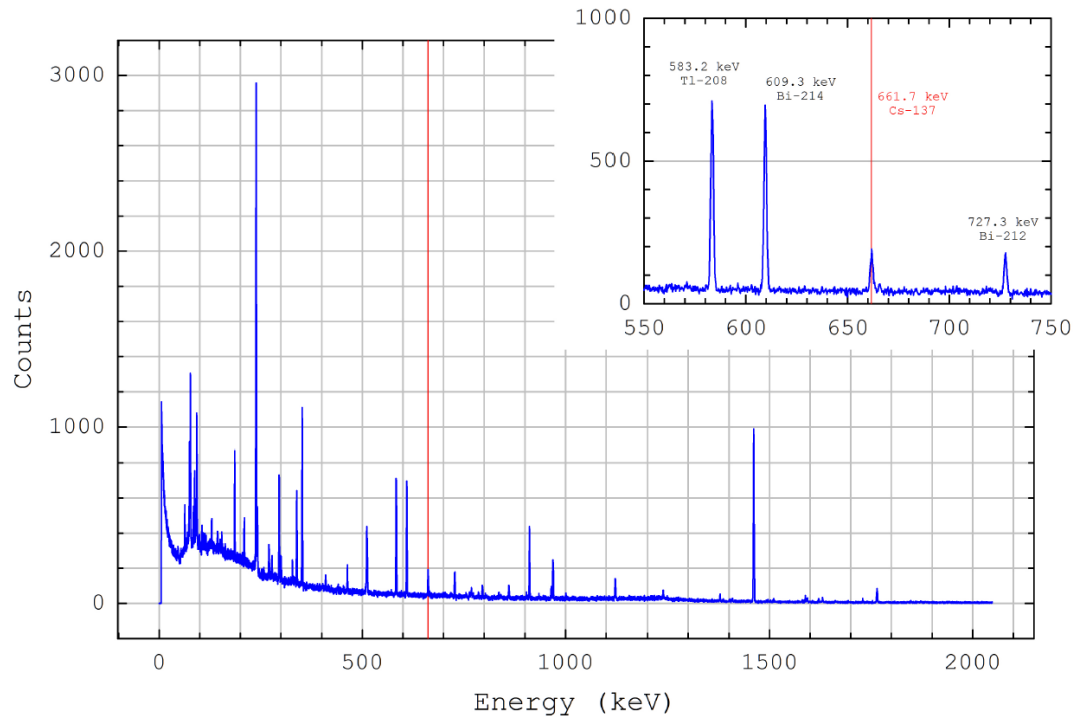


Sample	Mass (g)	Live time (s)	Counts background (average)	Counts of 661.7 keV peak	Comment
LD12	347.8	172821	83	78	background no Cs-137 in sample
SWL542	250.6	172185	50	191	clear peak Cs-137 in sample
TW09	213.1	170534	80	75	background no Cs-137 in sample

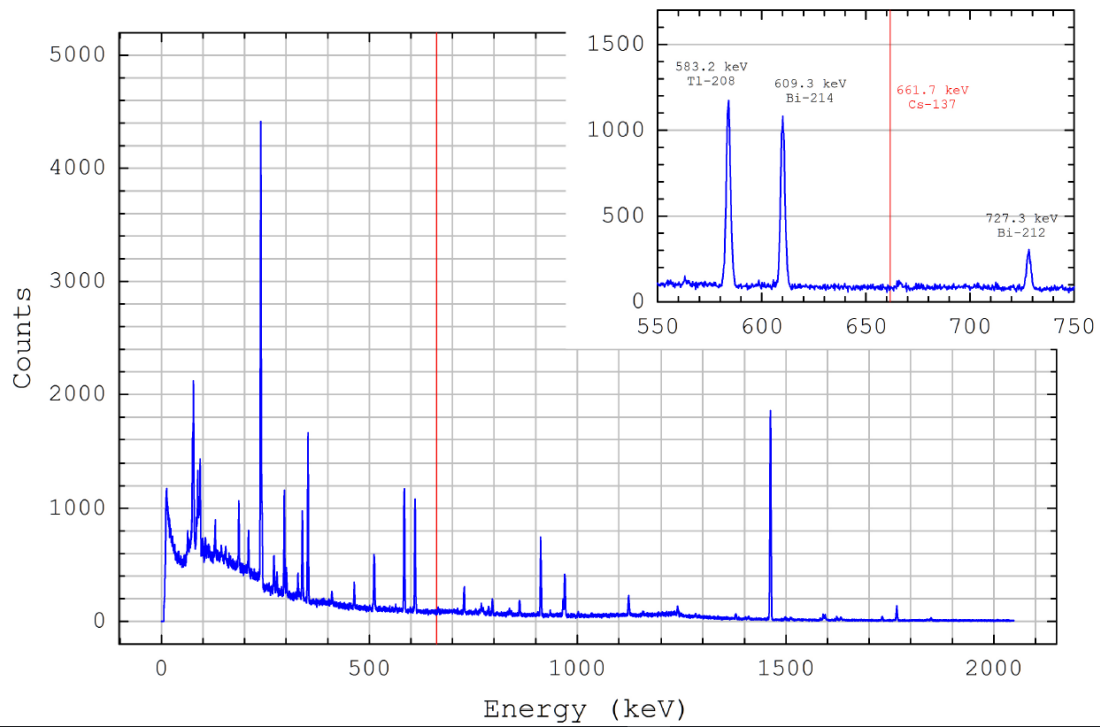
LD12



SWL542



TW09



附錄 4、矽藻分析原始資料



TW03: No diatoms found.

LD03: Freshwater environment. Dominant taxa are *Pinnularia* spp. (e.g., *Pinnularia hemiptera* and *P. acrosphaeria*) (32 %), *Stauroneis phoenicenteron* (19 %), and *Eunotia* spp (e.g., *Eunotia praerupta*) (35 %). These dominant taxa are all freshwater.

SWL537: Freshwater environment. Dominant taxa are *Eunotia* sp. aff. *camelus* (freshwater, 22 %), *Diadesmis confervacea* (freshwater, 21 %), and *Gomphonema parvulum* (freshwater, 12 %).

SWL539: Freshwater environment. Dominant taxa are *Eunotia camelus* (freshwater, 10 %), *Eunotia* sp. aff. *camelus* (freshwater, 45 %), and *Diadesmis confervacea* (freshwater, 5 %).

SWL540: Freshwater-Brackish. Dominant taxa are *Gomphonema augur* (freshwater, 8 %), *Eunotia flexuosa* (freshwater, 8 %), *Eunotia veneris* (freshwater, 5 %), and *Nitzschia scalpelliformis* (brackish, 7 %).

SWL541: Brackish-Marine. Dominant taxa are *Cyclotella striata* ([freshwater-]brackish, 22 %) and *Tryblionella cocconeiformis* (brackish-marine, 16 %).



附錄 5、鈾釷定年原始資料

^{230}Th dating results. The error is 2s error.

Sample Number	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppt)	$^{230}\text{Th} / ^{232}\text{Th}$ (atomic $\times 10^{-6}$)	$\delta^{234}\text{U}^*$ (measured)	$^{230}\text{Th} / ^{238}\text{U}$ (activity)	^{230}Th Age (yr) (uncorrected)	^{230}Th Age (yr) (corrected)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{Initial}}^{**}$ (corrected)	^{230}Th Age (yr BP) *** (corrected)
NPL501	2442.9 \pm 4.8	2744 \pm 56	403.3 \pm 8.2	144.1 \pm 1.9	0.02748 \pm 0.00010	2650 \pm 11	2611 \pm 38	145.1 1.9	2547 \pm 38
NPL504	2241.5 \pm 3.7	254.1 \pm 7.0	10142 \pm 279	142.7 \pm 1.6	0.06974 \pm 0.00019	6859 \pm 22	6855 \pm 22	145.5 1.6	6791 \pm 22
NPL505	2073.9 \pm 3.9	874 \pm 18	2779 \pm 57	141.4 \pm 1.6	0.07104 \pm 0.00024	6998 \pm 26	6984 \pm 30	144.2 1.7	6920 \pm 30
ZC568C-1	2852.9 \pm 5.2	491 \pm 11	340.3 \pm 8.6	144.5 \pm 1.9	0.003556 \pm 0.000034	339.3 \pm 3.3	333.3 \pm 6.5	144.7 1.9	269.3 6.5
ZC568C-2	3025.8 \pm 9.1	554 \pm 12	327.9 \pm 7.6	144.5 \pm 2.3	0.003643 \pm 0.000032	347.6 \pm 3.1	341.2 \pm 6.8	144.7 2.3	277.2 6.8
LKM569	2374.3 \pm 3.6	643 \pm 14	5011 \pm 110	139.5 \pm 1.6	0.08234 \pm 0.00021	8167 \pm 25	8157 \pm 26	142.8 1.6	8093 \pm 26
LKM570	2327.2 \pm 4.0	350.9 \pm 8.7	8943 \pm 222	143.1 \pm 1.7	0.08178 \pm 0.00023	8082 \pm 27	8077 \pm 27	146.4 1.8	8013 \pm 27
LKM572	2163.3 \pm 4.3	680 \pm 15	595 \pm 13	143.8 \pm 1.8	0.011340 \pm 0.000072	1086.3 \pm 7.1	1075 \pm 12	144.2 1.8	1011 \pm 12

U decay constants: $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10}$ (Jaffey et al., 1971) and $\lambda_{234} = 2.82206 \times 10^{-6}$ (Cheng et al., 2013). Th decay constant: $\lambda_{230} = 9.1705 \times 10^{-6}$ (Cheng et al., 2013).

* $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000 \cdot e^{\lambda_{234}T}$.

** $\delta^{234}\text{U}_{\text{Initial}}$ was calculated based on ^{230}Th age (T), i.e., $\delta^{234}\text{U}_{\text{Initial}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{\lambda_{234}T}$.

Age corrections were calculated using an estimated atomic $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ratio of 6 ± 4 ppm (Shen et al., 2008).

***B.P. stands for "Before Present" where the "Present" is defined as the year 1950 A.D.