

國立臺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



利用珊瑚微型環礁探討

緬甸西部蘭裏島之震間變形與地震週期

Inter-seismic behavior and earthquake recurrence interval

indicated by coral microatolls in Ramree Island, western Myanmar

劉司捷

Sze-Chieh Liu

指導教授：徐浩德 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

利用珊瑚微型環礁探討緬甸西部蘭裏島之
震間變形與地震週期

Inter-seismic behavior and earthquake recurrence interval
indicated by coral microatolls in Ramree Island,
western Myanmar

本論文係劉司捷君（R03224203）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：

徐鴻志

（簽名）

姜宏偉

（指導教授）

沈洲

宮守業

致謝



首先要感謝我的父母，在我追求學問的路上完全地支持我，讓我無後顧之憂地投入不斷嘗試與犯錯的研究生涯，全心往想走的人生方向上持續努力。

能夠順利完成這本論文，要感謝指導教授徐濬德老師。從大學到碩士班的過程中，徐老師在課堂上與野外工作時耐心的指導，不但引起了我對地質的喜愛，也使我能逐漸掌握做研究所需要的知識與能力。而在學術之外，我也很珍惜這幾年來每一個與徐老師相處的片刻，學生感念在心。

感謝沈川洲老師，在您實驗室做實驗的這幾年受您照顧甚多，除了科學上的指導外，老師對待我就如同自己的學生一般，令我倍感溫馨。感謝姜宏偉學長就像指導老師一樣，與我討論實驗方法與處理數據時給予了周詳且實用的建議，幫助我避免了很多不必要的失敗。感謝王昱學長在野外工作時對我的要求與訓練，讓我在這幾年間時時勉勵自己。感謝林立虹老師與王珮玲老師從大學以來的關心與照顧，也很感謝兩位老師與玲雯學姊在實驗上的支持。

感謝宮守業老師、鄧屬予老師、葉恩肇老師、羅立學長、佩萱學姊、董英宏、胡訓銘、陳怡文、渡邊貴昭、張哲豪、丁怡汝、鐘萱、吳珮瑾、謝皓程、郭北辰、李思儀對我研究提出的指正與建議。感謝於蓁學姊、Helen 學姊、忠哲學長、家豪在實驗過程中給我的鼓勵與幫助。感謝品璇與善慈協助處理各式各樣的樣本。

還要感謝 Bruce Lab 的大家，帶給我這幾年的美好回憶。每次聽興麟學姊的分享總能為問題找到新的想法；在崇哲學長的經驗傳授下，讓我在野外與室內工作省去自己探索的迷惘；感謝玉秀、佳穎學姊、怡蓉學姊、小希學姊、秦念祺學姊、奕維學長、小班學姊、陳承鴻學長、蔡原閔學長對我的提點與照顧；蔡元祿、袁宇威、蔡佳欣、殷瑤萱、吳俣、陳展懋這幾年來以同窗身份一起經歷的種種事情，感謝你們對我的幫助與包容。

最後礙於篇幅無法詳述，但真心感謝每一個出現在我生命裡的人。

摘要



西元 2004 年的南亞大海嘯為巽它大型逆衝帶引發之地震所致，而位於此逆衝帶向北延伸的緬甸西海岸區域，同樣也面臨著地震與海嘯災害的潛在風險。在該區域歷史記錄中唯一一次的大規模地震是西元 1762 年的阿拉干地震，前人於位在隱沒帶上盤的蘭裏島與基督島，利用抬升的海岸地形已對該地震的規模與該地區的上盤有所認識。然而，若想估算此地可能的地震平均再發週期，尚需了解現地震間沉降速率、地震同震抬升量、與長期抬升速率等資訊。

本研究利用珊瑚微型環礁作為古海水面指標，以了解隱沒帶上盤震間時期的變形特性。珊瑚的生長高度大致受到海水面低潮線的限制，此高度稱為最高生存面。一旦珊瑚的生長高度與最高生存面達成平衡，珊瑚微型環礁的外形與其年生長紋即可記錄相對海水面的變化。本研究將珊瑚板狀樣本切片後拍攝 X 光影像以辨識年生長紋高程，並利用鈾釷定年技術確認珊瑚的年代及建立年代模型，以重建該地的相對海水面歷史，同時結合氧同位素分析的結果，協助辨認伴隨氣候事件而發生的海水面震盪。另一方面，利用海階海岸線角的高度與海階沉積物的年代，則可以估計該地的長期抬升速率。

本研究於距海溝 80 公里遠的蘭裏島海岸邊一處名為雷卡蒙的漁村進行野外工作，對一抬升的化石珊瑚微型環礁群進行測量，並採集板狀樣本分析。此群珊瑚死於西元 1848 年所發生的地區性地震抬升，記錄到該地震前約 50 年的相對海水面歷史。本研究亦調查雷卡蒙地區海階，共可分為四階，其高程介於 1.0 到 11.4 公尺之間。結果顯示珊瑚最高生存面的平均上升速率為每年 5.3 到 5.8 公釐，此速率可代表該地區地殼於震間沉降的速率。期間也記錄到五次相對海水面短暫下降的事件，配合珊瑚生長型態與氧同位素分析結果，推測其事件為印度洋偶極震盪事件所造成。而第四階海階形成的年代介於 7.5 至 8.2 ka 之間，估計現地長期抬升速率為每年 1.0 到 1.7 公釐。

結合前人對雷卡蒙地區古地震事件的了解與本研究的結果，估計蘭裏島西北部區域性構造的地震再發週期應落在 300 到 360 年之間，若考慮隱沒帶地震與區域性構造地震的綜合貢獻，地震平均再發週期會介在 220 到 280 年之間，此結果較過去認為的週期更短，故應對該地區可能的地震災害做好準備。

關鍵字：緬甸、震間變形、珊瑚微型環礁、印度洋偶極震盪、地震再發週期

Abstract



The Sunda megathrust is one of the major plate boundaries in South Asia, along which the Indian-Australian plate subducts northeastward beneath the Burma micro-plate offshore western Myanmar. In the past several centuries, the 1762 Arakan earthquake was the only giant event along this plate boundary, and caused significant co-seismic uplift along a large stretch of the western Myanmar coast. In previous studies, the magnitude of the event and the potential seismogenic structures were analyzed based on uplifted coastal features on the Ramree and Cheduba Islands, two of the largest coastal islands of western Myanmar.

However, in order to estimate average earthquake recurrence interval, inter-seismic deformation rate, co-seismic uplift, and long-term uplift rate are all necessary. We utilized coral microatolls as natural tide gauge to analyze relative sea-level history and to obtain information of land-level change during the inter-seismic period, and utilized the elevations of marine terrace shoreline angles and the age of marine terrace deposits to determine long-term uplift rate.

For some coral genus such as *Porites*, the highest level of survival (HLS) is constrained within a few centimeters of the lowest tide level. Therefore, once the relationship between HLS and the sea level is established, the morphology of the microatolls can provide us the relative sea-level history based on the patterns of their annual growth bands under x-radiographs. U-Th dating technique can constrain the age of the coral, and we can also identify sea level anomalies caused by climatic events through oxygen isotope analysis.

We collected two slabs of coral microatolls from the intertidal zone near Leik-Ka-Maw, a small village in northwestern Ramree Island, approximately 80 km

away from the trench. The microatolls were uplifted and killed during a local earthquake event in 1848, and preserved HLS records of about 50 years prior to the 1848 event. We also surveyed four marine terraces with elevations between 1.0 and 11.4 meters.

Our results show that the coral recorded a HLS rise at a rate about 5.3 to 5.8 mm/yr, which represents land-level subsidence during the inter-seismic period. Several temporary HLS Diedown events are also present, likely produced by Indian Ocean Dipole events based on the microatoll morphology and results of oxygen isotopic analysis. The marine terrace level between 10.8 and 11.4 meters high formed during 7.5 ka and 8.2 ka, constraining a long-term uplift rate between 1.0 and 1.7 mm/yr. The recurrence interval of upper-plate splay fault earthquakes calculated using these results is between 300 to 360 years, and the average recurrence interval of both types of earthquakes (megathrust and splay fault) is between 220 to 280 years, both are shorter than the number obtained in previous studies. Therefore, it is important to further assess and prepare for earthquake hazards in this area.

Key Words: Myanmar, inter-seismic deformation, coral microatolls, Indian Ocean Dipole, earthquake recurrence interval

目錄



第一章 研究動機與目的	1
第二章 研究方法與材料	6
第一節 高程測量	6
第二節 珊瑚微型環礁	7
2.2.1 成因	7
2.2.2 最高生存面	7
2.2.3 年生長紋	12
2.2.4 相對海水面歷史	14
2.2.5 構造活動指示	14
2.2.6 海水面變化記錄	18
第三節 鈾釷定年	18
2.3.1 鈾釷定年原理	18
2.3.2 珊瑚的鈾釷定年	19
2.3.3 鈾釷年代計算	20
第四節 氧同位素	20
第三章 野外工作與樣本分析	22
第一節 研究區域概況	22
第二節 高程測量	22
第三節 樣本採集與分析處理	26
3.3.1 樣本前置處理	26
3.3.2 鈾釷定年分析	32
3.3.3 氧同位素分析	32

第四章 重建相對海水面歷史	34
第一節 最高生存面記錄精度.....	34
第二節 描繪 LKM302 生長形態.....	37
第三節 鈾釷定年結果與年代模式.....	37
第四節 重建 LKM302 所記錄的相對海水面歷史.....	42
第五節 描繪 LKM115 生長形態.....	44
第六節 重建 LKM115 所記錄的相對海水面歷史.....	48
第五章 氧同位素分析結果	50
第一節 氧同位素分析數據.....	50
第二節 年生長紋層描繪與對比.....	50
第三節 氧同位素數據年代模式.....	54
第六章 海階階面調查結果	56
第一節 野外觀察.....	56
第二節 高程測量與地質剖面.....	57
第三節 鈾釷定年結果.....	59
第四節 LKM 長期抬升速率.....	59
第七章 討論	63
第一節 珊瑚微型環礁生長形態的海水面意義.....	63
7.1.1 辨識最高生存面.....	63
7.1.2 Diedown 事件特性.....	65
第二節 Diedown 指示的印度洋偶極震盪事件.....	67
第三節 LKM 震間沉降速率.....	70
第四節 地震再發週期估計.....	72
7.4.1 區域性地震再發週期.....	72
7.4.2 地震平均再發週期.....	74
第八章 結論	77

參考文獻.....	79
附錄一 樣本 LKM302 外觀可見之 Diedown 全站儀測量結果.....	87
附錄二 珊瑚微型環礁形態描繪量測結果	89
LKM302 結果.....	89
LKM115 結果.....	91
附錄三 氧同位素分析結果	92
附錄四 LKM 地區海階地形測量結果.....	118

圖目錄



圖 1-1 彈性回彈模型	2
圖 1-2 研究區域	3
圖 1-3 地震再發週期預估	5
圖 2-1 現生珊瑚微型環礁	8
圖 2-2 現生圓穹狀 <i>Porites</i> 珊瑚	9
圖 2-3 最高生存面限制珊瑚生長高度示意圖	10
圖 2-4 珊瑚微型環礁適應最高生存面生長外觀示意圖	11
圖 2-5 曝光反轉的珊瑚 X 光影像	13
圖 2-6 珊瑚微型環礁指示的同震抬升	15
圖 2-7 珊瑚微型環礁指示的震間抬升與同震下沉	16
圖 2-8 珊瑚微型環礁指示的震間沉降	17
圖 3-1 蘭裏島北部地區衛星影像	23
圖 3-2 LKM 地區衛星影像	24
圖 3-3 LKM 地區西海岸地形剖面	25
圖 3-4 利用全站儀測量珊瑚微型環礁環狀邊緣高度	27
圖 3-5 架設於海階面上的 RTK-GPS 基站	28
圖 3-6 利用 RTK-GPS 移動站對地形面進行測量	29
圖 3-7 使用手持雙人鋸採集珊瑚板狀樣本	30
圖 3-8 於珊瑚樣本切面上繪製水平參考線以供影像校正	31
圖 3-9 利用中型鑽石複線切割機沿垂直珊瑚生長紋方向切下薄片	33
圖 4-1 樣本 LKM302 在形貌可見三層不同高度的圓環狀 Diedown 外觀	35
圖 4-2 樣本 LKM302 三層圓環狀 Diedown 外觀之全站儀測量結果	36
圖 4-3 珊瑚微型環礁樣本 LKM302	38

圖 4-4 樣本 LKM302 經曝光反轉的 X 光影像	39
圖 4-5 樣本 LKM302 描繪結果、年生長紋相對年代與鈾釷定年結果	40
圖 4-6 利用 LKM302 記錄所重建的相對海水面歷史	43
圖 4-7 珊瑚微型環礁樣本 LKM115	45
圖 4-8 樣本 LKM115 經曝光反轉的 X 光影像.....	46
圖 4-9 樣本 LKM115 描繪結果、年生長紋相對年代與鈾釷定年結果	47
圖 4-10 利用 LKM115 記錄所重建的相對海水面歷史	49
圖 5-1 氧同位素樣本採樣位置	51
圖 5-2 樣本 LKM302 下部 A 段	52
圖 5-3 樣本 LKM302 上部 B 段.....	53
圖 5-4 重建西元 1803 年至 1848 年間共 45 年的 $\delta^{18}\text{O}$ 數據.....	55
圖 6-1 LKM 地區海階地形測量投影結果與地質剖面示意圖	58
圖 6-2 蘭裏島北部至中部地區衛星影像	61
圖 7-1 樣本 LKM302 的相對海水面歷史	64
圖 7-2 樣本 LKM115 的相對海水面歷史	66
圖 7-3 樣本 LKM302 氧同位素結果與可能指示的 IOD 事件	69
圖 7-4 以最小平方方法迴歸估計 LKM 地區震間沉降速率	71
圖 7-5 LKM 地區地震平均再發週期介在 220 年到 280 年之間	76

表目錄



表 4-1 Uranium and thorium isotopic compositions and ^{230}Th ages for coral samples by MC-ICPMS at HISPEC, NTU	41
表 6-1 Uranium and thorium isotopic compositions and ^{230}Th ages for LKM terrace coral samples	60

第一章 研究動機與目的



西元 2004 年造成人員嚴重傷亡與龐大經濟損失的南亞大海嘯，為巽它大型逆衝帶(Sunda megathrust)在蘇門答臘(Sumatra)地區引發的地震所導致(Lay et al., 2005)。震後，許多研究分別在蘇門答臘地區針對古地震的分布與特性進行調查，提供當地政府未來在防災規劃上的地質基礎(Natawidjaja et al., 2004; Natawidjaja et al., 2006; Natawidjaja et al., 2007)。

而巽它大型逆衝帶向北延伸可達孟加拉南部海岸，同時也是中南半島重要的板塊邊界之一。緬甸西海岸地理上緊鄰著此逆衝帶，也面臨著地震與海嘯災害的潛在風險，但逆衝帶此段的特性尚未完全明瞭。因此，本研究欲針對緬甸西海岸地區的逆斷層活動特性進行探討。

巽它大型逆衝帶上盤構造的活動模式能以彈性回彈模型(dislocation model, Savage, 1983)理解。於震間時期(inter-seismic period)，下盤板塊持續往上盤板塊之下隱沒，但在地表附近的數十公里內，由於兩板塊之間鎖定(locked)而沒有相對位移，因此上盤板塊的前緣區域在受下盤板塊隱沒拖曳的作用下，會隨隱沒而逐漸沉降（圖 1-1 a）。而震間時期所累積的變形，會在到達臨界值後透過上下盤間產生破裂以地震的形式釋放，同時同震時期(co-seismic period)上盤板塊的前緣會抬升，並可能伴隨相關的地震災害（圖 1-1 b）。

回顧歷史文獻記錄，此區域發生在逆衝帶上唯一的一次大規模地震，是西元 1762 年的阿拉干(Arakan)大地震(Oldham, 1883)(圖 1-2 a)。前人(Wang et al., 2013)於位在隱沒帶上盤、緬甸西南部省份若開邦(Rakhine state)沿海兩座最大的島嶼——蘭裏島(Ramree Island)與基督島(Cheduba Is.)(圖 1-2 b)上，利用沿岸受西元 1762 年地震抬升的地形地貌，重建了此次地震的同震抬升量，並進一步估計地震規模

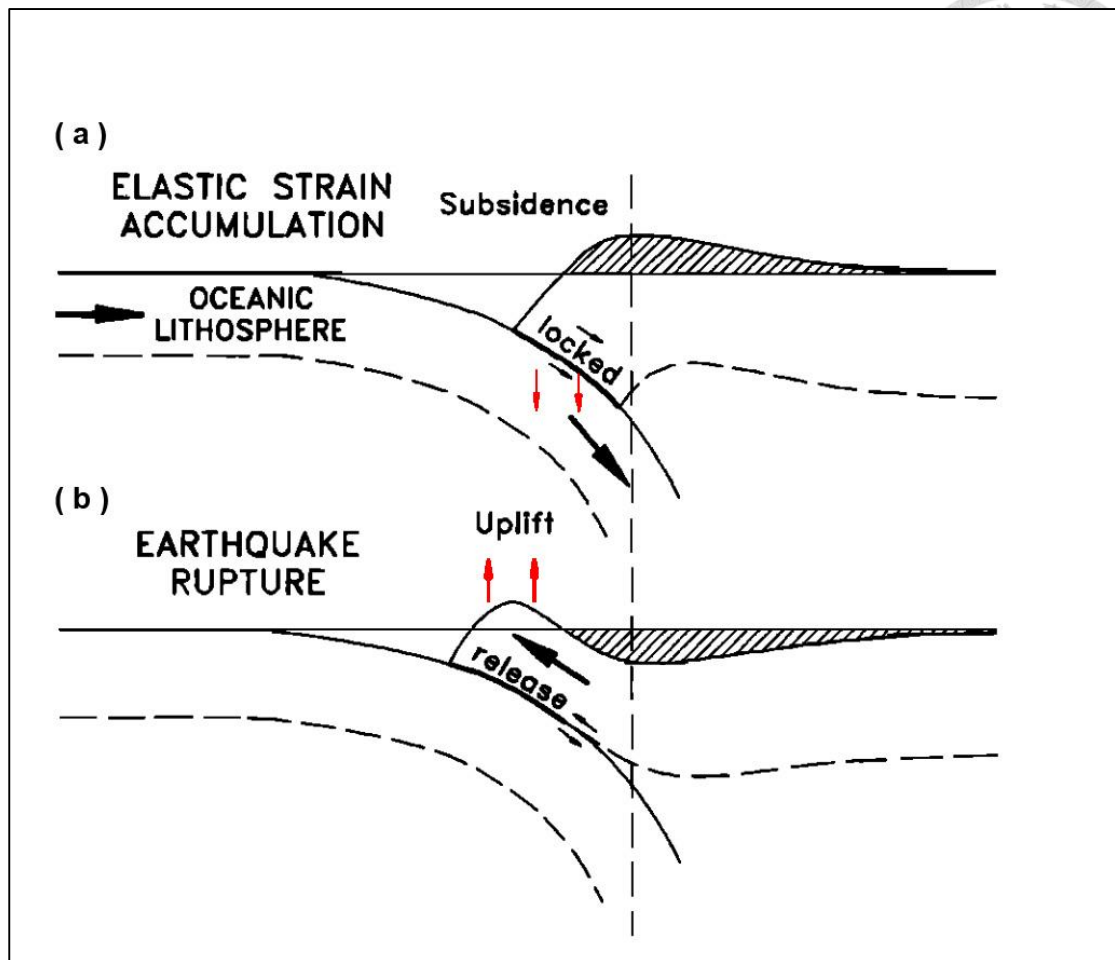


圖 1-1 彈性回彈模型。(a) 於震間時期(inter-seismic period)上盤板塊的前緣區域在受到下盤板塊隱沒拖曳的作用下，會隨隱沒而逐漸沉降；(b) 於同震時期(co-seismic period)，震間變形所累積的能量會在到達某臨界值後在上下盤間產生破裂而以地震的形式釋放，而上盤板塊的前緣會抬升(修改自 Dragert et al.,1994)。

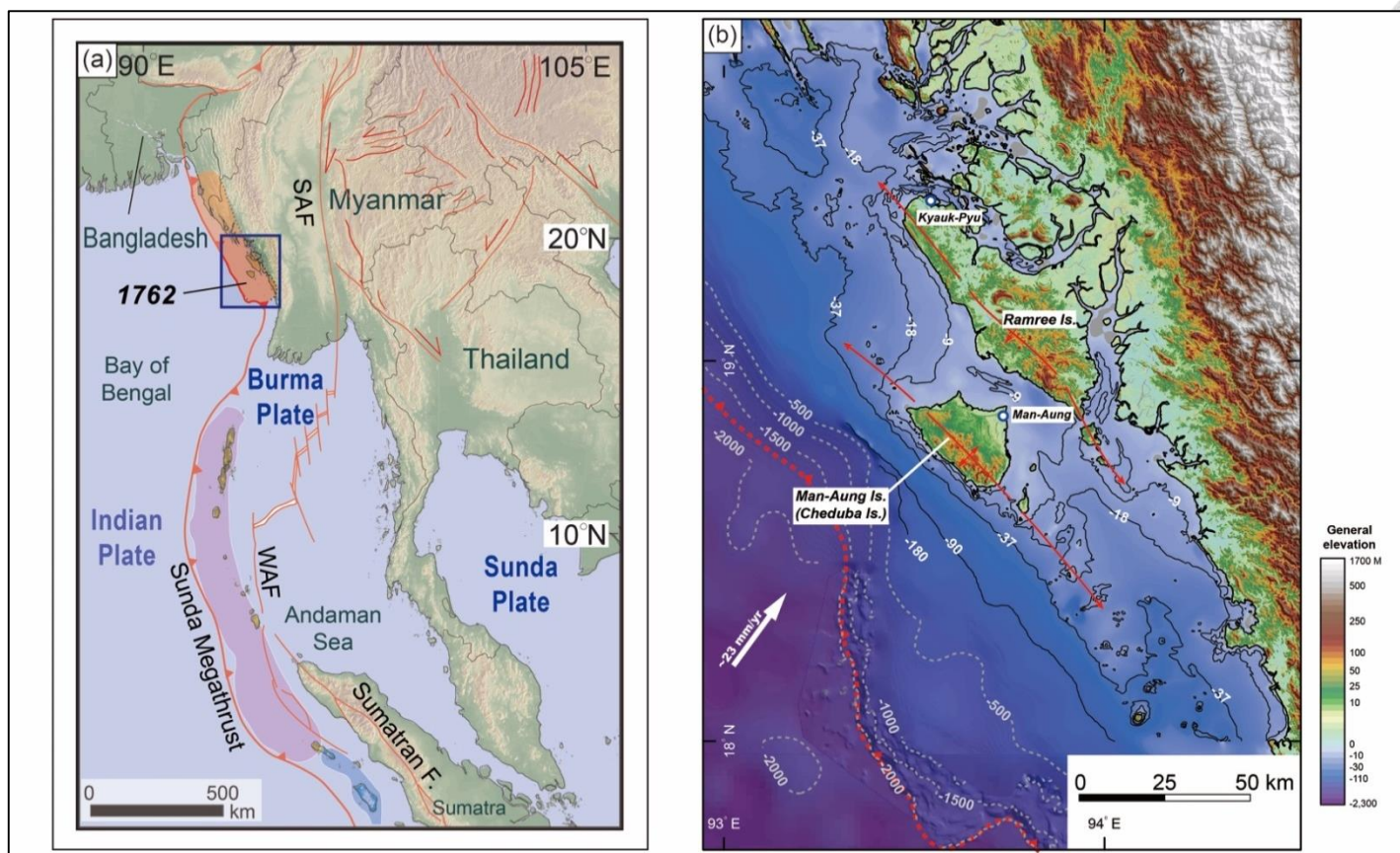


圖 1-2 研究區域。(a) 西元 1762 年的阿拉干大地震，是巽它大型逆衝帶北段於緬甸西海岸在歷史記錄中發生的唯一一次大規模地震；(b)前人於緬甸西南部若開邦被認為可能是 1762 年地震震央的蘭裏島(Ramree Is.)與基督島(Cheduba Is.)進行調查，並重建 1762 年地震各處的同震抬升量（修改自 Wang et al., 2013）。

與推測可能的上盤構造。研究中亦估算了上盤的長期抬升速率(R, long-term uplift rate)及震間變形速率(I, inter-seismic rate)，並計算此區域地震可能的平均再發週期(recurrence interval) (圖 1-3)。

前人研究參考印澳板塊每年以 23 公釐的速率向東北隱沒至緬甸微板塊之下 (Socquet et al., 2006)，並假設兩板塊間耦合程度(coupling)為 100%，利用數值模式估計在基督島西側至蘭裏島西側之間，震間變形速率可能落在每年-3 至-6 公釐之間(Than Tin Aung et al., 2008; Wang et al., 2013)。另一方面根據基督島南方尬義(Ka-I)地區的野外觀察，僅能推測可能的變形速率介在每年 0 至-9 公釐之間，若由此結果計算出的地震平均再發週期便會落在 400 至 1000 年之間(Wang et al., 2013)。如果能更精確地了解此區域於震間的變形行為，並改善對地震平均再發週期的預估，將能對緬甸西海岸地區的地震與海嘯相關災害防治規劃有所貢獻。

因此，本研究選擇位在隱沒帶上盤的蘭裏島進行調查，希望利用珊瑚微型環礁(coral microatolls)作為古海水面指標以獲得現地更可靠的震間沉降速率，並利用海階高度估計長期抬升速率，同時結合前人對阿拉干大地震抬升量的觀察，進行地震平均再發週期的計算，藉此增進對巽它大型逆衝帶在緬甸西部的認識。

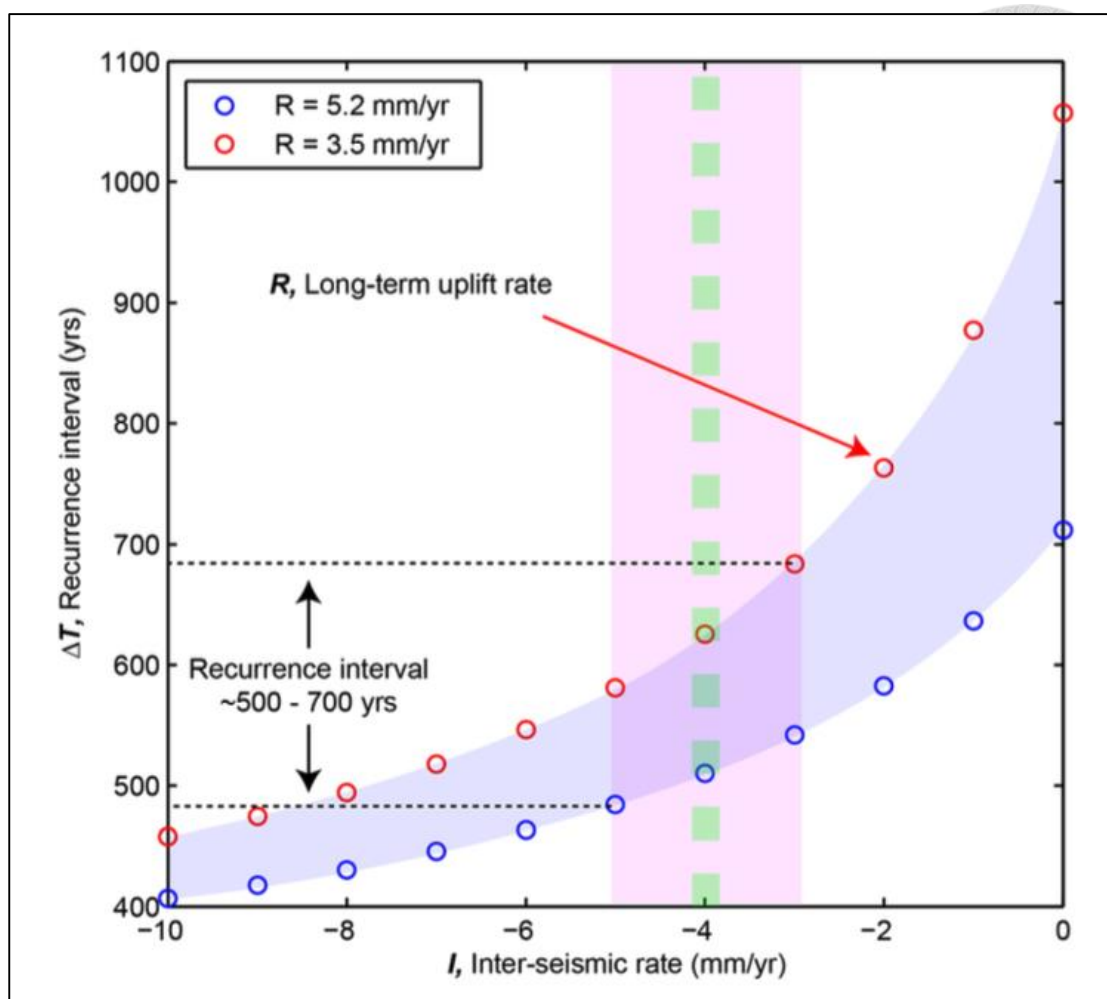


圖 1-3 地震再發週期預估。前人於基督島尬義地區的野外調查，測得西元 1762 年地震同震抬升量 3.7 公尺、震間變形速率每年-9 至 0 公釐、長期抬升速率每年 3.5 至 5.2 公釐，以此估算地震平均再發週期為 400 至 1000 年。若採用數值模式預估結果震間變形速率為每年-3 至-5 公釐，地震平均再發週期則會落在 500 至 700 年之間(Wang et al., 2013)。

第二章 研究方法與材料



本研究針對研究地區的化石珊瑚微型環礁群與地形面進行高程測量。利用珊瑚微型環礁頂面的高程差異，可以估算地震事件伴隨的同震抬升量，而珊瑚微型環礁內部的年生長紋形貌，能用於重建震間時期海水面的變動歷史。另一方面，利用堆積薄層沉積物的海階海岸線角高度，能夠估計地殼的長期抬升量。結合珊瑚的鈾釷定年技術後，不只可以使我們分辨抬升珊瑚微型環礁的地震事件，控制相對海面記錄所對應的年代，也可以透過海階上堆積的珊瑚沉積年代，推估階面形成的時間，計算長期抬升速率。

重建的相對海面歷史除了可以指示構造活動外，也可以記錄氣候事件伴隨的海水面震盪。透過珊瑚骨骼的氧同位素分析結果，能協助我們了解海水面震盪時，表層海水的溫度與鹽度特徵。

第一節 高程測量

本研究分別利用全站儀(total station)與 RTK-GPS(real time kinematic-global positioning system)兩種儀器進行測量。

全站儀為一種光學測量儀器，基站向高反射率的稜鏡(prism)發出雷射後，再接收反射回來的訊號測量距離，利用角度與距離計算稜鏡相對於基站的座標與高程，高程誤差約在數公釐以內。由於全站儀的測量結果是相對座標，因此還需要以手持 GPS 定位作為輔助，提供基站在全球座標系統中的位置。RTK-GPS 由基站與移動站兩部分組成，是利用兩部分同時接收 GPS 訊號進行解算定位，可以提供選定座標系統中的實際位置與高程，其高程誤差約在數公分之內。

第二節 珊瑚微型環礁



珊瑚微型環礁(coral microatolls)一詞描述珊瑚的一種生長外觀。典型的珊瑚微型環礁為單一群落的團塊狀珊瑚所構成，大致呈圓形，有平坦但已經死亡的頂面，現生的珊瑚微型環礁由外圍活著的珊瑚蟲向外生長(Scoffint & Stoddart, 1978) (圖 2-1)。

2.2.1 成因

根據在澳洲大堡礁的調查，能形成這種外觀的珊瑚品種有多達 23 屬 43 種 (Scoffint & Stoddart, 1978)；在印度洋的蘇門答臘地區，則以 *Porites*、*Goniastrea* 和 *Cyphastrea* 三屬珊瑚分布最為廣泛(Zachariasen, 1998)。

這種外觀的形成主要與海水面有關。由於珊瑚無法長時間暴露在空氣中生存，因此現地海水低潮線的高度，大致限制了珊瑚所能生長的最高高度(Scoffint & Stoddart, 1978)，此高度稱為最高生存面(highest level of survival, HLS, Taylor & Frohlich, 1987)。在珊瑚未受到最高生存面限制下，能自由地從中心向四面八方生長，形成圓穹狀(dome-shape)外觀 (圖 2-2、圖 2-3 a)；一旦珊瑚頂部高度達到最高生存面後，則無法再向上生長，取而代之的是貼著最高生存面往四周圍生長，呈扁平圓盤狀外觀，稱微型環礁狀(microatoll form, Scoffint & Stoddart, 1978) (圖 2-3 b)，並記錄當下最高生存面的高度。

2.2.2 最高生存面

若最高生存面高程發生變化，珊瑚微型環礁的外觀可以將變化過程記錄下來。當海水面下降使得最高生存面降低時，曝露在最高生存面之上的珊瑚容易死亡，死後造成的生長不連續面稱為 Diedown。若珊瑚微型環礁外圍仍有部分低於最高生存面，珊瑚便能沿著新的最高生存面繼續生長，因此外觀上會呈現中間高、外圍低的帽子形狀(hat form) (圖 2-4 a)；反之，當海面上升使得最高生存面提高



圖 2-1 現生珊瑚微型環礁（coral microatolls；Aron Meltzner 提供，2017）。



圖 2-2 現生圓穹狀 *Porites* 珊瑚 (National Park of American Samoa 提供, 2013)。

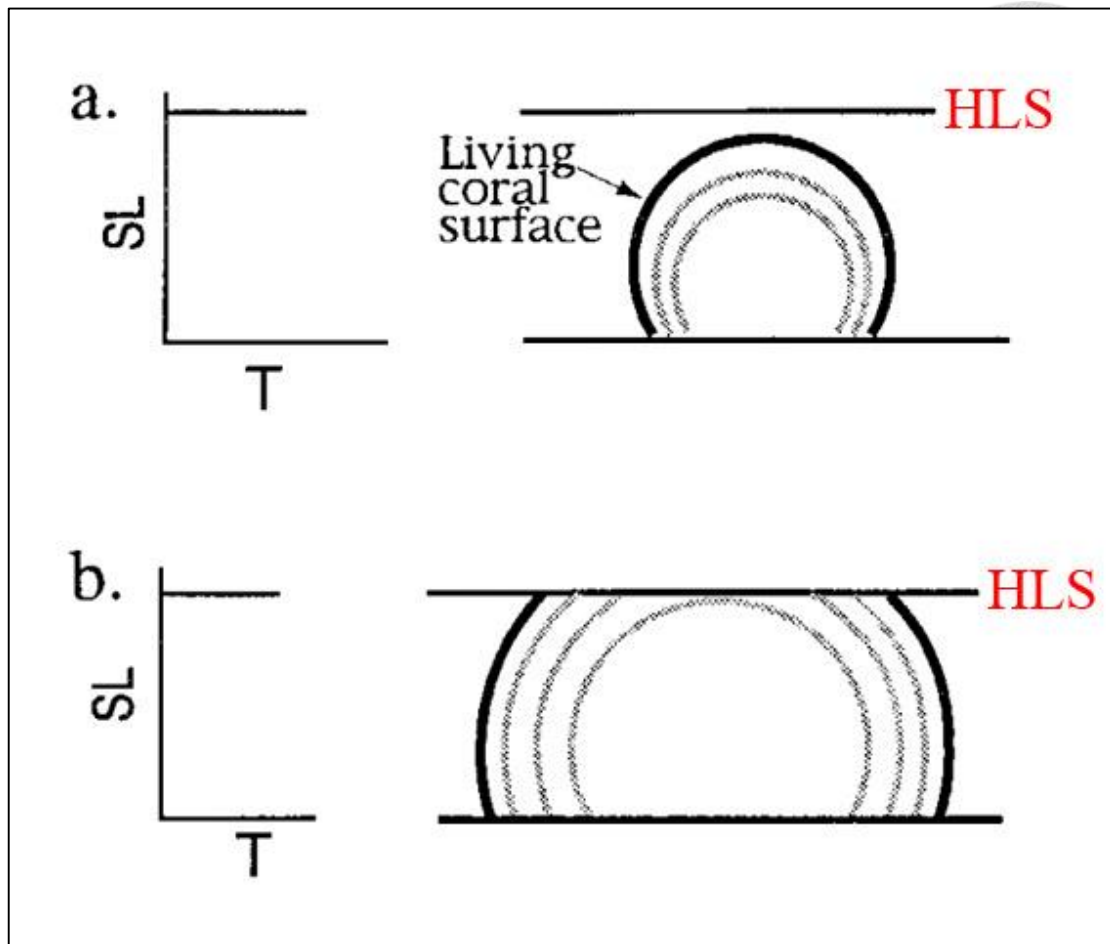


圖 2-3 最高生存面限制珊瑚生長高度示意圖。珊瑚的生長高度會受到最高生存面的限制，(a) 當珊瑚頂部高度低於最高生存面時，常呈現圓穹狀外觀；(b) 當珊瑚頂部高度達到最高生存面後，會呈珊瑚微型環礁狀（修改自 Zachariasen et al., 2000）。

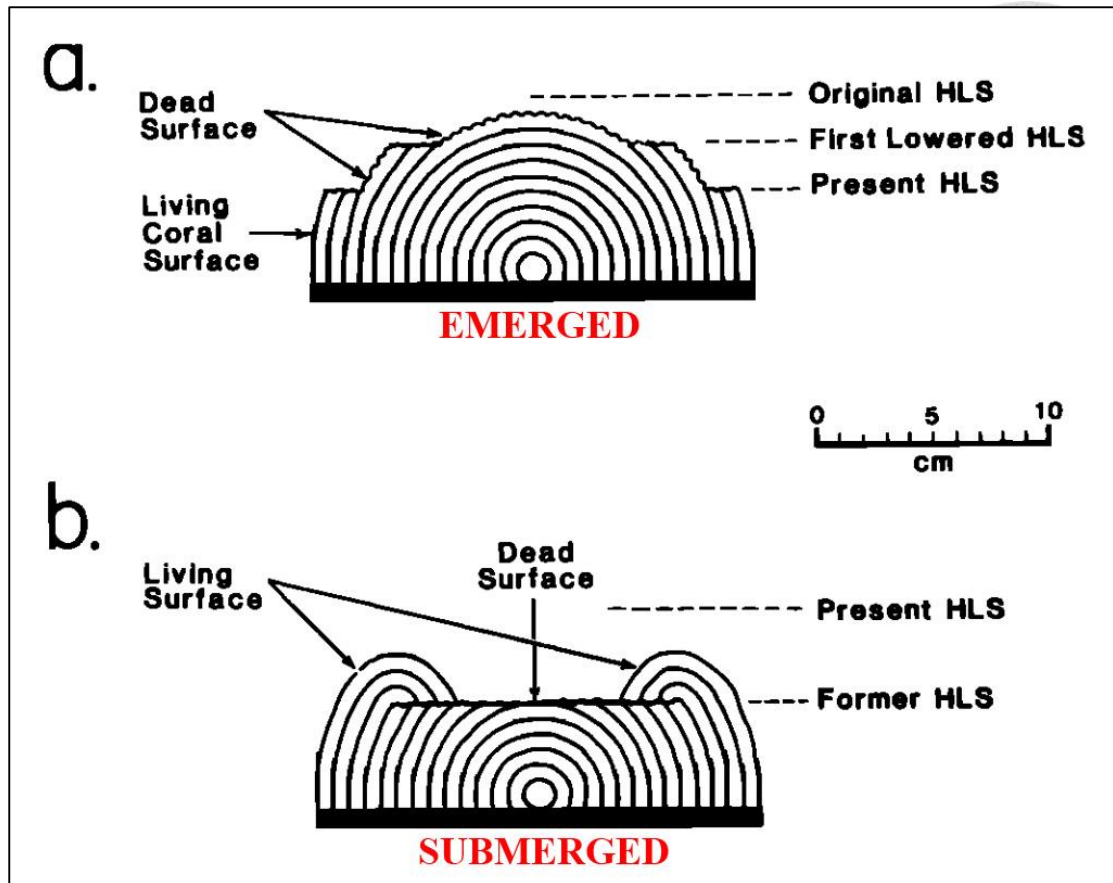


圖 2-4 珊瑚微型環礁適應最高生存面生長外觀示意圖。珊瑚微型環礁為了適應最高生存面的改變，會呈現不同的外觀形態，(a) 當最高生存面下降至低於珊瑚頂部時，珊瑚微型環礁會呈帽子狀外觀；(b) 當最高生存面上升時，珊瑚微型環礁會呈杯子狀外觀（修改自 Taylor & Frohlich, 1987）。

時，在原珊瑚高度與新的最高生存面之間會產生空間，新生的珊瑚可以向上生長，外觀上便會呈現外圍高、中間低的杯子形狀(cup form, Scoffint & Stoddart, 1978; Taylor & Frohlich, 1987; Zachariasen, 1998) (圖 2-4 b)。

珊瑚微型環礁在記錄最高生存面的升降時，所需要的反應時間並不相同。當最高生存面下降時，曝露在空氣中的珊瑚會在幾天內死亡，反應即時。但在最高生存面上升時，所需的反應時間同時受到最高生存面上升的高度與珊瑚的生長速率所影響，新生的珊瑚可能需要花數年至數十年的時間，其高度才能與新的最高生存面達成平衡(Taylor & Frohlich, 1987)。

一般而言，珊瑚微型環礁的生長速率大致在每年 1 到 2 公分之間(Taylor & Frohlich, 1987; Zachariasen et al., 2000)，其中 *Porites* 屬的珊瑚，在珊瑚礁潟湖環境中，生長速率介在每年 10.5 到 17.4 公釐之間，平均生長速率為每年 12.9 ± 2.4 公釐(Priess et al., 1995)。

2.2.3 年生長紋

珊瑚的年生長紋(annual growth bands)，可以提供我們最高生存面記錄所對應的時間次序(Taylor & Frohlich, 1987)。明暗成對的年生長紋，是由於珊瑚骨骼密度的變化所導致(Knutson et al., 1972)，如 *Porites*、*Goniastrea* 等屬珊瑚骨骼密度具有年週期性的變化，主要受到海水溫度的影響，夏季生長速率較快，形成的骨骼密度較低；冬季生長速率較慢，形成的骨骼密度也較高。另外也會受到降雨及雲量等因素的控制。

因為 X 光對不同密度的珊瑚骨骼穿透度不同，經過珊瑚微型環礁的中心，垂直切下厚度 1 至 2 公分的珊瑚板狀樣本拍攝 X 光片，可以在影像中分辨出年生長紋。在 X 光影像中，密度較高的珊瑚骨骼因穿透度較差(radiopaque)呈淺色，密度較低的珊瑚骨骼穿透度較佳(radiolucent)呈深色。為了更利於辨識，通常會將 X 光影像的曝光程度反轉(invert grayscale)後呈現(Pätzold, 1984)。反轉的影像中，深色為珊瑚密度較高的部分，淺色為珊瑚密度較低的部分 (圖 2-5)。

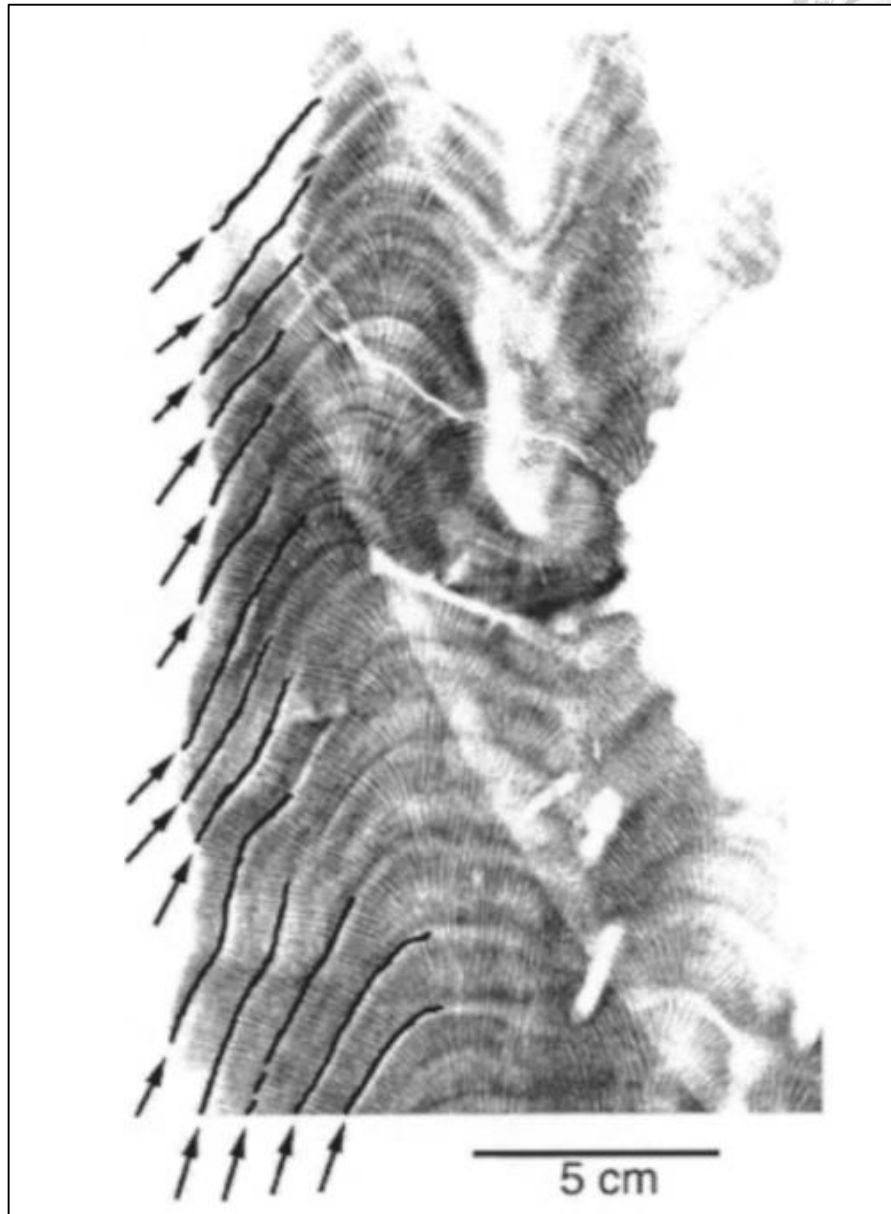


圖 2-5 曝光反轉的珊瑚 X 光影像。箭頭所指的黑色線條是沿著影像中顏色較深處描繪，為珊瑚骨骼密度較高的部分 (Zachariasen et al., 2000)。

2.2.4 相對海水面歷史

利用年生長紋所指示的各層相對年代，結合珊瑚微型環礁每年所記錄到的最高生存面高度，便可以建立最高生存面變動的年尺度時間序列，或稱最高生存面歷史。珊瑚所記錄到的最高生存面歷史，雖然無法簡單地推算當時的絕對海水面高度，卻可以提供我們可靠的海水面變化趨勢(Zachariasen, 1998)。

前人研究在蘇門答臘地區，針對現生珊瑚微型環礁群與化石珊瑚微型環礁群所記錄到的最高生存面進行測量，統計結果顯示平均而言，單一珊瑚微型環礁所記錄到的最高生存面，誤差在 4 公分(2σ)以內，而在單一地點的多顆珊瑚微型環礁間，對同一最高生存面的記錄，精度則約為 7 公分(2σ)(Zachariasen, 1998)。

將年生長紋記錄轉換成相對海水面的過程中，討論年生長紋前後層關係之前，必須考慮到大部分的年生長紋，並不容易直接判斷其高度是否真正代表了當時的最高生存面(HLS)，因此表示時會使用最高生長面(highest level of growth, HLG)做較為保守的描述(Meltzner et al., 2010)。

2.2.5 構造活動指示

最高生存面變化的歷史，可以應用於指示構造活動的特性(Taylor & Frohlich, 1987; Zachariasen, 1998; Zachariasen et al., 2000; Natawidjaja et al., 2004)。當陸地受到同震抬升時會將珊瑚一併隆起，對珊瑚而言海水面突然相對地下降，限制其生長的最高生存面也隨之降低，地震前後記錄到不同的最高生存面，兩者之間的高程差便可以代表地震同震抬升量(圖 2-6)。當陸地緩慢而持續地抬升時，最高生存面也隨之緩慢下降，珊瑚微型環礁逐年記錄最高生存面，形態便會呈現由內向外持續降低的外觀(圖 2-7)。

當陸地發生同震沉降時，限制珊瑚生長的最高生存面相對升高，使珊瑚可以自由地向上生長。過程中，珊瑚亦會朝兩側生長，呈現新生珊瑚由外向內包覆 Diedown 的外觀(Woodroffe & McLean, 1990; Zachariasen, 1998)(圖 2-7)。當陸地緩慢而持續地沉降時，最高生存面緩慢上升。若陸地的沉降速率小於等於珊瑚的

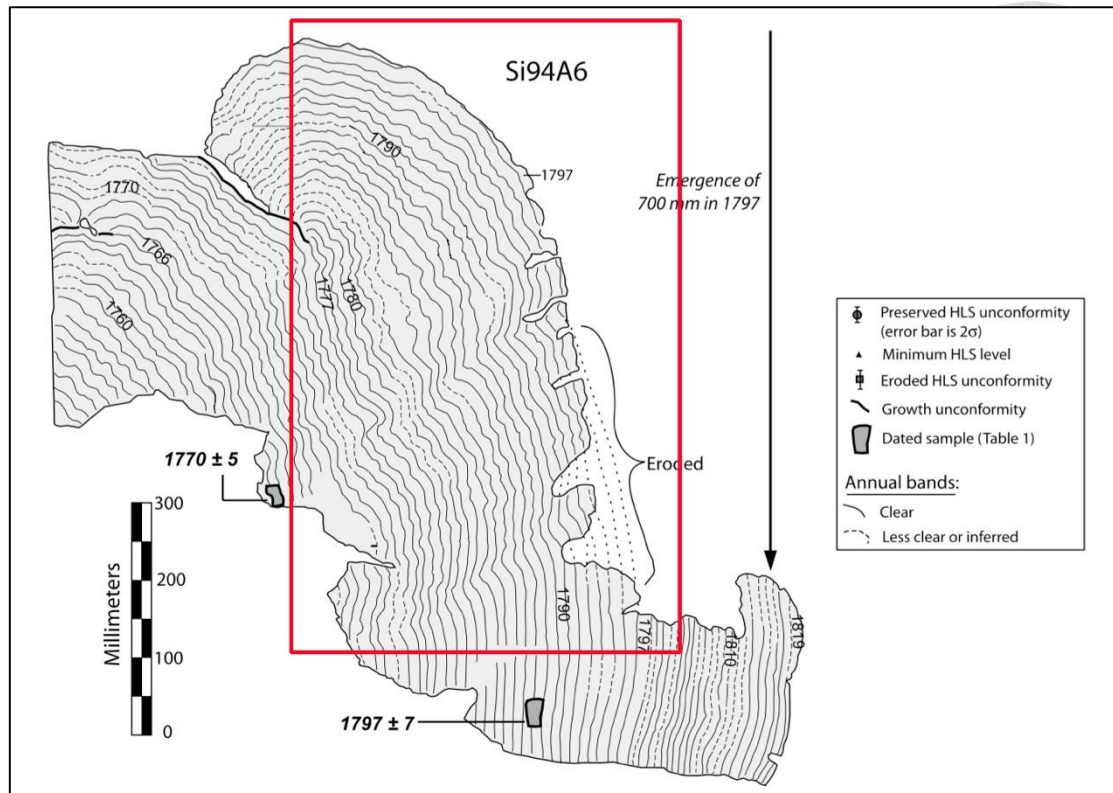


圖 2-6 珊瑚微型環礁指示的同震抬升。西元 1797 年前後珊瑚所記錄到的最高生存面約有 700 公釐的高程差，指示地震的同震抬升量(Natawidjaja et al., 2006)。

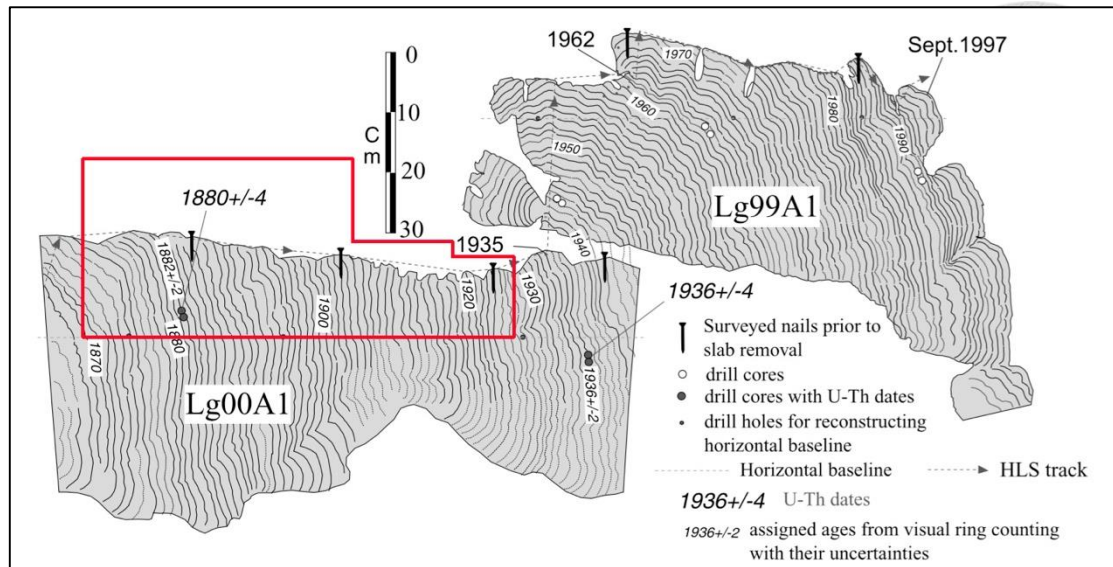


圖 2-7 珊瑚微型環礁指示的震間抬升與同震下沉。在西元 1880 到 1930 年間最高生存面持續下降，指示地殼緩慢地抬升；西元 1935 年後珊瑚不再受最高生存面的限制自由地向上生長，直到西元 1962 年達到新的最高生存面為止，前後最高生存面產生約略 30 公分的高程差，指示可能的同震下沉量(Natawidjaja et al., 2004)。

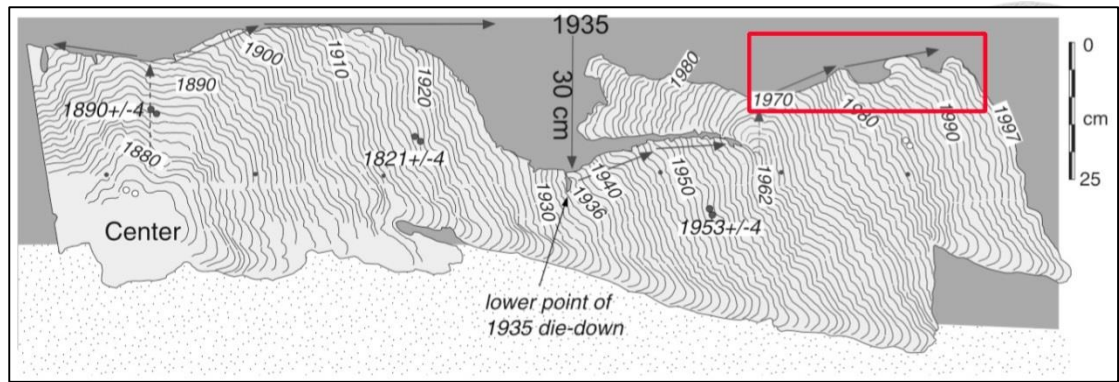


圖 2-8 珊瑚微型環礁指示的震間沉降。在西元 1970 至 1990 年間最高生存面緩緩上升，指示地殼持續沉降的過程(Natawidjaja et al., 2004)。

生長速率，珊瑚便能生長到當時的最高生存面，呈現由內向外持續升高的外形(圖 2-8)。



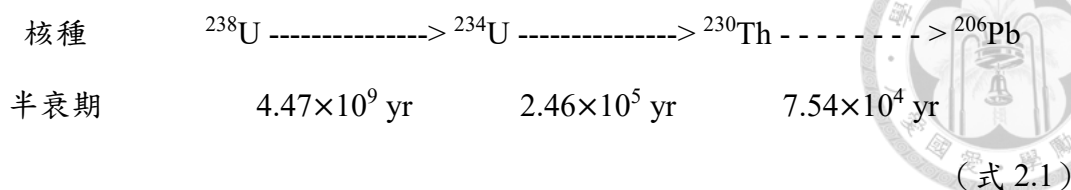
2.2.6 海水面變化記錄

全球海水面的升降與區域海水面的震盪，同樣也會改變最高生存面而被珊瑚微型環礁記錄。在構造活動平靜、地殼高程沒有變動的地方，相對海水面的趨勢可以提供年解析度的海水面變化(Meltzner et al., 2017)；太平洋之聖嬰現象(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)或印度洋偶極震盪(Indian Ocean Dipole, IOD)，可能伴隨著區域性的海水面異常(sea level anomaly)並持續數月到數年之久，也能被珊瑚微型環礁記錄(Taylor & Frohlich, 1987; Meltzner et al., 2010)。其中，氣候事件伴隨的海水面暫時性下降，會在珊瑚頂部造成 Diedown，可以精確地指示海水面下降的時間與規模。事件結束後最高生存面回升，新生的珊瑚會向上向內包覆生長，為短期海水面震盪的重要證據(Meltzner et al., 2010)。

第三節 鈾釷定年

2.3.1 鈾釷定年原理

鈾釷定年(uranium-thorium dating)屬於鈾系定年法(uranium-series dating method)中的一種，亦稱 ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th 定年，或 ^{230}Th 定年，是利用 ^{238}U 與其衰變產物 ^{234}U 與 ^{230}Th 定年(Barnes et al., 1956; Kaufman & Broecker, 1965; Edwards et al., 1987)。 ^{238}U 具有放射性，會依序衰變為 ^{234}Th 、 ^{234}Pa 、 ^{234}U 與 ^{230}Th ，其中，由於 ^{234}Th 與 ^{234}Pa 半衰期相對 ^{238}U 很短，在形成封閉系統(closed system)後母子元素會很快達成活度比相同的永世平衡狀態(secular equilibrium, Schlanger et al., 1963)，因此衰變序列可以簡化為：



而半衰期較長的 ^{234}U 與 ^{230}Th ，則需要比較長的時間讓活度比達成平衡，鈾鈦定年即是活度比不平衡與時間關係的一種應用(Schlanger et al., 1963)。

2.3.2 珊瑚的鈾鈦定年

在珊瑚骨骼中含有數 ppm(parts per million)的鈾(Barnes et al., 1956; Kaufman & Broecker, 1965)，與珊瑚碳酸鈣骨骼的霰石(aragonite)結晶及海水中的鈾濃度有關。碳酸鈣在自然界中有霰石與方解石兩種主要的結晶方式，其中霰石傾向與比 Ca^{2+} （鈣離子）離子半徑大的正二價離子結晶，而方解石則傾向與比 Ca^{2+} 離子半徑小的正二價離子結晶(Bragg, 1937)。以 Sr^{2+} （鋇離子）為例，在海中形成霰石的鋇濃度比方解石高了 3 到 4 倍(Thompson & Chow, 1955)。而鈾在海水中主要以 UO_2^{2+} （二氧化鈾）離子的形式存在， UO_2^{2+} 和碳酸鈣結晶的特性與 Sr^{2+} 相似，因此海水中的高鈾鈣比值（約 1.2×10^{-6} ）使珊瑚骨骼中富含鈾元素，為珊瑚能夠應用鈾鈦定年的重要條件(Schlanger et al., 1963)。

鈦在海中傾向附著在沉積物上(Schlanger et al., 1963; Moore, 1981)，因此 ^{230}Th 在海水中的濃度，比海水中 ^{238}U 平衡後應有的濃度低(Pettersson, 1937)。海水中低濃度的鈦，使珊瑚骨骼形成時僅含有少量的 ^{230}Th ，稱為 ^{230}Th 初始值，此數值可以利用海水中 ^{230}Th 與 ^{232}Th 的比值估算(Tatsumoto & Goldberg, 1959; Thurber et al., 1965; Edwards et al., 1987; Shen et al., 2008)。

珊瑚骨骼的霰石晶體形成後，對鈾鈦同位素而言屬於封閉系統，即鈾鈦同位素無法自由進出霰石晶體。隨著衰變進行，珊瑚骨骼中大部分 ^{230}Th 自 ^{234}U 衰變而來，可以提供衰變所歷經時間的資訊。若霰石溶解後再結晶(recrystallization)

為次生霏石或方解石(secondary aragonite/calcite)，會破壞系統的封閉性使鈾釷能夠進出，而無法正確的估算年代，因此需要挑選未再結晶的珊瑚樣本進行定年(Schlanger et al., 1963; Thurber et al., 1965)。



2.3.3 鈾釷年代計算

鈾釷定年的年代，可以由下式表示(Bateman, 1910; Broecker & Thurber, 1965; Cheng et al., 2000)：

$$\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{238}\text{U}} = 1 + \left(\left(\frac{{}^{232}\text{Th}}{{}^{238}\text{U}} \right) \left(\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{232}\text{Th}} \right)_i - 1 \right) e^{-\lambda_{230}t} + \frac{\delta^{234}\text{U}_m}{1000} \left(\frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \right) (1 - e^{(\lambda_{234} - \lambda_{230})t})$$

(式 2.2)

其中，同位素比值皆為活度比， λ 為同位素的衰變常數， λ_{230} 為 $9.1705 \times 10^{-6} / \text{yr}$ ， λ_{234} 為 $2.8221 \times 10^{-6} / \text{yr}$ (Cheng et al., 2013)， $({}^{230}\text{Th}/{}^{232}\text{Th})_i$ 為樣本中 ${}^{230}\text{Th}$ 與 ${}^{232}\text{Th}$ 的初始比值， t 為 ${}^{230}\text{Th}$ 年代。 $\delta^{234}\text{U}_m = \{[({}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U})_m / ({}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U})_{\text{eq}}] - 1\} \times 10^3$ ， $({}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U})_m$ 為測量值， $({}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U})_{\text{eq}}$ 為永世平衡下的比值。

第四節 氧同位素

氧元素在自然界中有三種不具放射性的穩定同位素，分別是 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{17}\text{O}$ 與 ${}^{18}\text{O}$ 。其中， ${}^{16}\text{O}$ 與 ${}^{18}\text{O}$ 在樣品中的同位素比例相對於選定的標準品，可以利用 $\delta^{18}\text{O}$ 表示，其關係式為：

$$\delta^{18}\text{O} = 1000 \left(\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{sample}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{standard}}} - 1 \right)$$

(式2.3)

海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受到表層海水溫度(sea surface temperature, SST)與表層海水鹽度(sea surface salinity, SSS)影響，並可以被珊瑚所記錄下來。

表層海水的溫度變化會改變海水中碳酸根離子(HCO_3^-)與海水的氧同位素平衡(McCrea, 1950)，而珊瑚在進行鈣化作用形成骨骼時，會取用海水中碳酸根離子為材料(Pearse, 1970)，因此珊瑚所記錄的 $\delta^{18}\text{O}$ ，可以反應表層海水溫度的變化(Weber & Woodhead, 1972)。另一方面，由於降雨量變化會影響從陸地注入海洋的淡水流量，而淡水的 $\delta^{18}\text{O}$ 又較海水小，因此淡水的注入會同時降低海水的 $\delta^{18}\text{O}$ (McCulloch et al., 1994)與表層海水的鹽度(Le Bec et al., 2000)。表層海水鹽度與珊瑚的 $\delta^{18}\text{O}$ 之間的相關性，使珊瑚的 $\delta^{18}\text{O}$ 也可以指示降雨量與海水鹽度的變化(McCulloch et al., 1994; Le Bec et al., 2000)。

第三章 野外工作與樣本分析



第一節 研究區域概況

本研究選定之研究區域為距離海溝約 80 公里遠，位在隱沒帶上盤的蘭裏島西北部海岸。主要的測量與採樣工作位置為一處名為雷卡蒙(Leik-Ka-Maw, LKM)的漁村（圖 3-1）。

在 LKM 海岸邊分布數群被抬升的化石珊瑚微型環礁群體（圖 3-2），依照頂面高度可分為三層（王崇哲，2013）：最低的一層數量最多且保存良好，其高度約比現地平均大潮較低低潮面(mean lower water spring, MLWS)高約 0.7 公尺，指示西元 1848 年發生在蘭裏島北部城鎮皎漂(Kyauk-pyu)一次區域性地震的同震抬升(Oldham, 1883)；次高的一層數量較少，比第一層珊瑚高約 1.3 公尺，指示西元 1762 年阿拉干大地震的同震抬升；最高的一層數量最少且外觀受侵蝕，比第二層高約 0.5 公尺，指示了西元 9 到 10 世紀間一次地震的同震抬升（圖 3-3）。

此外，在 LKM 亦有至少四階發育良好的海階存在（圖 3-2），分布在平均海水面之上 2 到 13 公尺之間，每階海階都是由超過一次以上的地震事件抬升所形成（王崇哲，2013）。在第四階海階上的沉積物中發現的珊瑚碎塊，其年代距今 7522 年前至 9052 年前之間不等，可能指示該階海階形成的年代(王崇哲，2013)。

第二節 高程測量

為了解研究區域內珊瑚微型環礁在記錄最高生存面時的精確度，我們分別針對選定之珊瑚微型環礁在外觀上可見的不同次 Diedown 記錄，沿其環狀邊緣進

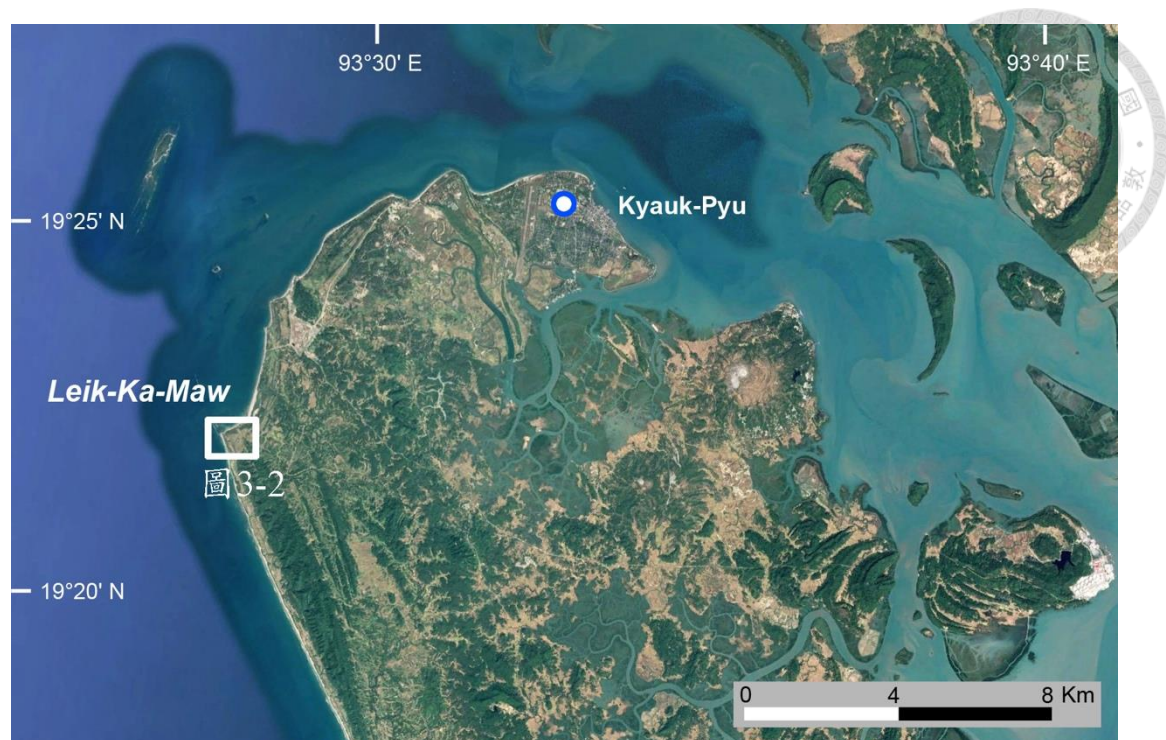


圖 3-1 蘭裏島北部地區衛星影像。本研究於蘭裏島西北部海岸的漁村雷卡蒙 (Leik-Ka-Maw, LKM) 進行測量與採樣。



圖 3-2 LKM 地區衛星影像。在 LKM 海岸邊有被抬升的化石珊瑚微型環礁群與至少四階發育良好的海階分布。

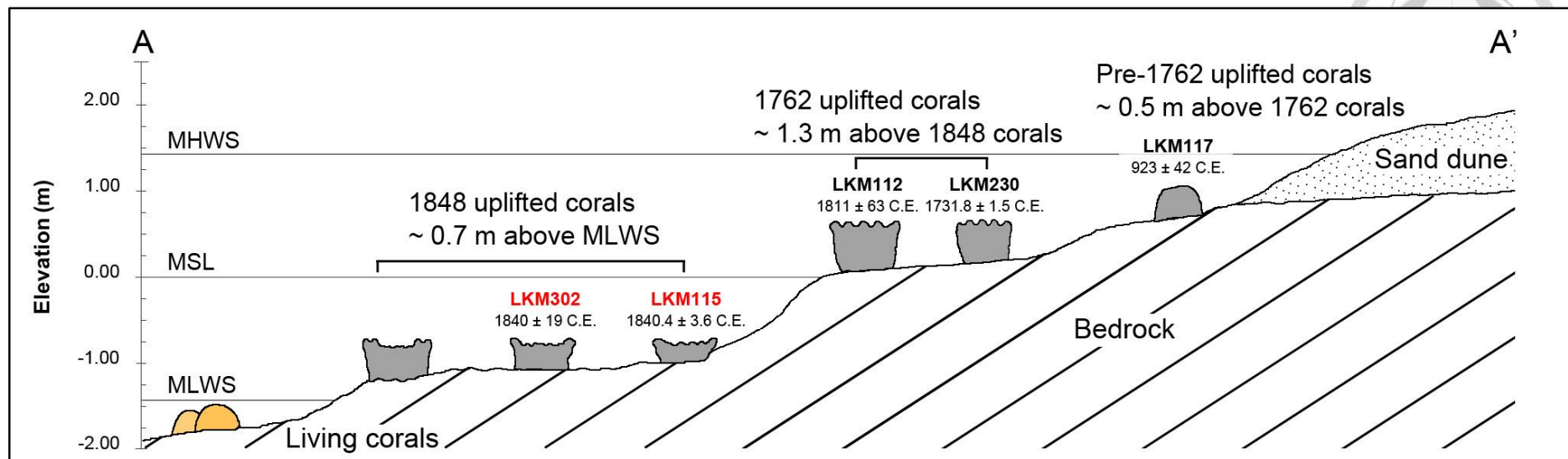


圖 3-3 LKM 地區西海岸地形剖面。被抬升的化石珊瑚微型環礁群依照高度可分為三層，由低到高分別指示西元 1848 年、西元 1762 年與西元 9 到 10 世紀間地震事件所伴隨的同震抬升(Modified from Shyu et al., in preparation)。

行多次測量（圖 3-4）。考量測量目標的高程差距僅在數公分之內，需要較小誤差的測量方式才能夠分辨，再者由於珊瑚微型環礁距離相近，彼此之間沒有障礙物阻擋，本研究適合用全站儀進行高精度測量。



另一方面，為了估計此地的長期抬升速率，本研究亦針對前人研究指出的海階階面進行較準確的高程測量。因為海階面分布範圍較廣，且階面之間植被茂密通視不良，所以此部分選用 RTK-GPS 進行測量（圖 3-5、圖 3-6）。

第三節 樣本採集與分析處理

本研究透過採集西元 1848 年地震同震抬升而死亡的珊瑚微型環礁群，預期能了解此地西元 1762 年阿拉干大地震到西元 1848 年之間的震間沉降特性與海水特徵。

3.3.1 樣本前置處理

本研究使用手持雙人鋸穿過珊瑚微型環礁的中心，垂直切下約 20 公分厚的板狀樣本（圖 3-7），並於採集當下在樣本切面上繪製水平參考線（圖 3-8）。透過船運運送樣本回臺灣後，將樣本用漂白水浸泡，洗去表層的藻類與黴斑，在新北市五股區正泰石材廠的協助下，將板狀樣本切割為 1 至 2 公分厚的片狀樣本，再前往國立臺灣大學生農學院附設動物醫院，得該院的協助拍攝片狀樣本的局部 X 光影像。最後以繪圖軟體拼合 X 光影像，並利用水平參考線校正水平，進行年生長紋與 Diedown 的描繪量測工作，以及重建相對海水面變化。



圖 3-4 利用全站儀測量珊瑚微型環礁環狀邊緣高度。本研究使用全站儀測量選定之珊瑚微型環礁的不同高度環狀邊緣，以了解研究區域內珊瑚微型環礁在記錄最高生存面時的精確度。



圖 3-5 架設於海階面上的 RTK-GPS 基站。



圖 3-6 利用 RTK-GPS 移動站對地形面進行測量。



圖 3-7 使用手持雙人鋸採集珊瑚板狀樣本。



圖 3-8 於珊瑚樣本切面上繪製水平參考線以供影像校正。

3.3.2 鈾釷定年分析

本研究選擇片狀樣本中肉眼觀察下生長紋明顯且沙土等雜質較少的部分，利用手術刀採取 20 至 100 毫克的塊狀樣本，於國立臺灣大學地質科學系高精度質譜儀與環境變遷實驗室(HISPEC)進行鈾釷定年分析。在 Class-10000 等級的無塵室內，將樣本置於純水中使用超音波震盪清洗，以不超過 70°C 的溫度烤乾，後將標本倒入鐵氟龍(Teflon)材質的容器中，以硝酸溶解之並加入含 ^{229}Th - ^{233}U - ^{236}U 同位素之示蹤劑(spike)，利用共沉澱法(iron co-precipitation)與離子交換法(anion-exchange)，純化與分離出鈾及釷。最後將其分別溶於 1%硝酸加 0.002N 的 HF 中 (Shen et al., 2002)，使用多接收感應耦合電漿質譜儀 (Multicollector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, MC-ICP-MS, Thermo-Fisher, Neptune)測量(Shen et al., 2012)。

3.3.3 氧同位素分析

本研究利用中型鑽石複線切割機，將片狀樣本沿垂直生長紋方向切割為 A、B 兩段共 45 公分長，各 5 公釐厚的薄片（圖 3-9），再利用桌上型鑽石複線切割機每隔 1 公釐取 1 到 2 公釐深的樣本，於無塵室中將樣本震盪烤乾後壓碎為粉末，送至國立臺灣大學海洋研究所穩定同位素質譜儀實驗室，進行碳氧穩定同位素分析。針對每個樣本取 0.150 至 0.200 毫克，透過全自動碳酸鹽分析裝置(carbonate device, Kiel IV)將樣本與磷酸反應成為二氧化碳氣體，再使用同位素比值質譜儀 (Isotope Ratio Mass Spectrometer, Thermo-Finnigan, MAT253)測量，並以 NBS19 為標準品校正儀器測量結果(Wang et al., 2010)。



圖 3-9 利用中型鑽石複線切割機沿垂直珊瑚生長紋方向切下薄片。由於受切割機切割長度之限制，必須將珊瑚分為兩段取樣，為了組合兩段薄片的分析結果，切割時選定同一層年生長紋（標示為綠色的層位）在兩段中重複出現以利對比。A 段為珊瑚下部，長約 19 公分，B 段為珊瑚上部，長約 26 公分。

第四章 重建相對海水面歷史



第一節 最高生存面記錄精度

本研究在野外針對樣本編號 LKM302 的珊瑚微型環礁進行測量，用以估計 LKM 海岸單一珊瑚微型環礁在記錄 HLS 時的精度。此珊瑚微型環礁可見三層不同高度的圓環狀 Diedown 外觀（圖 4-1），由於同一環狀上各處生長的時間應相同，若生長時受到 HLS 的限制，同一環上各處的高度應會指示同一 HLS。因此可以透過檢查同一圓環上的高程測量結果是否一致，判斷圓環狀外觀是否確實與 HLS 達成平衡，再進一步估算珊瑚微型環礁記錄 HLS 的誤差。

全站儀測量結果（附錄一）摘要如圖 4-2 所示，最外圍圓環相對於平均海水面高 $13.7 \pm 1.1 (2\sigma)$ 公分，第二層圓環的高度為 $8.9 \pm 1.8 (2\sigma)$ 公分，最內側圓形平面的高度為 $1.4 \pm 2.6 (2\sigma)$ 公分，顯示在每個圓環狀外觀形成時，珊瑚微型環礁確實與 HLS 達成平衡。

LKM302 最低的內側圓環測量結果範圍較大，其原因可能為該圓環四周圍被較高的第二層圓環所圍繞，形成一個易積水與沉積沙石的形貌，使得測量高程時較難辨識平面的真實高度。考慮此誤差並非珊瑚微型環礁記錄 HLS 時所產生，並可以在觀察珊瑚微型環礁切片的 X 光影像時排除，本研究參考最外層與第二層的測量結果，估計此地單顆珊瑚微型環礁記錄 HLS 時之精度應落在 1 到 2 公分之間。

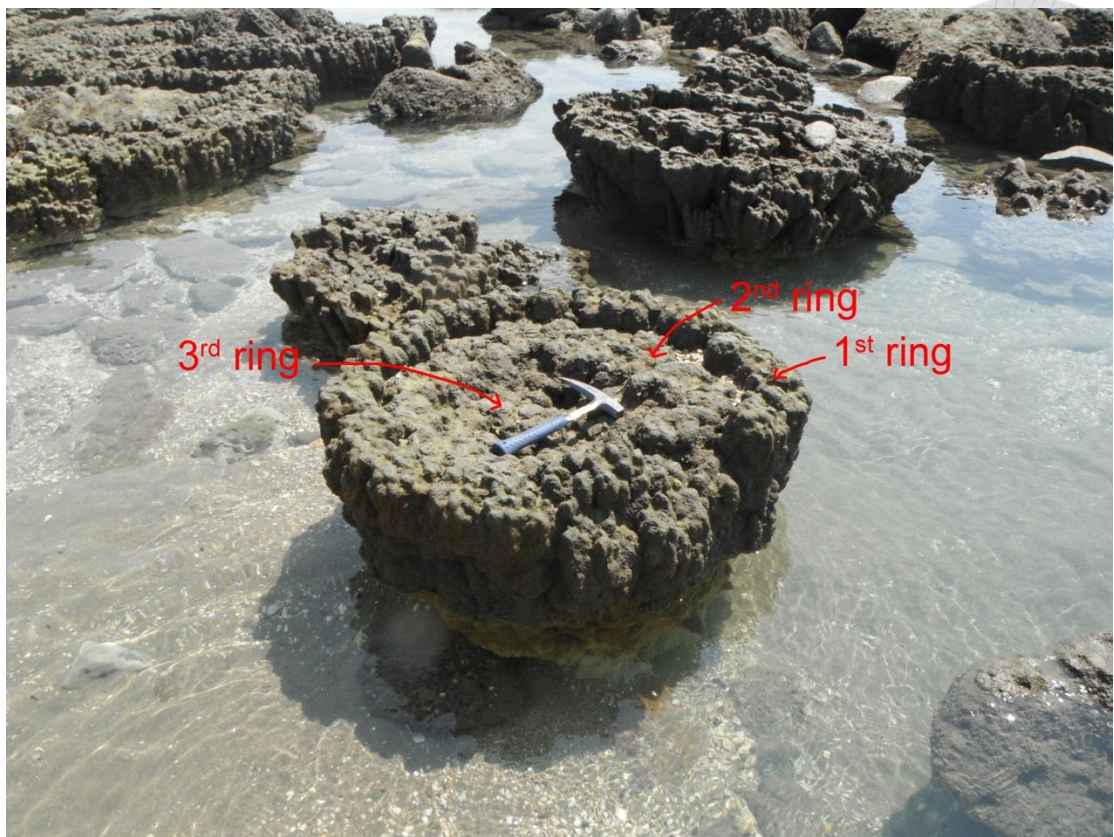


圖 4-1 樣本 LKM302 在形貌可見三層不同高度的圓環狀 Diedown 外觀。

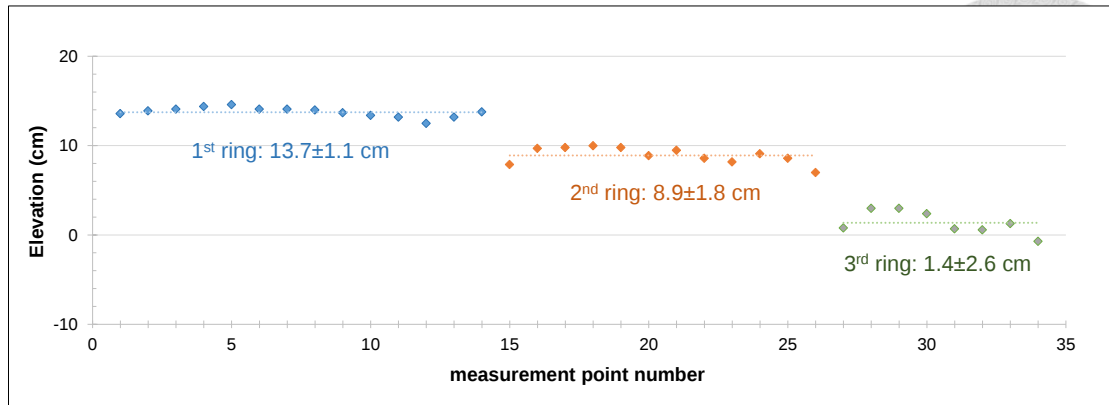


圖 4-2 樣本 LKM302 三層圓環狀 Diedown 外觀之全站儀測量結果。pt.1 到 pt.14 為最外圍圓環，平均高度相對於平均海水面高 13.7 公分，誤差 1.1 公分；pt.15 到 pt.26 為第二層圓環，平均高度相對於平均海水面高 8.9 公分，誤差 1.8 公分；pt.26 到 pt.34 為最內側圓形平面，平均高度相對於平均海水面高 1.4 公分，誤差 2.6 公分。

第二節 描繪 LKM302 生長形態



樣本 LKM302 為單一顆珊瑚微型環礁切片（圖 4-3），本研究針對此樣本所拍攝的 X 光影像如圖 4-4 所示。藉由辨識 X 光影像並輔以肉眼觀察樣本表面後，所描繪的珊瑚生長形態如圖 4-5 所示。圖 4-5 中標示為細黑色線段處為珊瑚的年生長紋，依據 X 光影像中淺色轉為深色的邊緣繪製，每間隔一對深淺條帶繪製一條。其中考量部分線段兩端延伸性不佳，或部分區域 X 光影像模糊不易判斷，改以細黑色虛線標示可能存在但無法肯定的年生長紋。粗紅色線段標示 Diedown 表面，依據 X 光影像中珊瑚生長不連續處，並輔以肉眼觀察樣本侵蝕面位置繪製，其中無法確認延伸關係者，亦以紅色虛線標示。

綜觀 LKM302 的年生長紋形貌可知，該珊瑚由中心向上並向外生長，過程中生長高度呈現逐年上升的趨勢，之間包含了 4 次珊瑚頂部露出水面部分死亡且受到侵蝕，而後從較低處繼續生長的 Diedown 特徵。為了進一步了解 LKM302 所記錄的相對海水面資訊，本研究以該珊瑚最外層的年生長紋作為高程基準，向內測量每層年生長紋的高度，重建珊瑚死亡前的每年相對海水面時間序列。

第三節 鈾釷定年結果與年代模式

為了建立 LKM302 所記錄的 HLS 與絕對年代的對應關係，本研究選定不同的 6 層年生長紋採樣測定其鈾釷年代(表 4-1)，其中定年樣本的 $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial corrected}}$ 數值皆落在海水初始值 146.0 ± 4.0 之內(Culter et al., 2003)，顯示樣本並未受到後期再結晶作用。若此群珊瑚死於西元 1848 年地震事件的同震抬升，便能視最外層的年生長紋年代為西元 1848 年，而向內計算年生長紋之層數所得到的相對



圖 4-3 珊瑚微型環礁樣本 LKM302。

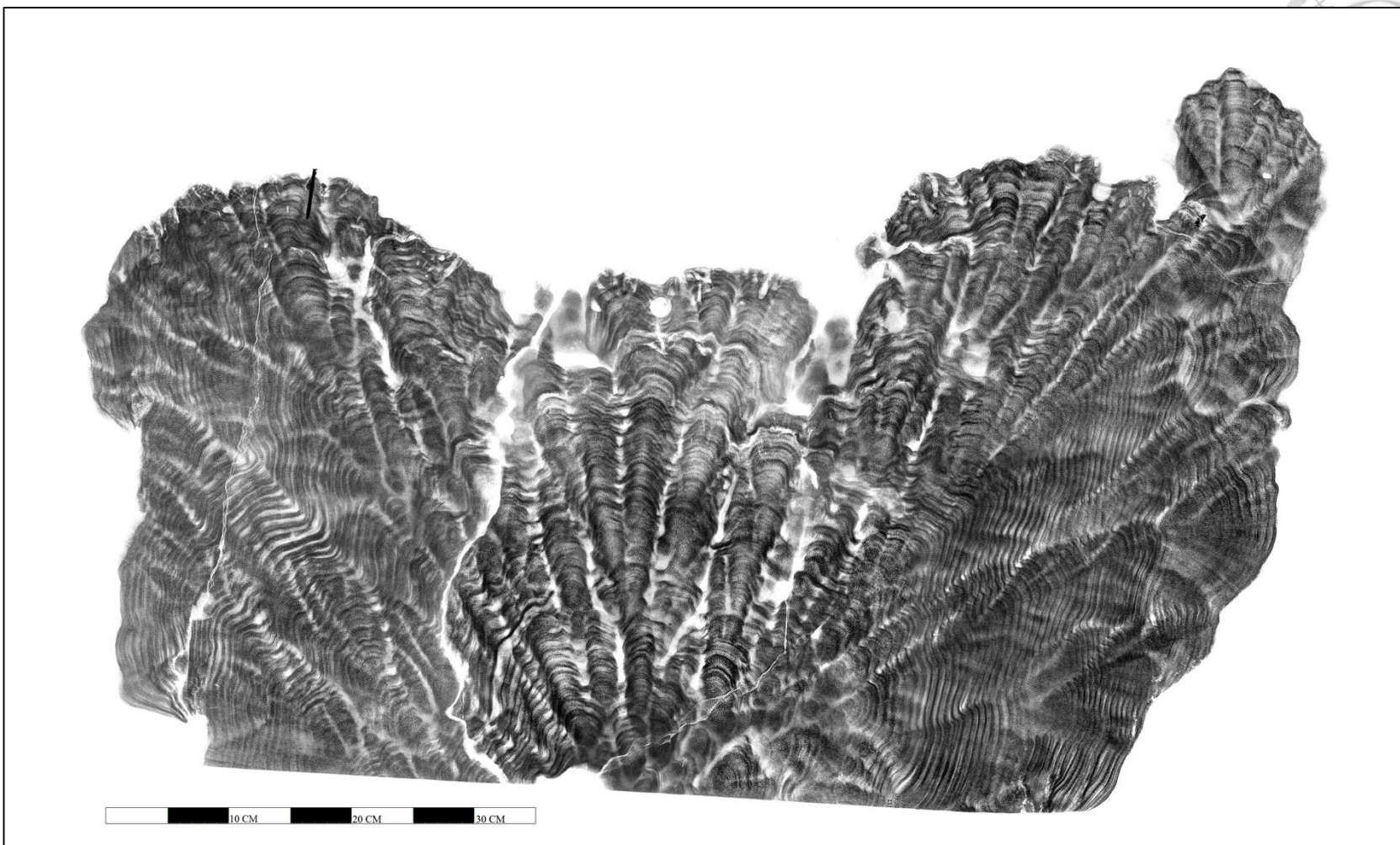


圖 4-4 樣本 LKM302 經曝光反轉的 X 光影像。

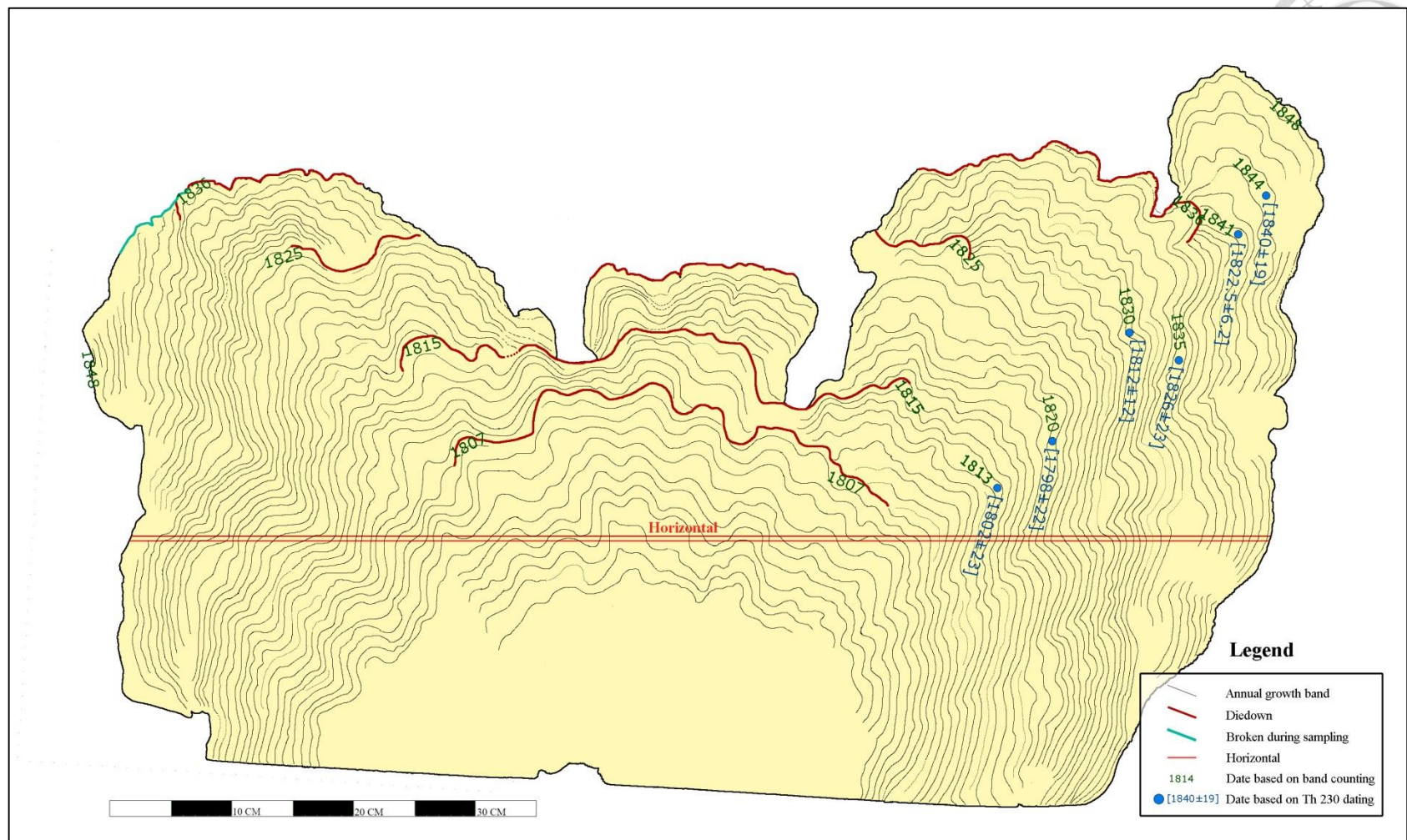


圖 4-5 樣本 LKM302 描繪結果、年生長紋相對年代與鈾釷定年結果。

表 4-1 Uranium and thorium isotopic compositions and ^{230}Th ages for coral samples by MC-ICPMS at HISPEC, NTU.

Sample ID	Weight g	^{238}U ng/g ^a	^{232}Th pg/g	$\delta^{234}\text{U}$ measured ^d	$[^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}]$ activity ($\times 10^{-6}$) ^c	$[^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}]$ atomic ($\times 10^{-6}$)	Age uncorrected	Age corrected ^{c,d}	Age (CE)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ corrected ^b
LKM302-1	0.12808	2594.1 $\pm$ 2.7	4070 $\pm$ 10	148.7 $\pm$ 1.2	0.002224 $\pm$ 0.000056	23.37 $\pm$ 0.59	211.3 $\pm$ 5.3	175 $\pm$ 19	1,840 $\pm$ 19	148.7 $\pm$ 1.2
LKM302-2	0.13939	2641.1 $\pm$ 3.3	5079 $\pm$ 11	147.1 $\pm$ 1.4	0.002458 $\pm$ 0.000052	21.07 $\pm$ 0.45	233.9 $\pm$ 5.0	189 $\pm$ 23	1,826 $\pm$ 23	147.2 $\pm$ 1.4
LKM302-3	0.02385	2765.2 $\pm$ 3.1	999 $\pm$ 20	141.8 $\pm$ 2.1	0.002114 $\pm$ 0.000048	96.5 $\pm$ 2.9	202.1 $\pm$ 4.6	193.8 $\pm$ 6.2	1,822.5 $\pm$ 6.2	141.9 $\pm$ 2.1
LKM302-4	0.06832	2606.5 $\pm$ 2.8	2697.3 $\pm$ 8.1	146.4 $\pm$ 1.8	0.002395 $\pm$ 0.000036	38.16 $\pm$ 0.58	228.0 $\pm$ 3.4	204 $\pm$ 12	1,812 $\pm$ 12	146.5 $\pm$ 1.8
LKM302-5	0.14480	2690.1 $\pm$ 3.0	5066 $\pm$ 11	144.5 $\pm$ 1.8	0.002745 $\pm$ 0.000042	24.03 $\pm$ 0.37	261.8 $\pm$ 4.0	218 $\pm$ 22	1,798 $\pm$ 22	144.5 $\pm$ 1.9
LKM302-6	0.23337	2907.4 $\pm$ 3.5	5626 $\pm$ 13	144.7 $\pm$ 1.9	0.002711 $\pm$ 0.000045	23.10 $\pm$ 0.39	258.5 $\pm$ 4.3	214 $\pm$ 23	1,802 $\pm$ 23	144.8 $\pm$ 1.9

Analytical errors are 2s of the mean.

^a $[^{238}\text{U}] = [^{235}\text{U}] \times 137.77 (\pm 0.11\%)$ (Hiess et al., 2012); $d^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$.

^b $d^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ corrected was calculated based on ^{230}Th age (T), i.e., $d^{234}\text{U}_{\text{initial}} = d^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{1234 \times T}$, and T is corrected age.

^c $[^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} = 1 - e^{-12307} + (d^{234}\text{U}_{\text{measured}}/1000)[(1 - e^{-12307})/(1 - e^{-12347})]$, where T is the age.

Decay constants are $9.1705 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ for ^{230}Th , $2.8221 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ for ^{234}U (Cheng et al., 2013), and $1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ for ^{238}U (Jaffey et al., 1971).

^dAge corrections, relative to chemistry date between October 2015 and March 2016, were calculated using an estimated atomic $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ratio of $4 (\pm 2) \times 10^{-6}$ (Shen et al., 2008).

年代，應與鈾釷年代相符。

在圖 4-5 中，以墨綠色數字分別標示由珊瑚左右兩側向內計算生長紋所推算出之年代，兩側計算結果一致顯示樣本 LKM302 生長時具有良好的對稱性。以藍色點標示採樣點位置，並以藍色數字標示鈾釷年代與定年誤差。將鈾釷年代與年生長紋相對年代比較後可見，樣本 LKM302-1、LKM302-2、LKM302-5 與 LKM302-6 的鈾釷年代與年生長紋相對年代相符，支持珊瑚樣本 LKM302 死於西元 1848 年地震同震抬升的假設。結合同生長紋之層數計算與鈾釷定年的結果，顯示 LKM302 記錄了西元 1848 年之前共 52 年的相對海水面記錄。

第四節 重建 LKM302 所記錄的相對海水面歷史

本研究分別統計樣本 LKM302 兩側所保存的年生長紋高程。在利用其他條件輔以判斷前，在此保守地將珊瑚年生長紋高程以最高生長面(HLG)描述。考量除構造活動的影響外，全球海水面於 19 世紀上升了 6 公分(Jevrejeva et al., 2008)的效應，同樣也會反應在珊瑚微型環礁的形貌上。因此為了探討現地相對海水面的變化，在缺乏更高解析度報導的情況下，本研究假設 19 世紀海面上升之平均速率為每年 0.6 公釐，並移除此海面上升效應對 HLG 的影響（附錄二）。

利用珊瑚生長形態描繪結果所得的年尺度 HLG 記錄，再校正全球海面上升的效應後，重建的相對海水面歷史如圖 4-6 所示。西元 1807 年之前珊瑚呈圓穹狀外觀，最高處的高度代表 HLG，以藍色菱形標示。於 1807 年發生的 Diedown 事件使珊瑚頂面局部死亡，以藍色正方形標示 Diedown 發生前的 HLG，並以橘色與綠色短直線區分 Diedown 在珊瑚左右兩側所影響的高度。Diedown 事件過後兩側珊瑚 Diedown 之下活著的部分繼續生長，由於兩側高度並不完全相同，分

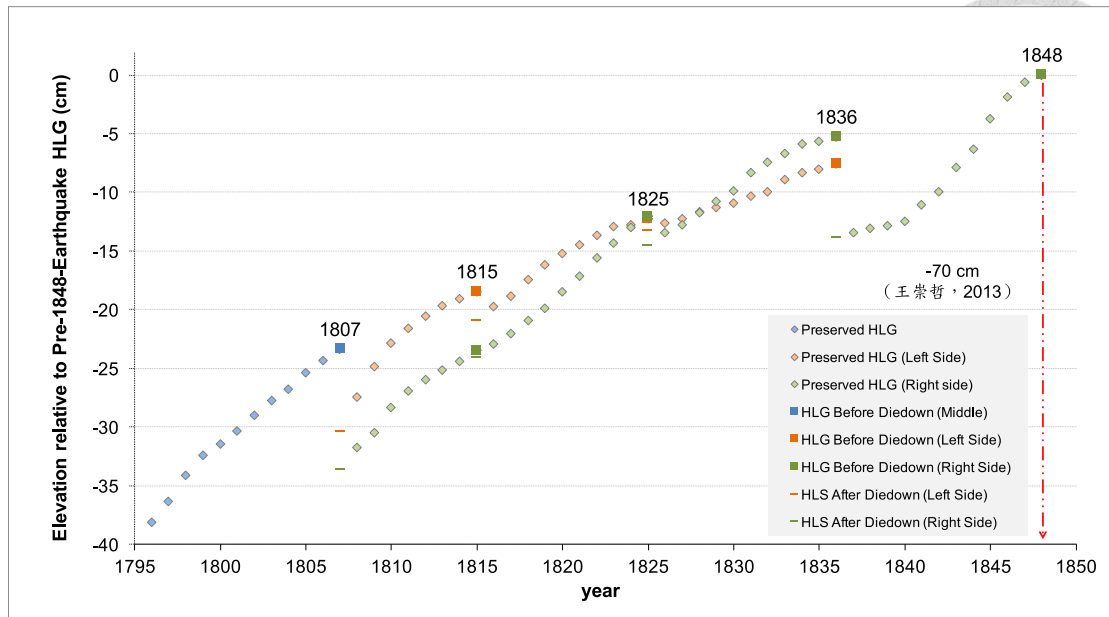


圖 4-6 利用 LKM302 記錄所重建的相對海水面歷史。

別以橘色與綠色菱形表示 Diedown 過後左右兩側的 HLG。直到西元 1815 年發生的另一次 Diedown 事件，同樣造成珊瑚頂面局部死亡，分別以橘色與綠色正方形標示 Diedown 發生前左右兩側的 HLG，並以橘色與綠色短直線區分 Diedown 於左右兩側影響的高度。

自西元 1815 年的 Diedown 事件後到西元 1848 年地震事件間，樣本 LKM302 陸續記錄到西元 1825 年與 1836 年兩次的 Diedown 事件。西元 1836 年的 Diedown 事件後到西元 1848 年間，由於 LKM302 左側破碎而缺失記錄，僅有右側樣本能夠提供 HLG 資訊。

第五節 描繪 LKM115 生長形態

樣本 LKM115 為單一顆珊瑚微型環礁一側的局部切片（圖 4-7），圖 4-8 為本研究針對 LKM115 拍攝的 X 光影像，依循本章第二節所描述方式描繪此 X 光影像後，描繪的 LKM115 生長形態結果如圖 4-9 所示。

由描繪結果可見 LKM115 的生長特徵與 LKM302 相似，呈現由內向上與向外生長的形態，過程中亦經歷了 2 到 3 次的 Diedown 事件。在 LKM115 向上的生長軸方向上，樣本上半部有兩次明顯的 Diedown 事件，其中較早的一次被採樣時的切面截切，無法確認其延伸性而以問號標示。樣本下半部的生長軸方向上則有一侵蝕面，由於筆者無法判斷其是否為生長時經歷的 Diedown 事件所形成，同時也被採樣時的切面截切，故也以虛線與問號標示。



圖 4-7 珊瑚微型環礁樣本 LKM115。

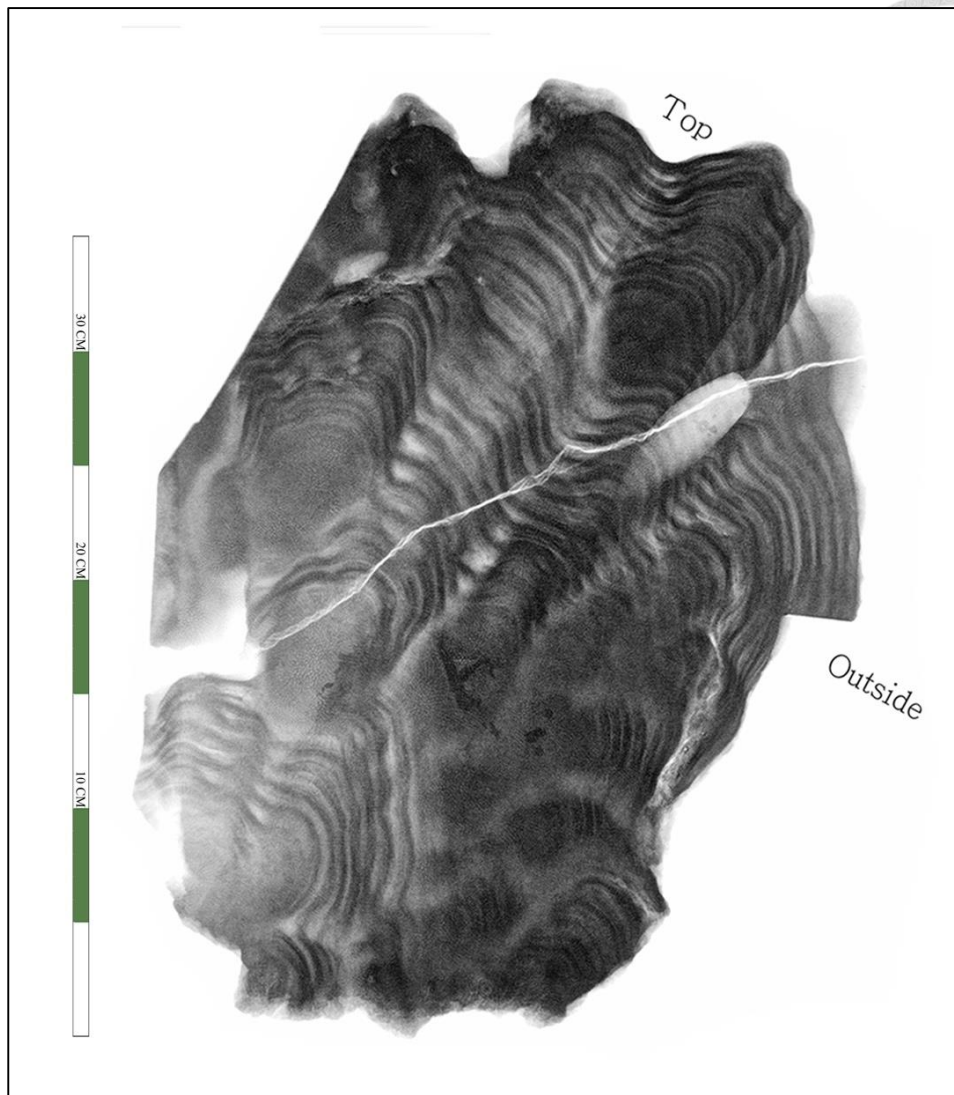


圖 4-8 樣本 LKM115 經曝光反轉的 X 光影像。

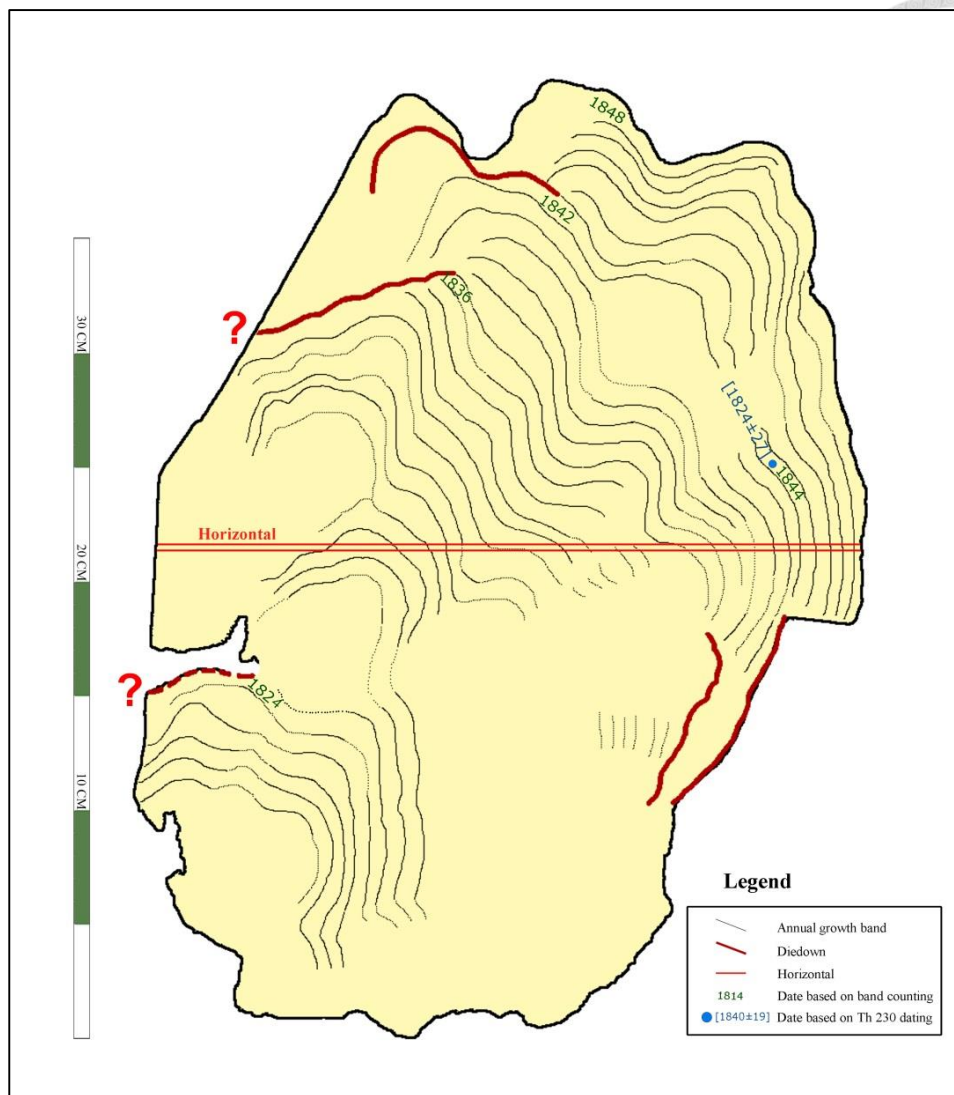


圖 4-9 樣本 LKM115 描繪結果、年生長紋相對年代與鈷釷定年結果。

第六節 重建 LKM115 所記錄的相對海水面歷史



王崇哲(2013)曾經對該樣本選定的年生長紋層測定鈾釷年代，其採樣位置與定年結果標示於圖 4-9，與本研究年生長紋之層數計算之相對年代相符，顯示 LKM115 亦死於西元 1848 年地震事件，記錄了西元 1848 年之前共 30 年的相對海水面記錄（附錄二）。

依循本章第三節所描述之方式，重建的相對海水面歷史如圖 4-10 所示。除了標示珊瑚每年所記錄的 HLG 外，於西元 1824 年、1836 年與 1842 年分別標示了可能 Diedown 事件前後的 HLG 資訊。其中，西元 1824 年的侵蝕面無法肯定為 Diedown 事件，西元 1836 年的 Diedown 事件無法確認其側向延伸所影響的高度，在此分別以橘色圓形跟黑色交叉標示，與其他具有較高可信度的數據區別。

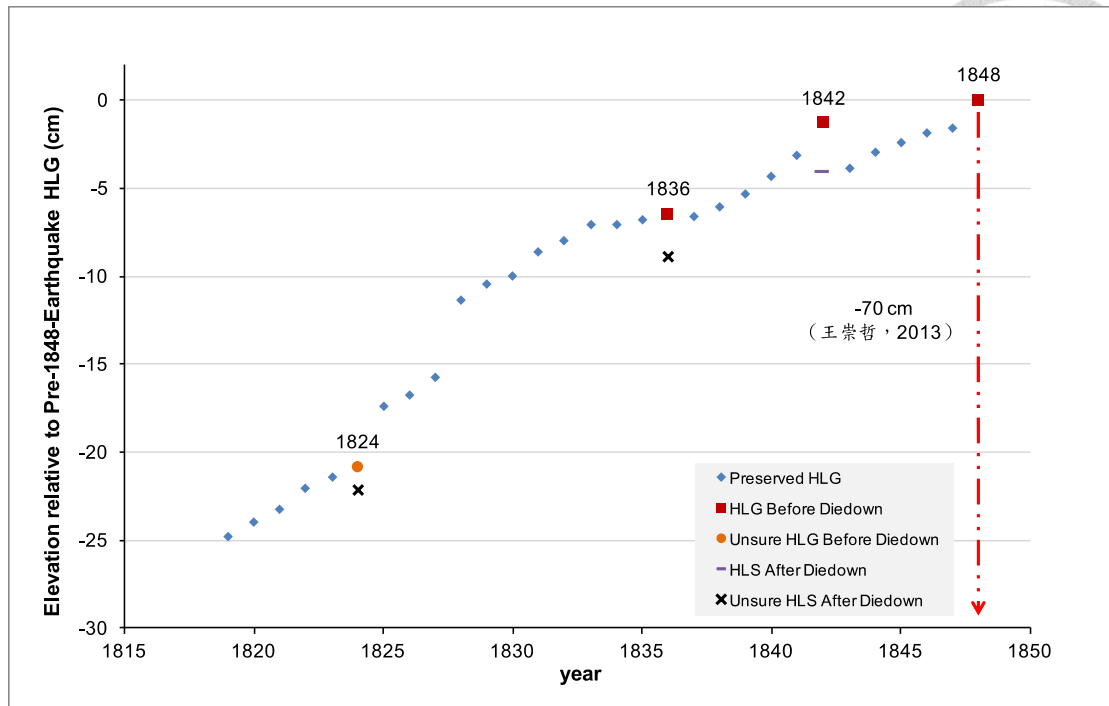


圖 4-10 利用 LKM115 記錄所重建的相對海水面歷史。

第五章 氧同位素分析結果



透過珊瑚年生長紋的觀察得知，在本研究所關注的數十年間，研究區域內發生了數次的海水面相對下降事件。由第二章之敘述可知，海水面相對變化事件除了構造活動外，也可能由氣候事件所導致，而珊瑚骨骼氧同位素記錄所反應的表層海水溫度與鹽度變化，能協助我們辨識海水面相對下降時研究區域內的氣候特徵，因此，本研究亦對珊瑚微型環礁樣本進行氧同位素分析。

第一節 氧同位素分析數據

本研究針對樣本 LKM302 共取 443 個樣本分析其氧同位素，190 個樣本取自 A 段（圖 5-1），分析數據如圖 5-2 a 所標示，253 個樣本取自 B 段（圖 5-1），分析數據如圖 5-3 a 所標示（原始數據附於附錄三）。 $\delta^{18}\text{O}$ 數值落在 -4.4‰ 到 -7.1‰ 之間。

第二節 年生長紋層描繪與對比

為了建立 $\delta^{18}\text{O}$ 數據與年代之間的關係，本研究分別將 A、B 兩段樣本的可見光影像（圖 5-2 b、圖 5-3 b）、X 光影像（圖 5-2 c、圖 5-3 c）與 $\delta^{18}\text{O}$ 的季節性週期訊號對比。以藍色細線繪製年生長紋的形態，並利用珊瑚板狀樣本上記錄到的 4 次 Diedown 事件在側向的延伸關係，以紅色粗線標示 Diedown 事件於 A、B 兩段樣本對應到的年生長紋層位。結果顯示，A、B 兩段樣本的數據共記錄了珊瑚死前 45 年的訊號，同時涵蓋珊瑚形貌上所觀察到的 4 次 Diedown 事件。

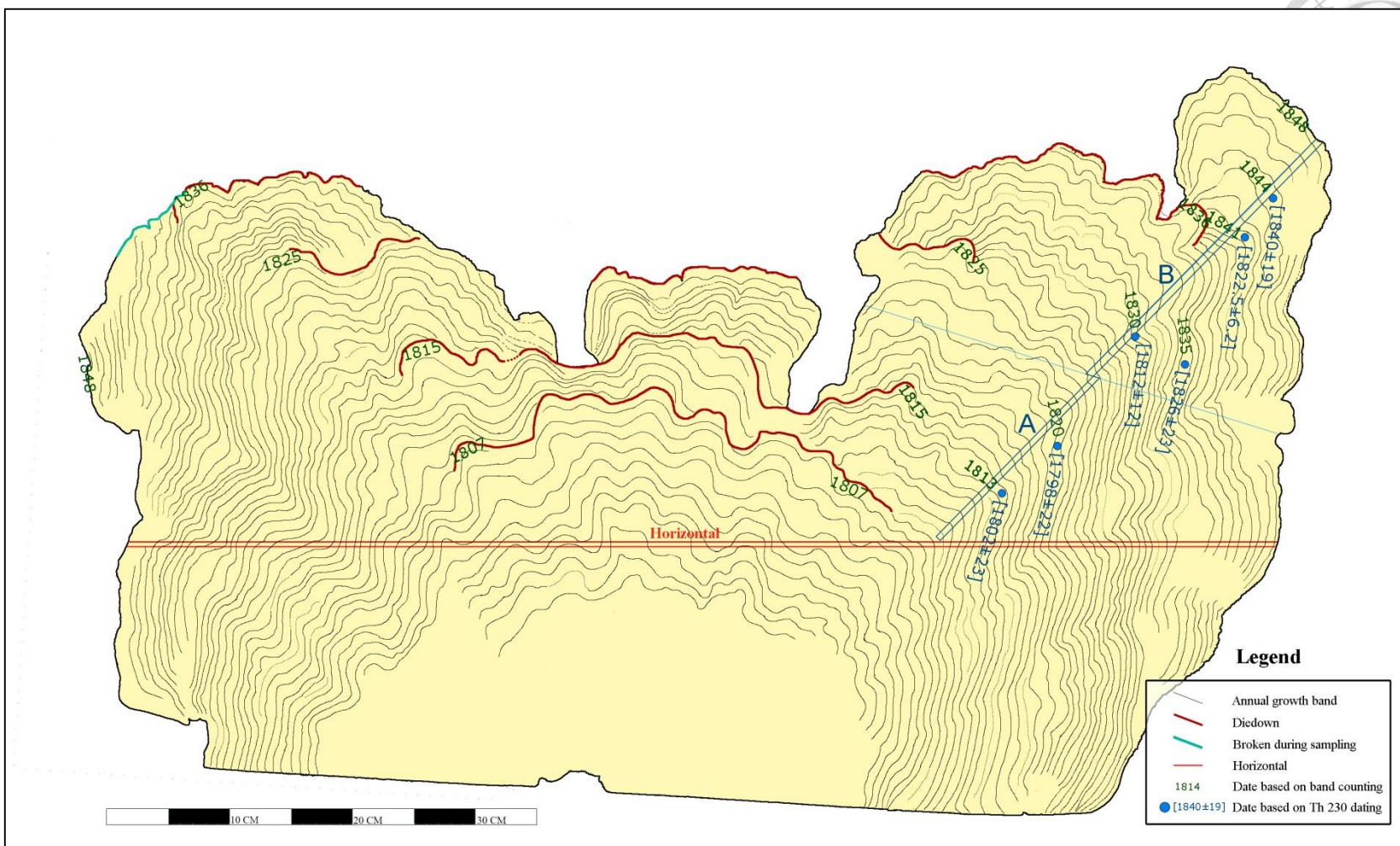


圖 5-1 氧同位素樣本採樣位置。

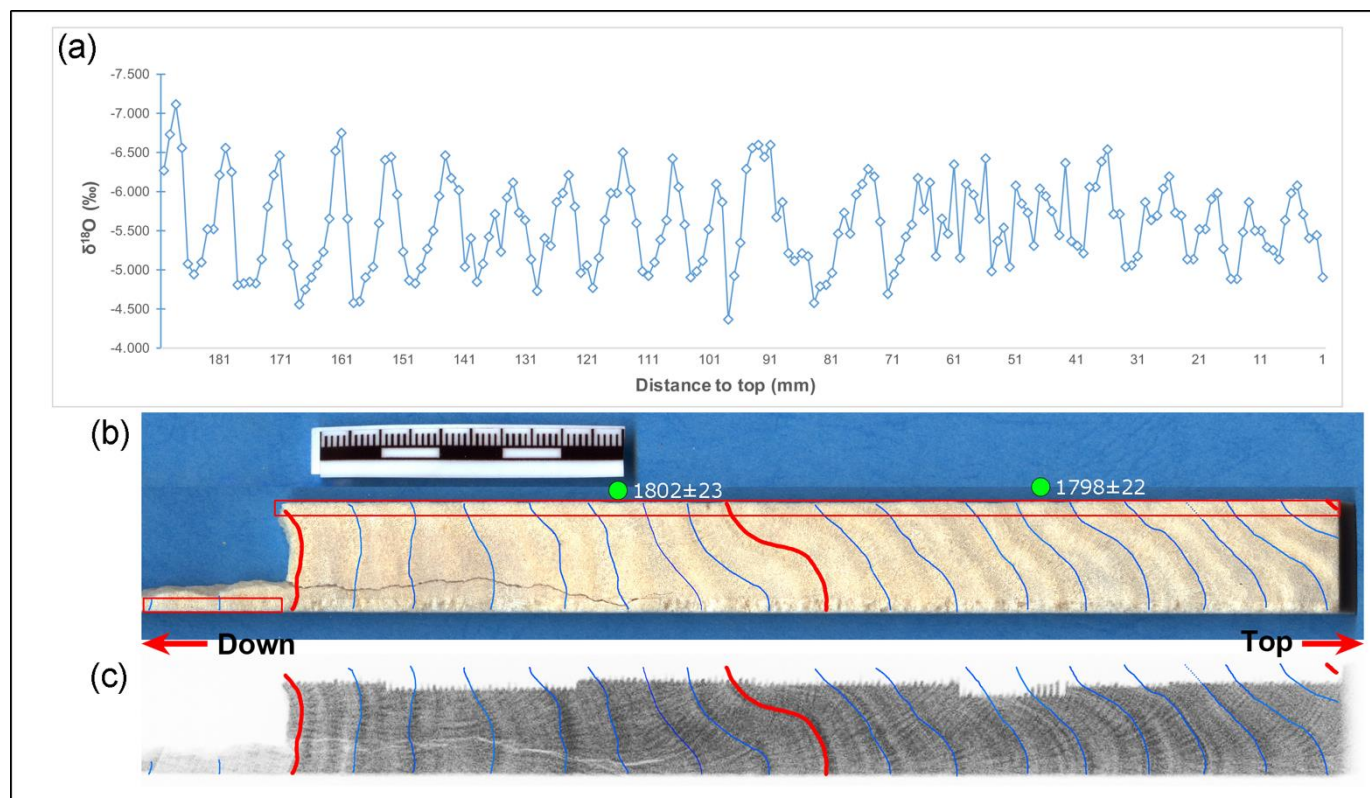


圖 5-2 樣本 LKM302 下部 A 段。(a) 氧同位素分析數據；(b) 於可見光影像上描繪之年生長紋及 Diedown 結果；(c) 於經曝光反轉的 X 光影像上描繪之年生長紋與 Diedown 結果。

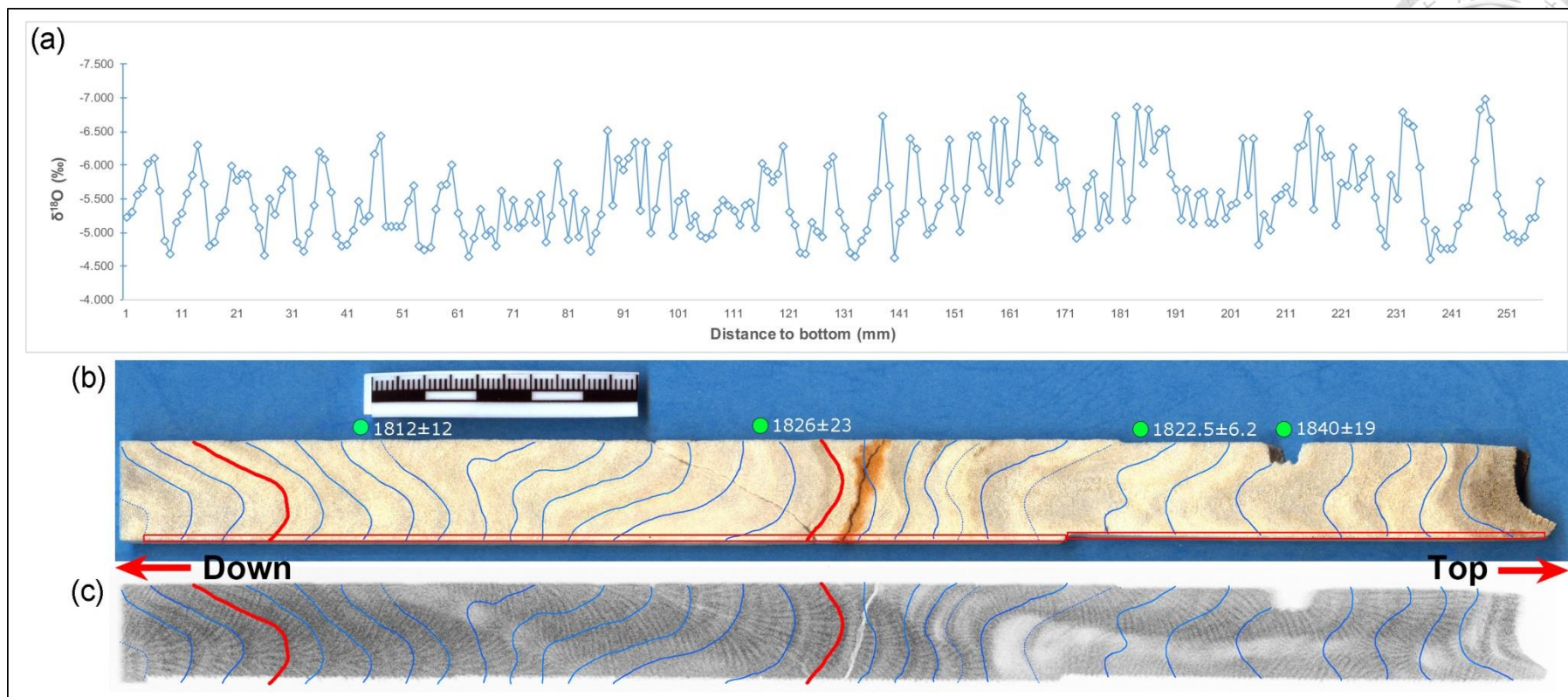


圖 5-3 樣本 LKM302 上部 B 段。(a) 氧同位素分析數據；(b) 於可見光影像上描繪之年生長紋及 Diedown 結果；(c) 於經曝光反轉的 X 光影像上描繪之年生長紋與 Diedown 結果。

第三節 氧同位素數據年代模式

結合第四章鈾釷定年結果與本章氧同位素分析數據、年生長紋描繪與對比結果，本研究重建了樣本 LKM302 於西元 1803 年至 1848 年之間所記錄的 $\delta^{18}\text{O}$ 數據（圖 5-4），同時涵蓋 4 次 Diedown 事件發生的年生長紋層位，事件年代分別對應於西元 1805-06 年、1813-14 年、1823-24 年、以及 1834-35 年。



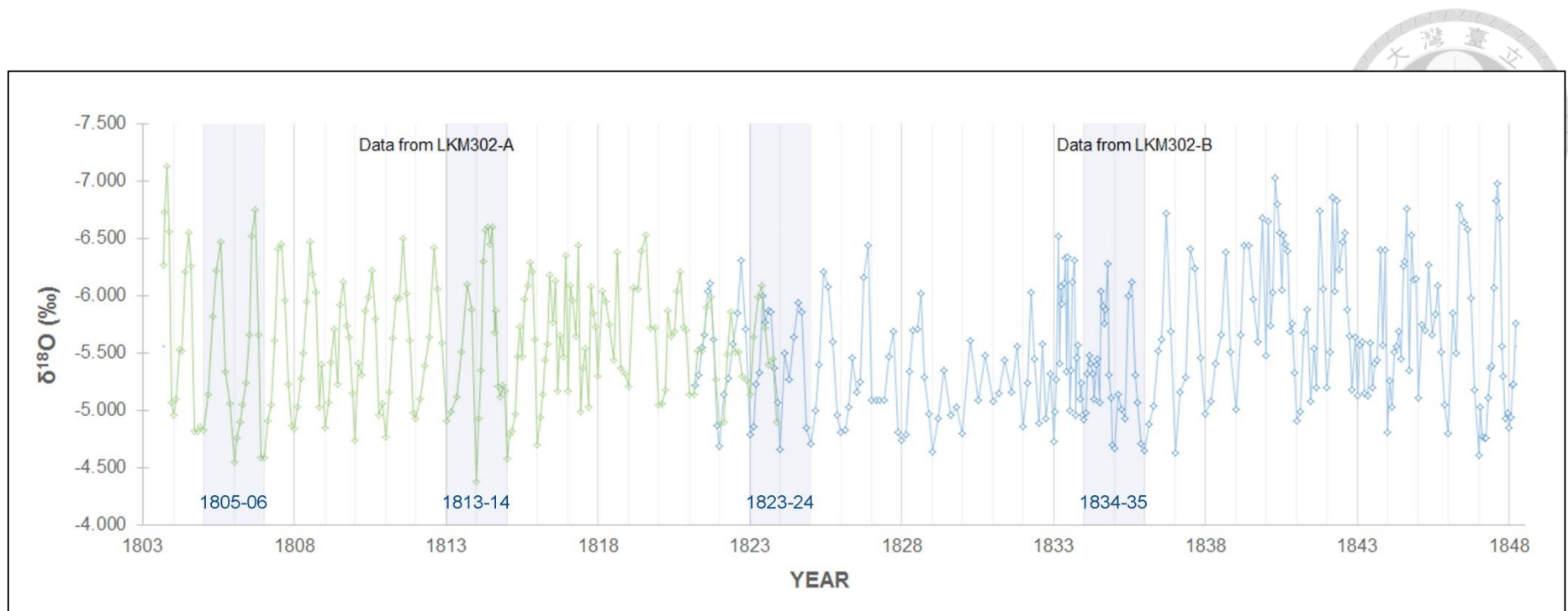


圖 5-4 重建西元 1803 年至 1848 年間共 45 年的 $\delta^{18}\text{O}$ 數據。綠色菱形標示的為 LKM302-A 之分析結果，藍色菱形標示的為 LKM302-B 之分析結果。紫色色塊標示了 4 次 Diedown 事件年生長紋層位所對應的年代，依序分別為西元 1805-06 年、西元 1813-14 年、西元 1823-24 年、以及西元 1834-35 年。

第六章 海階階面調查結果



為了解 LKM 現地的長期抬升速率，本研究亦針對王崇哲(2013)於 LKM 所提出的四階海階進行調查。海階由低到高依序為 Terrace I、Terrace II、Terrace III 與 Terrace IV，本研究透過野外觀察、測量與採樣，推測海階海岸線角的高度，結合前人與本研究在海階沉積物中採得珊瑚碎塊的鈾釷定年結果，估計海階形成的年代，並計算此地的長期抬升速率。

第一節 野外觀察

LKM 海階階面上皆覆蓋受風化的土壤層。王崇哲(2013)觀察位在 Terrace I 上的水井與槽溝指出，土壤層之下分別為細砂與粗砂夾細礫石所組成之沉積。另一方面，Terrace IV 上出露的土壤剖面中可觀察到珊瑚碎塊、貝殼與牡蠣，王崇哲(2013)於此階面上一受侵蝕而下切形成的河道中，採集到珊瑚碎塊樣本 LKM215、LKM216、LKM217，本研究直接於階面上採得珊瑚樣本 LKM569，於另一下切河道中的土壤剖面中採得珊瑚樣本 LKM570。綜合上述觀察，推測此處海階階面沉積物主要由海相物質所構成，而後風化形成土壤。

在海階階面沉積物之下，本研究並未發現底岩出露，但海岸邊現生海蝕平台有向西傾的砂岩地層出露，附近較高的山脊主要也以砂岩地層所構成。同時蘭裏島西部的地形主要受到構造抬升影響，而蘭裏島中部西海岸 Zin-Chaung 地區的海階形態，是由僅約 0.5 公尺厚的海相沉積物堆積在抬升的海蝕平台之上所形成 (Wang et al., 2013)。綜合上述，推測此處海階發育應為以砂岩為底岩的海蝕平台形成後，堆積海相沉積物再經構造抬升而成。

由於缺乏底岩與沉積物邊界的觀察，本研究透過沉積物厚度的觀察，推測底岩可能的深度。王崇哲(2013)於 Terrace I 對水井側壁與槽溝剖面的觀察指出，在階面之下 0.8 公尺處仍為海相沉積物，顯示該處海階底岩應不淺於階面之下 0.8 公尺；另一方面，Terrace IV 上的河道高程較該階地面低約 3.0 公尺，而河道旁出露的剖面並未發現底岩，顯示該處海階底岩可能不淺於階面之下 3.0 公尺。

第二節 高程測量與地質剖面

本研究利用 RTK-GPS 測量海階階面與樣本的高程，測量點位在空間上的分布如圖 3-2 白點所標示，測量數據可見附錄四。將測量結果投影至 B-B' 方向繪製地形剖面後，可以分辨出四個向海側傾斜的相異高度平面，分別對應王崇哲(2013)所提出的海階階面 Terrace I 到 Terrace IV (圖 6-1)。測量結果顯示，Terrace I 約比現地平均海水面(下同)約高 1.0 到 1.4 公尺，上覆現生的海岸沙丘；Terrace II 約高 4.1 至 4.4 公尺，上覆殘餘古沙丘；Terrace III 約高 6.0 至 6.2 公尺；Terrace IV 約高 10.8 至 11.4 公尺。

本研究推測在地形面之下，具有海階沉積物以及底岩形成的海蝕平台。若依照前人研究 (Burbank & Anderson, 2011；梁翠容，1990；蔡佳穎，2013) 假設底岩與海階沉積物的交界面以坡度 1° 向海側傾斜，則底岩面將會與海階地形面斜交而出露地表，與野外觀察不符，故本研究選擇以地形面坡度假設為底岩坡度，並以海階階崖(terrace riser)與海蝕平台交會的位置，假設為海岸線角的位置。

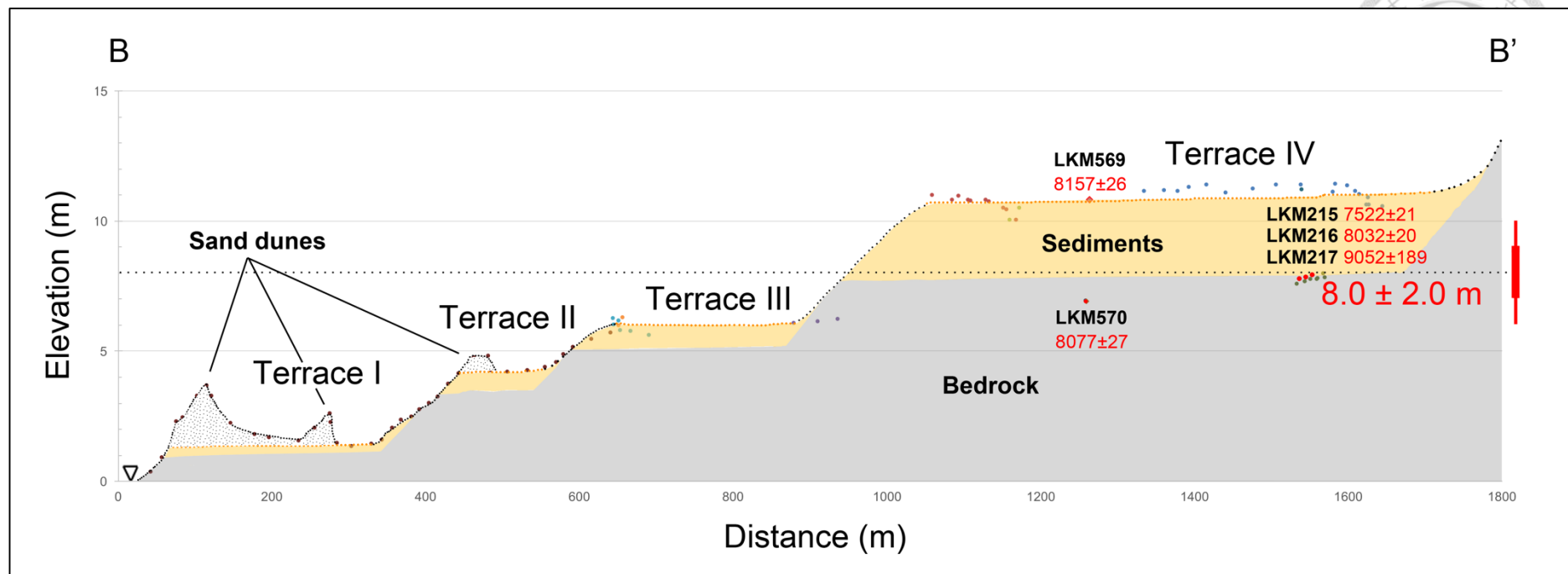


圖 6-1 LKM 地區海階地形測量投影結果與地質剖面示意圖。

第三節 鈾釷定年結果



王崇哲(2013)於第四階海階採集的珊瑚碎塊樣本 LKM215、LKM216、LKM217，鈾釷年代分別為 7522 ± 21 、 8032 ± 20 、 9052 ± 189 年前（相對於西元 2013 年）。本研究於同一海階採集的珊瑚樣本 LKM569、LKM570，鈾釷年代分別為 8157 ± 26 年前與 8077 ± 27 年前（相對於西元 2015 年，表格 6-1）。

第四節 LKM 長期抬升速率

本研究利用海階海岸線角的高度做為指示古海水面的指標，估計海階的垂直抬升量。前人在蘭裏島的調查顯示，此處現生海岸線角的高度較平均較高潮面 (mean higher high water, MHHW) 高約 20 公分 (Wang et al., 2013)，即平均海水面上約 1.2 公尺。

由地質剖面可見，Terrace IV 的海岸線角高度為 8.0 公尺，上覆沉積物厚約 3.0 公尺。若考慮該處並未觀察到底岩出露，沉積物厚度可能厚於 3.0 公尺，而海岸線角的高度會低於 8.0 公尺；另一方面，考慮前人於 Zin-Chaung 地區（圖 6-2）的觀察指出，該處海階前緣處沉積物厚度僅厚約 0.5 公尺 (Wang et al., 2013)，假設於海岸線角位置沉積物厚度應不大於 1.0 公尺，則 Terrace IV 的海岸線角約為 10.0 公尺高。綜合上述，本研究試以 2.0 公尺為誤差範圍估計 Terrace IV 的海岸線角高度，即 8.0 ± 2.0 公尺，較現生海岸線角指示的高度高 6.8 ± 2.0 公尺。

基於階面沉積物堆積於海蝕平台形成之後的假設，本研究利用沉積物中珊瑚的年代估計沉積物的可能堆積年代，並將此假設為海階面與海岸線角的形成年代。Terrace IV 上定年數據如圖 6-1 所標示，顯示階面最晚可能形成於 7522 年之前（相

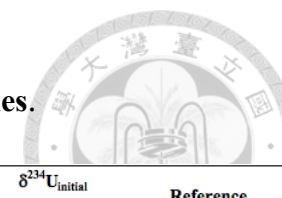


表 6-1 Uranium and thorium isotopic compositions and ^{230}Th ages for LKM terrace coral samples.

Sample ID	Weight g	^{238}U ppb ^a	^{232}Th ppt	$\delta^{234}\text{U}$ measured ^a	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]$ activity ^c	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{232}\text{Th}]$ ppm ^d	Age uncorrected	Age corrected ^{c,e}	Age (CE)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ corrected ^b	Reference
LKM215	0.09303	2392.0 ± 2.4	660.6 ± 7.5	146.9 ± 1.7	0.07654 ± 0.00017	4576 ± 53	7,532 ± 21	7,522 ± 21	-5,510 ± 21	150.0 ± 1.7	王, 2013
LKM216	0.10505	2150.0 ± 1.9	47.5 ± 6.6	145.1 ± 1.4	0.08133 ± 0.00017	60811 ± 8489	8,033 ± 20	8,032 ± 20	-6,020 ± 20	148.4 ± 1.5	王, 2013
LKM217	0.16903	2700.4 ± 2.3	19902 ± 78	147.4 ± 1.5	0.09390 ± 0.00080	210.4 ± 2.0	9,307 ± 84	9,052 ± 189	-7,040 ± 189	151.2 ± 1.5	王, 2013
LKM569	0.02115	2374.3 ± 3.6	643 ± 14	139.5 ± 1.6	0.08234 ± 0.00021	5011 ± 110	8,167 ± 25	8,157 ± 26	-6,142 ± 26	142.8 ± 1.6	this study
LKM570	0.02357	2327.2 ± 4.0	350.9 ± 8.7	143.1 ± 1.7	0.08178 ± 0.00023	8943 ± 222	8,082 ± 27	8,077 ± 27	-6,062 ± 27	146.4 ± 1.8	this study

Analytical errors are 2s of the mean.

^a $[\text{}^{238}\text{U}] = [\text{}^{235}\text{U}] \times 137.77 (\pm 0.11\%)$ (Hiess et al., 2012); $\delta^{234}\text{U} = ([\text{}^{234}\text{U}/\text{}^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$.

^b $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ corrected was calculated based on ^{230}Th age (T), i.e., $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{(\lambda^{234}\text{U} - \lambda^{230}\text{Th})T}$, and T is corrected age.

^c $[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]_{\text{activity}} = 1 - e^{-\lambda^{230}\text{Th}T} + (\delta^{234}\text{U}_{\text{measured}}/1000)(\lambda^{230}\text{Th}/(\lambda^{230}\text{Th} - \lambda^{234}\text{U}))(1 - e^{-(\lambda^{230}\text{Th} - \lambda^{234}\text{U})T})$, where T is the age.

Decay constants are $9.1705 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ for ^{230}Th , $2.8221 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ for ^{234}U (Cheng et al., 2013), and $1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ for ^{238}U (Jaffey et al., 1971).

^dAge corrections, relative to chemistry date between July 2012 and July 2015, were calculated using an estimated atomic $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ratio of $6 (\pm 4) \times 10^{-6}$ (Shen et al., 2008).



圖 6-2 蘭裏島北部至中部地區衛星影像。

對於西元 2013 年)，又樣本年代主要集中在 8032 年前至 8157 年前（相對於西元 2015 年）之間，故推測海階面形成最可能的年代為距今 7.5 ka 至 8.2 ka 之間。

若 Terrace IV 形成於 7.5 ka 至 8.2 ka 之間，估算長期抬升速率時則需考慮到當時全球海水面仍在經歷中全新世海進(Middle Holocene transgression)的過程，西印度洋東側的海水面約比現代低 3 至 4 公尺(Horton et al., 2005)。因此，海岸線角實際被抬升的高度應為 6.8 ± 2.0 公尺再加上 3 至 4 公尺，即 $9.8 \sim 10.8 \pm 2.0$ 公尺，如此計算出來的長期抬升速率會介在每年 1.0 到 1.7 公釐之間。

第七章 討論



第一節 珊瑚微型環礁生長形態的海水面意義

7.1.1 辨識最高生存面

本研究重建了珊瑚微型環礁樣本 LKM302 與 LKM115 記錄的相對海水面歷史，其中樣本 LKM302 左右兩側分別有獨立的統計結果（圖 4-5），考量珊瑚的最高生長面(HLG)應為當下珊瑚生長所達到的最高高度，故當左右兩側對應的年生長紋高度不相同時，本研究認為高度較高的一側應較可代表該年的 HLG（標示為 Preserved HLG）。

為探討震間活動與 Diedown 事件的特性，需要進一步辨識珊瑚所記錄的 HLG，是否可代表其最高生存面(HLS)，而 Diedown 事件所造成的珊瑚形貌或可協助判斷。本研究判斷並標示出 HLS 的相對海水面歷史如圖 7-1 所示。在樣本 LKM302 記錄的相對海水面歷史中可見四次 Diedown 事件，於相對海水面下降使珊瑚頂部局部死亡後，存活下來的珊瑚高度應可代表 HLS（標示為 HLS After Diedown）。

而在兩次 Diedown 事件之間，珊瑚的生長速率也可指示珊瑚與 HLS 間達成平衡的資訊。以西元 1807 到 1815 年間為例，在 1807-08 年的 Diedown 後，珊瑚的生長速率可以區分為兩個時期：珊瑚先由 HLS After Diedown 的高度開始以較高的生長速率向上生長，此時期持續到 1811 年後，轉為較緩慢但穩定的生長速率直到 1815-16 年的 Diedown 發生。這種生長模式的改變，推測指示珊瑚由未受到 HLS 限制可以自由生長的狀態，高度逐漸達到 HLS 而開始受到限制的過程，因此第二個時期觀察到的生長高度應能夠代表當時的 HLS（標示為 HLS

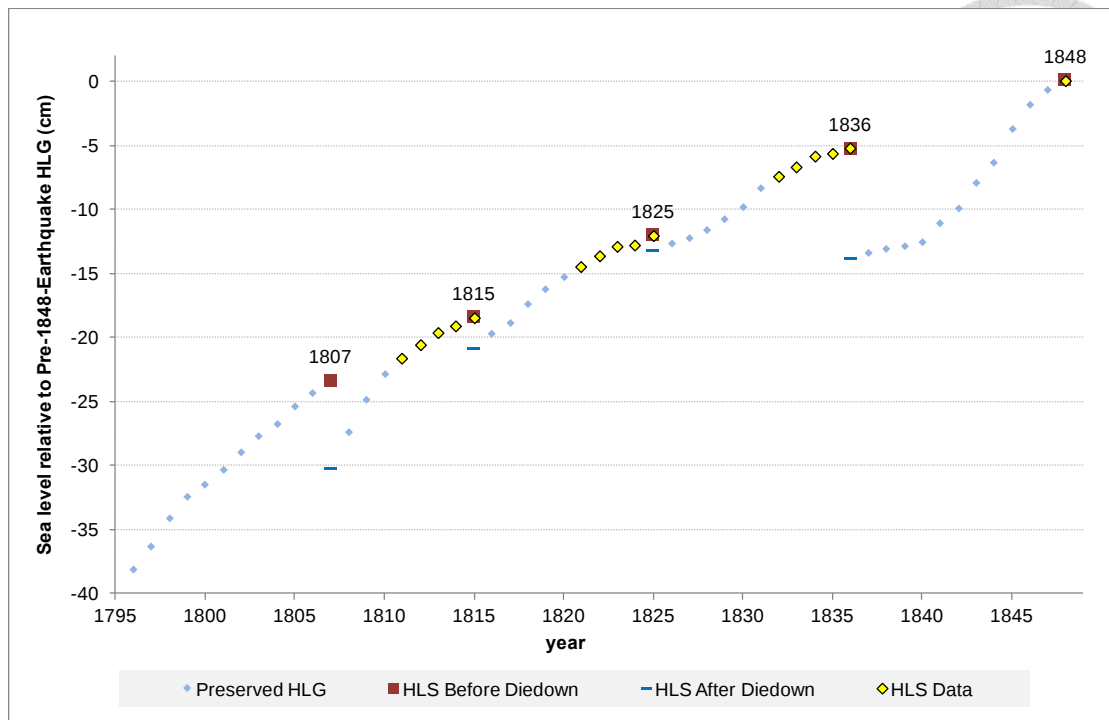


圖 7-1 樣本 LKM302 的相對海水面歷史。

Data)。此兩段式的生長模式亦可以在西元 1815 到 1825 年間與 1825 到 1836 年間觀察到，提供 Diedown 發生前數年的 HLS 資訊。樣本 LKM302 的記錄中，僅在西元 1836-37 年 Diedown 後出現了較不一樣的生長模式。推測當時珊瑚的生長可能同時受到幾何形態上的限制而僅能向側邊生長(圖 4-4)，而後花了約 4 年的時間才越過 1836-37 年 Diedown 的侵蝕面，形成可自由向上生長的頂面，故本研究仍以 HLG 描述該段時間珊瑚的生長高度。

在樣本 LKM115 記錄的相對海水面歷史中可見(圖 4-8)，西元 1833 年之前珊瑚呈現較快的生長速率，於 1833 年開始趨緩，直到 1836-37 年的 Diedown 發生；在西元 1836-37 年的 Diedown 過後，珊瑚維持 Diedown 前的生長速率，於西元 1840 到 1842 年間轉為較高的生長速率，直到西元 1842-43 年經歷了另一次的 Diedown 事件後，再回到 1840 年之前的生長速率。根據上述推測，在 1833 至 1840 年與 1842 到 1848 年間，珊瑚的生長與 HLS 達成平衡。故本研究標示出 HLS 的相對海水面歷史如圖 7-2 所示。

7.1.2 Diedown 事件特性

辨識珊瑚所指示的 HLS，能讓我們了解 Diedown 事件發生時，相對海水面變化過程的特性。

在圖 7-1 中可見，樣本 LKM302 記錄到 Diedown 事件相對海水面下降的規模範圍在 1.2 到 8.6 公分之間，事件間隔則落在 8 到 12 年之間。然而儘管樣本 LKM302 記錄到西元 1807-08、1815-16、以及 1825-26 年 Diedown 事件當年度的 HLS (標示為 HLS After Diedown)，但在隨後的數年之中，珊瑚的向上生長卻皆未受到 HLS 的限制，並在 3 年之內就回到 Diedown 事件前的高度，指示造成 Diedown 的海水面下降事件應屬於暫時性的下降，而海水面在事件之後的 1 至 3

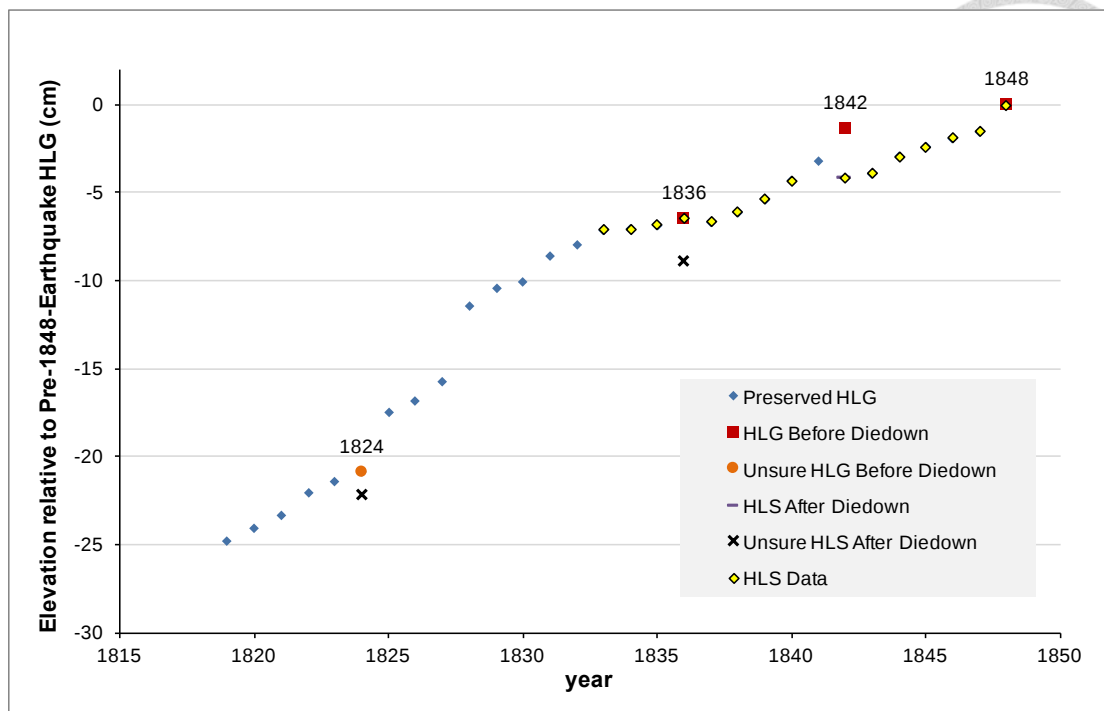


圖 7-2 樣本 LKM115 的相對海水面歷史。

年之內即回到事件發生前的高度。

另一方面，由圖 7-2 可見，樣本 LKM115 確實記錄到的相對海水面下降事件僅有西元 1842-43 年一次，其規模為 2.8 公分。在西元 1842-43 年 Diedown 事件之前的 1 到 2 年間，珊瑚短暫地脫離了 HLS 的限制，並在隨後的 1842-43 年 Diedown 事件後回到 1840 年之前的趨勢上，生長高度重新受到 HLS 的主導。推測於西元 1841 年至 1842 年間海水面曾短暫地相對上升提供珊瑚向上生長的空間，在 1842 年時海水面下降回上升事件前的高度，造成珊瑚形貌上的 Diedown。

第二節 Diedown 指示的印度洋偶極震盪事件

在研究區域所屬的孟加拉灣(Bay of Bengal)，導致海水面發生持續數月到數年異常的最可能原因為印度洋偶極震盪(Indian Ocean Dipole, IOD; Saji et al., 1999)事件。發生正向 IOD 事件(pIOD)時，印度洋的東側海水面較平常年低；而發生負向 IOD(nIOD)事件時，印度洋的東側海水面較平常年高。根據衛星測量資料，發生在西元 1996 到 1997 年的 pIOD 事件在緬甸西海岸造成了 5 到 10 公分的海水面下降(Han and Webster, 2001)，此規模與珊瑚 Diedown 記錄到的海水面變動規模相符。就頻率而言，前人研究(Rao et al., 2002)所統計的 IOD 事件記錄顯示，20 世紀以來 IOD 事件的發生間隔介在 3 到 12 年之間不等，亦與珊瑚記錄的 Diedown 事件間隔相近。

IOD 發生時除了海水面高度的異常外，亦伴隨著表層海水溫度(SST)與表層海水鹽度(SSS)的變化(Saji et al., 1999; Masson et al., 2004)，並會反應在珊瑚的氧同位素記錄上。發生 pIOD 事件時，印度洋東側的 SST 較平常年低、SSS 較平常年高，使珊瑚的 $\delta^{18}\text{O}$ 數值較平常年高；反之發生 nIOD 事件時，印度洋東側的

SST 較平常年高、SSS 較平常年低，使珊瑚的 $\delta^{18}\text{O}$ 較平常年低。

討論樣本 LKM302 的氧同位素分析結果（圖 7-3）前需要注意到，由於相對海水面歷史中的西元 1836-37 年 Diedown 到珊瑚最外圍之間，在氧同位素分析時獨立計算的年生長層層數共 14 層，較重建相對海水面歷史時多了 2 層，因此 LKM302 記錄到的四次 Diedown 事件在氧同位素結果中，對應到的年代與相對海水面歷史中出現了 2 年的差異，並非指示相異的事件。不過儘管如此，由於 Diedown 事件對應到氧同位素數據，是利用珊瑚板狀樣本上的 Diedown 形貌在側向的延伸關係所決定，因此事件對應西元紀年年代的不同，並不會影響到 Diedown 與氧同位素數據的對應關係。

針對氧同位素分析數據，若取每年之中 $\delta^{18}\text{O}$ 的最高值計算冬季平均，LKM302 記錄到的四次 Diedown 事件發生期間， $\delta^{18}\text{O}$ 數值皆高於冬季平均值，其中西元 1805-06 年、1813-14 年的兩次 Diedown 事件，期間的 $\delta^{18}\text{O}$ 數值皆高於冬季平均的 1 個標準差，推測應為 pIOD 事件發生時，較低的 SST 與較高的 SSS 所共同貢獻的結果。

另一方面，於樣本 LKM115 所觀察到的西元 1840 到 1842 年間相對海面上升的事件，由於重建年代模式時的誤差而無法良好的直接對應到 LKM302 的氧同位素數據中。但根據 $\delta^{18}\text{O}$ 數值，西元 1839 年的冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 比平常年低，幾乎接近平常年的平均值，同時 1840 年夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 低於夏季平均值 1 個標準差（取每年之中 $\delta^{18}\text{O}$ 的最低值計算夏季平均），故推測此相對海面上升的事件，應可以對應到西元 1839-40 年的氧同位素特徵，指示 nIOD 事件的發生。

前人研究(Gagan et al., 2015)在蘇門答臘地區珊瑚的氧同位素與形貌記錄中，發現西元 1802、1810 與 1818-19 年皆有 pIOD 事件的證據，可與本研究西元 1805-06、1813-14 與 1823-23 年的 Diedown 對比；而 Meltzner 等人(2015)亦在蘇

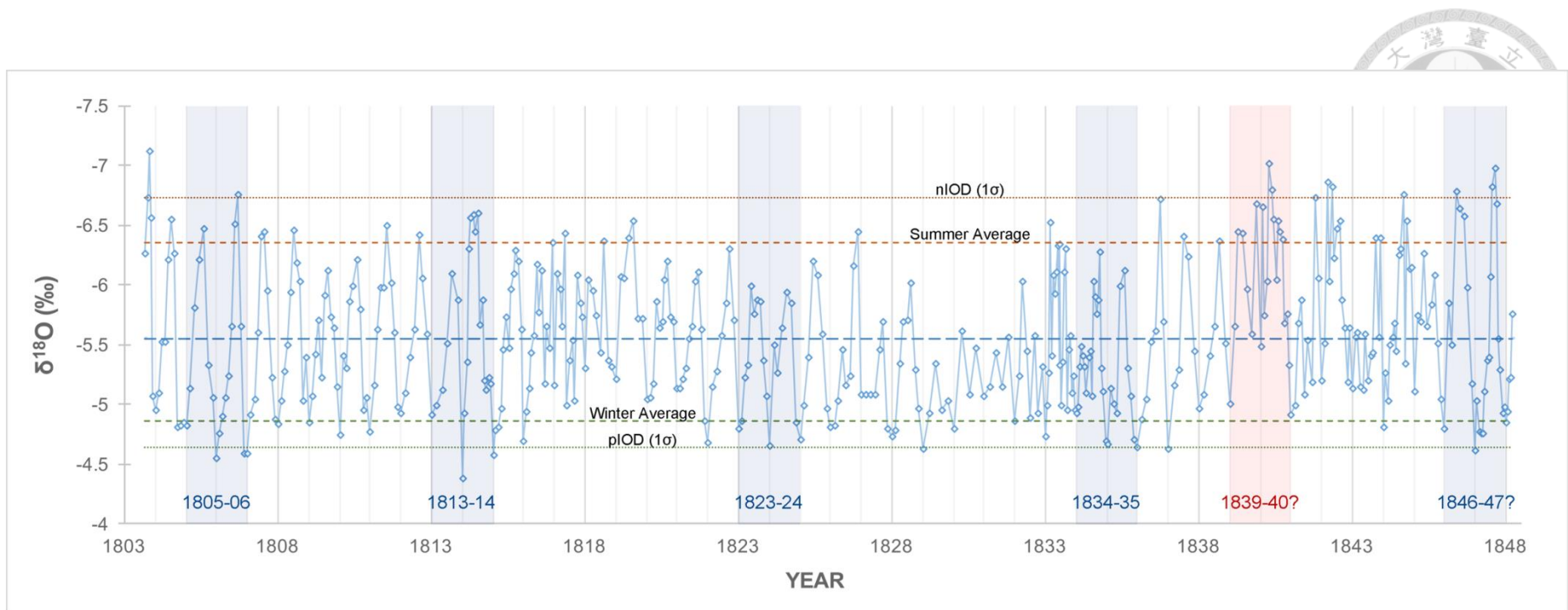


圖 7-3 樣本 LKM302 氧同位素結果與可能指示的 IOD 事件。

門達臘地區的珊瑚微型環礁的形貌記錄中，廣泛地發現西元 1847 年有 pIOD 所造成的 Diedown 形貌，儘管本研究並未在 LKM 地區的珊瑚微型環礁中觀察到對應的 Diedown 發生，但可能可以與氧同位素記錄中 1846-47 年 $\delta^{18}\text{O}$ 數值高於冬季平均的 1 個標準差的事件對比。而與前人研究所記載的時間對比事件年代的差異，可能源自於珊瑚微型環礁樣本其外圍 2 至 3 年的生長紋層剝落或侵蝕所致。

第三節 LKM 震間沉降速率

在推測數次的 Diedown 事件應為 IOD 伴隨的海水面異常，而非構造活動造成的抬升後，為進一步探討 LKM 現地的震間沉降速率，本研究假設樣本 LKM302 與樣本 LKM115 於西元 1848 年的高程相同，將兩樣本記錄的相對海水面歷史合併繪製（圖 7-4）以利對照。在西元 1811 到 1836 年間，樣本 LKM302 有較好的 HLS 控制，將其以最小平方法做一次迴歸後，得到此期間相對海水面上升速率為每年 6.5 公釐（橘色迴歸線， $R^2=0.9983$ ）；樣本 LKM115 則在西元 1833 到 1848 年珊瑚死亡前，有完整的 HLS 記錄，將其迴歸後得相對海水面上升速率為每年 4.6 公釐（綠色迴歸線， $R^2=0.9580$ ）。在排除全球海水面長期上升與區域海水面短期震盪的效應後，本研究推測此海水面對上升的現象，來自於隱沒帶上盤震間沉降的貢獻，此海水面對上升速率可視為震間沉降速率，於西元 1811 到 1836 年間為每年 6.5 公釐，西元 1833 到 1848 年間則為每年 4.6 公釐。

然而若考慮計算年生長紋之層數時可能的誤差，未被計算到的年生長紋將使我們高估震間沉降的速率。在樣本 LKM302 描繪的珊瑚生長形態結果中（圖 4-4），西元 1807 年到 1836 年 Diedown 之間，本研究以虛線描繪了兩層可能存在但並不肯定的年生長紋；在 1834 到 1835 年的 Diedown 到 1848 年間，利用氧同位素

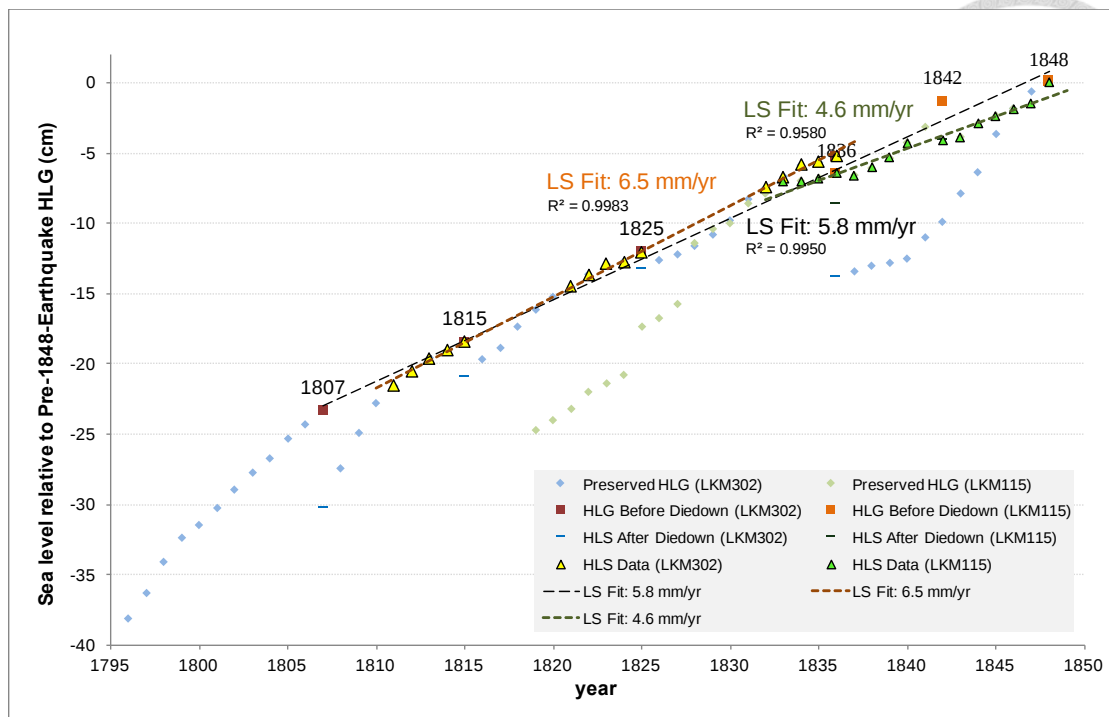


圖 7-4 以最小平方法迴歸估計 LKM 地區震間沉降速率。

分析所辨識出的年生長層較描繪生長紋形態時多出兩層。若將兩者誤差考慮至震間沉降速率的估算中，於西元 1811 到 1836 年間沉降速率將為每年 6.0 公釐，西元 1833 到 1848 年間則將為每年 4.1 公釐。

針對地震前沉降速率改變的機制本研究並未能進行更深入的討論，若保守地將此變化視為珊瑚微型環礁記錄相對海水面時的誤差，我們可利用 LKM302 中 Diedown 事件前的所有 HLS 數據計算約略 40 年間 LKM 地區的平均震間沉降速率為每年 5.8 公釐(黑色回歸線, $R^2=0.9950$)；若將本研究與前人研究(Gagan et al., 2015)的 pIOD 事件對比，考慮年生長紋層數計算可能存在 4 年的誤差，則 1805-06 年 Diedown 事件年代將修正為 1801-02 年，1813-14 年 Diedown 事件將修正為 1809-10 年，以此時間估計所得的平均震間沉降速率則為每年 5.3 公釐。

此震間變形速率結果符合前人研究中(Than Tin Aung et al., 2008; Wang et al., 2013)利用數值模型所估計的每年-3 至-6 公釐，顯示巽它大型逆衝帶在蘭裏島與基督島所在區域，其上下盤板塊間的耦合程度應與模擬時假設的 100%相近。

第四節 地震再發週期估計

7.4.1 區域性地震再發週期

本研究利用前人(Wang et al., 2013)提出的公式，估算蘭裏島西北部區域可能的地震再發週期，其公式如下：

$$R = \Delta Z / \Delta T + I$$

(式 7.1)

其中， R 為現地的長期抬升速率， ΔZ 為每一次地震的同震抬升量， ΔT 為地震的再發週期， I 為震間的變形速率。

透過在 LKM 地區的研究可知，此區域陸地的長期抬升同時受到如西元 1762 年阿拉干大地震這類型的隱沒帶大地震(Wang et al., 2013)與如西元 1848 年皎漂的區域性地震（王崇哲，2013）所貢獻，因此式 7.1 可以改寫為：

$$R = \Delta Z_{1762} / \Delta T_{1762} + \Delta Z_{1848} / \Delta T_{1848} + I \quad (\text{式 7.2})$$

其中， ΔZ_{1762} 為每一次隱沒帶地震的同震抬升量，在此採用西元 1762 年阿拉干大地震的同震抬升量估計，而 ΔT_{1762} 為此類地震的再發週期； ΔZ_{1848} 為每一次區域性地震的同震抬升量，在此採用西元 1848 年地震的同震抬升量估計，而 ΔT_{1848} 為此類地震的再發週期。

然而野外工作時所測量到的珊瑚微型環礁高度差（圖 3-3），指示的僅代表地震事件的視抬升量，此高度差同時記錄了地震事件的同震抬升量以及隱沒帶上盤的震間沉降效應，因此需要再考慮地殼震間的沉降量才能夠代表地震的同震抬升(Wang et al., 2013)。其中沉降量與震間的沉降速率及所歷經的時間有關，因此能以下列兩式估計兩種不同類型地震的同震抬升量：

$$\Delta Z_{1762} = \Delta U_{t_{1762}} - I * T_{1762 \sim 1848} \quad (\text{式 7.3})$$

$$\Delta Z_{1848} = \Delta U_{t_{1848}} - I * T_{1848 \sim 2013} \quad (\text{式 7.4})$$

其中， ΔU_{t1762} 為西元 1762 年阿拉干大地震在野外觀察到的抬升量， $T_{1762\sim 1848}$ 為此次地震到下次西元 1848 年地震之間所歷經的時間(87 年)， ΔU_{t1848} 為西元 1848 年地震在野外觀察到的抬升量， $T_{1848\sim 2013}$ 為此次地震到前人研究中野外測量之間所歷經的時間(166 年)。

利用本研究在 LKM 地區得到的平均震間沉降速率(每年 5.3 到 5.8 公釐)代入 I，結合前人(王崇哲，2013)對西元 1762 年阿拉干大地震觀察到的抬升量 1.3 公尺代入 ΔU_{t1762} ，西元 1848 年地震觀察到的抬升量 0.7 公尺代入 ΔU_{t1848} ，可得到每一次隱沒帶地震的同震抬升量 ΔZ_{1762} 約為 1.8 公尺，每一次區域性地震的同震抬升量 ΔZ_{1848} 介在 1.6 到 1.7 公尺之間。並以前人(Shishikura, 2009)利用海階地形針對巽它大型逆衝帶所估計的地震再發週期約 900 年代入 ΔT_{1762} ，本研究所估算的長期抬升速率(每年 1.0 到 1.7 公釐)代入 R，則能以式 7.2 估計蘭裏島西北部的區域性地震再發週期 ΔT_{1848} 約落在 300 年到 360 年之間。

7.4.2 地震平均再發週期

儘管本研究在前一小節中將 LKM 地區的長期抬升量區分為兩種不同機制的地震所貢獻，然而分別計算兩種類型地震的同震抬升量後可發現，雖然兩種地震的發生機制與地震規模並不相似，但在研究區域內兩種地震的同震抬升量 ΔZ_{1762} 與 ΔZ_{1848} 皆落在 1.6 公尺到 1.8 公尺之間，此特徵與式 7.1 中每次地震同震抬升量相同的假設相符，因此也能不去區分地震發生的機制，將式 7.1 整理為下式：

$$\Delta T = (U_t - I * T) / (R - I)$$

(式 7.5)

求取兩種地震的平均再發週期(average recurrence interval)，其中， ΔT 為地震的平均再發週期， U_t 為地震的視抬升量， I 為震間變形速率， T 為地震事件後到下一次事件所歷經的時間， R 為長期抬升速率。

將 U_t 分別以 U_{t1762} 與 U_{t1848} 代入， T 以 ΔT_{1762} 與 ΔT_{1848} 代入， I 介在每年 5.3 到 5.8 公釐之間， R 介在每年 1.0 到 1.7 公釐之間，則可利用式 7.5 估計在陸地平均每年沉降 5.3 到 5.8 公釐的條件下，透過每次地震同震抬升約 1.6 到 1.8 公尺，且長期而言陸地每年抬升 1.0 到 1.7 公釐，則需要平均每 220 到 280 年發生一次地震，為地震的平均再發週期 ΔT (圖 7-5)。

此一地震平均再發週期比前人在基督島上所計算出來的 500 至 700 年來的短 (Wang et al., 2013)，亦短於前人利用海階年代所估算的地震再發週期(Shishikura, 2009)，表示此區域的構造比過去所認為的更加活躍。由於上次災害性地震發生於西元 1848 年，根據本研究的計算結果，這個區域近期再次遭受災害性地震影響的可能性並不低，需要當地政府與各界研究機構進行更加深入的調查，針對可能發生的地震災害擬定防災計畫。

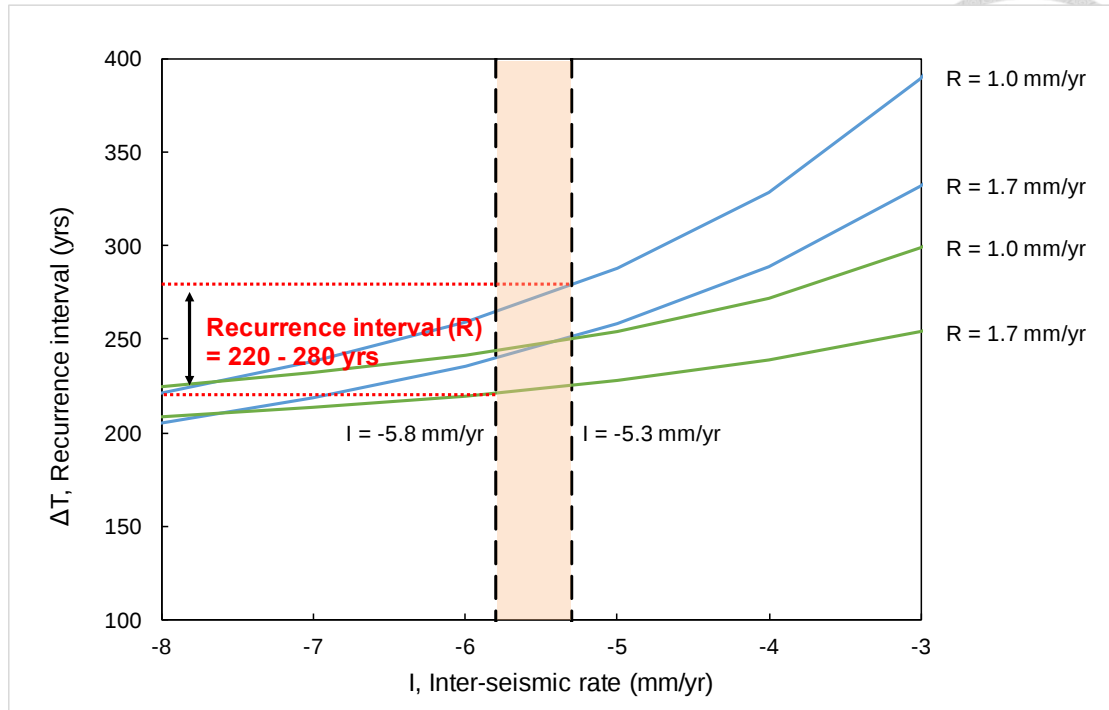


圖 7-5 LKM 地區地震平均再發週期介在 220 年到 280 年之間。若震間沉降速率介在每年 5.3 至 5.8 公釐，長期抬升速率介在每年 1.0 至 1.7 公釐，分別以藍色線段表示西元 1762 年地震的同震抬升，綠色線段表示西元 1848 年地震的同震抬升，所對應的地震平均再發週期會介在 220 年到 280 年之間。

第八章 結論



本研究於緬甸西南部若開邦蘭裏島海岸的漁村雷卡蒙進行野外工作。針對珊瑚微型環礁樣本 LKM302 外觀上可見的 Diedown 形貌進行高程測量，判斷該地的珊瑚微型環礁記錄最高生存面精度約在 1 到 2 公分之間。

本研究採集兩珊瑚微型環礁板狀樣本 LKM302、LKM115，利用鈾釷定年技術確認兩珊瑚死於西元 1848 年發生在皎漂的一次區域性地震所伴隨的同震抬升，將樣本切片拍攝 X 光影像後，判斷其年生長紋的形態並分別重建兩樣本 1848 年之前 52 與 30 年的相對海水面歷史。其中部分數據為可以精確指示海水面高度的珊瑚最高生存面，過程中相對海水面持續上升約 24 公分，亦包含五次不同的海水面下降事件。利用重建的相對海水面歷史，估計於西元 1811 到 1836 年間該地區沉降速率為每年 6.0 到 6.5 公釐，西元 1833 到 1848 年間該地區沉降速率為每年 4.1 到 4.6 公釐，平均而言，約略 40 年間的沉降速率為每年 5.3 到 5.8 公釐。

珊瑚微型環礁樣本形貌上所記錄到的海水面相對下降事件，規模介在 1.2 到 8.6 公分之間，各事件彼此間隔 8 到 12 年。為了解此海水面異常現象發生時的氣候條件，本研究針對樣本 LKM302 共取 443 個氧同位素分析樣本，重建了在西元 1803 到 1848 年間共 45 年的 $\delta^{18}\text{O}$ 記錄。結果顯示，在西元 1805-06、1813-14、1823-24、與 1834-35 年發生海水面下降事件時，測得較平常年冬季高的 $\delta^{18}\text{O}$ ，可能指示較低的海溫或較少的降雨，推測為正向的印度洋偶極震盪所造成；而西元 1839-40 年海水面較高時，測得較平常年夏季低的 $\delta^{18}\text{O}$ ，可能指示較高的海溫或較多的降雨，推測為負向的印度洋偶極震盪所造成，並可以與蘇門答臘地區的 IOD 記錄對比。

本研究測量了 LKM 地區的四階海階地形剖面，高度介於平均海水面之上 1.0

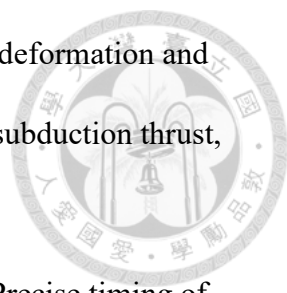
到 11.4 公尺之間，並推測 Terrace IV 海岸線角高度可能位在 6.0 到 10.0 公尺之間。同時利用階地沉積物中珊瑚樣本的年代估計此海階形成於 7.5 至 8.2 ka，推算現地長期抬升速率為每年 1.0 到 1.7 公釐。

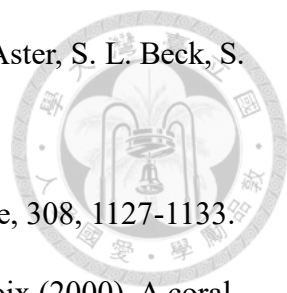
本研究利用在 LKM 地區所得到的平均震間沉降速率與長期抬升速率，結合前人研究對西元 1762 年阿拉干大地震抬升量的調查，代入估計地震平均再發週期的公式中，估計蘭裏島西北部區域性構造的地震再發週期應落在 300 年到 360 年之間，若考慮隱沒帶地震與區域性構造地震綜合的貢獻，地震平均再發週期會介在 220 年到 280 年之間，此結果較過去認為的週期更短，故應對該地區可能發生的地震災害做好防災準備。

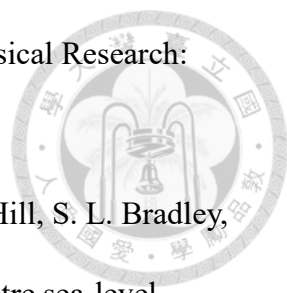
參考文獻

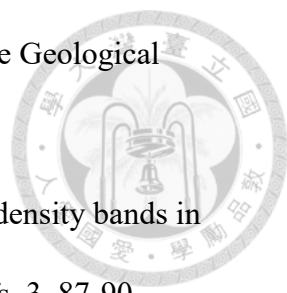


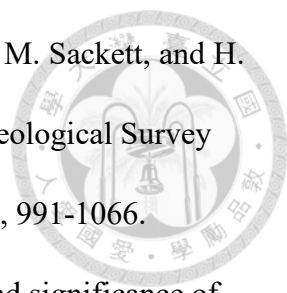
- Barnes, J., E. Lang, and H. Potratz (1956), Ratio of ionium to uranium in coral limestone, *Science*, 124, 175-176.
- Bateman, H. (1910), The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 15, 423-427.
- Bragg, W. L. (1937), *Atomic Structure of Minerals*, Cornell University Press, 292pp.
- Broecker, W. S., and D. L. Thurber (1965), Uranium-series dating of corals and oolites from Bahaman and Florida Key limestones, *Science*, 149, 58-60.
- Burbank, D. W., and R. S. Anderson (2011), *Tectonic Geomorphology*, John Wiley & Sons, 274pp.
- Cheng, H., R. L. Edwards, J. Hoff, C. D. Gallup, D. A. Richards, and Y. Asmerom (2000), The half-lives of uranium-234 and thorium-230, *Chemical Geology*, 169, 17-33.
- Cheng, H., R. L. Edwards, C.-C. Shen, V. J. Polyak, Y. Asmerom, J. Woodhead, J. Hellstrom, Y. Wang, X. Kong, and C. Spötl (2013), Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U–Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry, *Earth and Planetary Science Letters*, 371, 82-91.
- Chow, T. J., and T. G. Thompson (1955), Flame photometric determination of strontium in sea water, *Analytical Chemistry*, 27, 18-21.

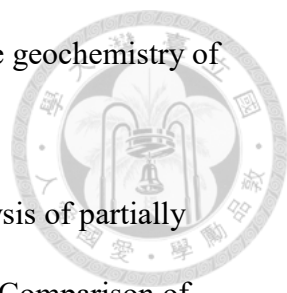
- 
- Dragert, H., R. Hyndman, G. Rogers, and K. Wang (1994), Current deformation and the width of the seismogenic zone of the northern Cascadia subduction thrust, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99, 653-668.
- Edwards, R. L., J. H. Chen, T.-L. Ku and G. J. Wasserburg (1987), Precise timing of the last interglacial period from mass spectrometric determination of Th-230 in corals, *Science*, 236, 1547–1553.
- Gagan, M. K., S. M. Sosdian, H. Scott-Gagan, K. Sieh, W. S. Hantoro, D. H. Natawidjaja, R. W. Briggs, B. W. Suwargadi, and H. Rifai (2015), Coral $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ records of vertical seafloor displacement during megathrust earthquakes west of Sumatra, *Earth and Planetary Science Letters*, 432, 461-471.
- Han, W., and P. J. Webster (2002), Forcing mechanisms of sea level interannual variability in the Bay of Bengal, *Journal of Physical Oceanography*, 32, 216-239.
- Horton, B. P., P. L. Gibbard, G. Mine, R. Morley, C. Purintavaragul, and J. M. Stargardt (2005), Holocene sea levels and palaeoenvironments, Malay-Thai Peninsula, southeast Asia, *The Holocene*, 15, 1199-1213.
- Jevrejeva, S., J. Moore, A. Grinsted, and P. Woodworth (2008), Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, *Geophysical Research Letters*, 35, L08715, doi:10.1029/2008GL033611.
- Knutson, D. W., R. W. Buddemeier, and S. V. Smith (1972), Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals, *Science*, 177, 270-272.

- 
- Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, M. Nettles, S. N. Ward, R. C. Aster, S. L. Beck, S. L. Bilek, M. R. Brudzinski, and R. Butler (2005), The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 december 2004, *Science*, 308, 1127-1133.
- Le Bec, N., A. Julliet-Leclerc, T. Corrège, D. Blamart, and T. Delcroix (2000), A coral $\delta^{18}\text{O}$ record of ENSO driven sea surface salinity variability in Fiji (south-western tropical Pacific), *Geophysical Research Letters*, 27, 3897-3900.
- Masson, S., J. P. Boulanger, C. Menkes, P. Delecluse, and T. Yamagata (2004), Impact of salinity on the 1997 Indian Ocean dipole event in a numerical experiment, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109, C02002, doi:10.1029/2003JC001807.
- McCrea, J. M. (1950), On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale, *The Journal of Chemical Physics*, 18, 849-857.
- McCulloch, M. T., M. K. Gagan, G. E. Mortimer, A. R. Chivas, and P. J. Isdale (1994), A high-resolution Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982–1983 El Nino, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 2747-2754.
- Meltzner, A. J., K. Sieh, H.-W. Chiang, C.-C. Wu, L. L. Tsang, C.-C. Shen, E. M. Hill, B. W. Suwargadi, D. H. Natawidjaja, and B. Philibosian (2015), Time-varying interseismic strain rates and similar seismic ruptures on the Nias–Simeulue patch of the Sunda megathrust, *Quaternary Science Reviews*, 122, 258-281.
- Meltzner, A. J., K. Sieh, H. W. Chiang, C. C. Shen, B. W. Suwargadi, D. H. Natawidjaja, B. E. Philibosian, R. W. Briggs, and J. Galetzka (2010), Coral evidence for earthquake recurrence and an AD 1390–1455 cluster at the south

- 
- end of the 2004 Aceh–Andaman rupture, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B10402, doi:10.1029/2010JB007499.
- Meltzner, A. J., A. D. Switzer, B. P. Horton, E. Ashe, Q. Qiu, D. F. Hill, S. L. Bradley, R. E. Kopp, E. M. Hill, and J. M. Majewski (2017), Half-metre sea-level fluctuations on centennial timescales from mid-Holocene corals of Southeast Asia, *Nature Communications*, 8, 14387, doi:10.1038/ncomms14387.
- Moore, W. S. (1981), The thorium isotope content of ocean water, *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 419-426.
- Natawidjaja, D. H., K. Sieh, M. Chlieh, J. Galetzka, B. W. Suwargadi, H. Cheng, R. L. Edwards, J.-P. Avouac, and S. N. Ward (2006), Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B06403, doi:10.1029/2005JB004025.
- Natawidjaja, D. H., K. Sieh, J. Galetzka, B. W. Suwargadi, H. Cheng, R. L. Edwards, and M. Chlieh (2007), Interseismic deformation above the Sunda Megathrust recorded in coral microatolls of the Mentawai islands, West Sumatra, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112, B02404, doi:10.1029/2006JB004450.
- Natawidjaja, D. H., K. Sieh, S. N. Ward, H. Cheng, R. L. Edwards, J. Galetzka, and B. W. Suwargadi (2004), Paleogeodetic records of seismic and aseismic subduction from central Sumatran microatolls, Indonesia, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4), B04306, doi:10.1029/2003JB002398.

- 
- Oldham, T. (1883), Catalogue of Indian earthquakes, Memoirs of the Geological Survey of India, 19(3), 163-215.
- Pätzold, J. (1984), Growth rhythms recorded in stable isotopes and density bands in the reef coral *Porites lobata* (Cebu, Philippines), Coral Reefs, 3, 87-90.
- Pearse, V. B. (1970), Incorporation of metabolic CO₂ into coral skeleton, Nature, 228, 383-383.
- Pettersson, H. (1937), The proportion of thorium to uranium in rocks and in the sea, Akad. Wiss. Wien Anz., Math.-Naturwiss. Kl., Denkschr, 127-128.
- Priess, K., B. Thomassin, G. Heiss, W.-C. Dullo, and G. Camoin (1995), Variabilite de la croissance de Porites massifs dans les recifs coralliens de Mayotte, Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie, 318, 1147-1154.
- Rao, S. A., S. K. Behera, Y. Masumoto, and T. Yamagata (2002), Interannual subsurface variability in the tropical Indian Ocean with a special emphasis on the Indian Ocean dipole, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49, 1549-1572.
- Saji, N., B. Goswami, P. Vinayachandran, and T. Yamagata (1999), A dipole mode in the tropical Indian Ocean, Nature, 401, 360-363.
- Savage, J. (1983), A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88, 4984-4996.

- 
- Schlanger, S. O., D. L. Graf, J. R. Goldsmith, G. A. Macdonald, W. M. Sackett, and H. A. Potratz (1963), Subsurface geology of Eniwetok Atoll, Geological Survey Professional Paper 260-BB, US Government Printing Office, 991-1066.
- Scoffin, T. P., D. R. Stoddart, and B. R. Rosen (1978), The nature and significance of microatolls, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 284, 99-122.
- Shen, C.-C., R. L. Edwards, H. Cheng, J. A. Dorale, R. B. Thomas, S. B. Moran, S. E. Weinstein, and H. N. Edmonds (2002), Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry, *Chemical Geology*, 185, 165-178.
- Shen, C.-C., K.-S. Li, K. Sieh, D. Natawidjaja, H. Cheng, X. Wang, R. L. Edwards, D. D. Lam, Y.-T. Hsieh, and T.-Y. Fan (2008), Variation of initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ and limits of high precision U–Th dating of shallow-water corals, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 4201-4223.
- Shen, C.-C., C.-C. Wu, H. Cheng, R. L. Edwards, Y.-T. Hsieh, S. Gallet, C.-C. Chang, T.-Y. Li, D. D. Lam, and A. Kano (2012), High-precision and high-resolution carbonate ^{230}Th dating by MC-ICP-MS with SEM protocols, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 99, 71-86.
- Shishikura, M. (2009), Geomorphological evidence of great Holocene earthquakes of western Myanmar, paper presented at Proceedings of the international workshop on Tsunami and storm surge hazard assessment and management for Bangladesh.

- 
- Tatsumoto, M., and E. Goldberg (1959), Some aspects of the marine geochemistry of uranium, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 17, 201-208.
- Taylor, F. W., C. Frohlich, J. Lecolle, and M. Strecker (1987), Analysis of partially emerged corals and reef terraces in the central Vanuatu Arc: Comparison of contemporary coseismic and nonseismic with quaternary vertical movements, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92, 4905-4933.
- Thurber, D. L., W. S. Broecker, R. L. Blanchard, and H. A. Potratz (1965), Uranium-series ages of Pacific atoll coral, *Science*, 149, 55-58.
- Wang, P. L., J. J. Wu, E. C. Yeh, S. R. Song, Y. G. Chen, and L. H. Lin (2010), Isotopic constraints of vein carbonates on fluid sources and processes associated with the ongoing brittle deformation within the accretionary wedge of Taiwan, *Terra Nova*, 22, 251-256.
- 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 (2013), 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, 1277-1303.
- Weber, J. N., and P. M. Woodhead (1972), Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates, *Journal of Geophysical Research*, 77(3), 463-473.
- Woodroffe, C., and R. Mclean (1990), Microatolls and recent sea level change on coral atolls, *Nature*, 344(6266), 531-534.

Zachariasen, J. (1998), A Study of Vertical Deformation Using Coral Microatolls,

Ph.D Thesis, California Institute of Technology, 418pp.

Zachariasen, J., K. Sieh, F. W. Taylor, and W. S. Hantoro (2000), Modern vertical deformation above the Sumatran subduction zone: Paleogeodetic insights from coral microatolls, Bulletin of the Seismological Society of America, 90, 897-913.

王崇哲 (2013)，緬甸西南部蘭裏島之古地震事件研究，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 83 頁。

梁翠容 (1990)，臺灣東北角海蝕平台地形之研究，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文，共 84 頁。

蔡佳穎 (2013)，臺灣東北部之海階地形及其新構造意義，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文，共 120 頁。

附錄一 樣本 LKM302 外觀可見之 Diedown 全站儀測量結果



測量日期：2013/03/08

測量基站座標：19.36614°N, 93.46891°E

測量單位：公尺

描述：於 LKM 海岸邊測量樣本 LKM302 外觀上可見之三層高度不同的環狀 Diedown 外觀。pt.02 為海水面測量點，pt.03 至 16 為最外圍環狀，pt.17 至 28 為第二層環狀，pt.29 到 36 為最內層圓環狀。

	Raw XYZ data			校正高程	
	N	E	Z	校正海水面	校正潮汐
1	0.000	0.000	0.000		
2	23.935	41.306	-0.890	-0.409	-1.000
3	21.962	2.374	-0.163	0.318	-0.273
4	22.117	2.201	-0.160	0.321	-0.270
5	22.245	2.153	-0.158	0.323	-0.268
6	22.407	2.141	-0.155	0.326	-0.265
7	22.578	2.221	-0.153	0.328	-0.263
8	22.698	2.357	-0.158	0.323	-0.268
9	22.737	2.557	-0.158	0.323	-0.268
10	22.668	2.788	-0.159	0.322	-0.269
11	22.579	2.903	-0.162	0.319	-0.272
12	22.504	3.01	-0.165	0.316	-0.275
13	22.299	3.003	-0.167	0.314	-0.277
14	22.136	2.939	-0.174	0.307	-0.284
15	22.036	2.883	-0.167	0.314	-0.277
16	21.990	2.576	-0.161	0.320	-0.271
17	22.086	2.453	-0.220	0.261	-0.330
18	22.136	2.305	-0.202	0.279	-0.312
19	22.272	2.266	-0.201	0.280	-0.311
20	22.426	2.249	-0.199	0.282	-0.309
21	22.536	2.347	-0.201	0.280	-0.311

22	22.599	2.497	-0.210	0.271	-0.320
23	22.646	2.571	-0.204	0.277	-0.314
24	22.543	2.729	-0.213	0.268	-0.323
25	22.439	2.872	-0.217	0.264	-0.327
26	22.270	2.879	-0.208	0.273	-0.318
27	22.155	2.842	-0.213	0.268	-0.323
28	22.121	2.712	-0.229	0.252	-0.339
29	22.183	2.558	-0.291	0.190	-0.401
30	22.272	2.424	-0.269	0.212	-0.379
31	22.344	2.357	-0.269	0.212	-0.379
32	22.412	2.408	-0.275	0.206	-0.385
33	22.453	2.553	-0.292	0.189	-0.402
34	22.384	2.560	-0.293	0.188	-0.403
35	22.366	2.680	-0.286	0.195	-0.396
36	22.271	2.529	-0.306	0.175	-0.416

附錄二 珊瑚微型環礁形態描繪量測結果



LKM302 結果

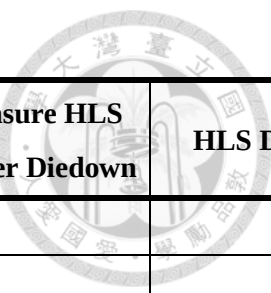
單位：公分

Year	Preserved HLG (Middle)	Preserved HLG (Left Side)	Preserved HLG (Right side)	HLG Before Diedown (Middle)	HLG Before Diedown (Left Side)	HLG Before Diedown (Right Side)	HLS After Diedown (Left Side)	HLS After Diedown (Right Side)
1796	-38.12							
1797	-36.38							
1798	-34.14							
1799	-32.40							
1800	-31.46							
1801	-30.32							
1802	-28.98							
1803	-27.74							
1804	-26.80							
1805	-25.36							
1806	-24.32							
1807	-23.38			-23.38			-30.28	-33.58
1808		-27.44	-31.74					
1809		-24.90	-30.50					
1810		-22.86	-28.36					
1811		-21.62	-26.92					
1812		-20.58	-25.98					
1813		-19.64	-25.14					
1814		-19.10	-24.40					
1815		-18.46	-23.46		-18.46	-23.46	-20.92	-24.12
1816		-19.72	-22.92					
1817		-18.88	-22.08					
1818		-17.44	-20.94					

1819		-16.20	-19.9					
1820		-15.26	-18.46					
1821		-14.52	-17.12					
1822		-13.68	-15.58					
1823		-12.94	-14.34					
1824		-12.80	-13.00					
1825		-12.26	-12.06		-12.26	-12.06	-13.22	-14.52
1826		-12.62	-13.42					
1827		-12.28	-12.78					
1828		-11.64	-11.74					
1829		-11.30	-10.80					
1830		-10.96	-9.86					
1831		-10.32	-8.32					
1832		-9.98	-7.48					
1833		-8.94	-6.74					
1834		-8.30	-5.90					
1835		-8.06	-5.66					
1836		-7.58	-5.28		-7.58	-5.28	16.58	-13.84
1837			-13.44					
1838			-13.10					
1839			-12.86					
1840			-12.52					
1841			-11.08					
1842			-9.94					
1843			-7.90					
1844			-6.36					
1845			-3.72					
1846			-1.88					
1847			-0.64					
1848			0.00			0.00		

LKM115 結果

單位：公分



Year	Preserved HLG	HLG Before Diedown	Unsure HLG Before Diedown	HLS After Diedown	Unsure HLS After Diedown	HLS Data
1819	-24.76					
1820	-24.02					
1821	-23.28					
1822	-22.04					
1823	-21.40					
1824	-20.86		-20.86		-22.12	
1825	-17.42					
1826	-16.78					
1827	-15.74					
1828	-11.40					
1829	-10.46					
1830	-10.02					
1831	-8.58					
1832	-7.94					
1833	-7.10					-7.10
1834	-7.06					-7.06
1835	-6.82					-6.82
1836	-6.48	-6.48			-8.88	-6.48
1837	-6.64					-6.64
1838	-6.10					-6.10
1839	-5.36					-5.36
1840	-4.32					-4.32
1841	-3.18					-3.18
1842	-1.34	-1.34		-4.14		-4.14
1843	-3.90					-3.90
1844	-2.96					-2.96
1845	-2.42					-2.42
1846	-1.88					-1.88
1847	-1.54					-1.54
1848	0.00	0.00				0.00

附錄三 氧同位素分析結果



Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analytical Date: 2016/9/8

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
34180	1	2	MAB	0.182	9467	8894	3.349	0.012	-7.202	0.013
34181	2	2	MAB	0.174	9952	9582	3.280	0.014	-7.215	0.008
34182	1	3	NBS19	0.094	2691	2814	1.842	0.005	-2.300	0.035
34183	2	3	A01	0.142	10133	9912	-0.945	0.016	-5.175	0.017
34184	1	4	A02	0.153	9617	9169	-1.432	0.002	-5.727	0.022
34185	2	4	A03	0.103	5948	5750	-1.337	0.029	-5.678	0.040
34186	1	5	A04	0.149	7779	6930	-2.016	0.015	-5.996	0.019
34187	2	5	A05	0.120	6144	6210	-3.633	0.011	-6.364	0.035
34188	1	6	A06	0.153	9750	9262	-4.236	0.003	-6.262	0.025
34189	2	6	MAB	0.162	9038	8147	3.257	0.009	-7.244	0.013
34190	1	7	MAB	0.200	10630	9445	3.307	0.026	-7.170	0.048
34191	2	7	A07	0.134	8698	7897	-3.115	0.013	-5.918	0.033
34192	1	8	A08	0.121	8299	7462	-1.833	0.013	-5.409	0.013
34193	2	8	A09	0.116	7590	6727	-2.181	0.023	-5.537	0.028
34194	1	9	A10	0.169	9748	9286	-1.120	0.010	-5.573	0.018
34195	2	9	A11	0.153	8712	7746	-1.038	0.016	-5.787	0.023
34196	1	10	A12	0.101	5928	5831	-1.080	0.020	-5.783	0.043
34197	2	10	MAB	0.189	10118	9906	3.318	0.003	-7.201	0.021
34198	1	11	MAB	0.163	9770	8881	3.301	0.013	-7.276	0.027
34199	2	11	A13	0.147	8626	7798	-2.154	0.018	-6.138	0.017
34200	1	12	A14	0.130	8241	7565	-2.419	0.013	-5.768	0.013
34201	2	12	A15	0.126	7084	6321	-0.749	0.039	-5.389	0.047
34202	1	13	A16	0.166	10613	9335	-0.033	0.036	-5.096	0.052
34203	2	13	A17	0.098	5731	5362	-0.454	0.032	-5.831	0.030
34204	1	14	A18	0.125	6349	5816	-1.298	0.023	-6.266	0.055

34205	2	14	MAB	0.185	10179	10024	3.316	0.009	-7.127	0.019
34206	1	15	MAB	0.186	10077	9864	3.348	0.015	-7.079	0.014
34207	2	15	A19	0.130	7270	6366	-2.416	0.009	-6.176	0.057
34208	1	16	A20	0.114	5913	5897	-1.706	0.026	-5.797	0.035
34209	2	16	A21	0.142	8219	7327	-1.349	0.012	-5.796	0.024
34210	1	17	A22	0.131	7984	7211	-0.773	0.030	-5.699	0.040
34211	2	17	A23	0.112	6177	5565	-1.174	0.043	-6.044	0.057
34212	1	18	A24	0.119	6987	6188	-1.973	0.030	-6.485	0.058
34213	2	18	MAB	0.165	10354	10284	3.289	0.011	-7.216	0.009
34214	1	19	MAB	0.188	10267	10182	3.331	0.007	-7.170	0.006
34215	2	19	A25	0.129	7696	6913	-1.518	0.020	-6.006	0.036
34216	1	20	A26	0.169	10108	9952	-3.112	0.011	-6.480	0.019
34217	2	20	A27	0.152	8608	7619	-3.680	0.015	-6.315	0.039
34218	1	21	A28	0.165	9589	8780	-2.952	0.020	-5.966	0.022
34219	2	21	A29	0.148	8750	7927	-2.794	0.017	-5.920	0.017
34220	1	22	A30	0.103	7704	6964	-3.848	0.018	-6.141	0.035
34221	2	22	MAB	0.192	10084	9921	3.325	0.010	-7.171	0.016
34222	1	23	MAB	0.181	9831	9410	3.329	0.007	-7.156	0.017
34223	2	23	NBS19	0.096	5783	5473	1.718	0.024	-2.651	0.038
34224	1	24	A31	0.109	6338	5610	-1.394	0.041	-5.420	0.068
34225	2	24	A32	0.118	6435	5741	-1.588	0.033	-5.487	0.067

MAB mean (n=12)	3.313	-7.186
MAB std	0.027	0.052
NBS19 mean (n=2)	1.780	-2.476
NBS19 std	0.088	0.248

Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analytical Date: 2016/9/10

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
34226	1	2	MAB	0.179	9040	8718	3.371	0.021	-7.138	0.027
34227	2	2	MAB	0.184	9858	9713	3.313	0.013	-7.082	0.018
34228	1	3	NBS19	0.163	11194	10383	1.838	0.026	-2.434	0.026
34229	2	3	A33	0.116	5496	5072	-1.705	0.083	-5.650	0.114
34230	1	4	A34	0.116	6416	5918	-2.369	0.044	-6.727	0.075
34231	2	4	A35	0.109	5815	5337	-1.838	0.105	-5.952	0.145
34232	1	5	A36	0.153	7746	7087	-4.570	0.01	-6.775	0.014
34233	2	5	A37	0.143	8696	7938	-2.620	0.01	-6.631	0.021
34234	1	6	A38	0.145	8632	7808	-3.304	0.016	-6.298	0.020
34235	2	6	MAB	0.201	9956	9735	3.365	0.008	-7.046	0.013
34236	1	7	MAB	0.174	9755	9289	3.344	0.006	-7.142	0.037
34237	2	7	A39	0.102	6530	5952	-3.938	0.041	-6.471	0.055
34238	1	8	A40	0.102	5720	5345	-2.207	0.038	-5.719	0.056
34239	2	8	A41	0.134	7732	6920	-2.439	0.025	-5.562	0.047
34240	1	9	A42	0.110	7142	6379	-2.442	0.03	-5.611	0.045
34241	2	9	A43	0.109	6557	5825	-4.647	0.028	-6.617	0.067
34242	1	10	A44	0.117	6165	5547	-3.368	0.049	-5.989	0.059
34243	2	10	MAB	0.212	10026	9752	3.364	0.011	-7.159	0.008
34244	1	11	MAB	0.183	10068	10005	3.334	0.004	-7.207	0.004
34245	2	11	A45	0.162	9122	8446	-1.589	0.008	-5.989	0.024
34246	1	12	A46	0.175	9798	9329	-3.188	0.010	-6.191	0.020
34247	2	12	A47	0.126	8591	7891	-2.365	0.011	-6.281	0.026
34248	1	13	A48	0.167	10462	10510	-1.381	0.009	-5.545	0.010
34249	2	13	A49	0.126	7551	6815	-1.660	0.018	-5.970	0.044
34250	1	14	A50	0.175	10349	10270	-4.186	0.013	-6.091	0.019
34251	2	14	MAB	0.166	9869	9418	3.311	0.003	-7.177	0.018
34252	1	15	MAB	0.189	10109	10052	3.342	0.006	-7.118	0.006
34253	2	15	A51	0.139	8538	7806	-3.469	0.012	-6.325	0.015
34254	1	16	A52	0.170	9993	9862	-2.002	0.012	-5.275	0.015

34255	2	16	A53	0.131	7774	7093	-3.153	0.014	-5.781	0.048
34256	1	17	A54	0.175	10014	9761	-2.867	0.007	-5.612	0.015
34257	2	17	A55	0.164	9843	9525	-1.776	0.015	-5.231	0.015
34258	1	18	A56	0.135	8101	7320	-3.404	0.018	-6.678	0.025
34259	2	18	MAB	0.174	10004	9754	3.335	0.012	-7.131	0.022
34260	1	19	MAB	0.205	10232	10300	3.341	0.003	-7.206	0.014
34261	2	19	A57	0.097	6307	5756	-2.554	0.024	-5.893	0.051
34262	1	20	A58	0.177	10488	10506	-2.544	0.004	-6.203	0.014
34263	2	20	A59	0.096	5937	5759	-3.211	0.022	-6.334	0.011
34264	1	21	A60	0.169	10039	9764	-1.893	0.008	-5.407	0.025
34265	2	21	A61	0.098	5825	5752	-4.660	0.023	-6.593	0.029
34266	1	22	A62	0.096	5978	5802	-1.014	0.018	-5.710	0.029
34267	2	22	MAB	0.176	10348	10362	3.335	0.008	-7.138	0.019
34268	1	23	MAB	0.176	10006	9674	3.325	0.006	-7.183	0.013
34269	2	23	NBS19	0.146	10272	10182	1.810	0.009	-2.452	0.016
34270	1	24	A63	0.110	6537	6043	-3.191	0.035	-5.897	0.060
34271	2	24	A64	0.168	10112	10008	-2.165	0.008	-5.414	0.013

MAB mean (n=12)	3.340	-7.144
MAB std	0.019	0.048
NBS19 mean (n=2)	1.824	-2.443
NBS19 std	0.020	0.013

Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analytical Date: 2016/9/21

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle	1 Cycle	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$
					Int Samp 44	Int Ref 44	Mean (permil)	Std Dev (permil)	Mean (permil)	Std Dev (permil)
34478	1	2	MAB	0.183	10019	9241	3.316	0.009	-7.276	0.037
34479	2	2	MAB	0.203	9485	9056	3.401	0.010	-7.042	0.025
34480	1	3	NBS19	0.199	9709	9431	1.987	0.008	-2.466	0.011
34481	2	3	A15	0.161	8226	7203	-0.710	0.029	-5.146	0.044
34482	1	4	A16	0.180	9617	9334	-0.172	0.011	-5.133	0.009

34483	2	4	A17	0.179	9629	9305	-0.232	0.020	-5.519	0.019
34484	1	5	A22	0.170	9762	9510	-0.478	0.006	-5.386	0.016
34485	2	5	A23	0.165	9198	8667	-0.426	0.022	-5.391	0.031
34486	1	6	A24	0.174	9102	8561	-1.067	0.016	-5.945	0.019
34487	2	6	A31	0.170	9386	9130	-1.680	0.007	-5.431	0.012
34488	1	7	MAB	0.191	9599	9239	3.376	0.016	-7.105	0.020
34489	2	7	MAB	0.196	9890	9707	3.353	0.004	-7.049	0.027
34490	1	8	A32	0.172	9750	9617	-1.304	0.009	-5.314	0.014
34491	2	8	A33	0.159	9761	9507	-1.370	0.012	-5.298	0.010
34492	1	9	A34	0.161	11098	11391	-1.328	0.019	-5.968	0.013
34493	2	9	A35	0.165	6897	6060	-2.469	0.060	-5.984	0.140
34494	1	10	A39	0.144	7249	5764	-3.956	0.129	-6.357	0.206
34495	2	10	A40	0.180	9179	8569	-2.592	0.007	-5.464	0.034
34496	1	11	A44	0.182	9758	9616	-3.052	0.008	-5.691	0.021
34497	2	11	A63	0.159	9224	8792	-3.523	0.013	-5.902	0.020
34498	1	12	MAB	0.209	9783	9559	3.455	0.008	-7.042	0.008
34499	2	12	MAB	0.166	9492	9364	3.416	0.011	-7.125	0.018
34500	1	13	A66	0.159	9549	9750	-3.336	0.009	-6.375	0.009
34501	2	13	A67	0.164	9807	10552	-1.421	0.007	-6.024	0.011
34502	1	14	A68							
34503	2	14	A69	0.196	9738	9467	-3.953	0.014	-5.835	0.023
34505	1	15	A70	0.162	8623	7911	-3.054	0.012	-5.686	0.022
34506	2	15	A71	0.172	9769	9530	-1.477	0.012	-5.390	0.016
34507	1	16	A72	0.198	9468	9133	-0.983	0.004	-5.192	0.017
34508	2	16	A73	0.164	9573	9181	-0.894	0.012	-4.948	0.016
34509	1	17	MAB	0.192	9623	9288	3.359	0.010	-7.104	0.011
34510	2	17	MAB	0.192	9539	9425	3.428	0.012	-7.032	0.014
34511	1	23	NBS19	0.188	9783	10510	1.865	0.005	-2.438	0.009

MAB mean (n=8)	3.388	-7.097
MAB std	0.045	0.081
NBS19 mean (n=2)	1.926	-2.452
NBS19 std	0.086	0.020

Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
34512	1	2	MAB	0.190	8849	8380	3.366	0.021	-7.114	0.017
34513	2	2	MAB	0.201	9307	8880	3.338	0.016	-7.017	0.016
34515	1	3	NBS19	0.194	9465	9131	1.869	0.014	-2.387	0.019
34516	2	3	A74	0.161	8620	7875	-1.577	0.012	-5.808	0.029
34533	1	2	MAB	0.208	9803	8233	3.280	0.024	-6.853	0.052
34534	2	2	MAB	0.173	7876	7099	3.343	0.035	-7.049	0.080
34535	1	3	NBS19	0.171	9492	8970	1.878	0.012	-2.384	0.028
34536	2	3	A75	0.186	9139	8555	-2.618	0.015	-6.39	0.029
34537	1	4	A76	0.167	8406	7373	-2.708	0.030	-6.471	0.040
34538	2	4	A77							
34539	1	5	A78	0.160	9763	9404	-4.098	0.014	-6.152	0.020
34540	2	5	A79	0.206	9352	8808	-3.396	0.010	-5.657	0.032
34541	1	6	A80	0.180	9757	9487	-3.784	0.016	-5.912	0.018
34542	2	6	A81	0.192	11109	9867	-3.327	0.019	-5.651	0.018
34543	1	7	MAB	0.169	9237	8755	3.346	0.021	-7.038	0.009
34544	2	7	MAB	0.199	9491	9101	3.348	0.013	-7.054	0.022
34545	1	8	A82	0.208	9745	9385	-2.054	0.013	-5.154	0.023
34546	2	8	A83	0.164	9535	9127	-1.423	0.005	-5.000	0.014
34547	1	9	A84	0.168	8031	7639	-0.898	0.021	-4.976	0.020
34548	2	9	A85	0.193	9386	8826	-0.867	0.017	-4.767	0.023
34549	1	10	A86	0.155	8983	8207	-1.325	0.019	-5.356	0.038
34550	2	10	A87	0.177	9599	9305	-1.573	0.008	-5.407	0.002
34551	1	11	A88	0.155	8727	8173	-1.645	0.017	-5.306	0.026
34552	2	11	A89	0.200	9858	9792	-1.486	0.007	-5.392	0.003
34553	1	12	MAB	0.183	9852	8701	3.351	0.018	-7.038	0.018
34554	2	12	MAB	0.210	9487	8983	3.339	0.011	-7.060	0.022
34555	1	13	A90	0.173	10147	10032	-2.219	0.002	-6.056	0.011
34556	2	13	A91	0.198	9318	9023	-2.121	0.010	-5.859	0.018
34557	1	14	A92	0.197	9888	9658	-3.256	0.006	-6.787	0.023
34558	2	14	A93	0.192	9461	9041	-3.224	0.015	-6.633	0.014

34559	1	15	A94	0.155	8455	7712	-5.017	0.024	-6.778	0.038
34560	2	15	A95	0.147	8601	7805	-4.320	0.022	-6.751	0.043
34561	1	16	A96	0.176	8710	7870	-4.959	0.009	-6.485	0.050
34562	2	16	A97	0.177	8452	7533	-2.669	0.024	-5.538	0.039
34563	1	17	MAB	0.204	9844	9506	3.369	0.013	-7.036	0.018
34564	2	17	MAB	0.176	9781	9485	3.344	0.020	-7.126	0.015
34565	1	18	A98	0.196	8156	7407	-0.640	0.032	-5.115	0.039
34566	2	18	A99	0.194	9879	9590	-0.327	0.008	-4.563	0.008

MAB mean (n=10) 3.342 -7.039

MAB std 0.024 0.074

NBS19 mean (n=2) 1.874 -2.386

NBS19 std 0.006 0.002

Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analytical Date: 2016/10/5

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
34698	1	2	MAB	0.187	9490	8200	3.382	0.032	-7.078	0.035
34699	2	2	MAB	0.186	10437	9182	3.385	0.021	-7.095	0.019
34700	1	3	NBS19	0.215	9618	9300	1.865	0.013	-2.337	0.013
34701	2	3	A35	0.216	7045	6666	-2.262	0.054	-6.061	0.095
34702	1	4	A39	0.167	8254	7233	-4.412	0.053	-6.493	0.090
34703	2	4	A68	0.213	6687	6226	-3.864	0.075	-6.736	0.135
34704	1	5	A77	0.227	6642	6206	-4.151	0.077	-6.155	0.142
34705	2	5	A100	0.188	9655	9245	-0.885	0.009	-6.033	0.025
34706	1	6	A101	0.159	9982	9741	-4.063	0.014	-6.255	0.018
34707	2	6	A102	0.169	9953	10037	-2.858	0.008	-5.672	0.003
34708	1	7	MAB	0.206	11170	9795	3.328	0.014	-7.064	0.035
34710	2	7	MAB	0.188	9499	9263	3.356	0.007	-7.135	0.014
34711	1	8	A103	0.202	9860	9754	-0.455	0.005	-5.280	0.016
34712	2	8	A104	0.164	10102	10128	-0.445	0.010	-5.148	0.016
34713	1	9	A105	0.168	8533	8045	-0.260	0.026	-5.069	0.035

34714	2	9	A106	0.171	9401	8836	-0.658	0.014	-5.743	0.028
34715	1	10	A107	0.150	9912	9727	-1.126	0.005	-6.217	0.017
34716	2	10	A108	0.169	9948	9877	-3.871	0.020	-6.576	0.017
34717	1	11	A109	0.186	9633	9255	-3.398	0.006	-5.793	0.020
34718	2	11	A110	0.178	9669	9570	-2.176	0.007	-5.550	0.008
34719	1	12	MAB	0.199	9556	9099	3.346	0.012	-7.057	0.022
34720	2	12	MAB	0.186	9684	9344	3.360	0.007	-7.124	0.019
34721	1	13	A111	0.193	9782	9420	-1.081	0.017	-5.262	0.011
34722	2	13	A112	0.195	9755	9506	-0.788	0.009	-5.091	0.007
34723	1	14	A113	0.183	9741	9545	-0.685	0.001	-5.138	0.025
34724	2	14	A114	0.197	9245	8639	-1.108	0.012	-5.765	0.026
34725	1	15	A115	0.190	6199	5853	-1.539	0.066	-6.280	0.099
34726	2	15	A116	0.167	9650	9360	-2.501	0.011	-6.654	0.007
34727	1	16	A117	0.187	9459	9013	-3.795	0.015	-6.140	0.026
34728	2	16	A118	0.195	9828	9551	-2.855	0.008	-6.134	0.024
34729	1	17	MAB	0.202	9637	9234	3.377	0.007	-7.097	0.020
34730	2	17	MAB	0.185	9668	9409	3.368	0.012	-7.117	0.004
34731	1	18	A119	0.228	6076	5818	-2.907	0.061	-6.372	0.084
34732	2	18	A120	0.183	9668	9298	-1.667	0.003	-5.317	0.023
34733	1	19	A122	0.197	9738	9418	-0.598	0.009	-4.927	0.012
34734	2	19	A123	0.195	9438	8946	-1.678	0.009	-5.220	0.028
34735	1	20	A124	0.208	9727	9361	-0.723	0.009	-5.115	0.022
34736	2	20	A125	0.219	5220	5368	-1.350	0.006	-5.961	0.026
34737	1	21	A126	0.208	5982	5778	-1.769	0.030	-6.373	0.080
34738	2	21	A127	0.187	9714	9400	-3.240	0.007	-6.147	0.021
34739	1	22	MAB	0.176	9529	9187	3.354	0.013	-7.110	0.025
34740	2	22	MAB	0.191	9741	9501	3.413	0.005	-7.045	0.013
34741	1	23	NBS19	0.185	9697	9352	1.862	0.008	-2.381	0.017
34742	2	23	A128	0.199	9681	9298	-3.081	0.011	-6.023	0.017
34743	1	24	A129	0.183	10177	10243	-1.960	0.005	-5.465	0.006
34744	2	24	A130	0.174	9866	9755	-2.385	0.007	-5.568	0.017

MAB mean (n=10)

3.367

-7.092

MAB std

0.024

0.030

NBS19 mean (n=2)

1.864

-2.359

Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analytical Date: 2016/10/7



Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
34783	1	2	MAB	0.203	9928	8783	3.395	0.017	-6.985	0.026
34784	2	2	MAB	0.170	9376	8742	3.354	0.016	-7.09	0.029
34785	1	3	NBS19	0.145	7981	6868	1.812	0.050	-2.456	0.082
34786	2	3	A131	0.185	9594	9156	-1.038	0.011	-5.062	0.016
34787	1	4	A132	0.218	9594	9265	-1.142	0.018	-5.465	0.019
34788	2	4	A133	0.216	9575	9189	-1.031	0.005	-5.960	0.017
34789	1	5	A134	0.180	9583	9158	-1.773	0.015	-6.058	0.021
34790	2	5	A135	0.228	7481	7097	-1.854	0.044	-5.995	0.096
34791	1	6	A136	0.184	9640	9276	-2.574	0.007	-6.239	0.010
34792	2	6	A137	0.186	9671	9473	-1.860	0.010	-5.550	0.009
34793	1	7	MAB	0.180	9717	9401	3.343	0.016	-7.103	0.013
34794	2	7	MAB	0.185	9719	9394	3.336	0.015	-7.127	0.013
34795	1	8	A138	0.192	8549	7562	-3.468	0.040	-6.028	0.067
34796	2	8	A139	0.175	9792	9550	-3.107	0.005	-5.740	0.017
34797	1	9	A140	0.180	9611	9316	-1.920	0.005	-5.393	0.007
34798	2	9	A141	0.165	9595	9272	-1.691	0.009	-5.172	0.020
34799	1	10	A142	0.197	9000	8266	-0.690	0.022	-5.720	0.034
34800	2	10	A143	0.208	9766	9526	-0.817	0.007	-5.354	0.010
34801	1	11	A144	0.178	9693	9623	-1.016	0.008	-6.348	0.008
34802	2	11	A145	0.218	9608	9379	-1.705	0.008	-6.506	0.015
34803	1	12	MAB	0.204	9638	9325	3.358	0.010	-7.029	0.024
34804	2	12	MAB	0.161	10158	9032	3.337	0.011	-7.161	0.026
34805	1	13	A146	0.170	9531	9155	-3.333	0.009	-6.785	0.011
34806	2	13	A147	0.196	10005	9942	-3.635	0.011	-6.265	0.011
34807	1	14	A148	0.194	9703	9502	-2.236	0.008	-5.824	0.015
34808	2	14	A149	0.230	9489	9019	-1.738	0.022	-5.599	0.021
34809	1	15	A150	0.201	9792	9541	-1.375	0.005	-5.351	0.009

34810	2	15	A151	0.193	9725	9374	-1.309	0.010	-5.160	0.022
34811	1	16	A152	0.153	9208	8560	-0.402	0.022	-5.192	0.030
34812	2	16	A153	0.163	9617	9441	-1.180	0.012	-5.548	0.020
34813	1	17	MAB	0.196	9682	9334	3.390	0.019	-7.096	0.009
34814	2	17	MAB	0.171	9667	9292	3.348	0.016	-7.095	0.017
34815	1	18	A154	0.230	9795	9484	-1.864	0.008	-6.277	0.021
34816	2	18	A155	0.170	9707	9386	-3.111	0.007	-6.764	0.005
34817	1	19	A156	0.193	8536	8070	-3.845	0.025	-6.732	0.036
34818	2	19	A157	0.206	9592	9238	-3.180	0.007	-5.929	0.019
34819	1	20	A158	0.174	9543	9147	-1.746	0.007	-5.370	0.012
34820	2	20	A159	0.164	7932	6996	-1.454	0.068	-5.229	0.075
34821	1	21	A160	0.226	6939	6498	-0.995	0.076	-4.822	0.138
34822	2	21	A161	0.185	9639	9381	-0.936	0.012	-4.910	0.007
34823	1	22	MAB	0.208	9541	9231	3.406	0.006	-7.149	0.009
34824	2	22	MAB	0.184	9672	9347	3.386	0.008	-7.079	0.020
34825	1	23	NBS19	0.164	7994	6626	1.769	0.072	-2.587	0.137
34826	2	23	A163	0.212	43	2215	-14.818	0.490	-20.677	0.358
34827	1	24	A164	0.193	7312	6470	-3.082	0.095	-7.072	0.170
34828	2	24	A165	0.166	9591	9390	-3.227	0.009	-5.979	0.023

MAB mean (n=10)	3.365	-7.091
MAB std	0.026	0.053
NBS19 mean (n=2)	1.791	-2.522
NBS19 std	0.030	0.093

Sample Note: 紅字標示樣品需重測

Analytical Date: 2016/10/11

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
34829	1	2	MAB	0.170	8650	8024	3.420	0.029	-7.010	0.050
34830	2	2	MAB	0.167	8436	8056	3.297	0.021	-7.096	0.044
34831	1	3	NBS19	0.174	9472	8936	1.886	0.013	-2.534	0.025
34832	2	3	A166	0.187	9412	9164	-1.498	0.021	-5.533	0.016
34834	1	4	A167	0.181	10378	8818	-1.879	0.032	-5.342	0.043
34835	2	4	A168	0.155	8436	7326	-2.189	0.040	-5.190	0.067
34836	1	5	A169	0.167	9672	9322	-1.687	0.011	-5.052	0.016
34837	2	5	A170	0.177	9403	8907	-0.677	0.010	-4.843	0.016
34838	1	6	A171	0.159	8656	7798	-0.482	0.025	-5.347	0.053
34839	2	6	A172	0.189	9653	9390	-1.301	0.008	-5.625	0.010
34840	1	7	MAB	0.171	9499	8990	3.379	0.013	-6.971	0.022
34841	2	7	MAB	0.163	9737	9477	3.353	0.013	-7.096	0.008
34842	1	8	A173	0.217	9612	9237	-3.861	0.011	-6.758	0.026
34843	2	8	A174	0.195	9753	9419	-2.861	0.008	-6.504	0.017
34844	1	9	A175	0.200	9495	9186	-3.962	0.013	-6.103	0.013
34845	2	9	A176	0.195	9334	8785	-2.392	0.011	-5.427	0.012
34846	1	10	A177	0.170	8613	6711	-0.648	0.062	-5.155	0.100
34847	2	10	A178	0.218	9534	9132	-0.517	0.012	-5.146	0.017
34848	1	11	A179	0.216	9480	9043	-0.612	0.019	-5.112	0.018
34849	2	11	A180	0.225	9506	9102	0.083	0.014	-5.105	0.017
34850	1	12	MAB	0.201	9504	9072	3.437	0.012	-7.176	0.024
34851	2	12	MAB	0.214	9507	9005	3.477	0.016	-7.120	0.021
34852	1	13	A181	0.177						
34853	2	13	A182	0.179	9555	9258	-3.004	0.010	-6.841	0.016
34854	1	14	A183	0.189	9659	9415	-5.279	0.012	-6.498	0.013
34855	2	14	A184	0.208	9378	8813	-1.694	0.021	-5.809	0.029
34856	1	15	A185	0.163	7377	5718	-0.886	0.142	-6.21	0.248
34857	2	15	A186	0.218	9674	9371	-0.826	0.006	-5.384	0.007
34858	1	16	A187	0.172	8289	6576	-1.174	0.074	-5.378	0.117
34859	2	16	A188	0.174	9527	9205	-0.503	0.012	-5.363	0.024

34860	1	17	MAB	0.214	9421	8913	3.442	0.019	-7.212	0.019
34861	2	17	MAB	0.191	9524	9151	3.390	0.010	-7.107	0.016
34862	1	18	A189	0.189	9722	9325	-1.790	0.012	-6.847	0.018
34863	2	18	A190	0.150	7868	6210	-2.194	0.136	-7.357	0.209
34864	1	19	A191	0.215	9632	9350	-2.856	0.005	-7.021	0.026
34865	2	19	A192	0.204	9470	9108	-4.459	0.022	-6.556	0.014
34866	1	20	A68	0.186	9590	9254	-3.586	0.009	-6.464	0.015
34867	2	20	A77	0.165	6925	5327	-4.195	0.077	-6.861	0.129
34868	1	21	A115	0.207	9633	9244	-1.713	0.013	-6.305	0.011
34869	2	21	A119	0.190	9628	9384	-2.884	0.013	-5.921	0.023
34870	1	22	MAB	0.210	9444	8977	3.377	0.016	-7.100	0.016
34871	2	22	MAB	0.178	8706	6609	3.458	0.093	-7.199	0.153
34872	1	23	NBS19	0.172	9651	9317	1.956	0.010	-2.446	0.020
34873	2	23	A160	0.208	9707	9366	-0.899	0.007	-4.881	0.017
34874	1	24	A163	0.191	9516	9241	-1.957	0.003	-7.042	0.020
34875	2	24	A164	0.215	9713	9431	-2.598	0.012	-6.804	0.019

MAB mean (n=10)	3.403	-7.109
MAB std	0.054	0.076
NBS19 mean (n=2)	1.921	-2.490
NBS19 std	0.049	0.062

Sample Note:

Analytical Date: 2017/2/17

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
37001	1	2	MAB	0.170	15873	16550	3.500	0.004	-6.873	0.004
37002	2	2	MAB	0.207	13088	13725	3.467	0.005	-6.847	0.017
37003	1	3	NBS19	0.171	13004	13520	1.966	0.006	-2.150	0.008
37004	2	3	A35	0.177	13268	13854	-2.180	0.010	-5.661	0.009
37005	1	4	A39	0.194	13101	13859	-3.631	0.010	-6.011	0.014
37006	2	4	A77	0.193	13003	13414	-3.849	0.007	-6.033	0.007

37007	1	5	A135	0.196	13200	13697	-1.817	0.005	-6.060	0.007
37008	2	5	A159	0.166	13128	13704	-1.320	0.006	-4.852	0.010
37009	1	6	A177	0.188	13261	13937	-0.551	0.006	-4.768	0.007
37010	2	6	A181	0.191	9122	9564	-1.534	0.008	-6.204	0.003
37011	1	7	MAB	0.196	12919	13300	3.460	0.010	-6.913	0.007
37012	2	7	MAB	0.184	8468	8729	3.444	0.005	-6.747	0.016
37013	1	8	A185	0.177	13035	13695	-0.662	0.005	-5.468	0.012
37014	2	8	A187	0.190	13219	13897	-0.760	0.005	-4.898	0.005
37015	1	9	A190	0.172	13212	13919	-2.224	0.005	-7.068	0.007
37016	2	9	A162	0.196	12942	13308	-0.608	0.009	-5.601	0.008
37017	1	10	B01	0.182	13195	13671	-0.195	0.003	-5.162	0.009
37018	2	10	B02	0.164	13258	13850	-0.363	0.004	-5.248	0.007
37019	1	11	B03	0.162	13333	13970	-2.053	0.005	-5.494	0.012
37020	2	11	B04	0.186	8294	8661	-3.100	0.008	-5.604	0.016
37021	1	12	MAB	0.151	15665	15911	3.378	0.007	-6.908	0.004
37022	2	12	MAB	0.155	13209	13745	3.432	0.008	-6.884	0.004
37023	1	13	B05	0.179	13016	13724	-0.949	0.008	-5.978	0.007
37024	2	13	B06	0.176	13248	13875	-1.186	0.006	-6.047	0.010
37025	1	14	B07	0.171	13143	14011	-1.421	0.004	-5.566	0.006
37026	2	14	B08	0.176	16838	17219	-0.176	0.008	-4.812	0.010
37027	1	15	B09	0.193	13153	13662	-0.300	0.005	-4.628	0.017
37028	2	15	B10	0.176	9363	9736	-0.550	0.006	-5.086	0.010
37029	1	16	B11	0.183	13417	14117	-0.274	0.004	-5.220	0.010
37030	2	16	B12	0.193	13177	14145	-2.480	0.006	-5.522	0.007
37031	1	17	MAB	0.191	12984	13409	3.457	0.008	-6.678	0.014
37032	2	17	MAB	0.212	9709	10088	3.464	0.004	-6.729	0.014
37033	1	18	B13	0.175	13238	13926	-3.653	0.003	-5.788	0.011
37034	2	18	B14	0.185	13082	13608	-1.895	0.005	-6.250	0.007
37035	1	19	B15	0.173	13142	13929	-0.438	0.005	-5.650	0.004
37036	2	19	B16	0.181	12938	13374	0.074	0.006	-4.736	0.012
37037	1	20	B17	0.188	13042	13556	-0.326	0.006	-4.806	0.022
37038	2	20	B18	0.190	12995	13546	-1.935	0.005	-5.173	0.009
37039	1	21	B19	0.186	13031	13680	-1.576	0.007	-5.274	0.008
37040	2	21	B20	0.188	13215	13981	-3.251	0.008	-5.938	0.007
37041	1	22	MAB	0.171	13027	13389	3.487	0.007	-6.843	0.003
37042	2	22	MAB	0.182	13180	13723	3.433	0.003	-6.842	0.004

37043	1	23	NBS19	0.155	13072	13712	1.962	0.005	-2.136	0.012
37044	2	23	B21	0.183	13102	14026	-1.111	0.006	-5.707	0.013
37045	1	24	B22	0.174	13028	13911	-1.725	0.003	-5.813	0.008
37046	2	24	B23	0.170	11995	12541	-1.420	0.003	-5.804	0.006

MAB mean (n=10) 3.452 -6.826
MAB std 0.034 0.081

NBS19 mean (n=2) 1.964 -2.143
NBS19 std 0.003 0.010

Sample Note:

Analytical Date: 2017/2/20.21

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
37047	1	2	MAB	0.230	12955	13333	3.493	0.012	-6.875	0.007
37048	2	2	MAB	0.227	12990	13554	3.434	0.002	-6.86	0.010
37049	1	3	NBS19	0.131	13618	14200	1.971	0.006	-2.195	0.011
37050	2	3	B24	0.179	12889	13662	-0.869	0.008	-5.392	0.010
37051	1	4	B25	0.161	12997	13854	-0.381	0.005	-5.094	0.008
37052	2	4	B26	0.190	13048	13412	-0.438	0.007	-4.684	0.009
37053	1	5	B27	0.200	13134	13730	-2.356	0.007	-5.525	0.007
37054	2	5	B28	0.200	13174	13706	-2.825	0.005	-5.295	0.012
37055	1	6	B29	0.165	13196	13895	-3.605	0.008	-5.660	0.012
37056	2	6	B30	0.173	13237	14129	-3.594	0.004	-5.959	0.009
37057	1	7	MAB	0.176	13008	13435	3.471	0.003	-6.822	0.009
37058	2	7	MAB	0.213	13250	13729	3.466	0.006	-6.812	0.005
37059	1	8	B31	0.190	13108	13726	-1.325	0.011	-5.877	0.012
37060	2	8	B32	0.183	13145	13709	-0.566	0.007	-4.873	0.010
37061	1	9	B33	0.179	12989	13854	-0.262	0.007	-4.737	0.016
37062	2	9	B34	0.195	12922	13296	-1.448	0.005	-5.018	0.007
37063	1	10	B35	0.166	13142	13630	-1.995	0.006	-5.424	0.015
37064	2	10	B36	0.163	13309	13886	-3.347	0.012	-6.228	0.007

37065	1	11	B37	0.157	13373	14131	-3.500	0.005	-6.100	0.020
37066	2	11	B38	0.191	12990	13676	-0.988	0.004	-5.619	0.017
37067	1	12	MAB	0.190	12981	13425	3.458	0.014	-6.939	0.010
37068	2	12	MAB	0.202	13091	13628	3.466	0.006	-6.845	0.017
37069	1	13	B39	0.178	13170	13777	-0.816	0.004	-4.985	0.010
37070	2	13	B40	0.165	13408	14257	-1.244	0.010	-4.832	0.009
37071	1	14	B41	0.195	13080	14010	-0.931	0.011	-4.850	0.008
37072	2	14	B42	0.184	12938	13374	-1.375	0.007	-5.056	0.008
37073	1	15	B43	0.187	13295	13847	-2.556	0.008	-5.482	0.005
37074	2	15	B44	0.177	12874	13528	-1.412	0.008	-5.185	0.008
37076	1	16	B45	0.158	15880	16530	-2.280	0.007	-5.269	0.012
37077	2	16	B46	0.194	13028	13585	-1.817	0.007	-6.182	0.007
37078	1	17	MAB	0.158	13162	13824	3.445	0.007	-6.867	0.004
37079	2	17	MAB	0.161	13383	14085	3.426	0.005	-6.869	0.013
37080	1	18	B47	0.162	13110	13959	-1.234	0.007	-6.464	0.009
37081	2	18	B48	0.166	13040	13425	-0.268	0.005	-5.110	0.007
37082	1	19	B49	0.176	13081	13619	-0.664	0.013	-5.113	0.010
37083	2	19	B50	0.180	13130	13713	-1.292	0.004	-5.110	0.008
37084	1	20	B51	0.174	13185	13751	-1.060	0.008	-5.111	0.013
37085	2	20	B52	0.179	13118	14069	-3.089	0.008	-5.489	0.011
37086	1	21	B53	0.183	12669	13141	-0.387	0.008	-5.712	0.009
37087	2	21	B54	0.185	12999	13422	-0.472	0.005	-4.828	0.011
37088	1	22	MAB	0.230	11382	11959	3.435	0.008	-6.530	0.011
37089	2	22	MAB	0.207	13063	13617	3.485	0.003	-6.740	0.008
37090	1	23	NBS19	0.137	13402	13912	1.932	0.006	-2.252	0.010
37091	2	23	B55	0.197	13170	13613	-0.608	0.004	-4.762	0.007
37092	1	24	B56	0.169	13082	13744	-0.567	0.005	-4.812	0.011
37093	2	24	B57	0.162	13088	13682	-2.903	0.009	-5.366	0.002

MAB mean (n=10)	3.458	-6.816
MAB std	0.022	0.113
NBS19 mean (n=2)	1.952	-2.224
NBS19 std	0.028	0.040

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/3.6

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle	1 Cycle	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$
					Int Samp 44	Int Ref 44	Mean (permil)	Std Dev (permil)	Mean (permil)	Std Dev (permil)
37265	1	2	MAB	0.192	14013	14441	3.461	0.012	-6.892	0.007
37266	2	2	MAB	0.192	14137	14660	3.453	0.004	-6.920	0.013
37267	1	3	NBS19	0.142	14107	14733	1.958	0.006	-2.256	0.018
37268	2	3	B58	0.174	14385	15039	-3.054	0.009	-5.768	0.008
37269	1	4	B59	0.173	14160	14873	-2.367	0.006	-5.781	0.004
37270	2	4	B60	0.170	14154	14589	-1.320	0.008	-6.085	0.014
37271	1	5	B61	0.173	13986	14480	-0.328	0.005	-5.362	0.009
37272	2	5	B62	0.164	14144	14717	-0.726	0.007	-5.036	0.008
37273	1	6	B63	0.180	14178	14947	-0.186	0.007	-4.706	0.013
37274	2	6	B64	0.188	14109	14770	-1.231	0.007	-4.996	0.014
37275	1	7	MAB	0.184	14076	14594	3.466	0.006	-6.955	0.009
37276	2	7	MAB	0.196	14211	14763	3.456	0.006	-6.853	0.011
37277	1	8	B65	0.189	14319	14902	-2.034	0.008	-5.417	0.007
37278	2	8	B66	0.167	14114	14848	-0.262	0.006	-5.025	0.011
37279	1	9	B67	0.169	14140	14862	-0.849	0.005	-5.101	0.007
37280	2	9	B68	0.168	14087	14515	-0.468	0.005	-4.874	0.014
37281	1	10	B69	0.182	14228	14807	-2.798	0.007	-5.680	0.011
37282	2	10	B70	0.174	14276	14919	-1.106	0.007	-5.156	0.007
37283	1	11	B71	0.181	14425	15121	-2.065	0.007	-5.549	0.010
37284	2	11	B72	0.178	14144	14840	-0.612	0.009	-5.147	0.011
37285	1	12	MAB	0.212	13096	13310	3.463	0.005	-6.767	0.008
37286	2	12	MAB	0.167	14204	14746	3.425	0.005	-6.888	0.011
37287	1	13	B73	0.179	7891	7378	-1.120	0.006	-5.216	0.004
37288	2	13	B74	0.190	14235	14911	-2.209	0.009	-5.506	0.015
37289	1	14	B75	0.175	14165	14872	-0.940	0.006	-5.224	0.011
37290	2	14	B76	0.163	14019	14424	-0.907	0.005	-5.629	0.005
37291	1	15	B77	0.158	14256	14850	-0.067	0.006	-4.930	0.007
37292	2	15	B78	0.167	14149	14856	-0.367	0.005	-5.309	0.009
37293	1	16	B79	0.197	13974	14762	-2.517	0.002	-6.096	0.010
37294	2	16	B80	0.159	14285	14959	-2.246	0.004	-5.517	0.008

37295	1	17	MAB	0.206	11806	12072	3.458	0.009	-6.749	0.017
37296	2	17	MAB	0.166	14166	14707	3.450	0.003	-6.886	0.006
37297	1	18	B81	0.160	14080	14629	-0.539	0.006	-4.960	0.016
37298	2	18	B82	0.178	12662	13102	-1.388	0.008	-5.652	0.011
37299	1	19	B83	0.163	14138	14951	-1.868	0.007	-5.004	0.011
37300	2	19	B84	0.198	11525	11822	-3.644	0.004	-5.390	0.008
37301	1	20	B85	0.200	11772	12081	-1.984	0.009	-4.800	0.008
37302	2	20	B86	0.168	13806	14267	-2.789	0.005	-5.061	0.007
37303	1	21	B87	0.174	14118	14597	-3.270	0.005	-5.339	0.011
37304	2	21	B88	0.165	14107	14892	-4.026	0.004	-6.590	0.011
37305	1	22	MAB	0.188	14227	14895	3.449	0.012	-6.884	0.011
37306	2	22	MAB	0.193	12131	12615	3.434	0.005	-6.800	0.016
37307	1	23	NBS19	0.117	14025	14488	1.934	0.005	-2.285	0.012
37308	2	23	B89	0.159	14207	14746	-3.148	0.003	-5.476	0.007
37309	1	24	B90	0.155	14030	14687	-3.158	0.005	-6.153	0.006
37310	2	24	B91	0.165	14125	14795	-2.846	0.004	-5.999	0.007

MAB mean (n=10)	3.452	-6.859
MAB std	0.013	0.067
NBS19 mean (n=2)	1.946	-2.271
NBS19 std	0.017	0.021

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/7

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
37311	1	2	MAB	0.181	14091	14541	3.486	0.005	-6.875	0.012
37312	2	2	MAB	0.161	14112	14638	3.441	0.008	-6.882	0.006
37313	1	3	NBS19	0.128	14447	15026	1.966	0.008	-2.188	0.006
37314	2	3	B92	0.158	14294	14919	-2.950	0.007	-6.154	0.012
37315	1	4	B93	0.199	14134	14746	-4.714	0.006	-6.376	0.013
37316	2	4	B94	0.167	14202	14847	-2.191	0.003	-5.380	0.01

37317	1	5	B95	0.176	14346	14868	-4.834	0.002	-6.386	0.005
37318	2	5	B96	0.170	14235	14870	-2.180	0.007	-5.041	0.008
37319	1	6	B97	0.167	14098	14820	-2.143	0.009	-5.396	0.008
37320	2	6	B98	0.183	13931	14729	-3.746	0.008	-6.161	0.009
37321	1	7	MAB	0.168	14141	14635	3.479	0.007	-6.948	0.013
37322	2	7	MAB	0.208	14237	14828	3.514	0.004	-6.769	0.014
37323	1	8	B99	0.179	14206	14821	-3.509	0.006	-6.349	0.011
37324	2	8	B100	0.190	14167	14732	-2.780	0.007	-5.003	0.013
37325	1	9	B101	0.175	14263	14962	-1.706	0.004	-5.509	0.004
37326	2	9	B102	0.188	14109	14586	-1.714	0.004	-5.619	0.010
37327	1	10	B103	0.179	14243	14777	-1.348	0.002	-5.141	0.008
37328	2	10	B104	0.188	14319	14881	-4.018	0.003	-5.287	0.007
37329	1	11	B105	0.179	14221	15008	-1.555	0.006	-5.004	0.015
37330	2	11	B106	0.177	14256	14992	-2.198	0.009	-4.969	0.007
37331	1	12	MAB	0.167	14167	14601	3.500	0.008	-6.854	0.013
37332	2	12	MAB	0.158	14201	14730	3.451	0.005	-6.901	0.010
37333	1	13	B107	0.161	14290	14828	-2.198	0.004	-5.029	0.016
37334	2	13	B108	0.163	14222	14883	-4.241	0.004	-5.366	0.012
37335	1	14	B109	0.163	14363	15197	-4.415	0.006	-5.527	0.009
37336	2	14	B110	0.157	14207	14642	-4.196	0.006	-5.455	0.012
37337	1	15	B111	0.200	11812	12067	-3.715	0.011	-5.362	0.010
37338	2	15	B112	0.168	14237	14962	-2.916	0.006	-5.149	0.007
37339	1	16	B113	0.176	14339	14963	-3.456	0.009	-5.442	0.022
37340	2	16	B114	0.156	14396	15044	-3.667	0.009	-5.493	0.008
37341	1	17	MAB	0.203	14022	14475	3.475	0.006	-6.851	0.011
37342	2	17	MAB	0.159	14391	14915	3.450	0.004	-6.892	0.007
37343	1	18	B115	0.161	14252	15016	-2.417	0.001	-5.117	0.004
37344	2	18	B116	0.160	14388	15038	-3.038	0.004	-6.079	0.015
37345	1	19	B117	0.178	14336	15204	-2.810	0.007	-5.950	0.010
37346	2	19	B118	0.153	14012	14493	-2.886	0.005	-5.808	0.009
37347	1	20	B119	0.158	14321	14857	-1.275	0.006	-5.923	0.004
37348	2	20	B120	0.166	14232	14857	-2.606	0.003	-6.319	0.010
37350	1	21	B121	0.182	14105	14758	-1.283	0.005	-5.352	0.017
37351	2	21	B122	0.159	14215	14905	-1.237	0.014	-5.157	0.013
37352	1	22	MAB	0.192	14037	14499	3.495	0.005	-6.785	0.015
37353	2	22	MAB	0.180	14174	14833	3.434	0.007	-6.953	0.004

37356	1	23	NBS19	0.110	14358	15119	1.957	0.008	-2.304	0.013
37357	2	23	B123	few	11536	11941	-1.603	0.004	-4.746	0.009
37358	1	24	B124	0.155	14225	15038	-1.437	0.003	-4.719	0.006
37359	2	24	B125	0.180	13905	14609	-2.856	0.005	-5.187	0.017

MAB mean (n=10)	3.473	-6.871
MAB std	0.027	0.060
NBS19 mean (n=2)	1.962	-2.246
NBS19 std	0.006	0.082

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/21

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle	1 Cycle	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
					Int Samp 44	Int Ref 44				
37592	1	2	MAB	0.187	13828	14285	3.474	0.007	-6.791	0.010
37593	2	2	MAB	0.186	13904	14410	3.436	0.002	-6.930	0.014
37594	1	3	NBS19	0.134	13887	14431	1.953	0.007	-2.178	0.015
37595	2	3	B126	0.153	6089	6321	-2.068	0.015	-5.055	0.021
37596	1	4	B127	0.180	13893	14596	-0.945	0.010	-4.972	0.009
37597	2	4	B128	0.185	13786	14216	-3.727	0.003	-6.039	0.012
37598	1	5	B129	0.181	13967	14428	-2.887	0.007	-6.168	0.014
37599	2	5	B130	0.171	13950	14491	-0.909	0.011	-5.355	0.014
37600	1	6	B131	0.170	13933	14551	-0.909	0.006	-5.111	0.012
37601	2	6	B132	0.199	13927	14542	-1.523	0.008	-4.753	0.010
37602	1	7	MAB	0.166	13730	14121	3.453	0.005	-6.946	0.010
37603	2	7	MAB	0.191	14049	14626	3.446	0.012	-6.900	0.010
37604	1	8	B133	0.184	13945	14554	-1.512	0.005	-4.694	0.017
37605	2	8	B134	0.154	13922	14561	-1.764	0.006	-4.925	0.021
37606	1	9	B135	0.162	13978	14756	-1.265	0.004	-5.085	0.004
37607	2	9	B136	0.200	13860	14284	-2.921	0.009	-5.565	0.023
37608	1	10	B137	0.195	14047	14534	-2.829	0.010	-5.665	0.011

37609	2	10	B138	0.180	13940	14621	-1.831	0.003	-6.765	0.015
37610	1	11	B139	0.195	7421	6821	-0.382	0.006	-5.733	0.015
37611	2	11	B140	0.158	14036	14701	-0.688	0.014	-4.677	0.022
37612	1	12	MAB	0.178	13908	14299	3.448	0.008	-6.913	0.018
37613	2	12	MAB	0.180	13904	14382	3.434	0.008	-6.890	0.007
37614	1	13	B141	0.176	13886	14468	-1.610	0.006	-5.205	0.005
37615	2	13	B142	0.200	11376	11709	-2.895	0.008	-5.338	0.018
37616	1	14	B143	0.186	13960	14731	-3.309	0.008	-6.450	0.014
37617	2	14	B144	0.162	13853	14251	-0.855	0.008	-6.282	0.010
37618	1	15	B145	0.194	13997	14501	-0.483	0.008	-5.499	0.017
37619	2	15	B146	0.171	14021	14545	-1.271	0.006	-5.011	0.016
37620	1	16	B147	0.179	13937	14478	-1.777	0.005	-5.125	0.008
37621	2	16	B148	0.162	14077	14810	-2.157	0.005	-5.452	0.012
37622	1	17	MAB	0.171	13880	14429	3.486	0.008	-6.856	0.015
37623	2	17	MAB	0.164	13894	14485	3.424	0.006	-6.889	0.011
37624	1	18	B149	0.162	14010	14593	-3.130	0.008	-5.705	0.015
37625	2	18	B150	0.180	13939	14514	-2.593	0.005	-6.419	0.023
37626	1	19	B151	0.194	13901	14551	-0.690	0.005	-5.554	0.017
37627	2	19	B152	0.181	13974	14429	-1.659	0.004	-5.052	0.013
37628	1	20	B153	0.181	13944	14375	-3.500	0.011	-5.705	0.015
37629	2	20	B154	0.156	18229	18781	-3.745	0.012	-6.486	0.012
37630	1	21	B155	0.157	13898	14461	-1.788	0.006	-6.482	0.014
37631	2	21	B156	0.156	14221	14908	-1.834	0.003	-6.009	0.009
37633	1	22	MAB	0.169	13934	14345	3.458	0.007	-6.895	0.007
37634	2	22	MAB	0.153	14214	14743	3.414	0.008	-7.025	0.015
37635	1	23	NBS19	0.112	14614	15266	1.924	0.012	-2.313	0.025

MAB mean (n=10)	3.447	-6.904
MAB std	0.022	0.060
NBS19 mean (n=2)	1.939	-2.246
NBS19 std	0.021	0.095

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/22

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
37636	1	2	MAB	0.197	13975	14413	3.426	0.009	-6.935	0.010
37637	2	2	MAB	0.164	14279	14824	3.403	0.004	-6.902	0.015
37638	1	3	NBS19	0.154	14487	15137	1.914	0.010	-2.251	0.010
37639	2	3	B160	0.152	14137	14850	-3.413	0.011	-5.594	0.007
37640	1	4	B161	0.178	14314	14949	-5.511	0.009	-6.674	0.019
37641	2	4	B162	0.151	13976	14329	-3.460	0.009	-5.483	0.009
37642	1	5	B163	0.166	14111	14537	-5.828	0.011	-6.648	0.018
37643	2	5	B164	0.199	14081	14637	-4.090	0.007	-5.742	0.007
37644	1	6	B165	0.166	14224	14781	-4.749	0.003	-6.025	0.008
37645	2	6	B166	0.169	14096	14916	-4.448	0.007	-7.023	0.019
37646	1	7	MAB	0.158	14068	14460	3.397	0.006	-7.023	0.012
37647	2	7	MAB	0.156	14308	14799	3.395	0.006	-6.908	0.005
37648	1	8	B167	0.192	14672	15298	-4.851	0.010	-6.798	0.019
37649	2	8	B168	0.164	14151	14837	-4.211	0.005	-6.546	0.009
37650	1	9	B169	0.175	14166	14906	-2.626	0.010	-6.050	0.011
37651	2	9	B170	0.189	14109	14557	-5.215	0.014	-6.531	0.026
37652	1	10	B171	0.170	14167	14731	-4.937	0.009	-6.444	0.018
37653	2	10	B172	0.190	14253	14805	-5.069	0.002	-6.383	0.015
37654	1	11	B173	0.156	13976	14664	-1.844	0.004	-5.684	0.017
37656	2	11	B174	0.171	18861	19322	-3.970	0.006	-5.760	0.011
37657	1	12	MAB	0.165	14158	14617	3.390	0.009	-6.999	0.035
37658	2	12	MAB	0.150	14185	14739	3.392	0.010	-6.969	0.024
37659	1	23	NBS19	0.150	14515	15362	1.909	0.007	-2.268	0.020

MAB mean (n=6)

3.401

-6.956

MAB std

0.013

0.049

NBS19 mean (n=2)

1.912

-2.260

NBS19 std

0.004

0.012

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/27

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle Int Samp 44	1 Cycle Int Ref 44	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
37726	1	2	MAB	0.169	17550	17943	3.435	0.008	-6.934	0.015
37727	2	2	MAB	0.168	14211	14695	3.458	0.006	-6.982	0.007
37728	1	3	NBS19		10298	10665	1.926	0.010	-2.250	0.019
37729	2	3	B157	0.150	13741	14281	-0.918	0.008	-5.427	0.005
37730	1	4	B158	0.183	14181	14826	-1.123	0.007	-5.015	0.005
37731	2	4	B159	0.187	14069	14462	-1.594	0.005	-5.094	0.009
37733	1	5	B175	0.199	14191	14684	-4.059	0.006	-5.779	0.009
37734	2	5	B176	0.176	14215	14728	-1.997	0.008	-5.976	0.015
37735	1	6	B177	0.182	14333	15003	-2.604	0.011	-5.181	0.005
37736	2	6	B178	0.190	14236	14900	-2.592	0.007	-5.642	0.018
37737	1	7	MAB	0.165	14023	14426	3.434	0.009	-6.959	0.008
37738	2	7	MAB	0.177	14319	14834	3.444	0.009	-6.893	0.012
37739	1	8	B179	0.161	14184	14685	-2.418	0.007	-5.296	0.023
37740	2	8	B180	0.159	14149	14718	-5.487	0.005	-6.836	0.014
37742	1	9	B181	0.184	14185	14640	-3.805	0.003	-6.157	0.019
37743	2	9	B182	0.169	14278	14754	-2.758	0.006	-5.299	0.006
37744	1	10	B183	0.190	14181	14864	-3.096	0.006	-5.609	0.005
37745	2	10	B184	0.166	14291	14903	-4.440	0.005	-6.958	0.013
37747	1	18	NBS19		7130	7403	1.850	0.011	-2.355	0.019

MAB mean (n=4)

3.443

-6.942

MAB std

0.011

0.038

NBS19 mean (n=2)

1.888

-2.303

NBS19 std

0.054

0.074

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/30

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle	1 Cycle	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$
					Int Samp 44	Int Ref 44	Mean (permil)	Std Dev (permil)	Mean (permil)	Std Dev (permil)
37830	1	2	MAB	0.160	18294	18720	3.434	0.005	-6.816	0.005
37831	2	2	MAB	0.166	14189	14642	3.407	0.003	-6.987	0.008
37832	1	3	NBS19	0.142	14080	14658	1.913	0.004	-2.210	0.009
37833	2	3	B185	0.187	14257	14835	-4.429	0.006	-6.035	0.009
37834	1	4	B186	0.174	14358	14974	-3.661	0.007	-6.824	0.006
37835	2	4	B187	0.171	13934	14323	-3.390	0.006	-6.224	0.006
37836	1	5	B188	0.194	14306	14831	-4.141	0.005	-6.466	0.007
37837	2	5	B189	0.162	14082	14621	-4.810	0.010	-6.543	0.008
37838	1	6	B190	0.183	14136	14709	-2.056	0.003	-5.877	0.008
37839	2	6	B191	0.180	14075	14739	-1.694	0.006	-5.646	0.015
37840	1	7	MAB	0.184	14097	14549	3.413	0.008	-6.901	0.012
37841	2	7	MAB	0.185	14193	14672	3.402	0.011	-6.894	0.012
37842	1	8	B192	0.167	14312	14949	-1.137	0.009	-5.182	0.007
37843	2	8	B193	0.165	14229	14897	-2.090	0.004	-5.640	0.016
37844	1	9	B194	0.188	14180	14898	-1.658	0.006	-5.133	0.009
37845	2	9	B195	0.185	14058	14542	-3.279	0.006	-5.568	0.005
37846	1	10	B196	0.155	14112	14614	-3.010	0.004	-5.597	0.006
37847	2	10	B197	0.165	14183	14735	-1.610	0.006	-5.144	0.016
37848	1	11	B198	0.111	14331	14935	-1.330	0.008	-5.129	0.013
37849	2	11	B199	0.197	14306	15096	-2.816	0.005	-5.591	0.016
37850	1	12	MAB	0.189	14334	14784	3.412	0.006	-6.947	0.011
37851	2	12	MAB	0.202	14167	14666	3.406	0.008	-6.955	0.007
37852	1	13	B200	0.176	14207	14857	-1.679	0.004	-5.203	0.026
37853	2	13	B201	0.170	14228	14786	-1.775	0.007	-5.413	0.015
37854	1	14	B202	0.173	14272	14977	-1.844	0.007	-5.440	0.017
37855	2	14	B203	0.155	14061	14482	-3.489	0.005	-6.394	0.026
37856	1	15	B204	0.179	14183	14688	-1.734	0.008	-5.567	0.031
37857	2	15	B205	0.161	14153	14694	-1.804	0.008	-6.394	0.025
37858	1	16	B206	0.182	14233	14808	-1.058	0.013	-4.811	0.011
37859	2	16	B207	0.151	14075	14784	-1.981	0.015	-5.263	0.018

37860	1	17	MAB	0.179	14115	14518	3.417	0.009	-6.941	0.008
37861	2	17	MAB	0.195	14258	14734	3.416	0.007	-6.952	0.012
37862	1	18	NBS19	0.132	14332	14868	1.888	0.006	-2.320	0.011

MAB mean (n=8)

3.413

-6.924

MAB std

0.010

0.053

NBS19 mean (n=2)

1.901

-2.265

NBS19 std

0.018

0.078

Sample Note:

Analytical Date: 2017/3/31

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle	1 Cycle	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{13}\text{C_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$	$\delta^{18}\text{O_PDB}$
					Int	Int Ref				
					Samp		Mean	Std Dev	Mean	Std Dev
					44	44	(permil)	(permil)	(permil)	(permil)
37864	1	2	MAB	0.152	16514	16907	3.392	0.007	-6.929	0.019
37865	2	2	MAB	0.165	14182	14599	3.416	0.008	-6.894	0.012
37866	1	3	NBS19	0.128	14241	14695	1.913	0.004	-2.22	0.012
37867	2	3	B208	0.179	14101	14618	-1.969	0.011	-5.083	0.009
37868	1	4	B209	0.197	14206	14717	-3.860	0.005	-5.557	0.008
37869	2	4	B210	0.181	14121	14547	-3.196	0.010	-5.611	0.006
37870	1	5	B211	0.163	14250	14765	-3.461	0.005	-5.736	0.003
37871	2	5	B212	0.165	14181	14628	-3.904	0.003	-5.497	0.009
37872	1	6	B213	0.181	14109	14597	-4.787	0.008	-6.308	0.008
37873	2	6	B214	0.176	14182	14702	-4.698	0.004	-6.352	0.011
37874	1	7	MAB	0.159	14040	14399	3.385	0.006	-6.941	0.011
37875	2	7	MAB	0.188	14060	14511	3.430	0.006	-6.900	0.015
37876	1	8	B215	0.168	14081	14600	-3.873	0.012	-6.806	0.006
37877	2	8	B216	0.178	14194	14698	-3.311	0.006	-5.399	0.013
37878	1	9	B217	0.172	14189	14693	-3.102	0.006	-6.585	0.012
37879	2	9	B218	0.165	14173	14559	-2.496	0.009	-6.187	0.012
37880	1	10	B219	0.180	14183	14603	-2.375	0.007	-6.197	0.007
37881	2	10	B220	0.190	14080	14563	-1.894	0.007	-5.165	0.005
37882	1	11	B221	0.191	14124	14615	-3.110	0.009	-5.796	0.011

37883	2	11	B222	0.154	14160	14736	-3.199	0.006	-5.749	0.021
37884	1	12	MAB	0.154	14209	14602	3.417	0.004	-6.993	0.008
37885	2	12	MAB	0.180	14233	14718	3.431	0.006	-6.918	0.012
37886	1	13	B223	0.162	14169	14706	-3.031	0.007	-6.319	0.011
37887	2	13	B224	0.163	14233	14729	-2.720	0.007	-5.711	0.011
37888	1	14	B225	0.175	14046	14587	-2.702	0.010	-5.890	0.008
37889	2	14	B226	0.161	13976	14338	-1.693	0.007	-6.140	0.011
37890	1	15	B227	0.168	14182	14623	-0.636	0.005	-5.566	0.006
37891	2	15	B228	0.166	14220	14785	-1.163	0.006	-5.101	0.010
37893	1	16	B229	0.160	17348	17655	-0.186	0.008	-4.856	0.007
37894	2	16	B230	0.208	14192	14727	-4.093	0.010	-5.903	0.011
37895	1	22	MAB	0.170	13971	14394	3.434	0.009	-6.889	0.005
37896	2	22	MAB	0.154	14237	14749	3.426	0.006	-6.878	0.016
37897	1	23	NBS19	0.128	14104	14632	1.889	0.004	-2.286	0.007

MAB mean (n=8)	3.416	-6.918
MAB std	0.018	0.037
NBS19 mean (n=2)	1.901	-2.253
NBS19 std	0.017	0.047

Sample Note:

Analytical Date: 2017/4/5

Analysis	Line	Sample	Sample Name	weight (mg)	1 Cycle	1 Cycle	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{13}\text{C_PDB}$ Std Dev (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Mean (permil)	$\delta^{18}\text{O_PDB}$ Std Dev (permil)
					Int Samp 44	Int Ref 44				
37898	1	2	MAB	0.181	14034	14401	3.439	0.005	-6.837	0.007
37899	2	2	MAB	0.155	14105	14547	3.440	0.005	-6.857	0.006
37900	1	3	NBS19	0.136	17415	17879	1.926	0.005	-2.294	0.013
37901	2	3	B231	0.172	14210	14733	-3.524	0.005	-5.561	0.010
37902	1	4	B232	0.130	14114	14646	-3.958	0.007	-6.853	0.016
37904	2	4	B233	0.158	14097	14466	-2.937	0.003	-6.702	0.010
37905	1	5	B234	0.150	14008	14505	-2.682	0.006	-6.645	0.002
37906	2	5	B235	0.161	14249	14789	-1.396	0.010	-6.038	0.009

37907	1	6	B236	0.153	16564	17092	-0.619	0.007	-5.239	0.021
37908	2	6	B237	0.205	14172	14710	-0.796	0.004	-4.674	0.011
37909	1	7	MAB	0.179	14030	14407	3.407	0.004	-6.979	0.006
37910	2	7	MAB	0.153	14173	14616	3.414	0.013	-6.906	0.012
37911	1	8	B238	0.158	14172	14645	-0.628	0.009	-5.097	0.007
37912	2	8	B239	0.195	14165	14610	-1.046	0.007	-4.832	0.008
37913	1	9	B240	0.174	15680	16173	-0.963	0.006	-4.821	0.016
37914	2	9	B241	0.176	14137	14622	-0.670	0.011	-4.824	0.018
37915	1	10	B242	0.195	14133	14589	-0.943	0.006	-5.176	0.007
37916	2	10	B243	0.141	14421	15069	-1.068	0.003	-5.437	0.006
37917	1	11	B244	0.165	14274	14810	-1.603	0.007	-5.453	0.023
37918	2	11	B245	0.210	14296	15070	-3.914	0.011	-6.134	0.008
37919	1	12	MAB	0.164	14131	14543	3.382	0.006	-7.001	0.010
37920	2	12	MAB	0.160	14115	14582	3.413	0.010	-6.932	0.021
37921	1	13	B246	few	14249	14829	-3.822	0.005	-6.889	0.012
37922	2	13	B247	few	14184	14707	-3.177	0.008	-7.041	0.022
37923	1	14	B248	few	14224	14773	-1.688	0.009	-6.741	0.007
37924	2	14	B249	few	13368	13735	-1.224	0.006	-5.620	0.009
37925	1	15	B250	few	14116	14593	-1.551	0.008	-5.359	0.012
37926	2	15	B251	0.151	14114	14579	-1.514	0.009	-4.992	0.010
37927	1	16	B252	few	14146	14657	-1.756	0.009	-5.043	0.013
37928	2	16	B253	0.166	13944	14279	-1.719	0.011	-4.913	0.004
37929	1	17	MAB	0.204	14251	14699	3.414	0.013	-6.989	0.007
37930	2	17	MAB	0.188	14257	14742	3.411	0.005	-6.939	0.014
37931	1	18	NBS19	0.113	14234	14759	1.839	0.007	-2.234	0.013
37932	2	18	B254	0.185	13964	14373	-1.748	0.008	-5.003	0.016
37933	1	19	B255	0.195	14265	14779	-1.932	0.005	-5.280	0.008
37934	2	19	B256	0.173	3849	4026	-1.698	0.008	-5.295	0.024
37935	1	20	B257	few	6838	7030	-1.899	0.004	-5.818	0.010

MAB mean (n=8)

3.415

-6.930

MAB std

0.018

0.060

NBS19 mean (n=2)

1.883

-2.264

NBS19 std

0.062

0.042

附錄四 LKM 地區海階地形測量結果



測量日期：2015/03/20

座標系統：UTM 6° (WGS84)

Zone：46Q

單位：公尺

pt	Easting	Northing	Height	Error	description
1	550929.1829	2141021.6188	7.7350	0.0000	發現珊瑚樣本 LKM215、LKM216、 LKM217 的河道
2	550931.6747	2141010.1353	7.7981	0.0182	
3	550926.5929	2141030.9693	7.7373	0.0140	
4	550921.9770	2141037.2484	7.6478	0.0165	
5	550917.8139	2141047.8010	7.5627	0.0173	
6	550938.4199	2141029.2504	7.7844	0.0183	
7	550943.0654	2141023.3323	7.9688	0.0160	
8	550904.5480	2141024.7940	11.1921	0.0171	珊瑚樣本上方的階面
9	550970.7866	2141033.2201	11.0898	0.0268	T4 階面
10	550986.6144	2141000.7560	11.0073	0.0188	
11	551004.3882	2141005.1190	10.6126	0.0135	
12	551017.4904	2141014.1888	10.6043	0.0124	
13	551038.3647	2141009.9577	10.5556	0.0143	
14	551053.3001	2141052.1087	10.8710	0.0205	
15	551041.1633	2141062.7486	11.1241	0.0202	
16	551029.8826	2141067.0168	11.3623	0.0155	
17	551005.2646	2141063.7634	11.4121	0.0121	
18	550968.3932	2141090.0470	11.3781	0.0127	
19	550944.4875	2141111.7165	11.3806	0.0137	
20	550915.4631	2141126.2112	11.2229	0.0134	
21	550875.6989	2141136.1512	11.0809	0.0144	
22	550874.1907	2141169.5221	11.3814	0.0143	
23	550854.7815	2141182.3798	11.2805	0.0124	
24	550840.2771	2141189.1291	11.1172	0.0134	

25	550813.0997	2141186.7790	11.1589	0.0129	 河道階面
26	550781.9936	2141192.4534	11.1442	0.0159	
27	550755.4490	2141212.0213	4.6265	0.0128	
28	550771.5664	2141231.7493	4.7279	0.0147	
29	550760.8728	2141256.3640	4.5536	0.0132	
30	550783.8730	2141296.4573	4.2653	0.0206	珊瑚樣本 LKM570
31	550739.8405	2141258.3889	6.9128	0.0187	
32	550750.2865	2141328.8735	4.2642	0.0150	河道階面
33	550781.8471	2141350.3117	4.2136	0.0132	
34	550764.3537	2141383.0419	4.1335	0.0125	
35	550749.4443	2141413.2637	10.4283	0.0115	T4 階面
36	550718.3019	2141419.7607	10.7966	0.0152	
37	550694.0479	2141427.6439	10.8056	0.0130	
38	550667.6955	2141419.0614	10.9467	0.0127	
39	550652.6678	2141453.0321	10.9759	0.0143	
40	550694.8896	2141458.3139	10.8032	0.0123	
41	550724.6388	2141453.8694	10.7634	0.0130	
42	550750.0169	2141446.1277	10.7464	0.0225	
43	550776.3991	2141446.5464	10.4887	0.0134	
44	550774.0588	2141419.7559	10.0316	0.0137	
45	550804.5344	2141401.0441	3.9763	0.0144	古河道階面
46	550836.2384	2141432.4544	3.8641	0.0124	
47	550847.6814	2141482.5193	3.6730	0.0153	
48	550862.9450	2141503.3298	10.4832	0.0155	另一側的 T4 階面
49	550853.5641	2141511.4438	10.0262	0.0194	
50	550818.9409	2141509.5029	3.5287	0.0182	古河道階面
51	550797.2130	2141533.1578	3.3784	0.0180	
52	550762.1155	2141545.7555	3.2608	0.0180	
53	550744.2260	2141557.4602	4.1834	0.0184	
54	550746.4111	2141584.6690	5.3962	0.0189	T3 殘餘面
55	550735.6248	2141573.2324	5.3503	0.0233	
56	550718.2974	2141622.8983	5.8998	0.0228	
57	550701.8188	2141612.6827	4.0407	0.0220	
58	550655.1165	2141571.5572	4.1020	0.0201	

59	550623.8219	2141591.4058	4.1895	0.0194	
60	550643.9405	2141618.2871	6.2221	0.0140	
61	550625.5152	2141636.3437	6.1146	0.0134	
62	550605.0523	2141659.9922	6.0545	0.0123	
63	550559.4561	2141697.6984	4.3954	0.0136	古河道階面
64	550510.7574	2141706.9818	4.4693	0.0113	
65	550469.5198	2141723.1061	4.4784	0.0151	
66	550418.3838	2141722.3873	4.8058	0.0133	
67	550407.5668	2141728.3496	5.5907	0.0143	T3 階面
68	550372.7615	2141727.8859	5.7430	0.0146	
69	550333.7616	2141708.2244	5.7697	0.0140	
70	550297.7822	2141683.9505	5.9944	0.0139	
71	550256.7104	2141644.1471	6.2545	0.0134	
72	550226.6917	2141603.6785	6.1664	0.0144	
73	550318.4403	2141651.6766	4.4935	0.0223	T4 beach ridge 下的礫石
74	550193.4282	2141570.9291	5.9661	0.0154	T3 階面
75	550170.1316	2141539.8714	6.2865	0.0158	
76	550162.0852	2141535.2631	5.7919	0.0169	河道
77	550138.2906	2141517.5581	5.5487	0.0165	
78	550137.1379	2141486.2433	6.2437	0.0145	T3 到 T4 剖面
79	550145.7808	2141462.6101	6.5683	0.0204	
80	550153.8186	2141448.5182	6.8389	0.0185	
81	550161.5308	2141432.6075	7.2747	0.0185	
82	550165.7984	2141415.5398	7.8532	0.0152	
83	550163.8975	2141399.2042	8.2849	0.0179	道路
84	550116.0418	2141507.8241	5.6912	0.0155	T3 往海邊剖面
85	550097.1940	2141525.1675	5.4357	0.0168	
86	550075.6033	2141536.9847	5.1345	0.0163	
87	550065.4699	2141544.8425	4.8666	0.0134	
88	550057.6825	2141550.6068	4.5509	0.0146	
89	550046.9511	2141559.6233	4.3705	0.0145	
90	550028.1229	2141572.9749	4.2314	0.0145	
91	550006.8832	2141588.5241	4.1761	0.0149	

92	549990.0582	2141603.2174	4.2435	0.0136	
93	549987.2493	2141604.9740	4.7966	0.0142	
94	549972.8142	2141616.4373	4.7312	0.0134	
95	549956.0288	2141628.3975	4.1140	0.0133	
96	549945.9129	2141637.1542	3.7350	0.0147	
97	549935.2613	2141644.9852	3.2392	0.0134	
98	549926.1454	2141652.0267	2.9754	0.0138	
99	549916.8631	2141660.5257	2.7434	0.0153	
100	549908.8938	2141667.6555	2.4751	0.0140	
101	549899.0772	2141676.8406	2.3319	0.0157	
102	549889.5383	2141683.8106	2.0223	0.0136	
103	549880.4330	2141693.7167	1.5555	0.0149	
104	549870.5946	2141703.1003	1.4075	0.0159	
105	549853.3622	2141722.2462	1.3393	0.0145	
106	549839.6799	2141734.9230	1.4374	0.0162	
107	549836.3163	2141743.5401	2.2354	0.0153	
108	549835.9712	2141744.9131	2.5902	0.0166	
109	549818.2338	2141754.4690	2.0410	0.0151	
110	549802.7516	2141769.5461	1.5486	0.0175	
111	549769.7071	2141789.8576	1.6705	0.0142	
112	549758.2256	2141805.0524	1.7734	0.0144	
113	549739.9716	2141830.6939	2.2114	0.0166	
114	549722.6215	2141848.5342	3.2488	0.0172	
115	549717.2247	2141852.0491	3.6568	0.0149	
116	549706.6096	2141860.1286	3.2754	0.0145	
117	549691.1506	2141870.4673	2.4345	0.0155	
118	549684.6616	2141876.0300	2.2718	0.0180	
119	549669.5376	2141887.6969	0.8985	0.0170	
120	549658.1177	2141896.4511	0.3449	0.0215	
121	549641.7443	2141908.7460	-0.1744	0.0247	
122	549623.1533	2141921.7120	-0.6346	0.0318	海水面(捨棄)
123	549623.1637	2141921.7744	-0.6420	0.0191	海水面