

國立臺灣大學理學院地質科學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Geosciences

National Taiwan University

Master Thesis

台灣西南海域上部斜坡海底泥火山

氣體來源及甲烷通量估算

Gas Origin and Estimation of Methane Flux from Submarine
Mud Volcanoes in the Upper Slope Offshore Southwest Taiwan

黃愉琿

Yu Chun Huang

指導教授：楊燦堯 博士

Advisor: Tsanyao Frank Yang, Ph.D.

中華民國 102 年 8 月

August, 2013

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

台灣西南海域上部斜坡海底泥火山

氣體來源及甲烷通量估算

Gas Origin and Estimation of Methane Flux from Submarine

Mud Volcanoes in the Upper Slope Offshore Southwest Taiwan

本論文係黃愉琿君 (R00224207) 在國立臺灣大學地質科學系完成之碩士學位論文，於民國 102 年 8 月 2 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：

楊煥堯

(指導教授)

林仁山

林曉斌

洪復章

王詠綸

謝志杰

誌 謝

碩士班在讀期間的這兩年是我的人生中很特別也很重要的過程，這本論文的誕生即是重要見證，搭上研究船出海採樣、參加國際會議等經驗更是過去從來未能想像，能夠體驗如此特別的人生經驗都要感謝偉大的楊燦堯老師給予我加入氣體地球化學實驗室的機會。兩年前初來乍到一個新環境，在實驗室的大家照顧之下，陌生的緊張感很快就消失無蹤，謝謝你們。

感謝水合物組的大姐頭**乃圈圈乃禎**，從實驗到出海大小事都是妳教我的，感謝**胡拉奇靜宜**在我剛進來時就一直很愛護我、幫我分擔實驗，感謝**小龜宗翰**好幾次出海的力挺，感謝**佩涓**雖然我們見到面的時間不長，但每次信件往來都得到妳很多很棒的回應，感謝**宣文**打從心底替學弟妹們著想，和你討論學術過程裡總是得到特別的想法，感謝來自日本的博士後研究員**蛭田明宏**先生用力的鞭策，水合物組因為有你們而壯大。


感謝和我一起出過野外還有航次、幫我分擔很多實驗的**曜睿、松棧、悅婷、Lulu**；感謝給我很多鼓勵跟建議的**曉芬、艾荻、建任大哥、Monika**；感謝行政助理**佳菱與皇伶**，沒有你們的話我們很多事情都無法進行；特別感謝**心怡**，因為就在鄰座的關係，有什麼問題轉頭就是問你，你總是無條件替我解惑。還有**Walia**一家、土壤氣組的**世榮、小州、國維、效賢**，前助理**大蒜張嘉心、學弟妹又珍、大綸、小乖、高麗菜**，氣體地球化學實驗室就是個大家庭，我在這裡學習到很多不同於以往的經驗，也得到很多很多溫暖。

感謝碩士班同學**林頭大毓潔和簡武雄于翔**，我從你們這裡得到的是絕對的支持與鼓勵，感謝 237 研究生室的**姚明辰翰和賴瑞序衡、雅琳小西瓜**還有**邵文佑佑哥**，在論文工作進行時 237 簡直就是第二個家。

感謝**王詠絢老師、林立虹老師、林曉武老師、洪慶章老師、蘇志杰老師**給我很多論文上的建議，感謝**海研三號**全體人員於出海採樣時的協助，感謝地調所**陳松春**先生提供很多資料以及學術上寶貴的意見，感謝中央大學**林筱珊**助理協助資料處理。感謝**成大地科系、台大海研所**的朋友們一直以來的陪伴，最後要感謝**永成眼鏡公司**的老闆和老闆娘，因為你們是我生命中最重要的人。

碩士班的生活以這本論文的完成而劃下句點，謝謝在這段期間所有曾經為我付出、幫助過我的人們，我會帶著滿滿的收穫，繼續往人生的下個旅程邁進。

摘要



台灣西南海域上部斜坡區域已確定有 13 座泥火山存在活躍地噴氣中，這些泥火山分別被命名為 MV1 ~ MV13。透過海洋沉積物之孔隙氣體及海水溶解氣體分析，得知本區域海底泥火山噴發氣體主要為甲烷，與少量其他碳氫化合物與二氧化碳等，這些碳氫化合物可能逸出海表形成重要的天然溫室氣體來源。本研究利用海研三號及海研五號研究船於 2011-2012 年航次，有系統地採集本地區海底泥火山逸氣正上方及周圍區域之海水剖面（water column）及海底沉積物岩心樣品，以探討其甲烷逸氣來源並估算其通量。

海底沉積物岩心樣品所含甲烷氣體之碳同位素分析結果約為 $-30 \sim -50 \%$ ，指示該區域之甲烷氣體主要為熱分解來源，而後可能有不同比例生物性甲烷來源之混染。由海水樣品中溶解氣體分析結果顯示，其甲烷濃度高於正常海水背景值 2~20 倍，暗示甲烷氣由泥火山逸散至海水中。氣泡大小分佈、泥火山噴發的初始條件造成的上升及側向海流等因素影響了甲烷在海水中的移棲型態，許多證據都指向本研究區域深水泥火山噴發之甲烷可以被傳送到淺層海水之中。

透過氣體擴散方程式（Gas Diffusion Equation）計算，本區域海洋對大氣甲烷通量為 $0.15 \sim 127 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ；透過 Fick's Law 計算沉積物對海洋底水的甲烷擴散通量為 $1.14 \sim 157 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ，此結果顯示本區域海底泥火山對海洋及大氣扮演提供甲烷的角色。進一步考慮噴氣影響的面積，初步估算西南海域上部斜坡海底泥火山區貢獻到大氣中的甲烷量為每年 4.1 噸。

關鍵字：台灣西南海域、海底泥火山、甲烷通量、氣體來源

Abstract

Thirteen submarine active mud volcanoes, which named MV1~ MV13, have been recognized in the area between Kaoping Canyon and Fangliao Ridge, offshore southwest Taiwan. It has been considered that these mud volcanoes are closely related to the intrusion of mud diapirs. The predominant composition of those gas seeps is methane, which may escape to the atmosphere and become an important natural source of greenhouse gas.

To estimate the methane flux emission via those mud volcanoes in this area, we have conducted three-cruise surveys during the period of 2011-2012. In this study, we traced the location of gas plume for each mud volcano by echo sonar (EK60) survey first. And then, we can collect the water column samples right above the venting mud volcanoes, and also the sediment samples by gravity corer.

The carbon isotopic data of methane gas from cored sediments range from -30 to -50 ‰. It indicates that the methane gas is mostly thermogenic in origin, and may mix with different proportions of biogenic gas source. Meanwhile, the dissolved methane concentrations of sea water above the seepages are 2-20 times higher than those in the background area. Many factors may affect the migration of dissolved methane, including the distribution of methane gas bubble sizes and upwelling / lateral current resulted by initial condition of venting. All the evidences point out the dissolved methane which supplied by deep water submarine mud volcanoes can be transferred to the shallow depth in study area.

Based on the diffusive exchange equation and Fick's First Law, the methane flux of sediment-to-bottom water and ocean-to-air can be estimated ca. 1.14 ~ 157 and 0.15 ~ 127 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectively. The result shows that the sea water would play an important role in methane source to atmosphere, at least, in the studied region.

Furthermore, we can have an approximate estimation of the total methane flux of ca. 4,100 kg yr⁻¹ in this region.



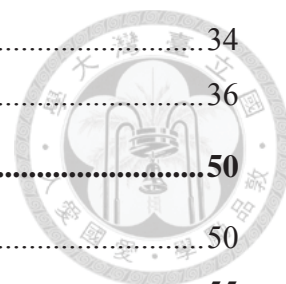
Key words : off SW Taiwan, submarine mud volcano, methane flux, gas origin

目 錄



誌 謝.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	III
目 錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	VIII
第一章 緒論	1
1-1 研究背景	1
1-2 文獻回顧	2
1-3 研究目的	6
1-3-1 了解甲烷離開沉積物後在海水中移棲的型態與原因	6
1-3-2 估算台灣西南海域上部斜坡甲烷對大氣的總輸出量	6
第二章 研究方法	7
2-1 研究區域	7
2-1-1 台灣西南海域上部斜坡地質構造背景	7
2-1-2 採樣位置	7
2-2-2 海水樣品採集及分析	14
2-2-3 海洋沉積物及其孔隙水採集及分析	16
2-3 氣體濃度換算	18
2-3-1 海水溶解氣體濃度計算	18
2-3-2 沉積物間隙氣體濃度計算	18
2-3-3 氣體成份分析之準確度和精確度誤差	18
第三章 分析結果	19
3-1 海水	19
3-1-1 溶解氣體分析結果	19
3-1-2 氮同位素分析結果	21
3-2 海洋沉積物	31
3-2-1 孔隙氣體及其甲烷碳同位素分析結果	31

3-2-2 孔隙水陰離子分析結果.....	34
3-2-3 孔隙水溶解無機碳及其碳同位素分析結果.....	36
第四章 討論	50
4-1 溶解甲烷在海水中隨深度的變化.....	50
4-2 甲烷通量.....	55
4-2-1 沉積物中的甲烷通量.....	55
4-2-2 沉積物對海洋底水之甲烷通量.....	57
4-2-3 海水對大氣之甲烷通量.....	58
4-2-4 研究區域的甲烷總輸出量.....	62
4-3 氣體來源.....	64
4-3-1 沉積物孔隙中的甲烷碳同位素.....	64
4-3-2 海水剖面的溶解氦氣及其同位素.....	66
4-4 孔隙水溶解無機碳同位素與泥火山噴發型態相關性之推論.....	67
4-5 甲烷移棲模型.....	71
第五章 結論	72
第六章 參考文獻	73



圖目錄



圖 1-1：由水下無人載具（ROV）拍攝到海底泥火山噴發影像.....	4
圖 1-2：台灣西南海域底層海水甲烷濃度分佈圖.....	4
圖 2-1：台灣西南海域上部斜坡 13 座泥火山及其他逸氣構造位置圖.....	8
圖 2-2：本研究採樣位置圖，藍色標記為海水剖面、紅色標記為重力岩心.....	9
圖 2-3：海水樣品採集及分析流程圖.....	15
圖 2-4：海洋沉積物樣品採集及分析流程圖.....	17
圖 3-1：海水溶解甲烷濃度隨深度變化圖。綠色、藍色、紅色點分別為航次 OR3-1553、OR3-1621 及 OR3-1643 之分析結果.....	20
圖 3-2：海水氦同位素 A-C-M 三端點圖.....	21
圖 3-3：海洋底水甲烷溶解濃度空間分佈圖，單位為 nL/L.....	32
圖 3-4：沉積物孔隙間溶解甲烷氣體隨深度變化圖.....	33
圖 3-5：沉積物孔隙水中硫酸根離子濃度隨深度變化圖.....	35
圖 3-6：孔隙水溶解無機碳與其碳同位素隨深度變化.....	36
圖 4-1：氣泡大小與破裂深度關係之數值模擬結果.....	52
圖 4-2：MV1 於航次 OR3-1553 為 EK60 科學測深儀（Scientific Sounder System）記錄到之海床回波聲納影像及都普勒海流儀（Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP）所記錄到之海流狀況.....	53
圖 4-3：MV1 於航次 OR3-1621 所記錄到之溫鹽隨深度變化圖、EK60 科學測深圖及採樣位置對應圖.....	54
圖 4-4：督卜勒海流儀所記錄到背景站位海流情況（經緯度：22.1626, 120.3001）.....	54
圖 4-5：複合式噴氣模型模擬結果（Socolofsky et al., 2005）.....	55
圖 4-6：本研究區域海水對大氣之甲烷擴散通量之機率分佈圖.....	63
圖 4-7：航次 OR3-1643 GS shell 噴氣情形及點位圖.....	64
圖 4-8：孔隙間氣體 C1/C2+ 及甲烷碳同位素關係圖.....	65
圖 4-9：西南海域上部斜坡泥火山與泥貫入體分布圖（陳松春，2013）.....	66
圖 4-10：海水中溶解氦氣與溶解甲烷關係圖.....	67
圖 4-11：MV10-C、MV12-C 孔隙間甲烷、硫酸根離子及溶解無機碳剖面對應圖.....	69
圖 4-12：MV1、MV3、MV5、MV6、MV9、MV10 側掃聲納影像.....	70
圖 4-13：海研三號科學測深儀於航次 OR3-1621 記錄到 MV12 噴發情形.....	70
圖 4-14：西南海域上部斜坡泥火山區甲烷移棲模型.....	71

表目錄



表 1-1：世界不同海底逸氣構造甲烷對大氣貢獻量（修改自 Solomon et al., 2009）.....	5
表 2-1：各航次站位岩心之經緯度、水深、長度資料列表.....	10
表 2-2：海水樣品站位、經緯度、水深資料列表.....	11
表 3-1：各航次海水溶解甲烷氣體分析結果 unit: nL/L.....	22
表 3-2：各航次海水溶解二氧化碳氣體分析結果.....	26
表 3-3：海水溶解氮氣之濃度及同位素組成.....	30
表 3-4：OR3-1553 孔隙氣體、陰離子分析結果.....	37
表 3-5：OR3-1621 孔隙氣體、陰離子、溶解無機碳及其碳同位素、孔隙率分析結果.....	38
表 3-6：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果.....	43
表 3-7：OR5-1209-2 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果.....	49
表 4-1：計算沉積物間隙水硫酸鹽通量及沉積物擴散常數 D_s 結果.....	56
表 4-2：計算沉積物對海洋底水之甲烷通量及擴散常數 D_s 結果.....	57
表 4-3：各海水剖面甲烷對大氣通量計算結果.....	59
表 4-4：本研究區域中經由噴氣情形定義出各逸氣構造「提供主要通量的面積」.....	64

第一章 緒論



1-1 研究背景

聯合國跨政府氣候變遷會議 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在 2007 年報導指出，以一百年為平均計算、相同單位重量的甲烷其全球暖化潛勢 (Global Warming Potential, GWP) 是二氧化碳的 23 倍，甲烷對於全球氣候環境的影響不容小覷。根據前人研究可將地質來源的甲烷分為三種，一是火山來源 (經由 Fischer-Tropsch 反應產生：一氧化碳和氫氣在經過催化反應轉換為甲烷)、二是由沉積物經過熱分解所形成的甲烷、三是生物來源的甲烷，包括天然氣水合物中的甲烷以及海洋沉積物被微生物分解所形成甲烷 (洪瑋立, 2009; Morner and Etipoe, 2002)。

泥火山的噴氣活動供應大量的地質來源甲烷，陸上泥火山會直接將甲烷貢獻到大氣之中，Etiope & Milkov (2004) 估算全球陸上泥火山的甲烷總貢獻量 (包括靜態排氣和噴發) 為每年 8.4 到 12 百萬噸。而海底泥火山的研究近年越被科學家所重視，Milkov (2000) 提出五個研究海底泥火山的重要性：一、它們是將甲烷從岩石圈傳送到水圈及大氣圈的通道，而甲烷和溫室效應及氣候變遷息息相關；二、它們可以成為指示深部地底石油潛藏可能的證據；三、藉由分析泥流帶上來的角礫岩碎片可以得到泥火山地區沉積層序的資訊；四、海底泥火山的活動會影響鑽探作業、破壞海底電纜；五、和深水泥火山相關的天然氣水合物可以成為新興替代能源。

Milkov (2000) 將海底泥火山的形成機制和原因分類成地質、構造、地球化學以及水文學等四大因素，以地質及構造因素可以清楚解釋台灣西南海域的地質條件何以發育出泥火山。上部斜坡快速的沉積速率使得厚層有機物質堆積，沉積地層的荷重造成泥貫入體生成，加上位於板塊交界帶，不斷碰撞擠壓產生的側向應力，提供通道讓有機物移棲到淺層沉積物中。

台灣西南海域位於台灣海峽與呂宋海峽的交界帶，本區的潮流系統複雜，黑

潮主流朝西北方進入呂宋海峽，夾帶部分南海海水，進入本區形成黑潮套流，在台灣西南海域會有順/逆時針的環流交替產生（此環流的產生機制和當地的風應力旋度（wind stress curl）有關）（Wu et al., 2005）。Hsu et al.（2013）針對本區上部斜坡泥火山 MV1 做觀察，發現海底泥火山的噴氣強度和潮汐高低有關。不同潮水的溫鹽特性不同，因為密度不同所造成的海水分層，形成一層「屏蔽」阻止進入海水中的甲烷繼續向上移棲（Kessler et al., 2011），但在有側向流場存在的情形下，若泥火山噴氣的初始速率達到一定大小，則甲烷仍能不受海水分層影響，而被傳送到淺層海水之中（Socolofsky and Adams, 2005）。

隨著海洋探測技術的進步，台灣西南部地區海底泥火山的相關研究也被重視，本研究期望能以氣體地球化學方法為基礎，對本地區進行較為詳細有系統的調查工作，以探討其甲烷逸氣來源、移棲型態及原因並估算其通量。

1-2 文獻回顧

過去在台灣西南海域有許多關於甲烷通量之研究，但都僅止於海洋沉積物中的甲烷通量估算（莊佩涓，2006；洪瑋立，2009；胡靜宜，2012）。洪瑋立（2009）利用動力學模型（Kinetic Model）估算出台灣西南部海底泥火山區每年有約196-317噸的甲烷從深部貢獻到淺層中，且大部分的甲烷都會在淺層沉積物被微生物作用消耗掉而不會逸散到海水或是大氣之中。陳松春（2011）展示了由水下無人載具（Remotely Operated Vehicle, ROV）拍攝到西南海域上部斜坡海底泥火山活躍活動之影像，可以清楚觀察到泥火山噴發物質直接以氣泡的形式貢獻到海水之中（圖1-1），而 Chuang et al.（2006; 2010）也在台灣西南海域的海洋底水量測到高甲烷濃度的訊號（圖1-2），顯示本區域之泥火山是為一良好通道可以使沉積物中的甲烷直接貢獻到海水之中。

過去的研究認為海底逸氣構造所噴發之甲烷，會因為海水中的稀釋作用及微生物消耗作用，在進入大氣前就消耗完畢，尤其是水深大於200公尺之深水逸氣構造，並不會有甲烷逸出海表之疑慮（Grant & Whiticar, 2002; McGinnis et al.,

2006; Valentine et al., 2001) , 但 Solomon et al. (2009) 提出證據, 證明墨西哥灣地區的深水泥火山噴發之甲烷在海水中的氧化作用可以被忽略, 因為氣泡大小分佈、噴氣造成的上升海流等, 海水中的甲烷可以被傳送到淺層海水甚至是大氣中, 墨西哥灣地區過去的甲烷對大氣的貢獻量可能低估。透過修正後的氣體擴散方程式 (Diffusive exchange equation), 則得以估算出海水對大氣的甲烷通量 (Wanninkhof, 1992):

$$\text{Flux} = k_{\text{avg}} (C_{\text{plume}} - C_{\text{eq}}) \quad (1-1)$$

C_{plume} 為量測到之甲烷濃度 (μM), C_{eq} 為和大氣平衡時水體的甲烷濃度 (μM), k_{avg} 為氣體擴散速率 (cm hr^{-1}), 定義如下:

$$k_{\text{avg}} = 0.31 u_{\text{avg}}^2 (Sc / 660)^{-0.5} \quad (1-2)$$

u_{avg} 為採樣時的平均風速 (m s^{-1}), Sc 為施密特數 ($Sc = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$, t 為攝氏溫度, 甲烷在海水環境中各系數為 $A = 2039.2$, $B = 120.31$, $C = 3.4209$, $D = 0.040437$)。

比較世界上各地區不同類型海底逸氣構造, 用相同方式採樣方式 (CTD rosette system) 及計算方法算出對大氣的甲烷貢獻量 (表1-1), 以水深 200公尺為分界, 將海底逸氣構造分為淺水以及深水。淺水逸氣構造的甲烷貢獻量都較深水逸氣構造高, 顯示甲烷離開海床後, 雖然會經過生物性甲烷氧化作用而被消耗不致構成重要溫室氣體來源, 但位於水深較淺部的逸氣構造, 還是有機會保存部分未被氧化之甲烷氣逸出海表。

台灣西南海域上部斜坡地區已有13座泥火山被確實辨識出來, 由經濟部中央地質調查所命名為 MV1~MV13 (陳松春, 2011)。此13座泥火山之頂部深度為300~800公尺水深, 皆屬於深水泥火山, 早期的概念中本區域海水中的甲烷對大氣的貢獻量是被忽略的。

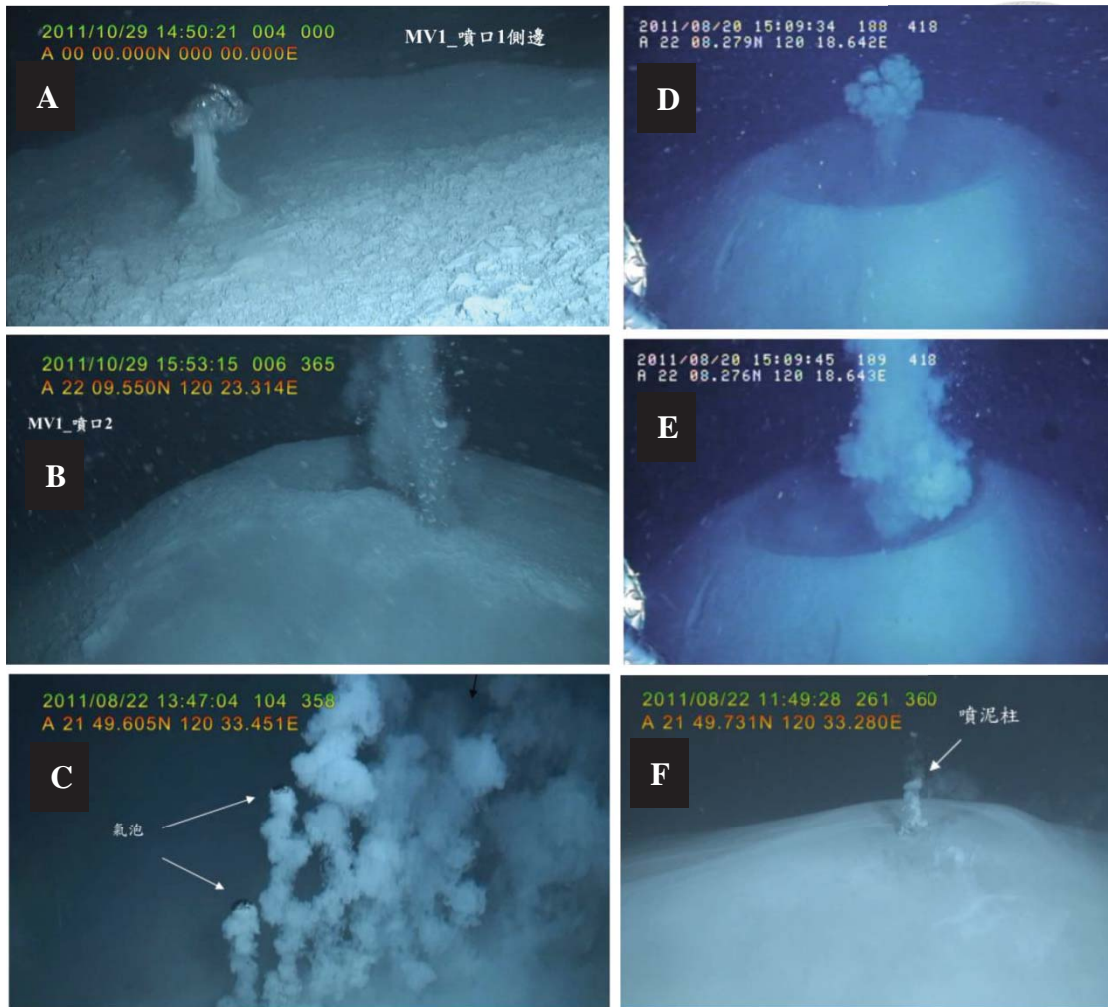


圖 1-1：由水下無人載具（ROV）拍攝到海底泥火山噴發影像
 （擷取並修改自陳松春，2011）

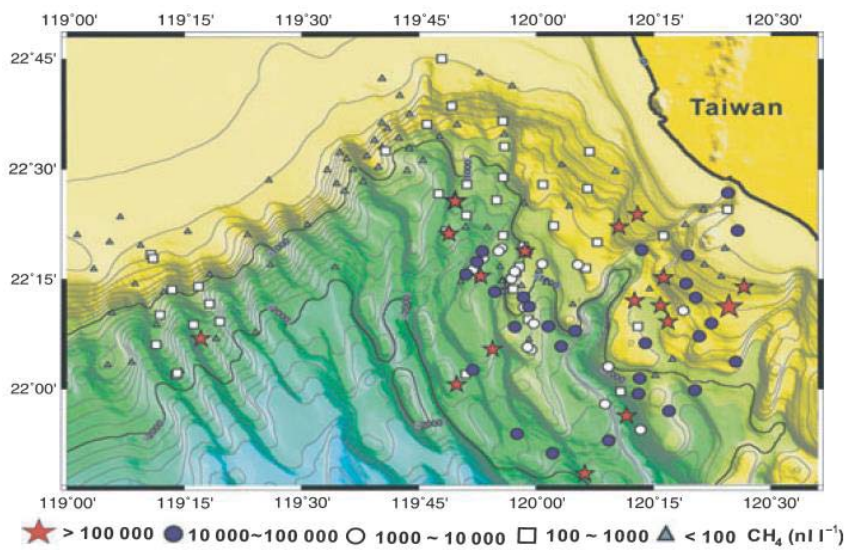


圖 1-2：台灣西南海域底層海水甲烷濃度分佈圖
 （單位：nL/L）（Chuang et al., 2010）



表 1-1：世界不同海底逸氣構造甲烷對大氣貢獻量（修改自 Solomon et al., 2009）

位置	甲烷通量 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	水深 (m)	逸氣型態	來源文獻
Shallow water (< 200 m)				
Paleo Dnepr Area, Black Sea	200	90	max. diffusive	Schmale et al. (2005)
Dnepr Shelf, Black Sea	66	< 200	max. diffusive	Schmale et al. (2005)
NW Black Sea	53	< 200	max. diffusive	Amouroux et al. (2002)
Coal Oil Point	1296	< 70	diffusive	Mau et al. (2007)
Deep Water (> 200 m)				
Pacific Ocean open water	0.9-3.5	> 1000	diffusive	Tilbrook & Karl (1995)
Subtropical North Pacific	1.6	> 1000	diffusive	Holmes et al. (2000)
Sargasso Sea	4.4	> 1000	diffusive	Holmes et al. (2000)
Sea of Okhotsk	1.5-63	100-700	diffusive	Yoshida et al. (2004)
Arabian Sea	4.6-13.9	> 1000	diffusive	Owens et al. (1991)
Sorokin Trough, Black Sea	49	2080	max. diffusive	Schmale et al. (2005)
Black Sea	27	basin average	diffusive	Reeburgh et al. (1991)
Gulf of Mexico hydrocarbon plumes	-0.38-7.0	500-600	diffusive	Solomon et al. (2009)

1-3 研究目的

1-3-1 了解甲烷離開沉積物後在海水中移棲的型態與原因

海底泥火山的甲烷噴氣不如陸上泥火山是直接對大氣貢獻，進入水體後甲烷經歷許多複雜的反應，現階段的海洋研究設備也較難直接觀察之，因此本研究期望以地球化學方法為基礎，廣納各種學門做討論，針對甲烷離開海洋沉積物後，在海水中的移棲的形態及其發生的原因，建立一個完整而詳實的描述，探討甲烷逸散出海表的各種可能性。

1-3-2 估算台灣西南海域上部斜坡甲烷對大氣的總輸出量

甲烷是重要的溫室效應氣體，過多的甲烷排放會對環境生態造成衝擊，而泥火山是供應大量地質來源甲烷進入水圈及大氣圈的地質構造，過去深水泥火山對大氣的甲烷貢獻量被認為是可以忽略，因此本研究欲以氣體地球化學方法定量計算本區對大氣的甲烷通量，並且進一步考慮面積要素，估算本區甲烷對大氣的總輸出量，探討本區的甲烷排放是否對環境生態造成影響。

第二章 研究方法



2-1 研究區域

本研究對象為台灣西南外海上部斜坡之 13 座泥火山及其他逸氣構造 (圖 2-1)，是利用 OR3-1553A (2011.7.25~28)、OR3-1621 (2012.6.25~29)、OR3-1643 (2012.9.18~22)、OR5-1209-2 (2012.10.1~10) 等四個航次，總共採集 57 組海水剖面 (water column) 以及 30 個重力岩心。上部斜坡是指位於高屏峽谷及枋寮海脊之間的區域，根據震測及高精密之多音束水深資料可以繪出 8 處泥貫入體構造及辨識出 13 座泥火山，泥火山主要分布在泥貫入體頂部，因此可推論泥火山的成因和泥貫入體之發育有關 (陳松春，2011)。

2-1-1 台灣西南海域上部斜坡地質構造背景

台灣西南海域位於歐亞板塊及菲律賓海板塊交界處，是弧陸碰撞前緣與被動大陸邊緣接觸之地帶，本區域存在著一系列北北西-南南東走向的褶皺與逆衝斷層構造 (Liu et al., 1997)。

受到東北-西南走向大陸棚、坡構造的影響，這一系列的褶皺與逆衝斷層構造在大陸坡上轉為南-北走向，並逐漸停止發育。增積岩體最前端的變形前緣，從馬尼拉海溝的北端往西北方延伸，在北緯 22 度左右開始稍微轉向東北方並且延伸，沿著這些逐一消失的褶皺與逆衝斷層構造前端位置，在台南市附近上陸 (劉家瑄，2002)。

2-1-2 採樣位置

本研究採樣位置標示於圖 2- 2。航次 OR3-1553A (2011.7.25~28) 以上部斜坡北部的泥火山採樣工作為主，成功在 MV1、MV5、MV7、MV8 取得重力岩心，並在 MV1 及 MV3 取得較完整的海水樣品數組。航次 OR3-1621 (2012.6.25~29) 以位在不同構造線上的 MV1、MV5、MV12 採樣為主，並在

MV1 及 MV12 取得較完整的海水樣品。航次 OR3-1643 (2012.9.18~22) 以採取海底沉積物為主要目標，採集 MV3、MV4、MV5、MV7、MV8、MV9、MV11 等泥火山之岩心，並在貝塚海脊南邊之突起找到一處明顯新噴發進行採樣 (命名為 Gas seep shell, GS shell)，另外採取淺水逸氣構造 GT39B 及 G96 之海水樣品，而 OR5-1209-2 (2012.10.1~10) 則是採集兩個並未被命名的地形突起處的重力岩心，分別命名為 OR5-1209-2-MV1 及 OR5-1209-2-MV2。表 2-1 為各航次岩心樣品之站位名稱、經緯度、底深及岩心長度資料列表；表 2-2 為各航次海水樣品之佔位名稱、經緯度、底深及下放深度資料列表。

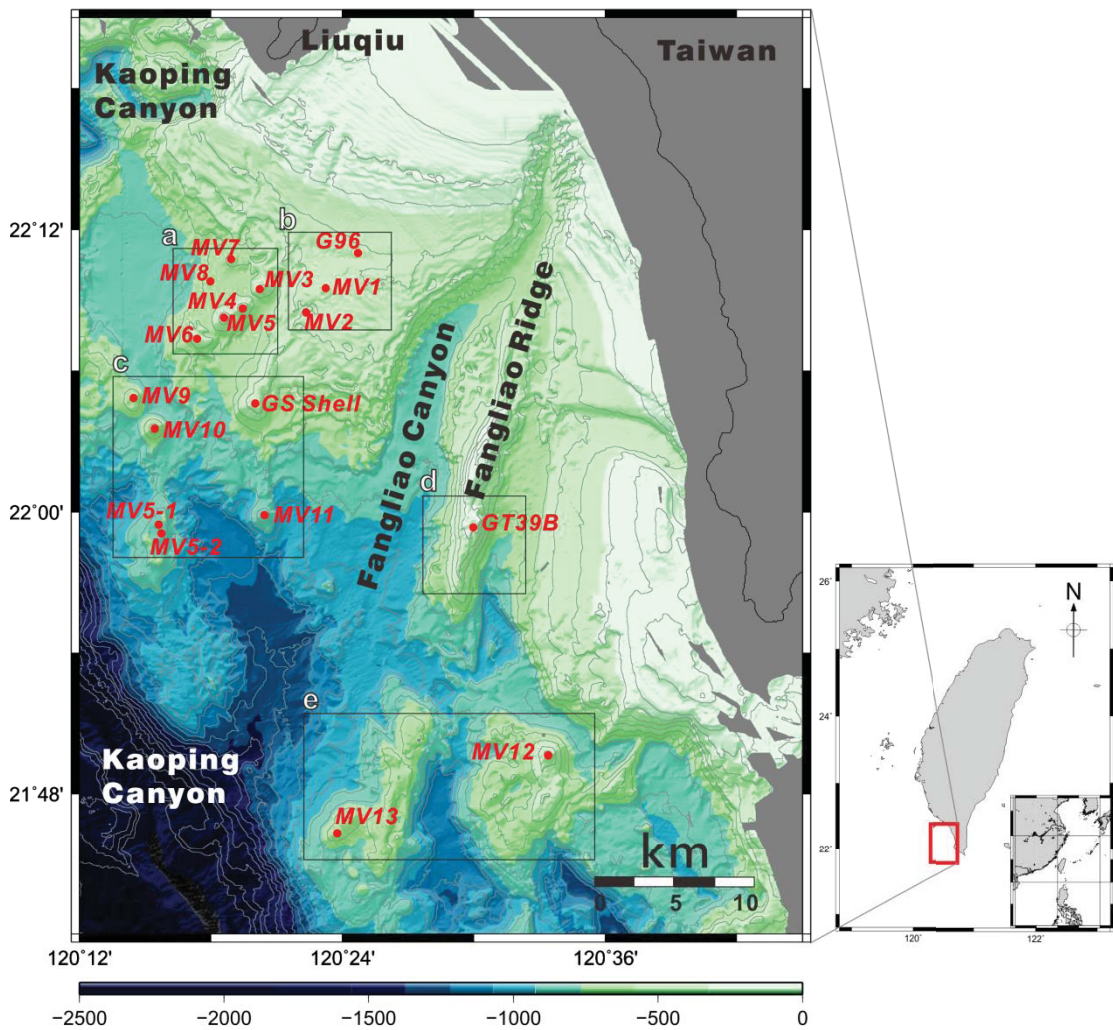


圖 2-1：台灣西南海域上部斜坡 13 座泥火山及其他逸氣構造位置圖
圖中方框為對應到圖 2-2 之局部放大採樣位置圖

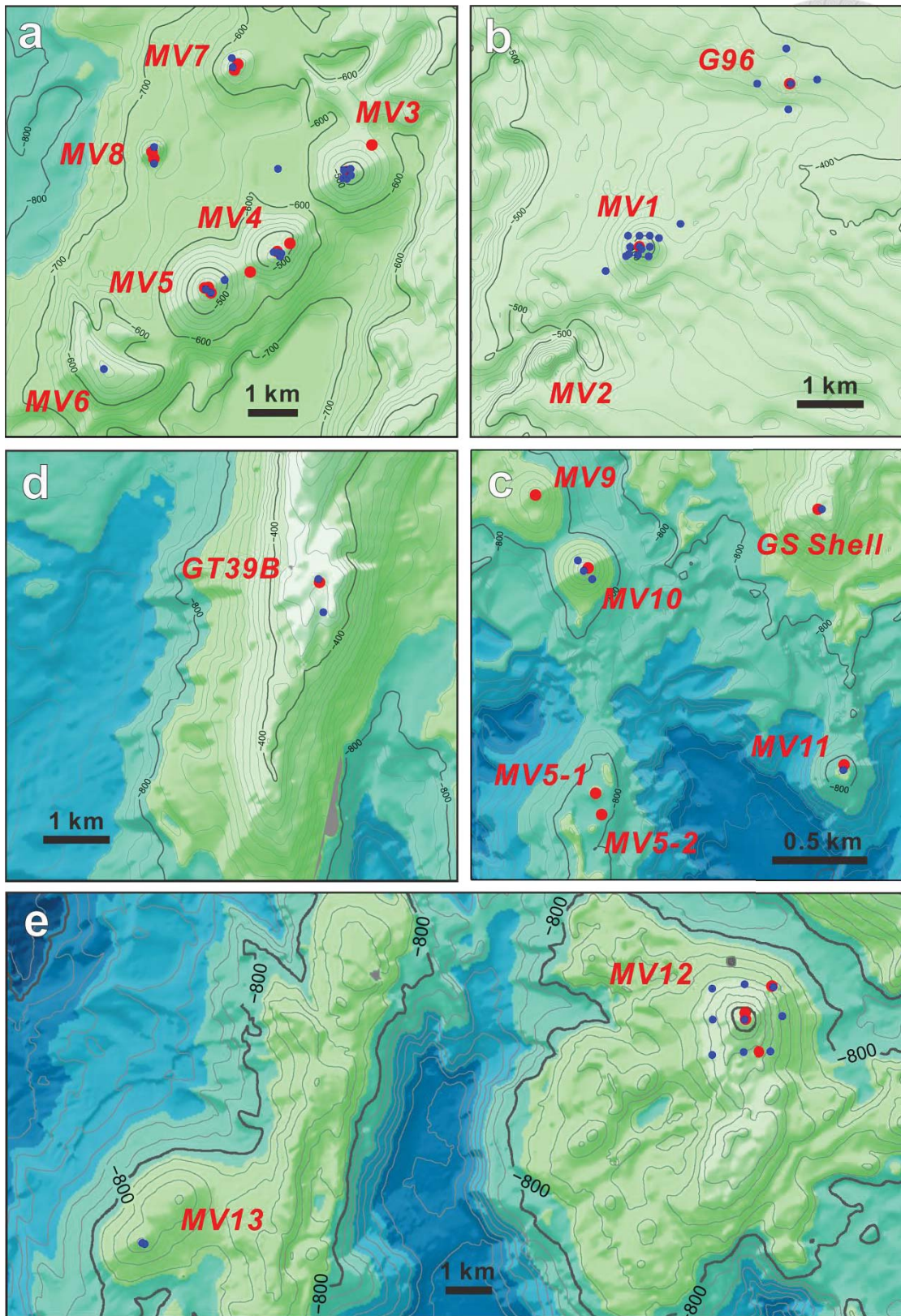


圖 2-2：本研究採樣位置圖，藍色標記為海水剖面、紅色標記為重力岩心

表 2- 1：各航次站位岩心之經緯度、水深、長度資料列表

航次	站位	緯度(°N)	經度(°E)	水深(m)	岩心長度(cm)	採樣器
OR3-1553A	MV1-C	22°9.52'	120°23.237'	380	70	G.C.
	MV5-C	22°8.26'	120°18.592'	432	60	G.C.
	MV7-C	22°10.766'	120°18.939'	533	75	G.C.
	MV8-C	22°9.757'	120°17.956'	600	100	G.C.
OR3-1621	MV1-N	22°9.75'	120°23.603'	410	90	G.C.
	MV1-NC	22°9.646'	120°23.44'	435	45	G.C.
	MV1-C	22°09.555'	120°23.303'	360	49	G.C.
	MV1-SC	22°9.456'	120°23.078'	430	48	G.C.
	MV1-S	22°9.298'	120°22.905'	462	65	G.C.
	MV5-C	22°8.215'	120°18.564'	437	65	G.C.
	MV10-C	22°3.56'	120°15.473'	505	55	G.C.
	MV12-NCC	21°49.761'	120°33.361'	363	60	G.C.
	MV12-SSE	21°49.170'	120°33.635'	515	59	G.C.
	MV12-NE	21°50.15'	120°33.847'	593	55	G.C.
	MV12-C	21°49.648'	120°33.41'	360	64	G.C.
	OR3-1643	MV3-C	22°9.557'	120°20.255'	475	70
MV3-NE		22°9.854'	120°20.58'	552	65	G.C.
MV4-C		22°8.666'	120°19.45'	467	40	G.C.
MV4-NE		22°8.757'	120°19.6'	485	35	G.C.
MV4-SW		22°8.436'	120°19.125'	550	50	G.C.
MV5-C		22°8.205'	120°18.657'	432	50	G.C.
MV7-C		22°10.705'	120°18.948'	536	90	G.C.
MV8-C		22°9.72'	120°17.969'	610	50	G.C.
MV9-C		22°5.128'	120°14.417'	662	60	G.C.

表 2-1 (續)：各航次站位岩心之經緯度、水深、長度資料列表

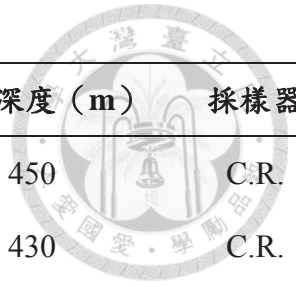
航次	站位	緯度(°N)	經度(°E)	底深(m)	岩心長度(cm)	採樣器
OR3-1643	MV11-C	21°59.995'	120°20.448'	752	75	G.C.
	GT39B-N	21°59.559'	120°29.968'	266	50	G.C.
	G96-C	22°10.996'	120°24.685'	409	85	G.C.
	GS shell	22°4.618'	120°19.946'	437	40	G.C.
OR5-1209-2	OR5MV1	21°59.467'	120°15.617'	739	139	G.C.
	OR5MV2	21°59.830'	120°15.733'	763	160	G.C.

G.C. = Gravity Core (重力岩心)

表 2-2：海水樣品站位、經緯度、水深資料列表

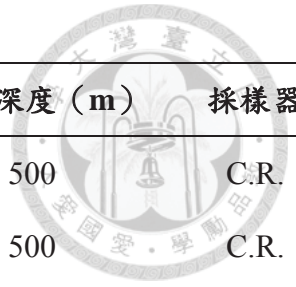
航次	站位	緯度(°N)	經度(°E)	底深(m)	下放深度(m)	採樣器
OR3-1553A	MV1-S	22°9.446'	120°23.222'	400	350	C.R.
	MV1-N	22°9.62'	120°23.237'	407	350	C.R.
	MV1-E	22°9.52'	120°23.337'	390	350	C.R.
	MV1-W	22°9.519'	120°23.146'	408	350	C.R.
	MV1-SE	22°9.434'	120°23.327'	397	350	C.R.
	MV1-NW	22°9.62'	120°23.127'	417	350	C.R.
	MV1-NE	22°9.62'	120°23.337'	390	350	C.R.
	MV1-SW	22°9.455'	120°23.136'	414	350	C.R.
	MV3-E	22°9.516'	120°20.328'	464	430	C.R.
	MV3-NW	22°9.57'	120°20.247'	481	450	C.R.
	MV3-W	22°9.542'	120°20.246'	480	450	C.R.
	MV3-SW	22°9.48'	120°20.237'	489	450	C.R.
	MV3-C	22°9.467'	120°20.232'	477	450	C.R.

表 2-2 (續): 海水樣品站位、經緯度、水深資料列表



航次	站位	緯度 (°N)	經度 (°E)	底深 (m)	下放深度 (m)	採樣器
OR3-1553A	MV3-S	22°09.476'	120°20.281'	482	450	C.R.
	MV3-N	22°9.589'	120°20.284'	473	430	C.R.
	MV4-1	22°8.657'	120°19.406'	463	430	C.R.
	MV4-2	22°8.645'	120°19.498'	460	430	C.R.
	MV4-3	22°8.61'	120°19.484'	463	430	C.R.
	MV5-C	22°8.252'	120°18.598'	427	400	C.R.
	MV6-C	22°7.357'	120°17.378'	513	480	C.R.
	MV7-C	22°10.745'	120°18.916'	538	500	C.R.
	MV7-N	22°10.795'	120°18.908'	540	500	C.R.
	MV8-C	22°9.8'	120°17.977'	600	550	C.R.
OR3-1621	MV1-N	22°9.727'	120°23.635'	435	380	C.R.
	MV1-NC	22°9.6'	120°23.426'	402	350	C.R.
	MV1-SC	22°9.436'	120°23.106'	427	380	C.R.
	MV1-C	22°9.508'	120°23.248'	380	320	C.R.
	MV1-S	22°9.302'	120°22.908'	460	400	C.R.
	MV5-C	22°08.246'	120°18.596'	430	380	C.R.
	MV5-NC	22°8.35'	120°18.821'	485	430	C.R.
	MV5-SC	22°8.106'	120°18.422'	490	450	C.R.
	MV10-C	22°3.512'	120°15.386'	525	480	C.R.
	MV10-SE	22°3.359'	120°15.551'	596	550	C.R.
	MV10-NW	22°3.699'	120°15.272'	569	500	C.R.
	MV11-C	21°59.9'	120°20.436'	767	700	C.R.
MV12-C	21°49.64'	120°33.392'	362	330	C.R.	

表 2-2 (續): 海水樣品站位、經緯度、水深資料列表



航次	站位	緯度 (°N)	經度 (°E)	底深 (m)	下放深度 (m)	採樣器
OR3-1621	MV12-N	21°50.17'	120°33.395'	548	500	C.R.
	MV12-SE	21°49.175'	120°33.824'	551	500	C.R.
	MV12-SW	21°49.12	120°32.878'	555	500	C.R.
	MV12-NW	21°50.107'	120°32.877'	565	500	C.R.
	MV12-NE	21°50.132'	120°33.869'	586	500	C.R.
	MV12-E	21°49.7'	120°34.011'	580	500	C.R.
	MV12-S	21°49.158'	120°33.377'	496	450	C.R.
	MV12-W	21°49.64'	120°32.889'	530	450	C.R.
	MV13-C	21°46.300'	120°23.806'	575	500	C.R.
OR3-1643	MV3-C	22°9.586'	120°20.326'	462	400	C.R.
	MV4-C	22°8.656'	120°19.46'	460	400	C.R.
	MV5-C	22°8.282'	120°18.707'	446	400	C.R.
	MV8-C	22°9.678'	120°17.977'	625	550	C.R.
	MV shell	22°4.62'	120°20.021'	430	400	C.R.
	GT39B-N	21°59.6'	120°29.952'	262	250	C.R.
	GT39B-S	21°59.19'	120°30.019'	304	250	C.R.
	G96-C	22°10.999'	120°24.710'	410	350	C.R.
	G96-E	22°11.036'	120°24.965'	406	350	C.R.
	G96-N	22°11.315'	120°24.666'	440	350	C.R.
	G96-W	22°10.998'	120°24.388'	425	400	C.R.
G96-S	22°10.766'	120°24.687'	430	400	C.R.	

C.R. = CTD + Rosette

2-2 樣品及分析方法

本研究使用的樣品分為海水及海洋沉積物二部份。利用海研三號 EK60 科學測深儀 (Scientific Sounder System) 確認泥火山噴氣中心後，以溫鹽深儀搭載輪盤式採水器 (CTD Rosette System)，採集泥火山逸氣正上方以及周圍區域上方之海水垂直剖面樣品；再用重力岩心採集器採集海底沉積物。

海水樣品用氣相層析儀 (Gas Chromatographs, GC) 測量海水樣品中溶解氣體，包含甲烷、乙烷、丙烷及二氧化碳，後挑選甲烷濃度高於背景值的垂直剖面最接近海床二深度測量氮同位素比值。海底沉積物樣品則分為沉積物及孔隙水，用氣相層析儀測量沉積物孔隙中的氣體，後挑選甲烷濃度異常之站位用甲烷碳同位素分析儀 (Methane Carbon Isotopes Analyzer, MCIA) 進行分析；孔隙水則利用離子層析儀分析主要陰陽離子，及利用 Picarro $\delta^{13}\text{C}$ -DIC 分析儀測量溶解無機碳及其碳同位素。

重力岩心頂部的海洋底水採集後會同時進行上述海水樣品及沉積物孔隙水之分析流程。

2-2-2 海水樣品採集及分析

海水樣品採集及分析流程圖如圖 2-3 所示：

- (1) 研究船抵達站位後下放 CTD 收集溫度、鹽度等資料，上收時每組海水剖面共收取十個不同的深度之海水樣品，該深度隨各站位底深做調整。
- (2) 先用海水潤洗 200 mL 血清瓶然後裝滿，避免空氣進入血清瓶，再用血清蓋及鋁蓋密封血清瓶，倒置，此樣品將用來進行溶解氣體分析；用 0.22 μm 過濾頭過濾海水裝滿棕色樣品瓶，此樣品將用來進行溶解無機碳及其碳同位素分析；用事先抽真空的氣體採樣瓶採集各海水剖面最深二深度，此樣品將用來進行氮同位素分析。
- (3) 樣品帶回實驗室後，用氣相層析儀分析海水溶解氣體包括甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳等。使用製造罐頂空間方法 (head space method) 為前處理，

抽取 5 c.c. 氦氣打入 200 mL 血清瓶，並同時用另一乾淨針頭將相同體積海水樣品排出，確保壓力平衡。震盪已做好罐頂空間之樣品，使海水溶解氣體能進入罐頂空間之氦氣中。準備裝有飽和食鹽水之針筒及另一乾淨針筒抽取 3 c.c. 氦氣同時將相同體積之飽和食鹽水注入血清瓶中，將樣品用注射法打入氣相層析儀進行測量。

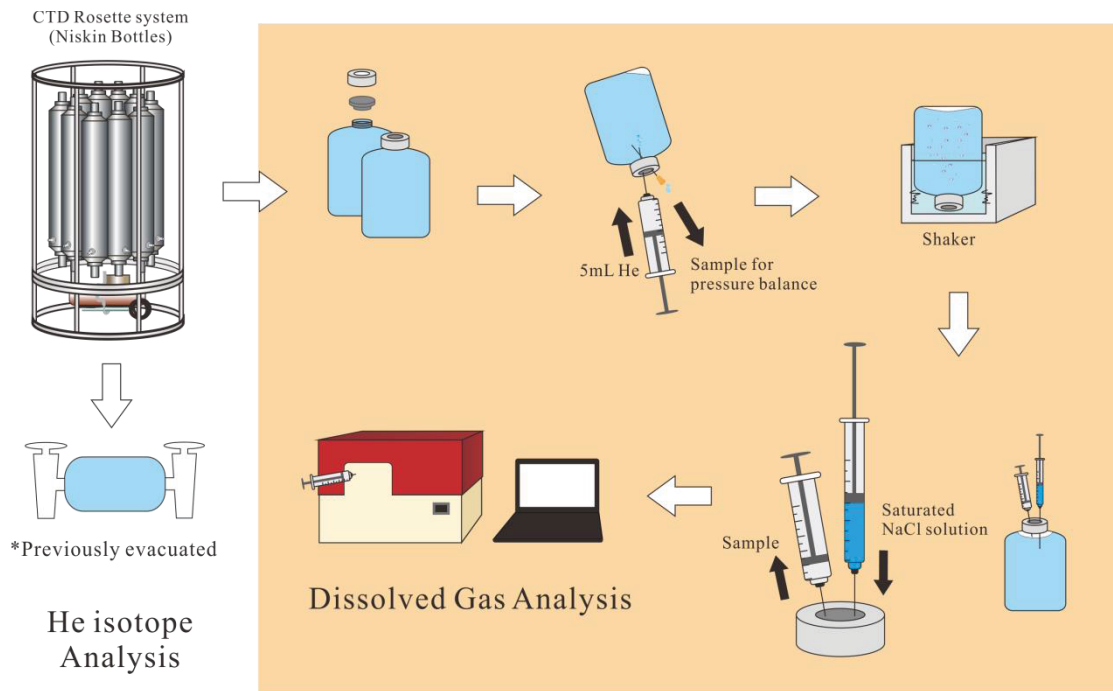


圖 2-3：海水樣品採集及分析流程圖

2-2-3 海洋沉積物及其孔隙水採集及分析

海洋沉積物樣品採集及分析流程圖如圖 2-4 所示：

- (1) 將 3 c.c. 針筒切除刻度 0 c.c. 以上的部分，用來定量採集沉積物。抽取 15 c.c. 沉積物樣品裝入 30 mL 血清瓶中，用飽和食鹽水填滿血清瓶避免空氣進入，此樣品將用來進行沉積物孔隙間氣體 (pore gas) 分析；抽取 5 c.c. 沉積物樣品裝入閃爍計數瓶中，此樣品將用來進行孔隙率 (porosity) 測量。
- (2) 將其餘的沉積物裝入離心管中，再將離心管放入離心機中，使得孔隙水與沉積物分離，取出孔隙水 (pore water)，分別使用 0.45 μm 及 0.22 μm 過濾頭過濾，用來進行陰陽離子 (用來進行陽離子分析的樣品要事先加入濃硝酸) 及溶解無機碳及其碳同位素分析。
- (3) 樣品帶回實驗室後，孔隙間氣體使用氣相層析儀分析包括甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳等。使用製造罐頂空間方法 (head space method) 為前處理，抽取 5 c.c. 氮氣打入 30 mL 血清瓶，並同時用另一事先準備好裝有少許飽和食鹽水之針筒，將相同體積海水樣品排出，確保瓶內及瓶外的壓力平衡。震盪已做好罐頂空間之樣品，使孔隙間氣體能進入罐頂空間之氮氣中。使用方才飽和食鹽水針筒及另一乾淨針筒抽取氮氣同時將相同體積之飽和食鹽水注入血清瓶中，將樣品用注射法打入氣相層析儀進行測量。
- (4) 用氣相層析儀確認甲烷濃度後，挑選甲烷濃度異常之站位，一樣利用罐頂空間方法為前處理並使用甲烷碳同位素分析儀 (Methane Carbon Isotopes Analyzer, MCIA) 測量甲烷碳同位素。



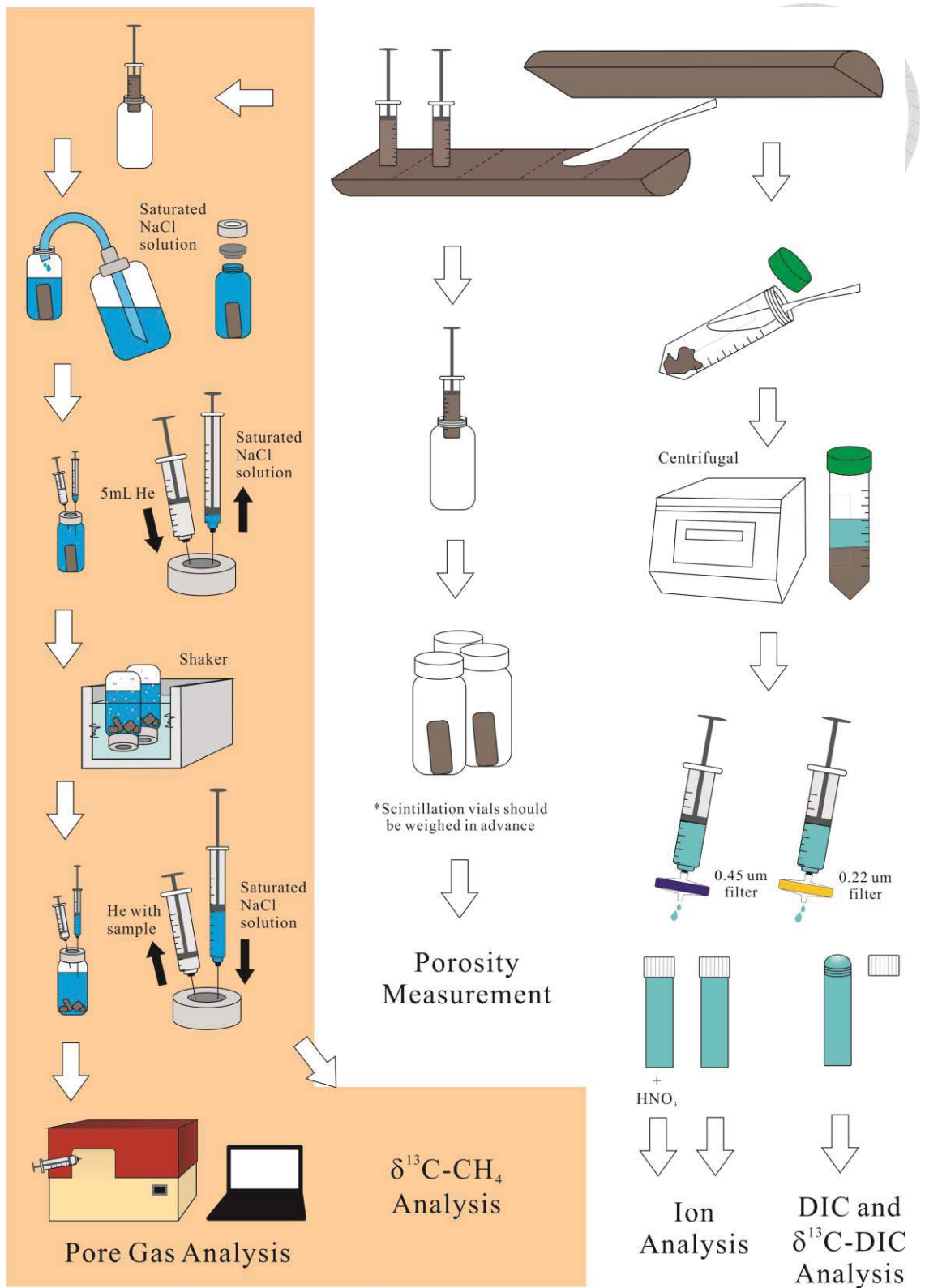


圖 2-4：海洋沉積物樣品採集及分析流程圖



2-3 氣體濃度換算

2-3-1 海水溶解氣體濃度計算

海水溶解氣體濃度分析結果，以 nL/L（氣體含量/海水）為單位。海水剖面樣品所分析到甲烷氣體濃度可由下式計算得：

$$C = \frac{(A \times F) \times R \times (273.15 + T_{inj})}{W} \times \frac{V_{head}}{V_{inj}} \times 10^6 \quad (2-1)$$

C 為溶解在海水中的甲烷濃度 (nL/L)，A 為氣相層析儀量測到的積分面積，F 為校正常數 (mmol/A)，R 為標準氣體常數 (0.0821 atm L/mole K)， T_{inj} 為進樣時的溫度 (°C)，W 為脫氣的海水體積 (mL)， V_{head} 為罐頂空間體積 (mL)， V_{inj} 為進樣體積 (mL)。

2-3-2 沉積物間隙氣體濃度計算

沉積物間隙氣體濃度分析結果，以 μ L/L（氣體含量/濕沉積物）為單位。沉積物樣品所分析到孔隙間甲烷氣體濃度可由下式計算得：

$$C = \frac{(A \times F) \times R \times (273.15 + T_{inj})}{V_{sed}} \times \frac{V_{head}}{V_{inj}} \times 10^6 \quad (2-2)$$

C 為沉積物間隙氣體濃度 (μ L/L)，為 A: 氣相層析儀量測到的積分面積，F 為校正常數 (mmol/A)，R 為標準氣體常數 (0.0821 atm L/mole K)， T_{inj} 為進樣時的溫度 (°C)， V_{sed} 為沉積物樣品體積 (mL)， V_{head} 為罐頂空間體積 (mL)， V_{inj} 為進樣體積 (mL)。

2-3-3 氣體成份分析之準確度和精確度誤差

使用氣相層析儀分析樣品之前，會先使用標準氣體製作檢量線，用以確保分析方法、數據之可信。整體而言，本分析系統之偵測極限很低，檢量線也維持良好的線性關係及再現性。整體分析誤差小於 2.5% (Lee et al., 2005)。

第三章 分析結果



3-1 海水

3-1-1 溶解氣體分析結果

海水中溶解甲烷及二氧化碳分析結果如表 3-1、表 3-2 所示。本研究區域的海水溶解甲烷氣體接近海床 50 公尺處，濃度為 24 ~ 1374 nL/L (表 3-1 圖 3-1)。在 MV1、MV3、MV5、MV12 等逸氣構造，發現在噴氣中心採集的底部海水樣品並不如預期有最高的甲烷濃度，反而是周邊的樣品如 MV1-N、MV1-E、MV3-S、MV3-W、MV5-NC、MV5-SC、MV12-W、MV12-S 等站位有單一逸氣構造底水甲烷濃度最高值；另外在 MV1-N (1553)、MV1-E (1553)、MV1-NW (1553)、MV1-SW (1553)、MV1-S (1553)、MV1-N (1621)、MV1-SC (1621)、MV1-S (1621)、MV3-C (1553)、MV3-NW (1553)、MV4-2 (1553)、MV5-C (1643)、MV7-C (1553)、MV8-C (1553)、MV8-C (1643)、MV10-SE (1621)、MV12-W (1621)、MV12-SW (1621)、GT39B-N (1643)、GT39B-S (1643)、G96-E (1643)、G96-N (1643)、G96-S (1643)、G96-W (1643)、MV6-C (1553)、MV13-C (1621)、GS shell (1643) 等站位在距離海床 100 到 150 公尺的深度出現甲烷濃度最高值；在 MV1-N (1621)、MV1-SC (1621)、MV1-NC (1621)、MV4-C (1643)、MV7-C (1553)、MV10-NW (1621)、MV12-NW (1621)、GT39B-N (1643)、GT39B-S (1643)、MV6-C (1553)、G96-E (1643) 等站位則出現某些深度有濃度突然升高的現象。上述特徵和海流造成的海水分層現象及逸氣型態有關，於第四章會進一步討論。

本研究區域多數站位接近海水表面時，甲烷濃度已經降低至接近海水背景值，但 MV10-C (1621) 的海水溶解甲烷卻是從海床至海表甲烷濃度一直維持在 200 nL/L 上下，顯示該站位的泥火山氣體噴發力量可以將甲烷氣體帶至海床表面甚至逸出海表進入大氣。

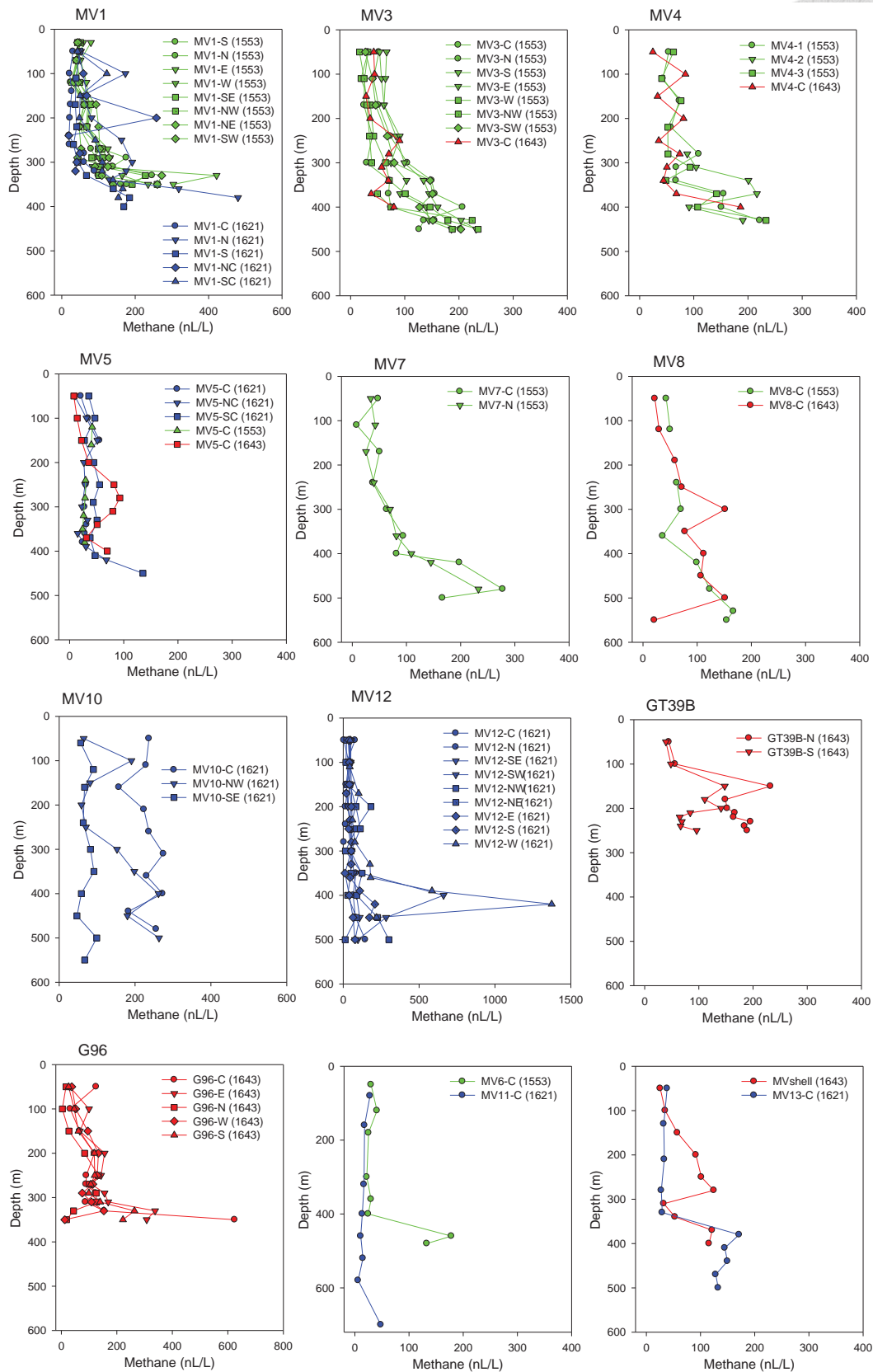


圖 3-1：海水溶解甲烷濃度隨深度變化圖。綠色、藍色、紅色點分別為航次 OR3-1553、OR3-1621 及 OR3-1643 之分析結果



3-1-2 氦同位素分析結果

透過稀有氣體質譜儀測量最接近海床二深度之海水樣品的溶解氦濃度及其同位素比值（表 3- 3），結果顯示氣體來源為地殼及大氣混合，根據 A-C-M 三端點圖（圖 3- 2），多數站位落在地殼來源比例 20% 以下，少數落在地殼來源比例 50% 以上，MV12-W 可在相同樣品對應有很高的溶解甲烷濃度（圖 3- 1）。

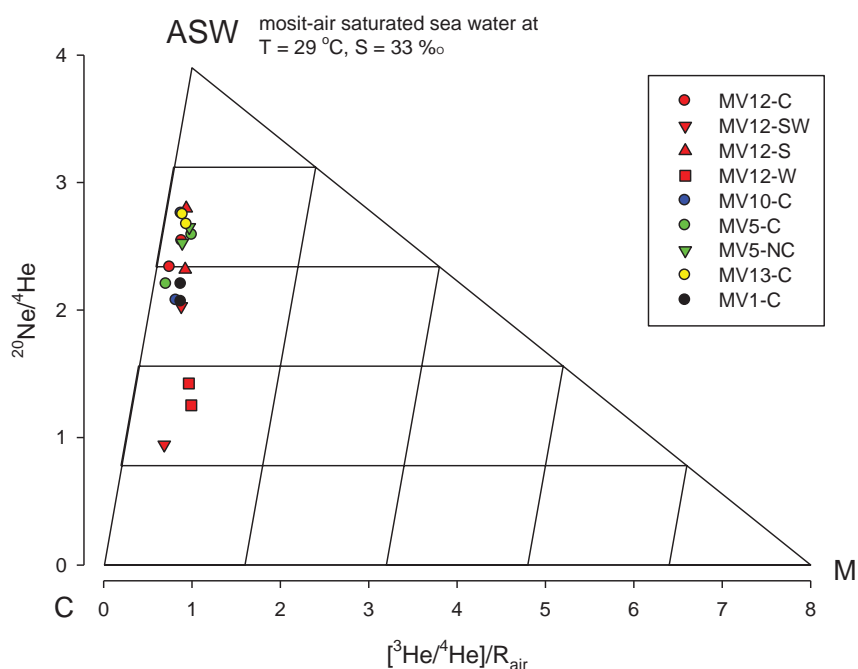


圖 3- 2：海水氦同位素 A-C-M 三端點圖

（ASW 為氣體飽和水、C 地殼、M 為地函來源。）

表 3-1：各航次海水溶解甲烷氣體分析結果 unit: nL/L

x : analysis failure

OR3-1553

(m)	MV1-S	(m)	MV1-N	(m)	MV1-E	(m)	MV1-W	(m)	MV1-SE	(m)	MV1-NW	(m)	MV1-NE	(m)	MV1-SW	(m)	MV3-E	(m)	MV3-NW
30	43.7	30	44.9	30	79.2	30	58.5	30	51.3	30	42.9	30	47.7	30	43.4	50	66.5	50	16.5
70	47.2	70	43.9	70	51.3	70	45.2	70	41.6	70	39.4	70	39.0	70	39.2	110	64.5	110	24.9
120	23.8	120	28.7	120	67.3	120	37.9	120	49.1	120	27.2	120	32.3	120	44.9	170	61.6	170	30.3
170	84.1	170	68.3	170	75.0	170	71.5	170	79.3	170	60.3	170	61.4	170	93.4	240	90.7	240	34.8
220	70.3	220	47.6	220	69.0	220	66.4	220	68.1	220	47.2	220	47.3	220	100	300	74.6	300	38.9
270	109	270	80.0	270	126	270	110	270	99.6	270	110	270	52.5	270	104	340	103	340	x
290	176	290	91.5	290	132	290	101	290	112	290	81.9	290	43.1	290	128	370	91.4	370	49.7
310	138	310	140	310	84.1	310	x	310	106	310	104	310	126	310	90.5	400	139	400	74.5
330	99.3	330	246	330	422	330	165	330	101	330	228	330	272	330	109	430	144	430	224
350	178	350	161	350	304	350	235	350	260	350	192	350	260	350	140	450	186	450	188
(m)	MV3-W	(m)	MV3-SW	(m)	MV3-C	(m)	MV3-S	(m)	MV3-N	(m)	MV4-1	(m)	MV4-2	(m)	MV4-3	(m)	MV5-C	(m)	MV6-C
50	32.1	50	27.4	50	52.3	50	53.7	50	32.1	50	53.7	50	x	50	62.6	50	x	50	30.0
110	19.2	110	40.2	110	42.3	110	57.0	110	25.8	110	43.0	110	x	110	40.8	120	41.6	120	40.9
170	36.4	170	46.2	170	51.5	170	61.7	170	24.8	160	73.5	160	x	160	76.5	160	40.2	180	25.3
240	42.6	240	67.8	240	73.4	240	83.8	240	40.0	220	57.7	220	x	220	52.0	200	x	240	x
300	64.3	300	80.5	300	105	300	99.2	300	29.8	280	109	280	88.0	280	52.5	240	29.5	300	22.1
340	71.6	340	147	340	150	340	135	340	71.9	310	67.5	310	104	310	93.2	280	28.6	360	30.0
370	101	370	151	370	155	370	145	370	70.2	340	67.2	340	201	340	48.1	320	25.8	400	24.7
400	1467	400	127	400	207	400	161	400	74.1	370	155	370	216	370	142	350	24.1	430	x
430	180	430	152	430	135	430	204	430	155	400	151	400	91.2	400	107	380	28.1	460	178
450	235	450	203	450	127	450	232	450	203	430	222	430	190	430	233	400	x	480	133

表 3-1 (續): 各航次海水溶解甲烷氣體分析結果

(m)	MV7-C	(m)	MV7-N	(m)	MV8-C
50	47.6	50	34.1	50	43.0
110	8.21	110	42.4	120	50.0
170	50.5	170	25.3	180	x
240	38.1	240	39.9	240	62.4
300	63.5	300	69.6	300	70.2
360	94.2	360	81.4	360	36.4
400	81.7	400	109	420	99.4
420	198	420	145	480	123
480	278	480	233	530	167
500	166	500	x	550	155



OR3-1621

(m)	MV1-N	(m)	MV1-NC	(m)	MV1-SC	(m)	MV1-C	(m)	MV1-S	(m)	MV5-C	(m)	MV5-NC	(m)	MV5-SC	(m)	MV10-C	(m)	MV10-SE
50	52.4	50	43.9	50	43.1	50	30.7	50	49.5	50	20.8	50	9.68	50	35.3	50	237	60	56.8
100	173	100	58.8	100	123	100	21.5	110	38.8	100	34.4	100	31.3	100	46.8	110	229	120	90.4
150	55.8	150	67.9	150	49.9	140	27.2	170	36.9	150	55.2	150	51.3	150	27.5	160	158	160	66.9
200	81.2	200	258	200	48.3	170	24.1	220	40.8	200	x	200	26.5	200	44.5	210	224	240	63.5
250	163	240	19.3	250	91.3	200	22.3	260	32.0	250	30.2	250	28.6	250	55.5	260	237	300	82.5
300	192	280	49.1	300	110	240	19.9	300	43.9	300	27.7	300	22.9	290	43.7	310	273	350	91.7
320	175	300	40.8	320	110	260	21.0	330	67.3	320	x	330	33.1	330	50.7	360	230	400	58.4
340	130	320	37.3	340	139	280	61.1	360	141	340	31.4	360	15.1	370	37.9	400	273	450	47.0
360	319	340	x	360	166	300	60.6	380	185	360	28.1	390	30.3	410	47.2	440	183	500	99.3
380	480	360	x	380	154	320	90.0	400	169	380	24.1	420	67.8	450	135	480	256	550	67.4

表 3-1 (續): 各航次海水溶解甲烷氣體分析結果

(m)	MV10-NW	(m)	MV11-C	(m)	MV12-C	(m)	MV12-N	(m)	MV12-SE	(m)	MV12-SW	(m)	MV12-NW	(m)	MV12-NE	(m)	MV12-E	(m)	MV12-S
50	64.6	80	28.1	50	77.9	50	4.32	50	51.0	50	37.8	50	34.3	50	23.2	50	47.8	50	36.6
100	191	160	18.0	100	22.7	100	36.6	100	50.1	100	46.6	100	42.3	100	17.9	100	46.6	100	39.7
150	81.5	240	x	140	x	150	20.0	150	53.2	150	40.3	150	27.2	150	43.4	150	40.3	170	20.5
200	58.9	320	16.9	170	23.7	200	34.5	200	57.5	200	30.7	200	183	200	84.1	200	53.7	230	44.9
250	70.4	400	13.8	200	15.1	250	x	250	57.0	250	47.7	250	85.5	250	113	250	35.5	280	54.0
300	153	460	10.8	220	x	300	x	300	56.3	300	48.3	300	14.6	300	52.8	300	53.2	330	51.4
350	198	520	15.0	240	16.0	350	83.6	350	70.1	350	120	350	124	350	50.9	350	12.1	360	45.5
400	262	580	6.17	260	x	400	65.8	400	88.2	400	661	400	89.3	400	29.6	400	39.7	390	109
450	180	640	x	280	5.01	450	81.1	450	109	450	282	450	226	450	86.4	450	65.0	420	209
500	263	700	48.1	300	x	500	145	500	77.9	500	96.9	500	301	500	12.9	500	77.9	450	173
(m)	MV12-W	(m)	MV13-C																
50	45.5	50	38.4																
110	43.2	130	32.1																
170	102	210	33.2																
230	60.7	280	27.5																
280	76.7	330	29.3																
330	176	380	171																
360	181	410	145																
390	585	440	150																
420	1374	470	128																
450	220	500	133																

表 3-1 (續): 各航次海水溶解甲烷氣體分析結果

OR3-1643

(m)	MV3-C	(m)	MV4	(m)	MV5	(m)	MV8	(m)	MV shell	(m)	GT39B-N	(m)	GT39B-S	(m)	G96-C	(m)	G96-E	(m)	G96-N
50	42.7	50	24.5	50	7.82	50	22.0	50	25.7	50	44.7	50	39.3	50	125	50	30.5	50	16.8
100	44.4	100	84.5	100	13.9	120	29.7	100	34.8	100	56.1	100	48.5	100	32.1	100	99.8	100	3.48
150	28.7	150	33.2	150	22.1	190	59.1	150	57.3	150	232	150	148	150	66.0	150	66.8	150	27.2
200	36.0	200	81.0	200	35.1	250	71.6	200	91.4	180	149	180	111	200	119	200	156	200	83.9
250	90.3	250	35.3	250	81.9	300	152	250	102	200	152	200	141	250	90.3	250	143	250	134
280	70.6	280	74.1	280	92.8	350	77.4	280	125	210	166	210	84.1	270	89.2	270	108	270	101
310	57.3	310	50.4	310	79.7	400	112	310	32.1	220	164	220	64.7	290	123	290	156	290	125
340	69.7	340	44.0	340	51.0	450	107	340	52.9	230	195	230	68.6	310	87.0	310	169	310	127
370	38.0	370	67.9	370	30.9	500	151	370	122	240	184	240	66.4	330	155	330	338	330	43.9
400	79.9	400	186	400	69.5	550	20.9	400	116	250	189	250	95.9	350	624	350	308	350	18.9
(m)	G96-W	(m)	G96-S																
50	37.5	50	26.5																
100	51.7	100	46.2																
150	95.6	150	61.8																
200	134	200	119																
250	129	250	120																
280	114	280	106																
310	75.4	310	99.2																
340	109	340	140																
370	153	370	263																
400	12.5	400	222																

表 3-2：各航次海水溶解二氧化碳氣體分析結果

unit: uL/L x : analysis failure

OR3-1553

(m)	MV1-S	(m)	MV1-N	(m)	MV1-E	(m)	MV1-W	(m)	MV1-SE	(m)	MV1-NW	(m)	MV1-NE	(m)	MV1-SW	(m)	MV3-E	(m)	MV3-NW
30	9.30	30	12.5	30	13.1	30	9.79	30	13.8	30	12.5	30	14.8	30	8.6	30	10.5	30	11.6
70	11.0	70	13.4	70	13.7	70	9.51	70	17.4	70	12.6	70	14.8	70	11.4	70	14.4	70	13.6
120	12.3	120	18.3	120	19.3	120	12.9	120	25.1	120	17.7	120	19.5	120	12.3	120	15.7	120	17.9
170	19.3	170	19.9	170	20.4	170	14.8	170	23.3	170	19.3	170	23.1	170	17.5	170	16.5	170	22.6
220	21.0	220	23.2	220	21.3	220	17.9	220	31.1	220	18.4	220	24.3	220	20.8	220	22.9	220	21.8
270	25.6	270	27.1	270	25.9	270	20.0	270	32.6	270	23.3	270	29.8	270	22.1	270	29.3	270	x
290	25.2	290	28.4	290	30.0	290	22.4	290	33.0	290	25.9	290	32.4	290	23.9	290	26.7	290	32.9
310	26.5	310	30.5	310	30.5	310	x	310	32.3	310	25.2	310	29.9	310	23.8	310	29.6	310	34.5
330	31.8	330	32.5	330	31.8	330	30.6	330	23.2	330	34.7	330	30.4	330	31.8	330	33.9	330	25.8
350	40.1	350	35.1	350	31.7	350	28.7	350	23.9	350	31.0	350	32.4	350	29.0	350	35.3	350	24.5
(m)	MV3-W	(m)	MV3-W	(m)	MV3-C	(m)	MV3-S	(m)	MV3-N	(m)	MV4-1	(m)	MV4-2	(m)	MV4-3	(m)	MV5-C	(m)	MV6-C
30	12.8	50	9.47	50	10.9	50	11.4	50	12.0	50	17.7	50	x	50	9.56	50	x	50	9.4
70	17.4	110	12.7	110	14.2	110	10.7	110	12.4	110	16.1	110	x	110	15.7	120	12.0	120	10.9
120	21.5	170	19.6	170	17.1	170	15.5	170	16.9	160	26.7	160	x	160	17.7	160	21.0	180	14.1
170	23.4	240	24.3	240	22.4	240	17.1	240	17.3	220	27.0	220	x	220	19.9	200	x	240	x
220	34.0	300	26.1	300	25.4	300	20.8	300	22.8	280	36.9	280	29.6	280	29.3	240	18.2	300	19.4
270	23.2	340	27.7	340	25.9	340	26.2	340	24.9	310	32.1	310	28.9	310	30.9	280	23.5	360	25.4
290	29.0	370	25.9	370	27.2	370	31.5	370	26.1	340	33.7	340	30.3	340	34.4	320	23.2	400	29.2
310	38.6	400	30.6	400	27.8	400	28.1	400	30.6	370	35.9	370	31.5	370	35.1	350	27.8	430	x
330	41.8	430	22.1	430	26.8	430	31.6	430	30.3	400	31.4	400	27.0	400	25.7	380	53.2	460	41.5
350	33.7	450	41.4	450	35.4	450	30.0	450	29.3	430	39.0	430	30.2	430	40.7	400	x	480	38.7

表 3-2 (續): 各航次海水溶解二氧化碳氣體分析結果

(m)	MV7-C	(m)	MV7-N	(m)	MV8-C
50	14.1	50	10.6	50	10.3
110	0.84	110	9.01	120	11.6
170	17.0	170	9.88	180	x
240	21.9	240	12.3	240	20.1
300	26.0	300	15.5	300	22.1
360	29.7	360	20.6	360	25.7
400	32.1	400	23.1	420	29.6
420	34.2	420	29.8	480	26.1
480	x	480	35.2	530	39.6
500	44.6	500	x	550	44.1



OR3-1621

(m)	MV1-N	(m)	MV1-NC	(m)	MV1-SC	(m)	MV1-C	(m)	MV1-S	(m)	MV5-C	(m)	MV5-NC	(m)	MV5-SC	(m)	MV10-C	(m)	MV10-SE
50	34.7	50	36.5	50	17.4	50	27.1	50	25.9	50	470	50	1647	50	22.4	50	x	60	40.2
100	33.3	100	17.7	100	17.2	100	25.7	110	21.2	100	46.2	100	2054	100	x	110	x	120	35.6
150	31.7	150	26.9	150	16.0	140	24.3	170	22.3	150	35.7	150	49.0	150	16.7	160	x	160	33.1
200	23.5	200	21.5	200	15.1	170	31.2	220	21.3	200	x	200	39.9	200	17.7	210	x	240	34.8
250	28.2	240	25.2	250	23.5	200	38.0	260	22.8	250	42.6	250	27.1	250	18.6	260	x	300	28.7
300	25.3	280	7.31	300	31.6	240	31.9	300	21.2	300	38.1	300	29.8	290	16.5	310	x	350	27.8
320	23.3	300	18.8	320	21.8	260	28.2	330	17.0	320	0.00	330	34.2	330	17.5	360	x	400	22.4
340	20.2	320	13.2	340	19.3	280	23.2	360	15.5	340	24.1	360	32.9	370	22.0	400	x	450	23.2
360	17.1	340	x	360	10.6	300	20.2	380	13.1	360	25.8	390	18.4	410	19.6	440	x	500	18.5
380	6.61	360	x	380	13.8	320	14.6	400	13.2	380	5.33	420	14.0	450	5.91	480	x	550	13.9

表 3-2 (續): 各航次海水溶解二氧化碳氣體分析結果

(m)	MV10-NW	(m)	MV11-C	(m)	MV12-C	(m)	MV12-N	(m)	MV12-SE	(m)	MV12-SW	(m)	MV12-NW	(m)	MV12-NE	(m)	MV12-E	(m)	MV12-S
50	x	80	33.0	50	28.6	50	29.5	50	9.33	50	75.2	50	53.3	50	14.2	50	10.7	50	5.95
100	x	160	32.1	100	8.90	100	70.7	100	16.2	100	92.4	100	62.6	100	19.2	100	15.3	100	x
150	x	240	26.4	140	x	150	33.7	150	12.7	150	90.6	150	63.0	150	23.0	150	16.6	170	25.6
200	x	320	27.2	170	19.4	200	28.9	200	19.5	200	85.2	200	62.4	200	11.9	200	22.5	230	20.1
250	x	400	30.5	200	0.00	250	x	250	34.8	250	x	250	56.5	250	35.8	250	26.6	280	29.2
300	x	460	21.1	220	53.2	300	x	300	42.9	300	68.8	300	53.3	300	15.8	300	0.05	330	19.0
350	x	520	24.0	240	28.5	350	21.5	350	27.7	350	19.7	350	44.8	350	24.0	350	24.2	360	27.6
400	x	580	6.2	260	x	400	20.4	400	47.7	400	19.2	400	35.0	400	20.0	400	23.1	390	26.5
450	x	640	21.2	280	21.4	450	18.3	450	33.1	450	15.9	450	29.8	450	18.6	450	29.4	420	x
500	x	700	9.88	300	x	500	52.1	500	34.2	500	9.84	500	12.8	500	15.3	500	18.8	450	x
(m)	MV12-W	(m)	MV13-C																
50	49.1	50	32.0																
110	42.0	130	20.1																
170	42.4	210	30.2																
230	44.7	280	25.5																
280	78.9	330	25.6																
330	30.4	380	27.3																
360	28.5	410	31.7																
390	20.4	440	24.4																
420	28.9	470	14.1																
450	25.5	500	11.2																

表 3-2 (續): 各航次海水溶解二氧化碳氣體分析結果

OR3-1643

(m)	MV3-C	(m)	MV4	(m)	MV5	(m)	MV8	(m)	MV shell	(m)	GT39B-N	(m)	GT39B-S	(m)	G96-C	(m)	G96-E	(m)	G96-N
50	7.25	50	8.16	50	18.2	50	76.1	50	8.68	50	95.5	50	96.2	50	407	50	73.5	50	81.3
100	11.3	100	12.9	100	37.8	120	169	100	11.1	100	154	100	114	100	295	100	90.3	100	121
150	18.7	150	14.8	150	65.0	190	186	150	22.7	150	202	150	176	150	470	150	155	150	178
200	26.8	200	15.2	200	127	250	185	200	23.9	180	265	180	207	200	299	200	155	200	194
250	31.5	250	18.8	250	165	300	239	250	23.7	200	238	200	231	250	371	250	201	250	187
280	27.7	280	19.8	280	271	350	277	280	22.3	210	255	210	203	270	340	270	207	270	205
310	26.2	310	27.5	310	280	400	363	310	22.0	220	230	220	270	290	325	290	220	290	204
340	27.8	340	25.7	340	299	450	247	340	27.7	230	257	230	265	310	275	310	239	310	212
370	40.6	370	27.2	370	303	500	349	370	29.6	240	200	240	344	330	104	330	209	330	213
400	36.9	400	28.4	400	375	550	330	400	32.4	250	223	250	264	350	94.2	350	254	350	175
(m)	G96-W	(m)	G96-S																
50	86.0	50	87.2																
100	93.7	100	125																
150	167	150	169																
200	176	200	146																
250	203	250	183																
280	185	280	190																
310	217	310	199																
340	245	340	206																
370	232	370	241																
400	0.00	400	263																

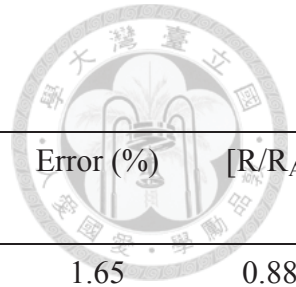


表 3-3：海水溶解氦氣之濃度及同位素組成

Site	[⁴ He] (nL/L)	⁴ He/ ²⁰ Ne	³ He/ ⁴ He (x10 ⁻⁶)	Error (%)	[R/R _A]
MV1-C-300 (1621)	2.8	0.484	1.22	1.65	0.88
MV1-C-320 (1621)	4.6	0.454	1.22	1.58	0.88
MV5-C-380 (1621)	2.5	0.478	9.86	1.66	0.71
MV5-C-360 (1621)	276	0.386	1.39	1.53	1.00
MV5-NC-390 (1621)	2.8	0.378	1.35	1.51	0.97
MV5-NC-420 (1621)	3.7	0.396	1.24	1.57	0.89
MV10-C-480 (1621)	2.6	0.363	2.19	1.54	1.57
MV10-C-440 (1621)	2.5	0.482	1.14	1.70	0.82
MV12-C-300 (1621)	271	0.428	1.04	1.64	0.75
MV12-C-280 (1621)	3.9	0.393	1.23	1.69	0.89
MV12-SW-450 (1621)	3.6	1.060	1.28	1.66	0.92
MV12-SW-500 (1621)	1.6	0.493	1.30	1.60	0.94
MV12-S-420 (1621)	2.9	0.431	1.38	1.57	0.99
MV12-S-450 (1621)	3.3	0.357	1.34	1.53	0.97
MV12-W-450 (1621)	369	0.798	0.96	1.64	0.69
MV12-W-420 (1621)	2.6	0.702	1.22	1.56	0.88
MV13-C-500 (1621)	5.0	0.364	1.31	1.57	0.94
MV13-C-470 (1621)	3.3	0.374	0.00	1.64	0.90

註：站位名稱的第三項為採樣深度，每一組海水剖面測量最深二深度樣品之溶解氦氣濃度及其同位素。

3-2 海洋沉積物

3-2-1 孔隙氣體及其甲烷碳同位素分析結果

本研究四個航次中共分析重力岩心 30 支，是利用氣相層析儀（Gas Chromatographs, GC）測量岩心頂部水（海洋底水）及沉積物孔隙氣體甲烷、乙烷、丙烷及二氧化碳（表 3- 4 ~表 3- 7），表中岩心深度標示為 0 公分為岩心頂部水之資料。

岩心頂部水（海洋底水）在空間上的濃度分佈如圖 3- 3 所示。孔隙溶解甲烷的結果在 MV1-C(1553)、MV4-C(1643)、MV5-C(1621)、MV8-C(1553)、MV11-C(1643)、MV12-C(1621)、MV12-NCC(1621)等站位發現於海床極淺部，即有甲烷濃度隨深度變深而上升之特性（圖 3- 4）；在 MV1-C(1553)、MV3-C(1643)、MV4-C(1643)、MV5-C(1553)、MV5(1621)、MV10-C(1621)、MV11-C(1643)、M12-C(1621)、M12-NCC(1621)、M12-SSE(1621)等站位有測量到乙烷，初步推論本區泥火山噴發之碳氫化合物主要為熱分解來源。

進一步用甲烷碳同位素分析儀（Methane Carbon Isotopes Analyzer, MCIA）測量位在不同泥貫入體上之 MV4-C、MV11-C 甲烷碳同位素，結果分別為-50.0 ~ -47.8‰ 和 -32.0 ~ -29.8‰，指示該區域之甲烷氣體主要為熱分解來源，而後可能有不同比例生物性甲烷來源之混染。

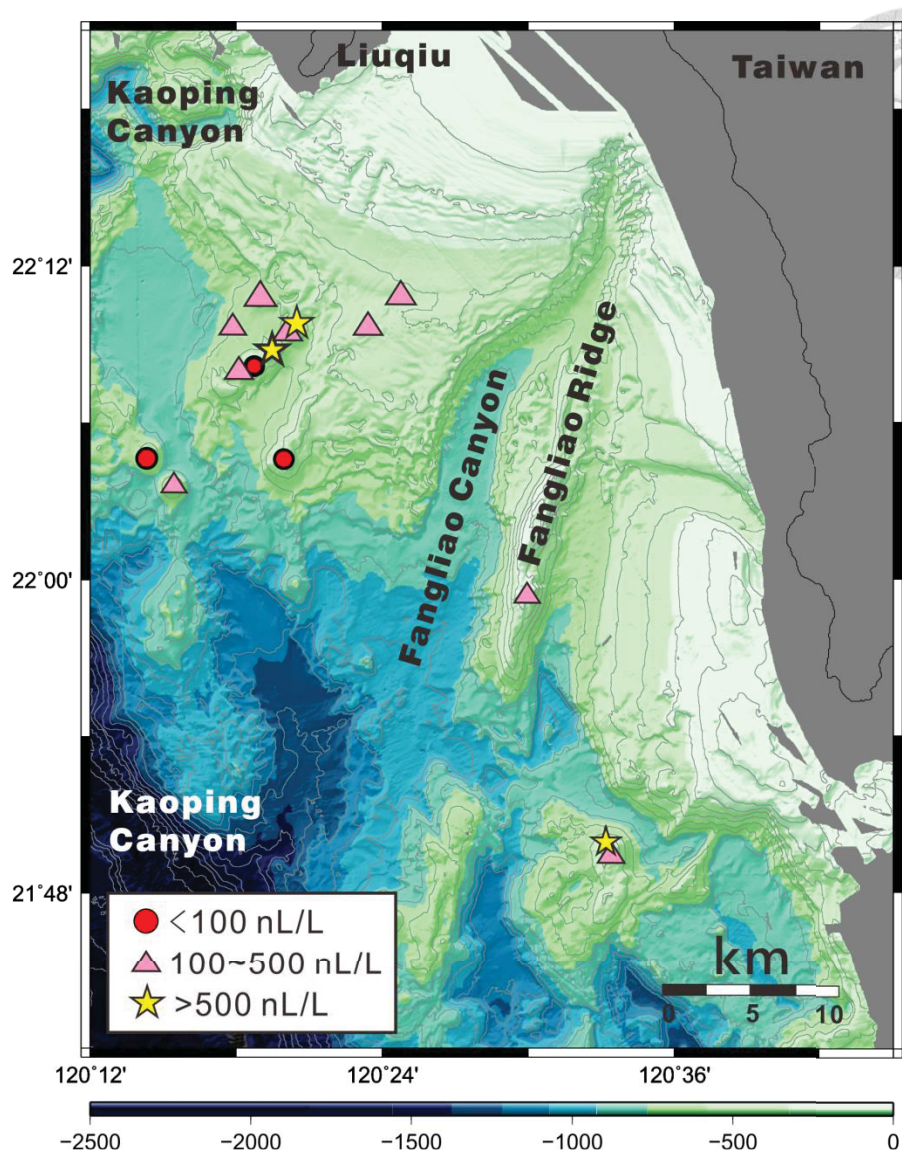


圖 3-3：海洋底水甲烷溶解濃度空間分佈圖，單位為 nL/L

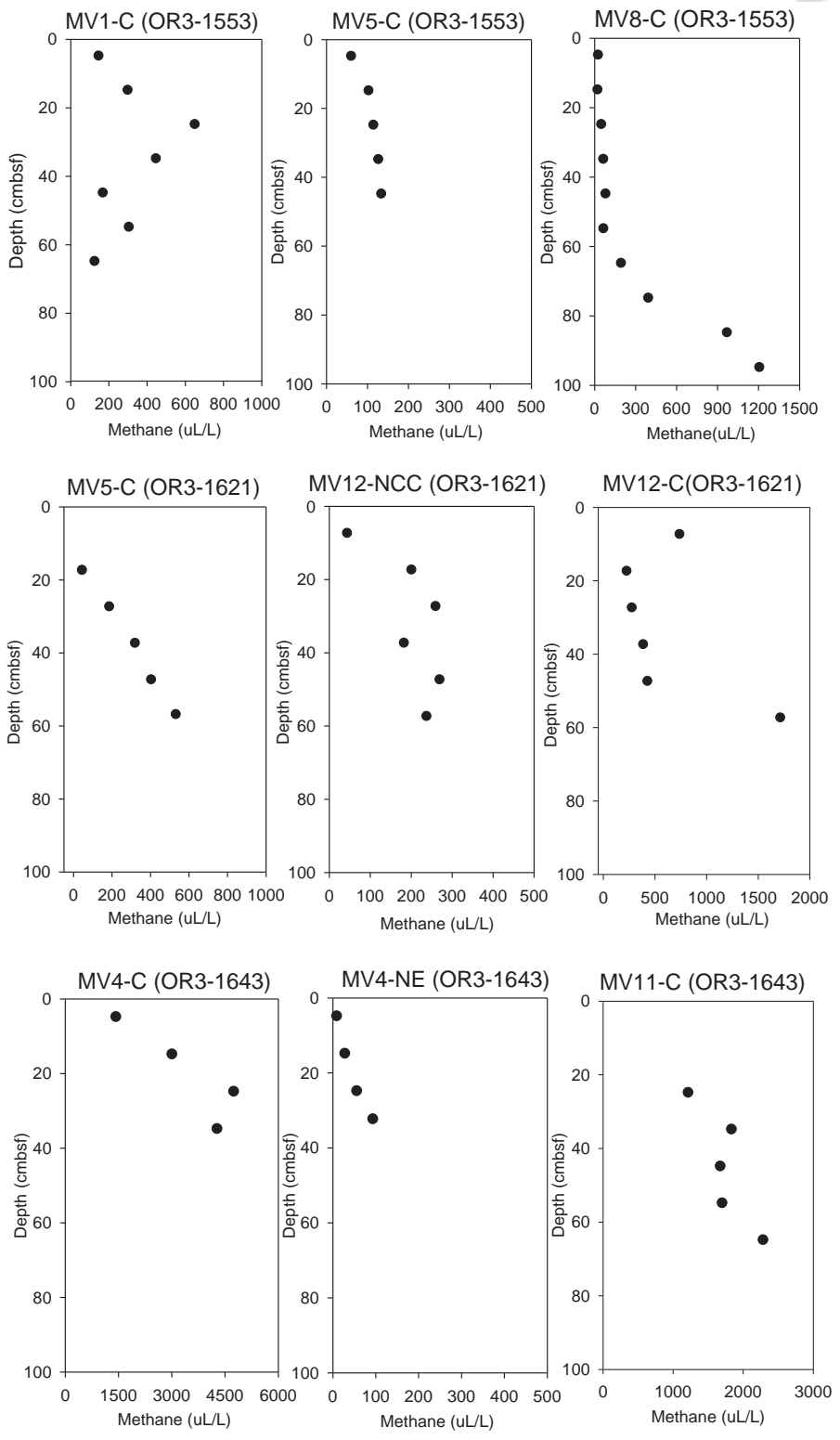


圖 3-4：沉積物孔隙間溶解甲烷氣體隨深度變化圖

(此處僅顯示隨深度有濃度變化之站位)

3-2-2 孔隙水陰離子分析結果

本研究使用離子層析儀 (Ion Chromatography, IC) 測量岩心頂部水 (海洋底水) 及孔隙水中之陰陽離子, 包括硫酸根、氯、氟、溴等陰離子 (表 3-4~表 3-7)。

由孔隙水中硫酸根離子濃度隨沉積物深度變化圖 (圖 3-5) 中可以發現, 站位 MV1-C (1553)、MV5-C (1553)、MV7-C (1553)、MV1-C (1621)、MV1-S (1621)、MV5-C (1621)、MV12-C (1621)、MV12-NCC (1621)、MV12-SSE (1621) 都有在淺層突然升高又下降的情形; MV4-C (1643) 為混亂無規則的表現; MV8-C (1553)、MV10-C (1621)、MV12-NE (1621)、MV5-C (1643)、MV9-C (1643)、MV11-C (1643) 則是幾乎維持一定斜率下降; MV1-N (1621)、MV1-NC (1621)、MV3-C (1621)、MV3-NE (1621)、MV4-NE (1643)、MV4-SW (1643)、MV7-C (1643)、MV8-C (1643)、GS shell (1643)、GT39B-N (1643)、G96-C (1643) 等隨深度沒有變化。

根據溶解甲烷氣體分析及碳酸根離子濃度分析結果, 可以將噴氣形式分為三種, 背景通量站位 (background site), 甲烷通量非常低或沒有甲烷通量、含碳氫化合物區域站位 (hydrocarbon bearing region), 甲烷以擴散的方式持續供應到淺層沉積物, MV8-C(1553)、MV5-C(1621)、MV10-C(1621)、MV12-C (1621)、MV9-C(1643)、MV11-C(1643)、OR5-1209-2-MV1、OR5-1209-2-MV2 等站位屬於此種逸氣形式; 以及噴氣站位 (venting site), 可用 EK60 聲納觀察到噴氣現象, 甲烷直接貢獻到對底層海水, 如 MV4-C (1643)。



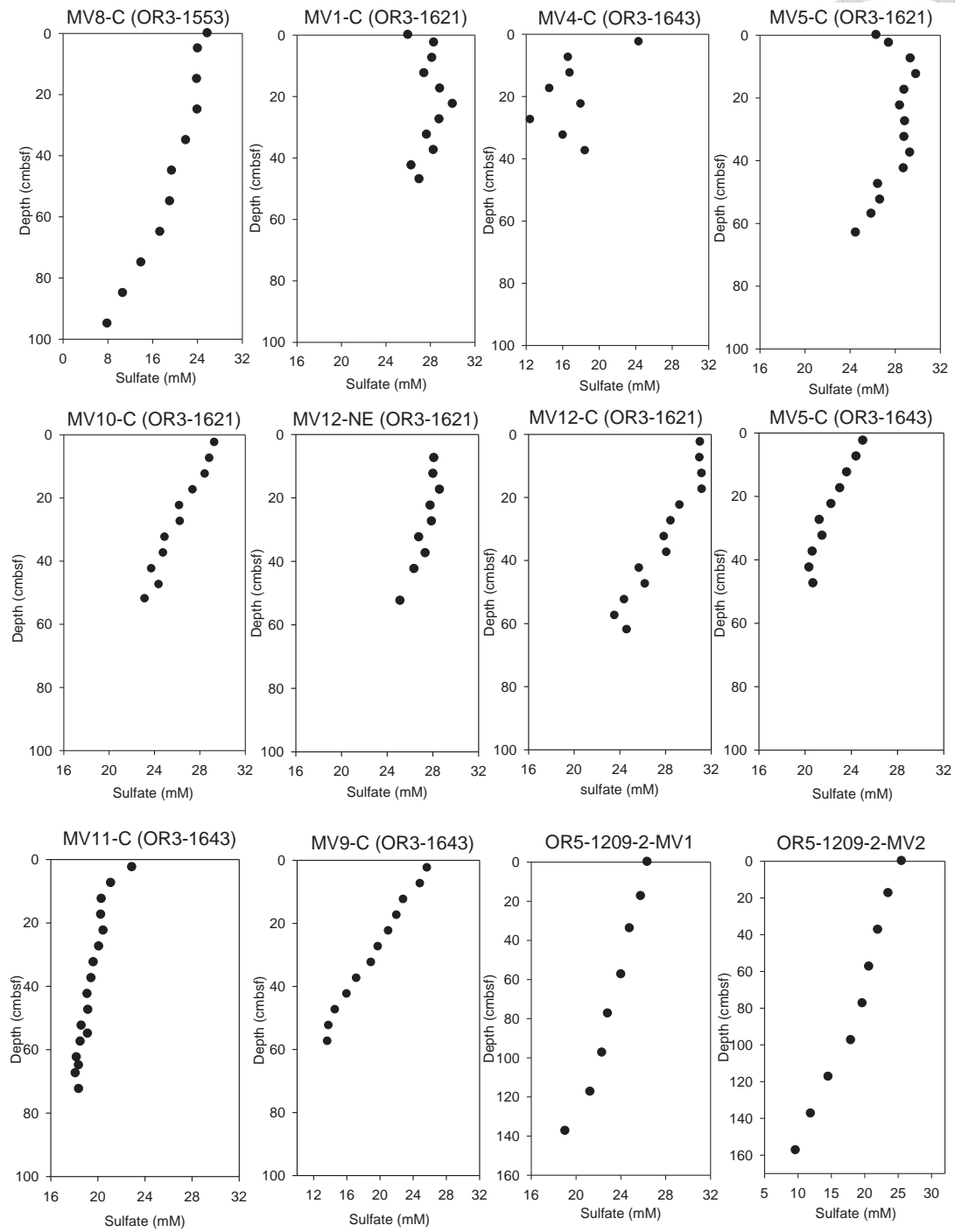


圖 3-5：沉積物孔隙水中硫酸根離子濃度隨深度變化圖

(此處僅顯示隨深度有濃度變化之站位)

3-2-3 孔隙水溶解無機碳及其碳同位素分析結果

本研究使用 Picarro $\delta^{13}\text{C}$ -DIC 分析儀測量孔隙水中的溶解無機碳及其碳同位素 (圖 3-6)，溶解無機碳測量結果為 6.85 ~ 50.7 ppm，而可量測到之溶解無機碳同位素為 -23.0 ~ -9.1‰；MV1-S (1621)、MV12-C (1621) 其溶解無機碳濃度及碳同位素有良好的鏡像關係。

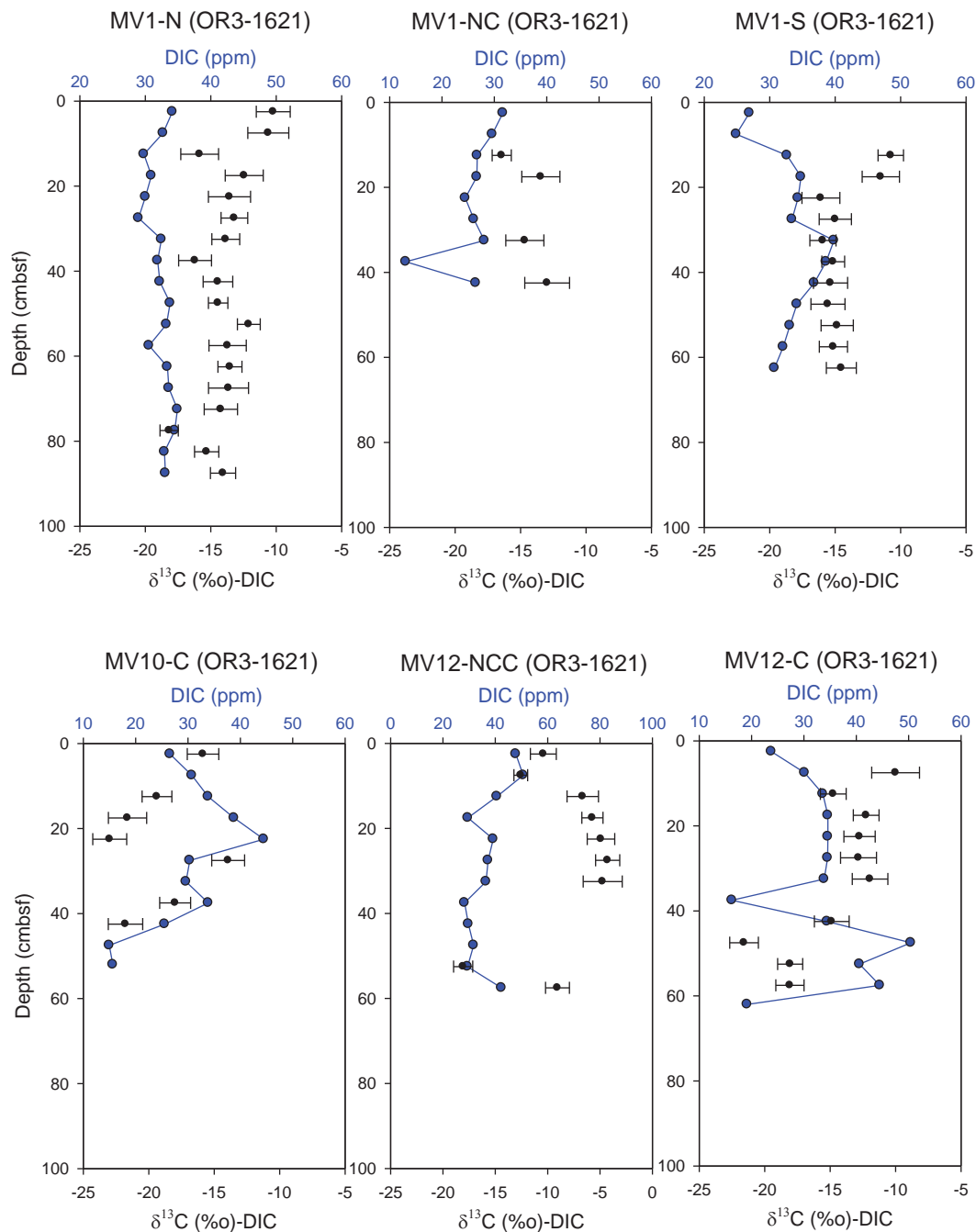


圖 3-6：孔隙水溶解無機碳與其碳同位素隨深度變化

表 3- 4：OR3-1553 孔隙氣體、陰離子分析結果

x : analysis failure

b.d.l: below detection limit

Core Name	Depth (cmbsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)
MV1-C	0.0	25.58					
	5.0	28.40	553	0.91	149	11.7	1252
	15.0	23.64	x	x	302	13.8	1263
	25.0	24.50	554	0.91	653	20.9	1503
	35.0	23.83	553	0.91	450	19.4	1557
	45.0	23.37	x	x	172	3.58	1373
	55.0	26.74	565	0.93	308	3.50	1254
	65.0	26.03	556	0.92	129	3.79	1280
MV5-C	0.0	25.82					
	5.0	28.79	545	0.92	62.0	9.20	756
	15.0	28.78	554	0.92	105	10.3	959
	25.0	28.54	551	0.87	117	9.75	861
	35.0	31.23	590	0.97	128	10.4	710
	45.0	31.55	598	0.96	136	9.50	818
	55.0	32.48	607	0.98	x	x	x
	MV7-C	0.0	25.63				
5.0		28.30	539	0.92	18.5	b.d.l.	1638
15.0		x	x	x	11.4	b.d.l.	850
25.0		28.68	544	0.90	13.3	b.d.l.	933
35.0		28.10	541	0.79	11.1	b.d.l.	832
45.0		28.52	553	0.91	9.17	b.d.l.	507
55.0		28.53	553	0.91	55.8	b.d.l.	1197
65.0		28.54	554	0.92	18.5	b.d.l.	886
72.5		31.64	649	1.02	18.2	b.d.l.	1006
MV8-C	5.0	24.13	539	b.d.l.	31.1	b.d.l.	1088
	15.0	23.95	586	b.d.l.	26.7	b.d.l.	1188
	25.0	24.04	595	b.d.l.	54.4	b.d.l.	873
	35.0	22.00	547	b.d.l.	69.2	b.d.l.	1392
	45.0	19.49	529	b.d.l.	85.5	b.d.l.	1523
	55.0	19.15	542	b.d.l.	69.9	b.d.l.	1379
	65.0	17.40	542	b.d.l.	199	b.d.l.	958
	75.0	14.01	532	b.d.l.	398	b.d.l.	764
	85.0	10.74	531	b.d.l.	974	b.d.l.	1433
	95.0	7.97	544	b.d.l.	1211	b.d.l.	1655

表 3- 5：OR3-1621 孔隙氣體、陰離子、溶解無機碳及其碳同位素、孔隙率分析結果

x : analysis failure

b.d.l: below detection limit

Core Name	Depth (cmbfsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	DIC (ppm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)-DIC	error	Porosity (%)
MV1-N	0.00	26.01	506	0.40							
	2.50	25.44	501	0.61				34.2	-10.2	1.3	
	7.50	25.76	506	0.63	0.64	b.d.l.	604	32.7	-10.6	1.6	58.67
	12.50	26.26	512	0.38				29.8	-15.8	1.4	
	17.50	26.02	507	0.42	0.86	b.d.l.	607	30.9	-12.4	1.5	57.52
	22.50	25.49	501	0.59				30.0	-13.6	1.6	
	27.50	26.03	507	0.37	2.14	b.d.l.	508	29.0	-13.2	1.0	54.47
	32.50	25.83	508	0.65				32.5	-13.9	1.1	
	37.50	25.48	505	0.36	2.43	b.d.l.	701	32.0	-16.2	1.3	52.82
	42.50	25.37	505	0.39				32.2	-14.4	1.1	
	47.50	26.07	511	0.42	0.89	b.d.l.	x	33.8	-14.4	0.7	57.67
	52.50	25.17	506	0.63				33.2	-12.1	0.9	
	57.50	24.92	504	0.64	0.81	b.d.l.	811	30.6	-13.7	1.4	57.30
	62.50	24.68	502	0.41				33.4	-13.5	0.9	
	67.50	24.94	506	0.41	2.75	b.d.l.	863	33.6	-13.6	1.5	47.45
	72.50	24.77	507	0.40				34.9	-14.2	1.3	
	77.50	25.05	510	0.40	2.13	b.d.l.	894	34.5	-18.2	0.7	60.80
82.50	24.85	505	0.38				32.9	-15.3	1.0	55.60	
87.50	24.90	503	0.37				33.1	-14.1	1.0		
MV1-NC	0.00	26.61	511	0.40							
	2.50	25.99	505	0.37				31.6	b.d.l.		
	7.50	26.71	509	0.45	5.87	b.d.l.	505	29.6	b.d.l.		44.08
	12.50	26.32	500	0.34				26.7	-16.4	0.7	
	17.50	26.05	498	0.29	4.85	b.d.l.	536		-13.4		51.02
	22.50	25.82	497	0.36				24.5	b.d.l.		
	27.50	26.05	500	0.42	6.13	b.d.l.	506	26.1	b.d.l.		40.53
32.50	25.52	502	0.40				28.1	-14.7	1.5		

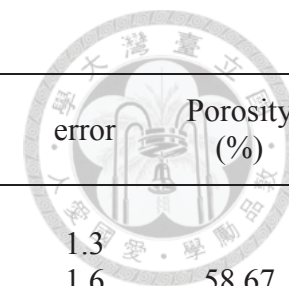


表 3-5 (續): OR3-1621 孔隙氣體、陰離子、溶解無機碳及其碳同位素、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	DIC (ppm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)-DIC	error	Porosity (%)
MV1-NC	37.50	26.18	502	0.39	8.34	b.d.l.	365.87	13.1	b.d.l.	1.7	42.69
	42.50	25.99	502	0.38				26.5	-13.0		
MV1-C	0.00	26.02	509	0.84						1.7	56.93
	2.50	28.35	514	0.77				13.8	b.d.l.		
	7.50	28.18	512	0.77	21.4	0.45	437	14.2	b.d.l.		
	12.50	27.46	511	0.77				15.0	b.d.l.		
	17.50	28.90	512	0.77	36.2	0.39	411	17.8	b.d.l.		
	22.50	30.03	508	0.74				19.6	b.d.l.		
	27.50	28.83	510	0.77	41.6	0.13	291	14.6	b.d.l.		
	32.50	27.71	509	0.77				16.2	b.d.l.		
	37.50	28.31	514	0.78	51.2	0.31	345	16.8	b.d.l.		
	42.50	26.32	508	0.76				17.8	b.d.l.		
MV1-SC	0.00		511	0.41						1.7	40.20
	2.50	26.93	508	0.39				22.4	b.d.l.		
	7.50	27.46	512	0.67	6.09	0.08	560	x	x		
	12.50	26.20	505	0.56				13.3	b.d.l.		
	17.50	25.84	502	0.62	10.2	0.11	678	12.9	b.d.l.		
	22.50	25.76	500	0.36				13.3	b.d.l.		
	27.50	26.71	508	0.62	4.23	0.09	445	12.3	b.d.l.		
	32.50	26.17	508	0.65				13.0	b.d.l.		
	37.50	26.23	504	0.64	3.95	0.22	384	11.7	b.d.l.		
	42.50	25.49	501	0.61				11.5	b.d.l.		
46.50	25.58	505	0.64	x	x	x	11.0	b.d.l.			
MV1-S	0.00	26.05	508	0.40						1.0	25.33
	2.50	27.34	516	0.78				26.9	b.d.l.		
	7.50	28.35	512	0.78	13.1	0.74	700	24.9	b.d.l.		
	12.50	27.94	508	0.76				32.7	-10.7		

表 3-5 (續): OR3-1621 孔隙氣體、陰離子、溶解無機碳及其碳同位素、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	DIC (ppm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)-DIC	error	Porosity (%)
MV1-S	17.50	28.38	512	0.77	37.9	2.60	612	34.8	-11.5	1.4	
	22.50	25.86	512	0.77				34.3	-16.1	1.5	
	27.50	27.17	510	0.80	14.9	1.01	907	33.4	-15.0	1.2	32.80
	32.50	25.96	512	0.78				39.8	-16.0	1.0	
	37.50	25.56	509	0.77	30.9	1.42	860	38.6	-15.1	0.9	56.82
	42.50	26.18	512	0.78				36.8	-15.4	1.3	
	47.50	25.77	507	0.78	68.9	0.21	681	34.2	-15.5	1.3	54.98
	52.50	26.25	509	0.77				33.1	-14.8	1.2	
	57.50	26.75	512	0.78	55.1	0.31	547	32.1	-15.1	1.1	51.20
	62.50	26.64	510	0.77				30.7	-14.5	1.1	
MV5-C	0.00	26.36	510	0.40							
	2.50	27.46	511	0.76				21.4	-20.7	1.0	
	7.50	29.38	512	0.88				10.7	b.d.l.		47.43
	12.50	29.87	516	0.63				6.85	b.d.l.		
	17.50	28.84	508	0.76	48.1	1.65	215	9.33	b.d.l.		47.98
	22.50	28.44	510	0.75				11.6	b.d.l.		
	27.50	28.89	511	0.76	190	3.51	174	28.9	b.d.l.		42.04
	32.50	28.83	513	0.77				8.44	b.d.l.		
	37.50	29.35	510	0.73	323	4.17	292	8.29	b.d.l.		46.35
	42.50	28.77	517	0.80				9.45	b.d.l.		
	47.50	26.49	507	0.76	407	5.96	279	x	x		42.49
	52.50	26.68	509	0.77				6.39	b.d.l.		
	57.00	25.91	512	0.77	535	3.30	239	x			40.20
	63.00	24.53	510	0.77				11.3	b.d.l.		
MV10-C	2.50	29.32	515	0.89				26.6	-15.9	1.2	
	7.50	28.88	511	0.77	7.51	0.22	1064	30.8	b.d.l.		54.56
	12.50	28.49	509	0.76				33.9	-19.4	1.1	
	17.50	27.41	509	0.75	14.4	0.31	803	38.8	-21.6	1.5	51.37

表 3-5 (續): OR3-1621 孔隙氣體、陰離子、溶解無機碳及其碳同位素、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	DIC (ppm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)-DIC	error	Porosity (%)
MV10-C	22.50	26.23	509	0.76				44.5	-23.0	1.3	
	27.50	26.29	506	0.76	10.3	0.22	821	30.3	-13.9	1.3	50.67
	32.50	24.95	507	0.71				29.6	b.d.l.		
	37.50	24.81	509	0.76	18.5	0.18	1168	33.9	-18.0	1.2	49.45
	42.50	23.77	507	0.75				25.6	-21.8	1.3	
	47.50	24.41	508	0.76	18.8	0.28	1329	15.0	b.d.l.		50.05
	52.00	23.18	502	0.75				15.7	b.d.l.		
MV12-NCC	0.00	26.07	512	0.42							
	2.50	x	x	x				47.8	-10.4	1.2	
	7.50	29.53	514	0.72	45.4	0.65	406	50.7	-12.6	0.7	51.69
	12.50	32.84	522	0.79				40.6	-6.7	1.5	
	17.50	33.61	514	0.78	202	1.03	1100	29.6	-5.7	1.0	49.52
	22.50	31.70	514	0.78				39.2	-5.0	1.3	
	27.50	32.02	513	0.77	262	1.02	1026	37.2	-4.3	1.2	
	32.50	31.28	519	0.79				36.5	-4.7	1.9	
	37.50	33.55	514	0.78	184	0.14	1133	28.3	b.d.l.		44.92
	42.50	31.33	510	0.76				29.7	b.d.l.		
	47.50	31.65	515	0.78	271	0.16	1012	31.7	b.d.l.		41.52
	52.50	29.28	506	0.68				29.4	-18.1	0.9	
57.50	29.68	514	0.77	239	0.92	1156	42.4	-9.1	1.2	42.88	
MV12-SSE	0.00	26.30	510	0.42	0.22		25.6				
	2.50	26.62	505	0.88				x	x		
	7.50	27.26	507	0.89	2.94	b.d.l.	601	x	x		42.59
	12.50	29.12	503	0.87				12.9	b.d.l.		
	17.50	28.12	507	0.86	5.28	b.d.l.	713	11.6	b.d.l.		44.72
	22.50	27.16	503	0.82				12.9	b.d.l.		
	27.50	27.60	508	0.83	8.13	0.07	842	10.4	b.d.l.		42.50
	32.50	25.80	508	0.82				12.2	b.d.l.		

表 3-5 (續): OR3-1621 孔隙氣體、陰離子、溶解無機碳及其碳同位素、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	DIC (ppm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)-DIC	error	Porosity (%)
M V12-SSE	37.50	26.07	504	0.81	5.31	b.d.l.	724	8.22	b.d.l.		42.40
	42.50	25.17	504	0.82				10.9	b.d.l.		
	47.50	25.61	509	0.94	5.38	b.d.l.	782	11.3	b.d.l.		42.49
	52.50	24.71	503	0.82				10.4	b.d.l.		
	57.00	25.11	504	0.82	10.2	0.47	683	11.5	b.d.l.		41.50
MV12-NE	2.50							22.9	b.d.l.		
	7.50	28.14	516	0.80	2.82	b.d.l.	232	19.9	b.d.l.		40.45
	12.50	28.06	513	0.77				x	x		
	17.50	28.64	515	0.77	2.70	b.d.l.	550	18.7	b.d.l.		41.29
	22.50	27.81	512	0.76				21.1	b.d.l.		
	27.50	27.93	515	0.80	3.09	b.d.l.	557	18.4	b.d.l.		41.58
	32.50	26.82	513	0.76				20.6	b.d.l.		
	37.50	27.38	515	0.77	2.75	b.d.l.	659	x	x		40.48
	42.50	26.41	516	0.78				20.7	b.d.l.		
	47.50	x	x	x	5.33	b.d.l.	860	25.7	-11.9	1.5	43.54
52.50	25.18	511	0.76				29.4	b.d.l.			
MV12-C	2.50	31.07	511	0.77				23.7	b.d.l.		
	7.50	31.03	509	0.77	746	17.5	397	30.1	-1.0	1.8	55.66
	12.50	31.20	508	0.76				33.6	-14.7	1.0	
	17.50	31.22	505	0.75	233	1.84	411	34.6	-12.2	1.0	55.56
	22.50	29.28	505	0.75				34.6	-12.7	1.2	
	27.50	28.49	506	0.75	283	22.0	547	34.5	-12.8	1.4	44.16
	32.50	27.91	509	0.75				33.9	-11.9	1.4	
	37.50	28.12	510	0.55	392	188	346	16.3	b.d.l.		47.52
	42.50	25.72	504	0.74				34.4	-14.9	1.3	
	47.50	26.25	516	0.78	434	278	350	50.4	-21.6	1.1	45.35
	52.50	24.42	506	0.75				40.6	-18.1	1.0	
	57.50	23.57	503	0.75	1721	489	577	44.5	-18.1	1.1	47.92
	62.00	24.64	505	0.62				19.2	b.d.l.		

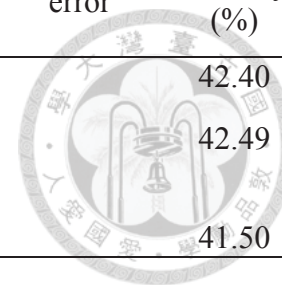


表 3- 6：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果
 x : analysis failure
 b.d.l.: below detection limit

Core Name	Depth (cmbsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
MV3-C	2.5	26.56	515	0.85					
	5.0				9.80	b.d.l	b.d.l	286	57.55
	7.5	26.94	516	0.86					
	12.5	27.15	523	0.87					
	15.0				11.4	0.29	0.02	367	52.33
	17.5	27.36	527	0.89					
	22.5	26.63	518	0.86					
	25.0				23.0	0.43	0.05	531	53.95
	27.5	26.05	512	0.84					
	32.5	26.42	518	0.86					
	35.0				32.3	0.45	0.03	485	49.27
	37.5	26.40	520	0.86					
	42.5	26.40	518	0.86					
	45.0				50.3	0.57	0.02	295	48.51
	47.5	26.18	520	0.86					
	52.5	26.00	518	0.85					
	55.0				40.3	0.31	0.02	290	48.04
	57.5	25.60	514	0.84					
	62.5	25.71	518	0.86					
65.0				67.2	b.d.l	b.d.l	325	57.72	
67.5	25.42	516	0.84						
MV3-NE	2.5	26.33	512	0.79					
	5.0				3.37	b.d.l	b.d.l	8581	54.75
	7.5	26.45	514	0.79					
	12.5	26.23	514	0.78					
	15.0				2.35	b.d.l	b.d.l	5268	55.44
	17.5	26.36	518	0.68					
	22.5	26.56	522	0.89					
	25.0				1.50	b.d.l	b.d.l	6431	53.98
	27.5	26.18	517	0.80					
	32.5	25.94	518	0.80					
	35.0				1.77	b.d.l	b.d.l	4596	49.19
	37.5	26.09	518	0.83					
	42.5	25.76	513	0.84					
45.0				1.55	b.d.l	b.d.l	2721	51.22	
47.5	24.91	515	0.82						

表 3-6 (續)：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfs)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
MV3-NE	52.5	25.12	517	0.77					
	55.0				3.54	b.d.l	b.d.l	2417	49.86
	57.5	24.89	516	0.78					
	62.5	25.05	521	0.79	1.48	b.d.l	b.d.l	3276	
	65.0								50.12
MV4-C	2.5	24.38	511	0.79					
	5.0				1449	6.99	b.d.l	166	50.99
	7.5	16.65	510	0.79					
	12.5	16.82	514	0.80					
	15.0				3027	8.59	b.d.l	539	50.93
	17.5	14.60	509	0.78					
	22.5	18.03	510	0.79					
	25.0				4767	15.6	b.d.l	724	47.56
	27.5	12.49	511	0.80					
	32.5	16.07	512	0.79					
	35.0				4298	21.5	b.d.l	516	47.23
MV4-NE	2.5	26.20	512	0.85					
	5.0				10.69	0.07	b.d.l	2662	53.79
	7.5	25.81	508	0.82					
	12.5	25.92	509	0.83					
	15.0				29.63	0.17	b.d.l	x	52.95
	17.5	25.91	520	0.83					
	22.5	25.98	511	0.84					
	25.0				57.50	0.33	b.d.l	1061	49.76
	27.5	25.73	507	0.81					
	32.5	26.13	511	0.84	94.98	0.69	0.15	1682	48.37
MV4-SW	2.5	26.95	521	0.86					
	5.0				1.22	b.d.l	b.d.l	1742	49.39
	7.5	26.25	513	0.83					
	12.5	26.34	515	0.85					
	15.0				1.30	b.d.l	b.d.l	2193	48.86
	17.5	26.30	516	0.86					
	22.5	26.21	514	0.85					
	25.0				1.45	b.d.l	b.d.l	3088	49.00
	27.5	26.27	513	0.85					
	32.5	26.81	515	0.78					
35.0				3.97	b.d.l	b.d.l	7277	59.74	

表 3-6 (續)：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfs)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
MV4-SW	37.5	26.47	515	0.85					
	42.5	26.86	516	0.78					
	45.0				1.31	b.d.l	b.d.l	3551	50.45
	47.5	25.97	510	0.84					
MV5-C	2.5	25.05	509	0.79					
	5.0				1.16E-02	2.59E-04	b.d.l	3.85	50.61
	7.5	24.46	513	0.81					
	12.5	23.66	511	0.80					
	15.0				3.19E-02	4.95E-04	9.82E-05	5.05	49.79
	17.5	23.06	514	0.81					
	22.5	22.30	512	0.81					
	25.0				4.84E-02	4.33E-04	7.25E-05	6.12	48.97
	27.5	21.28	503	0.79					
	32.5	21.52	514	0.82					
	35.0				6.00E-02	6.94E-04	3.00E-04	6.16	46.51
	37.5	20.67	509	0.81					
	42.5	20.39	510	0.80					
	45.0				3.94E-02	1.86E-04	b.d.l	6.29	47.15
47.5	20.73	507	0.80						
MV7-C	2.5	25.53	504	0.80					
	5.0				0.99	b.d.l	b.d.l	772	68.87
	7.5	26.01	511	0.81					
	12.5	26.37	517	0.83					
	15.0				1.19	b.d.l	b.d.l	683	61.12
	17.5	25.78	510	0.82					
	22.5	25.70	510	0.80					
	25.0				1.77	b.d.l	b.d.l	875	60.59
	27.5	25.53	510	0.81					
	32.5	25.59	511	0.81					
	35.0				2.08	b.d.l	b.d.l	912	62.97
	37.5	25.66	512	0.81					
	42.5	25.65	512	0.81					
	45.0				3.24	b.d.l	b.d.l	894	65.61
	47.5	25.95	513	0.82					
	52.5	25.64	512	0.81					
	55.0				3.41	b.d.l	b.d.l	904	57.89
57.5	25.83	514	0.82						
62.5	25.76	518	0.83						

表 3-6 (續)：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfs)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
MV7-C	65.0				3.51	b.d.l	b.d.l	807	61.13
	67.5	25.51	515	0.83					
	72.5	24.96	507	0.80					
	75.0				3.38	b.d.l	b.d.l	685	58.34
	77.5	25.30	512	0.81					
	82.5	25.12	511	0.80					
	85.0				3.04	b.d.l	b.d.l	600	55.42
	87.5	25.39	513	0.81					
MV8-C	2.5	25.32	507	0.79					
	5.0				23.0	b.d.l	b.d.l	2037	58.63
	7.5	24.82	501	0.77					
	12.5	25.11	505	0.79					
	15.0				25.0	b.d.l	b.d.l	1735	58.06
	17.5	25.20	509	0.81					
	22.5	24.95	507	0.79					
	25.0				33.8	b.d.l	b.d.l	5259	58.31
	27.5	24.56	505	0.79					
	32.5	24.53	507	0.80					
	35.0				21.6	b.d.l	b.d.l	3985	58.40
	37.5	24.69	506	0.79					
	42.5	24.93	506	0.79					
	45.0				27.3	b.d.l	b.d.l	2877	60.52
47.5	25.19	509	0.80						
MV9-C	2.5	25.73	514	0.79					
	5.0				8.88	0.29	b.d.l	7902	50.13
	7.5	24.88	520	0.81					
	12.5	22.86	506	0.79					
	15.0				13.3	0.36	b.d.l	8095	47.83
	17.5	22.05	510	0.79					
	22.5	21.06	507	0.78					
	25.0				24.4	0.51	b.d.l	12118	53.21
	27.5	19.81	508	0.80					
	32.5	18.97	508	0.79					
	35.0				21.3	0.64	b.d.l	11400	48.67
	37.5	17.21	503	0.78					
	42.5	16.04	505	0.78					
	45.0				27.3	0.50	0.03	11742	49.58
47.5	14.63	505	0.78						

表 3-6 (續)：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbfs)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
MV9-C	52.5	13.85	504	0.79					
	55.0				34.2	0.42	0.02	11226	48.81
	57.5	13.72	505	0.80					
MV11-C	2.5	22.93	497	0.79					
	5.0				x	x	x	x	
	7.5	21.14	501	0.83					
	12.5	20.34	500	0.82					
	15.0				x	x	x	x	49.96
	17.5	20.29	499	0.81					
	22.5	20.50	504	0.83					
	25.0				1225	32.5	0.99	816	
	27.5	20.13	503	0.83					
	32.5	19.65	504	0.82					
	35.0				1844	47.3	1.25	1084	
	37.5	19.47	503	0.82					
	42.5	19.14	504	0.83					48.07
	45.0				1684	42.6	0.94	994	
	47.5	19.20	506	0.82					
	52.5	18.64	502	0.82					46.03
	55.0	19.17	507	0.83	1711	49.6	1.84	1390	
57.5	18.55	503	0.82						
62.5	18.23	499	0.83					46.04	
65.0	18.41	507	0.83	2294	73.2	1.06	1444		
67.5	18.14	502	0.78					45.26	
72.5	18.42	506	0.84						
GT39B-N	2.5	26.10	511	0.81					
	5.0				3.26	b.d.l	b.d.l	3644	50.13
	7.5	26.21	512	0.81					
	12.5	26.59	515	0.82					
	15.0				5.43	b.d.l	b.d.l	3274	42.59
	17.5	26.12	512	0.81					
	22.5	26.37	512	0.82					
	25.0				6.55	b.d.l	b.d.l	2601	45.96
	27.5	25.99	509	0.85					
	32.5	26.30	513	0.82					
	35.0				7.67	b.d.l	b.d.l	2544	46.86
37.5	25.97	510	0.84						
42.5	26.29	512	0.84						

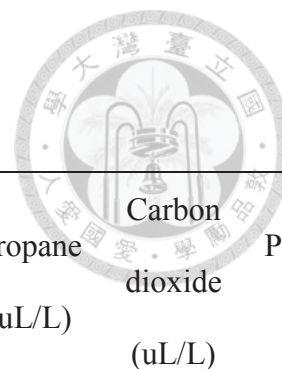
表 3-6 (續)：OR3-1643 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果

Core Name	Depth (cmbsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
GT39B-N	45.0				7.90	b.d.l	b.d.l	2212	45.28
	47.5	26.18	512	0.83					
G96-C	2.5	26.58	519	0.52					
	5.0				1.96	b.d.l	b.d.l	794	59.51
	7.5	25.68	508	0.51					
	12.5	26.15	512	0.51					
	15.0				3.60	b.d.l	b.d.l	787	59.21
	17.5	25.58	510	0.51					
	22.5	25.59	511	0.51					
	25.0				6.05	b.d.l	b.d.l	662	61.97
	27.5	25.39	509	0.50					
	32.5	25.84	517	0.52					
	35.0				9.12	b.d.l	b.d.l	589	59.52
	37.5	25.14	508	0.51					
	42.5	25.55	512	0.51					
	45.0				7.47	b.d.l	b.d.l	597	58.62
	47.5	25.43	512	0.51					
	52.5	25.18	510	0.51					
	55.0				7.74	b.d.l	b.d.l	564	57.44
	57.5	25.01	509	0.50					
	62.5	25.42	515	0.52					
	65.0				7.79	b.d.l	b.d.l	548	57.32
67.5	25.77	519	0.52						
72.5	24.96	510	0.51						
75.0				5.91	b.d.l	b.d.l	483	56.29	
77.5	25.05	511	0.51						
82.5	25.31	514	0.52						
GS shell	2.5	25.94	507	0.83	0.84	b.d.l	b.d.l	2587	
	5.0								
	7.5	26.16	511	0.91					47.58
	12.5	26.18	510	0.84	1.19	b.d.l	b.d.l	2957	
	15.0								
	17.5	25.64	505	0.82					46.19
	22.5	26.55	516	0.85	1.76	b.d.l	b.d.l	2495	
	25.0								
	27.5	26.06	512	0.97					46.09
	32.5	26.14	508	0.83					
35.0									
37.5	25.91	507	0.84						

表 3- 7：OR5-1209-2 孔隙氣體、陰離子、孔隙率分析結果

x : analysis failure

b.d.l.: below detection limit



Core Name	Depth (cmbsf)	Sulfate (mM)	Chloride (mM)	Bromide (mM)	Methane (uL/L)	Ethane (uL/L)	Propane (uL/L)	Carbon dioxide (uL/L)	Porosity (%)
OR5-1209	0	26.39	510	0.83					
-2-MV1	17.5	25.81	505	0.83	1.82	b.d.l.	b.d.l.	278	x
	34	24.82	501	0.82	2.54	b.d.l.	b.d.l.	340	46.30
	57.5	24.05	501	0.82	3.37	b.d.l.	b.d.l.	368	51.36
	77.5	22.86	497	0.81	3.30	b.d.l.	b.d.l.	415	52.92
	97.5	22.35	502	0.83	4.00	b.d.l.	b.d.l.	436	48.44
	117.5	21.29	498	0.81	6.30	b.d.l.	b.d.l.	443	48.64
	137.5	19.07	493	0.81	12.9	b.d.l.	b.d.l.	697.	44.94
OR5-1209	0	25.5719	503	0.82					
-2-MV2	17.5	23.5615	499	0.81	5.77	b.d.l.	b.d.l.	2938	51.95
	37.5	22.0167	500	0.82	6.98	b.d.l.	b.d.l.	3324	51.75
	57.5	20.6865	499	0.81	8.11	b.d.l.	b.d.l.	3927	52.92
	77.5	19.7052	495	0.84	13.74	b.d.l.	b.d.l.	4614	50.00
	97.5	17.974	498	0.81	12.08	b.d.l.	b.d.l.	4492	50.78
	117.5	14.5927	490	0.80	17.43	b.d.l.	b.d.l.	5096	48.05
	137.5	11.9667	487	0.82	26.17	b.d.l.	b.d.l.	4984	47.67
	157.5	9.7083	481	0.78	34.85	b.d.l.	b.d.l.	5567	49.22

第四章 討論



4-1 溶解甲烷在海水中隨深度的變化

溶解甲烷濃度隨海水深度的變化（圖 3-1）整體的趨勢相似：在底層海水有高濃度甲烷的訊號，隨著深度變淺甲烷濃度下降，接近海水表面時大多下降至海水背景值，可以用來說明甲烷進入海水後會隨著時間被消耗。但仔細觀察可以發現，在許多站位都有在某些深度甲烷濃度突然升高的現象，此現象在 MV1-N (1621)、MV1-SC (1621)、MV-NC (1621)、MV8-C (1643)、MV10-NW (1621)等站位較為明顯，泥火山噴發時伴隨氣泡的存在可以用來解釋此現象：當一團高濃度甲烷從沉積物進入海水，底層海水的甲烷瞬間超過飽和濃度，過飽和的狀態下，甲烷便會以氣體（氣泡）的形式存在，本研究區域已確實拍攝到泥火山噴發伴隨著氣泡的存在（陳松春，2011）。氣泡的大小取決於甲烷的濃度，當泥火山有間歇性噴發的現象，氣泡就會有體積大小分佈範圍，體積較小的氣泡在水中能維持的時間較短，進入水中不久後就會破裂溶解到海水中，因此在底層海水通常有高濃度甲烷的訊號，而體積較大的氣泡可以在水中維持較長時間，向上移棲一段距離之後才破裂溶解出來，造成某些深度甲烷濃度突然升高的情況。圖 4-1 為考慮壓力條件的氣泡破裂深度數值模擬結果（Solomon et al., 2009; MacDonald et al., 2002; Leifer and Patro, 2002），體積越大的氣泡在水中的破裂深度越接近淺層，即使在噴氣速率（ V_{up} ）為 0 的狀況下，半徑大於 4000 μm 的氣泡還是能夠維持到混合層（mixed layer）的深度才破裂溶解出來。

噴氣中心採集的底部海水樣品並不如預期有最高的甲烷濃度，反而是周邊的站位有單一逸氣構造底水甲烷濃度最高值，及某些站位的甲烷濃度最高值並不出現在最接近海床，而是出現在距離海床 100 ~ 200 公尺的深度等現象是受到海流的影響，以下將分別討論上升海流以及側向海流。

圖 4-2 為 MV1 於航次 OR3-1553 採樣當時為 EK500 科學測深儀（Scientific Sounder System）記錄到之海床回波聲納影像及為都普勒海流儀（Acoustic

Doppler Current Profilers, ADCP) 所記錄到之海流狀況。EK60 記錄到有泥火山噴氣的位置，在 ADCP 圖上也可以觀察到有垂直方向的速率 (圖 4-2 標中記 a, b, c 處)。剖面 a 在 EK60 並無噴氣現象，但仍然在水深約 400 公尺處記錄到有垂直方向的速率突然上升至約 1000 mm/s。此現象普遍出現在各個有噴氣活動海底泥火山，顯示本區海底泥火山噴氣活動之活躍。此外，在航次 OR3-1621 中也有一筆泥火山 MV1 噴發中心之噴氣直達海表面的記錄，比對採樣當時海水剖面的溫鹽資料(圖 4-3)，可以發現噴氣中心(MV1-C)的斜溫層較周圍背景站位(MV1-N、MV1-S)的斜溫層為淺，顯示泥火山噴發促使次表層海水混合較為均勻所產生的現象。

觀察本研究三個航次的 ADCP 記錄，發現泥火山噴氣造成海底的上升海流往往伴隨著高速側向海流的出現，並且也會在上升海流的上方或下方同時會出現下沉海流，無泥火山噴發的背景站位通常不會有此現象發生 (圖 4-4)。以 Socolofsky et al. (2005) 所提出的複合式噴氣模型可以解釋此現象，此模型是根據前人的模型做修正，模擬海水的分層現象以及海流的存在，適用於深水系統的噴氣型態描述。圖 4-5 是該模型使用三個不同初始噴發速率所得到的三種深水系統會出現的噴氣型態，黑色點部分氣泡，對應到本研究就是甲烷氣泡、黑色線包圍的白色區域是噴氣所帶動之流體，對應到本研究就是溶解甲烷。本研究量測的對象是溶解甲烷，溶解甲烷在海水中上升一段時間後會被「屏蔽」住，(此高度稱為 Trap Height)，進而開始剝離 (Peel Height)，根據初始噴發速率的不同 (初始噴發速率的設定是 $Type 1^* < Type 2 < Type 3$)，屏蔽與剝離的型態與高度也會不同，剝離的同時也會產生下沉海流，一連串的現象包括屏蔽、剝離及下沉海流的出現造成了區域性的側向海流的存在。若以 Socolofsky et al. (2005) 的噴氣型態做分類，本研究區域以量測溶解甲烷濃度所觀察到的噴氣型態大多為 Type 1* 及 Type 2，唯 MV10-C (1621) 屬於 Type 3，由於此模型強調噴發的初始條件的重要，可以顯示泥火山 MV10 在採樣當時噴發之劇烈。

本研究之海底泥火山噴發之之溶解甲烷在海水中隨深度的變化可以用氣泡

大小分佈、噴氣造成的上升海流、及其伴隨之區域性側向海流以及泥火山初始噴發速率來做解釋。氣泡是重要的媒介可以保存甲烷氣體到淺層海水甚至是海水表面，而噴氣造成的上升海流更可以使得甲烷氣泡或是溶解甲烷更快到達淺層海水，使得甲烷逃過海水的稀釋以及氧化作用，進而傳輸到大氣之中。

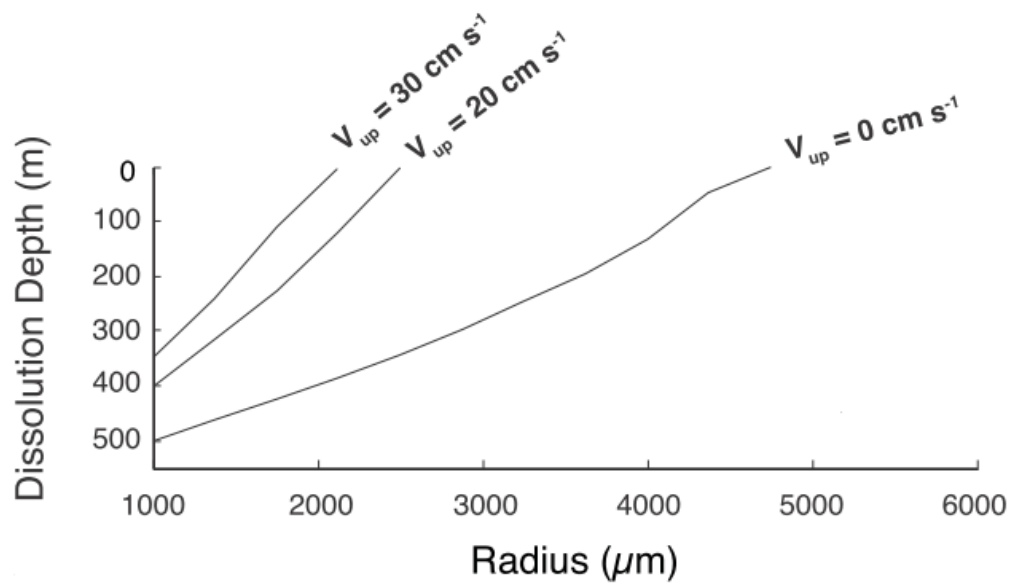


圖 4- 1：氣泡大小與破裂深度關係之數值模擬結果
(Solomon et al., 2009; MacDonald et al., 2002; Leifer & Patro, 2002)

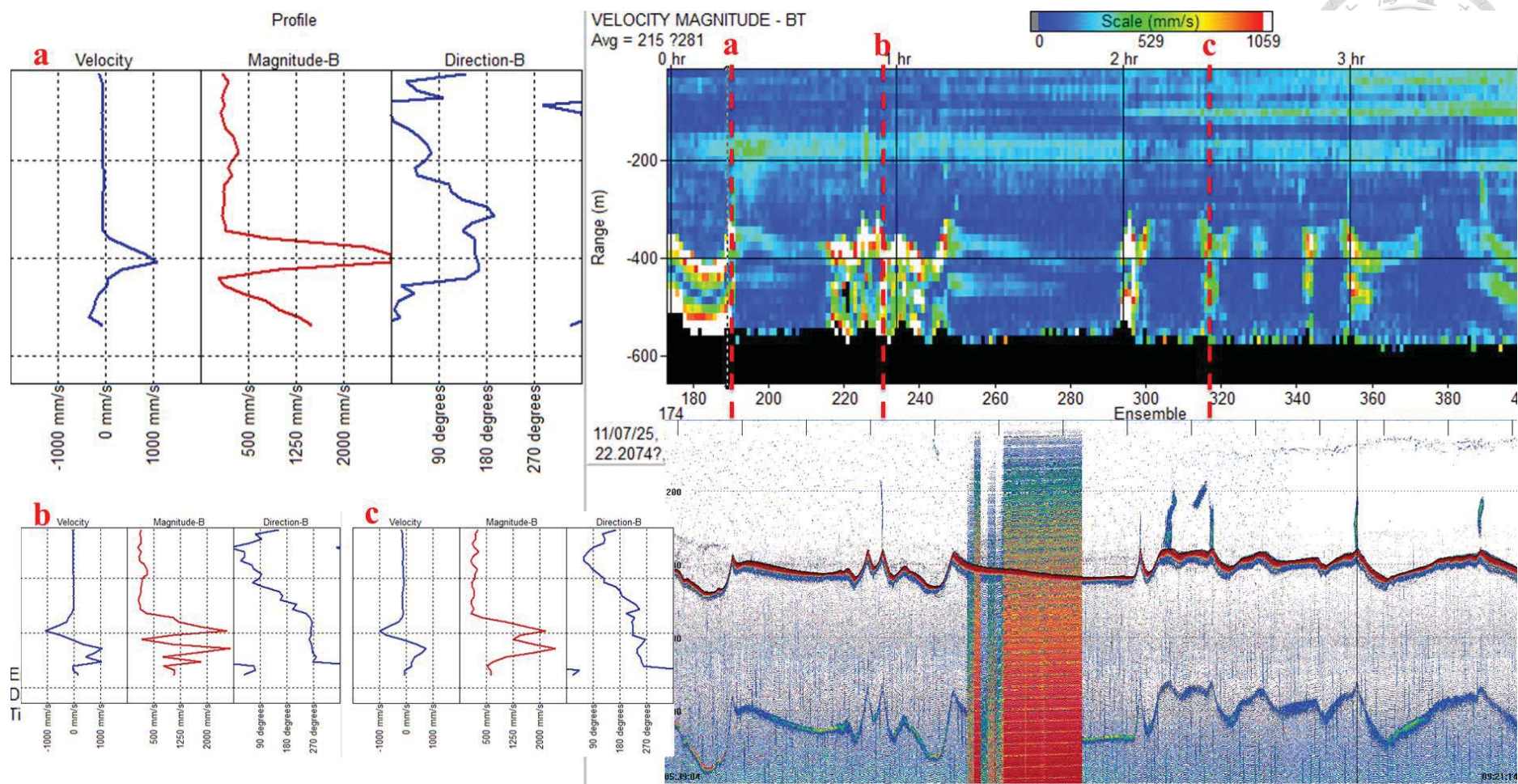


圖 4-2：MV1 於航次 OR3-1553 為 EK60 科學測深儀 (Scientific Sounder System) 記錄到之海床回波聲納影像及都普勒海流儀 (Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP) 所記錄到之海流狀況

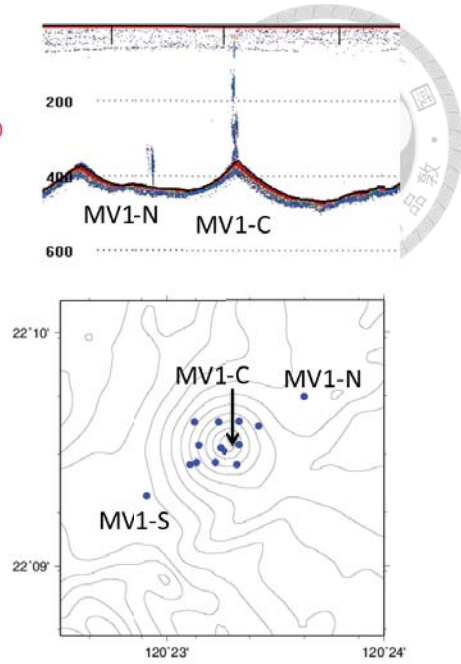
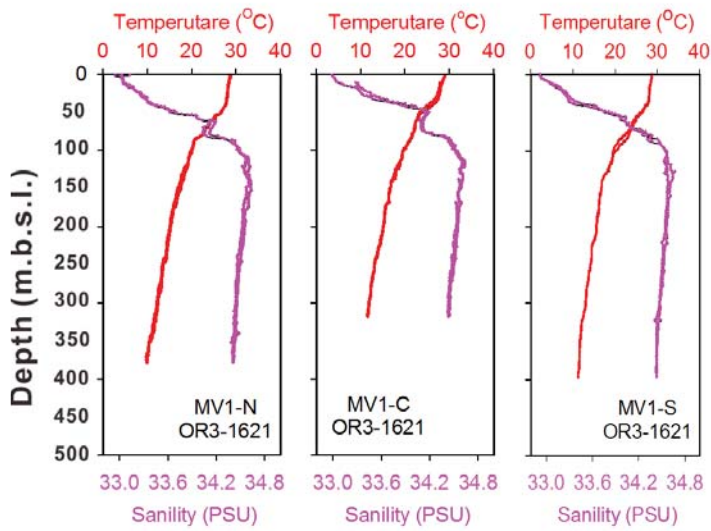


圖 4-3：MV1 於航次 OR3-1621 所記錄到之溫鹽隨深度變化圖、EK60 科學測深圖及採樣位置對應圖

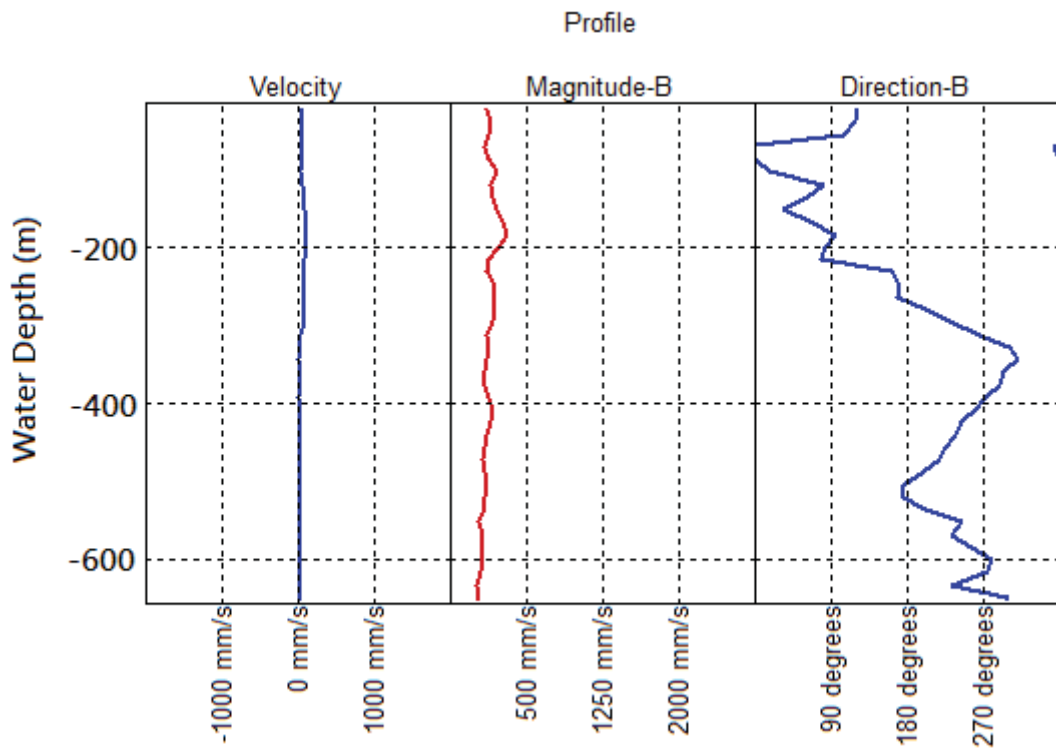


圖 4-4：督卜勒海流儀所記錄到背景站位海流情況(經緯度:22.1626, 120.3001)

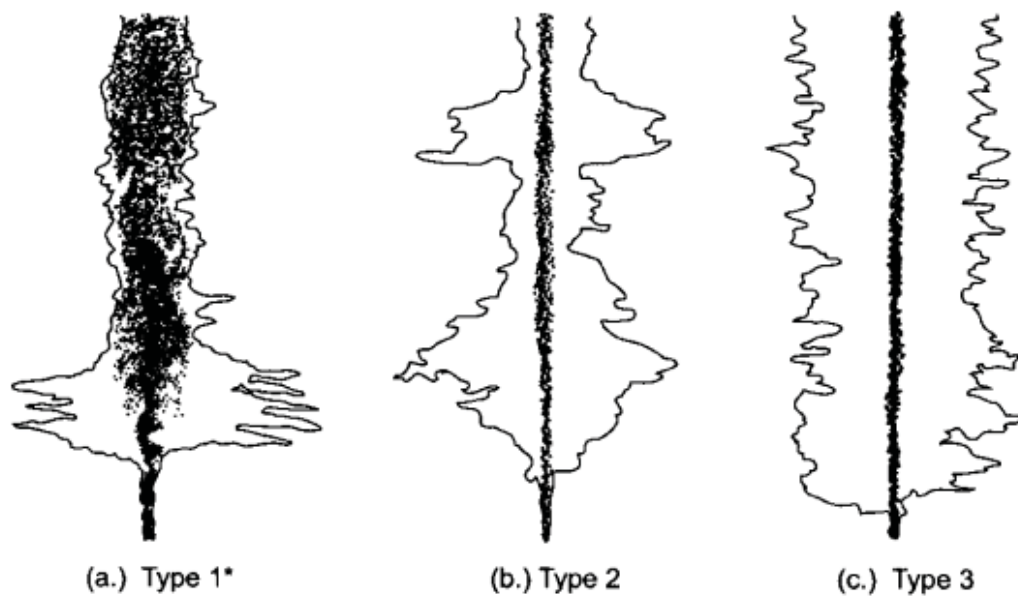
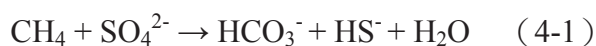


圖 4-5：複合式噴氣模型模擬結果 (Socolofsky et al., 2005)

4-2 甲烷通量

4-2-1 沉積物中的甲烷通量

甲烷厭氧氧化反應，在穩定狀態下，甲烷厭氧氧化反應所需消耗甲烷與硫酸鹽之莫爾數比為 1 : 1 :



因此可藉由計算硫酸鹽通量來取代甲烷通量 (Borowski, 1996)。Niewöhner et al. (1998) 指出除了計算硫酸鹽通量也同時也能計算甲烷通量，沉積物間隙氣體或孔隙水硫酸鹽濃度剖面呈現線性的濃度梯度變化時，可根據 Fick's first law 計算該剖面的擴散通量 (Berner, 1980) :

$$J = -\phi \cdot D_s \cdot dc/dx \quad (4-2)$$

J 為擴散通量 ($\text{mmol m}^{-2} \text{y}^{-1}$)， ϕ 為孔隙度， dc/dx 為甲烷或硫酸鹽濃度梯度 (mM m^{-1})， D_s 為沉積物的擴散常數 ($\text{m}^2 \text{y}^{-1}$) :

$$D_s = D_0 / [1 + n(1 - \phi)] \quad (4-3)$$

D_0 (4°C) 為海水中甲烷或硫酸鹽的示蹤擴散係數 (Tracer diffusion coefficients) (Iversen and Jørgensen, 1993), 硫酸鹽之 D_0 值為 $0.56 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 甲烷之 D_0 值為 $0.87 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、而泥或沙質沉積物 $n = 3$ 。

根據溶解甲烷氣體分析及碳酸根離子濃度分析結果(圖 3-4 ~ 圖 3-5), 可以將噴氣形式分為三種, 背景通量站位 (Background site), 甲烷通量非常低或沒有甲烷通量; 含碳氫化合物區域站位 (Hydrocarbon bearing region), 甲烷以擴散的方式持續供應到淺層沉積物; 以及噴氣站位 (Venting site), 可用 EK60 聲納觀察到噴氣現象, 甲烷直接貢獻到對底層海水。本研究所採集的 30 個重力岩心長度都未達到硫酸鹽甲烷交界帶 (Sulfate-Methane interface, SMI), 因此僅能假設硫酸根離子剖面開始出現變化之斜率延伸到 SMI 之深度沒有變化, 可以計算出含碳氫化合物區域站位 (Hydrocarbon bearing region) 的擴散通量結果 (表 4-1)。

表 4-1: 計算沉積物間隙水硫酸鹽通量及沉積物擴散常數 D_s 結果

Site	D_s of sulfate ($\text{m}^2 \text{ yr}^{-1}$)	ϕ	Sulfate flux (Proxy methane flux) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
MV8-C (1553)	7.93E-03	0.59	405
MV5-C (1621)	6.95E-03	0.49	98.6
MV10-C (1621)	7.17E-03	0.51	127
MV12-C (1621)	6.79E-03	0.47	232
MV9-C (1643)	7.04E-03	0.50	222
OR5-1209-2-MV1	6.96E-03	0.49	45.8
OR5-1209-2-MV2	7.09E-03	0.50	95.1
			Avg. = 175

4-2-2 沉積物對海洋底水之甲烷通量

沉積物對海洋底水之甲烷通量使用岩心頂部水及沉積物最淺深度樣品之甲烷濃度以 Fick's First Law (式 4-2、式 4-3) 進行計算，假設岩心頂部水為沉積物深度 0 公分，即是沉積物及海水之交界處，將此段之甲烷擴散通量視為沉積物對海洋底水之甲烷通量，計算結果如表 4-2 所示，本區域之沉積物對海洋底水甲烷通量為 1.14 ~ 157 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。

表 4-2：計算沉積物對海洋底水之甲烷通量及擴散常數 D_s 結果

Site	C_{BW} (nM)	C_{sediment} (nM)	ϕ	D_s of Methane ($\text{m}^2 \text{yr}^{-1}$)	Methane flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
MV1-C (1621)	8.35	869	0.57	1.20E-02	85.6
MV1-S (1621)	8.08	532	0.54	1.16E-02	48.1
MV1-SC (1621)	5.23	247	0.50	1.10E-02	19.4
MV1-N (1621)	15.1	25.9	0.59	1.22E-02	1.14
MV1-NC (1621)	9.66	238	0.44	1.02E-02	15.1
MV10-C (1621)	8.98	305	0.59	1.24E-02	31.7
MV12-NCC (1621)	23.1	1841	0.52	1.13E-02	157
MV12 SSE (1621)	8.91	119	0.47	1.06E-02	8.02
MV3-C (1643)	22.8	398	0.59	1.23E-02	39.8
MV3-NE (1643)	4.16	137	0.55	1.16E-02	12.3
MV4-NE (1643)	22.6	434	0.55	1.16E-02	38.2
MV4-SW (1643)	3.95	50	0.50	1.09E-02	3.61
MV5-C (1643)	13.4	469	0.51	1.11E-02	37.2
MV7-C (1643)	5.04	40.0	0.69	1.42E-02	4.99
MV8-C (1643)	9.67	936	0.61	1.27E-02	106
MV9-C (1643)	1.75	361	0.51	1.10E-02	29.3
GS shell (1643)	3.16	33.9	0.48	1.07E-02	2.29
GT39B-N (1643)	5.64	133	0.47	1.07E-02	9.37
G96-C (1643)	15.0	79.6	0.60	1.25E-02	7.15

4-2-3 海水對大氣之甲烷通量

海水對大氣的甲烷擴散通量是使用修正後的氣體擴散方程式做計算(式 1-1、1-2) (Wanninkhof, 1992)，甲烷濃度 (C_{plume}) 使用每個海水剖面最近海表深度的濃度，風速是氣象儀所記錄到每分鐘一筆再經過換算之對地風速，使用每小時平均值做計算，而換算和大氣平衡時水體的甲烷濃度 (C_{eq}) 與施密特數 (Sc) 所需要的溫鹽資料則為採樣時溫鹽深儀 (CTD Rosette System) 所記錄。計算的結果如表 4-3 所示，本區域海水對大氣之甲烷通量為 $0.15 \sim 127 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。

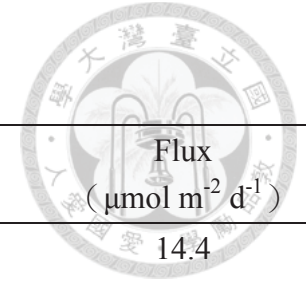


表 4-3：各海水剖面甲烷對大氣通量計算結果

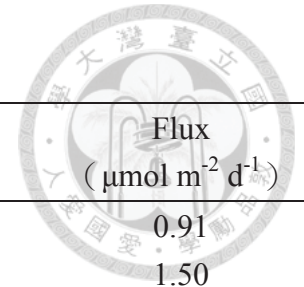
site	u_{avg} ($m s^{-1}$)	T ($^{\circ}C$)	Sc	k_{avg} ($cm hr^{-1}$)	S (‰)	C_{plume} (μM)	C_{eq} (μM)	Flux ($\mu mol m^{-2} d^{-1}$)
MV1-SE (1553)	8.8	28.41	455.05	37.33	33.74	2.08E-03	5.84E-06	14.4
MV1-NW (1553)	9.5	28.36	456.35	13.42	33.74	1.74E-03	5.86E-06	14.0
MV1-E (1553)	7.8	27.71	471.82	9.17	33.92	3.22E-03	5.82E-06	17.2
MV1-NE (1553)	10.6	28.23	459.45	9.29	33.77	1.94E-03	5.90E-06	19.4
MV1-W (1553)	11.7	28.39	455.52	13.43	33.78	2.38E-03	5.71E-06	29.1
MV1-SW (1553)	11.7	28.40	455.35	13.44	33.76	1.76E-03	5.78E-06	21.5
MV1-S (1553)	7.8	28.39	455.57	13.43	33.73	1.77E-03	5.88E-06	9.63
MV1-N (1553)	10.6	28.33	456.86	9.31	33.74	1.82E-03	5.89E-06	18.3
MV3-E (1553)	1.9	26.49	501.03	8.89	34.02	2.70E-03	6.57E-06	0.83
MV3-NW (1553)	3.4	26.25	506.85	3.18	34.06	6.69E-04	6.67E-06	0.65
MV3-W (1553)	8.2	25.40	527.64	3.12	34.18	1.30E-03	7.06E-06	7.25
MV3-SW (1553)	10.5	26.38	503.77	3.19	34.04	1.11E-03	6.60E-06	10.4
MV3-C (1553)	10.5	26.21	507.73	3.18	34.06	2.12E-03	6.71E-06	19.8
MV3-S (1553)	1.9	27.45	477.93	5.83	34.03	2.18E-03	5.70E-06	0.69
MV3-N (1553)	2.2	26.43	502.38	8.88	34.03	1.30E-03	6.59E-06	0.54
MV4-1 (1553)	4.0	26.66	497.05	17.50	34.05	2.18E-03	6.33E-06	2.98
MV4-3 (1553)	4.9	26.49	501.11	17.43	34.08	2.54E-03	6.37E-06	5.19
MV6-C (1553)	9.5	27.59	474.69	9.14	34.12	1.22E-03	5.29E-06	9.61
MV7-N (1553)	2.3	26.65	497.18	60.36	33.99	1.38E-03	6.55E-06	0.63

表 4-2 (續)：各海水剖面甲烷對大氣通量計算

site	u_{avg} ($m\ s^{-1}$)	T ($^{\circ}C$)	Sc	k_{avg} ($cm\ hr^{-1}$)	S (‰)	C_{plume} (μM)	C_{eq} (μM)	Flux ($\mu mol\ m^{-2}\ d^{-1}$)
MV7-C (1553)	1.9	26.60	498.32	5.71	33.99	1.93E-03	6.59E-06	0.60
MV8-C (1553)	2.6	25.99	513.10	59.42	34.14	1.74E-03	6.62E-06	0.99
MV1-C (1621)	5	24.23	557.27	0.34	34.17	1.25E-03	8.41E-06	0.10
MV1-N (1621)	2.8	26.92	490.77	0.36	33.69	2.13E-03	7.43E-06	2.51
MV1-NC (1621)	3.9	26.97	489.49	5.76	33.68	1.78E-03	7.42E-06	1.43
MV1-S (1621)	5	26.57	499.16	1.43	33.82	2.01E-03	7.28E-06	2.33
MV1-SC (1621)	5.8	26.57	499.02	0.36	33.78	1.75E-03	7.46E-06	4.28
MV5-C (1621)	4.7	25.86	516.41	1.40	33.89	8.43E-04	7.73E-06	1.55
MV5-NC (1621)	6.6	27.68	472.46	17.95	33.54	3.93E-04	7.26E-06	1.48
MV5-SC (1621)	6.6	27.98	465.36	9.23	33.50	1.43E-03	7.10E-06	5.50
MV10-C (1621)	12.4	26.60	498.46	35.67	33.80	9.62E-03	7.32E-06	127
MV10-NW (1621)	12.4	26.51	500.54	35.60	33.85	2.62E-03	7.20E-06	34.3
MV10-SE (1621)	14.1	26.57	499.14	28.87	33.80	2.31E-03	7.37E-06	39.1
MV11-C (1621)	3.0	22.75	596.65	5.22	34.27	1.95E-03	9.90E-06	1.37
MV12-C (1621)	2.9	26.12	510.07	8.82	34.01	3.16E-03	7.00E-06	2.25
MV12-S (1621)	1.1	26.80	493.48	1.43	33.74	1.49E-03	7.38E-06	0.15
MV12-E (1621)	4.3	27.42	478.75	5.82	33.62	1.94E-03	7.21E-06	3.12
MV12-SE (1621)	1.8	26.60	498.35	3.21	33.78	2.07E-03	7.42E-06	0.57
MV12-SW (1621)	1.6	26.63	497.55	0.36	33.76	1.67E-03	7.45E-06	0.36

表 4-2 (續)：各海水剖面甲烷對大氣通量計算

site	u_{avg} ($m\ s^{-1}$)	T ($^{\circ}C$)	Sc	k_{avg} ($cm\ hr^{-1}$)	S (‰)	C_{plume} (μM)	C_{eq} (μM)	Flux ($\mu mol\ m^{-2}\ d^{-1}$)
MV12-W (1621)	2.5	23.29	581.88	0.33	34.25	1.85E-03	9.25E-06	0.91
MV12-NW (1621)	3.7	23.41	578.80	1.32	34.25	1.39E-03	9.07E-06	1.50
MV12-NE (1621)	8.5	25.65	521.63	3.14	34.05	9.41E-04	7.32E-06	5.65
MV12-N (1621)	4.3	26.76	494.62	3.22	33.78	2.00E-04	7.26E-06	0.31
MV13-C (1621)	3.0	23.37	579.83	5.29	34.39	1.56E-03	8.47E-06	1.11
MV3-C (1643)	2.5	27.80	469.56	3.31	33.47	1.73E-03	7.43E-06	0.95
MV4-C (1643)	7.6	27.43	478.47	17.84	33.57	9.94E-04	7.38E-06	4.98
MV5-C (1643)	3.8	28.67	448.76	18.42	32.98	3.17E-04	8.64E-06	0.40
MV8-C (1643)	7.0	28.42	454.81	5.98	33.13	8.92E-04	8.22E-06	3.88
GS shell (1643)	2.2	28.61	450.35	18.39	32.93	1.04E-03	8.96E-06	0.45
G96-C (1643)	1.1	28.30	457.68	3.35	33.28	5.10E-03	7.69E-06	0.55
G96-E (1643)	1.3	28.65	449.31	3.38	33.07	1.24E-03	8.23E-06	0.19
G96-N (1643)	2.8	27.81	469.31	1.47	33.33	6.82E-04	8.04E-06	0.47
G96-S (1643)	2.5	27.84	468.75	1.47	33.36	1.07E-03	7.86E-06	0.59
G96-W (1643)	2.5	28.12	462.05	1.48	33.24	1.52E-03	8.08E-06	0.84
GT39B-N (1643)	2.2	27.34	480.49	29.43	33.73	1.81E-03	6.85E-06	0.76
GT39B-S (1643)	2.4	27.90	467.14	29.85	33.43	1.60E-03	7.48E-06	0.81



4-2-4 研究區域的甲烷總輸出量

估算甲烷的總輸出量必須考慮通量影響的面積，由於噴氣的影響範圍很難定義，且各個地區的泥火山噴發狀況不一，過去少有文獻提供詳盡的方法，在得到單一點的甲烷通量後，再考慮面積因素進行大範圍的甲烷輸出量估算。本研究提供一個簡單的概念，定義出「提供主要通量的面積」(A_d)、「主要通量」(Z)、「背景通量」(X)三個項目，可由式 4-6 表示：

$$\text{Total Output} = Z \cdot A_d + X \cdot (A_t - A_d) \quad (4-6)$$

A_t 為研究區域中被海底泥火山噴氣影響的總面積， A_t 減掉提供主要通量的面積 A_d ，就是「提供背景通量的面積」。Sinclair (1974) 提出一組地化資料中可能是由許多不同的族群組合而成，由於地化分析資料大部分皆符合自然對數分佈，若是由許多族群組合則此一資料中就有很多不同的自然對數分佈，因此我們可以利用累積統計作圖，辨識出轉折點，一個轉折點代表此組資料是由兩種不同的族群組成，此統計方法已經被應用在火山氣體通量估算上 (Lan et al., 2007; 溫心怡, 2010)。將計算出來單一點的甲烷擴散通量結果 (表 4-2) 使用此累積分佈統計法，投圖的結果為圖 4-6，經過判識將通量值分為三個類群， X 為背景通量，平均值為 $0.17 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、 Z 為主要通量，平均值為 $40.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、 Y 則為背景通量及主要通量的混合通量。

接著要定義提供主要通量的面積 A_d ，圖 4-7 是航次 OR3-1643 中 GS shell 採樣點的水深解析圖及出現噴氣現象的點位圖，將噴氣最劇烈的點視為單一泥火山的噴發中心 (紅色箭頭)，噴發中心與該單一泥火山最外圍的噴發點做連線畫圓，此面積用來代表該泥火山提供主要通量面積 A_d (domain area)。由於每個泥火山的噴發情形不同，不同泥火山的 A_d 也是個別定義，表 4-4 為本研究航次中能夠定義出的主要通量面積。

最後是估算上部斜坡中被泥火山噴氣影響的總面積 A_t ，由於本研究對象的 13 座泥火山以及其他逸氣構造水深分佈於 300~800 公尺，因此 800 公尺

水深以上的海域都被視為被影響的區域，經過估算總面積約為 2500 平方公里。使用式 4-6，初步估算出本研究區域的甲烷總輸出量為每年 4.1 噸。由於本研究僅蒐集三個航次的逸氣構造噴發情形，只定義出八個逸氣構造的提供主要通量面積 A_d ，因此換算出來的甲烷總輸出量僅能代表本研究區域甲烷排放量的下限，加上本研究是針對溶解態的甲烷進行估算，有更多部分的甲烷是以氣泡為媒介直接傳送到大氣中，這個部分在本研究仍是被忽略。

採樣點位密度太低、因冬季海況較差而較無法獲得冬季的樣品及海況資料、以及現在的海洋探測技術還未能確實掌握泥火山的噴氣情況等等都是海化研究可能遭遇的難題，但本研究在台灣是正要開始被關注的範疇，相信相關的研究在未來會有長足的進步。

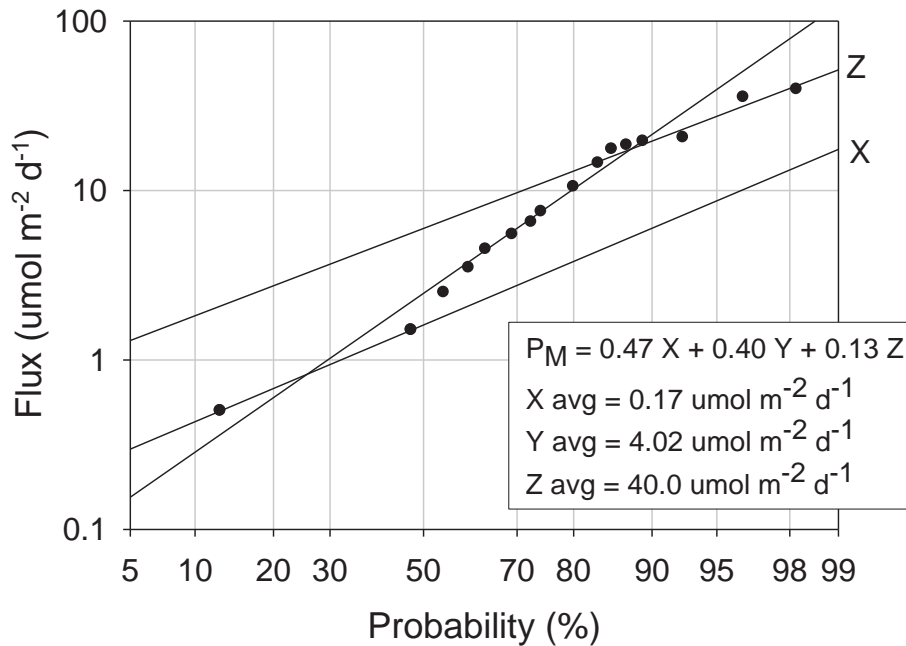


圖 4-6：本研究區域海水對大氣之甲烷擴散通量之機率分佈圖

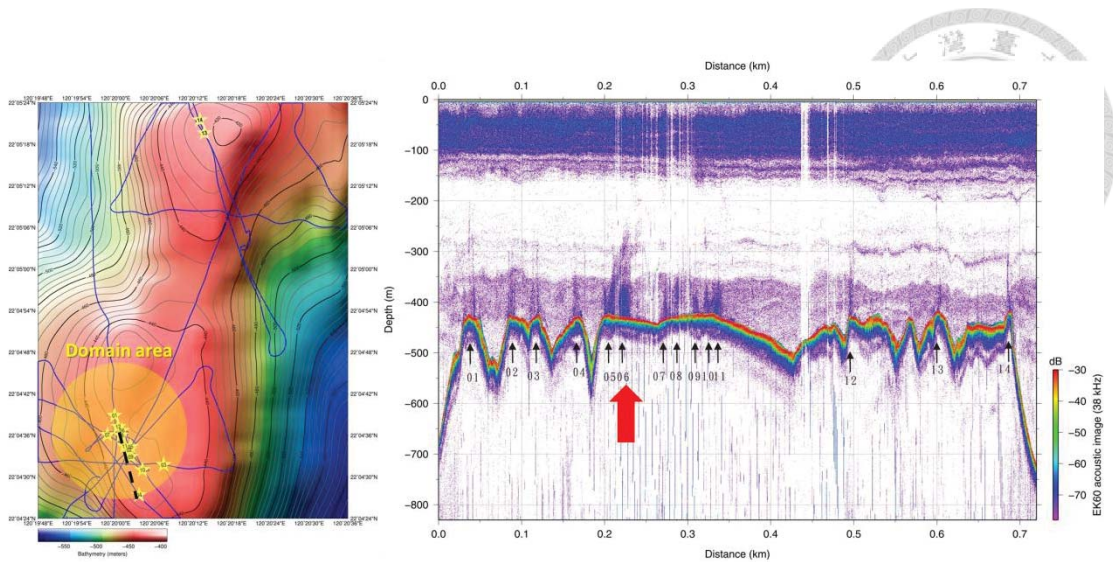


圖 4-7：航次 OR3-1643 GS shell 噴氣情形及點位圖

表 4-4：本研究區域中經由噴氣情形定義出各逸氣構造「提供主要通量的面積」

Site	Domain area (A_d) (km^2)	Site	Domain area (A_d) (km^2)
G96	0.35	MV5	0.11
MV1	1.74	MV12	2.69
MV3	0.13	MV13	0.90
MV4	0.72	GS shell	0.45

4-3 氣體來源

4-3-1 沉積物孔隙中的甲烷碳同位素

MV4-C、MV11-C 的沉積物孔隙間甲烷碳同位素和 $C1/C2+$ 比値之關係如圖 4-8 所示。碳氫化合物向上移棲的過程中，因為分子量不同造成分異效應，分子量較輕的甲烷的移棲速率較快，沉積物越淺處其量測到之甲烷濃度越高， $C1/C2+$ 比値也越高。因為量測碳同位素之沉積物深度都未達 SMI， $C1/C2+$ 之實際值應較量測到的為低。

有機物質深埋後被地溫梯度加熱產生油氣，同時生成各種碳數的碳氫化合物，藉由此方法生成的甲烷被稱為熱分解 (thermogenic) 來源甲烷，因此熱分解來源也代表深部來源。鏡煤素反射率 (vitrinite reflectance) 是常被用

來判定有機物成熟度的指標 (Ting, 1978)，以反射率值 0.5% 為分界，小於 0.5% 為未成熟 (immature) 階段，地層受熱程度尚不足以使有機物質生成大量油氣；反射率值大於 0.5% 開始進入成熟 (mature) 階段，有機物質受熱生成熱分解油氣 (Tissot and Welte, 1984；林殿順，2010)

林殿順 (2010) 指出在西南海域之鏡煤素反射率 0.5% 等成熟度線多在海床下 2,800 ~ 2,900 公尺，顯示埋深至少要超過 2,800 公尺才開始進入熱分解油氣的生成階段，但我們卻在非常淺層 (< 1 m) 的沉積物中同時量測到甲烷及乙烷 (甚至 MV11-C 有丙烷) (表 3-6)，以及量測到甲烷碳同位素落在熱分解來源的範圍，表示有其他媒介將深部來源物質帶上淺層。

西南海域上部斜坡的海底泥火山成因和泥貫入體的發育有關 (曾威豪，2006；陳松春，2010)，圖 4-9 顯示泥火山 MV4 和 MV11 位於泥貫入體 MD3 及 MD5 之上，根據陳松春 (2013) 計算，本區域泥貫入體深度至少有 4,000 公尺深，遠超過熱分解氣體生成深度 2,800 公尺，因此熱分解氣體可以在泥貫入體內深部地層中孕育生成，再沿泥貫入體快速移棲到海床上。

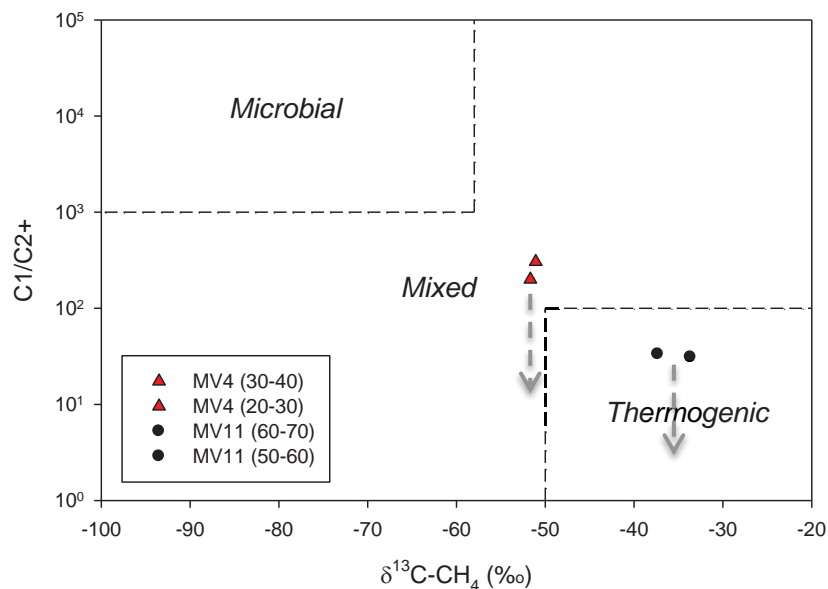


圖 4-8：孔隙間氣體 C1/C2+ 及甲烷碳同位素關係圖 (括號內數字為沉積物深度，單位為公分)

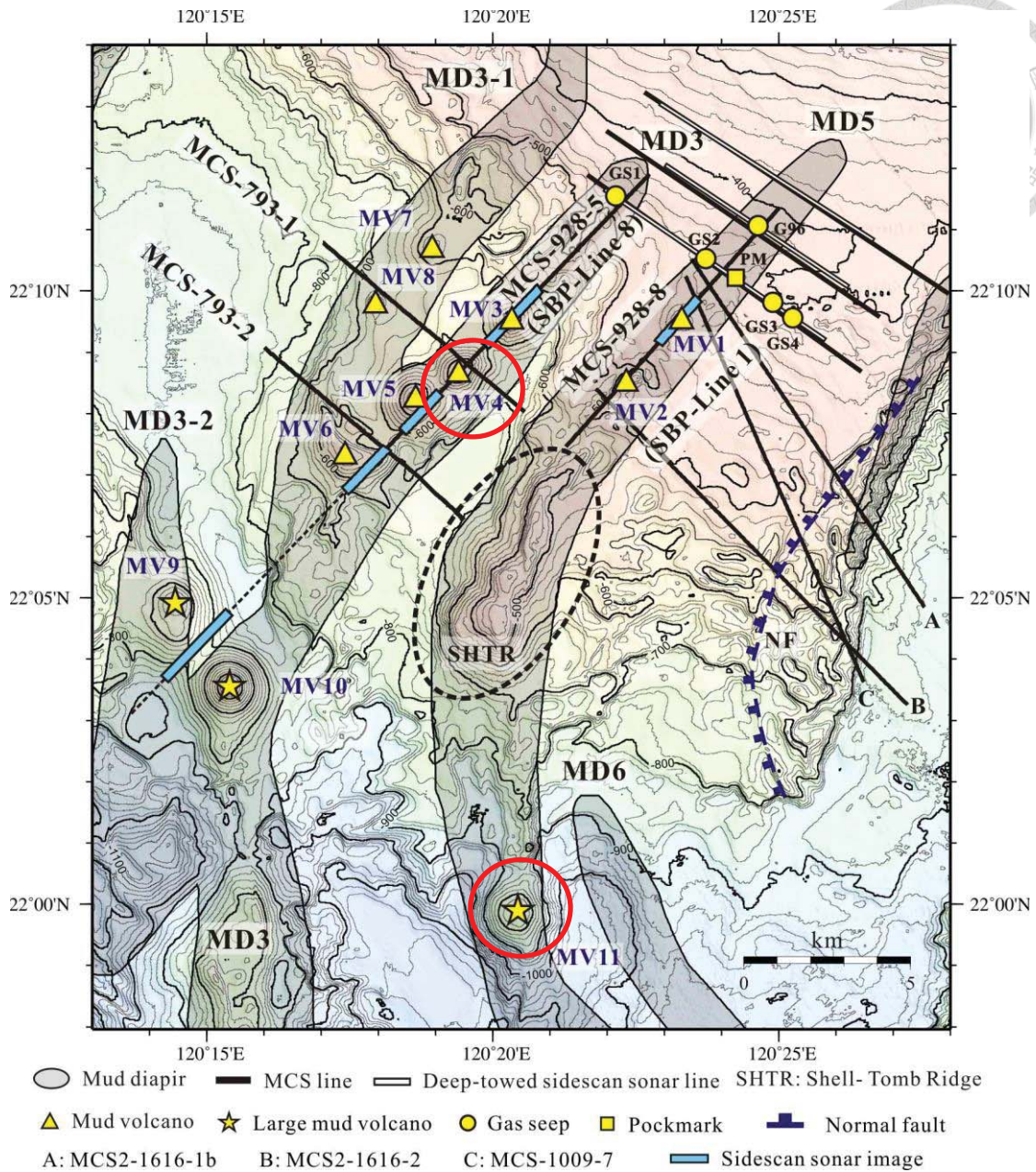


圖 4-9：西南海域上部斜坡泥火山與泥貫入體分布圖（陳松春，2013）

4-3-2 海水剖面的溶解氦氣及其同位素

將海水中氦同位素投到 A-C-M 三端成分圖（圖 3-2），可以發現本研究區域之海底泥火山噴發之氣體為大氣與地殼來源混染。進一步將海水溶解氦氣濃度與甲烷濃度作圖（圖 4-10），發現存在兩個趨勢線。根據 Yang et al. (2006)，海水中溶解甲烷及溶解氦氣若同時出現高濃度訊號則代表該氣體來自深部來源，若出現如圖 4-10 中甲烷及氦氣濃度不同步的現象，則不排

除是採樣過程的失誤所造成的漏氣。本研究區域之泥火山皆座落於泥貫入體之上，泥貫入體能將深部來源的物質帶上淺層，因此由泥火山噴氣帶進海水中的氣體理應出現深部來源之訊號。

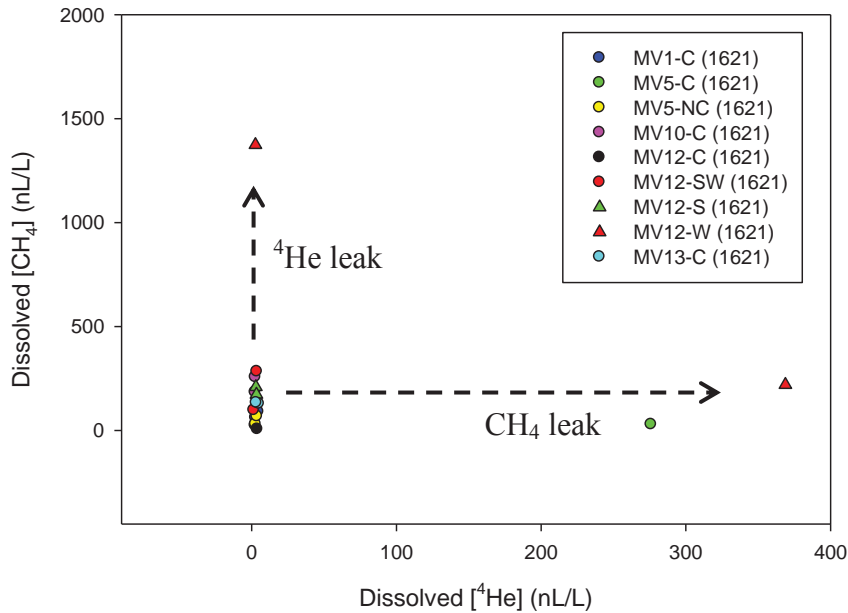
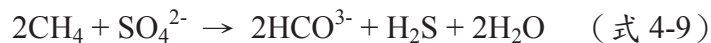


圖 4-10：海水中溶解氦氣與溶解甲烷關係圖

4-4 孔隙水溶解無機碳同位素與泥火山噴發型態相關性之推論

海洋沉積物在還原狀態下，孔隙水中的硫酸鹽會被微生物消耗，此硫酸還原反應主要有兩種，分別是有機物消耗硫酸鹽反應 (organoclastic sulfate reduction, 式 4-8) 和甲烷與硫酸鹽反應 (methanotrophic sulfate reduction, 式 4-9)：



此二反應皆會產生溶解無機碳 (沉積物中的溶解無機碳 (dissolved inorganic carbon, DIC) 為主，故視碳酸氫根為溶解無機碳)，因此可以藉由分析溶解無機碳的碳同位素來判識反應碳的來源。若在 SMI 出現溶解無機碳同位素比之最低值，則代表該區域為 AOM 反應，但本研究採集之岩心深度都未達 SMI 深度，唯圖 3-6 可觀察到溶解無機碳同位素比值有隨深度變深而下降的趨勢，因

此在假設本區域之沉積物中以進行 AOM 反應為主進行討論。

由於本區泥火山噴發活躍，並不會像一般海洋沉積環境中的溶解無機碳同位素比值隨深度變淺穩定變大，以位於噴發中心的 MV10-C、MV12-C 為例（圖 4-11），MV10-C 的同位素變化在深度約 20 公分處可明顯分層，而溶解無機碳濃度也在此深度出現轉折，對應硫酸根離子濃度，在 20 公分以下也顯得較為凌亂；MV12-C 的溶解無機碳透過和硫酸根離子比對可分為三層。

泥火山噴發時會將以泥為主的深海沉積物帶出海床，這些泥在噴發中心周圍沉降，使得泥火山多呈現圓錐狀的外型。若泥火山停止噴發，底流的侵蝕速率大於噴發帶來沉積物的沉積速率，泥火山的外型就會漸漸消失，反之，若泥火山噴發活躍且連續使得沉積作用不中斷，泥火山圓錐狀的外型就會維持高放射對稱且坡度也會較陡。從地形上看，MV10 是泥火山中坡度最大的（ $\sim 13.6^\circ$ ），也是高度最高的（ ~ 345 公尺），從側掃聲納影像，也看到泥流痕跡（圖 4-12，資料由陳松春提供），顯示 MV10 噴發之活躍。

MV10-C 之溶解無機碳同位素剖面在約 20 公分處出現大幅度的跳動，可能是因為噴發活躍造成快速堆積所致，20 公分處為上次噴發後的穩定海床面，上覆的 20 公分沉積物是這次噴發後所堆積的，微生物作用在這兩層沉積物之間還未達成穩定狀態，故出現溶解無機碳同位素比值的跳動。MV12-C 除了可透過和硫酸根離子比對分成三層外，溶解無機碳同位素也疑似以約 40 公分為界出現趨勢相似的兩個週期，而 40 公分以下之比值整體較 40 公分以上為低，如用相同的概念解釋，MV12-C 之 40 公分以上為本次噴發後所堆積的新層沉積物。從航次 OR3-1621 EK60 的結果（圖 4-13）以及 ROV 影像（圖 1-1C）顯示，MV12 噴發位置不只一處且噴發型態包含了裂隙噴發，這或許是造成 MV12 錐體頂部為平坦狀的原因之一。

在此推論成立的前提下，泥火山的噴泥量之大造成大於 20 公分的沉積物一次堆積，反應在溶解無機碳同位素剖面上，顯示泥火山噴發之活躍。然而關於海底泥火山的噴發型態有許多方面還是未知，目前僅能使用間接的方式來進行初

步的討論。

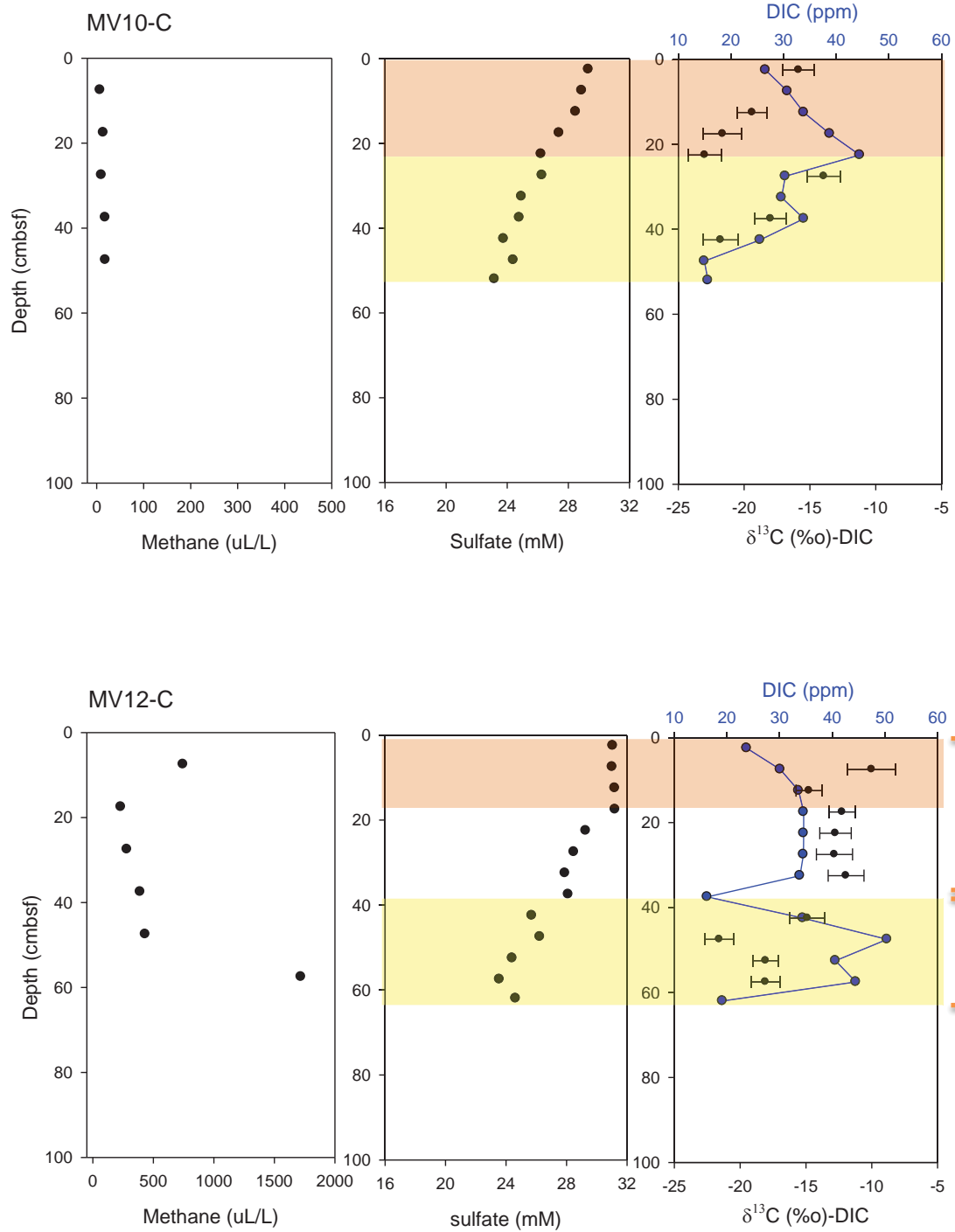
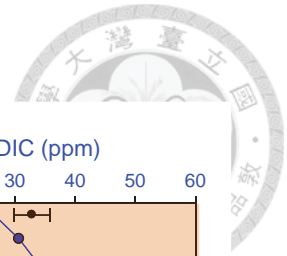


圖 4- 11：MV10-C、MV12-C 孔隙間甲烷、硫酸根離子及溶解無機碳剖面對應圖

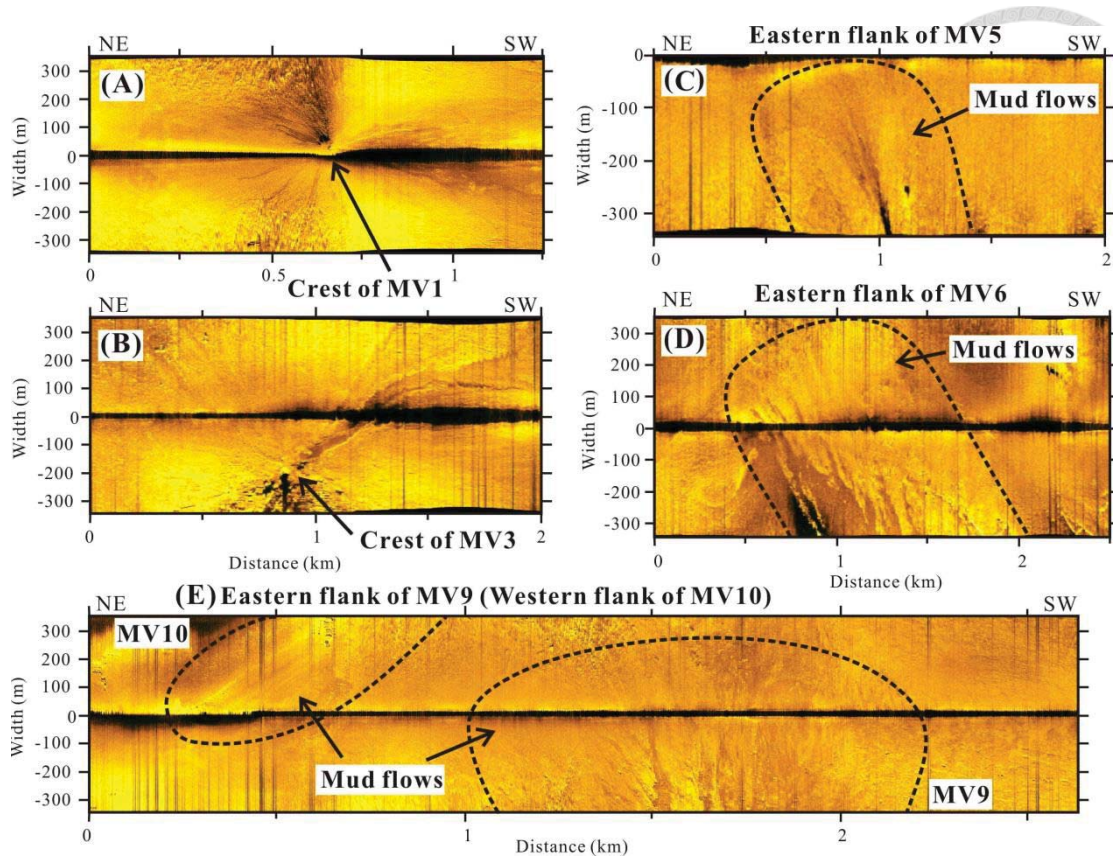


圖 4- 12：MV1、MV3、MV5、MV6、MV9、MV10 側掃聲納影像
 影像中可清楚觀察到新鮮泥流，顯示泥火山噴發活躍（資料由陳松春提供）

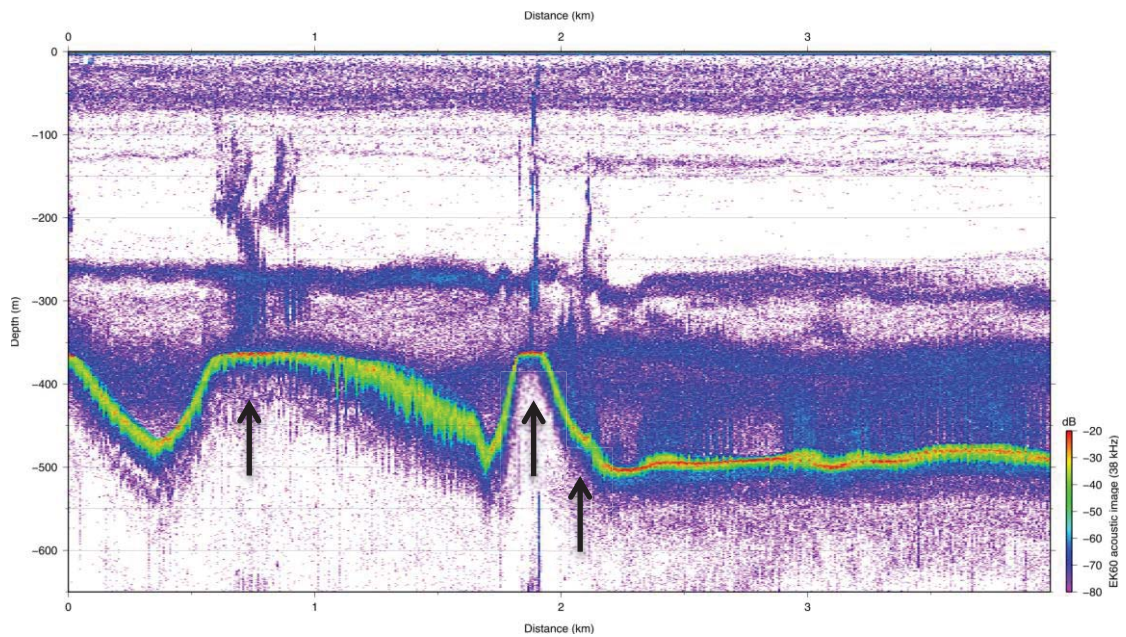


圖 4- 13：海研三號科學測深儀於航次 OR3-1621 記錄到 MV12 噴發情形
 影像中清楚顯示噴發不只一處且非常活躍

4-5 甲烷移棲模型

圖 4-14 為本研究對海底泥火山區甲烷從沉積物、海水到大氣的移棲型態所做的描述。A. 泥灌入體將深部來源之甲烷快速帶到較淺部的沉積物之後 B. 經過計算初估有 $45.8 \sim 403 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 的甲烷貢獻到淺層沉積物中，雖然大部分在此處被消耗掉（洪瑋立，2009），但 C. 海底泥火山仍然提供一個通道讓甲烷可以 D. 貢獻到海水之中，根據計算約有 $1.14 \sim 157 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 的甲烷進入底層海水，因此在底層海水可量測得到高甲烷濃度，隨著氣泡的破裂效應、上升及側向海流的影響等因素，E. 甲烷在海水被稀釋、氧化，但依然 F. 有甲烷能夠繼續向淺層海水移棲，最後 G. 向大氣貢獻 $0.15 \sim 127 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。

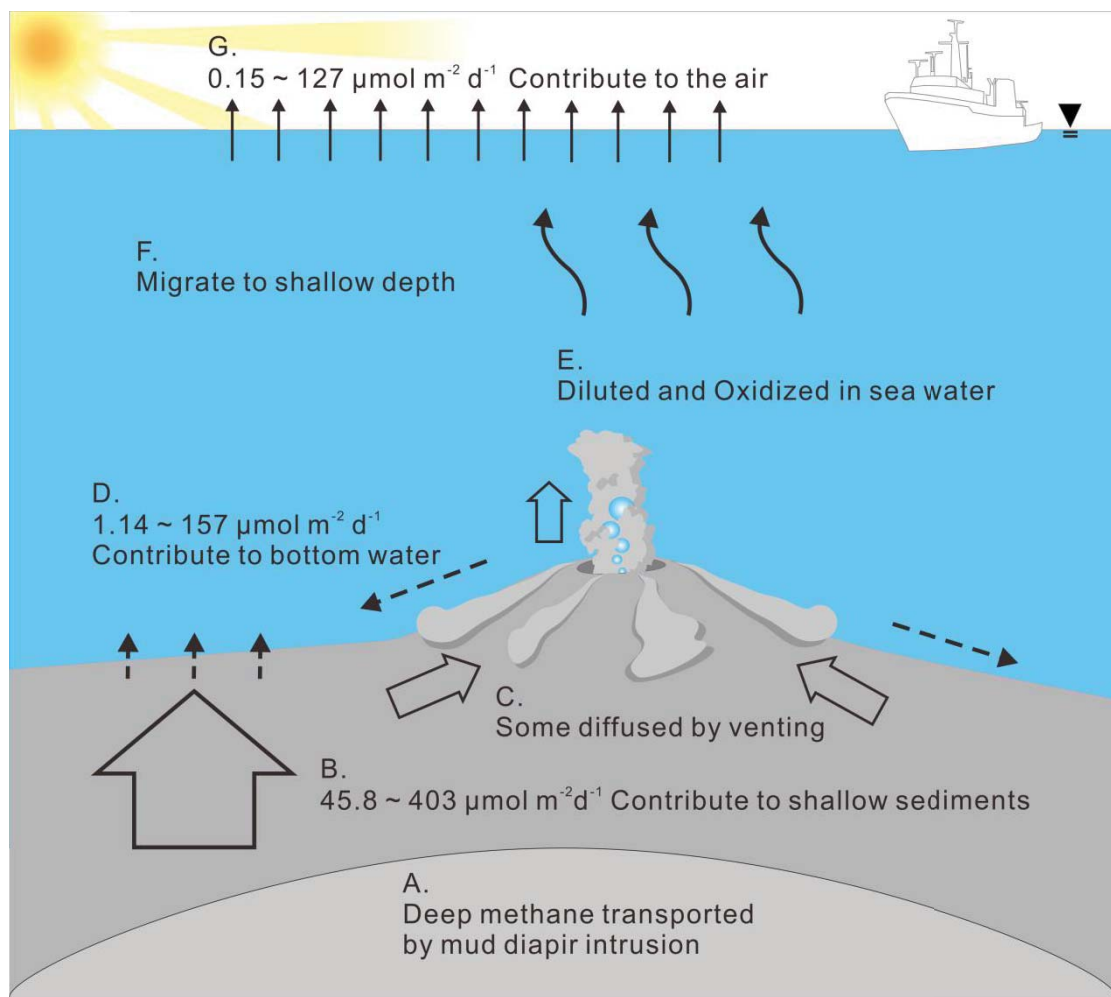


圖 4-14：西南海域上部斜坡泥火山區甲烷移棲模型

第五章 結論



1. 本研究利用 OR3-1553A (2011.7.25~28)、OR3-1621 (2012.6.25~29)、OR3-1643 (2012.9.18~22)、OR5-1209-2 (2012.10.1~10) 等四個航次，在台灣西南海域上部斜坡海底泥火山區總共採集 57 組海水剖面以及 30 個重力岩心，使用罐頂空間方法及氣相層析儀測量溶解氣體、使用離子層析儀測量沉積物孔隙水中的主要陰離子等，藉由地化分析方法發現泥火山逸氣的證據。
2. 海底沉積物岩心 MV4 和 MV11 在非常淺層 (< 1m) 處之甲烷碳同位素分析結果為 -30 ~ -50 ‰，指示該區域之甲烷氣體主要為熱分解來源，而後可能有不同比例生物性甲烷來源之混染，顯示泥貫入體將深部來源物質帶上淺層中。
3. 海水剖面溶解甲烷濃度隨深度的變化可能受到氣泡大小分佈、海底泥火山噴氣造成的上升及側向海流、以及泥火山噴氣的初始速率所影響，許多證據都指向本區域的海底泥火山有潛力將海水中的甲烷傳送到淺層海水甚至是大氣中。
4. 假設硫酸根離子開始出現變化之斜率延伸到硫酸鹽-甲烷交界面 (Sulfate Methane interface, SMI) 不變為前提，利用 Fick's First Law 計算出本區域沉積物中的甲烷擴散通量為 $45.8 \sim 403 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ；直接使用甲烷濃度計算沉積物對海洋底水的甲烷通量為 $1.14 \sim 157 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ；再利用修正後的氣體擴散方程式算出本區域對大氣的甲烷擴散通量為 $0.15 \sim 127 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。
5. 使用累積統計方法將單一點的甲烷擴散通量投到機率分佈圖並加以分群，定義出本區域的主要通量及背景通量，再依各泥火山定義出貢獻主要通量之面積，估算出本研究區域每年粗估最少約有 4.1 噸甲烷貢獻到大氣之中。
6. 根據甲烷在海水中的移棲型態探討及各環境中甲烷擴散通量的估算，建構出台灣西南海域上部斜坡海底泥火山區海水中的甲烷移棲模型。整體而言本研究區域海底泥火山持續貢獻甲烷到海水及大氣中。

第六章 參考文獻



林殿順 (2010) 台灣西南海域新興能源-天然氣水合物資源調查與評估：震測及地熱調查 (3/4)：含天然氣水合物地層的構造與沉積特徵研究，經濟部中央地質調查所報告第 99-25-F 號，102 頁。

洪瑋立 (2009) 台灣西南部地區增積岩楔之甲烷貢獻量評估。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 88 頁。

胡靜宜 (2012) 台灣西南海域天然氣水合物潛藏區甲烷通量與流體來源探討。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 80 頁。

莊佩涓 (2006) 台灣西南海域天然氣水合物賦存區之氣體地球化學研究。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 83 頁。

陳松春 (2011) 台灣西南海域高屏上部斜坡之逸氣構造和天然氣水合物賦存關係之研究，經濟部中央地質調查所報告書 100 年度自行研究計畫報告編號：100008，共 112 頁。

溫心怡 (2010) 大屯火山群地熱區中土壤氣體之二氧化碳通量。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 65 頁。

曾威豪 (2006) 台灣西南海域海底泥火山之分布特徵與噴發機制。國立台灣大學海洋研究所碩士論文，共 62 頁。

劉家瑄 (2002) 臺灣大地構造，黃奇瑜主編，中國地質學會出版，共 210 頁。

Amouroux, D., G. Roberts, S. Rapsomanikis & M. O. Andreae (2002) Biogenic gas (CH_4 , N_2O , DMS) emission to the atmosphere from near-shore and shelf waters of the north-western Black Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 54, 575-587.

Berner, R. A. (1980) *Early Diagenesis. A Theoretical Approach*, Princeton University Press, 241pp.

Broecker, W.S. and T. H. Peng, (1982) *Tracers in the Sea*, Eldigio Press, Palisades, NY, 692 pp.

Borowski, W. S., C. K. Paull & W. Ussler (1996) Marine pore-water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate. *Geology*, 24, 655-658.

Chuang, P. C., T. F. Yang, W. L. Hong, S. Lin, C. H. Sun, A. T. S. Lin, J. C. Chen, Y. Wang & S. H. Chung (2010) Estimation of methane flux offshore SW Taiwan and the influence of tectonics on gas hydrate accumulation. *Geofluids*, 10, 497-510.

Chuang, P. C., T. F. Yang, S. Lin, H. F. Lee, T. F. Lan, W. L. Hong, C. S. Liu, J. C. Chen & Y. Wang (2006) Extremely high methane concentration in bottom water and cored sediments from offshore southwestern Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17, 903-920.

Dimitrov, L. I. (2002) Mud volcanoes - the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews*, 59, 49-76.

Etioppe, G. & A. V. Milkov (2004) A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environmental Geology*, 46, 997-1002.


Fofonoff, P. and R. C. Millard Jr (1983) Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical Papers in Marine Sciences* 44, 53 pp.

Grant, N. J. & M. J. Whiticar (2002) Stable carbon isotopic evidence for methane oxidation in plumes above Hydrate Ridge, Cascadia Oregon Margin. *Global Biogeochemical Cycles*, 16.

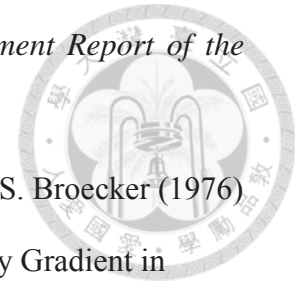
Holmes, M. E., F. J. Sansone, T. M. Rust & B. N. Popp (2000) Methane production, consumption, and air-sea exchange in the open ocean: An evaluation based on

- carbon isotopic ratios. *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 1-10.
- Hornafius, J. S., D. Quigley & B. P. Luyendyk (1999) The world's most spectacular marine hydrocarbon seeps (Coal Oil Point, Santa Barbara Channel, California): Quantification of emissions. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 104, 20703-20711.
- Hovland, M., A. G. Judd & R. A. Burke (1993) The Global Flux of Methane from Shallow Submarine Sediments. *Chemosphere*, 26, 559-578.
- Hsu, S. K., Wang, S. Y., Liao, Y. C., Yang, T.F., Jan, S., Lin, J. Y., Chen, S.C. (2013) Tide-modulated gas emissions and tremors off SW Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370, 98-107.
- Kessler, J. D., D. L. Valentine, M. C. Redmond, M. R. Du, E. W. Chan, S. D. Mendes, E. W. Quiroz, C. J. Villanueva, S. S. Shusta, L. M. Werra, S. A. Yvon-Lewis & T. C. Weber (2011) A Persistent Oxygen Anomaly Reveals the Fate of Spilled Methane in the Deep Gulf of Mexico. *Science*, 331, 312-315.
- Kopf, A. J. (2002) Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, 40.
- Lan, T. F., T. F. Yang, H. F. Lee, Y. G. Chen, C. H. Chen, S. R. Song & S. Tsao (2007) Compositions and flux of soil gas in Liu-Huang-Ku hydrothermal area, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165, 32-45.
- Lee, H. F., T. F. Yang, T. F. Lan, S. R. Song & S. Tsao (2005) Fumarolic gas composition of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16, 843-864.
- Leifer, I. & R. K. Patro (2002) The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study. *Continental Shelf Research*, 22, 2409-2428.
- Libes, Susan M. (2009) *Introduction to marine biogeochemistry (2nd ed.)*, Academic

Press, 88-91.

- 
- Liu, C. S., I. L. Huang & L. S. Teng (1997) Structural features off southwestern Taiwan. *Marine Geology*, 137, 305-319.
- MacDonald, I. R., I. Leifer, R. Sassen, P. Stine, R. Mitchell & N. Guinasso (2002) Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere. *Geofluids*, 2, 95-107.
- Mau, S., D. L. Valentine, J. F. Clark, J. Reed, R. Camilli & L. Washburn (2007) Dissolved methane distributions and air-sea flux in the plume of a massive seep field, Coal Oil Point, California. *Geophysical Research Letters*, 34.
- McGinnis, D. F., J. Greinert, Y. Artemov, S. E. Beaubien & A. Wuest (2006) Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 111.
- Milkov, A. V. (2000) Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 167, 29-42.
- Morner, N. A. & G. Etiope (2002) Carbon degassing from the lithosphere. *Global and Planetary Change*, 33, 185-203.
- Niewohner, C., C. Hensen, S. Kasten, M. Zabel & H. D. Schulz (1998) Deep sulfate reduction completely mediated by anaerobic methane oxidation in sediments of the upwelling area off Namibia. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 62, 455-464.
- Osborn, T. R. (1980) Estimates of the Local-Rate of Vertical Diffusion from Dissipation Measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 10, 83-89.
- Owens, N. J. P., C. S. Law, R. F. C. Mantoura, P. H. Burkill & C. A. Llewellyn (1991) Methane Flux to the Atmosphere from the Arabian Sea. *Nature*, 354, 293-296.
- Ramaswamy, V., O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G. Shi, & S. Solomon, (2001) Radiative forcing of climate change.

Climate Change 2001: The Scientific Basis, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 349



Sarmiento, J. L., H. W. Feely, W. S. Moore, A. E. Bainbridge & W. S. Broecker (1976)

Relationship between Vertical Eddy Diffusion and Buoyancy Gradient in

Deep-Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 357-370.

Sauter, E. J., S. I. Muyakshin, J. L. Charlou, M. Schluter, A. Boetius, K. Jerosch, E.

Damm, J. P. Foucher & M. Klages (2006) Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles. *Earth and Planetary Science Letters*, 243, 354-365.

Schmale, O., J. Greinert & G. Rehder (2005) Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea into the atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 32.

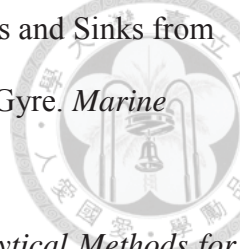
Scranton, M. I., F. L. Sayles, M. P. Bacon & P. G. Brewer (1987) Temporal Changes in the Hydrography and Chemistry of the Cariaco Trench. *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers*, 34, 945-963.

Shindell, D. T., G. Faluvegi, D. M. Koch, G. A. Schmidt, N. Unger & S. E. Bauer (2009) Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. *Science*, 326, 716-718.

Sinclair, A.J. (1974) Selection of thresholds in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration* 3, 129-149.

Socolofsky, S. A. & E. E. Adams (2005) Role of slip velocity in the behavior of stratified multiphase plumes. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 131, 273-282.

Solomon, E. A., M. Kastner, I. R. MacDonald & I. Leifer (2009) Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico. *Nature Geoscience*, 2, 561-565.

- 
- Tilbrook, B. D. & D. M. Karl (1995) Methane Sources, Distributions and Sinks from California Coastal Waters to the Oligotrophic North Pacific Gyre. *Marine Chemistry*, 49, 51-64.
- Ting, F.T.C. (1978) Petrographic techniques in coal analysis. *Analytical Methods for Coal and Coal Products*. Academic Press, Inc., New York, 3-26.
- Tomczak, M. (2000) An introduction to online physical oceanography. *Oceanography* 13, 104-105.
- Tissot, B. P., and Welte, D. H. (1984) Petroleum formation and occurrence. *a New approach to oil gas exploration*, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 699.
- Valentine, D. L., D. C. Blanton, W. S. Reeburgh & M. Kastner (2001) Water column methane oxidation adjacent to an area of active hydrate dissociation, Eel River Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 2633-2640.
- Wanninkhof, R. (1992) Relationship between Wind-Speed and Gas-Exchange over the Ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 97, 7373-7382.
- Wu, C. R., T. Y. Tang & S. F. Lin (2005) Intra-seasonal variation in the velocity field of the northeastern South China Sea. *Continental Shelf Research*, 25, 2075-2083.
- Yamamoto, S., J. B. Alcauskas & T. E. Crozier (1976) Solubility of Methane in Distilled Water and Seawater. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 21, 78-80.
- Yang, T. F., P. C. Chuang, S. Lin, J. C. Chen, Y. Wang & S. H. Chung (2006) Methane venting in gas hydrate potential area offshore of SW Taiwan: Evidence of gas analysis of water column samples. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17, 933-950.
- Yoshida, O., H. Y. Inoue, S. Watanabe, S. Noriki & M. Wakatsuchi (2004) Methane in

the western part of the Sea of Okhotsk in 1998-2000. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 109.

