

國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Graduate Institute of Oceanography

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

應用三維反射震測技術調查台灣西南海域天然氣

水合物系統

Applying 3D Seismic Technique for Gas Hydrate

Investigation Offshore Southwestern Taiwan

廖士瑋

Shih-Wei Liao

指導教授：劉家瑄 博士

Advisor: Char-Shine Liu, Ph.D

中華民國 99 年 2 月

February, 2010

誌謝

歷時兩年半，拖拖拉拉的也總算是把論文寫完了。能夠完成碩士學業，首先當然要感謝劉家瑄老師的栽培與指導，實驗室提供的龐大資源是我完成研究不可或缺的。口試委員王詠絢博士、傅式齊博士、林殿順老師，謝謝你們願意抽空看完我的論文，並且熱情的給予指導和建議。

再來要感謝實驗室的學長姐，鶴瀚、瑞焜、浩庭、松棧等，謝謝你們在我研究上給予的幫助與建議，尤其是鶴瀚與浩庭，不僅僅是研究上，也包括了許多實驗室其它業務與生活上的支持。再來是我的同學們，已經畢業的政儀；今年一起畢業的怡心、阿柯，一起搶電腦做作業到深夜的日子比各自悶著頭寫論文有趣多了。

另外要特別感謝兩個人，第一個是菲利浦博士，沒有你的幫忙我的碩士論文大概是生不出來了。你的幽默風趣我們實驗室的大家都不會忘記的，希望有機會可以去法國找你玩。在這裡要特別註明，菲利浦才是台灣學界第一個完成三維震測的人，我做的不過是逆向工程而已。還有要特別感謝邱協棟邱大哥，你是我們海研所的寶物，你認真敬業的工作態度是我們年輕人學習的典範。沒有你的幫忙，這筆資料是不可能順利收集來的。

最後要感謝我的母親。雖然我覺得您還是搞不懂研究所到底在幹嘛，但是沒有您的支持我也不可能拿到碩士學位。最後的最後，謝謝所有曾經在我研究生活中給予我幫助而我沒有特別提到你名字的人。

摘要

天然氣水合物做為新型態的化石能源，擁有極大的潛力而廣為人注意。近年來，利用反射震測於台灣西南海域已發現大量的海底仿擬反射 (bottom simulating reflector, BSR) 存在，此一訊號被認為是天然氣水合物存在的重要指標。但是過去的調查皆為大範圍的普查，並未有針對特定區域進行天然氣水合物的空間分析。本研究係針對此一課題，利用高解析度之二維及新整編之三維反射震測資料來進行探討。

研究區域位於台灣西南海域永安海脊。在這個區域，清楚且連續的 BSR 幾乎覆蓋整個研究範圍。本研究分別利用 2004 年及 2008 年所收集的三筆高解析度二維多頻道反射震測資料，將之重新整併成一筆三維反射震測資料。其中，東西方向測線可劃分為 92 條，測線間距為 100 公尺；南北方向可畫分為 1,431 條，測線間距為 12.5 公尺，資料涵蓋範圍約 180 平方公里。本研究期望能利用三維震測資料在空間分析的優點，對永安海脊的天然氣水合物分布及流體移棲的模式有更深入的研究。

根據三維 BSR 的分布、反射訊號特徵與地形，我們將研究地區由西至東分為澎湖峽谷區、埋藏水道區、永安海脊、斜坡盆地西緣及盆地東緣等五個區段。天然氣水合物主要集中於埋藏水道區、永安海脊東翼、斜坡盆地西緣，其中又以永安海脊東翼與斜坡盆地西緣相鄰的地區 BSR 訊號最為連續且分布範圍最廣。而埋藏水道區以其良好的孔隙率和較為水平的地層而擁有最大範圍與最厚的游離氣層。此五個區段的水合物相關反射特徵各自受到不同的流體移棲機制影響，又可歸類構造活動、沉積作用兩種機制，兩種機制可能同時存在且互相影響。

Abstract

Gas hydrate as a potential new energy resource has been noticed worldwide in recent years. However, rapid dissociation of gas hydrate may cause serious environment problems such as submarine landslides and global warming. Offshore southwestern Taiwan, clear bottom simulating reflector (BSRs) and strong reflection amplitude anomalies have frequently been observed on 2D seismic profiles. In this study, we try to get detail in a small area by 3D seismic techniques.

The study area is located in the southern part of the Yung-An Ridge and adjacent slope basins offshore southwestern Taiwan. The 3D seismic data were collected using a single source and single streamer (thus, a 2D seismic system) shooting in E-W direction across the survey area with line spacing as close as 100 m. We built a 3D geometry from these closely spaced 2D seismic profiles. The 3D data volume contains 92 E-W trending in-lines with 100 m spacing, and 1431 N-S trending crosslines with 12.5 m spacing, the 3D volume covers an area about 180 km².

From this 3D data volume, we can see that BSR appears almost throughout the entire study area. Base on the seismic characteristics typically associated with gas hydrate and structures and sedimentary features, we separate the study area into 5 small zones. They are from west to east, the Penghu canyon, the buried channel area, the Yung-An ridge, the western part of the intra-slope basin, and the eastern part of the intra-slope basin. Each zone has it own fluid migration mechanism, and all mechanisms are controlled by either structure associated or sedimentary processes.

目錄

致謝	錯誤! 尚未定義書籤。
摘要	II
Abstract	III
目錄	IV
圖目錄	V
表目錄	VII
第一章 序論	1
1-1 天然氣水合物簡介	1
1-2 天然氣水合物之調查	2
1-3 台灣西南海域之天然氣水合物	4
1-4 天然氣水合物研究方法	6
1-5 研究目的	8
第二章 資料處理與分析	20
2-1 資料來源	20
2-2 高解析度多頻道二維震測資料處理	20
2-3 疊合後三維震測資料處理	22
第三章 研究成果	33
3-1 三維 BSR 分布	33
3-2 研究區域	33
3-3 震測特徵與構造的關係	34
3-4 永安海脊流體移棲的可能模式	38
第四章 結論	52
參考文獻	53
附錄	58

圖目錄

圖 1-1：天然氣水合物穩定溫壓曲線	9
圖 1-2：全球天然氣水合物研究分布	9
圖 1-3：活動大陸邊緣流體移棲與水合物形成的可能模式示意圖	10
圖 1-4：地形、構造特徵與流體移棲關係示意圖	11
圖 1-5：台灣西南海域構造特徵示意圖	12
圖 1-6：高屏下部陸坡之震測剖面與解釋	12
圖 1-7：永安海脊頂部區域 EK500 漁探儀記錄之冒氣現象	13
圖 1-8：永安海脊之側掃聲納與底質剖面研究結果	14
圖 1-9：台灣西南海域 BSR 分布圖	15
圖 1-10：流體移棲方向與速率估算	16
圖 1-11：台灣西南海域 BSR 分布型態與流體移棲示意圖	17
圖 1-12：建議 18 口井位之地形、構造與沈積物分布圖	17
圖 1-13：BSR 的反射訊號特徵圖	18
圖 1-14：三維 BSR 分布示意圖	19
圖 2-1：震測資料分布圖。紅線為 MCS735 航次，	27
圖 2-2：二維資料處理流程圖	28
圖 2-3：單聲源多電纜三維震測作業示意圖	28
圖 2-4：三維震測網格示意圖	29
圖 2-5：三維震測幾何示意圖	29
圖 2-6：三維資料處理流程圖	30
圖 2-7：二維單聲源單電纜震測施測幾何	30
圖 2-8：中點分布擴散	31
圖 2-9：三維網格參數示意圖	31
圖 2-10：處理完成之三維方塊震測資料	32
圖 3-1：BSR 分類	40
圖 3-2：BSR 於空間中的分布	41

圖 3-3：研究區域彩色繪影地形圖	42
圖 3-4：震測剖面與三維 BSR 分布	43
圖 3-5：In-line 26、x-line 1~650 之垂直切面	43
圖 3-6：水合物重新調整示意圖	44
圖 3-7：埋藏水道區之震測剖面	45
圖 3-8：雙程走時 2400 毫秒之時間切面	46
圖 3-9：澎湖峽谷 1.85Ma 以來之演化過程	47
圖 3-10：西北東南向之垂直切面	48
圖 3-11：In-line 24，x-line 500~1000 之震測剖面	49
圖 3-12：In-line 24 與 1756 毫秒之時間切面	50
圖 3-13：In-line 21、x-line 700~1431 之垂直切面	50
圖 3-14：In-line 53 與 1890 毫秒之時間切面	51
圖 3-15：永安海脊流體移棲可能模式示意圖	51



表目錄

表 2-1：各航次施測參數	26
表 2-2：三維網格震測資料方塊參數	32



第一章 序論

1-1 天然氣水合物簡介

天然氣水合物為氣體分子在高壓與低溫環境下被水分子包合所形成之冰晶狀物體。在自然環境中，天然氣水合物又以甲烷氣所形成的甲烷水合物最為常見。天然氣水合物的形成有其特定的溫壓條件。在自然環境下，天然氣水合物能夠穩定存在於高壓低溫的環境，而在海洋沉積物中，由於地下溫度隨深度增加，不同成分的天然氣水合物雖然會有不同的相變溫度，大體上都無法超過一個臨界的深度，這個深度即為溫壓關係圖中水合物穩定曲線與地溫梯度線的交點(圖 1-1)，被稱呼為天然氣水合物穩定底界(base of Gas Hydrate Stability zone, 簡稱 BGHS) (Miller, 1974; Stoll, 1974)。一般狀況下，BGHS 大約位於海床底下 200 到 500 公尺，而根據各地區的地熱條件以及封存環境會有不同的變化。圖 1-2 示為全球已知有天然氣水合物存在的地區。

天然氣水合物的形成除了穩定的溫壓條件之外，還需要有充足的天然氣供應。天然氣在地下深處受微生物或是熱熟成作用生成之後，可能會隨著流體向上或向兩側移棲，在合適的溫壓條件下，逐漸與水作用生成天然氣水合物。

由於天然氣水合物的分布範圍廣，其豐富的自然氣蘊藏量做為新能源的開發，已受到相當程度的重視。然而天然氣水合物解離時，大量的甲烷氣釋放對溫室效應的影響也同時受到關注 (Kvenvolden, 1988)。不論是做為能源開發或對是 global 氣候變化的影響，都促使我們欲對天然氣水合物做更深入的研究。

1-2 天然氣水合物之調查

非人工合成的天然氣水合物，最早是在 40 年代發現於極區的天然氣輸氣管中。這些輸氣管利用高壓將天然氣輸送至遠方，在極區低溫以及管內高壓的環境下，水合物自然的形成使得管路堵塞(Deaton and Frost Jr, 1946; Hammerschmidt, 1940)。

從 70 年代開始，許多研究都曾提及有關大陸邊緣的震測剖面中出現異常訊號層(anomalous horizon)(Markl, 1970; Shipley et al., 1979; Tucholke, 1977)。仔細分析這些異常訊號可以歸納出三點特徵：(1) 異常訊號時常連續而且橫切過地層平面(bedding planes)；(2) 異常訊號於海床下的深度(subbottom depth)隨著海床深度增加而增加，同時也隨著底水溫度下降而增加；(3) 這些異常訊號僅侷限於沉積層向陸地傾斜的地區；於向海洋傾斜的大陸隆堆(continental-rise)沉積層則不常見。(Tucholke, 1977)。由於上述的種種特性，這種訊號又被稱為海底仿擬反射(bottom simulating reflector, 簡稱 BSR)(Shipley et al., 1979)。另外，藉由深海鑽探所獲得的水合物與天然氣樣本得知，這些異常訊號出現的深度與水合物底界相當的接近，因此 BSR 被認為足以代表 BGHS 的位置(Ewing and Hollister, 1972)。

目前一般認為，震測剖面中所辨識出的異常訊號--BSR 可以代表天然氣水合物的存在，因此我們便能利用反射震測方法大量進行海洋環境之天然氣水合物調查。Kvenvolden (1988) 首先統整了過去的研究，分別將各個不同地區所發現的 BSR 以及岩心樣本等研究成果列表，並且針對天然氣水合物所擁有的甲烷碳含量做了粗略的估計，認為當時已知存於地下淺層的碳量為 10,000 個十億噸(gigatons)，如此大量的碳若釋放出來，勢必對於全球碳循環有相當大的影響。

Hyndman and Spence (1992)詳細分析了BSR的震測訊號特徵，同時進行了速度以及AVO分析並提出幾點看法；(1) BSR反射單純是由於BSR上方沉積物百分之三十的孔隙被水合物填充，而下方孔隙則不含水合物。(2) 水合物是以層狀聚集在穩定帶的下界，這個位置也剛好就是BSR的上方。(3) 即使BSR下方有游離氣(free gas)的存在，也僅止於低濃度(小於幾個百分比)或是非常薄層(小於幾公尺)，以至於使用震測方法不容易發現。同時作者認為這些現象也看似支持了天然氣是由於下方流體向上移棲，而不是自穩定帶中生成並形成天然氣水合物。另外Hyndman and Davis (1992)也提出了流體移棲與水合物形成的可能模式(圖 1-3)，說明了在活動大陸邊緣(增積岩體或非增積作用之大陸邊緣)天然氣水合物與流體活動的關係。

Chand and Minshull (2003)也針對天然氣水合物與流體的關係做了文獻的回顧，同樣的也提出了流體移棲於非活動與活動大陸邊緣的可能模式以及其相對應的震測特徵，例如在非活動大陸邊緣常出現有震測訊號空白(blanking)、BSR下方振幅增強以及流體逃脫(fluid escape)等特徵；而活動大陸邊緣則常有流體噴發(fluid expulsion)、BSR擾動等特徵。作者認為BSR產生的原因多半是因為在GHSZ下方有游離氣存在，而BSR的振幅除了跟水合物的濃度有關以外也跟地層孔隙率有關。另外，作者也認為水合物的形成勢必需要有流體的移棲來供應甲烷氣，甲烷氣在流體中可能以溶解態或是小氣泡的形式存在。當流體進入到GHSZ時逐漸形成水合物並填充原有的沉積物孔隙，因此沉積物的滲透率下降而流體變得不容易通過，但是對於BSR以下的游離氣是不是因為滲透率下降而被封存於穩定帶下方，還沒有相當清楚的了解。

流體移棲的模式與地形、構造也有相當密切的關係。Pecher et al.

(2001) 利用高解析度之震測資料進行秘魯西海岸之天然氣水合物研究。根據反射特徵以及岩心與地熱的資料，作者認為傾斜地層讓含有甲烷氣的流體更容易移棲至構造或地形高區，並進入水合物穩定帶形成水合物(圖 1-4)。在台灣東北方的南海海槽(Nankai Trough)，Ashi et al. (2002) 根據震測剖面的反射特徵，也認為沉積、侵蝕、地殼運動、構造的增厚(tectonic thickening)是影響流體移棲方式與控制 BSR 分布型態的重要因素。

1-3 台灣西南海域之天然氣水合物

台灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊的聚合邊界上，東北方為菲律賓板塊隱沒至歐亞板塊之下的琉球弧溝系統；南部則為歐亞板塊隱沒至菲律賓板塊的呂宋弧溝系統，構造運動相當活躍。台灣西南海域在地體架構上為隱沒增積作用向北轉變為弧陸碰撞的過渡帶(Kao et al., ; Reed et al., 1992)。以變形前緣為分界，西邊為南海大陸斜坡，屬於非活動性大陸邊緣，東邊為台灣造山帶，屬活動大陸邊緣(圖 1-5)，主要構造以褶皺、逆衝斷層與泥貫入體為主(Liu et al., 1997)。有三個主要的海底峽谷系統分別為澎湖(Yu and Chang, 2002)、高屏(Chiang and Yu, 2006)以及枋寮峽谷(Yu and Lu, 1995)切過整個增積岩體的西部，並輸送大量來自台灣造山帶的沉積物。

Reed et al. (1992) 將增積岩體從變形前緣到台灣陸地分成下部斜坡與上部斜坡。下部斜坡為以一系列北到西北走向的背斜為主要構造特徵。上部斜坡則為陡峭傾斜及高度變形的地層。Lin et al. (2008) 再根據詳細的構造特徵將下部斜坡分成前段(frontal segment)與後段(rear segment)，前段主要為盲斷層拱起形成的褶皺構造；後段則以覆瓦狀的

出露逆斷層為主(圖 1-6)

台灣地區的天然氣水合物研究，近年來在經濟部中央地質調查所的推動之下也展開了全面的調查。地球化學方面利用海底拖曳拍攝調查與沉積物岩心及間隙水化學參數之分析，發現台灣西南海域活動及被動大陸邊緣海域斷層及構造山脊沉積物中富含高濃度甲烷與硫化氫、快速硫酸鹽還原作用、高含量 pyrite-S 與自生性碳酸鈣的沉積及豐富的化學自營性生物(Chuang et al., 2006; Lin et al., 2006)。其中，在永安海脊頂部區域發現了正在冒氣的冷泉環境(圖 1-7)，海床上發現大面積自生性碳酸岩及貝殼碎片的覆蓋。研究結果也顯示，永安海脊普遍呈現快速硫酸鹽還原反應及黃鐵硫呈現異常高值，且呈現明顯的區域性差異，其中地化異常測站（高甲烷濃度、快速硫酸鹽還原反應、高含量黃鐵硫）普遍集中在海脊頂部冒氣區及海脊東側區域，可能與大地構造、斷層及甲烷移棲的空間差異變化有關(林曉武, 2008)。

根據側掃聲納資料影像顯示，在永安海脊有明顯的高反射係數的海床特徵存在，也發現有海床麻坑、海底山崩與小尺度正斷層等構造的發育。底質剖面資料顯示，位於永安海脊西側的地層白化帶可能為濁流堆積，且由於沈積物來源的顆粒較大，因此孔隙率也較大，可以形成良好的儲集層，使得向上移棲的甲烷氣體可以充填其間，如果溫壓條件許可，極可能產生天然氣水合物(圖 1-8)。

利用反射震測方法，發現 BSR 幾乎遍布整個台灣西南海域大陸斜坡區(圖 1-9)(Liu et al., 2006)。利用長支距的震測資料進行速度分析，也顯示在許多海脊的 BSR 下方有低速帶存在，可能就是游離氣封存的證據(Liu et al., 2006)。密集排列的 2.5 維反射震測也提供了永安海脊的構造、地層與 BSR 的側向變化資訊，並利用上述關係估算流體的流向。(圖 1-10)(Schnurle and Liu, 2010)。林哲銓 (2005)詳細分析了震測資料，

認為台灣西南海域的 BSR 分布於逆衝斷層區最為連續且富集。逆斷層活動將上盤地層抬升，天然氣沿著孔隙較佳的傾斜地層向淺部移棲。Lin et al. (2009) 根據 BSR 的分布特徵及其與構造、地層的關係，將台灣西南海域 BSR 分布型態分為四大類，依序為海脊型(ridge type)、盆地型(basin type)、海底峽谷型(submarine-canyon type)以及大陸斜坡型(continental slope type)(圖 1-11)。林殿順 (2008)根據大量地球化學、地熱，以及其它地球物理資料，利用石油系統常用之傳統油氣蘊藏之地質風險評估方法，對台灣西南海域提出了 18 口建議鑽井位置(圖 1-12)，其中在永安海及附近就包含了 4 口建議井位，可見永安海脊是相當具有研究價值之地區。以上研究皆顯示台灣西南海域擁有大量的天然氣水合物存在，可謂是全球天然氣水合物研究的重要區域。

1-4 天然氣水合物研究方法

由於水合物本身相變化與周圍環境溫壓變化的關係，水合物於地層中的分布呈現帶狀且存在一個臨界深度。在這個臨界深度以上水合物得以穩定生成，臨界深度以下水合物開始分解為游離氣。這個臨界深度就是所謂的天然氣水合物底界(BGHS)。在 BGHS 上方，水合物形成並填充於地層孔隙中，同時也改變了原有地層的聲學特性，提高了震波速度(Hyndman and Davis, 1992; Lee et al., 1994; Minshull, 1989)，而 BGHS 下方沒有水合物的部分則相對低速，介質聲波阻抗的差異使得震波在這個介面上產生稱為 BSR 的強反射(Markl, 1970; Shipley et al., 1979; Tucholke, 1977)(圖 1-13)。

BSR 是由於反射面上下介質不同波阻抗所產生的反射訊號，因此 BSR 既不是沉積循環的介面，也不是構造面，單純是一個物理特性的

分界。原則上，BSR 的分布特徵主要受到水合物本身的物質特性與地溫梯度和深度的影響而擁有隨著海床起伏的特性，但除此之外影響 BSR 分布變化的原因還有很多，諸如構造活動、地下水活動、沉積與侵蝕作用等等。上述影響 BSR 分布特徵的因素，都與流體移棲的模式有密切的關係。傳統上，反射震測在石油探勘方面絕對是不可或缺的工具，藉由尋找適當的儲油構造或是對異常的反射特徵進行振幅對截距分析(AVO analysis)等，都是常見的方法。如今利用密集且大量的高解析度震測資料所構築的三維反射震測方法也已被廣泛利用於石油探勘。天然氣水合物做為未來重要石化能源之一，在許多特性上與石油系統相當類似。從天然氣的生成源頭一直到進入適當的環境轉變成水合物，這中間的過程是如何進行的？流體的移棲在此就扮演了相當重要的角色。BSR 的分布即是受控於流體移棲，除了沿著二維的垂直剖面有不同的特徵之外，在側方向上(或說三維空間中)的變化是如何？利用三維反射震測在側方向上的解析能力或許有助於我們解決這個問題。

國外已有許多利用三維反射震測進行天然氣水合物研究的例子。Zuhlsdorff and Spies (2004)利用三維震測資料對加拿大 Vancouver 島附近一處錐形陷痕(pockmark)進行研究。作者認為，雖然水合物的填充降低了沉積地層的滲透率並使得天然氣難以通過，但是由構造活動引起孔隙液壓上升造成的液壓破裂(hydraulic fracturing)使得地層出現裂隙，這樣的裂隙提供了流體向海床移棲的通道(圖 1-14)。Gay et al. (2007)於 Lower Congo basin 的研究也顯示許多沉積作用或構造活動的特徵都與 BSR 異常有關。海床表面觀察到的許多流體噴發活動(fluid seep)都與下方被掩埋之儲集(reservoir/trap)構造的位置與幾合型態有密切的關係。沉積地層中的不連續面諸如斷層、鹽貫入體、侵蝕面(現生的或過

去的海底峽谷)等都足以形成良好的通道，讓流體側向或垂直向移棲。而高孔隙率、高滲透率的砂層或是濁流層不僅僅是良好的通道，同時也是良好的儲集構造。除此之外，更多利用高解析度的二維震測資料針對異常特徵與流體活動的研究都認為構造活動或沉積作用對 BSR 的分布有相當程度的影響。

1-5 研究目的

本研究係利用三維反射震測資料來建立永安海脊南方地區的天然氣水合物詳細分布並探討天然氣水合物系統。三維反射震測是油氣探勘界中必用的技術，可以提供調查地區詳細的地質構造與油氣分布資訊。國外已有許多利用三維反射震測方法進行天然氣水合物研究的例子，而在台灣，三維反射震測的技術除了石油公司使用過外，學術界中還尚未有人能夠應用在研究上。本研究即是台灣首次利用三維震測方法所進行的天然氣水合物調查研究，希望藉由三維震測資料在空間分析上的優勢，建立詳細的研究區域內天然氣水合物分布以及天然氣的移棲模式。

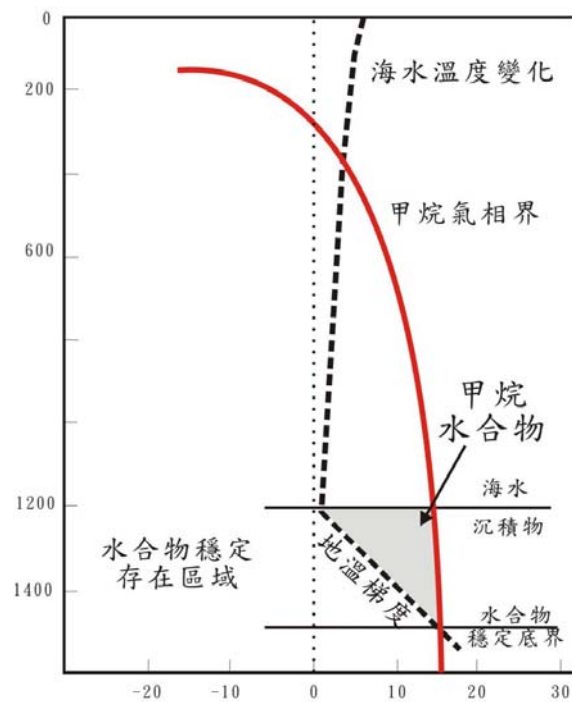


圖 1-1:天然氣水合物穩定溫壓曲線。陰影區域為天然氣水合物可穩定存在的環境。
(修改自 Kvenvolden, 1988)

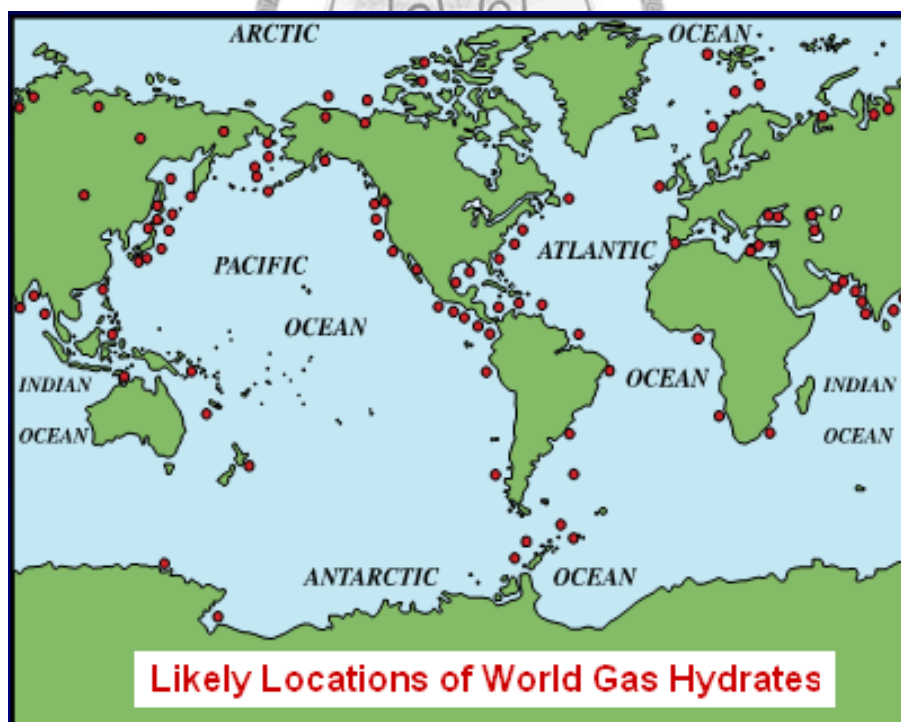


圖 1-2:全球天然氣水合物研究分布。多數分布於大陸邊緣，少數分布於極區永凍層。
(摘自 U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>)

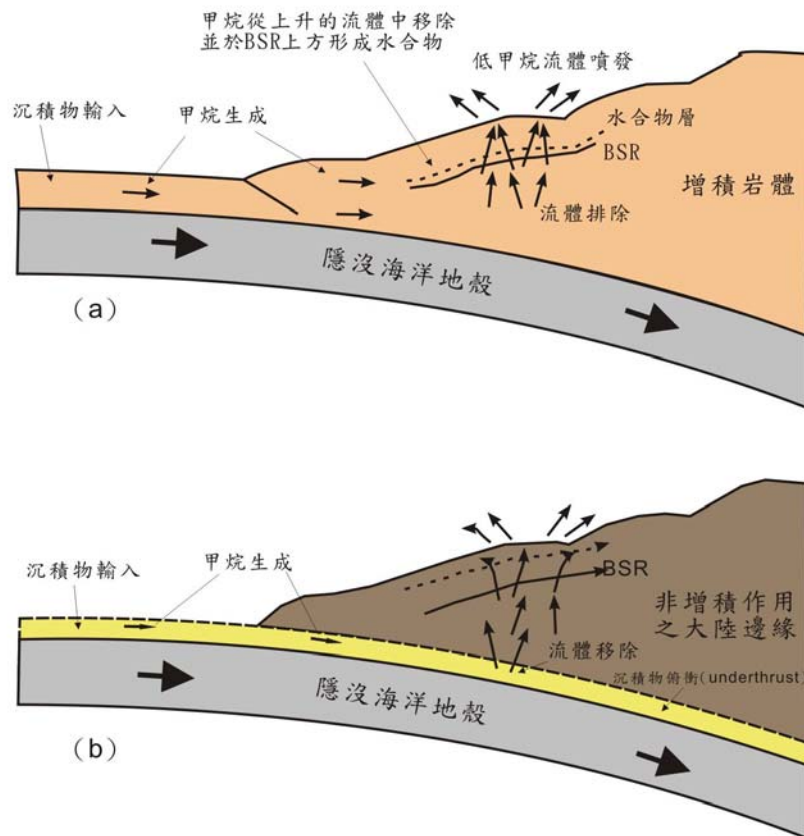


圖 1-3：活動大陸邊緣流體移棲與水合物形成的可能模式示意圖。(a)大陸邊緣在增積作用下，沉積物不斷被刮起加積進入增積岩體，其中大量的水分受到荷重而產生排水作用。這些含有甲烷氣的孔隙水進入到水合物的穩定帶時，甲烷被移除而形成天然氣水合物，另一部分的流體則可能噴發至海水中。(b)與 a 類似，由於沒有增積作用，沉積物以俯衝(underthrust)的方式隨著海洋地殼隱沒至大陸邊緣下，少量的流體因浮力向上移棲，在通過 BSR 時開始形成水合物。(修改自 Hyndman and Davis, 1992)

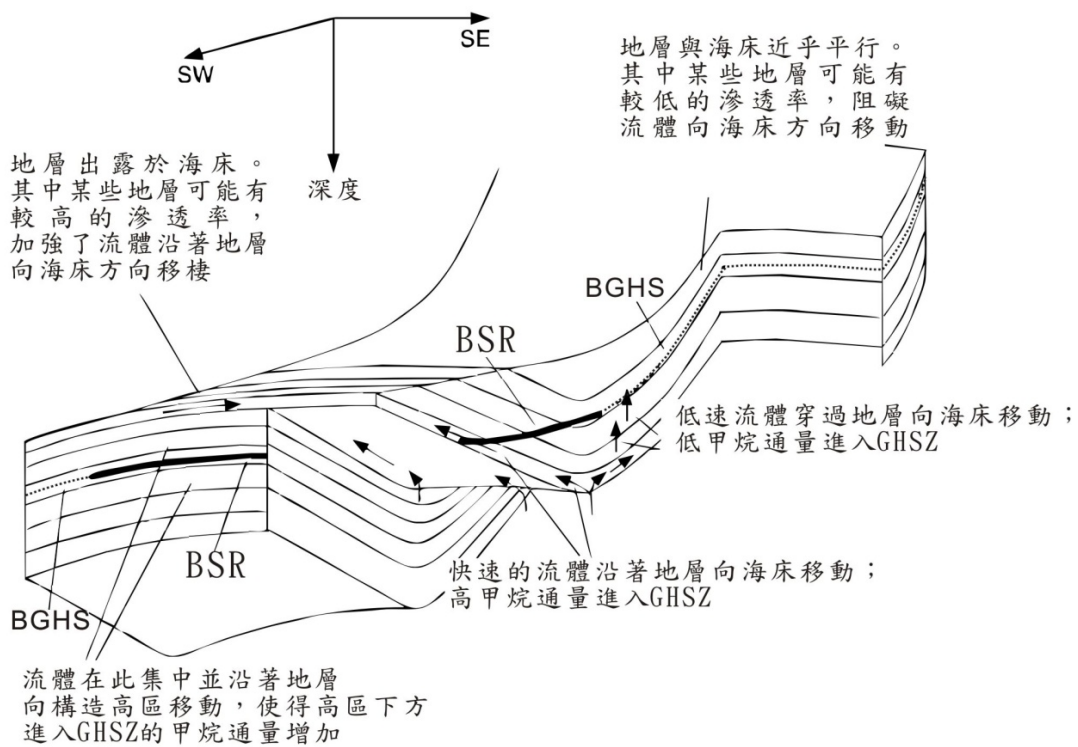


圖 1-4：地形、構造特徵與流體移棲關係示意圖。圖中可見兩個構造高區位於模型的兩側，高、低滲透率的地層互層形成良好的通道。含有天然氣的流體透過這些通道向海床方向快速移棲，同時也往構造或地形高區集中。天然氣進入穩定帶之後形成天然氣水合物。另外，流體也可能直接穿過不同滲透率的地層，緩緩向上移動。(修改自 Pecher et al., 2001)

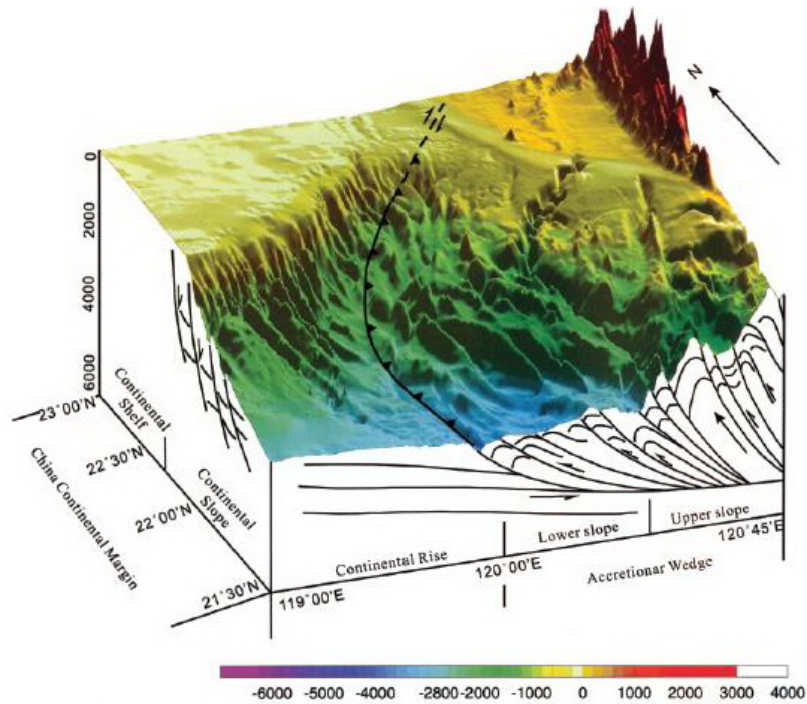


圖 1-5：台灣西南海域構造特徵示意圖。黑線為變形前緣，變形前緣以東為褶皺逆衝帶，屬活動大陸邊緣；西北為南海大陸斜坡，屬非活動大陸邊緣。(摘自 Liu et al., 2006)

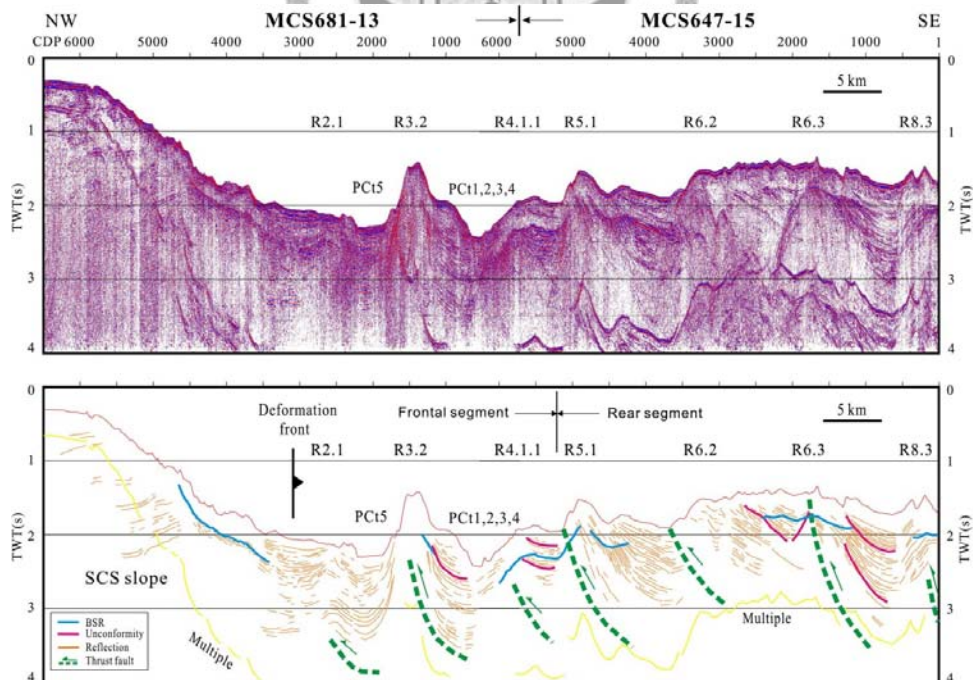


圖 1-6：高屏下部陸坡之震測剖面與解釋。綠色虛線為斷層，藍線為 BSR，紫紅色線代表不整合面。構造 R5.1 即為永安海脊下方之出露逆斷層，此構造將下部陸坡區分為前段與後段。(摘自 Lin et al., 2008)

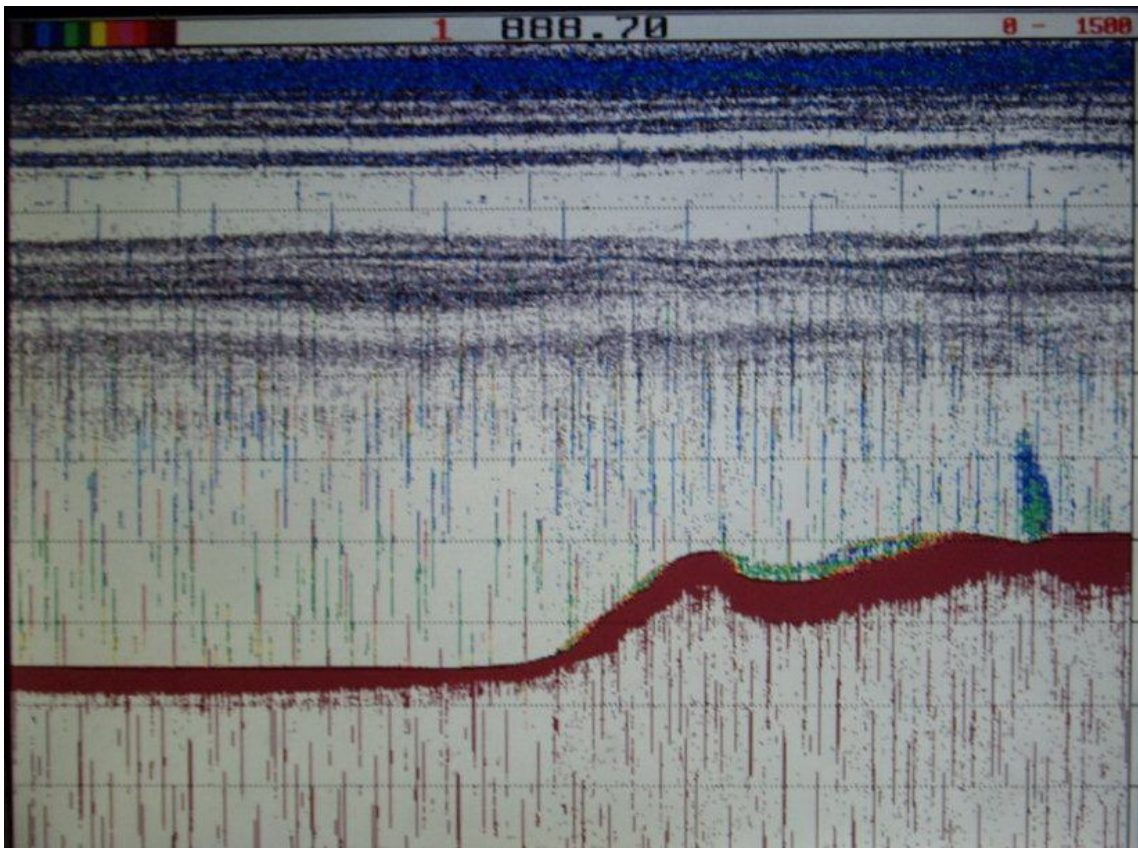


圖 1-7：永安海脊頂部區域 EK500 漁探儀記錄之冒氣現象。圖中右側明顯可見一冒氣現象。經由地球化學分析結果也顯示此區域有異常高的甲烷濃度。(摘自林曉武, 2008)

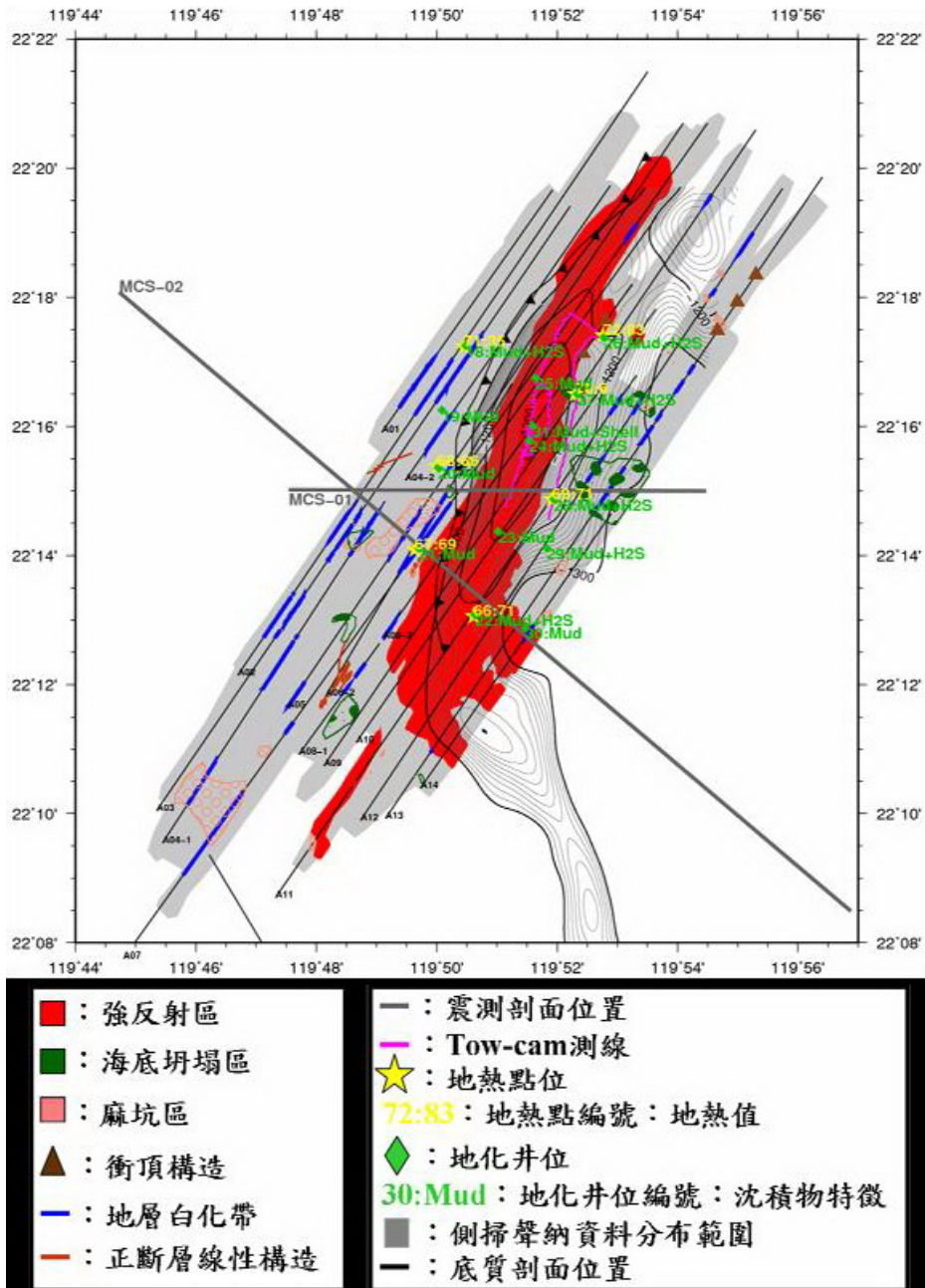


圖 1-8：永安海脊之側掃聲納與底質剖面研究結果。資料顯示永安海脊附近有許多流體活動特徵。流體活動可能造成海底坍塌、麻坑、衝頂構造等。此外，地球化學以及地熱研究也顯示永安海即有明顯的天然氣水合物特徵。(摘自許樹坤, 2008)

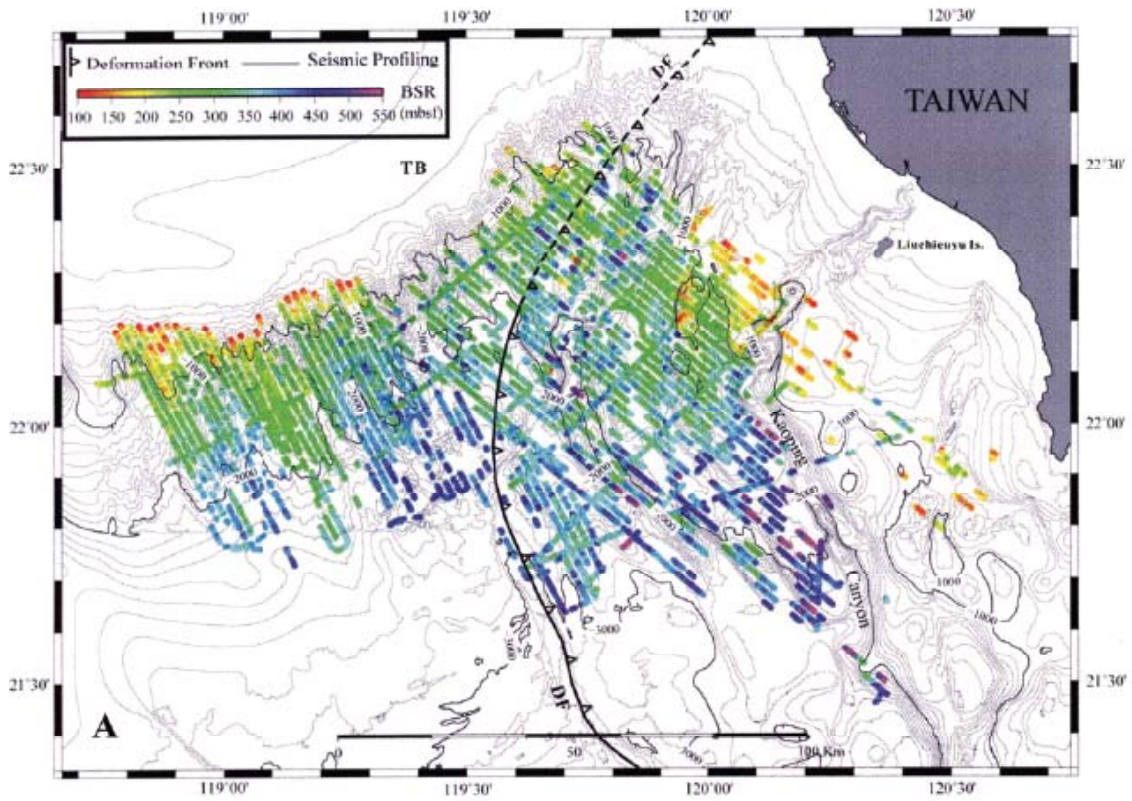


圖 1-9：台灣西南海域 BSR 分布圖。利用大量反射震測資料，進行 BSR 的辨識所獲得的 BSR 分布圖。如圖所示，台灣西南海域之 BSR 幾乎遍佈整個台灣西南海域大陸斜坡及一部分深海海盆。顏色變化代表 BSR 於海床下的深度，單位為公尺。
(摘自 Liu et al., 2006)

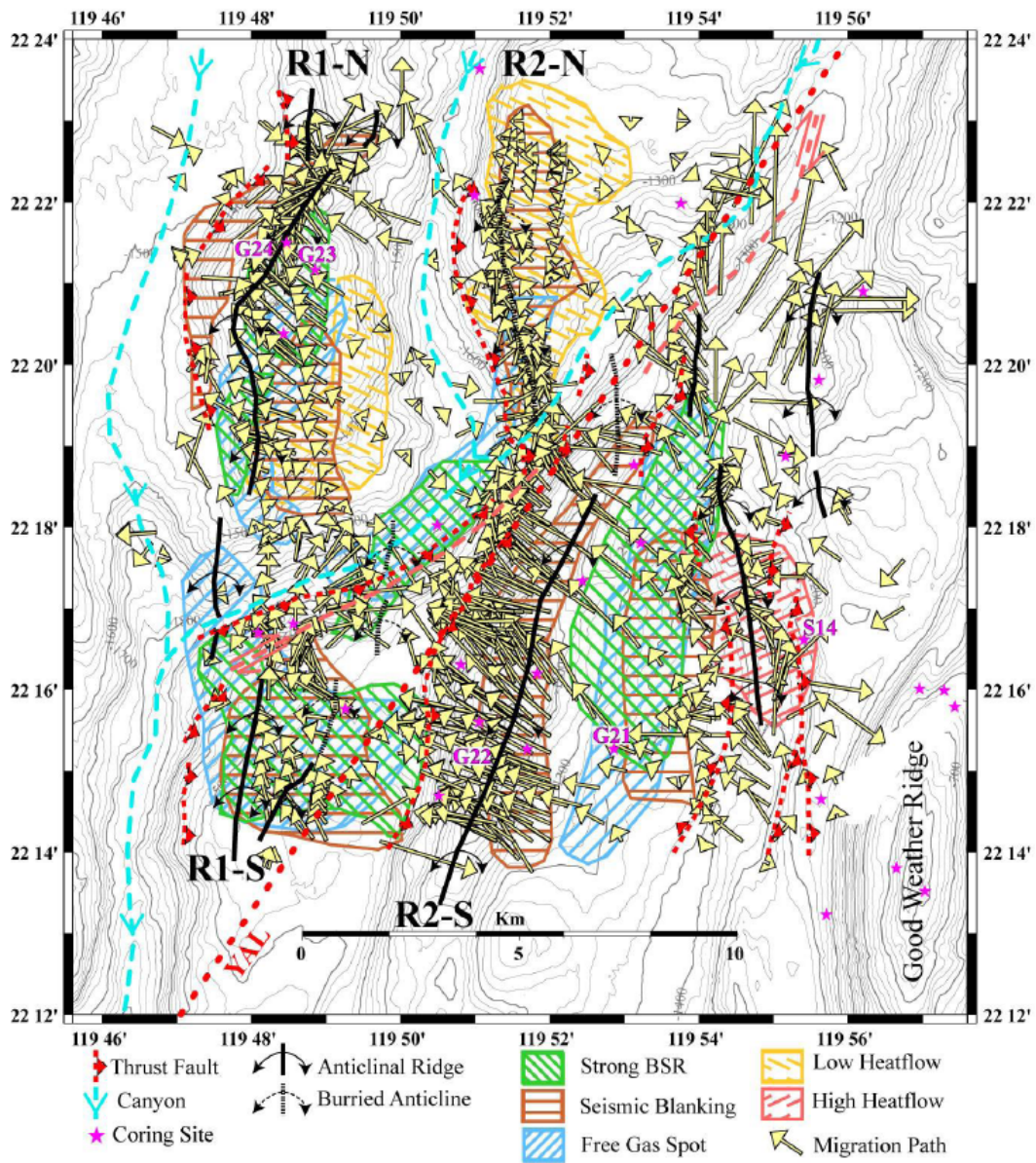


圖 1-10：流體移棲方向與速率估算。利用密集排列之 2.5 維震測資料，推估永安海脊附近地區，流體可能的移棲型態。圖中可明顯看出 R2-S (即永安海脊) 下方流體活動旺盛且流速較快。(摘自 Schnurle and Liu, 2010)

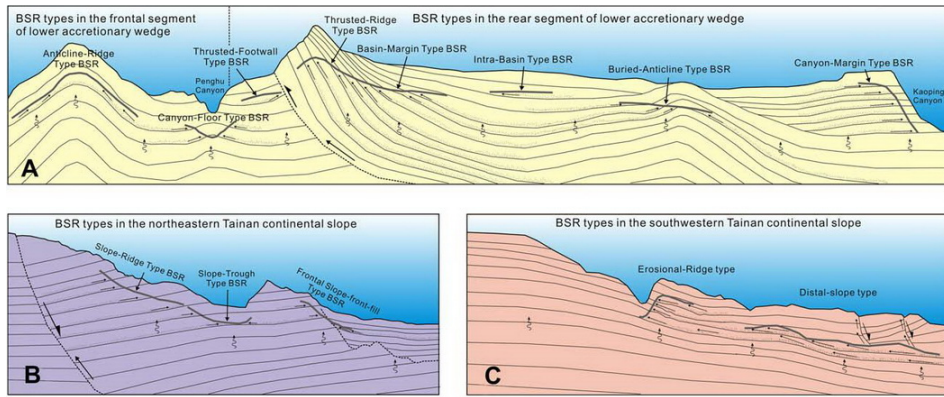


圖 1-11：台灣西南海域 BSR 分布型態與流體移棲示意圖。(A)在活動大陸斜坡上常見的構造與地型特徵如海底峽谷、斜坡盆地、逆衝斷層、褶皺等，都有其對應的 BSR 分布型態。其中尤以逆衝斷層提供了來自深部的天然氣向淺部移棲良好的通道。(B)在非活動大陸斜坡地區，大型的正斷層提供深部熱熱成天然氣向淺部移棲。斜坡的地層受正斷層活動影響向陸地方向傾斜，流體沿著斷層以及孔隙良好的傾斜地層向地表移動。(摘自 Lin et al., 2009)

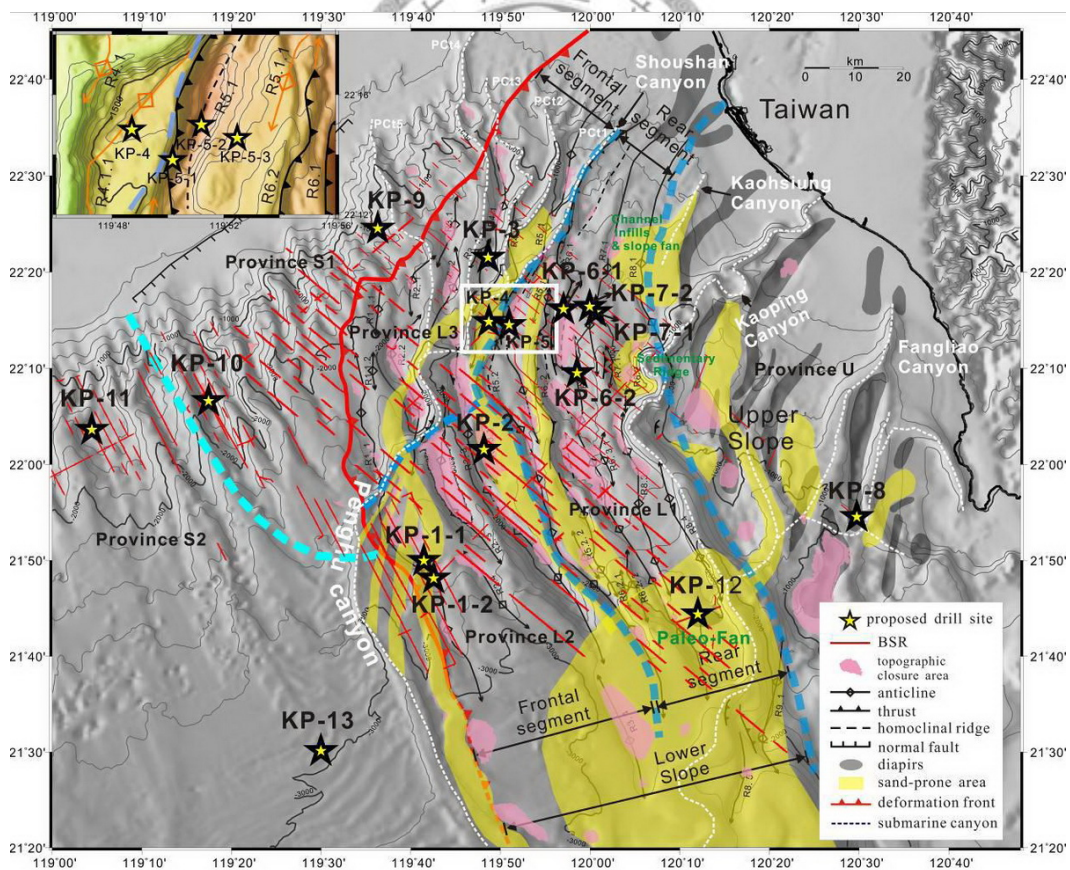


圖 1-12：建議 18 口井位之地形、構造與沈積物分布圖。KP-1~KP-13 為建議之井位名稱。白色方框為永安海脊。黃色範圍為可能有大量砂體出現的區域。(摘自鄰殿順, 2008)

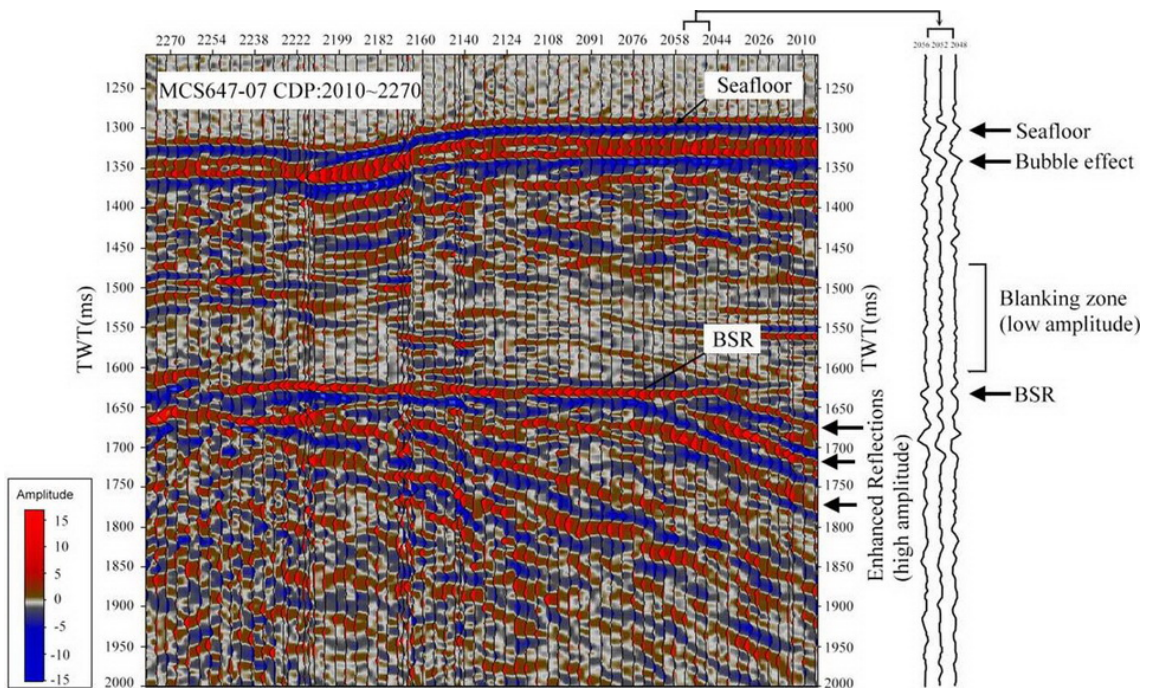


圖 1-13:BSR 的反射訊號特徵圖。圖中可見海床訊號與 BSR 訊號之波形呈現反相，且 BSR 上方出現空白帶(blanking zone)。BSR 與海床近乎平行並且橫切過傾斜的地層。而緊貼 BSR 下方的地層訊號有振幅異常增強的現象，可能是部分高孔隙率的地層受游離氣填充所致。(摘自 Lin et al., 2009)

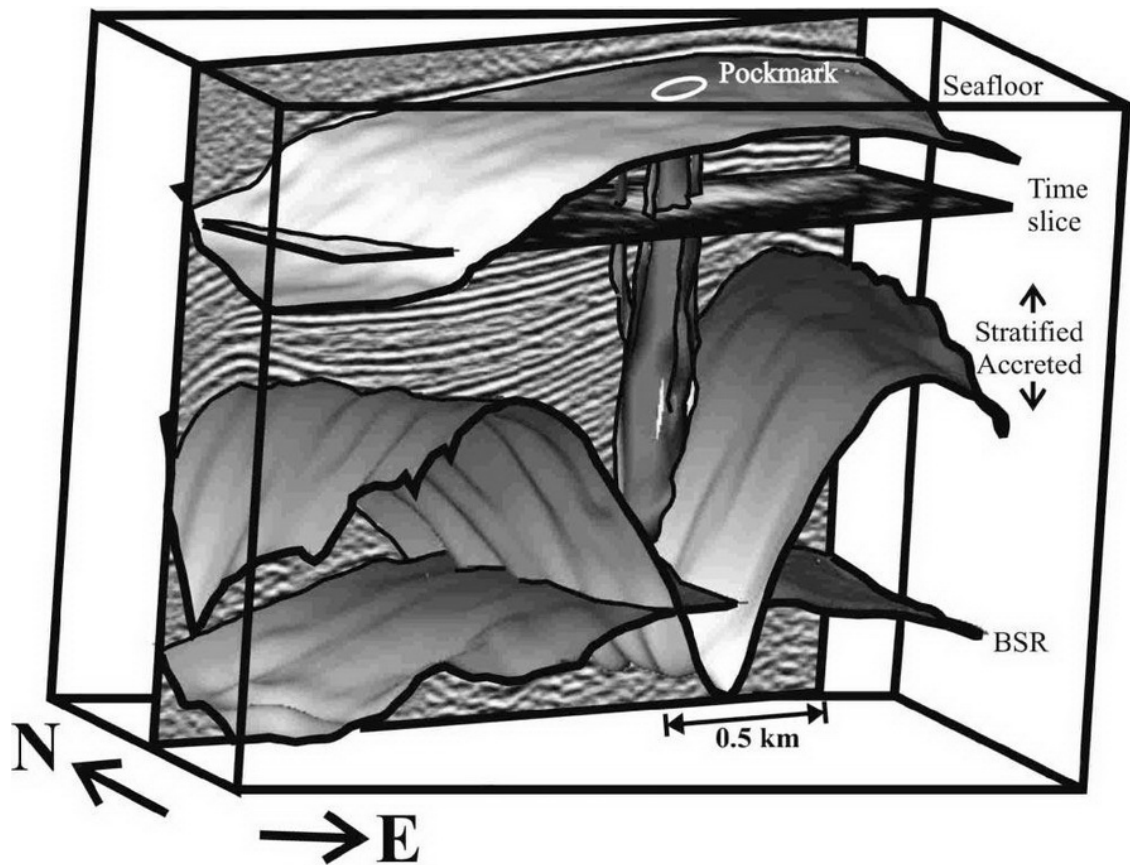


圖 1-14：三維 BSR 分布示意圖。研究區域屬於聚合作用的環境，構造活動引起的液壓破裂形成了通道，提供流體向上移棲的管道。大範圍的震測空白帶(seismic blanking zone)出現在 BSR 上方遠處，暗示其必定有大量足以形成水合物的天然氣衝過水合物層，甚至噴發至海床。(摘自 Zuhlsdorff and Spies, 2004)

第二章 資料處理與分析

2-1 資料來源

研究資料為海研一號研究船 (R/V Ocean Researcher I) 分別於 2004 年之 735 航次及 2008 年之 874、881 航次所蒐集之多頻道反射震測剖面，測線位置如圖 2-1。測線總長約 2358 公里，測線間距從 400 公尺至 100 公尺不等。735 航次測線共 13 條，測線總長約 864 公里；874 航次測線共 10 條；881 航次測線共 76 條，兩航次合併總長約 1,494 公里。各航次之施測參數整理如表 2-1。

2-2 高解析度多頻道二維震測資料處理

本研究所使用之二維震測資料由史菲力博士處理。首先將震測資料轉錄為 SEG-Y 格式後，利用 Landmark 公司震測資料處理軟體 ProMAX 進行資料處理。處理流程如圖 2-2。主要的處理步驟簡述如下。

2-2.1 資料讀取與初步展示

SEG-Y 資料輸入系統之後，在開始資料處理之前，為了檢視原始資料的品質，我們利用近支距展示 (Near trace gather display) 與同炸點展示 (shot gather display) 來確認資料是否有間斷或是其它異常，同時也提供此測線的基本輪廓，以利我們決定後續流程的處理參數。

2-2.2 幾何定位 (Geometry)

震測資料的幾何定位方式，是資料處理流程中最重要的一個步驟。本研究使用同中點/同深點 (common midpoint/common depth point) 法 (以下簡稱 CDP 方法)，將原本依同炸點集合 (common shot point gather) 排序的每一筆訊號，依據其在空間中之炸點-反射點-接收點的位置重新整理成同中點/同深點集合。此法所使用到的施測參數包含了施測頻道

數、頻道間距、炸點間距、儀器佈放的相關位置與深度、同中點間距，以及每一中點集合所包含的範圍(Bin size)等。CDP 方法的目的是在於，將空間中屬於同一反射點的訊號整理並疊加，藉此消除不屬於地層訊號之雜亂雜訊 (random noise) 並提高訊號的訊噪比 (signal to noise ratio, S/N)。

2-2.3 濾波與振幅修正

振幅修正的目的在於，要修正因球面擴散及非彈性衰減造成的振幅衰減，使訊號之振幅能接近原始振幅的狀況。濾波的目的是為了提高訊噪比，降低雜訊提高真實訊號的解析度。在海上作業時，我們會根據聲源的主要頻率範圍決定低切濾波器(low cut filter)及高切濾波器(high cut filter)的參數。資料處理時，再根據頻譜分析決定一帶通濾波器 (bandpass filter)，期望能獲得最真實的訊號，並避免過度修正產生的映頻效應 (aliasing)。

2-2.4 預測解迴旋

震測探勘時，震波訊號與地層反應的關係為迴旋模式(convolution model)，即我們所收到的訊號是聲源訊號跟地層訊號作用之後，再加上雜訊所組成的複雜訊號。除此之外，接收的訊號還包含了具有周期性特徵的規則雜波，如氣泡效應(bubble effect)、複反射(multiple)等。針對這些訊號，我們可以利用解迴旋的方式降低它們的影響。首先利用訊號自對比找出周期性訊號參數:解迴旋操作長度及解迴旋濾波器預測距離。其中，解迴旋操作長度即規則雜波一個週期的長度，而解迴旋濾波器預測距離則是雜波信號從零秒開始到第一個信號之半週期距離。

2-2.5 垂直隔距時差修正 (Normal Moveout correction)

由於同中點法當中，每一個中點所包含的訊號是來自不同的聲源

與接收器距離，所以必須要加以修正，將所有描線(trace)走時都修正成零支距垂直入射的來回走時。欲進行垂直隔時差修正，必須有地層的速度資訊，本研究利用速度頻譜法，每固定數個 CDP 取樣一個 CDP 進行疊合速度分析，再內插出整條測線之重合速度剖面，而後再與震測剖面比較並進一步修正速度值，即可得到合理的速度分析值。

2-2.6 重合 (Stack)

當上述處理都結束後，就可進行同中點的重合。重合是將所有同一中點集合的數條描線疊加成為一條描線，每一中點集合有多少描線進行重合，即稱為重合數。重合的目的是要提高訊噪比，使真實訊號能夠加強，同時降低雜訊。在垂直隔距時差修正良好的情況下，每一中點的重合數越高，訊噪比也越高。

2-2.7 移位 (Migration)

本研究使用二維 F-K 移位 (F-K Migration)。移位處理主要是修正非水平地層及具有破裂面的地層造成震波斜向入射或繞射的現象。經過移位處理之剖面擁有較好的水平解析度，較能反應真實地層之狀況。

2-3 疊合後三維震測資料處理

2-3.1 三維反射震測簡介

在真實空間中，幾乎所有的地下地質特徵如泥貫入體、褶皺、斷層等都是三維構造，這些構造跟我們所發出的聲源波迴旋反映的結果也是三維的波場，而二維剖面就好比是三維波場中的切平面 (cross-section)，剖面當中的訊號同時包含了只來自平面上的訊號以及來自平面外(out of plane)的訊號。若要獲得更好的影像品質，僅對二維訊號做處理是不夠的，針對來自平面外訊號的三維震測資料處理，是

提升震測剖面影像品質的關鍵之一。另外，三維震測也有助於地下構造的空間分析。

典型的海洋三維反射震測調查是進行一連串密集排列沿測線的炸測 (line shooting)，炸測方向 (boat track) 稱為沿線方向 (in-line direction)，而與之垂直的方向稱為橫線方向 (crossline direction, x-line direction)。傳統二維震測調查的測線間距通常較寬，從數百公尺到數公里，而三維震測的測線間距甚至可小到 25 公尺。如此緊密排列的測線勢必需要對聲源與接收器位置有準確的掌握，才能夠獲得較接近真實地下構造的影像。(圖 2-3)

在資料處理方面，三維與二維資料處理的基本原則是相同的。在二維處理中，所有的描線會重新排序成同中點集合 (common-midpoint gather/CMP gather) 最後進行 CMP 重合。在三維資料處理中，描線則是被重新排序成同網格胞集合 (common-cell gather/bins) 並進行同網格胞內描線的重合。(圖 2-4)

實地施測前，需根據研究目的及施測範圍訂定各項施測參數，如測線間距，炸點間距、聲源種類等等，以期能用最高效率、最低成本，達到最高資料品質。由於海研一號並未配備標準的三維震測系統，本研究在僅使用單一聲源與單一接收器電纜的情形下進行炸測，以大量密集排列的二維測線來模擬多電纜多聲源之三維反射震測。可惜的是，我們所使用的震測資料，僅在船身有全球衛星定位系統 (GPS) 的定位資訊，在接收器的部分並未有 GPS 定位，造成三維震測資料處理的困難。所以我們利用先前已處理完畢之二維震測資料進行重合後三維震測資料處理，其原理如圖 2-5，主要的處理流程(圖 2-6)將在下面章節中敘述。透過此方法，即便我們缺少接收器的定位資訊，也能夠進行三維震測幾何的整編，但是相對來說，此法也犧牲掉了往後進行更進

一步資料處理，如三維速度分析和三維移位處理的可能性。

2-3.2 SEG-Y 檔頭改寫。

由於我們是利用重合後之二維震測資料來建立新的三維資料，原本存於各個二維 SEG-Y 檔案的檔頭資訊如測線編號、炸點編號、接收點編號等都已不適用。為了進行接下來的三維幾何定位，我們根據各條測線在空間中的位置，由南往北由西到東重新排序，將原本最南邊的二維測線的最西邊一個 CDP 位置改寫成三維資料中的第一個炸測點，並依序往右遞增。所有二維測線經過檔頭改寫之後，依照順序合併成一個 SEG-Y 檔案供後續處理。

2-3.3 三維震測幾何定位

如前所述，幾何定位的目的在於，透過將每一條描線根據其中點位置重新整理(sorting)成 CDP 集合，讓每一條屬於同一中點的描線相互疊加，以提高訊噪比。要進行 CDP 的 sorting，我們必須清楚的了解每一條描線所屬的聲源、接收點位置，透過幾何計算來得到反射點/中點位置。由於海研一號的震測系統在接收器電纜上並未有定位裝置，我們無法清楚掌握接收器的位置。為了簡化手續，在二維處理中，我們一律假設接收電纜呈一直線從船尾向後延伸，電纜方向與船頭航向永遠呈 180 夾角。在近支距、炸點間距、接收器間距都固定的情形下，我們便能輕易的算出每一條描線所屬的炸點-中點-接收點座標（圖 2-7），並將之分配到其所屬的 CDP 集合。而原本同一 CDP 集合中數條不同支距的描線，在經過 NMO 修正及疊加之後，成為一條零支距之描線。

圖 2-3 所示，在三維震測幾何中，一般會將測線分成平行炸測方向的沿線(in-line)與垂直炸測方向的橫線(簡寫成 x-line)。實際上施測時，接收電纜會受到海流的作用而彎曲，所有描線的中點並不是單純的沿

著 in-line 方向分布，而是根據不同的支距以及電纜彎曲程度而分散在不同的 in-line 上(圖 2-8)。在缺少接收器定位的情形下，傳統的三維幾何定位方法幾乎是不可行的。

為解決定位的問題，我們利用先前已處理完成之二維震測資料來進行三維震測幾何的重新定位，其概念如圖 2-5。在二維中，重合後之震測資料，所有的 CDP 集合分別僅有一條描線，而每條描線皆為零支距垂直入射。我們把這樣的二維震測資料，看做是以零支距、單頻道(channel)之三維震測系統所收集來的三維震測資料，所有三維幾何中描線的炸點、中點、接收點與二維幾何中的 CDP 位置皆為同一點，這樣一來就可解決定位資料不齊全的問題。

此一方法優點在於，利用重合後二維資料零支距的特性，能夠大幅度的降低三維幾何的複雜程度。透過這個方法，只要施測使用的儀器及施測參數相近，我們都有機會可以將之整編成三維震測資料。但是此方法其實是建立在資料不全這個基礎上的應變法，所有的描線位置都是在接收電纜呈直線這個前提之下所計算出來的。

完成了測線幾何的調整之後，我們就可以開始規劃三維幾何的網格(grid)參數，每一個網格胞(grid cell)代表三維震測中的一個 CDP 集合，如圖 2-9。網格參數包括了 in-line 間距、x-line 間距、網格原點、網格旋轉角度、in-line 數目、x-line 數目。設計網格的目的是為了盡量讓所有的網格胞都能夠有最大的重合數，同時也必須考量到是否能符合真實的地質狀況，以避免讓不屬於同一個地層反射點的描線落進了相同的網格胞。原則上，網格參數的設定必須考量到資料本身中點分布的狀況，中點分布得越密，網格間距就可以越小，空間的解析度也會越高。相對的，若是網格間距小於資料點間距，則每一個網格的重合數會降低，甚至可能出現零重合數的情形。

由於本研究是利用二維資料重新整編，所以網格參數已在二維處理時大致決定了，我們需要考慮的是，是否需要使用較大的網格來提高重合數，避免過多的空白網格出現。本研究所使用的網格參數如表 2-2。

2-3.4 三維重合

理論上，原始資料在經過同網格集合的排序之後，即可以進行重合，將屬於同一網格胞之描線疊加藉此提高訊噪比。由於本研究是利用已經處理過的二維資料，所有的描線都已經於二維處理時修正回零支距的位置，因此我們不需要也不能再進行重合速度分析及 NMO 修正，而係依分布在各三維網格胞中的重合後零支距描線組合成為三維資料方塊(3D volume)，其中包含東西向的 in-line 92 條，南北向的 x-line 1431 條，深度為雙程走時 0 到 4 秒。圖 2-10 顯示為椅型切割(chair cut)之三維資料方塊，配合 Seismic Micro-Technology 公司的 KINGDOM 軟體進行震測資料的三維視覺化，進行資料的分析與解釋，將於第三章中說明。

表 2-1：各航次施測參數。

航次	測線數	頻道數	聲源型式	取樣率
MCS-735	13	24	Air gun 275 + 150 in ³	2 毫秒
MCS-874	10	48	Air gun 275 + 150 in ³	1 毫秒
MCS-881	76	48	Air gun 275 + 150 in ³	1 毫秒

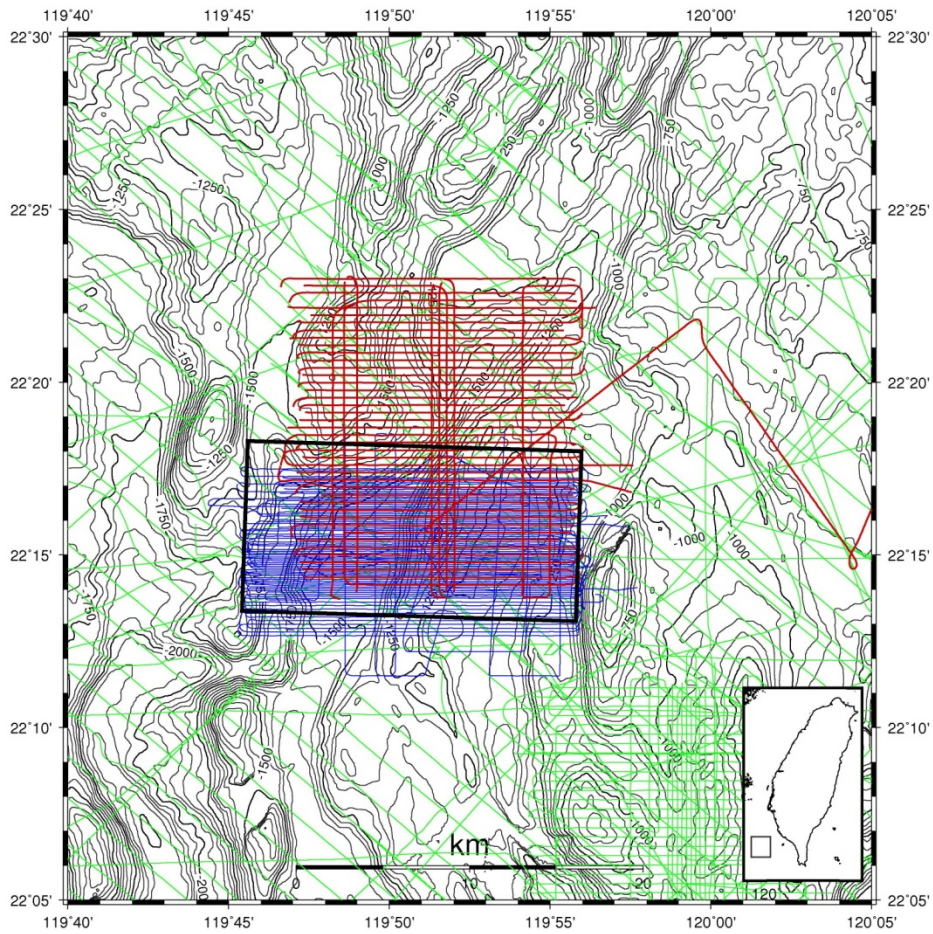


圖 2-1：震測資料分布圖。紅線為 MCS735 航次，藍線為 MCS874、MCS881 航次之測線分布位置；淺綠色線為其餘航次之測線；黑色框線為本研究整編之三維震測資料分布範圍。底圖使用之等高線間距為 50 公尺。要注意的是，由於 MCS735 航次與 MCS874、MCS881 航次所使用之資料收集系統不同，資料品質本身就有不同。

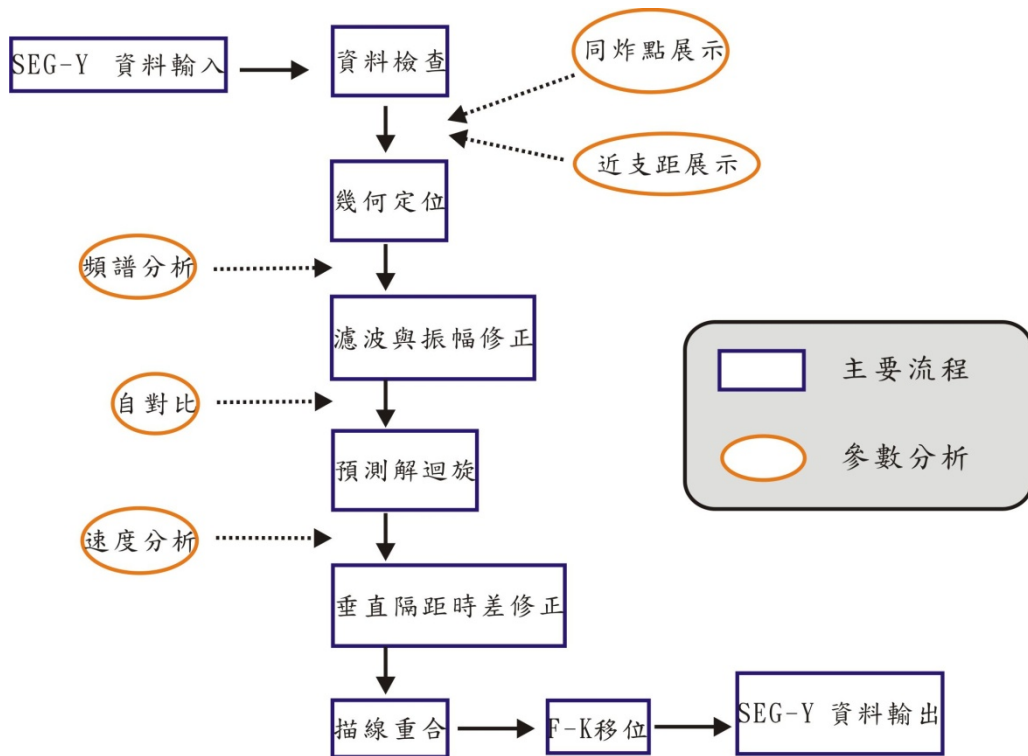


圖 2-2: 二維資料處理流程圖。藍色方格為主要流程，橘色為參數分析之處理步驟。

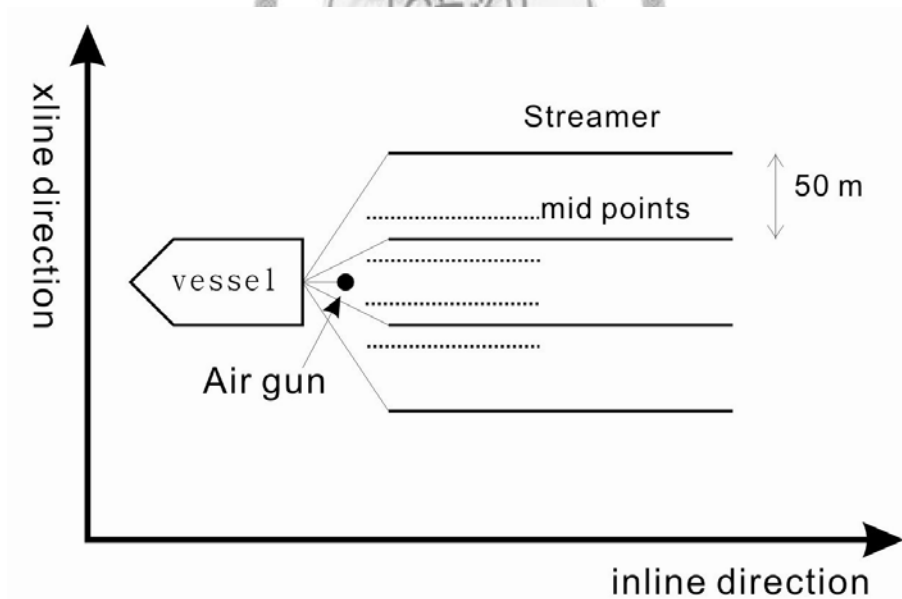


圖 2-3: 單聲源多電纜三維震測作業示意圖。為了提高三維震測的資料密度，多電纜型式的三維震測作業方式常被採用。以本圖為例，4 條電纜的間距為 50 公尺，則反射點在橫過測線的 x-line 方向的間距可以縮小到 25 公尺。

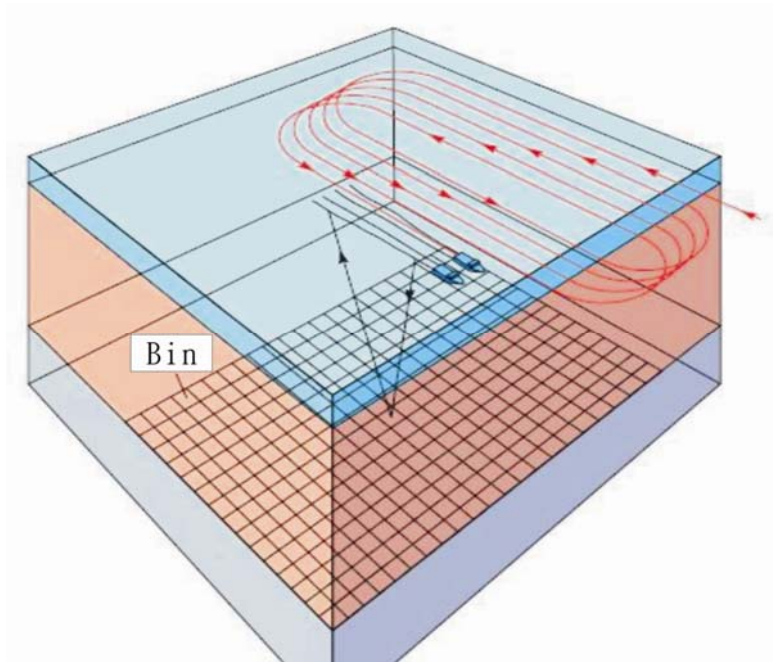


圖 2-4：三維震測網格示意圖。紅色線為船測航跡，底部的方格表示三維震測同中點網格胞分布。(修改自 Ashton et al., 1993)

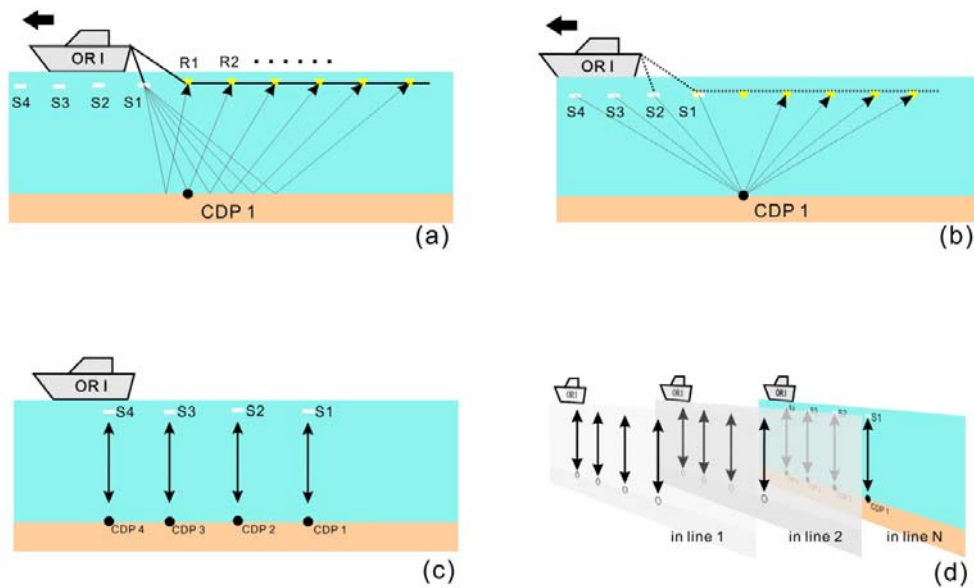


圖 2-5：三維震測幾何示意圖。(a) 二維震測之同炸點集合。S1、S2 等代表聲源位置。(b) 同中點集合。隨著炸點的前進，同一反射點可得到不同聲源-接受器組合之描線。(c) 經過重合後之震測資料，每一個中點僅有一條描線。(d) 將所有重合後之二維剖面依序併排，即可進行三維幾何定位。

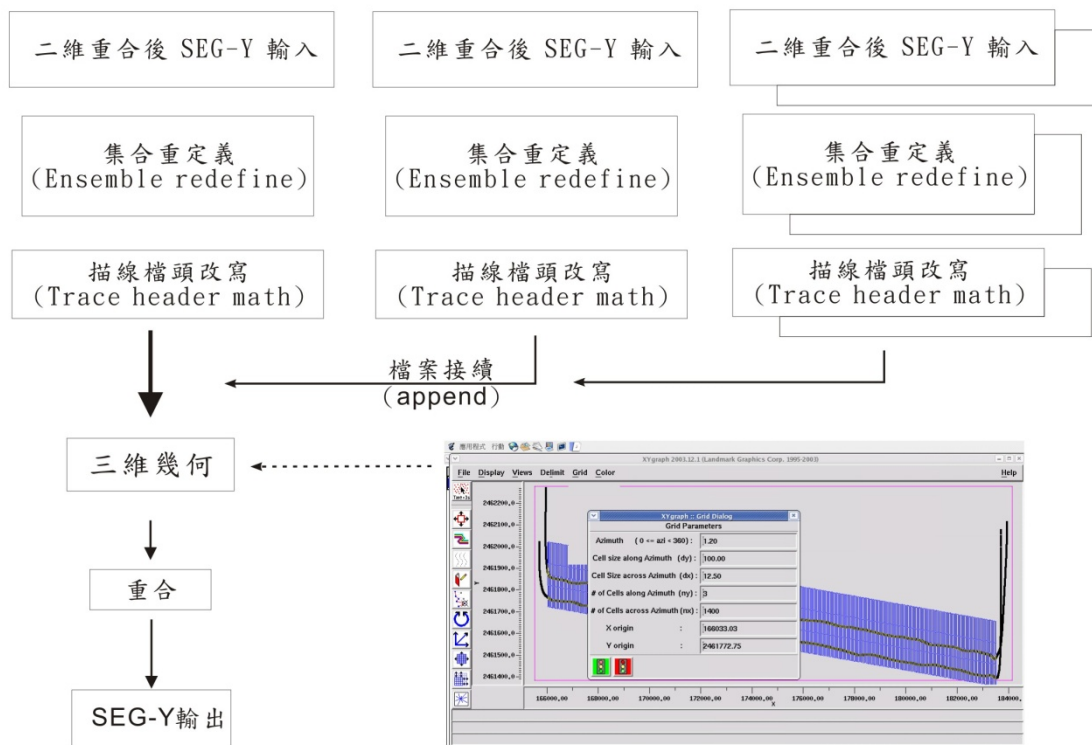


圖 2-6：三維資料處理流程圖。操作流程名稱是根據 ProMAX 資料處理軟體。

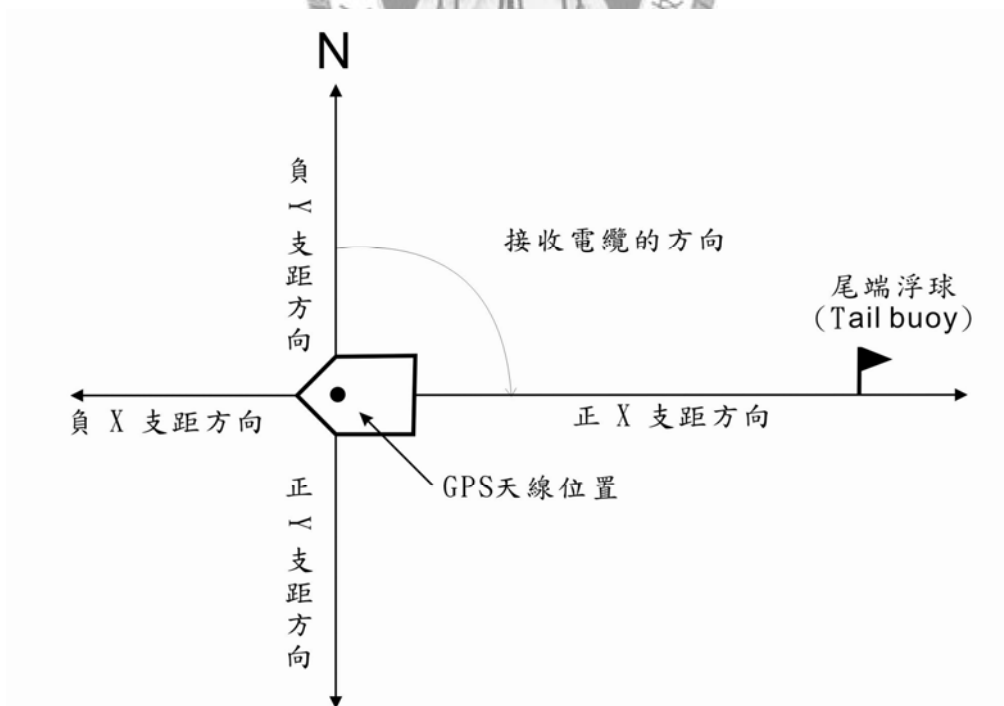


圖 2-7：二維單聲源單電纜震測施測幾何。(修改自 ProMAX 軟體操作手冊)

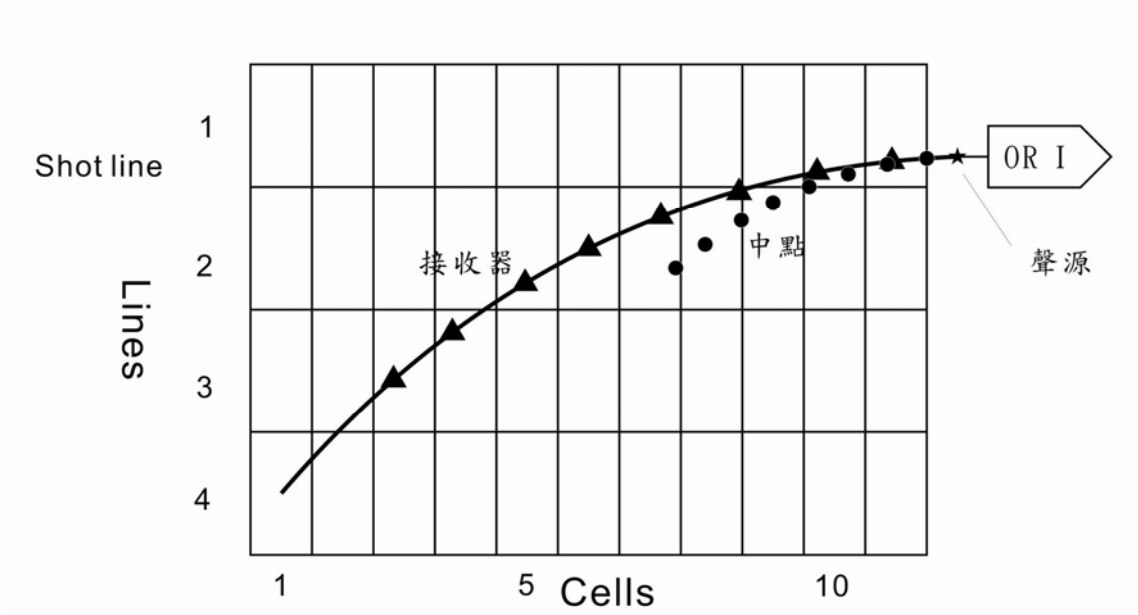


圖 2-8：中點分布擴散。時計施測時，受到海流影響造成接收電纜有羽狀現象 (feathering)，造成中點分布不均。(修改自 Yilmaz, 1987)

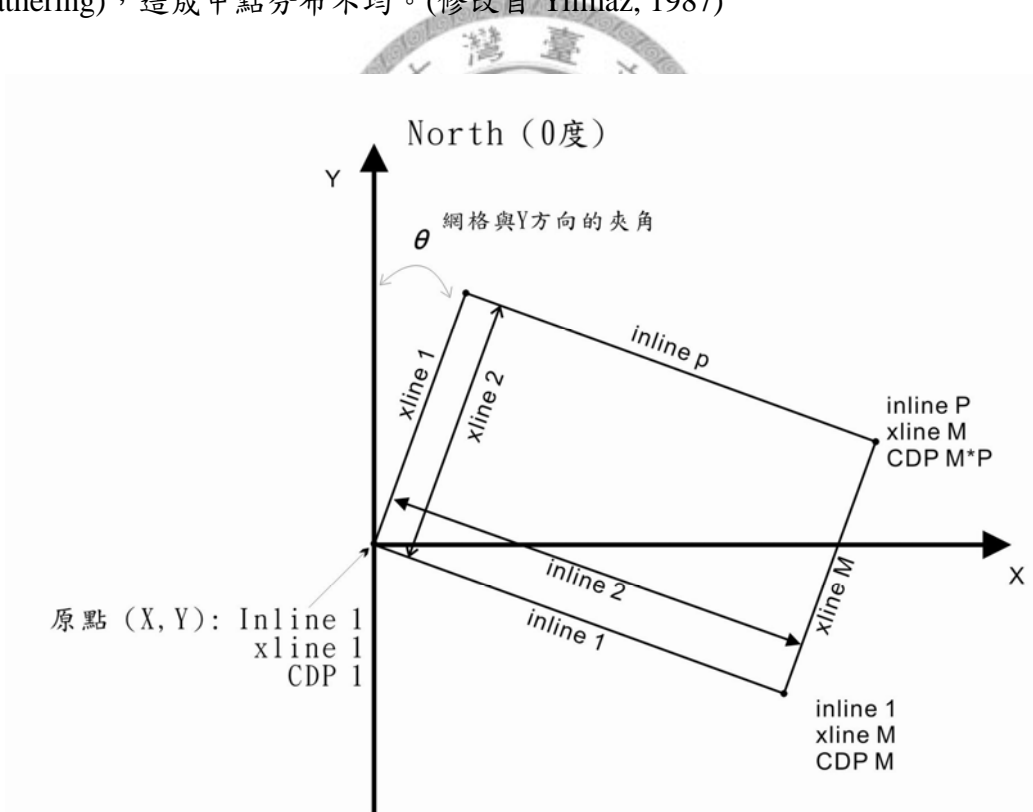


圖 2-9：三維網格參數示意圖。制訂三維網格時需要考量的參數有 in-line 數目、xline 數目、in-line 間距、xline 間距、網格原點、旋轉角度。(修改自 ProMAX 軟體操作手冊)

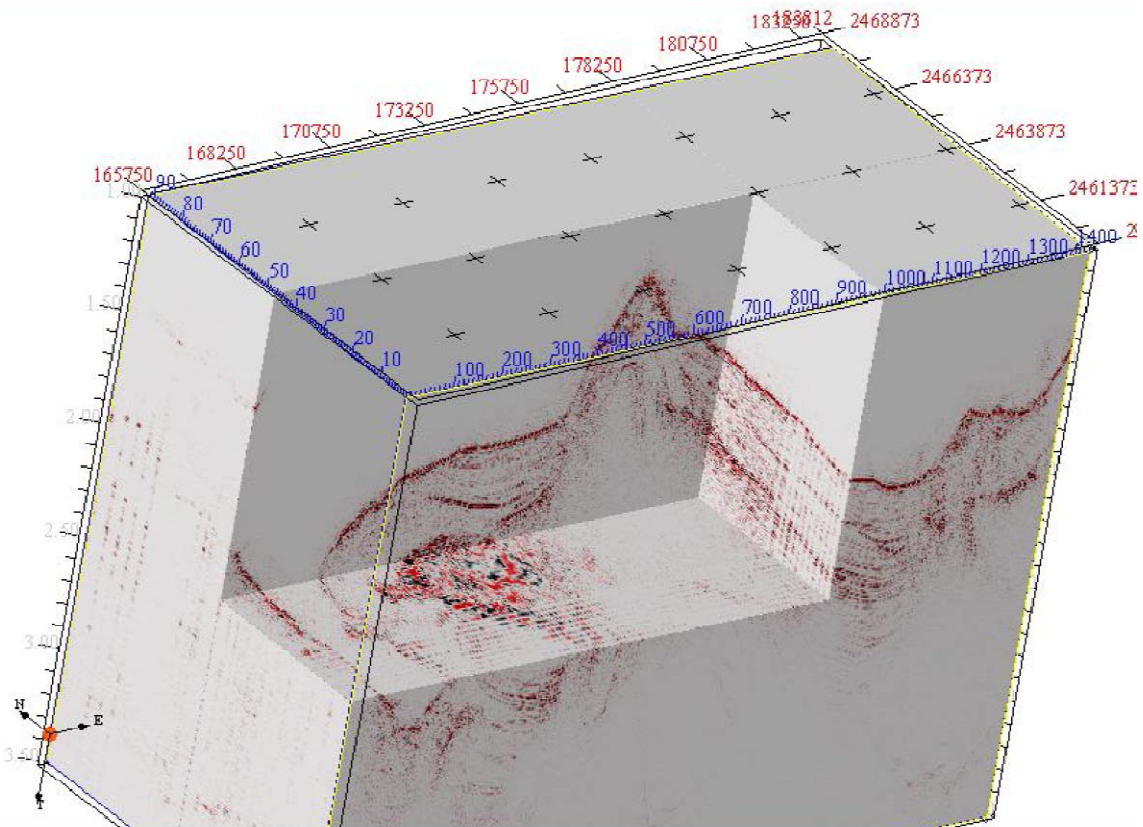


圖 2-10：處理完成之三維方塊震測資料。方塊南端的空白部分是因為測線間距為較寬的 200 公尺而非 100 公尺。

表 2-2：三維網格震測資料方塊參數。

in-line 數	92
in-line 間距	100 公尺
xline 數	1431
xline 間距	12.5 公尺
網格原點	(經度 , 緯度) = (119.757 , 22.232)
網格旋轉角度	1.2 度

第三章 研究成果

3-1 三維 BSR 分布

本研究利用震測資料解釋軟體 KINGDOM，將整編完成的三維震測資料予以三維視覺化展示，如圖 2-10。本研究的第一步是要先將震測訊號中的 BSR 挑選出來。在辨識 BSR 的方式上，Lee et al. (1994)於美國東南大陸斜坡的研究中將 BSR 依據反射係數的強弱分成三類，第一類稱為 strong BSR(簡寫成 S-BSR)，其波峰-波谷偶極(doublet)之波谷(振幅為負值)視反射係數小於-0.1；第二類稱為 weak BSR(簡寫成 W-BSR)，其波谷之視反射係數大於-0.05；第三類稱為 inferred BSR(簡寫成 I-BSR)，其反射係數之絕對值也大於-0.05。W-BSR 與 I-BSR 的不同在於，W-BSR 在震測剖面上振幅較 S-BSR 小且連續性較差，BSR 反射僅勉強可見且 W-BSR 時常會與 S-BSR 相連，而 I-BSR 於剖面上的辨識度要比 W-BSR 差，但是依然可以根據附近的強振幅異常來推斷可能的 I-BSR 位置，如圖 3-1。

本研究雖然沒有進行 BSR 反射係數的分析，但是我們依然可以根據前述的原則對 BSR 作挑選。在 BSR 的分析及選取策略上，本研究僅挑選剖面中有出現較強 BSR 特徵且空間連續性分布較佳的部分，其餘弱 BSR 反射或是僅於天然氣水合物預測穩定帶(predicted BGHS)下方有強振幅異常但極性反轉特徵不明顯且空間分布零散的部分，則予以排除，挑選的結果可以用圖 3-2 表示。

3-2 研究區域

研究區域位於北緯 22 度 15 分，東經 119 度 50 分的永安海脊及鄰

近區域。永安海脊位於高屏下部陸坡之前段與後段的分界線上。如前所述，下部陸坡的前段與後段在構造特徵上即有所不同，而永安海脊為一受出露逆斷層拱起的背斜。背斜左翼陡峭而右翼較平緩，海脊下方地層平行且向東傾斜(圖 1-7)。

從地形圖來看，研究區域內可分成幾個主要的地貌特徵。由西至東分別是澎湖峽谷、永安海脊、斜坡盆地(圖 3-3)。澎湖海底峽谷源於活動與非活動大陸斜坡交會處(Yu and Chang, 2002)，眾多支流分布於斜坡上並向南延伸。其中兩條支流於研究區域外圍永安海脊的最北端交匯，同時轉向西，再於研究區的最西端與另一條支流交匯並再度轉向南。永安海脊位於研究區正中央，海脊軸部呈北北東-南南西走向。海脊兩側各有一個小型的斜坡盆地，西側盆地海床較為平坦，於澎湖峽谷谷壁可見疑似崩塌的現象。東側盆地東鄰另一出露逆斷層並終止於好天氣海脊(Good Weather Ridge)。

3-3 震測特徵與構造的關係

利用三維視覺化的技術，我們可以將地形、震測剖面、BSR 分布做結合，針對 BSR 的分布與構造、地形的關係做討論，並歸納出幾點特徵，以下將針對此筆資料，由西至東，以澎湖峽谷、埋藏水道區、永安海脊、斜坡盆地西緣、斜坡盆地東緣等，分成五個區段分別進行探討。

3-3.1 澎湖峽谷

在澎湖峽谷的部分，由於此區域位於調查範圍較外側，資料密度較低，因此在三維震測影像上較為模糊，使得 BSR 的存在較不容易辨認。從圖 3-2、3-4 中可看出，BSR 在峽谷區的分布較集中於峽谷支流

之間尚未受到侵蝕的高區，而峽谷內部則不容易辨識出 BSR。此區域從大約北緯 22 度 17 分以南，強 BSR 僅少量出現於峽谷兩側谷壁，而峽谷底部僅有微弱之疑似 BSR 的訊號間斷出現。綜合三維與二維震測資料可以發現，於峽谷地區，BSR 在東西方向上的連續性普通，BSR 振幅於峽谷的兩側較強而峽谷中央較弱。但在南北方向上連續性不良，BSR 的強弱變化非常的不規則，但大致上可看出峽谷的地區的 BSR 是北多南少。峽谷兩側谷壁可見許多崩塌，而峽谷底部並未有明顯的沉積物堆積(圖 3-5)，說明峽谷內部處於侵蝕的環境。綜合以上觀察，我們認為峽谷下方 BSR 振幅較弱是因為峽谷的侵蝕切割使得峽谷加深，迫使天然氣水合物穩定底界(BGHS)向下移動，天然氣水合物重新調整，而原本為游離氣填充的地層孔隙一部分開始形成水合物，震波阻抗對比度降低，BSR 振幅強度也就降低。上述的 BSR 變化可以圖 3-6 說明。

類似的現象於其他地區也曾經被報導過，例如台灣東北方的 Nankai Trough, Ashi et al. (2002)認為在海底峽谷內，活躍的侵蝕作用帶走海床表面的沉積物，改變海床下之溫壓條件，對水合物而言形成了一個不穩定的環境，BGHS 因之向下移動，BSR 振幅減弱甚至消失。另外，陡峭的斜坡地區常有崩塌，快速且大量的沉積物移動也會造成 BGHS 不穩定。

3-3.2 埋藏水道區

峽谷東側至永安海脊下方出露逆斷層之間現為一斜坡盆地。從沿線切面(in-line section)來看，盆地北部緊鄰澎湖峽谷匯合與轉向處，內部的沉積層序混亂不容易辨認且 BSR 連續性較差(圖 3-7a)；而盆地中部與南部則擾動較少，BSR 與地層反射較清楚且連續，BSR 上方亦可清楚的看見空白帶(圖 3-7b、3-7c)，顯示中部、南部是較能夠穩定保存水合物的環境。圖 3-2 指示了盆地中央有大範圍的 BSR 分布，若從雙

程走時 2400 毫秒的時間切面(圖 3-8)來看，BSR 下方地層呈現因游離氣填充造成的強振幅異常呈矩形分布，寬約 4 公里，長約 8 公里，厚度最大約雙程走時 300 毫秒，此一強振幅異常幾乎涵蓋整個盆地，BSR 上方亦明顯呈現訊號空白(blanking)。

陳冠宇 (2006)根據震測以及地形資料認為澎湖峽谷的變化可以分為四期，如圖 3-9 所示，暗示了澎湖峽谷的位置在本研究的範圍內從 1.85 個百萬年前(Ma)至今可能有三次較大的變化。利用三維震測方塊在此區段切一西北東南向的垂直剖面，可以隱約看出古澎湖峽谷的位置(圖 3-10)。由於此區域過去 1.85 個百萬年都在澎湖峽谷的流域範圍內，粗顆粒的濁流沉積物填充在已經被廢棄的舊水道內，隨著澎湖峽谷向西移動，沉積物逐漸將氾濫區填平。這些水道沉積物擁有良好的孔隙率與滲透率，對於水合物跟游離氣來說都是良好的儲存介質。因此我們推測在本研究的古峽谷填充區，良好的介質加上大量的含甲烷氣流體是形成如此大範圍 BSR 與振幅異常的原因之一。

3-3.3 永安海脊

永安海脊為受斷層作用而傾斜抬升的背斜構造(Lin et al., 2008)。從圖 4-1.2 可看出海脊西翼與東翼的 BSR 分布差異相當明顯，西翼幾乎不存在強 BSR 反應。從震測剖面(圖 3-11)上可見到，海脊內部地層訊號呈平行或次平行且連續的反射並向東傾斜。斷層切過海脊下方並出露於海脊西側，同時將 BSR 以及下方的振幅異常切分成兩個區段，而位於斷層下盤的振幅異常較不明顯。在海脊下方，強振幅的地層訊號間隔出現，一部分的振幅異常甚至出現於 BSR 上方(圖 3-12)，此一異常訊號在時間切面上也可發現。過去認為在 BSR 上方為天然氣水合物填充孔隙，BSR 下方則聚積游離氣，因此在震測剖面上，BSR 上方形成震測空白帶而下方出現強振幅異常。而永安海脊所觀察到 BSR 上

方的振幅異常是否是游離氣造成的並不清楚。若是游離氣造成的，或許是受到斷層以及傾斜的地層影響，形成良好的流體移棲通道，在地質環境不穩定以及流體供應量較大的情況下，一部分甲烷氣與水合物可能共存於地層孔隙內。

3-3.4 斜坡盆地西緣

海脊東側為一斜坡盆地，盆地內部沉積層厚度由沉積中心向西變薄並收斂。盆地西緣及盆地內部的 BSR 訊號清楚且連續，幾乎覆蓋整個盆地(圖 3-2)。盆地西緣的 BSR 下方有明顯的強振幅異常，此一異常現象往東漸不明顯。BSR 下方的地層明顯可以看到強振幅間隔出現，越接近 BSR 下方振幅增加的現象越明顯。從圖 3-13 中永安海脊與盆地交界處(圖 4-2.9，黃色箭頭處)可以發現，振幅異常有向上超過 BGHS 的現象，同時 BSR 在此中斷。我們認為是因為此區地層略為向東傾斜，若是盆地中的沉積物是以高、低滲透率的地層互層沉積形成平板狀的通道，流體在移棲時自然會沿著地層面向西集中。若是流體的供應量較大，可能會有一部分的甲烷氣來不及轉變成甲烷水合物，因而造成了在 BSR 以上氣體與天然氣水合物共存的現象。

3-3.5 斜坡盆地東緣

海脊東側斜坡盆地之東緣終止於另一個出露逆斷層(Lin et al., 2008; 林哲銓, 2005)，從三維 BSR 分布(圖 3-2)可知此區域的 BSR 分布相較於盆地西緣要來得少，而北部又多於南部。從震測剖面上來看(圖 3-13)，這裡的 BSR 訊號較弱且不連續，而斷層作用使得地層較為破碎，從反射訊號上不容易辨認。另外，從震測剖面上可以發現一個垂直煙囪狀的訊號空白(seismic chimney)緊鄰著盆地東緣及斷層，此一煙囪狀訊號藉由時間切面還可向兩側延伸而呈帶狀分布(圖 3-14)。類似的訊號時常與斷層、BSR、pockmarks 同時出現，Gay et al. (2007)、Horozal et

al. (2009)都發現有類的反射特徵，被認為是流體活動的證據。斷層提供了流體移棲的管道，流體沿著斷層面向上移動，同時填充附近的裂隙與孔隙爾產生煙囪狀的震測訊號。

3-4 永安海脊流體移棲的可能模式

綜合上述觀察，並比對國內外對天然氣水合物反射特徵與流體移棲關係的例子，我們建立了永安海脊下方流體移棲可能的模式，如 3-15。影響永安海脊 BSR 或天然氣水合物分布的機制可以分為受構造活動以及受沉積作用影響兩類，前者如斷層、裂隙等；後者如海底峽谷侵蝕、崩塌、地層限制、孔隙率變化等。

在峽谷區，澎湖峽谷內的侵蝕下切改變了海床下的溫壓條件，BGHS 向下移動而原本的游離氣帶(free gas zone, FGZ)開始生成新的天然氣水合物，消弭了原本 BSR 上下的波阻抗差異，連帶的使 BSR 振幅減弱。峽谷兩側的谷壁常有滑動(slumping)、海底山崩(submarine landslide)、濁流等現象發生，這類快速的塊體運動可能也是造成水合物不穩定的因子之一。海底峽谷的位置受到構造影響而變動，粗顆粒的濁流沉積物時常填充在已經被廢棄的舊水道內。隨著澎湖峽谷向西移動，沉積物逐漸將古水道以及氾濫區填平，到今日以斜坡盆地的形式持續堆積沉積物。少了斷層或是侵蝕作用的影響，水合物能夠穩定的生成，而孔隙率較高的砂質濁流沉積物也提供足夠的空間聚集游離氣。在永安海脊下，斷層活動使上盤地層向東傾斜，流體可能順著斷層破裂面快速向海床表面移動，開放而沒有沉積物封閉的海脊西側或許是造成此區 BSR 不明顯的原因。而海脊東側，高低滲透率的地層互層形成平板狀的管道，流體受自身浮力作用沿著管道向海床表面移棲，

但是在沒有斷層通過的情形下，相對較慢的移棲速率使水合物及游離氣有機會被保留下來，因此我們在震測剖面上(圖 3-11)明顯發現海脊兩翼的反射特徵有相當大的差異。在斜坡盆地內，傾斜的地層使得流體自然向西集中，形成大範圍的振幅異常。斜坡盆地的東緣同樣也是受到斷層影響，流體快速活動可能形成噴發或是煙囪構造。

永安海脊附近地區的天然氣水合物系統，可分為天然氣來源、移棲途徑、水合物生成環境三方面來討論。其中天然氣的來源單純以此筆三維震測資料不容易辨別，在此不作討論。在移棲途徑上，藉由三維震測資料可以看出，斷層或是傾斜的地層是提供流體移棲的重要管道。Schnurle and Liu (2010)的研究中利用永安海脊附近的震測資料，分析斷層面或地層面的傾角與流體活動速率的關係，如圖 1-9 所示，以永安海脊東翼有最大流速而斜坡盆地東緣次之，其結果與本研究的結果或可做為對照。而流體靠著自身浮力作用穿過地層垂質向上移動，這樣的過程雖然相對緩慢，但是在穩定的沉積環境下仍然形成大範圍的天然氣水合物及游離氣層。在水合物的生成環境方面，穩定而較少構造活動或侵蝕作用的沉環境是聚集天然氣水合物與游離氣的重要元素之一。另外，以粗顆粒沉積物為主的高能量沉積環境也提供了充足的孔隙空間來儲存天然氣水合物。

藉由觀察三維震測資料，BSR 在空間中的分布能夠清楚的被描繪出來，但受限於施測方法以及資料品質，單純利用這筆三維資料較難有定量上的分析，倘若能配合海床表面的觀察、地球化學的分析、地熱異常分析、甚至鑽井的岩心資料、井下測量等，相信能提供更多的資訊來驗證上述的機制。

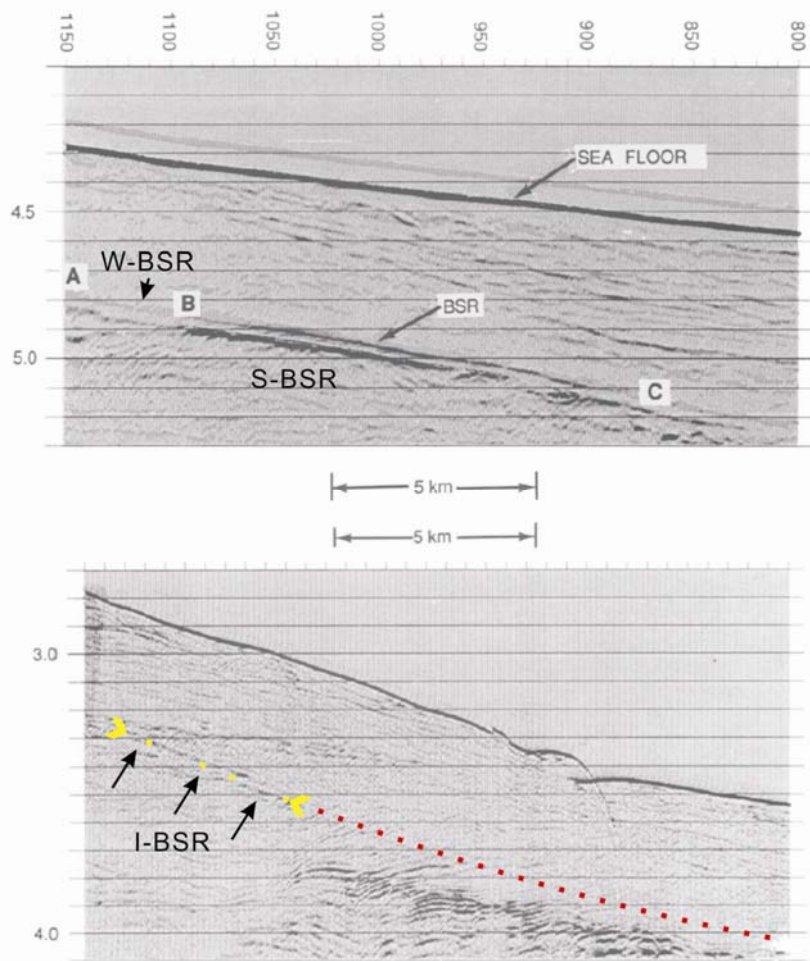


圖 3-1：BSR 分類。上圖 A、B 之間為 W-BSR，B、C 之間為 S-BSR。下圖黃色虛線內指示了 I-BSR 可能的位置，而紅色虛線代表游離氣與水合物可能的相界(phase boundary)。修改自(Lee et al., 1994)。

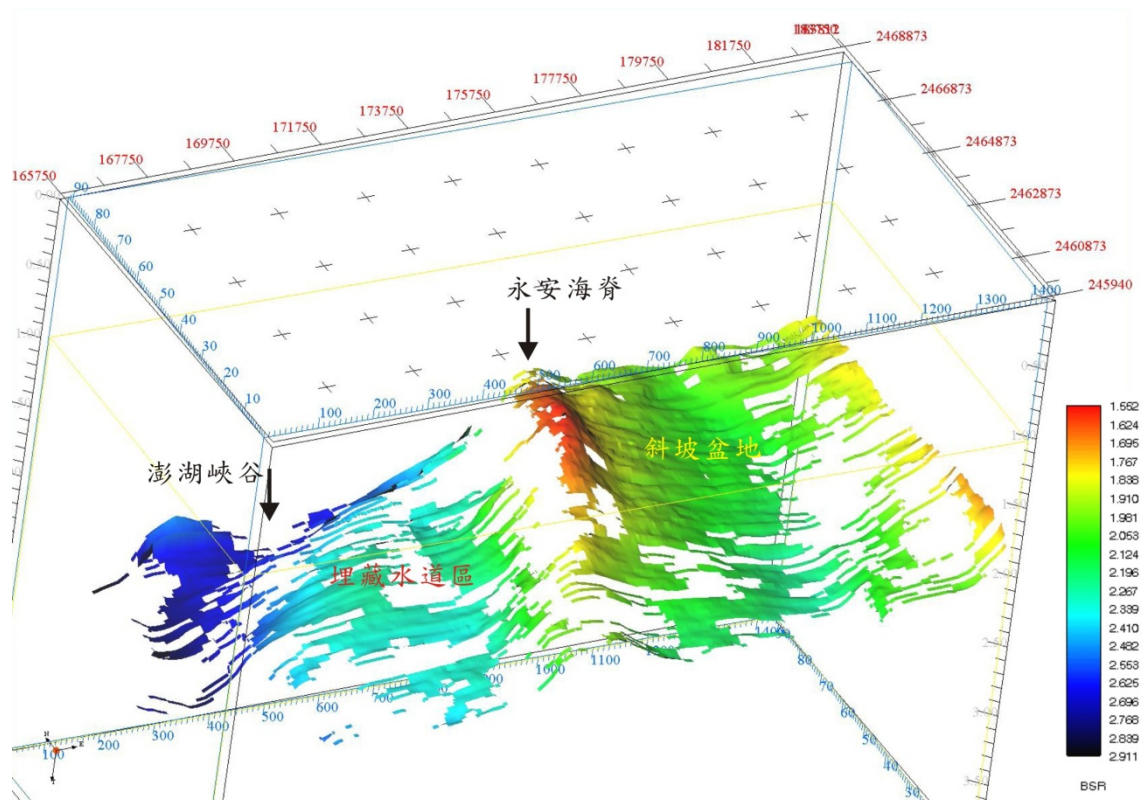


圖 3-2：BSR 於空間中的分布。顏色代表 BSR 距離海平面的深度，以雙程走時表示，單位為秒。觀察視角是從研究區的西南方往東北方俯視。

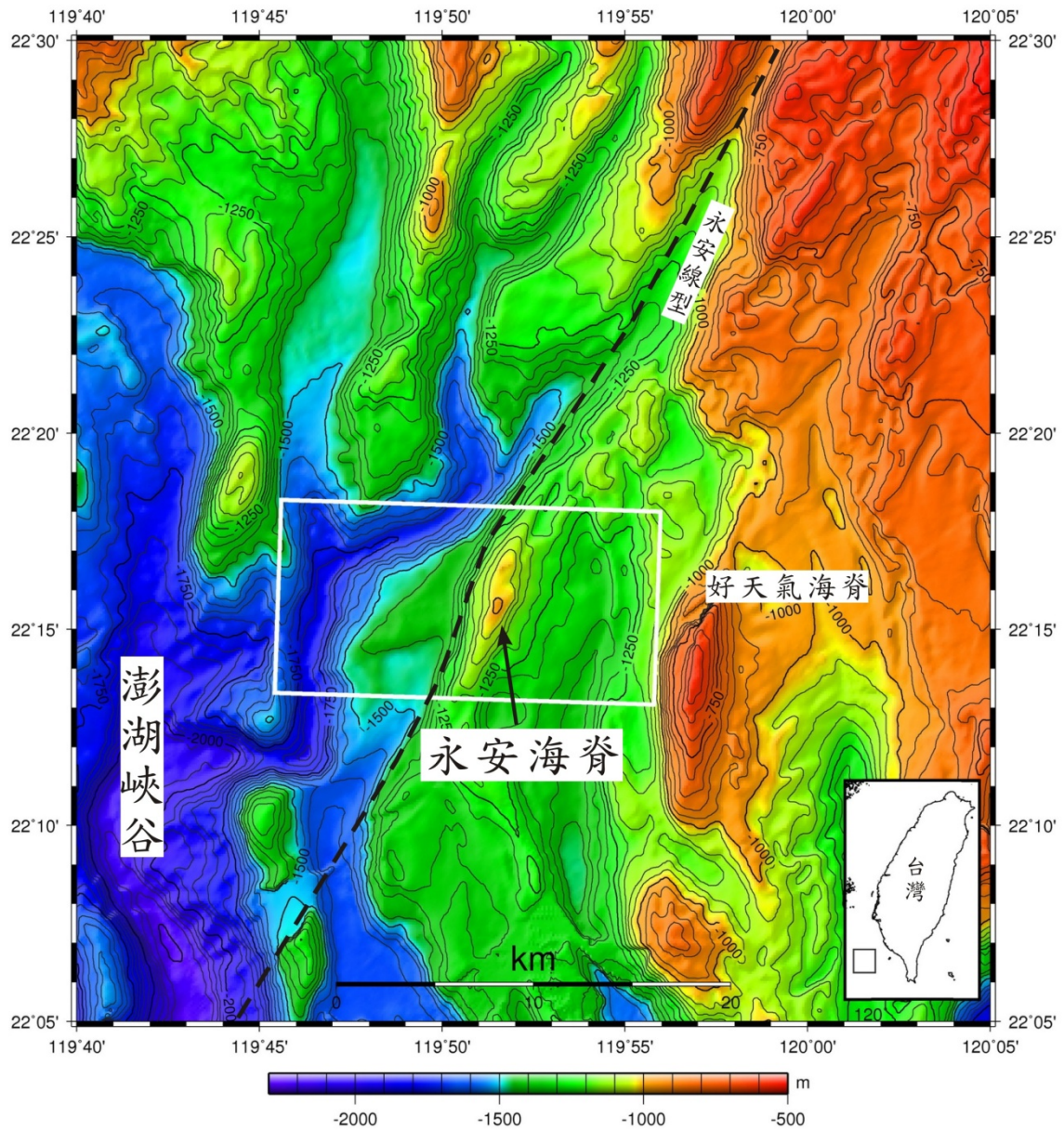


圖 3-3：研究區域彩色繪影地形圖。白色框為三維震測資料分布範圍。永安線型為一線型構造，自高屏陸坡沿著澎湖峽谷支流其一向西南方延伸至永安海脊南方。永安海脊為一斷層抬升之背斜式海脊，脊軸呈北北東-南南西走向。周圍水深從澎湖峽谷的 2200 公尺到永安海脊頂部約 1000 公尺深。

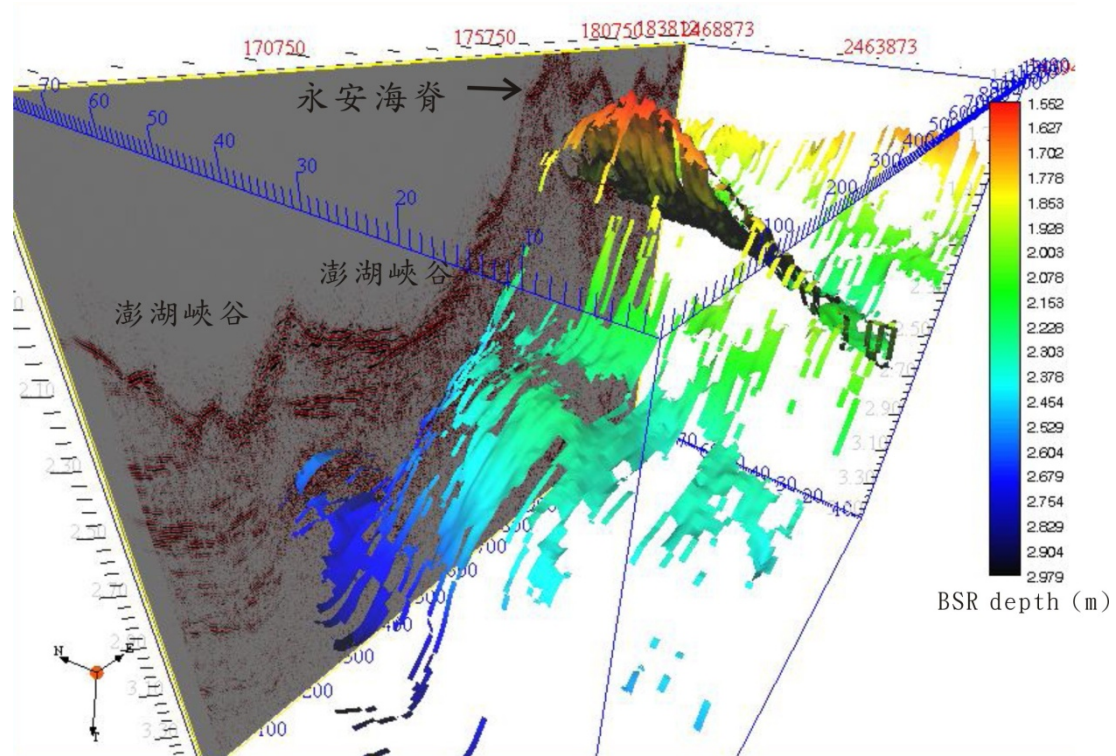


圖 3-4：震測剖面與三維 BSR 分布。圖中所示剖面為 in-line 90，研究區域之西北端，分別有兩條澎湖峽谷的支流進入此區域。左側的支流呈南北向，右側的支流呈東北西南向。對照圖 3-2 之地形圖可知兩條支流中間為一相對高區，海床沉積物較峽谷內部相對穩定使得下方水合物能夠穩定存在。

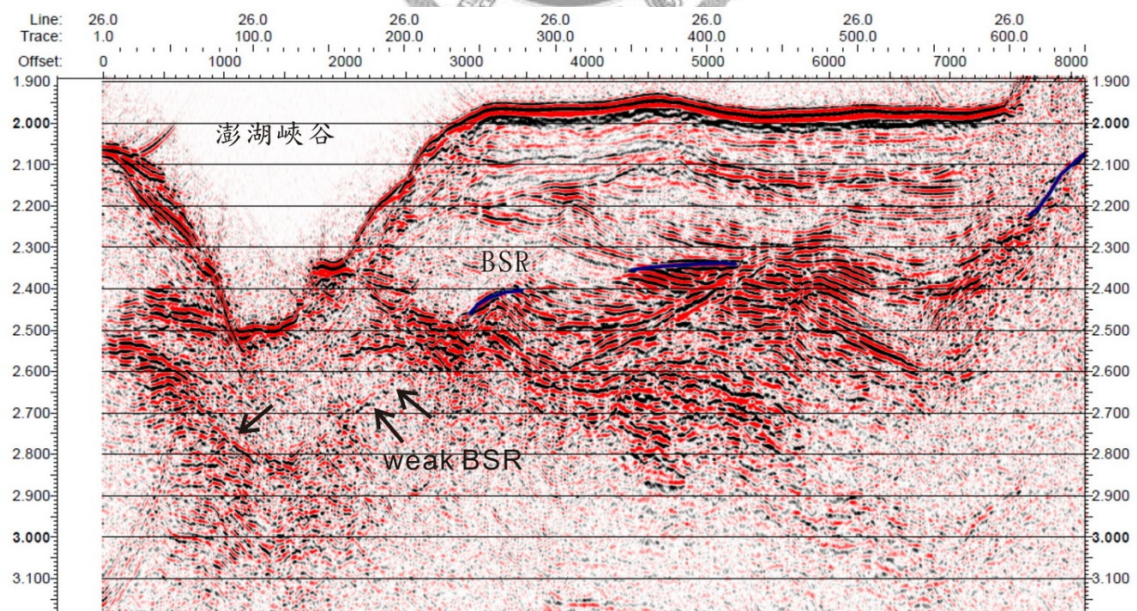


圖 3-5：In-line 26、x-line 1~650 之垂直切面。深藍色線為 BSR，箭頭指示處可見微弱的 BSR 訊號。

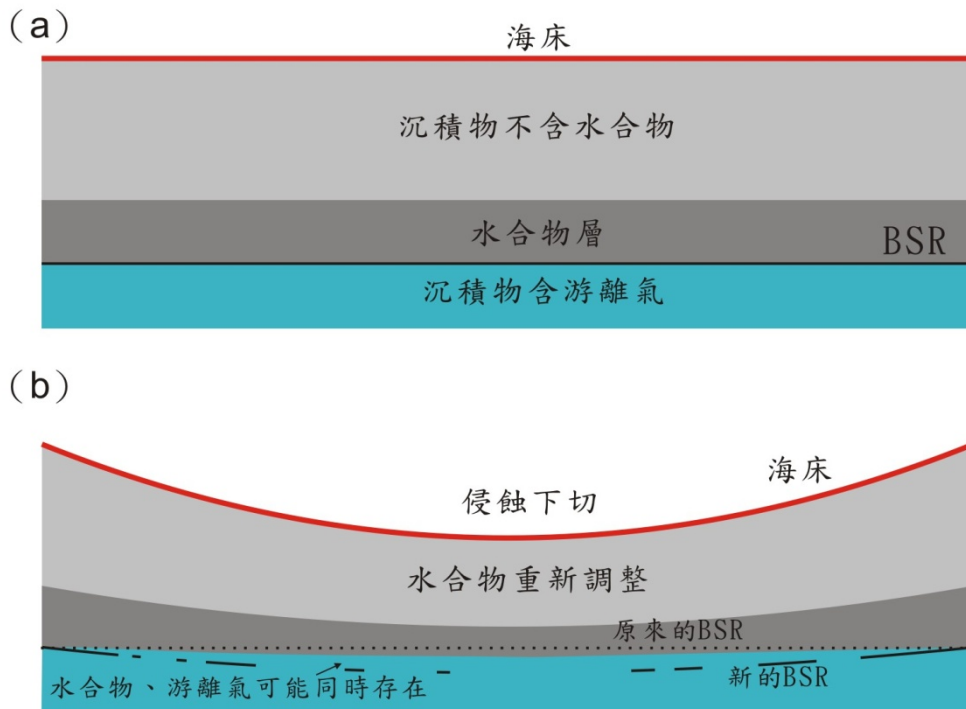


圖 3-6：水合物重新調整示意圖。(a) 原始情況，侵蝕與沉積作用處於平衡的狀態，或是沉積作用不明顯。(b) 當海床表面侵蝕速率加大，海床表面快速的下降同時水合物底界開始調整，若水合物形成的速率較慢，新的水合物穩定底界上下波阻抗差異較 a 情形下小，則 BSR 振幅可能較弱且連續性差。而 BSR 附近的沉積物孔隙中可能同時存在水合物與游離氣。

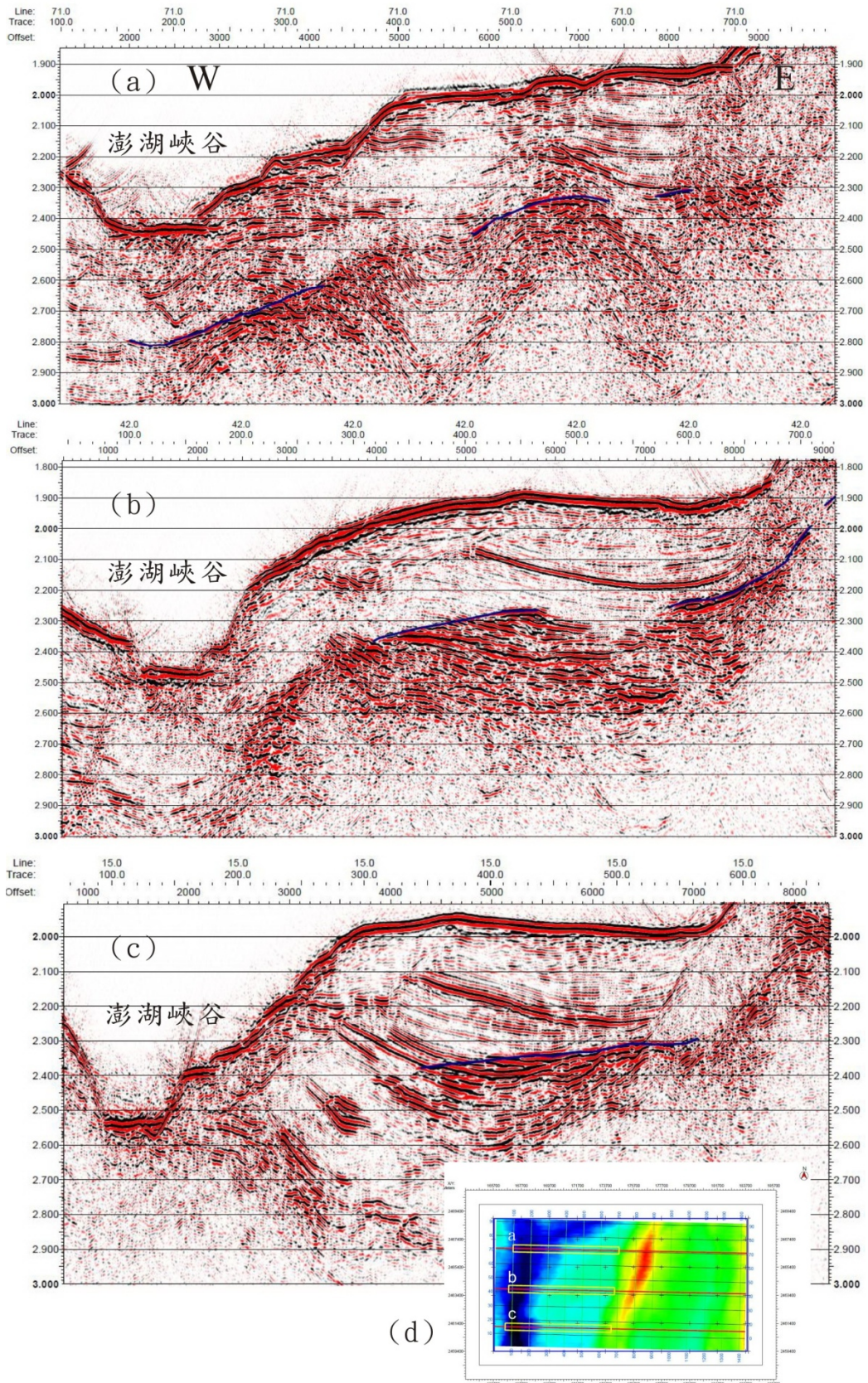


圖 3-7：埋藏水道區之震測剖面。(a)、(b)、(c)各為 in-line 71、42、15 之震測剖面。(d)為剖面位置示意圖，黃色方框即上方三條剖面所展示之範圍。

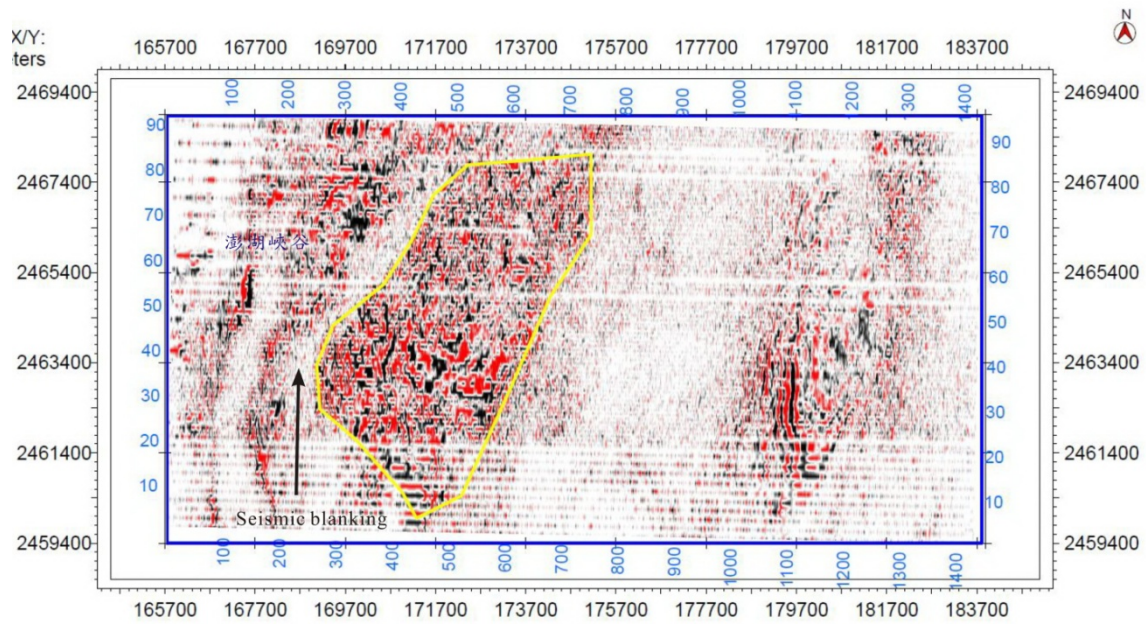


圖 3-8：雙程走時 2400 毫秒之時間切面。黃色圈選處為游離氣填充之強振幅異常，左側箭頭指示處明顯可見震測訊號空白帶。



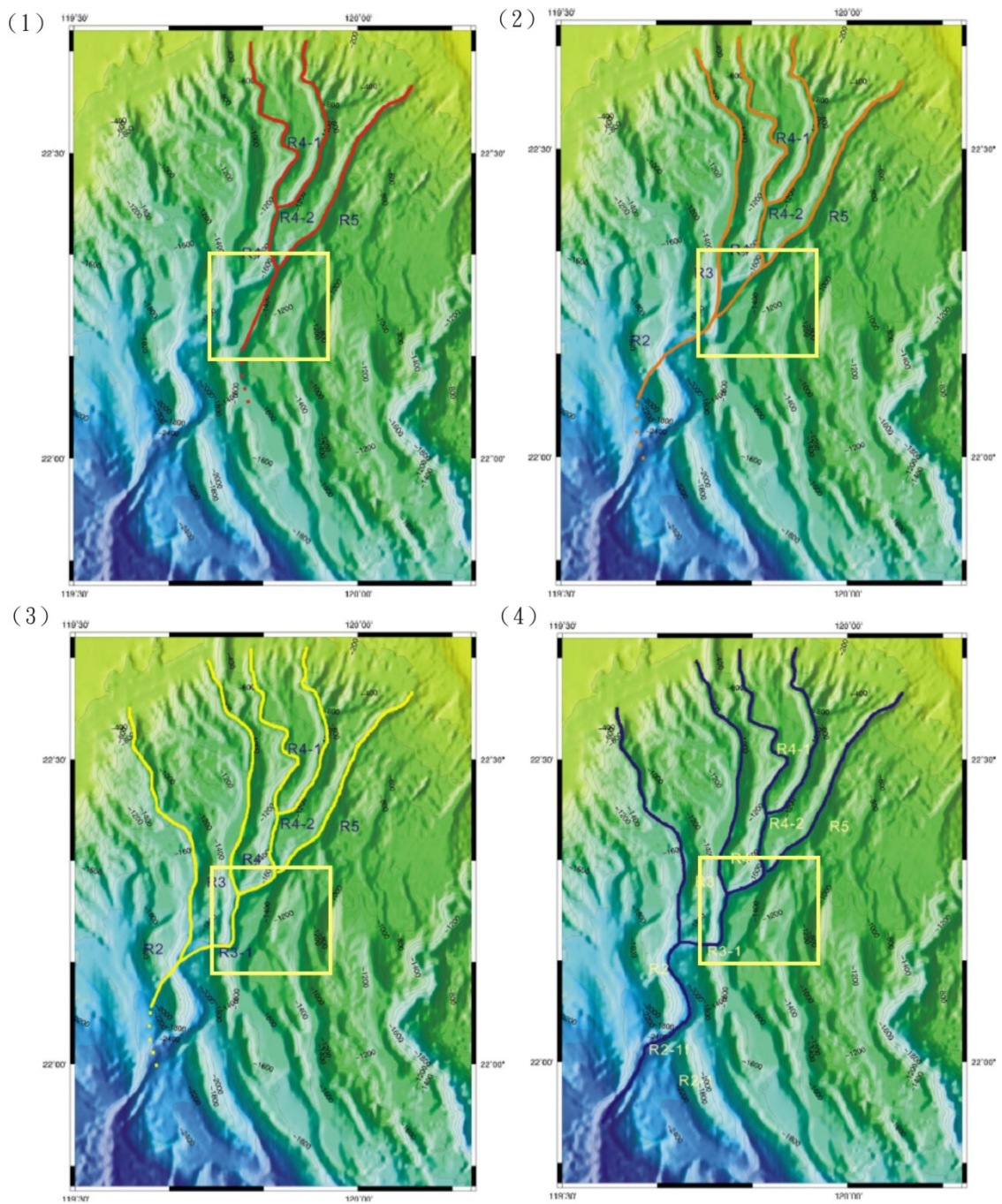


圖 3-9: 澎湖峽谷 1.85Ma 以來之演化過程。(1)、(2)、(3)、(4)分別為 1.85Ma、1.52Ma、1.22Ma、0.9Ma 時可能的峽谷位置。淡黃色方框大約為本研究之研究區域，注意其中的澎湖峽谷位置變化。修改自(陳冠宇, 2006)。

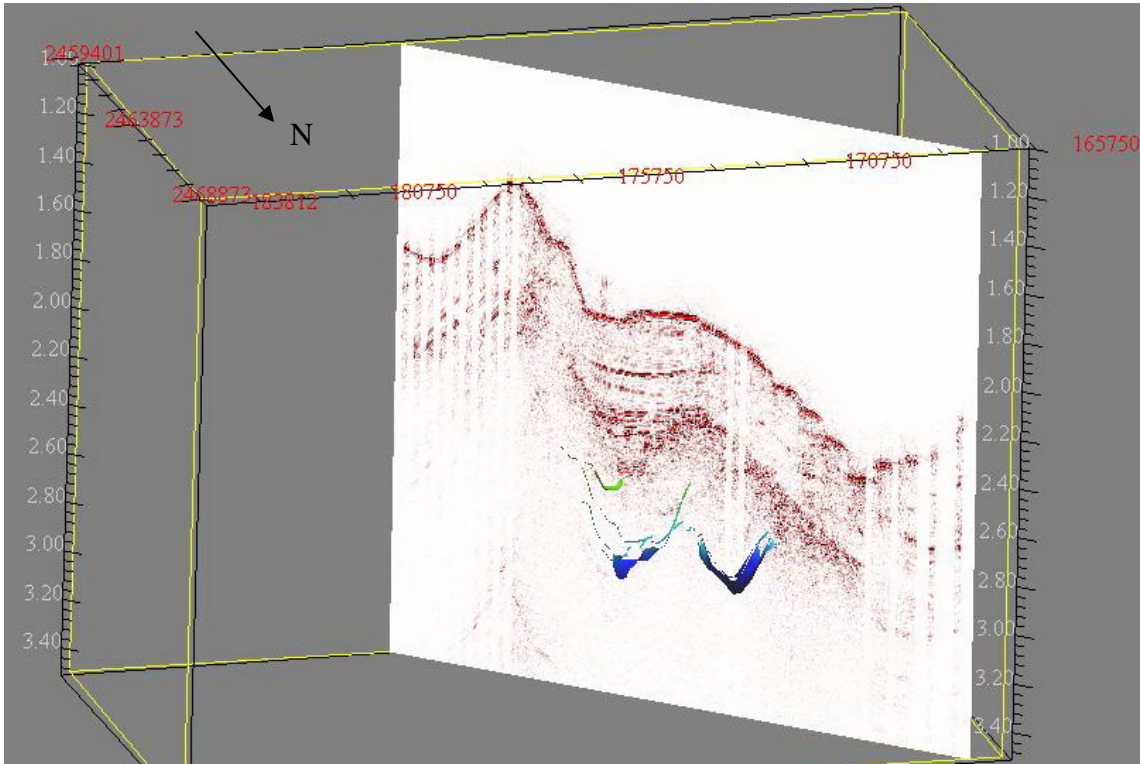


圖 3-10：西北東南向之垂直切面。圖中所示為疑似古澎湖峽谷的訊號，同時描繪成三維分布。由於此區段地層訊號較為複雜，僅有一小部分能夠清楚辨識古澎湖峽谷之位置。



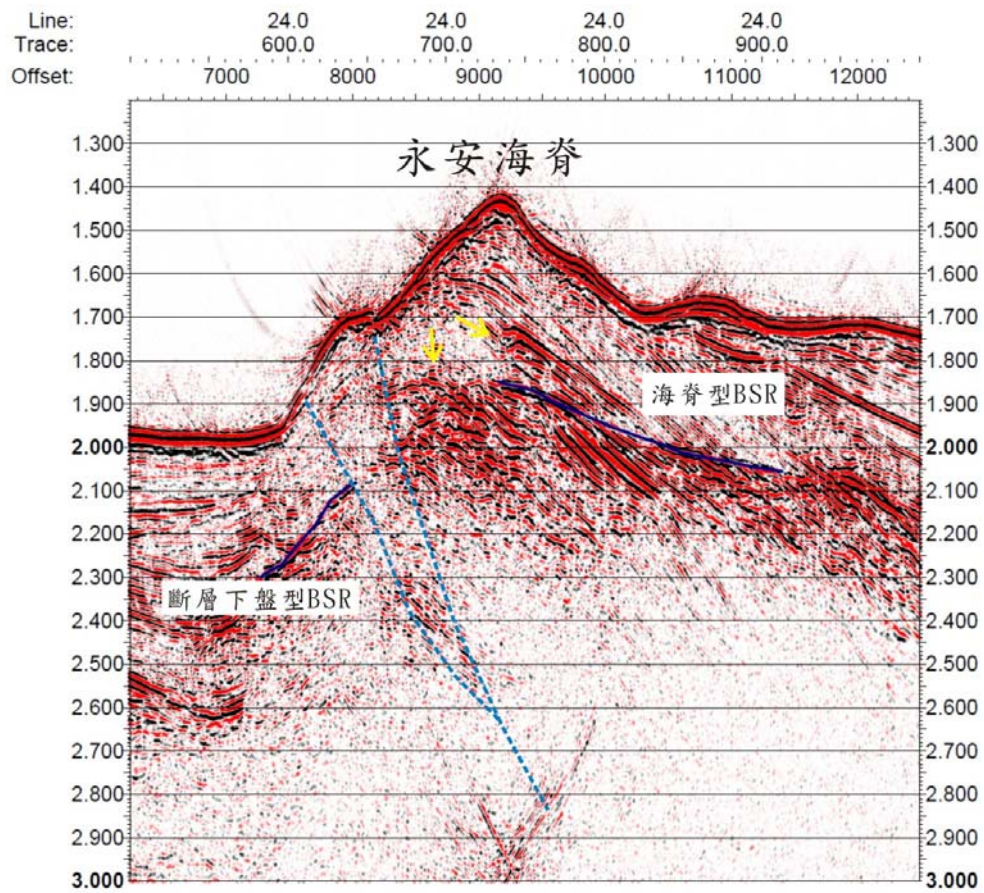


圖 3-11：In-line 24，x-line 500~1000 之震測剖面。永安海脊為一斷層抬升之背斜，下方地層向東傾斜且 BSR 穿過其中。斷層將永安海脊下方的振幅異常切分成兩個段落，位於斷層下盤的振幅異常較不明顯。黃色箭頭指示 BSR 上方之強振幅異常。

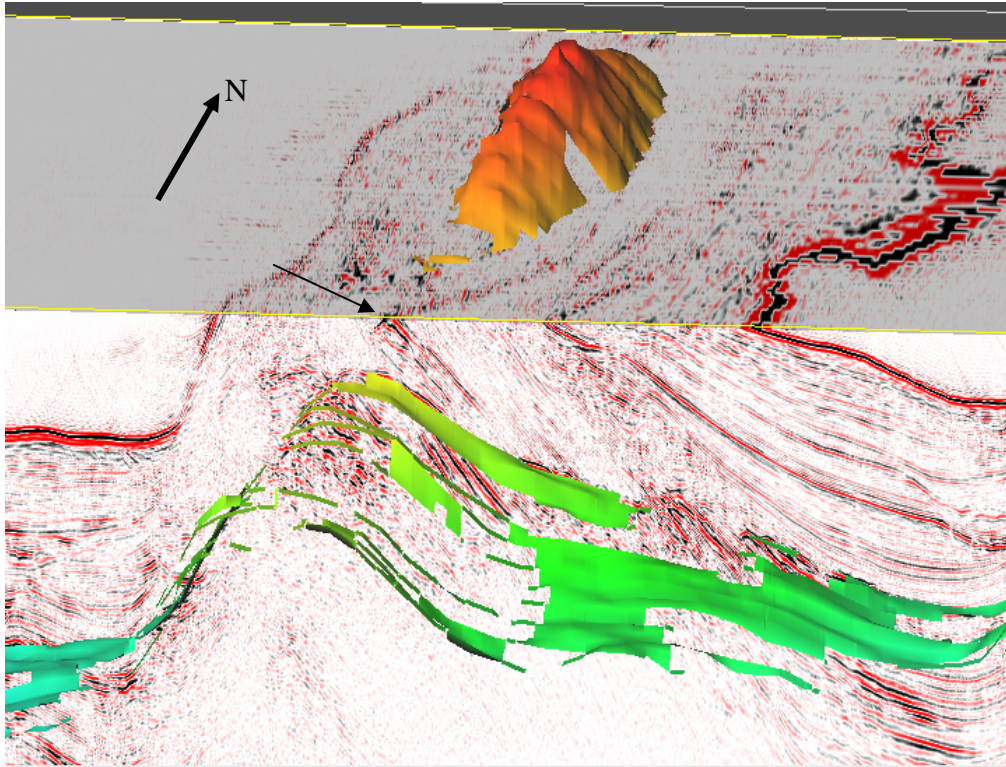


圖 3-12：In-line 24 與 1756 毫秒之時間切面。圖中可見永安海脊內 BSR 上方有一強振幅異常(箭頭指示處)，此振幅異常在時間切面上也可看到。

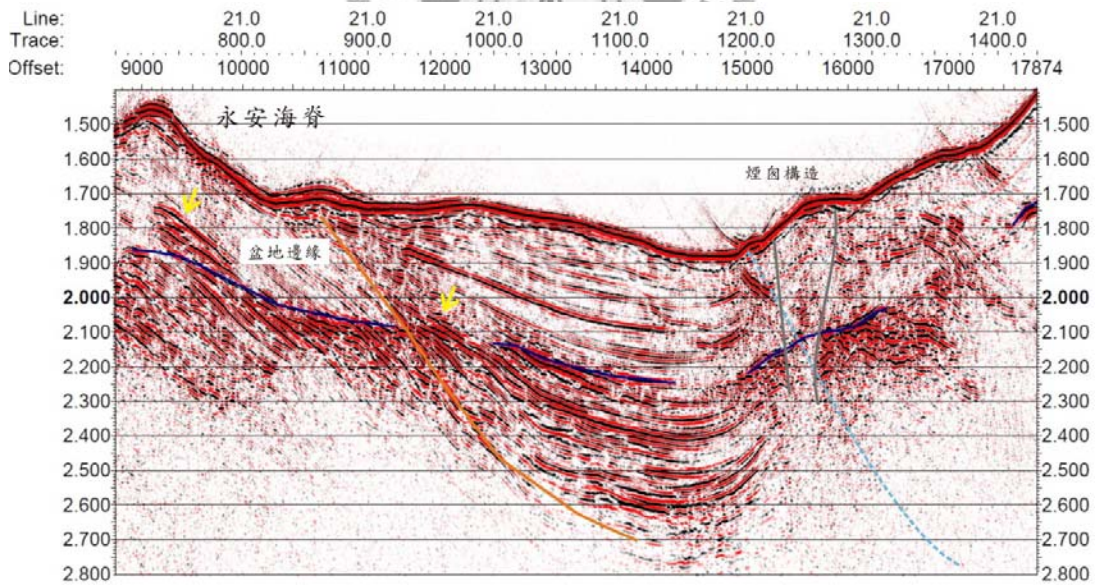


圖 3-13：In-line 21、x-line 700~1431 之垂直切面。深藍色線為 BSR；橘色線為盆地邊緣；淺藍色線為可能的斷層位置；灰色線為煙囪狀構造。黃色箭頭指示了 BSR 上之振幅異常。

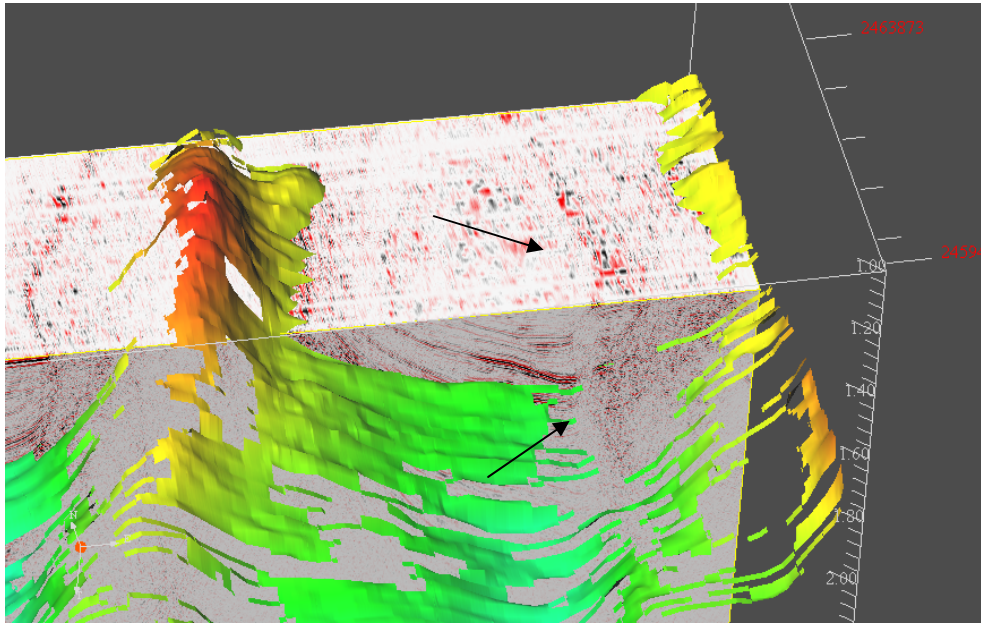


圖 3-14：In-line 53 與 1890 毫秒之時間切面。垂直切面的箭頭指示處可見一管狀空白帶，此一空白帶在時間切面上可向南北延伸。而空白帶旁則有一帶狀振幅異常。

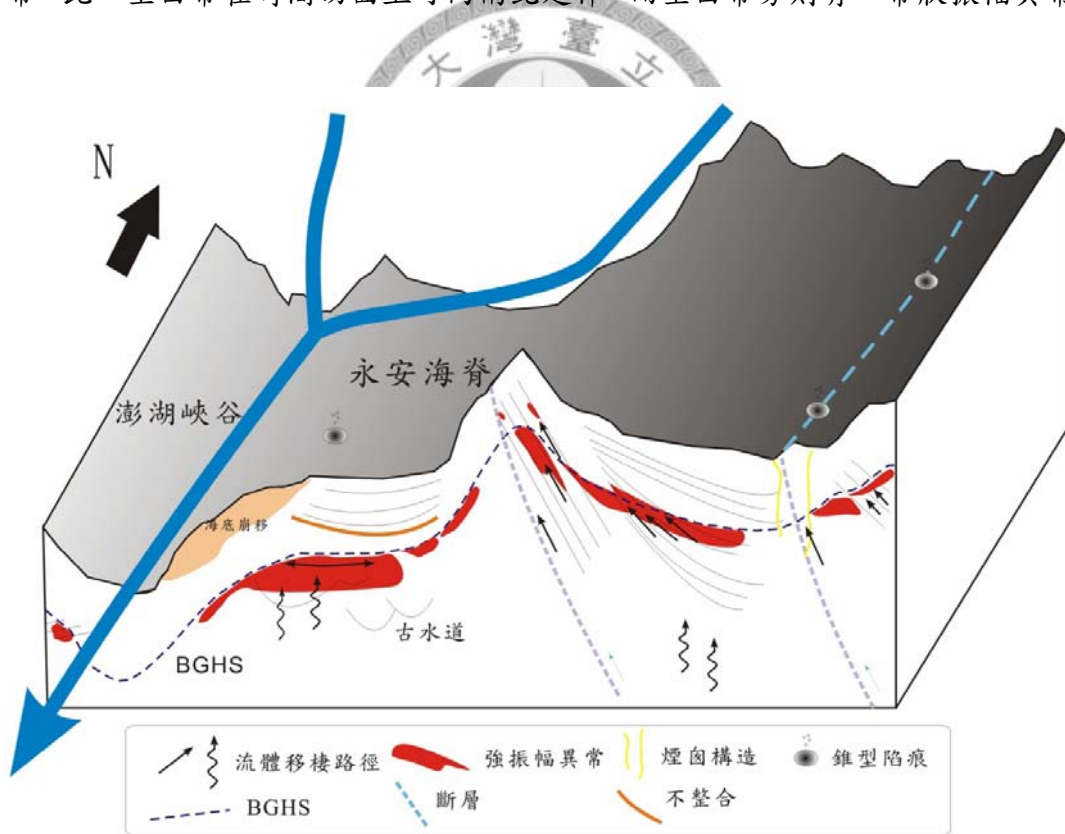


圖 3-15：永安海脊流體移棲可能模式示意圖。黑色箭頭代表流體移棲的可能路徑；紅色區塊標示了有強振幅異常的區域；淺藍虛線表示斷層；橘色線為不整合面；黃色線為煙囪構造，錐形陷痕的出現則時常與流體通道有關。

第四章 結論

本研究根據二維、三維震測資料以及海底地形等資料，綜合國外研究的例子，獲得以下結論：

一、本研究是利用測線密集的二維震測剖面組合成為一個三維資料方塊，其中包含東西向的 in-line 92 條，南北向的 x-line 1431 條，深度為雙程走時 0 到 4 秒。雖然在資料密度以及定位上尚有不足，但是此法仍能提供良好的三維震測資料進行三度空間中天然氣水合物分布特徵的分析。此研究為台灣學術界首次嘗試使用三維震測資料技術，相信能夠推動未來三維資料處理與分析技術的進步。

二、本研究依反射特徵與構造、地層的關係，將永安海脊附近地區分為澎湖峽谷、埋藏水道區、永安海脊、斜坡盆地西緣、斜坡盆地東緣五個區段。這五個區段各自受到不同的流體移棲模式主導其水合物與游離氣分布。

三、依本研究所使用的三維震測資料所示，天然氣水合物主要集中於埋藏水道區、永安海脊東翼與斜坡盆地西緣，其中又以永安海脊東翼與斜坡盆地西緣的 BSR 訊號最為連續且分布範圍最廣。但傾斜的地層使流體不容易停留在 BRS 下方。而埋藏水道區以其良好的孔隙率和較為水平的地層而擁有最大範圍與最厚的游離氣層。

四、本研究將永安海脊附近流體移棲的機制歸納為受構造活動影響以及受沉積作用影響這兩類。在峽谷內，侵蝕作用與兩側谷壁的塊體運動造成 BGHS 變動，減弱 BSR 的振幅。古水道被砂質沉積物填充，形成良好的天然氣水合物與游離氣儲存層。海脊下方的斷層以及斷層上盤傾斜的地層形成良好的流體移棲通道。斜坡盆地內，高、低滲透率的地層互層也是流體移棲的管道之一。

參考文獻

中文部分

林哲銓，2005，台灣西南海域含天然氣水合物地層之構造架構與沈積特徵。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，145-146 頁。

陳冠宇，2006，台灣西南外海之構造與地形特徵及澎湖海底峽谷演化。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，99-102 頁。

許樹坤，2008，台灣西南海域新興能源—天然氣水合物資源調查與評估：多音束水深及底拖聲納調查。中央地質調查所報告第 92-11 號，105 頁。

林曉武，2008，台灣西南海域新興能源—天然氣水合物資源調查與評估：地球化學調查研究。中央地質調查所報告第 97-29C 號，1-2 頁。

林殿順，2008，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。中央地質調查所報告第 98-25-F 號，1-19 頁。

英文部分

Ashton, C. P., D. Copenhagen, B. Bacon, A. Mann, N. Moldoveanu, C. Deplante, E. Aquitaine, F. Pau, T. Sinclair, and E. Gatwick, 1993, 3D seismic survey design: The Leading Edge, v. 12, p. 1094-1117.

Chiang, C. S., and H. S. Yu, 2006, Morphotectonics and incision of the Kaoping submarine canyon, SW Taiwan orogenic wedge: Geomorphology, v. 80, p. 199-213.

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

Deaton, W. M., and E. M. Frost Jr, 1946, Gas hydrates and their relation to the operation of natural-gas pipe lines, BM-Mon-8, Bureau of Mines, Amarillo, TX (USA). Helium Research Center.

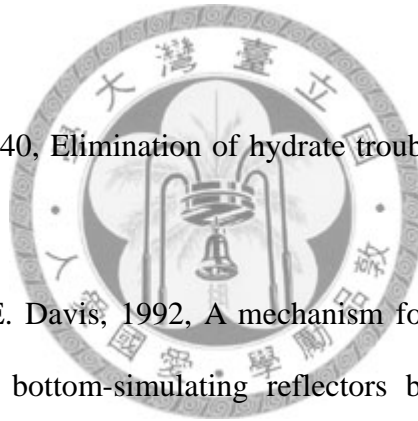
Ewing, J. I., and C. H. Hollister, 1972, Regional aspects of deep sea drilling in the western North Atlantic: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, v. 11, p. 951-973.

Hammerschmidt, E. G., 1940, Elimination of hydrate troubles: *Oil and Gas Journal*, v. 39, p. 61-68.

Hyndman, R. D., and E. E. Davis, 1992, A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion: *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, v. 97, p. 7025-7041.

Kao, H., G. C. Huang, and C. S. Liu, Transition from oblique subduction to collision in the northern Luzon arc-Taiwan region: Constraints from bathymetry and seismic observations: *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, v. 105.

Kvenvolden, K. A., 1988, Methane hydrate- A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?: *Chemical Geology*, v. 71, p. 41-51.



- Lee, M. W., D. R. Hutchinson, W. F. Avena, W. P. Dillon, J. J. Miller, and B. A. Swift, 1994, Seismic character of gas hydrates on the southeastern US continental margin: *Marine Geophysical Researches*, v. 16, p. 163-184.
- Lin, A. T., C. S. Liu, C. C. Lin, P. Schnurle, G. Y. Chen, W. Z. Liao, L. S. Teng, H. J. Chuang, and M. S. Wu, 2008, Tectonic features associated with the overriding of an accretionary wedge on top of a rifted continental margin: An example from Taiwan: *Marine Geology*, v. 255, p. 186-203.
- Lin, C. C., A. T.-S. Lin, C. S. Liu, G. Y. Chen, W. Z. Liao, and P. Schnurle, 2009, Geological controls on BSR occurrences in the incipient arc-continent collision zone off southwest Taiwan: *Marine and Petroleum Geology*, v. 26, p. 1118-1131.
- Lin, S., W. Hsieh, Y. C. Lim, T. F. Yang, C. Liu, and Y. Wang, 2006, Methane migration and its influence on sulfate reduction in the Good Weather Ridge region, South China Sea continental margin sediments: *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 17, p. 883.
- Liu, C. S., I. L. Huang, and L. S. Teng, 1997, Structural features off southwestern Taiwan: *Marine Geology*, v. 137, p. 305-319.
- Liu, C. S., P. Schnurle, Y. S. Wang, S. H. Chung, S. C. Chen, and T. H. Hsiuan, 2006, Distribution and Characters of Gas Hydrate Offshore of Southwestern Taiwan: *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 17, p. 615-644.
- Markl, R. G., 1970, Structure of the Blake-Bahama outer ridge: *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, v. 75, p. 4539.

- Miller, S. L., 1974, The nature and occurrence of clathrate hydrates: Natural gases in marine sediments, v. 3, p. 1-177.
- Minshull, T., 1989, Sediment compaction and fluid migration in the Makran accretionary prism: *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, v. 94, p. 7387–7402.
- Pecher, I. A., N. Kukowski, C. Huebscher, J. Greinert, and J. Bialas, 2001, The link between bottom-simulating reflections and methane flux into the gas hydrate stability zone—new evidence from Lima Basin, Peru Margin: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 185, p. 343-354.
- Reed, D. L., N. Lundberg, C. S. Liu, and B. Y. Kuo, 1992, Structural relations along the margins of the offshore Taiwan accretionary wedge: implications for accretion and crustal kinematics: *Yanji baogao- Guoli Taiwan daxue. L xueyuan dizhixue xi*, p. 105-122.
- Schnurle, P., and C. S. Liu, 2010, Structural controls on the formation of BSR offshore southwestern Taiwan from a dense seismic reflection survey, in T. Collett, A. Johnson, C. Knapp, and R. Boswell, eds., *Natural gas hydrates—Energy resource potential and associated geologic hazards: Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, v. 89, p. (in press).
- Shipley, T. H., M. H. Houston, R. T. Buffler, F. J. Shaub, K. J. McMillen, J. W. Ladd, and J. L. Worzel, 1979, Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises: *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, v. 63, p. 2204–2213.

Stoll, R. D., 1974, Effects of gas hydrates in sediments: Natural gases in marine sediments, p. 235-248.

Tucholke, B. E., 1977, Gas-hydrate horizons detected in seismic-profiler data from the western North Atlantic: Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., v. 61, p. 698-707.

Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing, volume 2 of Investigations in Geophysics: Society of Exploration Geophysicists.

Yu, H. S., and J. F. Chang, 2002, The Penghu submarine canyon off southwestern Taiwan: morphology and origin: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, v. 13, p. 547-562.

Yu, H. S., and J. C. Lu, 1995, Development of the shale diapir-controlled Fangliao Canyon on the continental slope off southwestern Taiwan: Journal of Southeast Asian Earth Sciences, v. 11, p. 265-276.

Zuhlsdorff, L., and V. Spies, 2004, Three-dimensional seismic characterization of a venting site reveals compelling indications of natural hydraulic fracturing: Geology, v. 32, p. 101.

網路資料

U.S. Geological Survey

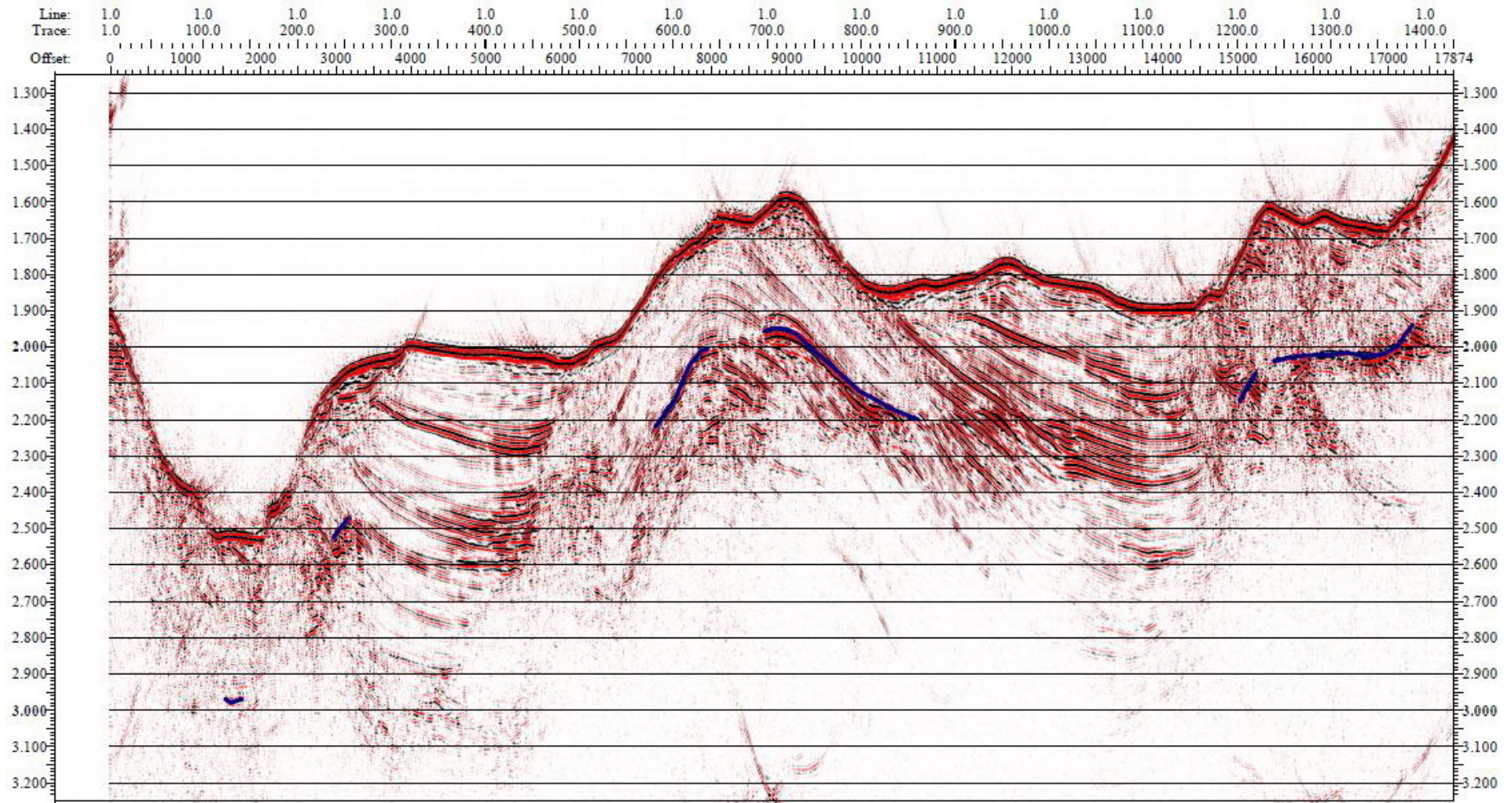
<http://www.usgs.gov/>

附錄

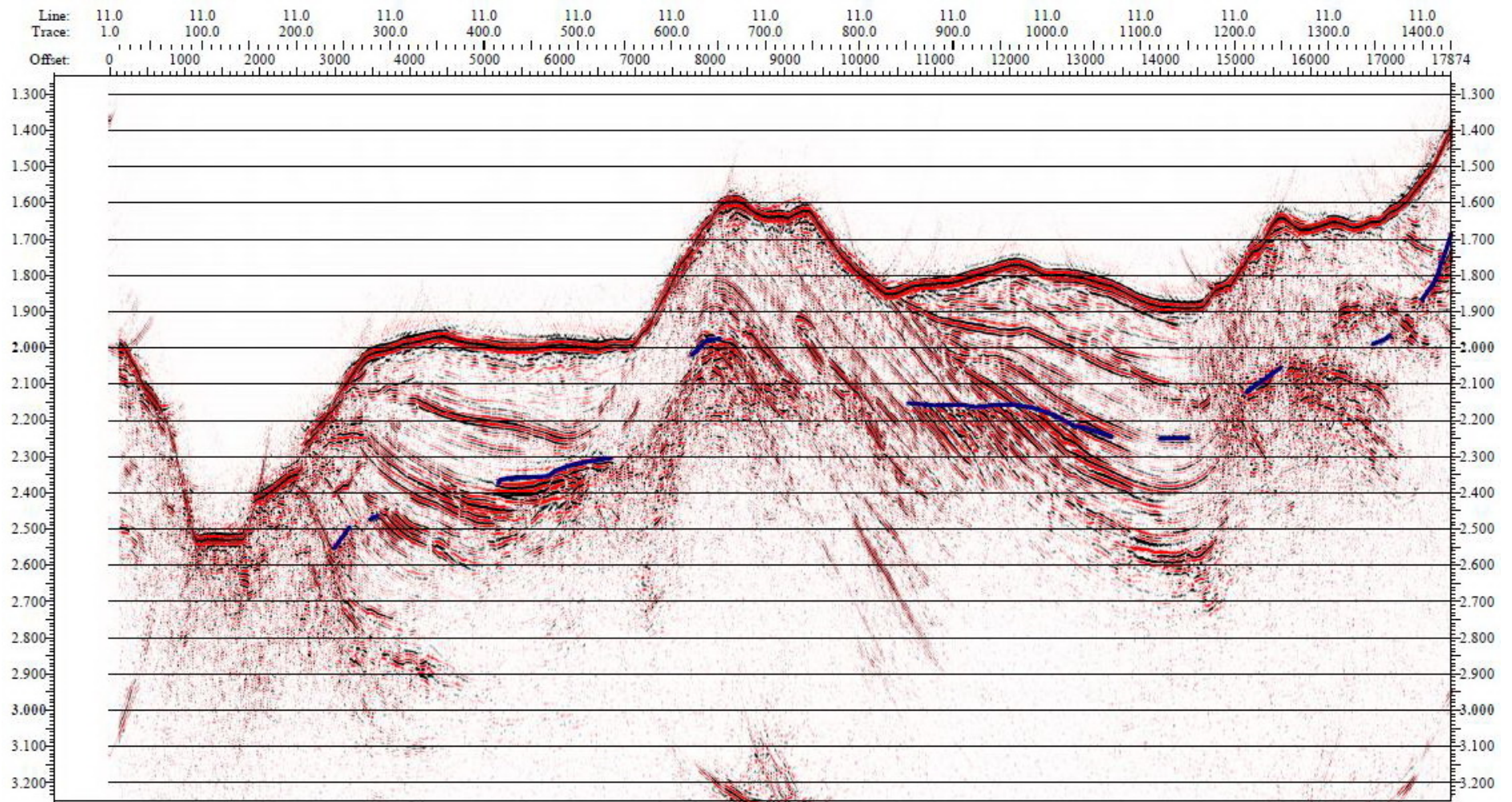
三維方塊垂直切面與時間切面

有鑑於三維資料在書面上不容易展示，在此收錄一部分沿線剖面，以大約每十條沿線取一條較清楚的剖面，以及從雙程走時 1.5 秒到 3 秒每 0.1 秒取樣之時間切面。

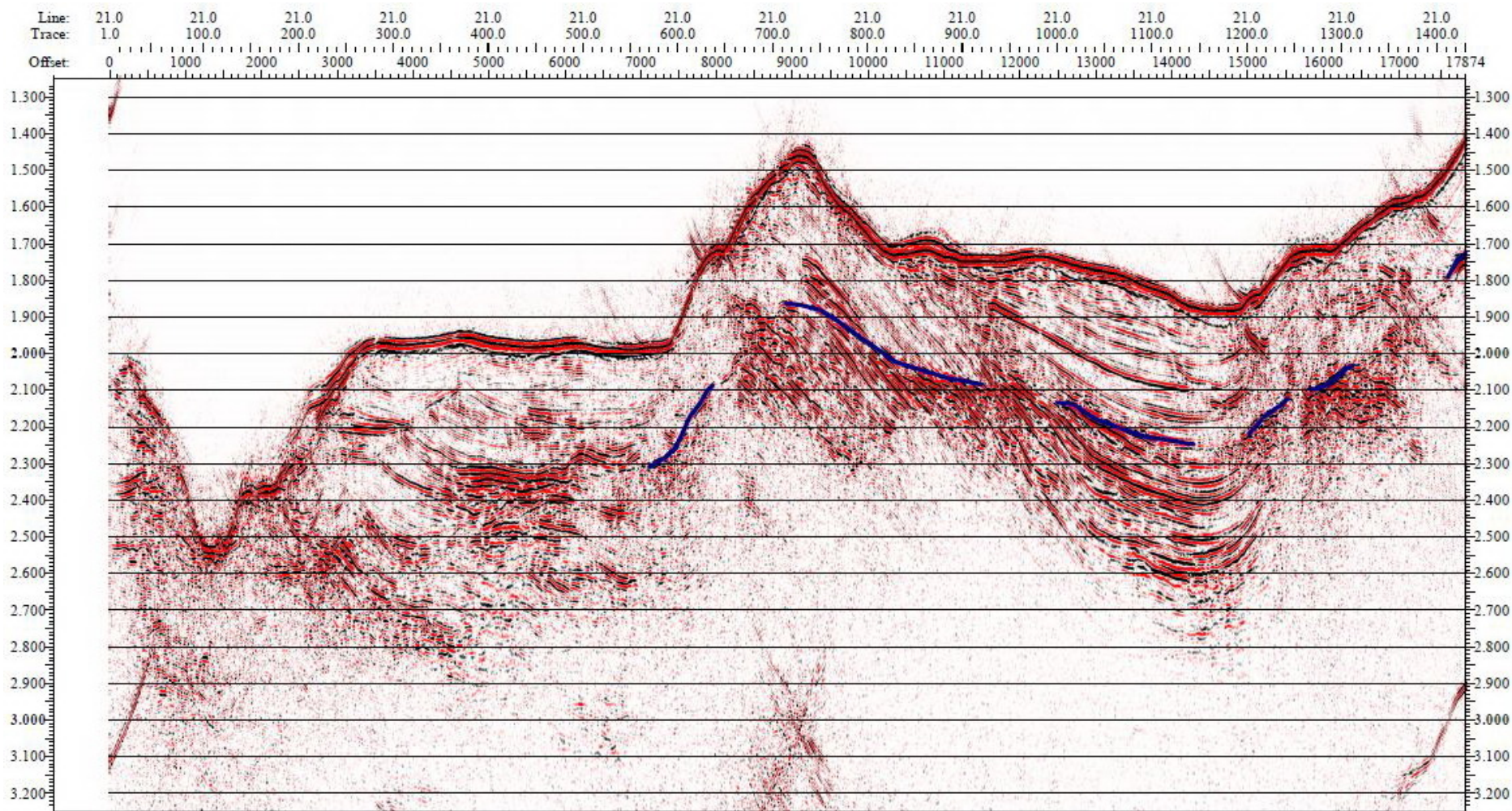




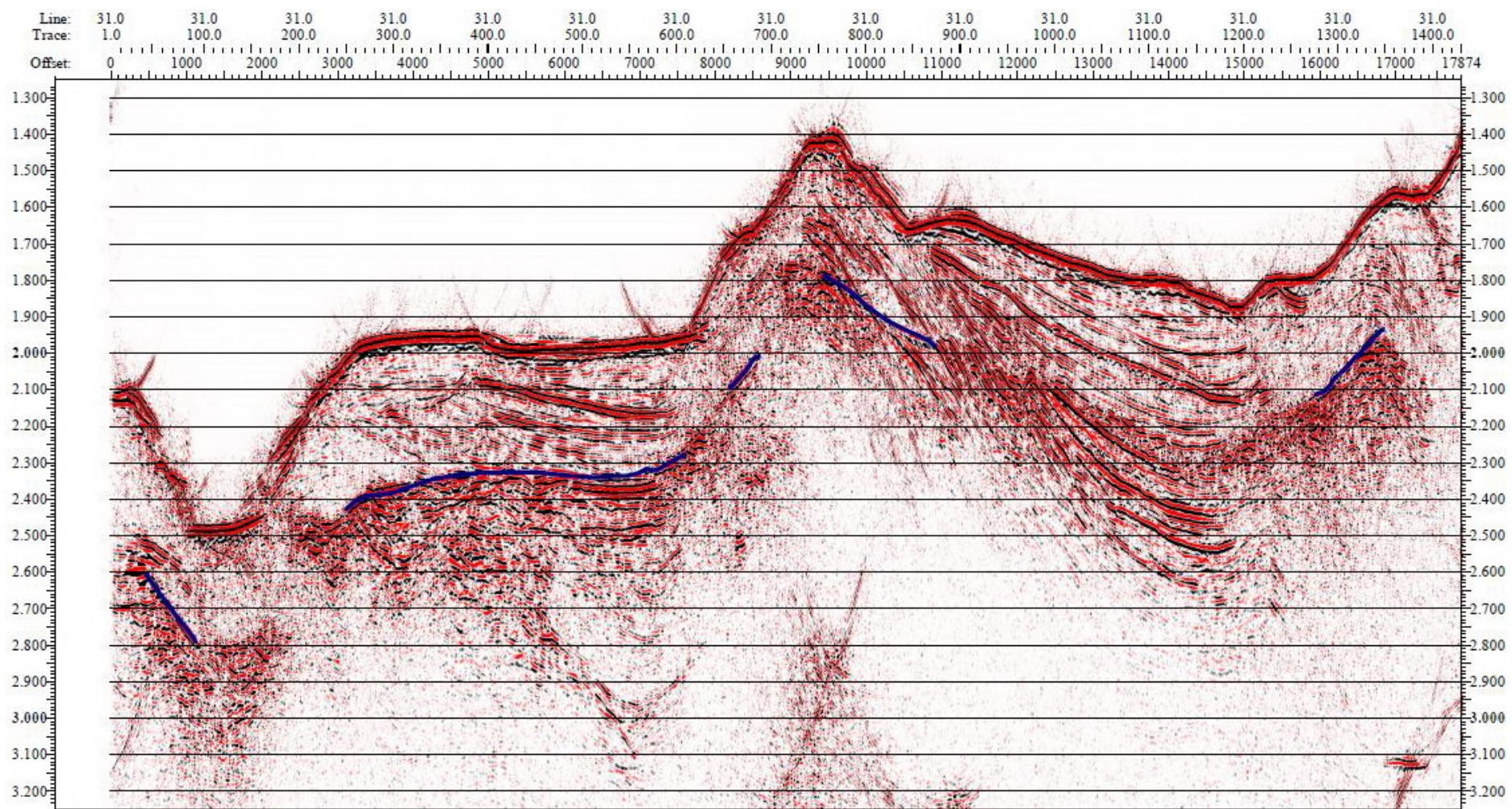
附圖 1：in-line 1 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



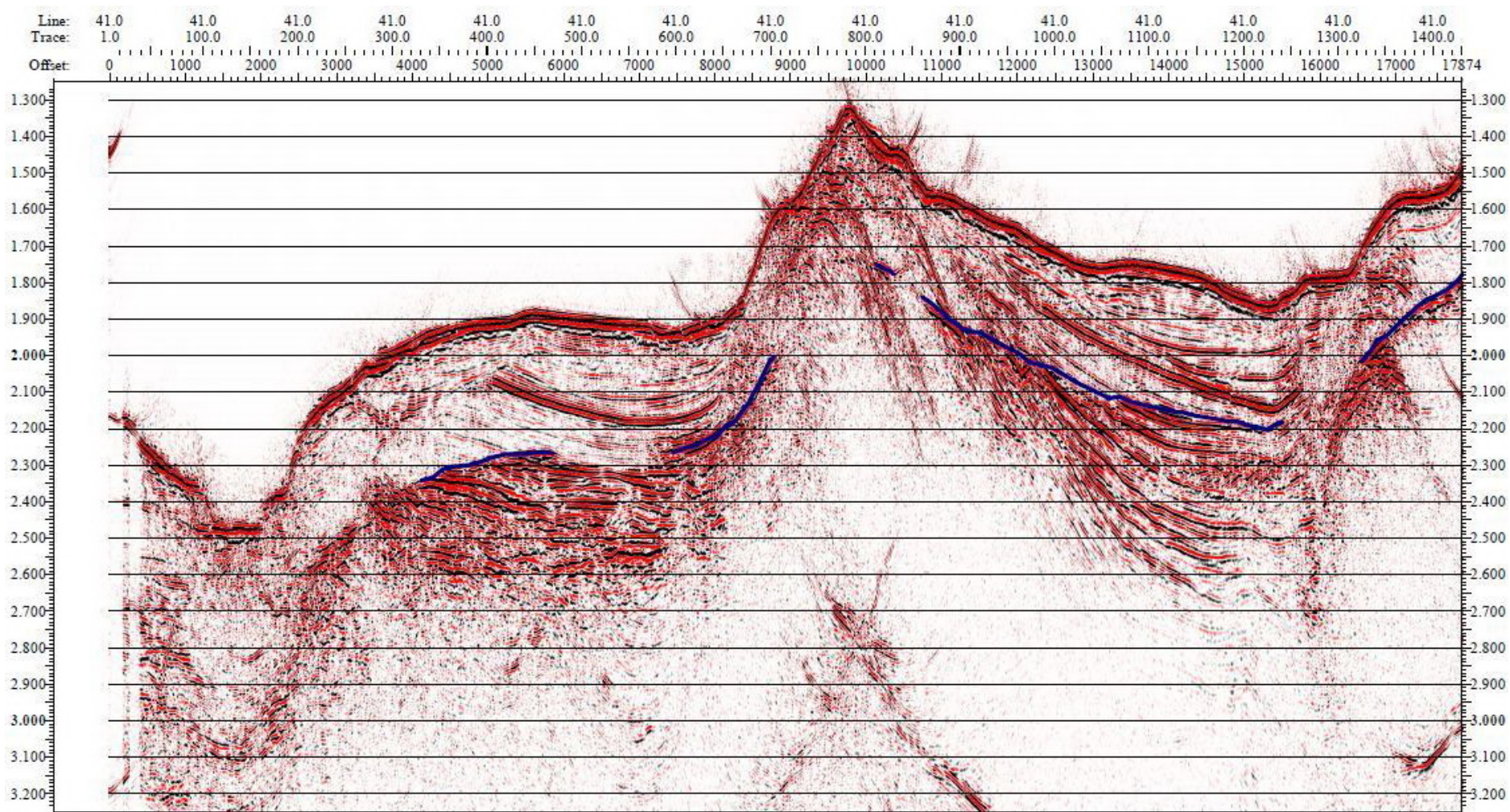
附圖 2：in-line 11 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



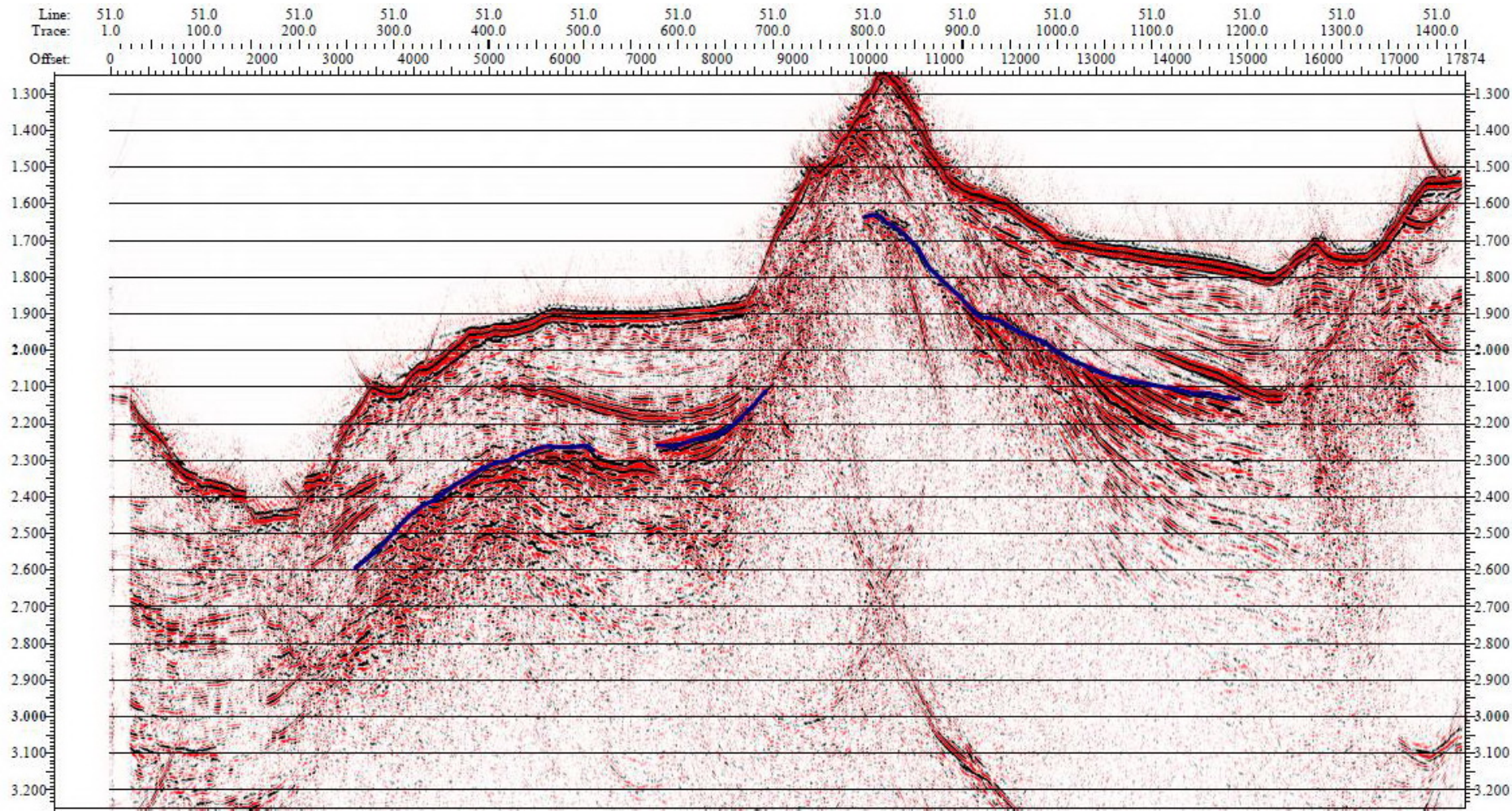
附圖 3：in-line 21 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



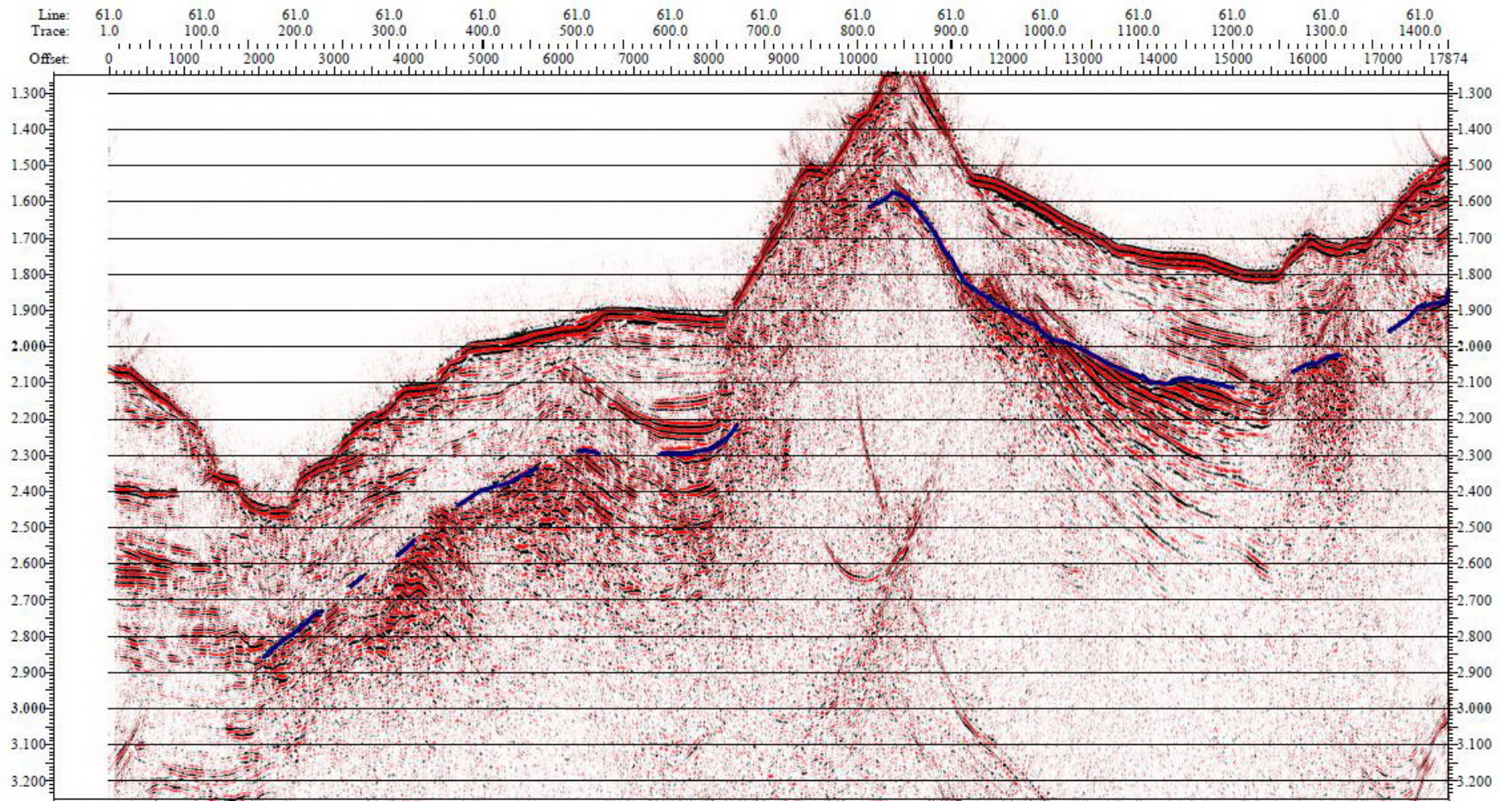
附圖 4：in-line 31 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



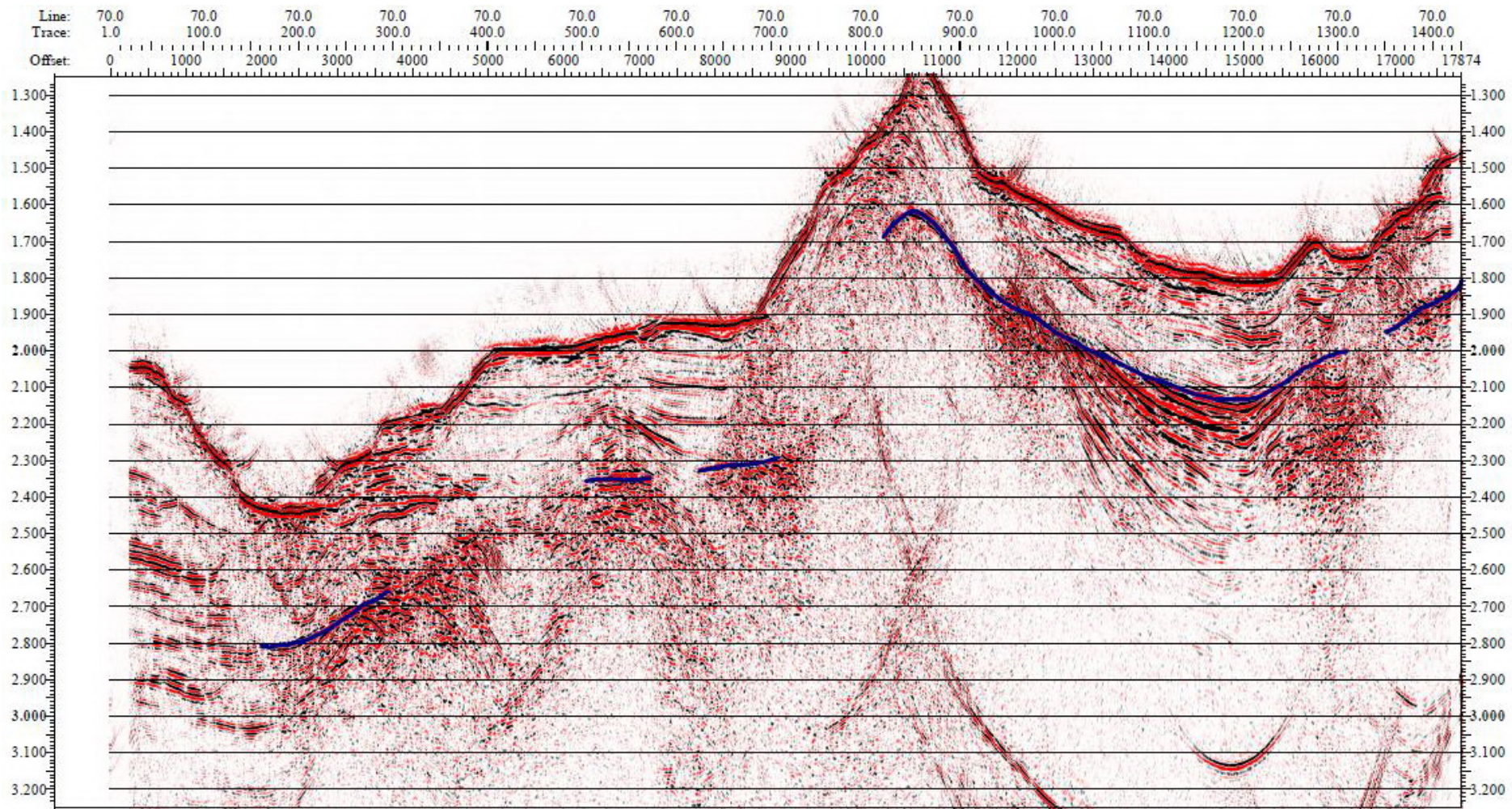
附圖 5：in-line 41 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



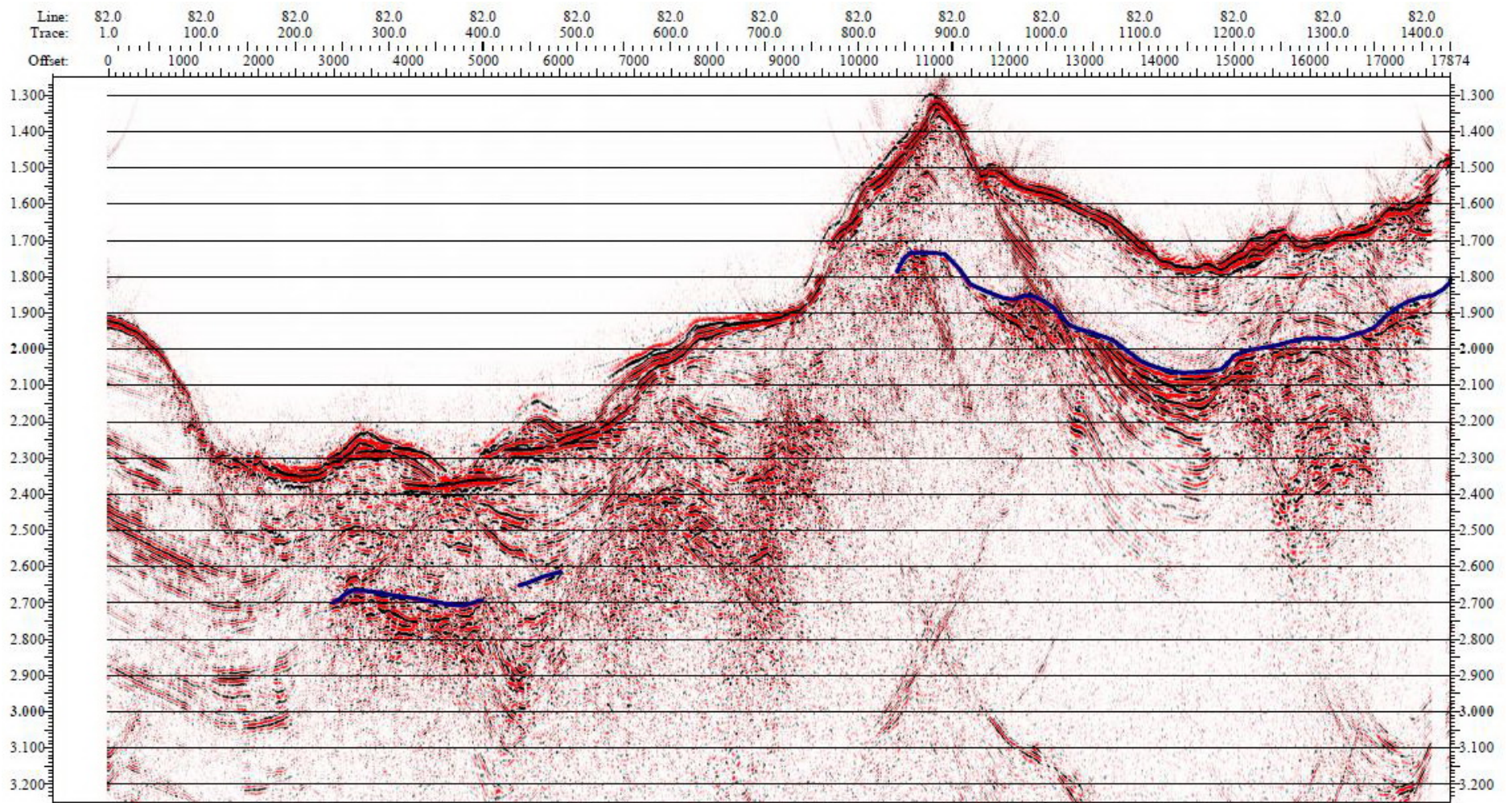
附圖 6：in-line 51 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



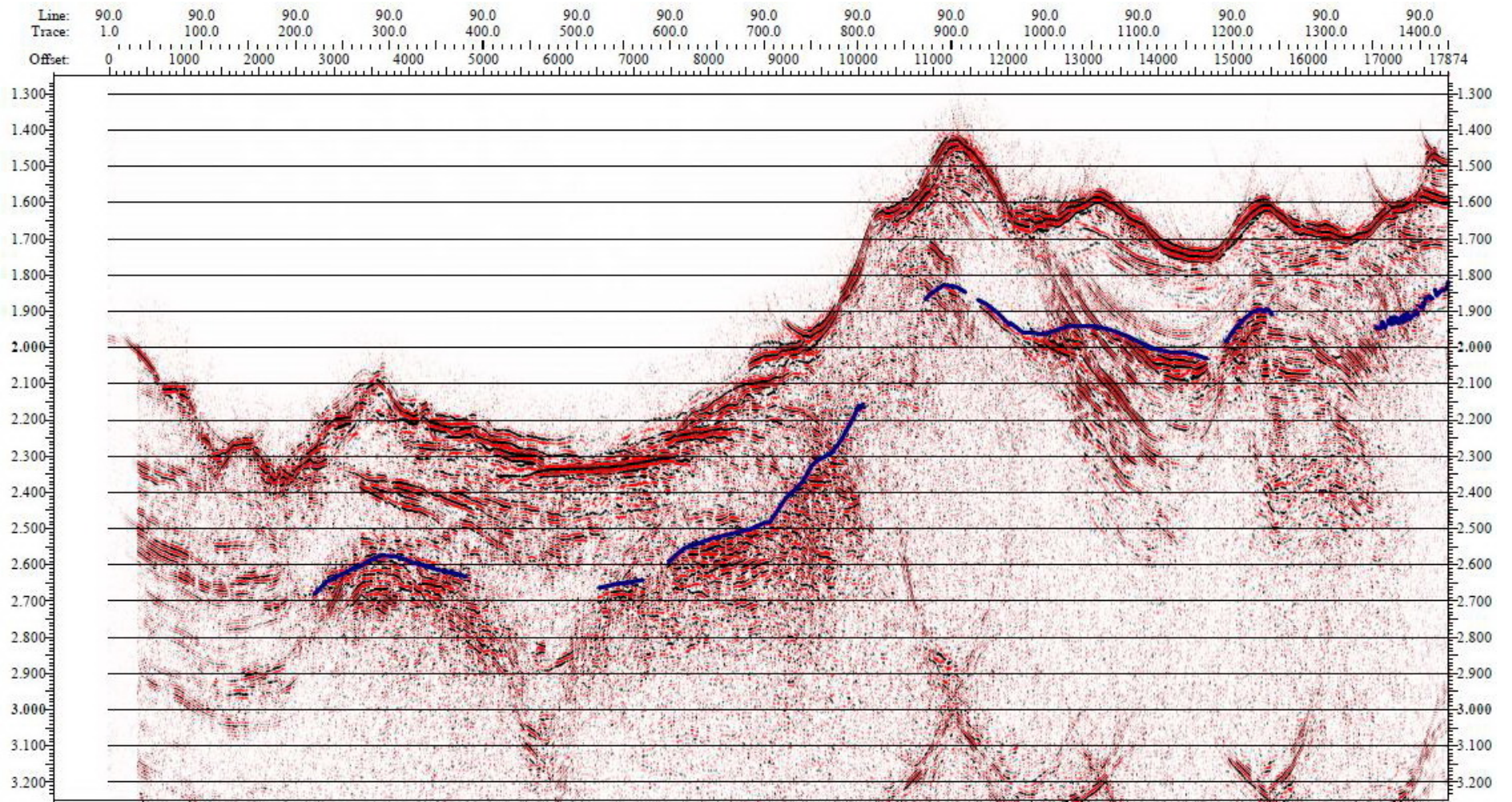
附圖 7：in-line 61 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



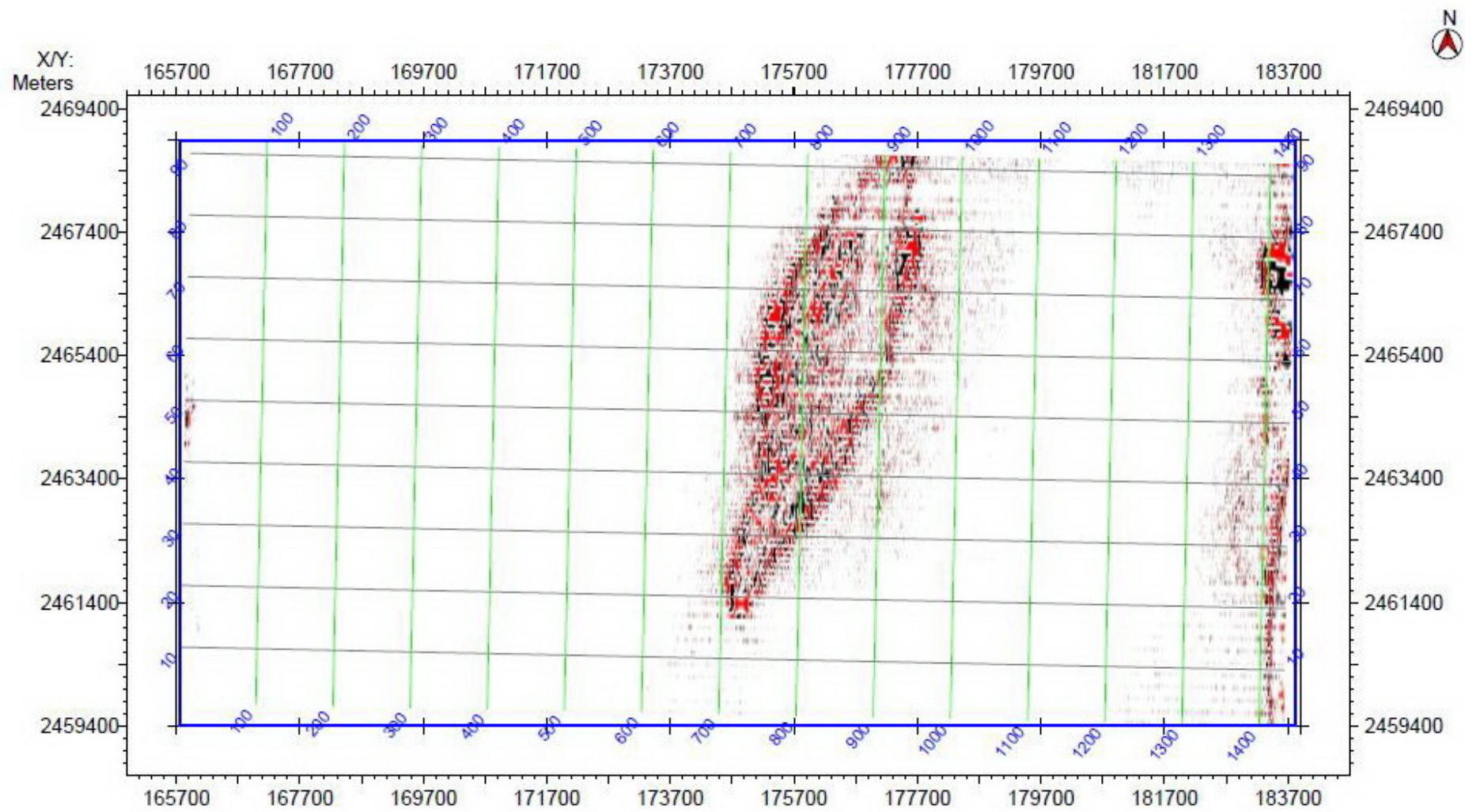
附圖 8：in-line 70 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



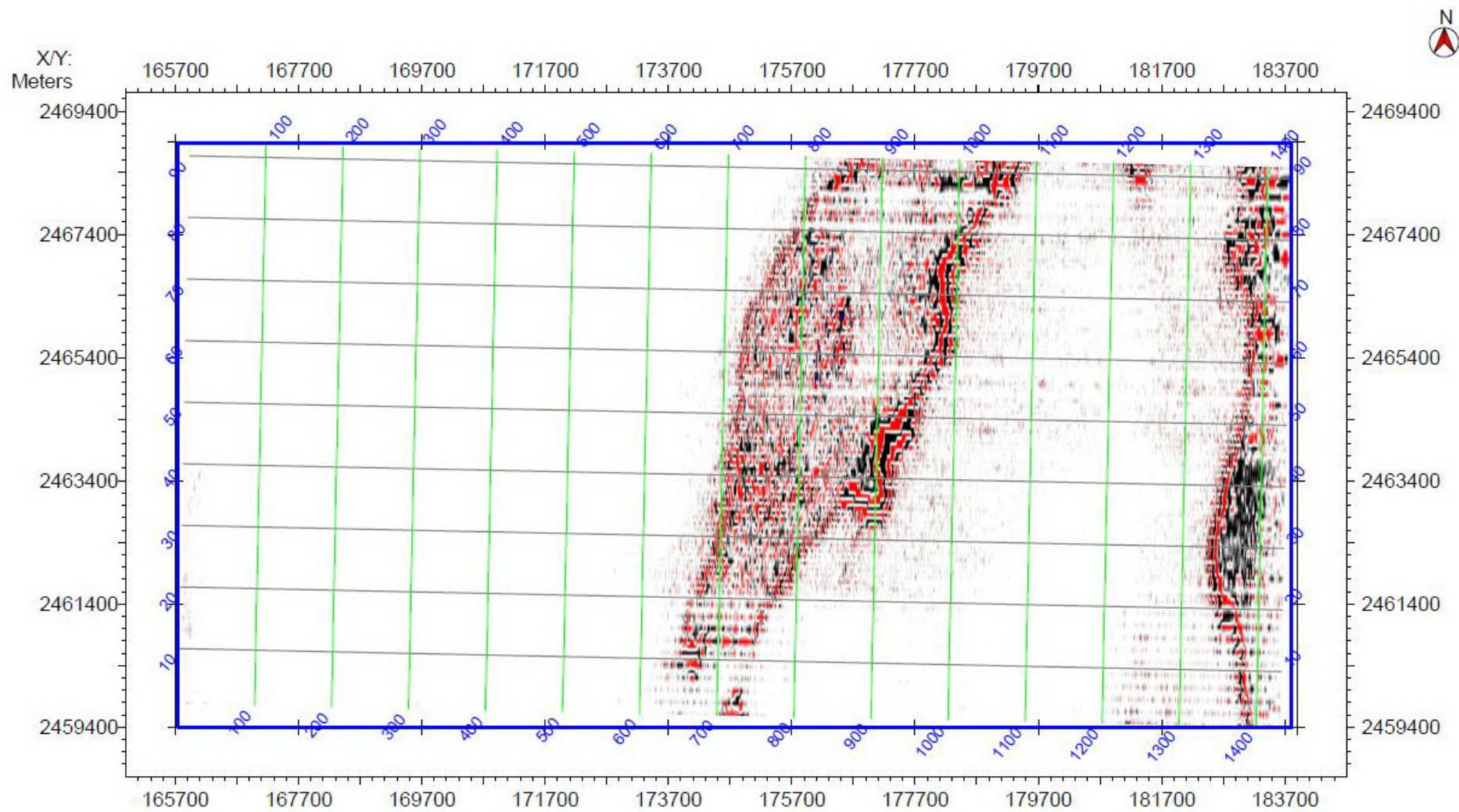
附圖 9：in-line 82 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



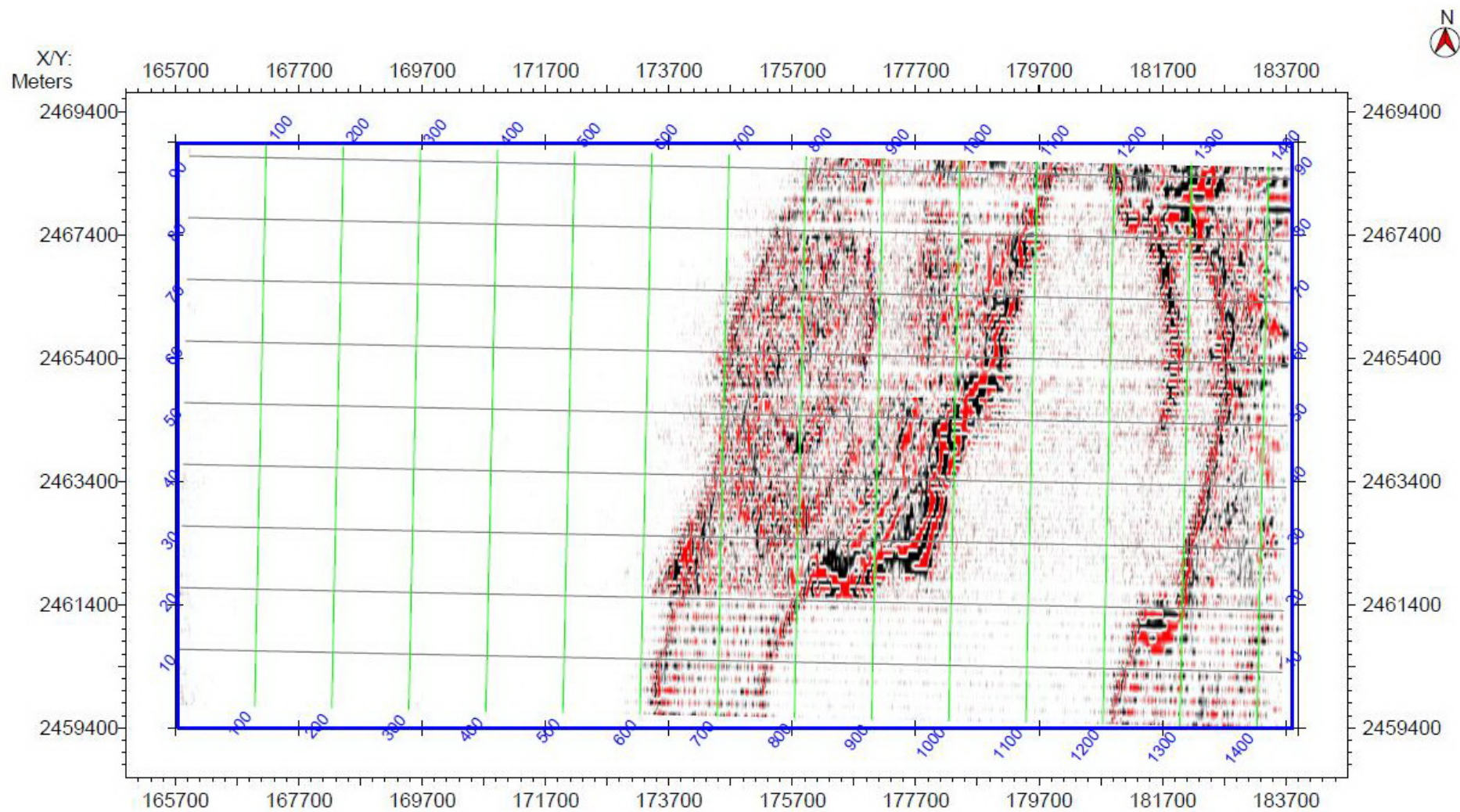
附圖 10：in-line 82 之震測剖面。藍色線為 BSR 位置。



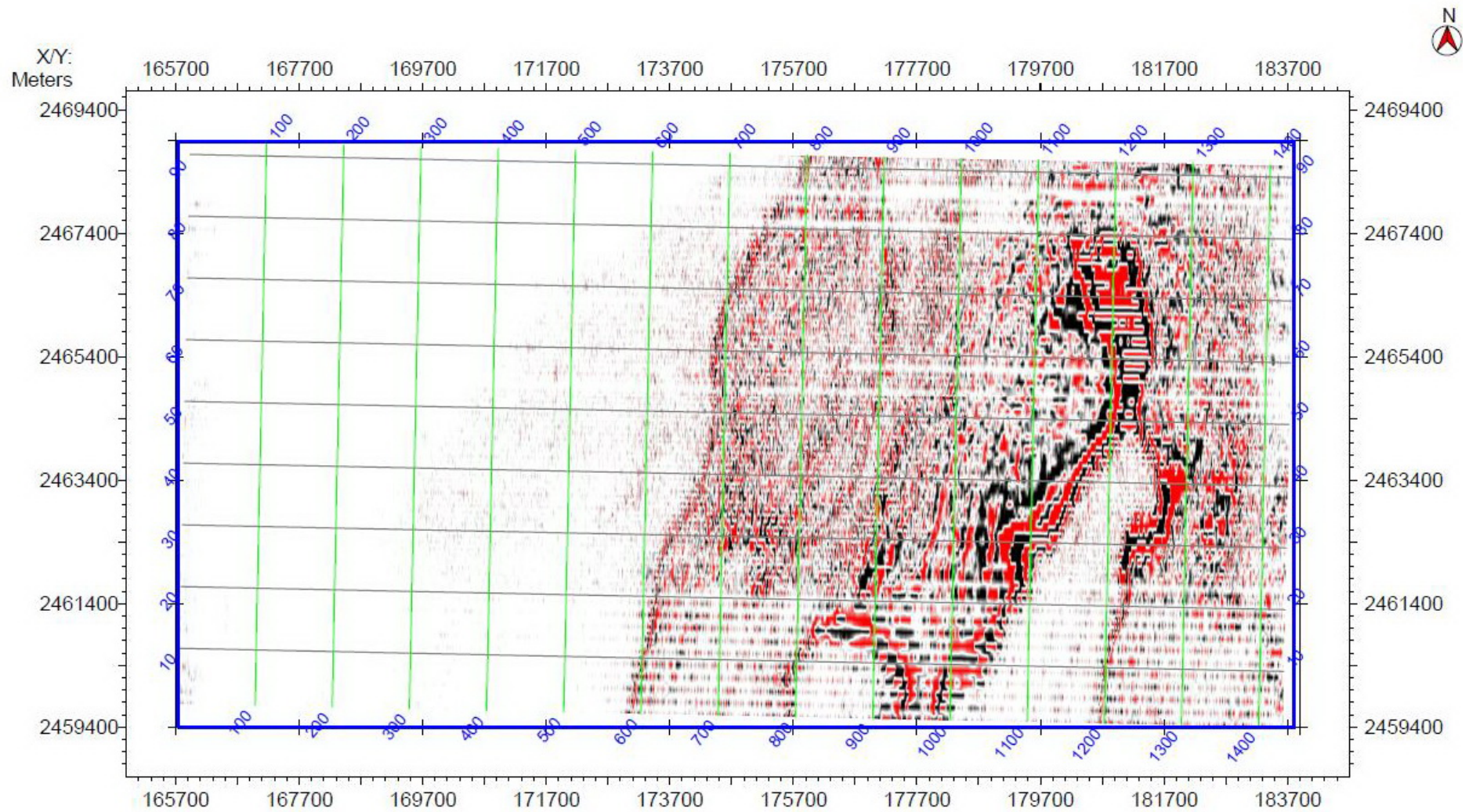
附圖 11：雙程走時 1.5 秒之時間切面。



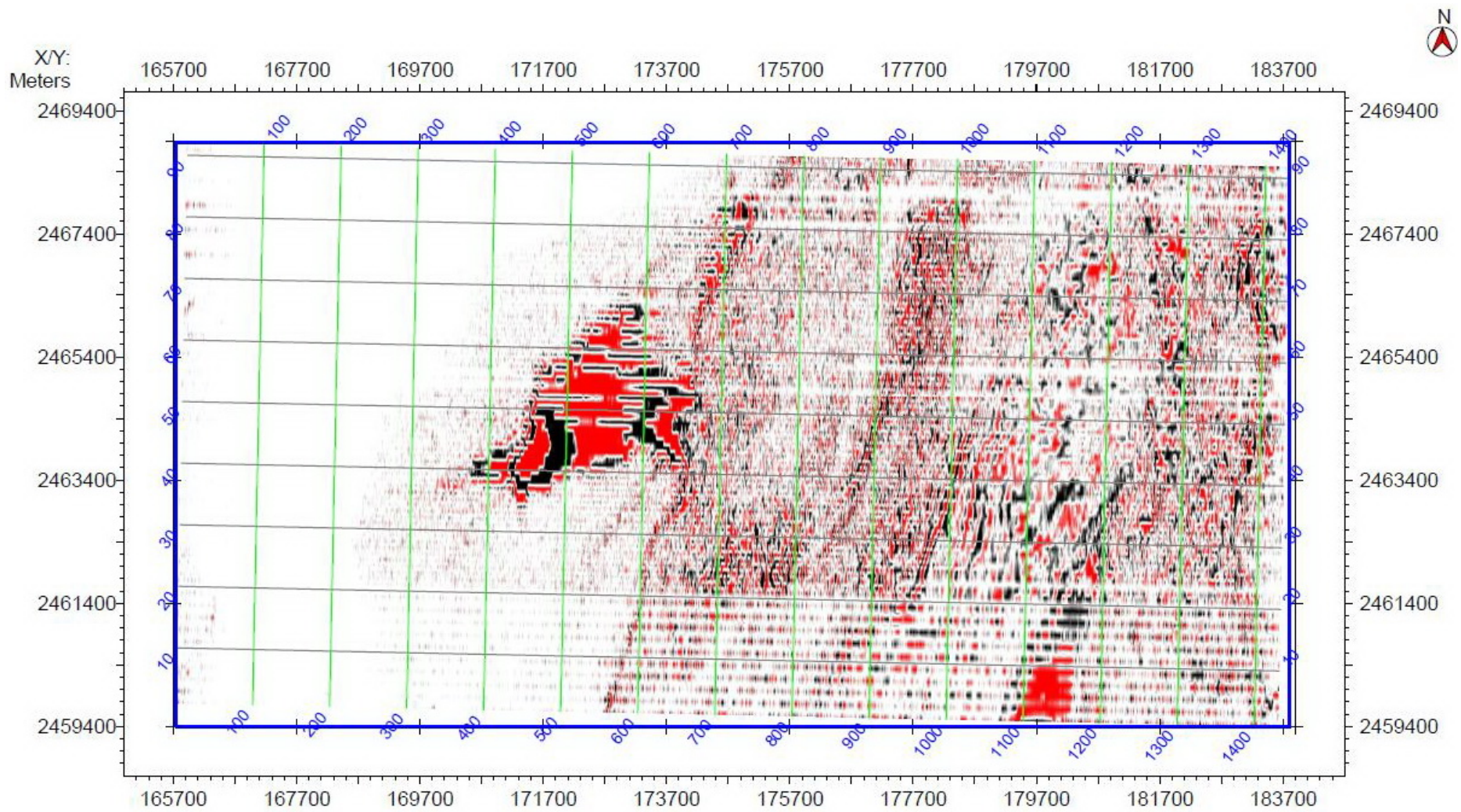
附圖 12：雙程走時 1.6 秒之時間切面。



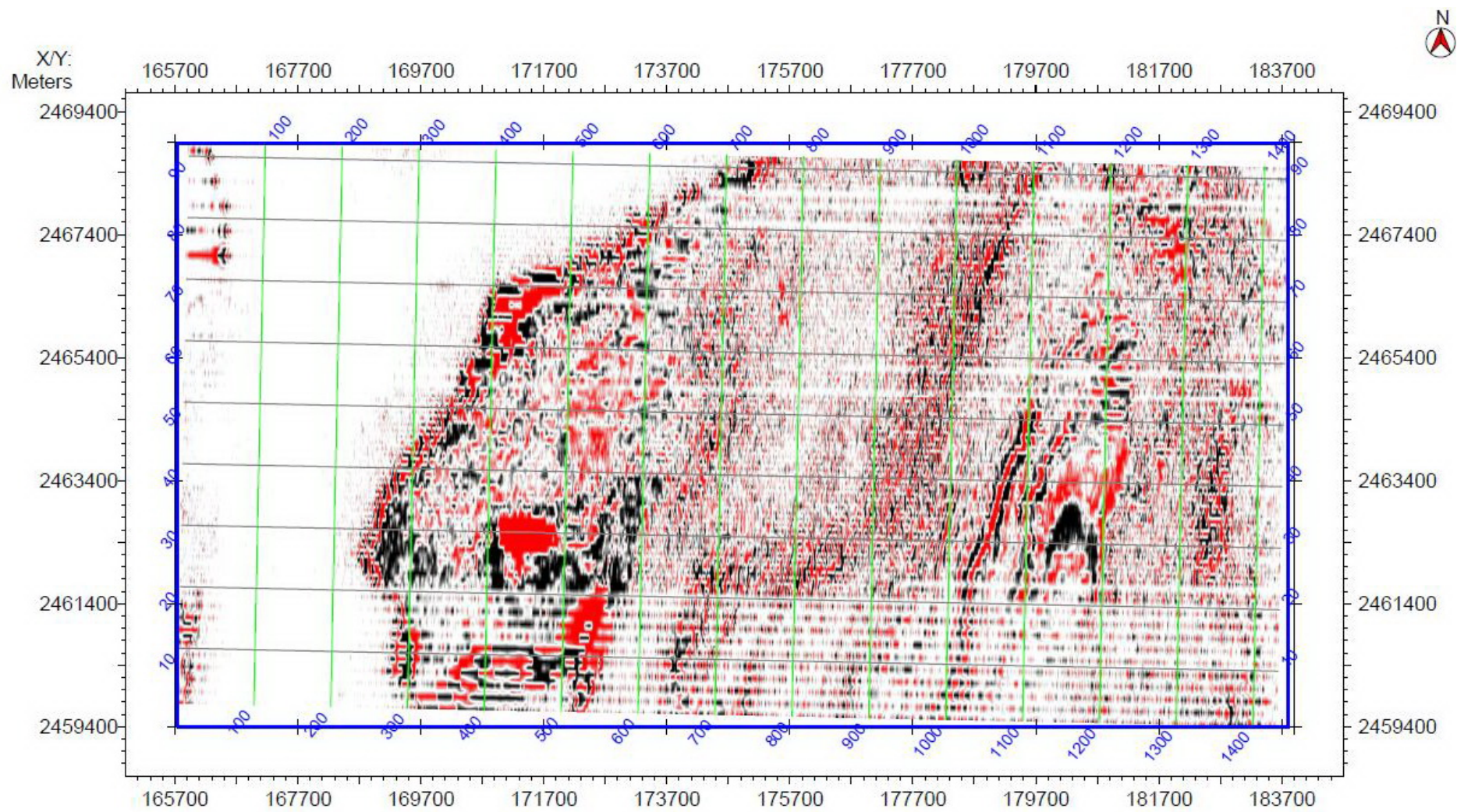
附圖 13：雙程走時 1.7 秒之時間切面。



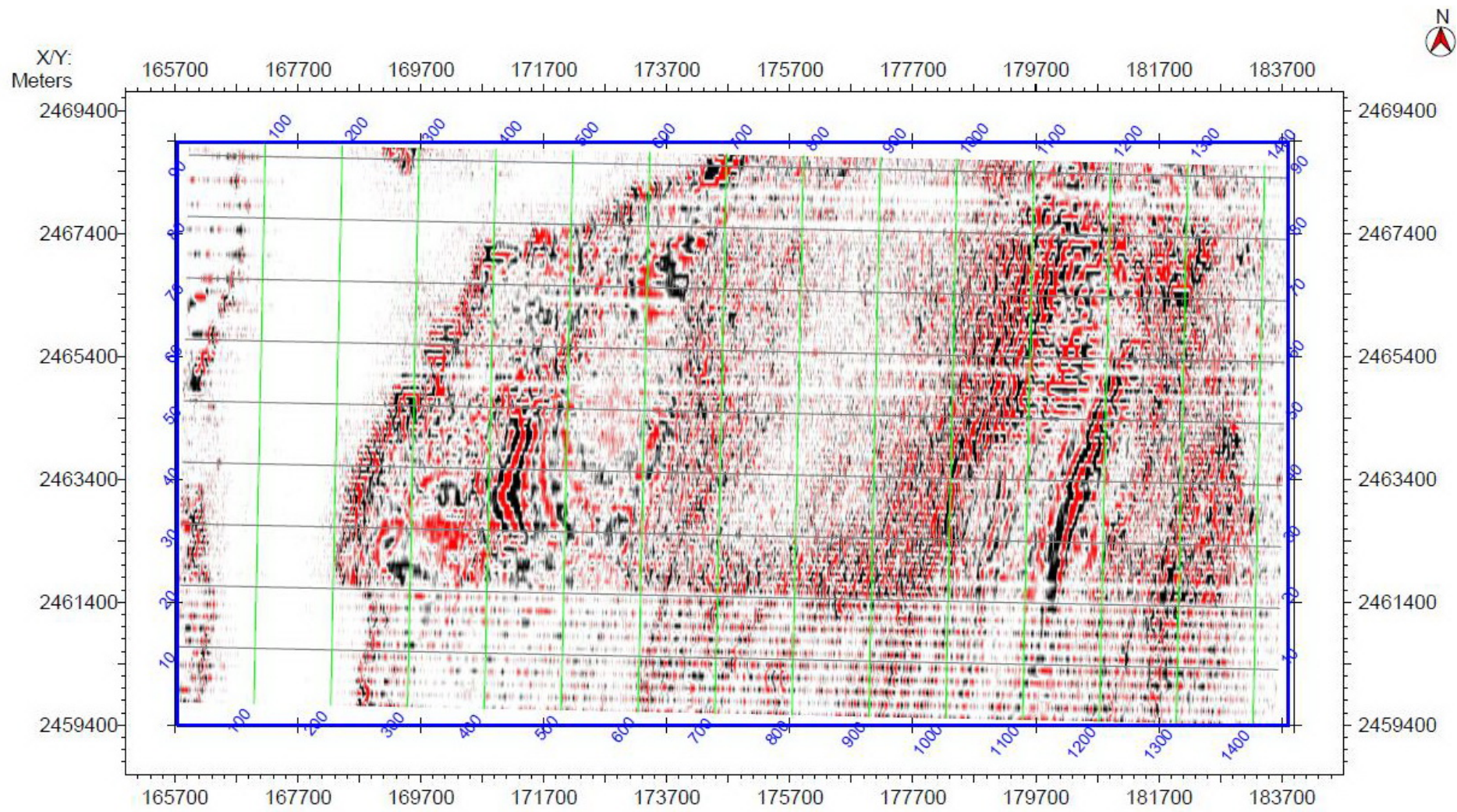
附圖 14：雙程走時 1.8 秒之時間切面。



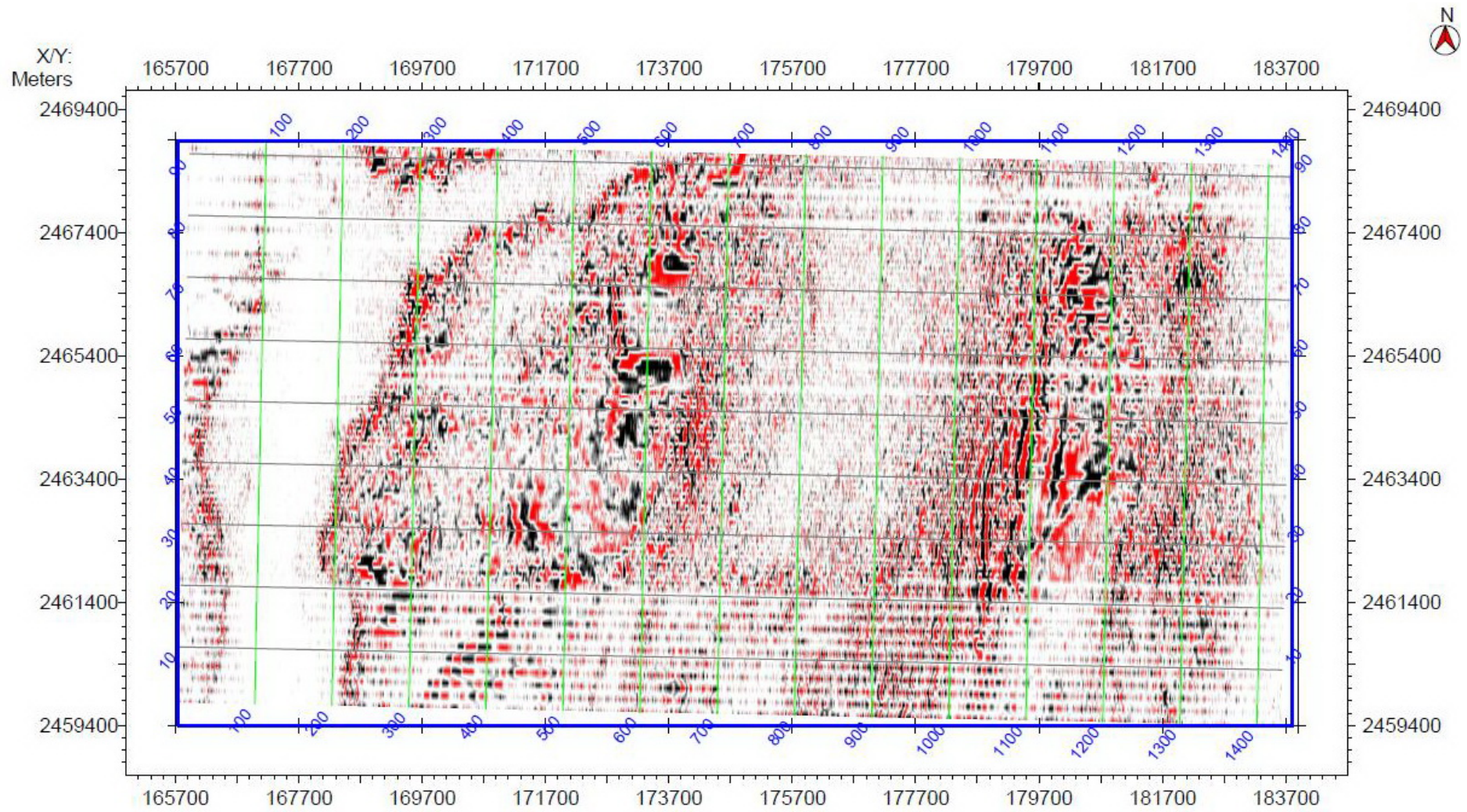
附圖 15：雙程走時 1.9 秒之時間切面。



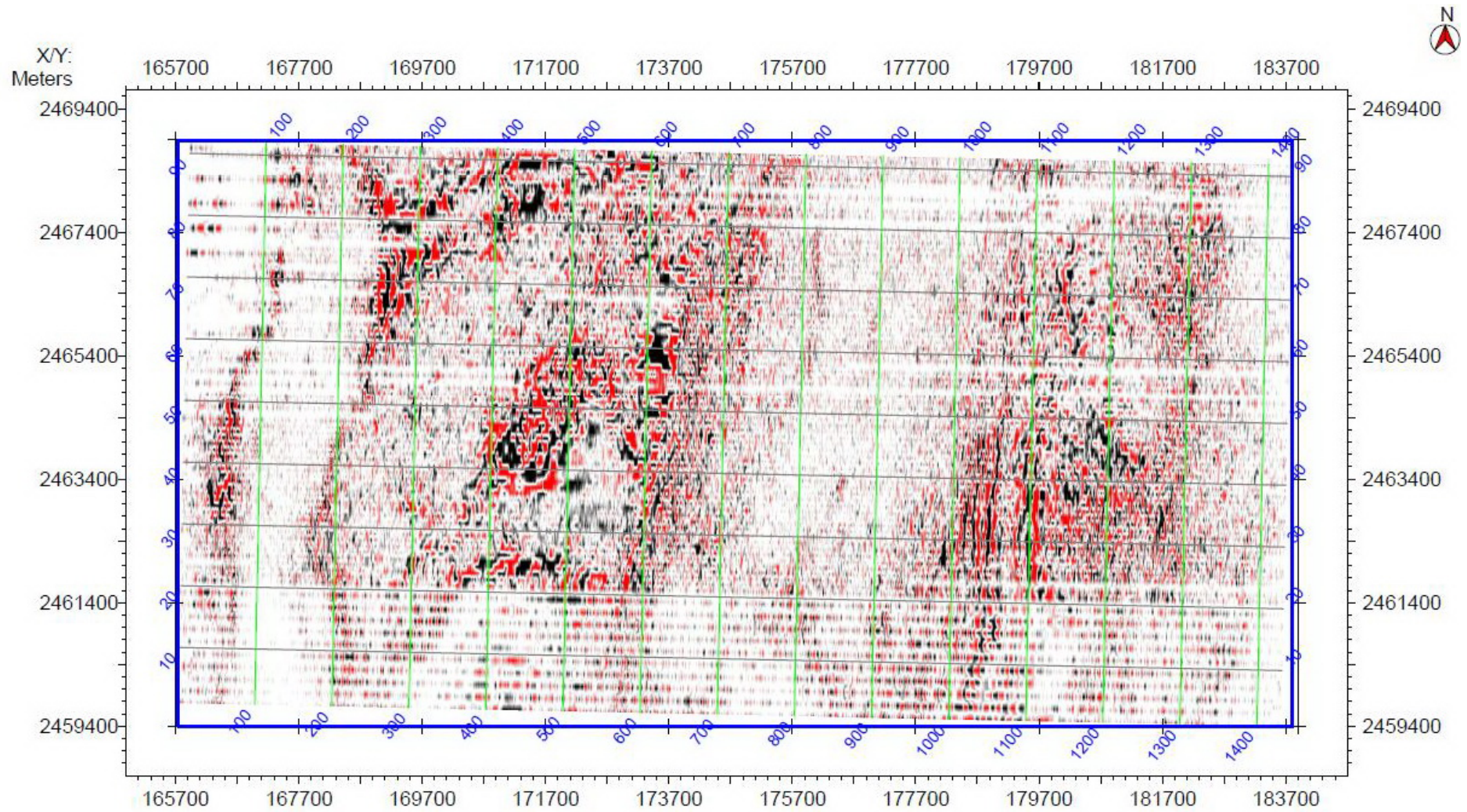
附圖 16：雙程走時 2.0 秒之時間切面。



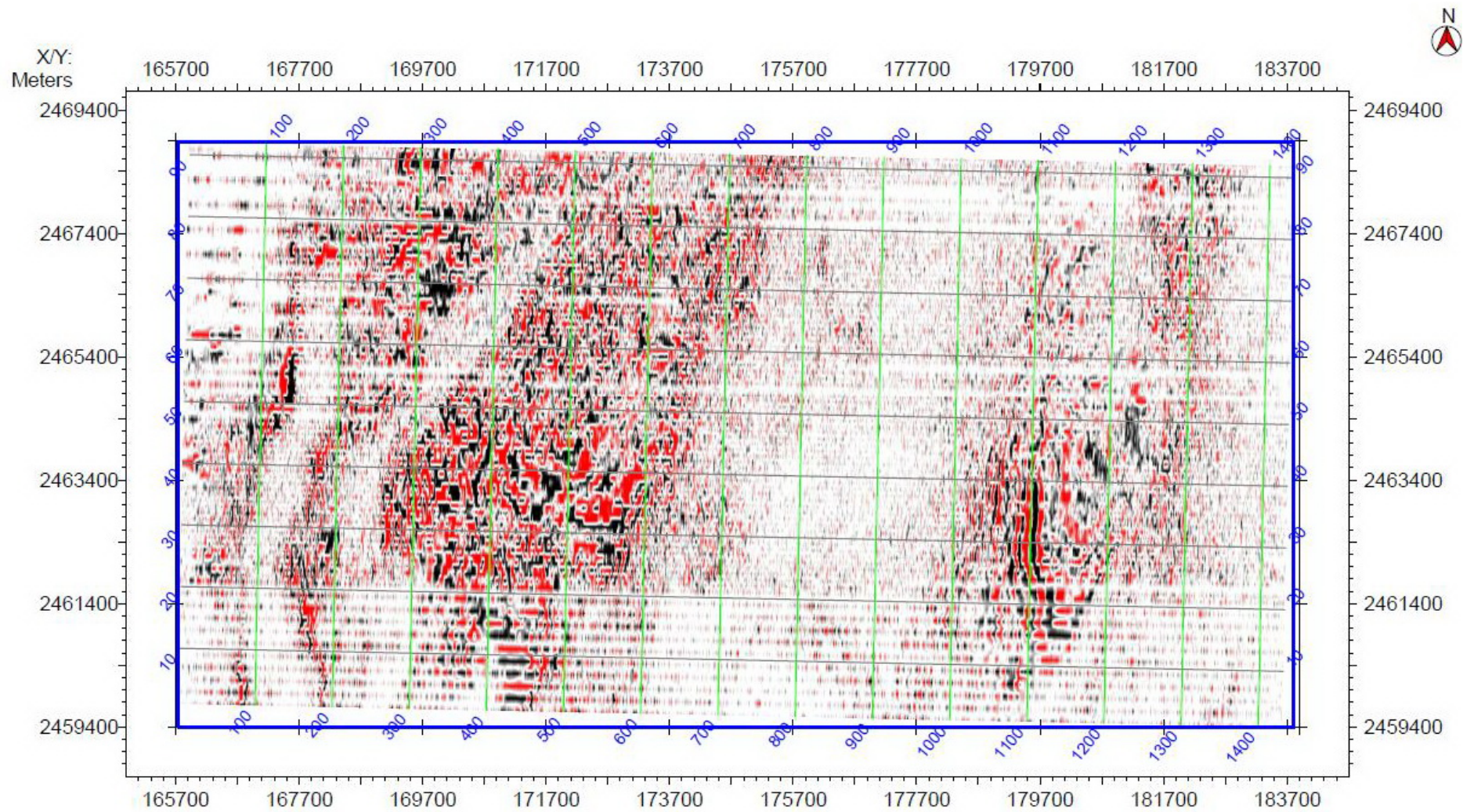
附圖 17：雙程走時 2.1 秒之時間切面。



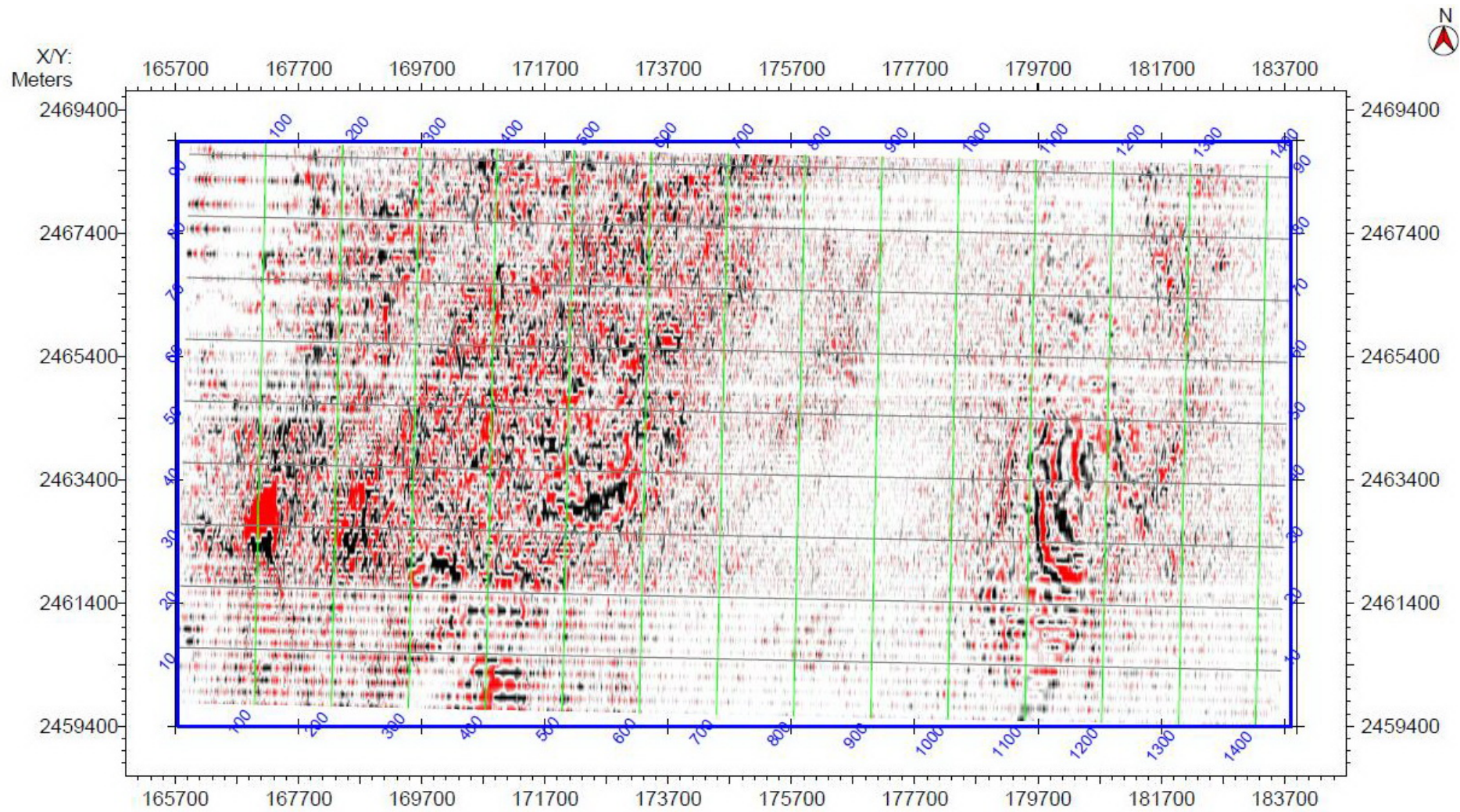
附圖 18：雙程走時 2.2 秒之時間切面。



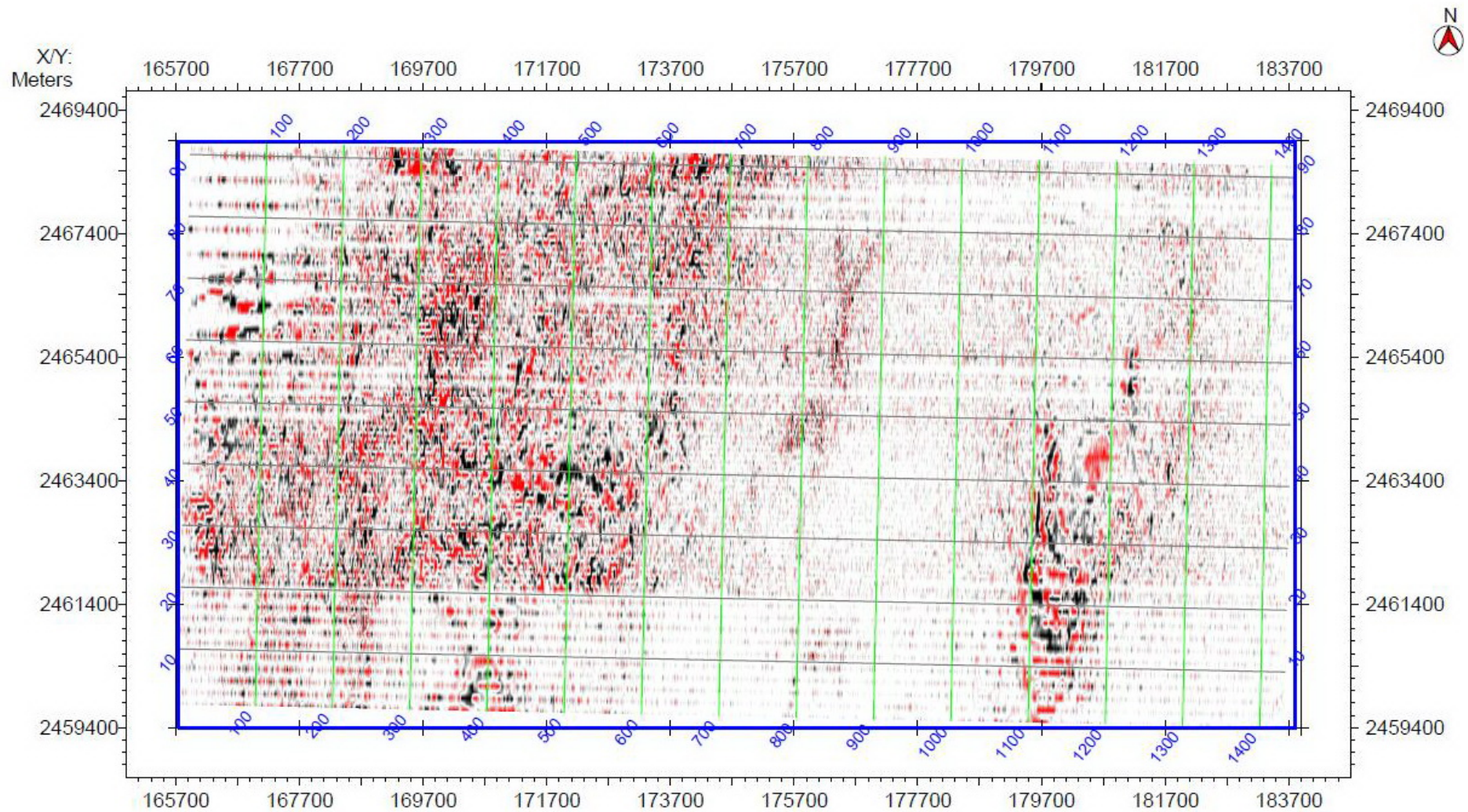
附圖 19：雙程走時 2.3 秒之時間切面。



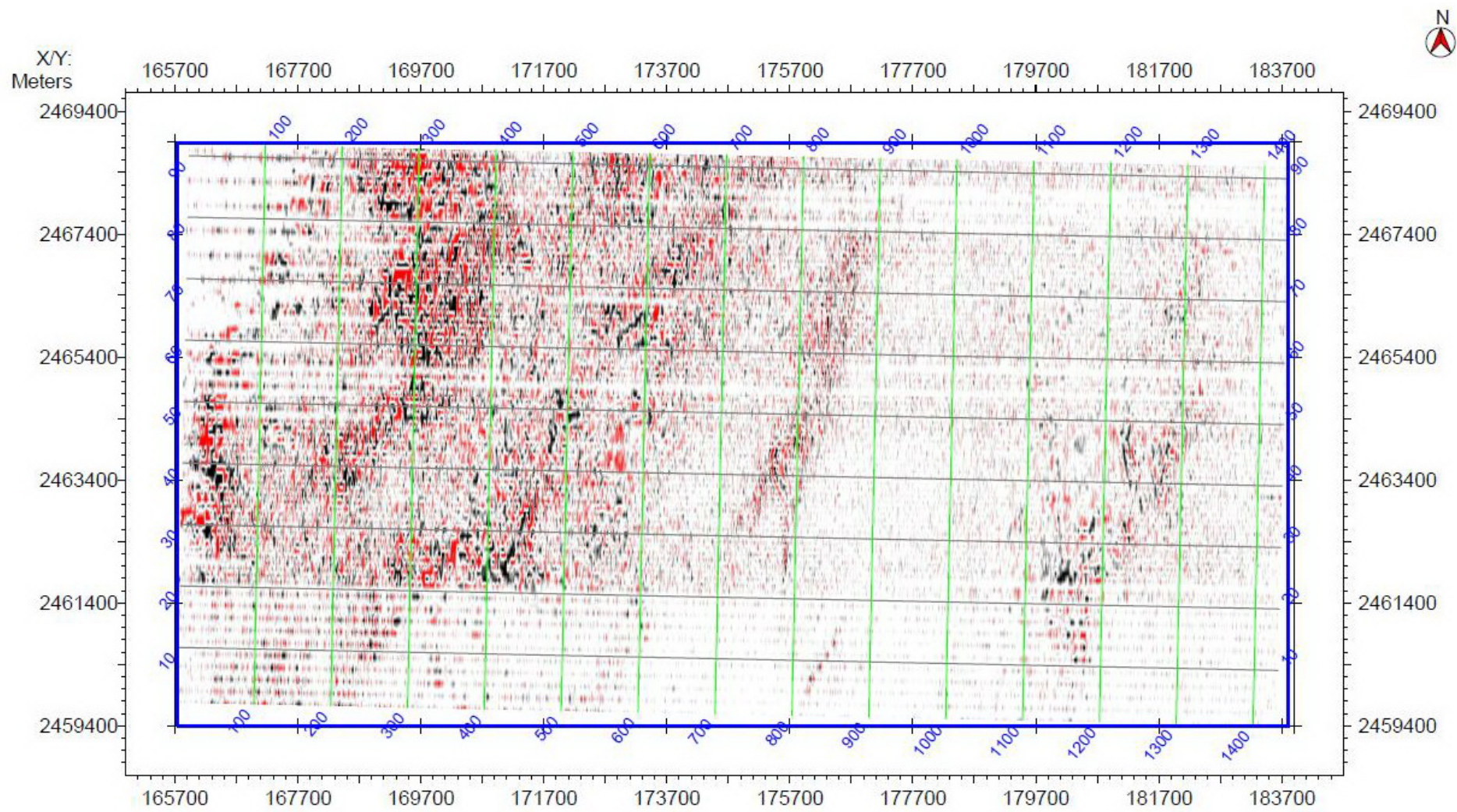
附圖 20：雙程走時 2.4 秒之時間切面。



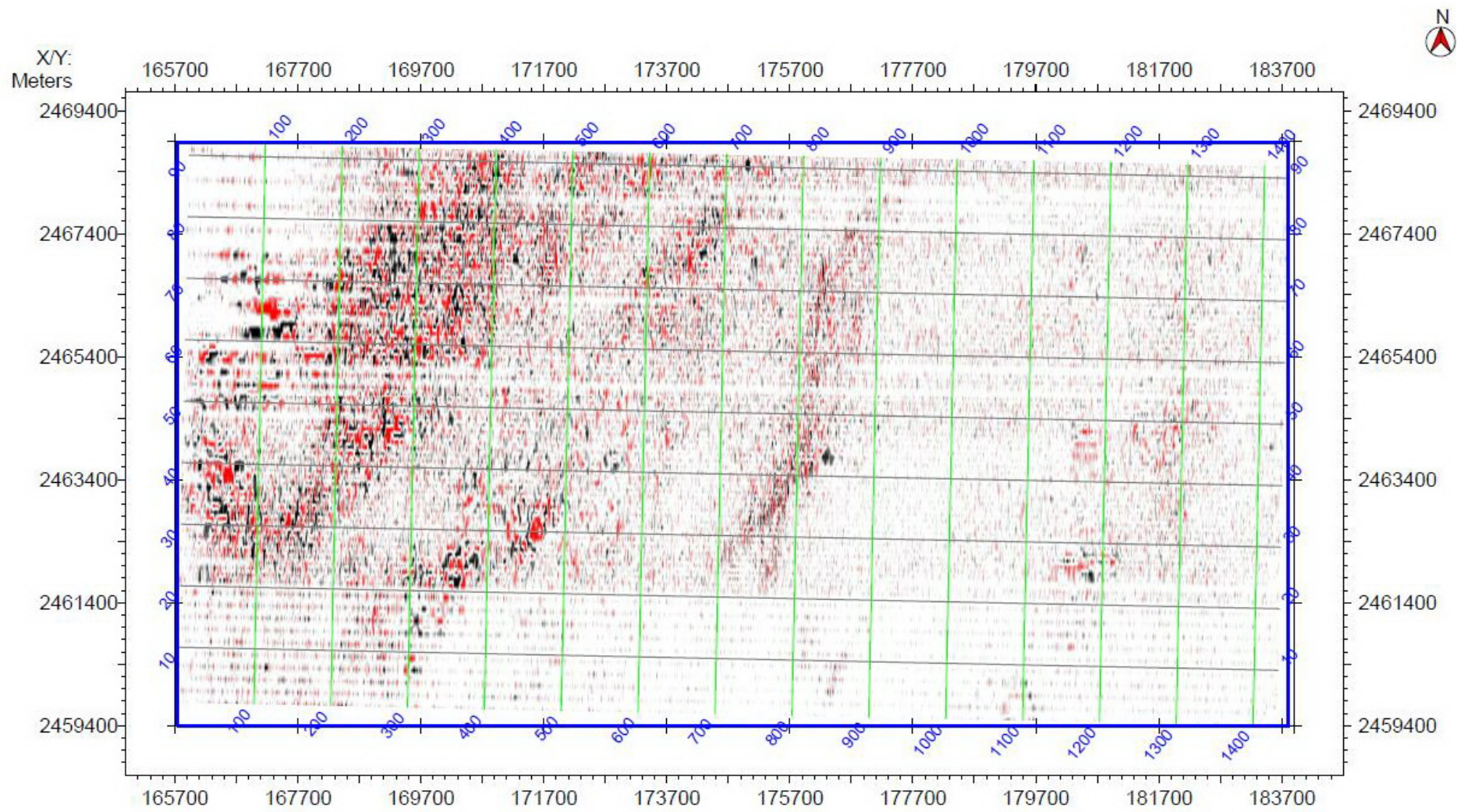
附圖 21：雙程走時 2.5 秒之時間切面。



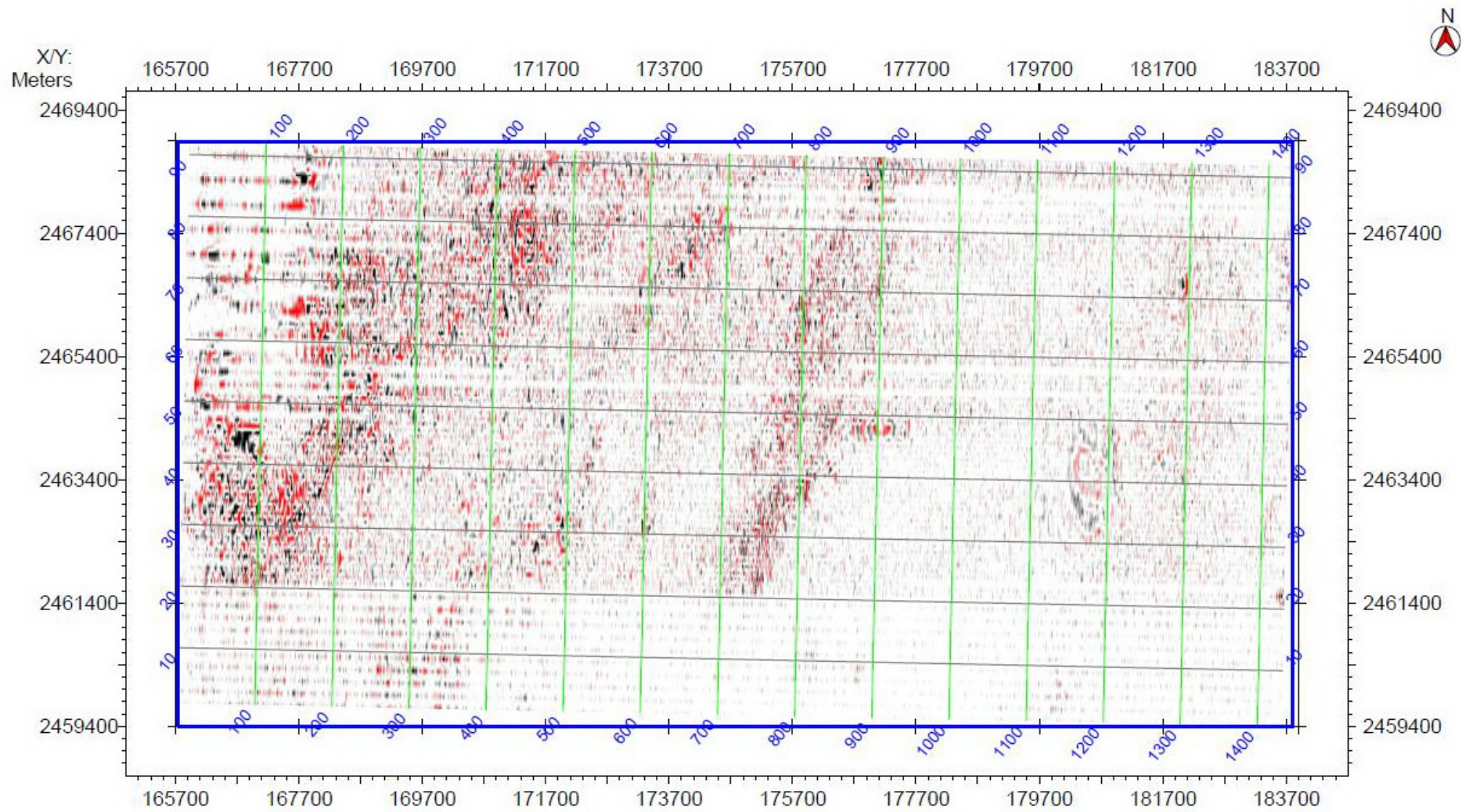
附圖 22：雙程走時 2.6 秒之時間切面。



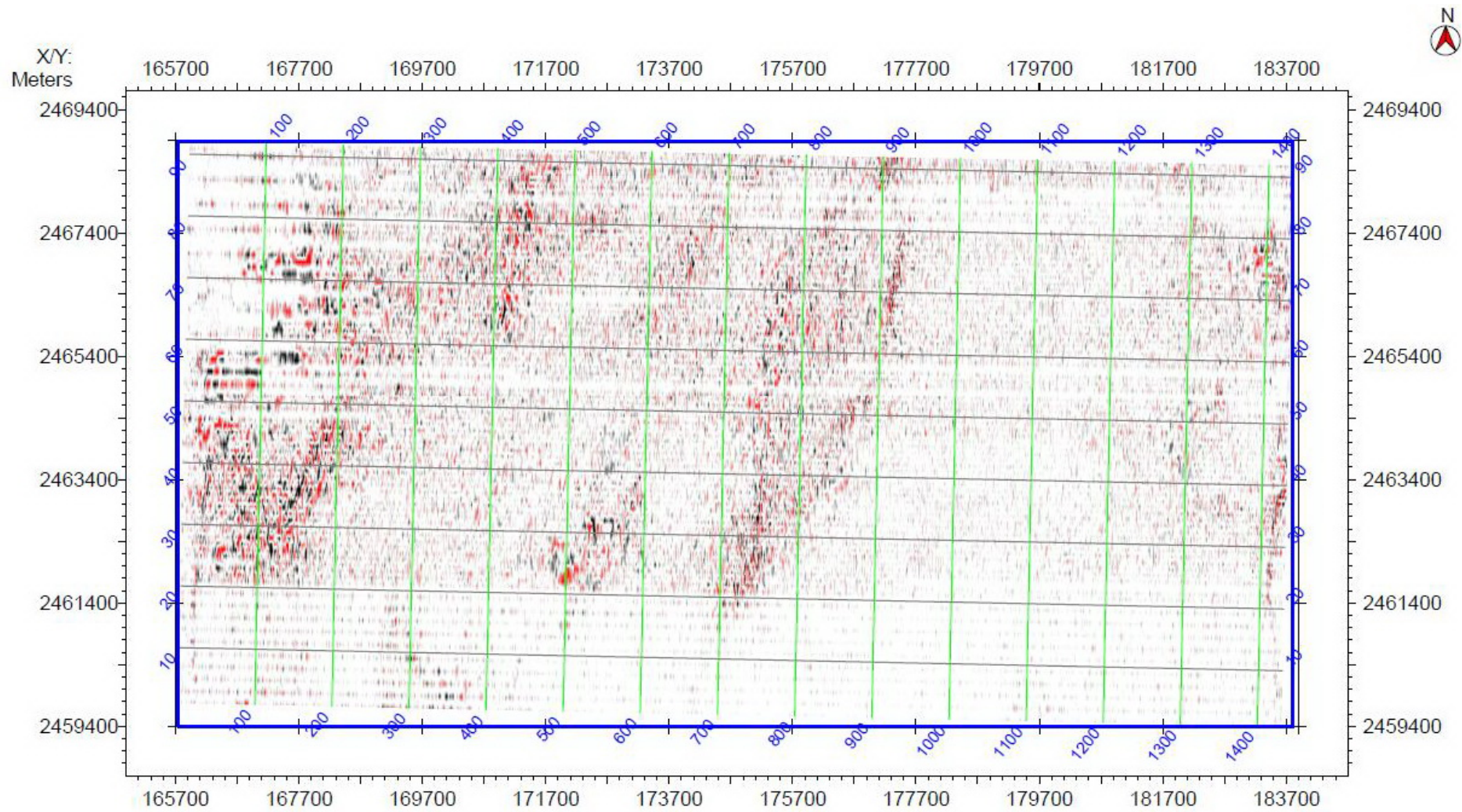
附圖 23：雙程走時 2.7 秒之時間切面。



附圖 24：雙程走時 2.8 秒之時間切面。



附圖 25：雙程走時 2.9 秒之時間切面。



附圖 26：雙程走時 3.0 秒之時間切面。