

出國報告（出國類別：開會）

## 參加 2011 年地球物理探勘師學會年會 出國報告

服務機關：台灣中油公司

姓名職稱：李健平 地球物理探勘師

派赴國家：美國

出國期間：100 年 9 月 16 日至 100 年 9 月 23 日

報告日期：100 年 11 月 9 日

## 摘 要

本次出國參加 2011 年地球物理探勘師學會年會，行程自 100 年 9 月 16 日至 100 年 9 月 23 日，為期八日。今年地球物理探勘師學會年會在美國德州聖安東尼奧市的國際會議中心舉辦，投稿相當踴躍，有超過 1150 篇摘要投稿，議程包含 108 個主題。本次參加會議的主要目的為瞭解地球物理探勘新技術，並吸收國外探勘方面資訊。整個行程先參加兩天的會前教育訓練課程，主題是三維震測屬性應用於好景區辨識與儲集層分類（3D Seismic Attributes for Prospect Identification & Reservoir Characterization），內容為各種常用的震測屬性原理說明與實際應用，藉由這樣的機會，對於震測屬性有更進一步的瞭解。接著參加三天的會議，會議主題相當廣泛，與地球物理探勘相關的主題都有涵蓋，此次主要對於振幅支距分析（AVO）和液裂的微震研究有比較多的注意，一些新技術可作為未來研究計畫的參考。此外，展場的軟硬體廠商對於探勘方面的新工具都有精彩的介紹，藉著這個機會多瞭解相關的軟體，比較功能差異可作為未來使用上的參考。

## 目 次

摘要 .....	1
目次 .....	2
目的 .....	3
過程 .....	3
建議與心得 .....	9
附錄 A.....	11

## 參加 2011 年地球物理探勘師學會年會出國報告

### 目的：

身為石油公司研究部門的地球物理探勘師，對於這個領域的脈動與資訊需有密切的接觸與更新，因此透過參加大型國際研討會來更新最新資訊有其必要性。在地球物理探勘領域，地球物理探勘師學會（Society of Exploration Geophysicists, SEG）年度會議為此領域的年度大型學術與技術研討會，主要的議題為探勘地下構造與尋找油氣等相關技術研討，來自世界各大洲的專家與學者，尤其是中東與南美洲與非洲的產油國家，更是不乏派員參加，這是這個研討會的特色。

2011 年地球物理探勘師學會年度會議在美國德州的聖安東尼奧市舉辦。今年有超過 1150 篇摘要投稿，議程包含 108 個主題，多為地球科學範疇的地球物理領域專業人員及學者與會發表。本次參加會議的主要目的為瞭解地球物理探勘新技術，並吸收國外探勘方面資訊。

### 過程：

此次地球物理探勘師年度會議的地點在聖安東尼奧市的 Henry B. Gonzalez 會議中心舉辦，從 9 月 16 日開始到 9 月 23 日結束，為期八天。整個會議期間的活動緊湊豐富，首先是會前的教育訓練課程，接著是研討會，最後幾天為針對特定主題的工作會。礙於經費有限，未能全程參與，選擇參與會前的短期訓練課程兩天，四天會議部份則參加三天，參加會議行程如表一所示。

此次會議，有機會報名地球物理探勘師學會所安排的會前教育訓練課程，SEG 年會通常會在會前舉辦教育訓練課程，邀請的講師皆為這個領域與主題中經驗豐富的資深講師，不管是在實務上或是理論上都有深入鑽研。本人所選的課程主題為 3D Seismic Attributes for Prospect Identification & Reservoir Characterization，由奧克拉荷馬大學的 Kurt J. Marfurt 教授講授。Marfurt 教授經歷相當豐富，取得博士學位後，曾在紐約擔任教職。五年後加入 Amoco 石油公司的研究部門，其間對於震測模擬、信號分析、盆地分析、震測屬性分析、反射層析成像、震測逆推等技術有皆有經驗。Amoco 石油公司工作期間，獲得五項專利。1999 年到休士頓大學擔任教授，目前為奧克拉荷馬大學的教授，主要為發展震測屬性技術。Marfurt 教授著作相當豐富，除了上百篇文章發表外，還著有兩本由 SEG 所出版的書，並擔任期刊的編輯。

課程內容主要講述透過震測屬性的分析，對於油氣的信號做比對與研判，確認油氣

所在位置。兩天的短期課程，由於啓程時，航空公司的班機故障，延誤半餘天的時間，抵達聖安東尼奧市已是早上 11 點，趕去教室時已漏了半天的課程。所幸講師準備的教材豐富詳細，之後仍可以花時間研讀教材來理解內容。課程中介紹許多不同的震測屬性與技術，如複波線 (complex traces)、相關性資料體 (coherence cube)、頻譜分解 (spectral decomposition) 等。

震測屬性在震測解釋上的重要性在於透過一些物理特性或統計分析，提高震測解釋的確定性，降低探勘風險。這樣的技術目前已是震測解釋上不可或缺的一支。然而這樣的觀念似乎未在本公司深入扎根，一切還是以震測構造解釋為主，除了少數例子外，其他先進的技術尚未與實際研究做連結與應用，顯示本公司在這方面似乎仍落後於國外的水準。

這個課程除了講述原理外，透過一些實例來說明這些技術的可行性。有些技術仍在發展中，有些技術已經發展成熟，可應用於本公司未來研究計畫。其他關於訓練課程內容的細節請見附錄 A。

表一、本次參加 2011 年 SEG 年會之行程。

日期	地點	行程
100/9/16-17	台北-洛杉磯-休士頓-聖安東尼奧	去程
100/9/17-18	聖安東尼奧	參加 2011 年地球物理探勘師年會短期訓練課程
100/9/19-21	聖安東尼奧	參加 2011 年地球物理探勘師年會
100/9/22-23	聖安東尼奧-舊金山-日本-台北	返程

接著為會議的主要議程，主題包含震測資料採集、非均向性 (anisotropy)、振幅支距分析 (AVO)、井下地球物理、電磁探勘、全波形逆推、地熱、重力與磁力、地球物理理論、震測解釋、近地表效應、微震研究、岩石物理、震測逆推、波傳模擬、震測資料處理、層析成像 (tomography) 等。其中個人比較有興趣的主題有 AVO 的技術、微震 (microseismic) 與儲集層辨識 (reservoir characterization)，可惜儲集層辨識的主題安排在星期四上午，由於行程安排，未能留下來聆聽。

在 AVO 的主題上，目前已經發展到振幅方位角分析 (Azimuthal AVO, 即 AVAz)，也就是探討 AVO 的方位變化問題。藉由不同方向的 AVO 變化來瞭解油氣蘊藏潛能。

振幅方向性的研究，主要是瞭解構造的非均向性（anisotropy）變化，其物理意義為裂隙發展方向與應力變化的影響。在水平應力場的自然裂隙和方位角變化提供非均向性的結果，這樣的非均向性可以由震測資料所量測出。

在微震研究方面，地震學上的微震研究通常是來瞭解小地震的發生位置與震源機制，由此確認斷層位置與走向，以及應力的方向，其中牽涉到地震定位的技術與斷層面解的辨識。然而這樣的技術應用在石油工業，則是在油氣開發生產階段，利用液裂（hydraulic fracturing）技術激勵生產時，同時以微震用來監測裂隙走向，並瞭解實際上施以應力所產生的裂隙是否有達到需求。



圖一、SEG 年會會場入口照片。

研討會發表的水準參差不齊，通常到會場前會先從議程中排出當日預定想聽的演講題目，結果實際到場聆聽的內容和預想的有段差距，或是講者的報告水準不夠，儘管內容吸引人，但是講述不夠清楚或是過快過慢，使得聽者吸收上的不良，這樣的狀況這次有不少場。此次聽到比較特別一提的主題有幾個，簡略描述如下：

在 Azimuthal AVO analysis: stabilizing the model parameters 的內容中，由 CGGVeritas 和 BP 的講者共同發表，AVAZ 是用來區分水平地層的裂隙分佈與方向，此研究主要是提出一個方法來穩定（stabilization）AVAZ 的參數。以距離－方位角分佈，包含方位角

區間與同距離向量 (common offset vector, COV) 兩種方法，來探討 AVAZ 模型參數的誤差。阿爾及利亞的陸地廣角資料 (WAZ) 用來展示這個方法的結果，這個方法可以降低非均向性梯度的雜訊，有助於後續的震測解釋。

Earthquake: A naturally occurring source of low-frequency data，這個題目是由艾森美孚上游研究公司 (ExxonMobil Upstream Research Company) 的研究人員所發表，反射震測資料包含兩個不同尺度的資料，低頻訊息由 NMO 速度分析導出，其信號在公里級的尺度 (即 1-2 公里)，然而高頻資料來自於反射振幅隨支距的變化 (AVO)，尺度在數十公尺。在兩個尺度資料之間有個空白帶，約在 1-6 Hz 的信號。這樣的信號空白帶會造成反射震測資料做震測逆推，以及全波形逆推時的問題。此研究利用地震資料所得到的速度模型，相較於震測資料的結果更接近於實際的速度模型 (由相當多口井所建立的速度模型)。結果說明地震站側向的解析度可以到 250 公尺，這樣的地震資料可以提供低頻的淺層速度影像，約到五公里深，對於油氣探勘的應用極有幫助。聽了這樣的研究頗令人振奮，因為地震儀器與技術應用於油氣探勘並不多見，多在生產或開發階段的微震研究，這個研究則較偏向探勘時的應用。

在 Distinguishing faults & fractures using microseismic energy release in the Barnett Shale 的題目中，利用地震統計常用的 Gutenberg & Richter 關係式分別計算該區域微震與裂隙的 b 值，即是地震規模與地震次數線性關係的斜率。裂隙是由液壓激勵油氣生產所造成的，其 b 值比斷層錯動造成地震的 b 值來得大，一般裂隙的 b 值約為 2，斷層 b 值約為 1，藉由 b 值來瞭解當地的應力狀態。不管是時間或是空間分佈，b 值都可指出注水激勵油氣生產試驗誘發微震的差別。由 b 值的空間分佈有助於瞭解激勵試驗在儲集層中成功的區域，可作為注水計畫的決策參考。

Q determination, corner frequency and spectral characteristics of microseismicity induced by hydraulic fracturing 這個題目，由 Calgary 大學的 Eaton 所報告。於 2010 年在加拿大的 central Alberta 對儲集層所做的液壓裂隙試驗，記錄到微震活動來研究衰減因子 Q，以理論的震源模型 Brune source model 計算微震。這樣的結果可估算微震規模可偵測的距離。關於這樣的主題，由於個人過去也有經驗，對於其利用的方法有些不同的看法，但是衰減研究應用在探勘也是值得發展的項目。

Long period, long duration seismic events during hydraulic fracture stimulation of a shale gas reservoir，這個題目是史丹佛大學的 Das 與 Zoback 教授的研究。長週期地震這個主題近幾年來在地震界是很熱門的主題，Nature 和 Science 期刊都有相關結果發表。不過這個

研究是發現在儲集層液壓試驗觀測到不尋常的長週期地震，其與在隱沒帶觀測的構造地動序列很相似。在最大注水壓力時發現長週期地震的數量最多，可能的解釋為液裂產生的高孔隙液壓造成已存在的斷層面慢滑動。有些地震在停止注水之後停止，意指其為注水所誘發，然斷層面繼續錯動可能是斷層面殘留的孔隙壓力所造成。

Carbon sequestration monitoring with acoustic double-difference waveform inversion: A case study on SACROC walkway VSP data，由麻省理工學院與美國 LANL 國家實驗室共同研究，此研究與二氧化碳封存（CCS）的研究有關。二氧化碳封存的技術可能有助於減緩全球暖化，這個研究透過波形層析成像的技術監測二氧化碳注入的情況，觀察其隨時間的變化。利用傳統與雙差分兩種方法對於德州 SACROC 的油氣場址進行二氧化碳監測，以垂直炸測的資料分析，顯示隨著二氧化碳的注入，P 波速度減少，這樣的結果可由雙差分方法求得的速度構造看出。

地震學為研究地下構造的一個重要工具，然而套用在小尺度的液裂試驗與注氣試驗，卻是另外一種應用。由這些報告的內容可以發現，在某個領域的基本方法與技術套用到另外一個領域，可能激發不同的火花。

屬於地球物理探勘的 SEG 會議議程中，震測信號處理與改進佔了很重要的一個部分，震測解釋結果與真實地下構造的吻合程度與震測資料品質息息相關，由於震測解釋所仰賴的是清晰的震測資料，如果震測資料不清楚，在震測解釋結果的說服力降低，想像空間增加，與實際地下構造吻合的機會也會降低。可惜目前公司在資料處理這方面未能有足夠的資源與人力，且這些前端作業也較不易得到實質的重視與回饋，這對於台灣中油這樣規模的公司，實屬可惜。如果說勘定井位是綜合各種資料評估的結果，需要現場單位分析來決定，而這些資料處理的技術正是研究單位能夠發揮的地方，然這需要長期研究開發的技術，並非短期可見成效或是急就章的計畫可以完成，一切就要看公司對於探勘方向的人力分配是否有長遠規劃。

由 SEG 會議的主題可以看出，目前熱門的主題與技術，以及未來發展的方向。本次會議中，震測資料處理、數值模擬、全波形逆推等都是震測信號處理相關的主題。此外，震測屬性的應用也有相當多的場次。地球物理探勘即是利用地球物理的原理著手，針對震測資料與井測資料進行分析，其中物理佔了很大的比重，從震測資料處理、震測解釋到勘定井位，過程中同時應用地質與地物的知識。單純的構造震測解釋在 SEG 會議比較少有文章發表，顯示這樣的內容不全然是地球物理探勘的主要範疇，其中包含的層序地層或是地質概念，則較偏於地質背景的專業工作。關於這點，本公司仍是將這方

面歸類於地球物理的範疇，儘管在實務工作上，並無地質或是地物領域的分別，而是以計畫完成為目標，但基本的背景與訓練不同，將會造成實際作業的差異。

大型國際會議通常都會有軟硬體廠商或是全球知名石油公司在會場的展區做商品展示、促銷活動，以及增加知名度（圖二）。在 9 月 18 日星期天參加 SEG 會議前晚的破冰（ice break）晚會，搶先在廠商的展場上參觀，感受石油公司與相關軟硬體公司交流活動的熱絡氣氛。可惜台灣參加此會的人並不多，並未能在這個場合遇到其他的來自台灣的與會者，東方面孔以中國大陸與日本人居多。



圖二、會議展場照片。

參觀幾家儀器公司展場，包含目前本公司正在使用的 Sercel 儀器公司，瞭解新產品的功能。此外，INOVA 公司的震盪震源車也有在展場展示。在震測解釋方面的軟體公司 Landmark 公司、Paradigm 公司以及 Kingdom 公司都有在展場講解最新版的軟體功能，以及對於震測解釋軟體發展的理念與趨勢。而震測逆推與震測屬性方面的 Fugro-Jason 公司，今年在講解時間表的安排上，特別安排了西班牙文和中文的講解，由此可見軟體公司對於拓展市場的努力。Fugro-Jason 公司針對地震到模擬（from seismic to simulation）的主題，提出他們公司軟體對於這個方面的努力，讓身為使用者的我對於這方面的發展有更清楚的認識。此外，阿拉伯與大陸石油公司的展場都相當大，由此可見大油公司的

財力雄厚。

經過三天的會議，儘管第四天早上仍有半天的議程，然則因為行程安排，所以於第四天一早就搭機踏上歸途，完成此次的參加會議與訓練課程的任務。

### **建議與心得：**

這次是第二次參加地球物理探勘師學會的年會，對於這個會議的運作流程，以及油工業與石油探勘方面的技術研討主題已較為熟悉且有概念，收穫自然也比第一次參加來得多。地球物理探勘師學會年會的性質，與之前參加過的美國地球物理學會秋季大會最大的不同在於這個是偏向於業界導向的會議，會議中發表的講者，很多是來自世界各石油公司，而非單純來自學術或是研究單位，會議的內容與技術都比較偏向應用層面，與一般的科學研究不盡相同，儘管是第二次參加，仍深感其間的差異。會議內容的主要目的都在於改進地球物理探勘的技術，以提高油氣探勘斬獲。有些油公司或是技術服務公司藉由發表的新技術來宣傳該公司的能力與技術，從中廣告吸引有興趣的客戶。雖然技術研討部分，需要有實做背景才能體會其研發創新的精髓，但是透過這樣的會議，仍能瞭解其技術進展程度，作為之後的參考。

此外，國外大油公司的研究部門大都以發展探勘技術，改善提高油氣採收率，開發軟體與技術，而非在做礦區評估的工作，這方面與目前本公司探勘研究單位的走向差別很大。當然，探勘技術的改進最主要的目的仍然是應用於礦區評估的結果，以提高公司探勘成功機會，但是兩者不應混為一談。

此行也發現，國外很多油公司是跟學術單位合作，透過贊助的機制培育及訓練未來擁有油公司所需技術專長的人才，這樣的機制在國內似乎仍不易見，而且目前國內大專院校擁有石油探勘方面專長的學者並不多，且是以偏向學術研究為主，和石油公司所需的技術與能力仍有落差，加上國內油公司目前只有兩家，本公司又屬於國營事業，需經過經濟部招考進用新進人員，就算與國內學術單位合作，人才不見得會通過考試進入本公司。因此國外油公司與學術界合作培訓所需專長人才的機制要在國內運行，可能會有些問題。

透過參加國際研討會的機會，可知道本公司目前使用的技術是否跟上世界的潮流和水準。當然，一些基礎的工具與方法對於石油探勘有其不可取代性，但是新技術與新觀念將是帶領公司開發新油源的契機，瞭解最新發展的趨勢，做為未來研究計畫的參考。

在安排本次行程方面，由於公司辦理出國開會事宜的運作流程，在購買機票確定行程前需先提出預定行程與預算計畫書，交付審查通過以後才可進行購買機票及其他相關作業。然而在計畫書尚未審查通過前，因為時程上未能確定，則機票與旅館的預訂則不能付款確定。而行程未能確定前不能先付款，又導致無法在計畫書上提出確切的行程。此外，從機票訂購到開票也有一定的時間，否則機票票價變動又會影響計畫書上所列的預算。目前的規定會造成兩者在程序上的矛盾，需在預訂機票確定行程與計畫書交付審查兩者之間來回溝通才能達成，其間的行程安排過程會造成不必要的時間浪費，希望能在程序上有所簡化，這是一點小小的建議。

最後感謝探探研究所的長官與同仁們，以及石油基金計畫的相關人員，提供這次出國開會的機會，吸收國外探勘方面的技術，增廣見聞。期望本次參加會議所帶回來的參考資料能夠對於公司其他相關人員有所幫助。

## 附錄 A：

### 三維震測屬性應用於好景區辨識與儲集層分類

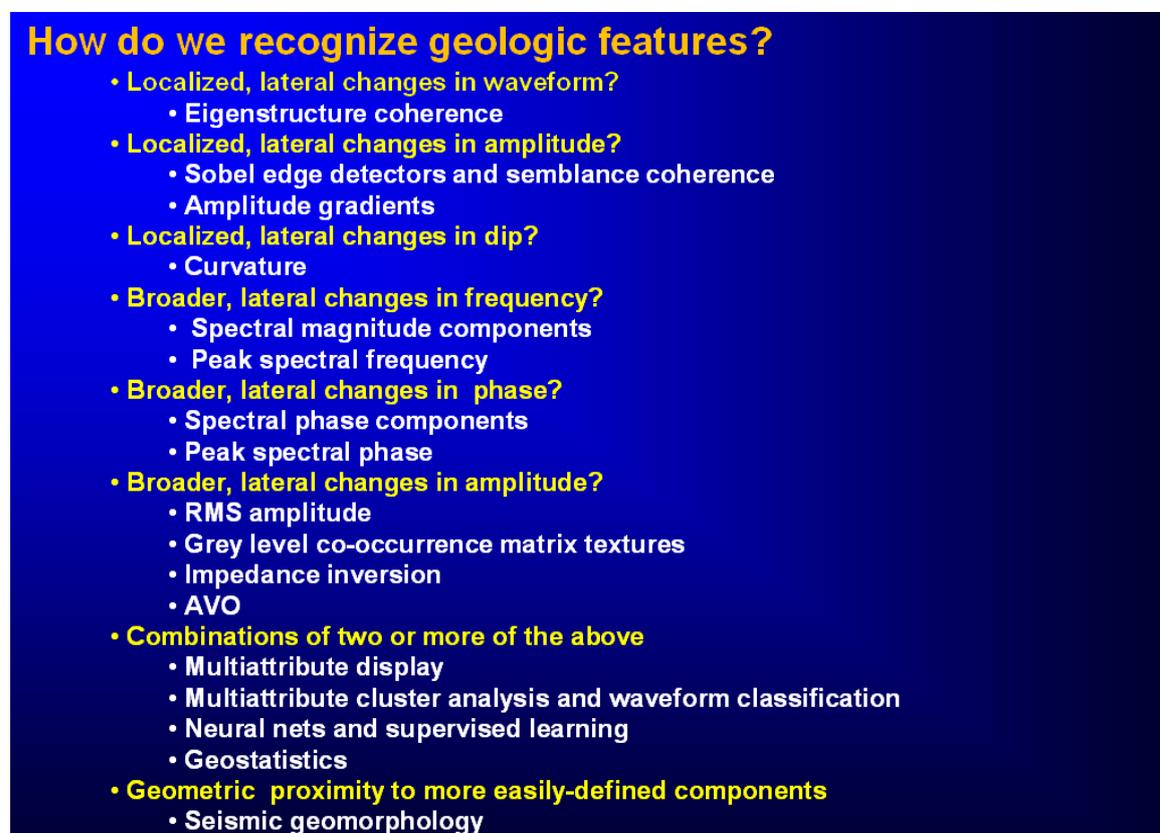
#### 3D Seismic Attributes for Prospect Identification & Reservoir Characterization

##### 教育課程內容概述

震測屬性是透過震測資料來瞭解地下構造在幾何上、運動學上、動力學上或是統計學上的特性。一般的震測屬性包含反射界面振幅、反射界面時間、反射界面的傾角與方位角、振幅相關性、振幅與支距關係、頻譜分解等，這些都是有物理意義及統計根據的屬性。此外，還可衍生出上百種可利用的屬性。簡單地說，震測屬性就是將震測資料轉化成各種視覺上或定量上有助於震測解釋的資料。

1960 年代，震測屬性已經開始為震測解釋所應用，隨著時間的演進，發展出許多不同的震測屬性提供油氣探勘上的應用。目前震測資料已經走到三維資料體的階段，對於這些大量且精細的震測資料，震測屬性分析又發展出不同且精細的方法。

關於不同的地質構造特徵，可用不同的震測屬性來尋找其特性。主要是依照震測信號在振幅、相位、頻率等各種變化作為震測屬性的方法辨識（圖 A.1）。



**How do we recognize geologic features?**

- **Localized, lateral changes in waveform?**
  - Eigenstructure coherence
- **Localized, lateral changes in amplitude?**
  - Sobel edge detectors and semblance coherence
  - Amplitude gradients
- **Localized, lateral changes in dip?**
  - Curvature
- **Broader, lateral changes in frequency?**
  - Spectral magnitude components
  - Peak spectral frequency
- **Broader, lateral changes in phase?**
  - Spectral phase components
  - Peak spectral phase
- **Broader, lateral changes in amplitude?**
  - RMS amplitude
  - Grey level co-occurrence matrix textures
  - Impedance inversion
  - AVO
- **Combinations of two or more of the above**
  - Multiattribute display
  - Multiattribute cluster analysis and waveform classification
  - Neural nets and supervised learning
  - Geostatistics
- **Geometric proximity to more easily-defined components**
  - Seismic geomorphology

圖 A.1 不同地質構造特徵需利用不同的震測屬性辨識。

震測屬性種類相當多，與地層面相關、地層厚度相關、單一波線震測屬性、多波線震測屬性、疊前震測屬性等，依據其種類分類，可由圖 A.2 來表示。

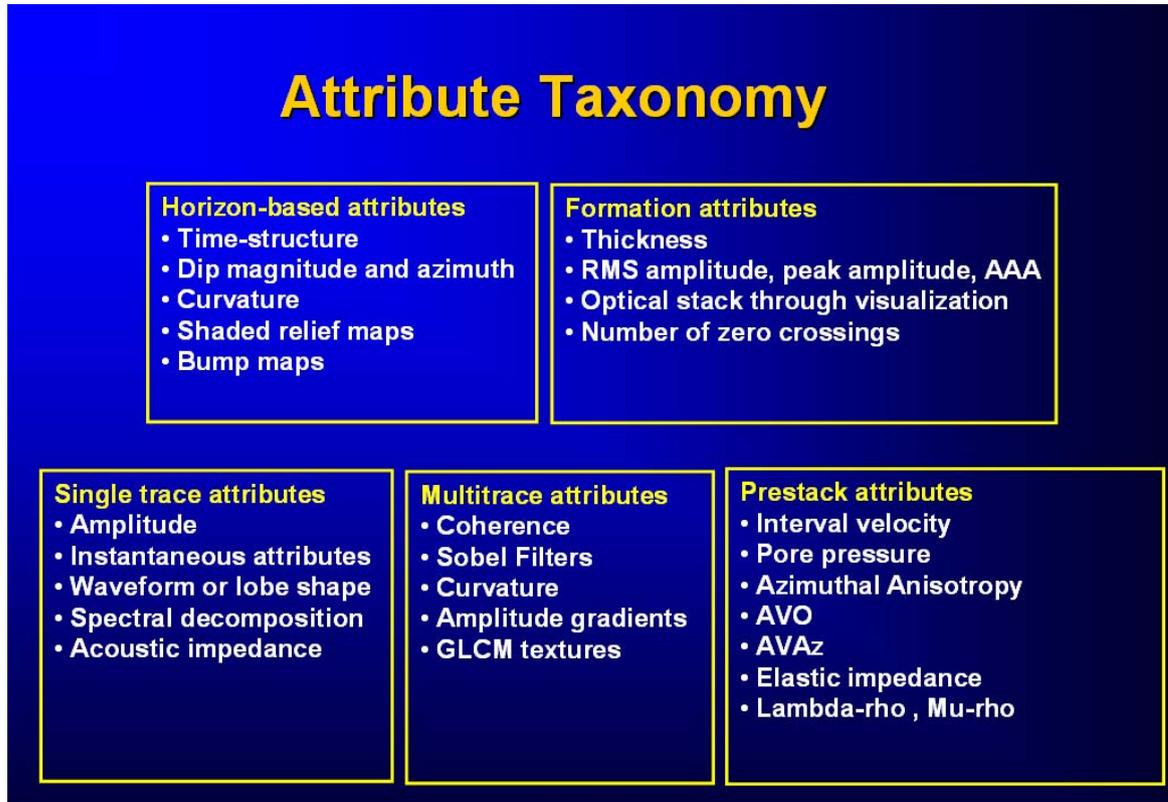


圖 A.2 不同震測屬性的分類。

下列就幾種常見的震測屬性來說明：

#### 1. 頻譜分解 (spectral decomposition)

頻譜分解的方法主要是將時間域的資料轉到頻率域，將較寬頻的震測資料分成幾個不同的頻帶，透過不同頻帶的信號強弱來瞭解地層厚度變化。利用傅立葉轉換 (Fourier transform) 的摺積理論 (convolution theorem) 將地層反射率  $r(t)$  與代表震源函數的漣波  $s(t)$  做摺積運算，加上隨機的函數  $n(t)$ ，可以得到震波資料  $u(t)$  (圖 A.3)。這幾個函數同樣也可以在頻率域做對應的運算，依照摺積理論在時間域做摺積運算，表示在頻率域做相乘運算，然後可在震波資料的函數中分解出不同頻帶的資料，其反映的信號強弱即是地層厚度的變化。

由於進行分析時，通常是針對某層地層或是某個區間來做頻譜分解，因此反射率視窗的摘取為短時間視窗，其在頻率域所展現的為多色譜 (band-limited colored spectrum)，而非長時間視窗所展現的白光譜 (white spectrum)。頻譜分解的結果可以提供與薄層有關的河道與三角洲等地質構造在視覺上的呈現，幫助地質模型的解釋。

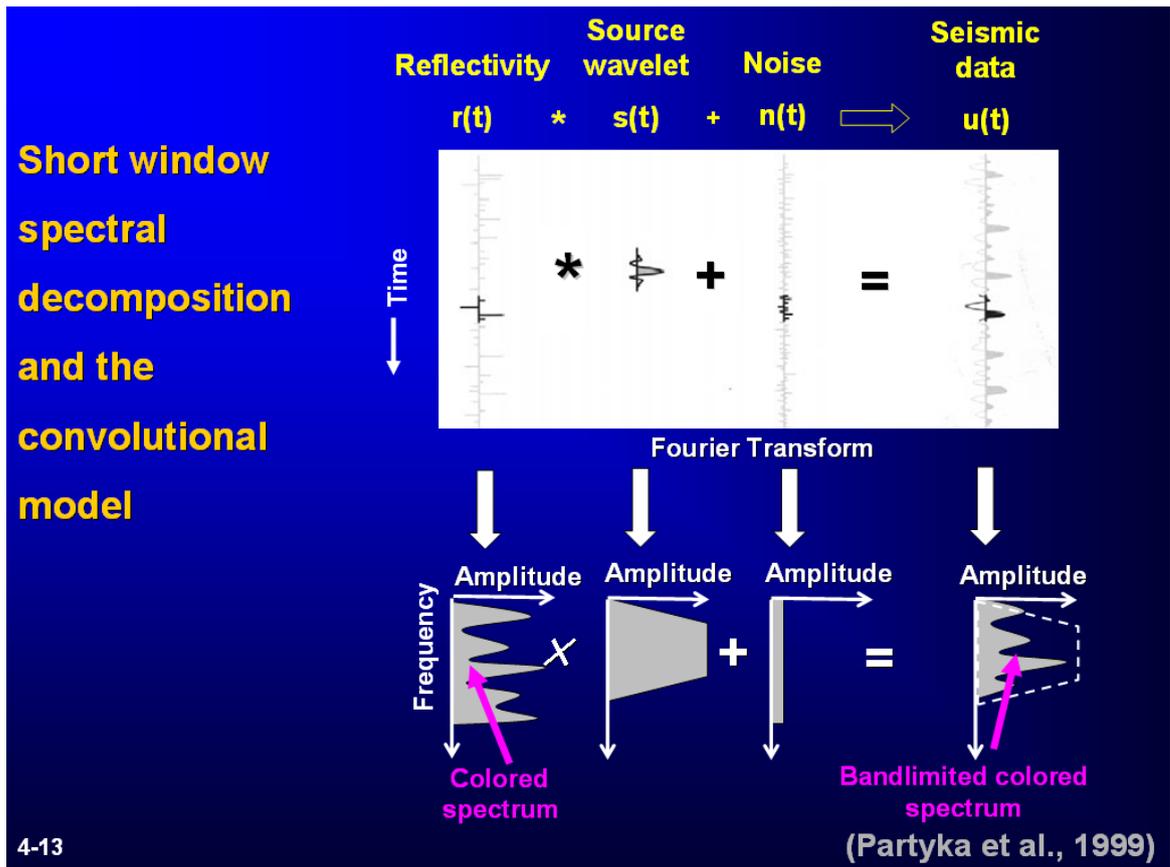


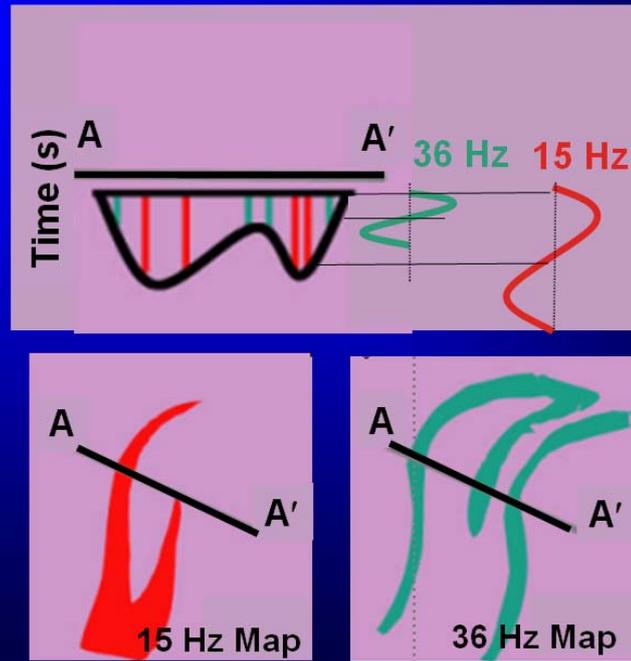
圖 A.3 震波信號在時間域與頻率域經過摺積理論所得到的結果。

圖 A.4 為頻譜分解方法應用於震測解釋上的的示意圖，高頻的資料可以解析薄層的構造，而低頻資料反映厚層的地層，由高頻到低頻不同頻段的資料相互比較，可以對地下構造（如古河道、地層）的厚度有所瞭解。

圖 A.5 為同一地層在不同頻帶所反映的能量強弱，透過這樣的分析可瞭解該區域地層厚薄的變化。10 Hz 反映較厚的地層，由圖可看出河道最厚的位置在左圖的黃色分佈，而 50 Hz 頻譜圖反映較薄的地層，顯示為河道的邊緣的位置。

一般傳統的方法是利用時間厚度來觀察地層的厚薄，透過頻譜分解的結果會比時間厚度圖的結果好，其原因在於頻譜分解這個方法的優點在於利用比較多的資料點來解析厚度問題。由時間厚度圖來看地層厚度，可能只有利用到震測資料的兩個採樣點來說明該層厚度，然而以頻譜分解的方式，取其時間視窗可用到震測資料約 50 個採樣點，如此利用較多資訊的結果當然可提供較清楚的厚度分佈。

## Thin bed tuning variation with thickness

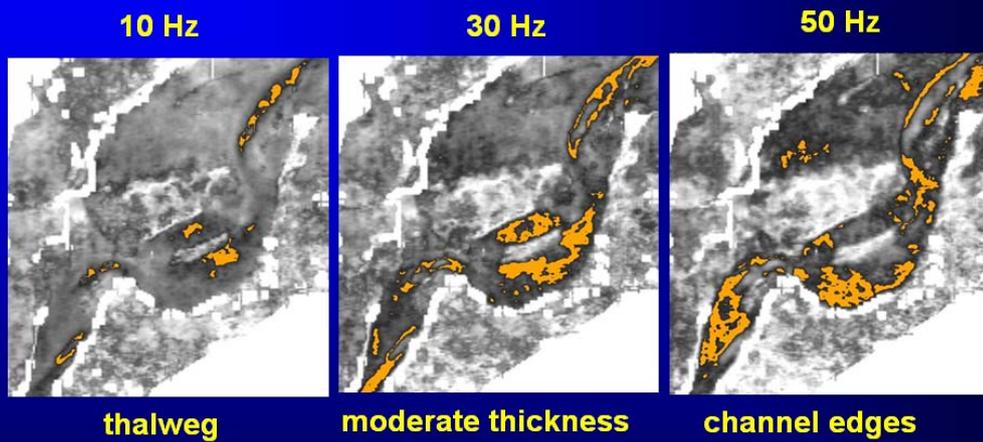


4-16

(Laughlin et al., 2002)

圖 A.4 不同頻率對所反映的地層厚度示意圖。

## Thin bed tuning variation with thickness



4-17

(Courtesy of Apache Corp.)

圖 A.5 同一地層在不同頻帶對所反映的地層厚度變化，黃色代表最高振幅值的位置。

## 2. 震測相關性資料體 (coherence)

震測相關性資料體主要是量測波形或是波線的相似度。震測波形是連波與地下地質做摺積的結果，這樣的結果會在振幅、頻率、相位產生變化，與反射界面上下的聲波阻抗以及地層厚度有關。此外，聲波阻抗受到地層的岩性、孔隙率、密度，和流體類型影響，震測波形會有側向的變化。可由震測波形的側向變化知道聲波阻抗對比的側向變化。由於對於波形變化的敏感度特性，使得震測相關性為一個偵測震測資料細微變化的有利工具。

震測相關性資料體為利用震測波線的交相比 (cross correlation) 計算信號的相關性，而相關性的大小顯示地層連續與不連續的部位，藉由不連續的信號辨識斷層的所在。圖 A.6 為兩波線做交相比得到相關曲線，首先以一波線為基準，取出一約 40 ms 大小的視窗，此一視窗對於另外一波線進行交相比運算，隨著視窗的移動，可以得到一個相關性函數，隨著波線的相似度越高，則相關性函數值越大，可以透過這樣的函數來瞭解波形變化的程度，這樣的相關性可幫助震測解釋人員辨識斷層與裂隙的存在。

三維震測資料體可以在視覺上觀察構造與層序特徵在空間上的演化，將三維震測資料體計算出震測相關性資料體，尤其可以明顯呈現斷層與河道邊界的位置。圖 A.7 為相關性資料體與震測資料體之間的比較，其中粉紅色與黃色分別為垂直與平行於斷層走向。由這樣的結果可以看出相關性資料體與震測資料體在時間切面皆可看出斷層的樣貌，然而震測相關性資料體可以顯現出更細微的變化，讓震測解釋人員能更容易地標示出斷層所在。震測相關性資料體通常應用於構造與層序地層的解釋。

對於震測相關性資料體，可以做出下列的要點：

- 對於界定地質邊界（如斷層、側向層序變化等）是一個很好的工具。
- 對於大量的資料體提供快速的評估。
- 提供斷層與裂隙的定量估算。
- 震測相關性資料體可加強層序地層的訊息。
- 應沿著地層傾角方向來計算震測相關性資料體。

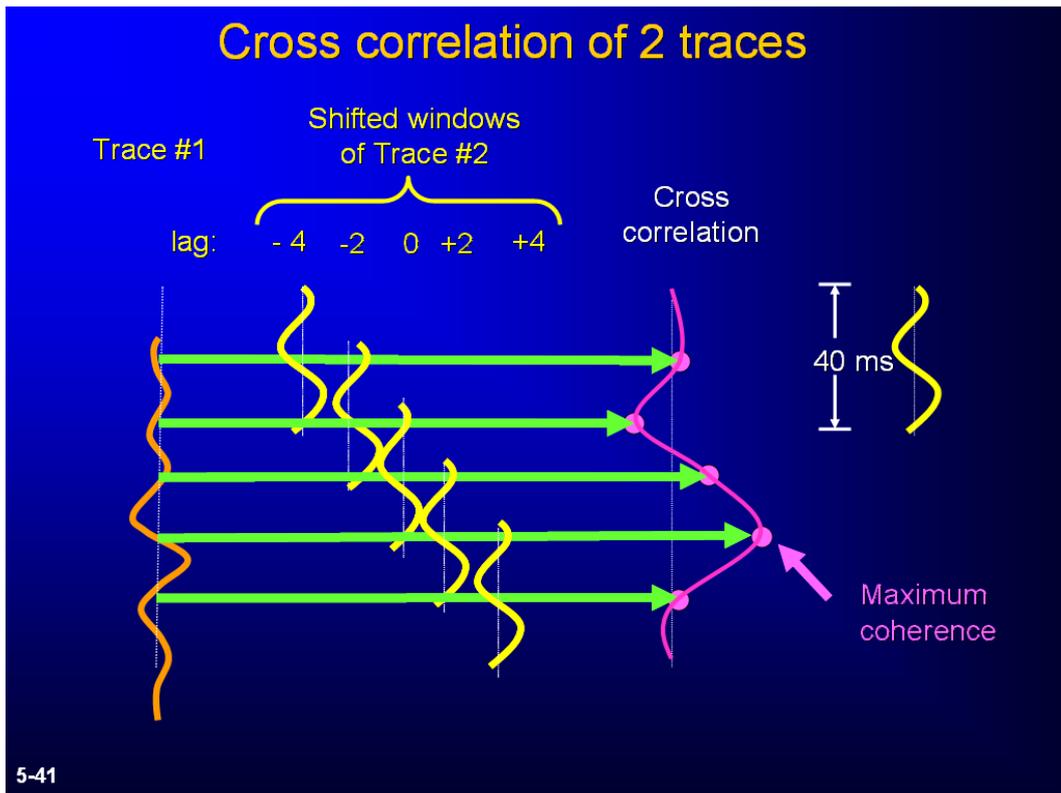


圖 A.6 兩個波線的交相比與其相關性函數。

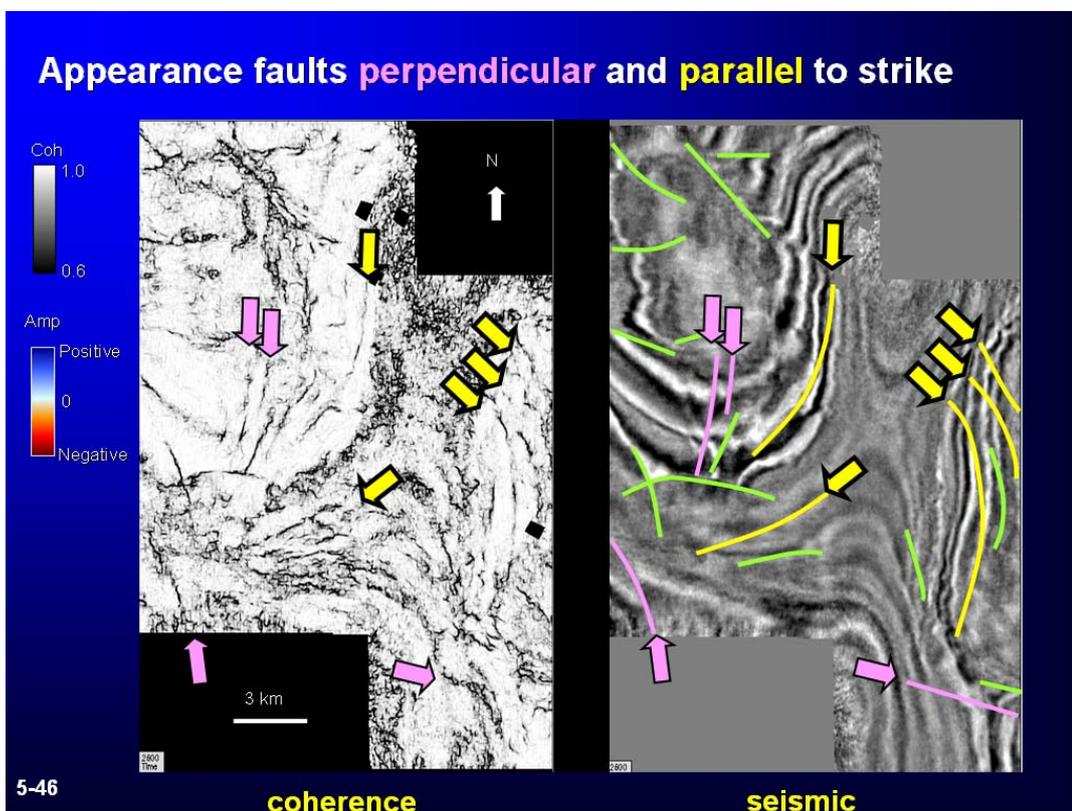


圖 A.7 相關性資料體與震測資料的時間切面比較，粉紅色與黃色分別為垂直與平行於斷層走向。

### 3. 曲率 (curvature) 屬性

這個震測屬性是利用空間上幾何的變化來偵測構造的變化。曲率的定義如下：

$$k = \frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2 x}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

其中背斜為  $k > 0$ ，平面為  $k = 0$ ，向斜為  $k < 0$ 。圖 A.8 可以說明曲率代表構造上的幾何意義，其反映地層的起伏變化，主要是跟褶皺與彎曲的地層構造有關。

圖 A.9 為曲率屬性在時間切面的呈現，可以看出一些線性的網狀構造，強的負曲率異常與低相關性函數成正比（黃箭頭標示），為坍塌構造的位置。粉紅箭頭指的東西向斷層的負曲率異常與低相關性函數對應。

針對曲率屬性可以做出下列要點：

- 曲率屬性不僅僅是在已做過地層解釋的震測剖面可以套用，更可以套用於未解釋的三維震測資料體。
- 大部分負的與正的主要曲率可將褶皺與彎曲構造的曲率影像清楚顯現。
- 曲率屬性對於古應力型態是很好的指標。
- 開張裂隙為曲率線型走向與最小水平應力方位的函數。
- 如果有差別壓密作用存在，河道會在曲率屬性的影像中呈現。
- 如果在跨過斷層的反射點傾角有變化，或是斷層錯動位移小於震測資料可解析範圍，抑或是斷層邊界在移位處理時不當，則斷層會在曲率屬性的影像中呈現。

震測屬性種類相當多，皆是透過物理或是數學的意義來反映地質構造上的特性。以上簡單介紹幾種常用的震測屬性，藉由這些震測屬性，可提高震測解釋上對於斷層、河道以及不同地質構造的辨識度，有助於震測解釋人員進行解釋，尤其是現在震測資料走向三維資料體的趨勢，有大量且精細的資料，更需要利用震測屬性來輔助地層、層序與構造的解釋，藉由這樣的工具以提高震測解釋的可信度。

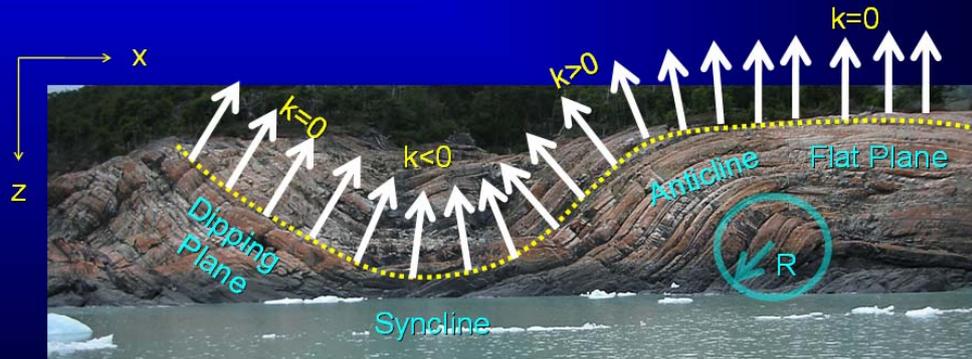
## Sign convention for 2D curvature attributes:

Anticline:  $k > 0$

Plane:  $k = 0$

Syncline:  $k < 0$

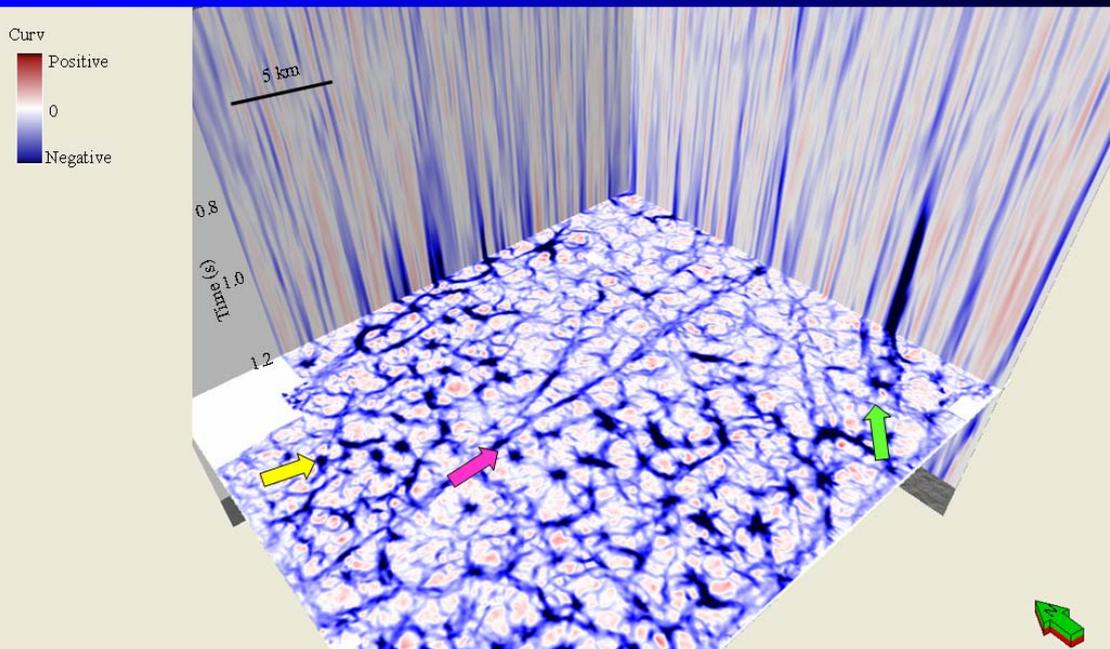
$$k = \frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2 z}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}$$



5-137

圖 A.8 曲率屬性的數學定義與其反映的地質構造。

## Most negative principal curvature, $k_2$



5-168

(Seismic data courtesy of Devon Energy)

圖 A.9 曲率屬性在三維震測資料體所呈現的結果。