

出國報告（出國類別：實習）

震幅支距分析、震測逆推及屬性分析-
理論與實務(AVO, Inversion, and
Attributes: Principles and Application)實
習

服務機關：台灣中油公司

姓名職稱：陳炳誠 地質師

派赴國家：美國

出國期間：105年8月20日至105年8月28日

報告日期：105年9月

目 錄

一、	一、摘要.....	3
二、	出國目的.....	4
三、	出國行程.....	5
四、	心得與建議.....	13

一、摘要

震幅支距(AVO)分析、震測資料逆推及屬性分析是利用震波之震幅與速度等參數以探討地下儲層之岩性與孔隙內液體特性的方式。這些分析方法有助於提升油氣探勘之成功率及幫助油氣田的開發生產規劃，故皆為現今石油探採行業常使用的地球物理方法。

這個課程是設計給地球物理師、地質師、探勘師、震測解釋人員、技術支援人員、震測資料處理人員、探採事業經理人員這類需要對這些科技的應用有清楚了解的人士。

課程由淺而深分別有：

- (1) 與油氣顯示有關的震測測勘技術基礎;
- (2) 油氣直接表徵的種類，包含 AVO;
- (3) AVO 異常的風險等級;
- (4) 了解岩石性質及孔隙流體的效應;
- (5) AVO 及其與世界上不同年代及不同埋深的油氣產層間的關係;
- (6) 在震測資料中顯示 AVO 效應的不同方法;
- (7) 震測資料模擬及流體置換模擬的不同方法;
- (8) 由震測資料逆推推測岩石性質與孔隙流體;
- (9) 從震測影像中獲得儲集岩訊息的頻譜分析與震測資料屬性分析方法;
- (10) 結合不同震測屬性以評估油氣潛能的方法。

經過這次課程，得到 AVO 分析、屬性分析及震測逆推的許多知識及應用的實務還有講師的經驗談。

原本上課之前，認為此課程主要著重的是各項中高階地球物理分析的技術，但課程是以岩石在不同地質、地質流體狀況下的性質為基礎，討論這些不同性質的岩石，會對震波傳遞的速度、地層密度及泊松比造成什麼影響。再以之討論會造成怎麼樣的震測資料特性。這種由岩石本質出發的教學方式，較易記憶，也較容易了解。

這個課程想使參與者對於這些技術的現況有清楚而且有用的認識。這個課程聚焦於理論的理解與實際的應用，且課程中的每一個主題都會有練習，提供參與課程的人員許多實用而簡單的方法將課程材料整合入工作中。

經這次的實習，將把所學帶回公司與同仁一同分享研討，以增進本公司於此方面的技術能力。

一、 出國目的

震幅支距(AVO)分析、震測資料逆推及屬性分析是利用震波之震幅與速度對於地層的反應，探討地下儲層之岩性與孔隙內液體特性的方式。這些分析方法可有助於提升油氣探勘之成功率及幫助油氣田的開發生產規劃，故為現今石油探採行業常使用的地球物理方法。

中油公司探採事業部除主要負責台灣陸上地質、地球物理探勘及開發地質工作外，亦協助查德礦區及海域及國外礦區之探勘技術工作。強化在 AVO 分析、震測資料逆推及震測屬性的理論及實務分析能力，是相當必要的。

以往 AVO、震測資料逆推及震測屬性分析，通常是由地球物理原理或震測解釋的原理出發作分析。此次由地質師參加此課程，可以由地質的角度出發，以不同的地層特性為出發點，討論及分析不同特性的地層，對於地震波動會有如何的反映。

希望分別從地質及地球物理的角度出發，研討地震波能量在地層中傳導的方式及其會有如何的反應特性，可以增進本公司之 AVO 分析、震測逆推及屬性資料的分析的方法、能力與經驗。

二、 出國行程

(一) 第一天

第一天上課內容包含 AVO、逆推及屬性分析的基礎地質物理知識、模擬軟體實作、AVO 原理簡介。

本訓練課程由 PetrolSkills 資深地球物理探勘講師 Donald S. Macpherson 授課，講師是這個領域與主題方面經驗豐富的資深講師，是年齡應有 70 多歲以上的老先生。不管是在實務上或是理論上都有深入鑽研。

其在加拿大亞伯達大學取得碩士學位後，進入美孚（Mobil）石油公司，先後在位於加拿大卡加利、美國達拉斯、紐奧良、英國倫敦的美孚分公司工作過，進行地球物理資料採集、處理與解釋的工作。在他的工作生涯中，他常參與地球物理技術的教學工作，他對於把地球物理工具清楚的教給別人很感興趣。他曾是美孚石油達拉斯教育部門的經理，也講授地球物理的主要課程。

本次上課的學員共有七人，從韓國、日本、剛果、台灣、加拿大各地的石油公司派員前來上課即佔五人，美國本地之石油行業從業人員僅有兩人。

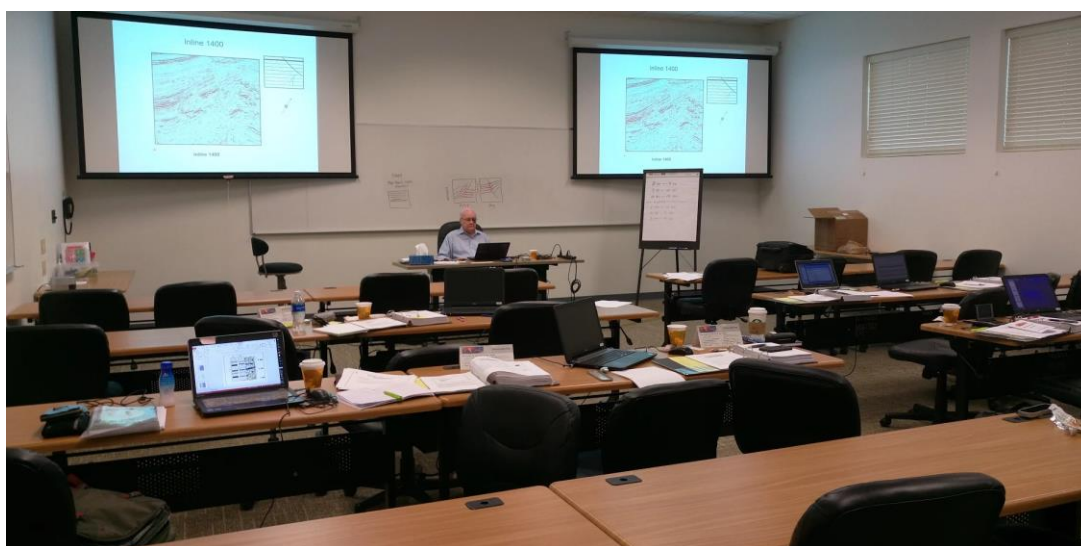


圖 1、上課教室及講師

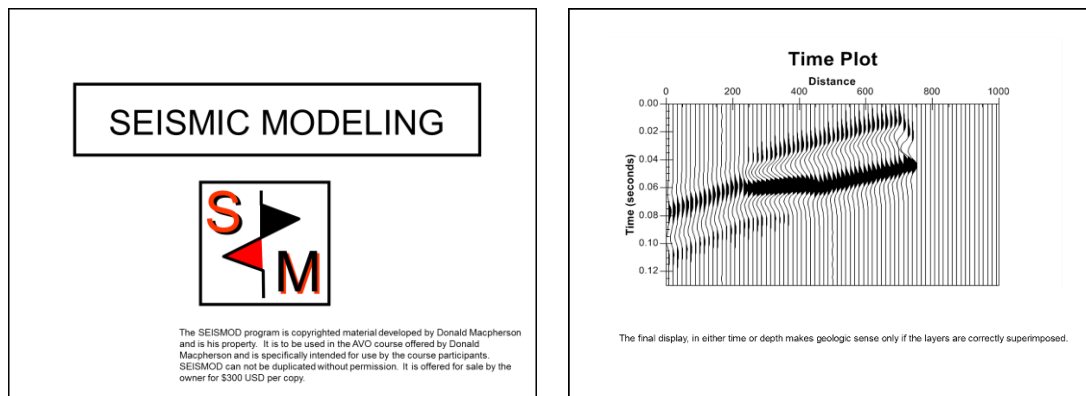
講師在課程開始時說明，AVO 本來佔課程最重要的比重，但近年來，震測資料逆推及屬性分析已經在探勘技術佔愈來愈多的比重，故此次課程將會提高震測逆推的比重。AVO 的課程將相對縮短。

第一天的課程包含同中點疊加、同反射點疊加至同成像點疊加的技术演進、調諧厚度與震測資料主頻的重要性、講師研發的軟體的教學、震測資料在深度域與時間域間展現的不同意義、AVO 的簡要介紹及直接油氣指徵 DHI 的可信度。

由於同成像點疊加是分別取不同入射角度的震測資料先進行疊前偏移再進行疊加，故同成像點疊加的資料處理方式對於後續進行 AVO 分析很有幫助。

在震測基礎知識部份，講師講解如何直接在震測剖面上推算調諧厚度及震測資料的主頻，而不需要依靠震測資料處理參數及測井資料的訊息。這個部份是講師多年來的經驗累積，一般並不常見此種估計方式。

講師為了課程的需要自行研發 AVO 建模的軟體，這個軟體十分的實用，據說在各個石油公司內部也廣被使用。學習使用此軟體，不只可以用以理解 AVO 的理論，也可以實際應用於專案實際研究。



圖二、講師發展之震測資料模擬軟體，可以用來模擬 AVO 現象。

講師說明雖然近年來愈來愈多人直接使用深度域的震測資料進行震測資料解釋，但由於地層在淺層速度慢，深處速度快，故會使震測資料在從時間域轉到深度域時，使淺處資料偏向高頻，深處資料偏向低頻，這個現象是與深度相依的，不是真實的地層情況。另外轉換為深度域的速度體亦通常不是十分正確，故在轉換為深度域時，會產生一定的誤差，故講師仍建議應在時間域上作震測解釋。

AVO 現象，是指地層反射面隨著震測資料支距的變化(震波入射角度)，反射係數也跟著變化的現象。這個現象在水層、油層及氣層都會出現。但在氣層及油層，隨著支距變大，反射係數會變大，而水層是會變小。油層的變化則與其氣/油比的大小而有不同的反應。AVO 現象，可以作為分辨出油氣水層的一種方式。由於油氣層的 AVO 現象與水層的 AVO 現象不同，所以油氣層的 AVO 現象就是一種 AVO 異常，可視為一種油氣直接指徵(DHI)。

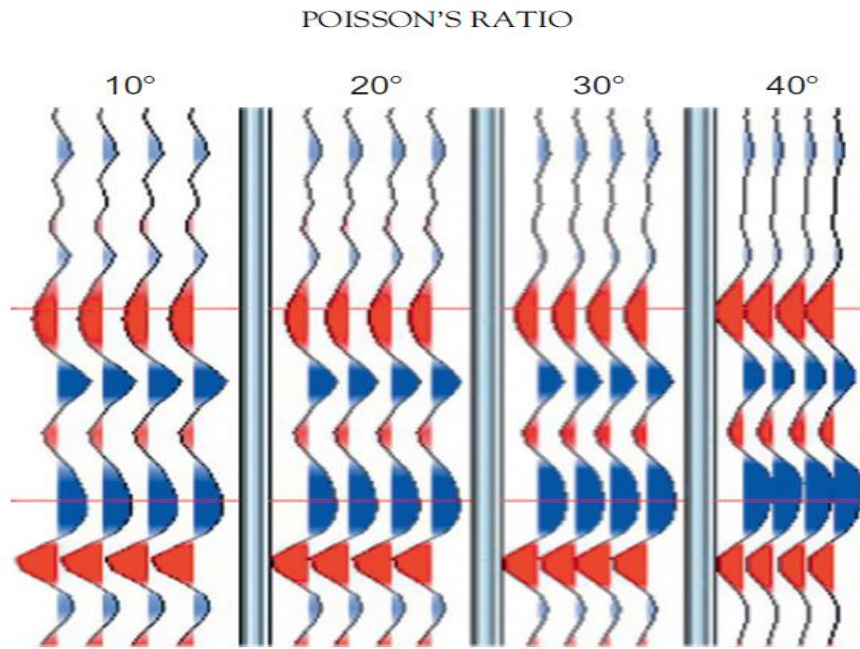


圖 2、在入射角逐漸變大的情況下，上下方的紅線處可看出震幅愈來愈大，這就是油氣層的 AVO 異常現象(Onajite E., 2014)。

在還沒有不同支距的震測資料分別分析的方法前，將全支距的資料疊加後，在明顯的氣/水及水/氣層的交界處亦會有較大的反射係數，使震幅變大，此即是 DHI，故也可以說全支距疊加後的震幅異常，是利用 AVO 現象分辨油氣層的特例。

(二) 第二天

第二天課程講授 DHI 的種類、油氣飽和度的不同會在震波速度及岩層密度上有如何的變化、DHI 的出現與否對探勘成功率應如何估算、岩石物理學上重要的 Gassmann 方程式簡介、岩層各向異性及異常高壓層對於震測傳遞會造成什麼影響。

在第一天的課程中說到 DHI 是是利利用 AVO 現象分辨油氣層，在全支距的描線疊加後的特例。分別有亮點(對應為第三類型 AVO 的特例)、相位倒轉(對應為第二類型 AVO 的特例)、暗點(對應為第一類型 AVO 的特例)、地層下傾方向震幅異常、平點、速度驟降、頻率驟降等等。

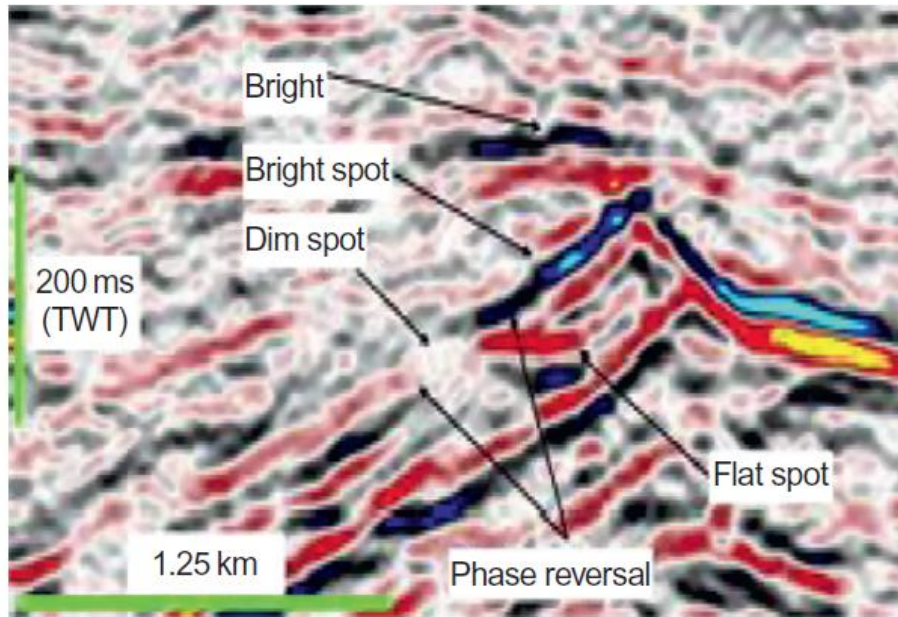


圖 3、各種直接油氣指徵，有氣層頂端會有亮點，在固結程度較好的位置會有暗點或側向相變化，在氣水界面會有平點產生(Onajite E., 2014)。

講師說明平點雖然以往被視為是一種重要的 DHI，但是在使用疊前偏移的技術後，多次波(multiple)不像使用疊後偏移的傳統方法容易消除，所以現今平點的出現有可能是多次波造成。需小心判斷。平點通常是氣/水層接觸面，不一定是真的水平的，但一定是正極性(美國標準極性表示下)。如果是雙軌而不是正極性，則可能震測資料不是零相位，如果是反極性則可能是誤判，不是真的 DHI。

然而上述現象的出現並不一定是油氣的表徵，因為 P 波的波速，在高水飽和度時就會開始驟降，所以有 DHI，並不能知道水飽和度的高低。只要有極少量的油氣就會有 DHI，但並不一樣是有商業價值的油氣量。而且側向岩性變化造成 P 波 S 波速度改變，或震測資料處理有問題都會出現 DHI 的現象。

經過統計學員氏定律的估計，如果原本沒有使用 AVO 技術的好景區的成功機率為 A，如果經 AVO 分析，有 DHI 現象，則成功機率可提升 10-15%，反之如分析後沒有 DHI 現象，則成功機率下降 10 至 15%。由統計學的分析，DHI 對探勘成功率的估計有一定的幫助，但並非可以完全依之作為探勘成功機率評估的萬靈丹。

AVO 異常並不一定是油氣造成，像是煤層、不適當的震測資料偏移處理，調諧效應、震測頻率不均衡，多次波消除不良等，都會造成。故要利用 AVO 現象時，要注意這些可能性。

第二天下午開始講授基本岩石物理，例如體積模數、剪力模數、岩石密度及泊

松比等岩石性質在岩石物理上的意義。這些岩石性質的變化，就是造成震測資料 AVO 現象的原因。例如油層的體積模數的變化主要不是反應油層的 API，而是反應油層的氣/油比。

在水層，P 波通常是 S 波速度的 2 倍，泊松比通常是 0.3 左右。但在氣層，P 波速度會比水層下降很多，S 波速度下降較少。泊松比會下降到 0.15。因此只要油氣層的含氣量從極低到開始微微增加，AVO 現象就會很明顯。但此時，油氣層的密度變化量還很小。

Gassmann' s 方程式在岩石物理上有很重要的意義。其說明不同流體飽和度的岩石之體積模數是岩石固體的體積模數與孔隙地層流體的體積模數的結合。所以在實務上，我們可以先在標準的水層，以聲波速度、密度及縱橫波速度比計算岩石固體結構的體積模數後，再一直變換可能的地層流體種類，就可以計算不同的油氣飽和度的油氣層的體積模數。接下來就可以利用推導出的油氣層體積模數計算油氣層的 P 波速度及縱橫波速度比。

因為在一般情況下，震測及電測資料只會有 P 波的資料，而沒有 S 波的資料。但是經由 Castagna 的泥線方程式，可以由 P 波速度推導出 S 波速度。講師說明這個泥線方程式經實務使用及實驗室的實驗結果，確實可以推導正確的 S 波速度。然而在不同的油氣飽和度條件下，泥線的斜率並不相同。

地下地層由於黏土礦物的定向排列沉積及自然裂隙的方向，而有各向異性。各向異性的存在，會使得震波在特定方向的行進方向較快。而 S 波對於各向異性的反應比 P 波明顯。由於各向異性使不同方向的 P 波及 S 波速度各不相同，也就造成 AVO 現象也有方向性。另外各向異性也會對震測資料偏移處理的正確性造成影響。

另外一個會影響震波傳遞速度的地質現象是異常高壓帶，由於異常高壓帶會造成有效壓力的降低也造成岩體強度的降低，使得震波傳遞速度變化。此時也會對 AVO 現象造成影響。

(三) 第三天

今天一開始延續昨天的主題，先說明如何以測井資料計算岩石破裂壓力。接下來講解 AVO 現象中重要的岩石物理公式，例如: Zoeppritz Equation, Schuy Equation。

由上述函數及實測數據顯示，水層的泊松比約為 0.3，氣層的泊松比約為 0.15，氣層的 P 波速度比水層的 P 波速度低，但水層與氣層的 S 波只有微降。

接下來講解 AVO 現象的另一種表達型式-斜率及截距交會圖。AVO 的斜率及截距圖是把 AVO 現象之反射係數及角度交會圖的斜率及截距數值轉繪至另一圖上。這一類型的圖型也可以用來顯示 AVO 現象與 AVO 異常。

接下來解講重要的 Castagna 及 Gassman' s 方程組，用來進行孔隙流體置換的模擬。

Castagna 函數用來計算水層的 S 波速度。再用計算出的水層 S 波速度代入 Gassmann 函數，並開始變換公式的水飽和率，就可以用 Gassman' s 方程組算出不同水飽和率的地層的理论 P 波及 S 波速度。之後把理论的速度與實際資料作比較，就可以推測在哪些層位可能有油氣存在。

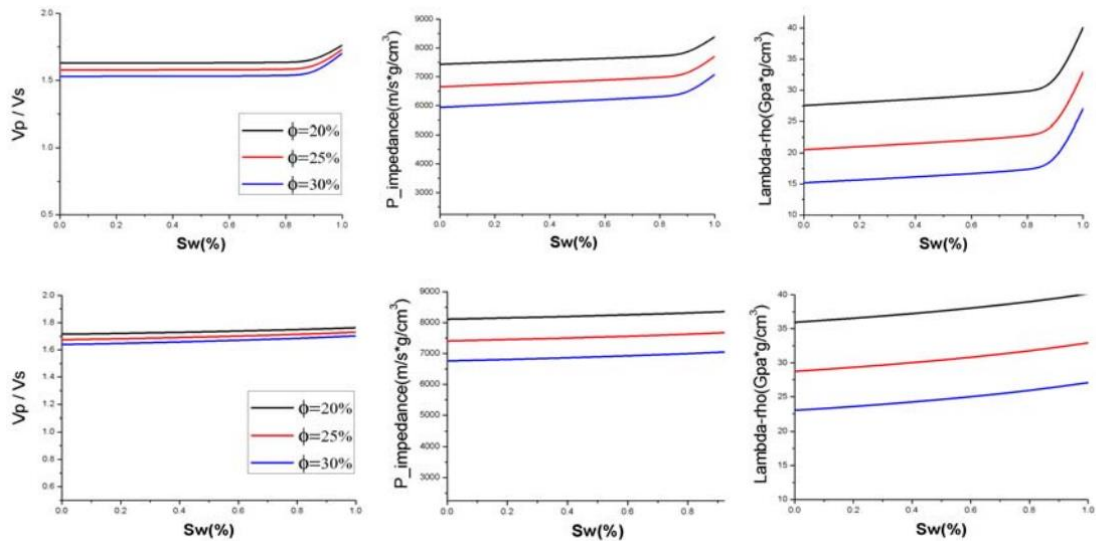


圖 4、以 Gassmann' s 方程組建立流體替換模型，並計算油氣飽和度增加時，不同孔隙率條件下的岩石彈性係數變化(Onajite E., 2014)。

今天下午開始講解疊後震測資料逆推。震測資料逆推包含疊前資料逆推及疊後資料逆推。而逆推最重要的概念，就是把原來指示不同性質的地層邊界間的震測震幅高低轉換為實際代表地層本身性質的阻抗。阻抗體就可以用來推測可能的岩石組成、孔隙、流體、壓力等等。

疊後資料逆推，就是以疊加後的震測資料作出的阻抗體。而疊前資料逆推，則是以震測資料疊加前不同支距的震測資料作逆推，所以可以得到不只一個，代表不同岩石物理意義的阻抗體。

(四) 第四天

第四天繼續講解各式各樣的震測資料逆推方式。進行疊前資料逆推及疊後資料逆推有各種不一樣的方法。疊後逆推比較簡單，主要是將井的密度測錄與速度測錄相乘，得到聲波阻抗，然後藉以計算反射係數。然後將反射係數與井附近的震測資料比

對，估算出井附近的震測資料之漣波。接著將震測資料中的漣波去除，則可得到震測的反射係數資料，進而得到震測的聲波阻抗資料。所以疊後逆推所得的資料體是聲波阻抗資料。

而實際進行疊後逆推的方法包含遞迴逆推、模型逆推、解頻譜逆推、隨機逆推還有以希爾伯特轉換進行的有色 (Colored) 逆推。

以希爾伯特轉換法進行的逆推，是一種非常簡單且正確性高的逆推法。其進行方式，是將震測資料之相位轉換 90 度，使震波的波峰及波谷可以實際位於岩層上而非岩層邊界。再將資料體補充低頻之訊號，使 90 度相位的視阻抗體之頻寬範圍與實際地層厚度較為接近。

疊前逆推需要利用到 S 波的資料，由於不同支距的震測資料，在同一地下位置的震幅不會相同，這就是 AVO 現象所造成。故可以利用不同支距的震測資料的震幅差異，推測 S 波的速度。

例如利用不同支距的各個震測資料體，每個資料體都提取其漣波，並利用 Aki Richards 方程式進行不同入射角條件下的反射係數求取。之後再進行不同支距資料體的反演，就可以得到不同支距條件下的彈性阻抗體。其本質是與疊後資料得到的聲波阻抗體相似，只是震波的入射角度不同，而造成不同的響應。彈性阻抗體代表 P 波、S 波及密度三個岩石物理參數的結合。

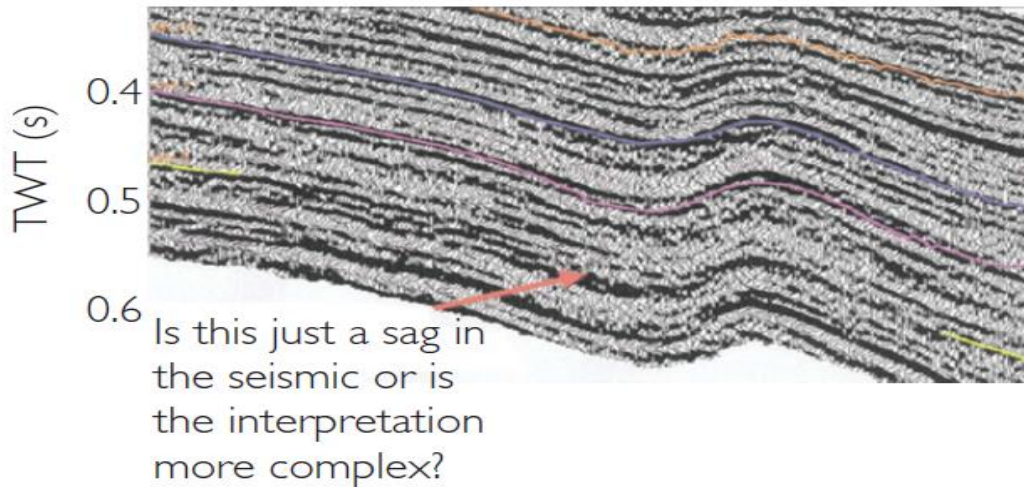
由於入射角的不同，影響最大的就是 P 波的速度。近支距的資料，以 P 波資料為主，遠支距則較多 S 波訊號。所以如果我們將不同入射角條件下的彈性阻抗體拿來互相比較。就可以同時得到 P 波阻抗體、S 波阻抗體及密度阻抗體。

因為有 P 波、S 波及密度阻抗體，就可以經由岩石物理公式，得到岩石之體積模數及剪力模數之相關阻抗體。由於岩石在含有油氣時，體積模數會有較大的變化，所以可以利用這個原理，推測在何處有油氣聚集。

需要注意的是，在進行上述的研究時，一樣需要利用 Gassmann's 方程組，計算在不同的流體充填，岩體應該有的岩石彈性參數，當作確定地層中可能的流體時的理論依據。

在進行逆推的工作時，最重要的就是測井資料的編輯，這是影響結果最大且最花時間的工作。

a) Reflectivity



b) Acoustic Impedance

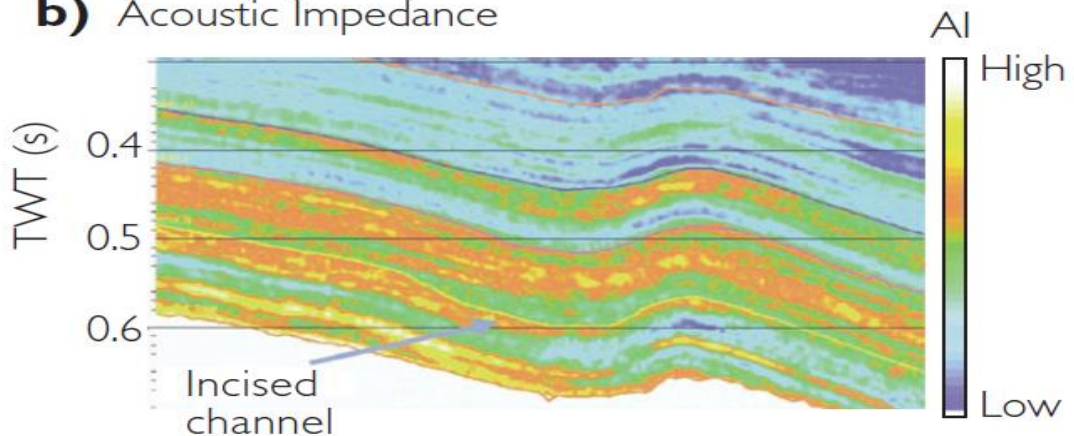


圖 5、原本傳統的反射震測剖面轉換為聲波阻抗逆推的顯示剖面。下圖的顏色直接代表不同的岩性 (Onajite E., 2014)。

(五) 第五天

第五天進行震測屬性的教學。震測屬性是針對傳統震測資料體的資料或逆推得到的阻抗體資料，再進行一些物理特性或統計分析，作數學運算，以獲得所需的地層訊息。

所以基本上，屬性分析基本上包含了，所有可以在震測資料體上進行的各種數學及統計操作。由於屬性分析偏向震測數據的統計分析方法。屬性的種類非常的多，講師課堂上說明，美國許多大學院校的地球物理研究所的博士生的畢業論文，就是發明一種新的屬性。而屬性的使用，是需要因地區的不同，進行嚐試，才可知道是否可以利用該屬性

三、心得與建議

經過這次課程後，對於 AVO 分析及震測逆推還有屬性分析有非常深入的了解。

這個課程除了討論岩石物理及岩石物理相關的課題也說明了實際進行 AVO 分析及震測資料逆推時所需要注意的技巧。在 AVO、震測逆推與震測屬性分析上，震測資料處理與改進佔了很重要的一環，這方面在課程中也有充份的講解。

另一方面講師也提供了實用的模擬軟體還有許多補充的案例資料，給學員參考。這些資料對我們有很大的益處。

這次的課程，講師不是僅收集教科書及期刊資料作講解，絕大部分的課程資料都是講師親自製作。講師所講的課程內容，也是其自身工作數十年來的經驗談，並非只是照教科書照本宣科。所以上這個課程與自行研讀書籍，自己學習有很大的不同。收獲豐富。

建議本公司可針對關鍵技術，聘請國外專業講師來台授課，以嘉惠公司整體的技術人員。

參考文獻:

1. Onajite E. (2014) Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration, Elsevier.
2. Petrosills (2016) AVO, Inversion, and Attributes: Principles and Application 講義。