

出國報告（出國類別：國際會議）

# 折射震測在非均向性介質之探測研究

服務機關：國立中正大學

姓名職稱：張永孚 教授

派赴國家：日本

出國期間：105 年 7 月 11 日至 15 日

報告日期：105 年 7 月 27 日

## 摘要

在沉積作用以及構造應力作用之影響下，地層普遍存在非均向的特性。而地層之非均向性將使得震波之傳播速度隨著傳播方向改變而有所變化。在地震及震測資料處理中，分析地層速度對於後續資料疊加和地下速度構造的研判相當重要，若忽略地層之非均向性則會出現方位或展距上之速度異常，造成構造的研判錯誤，因此地層之非均向性研究具有相當的重要性。截至目前為止，地層之非均向性研究大多透過分析反射波在非均向介質傳播之走時變化來獲得。然而，彈性波在非均向介質中必須具有足夠長的傳播路徑，才有辦法凸顯和觀察出震波的走時異常，因此當目標地層厚度不足或者其非均向特性微弱時，反射波所反映之非均向特性將會相當地不明顯。

為了克服目標地層之厚度不足或者其非均向特性微弱時的限制，且由於折射波能夠沿著地層傳播很長的距離，因此在本研究中我們嘗試利用折射震測來研究地層的非均向特性。採用物理模型以超音波模擬真實震波，觀察折射波在不同方位角的水平橫均向介質傳播時所產生之走時變化。這些初步的研究構想與成果，對於油氣的探勘相當重要，唯有充分的了解非均向地層的特性才有可能成功的探測到地下的油氣，因此藉由此次在日本京都舉行的 2016 工程與自然科學國際研討會，向各國專家學者請教、研討與推廣，並且再次好好地整理與審視我們的研究成果，希望能將折射震測法來評估目標層的非均向特性的技術，推廣到國際石油探勘界使用。經過研討會的研討後，本研究的結論為當折射 P 波傳播之方位角與水平橫均向介質之層面對稱軸夾角平行時，其反映之震波速度與反射 P 波垂直入射垂直橫均向介質之速度一致。而當折射波之方位角逐漸改變時，其傳播速度則以群速度模式逐漸增快至兩夾角呈垂直。因此，實驗結果不但證實了折射 P 波確實能夠作為分析薄地層之非均向性的工具，並成功的觀察到折射 P 波在不同方位角傳播的速度變化模式。

在此研討會中與各國專家學者請教、研討與推廣本研究過程中發現，我們也可以開發另外一種簡單、快速的方法來探測地層的非均向特性，並建議以垂直橫向非均向性的 AVO 近似方程式來簡單、快速的方法來探測地層的非均向特性。

## 目錄

一、 目的-----	3
二、 過程-----	4
三、 心得-----	6
四、 建議事項-----	11

## 一、 目的

在油氣探勘中，由於地層的非均向性質反映了地層的沉積情形和該區域受到大地構造應力作用的大小與方向。震波測勘時，地層的非均向可藉由同深點反射震測、垂直震測剖面、方位角隔距時差逆推、剪波分裂以及 P 波和轉型波的 AVO 分析等方法量測。由於地層的非均向性大部分多是利用反射波的走時異常來分析，而震波的走時與地層速度和累計的行經路徑有關，因此當震波傳播方向與薄非均向性地層層面互相垂直時，震波走時異常則變得相當不靈敏。另一方面，AVO 分析也因為影響振幅變化的因素過多，致使地層的非均向性質評估有許多不確定性。因此，為了解決上述兩種情形造成探測非均向地層的困難，我們希望開發利用折射震測法來評估目標層的非均向特性。

折射震測法常被用來評估風化層厚度、地層速度構造、斷層帶、基盤構造等。當折射波全反射後會沿著波速較快的地層層面傳播，所以可以累計較長的傳播路徑，造成較大的震波走時異常，利用此特性來評估目標層的非均向性質則顯的相當有幫助。由於受限於經費，因此本研究擬採用超音波物理模型實驗的方式來探討折射波在非均向性地層傳播的情形，再依據數值模擬結果來驗證其傳播特性，並預期折射波能夠用來推測地層裂隙發展的特性，進而評估層面裂隙的發展程度與延伸方向，對於了解地下目標層上的裂隙以及區域應力影響將有所幫助。

這些初步的研究構想與成果，對於油氣的探勘相當重要，唯有充分的了解非均向地層的特性才有可能成功的探測到地下的油氣，因此藉由此次在日本京都舉行的 2016 工程與自然科學國際研討會，向各國專家學者請教、研討與推廣，並且再次好好地整理與審視我們的研究成果，希望能將折射震測法來評估目標層的非均向特性的技術，推廣到國際石油探勘界使用。

## 二、 過程

### 參加 2016 工程與自然科學國際研討會

日期	行程內容
105年7月11日	啟程：搭乘菲律賓航空班機自台灣桃園國際機場出發 抵達日本關西機場 從日本關西機場搭乘日本國家鐵路(JR)到京都
105年7月12-14日	參加「2016工程與自然科學國際研討會」
105年7月14日	口頭報告方式參與 報告時間為15:40-16:00 發表論文標題「A seismic refraction study for a horizontal transverseisotropic medium」
105年7月15日	返程：從京都搭乘日本國家鐵路(JR)到日本關西機場 搭乘菲律賓航空班機自日本關西機場 抵達台灣桃園國際機場

### 參與海報展示報告:

參與社會科學類的海報展示報告中與泰國學者 Dr. Nara Kittimetheekul, Head of Master of Business Administration Program, Khon Kaen University, Nong Khai, Thailand 討論，其專長為社會學，當日日本的電視台正好播放日本天皇因為年老、體力衰退，準備退休交棒的新聞，泰國也有國王的政治體制，且泰王也年紀很大、90 歲了，且健康狀況不佳常常進出醫院。因此，請同時也討論泰國國王退位的政治情形，Kittimetheekul 系主任表示，泰國的政治與民情和日本不同，泰國國王不可能會退位，只能做到死亡。另外也討論到香港、海南島、台灣三個地方的政治和社會制度，香港以前為英國屬地為民主社會，後來回歸中國成為社會主義國家，海南島一直以來就是屬於中國的領土，而台灣不屬於中國，且為民主社會。三個地區人民的想法與政治相互之間的比較與討論，並且再一次對 Kittimetheekul 系主任表示，台灣為一民主社會、主權獨立的國家。

參與口頭報告研討:

參與海洋大學 Cherng-Yuan Lin 教授的口頭報告研討，期報告題目為" Effects of Co-solvent Addition and Reaction Temperature on Lipid Characteristics of Microalgae", 研究微藻因為添加一些微量溶液和其反應溫度對其生長的影響。與本系陳建易教授在做的，利用微生物來補獲大氣中的二氧化碳、微生物的綠能研究有關。

參與成功大學 Ming-Xian Lin 教授的口頭報告研討，期報告題目為" Modeling and Simulation of Nonlocal Analysis of Graphene Sheet Circular Nanoplate Actuator", 以數值模擬來研究奈米石墨烯晶體的震動特性，雖然數學方法很複雜，過程很繁複，但是在工業上如果沒有經由此模擬很難了解其特性，更不可能花大錢做好產品後才來研究其特性，因此還是必須以數值模擬來研究其特性。

參與印尼籍的 Lutfi Aditya Hasnowo 博士的口頭報告研討，期報告題目為"Co-assembly of Mg-Al LDH Nanosheets and p-Hydroxybenzoate, and Its Application to Reductive Adsorption of AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup>", 使用Mg-Al LDH奈米片和p-羥基苯去吸附AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup>的污染物，以有效的減少污染。

參與泰國籍的 Jaiarree 博士的口頭報告研討，期報告題目為"Production of Struvite Fertilizer for Greenhouse Gas reduction under Paddy Rice and Corn Plantation in Thailand", 鳥糞石肥料用在泰國水稻和玉米的栽種上的產量與溫室效應氣體排放的研究，除了在實驗室的研究外，並且建立一座小型戶外實驗室以實際栽種水稻和玉米來供研究使用，研究結果顯示鳥糞石肥料可以增加水稻和玉米的產量，又可以減少溫室效應氣體的排放。

口頭報告現場討論情形:

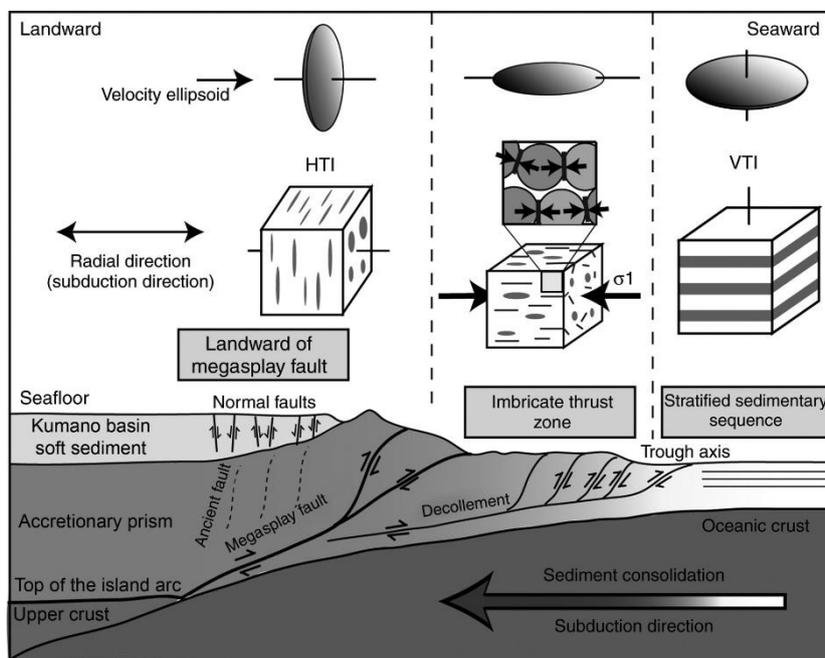
我口頭報告完後，主持人泰國籍的 Jaiarree 博士問我一個問題，他問到我研究的方法，是否已經被應用到實際的油氣探勘上。我回答:由於野外作業昂貴且耗時，因此若有足夠經費情況下，就能應用此方法從事野外的實際探勘。由於此為新推導出來的方程式，是否適用? 可以先用節約的方式，在實驗室中用一個縮小模型進行測試，這也是本研究的測試方法，測試結果顯示，新推導出來的方程式可以成功的探測出地層的非均向特性，因此相信本方法可以成功的應用在實際的油氣探勘上。報告完成後主持人 Jaiarree 博士，於會場公開的頒贈給我出席報告證明，出席報告證明如圖一所示。



圖一 出席報告證明

### 三、心得

由於受到沉積作用與大地應力作用的影響，地層往往會出現非均向性，其示意圖如下(圖二)所示。在圖的右邊為沉積作用造成地層的非均向性，圖的中間為擠壓應力造成地層的水平裂隙的地層的非均向性，圖的左邊為張力造成地層的垂直裂隙的地層的非均向性。



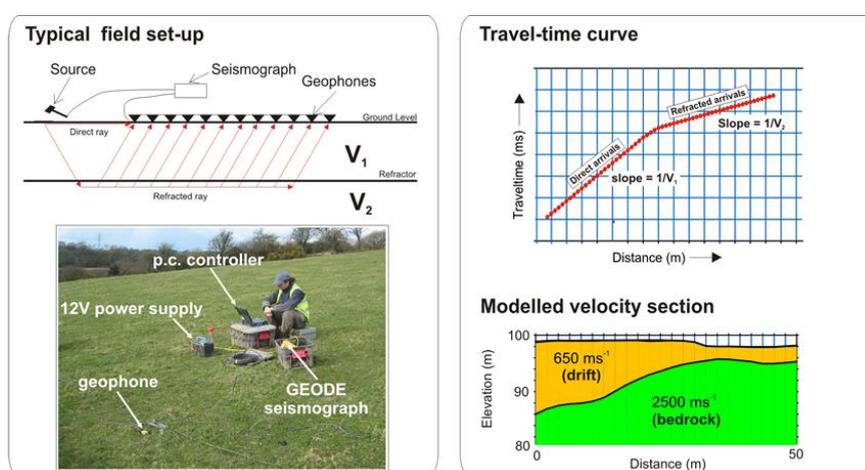
圖二 地層之非均向性成因

當震波行經這些非均向性地層時，震波速度會隨著傳播方向的不同而有所不同，若忽略此與傳播方向有關的震波速度特性，在處理地震或震測資料時就會出現誤差。以反射震測為例，若單純將地層假設為均向性地層，在做垂直隔距時差修正時就會使地層介面反射波走時無法得到有效的修正，如此一來震測剖面的品質將會下降。由於地層中普遍皆存在此種非均向性的特性，因此若要獲得更精確的地質構造，除了要考慮地層的非均向性對震波的影響外，更需要探測地層的非均向性的特性，知道地層非均向性的特性後，我們才有可能得到正確且清晰的震測剖面，並且從這些地層非均向性的特性我們可以了解地層沉積、裂隙或大地應力等特性，以便有效成功的探測油氣構造。

地層非均向性的量測可透過垂直震測剖面(Vertical-Seismic-Profiling, VSP)、反射波方位角隔距時差逆推、剪波分裂、P-S 轉型波以及振幅隨展距變化(Amplitude-Versus-Offset, AVO)來分析。除了 AVO 分析外，這些測量地層非均向性的方法皆依據震波在非均向地層內傳播的走時特性來分析。因此這些方法皆需要假設震波在非均向性地層中具有足夠長的傳播距離時才易於觀察其非均向性，因此不利於分析薄地層之非均向性或是分布於地層表面之裂隙特性。AVO 分析雖然能夠觀察地層介面處之振幅隨展距變化，但是影響震波振幅的因子過於複雜，因此不易藉由震波振幅評估地層之非均向性。當入射波的入射角度超過臨界角時，折射波能夠沿著高速地層的層面傳遞，若此高速地層即為非均向性地層，則震波可以在非均向性地層中傳播相當長的距離，如此對於地層非均向性的

特性評估有很大的助益，因此在本研究中，我們將利用折射震測法來研究地層的非均向性。

在野外震測中，折射震測常被用來評估風化層之厚度，其施測示意圖，如圖三所示。然而，受到沉積作用或大地應力的影響，在岩盤面上若出現裂隙分布，這些沉積作用或裂隙的特性反映在初達波到時，使得折射波出現速度異常，並且這種速度異常與方位有關(側線方向與非均向特性的對稱軸夾角)。透過折射震測中與方位有關的速度異常分析，能夠得知沉積作用或裂隙的發展情形，並間接評區域大地應力的大小以及作用方向。另一方面，在反射震測中若無視此特性，將會造成風化層厚度的評估出現誤差，進而使得靜態修正無法有效進行。因此，本研究分析折射波在非均向性地層的傳播特性可以有效的進一步校正風化層真正的厚度。



圖三 利用折射波進行風化層厚度評估

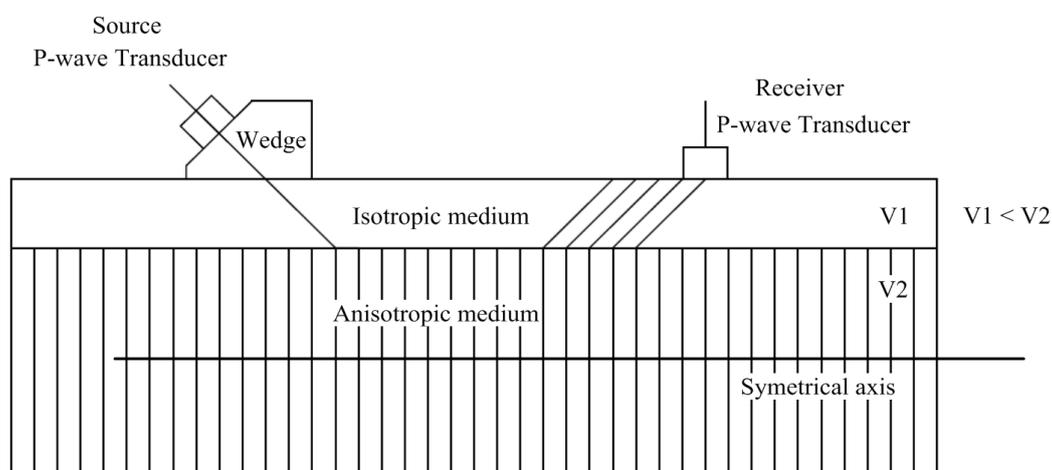
在研究震波非均向性中，Daley & Hron(1977)曾推導出體波在橫均向介質中波速隨傳播角度變化之精確公式，然而公式相當複雜，因此在使用非均向模型分析震波探勘資料時會出現問題。而 Thomsen(1986)將其公式簡化使得分析工作能夠有效的進行。在水文地質探勘、毒物廢料場址確定以及油氣探勘上，都需要準確地知道微裂隙與裂縫之發展情形，而裂隙之發展在震波傳遞上反映出了震波非均向性的特性，Ass' as(1992)即發展了依據震波傳遞之非均向性理論來做為解釋微裂隙與裂縫系統特性之工具。體波在非均向性介質傳遞的特性以及測量方法之歷史回顧由 Helbig and Thomsen(2005)發表於 GEOPHYSICS 期刊。

近年來折射波也開始被運用地層層面裂隙之特性分析，折射波是沿著地層層面傳遞，因此對於探測分布在地層表面上的裂隙，使用折射波分析之效果通常較反射波佳。在 Sil(2014)之專利文章中提到，利用折射波在不同方位角傳播之速度變化的特性可來評估儲集層之應力變化、裂隙發展以及監測人為誘發裂隙。同時也發展了在海上震測中，利用折射波觀測海底地層裂隙發展情形之方法。在實際應用的例子有 Kazinnik(2014)利用 P 波折射波與 Scholte wave(沿著層面行進的 P-SV 轉型波) 在不同方位傳播之走時變化，分析北海 Ekofisk 油田近地表之速度非均向性大小與方向。Tura(2015)利用折射波在不同方位角傳播之走時差異反演進地表地層之速度非均向性大小以及方向，並將此方法實際應用在分析北海

Joanne Field 油田近地表之速度非均向性大小及大地應力方向。

因此本研究擬採用折射震測法來評估目標層的非均向特性，研究方法擬採用物理模型模擬與理論計算來研究折射波在非均向性介質層面上傳播的特性，在理論計算方面將採用現有的理論解來計算，至於物理模擬方面將採用超音波實驗來驗證理論的結果。至於進行步驟，首先將從事理論計算，在理論計算中擬採用 Thomsen(1986)提出之體波在橫均向介質中近支距之隔距時差速度公式。首先將橫均向模型中五個獨立的彈性模數透過超音波實驗求出，再依據 Thomsem(1986)提出之公式計算體波於非均向介質傳播之理論群速度極性分布圖。接著再採用實體物理模型實驗來真正量測其折射波於非均向介質層面傳播之速度，以探討與驗證理論的正確性。

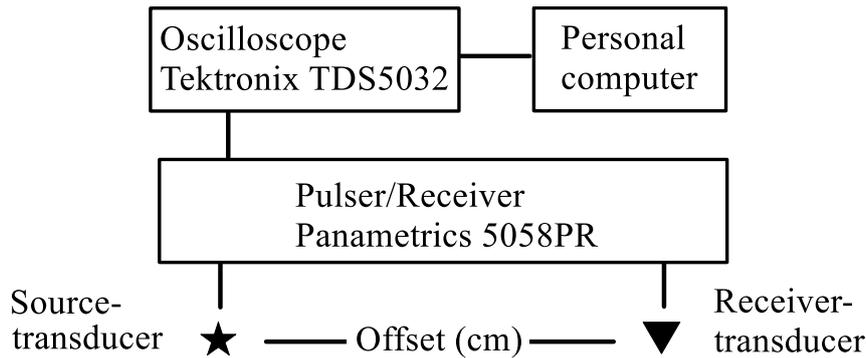
研究模型設計以兩層地層為例，第一層為均向性地層，第二層為非均向性且高速的地層，由於超音波探頭具有強烈的指向性，大部分的能量都往集中往探頭正下方發射，因此在震源處需加裝一個楔型塊使入射波能夠以臨界角入射折射地層，模型設計與施測示意圖如圖四所示。



圖四 模型設計與施測示意圖

在製作第二層非均向性地層，我們可以改變非均向性對稱軸的方向，並且在測量時我們可以改變側線的方位，因而獲得與方位有關的速度異常，藉以研究折射波在不同對稱軸方向的傳播特性。

至於資料收集，使用 P 波超音波探頭(P-wave transducer)在模型上方發射超音波；如圖四所示，接收器為同樣是 P 波的超音波探頭。資料收集方式說明如下，使用超音波探頭作為震波發射器及接收器，利用脈衝波形產生器／接受器來驅動超音波探頭以產生震波並且接收震波訊號，將接收到的震波訊號匯流到數位示波器上，數位示波器用來顯示與數位化所收收到的訊號，再使用個人電腦讀取示波器中已經數位化的訊號，來完成一次發射與接收程序，接下來僅移動接收超音波探頭到下一個探測地點，重複上述步驟完成另一次發射與接收程序，一直到完成所有探測地點的量測工作；實驗儀器配置圖如圖五所示。



圖五 實驗儀器配置圖

經由以上的設計與實測後發現，研究遭遇之困難及解決途徑，有 1、模型製作的困難：製作一個適用於超音波傳播並同時能模擬野外狀況之物理模型常受到尺寸與材質影響(如衰減效應過強)而出現失敗之情形，因此失敗後只能檢討失敗原因並重新製作與測試直到成功為止。2、兩介質介面之影響：以現有的理論計算來求得體波在非均向介質傳播之波速極性圖，皆是根據震波於地層內傳播之條件下進行，而折射波則是在介質層面上傳遞，兩介質之介面是否會使折射波之傳播特性產生影響仍是未知數，若出現異常，解決之道為尋找系上有此方面經驗與專長的老師，共同合作解決。

經由本研究結果，參與此次國際研討會與各國專家學者請教、研討與推廣，並且再次好好地整理與審視我們的研究成果，將獲得 1、學術研究預期之貢獻：由於地震波在非均向介質中傳播之特性較為複雜，而目前對於震波在這些介質介面上傳遞的特性之研究與了解較少，預期本研究成果有助於了解震波在非均向性介質層面上傳播之特性。2、國家發展預期之貢獻：折射波的應用無論在工程或地質調查上已受到廣泛的使用，本研究預期藉由修正地層之非均向性將此技術之精確度提高一個層次。與此同時，本研究在學術、工程評估及石油探勘業皆有貢獻，渴望能提高國家知名度，讓國外研究人員、石油公司能多與國人合作，帶來更多收益。3、工業方面預期之貢獻：由於本研究能夠有效地將地層面上之非均向性造成的影響歸納出，在地質調查中，判斷岩盤深度是工程界作為設計、施工之相當重要的參考，若能夠將此方法之精確度提升，將有助於建物施工時之決策判斷。

### 重要參考文獻

Ass' ad, J. M., Tatham, R. H., and McDonald, J. A., 1992, A physical model study of microcrack-induced anisotropy: *Geophysics*, **57**, 1562-1570.

Daley, P. F., 1977, Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **67**, 661-675.

Helbig, K., and Thomsen, L., 2005, 75 – plus years of anisotropy in exploration and reservoir seismics: A historical review of concepts and methods: *Geophysics*, **70**, 9ND – 23ND.

Kazinnik, R., Roy, B., Tura, A., Vedvik, L., and Knoth, O., 2014, Near surface velocities at Ekofisk from Scholte and refracted wave analysis: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2036-2039.

Sil, S., Tura, A., Kazinnik, R., and Zhu, X., 2014, Fracture characterization from

refraction travel-time data: U. S. Patent 20140133273.

Tura, A., Kazinnik, R., Tao, Y., and Betterly, S., 2015, A refraction method to detect reservoir velocity and anisotropy: *The Leading Edge*, **34**, 548-550, 552-552.

Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, 1954-1966.

#### 四、 建議事項

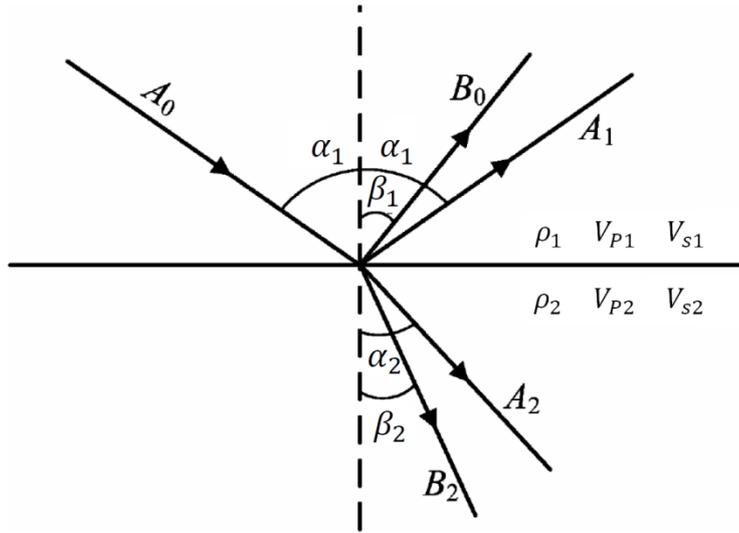
在與各國專家學者請教、研討與推廣本研究過程中發現，除了使用折射震測法來評估目標層的非均向特性外，我們也可以開發另外一種簡單、快速的方法來探測地層的非均向特性，於研討會中擬定未來的研究方向，並建議以下列方法來簡單、快速的方法來探測地層的非均向特性。

由於振幅隨展距變化 (Amplitude Versus Offset, AVO)的特性是地層的 P、S 波速度及密度的函數，因此可藉由振幅隨展距變化情形的分析來獲得地下岩性的訊息。油氣與蓋岩間即存在阻抗差異，因此油公司常利用這種振幅上的異常，來判斷地底下油氣的位置與含量，現今已經廣泛地利用 AVO 技術在各地進行探油工作，這種方法亦稱為直接探油法。傳統的 AVO 分析是建立在地層是均向性介質的條件下，分析反射係數隨展距的變化，然而近地表的沉積層常會出現重複性的沉積薄層，層面本身是均向性的，且層面間的距離遠小於震波波長，因此當震波傳遞於其中時會出現非均向性的特性，此種非均向性稱之為橫均向性介質 (transversely isotropic media, VTI)，由於此特性的存在，會強烈影響原本假設地層為均向性的 AVO 分析方式。

Deley 和 Hron(1977)曾經推導出體波在橫均向性介質中 AVO 的理論解，假設震波為平面波，且考慮介面上應變與應力的連續，再根據介質的物理參數，即可直接算出來，此理論解由於計算方式過於複雜，在 AVO 的分析上並不能提供更直觀的幫助。所以為了解決此問題，有許多學者對此理論解進行簡化的工作，像是 Banik(1987)在弱非均向性與低入射角度的情況下提出一種線性的近似方程式，說明在低入射角度時，反射係數的變化是由  $\delta$  主導，幾年後 Thomsen(1993)推導出在弱非均向性時，於高入射角度也能近似的方程式，隨後根據 Thomsen(1993)的研究成果，Rüger(1997)針對此進行修改，推導出在上下兩地層介質的物理性質差異不大時的近似方程式，比起前人的結果，Rüger 的近似式於高入射角度(20 度至 45 度)時能表現得更好，且他的線性方程式具有直觀的物理意義，現今也廣受推崇，在此建議中，我們將發展另一種更精簡的近似方程式，探討在一些常見到油氣的地質模型，此近似方程式的可行性。

因此我們建議的研究方法為，以均向介質的 Zoepprtiz 方程式為基礎，但是地層的 P 波速度，根據入射角改寫成非均相性參數  $\varepsilon$ 、 $\delta$  與入射波角度的函數，來計算 P 波的反射係數，並且針對一般常見到油氣的地質模型，即為頁岩覆蓋含氣砂岩的介面上，來驗證此近似方程式的正確性。

此近似方程式可以表示為以如圖六所示，彈性波在均向介質中傳遞時，若遇到一不連續面會產生震波的反射與透射現象，其反射與透射特性受控於上下兩介質的 P 波( $V_p$ )和 S 波( $V_s$ )速度與介質密度( $\rho$ )，以入射一個平面 P 波(入射振幅為  $A_0$ )為例，當入射波傳遞至不連續介面時，將會產生反射 P 波(反射振幅為  $A_1$ 、反射角為  $\alpha_1$ )、反射 S 波(反射振幅為  $B_0$ 、反射角為  $\beta_1$ )、透射 P 波(透射振幅為  $A_2$ 、透射角為  $\alpha_2$ )、與透射 S 波(透射振幅為  $B_2$ 、透射角為  $\beta_2$ )，透過 Zoepprtiz 方程式(方程式 1)，可以計算出反射 P 波的反射係數( $R_{PP}=A_1/A_0$ )、反射 S 波的反射係數( $R_{PS}=B_1/A_0$ )、透射 P 波的透射係數( $T_{PP}=A_2/A_0$ )與透射 S 波的透射係數( $T_{PS}=B_2/A_0$ )。



圖六 入射一個平面 P 波至不連續介面時，所產生的反射與穿射波

$$\begin{bmatrix} \sin \alpha_1 & \cos \beta_1 & -\sin \alpha_2 & \cos \beta_2 \\ -\cos \alpha_1 & \sin \beta_1 & -\cos \alpha_2 & -\sin \beta_2 \\ \sin 2\alpha_1 & \frac{V_{p1}}{V_{s1}} \cos 2\beta_1 & \frac{\rho_2 V_{p1} V_{s2}^2}{\rho_1 V_{s1} V_{s1}^2} \sin 2\alpha_1 & -\frac{\rho_2 V_{p1} V_{s1}}{\rho_1 V_{s1}^2} \cos 2\beta_2 \\ \cos 2\beta_1 & \frac{V_{s1}}{V_{p1}} \sin \beta_1 & -\frac{\rho_2 V_{p2}}{\rho_1 V_{p1}} \cos 2\beta_2 & -\frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1 V_{p1}} \sin 2\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_1 \\ \sin 2\alpha_1 \\ -\cos 2\beta_1 \end{bmatrix}$$

方程式 1 均向性介質之 Zoeppriz 方程式

本建議的近似方程式共採兩階段近似，在兩層的 VTI 介質(VTI/VTI)中，上下層的非均向性參數為 $\epsilon_1$ 、 $\delta_1$ 、 $\epsilon_2$ 與 $\delta_2$ ，因為 VTI/VTI 介面的 AVO 特性是由其非均向性參數的差值( $\Delta\delta$  與  $\Delta\epsilon$ )所主導，所以第一階段的近似是將 VTI/VTI 介面視作上層為非均向性參數 $\epsilon=\epsilon_1-\epsilon_2$ 、 $\delta=\delta_1-\delta_2$ 的 VTI 介質，下層則是均向性的介質(VTI/ISO)，在此簡化下，以 Zoeppriz 方程式為基礎，再將 VTI/ISO 介面視作兩層均向性介質(ISO/ISO)，但是在上層介質中的 P 波波速( $V_p$ )是隨入射角度( $\theta$ )改變而不同，垂直入射的波速( $V_{p1}$ )最慢，水平入射的波速( $V_{p2}$ )最快，我們根據入射角度( $\theta$ )增加而來分配 P 波波速， $V_{p1}$ 、 $V_{p2}$ 是由 Thomsen 的非均向性參數  $\epsilon$  所決定，隨後加上一項由  $\delta$  所控制的經驗項，形成本建議的近似方程式(方程式 2)。

$$V_p = \sqrt{(V_{p1} \cos \theta)^2 + (V_{p2} \sin \theta)^2 (1 + \delta \sin^2 \theta)}$$

方程式 2 非均向性介質之近似方程式

經由這兩次的簡化，先將原本的 VTI/VTI 介面簡化成 ISO/ISO 介面，再調整上層的 P 波波速即可，簡化後的方程式，比起 Rüger 的方程式更為精簡且直接。為了驗證此方程式的近似成效，我們使用了一系列的地質模型與非均向性參數，測試我們的近似解，測試相關的參數分為地質模型和非均向性參數。

我們的地質模型是頁岩(shale)覆蓋在含氣砂岩(gas sand) 的狀況，模型中的彈性參數(波速與密度)是採用符合 Rutherford 和 Williams(1989)所提出 class 1、class 2 與 class 3 的三種分類作為這次建議的參數(表 1)，此三種分類的說明如下：

Class 1:含氣砂岩的阻抗比頁岩大，且反射係數隨入射角度增加而遞減。

Class 2:含氣砂岩的阻抗與頁岩相近，且反射係數隨入射角度增加而遞減。

Class 3:含氣砂岩的阻抗比頁岩小，且反射係數隨入射角度增加而遞增。

這三種分類代表在油氣存在時，三種經典的 AVO 特性，很適合當作這次建議的模型，有助於了解此方程式應用於頁岩覆蓋含氣砂岩時的可行性。

表 1.本建議的三組模型所採用的彈性參數

	Shale			Gas Sand		
	Vp (km/s)	Vs (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (km/s)	Vs (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Model 1	3.30	1.70	2.35	4.20	2.70	2.49
Model 2	2.96	1.38	2.43	3.49	2.29	2.14
Model 3	2.73	1.24	2.35	2.02	1.23	2.13

至於非均向性參數，在此建議中我們考慮頁岩為垂直橫向非均向性，含氣砂岩則為均向性，為了選擇合理的非均向性參數，我們參考 Kim et al. (1993)的設定，此設定是根據 Thomsen(1986)的研究工作中所測量到的非均向性參數，在這些參數中， $\epsilon$  分布在 0.01 至 0.334，而  $\delta$  分布在-0.220 至 0.730 之間，分別各取平均，即得到  $\epsilon$  為 0.15、 $\delta$  為 0.13。

我們以這組非均向性參數與上段所述的地質模型進行計算，將我們的近似解、Rüger 的近似解與理論解做比較，驗證此近似方程式的正確性。如此則可以簡單、快速的方法來探測地層的非均向特性，以有效的探測地下油氣的位置與特性。

### 重要參考文獻

Banik, N. C., 1987, An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media: *Geophysics*, **52**, 1654-1664.

Daley, P. F., and Hron, F., 1977, Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **67**, 661 - 675.

Kim, K. Y., Wroldstad, K. H., and Aminzadeh, F., 1993, Effects of transverse isotropy on P-wave AVO for gas sands: *Geophysics*, **58**, 883 - 888.

Rutherford, S.R., and Williams, R.H., 1989, Amplitude-versus-offset variations in gas sands: *Geophysics*, **54**, 680-688.

Rüger, A., 1997. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry: *Geophysics*, **62**, no. 3, 713-722.

Thomsen, L., 1986. Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, no. 10, 1954-1966.

Thomsen, L., 1993, Weak anisotropic reflections, in Castagna, J.P., and Backus, M.M., eds, *Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO analysis*: SEG,

103 - 114.

雖然目前網際網路很發達，所有訊息都能很快經由網路快速獲得，與他人的聯絡亦可藉由網路方便快速達成，但是面對面的溝通與討論還是很重要，很多的原創想法都是在溝通中發生的。平常大家都在自己的研究室工作，難得可以與同好一起討論與分享研究心得和研究結果，如同華山論劍，不亦快哉，新的想法與創意亦在此萌芽茁壯。因此鼓勵大家參與國際研討會也希望國家持續支持這種活動。