

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會)

二〇〇四年美國地物師學會年會及振幅支距分析短期研討出國報告

中國石油股份有限公司 探採研究所
出國人：傅式齊

出國人職稱：地球物理探勘師

出國地區：美國

出國期間：93年10月8日至10月15日

報告日期：93年11月25日

目錄

摘要	1
壹、目的	..2
貳、過程	...2
參、地物師學會年心得	..3
肆、『振幅-支距分析、解釋』短期研討訓練課心得	..3
一、 振幅解釋技術發展史	..3
二、 岩石物理	..5
(一)、 彈性係數	..5
(二)、 P 波及 S 波速度	..7
1.P 波及 S 波速度與剪力(μ) 及體積(K) 彈性係數關係	7
2. P 波及 S 波速度與孔隙率及水飽和率關係	..7
3.P 波速度和電阻的關係	..8
4.P 波速度和密度的關係	..8
5.P 波速度和 S 波速度間的 Castagna 關係式	9
(三)、 V_p / V_s 及波松比 ()	..10
(四) 孔隙內流體替代(Fluid Substitution)	..11
三、 震測反射振幅的探討	..14
(一)、 垂直入射反射振幅、極性及相位	14
(二)、 地質界面幾何結構對反射振幅形貌的影響	15
(三)、 反射振幅和入射角的關係	..17
1.Fluid-Fluid 界面	..17
2.Solid-Solid 界面	..19
(四)、 Zoepprtiz Equation 的線性估算	..22
四、 油氣徵兆和 AVO 異常	..27
(一)、 直接探勘油氣指徵	27
(二)、 AVO 油氣異常類型	..28
五、 AVO 斜率及截距之特性	..31
(一)、 由反射係數區別孔隙內流體	31
1. 截距及斜率對區別孔隙內流體的貢獻	..31
2.Smith & Gidlow 的 Fluid Factor	..33
3.Lambda-Rho()孔隙內流體區別因子	34
4.A/B 振幅分析	35
(二)、 孔隙流體及岩性預測之交叉圖分析	37

(三)、AVO 震測特性交叉圖分析	..40
(四)、應用斜率及截距進行油氣評估之陷井	.43
1. 截距及斜率間統計上的相關性	..43
2. 剩餘 NMO 對截距及斜率估算的影響	.45
2. 剩餘 NMO 對截距及斜率估算的影響	.45
(五)、彈性阻抗(EI)	.47
伍、建議	..51
陸、參考文獻	..52

摘要

本次出國於十月九至十日參加 SEG 會前會『振幅-支距分析、解釋』短期研討課，十月十一至十三參加年會，並於十月十一日發表論文『Comprehensive analysis of hydrocarbon entrapment style of the Hsinying gas field and its application to hydrocarbon exploration』。年會中所見石油探勘相關解釋軟體益趨整合性及機動性，部分重合逆推彈性波阻抗的技術，已相當普遍的應用於油氣潛能評估及油氣層監測，探採研究所目前已將這一部分的技術發展，規劃在九十五年的研究計畫，但在實際應用時，未來仍需藉助 Fugro-Jason 公司技術層面相關人員的經驗傳承，方能正確有效的使技術生根。希望公司能支持相關出國訓練及軟體維護預算。本報告將以『振幅-支距分析、解釋』短期研討訓練的心得為重點，介紹由第一代以亮點為重點之振幅解釋技術，到第二代以振幅-支距分析為重點的技術。首先討論最基礎卻相當重要的震測資料振幅、極性、及相位的認識，其次討論振幅-支距分析極為相關之岩石物理。Zoepprtiz Equation 是反射振幅和入射角關係的理論基礎，本報告討論 Bortfeld、Aki & Richard、Shuey 及 Smith & Gidlow 等人之 Zoepprtiz Equation 簡化公式的個別特色及應用時之誤差。以代表三種埋深、六個地質模型，說明 Bortfeld 關係式的反射係數與孔隙流體與岩體剛性間之關係，也比較了三種 AVO 類型的孔隙流體曲線與剛性曲線的不同特性。直接探勘油氣指徵之亮點常和第三類型 AVO 異常相關，相位反轉常和第二類型 AVO 異常相關，暗點則常和第一類型 AVO 異常相關。AVO 截距及斜率對區別孔隙內流體的貢獻在本文中討論，亦討論了 Smith & Gidlow 的 Fluid Factor 應用於油氣評估，和油氣不相關的背景資料點的 Fluid Factor 均接近零，因而更能突顯具油氣潛能的探勘目標。Lambda-Rho() 孔隙內流體區別因子，是另一項油氣評估技術，但需進行所謂的 AVO 逆推或部分重合同步逆推，以獲得 P 阻抗及 S 阻抗。本公司日後可加強重合後資料體、截距及斜率等 AVO 特性資料體，以 A/B 振幅分析方法評估油氣潛能，不但較容易突顯探勘目標，亦可評估探勘目標的風險。本報告亦提出 AVO 分析應用於油氣評估時的一些陷阱，可提供日後探勘工作參考

壹、目的

美國地物師學會年會為一國際性地球物理相關科技會議，新科技之近期發展及應用資訊相當豐碩。本次奉派出國參加該會議期能了解及蒐集目前地球物理石油探勘新科技發展、應用，作為本所研究發展之參考方向。此外 地物師學會年會舉辦之地球物理科技應用延伸訓練課程，聘請石油探勘業界、顧問公司、或學術研究界具頂尖專業技術及知識之學者專家為授課講師，為短期內有效吸收專業技能之最佳機會。蒐集國外振幅-支距分析近年改善的技術、處理流程的整合、實際應用的陷阱及控管、個案研究等相關資訊，提高此技術應用於直接探勘的成功率。發表論文，達成石油基金管理委員會委辦計畫之效益。

貳、過程

九十三年十月八日由台北啟程到丹佛，十月九至十日參加 SEG 會前會『振幅-支距分析、解釋』短期研討訓練課，第一天課程由 Michael Graul 主講，第二天課程由 Fred J. Hilterman 主講。十月十一至十三參加二 0 0 四年美國地物師學會年會，並於十月十一日發表論文『Comprehensive analysis of hydrocarbon entrapment style of the Hsinying gas field and its application to hydrocarbon exploration』。

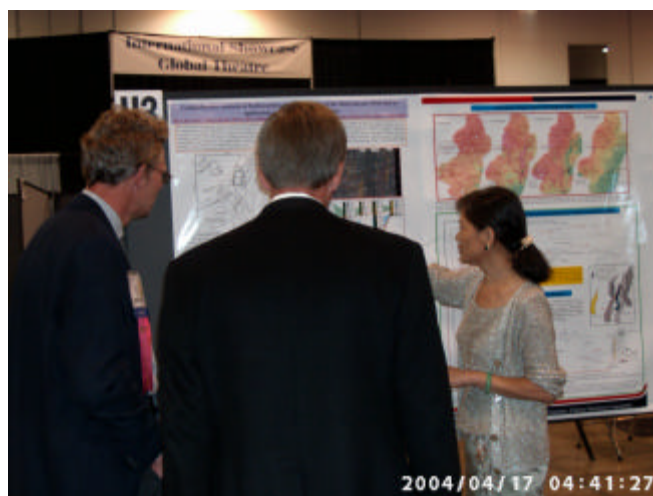


圖 1 十月十一日論文發表並向評審解說。

參、地物師學會年會心得

二〇〇四年美國地物師學會年會參展之公司甚多，石油探勘相關軟體益趨整合性及機動性，如 Landmark 最新發展之震測解釋軟體，在剖面上定義一視窗後，此視窗可機動性的隨滑鼠的移動，在此視窗內展示各種如瞬頻、瞬相、振幅強度等震測特性 (seismic attributes)，亦可在此視窗內展示低通、帶通、或高截濾波後的震測資料，亦即在摘取反射層面時，已可隨時整合以上各種震測資料型態，綜合研判最佳反射層面的摘取，並可同時注意是否存在油氣相關的震測特性，而不似以往，多先在重合移位後震測資料完成反射層面摘取後，才另行分析各種震測特性資料體。這種整合性及機動性的解釋方式，較容易掌握探勘目標。部分重合逆推彈性波阻抗 (elastic impedance) 的技術，近年已相當普遍的應用於油氣潛能評估、油氣層監測 (4D seismic)。此技術類似本研究所引進 Fugro-Jason 公司套裝軟體中之 Rock Trace 模組，經由部分重合同步逆推 (simultaneous partial stack inversion)，獲得 S 波阻抗三維資料體或 V_p/V_s 三維資料體，對於岩性及孔隙內流體，能有更佳的分辨性。探探研究所九十五年的研究計畫，已規劃將此技術應用於國外礦區之油氣評估。

肆、『振幅-支距分析、解釋』短期研討訓練課心得

此部分的報告內容，主要依據研討訓練課講師 Fred J. Hilterman 出版之 "Seismic Amplitude Interpretation" 一書 (Hilterman, 2001)。

一、振幅解釋技術發展史

振幅解釋技術發展之歷史可分為兩大時代 (Hilterman, 2001)，第一代以 1970~1982 年代為主，強調的是亮點和油氣的關連性，第二代由 1982 至今，強調的是振幅-支距分析 Knott 及 Zoeppritz 的研究 (Knott, 1899; Zoeppritz, 1919)，發展出平面波反射振幅和入射角的關係式，奠定了振幅-支距分析技術發展的理論基礎，然而

複雜冗長的數學式，很難表現出反射振幅和岩石物性間細微的變化關係。Koefoed (1955)利用 Zoeppritz equation 描述不同入射角之振幅隨地層介面波松比值變化的關係，成為現今之振幅-支距解釋所依據的基礎。Bortfeld(1961)將 Zoeppritz equation 簡化成流體及剛性兩大項，使得岩石物性和反射振幅相互關係，清楚簡易的顯現。Rosa(1976)了解到 Koefoed 的研究工作對地下岩性預測的重要性，嘗試由同深點集合震測描線振幅之逆推，萃取岩層之彈性參數。他的研究工作和 Shuey(1985)將 Zoeppritz equation 簡化為線性估算式有密切的關係。Shell 公司是石油工業界最早應用亮點於石油探勘的公司，在 1972 左右，亮點探勘技術被大量普遍的應用，但至 1982 年以前的第一代振幅解釋技術，並無任何用反射振幅預測岩性或孔隙內流體的紀錄，Ostrander(1982)的研究工作才使反射振幅應用於預測岩性或孔隙內流體的技術大放光明，振幅解釋的技術也才邁入第二代。第二代振幅解釋技術著重的是石油物理、正向及逆向模擬及振幅之保留、成像及逆推。Shuey 在 1985 年(1985)將 Zoeppritz equation 簡化為 P 波反射係數和入射角相關的線性估算式，由同深點集合振幅隨支距(入射角)的線性關係中之截距(intercept)與梯度(gradient)，評估油氣潛能。1990 年初，在 Gas Research Institute (GRI)及 SEG 的贊助下，Allen 及 Peddy(1993)由幾家在墨西哥灣探勘的公司蒐集了相關震測資料、井下資料及解釋，出版了 AVO 實用於墨西哥灣探勘的案例研究專書，不但詳述很多 AVO 成功的案例，亦記錄了許多由乾井所獲得的經驗及教訓。大多數 AVO 成功的案例是應用在墨西哥灣始新世的 Yegua 地層。至此，亮點的振幅解釋技術已成為 AVO 分析技術的一小部分。

值得一提的是 Gassmann(1951)對 AVO 技術發展的貢獻，他的工作無論對第一代或第二代振幅解釋技術，均有重要的影響卻常為人所忽略。Gassmann 的研究工作，提供了石油物理和震波速度間的校正關係，井下未鑽遇油氣的探勘目標層，利用其關係式可預測當目標地層若含不同飽和度油氣時之震波速度，亦即所謂的孔隙流體替換模

擬，進而模擬有油氣潛能時振幅支距的響應，以助於探勘潛能目標的探詢。

二、岩石物理

既然第二代振幅解釋技術強調的是分析震波在介質中傳遞時之振幅和岩性或孔隙內流體(含不同飽和度的油、氣或水)的關係，岩石物理及應力和應變間關係，自然是進入振幅-支距分析解釋前重要的課題。Castagna 等人(Castagna et al., 1993) 出版之 "Rock Physics—The Link Between Rock Properties and AVO Response"，Mavko 等人(Mavko et al., 1998) 出版之 "The Rock Physics Handbook—Tools for Seismic Analysis in Porous Media"，Wang 及 Nur(Wang and Nur, 1992) 出版之 SEG 叢刊 "Seismic Acoustic Velocities in Reservoir Rocks"，提供相當豐富的參考資料。

(一)、彈性係數

剪力(shear Modulus)、體積(bulk Modulus)、及楊氏係數(Young's Modulus)是最常用來描述物體受力狀態的彈性係數(圖 2)。岩石受到應力作用會發生應變(strain)，應變可分為 longitudinal strain(e_L)、transverse strain(e_w)及 shear strain(e_s)三種。完整的形變描述則牽涉岩石本身之三維立方體在三維空間的變形，稱之 volumetric strain (ϵ_v)。 $e_L = \Delta L/L$ ； $e_w = \Delta W/W$ ； $e_s = Y/X = \tan \theta$ ； $\epsilon_v = \Delta V/V$ 。對一完全彈性的介質而言，應變和應力間的關係可以 Hooke's Law 表示(應力 = 應變 \times 常數)。對 longitudinal strain 而言，此常數稱之 Young's Modulus (E)；對 shear strain 而言，此常數稱之 shear Modulus (μ) 或稱剛性係數(Rigidity)；對 volumetric strain 而言，此常數則稱之 bulk modulus(K)。當岩石無孔隙時，利用基岩(無孔隙)的彈性係數已足以展開波動理論方程式，但當岩石具孔隙時，岩石的總彈性係數則為孔隙率(ϕ)、基岩(K_{ma})、孔隙內流體(K_f)及含孔隙乾燥岩石(K_{dry})

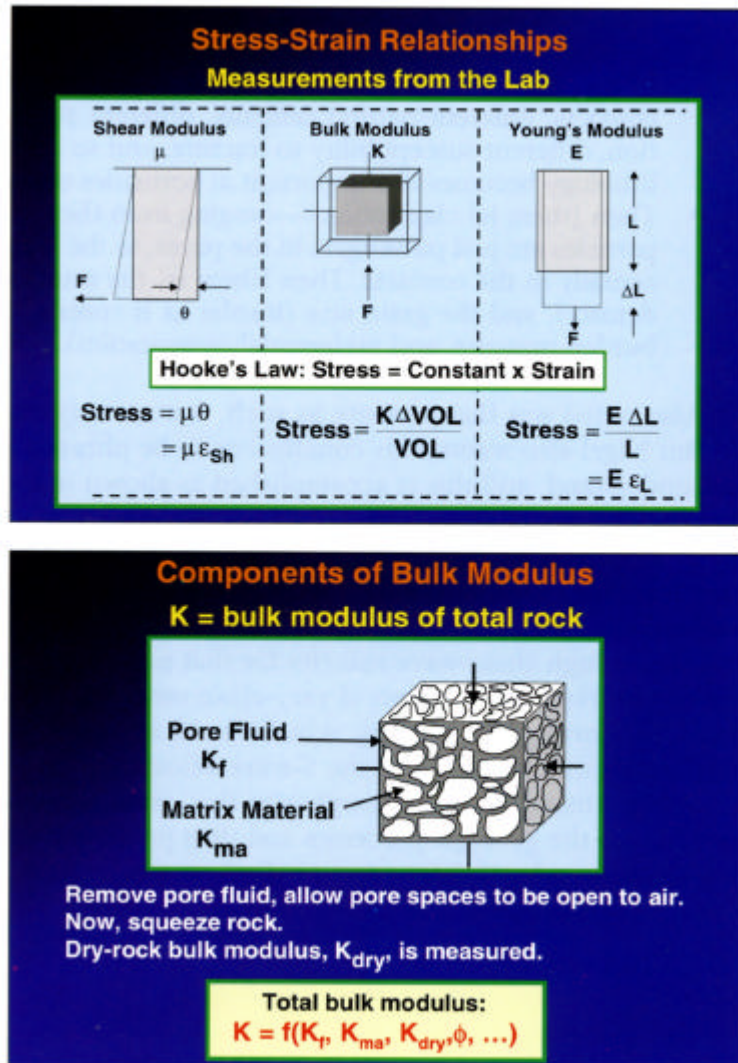


圖 2 岩石剪力 (shear Modulus)、體積 (bulk Modulus)、及楊氏係數等彈性係數定義 (From Hilterman, 2001)。

等彈性係數之函數 ($K = f(K_f, K_{ma}, K_{dry}, \dots)$) (Mavko and Nur, 1998; Gassmann, 1951) :

$$K = K_{dry} + \frac{\phi}{M}$$

$$= 1 - K_{dry} / K_{ma}$$

$$1/M = (1 - \phi) / K_{ma} + \phi / K_f$$

K_{ma} : solid modulus; K_{dry} : empty frame modulus; K_f : fluid modulus; ϕ : porosity

典型的 bulk modulus (10^{10} dynes/cm²) 值，石灰岩 (matrix) 為 60，砂岩 (matrix) 為 40，含孔隙乾燥砂岩為 0.9，水為 2.38，油為 1.0，氣為 0.021。

當水飽和率改變時，孔隙內流體之體積係數 (K_f) 亦隨之改變 (Gregory, 1977;)，依據 Reuss average 公式，流體體積係數之計算如下：

$$1 / K_f = S_w / K_{brine} + (1 - S_w) / K_{Gas}$$

$$K_{Gas} = 1.8 \times 10^7 ; K_{brine} = 2.510^9$$

依據 Voigt average 公式，流體體積係數之計算則為：

$$K_f = S_w * K_{brine} + (1 - S_w) * K_{Gas}$$

(二)、P 波及 S 波速度

1. P 波及 S 波速度與剪力 (μ) 及體積 (K) 彈性係數關係

$$V_P = \sqrt{\frac{(K + 4/3\mu)}{\rho}} \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

K : GPa (gigapascals)

ρ (density) : gm/cm³

velocity : km/s

2. P 波及 S 波速度與孔隙率及水飽和率關係 (Bio-Gassmann Theory)

當岩石的孔隙率及水飽和率為已知，其 P 波速度或密度為一但知道，便可利用 Bio-Gassmann Theory (Biot, 1956 a;b; Gregory, 1977, equation 21~30) 去估算不同孔隙率及水飽和率之下該岩石的 P 波及 S 波速度。其他參數如水、油氣及基岩 (matrix solid) 的密度及 bulk modulus，dry rock 的波松比，都需知道才能進行

估算。應用此理論公式估算 P 波及 S 波速度的目的，是利用已鑽遇含水目標層的井下資料，將孔隙內流體替換，假設某種有油氣聚集時的水飽和率，估算如果附近探勘目標層如果具油氣聚集潛能時，可能呈現之 S 波速度或波松比值，並用於振幅支距分析，以便評估其他好景區之油氣潛能。

3. P 波速度和電阻的關係

對許多老井而言，只有電阻測錄，此時可依據 Faust 經驗式 (1953)，估算 P 波速度：

$$V_p = a (Rd)^c$$

a, c = constant ; R = resistivity ; d = depth

或 $t = a + b R^c$

a, b, c = constant

或 $t = b R^c$ (McCoy and Smith, 1979)

4. P 波速度和密度的關係

P 波速度和密度的關係一般可以 Gardner's equation Lindseth's equation (1979) 描述，當其中一種井下測錄缺失時，可用此兩關係式估算另一種井下測錄：

a. Gardner's equation

$$\rho = a V_p^b$$

$$a = 0.23 ; b = 0.25$$

a, b 的值也可由實際岩樣的密度及 P 波速度的交叉圖擬合。

Castagna (1993) 近一步導出不同岩性所對應之 Gardner's equation：

$$\text{Sand: } \rho = 0.200 V_p^{0.261}$$

Shale: $= 0.204 V_P^{0.265}$
 Limestone: $= 0.243 V_P^{0.225}$
 Dolomite: $= 0.226 V_P^{0.243}$
 Anhydrite: $= 0.600 V_P^{0.160}$

b. Lindseth's equation

$$V_P = a (V_P) + b$$

$$a = 0.308 ; b = 3400 \text{ ft/sec}$$

c. P 波速度和密度之 Castagna 關係式

表 1 P 波速度和密度之 Castagna 關係式 (Castagna, 1993)

$$= a * V_P^2 + b * V_P + c \quad (\text{Velocity Unit: Km/S})$$

Coefficient	Limestone	Dolomite	Sandstone	Shale	Anhydrite
a	-0.0296	-0.235	-0.0115	-0.0261	-0.0203
b	0.4610	0.390	0.261	0.3730	0.3210
c	0.9630	1.242	1.515	1.4580	1.7320
Min V_P	3.5	4.5	1.5	1.5	4.6
Max V_P	6.4	7.1	6.0	5.0	7.4

5. P 波速度和 S 波速度間的 Castagna 關係式

表 2 波速度和 S 波速度間的 Castagna 關係式 (Castagna, 1993)

$$V_S = a * V_P^2 + b * V_P + c \quad (\text{Velocity Unit: Km/S})$$

Coefficient	Limestone	Dolomite	Sandstone	Shale	Coal
a	-0.055	-----	-----	-----	-0.232
Std error	0.006	-----	-----	-----	0.012
b	1.017	0.583	0.804	0.770	1.542
Std error	0.048	0.037	0.009	0.020	0.064

c	-1.030	-0.078	-0.856	-0.867	-1.214
Std error	0.088	0.104	0.106	0.120	0.014
R squared	0.911	0.874	0.984	0.979	0.966
# samples	129	37	136	32	143
Min V _P	1.5	4.0	1.5	1.5	1.5
Max V _P	6.5	7.0	6.1	5.9	3.5

(三)、V_P / V_S 及波松比 ()

V_P / V_S 值大於 2.0 是未固結砂岩的特徵，當 V_P / V_S 值小於 2.0 時，顯示岩樣為固結良好的岩石、或者為含氣而未固結砂岩的砂岩 (Gardner and Harris, 1968)。Gregory (1977) 的研究更顯示，對很大範圍內之孔隙率而言 (0~0.4)，含水固結砂岩之 V_P / V_S 和含氣固結砂岩之 V_P / V_S，分布範圍明顯的不同，僅小部份重疊，含水固結砂岩之 V_P / V_S (1.42~1.96) 普遍大於含氣固結砂岩之 V_P / V_S (1.30~1.66)。對固結砂岩而言，當氣飽和率增加時，其 V_P / V_S 可減少 3~30%。孔隙率增加時，含水固結砂岩 V_P / V_S 增加的趨勢較含氣固結砂岩 V_P / V_S 增加的趨勢明顯。壓力的增加會減小 V_P / V_S 值，但並無一致性的關係可預測。一般如果要用 P 波速度來估算 Elastic modulus, poisson's ratio, 及 V_P / V_S 值時，唯有目標區域內 P 波速度和這些參數間的相關性建立後，方得以估測。

波松比為 Koefoed(1955) 關係式中之岩性辨認參數，Harvey(1993) 的研究中可看出不同岩性其波松比分布的範圍各不同(圖 3)。波松比為橫向變形 (transverse strain) 和縱向變形 (longitudinal strain) 比之負值，地球物理師卻常以 V_P / V_S 比值來定義波松比 ():

$$= (-2)/2(-1) = (V_P / V_S)^2 = K/\mu + 4/3$$

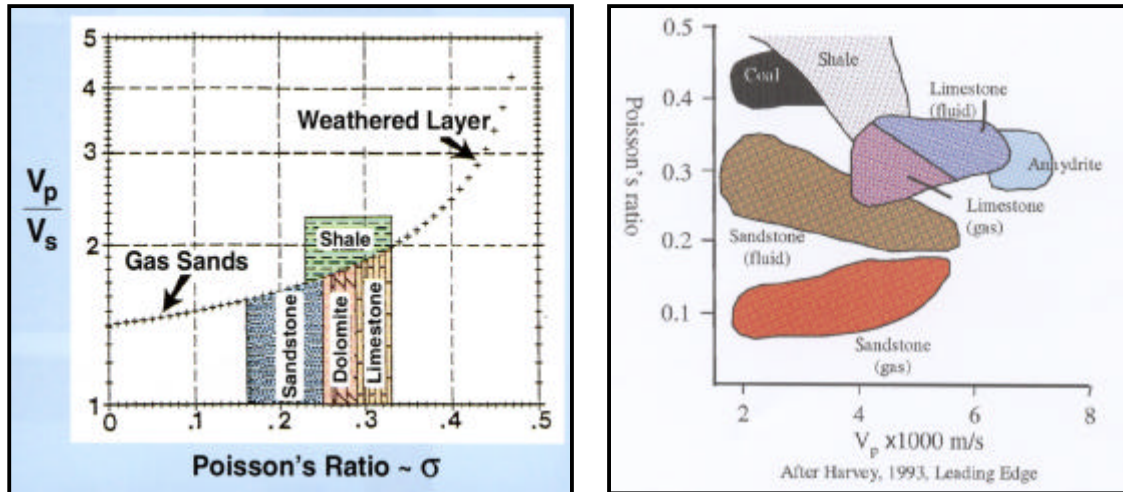


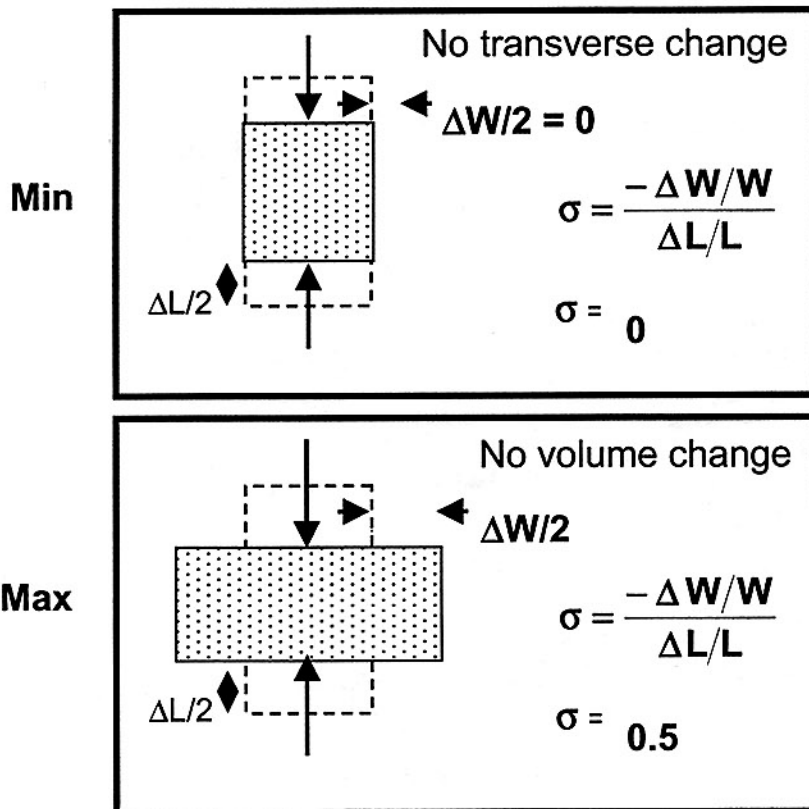
圖 3 V_p/V_s 及波松比值一般為區別岩性的指徵。

對均質的介質而言，波松比值分布在 0.0~0.5 間，當變形後體積等於變形前之體積，如水、空氣、油氣等液體，甚或海床下幾百英尺厚未固結沉積物，其波松比值等於 0.5。當變形後體積無橫向變形發生時，波松比值出現另一極值 0.0（圖 4）。當岩石孔隙中之水為油氣取代時，波松比值隨之降低。 V_p/V_s 及波松比值一般為區別岩性的指徵（圖 3），頁岩的波松比值一般比砂岩大，尤其是比含油氣砂大，但當埋深越來越淺時，頁岩和含水砂岩的波松比值範圍漸趨重疊，當埋深越來越深時，頁岩的波松比值分步趨勢和砂岩波松比值分步趨勢愈趨分離，且較砂岩波松比值低。

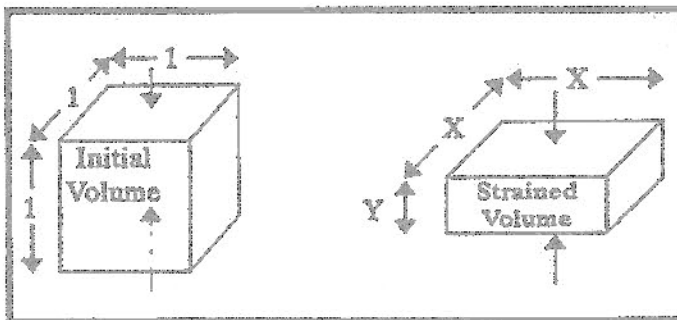
（四）孔隙內流體替代 (Fluid Substitution)

誠如前節所述，Gassmann(1951)對 AVO 技術發展最大的貢獻，即在孔隙內流體被其他流體取代時，提供了石油物理和震波速度間的校正關係（圖 5a），井下未鑽遇油氣的探勘目標層，利用其關係式可預測當目標地層若含不同飽和度油氣時之震波速度，亦即所謂的孔隙流體替換模擬，進而模擬有油氣潛能時振幅支距的響應，以助於探勘潛能目標的探尋。Gassmann 流體替代方程式中之 V_R 及

可由井下測錄取得，基岩的 bulk modulus (K_{ma}) 可由 Voigt, Reuss, 及 Hill (V-R-H) 的彈性係數模型估算（圖 5b），孔隙流體之 bulk



Theoretical limits: $-1. < \sigma < 0.5$
 Practical limits: $0. < \sigma < 0.5$



1. Strained volume has no transverse extension

$$x = 1 \quad \epsilon_{tt} = 0$$

$$y = .98 \quad \epsilon_{ll} = .02$$

$$\sigma = -0. / .02 = 0$$

2. Strained volume = Initial volume

$$y = .98$$

$$(x)(x)(.98) = 1$$

$$x = 1.01$$

$$\epsilon_{ll} = .02 \quad \epsilon_{tt} = -.01$$

$$\sigma = -(-.01) / .02 = .5$$

圖 4 波松比最大值 0.5 及最小值 0 時之變形定義 (from Hilterman's CD, 2001)。

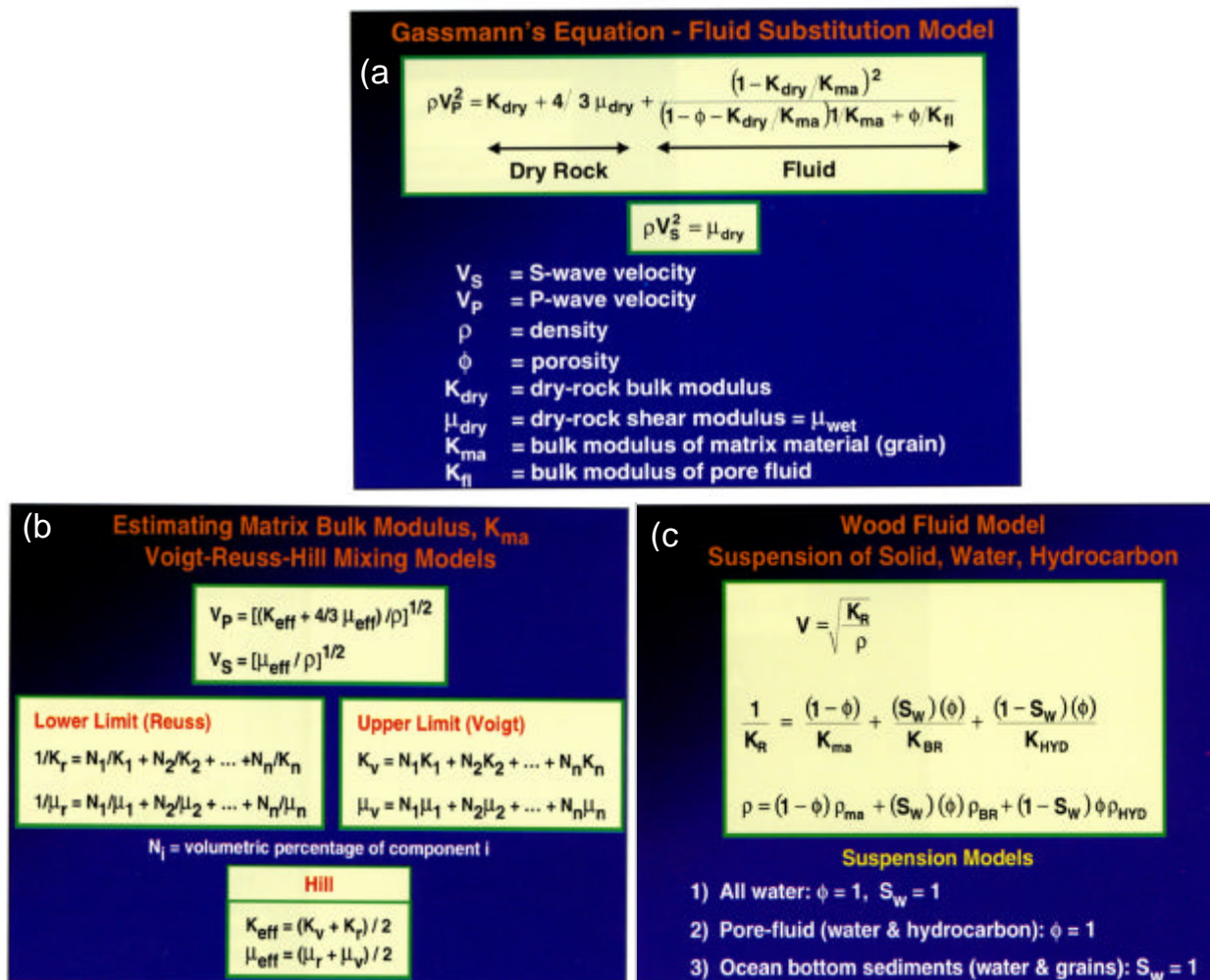


圖 5 Gassmann 流體替代方程式(a)、相關基岩的 bulk modulus(b)及孔隙流體之 bulk modulus 的估算(c)。(From, Hilterman, 2001)

modulus(K_{fl})則可由 Wood(1955)的孔隙流體彈性係數模型或 Batzle and Wang 的孔隙流體彈性係數估算方法估算 (圖 5c)。

以表 3 所示不同埋深時，Gassmann 公式所計算之 Dry Rock Trem 及 Fluid Rock Trem 來看，當埋深為 4000ft 較淺的岩層，孔隙內流體不論是含水或含氣，Fluid Term 對 $\text{Net } \rho a^2$ 的貢獻，均佔很大的比例，因孔隙內流體的改變，也造成 $\text{Net } \rho a^2$ 的值很大的改變。換言之，對埋深淺於 4000ft 的地層而言，孔隙內流體主導了 AVO 反射振幅響應，這也是後續“反射振幅和入射角的關係”一節中討論的

Fluid-Fluid 界面的現象。對埋深達 14000ft 深的岩層，孔隙內流體不論是含水或含氣，Fluid Term 對 Δa^2 的貢獻，均佔很小的比例，因孔隙內流體的改變，造成 Δa^2 值的改變很小。換言之，對埋深較深的地層而言，孔隙內流體不再主導了 AVO 反射振幅響應，這也是後續“反射振幅和入射角的關係”一節中討論的 Solid-Solid 界面的現象。

表 3a Gassmann 公式所計算之 Dry Rock Trem 及 Fluid Trem

4000ft-depth

	Δa^2 (from Dry Rock Trem)	Δa^2 (from Fluid Trem)	Net Δa^2
Wet	4.22 GPa	5.4 GPa	9.62
Gas	4.22 GPa	0.3 GPa	4.52

表 3b Gassmann 公式所計算之 Dry Rock Trem 及 Fluid Trem

14000ft-depth

	Δa^2 (from Dry Rock Trem)	Δa^2 (from Fluid Trem)	Net Δa^2
Wet	36.85 GPa	2.4 GPa	39.25
Gas	36.85 GPa	0.5 GPa	37.35

三、震測反射振幅的探討

(一)、垂直入射反射振幅、極性及相位

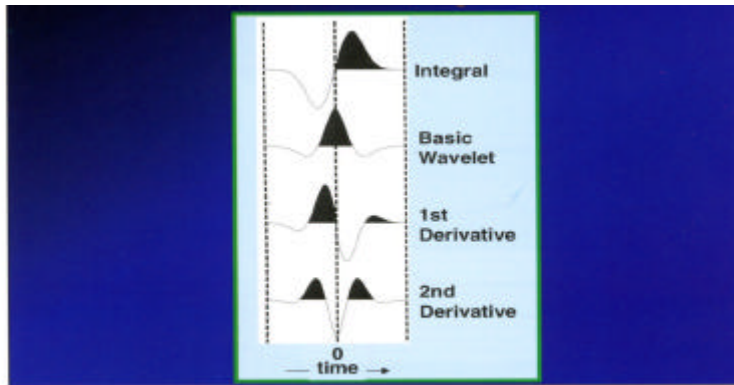
垂直入射波之反射振幅保留、極性及相位的確認，是振幅-支距分析的前導性重要工作。本報告後續要討論的 AVO 油氣異常類形，均是假設垂直入射波之漣波為零相位、由軟介質進入硬介質的界面其反射波極性為正的狀況下，利用 P-G(振幅-支距曲線之截距與梯度)交叉圖來分辨油氣異常潛能及其類型。震測測勘施測時，受波器的類型主要分為粒子運動的 Geophone 及壓力感應式的 hydrophone 兩種。海域資料在施測時，受波器有別於陸上測勘受波

器，是靠壓力的變化偵測反射訊號，而非靠物質的震動偵測反射訊號，海域震測資料的極性一般是需倒轉 180° 後，才能和陸上震測資料匹配。不同公司、或同公司不同人處理震測資料時，或將海域震測資料的極性倒轉，或保留原有極性。海域資料進行振幅-支距分析時，震測資料的極性是首要需釐清的事，否則探勘指徵的辨認，物性層位的定訂，甚或振幅支距 P-G 交叉圖上象限的定義，分析均會造成很大的困擾。一般海域震測資料極性的辨認，可由海床或基盤等硬的界面、或由淺層氣層軟的界面之反射特徵來辨認，亦可經由合成震波比對與漣波萃取來辨認極性。但在海床不深的情況（50 M 左右），25 M 間隔之受波器很容易在近之距已超過海床反射面之臨界角，海床的反射形貌並不清楚，更不易由海床的反射來辨認震測資料的極性。對一些較老年代的海域資料而言，其相位往往和零相位相差正或負九十度。當漣波的相位不為零時，如果為最小相位、能量仍集中在前面，振幅-支距的分析尚不致於引起很大的問題，但對某些相位而言，如 60° 或 90° ，對某些地層結構而言，可能會導致振幅-支距的誤判。此時宜針對目標層進行解迴旋處理 (target oriented deconvolution)，使目標層附近之震測資料轉為零相位或最小相位，或者經由 AVO 模擬的方式，另行歸納油氣評估的準則。

(二)、地質界面幾何結構對反射振幅形貌的影響

受地質界面幾何結構形貌及漣波迴旋作用的影響，一般在震測剖面可觀察到的界面，以零相位、一次微分、二次微分、或積分等各種形貌的漣波呈現 (圖 6)。積分的漣波具有較低的頻率分布，隨著微分的級數 (order) 漸增，漣波頻率分布亦漸趨高頻。厚層的界面振幅響應為原始震源漣波形貌 (零相位)，無論地下岩體的面積有多小、厚度有多薄，在震測剖面上均可觀測到對應之振幅響應。面積小如火成岩岩脈的振幅響應和薄層振幅響應的漣波形貌 (一次微分) 及振幅大小均類似 (圖 7a 上圖)。小面積岩體的振幅響應和薄層振幅響應一樣具諧調作用。小體積岩體的振幅響應則為二次微分漣波形貌 (圖 7a 下圖)。如果地質界面幾何形貌不為平面的狀況，移位

後和移位前反射振幅的比例 (scalar) 和幾何形貌的實體規模有關 (圖 7b), 射振幅響



面以外的反
z, 三維測

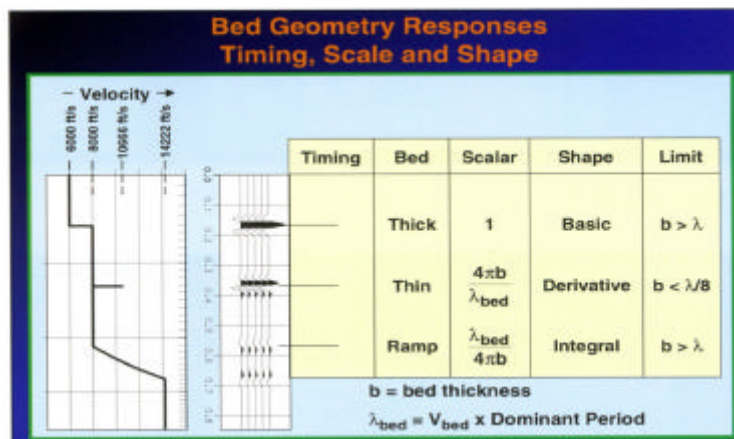


圖 6 受地質界面幾何結構形貌及漣波迴旋作用的影響，一般在震測剖面可觀察到的界面，以零相位、一次微分、二次微分、或積分等各種形貌的漣波呈現 (From Hilterman, 2001)。

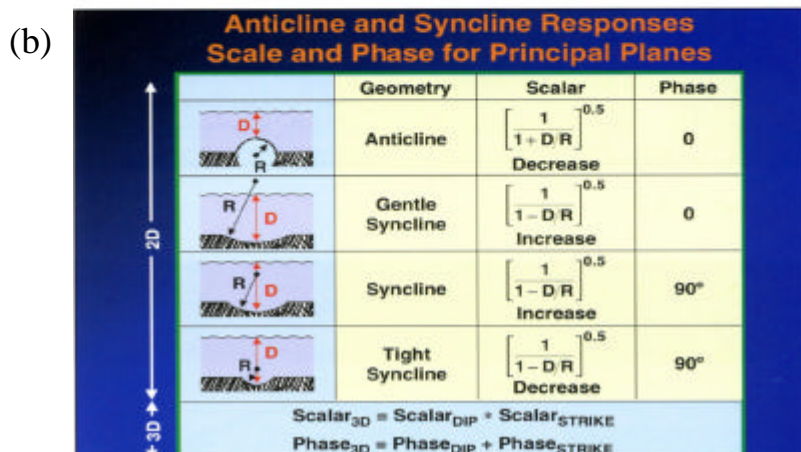
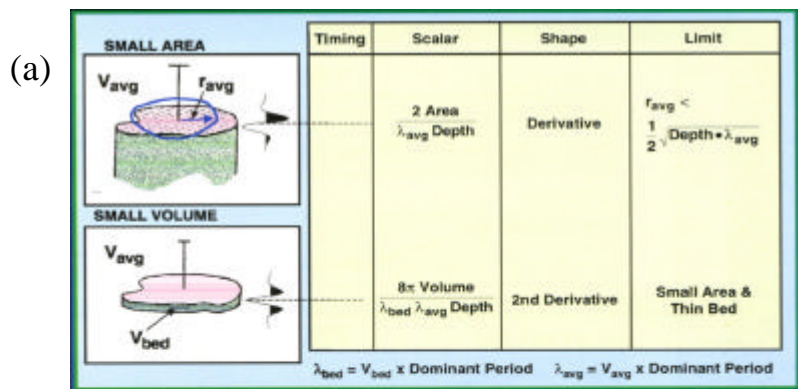


圖 7 小面積及體積的震波響應 (a), 及移位後和移位前反射振幅的比例和幾何形貌的實體規模關係 (b) (From Hilterman, 2001)。

勘及重合前時間移位處理，乃振幅-支距分析前處理重要的工作，以確保振幅的變化不受岩石物性以外其他因素的干擾。二維震測資料用於振幅-支距分析，其評估油氣潛能結果的風險相對的較高。

(三)、反射振幅和入射角的關係

1. Fluid-Fluid 界面

當地層埋深小於一千公尺時，岩層之固結度不夠，地層間界面的關係可視為 Fluid-Fluid 界面。此時 S 波的速度很小，可視為零 (Fluid 狀態)，反射係數和入射角的關係因而簡化如圖 8：

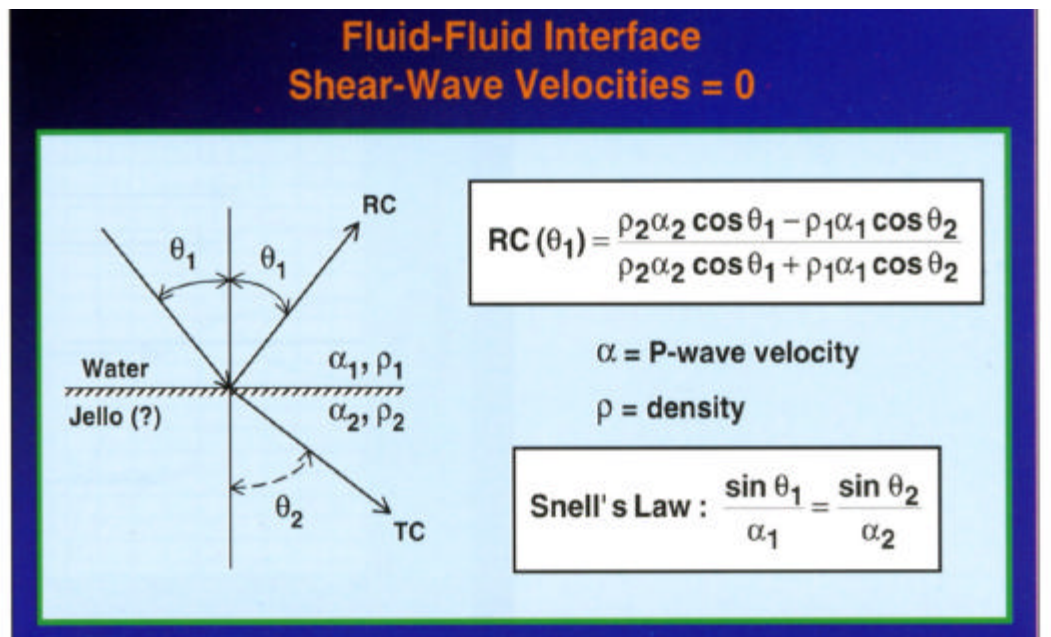


圖 8 Fluid-Fluid 界面之反射振幅和入射角的關係。
(from Hilterman, 2001)

對上、下地層 P 波速度為 5000ft/s 及 9000ft/s 的界面而言，若上、下地層之密度亦無差異，則反射振幅即相位隨入射角變化的曲線如圖 8 所示。反射振幅在超過臨界角 33.7°後達到 1.0，相位則在超過臨界角 33.7°後由零度漸增至入射角為 90°時之 180°。圖 9 的下圖為同深點聚合經靜態平移後之合成震波描線，最右一條描線之入射角為 63°，其對應之相位移約為 90°。對 Fluid-Fluid 界面而言，合成震波僅有三種波，也就是直達波、反射 P 波(PP-Reflection)及 Head Wave。

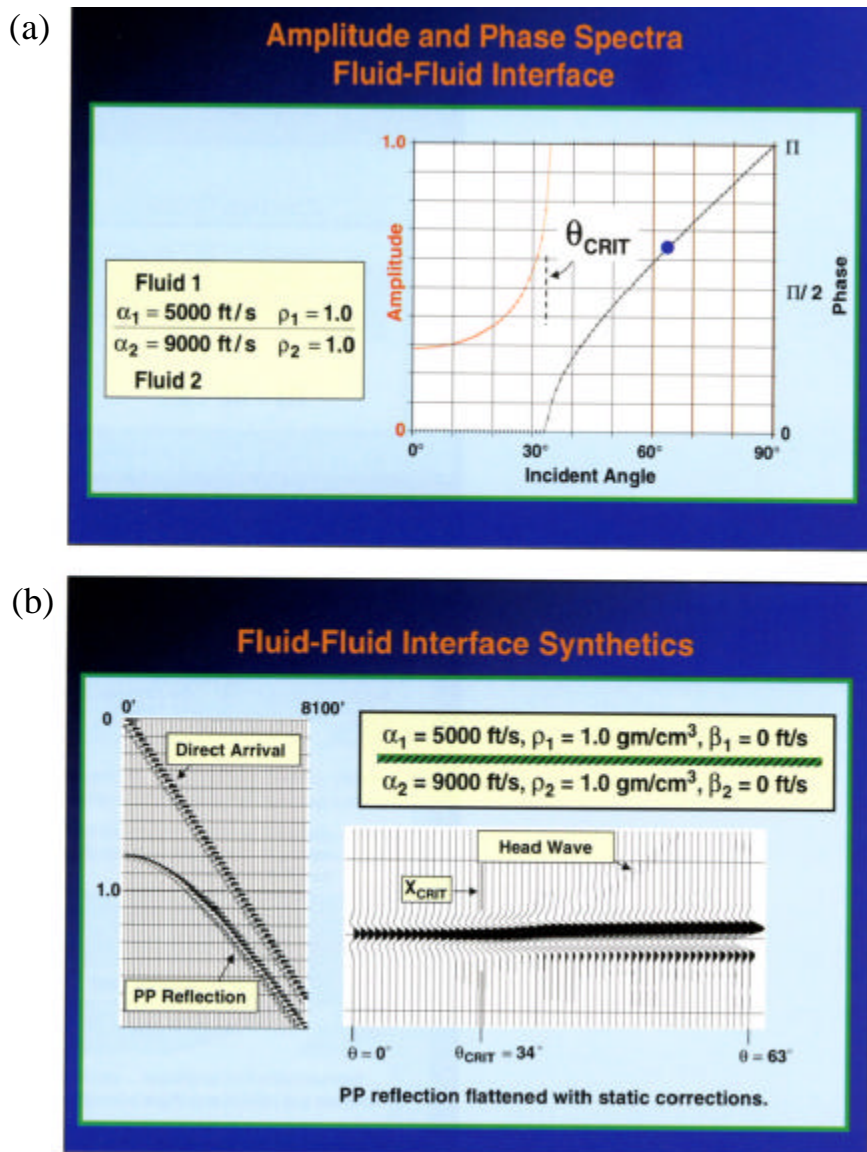


圖 9a 上、下地層 P 波速度為 5000ft/s 及 9000ft/s 的界面，且上、下地層之密度無差異時，反射振幅及相位隨入射角變化的曲線；圖 9b 同深點聚合經靜態平移後之合成震波描線。(from Hilterman, 2001)

2. Solid-Solid 界面

當地層的埋深增加至九千英尺以上，岩層逐漸緻密，地層間界面的關係變轉為 Solid-Solid 界面。對 P 波震源而言，當上行波和下行波均考慮時，八種反射或穿透波(transmitted wave)可由這種介面產生，各種轉換震波之振幅和入射角的關係，也因而複雜。Zoepprtiz Equation (1919)描述了這些轉換震波之振幅與入射角的關係(圖 10)。

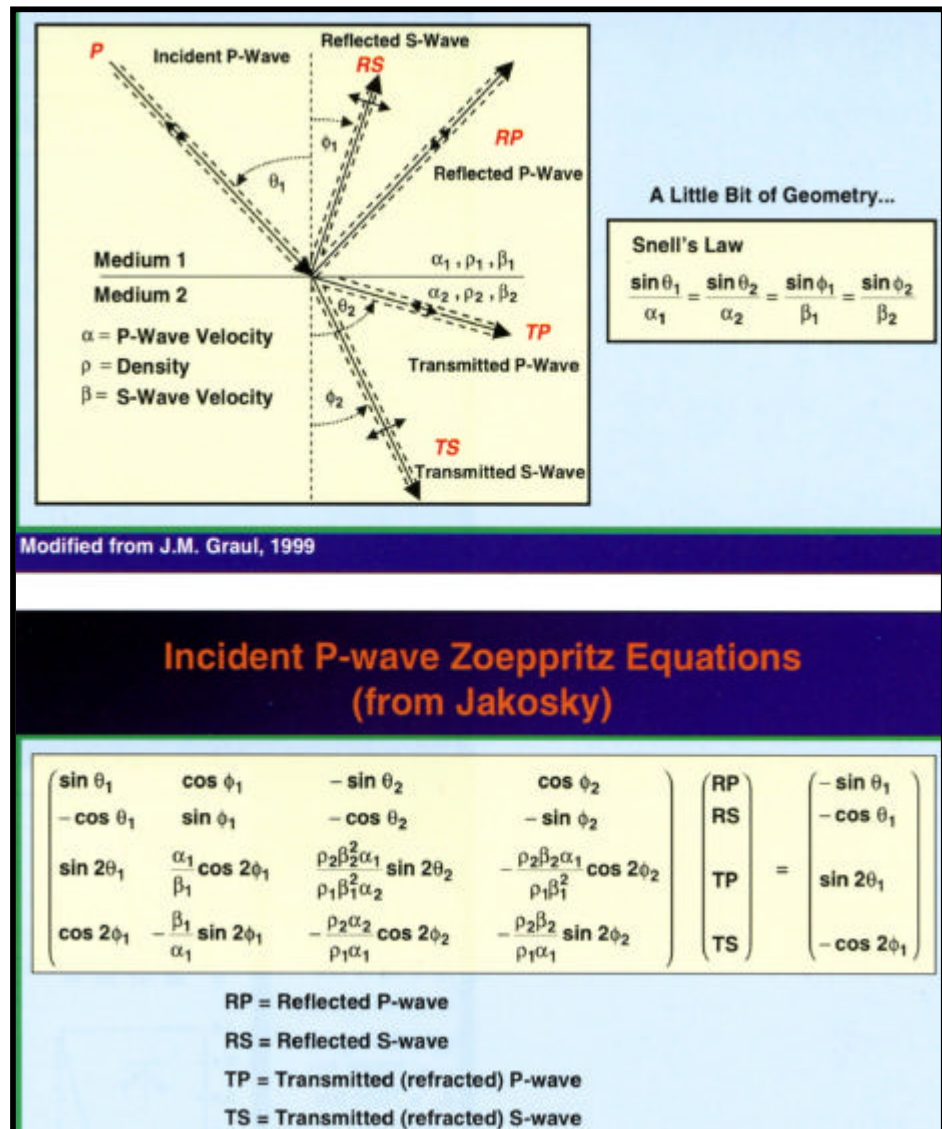


圖 10 描述 Solid-Solid 界面震波型態轉換後，各種轉換震波之振幅和入射角關係的 Zoepprtiz Equation (1919)。

當上、下地層速度差異極大時(下層P波速度為上層P波速度2.5倍),對垂直入射角而言(incidence angle=0°),沒有S波產生(圖11b,d,f,h);對下行波而言,當入射角超過第一個臨界角度時(ac),沒有P波能穿透進入下層介質(圖11c),當入射角超過第二個臨界角度時(as),沒有S波能穿透進入下層介質(圖11d);當入射角方向相反時,不會有臨界角發生,振幅隨入射角變化之曲線相較也平緩許多(圖11e~h)。

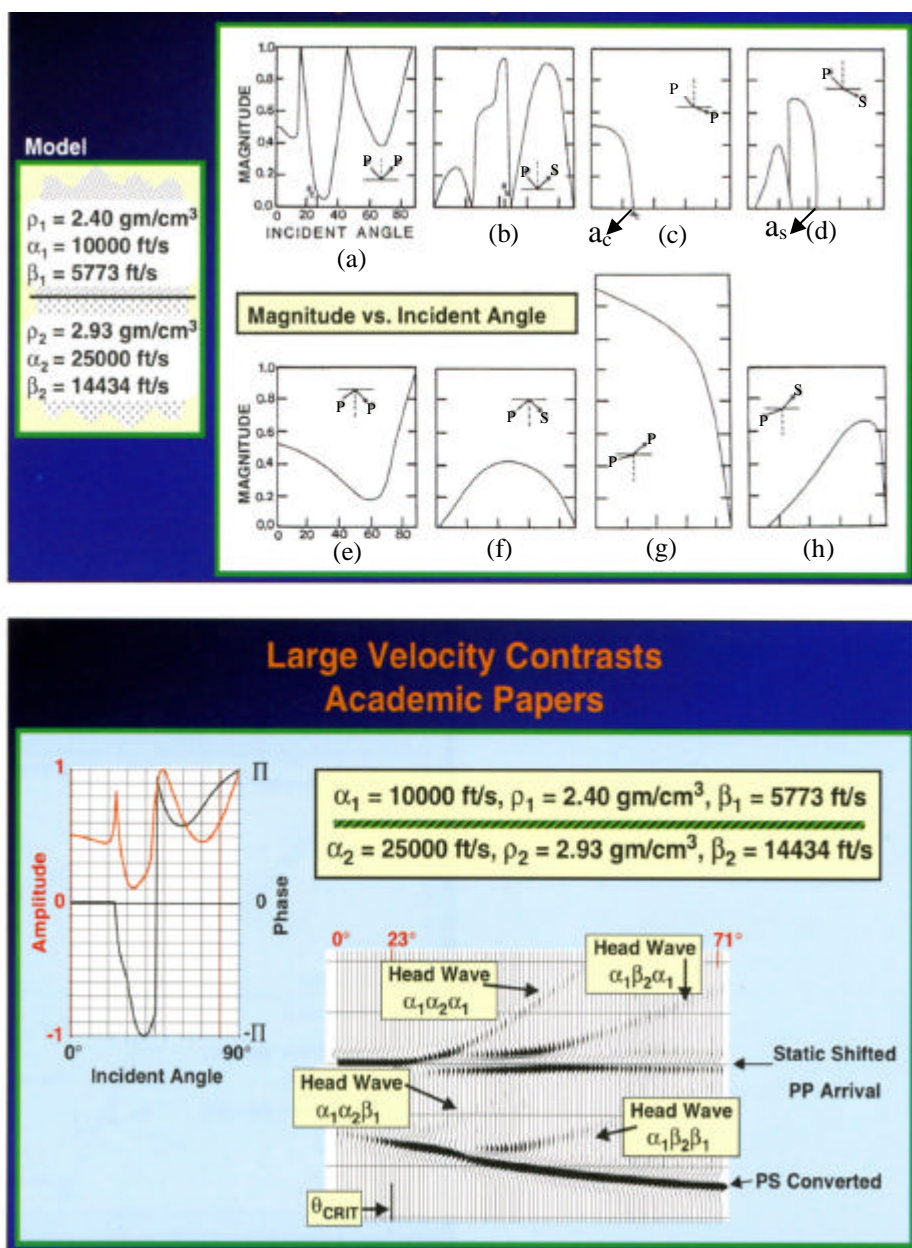


圖 11 上、下地層速度差異極大之界面, P 波轉換波之振幅與入射角關係曲線。(from Hilterman, 2001)

當上、下地層速度差異很小時(下層 P 波速度比上層 P 波速度增加 30%)，當入射角小的時候，PP 反射波曲線雖然較平緩，但入射角為 0° 的振幅強度幾乎為入射角為 30° 的振幅強度的二倍；穿透波的振幅在達到臨界角前，幾乎為定值；當入射角小的時候，下行波反射的 PP 反射波，其振幅-入射角曲線(圖 12e)和上行波反射的 PP 反射波之振幅-入射角曲線(圖 12a)相似，但兩者的極性(polarity)相反。

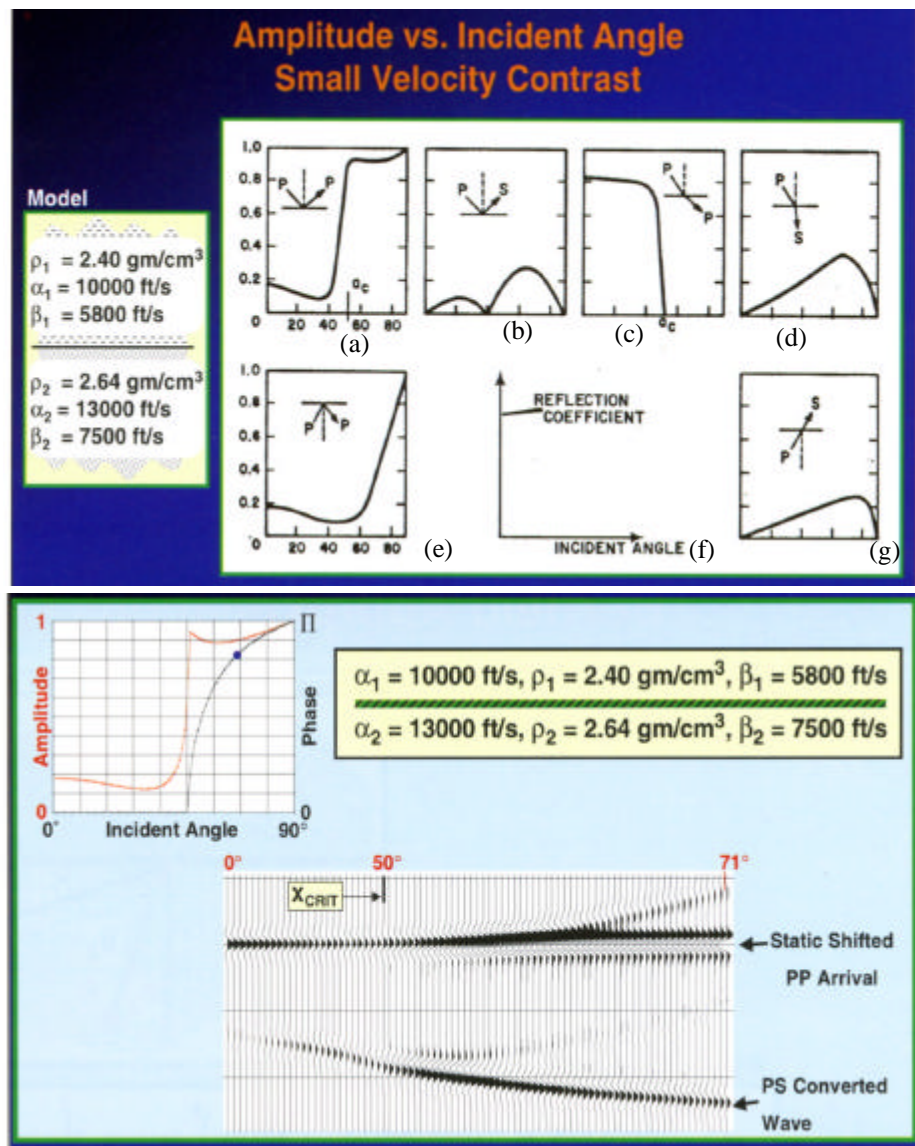


圖 12 上、下地層速度差異很小之界面，P 波轉換波之振幅與入射角關係曲線。(from Hilterman, 2001)

(四)、Zoepprtiz Equation 的線性估算

基於 Zoepprtiz Equation 太過複雜，難以應用於實際震測資料，先後有 Bortfeld(1961)、Aki & Richard(1980)、Shuey (1985)等人將 Zoepprtiz Equation 簡化(圖 13)。Bortfeld 強調的是反射係數與孔隙內流體及岩體剛性等物性間的關係；Aki & Richard 強調的是反射係數與與反射界面上、下地層間密度、P 波速度及 S 波速度的差異強度；Shuey 強調的是反射係數與入射角間的關係。NI_p 即 P-G 交叉圖之截距(Intercept)，A₀NI_p+?s / (1-s)² 即 P-G 交叉圖之梯度(Gradient)。Verm and Hilerman(1995)則強

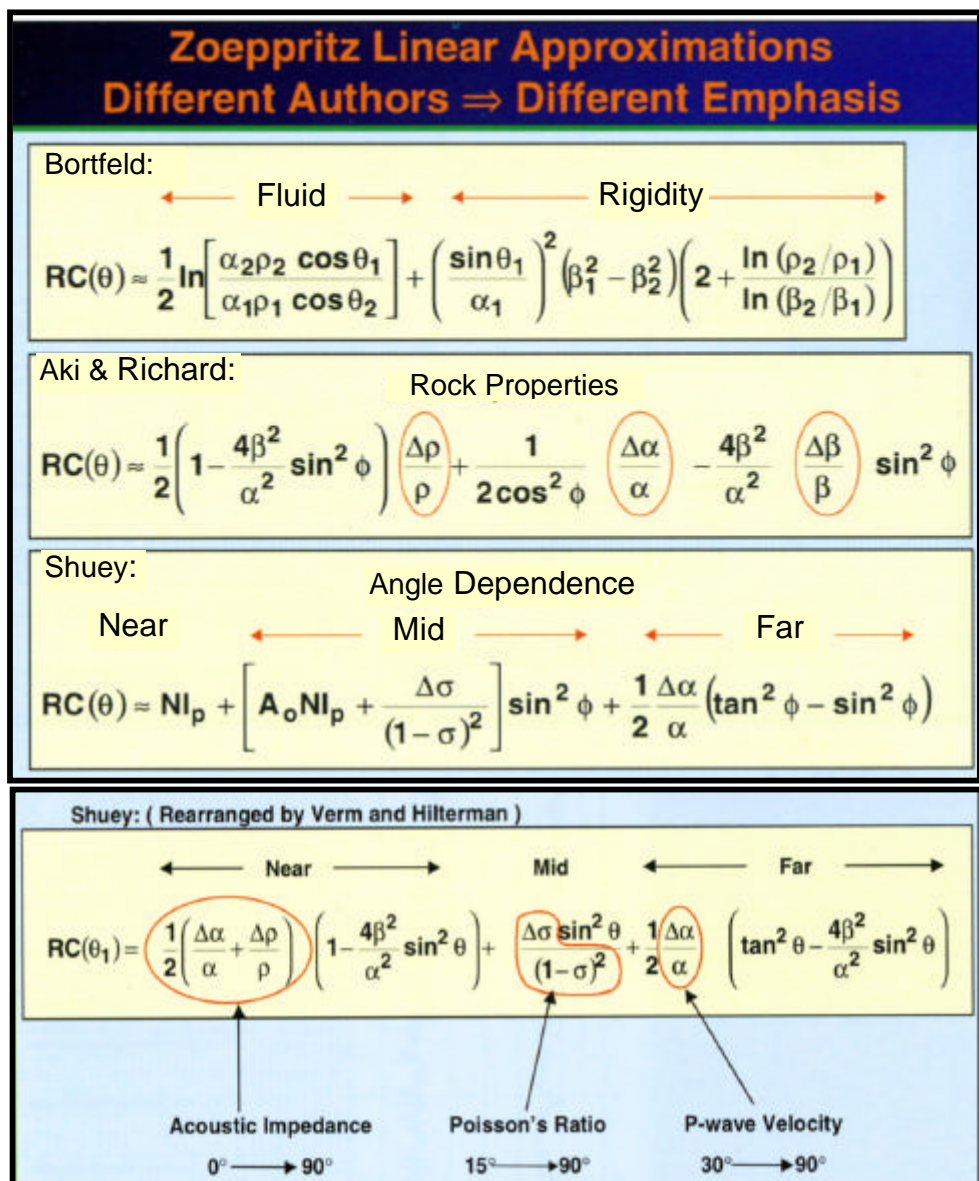


圖 13 Bortfeld(1961)、Aki & Richard(1980)、Shuey(1985)及 Verm and Hilerman(1995)等人之 Zoepprtiz Equation 估算式。

調聲波阻抗、波松比值及 P 波速度能影響振幅響應之入射角範圍，入射角 0~90°內震測描線之振幅均受聲波阻抗的影響，入射角 15~90°內震測描線之振幅均受波松比值的影響，入射角 30~90°內震測描線之振幅均受 P 波速度的影響。換句話說，0~15°內震測描線之振幅只受聲波阻抗的影響，波松比值對中支距範圍內震測描線之振幅影響較大。

Bortfeld 的關係式提出反射係數與入射角的關係，也同時表現反射係數與孔隙流體與岩體剛性間之關係(1961)，Wang(1999) 將其關係式加以改進，以上下地層間之 P 波速度、S 波速度及剛性係數(Rigidity, μ)的差異來表現 Fluid Term 及 Rigidity Term:

$$RC(\theta) = \underbrace{\left(\frac{1}{\cos^2 \theta} * \frac{\Delta a}{2a} + \frac{\Delta r}{2r} \right)}_{\text{Fluid Term}} - \underbrace{\left(\frac{2\Delta m}{ra^2} \sin^2 \theta \right)}_{\text{Rigidity Term}}$$

$RC(\theta)$: 某一入射角 θ 之反射係數

a : P 波速度

r : 密度

μ : 上下地層剛性係數(rigidity)的差異

公式中第一項和地層孔隙中流體性質相關性較大，第二項則與地層岩性、剛性係數相關性較大。以下藉由三種不同埋深的地質模型，來說明 Bortfeld 關係式的物理意義及所代表的三種 AVO 類型。每種埋深均有兩個地質模型，一為頁岩和含水砂組成之界面，另一為頁岩和含氣砂組成之界面。相關地質模型的參數如下表所示：

表 4 說明 Bortfeld 關係式的物理意義及所代表的三種 AVO 類型所用的地質模型其物性參數。

4000ft Depth

Model 1	a (ft/s)	?	s (波松比)	β (ft/s)
Shale	7190	2.16	0.419	2684
(1a)Wet Sand	7000	2.11	0.403	2820
(1b)Gas Sand	5061	1.88	0.241	2956

9000ft Depth

Model 2	a (ft/s)	?	s (波松比)	β (ft/s)
Shale	8670	2.29	0.378	3828
(2a)Wet Sand	10000	2.23	0.311	5233
(2b)Gas Sand	9125	2.08	0.221	5462

14000ft Depth

Model 3	a (ft/s)	?	s (波松比)	β (ft/s)
Shale	10150	2.40	0.343	4970
(3a)Wet Sand	13500	2.32	0.224	8048
(3b)Gas Sand	13288	2.21	0.182	8288

油氣聚集在淺地層時（小於一千公尺），油氣層周邊上下地層之孔隙均相對較大，油氣層及周邊背景地層均可視為較軟的物質，油氣層和上下地層剛性係數的差異很小，Bortfeld 關係式中第二項值接近零，此時油氣層和上下地層間之接觸關係可視為 Fluid 對 Fluid 的接觸關係（Hilterman, 2001），由 P 波速度及密度所計算之聲波阻抗之差異變化，是油氣主要指徵，在重合移位後震測剖面則以亮點為油氣主要指徵，屬第三類型振幅-支距油氣異常。圖 14b 左圖 (Model 1) 即為此種 Fluid 對 Fluid 接觸關係反射面的孔隙流體及岩體剛性曲線。無論含油氣或不含油氣的狀況，其對應之剛性曲線值 (Rigidity Term) 均接近零 (綠色點線)，含油氣或不含油氣最大的差異表現在孔隙流體這一項 (Fluid

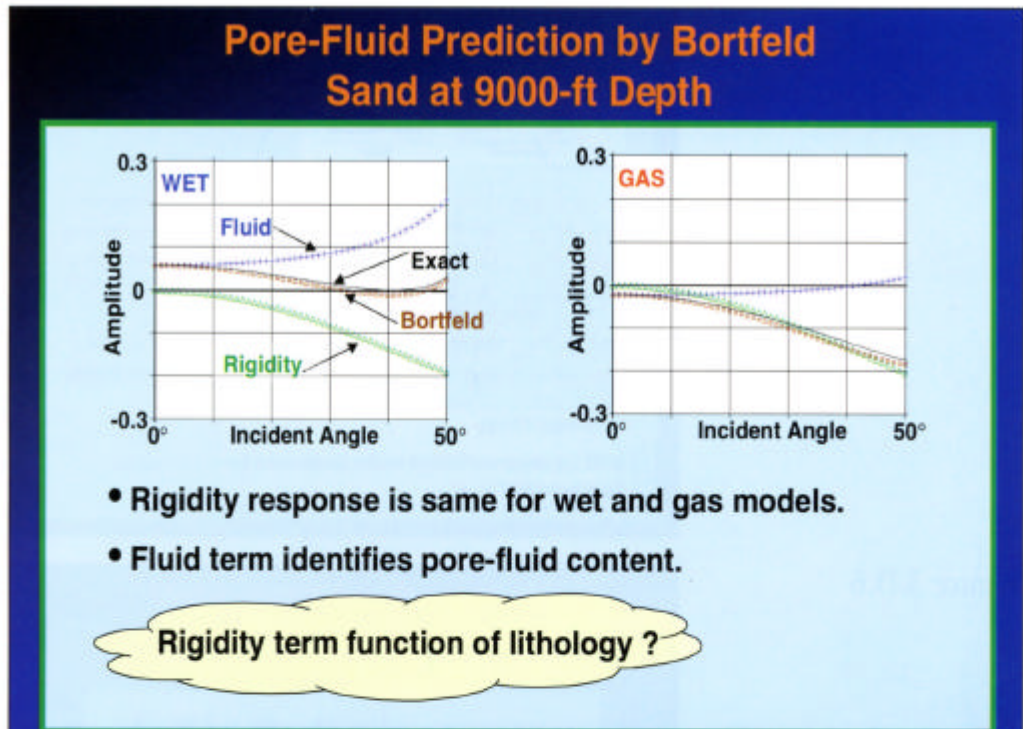


圖 14a 以 Bortfeld 關係式表現埋深約九千英尺地質模型(第二類型 AV0)對應之孔隙流體及岩体剛性曲線(from Hilterman, 2001)。

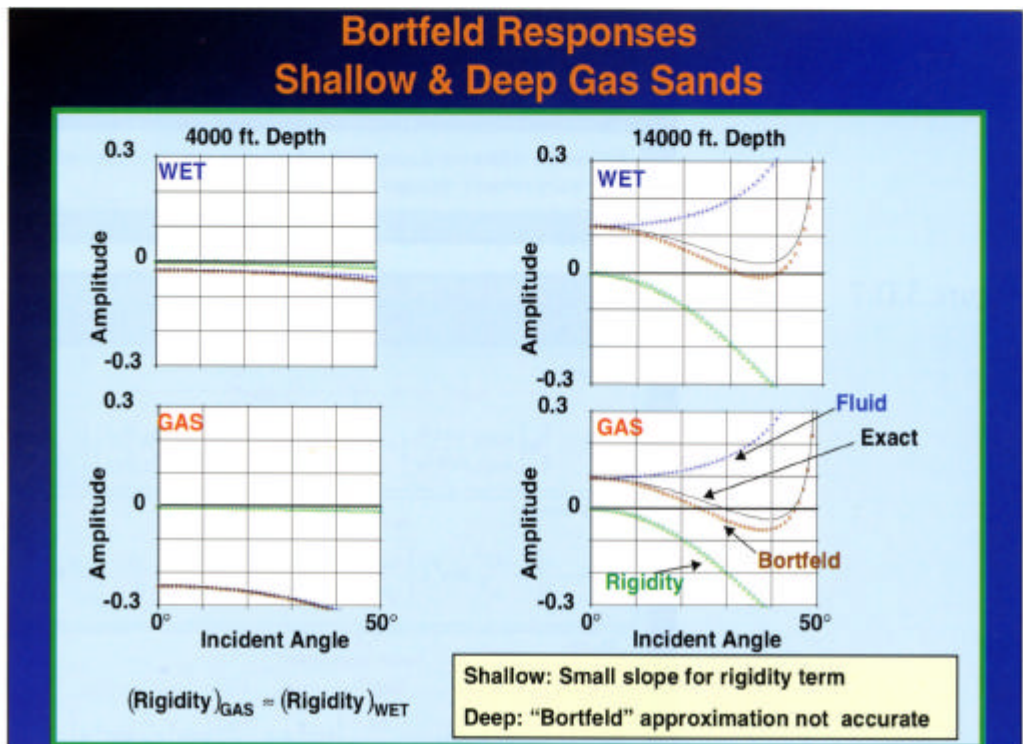


圖 14b 以 Bortfeld 關係式表現埋深淺於四千英尺及大於一萬四千英尺地質模型(第三及第一類型 AV0)對應之孔隙流體及岩体剛性曲線 (from Hilterman,2001)。

Term)(藍色點線),也因此 Rigidity Term 和 Fluid Term 相加後之反射係數隨支距變化曲線(紅色點線)幾乎和 Fluid Term 的曲線重合。含油氣或不含油氣在 Rigidity Term 和 Fluid Term 相加後之曲線上的表現,最大的差異在於此曲線上零支距之截距而非梯度。含油氣砂振幅-支距曲線的梯度雖較不含油氣砂振幅-支距曲線的梯度稍大,但在臨界角(約 30°)以內兩者的曲線梯度來看,不易區別,尤其在訊號/雜波比值低的狀況,若僅由振幅-支距分析所得之曲線梯度研判油氣潛能,是很容易造成誤判的。換句話說,如果已知探勘目標層不可能有煤層、石灰岩或火成岩等和強反射相關的岩性時,亮點(負的強反射振幅)油氣指徵已足以評估第三類型 AVO 異常的油氣潛能。臺灣地區過去的油氣探勘不乏鑽遇第三類型 AVO 異常的油氣,但油氣評估過程中往往過度強調振幅-支距曲線梯度異常的重要性,反而忽略了評估第三類型 AVO 油氣潛能更重要的指徵“振幅-支距曲線截距”。油氣評估區域內,所有的震測資料作同一保留真振幅的處理,探勘目標層反射振幅和背景地層平均反射振幅的差異強度,為評估此類型油氣的重要作業。

對 9000 英尺埋深的地層界面而言(Model 2),Bortfeld 的估算(9000 英尺埋深的中紅色點線)非常接近 Zoeppritz 解(圖 14a 中黑色細線),有油氣和沒有油氣的 Rigidity 曲線完全相同,差別僅在 Fluid 曲線的表現,含水砂 Fluid 曲線之梯度較含氣砂大許多,含水砂 Fluid 曲線之截距為正值,含氣砂卻為接近零之負值。換言之聲波阻抗(P Impedance)是區分孔隙內流體之主要因子。Rigidity Term 主要控制因子為 S 波速度,或可說 S 波阻抗(S Impedance)是區分岩性的控制因子。9000 英尺埋深模型 2 的 AVO 振幅響應(圖 14a)之 Rigidity 曲線如同上述模型 1 之 Rigidity 曲線(圖 14b)均起始於零振幅點,但其曲線梯度增加;相較於模型 1b 之油氣砂 Fluid 曲線的截距絕對值,模型 2b 油氣砂 Fluid 曲線的截距絕對值小許多。9000 英尺埋深模型 2b 的案例,代表第二類

型 AVO 油氣異常。

對 14000 英尺埋深的地層界面而言，Bortfeld 的估算和 Zoeppritz 解差別較大(Model 3, 圖 14b 右圖)，有油氣和沒有油氣的 Rigidity Term 亦完全相同，Fluid Term 的差別則減小許多。14000 英尺埋深模型 3b 的案例，代表第三類型 AVO 油氣異常。由以上三個不同埋深的案例所得的結論如下：含水砂和含氣砂零支距的振幅響應差別，隨深度增加而減小；Rigidity 曲線不受孔隙內流體種類的影響，但其曲線斜率隨埋深增加而增加。

四、油氣徵兆和 AVO 異常

(一)、直接探勘油氣指徵

1970 年代亮點振幅解釋被大量的應用於油氣探勘，1973 年 Geophysical Society of Houston 籌辦了“Lithology and direct detection of hydrocarbon using geophysical methods”座談會，許多如平點、亮點、暗點等直接探勘油氣指徵的案例研究於會中討論，Sengbush 出版之書中(1983)重新印製了會中 Barry and Shugart(1973)發表之直接探勘油氣指徵震測剖面(圖 15)。

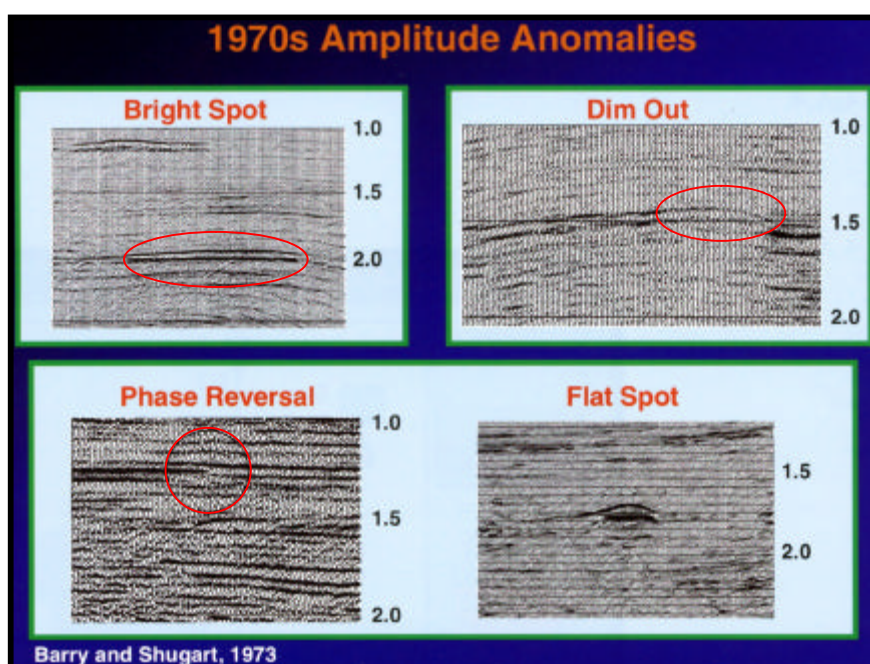


圖 15 亮點 暗點 相位反轉 及平點等直接探勘油氣指徵(Barry and Shugart, 1973)。

(二)、AVO 油氣異常類型

以上這些直接探勘油氣指徵均是指在重合移位後震測剖面所觀測到的現象，進入第二代振幅解釋時代以後，振幅-支距的分析解釋雖是在同深點集合進行，AVO 油氣異常也進一步分為四類，但不同類型的 AVO 油氣異常，在重合移位後震測剖面上仍是和這些直接探勘油氣指徵相關的。圖 16 說明亮點、暗點、及相位反轉等直接探勘油氣指徵和振幅-支距分析中截距的關係。暗點直接探勘指徵一般發生在埋深較深、較硬的岩層中，此種岩層在不含油氣的狀況下，為一強的正反射係數(NI)，當聚集油氣時，聲波阻抗略微下降，和其上地層之聲波阻抗差異強度稍減，正反射的振幅相較橫向未聚集油氣的地層界面弱。第一類型的 AVO 油氣異常，常具此種重合移位震測剖面上的油氣指徵。相位或極性倒轉的油氣指徵，一般發生在中等埋深，上覆頁岩聲波阻抗較其下不含油氣砂岩的聲波阻抗低，此種界面之反射係數在離開儲油構造的地方呈較小的正值，在油氣聚集的地方呈很小的負值，第二類型的 AVO 油氣異常，常具此種重合移位震測剖面上的油氣指徵。亮點油氣指徵一般發生在埋深較淺的狀況下，上覆於油氣砂的頁岩聲波阻抗較其下不含油氣砂岩的聲波阻抗高，此種界面之反射係數在離開儲油構造的地方呈較小的負值，在油氣聚集的地方呈很大的

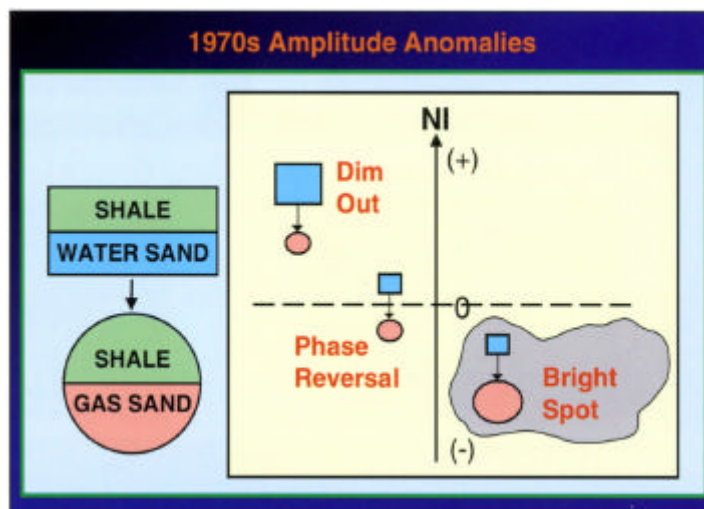


圖 16 亮點、暗點、及相位反轉等直接探勘油氣指徵和振幅-支距分析中截距(垂直入射波之反射係數)的關係。

負值，第三類型的 AV0 油氣異常，常具此種重合移位震測剖面上的油氣指徵。

在有限的深度範圍內，含水碎屑岩振幅支距分析之截距 (Intercept) 對梯度 (Gradient) 交叉圖常呈一近似線性關係的點群 (cluster)，稱之背景趨勢 (background trend)，此背景趨勢決定於背景碎屑岩之 V_P / V_S ，遠離此背景趨勢的資料點，顯示氣 (gas) 的存在。在此交叉圖上，含油氣砂岩資料點分佈的區域，可分為四類型 (圖 17)。曲線 a 至曲線 b 間為第一類型 AV0，對應之垂直入射反射係數大多為正值，曲線斜率較其他類型大，反射係數則隨入射角增加而減小，P-G 交叉圖上落於第四象限；曲線 b 至曲線 c 間為第二類型 AV0，同深點聚合上常可見目標層的漣波由零支距的很小振幅波峰轉為遠支距的較大振幅波谷，AV0 曲線斜率較第一類型小但較第三類型大，反射係數隨入射角增加而減小 (反射係數絕對值則常隨入射角增加而增加)，P-G 交叉圖上落於第三和第四象限間；曲線 c 至曲線 d 間為第三類型 AV0，AV0 曲線斜率最小，反射面的反射係數大多為負值，垂直入射反射係數之絕對值最大，反射係數隨入射角增加而減小 (反射係數絕對值則常隨入射角增加而增加)，P-G 交叉圖上落於第三象限，點群的分佈離背景趨勢最遠；d 至曲線 e 間為第四類型 AV0，反射係數隨入射角增加而增加，P-G 交叉圖上落於第二象限，Tight Gas Sand (Castagna et al., 1998) 為此類型 AV0 異常。

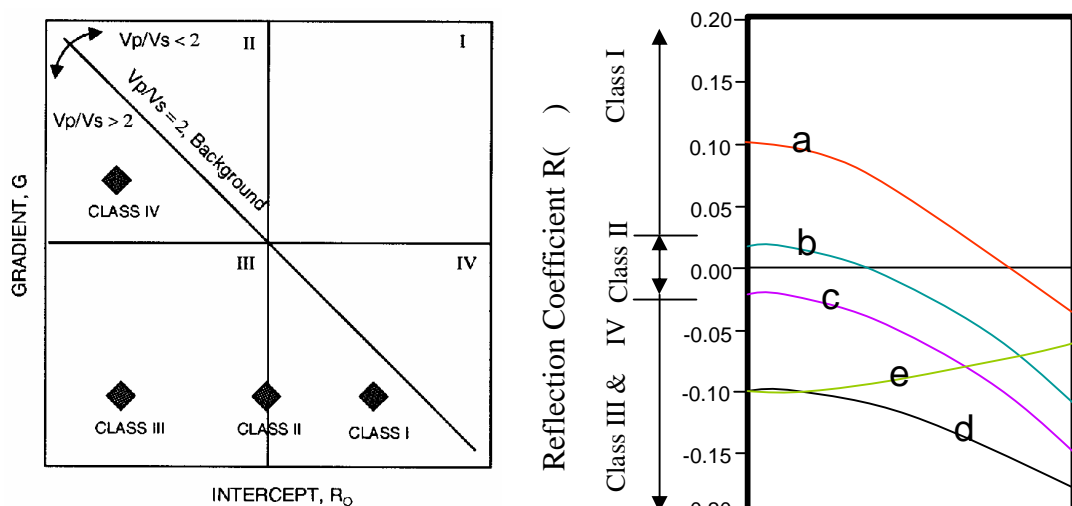


圖 17 四種類型 AV0 異常。

P-G 交叉圖之分析，不同軟體其水平軸和垂直軸的展示方式常不同，Promax 軟體分析結果，水平軸為梯度 G 值，象限定義為順時鐘方向；圖 17 中 P-G 交叉圖之水平軸為截距，象限定義為逆時鐘方向。利用 P-G 交叉圖研判油氣潛能及其異常類型時，需注意象限的定義，避免誤判(傅式齊等，2004)。研判第三類型 AVO 油氣異常時，截距是主要的指徵，研判第二類型 AVO 油氣異常時，梯度 G 值卻相形更重要，分析近、中、遠三種支距的部分重合剖面是否有隨支距增加而振幅明顯增加的現象，常是研判第二類型 AVO 油氣異常最快捷的方法(圖 18)。

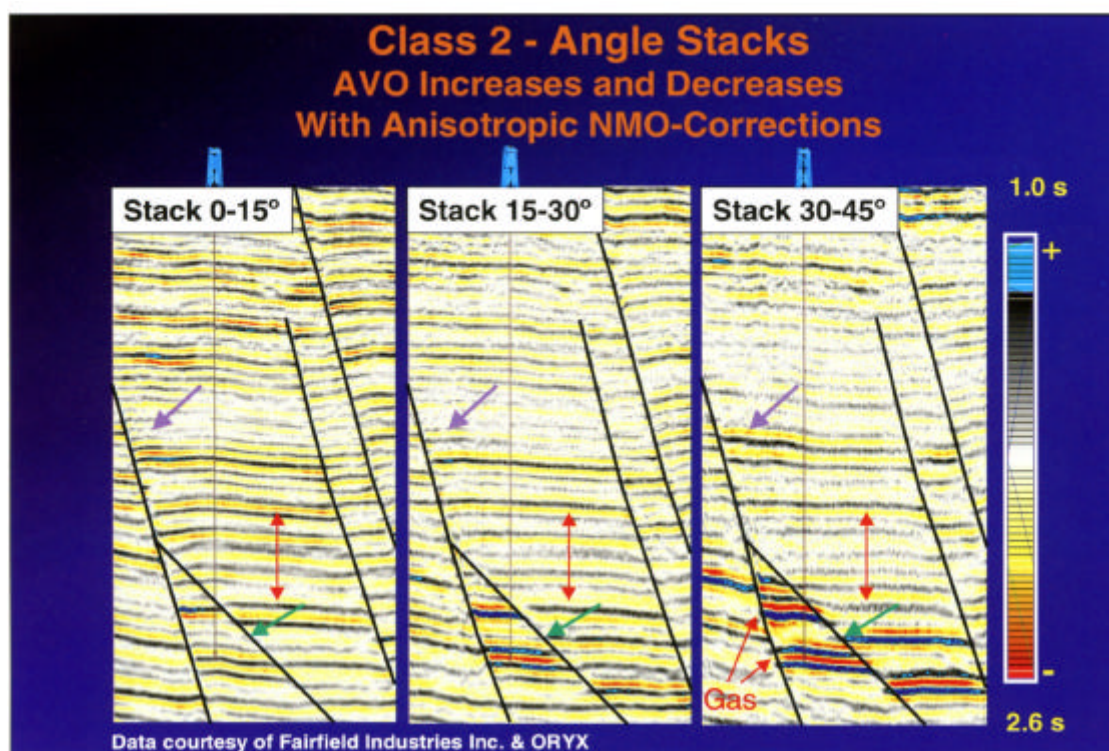


圖 18 以近、中、遠三種支距的部分重合剖面，研判第二類型 AVO 油氣異常 (from Hiltermab, 2001)。

五、AVO 斜率及截距之特性

(一)、由反射係數區別孔隙內流體

1. 截距及斜率對區別孔隙內流體的貢獻

圖 19(a) 中三個 Zoeppritz 線性估算式 (Shuey, 1985; Smith and Gidlow, 1987; Wiggins et al., 1983) 常被用來做 AVO 模擬，這些估算式雖相似，卻各自強調不同之 AVO 特性和入射角的關係。若將 19(a) 估算式中各項式的岩石物性相關係數以 NI_P 、 B 及 $H.O.$ (Higher Order) 表示，估算式即可以 19(b) 之形式表達，在 19(b) 中三估算式，Shuey 的估算式不同於其他兩個估算式，已假設 $a/B = 2$ 。以 19(b) 傳統的估算式 (Wiggins et al., 1983) 來看，可是為一線性方程式 $y = b + mx$ ， NI_P 為此線性方程式之截距 (b)， B 則為斜率或梯度 (m)，在 AVO 相關的研究文獻中，常以 "A" 代表 NI_P 。如果三估算式的 a/B 均假設為 2，且將 $H.O.$ (Higher Order) 項式去掉，即可簡化為 19(c) 之估算式。此時隨支距變化的振幅 (AVO) 和岩石物性相關的係數可分為兩項，一為垂直入射 P 波反射係數 (NI_P)，另一為 S 波反射係數 (NI_S)。在 Shuey 的算式中 $2(NI_P - NI_S)$ 以 PR 代表，稱之 Slope Reflectivity。由 19(a) 簡化為 19(b) 之估算式時， $NI_P = 1/2(\quad / \quad + \quad / \quad)$ ，則含氣砂和含水砂之 NI_P (截距) 的差異可表示如圖 19(d) 所示：

$$\begin{aligned} NI_{Gas} - NI_{Wet} &= ? a_{GW} + ? ?_{GW} , \\ ? a_{GW} &= 1/2[(? a/a)_{Gas} - (? a/a)_{Wet}] , \\ ? ?_{GW} &= 1/2[(? ?/?)_{Gas} - (? ?/?)_{Wet}] \end{aligned}$$

前節已討論以 Fluid 及 Rigidity 兩項反射係數來簡化 Zoeppritz equation 的 Bortfeld equation，孔隙內流體的區別只和 Fluid 反射係數項有關，P 波速度及密度差異是影響 Fluid 反射係數的主要物性參數，而密度差異對區別孔隙內流體的貢獻，相對於 P 波速度要小。同樣的來看 $NI_{Gas} - NI_{Wet}$ ， $NI_{Gas} - NI_{Wet}$ 亦是首要區別孔

(a)

Zoeppritz Linear Approximations Angle Dependence

Shuey: (Rearranged)

$$RC(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \left(1 - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right) + \frac{\Delta\sigma \sin^2\theta}{(1-\sigma)^2} + \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \left(\tan^2\theta - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right)$$

Smith et al.

$$RC(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \frac{1}{\cos^2\theta} - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \sin^2\theta - \frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho} \left(\tan^2\theta - \frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right)$$

Conventional:

$$RC(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) + \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 2 \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{2\Delta\beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \right] \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} (\sin^2\theta \tan^2\theta)$$

(b)

$$RC(\theta) \approx NI_P \cos^2\theta + B_1 \sin^2\theta + \text{H.O. (P-wave) [Shuey]}$$

$$RC(\theta) \approx NI_P + B_2 \sin^2\theta + \text{H.O. (P-wave) [Conventional]}$$

$$RC(\theta) \approx NI_P / \cos^2\theta + B_3 \sin^2\theta + \text{H.O. (density) [Smith]}$$

- NI_P = Normal-incident reflection coefficient (P-wave)
- B_s \Rightarrow f(P-wave, S-wave and density)
- H.O. \Rightarrow Higher-order terms

* Assumption background $\alpha/\beta = 2$ already made

(c)

$$RC(\theta) \approx NI_P \cos^2\theta + 2(NI_P - NI_S) \sin^2\theta \text{ [Shuey]}$$

$$RC(\theta) \approx NI_P + (NI_P - 2NI_S) \sin^2\theta \text{ [Conventional]}$$

$$RC(\theta) \approx NI_P / \cos^2\theta - 2NI_S \sin^2\theta \text{ [Smith]}$$

=2
Drop

$$NI_P = \frac{(\rho\alpha)_2 - (\rho\alpha)_1}{(\rho\alpha)_2 + (\rho\alpha)_1}$$

$$NI_S = \frac{(\rho\beta)_2 - (\rho\beta)_1}{(\rho\beta)_2 + (\rho\beta)_1}$$

(d)

Pore-Fluid Discrimination of Reflectivities

$$\Delta\alpha_{GW} = 1/2 [(\Delta\alpha/\alpha)_{GAS} - (\Delta\alpha/\alpha)_{WET}] < 0$$

$$\Delta\rho_{GW} = 1/2 [(\Delta\rho/\rho)_{GAS} - (\Delta\rho/\rho)_{WET}] < 0$$

Ranking

$$1 \quad \text{Normal Incident} \quad [NI_{GAS} - NI_{WET}] = [\Delta\alpha_{GW} + \Delta\rho_{GW}]$$

$$2 \quad \text{Shuey} \quad [B_{1,GAS} - B_{1,WET}] = [2\Delta\alpha_{GW}]$$

$$3 \quad \text{Conventional} \quad [B_{2,GAS} - B_{2,WET}] = [\Delta\alpha_{GW} - \Delta\rho_{GW}]$$

$$4 \quad \text{Smith ...} \quad [B_{3,GAS} - B_{3,WET}] = [-2\Delta\rho_{GW}]$$

圖 19 由反射係數區別孔隙內流體的相關公式導引 (from Hilterman, 2001)。

隙內流體的資訊。至於三種公式斜率或梯度對區別孔隙內流體的貢獻($B_{i, Gas}$ $B_{i, Wet}$)及貢獻度的排序，則可由圖 19(d)說明。Shuey 公式含氣砂和含水砂之的斜率差異只含速度差異而不包括密度差異($B_{1, Gas}$ $B_{1, Wet}=2\alpha_{GW}$)，相較於以 NI_P 來表現含氣砂和含水砂的差異($\alpha_{GW} + \rho_{GW}$)，區別孔隙內流體的程度自然較差。傳統公式 (Wiggins et al., 1983) 之斜率來表現含氣砂和含水砂的差異 ($B_{2, Gas}$ $B_{2, Wet}=\alpha_{GW} - \rho_{GW}$)，其區別孔隙內流體的程度排序第三，Smith 公式之斜率只含密度差異，區別孔隙內流體的程度最差。總體而言，振幅-支距分析的斜率並不會提供比截距(NI_P)更多的孔隙內流體相關資訊。

2. Smith & Gidlow 的 Fluid Factor

Smith 及 Gidlow 建議同時利用振幅-支距分析的截距與斜率來達到區分孔隙內流體的最大功效，首先利用其估算式產生 NI_P 剖面及 NI_S 剖面，其次取一不含油氣的視窗，估算 NI_P/NI_S 值()，為一隨時間及空間分布逐漸變化之函數，震測描線上每個取樣點之 Fluid Factor 定義如下：

$$F(t) = NI_P(t) / NI_S(t)$$

當地層不含油氣時， $F(t)$ 的值接近零，當地層含油氣時， $F(t)$ 的值大約等於 $NI_{Gas} - NI_{Weto}$ 。這種區分孔隙內流體或是評估油氣潛能最大的好處是，和油氣不相關的背景資料點因其值均接近零，因而更能突顯具油氣潛能的區域。Smith 及 Gidlow 的方法中，假設含氣砂和含水砂之 NI_S 是相同的，對第三類型 AVO 油氣異常而言，這個假設是較有問題的，所幸第三類型 AVO 油氣異常的評估，並不特別需要此種區分孔隙內流體的分析工作。Smith 及 Sutherland(1996)的研究中指出，當 $F(t)$ 值為 0.63 時，以 Fluid Factor 評估油氣潛能的效果最好。在他們研究個案中，第三類型 AVO 油氣異常的 $F(t)$ 值為 -1.92，第二類型 AVO 油氣異常的 $F(t)$ 值為

0.41，第一類型 AVO 油氣異常的 λ 值為 0.57。

3. Lambda-Rho(λ) 孔隙內流體區別因子

Lambda-Rho(λ) 可作為孔隙內流體區別因子的論點源自 Goodway(1997) 等人在加拿大地區 hard-rock(一般為第一類型 AVO 異常出現的環境) 測勘區域的相關研究工作，他們將 λ 定義為 $(\frac{V_p}{V_s})^2 - 2(\frac{V_p}{V_s})^2$ 。由圖 4(a) 的 Gassman equation 來看，區別孔隙內流體只與 Fluid Term 有關而和 Dry Rock Term 無關，將 Gassman equation 之等事兩邊均乘以 $\frac{1}{V_s^2}$ ：

$$(\frac{V_p}{V_s})^2 = (K_{dry} + 4/3 \mu_{dry} + K_{pore-fluid\ effect}) / V_s^2$$

再經由 S 波之速度定義：

$$b = \sqrt{\frac{m}{r}}$$

$$\text{得到 } (\frac{V_p}{V_s})^2 = (\mu_{dry} / V_s^2)$$

定義 $FD = K_{pore-fluid\ effect} / V_s^2$ 及 $G = K_{dry} / \mu_{dry} + 4/3$ 後， $(\frac{V_p}{V_s})^2 = G(\frac{V_p}{V_s})^2 - FD$ 等於 $K_{pore-fluid\ effect} / V_s^2$ ，亦即 $FD = (\frac{V_p}{V_s})^2 - G(\frac{V_p}{V_s})^2$ 。Goodway(1997) 等人將 λ 定義為 $(\frac{V_p}{V_s})^2 - 2(\frac{V_p}{V_s})^2$ ，實際上已類似 Gassman equation 中 $K_{pore-fluid\ effect}$ 的定義。Dry Rock 的 K_{dry} 等於 μ_{dry} (或可說 Dry Rock 的波松比 ν_{dry} 接近 0.125)，此時 G 等於 2.33；Goodway(1997) 等人將 λ 定義為 $(\frac{V_p}{V_s})^2 - 2(\frac{V_p}{V_s})^2$ 時， $K_{dry} / \mu_{dry} = 2/3$ ， ν_{dry} 為零。

在實際以震測資料分析此 Lambda-Rho 孔隙流體區別因子時，需先進行所謂的 AVO 逆推或部分重合同步逆推(Simultaneous Partial Stack Inversion) (如探研所引進 Fugro-Jason 之 Rock Trace 模組)，以獲得 P 阻抗(P-Impedance) 及 S 阻抗(S-Impedance) 資料體，取樣點之 λ 即 $(\frac{V_p}{V_s})^2 - 2(\frac{V_p}{V_s})^2 = (P-Impedance)^2 - 2(S-Impedance)^2$ 。

4. A/B 振幅分析

A/B 振幅分析中(圖 20)之 A 為探勘目標層在重合移位震測資料上之振幅，B 為探勘目標層附近(不包括探勘目標層或是遠離構造、分布在下傾方向之目標層)取一時窗內(圖 20 之綠色方框)之重合移位震測資料之 RMS 均方根振幅值($(\sum a_i^2)^{1/2}$)，此 A/B 振幅比值可作為油氣評估之指徵。

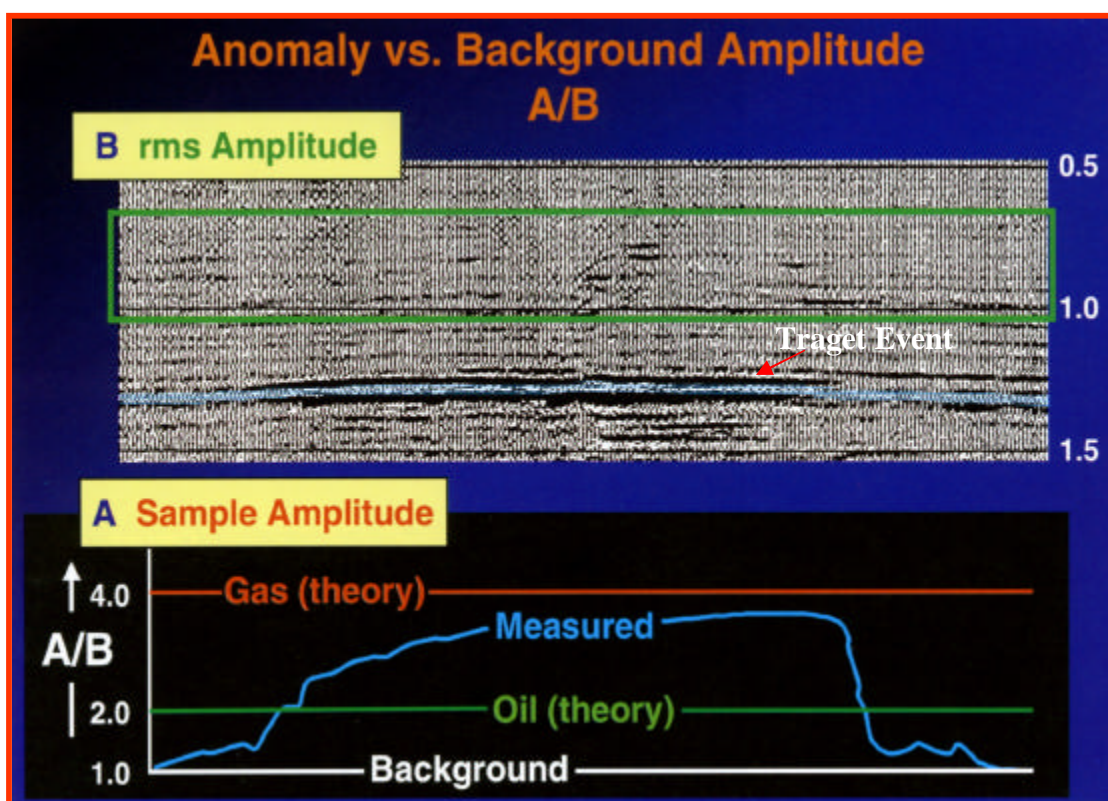


圖 20 A/B 振幅分析個案 (from Hilterman, 2001)。

A/B 振幅分析之傳統分析是應用在重合移位震測資料上，但也可應用在振幅-支距分析所得之截距(NI)及斜率(如 Shuey 估算式定義之 slope reflectivity 或稱波松反射係數、PR)資料體。以表四之六個模型為例，圖 21(a)為此六個模型反射界面所計算之零支距反射係數(NI)，以含水界面的三個 NI 值($B_{1,Wet}$ 、 $B_{2,Wet}$ 、 $B_{3,Wet}$)計算背景地層之 B 值，有油氣的三個模型所計算之 NI 值($A_{1,Gas}$ 、

$A_{2,Gas}$ 、 $A_{3,Gas}$)各為第一、第二、及第三類型 AVO 異常的 NI 值，如此計算之第三類型 AVO 異常的 A/B 值為 10，第二類型 AVO 異常的 A/B 值為 0.6，第一類型 AVO 異常的 A/B 值為 0.7。由圖 21(a)可看出，以 NI 資料體來分析 A/B 時，第三類型 AVO 異常很容易分辨，但對其餘兩種類型 AVO 異常，A/B 均很小，在訊號/雜波比稍差的狀況，便不容易正確的辨別油氣的潛能。

圖 21(b)為以表四之六個模型為例，計算其反射界面所計算之 Slope Reflectivity(PR)，以含水界面的三個 PR 值($B_{1,Wet}$ 、 $B_{2,Wet}$ 、 $B_{3,Wet}$)計算背景地層之 B 值，有油氣的三個模型所計算之 PR 值

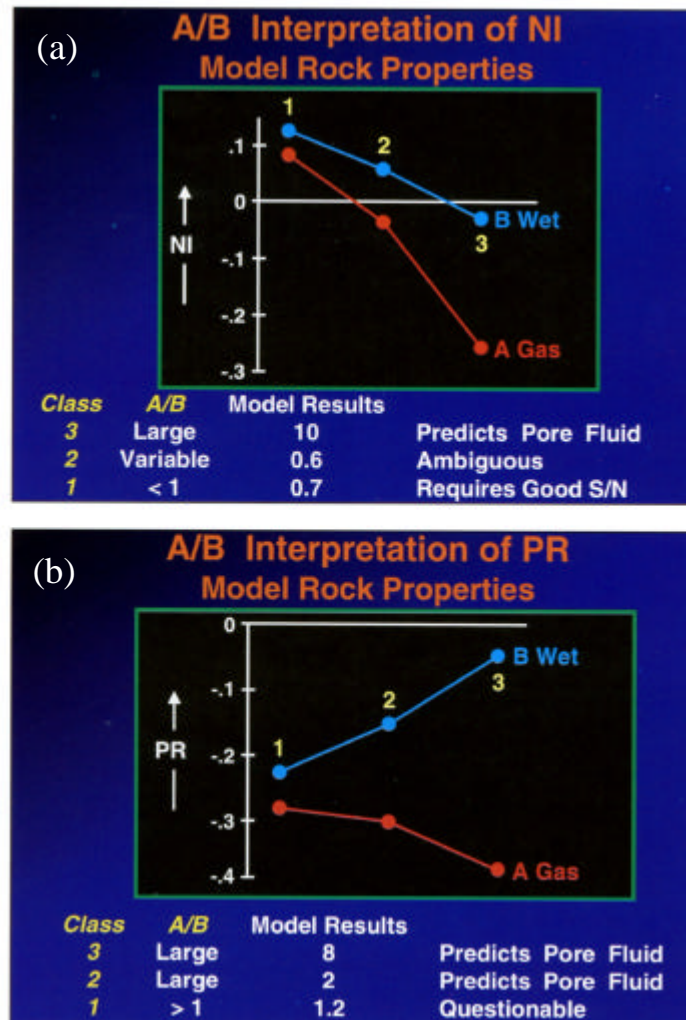


圖 21 以 NI 及 slope reflectivity 資料體進行 A/B 振幅分析之示意圖(from Hilterman, 2001)。

($A_{1, Gas}$ 、 $A_{2, Gas}$ 、 $A_{3, Gas}$)各為第一、第二、及第三類型 AVO 異常的 PR 值，如此計算之第三類型 AVO 異常的 A/B 值為 8，第二類型 AVO 異常的 A/B 值為 2，第一類型 AVO 異常的 A/B 值為 1.2。由圖 21(b) 可看出，以 PR 資料體來分析 A/B 時，不但第三類型 AVO 異常很容易分辨，第二類型 AVO 異常也較容易分辨，但第一類型 AVO 異常仍很難和背景地層區分。此時可利用前面討論的 Lambda-Rho 孔隙流體區別因子的分析來評估油氣潛能。

(二)、孔隙流體及岩性預測之交叉圖分析

井下各種岩石物理參數交叉圖用於孔隙流體及岩性預測的分析，同樣再以表四之六個模型之岩石物理參數來探討。如圖 22a 所示，S 波速度的資訊對分辨孔隙內流體幾無貢獻，無論那一種類型 AVO 異常，含水砂和含氣砂的 S 波速度幾乎一樣。圖 22a 左上交叉圖中密度似乎是區別孔隙內流體很好的因子，含水砂和含氣砂的密度差距似乎大於 P 波速度的差距，然而由含水砂變為含氣砂的密度改變僅為 7%，但由含水砂變為含氣砂的速度改變卻為 9%。速度和密度似乎均為區分岩性及孔隙流體很好的因子，但這兩個因子常相伴以阻抗的項次出現在 AVO 估算式中，很難彼此分離。也因此岩石物性的分析用阻抗、波松比、Lambda-Rho 及 μ 等資料進行交叉圖分析，也更具區分孔隙流體及岩性的能力(圖 22b)。

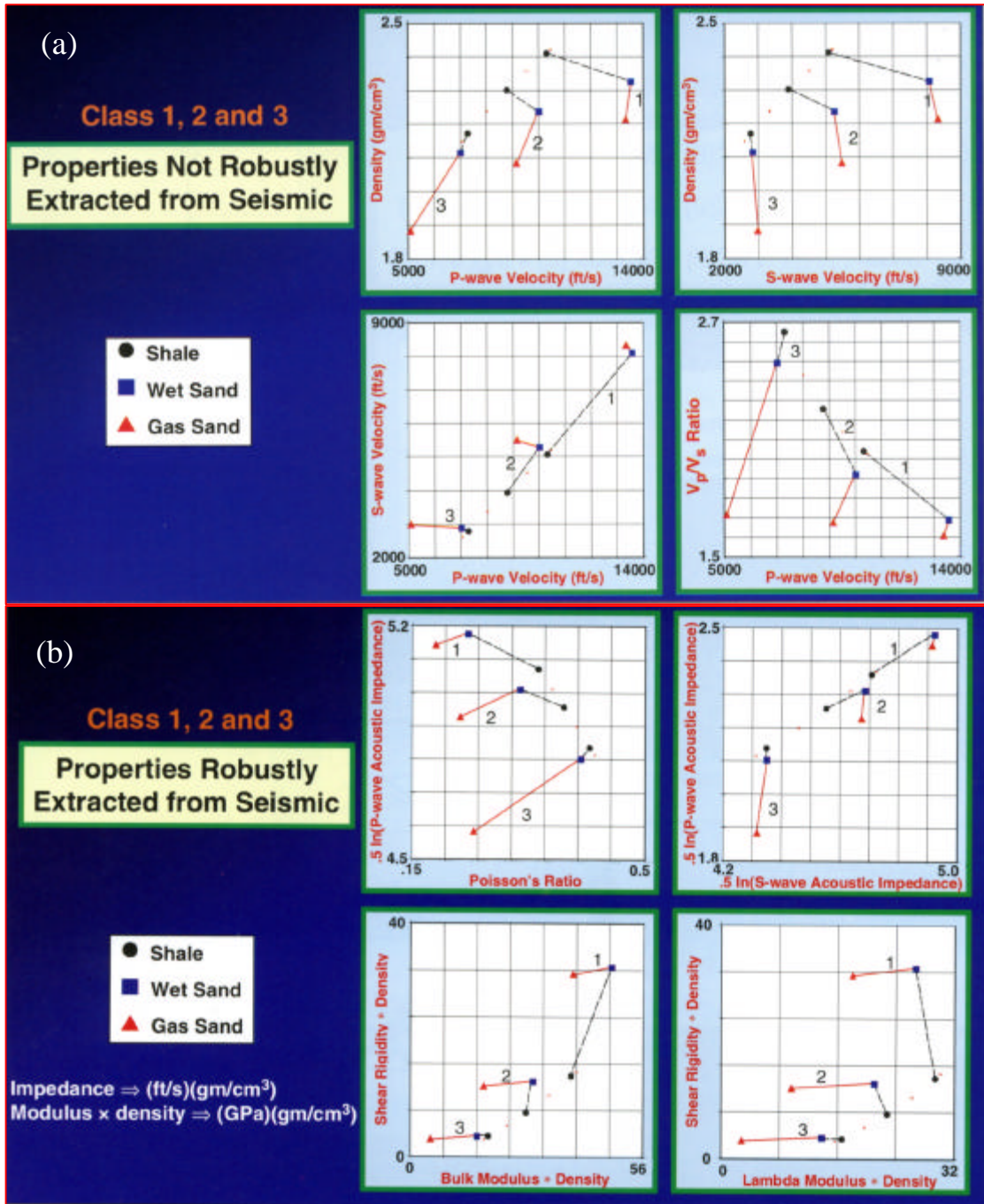


圖 22 井下各種岩石物理參數交叉圖用於孔隙流體及岩性預測的分析 (from Hilterman, 2001)。

前面討論 A/B 振幅分析時，以表四之六個模型為例，計算以 NI 及 slope reflectivity(PR)資料體進行 A/B 振幅分析之結果(圖 21),若以交叉圖來同時表現所計算之 NI 及 PR,即如圖 23 中 Shuey 估算式所分析之 P-G 交叉圖。圖 23 中只有背景頁岩/頁岩反射界面之 P-G 點群趨勢經過原點(綠點)，藍色小方塊為頁岩/含水砂界面之 P-G 點，紅色三角形為頁岩/含氣砂界面之 P-G 點。以 NI_p 來看，Conventional、Shuey 或 Smith & Gidlow 估算式所計算之第三類型 AVO 之 A/B 均很大(約為 10)，但其他兩類型計算之 A/B 均很小，不同公式之計算結果不大。但若以斜率來計算 A/B 並以之區別孔隙內流體，則 Shuey 估算式所計算之斜率 A/B 對第三及第二類型 AVO 異常的分辨均較其他兩種估算式的分辨力強。

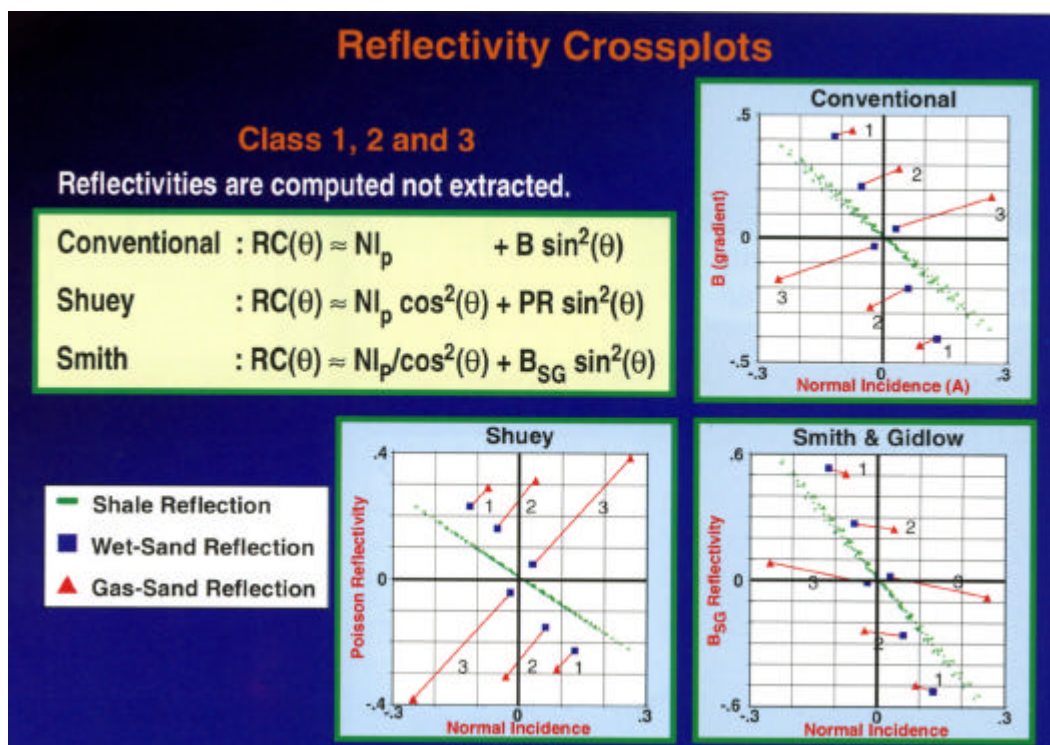


圖 23 以 Conventional、Shuey 及 Smith & Gidlow 三種估算式所分析之 P-G 交叉圖(from Hilterman, 2001)。

Castagna 等人(Castagna et al., 1998)也曾以模型及實際震測資料分析頁岩/含氣砂界面及頁岩/含水砂界面之 P-G 分布(圖 24)。根據他的結論,不論何種類型 AVO 異常,當由頁岩/含水砂界面轉為頁岩/含氣砂界面時, P 及 G 值均減小。

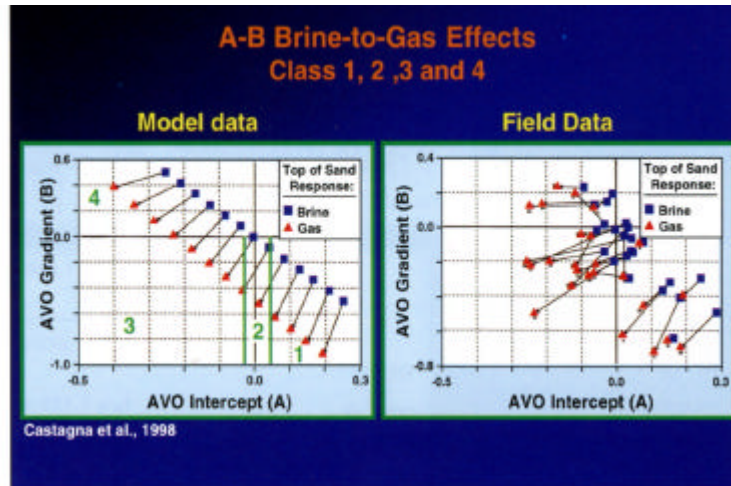


圖 24 模型及實際震測資料分析頁岩/含氣砂界面及頁岩/含水砂界面之 P-G 分布(Castagna et al., 1998)。

(三)、AVO 震測特性交叉圖分析

以前面討中所用之三種埋深、六個含水或含氣一維地質模形,含水或含氣厚度 15 公尺,迴旋運算漣波為 25 Hz Ricker 漣波,進行 AVO 模擬(圖 24)。AVO 特性分析結果列於圖右側, Grad 代表 CDP 聚合震測描線包跡(envelope)所分析之 AVO 斜率。當訊號/雜波比較差時,評估油氣潛能常用這種方式所分析之 Grad 取代 PR。比較圖中三種類型 AVO 異常含氣砂之 AVO 特性(NI、PR Stack、NIxPR、Grad),對第三類型 AVO 異常而言,NIxPR 剖面很容易區分含水層和含氣層,但對其他兩類型 AVO 異常而言,則不易區分含水層和含氣層。對於評估第三及第二類型 AVO 異常而言,Grad (envelope gradient) 似忽是一個有效的指徵。

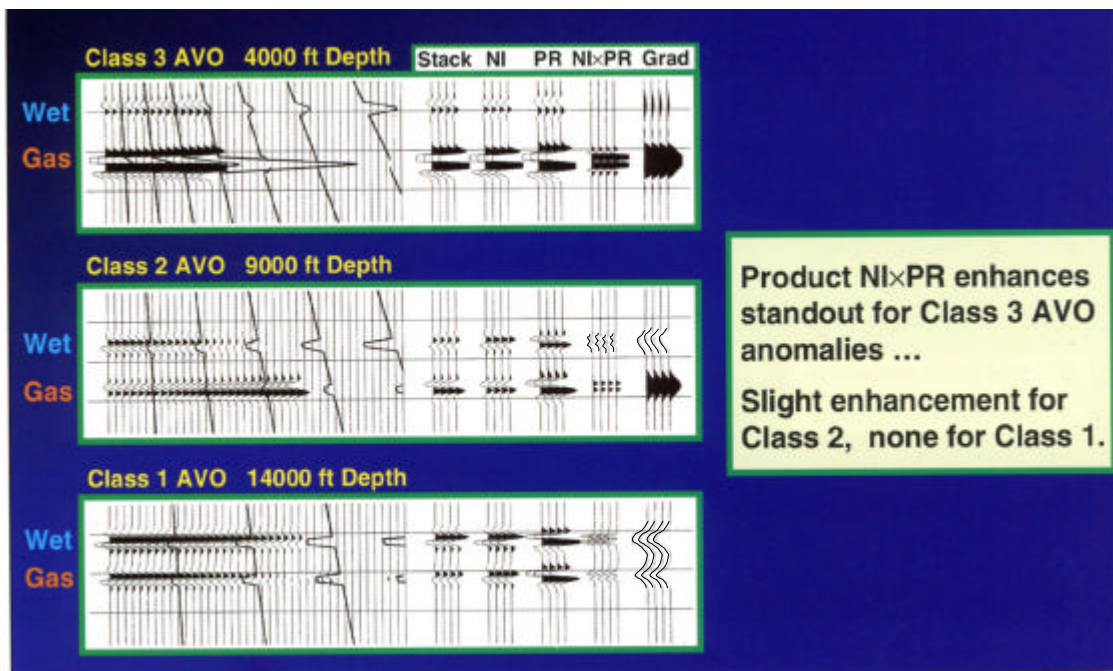


圖 24 三種埋深、六個含水或含氣一維地質模型，含水或含氣層厚度 15 公尺，迴旋運算漣波為 25 Hz Ricker 漣波，進行之 AVO 模擬(from Hilterman, 2001)。

將圖 24 的 CDP 合成震波聚合，依據 Shuey、Conventional、及 Smith & Gidlow 三種估算式，估算三種埋深含氣砂和含水砂之截距及斜率，其結果如圖 25 所示。最左邊的 NI 及 PR 為 Shuey 估算式之截距及斜率，第二組 A 及 B 為 Conventional Equation 之截距及斜率，第三組 NI 及 B_{SG} 為 Smith & Gidlow 估算式之截距及斜率。對含水砂而言，以 Shuey 估算式所得三種埋深之 NI 振幅約等於 PR 振幅，這種狀況有助於 NI 及 PR 逆推過程的穩定。以其他兩種估算式所得之含水砂的 AVO 特性(截距及斜率)，在不同深度時，NI 對 PR 之相對振幅比卻相差很多。對第三類型 AVO 而言，Conventional Equation 估算之 B 及 Smith & Gidlow 估算之 B_{SG} 的結果是不正確的，但 Shuey 公式估算之 PR 是正確的，而且等於傳統公式計算之 A 及 B 的和。以下之交叉圖分析，即以 Shuey 公式所計算之 AVO 特性來討論。

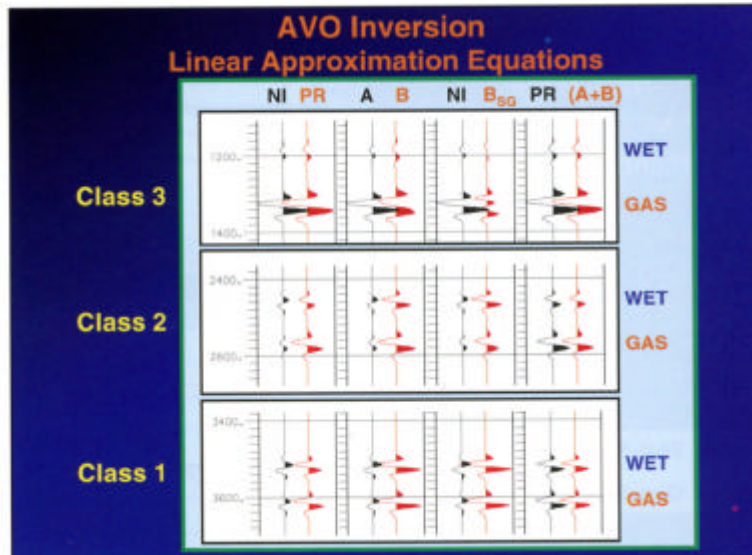


圖 25 依據 Shuey、Conventional、及 Smith & Gidlow 三種估算式，估算三種埋深含氣砂和含水砂之截距及斜率(from Hilterman, 2001)。

圖 26 為圖 24 之 CDP 合成震波，用 Shuey 估算式進行 NI 及 PR 之 AVO 特性分析，並製作之三種埋深(4000、9000、14000 英尺)對應之三種 AVO 類型之含氣砂及含水砂 NI-PR 交叉圖。

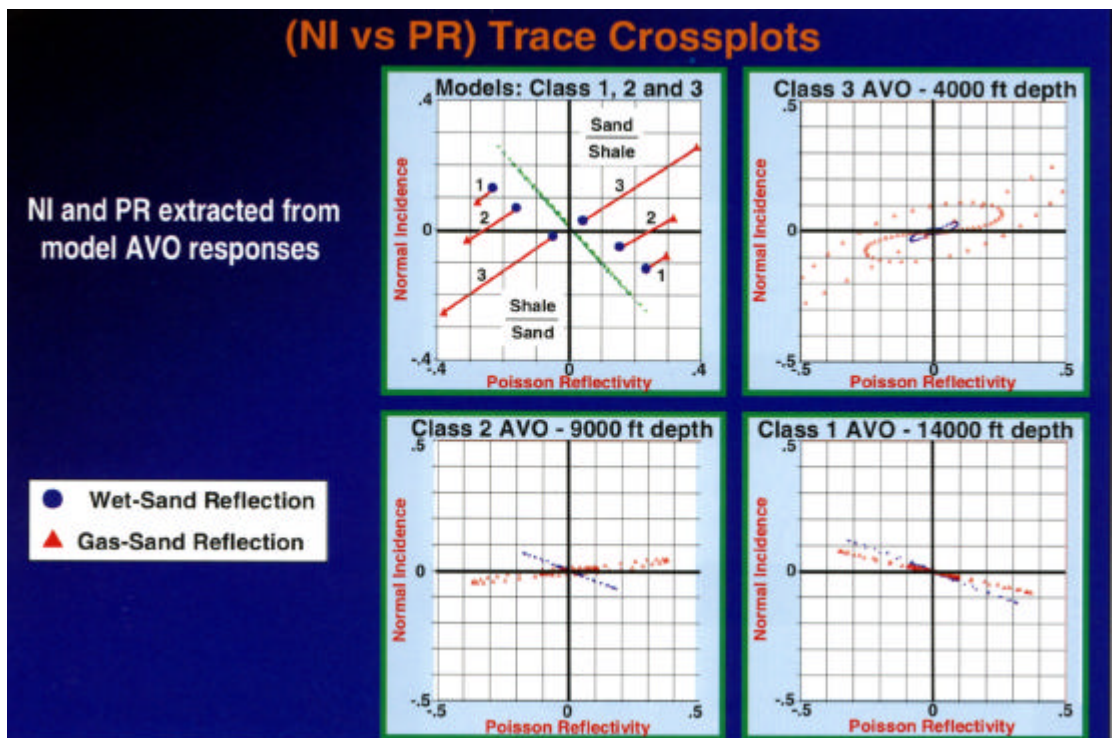


圖 26 用 Shuey 估算式進行 CDP 合成震波之 NI 及 PR 交叉圖分析 (from Hilterman, 2001)。

第三類型 AVO 之含水砂(藍點)及含氣砂(紅點)的 P-G 均呈 45°分布在同一趨勢上，第二類型 AVO 之含水砂及含氣砂的 P-G 分布以不同的趨勢呈銳角相交，其含水砂的 P-G 分布趨勢與第三類型的 P-G 分布趨勢幾成 90°，但其含氣砂的 P-G 分布趨勢卻和第三類型 AVO 相近。第一類型 AVO 之含水砂及含氣砂的 P-G 分布趨勢相似，且均類似第二類型 AVO 之含水砂的 P-G 分布趨勢。

(四)、應用斜率及截距進行油氣評估之陷阱

1. 截距及斜率間統計上的相關性

Cambois(1998)的研究中指出，以井下測錄校正 AVO 特性之 A-B(或稱 P-G)交叉圖分析，A 值的大小範圍和 B 值的大小範圍相同，但實際分析測勘所得震測資料時，B 值常大於 A 值十倍以上。如圖 27 所示，以最小二乘擬合方法估算截距(A)及斜率(B)之描線振幅，截距的振幅為 CDP 聚合重合後描線振幅的兩倍，而斜率描線振幅約為 CDP 聚合重合後描線振幅的十六倍。Cambois 認為這種現象是因在有雜波的實際狀況下，以最小二乘法估算截距及斜率時，截距及斜率間有統計上的相關性。圖 27 中的綠點為雜波所顯示之 P-G 分布，紅線為依據實測參數計算之理論曲線，理論曲線與雜波之 P-G 分布均與實際岩石物性之 P-G 分布很接近。換言之，截距(A)及斜率(B)和 random-noise 斜率間強烈的相關性，使得實際岩石物性或孔隙內流體的分辨變得模糊。Cambois 研究中另以斜率和 CDP 聚合重合後描線振幅進行交叉圖分析(圖 28 右圖)。圖 28 中紅點為含氣砂，在圖左之 P-G 交叉圖上，含氣砂的 P-G 分布與背景地層及雜訊的 P-G 分布似乎分離又不明確，很容易將 random noise 的 P-G 分布誤判為油氣異常。圖右以斜率和重合後描線振幅分析之交叉圖上，背景資訊之斜率和截距間的相關性減小，含氣砂亦於背景 P-G 分布的趨勢更增強，此時紅色 P-G 點為岩性或孔隙流體造成的可信度增加。

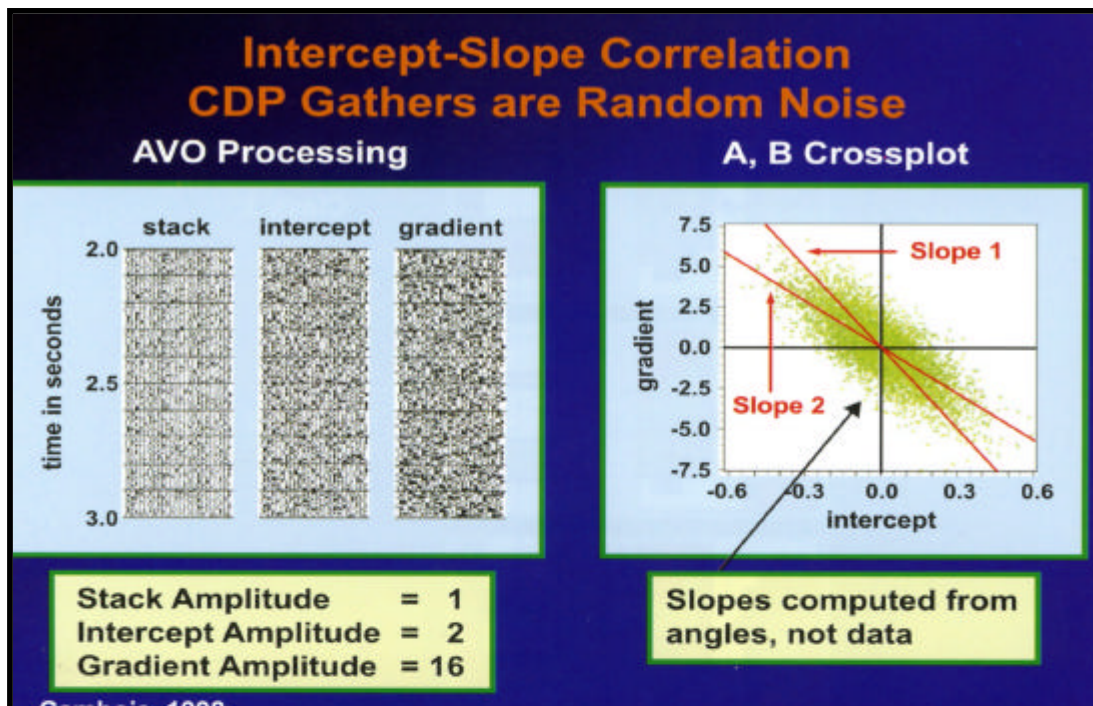


圖 27 截距(A)及斜率(B)和 random-noise 斜率間強烈的相關性，使得實際岩石物性或孔隙內流體的分辨變得模糊(from Cambois, 1998)。

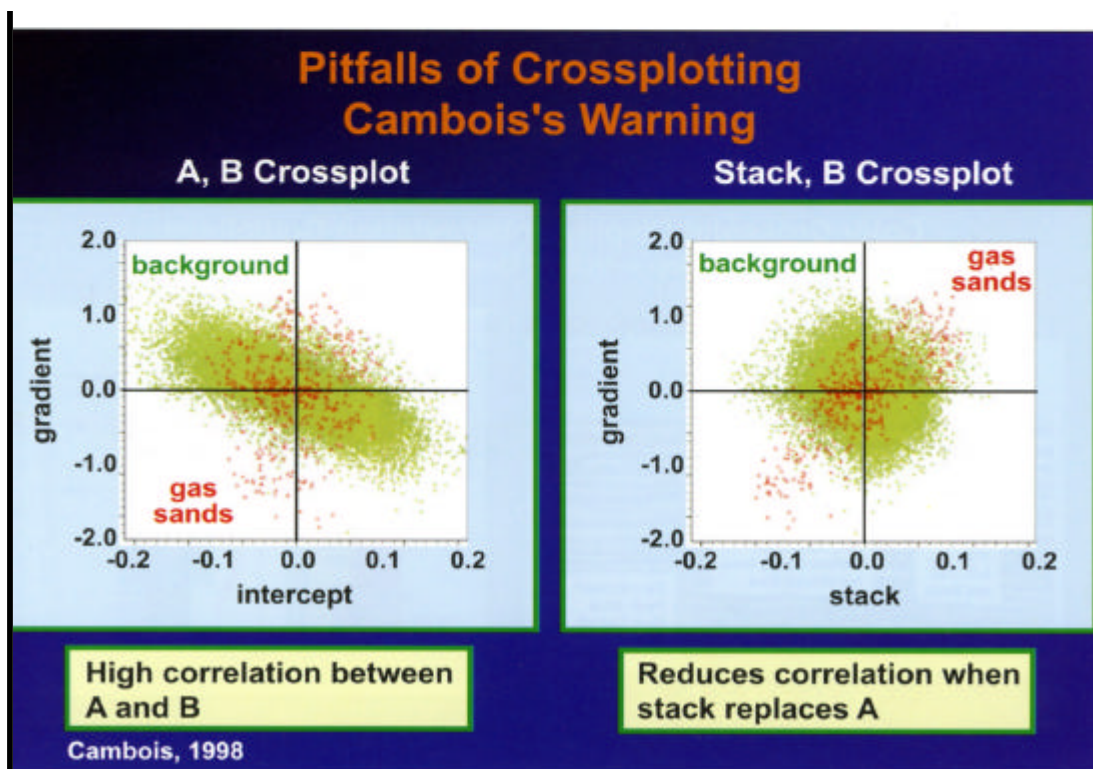


圖 28 用斜率及 CDP 聚合重合後描線振幅進行交叉圖分析，可減小背景資訊斜率和截距間的相關性，檢驗分布異常之 P-G 點為岩性或孔隙細流體造成，或 random noise 造成(Cambois, 1998)。

2. 剩餘 NMO 對截距及斜率估算的影響

Spratt (1987) 的研究提出, AV0 分析中截距及斜率的估算對剩餘 NMO 的敏感度很高, 圖 29 假設某岩石物性在 P-G 交叉圖上之 $NI_s(t)$ 輸入值為零(圖右呈水平分布之黑點), 當 4 毫秒剩餘 NMO 引入後, 估算之 $NI_s(t)$ 特性明顯的出現非零值的結果。當剩餘 NMO 增加時, 分析結果之 P-G 分布趨勢將更遠離原始之真實岩石物性 P-G 分布趨勢, 亦即估算結果之截距及斜率與原始岩石物性之截距及斜率差異越大(Hendrickson, 1999)。

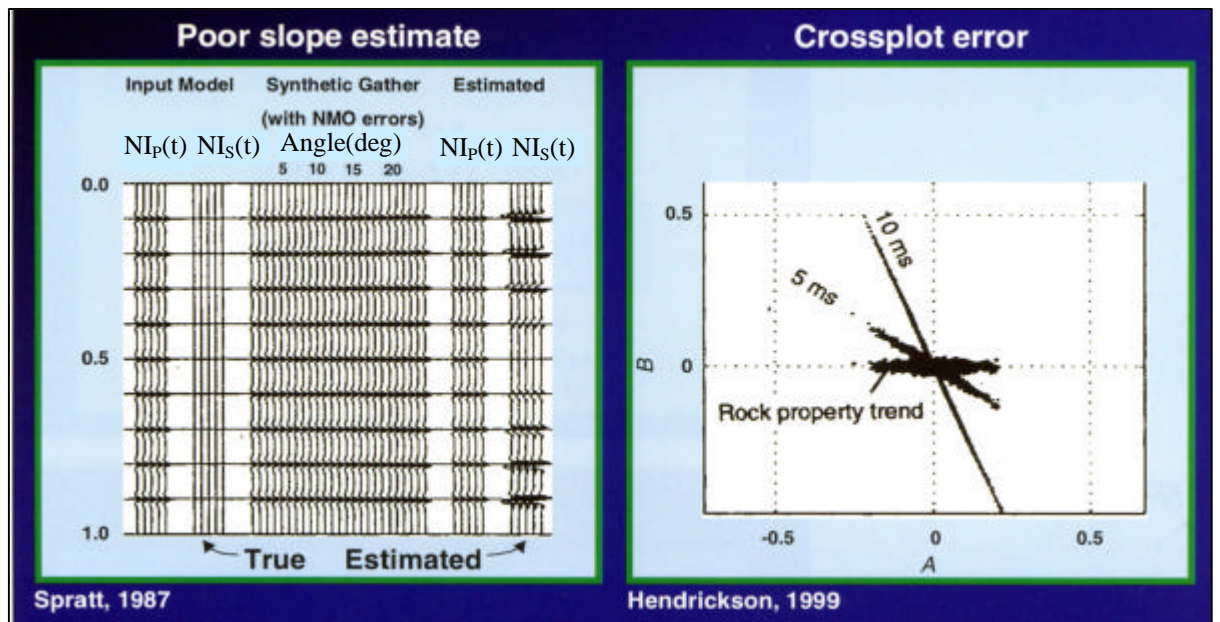


圖 29 剩餘 NMO 對截距及斜率估算的影響(Spratt, 1987; Hendrickson, 1999)。

3. 非零相位震測漣波對截距及斜率估算的影響

圖 30 之 AV0 響應為以零相位、最小相位及 90°相位之漣波, 模擬含氣砂之第二類型 AV0 響應結果。這些不同相位漣波所對應之 NI-PR 交叉圖上的含水砂及含氣砂之 AV0 特性向量長度各異, 但含水砂及含氣砂之 AV0 特性分布方向似乎受漣波相未改變的影響。

響不大。最小相位之 AVO 特性分布較其他兩種相位之 AVO 特性分布為寬。圖左之粉紅色線為含氣砂頂部在時間剖面上實際對應的反射時間，CDP 聚合合成震波之垂直隔距修正(NMO)是以波線追蹤的走時為為依據。對零相位及 90°相位之漣波而言，合成震波上與氣層相關之反射能量均以實際含氣砂頂部的反射時間面為中心，但最小相位漣波之合成震波，氣層相關之反射能量卻在實際含氣砂頂部的反射時間面之後才抵達，垂直隔距修正所定義的速度函數卻是依據此晚到的主能量所分析的，這種 AVO 特性分布變寬的現象實際上是 NMO 拉張所引起的剩餘 NMO 效應。對第三類型 AVO 分析而言，更常發生這種 NMO 拉張所造成的 AVO 特性分布變形。由這個例子的試驗顯示，相位的改變對 AVO 特性分布的趨勢改變似乎不大，僅只改變其向量的長度。但在 Allen and Peddy(1993)的研究中，卻指出漣波相位改變對 AVO 特性分布趨勢的影響。未來本公司的 AVO 研究分析工作，可針對各案釐清這方面的疑慮。

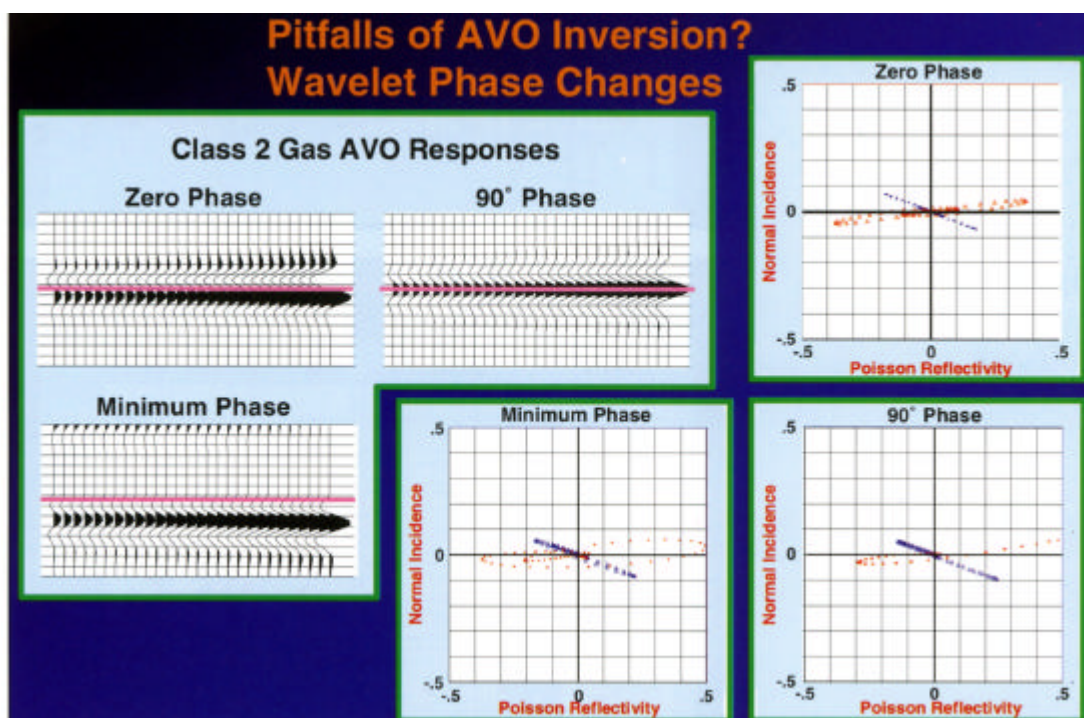


圖 30 非零相位震測漣波對截距及斜率估算的影響(hilterman, 2001)。

(五)、彈性阻抗(EI)

由 Aki & Richard(1980)的線性估算式開始, Connolly(1999)導引了不同入射角阻抗和 P 波速度、S 波速度、密度及入射角的關係式(圖 31), 此種隨入射角改變其值相對改變的阻抗稱之彈性阻抗(Elastic Impedance)。有了這個定義後, 不同入射角的重合剖面便可和已知的井下測錄校正。不同入射角範圍的重合剖面, 經積分後可得到不同入射角的代表性彈性阻抗, 如同傳統的聲波阻抗剖面可由重合移位資料積分後獲得。但最好獲得彈性阻抗的方式是經由井下資料和部分重合剖面萃取不同入射角範圍的漣波, 再經由部分重合的震測逆推過程, 獲得幾組不同入射角範圍(如 0~12°一組、10~23°一組、20~30°一組)的彈性阻抗。此時將 EI 震測描線來做交叉圖分析, 便可偵測岩性及孔隙內流體的變化。對第二類型 AVO 油氣異常的偵測而言, 以 EI 來區別岩性及孔隙內流體的變化可獲得更好的效果。

圖 32 在 8000~9000ft(2400~3000 M)間有兩處油氣層, 此兩油氣層對應於很大的波松比異常(ν), 30°或 40°為中心的部分重合剖面如果和近支距的部分重合剖面比較, 便能突顯油氣出現的範圍。如將近支距的震測描線積分並加入低頻, 即可估算井下聲波阻抗(P-Impedance Log)。同樣的方式, 如果將入射角 40°的震測描線積分並加入低頻, 即可估算入射角為 40°的彈性阻抗(Elastic-Impedance Log)(圖 33)。圖 33 右側 0°的彈性阻抗測錄幾乎完全沒有油氣相關的異常, 但 40°的彈性阻抗在油氣層區間卻呈現強烈的彈性阻抗異常。以 40°的彈性阻抗測錄計算合成震波(圖 34 第三個 panel), 並與入射角分布在 35~45°間震測描線重合後之震測描線比較(圖 34 第二個 panel)。正如理論所預期, EI 的合成震波幾乎等於 35~45°的部分重合震測描線。圖 34 中間三個 panel 的藍色背景描線為以 CDP 聚合所估算之 NI 描線, 第四個

$$RC(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta\alpha}{\alpha} (1 + \tan^2 \theta) - \frac{\Delta\beta}{\beta} 8k \sin^2 \theta + \frac{\Delta\rho}{\rho} (1 - 4k \sin^2 \theta) \right]$$

$$k = \beta^2 / \alpha^2$$

$$RC(\theta) = .5 \ln EI_2(\theta) - .5 \ln EI_1(\theta)$$

$$EI(\theta) = \alpha \left[\alpha \tan^2 \theta - \beta - 8k \sin^2 \theta - \rho (1 - 4k \sin^2 \theta) \right]$$

k set to a constant ≈ 0.21

$EI(0^\circ) = AI = \text{Acoustic Impedance} = \rho\alpha$

圖 31 Connolly(1999) 彈性阻抗的公式導引。

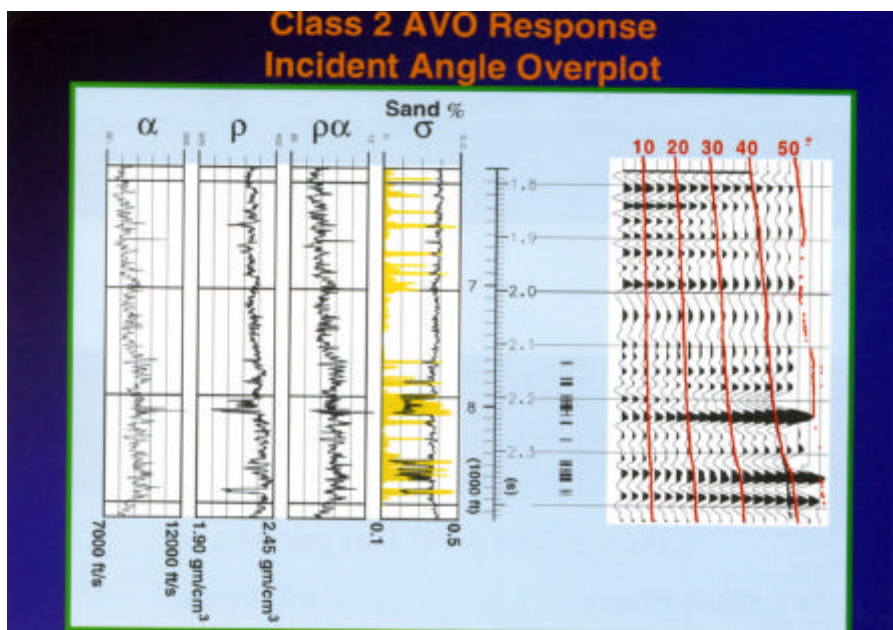


圖 32 第二類型 AVO 異常之振幅響應。

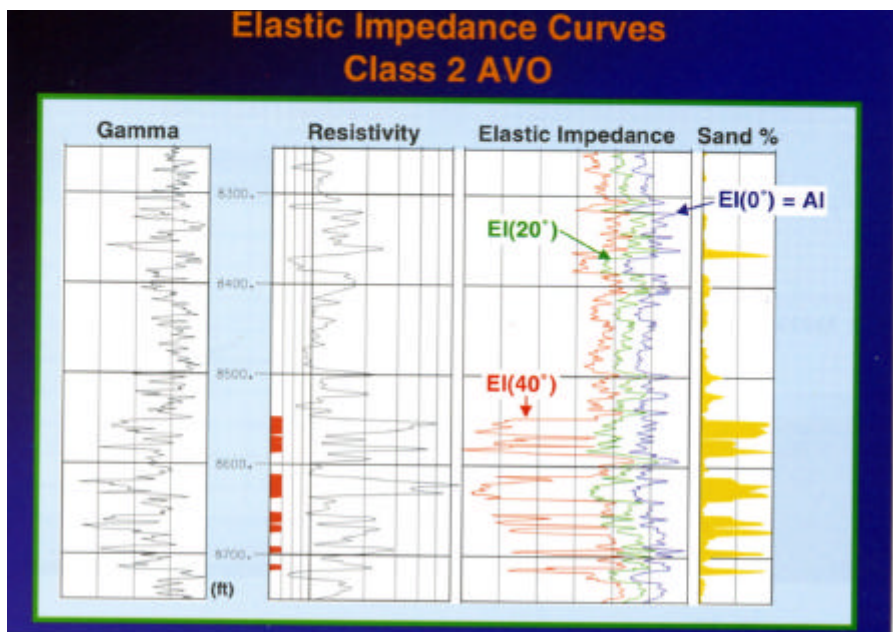


圖 33 彈性阻抗的估算。

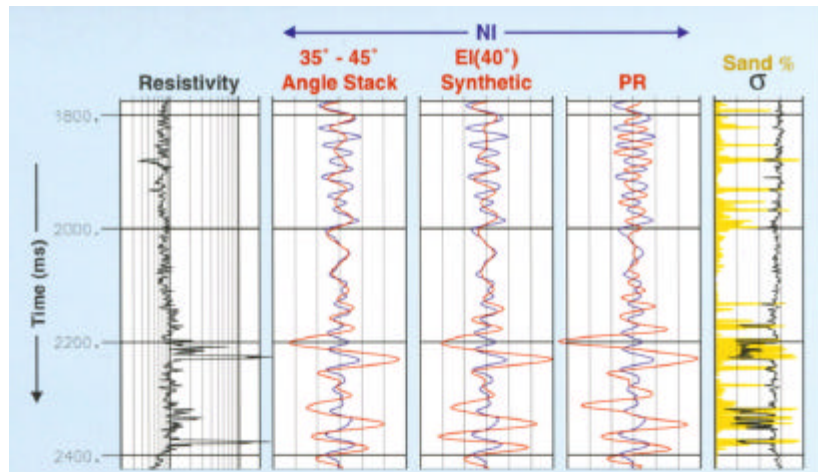


圖 34 第二類型 AVO 異常之振幅響應。

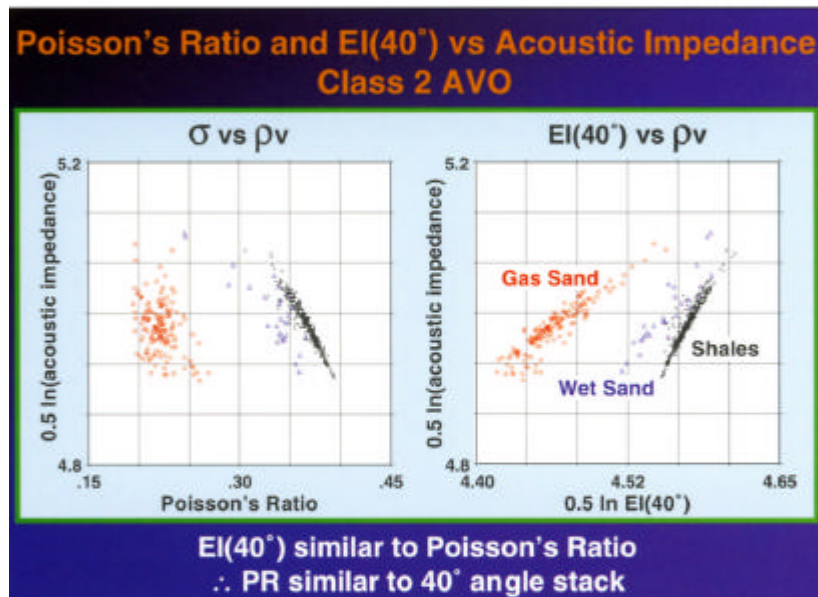


圖 35 第二類型 AVO 異常之振幅響應。

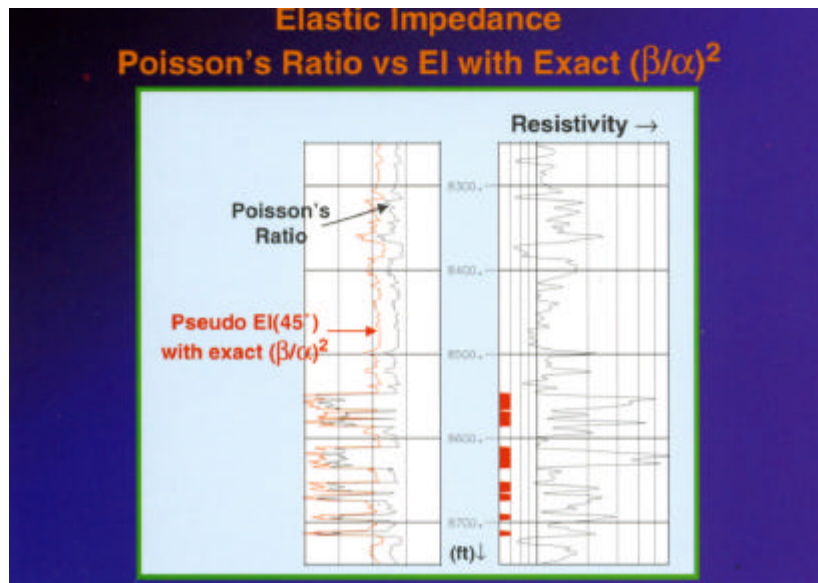


圖 36 $k=(\beta / a)^2$ 的 k 質不設為常數 0.21，而是可以隨深度改變時，經 scale 調整後， $0.5 \ln [EI(40^\circ)]$ 描線和波松比描線十分相近 (From Hilterman, 2001)。

panel 的紅色描線則為以 CDP 聚合所估算之 PR 描線(Shuey 公式所估之斜率)。EI 的合成震波也和 PR 描線很相似。一般 EI 合成震波的漣波頻寬會隨支距變遠而降低 t_0/t_x , t_0 為零支距的雙程走時, t_x 為支距為 X 之雙程走時。將 $0.5\ln[AI]$ 對 $0.5\ln[EI(40^\circ)]$ 作交叉圖(圖 35 右), 並以 $0.5\ln[AI]$ 對波松比作交叉圖(圖 35 左), 兩種交叉圖均可顯示岩性及孔隙內流體的差異, 頁岩、含水砂及含氣砂分別以不同且分離的點群呈現在交叉圖上。如果 Connolly(圖 31)的 EI 公式導引中, $k=(\beta/a)^2$ 的 k 質不設為常數 0.21, 而是可以隨深度改變, 經 scale 調整後, $0.5\ln[EI(40^\circ)]$ 描線和波松比描線十分相近(圖 36)。

本所地球物理組今年引進之 Fugro-Jason 套軟軟體中的 Rock Trace 即是這一部分分析技術的延伸, 將 CDP 聚合分為至少三個入射角的範圍, 經重合後在每個部分重合資料體(partial stack)進行漣波萃取及同步震測逆推(simultaneous partial stack inversion), 最終獲得的是 S 波阻抗資料體, 而非彈性阻抗資料體。彈性阻抗並非岩石的真實物性參數, 而是一種抽象的岩石物性代表, S 波阻抗才是岩石的真實物性參數。此外, 經由此部分重合同步逆推, 也同時獲得 P 波阻抗資料體, 並計算 V_p/V_s 或波松比資料體。其後再經由交叉圖分析, 更有效的辨別岩性及孔隙內流體。目前已將這一部分的技術發展, 規劃在九十五年的研究計畫, 並實際應用在厄瓜多十七號礦區的油氣評估。

伍、建議

1. 震測資料前處理對於振幅-支距分析或震測逆推而言，均影響深遠，所有處理流程參數的設定均需以探勘目標層來考量 (Target Oriented Processing)。油氣評估相關人員最好也參與震測資料處理的品管，對漣波極性、相位及振幅保留的狀況有所了解，才能以相對的風險高低來評估油氣潛能，而非有或無油氣的解釋。
2. 本公司過去以振幅-支距分析技術評估油氣潛能時，幾乎很少進行井下測錄的 AVO 模擬。今年經濟部石油基金委託本所進行之“直接探勘法研究與應用”計畫中，本所地物組與探採事業部國資處同仁合作，針對東引島盆地井測資料進行淺層鑽遇氣層及古新世基盤的 AVO 模擬。經由 AVO 模擬，一方面了解實際岩石物性的 AVO 響應及特性，另一方面經由模擬結果與實際資料的比對，體認振幅保留的可信度，更客觀的評估油氣的潛能。流體取代及流體取代後的 AVO 模擬，日後仍需持續加強。
3. 應用重合後資料體、截距及斜率等 AVO 特性資料體，以 A/B 振幅分析方法評估油氣潛能，不但較容易突顯探勘目標，相對的可了解探勘目標的風險，本公司在這方面的技術應用，尚不普遍，日後可強。其他如斜率對重合後資料體的交叉圖分析，也可嘗試。
4. 本報告結尾所討論之彈性阻抗分析技術，已普遍應用於石油探勘之油氣評估及油氣層生產監控。如報告中所提，本所地球物理組今年引進之 Fugro-Jason 套軟軟體中的 Rock Trace 即是這一部分分析技術的延伸，目前雖已將這一部分的技術發展，規劃在九十五年“厄瓜多礦區油開發方案研討”研究計畫中，但該技術在實際執行時，極可能仍需藉助 Fugro-Jason 公司技術層面相關人員的支援，傳承其實際應用上的經驗，方能正確有效的使技術生根。希望公司能支持該計畫所列

的相關出國訓練計畫及軟體維護預算。

5. 過去一年及今年度，個人實際負責許多震測逆推與儲集岩特性分析的工作案例及振幅-支距應用於東引島盆地油氣評估的研究，個人深感中油公司在岩石物理 (rock physics) 或石油物理 (petrophysics) 方面專才的缺乏，一般井下測錄的環境校正、石油物理測錄計算如 V Clay、Density 測錄的校正，欠缺專人做品管，井下岩性測錄 (Lithology Log) 的分析及建立基本上是完全缺乏的。而這些井測資料分析卻是儲集岩特性分析及 AVO 模擬的重要起始點，建議公司加強現有相關工作人員的訓練。

陸、參考文獻

- 傅式齊，楊玉良，黃昌盛，2004. 直接探勘法研究與應用 振幅-支距分析：九十三年度，經濟部石油基金獎勵石油開發技術研究發展計畫
- Aki, K., and Richards, P.G., 1980. Quantitative seismology —Theory and Methods,1:W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Allen, J.L. and Peddy, C.P., 1993. Amplitude variation with offset: Gulf Coast case studies: SEG Geophysical Development Series,4;
- Backus, M.M and Chen, R.L., 1975. Flat spot exploration: Geophys. Prosp., 23, 533-577.
- Barry, K.M. and Shugart, T.R., 1973. Seismic hydrocarbon indicators and models: Presented at the Geophysical Society of Houston “Lithology and direct detection of hydrocarbons using geophysical methods” symposium.
- Batzle, M., and Wang, Z., 1992. Seismic properties of fluids:Geophysics, 57, 1396-1408.
- Biot, M.A., 1956 a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range: J. Acoust. Soc. Am., 28, 168-178.
- Biot, M.A., 1956 b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated

- porous solid. II. Higher frequency range: *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, 179-191.
- Bortfeld, R., 1961. Approximation to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves: *Geophys. Prosp.*, 9, 485-503.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L., and Eastwood, R.L., 1985. Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks: *Geophysics*, v. 50, p. 571-581.
- Castagna, J.P., 1993. Petrophysical imaging using AVO: *The Leading Edge*, v. 12, no.3, p.172-178.
- Castagna, J.P., 1993. AVO analysis: Tutorial and review: In Castagna, J.P. and Backus, M.M., eds, *Offset reflectivity-Theory and practice of AVO anomalies*, *Soc. Expl. Geophys. Investigations in Geophysics* no. 8, p. 3-36.
- Castagna, J.P. and Smith, S.W., 1994. Comparison of AVO indicators: A modeling study: *Geophysics*, v.59, p. 1849-1855.
- Castagna, J.P., 2000. An introduction to this special section: AVO-The next step: *The Leading Edge*, v. 19, 1187.
- Gardner, G.H.F. and Harris, M.H., 1968. Velocity and attenuation of elastic waves in sand: 9th Ann. Logging Symposium, *Trans (SPWLA)*, p. M1-M19.
- Cambois, G., 1998. AVO attributes and noise: pitfalls in crossplotting: Presented at the 68th Ann. Internat. Mtg., *Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 244-247.
- Connolly, P., 1999. Elastic impedance: *The Leading Edge*, 18, 438-452.
- Gregory, A. R., 1976. Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks: *Geophysics*, V. 41, no. 5, p.895-921.
- Gregory, A. R., 1977. Aspects of rock physics from laboratory and log data that are important to seismic interpretation-in exploration: *AAPG memoir*

- 26, p.15-46.
- Hilterman, F.J., 2001. in Hilterman, F.J., ed., Seismic amplitude interpretation, 2001 Distinguished Instructor Short Course, Distinguished Instructor Series, No.4.
- Hilterman, F.J., Sherwood, J.W.C., Schellhorn, R., Bankhead, B. and DeVault, B., 1998. Identification of lithology in the Gulf of Mexico: The Leading Edge, 17, No. 2, 215-222.
- Hilterman, F., Van Schuyver, C., and Shar, M., 2000. AVO examples of long-offset 2-D data in the Gulf of Mexico: The Leading Edge, 19, no. 11, 1200-1213.
- Knott, C.G., 1899. Reflection and refraction of elastic waves with seismological application: Phil. Mag., 48, 64-97.
- Koefoed, O., 1955. On the effect of Poisson's ratio of rock strata on the reflection coefficients of plane waves: Geophys. Prop., 3, 381-387.
- Lindseth, R.O., 1979. Synthetic sonic logs- a process for stratigraphic interpretation: Geophysics, v. 44, no. 1, p. 3-26.7
- Ostrander, W.J., 1982. Plane wave reflection coefficients for gas sands at normal angles of incidence: Presented at the 52nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, p. 216-218.
- Ostrander, W.J., 1984. Plane wave reflection coefficients for gas sands at normal angles of incidence: Geophysics, v.49, p. 1637-1648.
- Rosa, A.L.R., 1976. Extraction of elastic parameters using seismic reflection amplitudes with offset variations: M.S. Thesis, Univ. of Houston.
- Ross, C.P., 2000. Effective AVO crossplot modeling: A tutorial: Geophysics, 65, 700-711.
- Sengbush, R.L., 1983. Seismic exploration methods: Internat. Human Res. Dev. Corp.
- Shuey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations: Geophysics, 50, 609-614.

Simmons, J.L. and Backus, M.M., 1994. AVO modeling and the locally converted shear wave: *Geophysics*, v.59, p. 1237-1248.

Smith, G. C. and Gidlow, P. M., 1987, Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas: *Geophys. Prosp.*, 35, 993-1014.

Smith, G.C. and Sutherland, R.A., 1996. The fluid factor as an AVO indicator: *Geophysics*, 61, 1425-1428.

Zoeppritz, K. 1919. Erdbebenwellen VIII B, On the reflection and propagation of seismic waves: *Gottinger Nachrichten*, I, 66-84.