

出國報告（出國類別：實習）

參加震測層序分析研 習課程

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：邱維毅 地球物理探勘師

派赴國家/地區：美國 休士頓

出國期間：108年10月20日至108年10月27日

報告日期：108年10月29日

摘要

震測層序分析是上世紀末探勘界最具革新之一的概念，對於地球物理探勘師與地質師而言，震測層序分析不僅僅是一項工具，而是一門整合了地質與地球物理科別智識的堅實學科。若應用得當，震測層序分析可做為了解地質演變歷史、描述盆地之時間與空間演化之方法。藉由震測層序分析並結合定年、鑽井資料所建立之年代地層 (chronostratigraphy)，蘊含了盆地沉積序列與區域斷層演育的資訊，因此可經由震測層序之研究，了解盆地內可能的儲集層、蓋層分布、沉積環境的演化歷程，進而推敲盆地的生油潛能。

本出國案即報名參加 PetroSkills 所開設之「Introduction To Seismic Stratigraphic: A Basin Scale Regional Exploration Workshop - ISS」課程，講師為國際知名之石油地質學家 John D. Pigott 教授。該課程專門開設予對於震測層序技術應用有興趣的地質或地球物理探勘師，藉由一系列的課程，結合阿拉斯加北部、墨西哥灣、南美洲和西非等地區之部分具鑽井控制的震測資料，講授震測層序解釋與分析所需具備的相關前置作業、資料、工作流程、圖表意義，以及如何根據震測層序解釋結果和年代地層圖繪製相對海水位面變化曲線? 如何自次層序組分析結果區分出不同體系域?如何結合震測相分析與反射強度討論可能的沉積環境?...等相關工作流程。

目次

一、目的.....	4
二、過程.....	4
三、具體成效.....	35
四、心得與建議.....	36
五、附錄（訓練機構與課程照片）.....	37

一、 目的

震測層序分析是上世紀末探勘界最具革新之一的概念，對於地球物理探勘師與地質師而言，震測層序分析不僅僅是一項工具，而是一門整合了地質與地球物理科別智識的堅實學科。若應用得當，震測層序分析可做為了解地質演變歷史、描述盆地之時間與空間演化之方法。藉由震測層序分析並結合定年、鑽井資料所建立之年代地層 (chronostratigraphy)，蘊含了盆地沉積序列與區域斷層演育的資訊，因此可經由震測層序之研究，了解盆地內可能的儲集層、蓋層分布、沉積環境的演化歷程，進而推敲盆地的生油潛能。

本出國案即報名參加 PetroSkills 所開設之「Introduction To Seismic Stratigraphic: A Basin Scale Regional Exploration Workshop - ISS」課程，講師為國際知名之石油地質學家 John D. Pigott 教授。該課程專門開設予對於震測層序技術應用有興趣的地質或地球物理探勘師，藉由一系列的課程，結合阿拉斯加北部、墨西哥灣、南美洲和西非等地區之部分具鑽井控制的震測資料，講授如何從資料中抽絲剝繭得到隱含的地質訊息、如何建構與解釋年代地層圖、海水位面變化曲線及震測相圖、自循環序列 (Autocyclic successions) 和外成循環序列 (Allocyclic successions) 對碎屑岩與碳酸鹽岩所造成的沉積差異及可能的儲層構造與油氣封閉潛力?如何重建盆地地質史?…等內容。

因本組工作主力之一為震測解釋，但以往多著重於構造與主要地層層面解釋，對於如何應用震測層序於震測解釋工作或礦區評估之認識較為薄弱，藉由參加此震測層序分析研習課程，期能精進震測層序知識並有助於礦區綜合評估作業。

二、 過程

因國籍航空公司僅長榮公司具直達休士頓之航段，唯預計抵達休士頓之時間為晚上 11:40。因此本案之出國之旅程規劃以台灣桃園機場<--->日本成田機場<--->美國休士頓機場之方式往返目的地。

PetroSkills 休士頓訓練中心位於休士頓郊區的 Katy Mills Pkwy 區域，距休士頓國際機場最短旅程約 72 公里，且大眾交通不甚便利，欲前往者須自行搭乘計程車。

本訓練課程章節如圖 1 與圖 1(續)所示。本報告將依授課日期分別簡介授課內容。

**INTRODUCTION TO SEISMIC
STRATIGRAPHY
AND
ADVANCED SEISMIC STRATIGRAPHY**

TOPIC	CONTENTS	PAGE
1.	INTRODUCTION: SEISMIC STRATIGRAPHY, THEORY AND PRACTICE	1
1.1.	DEFINITION	3
1.2.	PHILOSOPHY	4
1.3.	SIGNIFICANCE OF THE APPROACH	8
1.3.1.	GeoHistory Reconstruction	8
1.3.2.	Petroleum System Analysis	9
1.4.	SEISMIC EMPISTEMOLOGY	10
1.5.	BRIEF HISTORICAL REVIEW	11
2.	GEOPHYSICAL FUNDAMENTALS: EMPHASIS-WAVELET ANALYSIS	13
2.1.	WAVES AND RAYS	15
2.1.1.	Conceptual Model (Praxis)	15
2.1.2.	Principles and Laws	16
2.2.	WAVE EQUATION	17
2.3.	VELOCITY-DENSITY RELATIONSHIPS	20
2.3.1.	Velocity Definitions	20
2.3.2.	Common Interval Velocity Ranges	23
2.3.3.	Empirical versus Deterministic	25
2.3.4.	Diffractions and Migration (Praxis)	29
2.4.	AMPLITUDES AND FORWARD SEISMIC MODELS	33
2.4.1.	Reflection Coefficient (Praxis)	33

i

2.4.2.	Nonstationarity of the Input Wavelet	36
2.4.3.	Fluid Substitution (Praxis)	37
2.4.4.	Neidell Transition Zone	42
2.5.	FREQUENCY	44
2.5.1.	Dominant Frequency	44
2.5.2.	Interpretation (Praxis)	45
2.5.3.	Frequency Spectra Basics (Praxis)	47
2.6.	TEMPORAL RESOLUTION	51
2.6.1.	Vertical (Praxis)	51
2.6.2.	Horizontal (Praxis)	54
2.6.3.	Seismic Inversion	59
2.6.4.	Frequency Decomposition/Fluid Substitution	63
2.7.	INTERPRETIVE PHASE AND POLARITY	66
2.8.	ATTRIBUTES	68
2.8.1.	Taner Attribute Derivation	68
2.8.2.	Attribute Examples	72
2.8.3.	Coherency	76
2.9.	AMPLITUDE VARIATION WITH OFFSET	77
2.9.1.	Plane Wave Model	77
2.9.2.	Shuey's Equation	81
2.9.3.	Ostrander's Equation	82
2.9.4.	AVO Classes	83
2.9.5.	Vertical Seismic Profiling AVO (Praxis)	85
3.	VAIL SEQUENCE INTERPRETATION: EMPHASIS- REFLECTION GROUP ANALYSIS	87
3.1.	SEISMIC STRATIGRAPHIC ALGORITHM	89
3.2.	UNDERLYING ASSUMPTIONS OF OPERATIONAL SEISMIC SEQUENCE (Praxis)	90
3.3.	FAULT INTERPRETATION	93
3.3.1.	Fault (Zone) Imaging as Fault Plane and/or Reflector Discontinuities (Praxis)	94
3.3.2.	Fault Mechanical Stratigraphy	

ii

	(Praxis)	96
	3.3.3. Uncertainty (Praxis)	98
3.4.	TERMINATIONS AND OPERATIONAL SEQUENCE BOUNDARIES	99
3.4.1.	Boundary Assumptions and Logic	99
3.4.2.	Mechanics (Praxis)	101
3.5.	ACOUSTIC BASEMENT (Praxis)	106
3.6.	PITFALL OF MULTIPLES	107
3.6.1.	Multiples in General	108
3.6.2.	Water Bottom Multiples	109
3.7.	GEOVALIDATION WITH SYNTHETICS	111
3.7.1.	Sonic, Density, Checkshot, and VSP	111
3.7.2.	Procedure	112
3.7.3.	Reasons for Synthetic-Seismic Miss-match (Praxis)	114
3.7.4.	Miss-Match Quick Calculation	115
4.	GALLOWAY SEQUENCE INTERPRETATION: EMPHASIS-BOREHOLE MOTIFS	117
4.1.	GALLOWAY SEQUENCE ALGORITHM	119
4.2.	MOTIF ASSUMPTIONS	120
4.3.	PETROPHYSICAL LOG BASICS	121
4.3.1.	Gamma Ray Log	121
4.3.2.	Formation Density/Neutron Logs	121
4.3.3.	Sonic Log	122
4.3.4.	Resistivity Log	122
4.4.	CONSTRUCTION MECHANICS (Praxis)	123
5.	CHRONOSTRATIGRAPHY (WHEELER DIAGRAM CONSTRUCTION)	124
5.1.	DEFINITION AND ASSUMPTIONS	126
5.2.	MECHANICS OF CONSTRUCTION	127
5.2.1.	Properties	127
5.2.2.	Procedure	127
5.2.3.	Major Motifs (Praxis)	128

iii

5.3.	SIGNIFICANCE OF CONSTRUCTION	133
6.	SEA LEVEL CURVES	135
6.1.	CONCEPT OF ACCOMMODATION SPACE	137
6.2.	CONSTRUCTION FROM SEISMIC AND CHRONOSTRATIGRAPHY (Praxis)	143
6.3.	GLOBAL CURVES, CYCLE ORDERS, CAUSES	144
6.4.	CONSTRUCTION FROM MICRO-PALEONTOLOGY (Praxis)	155
6.5.	SEISMIC "SEA SLUG MODEL": THE SEQUENCE PARADIGM (Praxis)	157
7.	CARBONATE SEQUENCES	161
7.1.	SEISMIC CLASSIFICATION OF BUILDUPS	163
7.2.	SELECTED EXAMPLES	171
7.2.1.	Reefs	171
7.2.2.	Banks and Deep Water Fans	172
7.2.3.	Karst	173
7.3.	MECHANICS OF INTERPRETATION (Praxis)	174
8.	SILICICLASTIC SEQUENCES	177
8.1.	DELTA (HYPOPYCNAL)	179
8.1.1.	Geologic-Geophysical Basics	180
8.1.2.	Seismic Characterization (Praxis)	185
8.2.	SUBMARINE FANS (HYPERPYCNAL)	191
8.2.1.	Structural Context and Fan Geometry	191
8.2.2.	Hydrodynamic Control of Reservoir Quality and Seismic Imaging (Praxis)	194
9.	SEISMIC FACIES AND PALEO- ENVIRONMENTAL INTERPRETATION	203

iv

圖 1、本訓練課程之授課章節。其中紅色字體與褐色字體標示部分為課程主要重點，黑色字體部分則不特別講授，但是內容包含於講義中。

9.1. FACIES DEFINITION	205
9.2. FACIES TABLE CONSTRUCTION FROM SEISMIC EXCLUSIVELY (Praxis)	206
9.3. FACIES TABLE CONSTRUCTION FROM INTEGRATION OF SEISMIC AND MICRO-PALEO	207
9.3.1. Walter's Law	207
9.3.2. Utilizing MicroPaleo Sea Level Curve	208
9.3.3. Seismic Facies Table from Integrating Seismic, Micro-Paleo, and Walter's Law (Praxis)	209
9.4 SEISMIC FACIES MAPPING	210
10. GEOHISTORY CONSTRUCTION: THE SEISMIC STRATIGRAPHIC ALGORITHM (Praxis)	211
APPENDIX	215

圖 1(續)、本訓練課程之授課章節。其中紅色字體與褐色字體標示部分為課程主要重點，黑色字體部分則不特別講授，但是內容包含於講義中。

I. 首日 (10/21)

本日之講授內容分別包含(1).Introduction: Seismic stratigraphic, Theory and Practice、2.Geophysical Fundamentals: Emphasis-Wavelet Analysis與 3.Vail Sequence Interpretation: Emphasis Reflection Group Analysis 等三個章節。

1. Introduction: Seismic stratigraphic, Theory and Practice 章節中，Pigott 教授強調地球物理學家需學習如何聆聽震測資料。所謂聆聽，包含了來自於岩體基質與孔隙流體兩者在地球物理震測資料上所表現的物理特徵。而震測層序分析中的震測層序分析及漣波（反射特徵）分析都是用以解析震測資料中來自於岩石基質與流體信號之有效工具（如，AVO 分析可應用於解析岩石空隙之圍壓和孔隙率）。需特別注意的是，震測層序的目的並不僅僅是為了尋找地層封閉，而是試圖將地質學概念引入物理知識的一種研究方法。相較於井下資料分析之限制，震測層序分析方法透過解析震測資料，可引導研究人員了解大範圍的地史變化，而不僅限於某一個或數個井位。
2. Geophysical Fundamentals: Emphasis-Wavelet Analysis 章節裡，Pigott 教授強調，因平面波的波動方程式僅與波的振幅(amplitude)、波速(velocity)與相位(phase)等三要素有關，因此本章節分別講解此三要素。

首先釐清，聲波在介質中行進之路徑為最快路徑，並非最短路徑，因此利用聲波電測所量測之孔隙率數值，除了受到原生孔隙作用外，更受到次生孔隙的影響，故不能直接用以代表基質孔隙率(Matrix porosity)。

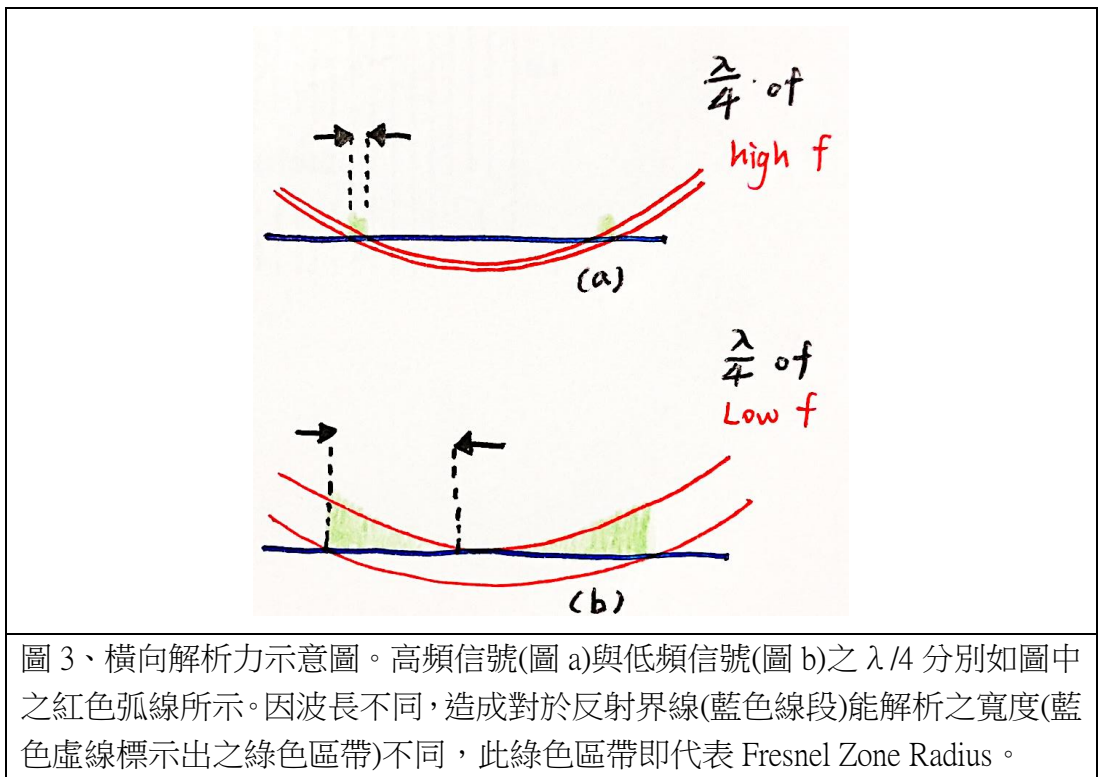
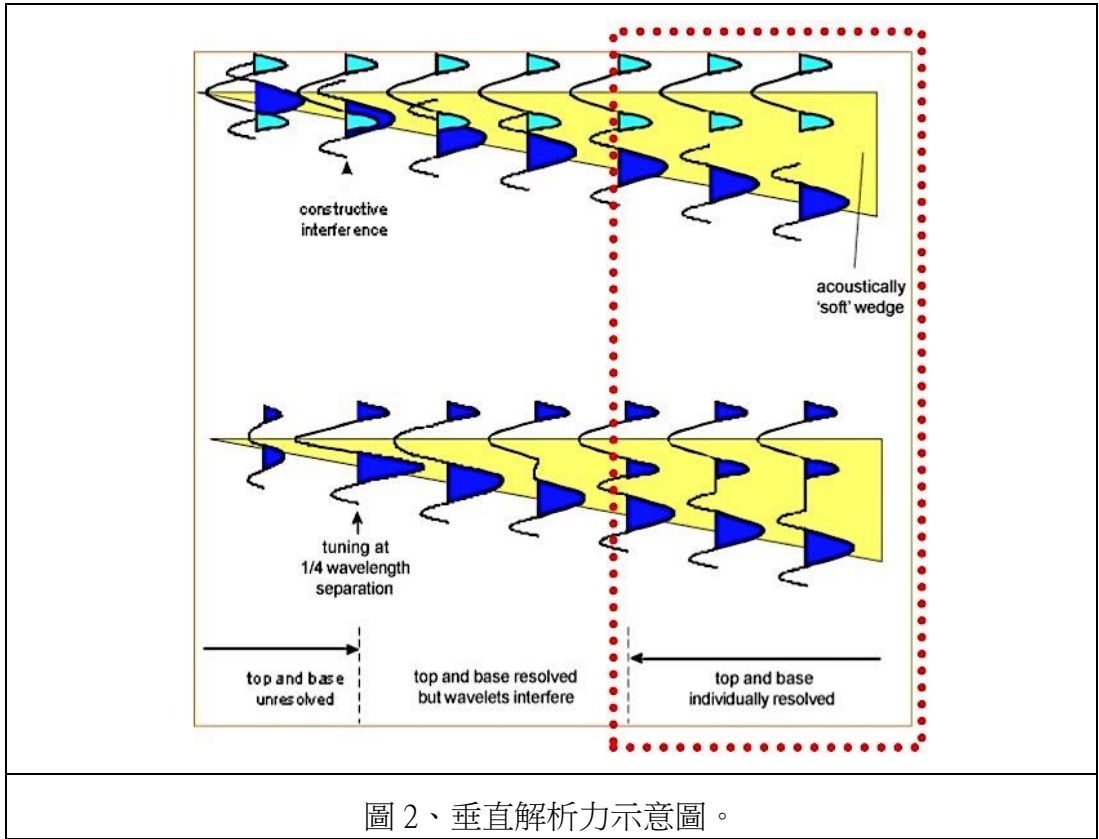
對於地物師而言，最能反映岩石特性的速度為區間速度(interval velocity, V_{int})，其代表聲波經過某一段時窗(time window)時之速度。然而，震測資料之速度來源為 CMP 處理時所得到的均方根速度(V_{rms})，因此利用 Dix 方程進行 V_{rms} 與 V_{int} 間已進行速度轉換是每個地物師都須知曉的基本技能。

Pigott 教授更強調，切勿再以 Gardner 經驗式進行電測資料分析中之岩石密度計算，因為該經驗式為擬合曲線，無法恰當的反應地下地質狀況。根據聲波速度 $V_p = \sqrt{(k + (4\mu/3)) / \rho}$ 可知，密度與聲波並非正比關係，隨埋深而增加之聲波速度應與岩石本身體積模數 k 及剪切模數 μ 的增加有關。

除了的振幅(amplitude)、波速(velocity)與相位(phase)等三要素介紹外，老師更以淺顯的方式介紹聲波阻抗(AI)、反射係數(Reflection Coefficient)和震測順推模型(Forward seismic model)間之關係，並實際練習計算與 Forward seismic 模型(契型模型)的建立概念。

由於入射波穿越地層時，往往會因各種能量消散的作用影響(Spherical Divergence、Transmission Loss、Absorption、Mode Conversion)而使得反射波能像降低，為了校正此現象，傳統上可能會以自動增益控制(AGC)進行處理。但 Pigott 教授提醒在場的每一位地物師，要求大家千萬不可將經過自動增益控制後之資料用於震測解釋，而是應該使用經驗提醒在場的每一位地物師，要求大家千萬不可將經過自動增益控制後之資料用於震測解釋，因為 AGC 並不具地質上或物理上之意義。較好的作法應該使用經驗振幅校正(empirical amplitude correction)或 Q 值分析進行震測資料的振幅回復，並基於校正後之震測資料進行解釋。

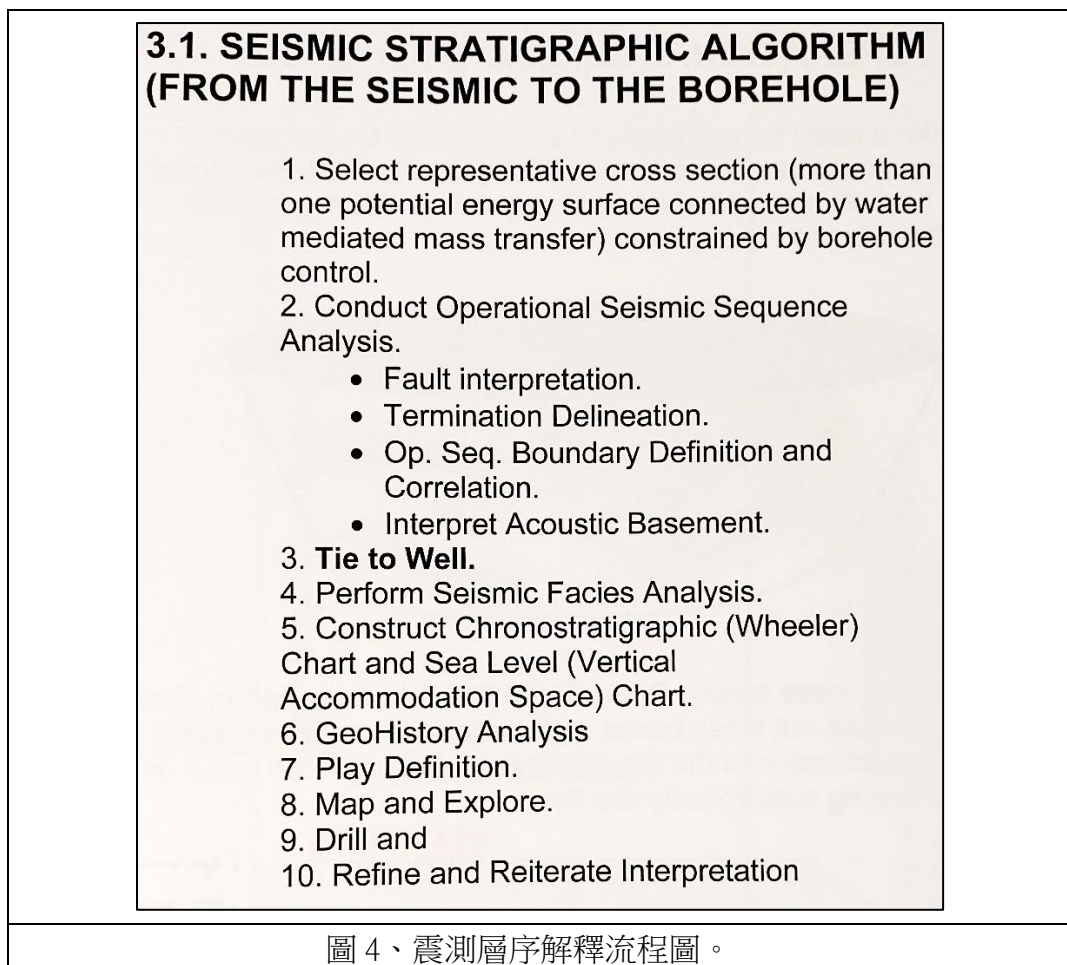
震測影像之解析力可分為垂直解析度與橫向解析度。垂直解析度的兩個重要因素是 Tuning thickness 和 Minimum Thickness，分別代表可區分出岩體上下介面反射信號之最小厚度(= $\lambda/4$)及可識別岩體之最小厚度(= $\lambda/30$)；橫向解析度則受控於 Fresnel Zone Radius ($FRZ = \frac{v}{4} \sqrt{twt/f}$)。老師以相對淺顯易懂的繪圖概念解釋了此兩解析力的成因，如圖 2 與圖 3 所示。

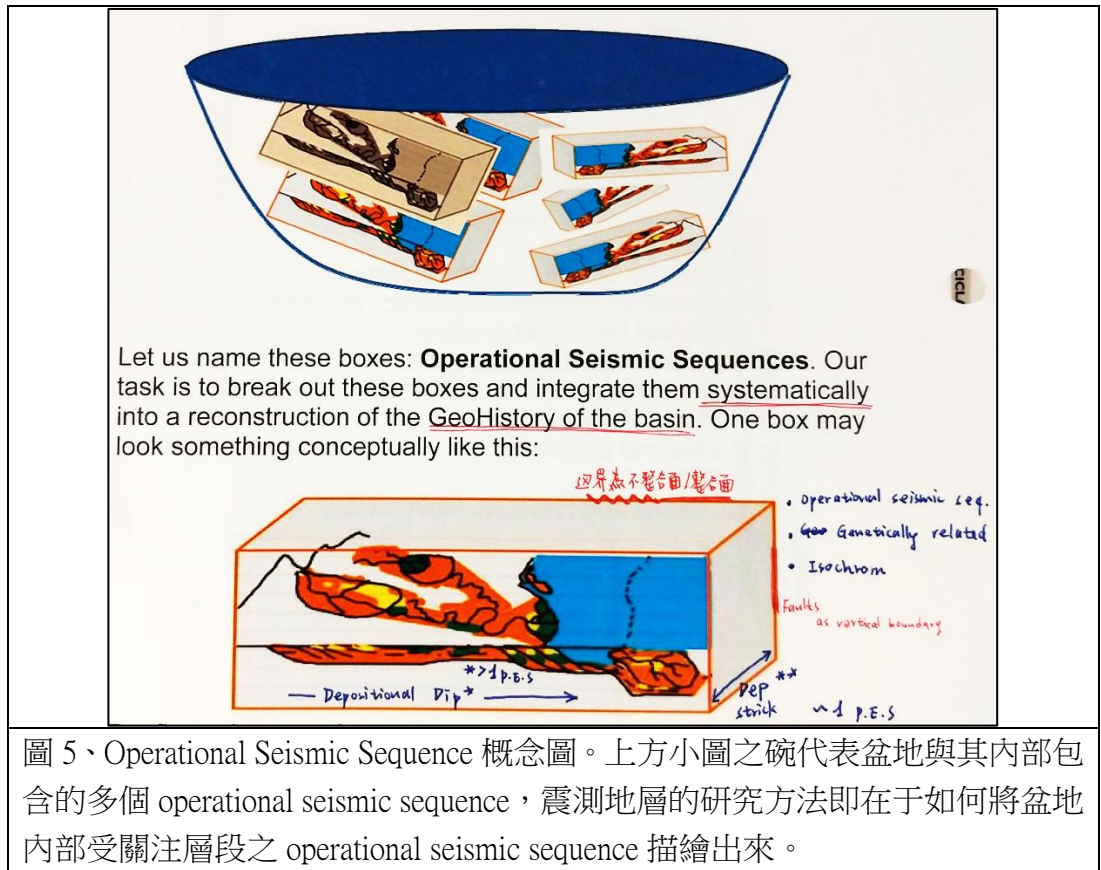


在講解震測逆推原理時,最令人驚訝的是, Pigott 教授嚴正的提醒,因受控於井下資料限制,探勘階段因鑽井數及相對之資料相對較少,震測逆推之結果

受參與計算之鑽井數量影響甚大，代表逆推結果具高不確定性，因此在此階段，若欲依據震測逆推的結果推測地下地質狀態，亦較有風險。該研究方法最佳的應用使用時機為開發階段，因單位面積鑽井數量較多，逆推結果可能較趨於穩定，故適合用於開發生產方案之擬定、調整。

3. Vail Sequence Interpretation: Emphasis Reflection Group Analysis 章節部分，最為重要的概念是 operational seismic sequence 概念。其意圖為分析盆地中所經歷的各個不同地質歷史，並以系統化的方式區分出不同時期的 operational seismic sequence。單一個 operational seismic sequence 邊界由不整合面與其相對的整合面所包夾，內部包含同一地質時間所發育的不同沉積環境。震測層序最重要的目的就在於解析出每個 operational seismic sequence，據以探討目標區域中的石油系統要素。此部分課程，著重在於實際於紙本震測剖面上解釋不同尺度的震測資料，了解如何以震測解釋工作達成此目的。其流程和概念如圖 4 與 5。





此章節在講授完 operational seismic sequence 之概念後，便依據圖 4 之流程，進行三條交會震測剖面的練習(其中一條為交會測線)，最終目標是要依據震測解釋完成年代地層圖、海水位面變化曲線。為了提升參訓學員相互間的交流討論，10 位參訓學員們共區分為三組進行共同作業。我與來自 Canacol Energy Ltd 之哥倫比亞分公司的 Diego Melo 地物師及 Burnett Oil Co.公司的 A&D 副總裁 Cliff Condrey 同一分組，練習斷層解釋、震測信號終止點的識別(Reflection Termination Delineation)、震測層序邊界的描繪...等流程。圖 6 即為今日完成之震測剖面解釋進度。

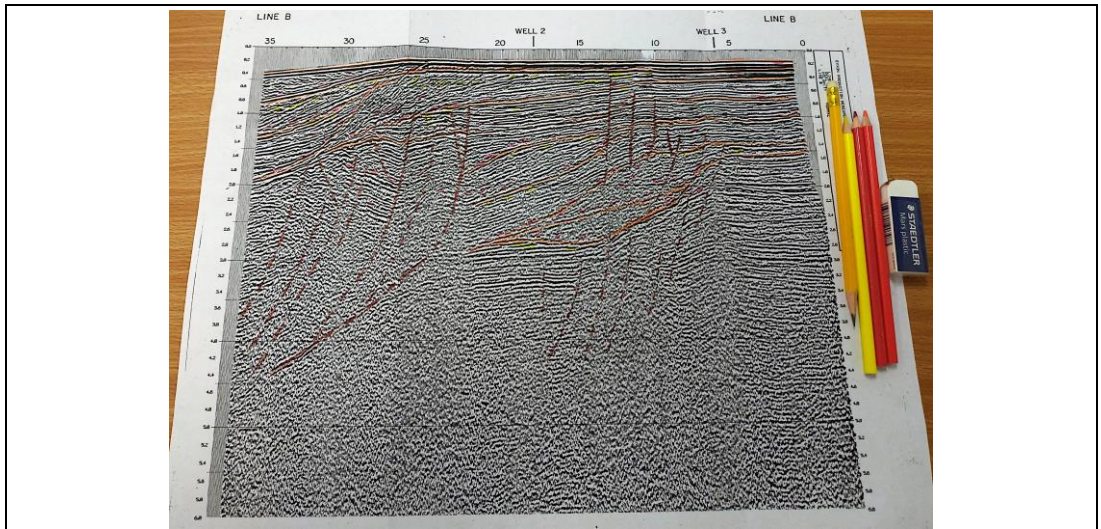


圖 6、斷層與各 operational seismic sequence 描繪完成後之震測剖面。本練習共針對三張震測剖面進行解釋，本處僅展示其中之一。

II. 第二日 (10/22)

本日課程延續首日之 Operational Seismic Sequence 震測資料解釋練習。在講解如何辨識聲波阻抗基盤、複反射信號的特徵與識別後，Pigott 教授要學員們在練習之震測剖面上標示出聲波阻抗基盤與識別可能的複反射，並且進行該三條交會震測資料的井下地質分層校正、修訂震測解釋、連接測線之解釋和修訂，以作為後續講課目的使用。本階段完成之成果如圖 7 所示。

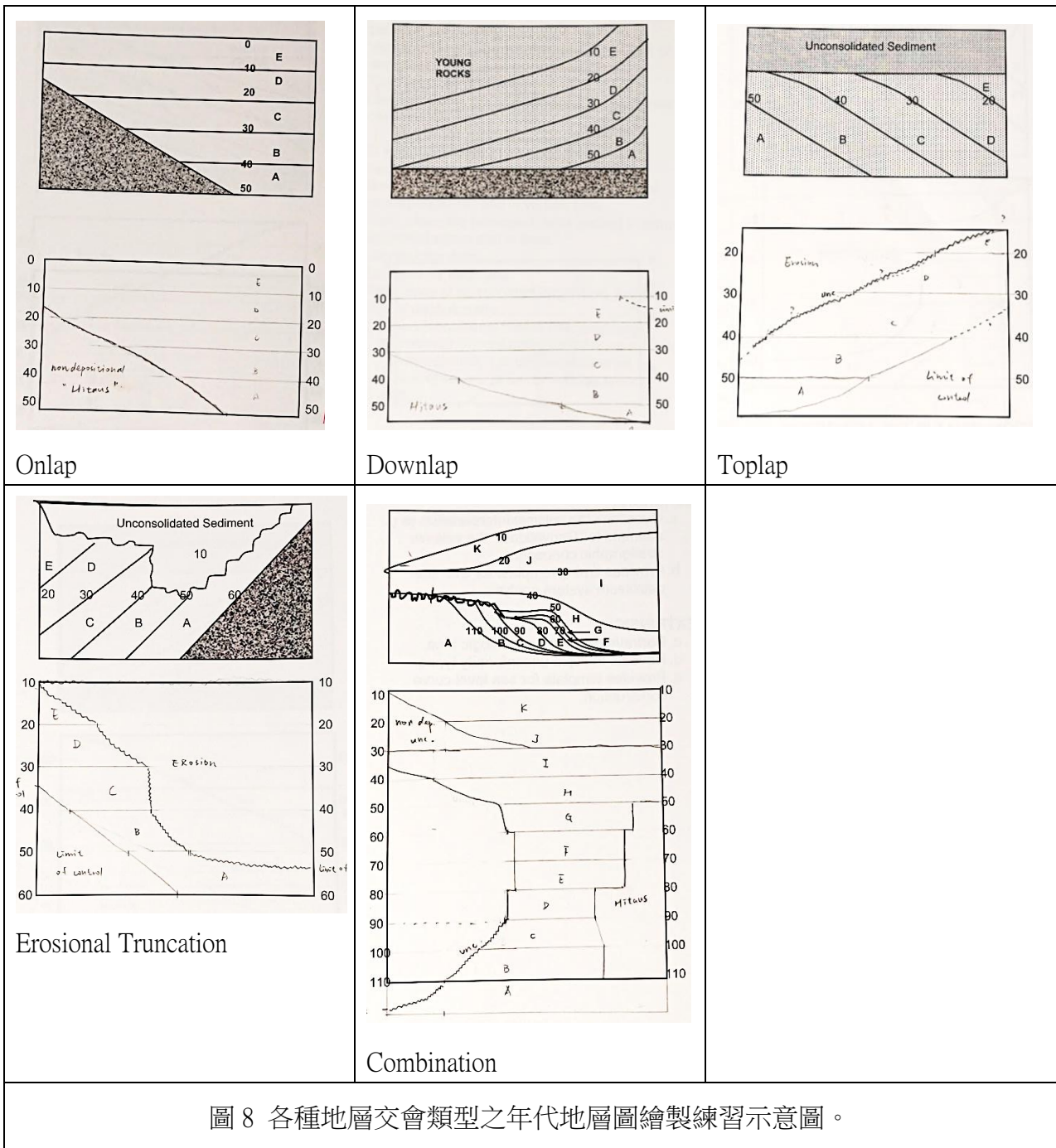


圖 8 各種地層交會類型之年代地層圖繪製練習示意圖。

III. 第三日 (10/23)

本日接續第二日之 Operational Seismic Sequence 震測資料解釋成果，將所解釋之剖面根據各 Operational Seismic Sequence 中之最古老及最年輕地層之位置、層序邊界類型 (不整合面或整合面) 及井下之定年結果，繪製成為年代地層圖。圖 9 即為所完成之年代地層圖。

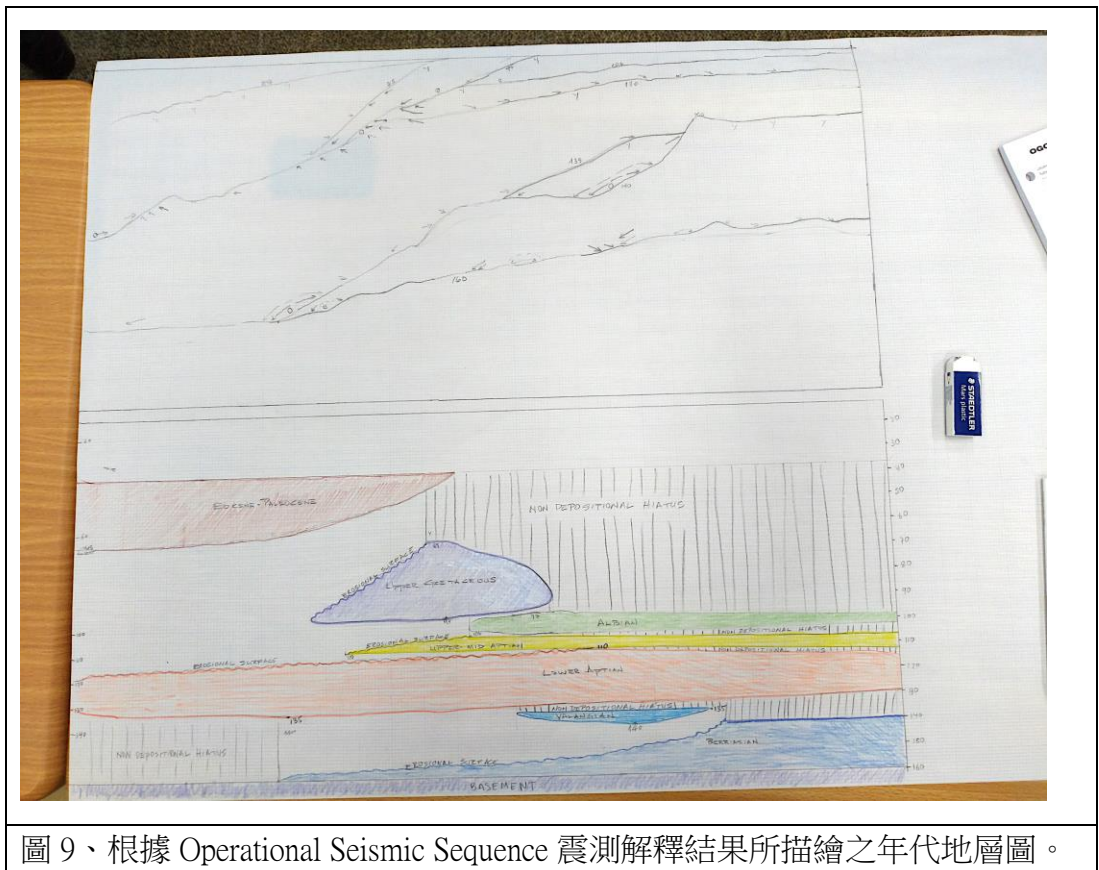


圖 9、根據 Operational Seismic Sequence 震測解釋結果所描繪之年代地層圖。

6. Sea Level Curves 章節。完成年代地層圖後，接續之學習目標即為如何根據 Operational Seismic Sequence 震測資料解釋和年代地層圖，繪製出相對海水水位面變化曲線。因此，在繪製相對海水水位面變化曲線前，須先了解相對海水水位面之概念。老師在本章節，以圖 10 講解海水水位面變化之概念。圖 10 中之碗狀空間可視為區域之盆地，該碗以一水管(如同連接至開放海洋的通道)與開放空間相連結(圖中之虛線立方體，可視為開放性海洋)。河流如同自外部輸送沉積物進入盆地堆積之途徑，一但沉積物經由河流搬運並堆積於盆地中時，將使得盆地可容納沉積物之橫向納積空間(Δ Horizontal Accommodation Modation Space)減小。盆地中增加之沉積物，使得盆地內被排出之水體經由管道，整體提升盆地與開放性海洋的海水位面，盆地之海水水位面升高，也同時地增加了盆地的垂直納積空間(Δ Vertical Accommodation Modation Space)。

需注意的是，無論是海水水位面上升(SL rise)、下降(SL fall)或穩定停滯(Still stand)，影響的都是垂直納積空間，並非可一對一的對應到濱線的 Transgression、Regression 或 Stationary 變化，兩者不可畫上等號。Transgression、Regression 與 Stationary 指稱的僅是橫向納積空間的變化。事實上，在海平面穩定上升的情

況下，不同的沉積物供應量即可分別造成 Transgression、Regression 與 Stationary 之現象(圖 11)。

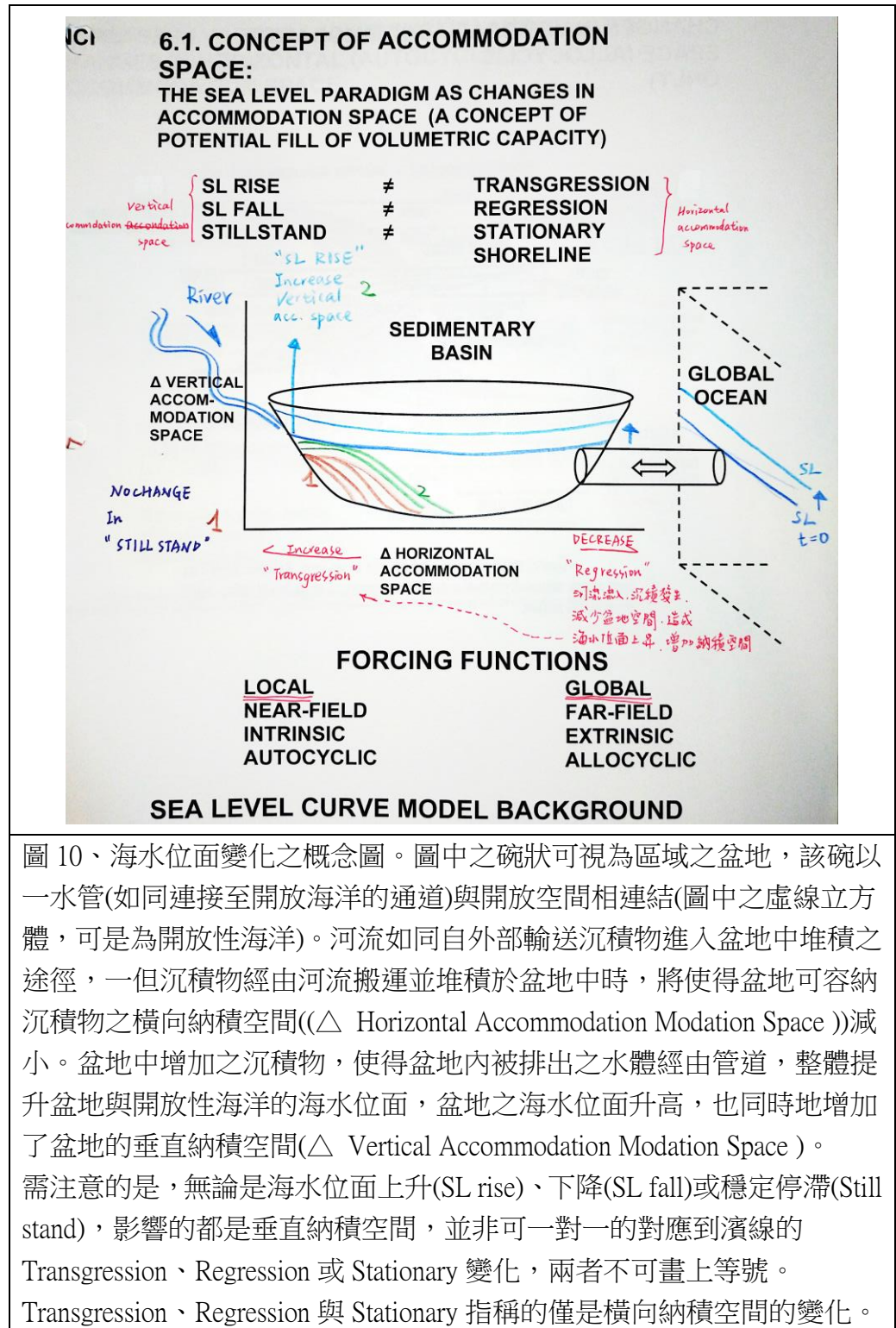


圖 10、海水位面變化之概念圖。圖中之碗狀可視為區域之盆地，該碗以一水管(如同連接至開放海洋的通道)與開放空間相連結(圖中之虛線立方體，可是為開放性海洋)。河流如同自外部輸送沉積物進入盆地中堆積之途徑，一但沉積物經由河流搬運並堆積於盆地中時，將使得盆地可容納沉積物之橫向納積空間(Δ Horizontal Accommodation Modation Space)減小。盆地中增加之沉積物，使得盆地內被排出之水體經由管道，整體提升盆地與開放性海洋的海水位面，盆地之海水位面升高，也同時地增加了盆地的垂直納積空間(Δ Vertical Accommodation Modation Space)。需注意的是，無論是海水位面上升(SL rise)、下降(SL fall)或穩定停滯(Still stand)，影響的都是垂直納積空間，並非可一對一的對應到濱線的 Transgression、Regression 或 Stationary 變化，兩者不可畫上等號。Transgression、Regression 與 Stationary 指稱的僅是橫向納積空間的變化。

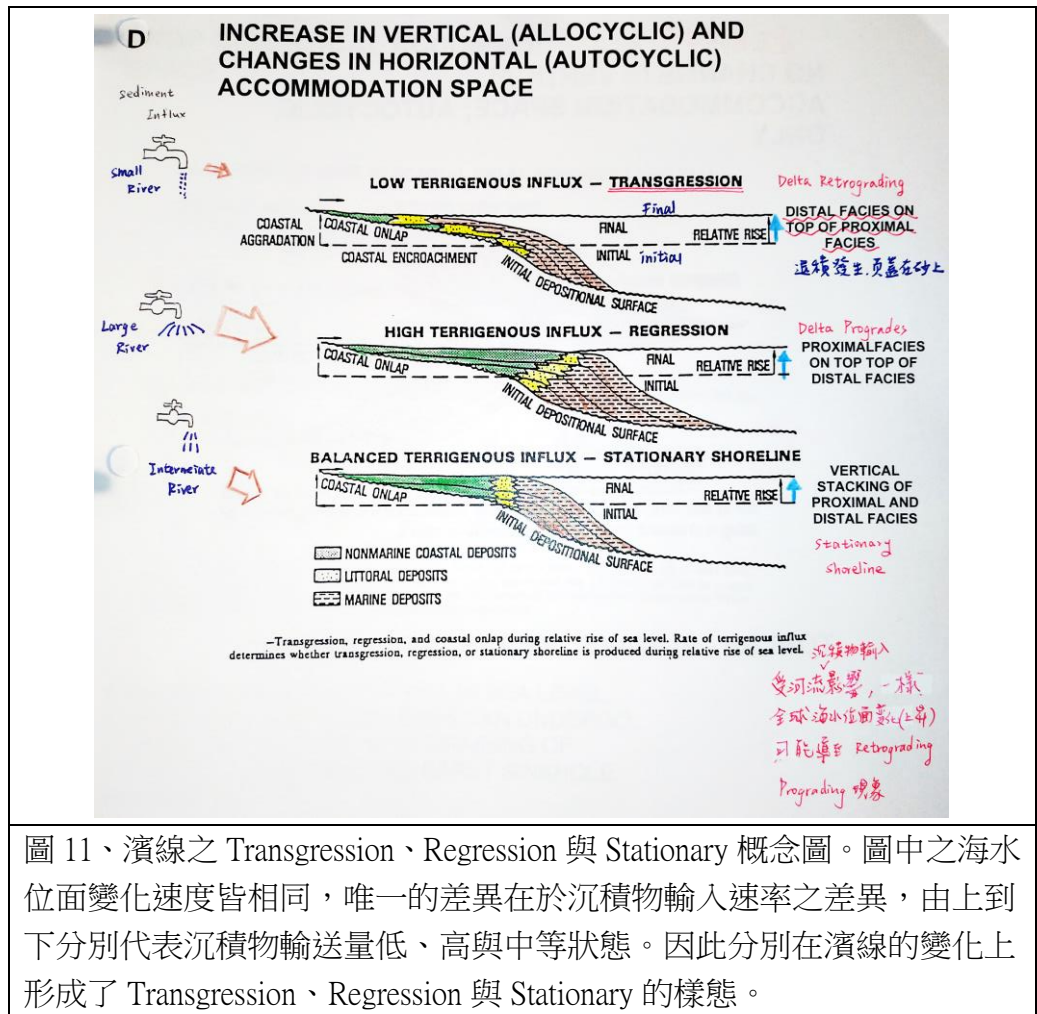


圖 11、濱線之 Transgression、Regression 與 Stationary 概念圖。圖中之海水水位面變化速度皆相同，唯一的差異在於沉積物輸入速率之差異，由上到下分別代表沉積物輸送量低、高與中等狀態。因此分別在濱線的變化上形成了 Transgression、Regression 與 Stationary 的樣態。

除了海水水位面穩定上升的情況外，當海水水位面相對穩定不變時(Still stand，代表垂向納積空間不變)，所形成的濱線稱為 Top lap。老師特別強調，當有 Top lap 現象出現時，代表沉積物所沉積之盆地僅受到自循環序列(Autocyclic)之影響，不受外成循環(Allocycle)的作用，且該沉積時期之海水水位面絕對是處於 Still stand 狀態(圖 12)。

此外，當海水水位面下降時，依據下降速度可區分為急遽下降與漸進下降等兩種不同的模式。圖 13(a)代表海水水位面急劇下降之狀況，圖 13(a)中編號 6 沉積物包之底界即為發生海水水位面急劇下降之時間，在該海水水位面下降時期，於編號 5 及早期之沉積物包頂部因受侵蝕作用而產生不整合面，而 6 號沉積物包之濱線則覆蓋於此不整合面上，形成 Coastal onlap 現象。當海水水位面漸進下降時，則會發育出 Erosional Truncation 現象。若震測剖面上發現 Erosional Truncation，則該時期一定有海水水位面下降之作用。老師另外強調，若碳酸鹽岩發育之區域遭遇海水水位面下降時，往往會形成階梯狀的碳酸鹽岩礁體

(Forced regression 現象)，礁體後端若原本之潟湖相泥質沉積物，會於海水位面上下降後暴露受侵蝕，進而發育喀斯特地貌(如圖 13 最頂端之手繪圖示)。

一但知曉各個 operational seismic sequence 中地層最老與最年輕之位置、與上下不同 operational seismic sequence 交界之邊界類型、邊界年代後，即可整合 operational seismic sequence 震測解釋結果及年代地層圖繪製研究區域的相對海水位面變化曲線。相對海水位面變化曲線之縱軸為年代，橫軸為相對海水位面深度變化。較為特別的是，各 Operational Seismic Sequence 中最老與最年輕之地層在震測剖面上的深度差異，以及不同 Operational Seismic Sequence 間交會處的深度差異就是相對海水位面變化圖的橫軸變化(圖 14)。此部分實際練習完成的相會海水位面變化圖如圖 15 所示。

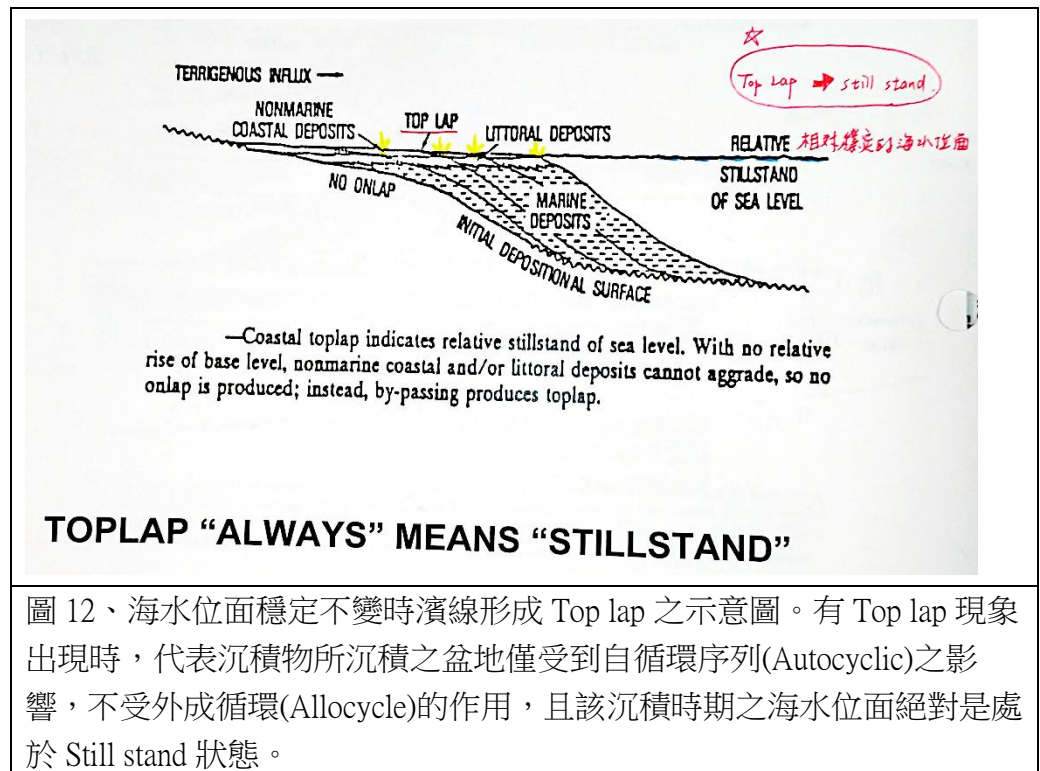


圖 12、海水位面穩定不變時濱線形成 Top lap 之示意圖。有 Top lap 現象出現時，代表沉積物所沉積之盆地僅受到自循環序列(Autocyclic)之影響，不受外成循環(Allocycle)的作用，且該沉積時期之海水位面絕對是處於 Still stand 狀態。

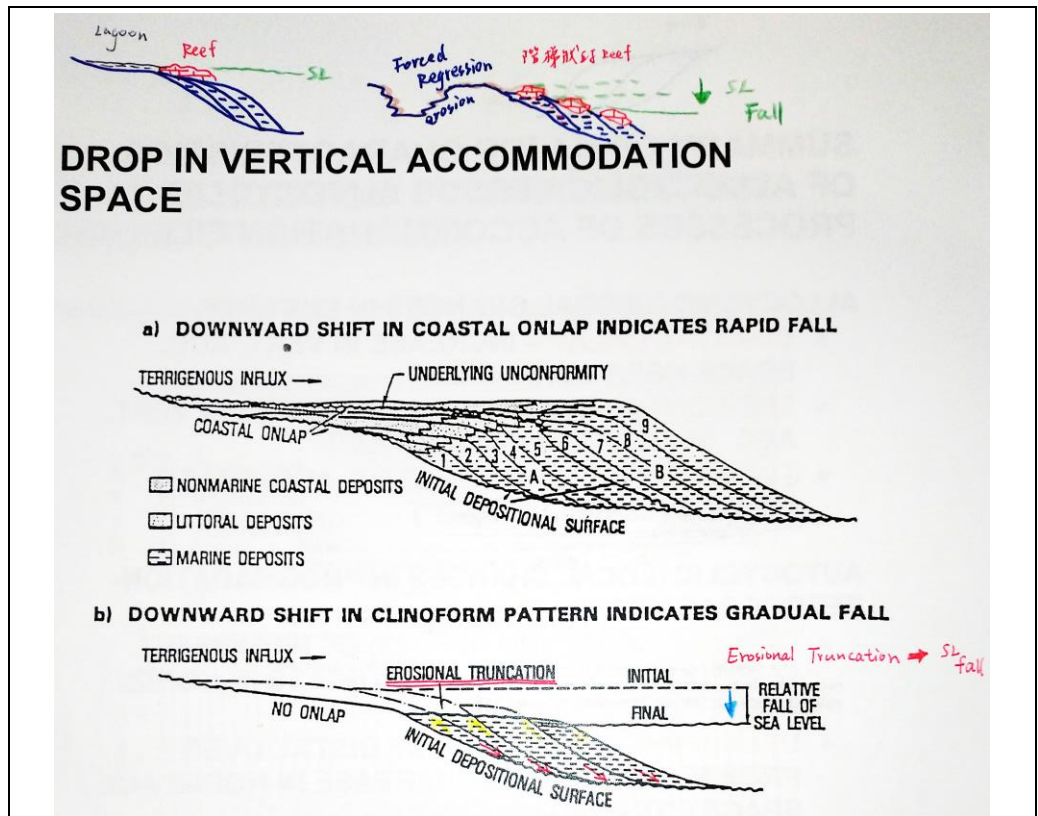


圖 13、海水位面下降時所形成之濱線形貌示意圖。海水位面依據下降速度可區分為急遽下降與漸進下降。圖(a)代表海水位面急劇下降之狀況，圖中編號 6 沉積物包之底界即為發生海水位面急劇下降之時間，在該海水位面下降時期，於編號 5 及早期之沉積物包頂部因受侵蝕作用而產生不整合面，而 6 好沉積物包之濱線則覆蓋於此不整合面上，形成 Coastal onlap 現象。若海水位面漸進下降(圖(b))，則會發育出 Erosional Truncation 現象。反之，若震測剖面上發現 Erosional Truncation，則該時期一定有海水位面下降之作用。

* Observed Change in Maximum Vertical Accommodation Space

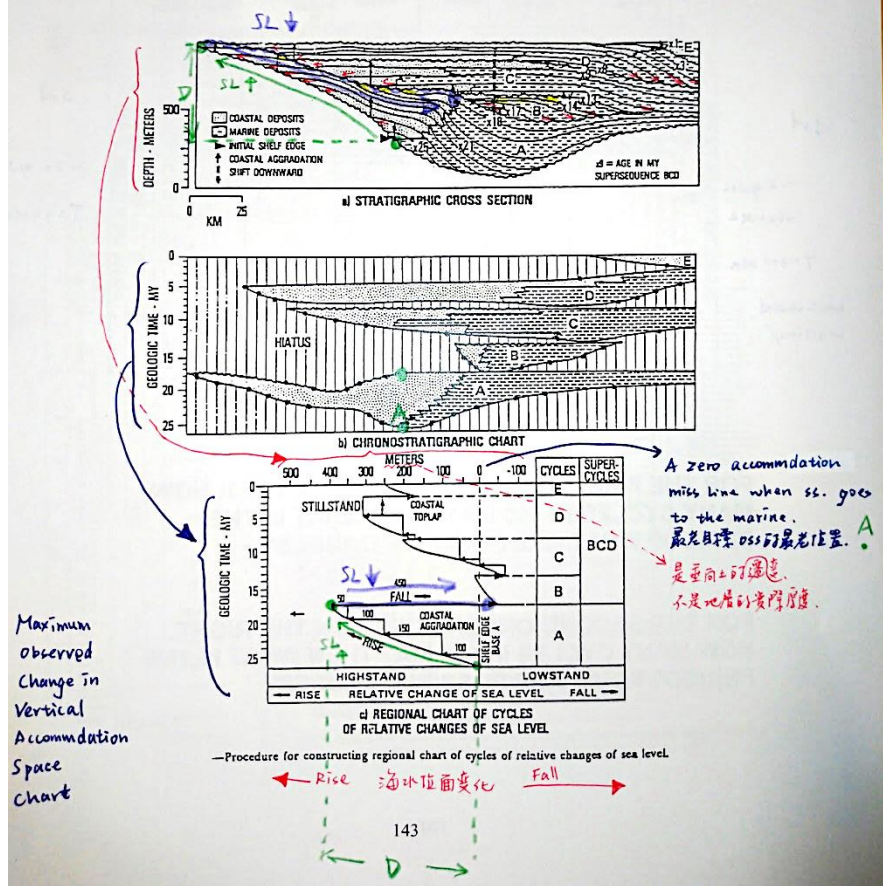


圖 14、某一區域之相對海水位面變化圖繪製示意圖。相對海水位面變化圖整合了 Operational Seismic Sequence 震測解釋結果和年代地層圖，其縱軸為年代，橫軸為相對海水位面深度變化。較為特別的是，各 Operational Seismic Sequence 中最老與最年之地層之深度差(代表遷變)，以及不同 Operational Seismic Sequence 間交會處的深度差就是相對海水位面變化圖的橫軸變化。

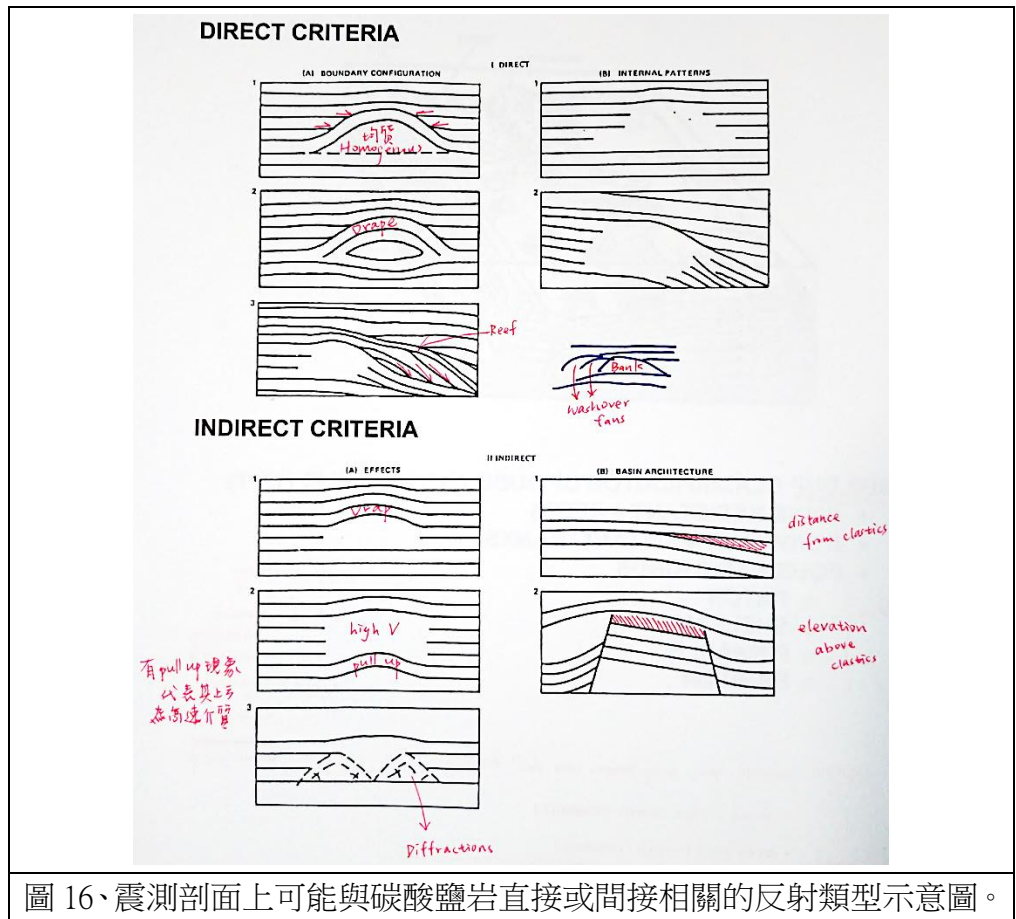
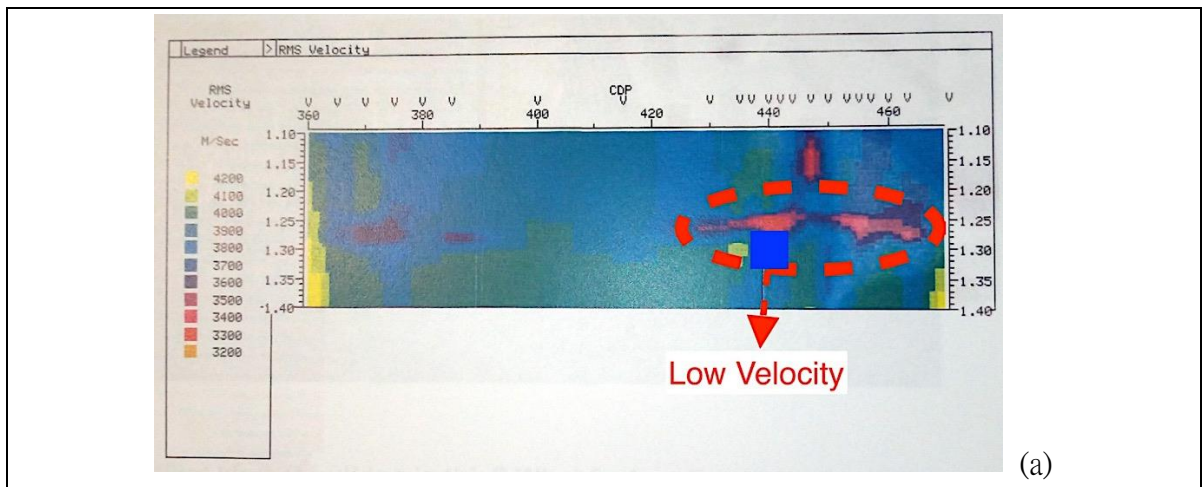
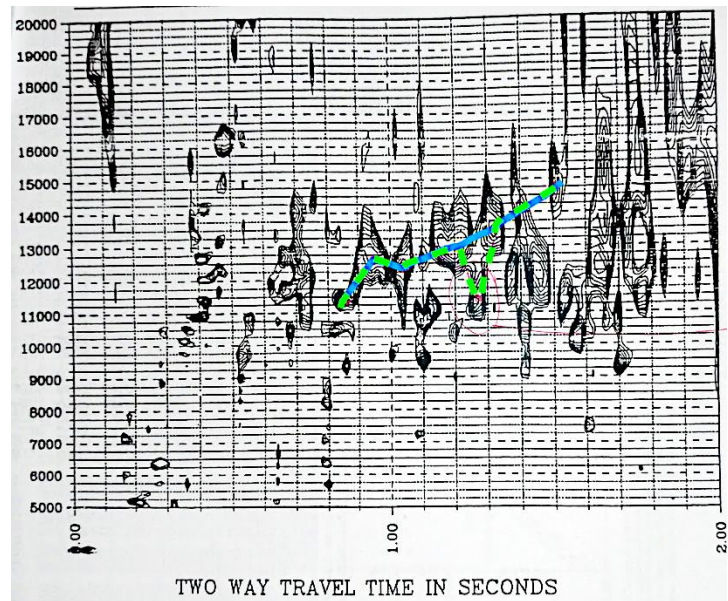


圖 16、震測剖面上可能與碳酸鹽岩直接或間接相關的反射類型示意圖。





(b)

圖 17、可能與含油氣碳酸鹽岩相關的速度剖面(a)和速度譜解釋(b)示意圖。(a)根據震測資料進行速度分析後所完成之速度剖面，可發現剖面中紅色虛線標示之區域唯一局部低速帶。Pigott 教授指出，此剖面是一個實際經由鑽井發現之儲油氣碳酸鹽岩構造，由於油氣的儲集，造成原本應為高速之碳酸鹽岩，在速度剖面上呈現低速異常帶。(b)震測資料之速度分析流程示意圖，橫軸為雙程走時，縱軸為不同的速度，當用於拉平雙曲線反射訊號之速度數值接近於實際地層速度數值時，則相關性會越高(黑色等值線越集中)。常見之速度分析往往會傾向越往深部速度越高之速度分析解釋，因而忽略的可能的低速異常體，而產生類似圖中藍色線段之解釋結果。但實際上，應該解釋的速度變化應如綠色虛線所示，標訂出低速異常。

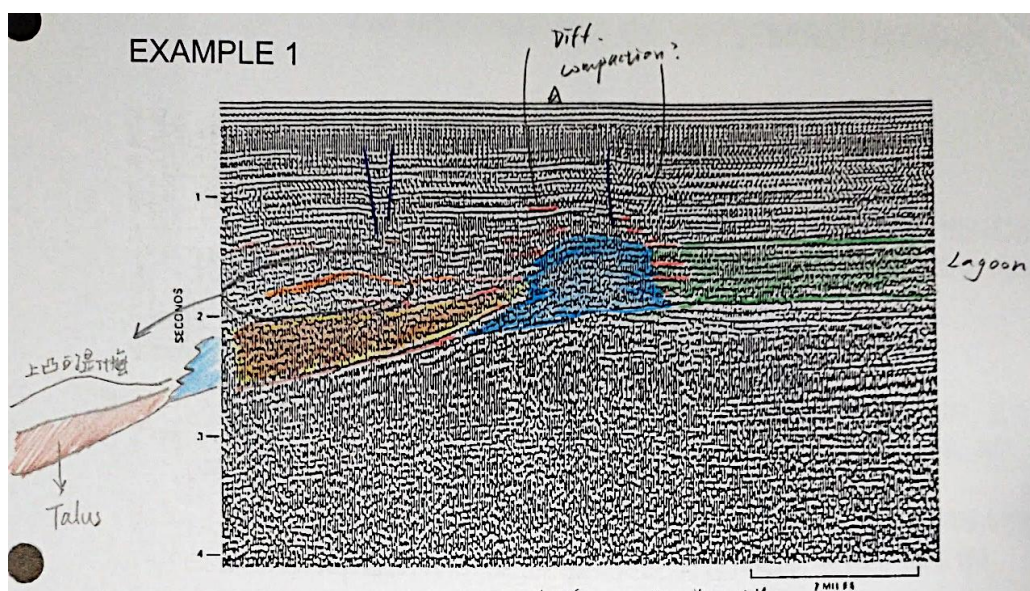


圖 18、碳酸鹽岩礁體之震測解釋練習結果。根據反射終止之位置、pull up 及 drap 等各種現象，進行 shelf margin 碳酸鹽岩礁體(藍色區域)、潟湖(綠色區域)與深水區(褐色區域)之識別。

IV. 第四日 (10/24)

本日課程一開始，Pigott 教授提供各個分組兩條位於北阿拉斯(Alaska)之陸域交會震測線，測線長度均約為 600 英里。各組需依據 Operational Seismic Sequence 解釋方法區分出震測基盤以上各震測層序。在完成兩震測剖面之震測層序解釋、交會線比對解釋結果、井下地質分層/震測剖面標示與解釋校正…等工作後，Pigott 要每個人接續領取兩條同樣位於北阿拉斯加的震測線，分別針對同研究區域不同剖面進行 Operational Seismic Sequence 解釋(圖 19)。並在完成解釋後，與一開始解釋之兩條剖面進行對比，觀察自行解釋之結果與共同進行之解釋結果是否相互吻合，若不同則修正之。藉由這樣的過程，讓學員們了解 operational Seismic Sequence 的徑向與橫向變化，以及更加熟悉震測層序解釋流程。

於描繪震測層序邊界時，Pigott 教授特別提醒，並非所有的層序邊界都會順著某一反射面延伸，而需視上下地層間介面是否具備顯著的波阻抗，其原理如圖 20 所示。在完成此部分練習後，根據所解釋之剖面現象，Pigott 教授整合第五章-Sea Level Curves 之概念，進行綜合解說。

首先介紹的是次層序(parasequence)之概念(圖 21)。當沉積物自河口往盆地加積時，接近物源端之沉積物顆粒以粗顆粒為主；遠離物源位置則以細顆粒沉積物為主。因為河流輸入之淡水密度較海水為低，因此淡水水體漂浮於鹽水體上。當淡水中的黏土顆粒遇到海水時，受到海水中的鹽分影響產生了黏土顆粒的凝聚作用，因而往下沉降，形成泥質堆積。此一從粗顆粒至細顆粒沉積的過程使得每個次層內存在縱向的岩性變化。而次層序間，則因為沉積環境的橫向變遷，形成了局部的不整合面。此不整合面稱為 Type II 不整合面。影響 Type II 不整合面的因素主要是自循環序列，此與受外成循環序列影響(相對海水位面的變化)所形成的 Type I 不整合面不同。外成循環序列是影響次層序組外部邊界最主要的因素，包含了 Type I 不整合面及其相對的整合面(圖 22)。

外成循環序列造成的海水位面升降，會形成不同的次層序組(parasequence set)，如 HST、LST 與 TST 等三種體系域，不同體系域之震測反射特徵皆有不同。因此，若藉由分析震測剖面上之反射信號特性，可推測不同體系域位置(圖 23)，並甚而輔助識別出有利的儲層位置，如低水位時期(LST)的盆底扇。

根據老師於課堂上展示之不公開資訊，基於儲油氣碎屑岩儲集層之沉積環境統計數據顯示(圖 24)，低水位時期的三角洲以及盆底扇之油氣藏比例顯高於其它類型的碎屑岩儲集層。因此，如何識別出低水位時期的三角洲與盆底扇是油氣探勘的一大目標，而 operational seismic sequence 研究方法正是協助分析、識別探勘有利儲集層之重要工具。

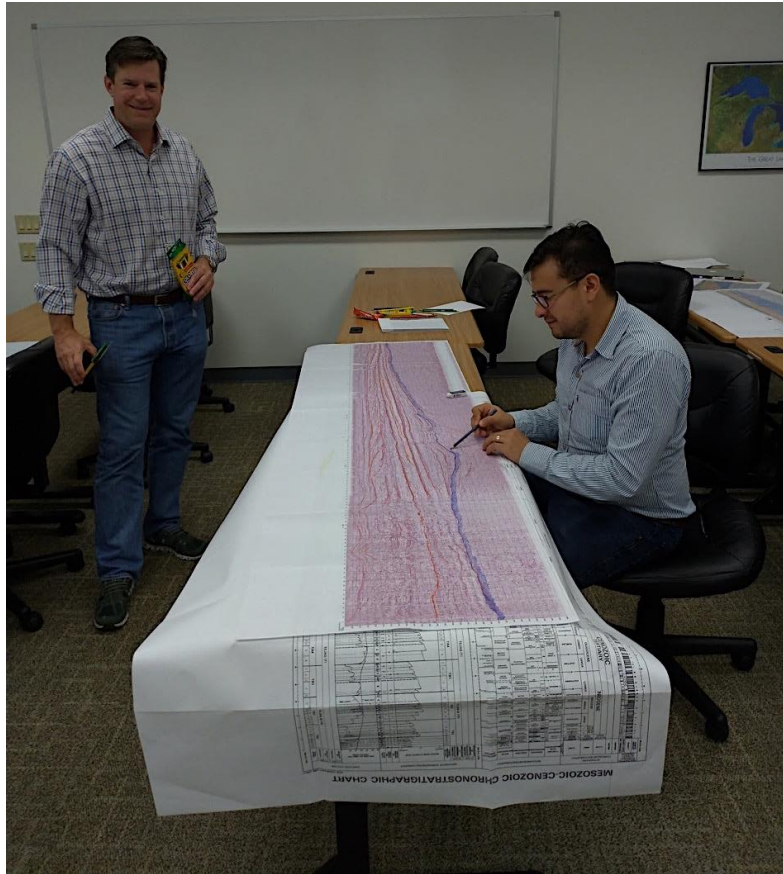


圖 19、進行阿拉斯加灣北坡長震測線之震測層序解釋的同組組員。剖面中橘色線段為解釋之層序邊界位置；紫色線段為解釋之聲波阻抗基盤位置。

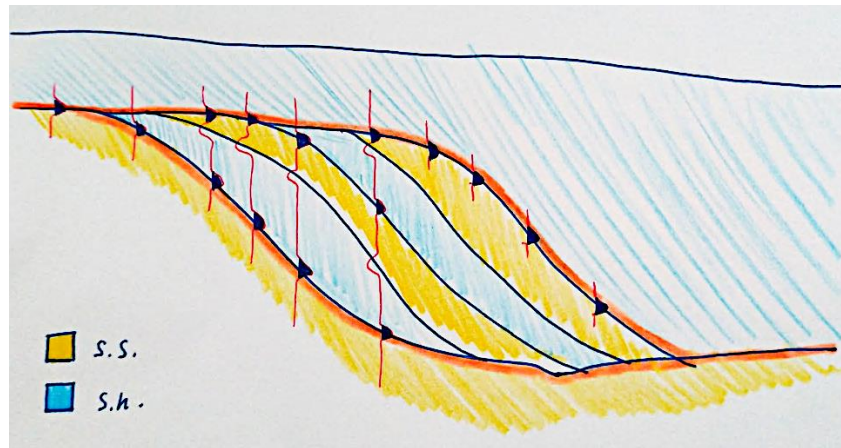


圖 20、層序邊界與反射介面反射特性解釋示意圖。圖中黃色區塊代表砂層；淺藍色區塊代表頁岩，橘色線段所圈畫之部分為單一個 operational Seismic Sequence 之範圍。觀察可發現，層序之邊界之反射極性不相同現象具有其物理意義。

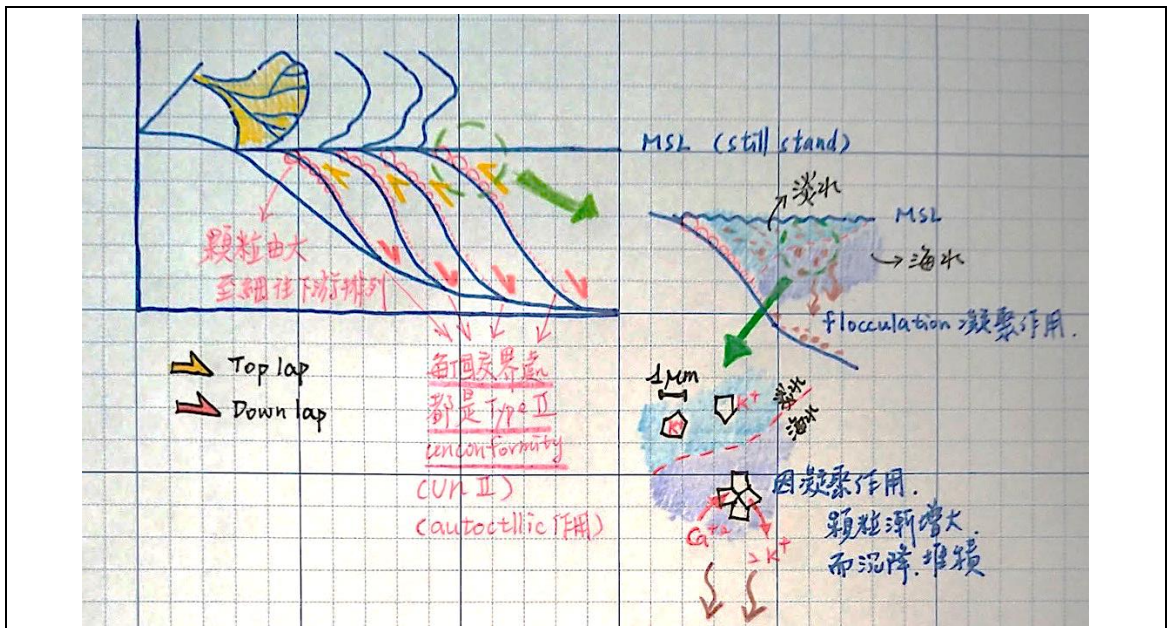


圖 21、次層序成因介紹示意圖。Operational seismic sequence 中，各次層序 (parasequence) 沉積時，接近物源端之沉積物顆粒以粗顆粒為主；遠離物源位置則以細顆粒沉積物為主。因為河流輸入之淡水密度較海水為低，因此淡水水體漂浮於鹽水體上。當淡水中的黏土顆粒遇到海水時，受到海水中的鹽分影響產生了黏土顆粒的凝聚作用，因而往下沉降，形成泥質堆積。此一從粗顆粒至細顆粒沉積的過程使得次層序內存在縱向的岩性變化。而次層序間，則因為沉積環境的橫向變遷，形成了局部的不整合面。此不整合面稱為 Type II 不整合面。

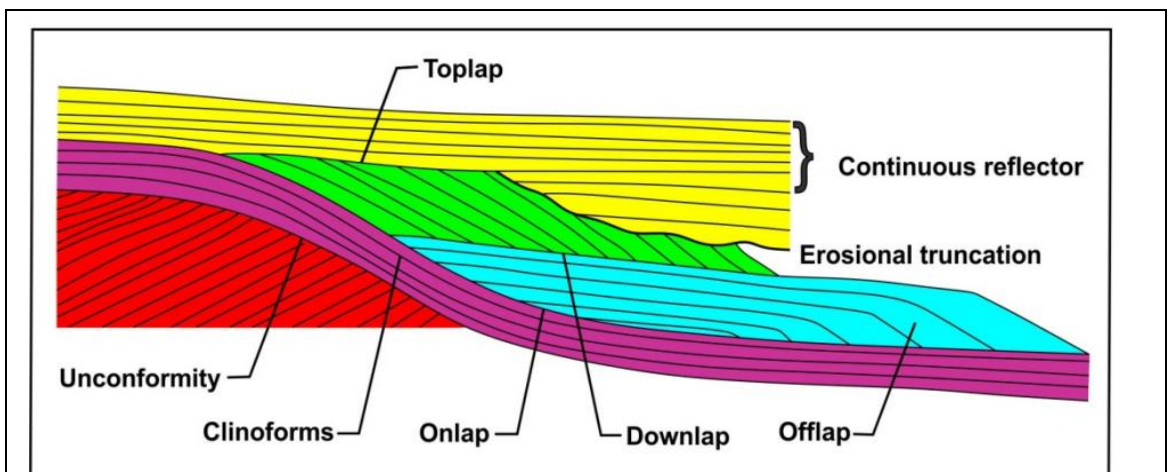
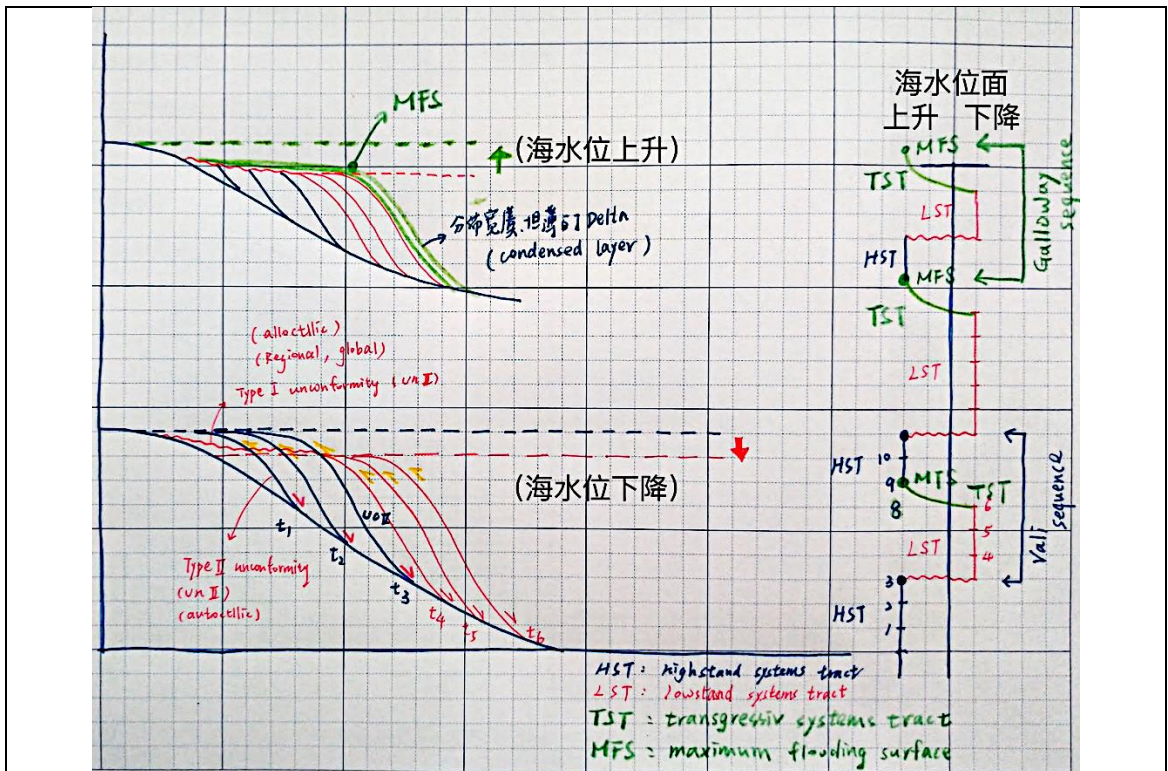
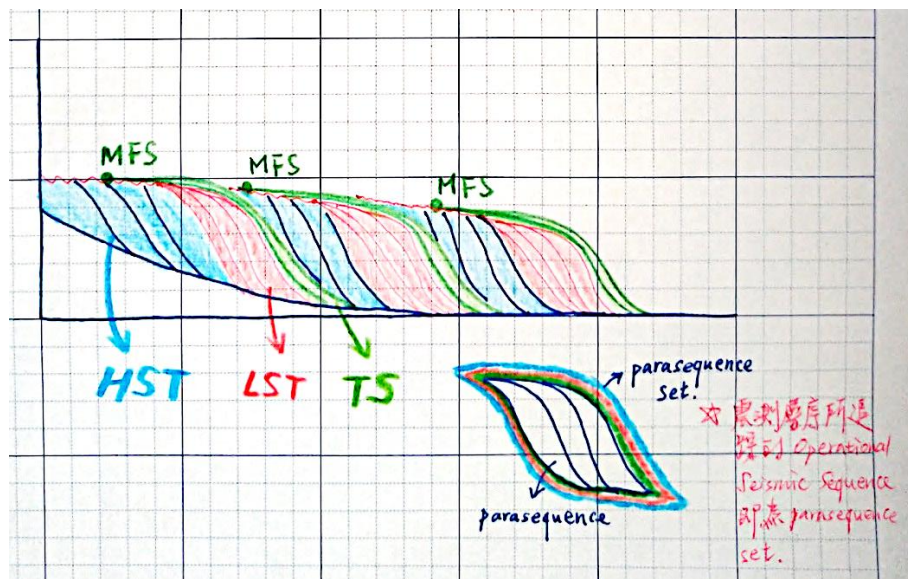


Figure-3. The differences in reflectors patterns and their relationship on seismic profile (Nicholas, G. 1999).

圖 22、不同的反射形貌與相互交接關係示意圖。Operational seismic sequence 解釋最為關鍵之重點即為正確的識別出震測資料中，如此圖所述之各反射形貌與交接關係。圖中不同顏色區塊分別代表了不同的次層序組。



(a)



(b)

圖 23、海水位面變化與次層序組之關係。海水位面升降時會形成不同的次層序組 (parasequence set), 如(a)所示。因此, 藉由分析震測剖面上所見到之反射信號特性, 可作為推測不同體系域(HST、LST、TST)與相對海水位面變化之根據(圖(b)與圖(a)右側之相對海水位面變化曲線), 甚至輔助識別出有利的儲層位置, 如 LST 時期的盆底扇。

World Oil Reserves			
clastic system			
Lowstand Delta	217	45 %	⇒ the best seal
Valley / canyon fill	97	19 %	
Basin Floor fan	96	21 %	
Highstand	48	10 %	
Transgressive	24	5 %	

圖 24、老師個人提供之儲油汽碎屑岩儲集層之沉積環境統計。由於該統計資料不允許流出，因此本圖片內容抄寫自老師資料。由數據可知，低水位時期的三角洲、盆底扇是極佳的探勘標的。

V. 第五日 (10/25)

本日為此訓練課程最後一天。Pigott 教授接續前一日所練習的北阿拉斯加震測解釋成果，講解要如何依據震測剖面上之橫向與縱向變化之次層序組，藉由震測反射訊號特徵差異識別出所屬之體系域？要怎樣進行震測相分析與推測可能的沉積環境？基於構造解釋和沈積環境分析結果的預計井位選定？…等等問題。

8. Siliciclastic Sequence 章節部分。根據統計資料(圖 24)，LST 時期之盆底扇是最具探勘潛能的碎屑岩儲集層，因此老師主要以盆底扇為例，講解海水水位面變化造成之體系域差異，以及海底扇的組構變化(如圖 26 與圖 27)。高水位體系域(HST)時期，盆底遠離沈積物供應來源，盆底扇之組構以泥質沈積物為主；由高水位體系域進入低水位體系域(LST)後，海水水位面降低，海底水道侵蝕營力增加，因此於高水位體系域之盆底扇頂部可能形成不整合面。由於盆底接近沈積物供應來源，因此低水位體系域時期之盆底扇以砂質為主；接續之進夷體系域(TST)時期，因海水水位面逐漸升高，盆底扇呈現如毛毯般廣泛分布的泥質扇體。且因為沉積速度緩慢，使得覆蓋在 LST 時期之砂質盆底扇上的泥質沉積物形成了凝聚地層段。凝聚

地層段可作為砂質盆底扇之蓋岩，其在震測剖面上的特徵為分佈寬廣、連續性之強振幅。

除了盆底扇外，三角洲亦是重要的儲油氣層，其組構會因波浪、河水或潮汐...等主要環境營力的差異，而形成不同的三角洲類型(圖 27)。此三種不同的三角洲類型，除了平面分佈上的差異外，在橫向的加積形態上亦有所不同。波浪主導的三角洲之加積形貌為傾斜狀(Oblique)；河流營力主導之三角洲的加積形貌為 S 型(Sigmoid)；潮汐為主營力之三角洲之加積型態則為覆瓦狀排列(Shingled)。各種型態可參考圖 28。

9. Seismic Facies Analysis and Paleoenvironmental Interpretation 章節部分。

震測相分析是基於不同形貌的震測反射信號特徵進行分類的研究方法，須先觀察 operational seismic sequence 之外部與內部特徵(圖 28(a))後，再以震測相分析之 ABC 法區分區不同的震測相類別。ABC 法主要考慮次層序組的上、下界交接形貌與內部反射形態，分別予以代碼組合(圖 28(b))。但並非不同的 ABC 代碼組合就可直接對應到不同類型的沉積環境。需搭配反射信號強度共同考慮可能的沉積環境(如圖 29)。

以三角洲為例，不同的三角洲部位(delta plain/pro delta, distributary mouth bar(DMB)/delta front)可能皆會出現相同的 ABC 代碼組合，但若將反射信號振幅強度納入綜合判斷，則可解釋出不同代碼組合位置可能的沈積環境。

本課程最後一項練習，即針對北阿拉斯加區域之 operational seismic sequence 解釋結果，針對某一分佈廣泛的 LST 體系域地層，進行構造圖的描繪，並結合震測相分析結果，綜合討論如和選定預計井位(圖 30)。如圖 30 之流程，雖然 LST 體系域地層於圖 30(a)中之 A 處有一局部高區，但考慮古沉積環境分析結果，最佳之儲集層並非位於構造高區，因此較有利之探勘井位應為圖 30(d)之 Distributary mouth bar 位置。在此練習的過程中，Pigott 教授提醒佈井的關鍵在於，井位絕對要座落於側線上，否則鑽探結果無法與震測資料相對比。尤其是鑽探結果為乾井時，無法結合震測資料及井測資料進行失敗分析，進而難以於同一區域之後續探勘工作降低探勘風險。

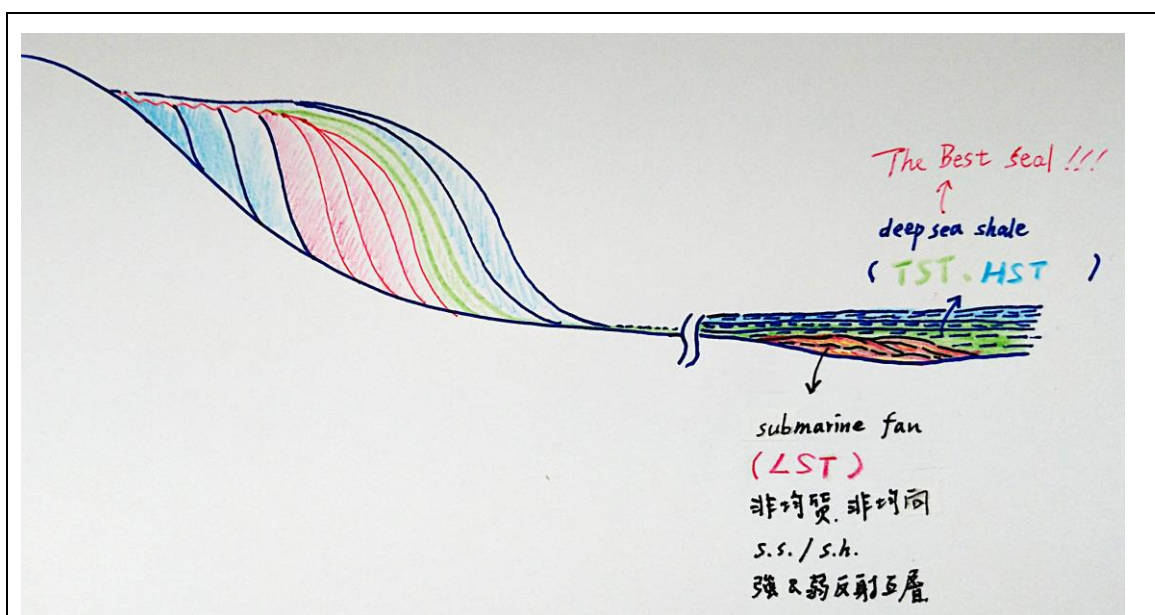


圖 25、LST 時期之盆底扇作為有利探勘目標之儲蓋組合示意剖面圖。低水位時期，因相對海水位面降低，使得輸入盆底之沉積物砂質含量增高，於盆底形成以砂質為主的盆底扇。當 LST 時期結束，海水位面上升進入 TST 時期後，盆底因遠離沉積物源，使得沉積物主要以泥質為主，且因為沉積速度緩慢，使得覆蓋在 LST 時期之砂質盆底扇上的泥質沉積物形成了凝聚地層段。凝聚地層段可作為砂質盆底扇之蓋岩，其在震測剖面上的特徵為分佈寬廣、連續性之強振幅。

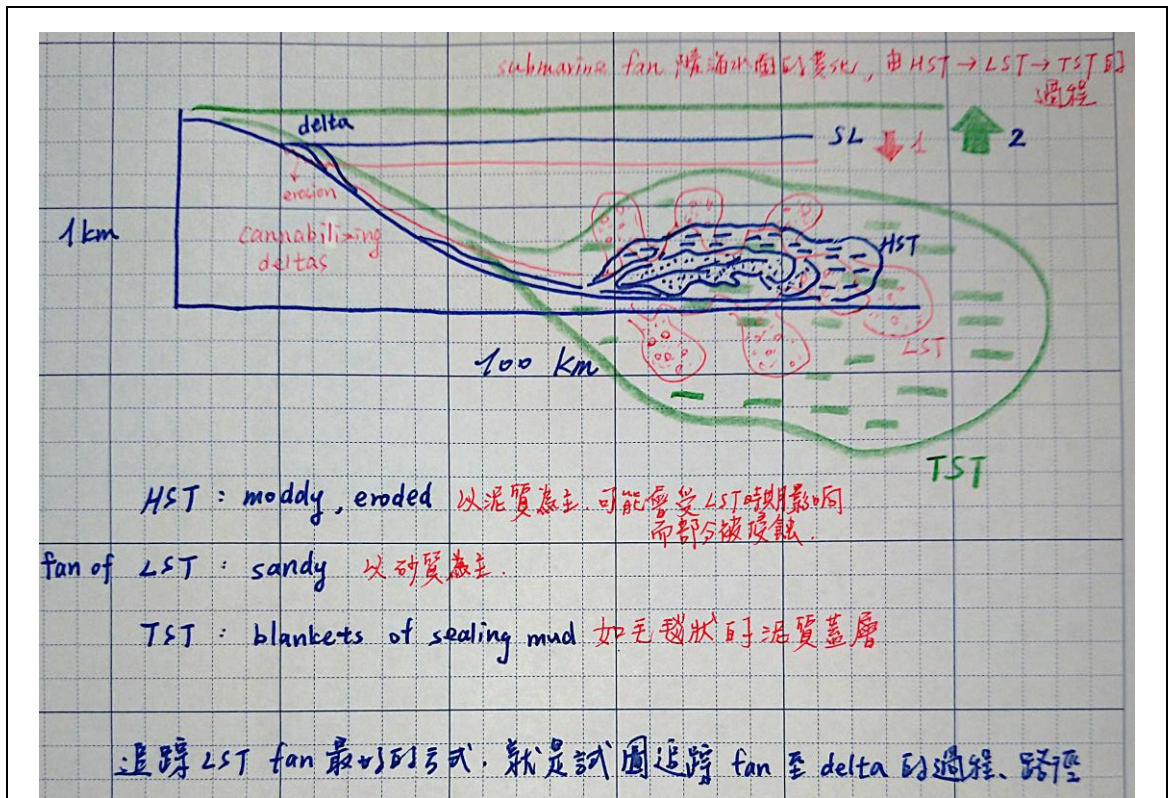


圖 26、HST 至 TST 時期，盆底扇變化示意圖。因相對海水水位造成沉積物供應距離與沉積物顆粒的改變，於 HST 時期形成之盆底扇主要以泥質為主，其最頂部可能受 LST 時期影響，而有侵蝕面存在；LST 時期之盆底扇則以砂質為主；TST 時期之盆底扇則以泥質為主，但外型毛毯般廣泛分布。

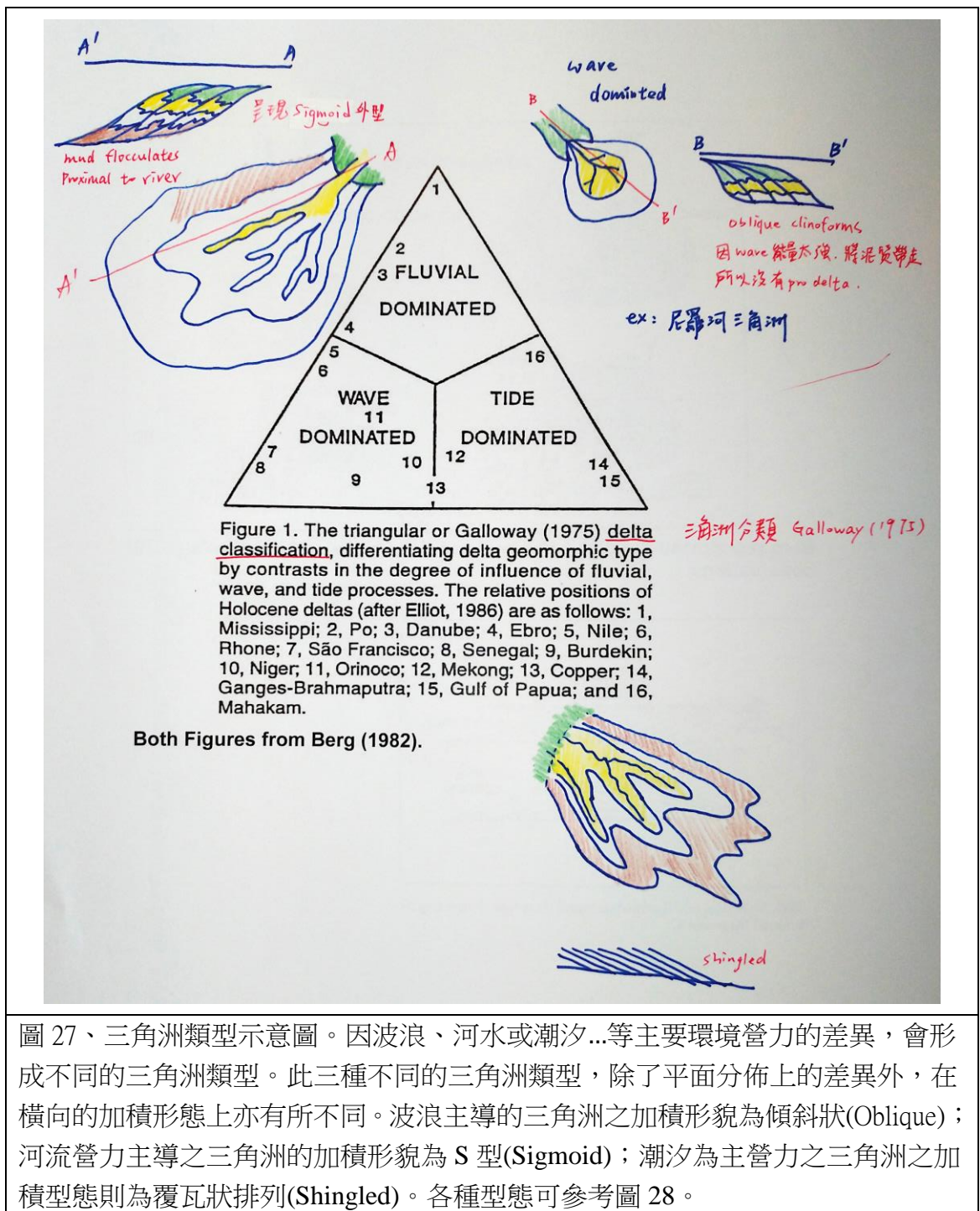


圖 27、三角洲類型示意圖。因波浪、河水或潮汐...等主要環境營力的差異，會形成不同的三角洲類型。此三種不同的三角洲類型，除了平面分佈上的差異外，在橫向的加積形態上亦有所不同。波浪主導的三角洲之加積形貌為傾斜狀(Oblique)；河流營力主導之三角洲的加積形貌為 S 型(Sigmoid)；潮汐為主營力之三角洲之加積型態則為覆瓦狀排列(Shingled)。各種型態可參考圖 28。

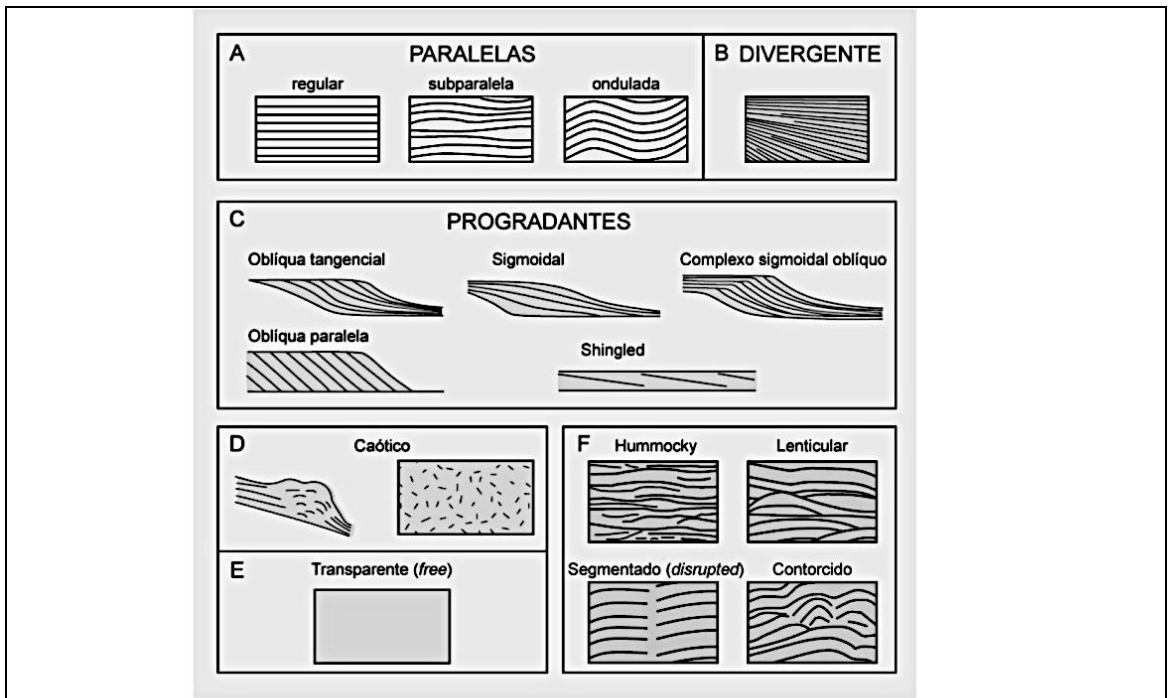
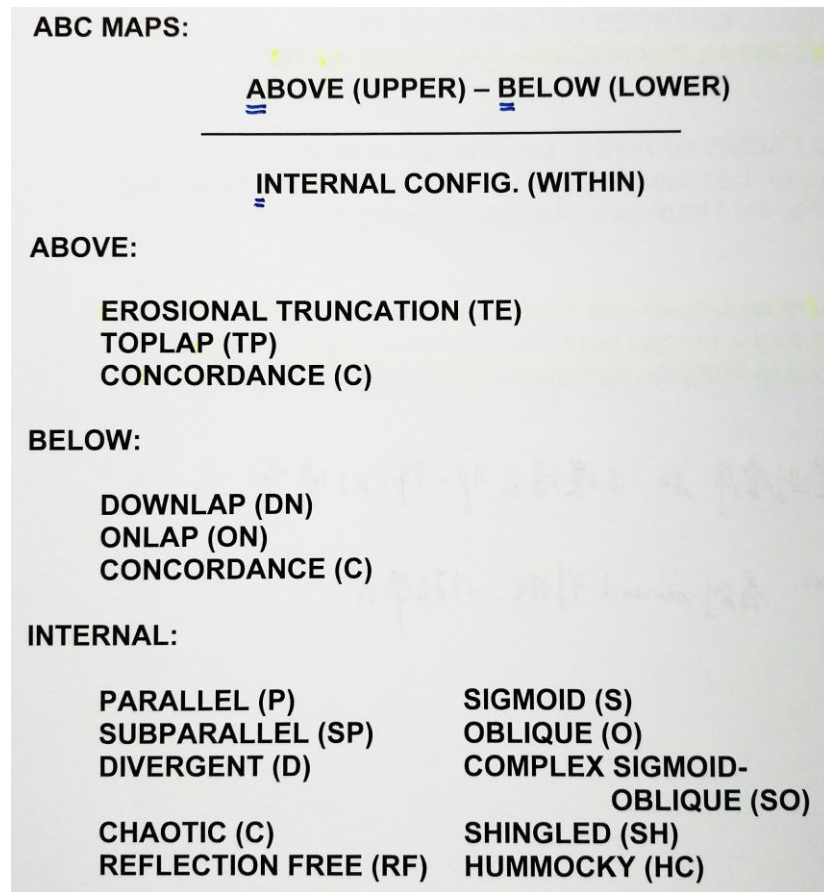


Fig. 21. Diagrams showing seismic reflection configurations of within a seismic sequence (modified from Mitchum et al., 1977 in Barboza, 2005).

(a)



(b)

圖 28、震測相之各形貌樣態與形貌代碼、ABC 分析方法示意圖。根據次層序組上界、下界與內部反射形貌(如圖(a))可結合震測相分析之 ABC 法進行分類，但並非不同的 ABC 代碼組合就可直接對應到不同類型的沉積環境。需搭配反射信號強度共同考慮可能的沉積環境(如圖 29)。

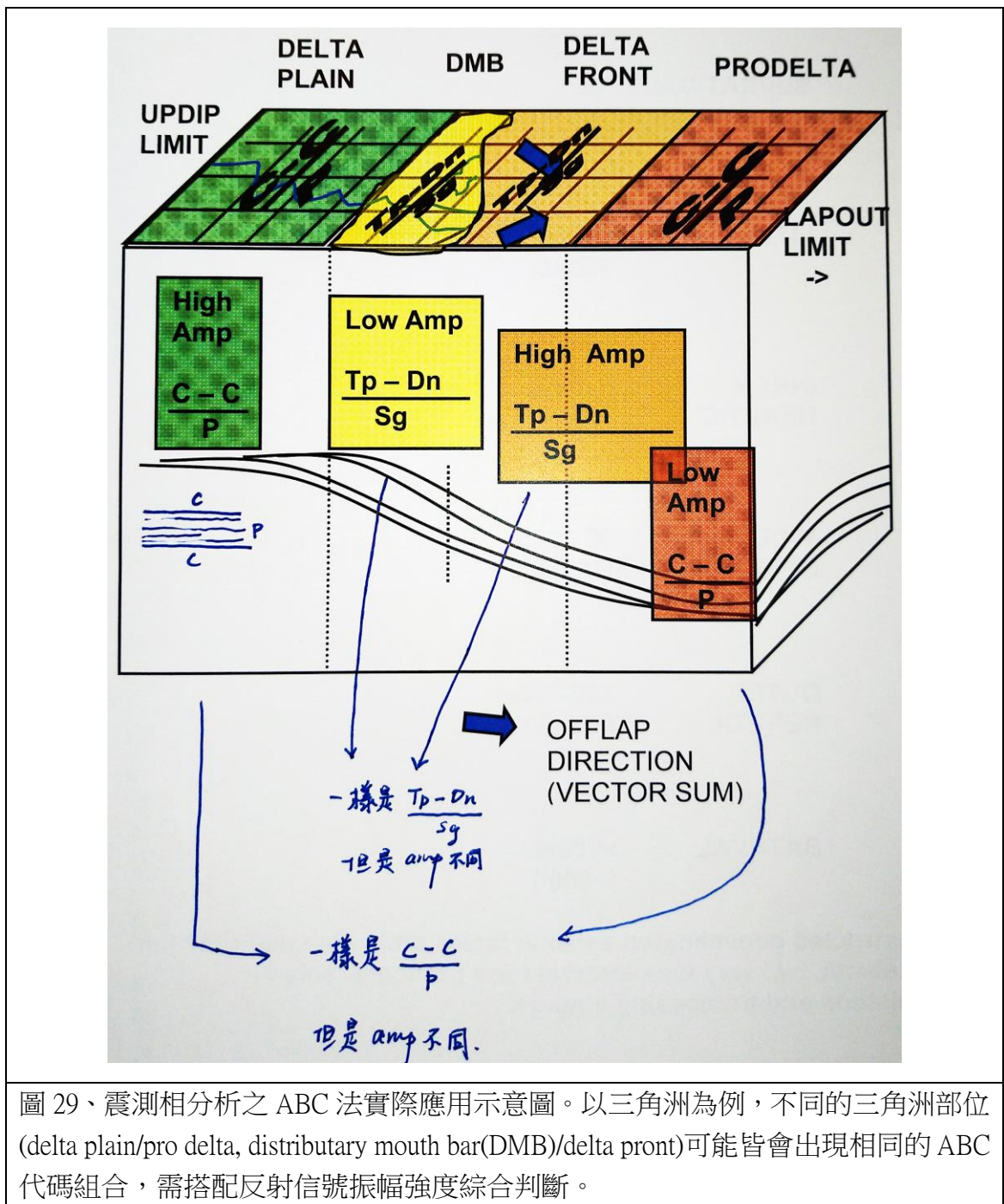


圖 29、震測相分析之 ABC 法實際應用示意圖。以三角洲為例，不同的三角洲部位 (delta plain/pro delta, distributary mouth bar(DMB)/delta pront)可能皆會出現相同的 ABC 代碼組合，需搭配反射信號振幅強度綜合判斷。

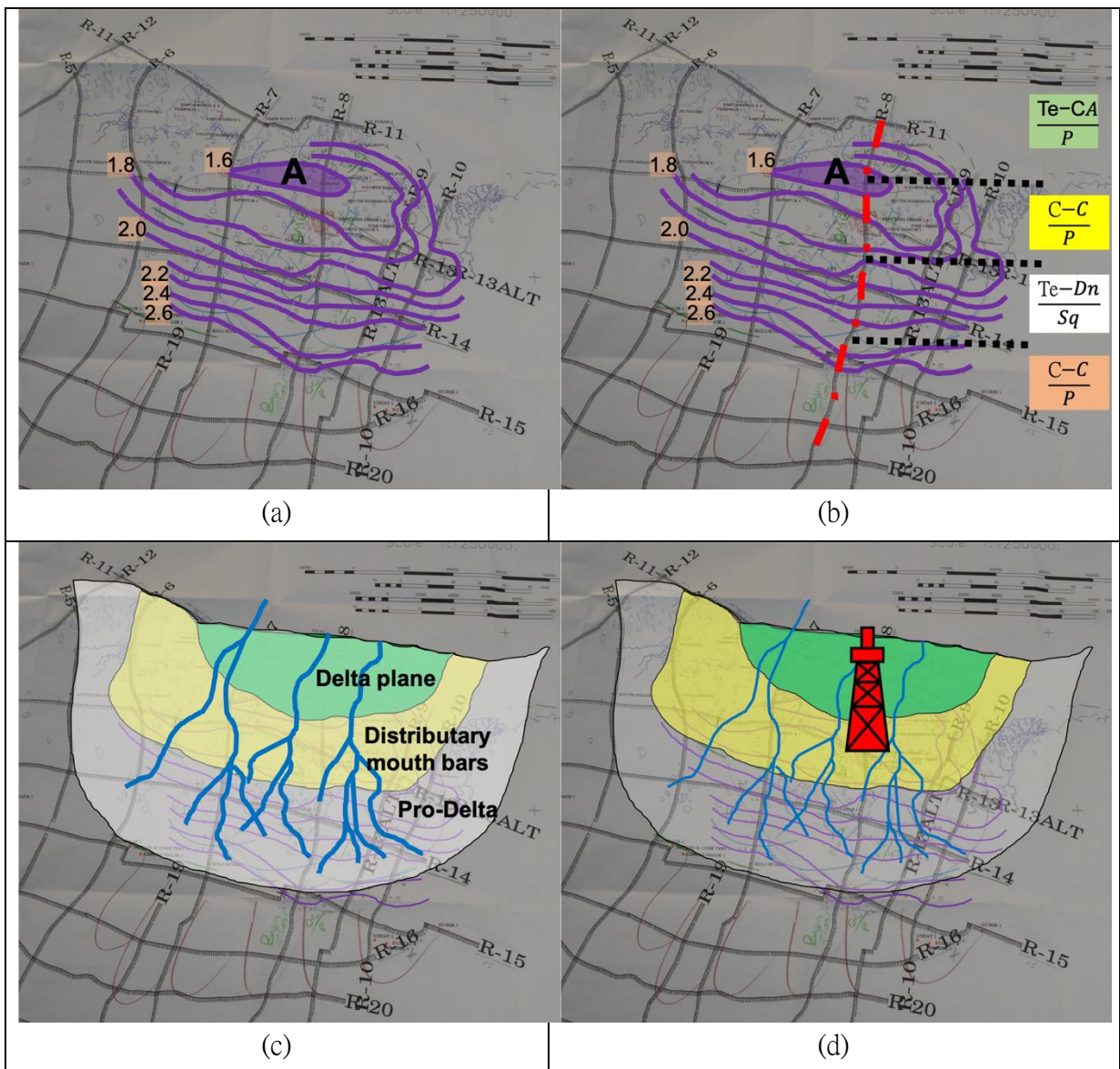


圖 30、結合震測層序解釋與震測相分析結果，綜合標定預計井位示意圖。此一係列圖示為紙本描繪後，再行拍照修改、製作練習流程之示意圖。如圖(a)所示，先完成侏羅系 Sag River 地層頂部(形成於 LST 時期)追蹤後，描繪出構造等值線圖。觀察構造圖可發現於 A 處有一局部高區。(b)沿著震測剖面分析該 LST 時期形成之次層序組各部位的沉積相組合代碼。(c)根據沉積相組合代碼，以及整合不同交會測線之古水流可能流向資訊，判斷各區域所屬古沉積環境。(d)綜合考慮構造與沉積環境可能的儲集岩特性差異後，決定有利的鑽探位置。

三、 具體成效

藉由參與本次震測層序入門課程，認識了 operational seismic sequence 的震測解釋方式、結合交會測線對比及井下分層繪製年代地層圖、綜合震測解釋及年代地層圖結果繪製相對海水位面變化曲線、次層序組邊界識別、震測相分類、古沉積環境推測…等分析工作的基本運用方式。雖然僅是極為基礎的認識，但是相信此些認識可助於往後研究區域石油系統的解讀或礦區評估工作。

四、 心得與建議

本震測層序訓練課程主要講授震測層序解釋與分析所需具備的相關前置作業、資料、工作流程、圖表意義，以及如何根據震測層序解釋結果和年代地層圖繪製相對海水位面變化曲線；如何自次層序組分析結果區分出不同體系域；如何結合震測相分析與反射強度討論可能的沉積環境。但因本課程為 Pigott 教授所開設之震測層序基本課程，有關如何於具有複雜斷層作用的地區進行震測層序解釋？年代地層繪製需如何考慮斷層作用？相對海水位面變化曲線要如何考慮斷層因素而繪製？…等問題，均包含於進階之訓練課程中(課程名稱為：ADVANCED SEISMIC STRATIGRAPHY: A SEQUENCE-WAVELET ANALYSIS EXPLORATION-EXPLOITATION WORKSHOP - ADS)。

近來幾年本所工作多集中於台灣西南海域的探勘，該區域經歷複雜的沈積史與構造事件影響。每當討論儲集層優劣時，往往僅限於概念上的猜測，事實上並不知道各體系域之有利探勘方向/位置。因此，如何有條理地將斷層的影響共同應用至研究區域的震測層序、震測相分析工作，應該是台灣西南海域研究之重要課題。震測相之應用不限於本國，基於近期所接觸之阿拉伯地區碳酸鹽岩儲集層而言，可發現跟該地區有關之許多研究，亦著力於震測層序分析及沈積環境探討上。雖然碳酸鹽岩之震測相分析工作可能與碎屑岩有極大的差異，但是震測層序的重要卻由此可看出。

因此，若後續有相關的出國計畫，建議派訓人員可以參加進階課程，以攜回進階課程之知識。並建議參訓前，先行預習基礎的層序地層、震測資料處理、震測相分析、年代地層圖與相對海水位面分析技巧…等概念，則實際參訓時應會較為容易融入課程氛圍與理解 Pigott 教授所欲傳達之觀念。

五、 附錄(訓練機構與課程過程照片)



PetroSkills 休士頓訓練中心外觀。



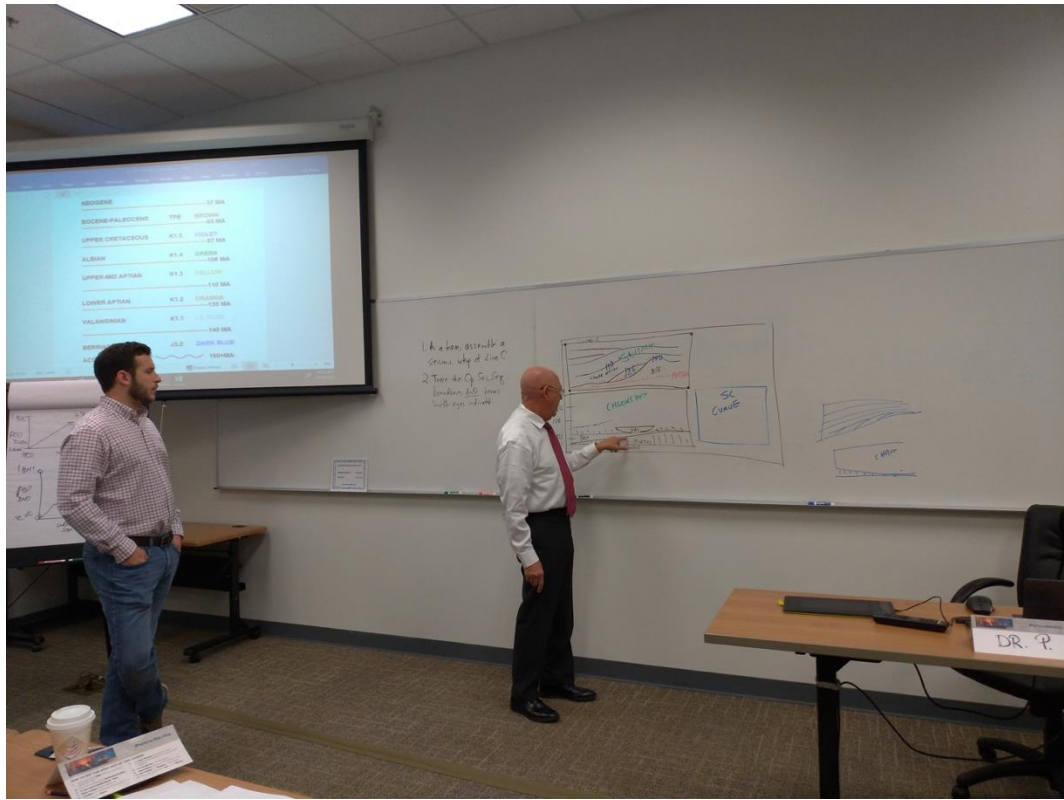
PetroSkills 休士頓訓練中心接待櫃檯。



PetroSkills 休士頓訓練中心之上課教室內部。



PetroSkills 休士頓訓練中心之教室外休息區一景。



Pigott 教授講解年代地層圖繪製方法中。



此次參訓之共同分組同學分別是來自 Canacol Energy Ltd 之哥倫比亞分公司的 Diego Melo 地物師(左)及 Burnett Oil Co.公司的 A&D 副總裁 Cliff Condrey(右)。



Pigott 教授分別檢視各分組之構造解釋、沉積相分析與預訂井位擬定概念，並給予建議中。