

出國報告（出國類別：實習）

參加深水沉積與儲層層序分析 訓練課程

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：廖韡智 研究員

派赴國家/地區：美國

出國期間：112年10月1日 至 112年10月8日

報告日期：112年10月30日

摘要

本出國案參加 PetroSkills®所開設之「Deep-water Turbidite Depositional Systems and Reservoirs - DWT」深水沉積與儲層層序分析訓練課程，講師為在石油業界服務將近 40 年的 Dave McGee 先生。5 天的課程中，McGee 先生根據其在深水環境儲層相關領域的工作經驗與成果，詳細解說從沉積物的搬運、深水環境的沉積過程、沉積物在海底峽谷-水道-深水扇系統內的樣貌，以及海水面變化對深水沉積和儲層可能位置的變化與影響。並利用震測資料、井測資料、露頭與其他相關數據，進行課堂上的實際操作，判斷資料中隱藏的深水沉積環境資訊，找出具有潛力的砂岩層。

目次

摘要.....	1
目次.....	2
目的.....	3
過程.....	4
具體成效.....	46
心得及建議.....	46
參考文獻.....	47

目的

深水環境在近年來逐漸成為油氣探勘的重要目標之一。除了現代的深水礦區探勘外，古代的深水濁流岩地層中儲集的油氣，也是油氣探勘的重要目標之一。濁流能夠將大量陸源有機沉積物與粗顆粒的砂質沉積物從陸地或淺海帶往深水區域，堆積出濁流岩與其相關的堆積層序，以及濁流環境下特有的沉積相模型 (Facies Model)。

本次出國案報名參加 PetroSkills®所開設之「Deep-water Turbidite Depositional Systems and Reservoirs - DWT」深水沉積與儲層層序分析訓練課程。由國際知名深水沉積學與探勘專家 Dave McGee 先生進行教授。此課程開設的目標受眾為參與探勘及生產的地質或地球物理探勘師、層序地層學家或儲層工程師等。藉由一系列的課程，結合講師在世界各大洲經歷與收集的露頭、鑽探與震測資料，講授深水沉積環境與其可能的儲層位置分布。

本課程綜合了現代、古代與地下的資料，探討分析濁流岩與其相關的沉積過程、砂體與可能的油氣儲層分布的案例研究。也會講述傳統理論在探勘上的侷限性，介紹有關濁流岩層序與儲層在地質學上的新概念與想法。課程內容包含了震測資料、井測資料、露頭與其他海底相關數據建構新的模型，其中包含了層序的解析度、砂體分布、解釋形成機制與了解對儲集層特徵的影響等資訊。

近年本工作團隊接觸的礦區除了台灣西南海域深水礦區探勘，探勘水深與油氣儲集地層皆與深水環境有關外，澳洲西北海域與印尼的探勘工作也預期會需要深水沉積與層序的相關知識。接下來若要持續對其他深水區域或是具有深水沉積儲集層的地區進行探勘研究工作，本課程的內容對此有極大的幫助。故藉由參加此深水沉積與儲層層序分析課程，學習與精進此一系列的知識技能，對未來的礦區探勘與評估工作能夠有極大的助益。

過程

本次受訓案之上課地點位在美國休士頓，目前僅有長榮航空有自台灣直飛的至休士頓的航班，但其落地時間接近當地時間晚上 12 點，再加上前往 PetroSkills® 訓練中心的車程，預計會在上課當日的凌晨 2 點入住飯店，如此將會嚴重影響上課的效率。因此本案往返美國交通以聯合航空台北-美國舊金山-休士頓的方式進行。PetroSkills® 在休士頓的訓練中心座落於郊區的 Katy 市的 Katy Mills Pkwy 區內，距離休士頓機場約 70 公里的距離，在大眾運輸交通方式較為不便的情況下，需要自行搭乘 uber 或計程車前往，乘車時間約 1 小時，在上課前一天晚上入住飯店進行準備與休息。

課程講師為 Dave McGee 先生，具有將近 40 年的探勘工作經驗，自 1990 年開始進行陸棚與深水礦區相關探勘與開發工作，工作經歷涵蓋 Mearsk Oil、ConocoPhillips、Shell 等大型石油公司，接觸過世界各地的深水礦區相關資料。目前則在美國蒙大拿州的 AIM Geanalytics 擔任首席地質學家。

除了講師的自我介紹，課程一開始也說明本次上課 5 天課程的大綱(圖一)。本次課程從初步介紹沉積物的沉積過程、沉積物堆積的樣貌、及深水沉積與層序地層的模型開始，並且由淺至深，詳細解說從河口與陸棚邊緣形成濁流，往斜坡造成的不同種類海底峽谷的型態，到深水區水道與堆積海底扇的過程及產物，最後能夠綜合這些資訊，進行尋找探勘目標的分析工作。

課程結束後，搭乘隔日星期六早上聯合航空的班機，循休士頓-舊金山-台北路線，於星期日傍晚 6 點 45 分降落桃園機場，返抵國門完成本次任務。

Course Schedule (approximate)

- **Day 1:** Introduction to deep water processes, products, and models
- **Day 2:** Submarine canyons, deep water fan deltas, deep water slopes
- **Day 3:** Deep-water channels
- **Day 4:** Sheet systems
- **Day 5:** Integration

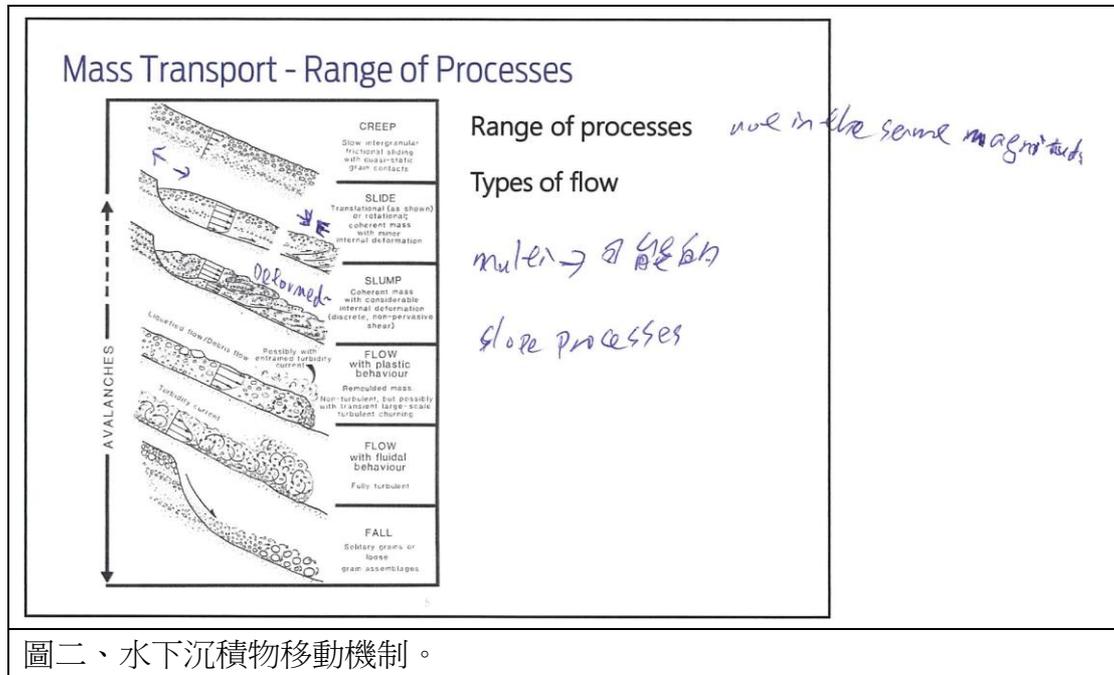
圖一、深水沉積與儲層層序課程大綱。

課程第一天（10月2日）

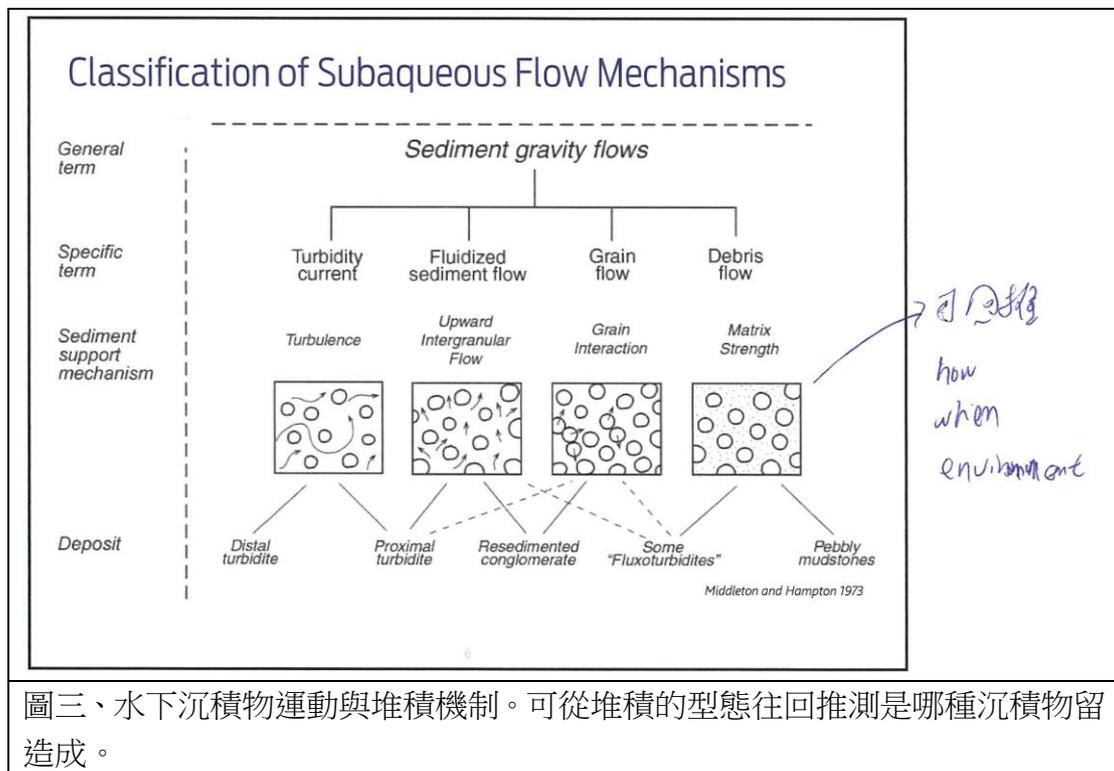
首日課程著重在建立深水沉積過程的整體架構知識，包含了沉積物往深水的移動方式與沉積的過程、深水區沉積物的形貌與沉積相、濁流的生成與控制、深水扇與層序模型等項目。

水下沉積物的移動機制(Mass transport)，根據變形或侵蝕與堆積的劇烈程度，由小到大，可分為下列數種方式(圖二)：潛移(creep)、滑動(slide)、崩塌(slump)、塑性流動(flow with plastic behaviour)、流性流動(flow with fluidal behaviour)、崩落(fall)。這幾種沉積物移動機制在自然界中，隨現地狀況不同，發生的規模有大有小，並且同樣的環境或同一事件中，有可能會同時包含複數種沉積物移動方式。沉積物在堆積後，其顆粒與基質的堆疊方式，則能夠反推其可能的發生機制、形成的過程、沉積的環境等資訊(圖三)。整體而言，深水沉積物自陸地或淺水環境的移動，需要藉由水夾帶沉積物，產生密度較大的「流」(flow)的方式帶走與堆積沉積物。堆積深水沉積物的「流」(原文為 flow，後續以沉積物流稱之)的型態，

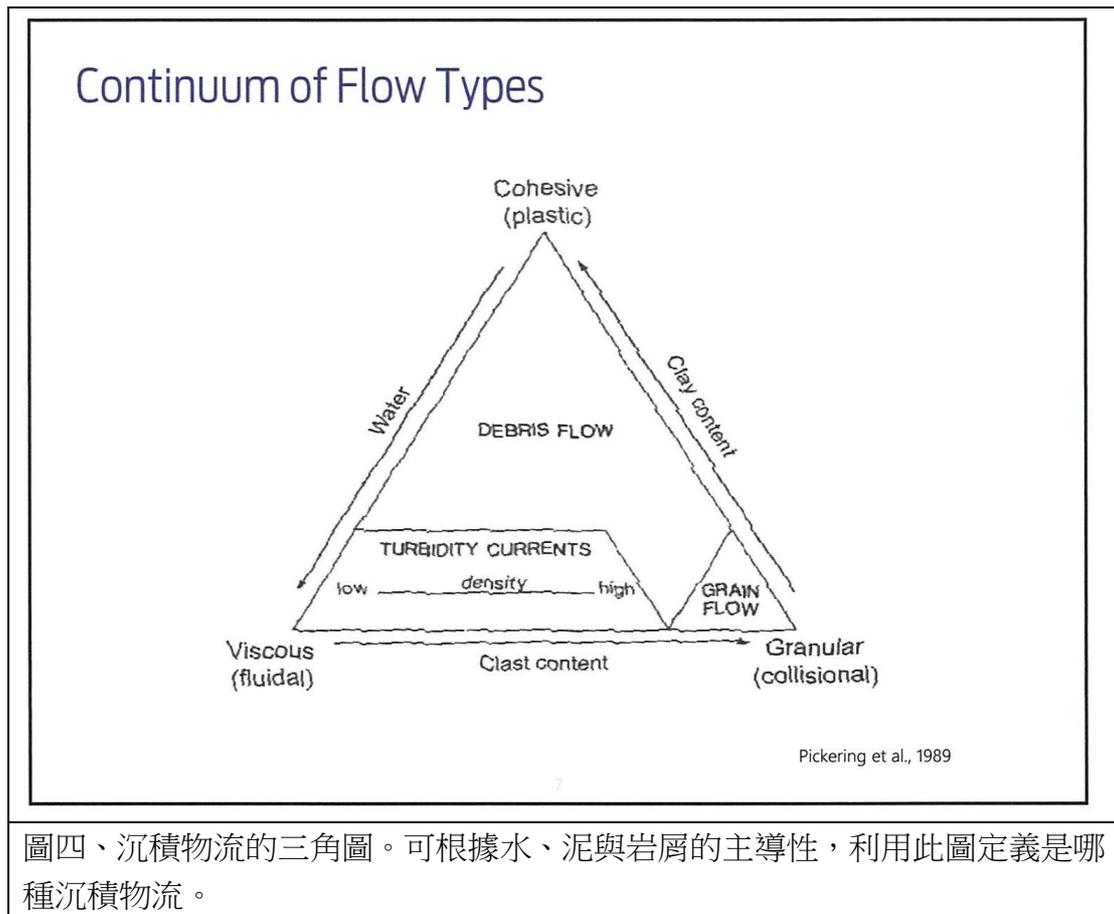
可利用三角圖進行分類(圖四)，圖中三項控制沉積物流類型的因素分別為水、泥含量與岩屑含量，對應到三角圖的三個端點分別為黏性(fluidal)、塑性(plastic)與碰撞(collisional)，在三角形內則依各成分的比例不同，可分類為濁流(turbidity currents)、碎屑流(debris flow)與顆粒流(grain flow)。



圖二、水下沉積物移動機制。



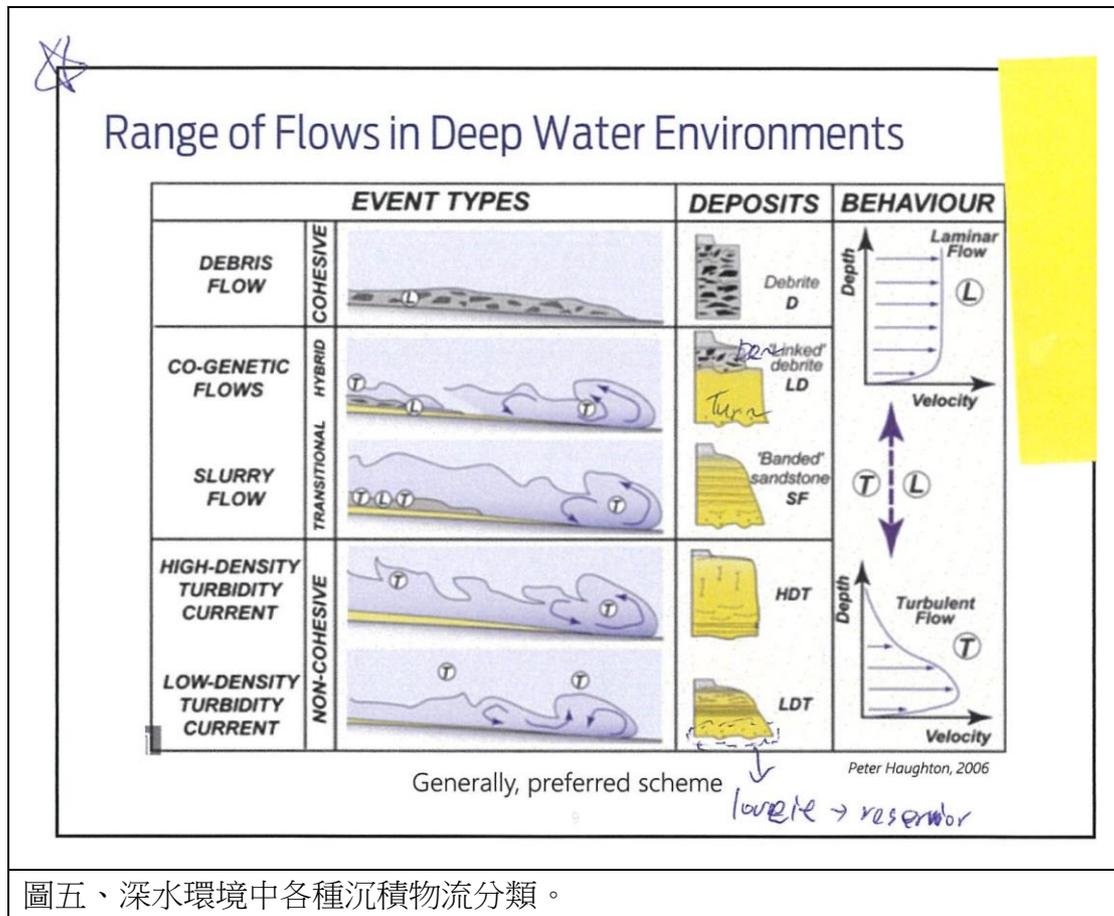
圖三、水下沉積物運動與堆積機制。可從堆積的型態往回推測是哪種沉積物造成。



圖四、沉積物流的三角圖。可根據水、泥與岩屑的主導性，利用此圖定義是哪種沉積物流。

不同的沉積物流除了內含的沉積物成分比例不同外，其流動方式與堆積的沉積物也會有不同的形貌展現。圖五展示深水環境中，各種沉積物流的型態、沉積物流內不同高度的流速與沉積物堆積的樣態，根據沉積物流的差異，可從較高塑性的碎屑流，經過塑性稍低的共生流(co-genetic flows)與泥漿流(slurry flow)，變化到低塑性的濁流。這幾種沉積物流的不同，除了其中夾帶的沉積物量與粒徑差異外，流動行為與在不同高度的流速差異，也是分辨其差異的主要特徵。高塑性的碎屑流流動行為為層流(laminar flow)，其特徵為各層流速相近，除了最底層因與海床面的摩擦力，造成流速往海床方向快速減低；低塑性的濁流流動行為為卷流(turbulence flow)，流速隨著不同高度變化，底層同樣因海床摩擦力造成流速較慢，但在中層流速最高，頂層則速度驟減。這樣的速度分布反映了不同的沉積樣貌，碎屑流的堆積較無分層，濁流沉積物則具有良好的分層，且其底部通常為砂質沉積物，具有良好的孔隙，具有成為油氣儲集層的潛力。講師特別提到圖五是整個

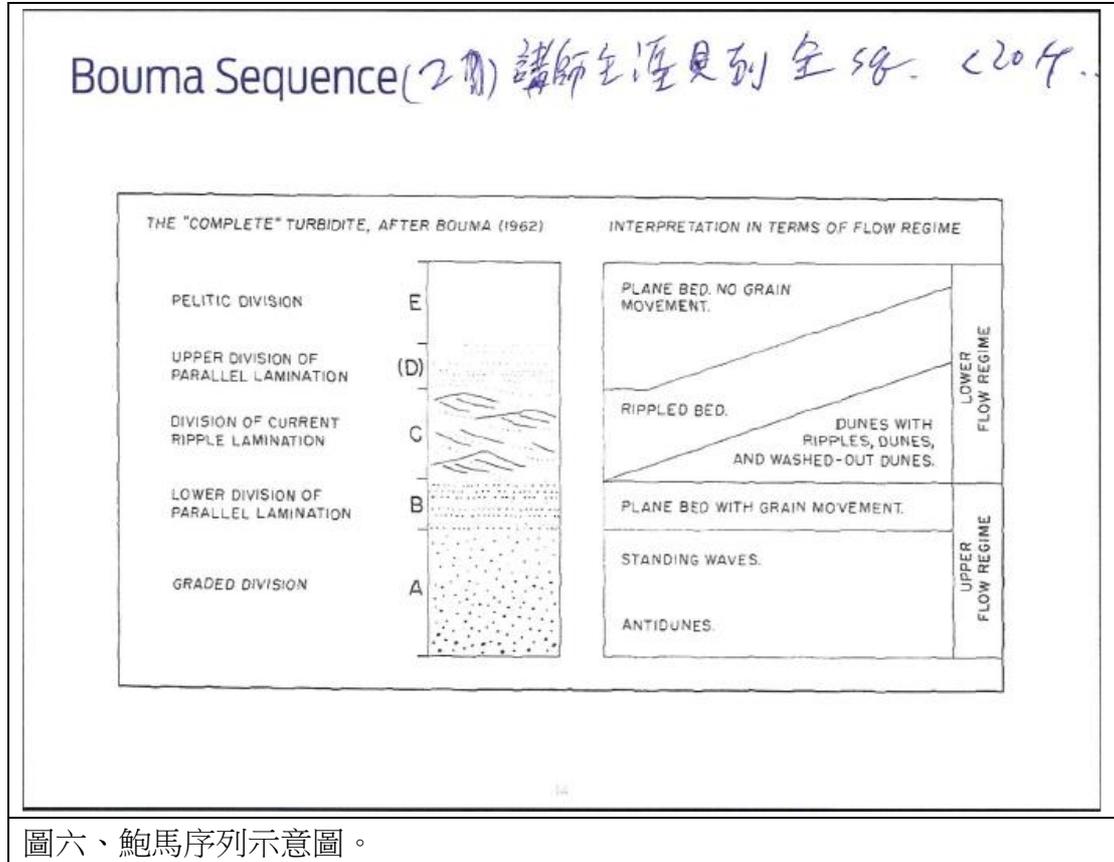
課程的核心之一，深水沉積物的運動與堆積皆可由此圖開始延伸出來，為深水環境沉積與儲層層序的基礎。



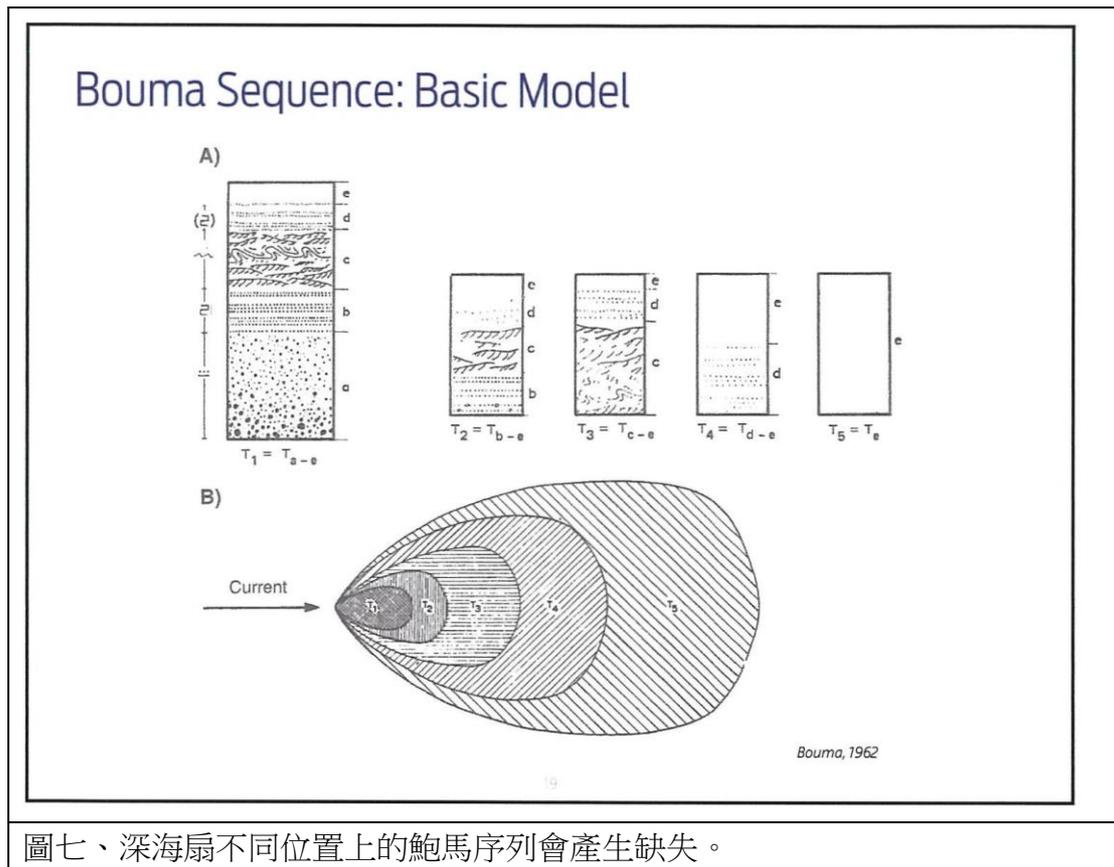
圖五、深水環境中各種沉積物流分類。

前一段落提到濁流沉積物(成岩後稱濁流岩，turbidite)具有良好的分層，稱為鮑馬序列(Bouma Sequence; Bouma, 1962)，為荷蘭地質學家 Arnold H. Bouma 於 1962 年提出。圖六展示一套完整的鮑馬序列所具備的沉積物堆積模式與特徵：從下往上分為 A 到 E 五層(或以 Ta 到 Te 表示)，A 與 B 層為粗顆粒沉積物，主要為砂岩質顆粒；C、D 與 E 層則是較細顆粒的沉積物，粒徑為粉沙或泥質顆粒。A 層為一次濁流沉積物最底層，常先把下方地層侵蝕後再行堆積，內部為具粒級層特徵的細至粗砂，有時會有液化作用的痕跡。B 層內部為平行一紋層之細粒至中砂岩堆積，底部常見底痕特徵。C 層為具有波紋的粉砂岩。D 層為平行薄粉砂層。E 層為塊狀，不具粒級層之泥岩堆積，可能有生物之化石。但通常在野外難以發現完整的鮑馬序列，隨著濁流向前流動，粗顆粒的沉積物會先沉積。到濁流尾端時，粗顆粒的砂質沉積物在上游處已先沉積，剩下較細顆粒的粉沙質或泥質沉積物，

鮑馬序列的下部也隨之減薄或消失(圖七)，此外，由於 A 層也會侵蝕下方地層，導致前一次堆積的鮑馬序列 E 或 D 層被侵蝕，發生僅留存 A 到 D 層或 A 到 C 層的狀況。



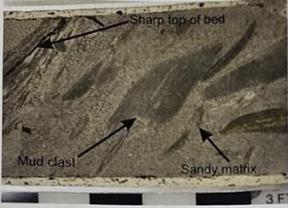
圖六、鮑馬序列示意圖。



圖七、深海扇不同位置上的鮑馬序列會產生缺失。

深水區除了濁流沉積物以外，也有其他沉積物流堆積而成的地層(濁流也可分為高濃度濁流 HDTF 與低濃度濁流 LDTF)，各種沉積物流堆積出來的地層，都擁有各自的特徵與沉積物粒徑變化的規律，能夠藉由觀察與歸納露頭或鑽井樣本來辨識，課程中列舉了數個現生的露頭，以照片展示這些露頭的特徵，如藉由同一露頭受侵蝕的相對強度與顏色判斷岩性，並觀察有無其他明顯沉積構造等項目，來判斷此一露頭經歷的沉積過程與沉積相。本課程第一個實際練習的項目即為利用照片判斷露頭或岩心的岩性與沉積相(圖八)。

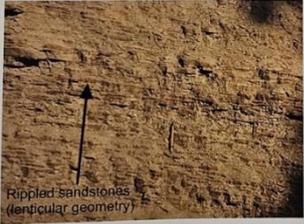
EXERCISE: Annotate the following photos and ascribe a lithotype and parent flow interpretation to each



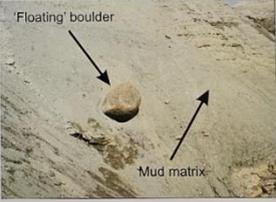
Lithotype 9: Type 6, sandstone breccia
Parent low type: slurry/debris flow



Lithotype 10: Type 18, thin-bedded turbidites
Parent low type: Low density turbidity currents



Lithotype 11: Type 18, thin-bedded turbidites
Parent low type: Low density turbidity currents



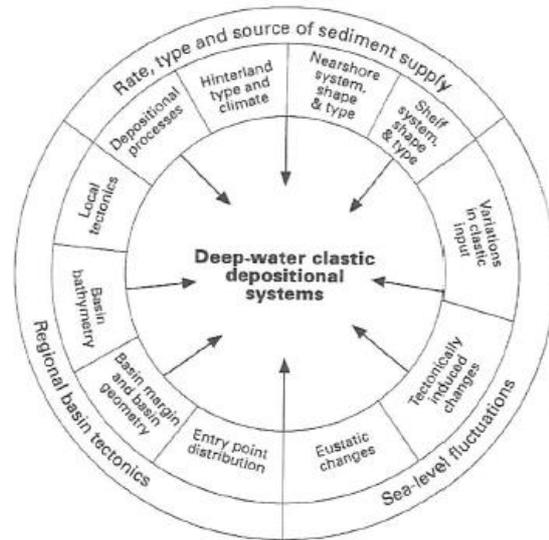
Lithotype 12: Type 16, muddy debris
Parent low type: Debris flow

圖八、課堂實作演練：從露頭辨識沉積相。

前面段落提到的各種沉積物流中，濁流事件是在深水沉積系統內，攜帶沉積物自淺水區長距離往深水區移動，並大範圍堆積深水沉積物的主要過程。小從每日的潮汐，大至區域盆地構造與海水面變化，皆有可能觸發沉積物往深處移動的事件(圖九)。根據事件發生的位置、過程與尺度，濁流事件的成因能分為下列數種方式：(1)陸域的河流氾濫直接流出的異重流(hyperpycnal flow)成為濁流，或是流出的低密度流(hypopycnal flow)沉降析出的濁流。(2)風暴使陸棚或陸棚邊緣產生濁流。(3)海嘯使陸棚產生濁流。(4)地震或火山造成斜坡產生濁流。(5)陸棚邊緣快速增加荷重產生濁流。(6)冰河溶解造成陸塊負載減輕抬升，在陸塊周邊產生濁流。(7)因海水面下降產生大量陸源沉積物往海域移動，造成的大量濁流事件。

What causes these events? What is their frequency?

'External'
and 'internal'
controls on
gravity flow
events



Schematic diagram illustrating the range of controls that influence deep-water sedimentation (by courtesy of M. Richards).

圖九、各種造成濁流與深水沉積的因素。

海水面下的地形根據其位置與坡度等特徵，大致可分為大陸棚、大陸斜坡與深海平原三個單元(圖十)。較早期的分類只將堆積粗顆粒砂質沉積物的水下扇體(submarine fans)(圖十一)分為盆底扇(basin floor fans)與斜坡扇(slope fans)。較新的研究則依據沉積物來源型態(單點、多點與線狀)、沉積物的主要粒徑分布等(圖十二)，標示出各種不同的深水沉積系統。深水沉積物也受到海水面變化的影響(圖十三)，在海水面升降的不同層序時期，深水區域接收到的沉積物的主要粒徑也會隨之變化。在低水位體系域時期(low stand system tract, LST)，大陸斜坡底部與鄰近的深海平原區域能夠接受大量的砂質沉積物，形成良好的儲集層，找尋此種類大範圍的砂質地層，在深水探勘活動中，是重要的探勘目標。

Bathymetric Profile of Ocean Basins

Continental Shelf

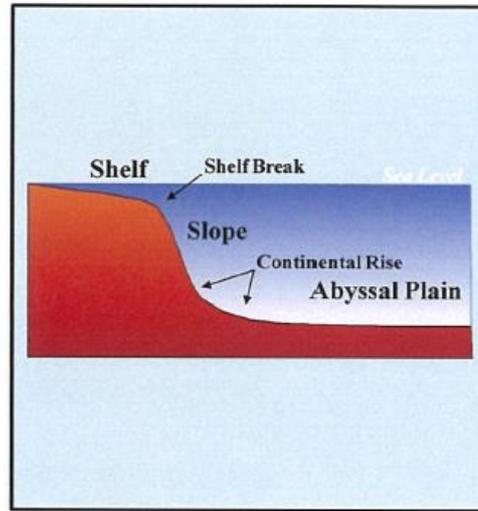
- Widely varying width
- Extends from shoreline to some 300ft water depth (range 150 to 1000ft)
- Low slope ($<1^\circ$)

Continental Slope

- Starts at shelf break
- Slope $1^\circ - 3^\circ$ (up to 10°)
- Lower slope is gently inclined due to deposition of clastic sediments (Continental rise)

Abyssal Plain

- Starts at $\pm 12,000$ ft
- Flat plain

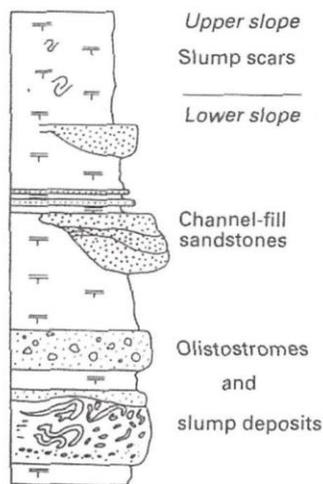


Note: Vertical scale is highly exaggerated

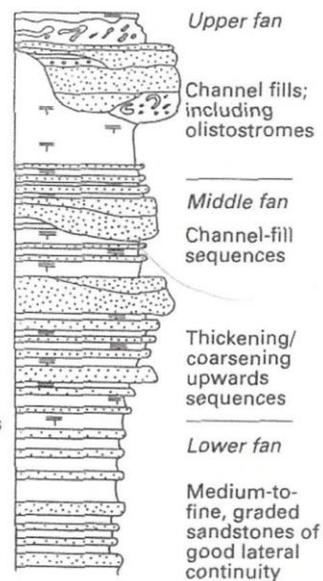
圖十、海水面下主要的地形單元。

Old Deep Water Fan Models

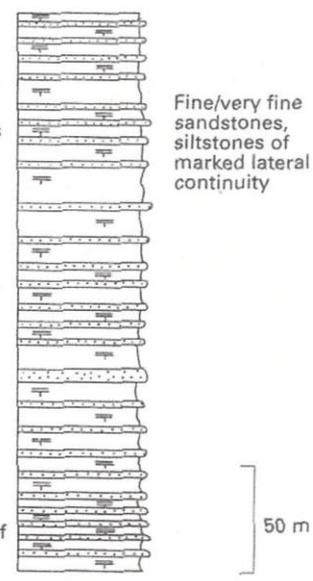
Slope-apron deposits



Deep-water fan deposits

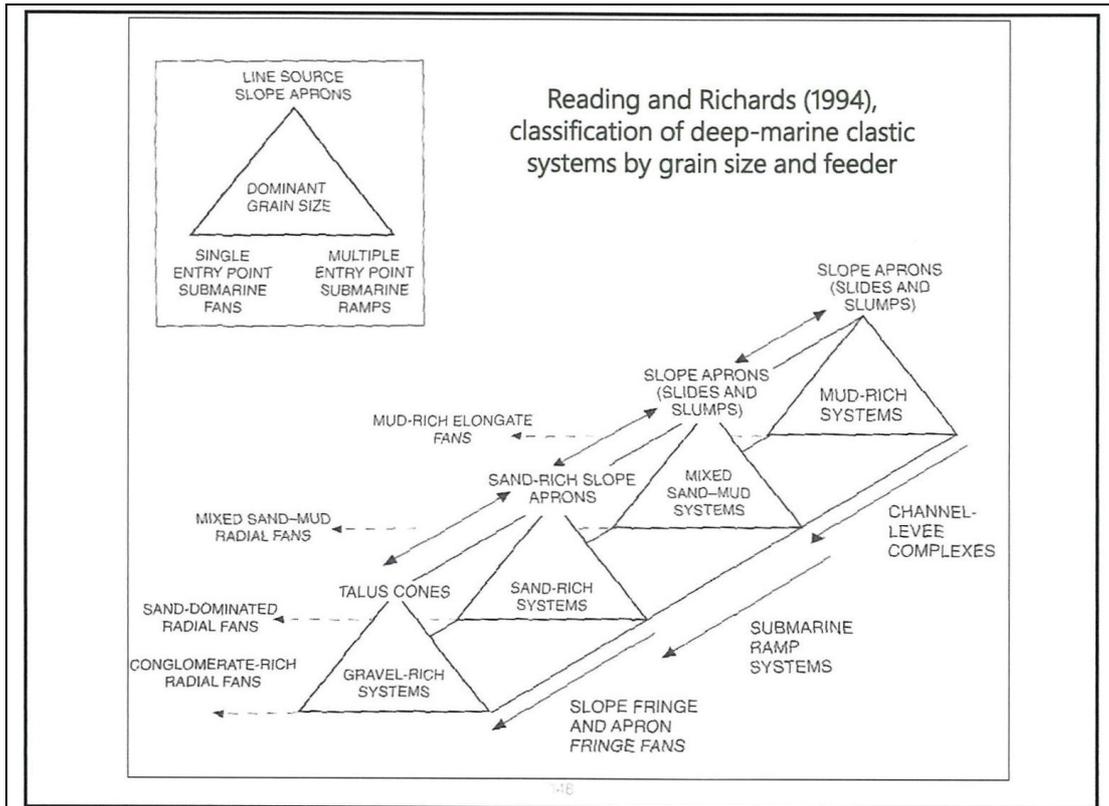


Basin plain deposits

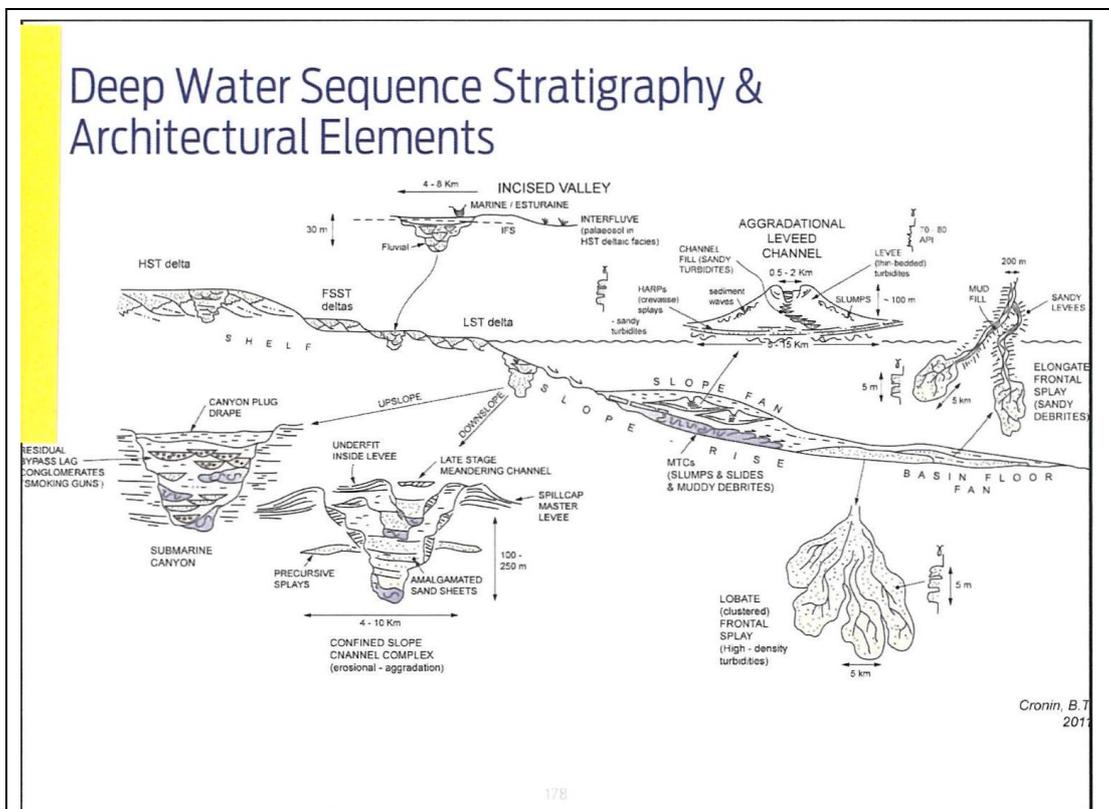


Mutti and Ricci Lucchi, 1972

圖十一、早期的深水沉積分類。只區分斜坡底部、深水扇以及深海盆地平原。

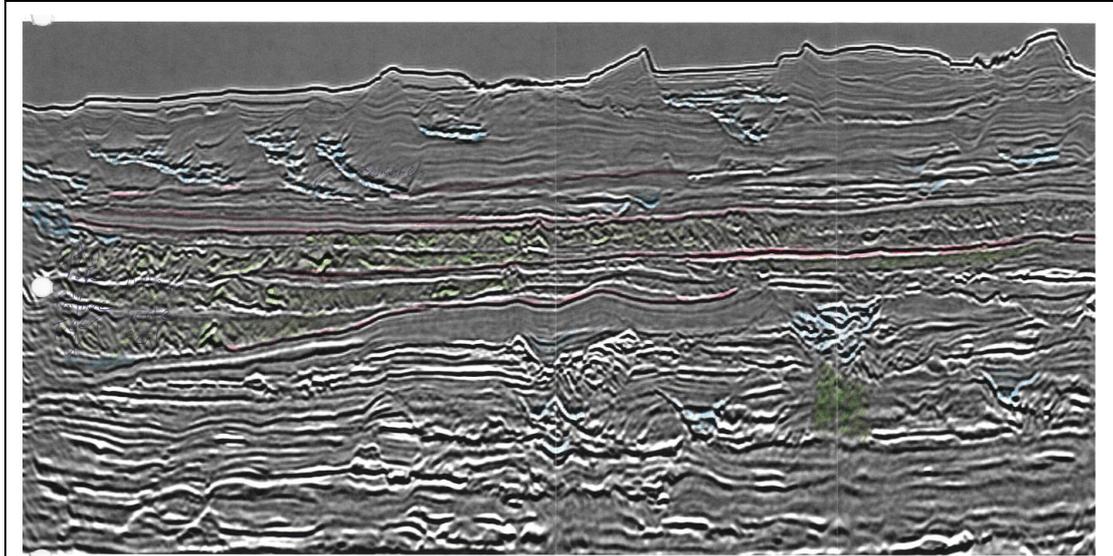


圖十二、近代深海沉積根據粒徑與沉積物來源條件分類。



圖十三、海水面變化與深水沉積模式關係示意圖。

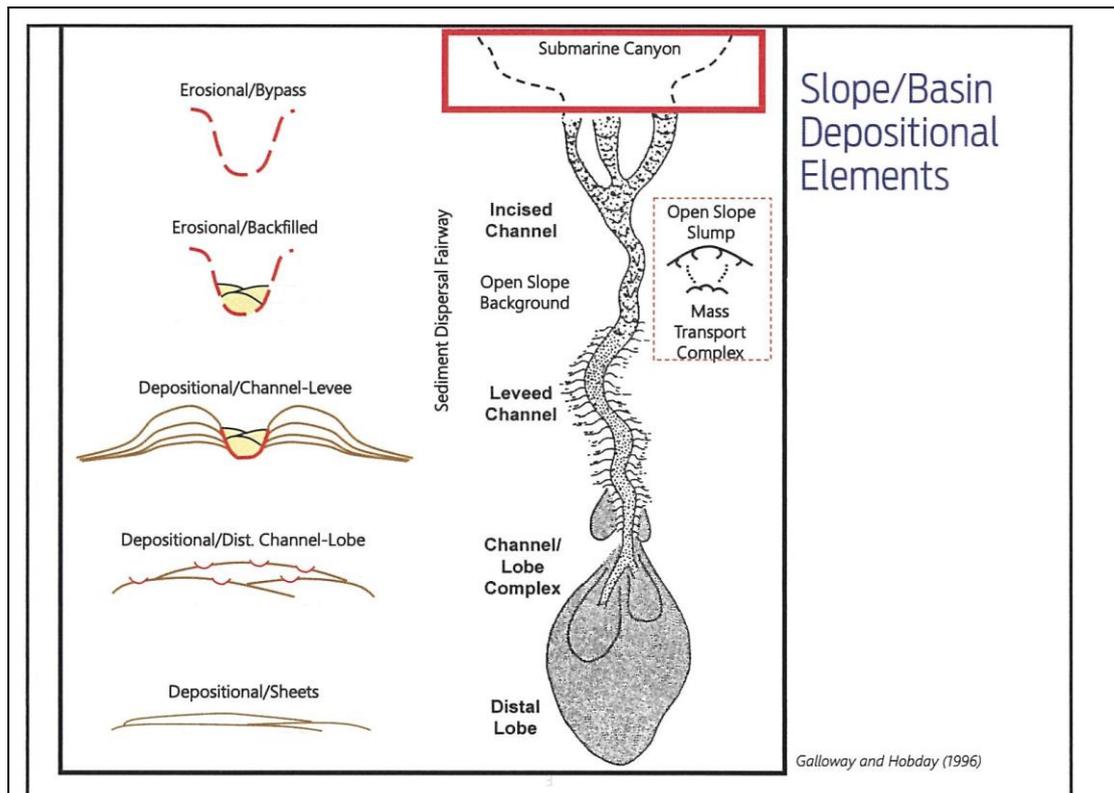
課程第一天最後以實作進行結尾(圖十四)，在震測剖面上摘取連續性好的反射、混亂的反射，以及海底峽谷相關沉積的反射，實作成果在隔天進行討論，並銜接下一日的課程。



圖十四、課堂實作演練：辨識深水沉積相關震測訊號。

課程第二天（10月3日）

課程第二天開始分三天詳細解說整套深海沉積環境中會出現的各種環境與構造組成。首先介紹的主題為大陸斜坡與海底峽谷(slope and canyon)，位在深水沉積環境上游源頭的位置(圖十五)，此位置主要的沉積過程為侵蝕與不堆積。首先討論前日最後的實作練習(圖十四)，位在剖面中央深度的幾個連續強反射(塗紅色)以及混亂震測訊號(塗綠色)的區域，反映在沉積當時為海水面下降 (FSST, falling stage system tract) 時期，海水面下降同時大量的沉積物堆積造成的 MTD(mass transport deposits)，其上下方有數個海底峽谷或海底水道(塗藍色)相關的反射，即是今日上課要討論的目標。海底峽谷具有數個特徵(圖十六)：(1)往海底峽谷上游可追溯到大型的河流來源，(2)較少出現在和緩的斜坡，且容易密集出現在陡坡，(3)不論海底峽谷底部與其下為岩石或沉積物，都會被峽谷侵蝕，(4)海底峽谷是溯源往海岸方向侵蝕的。



圖十五、海底峽谷在深水沉積系統中的位置。

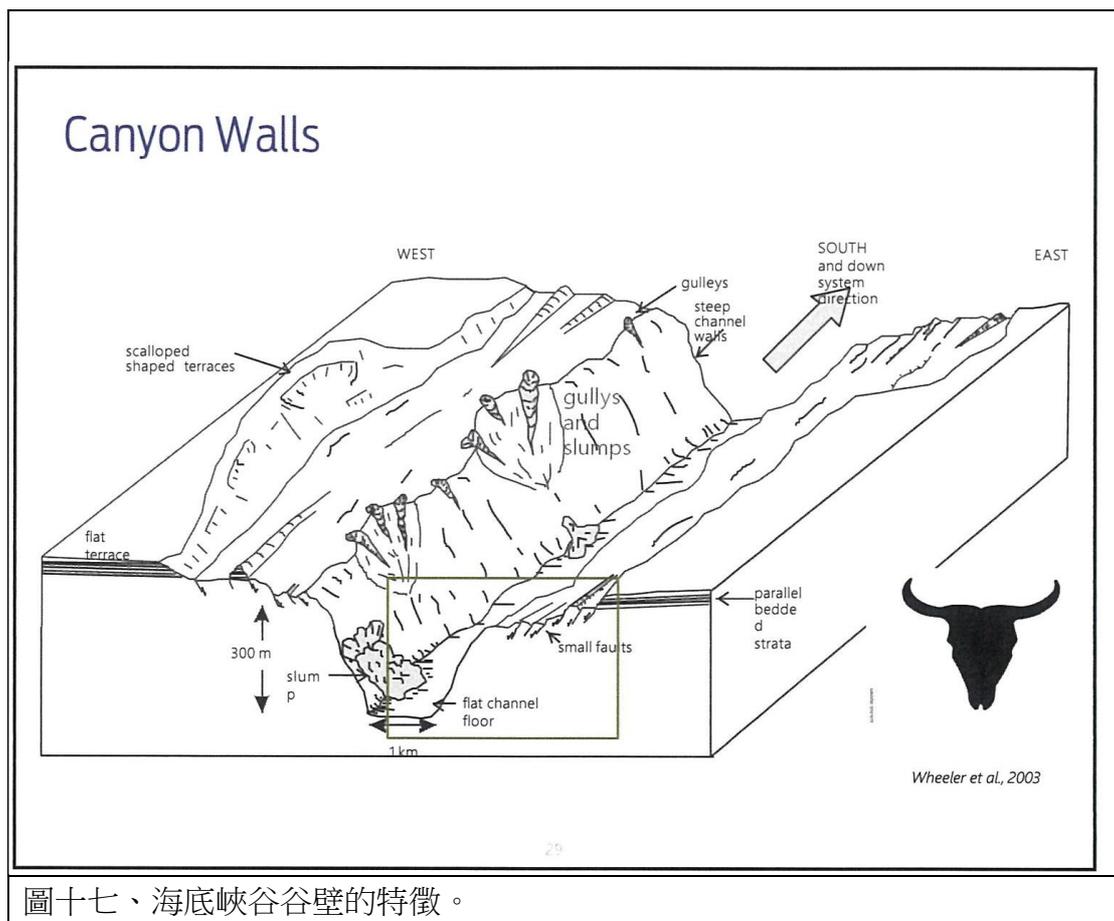
General Characteristics of Modern Canyons

Canyons are normally:

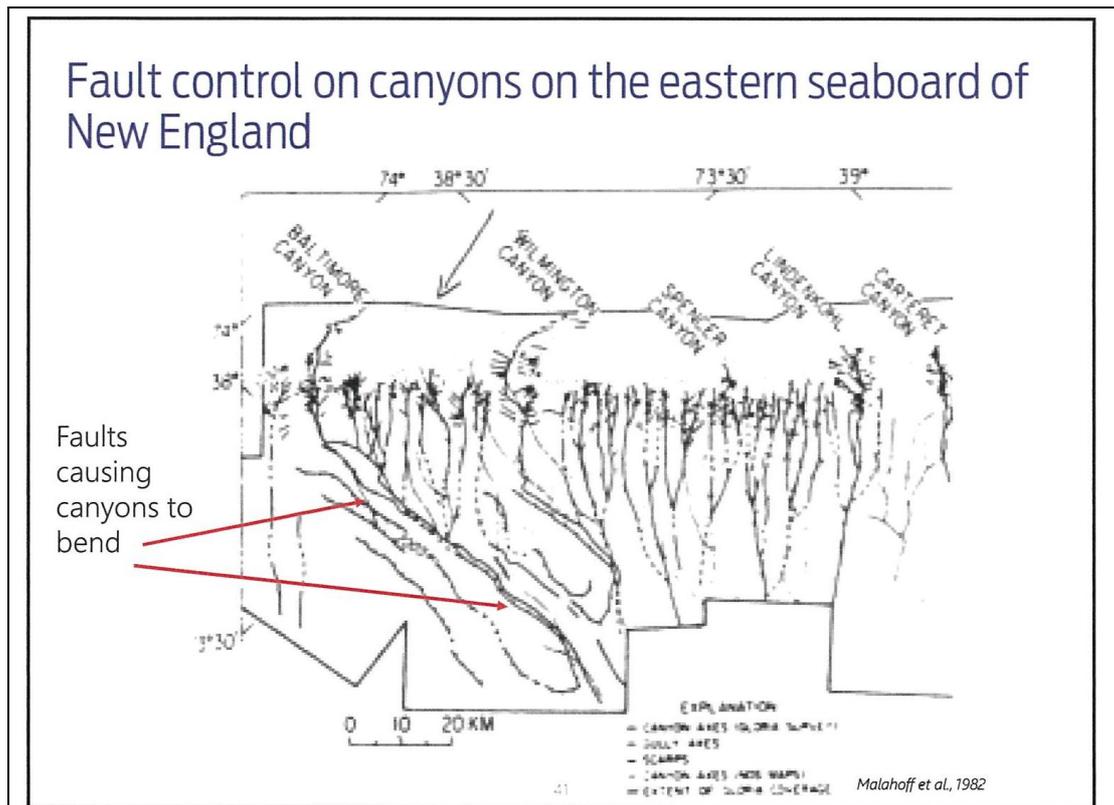
- Associated with large rivers (e.g., Amazon Canyon: Damuth et al., 1983)
- Rare on gentle slopes, and densely spaced on steeper slopes
- Erosive into any substrate, from unlithified sediment to crystalline rock
- Older, where the canyon head is more deeply recessed into the slope, or indeed, back across the shelf. This indicates that canyons develop shorewards by headward erosion of the canyon.

圖十六、海底峽谷的特徵。

海底峽谷內部可分為峽谷壁與峽谷軸。通常峽谷壁的位置坡度都是非常的陡，伴隨著崩塌等侵蝕作用，海底峽谷位在較陡的斜坡時，峽谷切面會比較傾向 V 字型，但在往下游斜坡坡度較緩時，峽谷切面則會慢慢變為 U 字型的樣貌(圖十七)。海底峽谷軸部發育則大多一直線往深海，並且在未受到構造影響的情況下，能夠在同一位置維持存在很長一段時間。但若有構造活動影響，海底峽谷很容易被構造改變其方向(圖十八)。

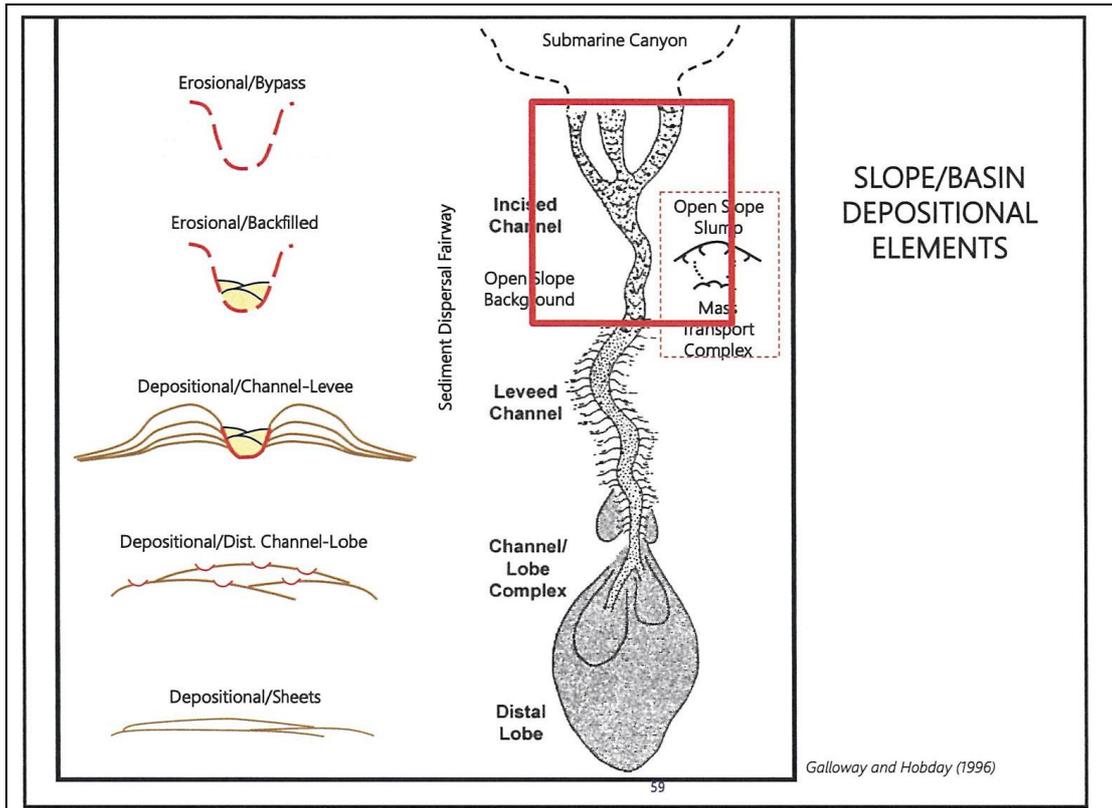


圖十七、海底峽谷谷壁的特徵。

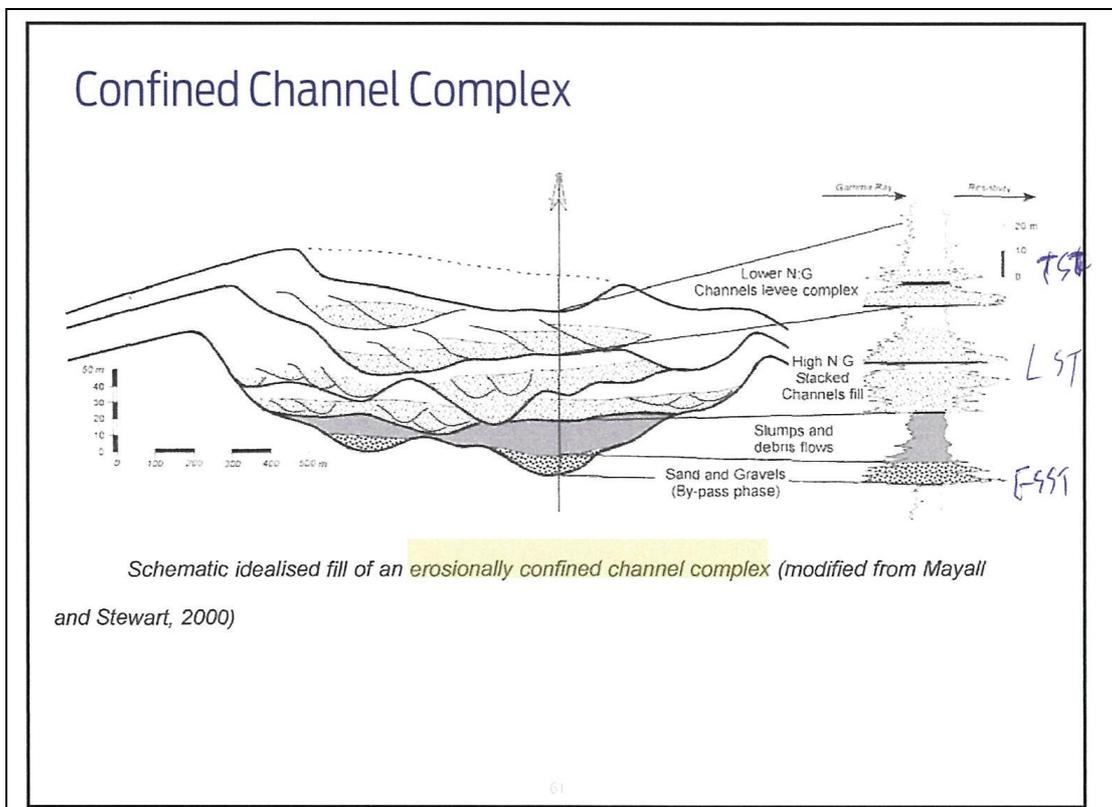


圖十八、海底峽谷易受構造影響改變方向。

海底峽谷往大陸斜坡下游發展後，其沉積過程從純粹的侵蝕不堆積轉變為具有侵蝕與回填沉積(backfilled)作用的環境(圖十九)。此種水道環境下的沉積形貌稱為限制型水道複合沉積(confined channel complex) (圖二十)，特徵為一系列數次峽谷形貌的侵蝕與沉積物充填(cut and fill)發生並限制在一個較大型的水道內，且由於靠近沉積物來源區域，每次堆積事件的底層會侵蝕並沉積較粗顆粒的礫質或砂質沉積物，水道主體為海床往下切所產生，但在水道及個別的峽谷兩側，仍會堆積溢堤沉積物(圖二十一)。水道外的兩側高區會堆積自然堤，水道中的峽谷外溢堤沉積物的則是堆積峽谷在兩側形成內堤(inner levee, IL)，但這些內堤不一定會保留下來，會隨著複數次的峽谷活動而相互侵蝕，峽谷活動也會因構造或海水面變化等因素，各次的活動呈現水平移動或向上加積的關係(圖二十二)。

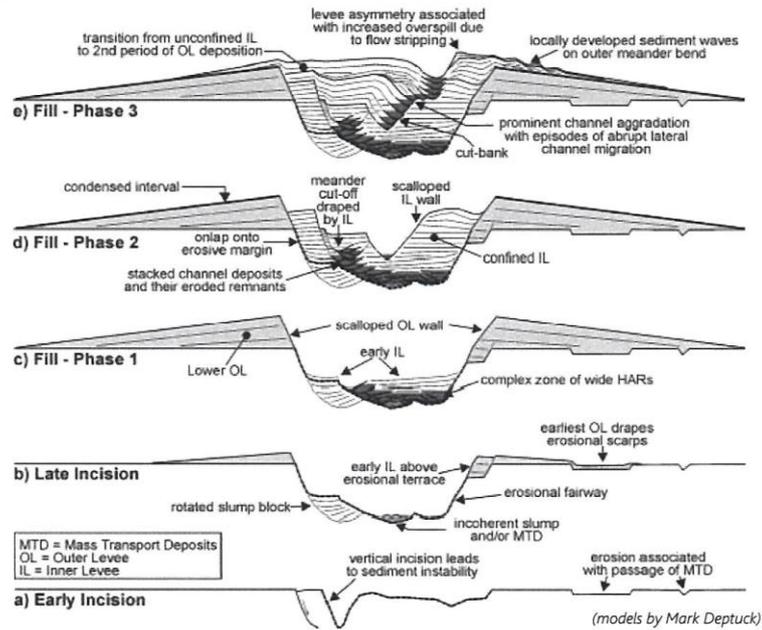


圖十九、海底峽谷下游的切蝕水道在深水沉積系統的位置與沉積特徵。



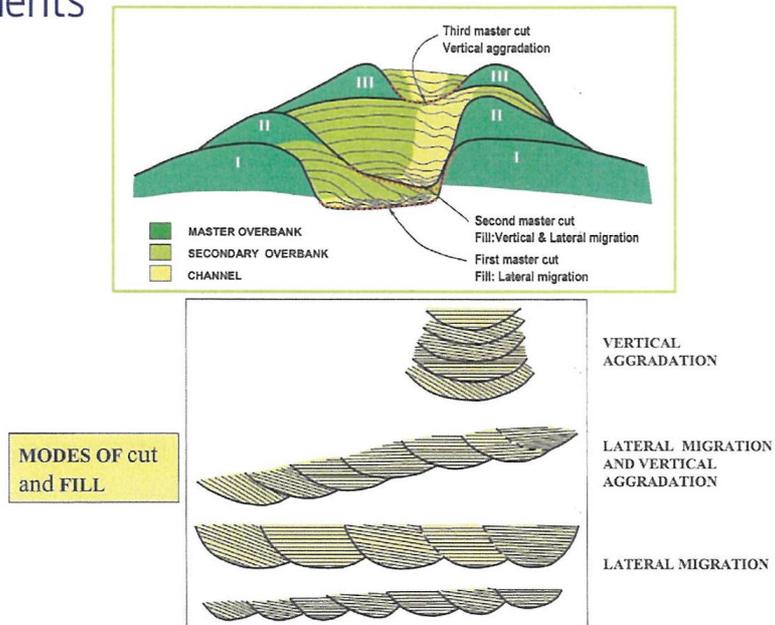
圖二十、限制型水道複合沉積與海水面變化造成的沉積物特徵變化。

Filling of Erosionally Confined Channel Complex



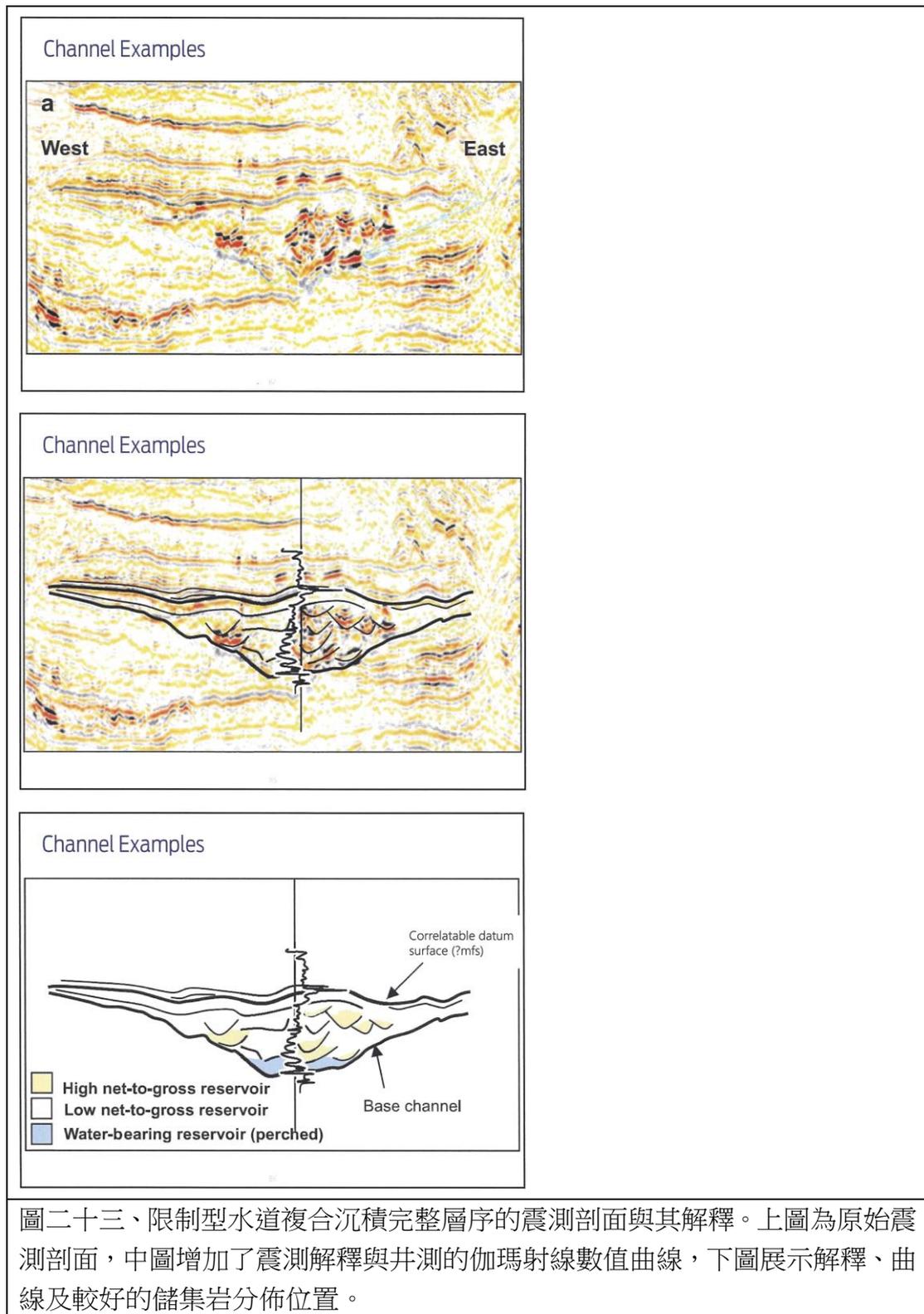
圖二十一、限制型水道複合沉積的演化。

Offset Stacked and Vertical Stacked Channel Elements



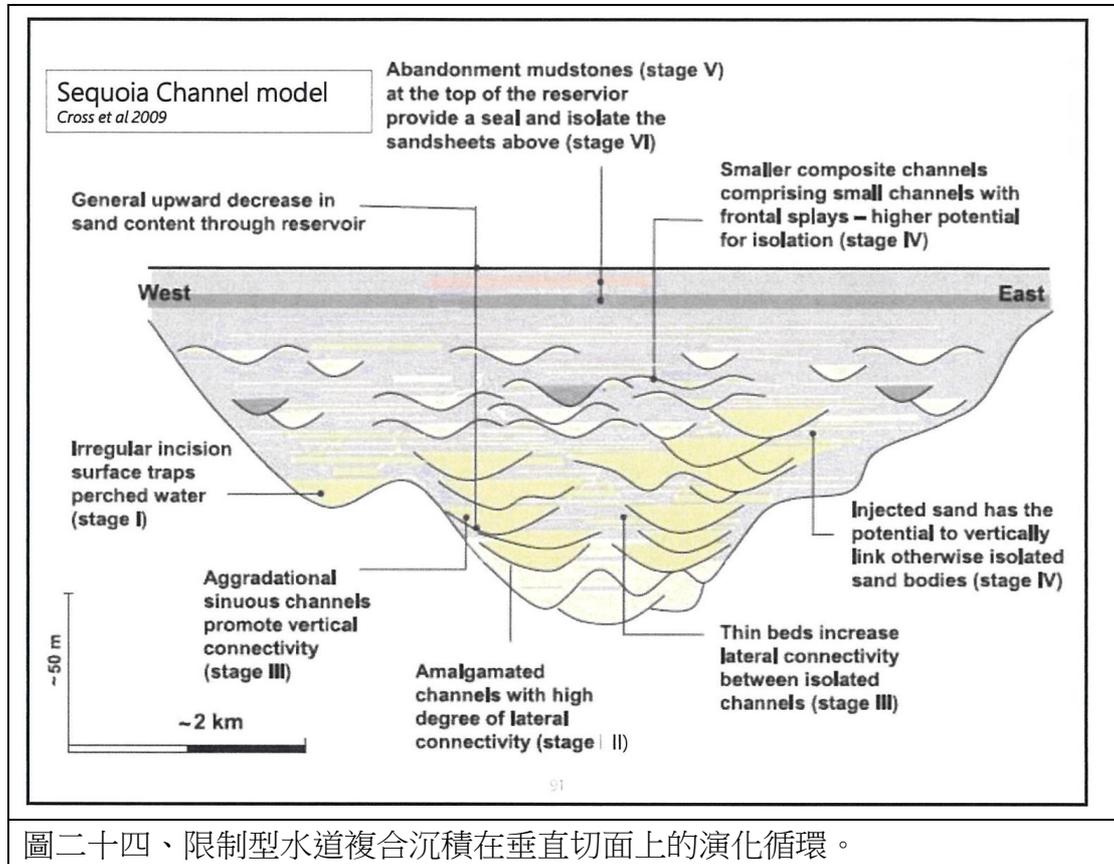
圖二十二、水道的水平疊加與垂直疊加變化。

在一套深水層序地層中，海水面下降(FSST 時期)，在層序下部堆積較粗顆粒的沉積物，接著海水面的停止下降(LST 時期，lowstand system tract)與上升(TST 時期，transgressive system tract)，整體沉積物顆粒會隨之變細(圖二十)。圖二十三展示切過一套限制型水道複合沉積完整層序的震測剖面與其解釋，配合鑽穿水道中央的井下量測伽瑪射線曲線(可反映岩層粒徑變化，數值愈高岩層的粒徑愈小)，可觀察到在整套層序的底部伽瑪射線數值最低，並且數值趨勢往層序頂部增加，在最大海漫面(maximum flooding surface, mfs)達到最高值，顯示在最水道底部的岩層粒徑最大，整體粒徑往水道淺部變小，在 mfs 位置的沉積物顆粒最細。限制型水道複合沉積內部，峽谷充填沉積物有較好的淨毛比(net-to-gross ratio)，可成為良好的探勘標的，而水道最底部沉積物雖也具有良好的孔隙條件，但因水道發生的位置較靠近沉積物來源，在最初期時多是碎屑流堆積，導致孔隙中含水量較高，若之後難以排除孔隙中的水，則不易儲集油氣，故並非最佳的探勘標的。

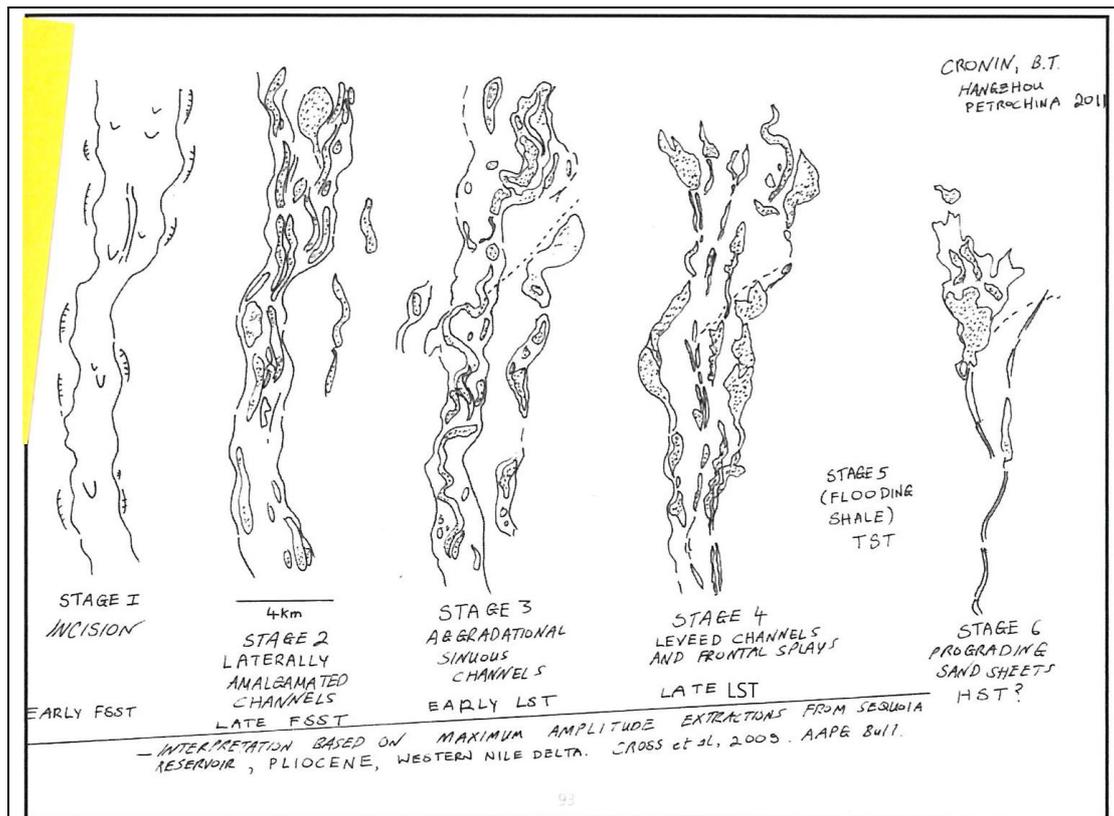


限制型水道複合沉積循環可區分為 6 個演化階段(圖二十四與圖二十五)。第一個階段為水道開始侵蝕而成長時期(對應早期 FSST)；第二階段時期，主水道內的峽谷水道頻繁地在水平方向變化位置與合併(對應晚期 FSST)；第三階段時，蜿蜒峽谷水道往上加積(對應早期 LST)；第四階段以堤壩水道為主(對應晚期 LST)；

第五階段為最大海漫面堆積，主要堆積細顆粒的頁岩質沉積物(對應 TST)；第六階段為層狀沉積物堆積，可能會有向前加積的層狀砂岩地層堆積(對應 HST，highstand system tract)。

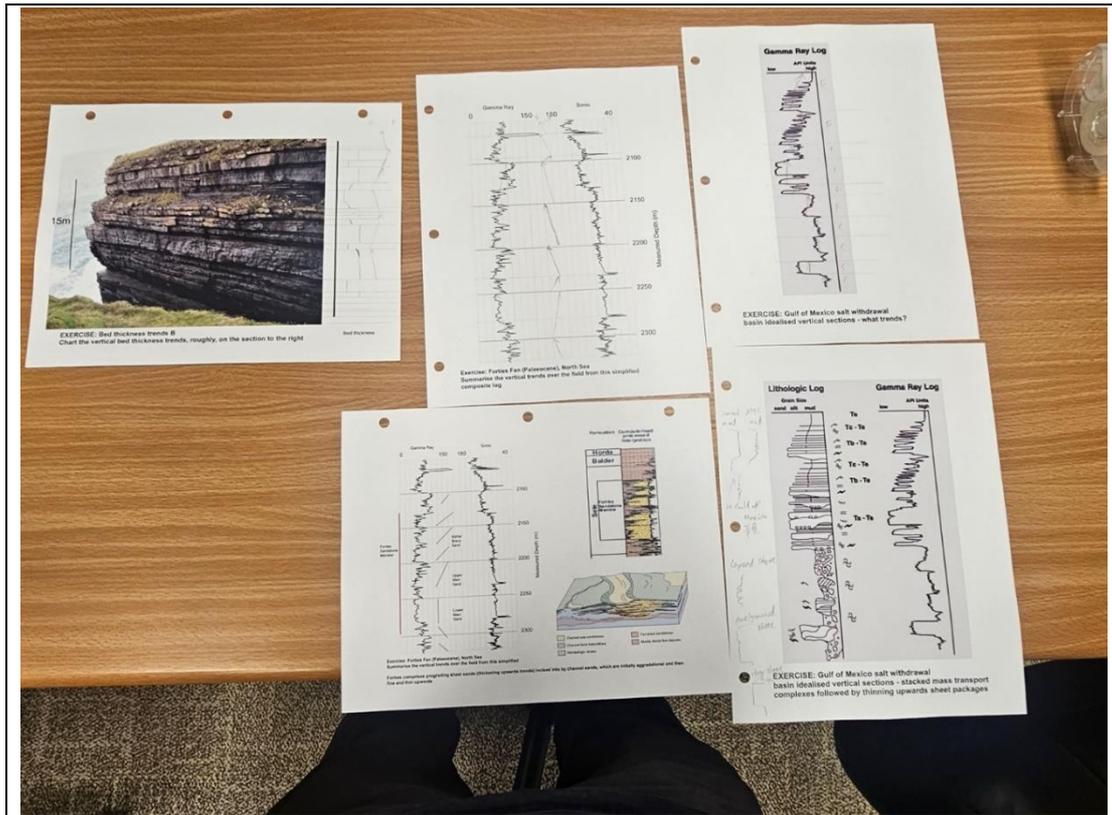


圖二十四、限制型水道複合沉積在垂直切面上的演化循環。

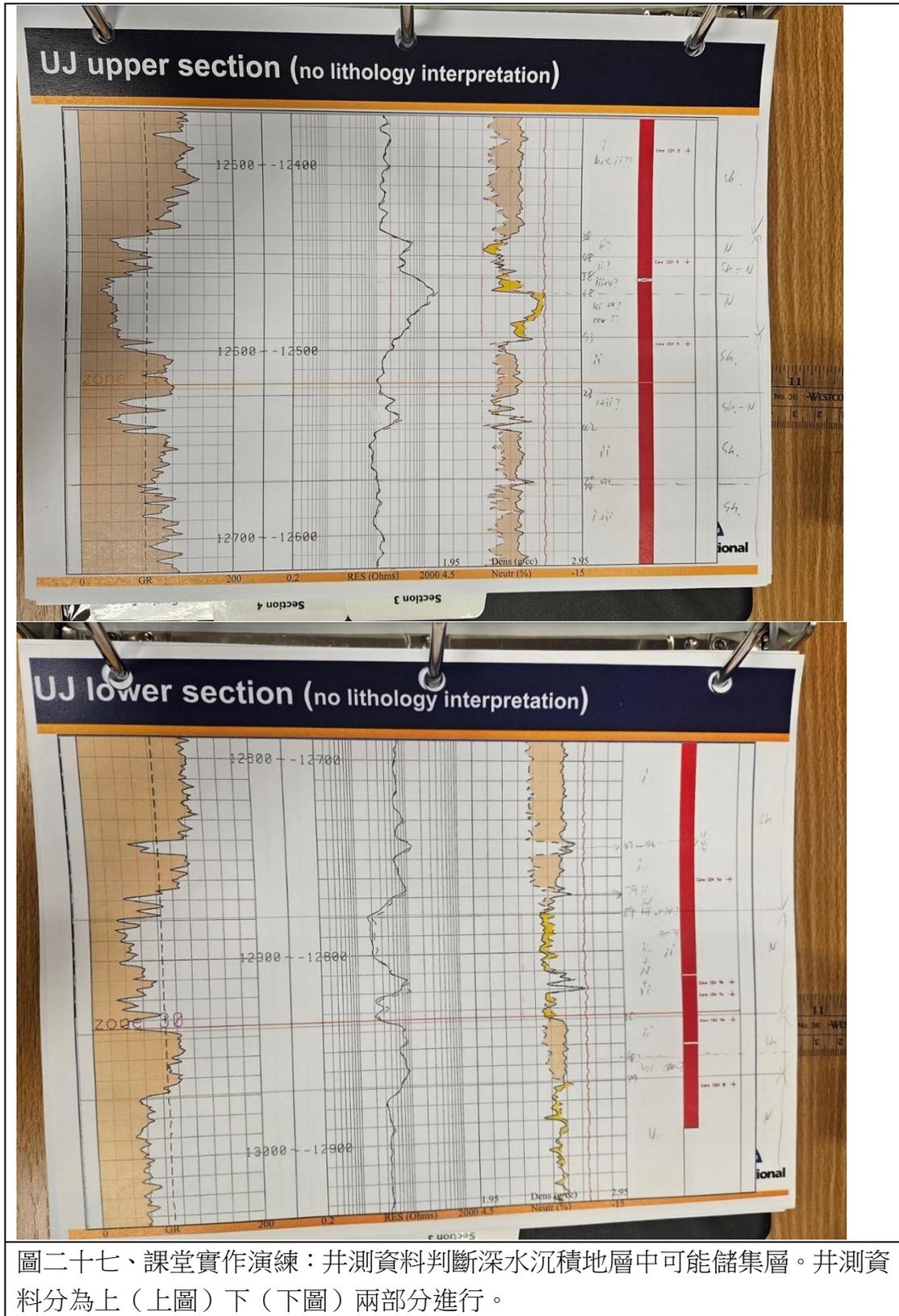


圖二十五、限制型水道複合沉積在水平切面上的演化循環。

第二天的實作，第一個練習實作使用多樣的探勘資訊判斷岩性變化(圖二十六)，並提出為何如此認為的判斷依據。分別以一個野外露頭、一口有伽瑪射線與P波波速的井下量測資料、及另一口只有伽瑪射線的井下量測資料進行判斷。除了岩性變化以外，講師也提到能夠用井測資料的變化頻率與振幅大小，大略判斷砂岩是經由何種沉積過程堆積而成的地層。第二個實作則先給予一口井的上下兩段井測資料(圖二十七)，判斷粗顆粒岩層(砂岩與礫岩)的位置。與前一天最後一個練習同樣地，這個練習會在隔天開始上課前進行討論。



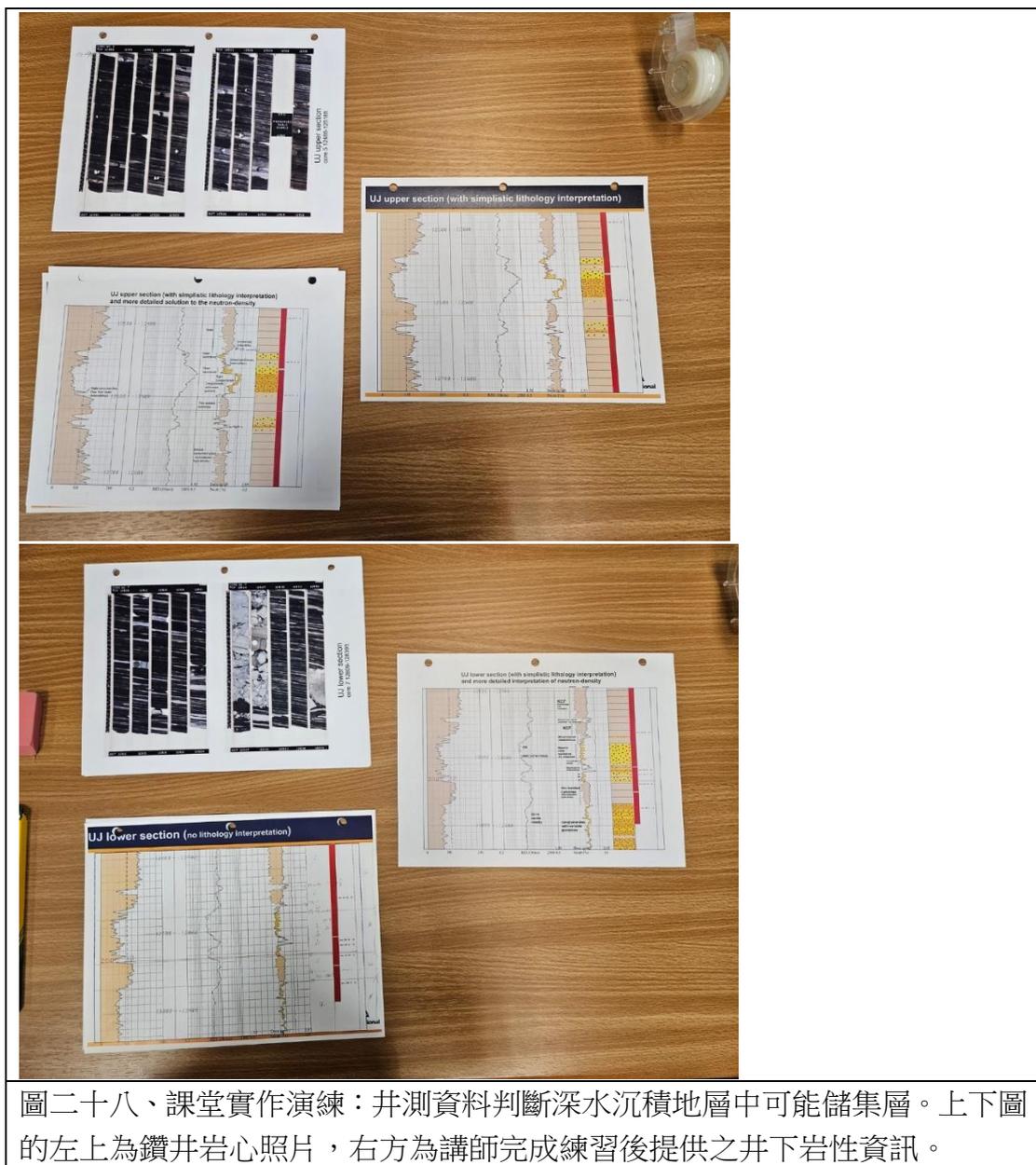
圖二十六、課堂實作演練：使用多樣的探勘資訊判斷岩性變化。藉由露頭影像（左上）與井測資料（上中與右上）進行練習，下中與右下為完成練習後，講師提供對應其上方資料的資訊。



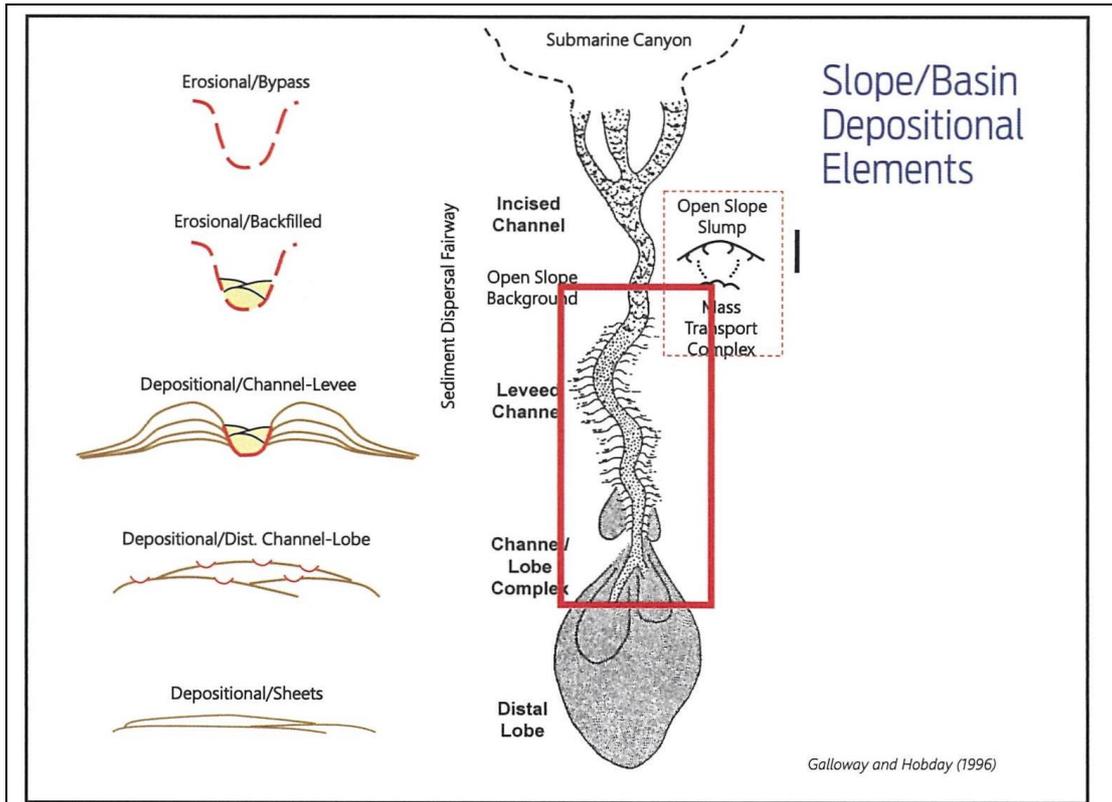
圖二十七、課堂實作演練：井測資料判斷深水沉積地層中可能儲集層。井測資料分為上（上圖）下（下圖）兩部分進行。

課程第三天（10月4日）

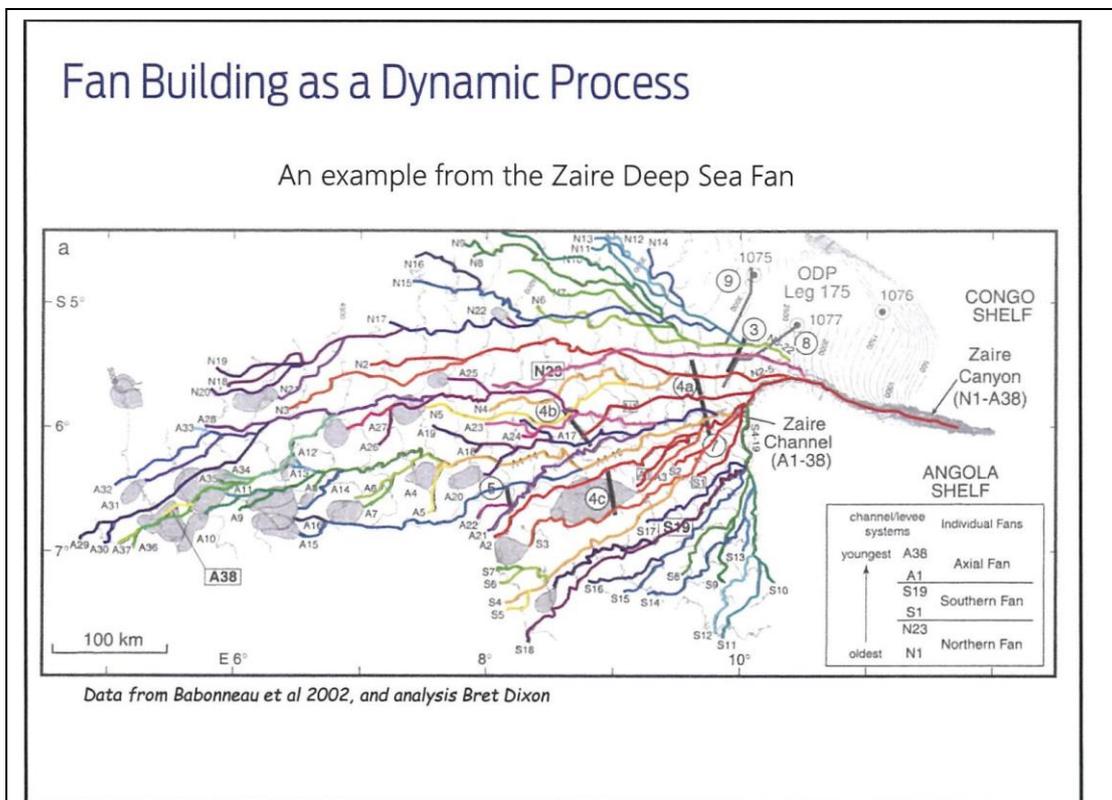
第三天課程主題為海底水道(submarine channel)，主要課程目標是深海的堤壩型水道(leveed channel)。首先先對前一天最後發出的練習進行討論，在討論開始前，講師再提供了各井的岩心照片(圖二十八)，並再比較岩心與實作的解釋成果。這口井的砂岩與礫岩層皆為深海水道沉積物，其中部分層段為儲集層，在岩心照片中可以觀察到含油氣地層與未含油氣地層的差異。另外有一部分的岩層沉積環境為今天要講授的深海堤壩型水道。



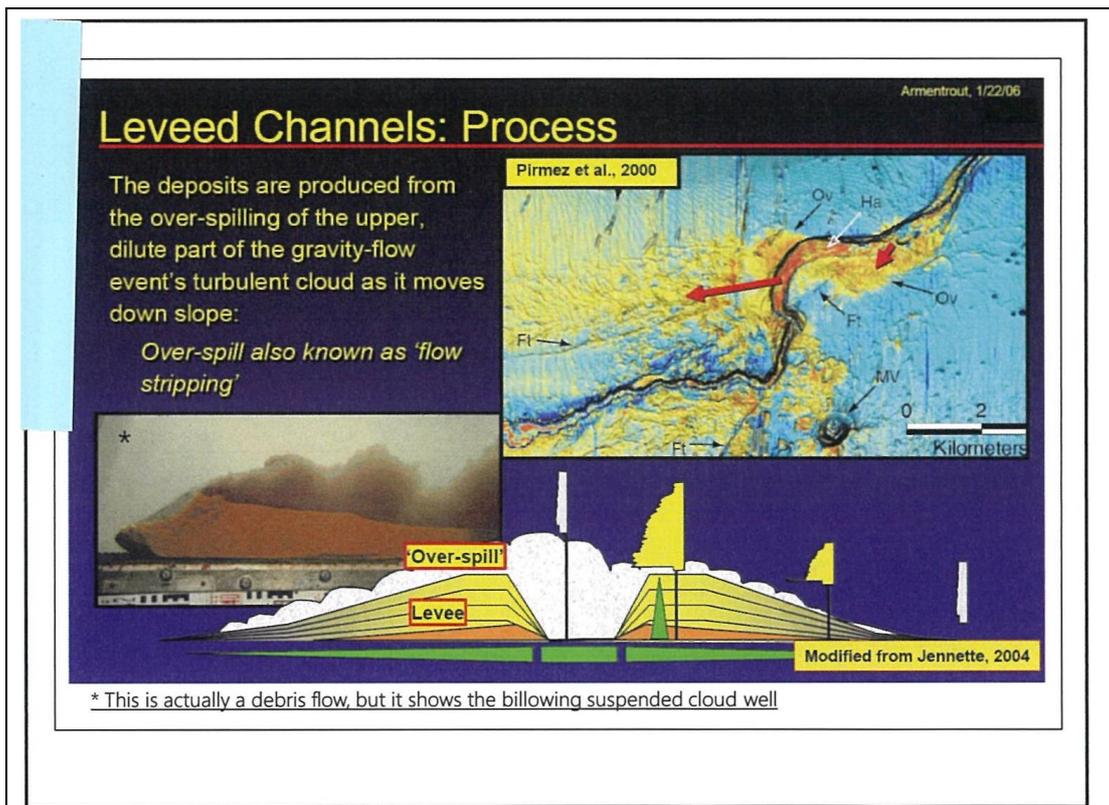
堤壩型水道位在限制型水道下方，接近大陸斜坡底部與進入深海平原的位置(圖二十九)。通常堤壩型水道的位置即為深海扇開始發育的區域(圖三十)，隨著堤壩型水道的下游支流(distributary)擴張或是溢堤改道，不斷地在深海扇內進行堆疊。堤壩型水道沉積相如圖三十一所示，與限制型水道不同的是，堤壩型水道在水道底部不一定有被侵蝕的部分，兩側堤壩底部很靠近水道底部位置。水道軸部是以濁流沉積物通過(bypass)為主，故僅沉積濁流通過後沉降的泥質沉積物。兩側的自然堤堆積以溢出(over-spill)的沉積物為大宗，底部堆積最粗顆粒砂質或礫質沉積物，堆積厚度則隨著遠離水道主流而減薄。堤壩型水道的沉積物溢出模式主要有兩種，濁流通過曲流轉彎處溢出(圖三十一)與濁流高出自然堤的溢出(圖三十二)。濁流通過曲流時會受到自然堤的限制，但當運動能量足以越過自然堤時，會衝出堤壩往水道外堆積。而高出自然堤的濁流，會有部分外緣的沉積物往堤壩方向溢出，沉積物便會堆積在堤壩上與其外側。與限制型水道相似，堤壩型水道隨著沉積物的堆積演化，也會產生堤壩型水道複合沉積相(leveed channel complex)(圖三十三)。由於濁流在此區域以堆積為主要沉積過程，較無侵蝕的能力，且受到兩側的自然堤壩的限制，堤壩型水道複合沉積以垂直方向的加積為主，水平方向的變化則是受水道曲流的左右移動變化造成。



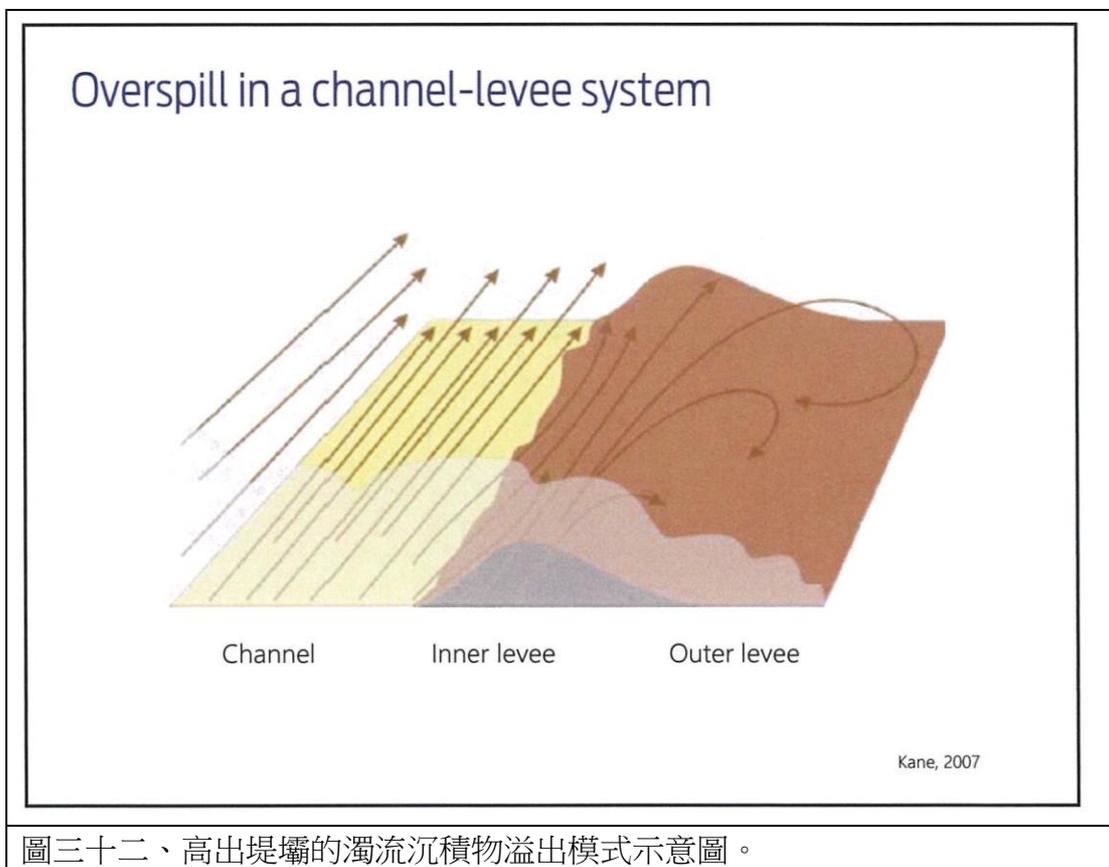
圖二十九、堤壩型水道在深水沉積環境的位置。



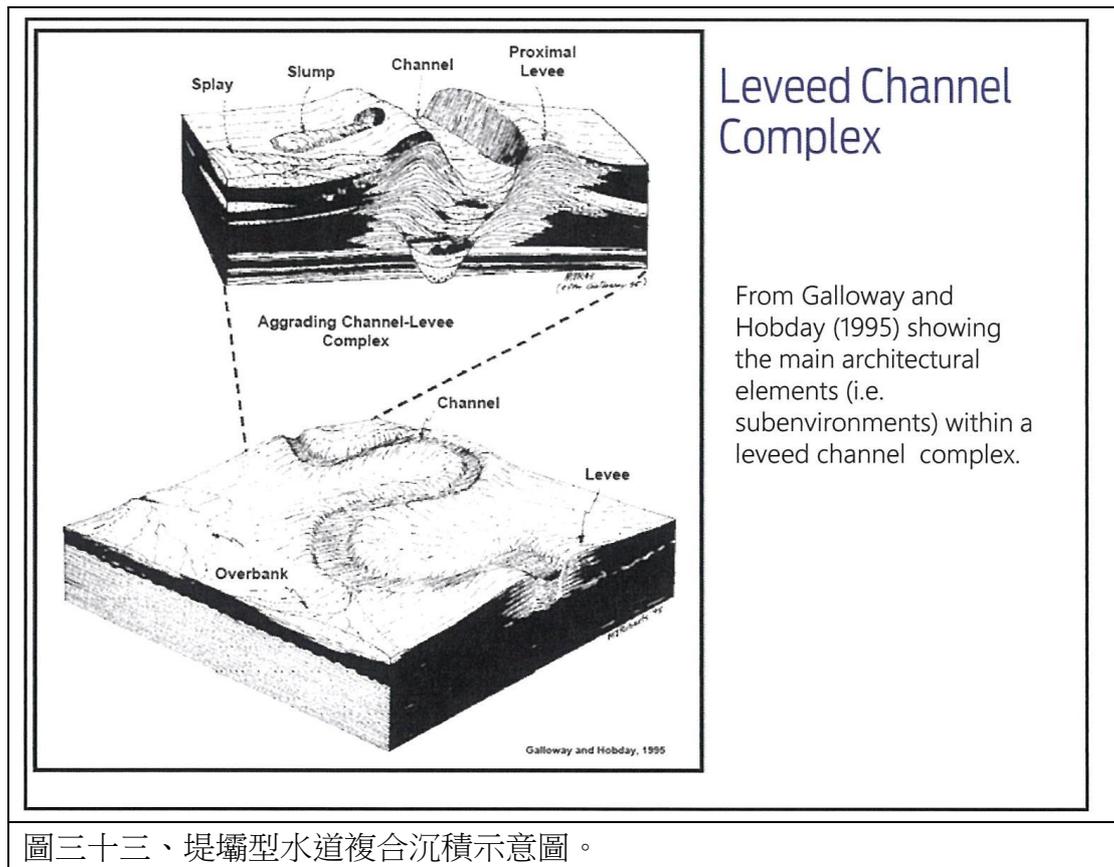
圖三十、現生 Zaire 深水扇上分布的堤壩型水道。深水扇上布滿水道與其下游支流。



圖三十一、堤壩型水道的沉積過程與堆積示意圖。



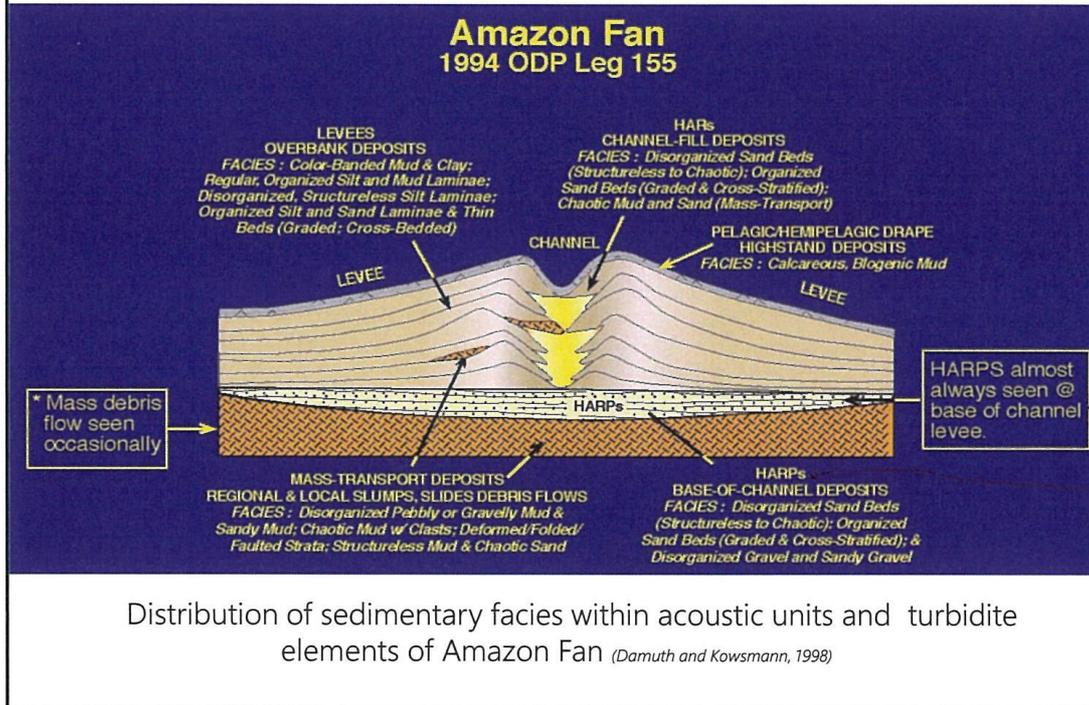
圖三十二、高出堤壩的濁流沉積物溢出模式示意圖。



圖三十三、堤壩型水道複合沉積示意圖。

在震測剖面中，堤壩型水道下方常見有一套強振幅反射訊號，稱之為 HARPs(強振幅反射組，high amplitude reflection packages) (圖三十四)，HARPs 是由於在堤壩型水道生成前，當地通常會先以溢堤堆積為主要的沉積來源，多次的溢堤沉積物在震測剖面中就成為多組強反射訊號，這種 HARPs 同時也富含沙質沉積物，是具有高油氣儲集潛能的探勘標的。堤壩型水道沉積在自然堤中，堆積了大量的砂質沉積物(圖三十五)，為重要的探勘目標。由於這些沉積物是經一次次的濁流事件堆積，不同次堆積的厚度可能不一致，但水平方向連續性都非常好，分布範圍則隨著水道本體位置的變化。水道內的沉積物則粒徑變化較大，不一定能成為良好的儲集岩。圖三十六顯示一套堤壩型水道堆積的鑽探成果，可見右岸的堤壩內鑽探發現天然氣儲集層，水道中心與左岸堤壩中則有發現油氣徵象。

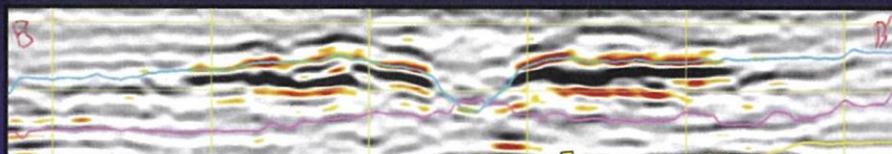
HARP Units



圖三十四、堤壩型水道下方的強振幅反射組示意圖

Levee Reservoir Characteristics

- Dominated by thin to medium bedded classical turbidites.
- Variable sand presence in axis.
- Straight to sinuous map patterns with central channel dim.
- Gull-wing cross section.
- Good lateral continuity, poor vertical continuity.

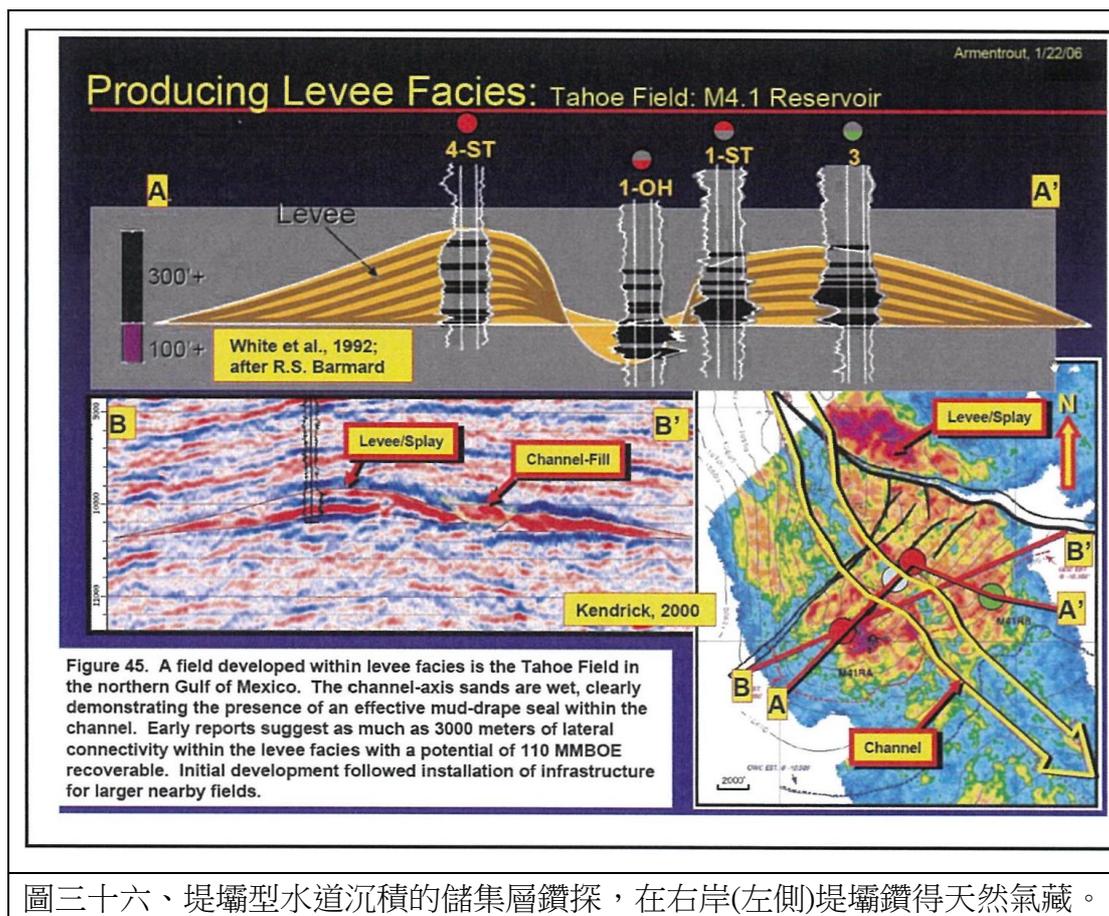


Reservoir in
Channel and Levees



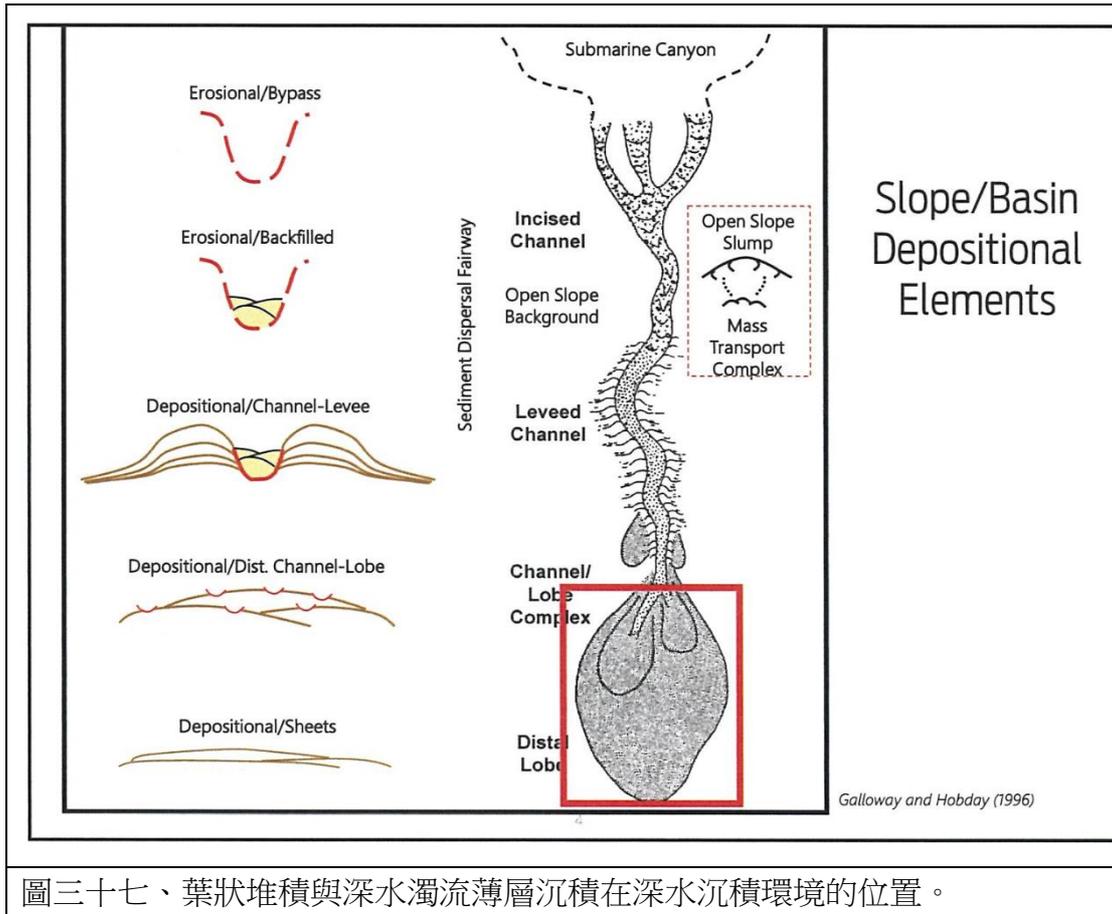
NET:GROSS 0.3-0.9 0.4-0.7 → 0.1 Jennette, 2004

圖三十五、自然堤內堆積的儲集岩特徵。



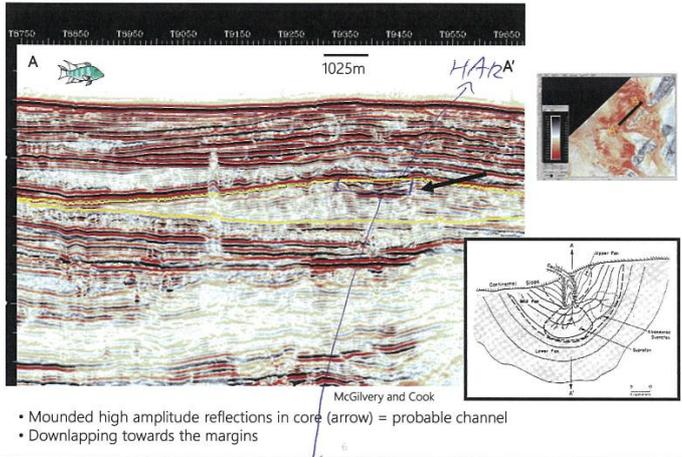
課程第四天（10月5日）

第四天的課程為濁流的深水沉積系統最尾端，葉狀(lobe)堆積與深水濁流片狀(Sheet)沉積(圖三十七)。圖三十八顯示了一套深海扇外葉狀堆積從深海扇到最外緣的變化，在靠近深海扇的位置，仍可觀察到部分水道的特徵，在葉狀堆積中，則呈現透鏡狀的沉積特徵，差別在葉狀堆積的不同位置有不同厚度。圖三十九顯示了一個濁流片狀沉積的野外露頭，每一層片狀堆積包含了一套鮑馬序列。濁流片狀堆積隨著堆疊方式的不同，分為層狀堆疊(layered sheet)與合併堆疊(amalgamated sheet)(圖四十)，這兩種堆疊方式反映了當時濁流的差異，形成合併堆疊的濁流相較於層狀堆疊的濁流，含有較多的粗顆粒沉積物，每次沉積事件造成的沉積物樣貌較形似透鏡狀，多次事件後形成合併堆疊。層狀堆疊的濁流事件較接近尾端，顆粒較細，各位置堆積厚度較為一致。



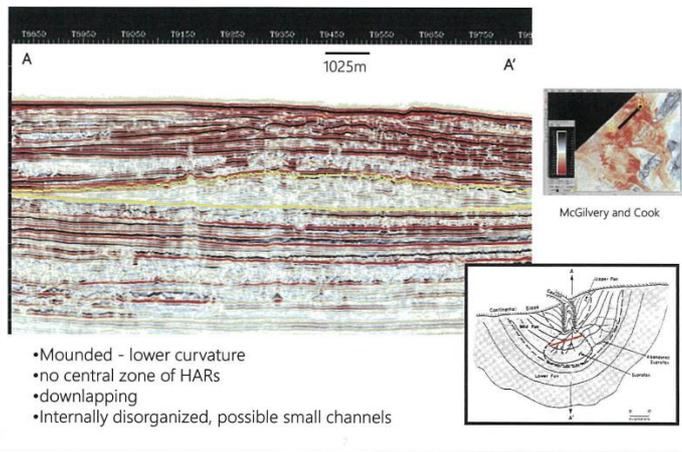
圖三十七、葉狀堆積與深水濁流薄層沉積在深水沉積環境的位置。

Brunei DLCs - Upper Package- Seismic Character - Proximal

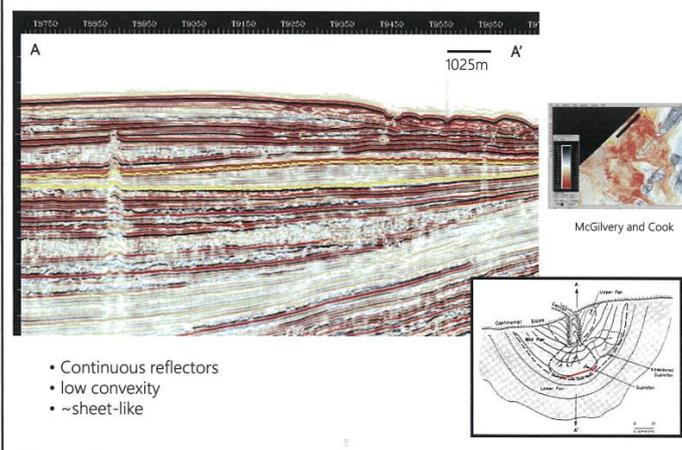


*slh relate channel complex
HAR? should wider*

Brunei DLCs - Upper Package- Seismic Character - Medial

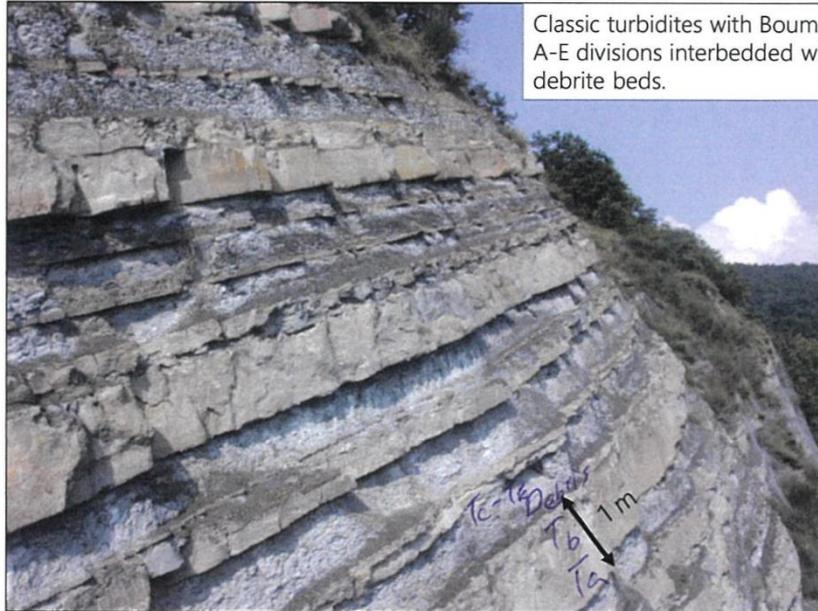


Brunei DLCs - Upper Package- Seismic Character - Distal



圖三十八、震測剖面顯示一套葉狀堆積的變化。上圖為最靠近深海扇的位置，中圖為葉狀堆積中部，下圖為葉狀堆積外緣。

Layered Sheets

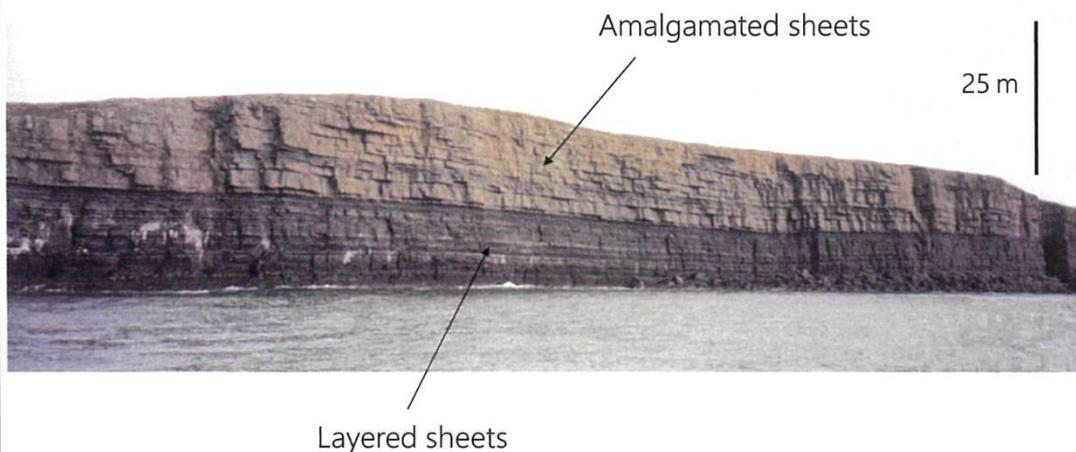


"Layered Sheets" – Distal basin floor setting
Miocene Marnosa Arenacea – Apennines of Italy

圖三十九、濁流片狀沉積野外露頭。

Base of Ross Formation: Sheet Turbidites

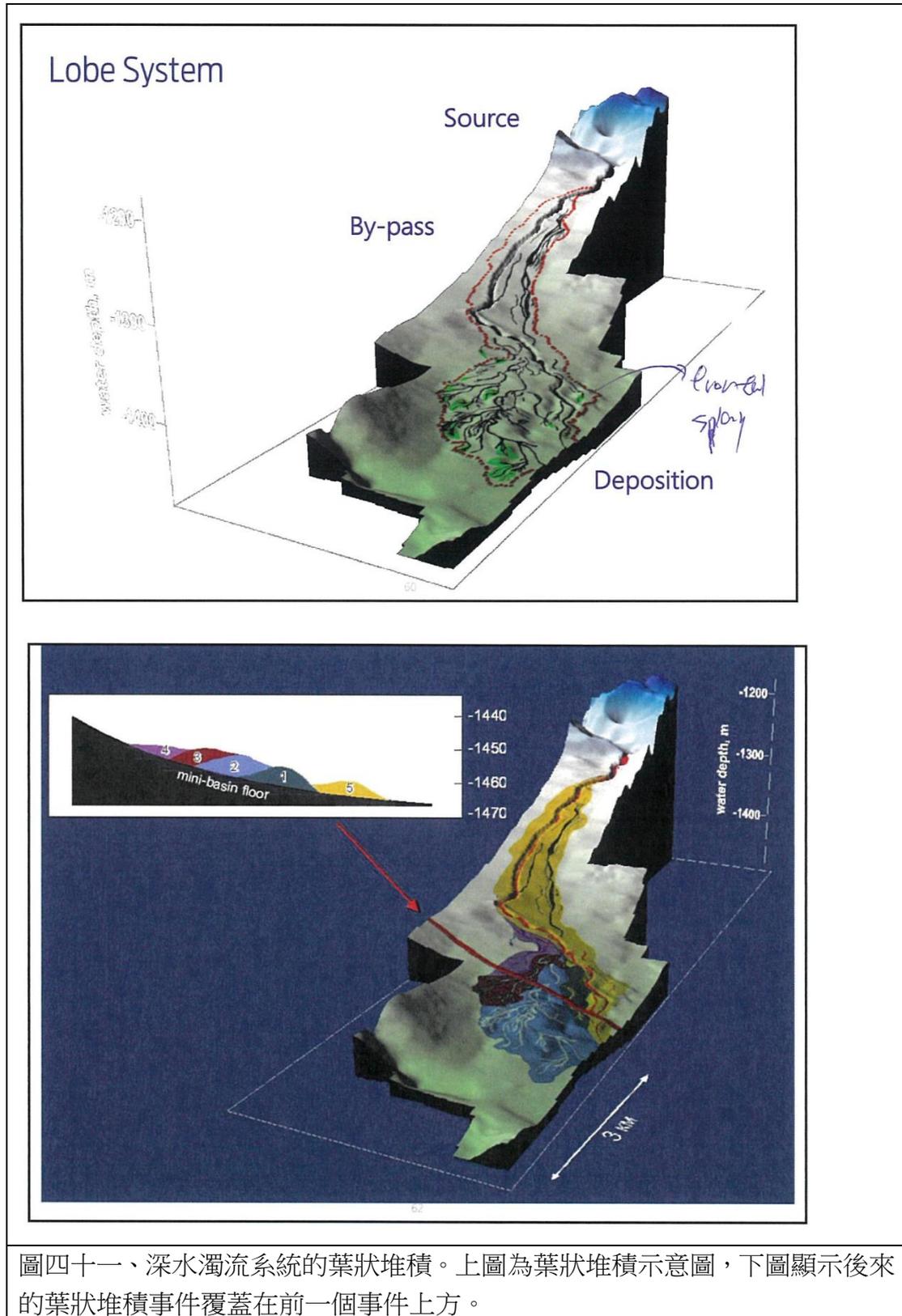
Note - net: gross, bed continuity and connectivity



85

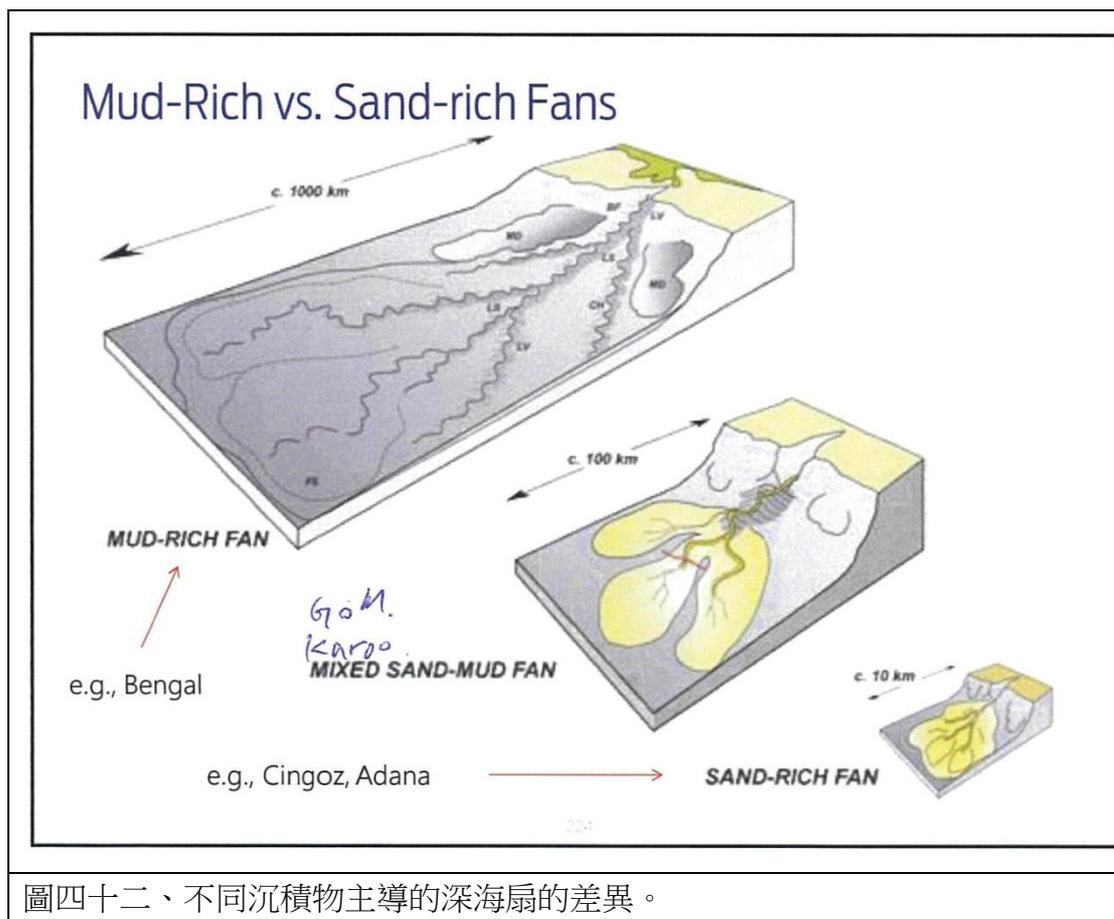
圖四十、野外濁流片狀堆積層狀堆疊與合併堆疊露頭。

圖四十一展示葉狀堆積的沉積過程，濁流由源頭往深海移動，通過大陸斜坡的峽谷與水道，最後堆積在深水區形成葉狀堆積。而在多次的葉狀堆積之間，後發生的事件可以覆蓋在之前發生的事件上方。



圖四十一、深水濁流系統的葉狀堆積。上圖為葉狀堆積示意圖，下圖顯示後來的葉狀堆積事件覆蓋在前一個事件上方。

深海扇在不同的沉積物輸出下也會產生不同的形貌，圖四十二展示了不同顆粒的沉積物主導沉積過程，造成深海扇的差異。泥質沉積物由於能夠被濁流帶往較遠的地方，由其主導的深海扇能夠廣達上千公里；相反地，砂質沉積物主導的深海扇，規模會比較小，在數十公里的規模。泥質與砂質沉積物兼具主導的深海扇，則可達上百公里的規模。在探勘工作上，儲層大多還是以砂質顆粒為大宗，故能夠精準判斷哪裡有砂質沉積物主導的深海扇，就能夠有較高的探勘成功率。



圖四十二、不同沉積物主導的深海扇的差異。

葉狀堆積與水道堆積在深水沉積中都是重要的探勘標的，但其特徵具有顯著的不同(圖四十三)。水道堆積有較多的沉積物受侵蝕或通過的沉積過程，且沉積物流向多為單一方向，並且因為被地形或自然堤所限制，沉積物呈現的形貌為長型或是透鏡狀較多，在層序地層中，地層厚度向上變薄。葉狀堆積則在較開放的深海區域，沉積物流向以單點往外擴散的方式為主，沉積物延展範圍較廣，沉積物堆積的水平延伸較廣，在層序地層中，地層厚度則向上變厚。課程中間三天的

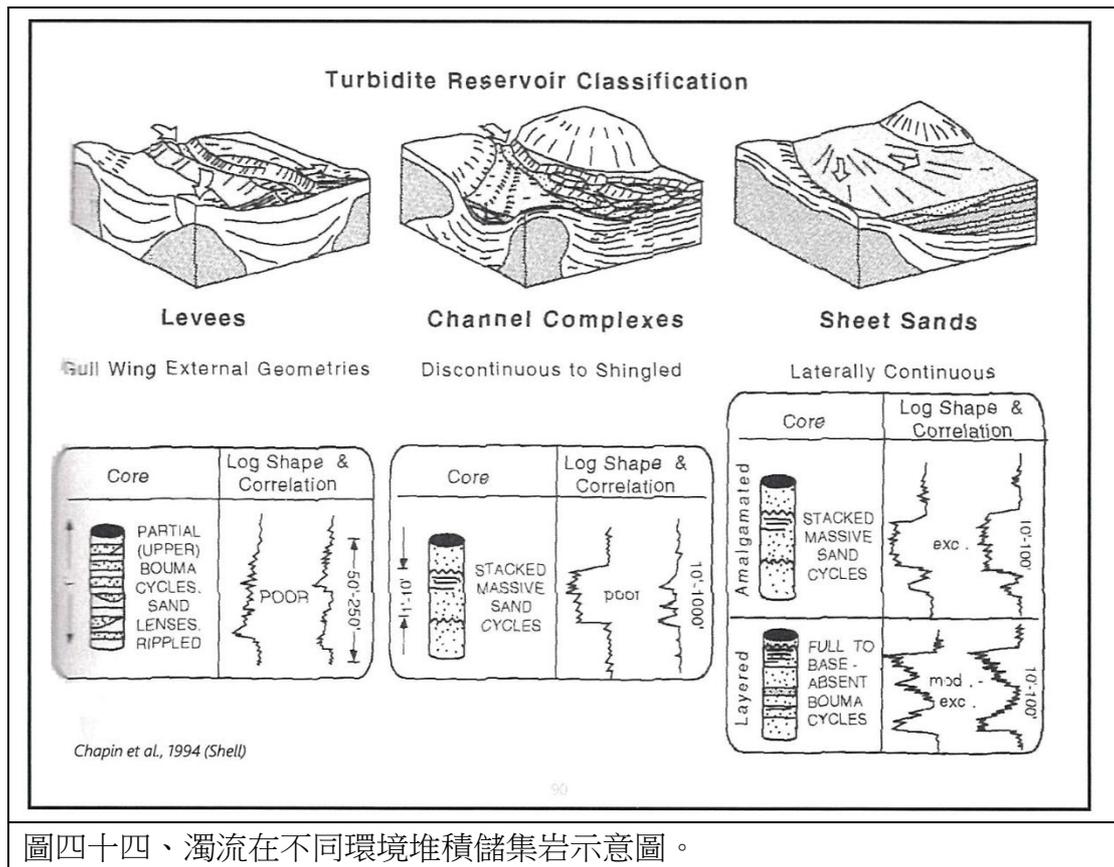
課程完整介紹整套濁流深水沉積的過程與堆積的樣貌，圖四十四整理了堤壩、水道複合沉積及片狀堆積的砂岩，在井下資料中呈現的樣貌。

Key Characteristics: 'Lobes' vs 'Channels'

<i>Lobes (sheets)</i>	<i>Channel fills</i>
	
<ul style="list-style-type: none">» laterally extensive, tabular» largely aggradational» "thickening-upward" cycles» radial/complex palaeocurrents	<ul style="list-style-type: none">» elongate/lenticular» erosion & bypass» thinning-up cycles» unimodal palaeocurrents

103

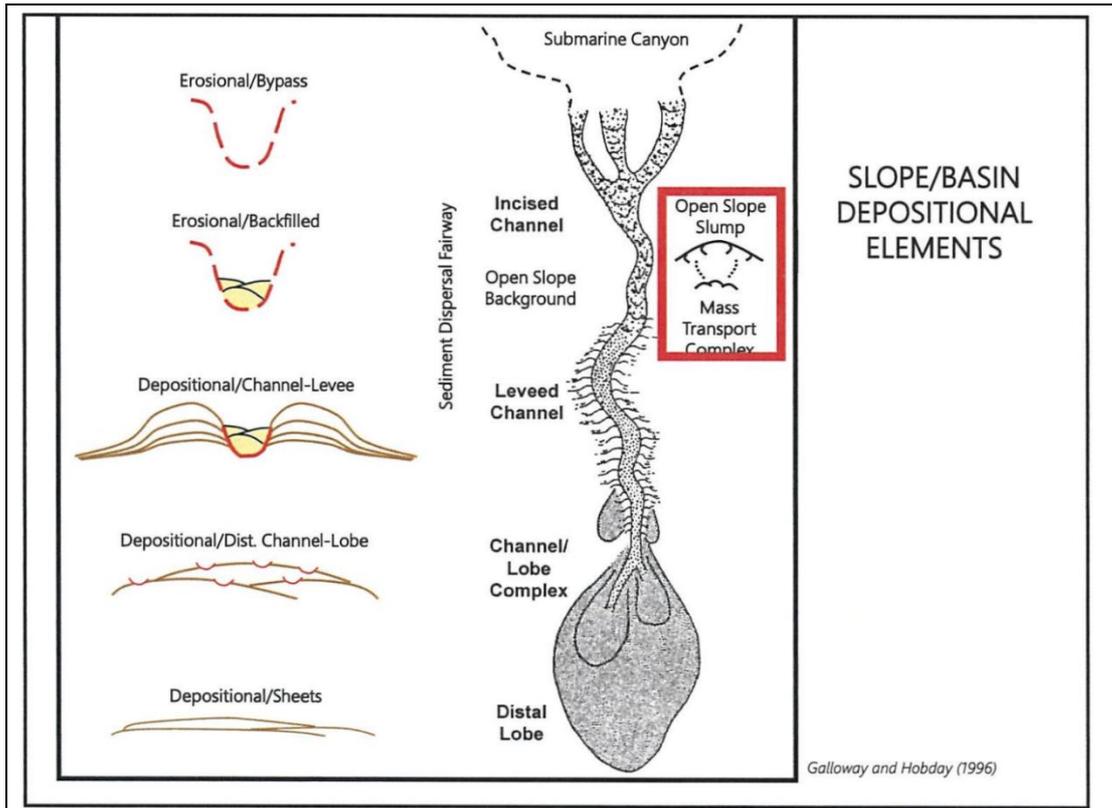
圖四十三、葉狀堆積與水道堆積的差異。



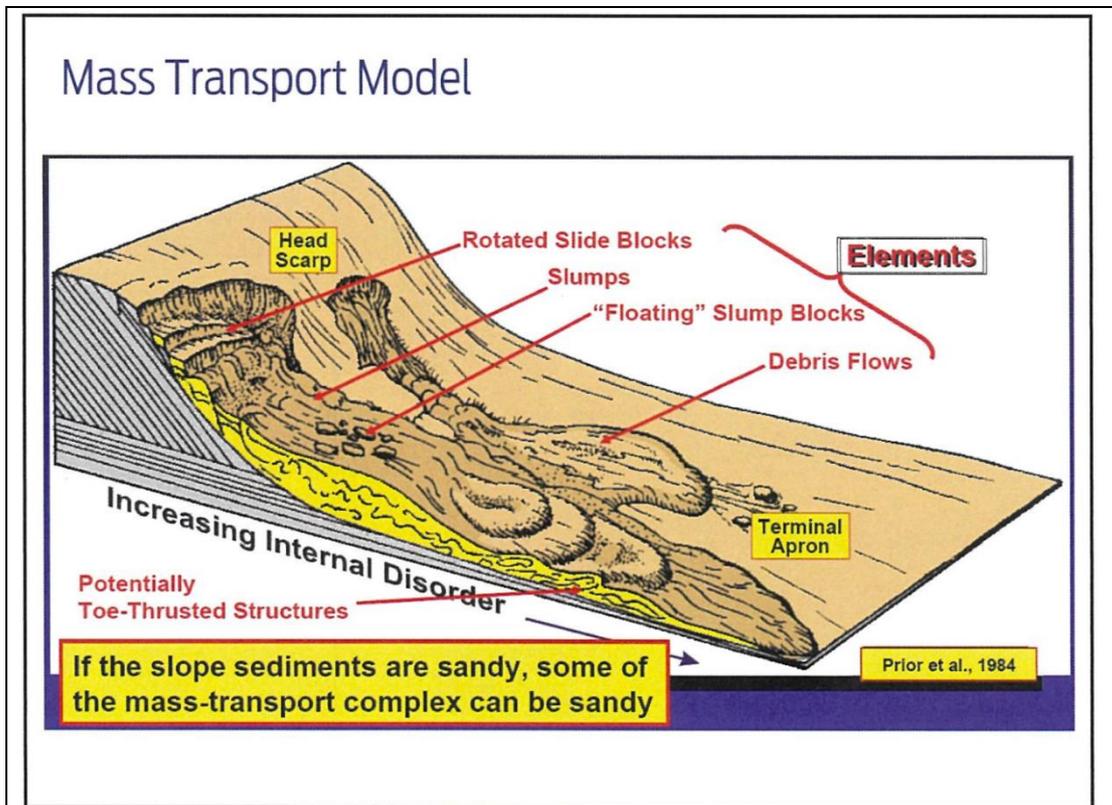
圖四十四、濁流在不同環境堆積儲集岩示意圖。

課程第五天（10月6日）

課程最後一天，則是介紹濁流以外，其他方式的深水沉積與儲層。首先介紹開放式的大範圍陸棚邊緣或斜坡沉積物崩塌或滑移(圖四十五)，產生的沉積物稱為 MTD(mass transport deposit) (圖四十六)，這種過程通常產生的沉積物流為碎屑流(debris flow)，沉積物一旦失去動能，即直接堆積在原地，造成沉積物輸送距離較短的現象，大多直接堆積在斜坡底部不遠處。在斜坡上的崩塌也有可能形成類似鋤形正斷層的效果，使得斜坡下方深海沉積物產生滑移等活動，形成各種壓縮構造(圖四十七與圖四十八)。

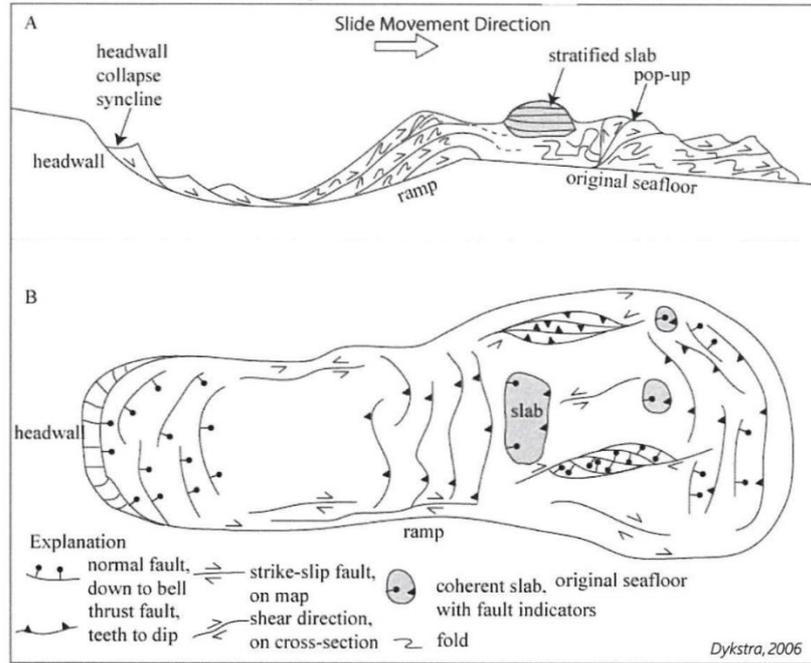


圖四十五、斜坡崩塌在深水沉積系統的位置。



圖四十六、MTD 的產生與堆積示意圖。

Detailed Mass Transport Model



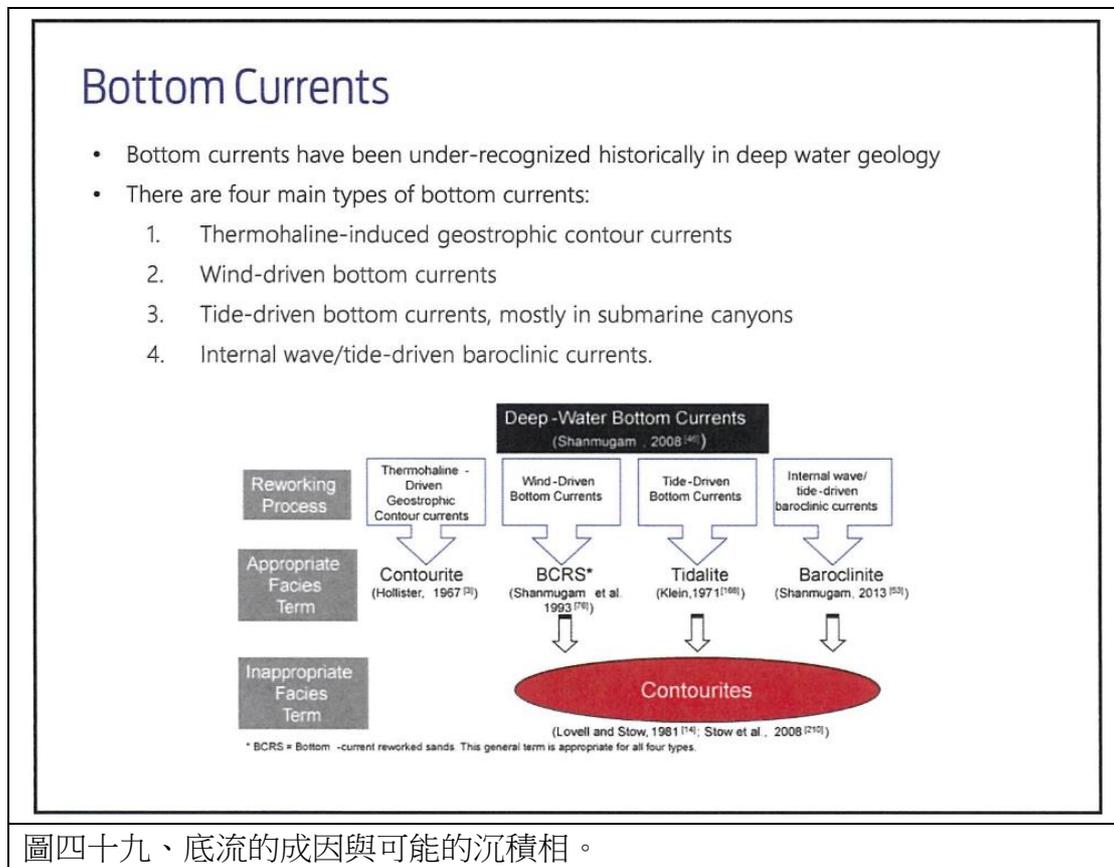
圖四十七、斜坡上發生的 MTD 活動形成類似鉞形正斷層的效果示意圖。

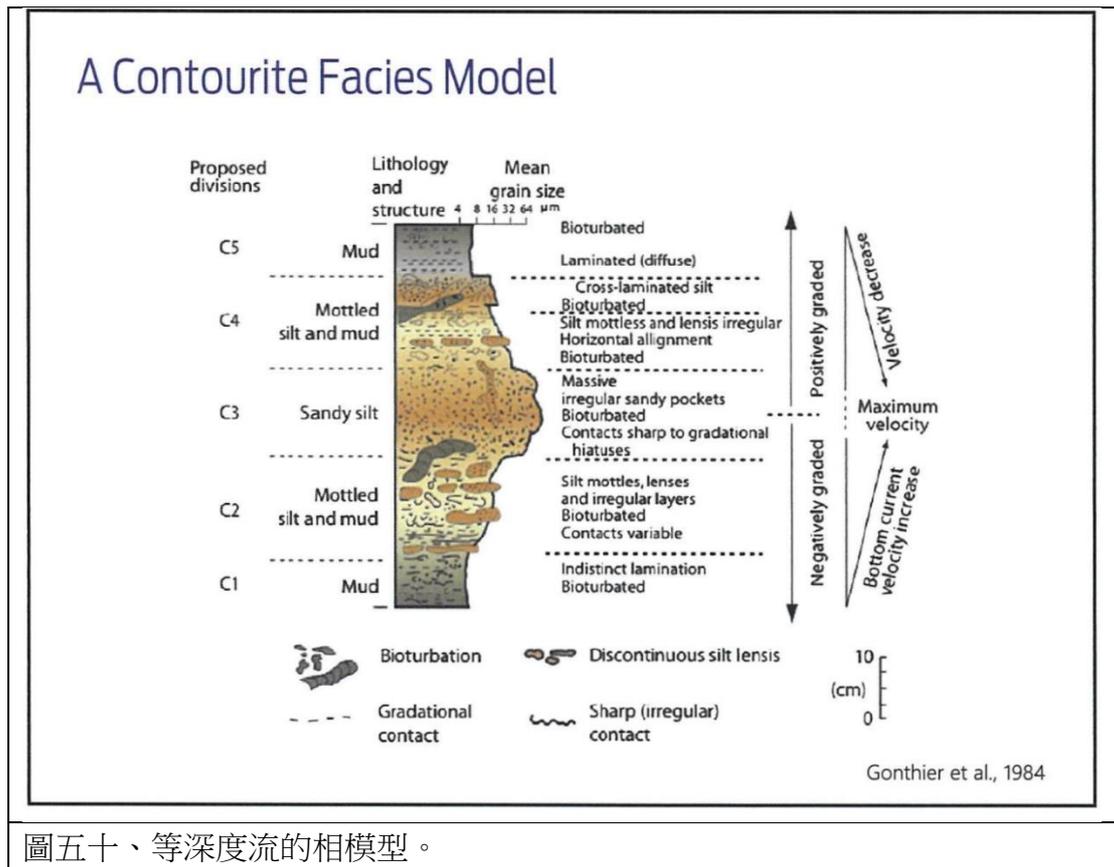
Deformation in a Slide



圖四十八、滑移造成的沉積物變形野外露頭。

影響深水環境的沉積物流，除了前面所述的濁流或碎屑流外，近年在學界較多被討論的一種沉積物流稱為底流(bottom currents) (圖四十九)。底流相對其他沉積物流較為特殊的地方為驅動的主要動力來源並非是重力，而是整個地球的溫鹽環流、風力、潮汐力或是海洋內波所產生。由於底流的產生與沉積物本身密切相關，因此目前少有地下儲層與之相關的研究。但風力、潮汐力或內波可能讓深水區域產生另一種流，稱為等深度流。這種流的特點在於不會有新的沉積物添加進來，而是重組受等深度流影響的沉積物分布。圖五十顯示一套等深度流的相模型，砂質沉積物會被堆積在流速最高的範圍，欲往流速低的方向，沉積物顆粒愈細。

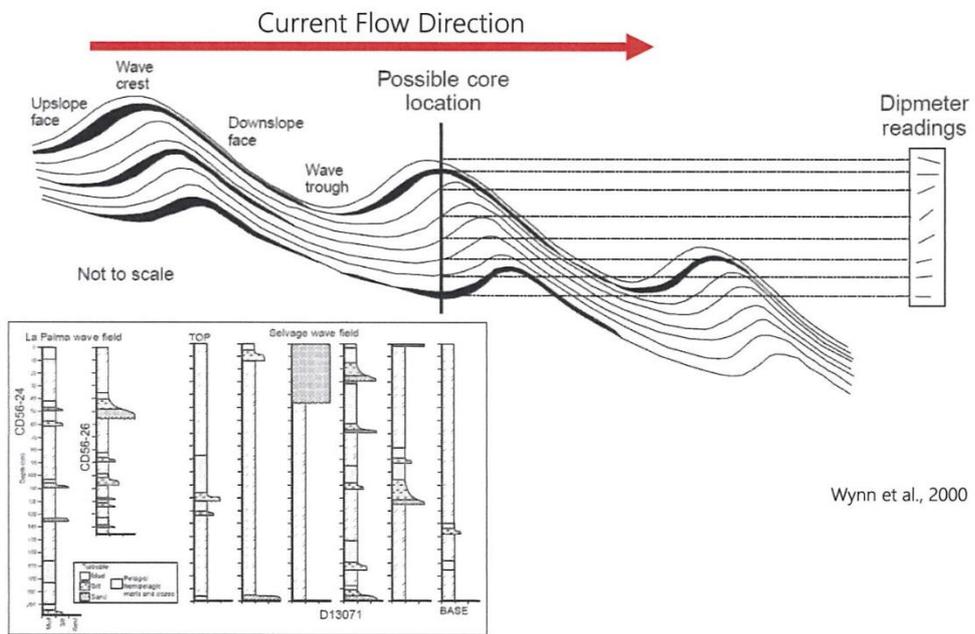




圖五十、等深度流的相模型。

深海沉積環境中，海床上有時可觀察到波狀的形貌，在垂直的剖面中也能同樣觀察到連續的波狀堆積，這種現象稱為沉積物波(sediment wave)(圖五十一)。沉積物波多發生在大陸斜坡或是堤壩外的斜坡上，陡坡朝向沉積物移動方向下游，緩坡則相反。在沉積物波的緩坡區域，由於濁流在此需要爬坡，動能減少，能夠堆積較粗顆粒的砂質沉積物，形成良好的油氣儲集地層，為重要的探勘標的。

Sediment Waves



圖五十一、沉積物波示意圖。

具體成效

本次參加深水沉積與儲層層序分析訓練課程，講師從沉積物的來源，沉積物從源頭到深海間的輸送堆積，到最後在深水的沉積過程，以及海水面變化造成的砂岩堆積位置變化，完整地解析整套深水沉積環境。並且能夠根據課程所講授的內容，藉由探勘資料的分析，在水道與深海扇的地層中找出可能的儲層分佈位置，有助於未來在深水沉積地層的探勘工作，提升發現油氣的成功率。

心得及建議

本次參加深水沉積與儲層層序分析訓練課程，上課內容從深水的沉積環境、沉積過程、海水面變化造成的地層層序等，都是從講師McGee 先生數十年的探勘經驗中，不斷地實際執行與驗證的成果。過往本公司的探勘工作，較少以深水礦區或深水形成的儲層為探勘區域或目標。藉由此次課程，學習到深水環境的堆積地層，並非只能堆積細顆粒的頁岩，而是能夠藉由海底峽谷-水道-深海扇這套沉積物輸送管道，將較粗顆粒的礫質與砂質沉積物，往深水區域輸送，並且能夠在海水面變化造成的層序循環中，堆積具有良好的油氣儲集潛能的砂岩層。

近年的探勘工作中，台灣西南海域深水礦區探勘工作，是少數能夠馬上應用本課程學到的知識，增進資料分析工作的成果。接下來的澳洲西北海域與印尼礦區探勘工作，也需要深水沉積環境相關知識應用在這些礦區。長期而言，未來也會有愈來愈多潛在的探勘礦區需應用到深水沉積與儲層層序的相關知識。因此，未來若能有相關的出國計畫，建議能夠選擇深水環境或是層序地層相關的項目，以提升整體探勘工作的技能與產出。並且建議在出國前，能夠先預習相關的基本知識，如水下沉積物輸送與堆積或是海水面變化相關的知識，在實際上課時便能夠更加有效率地學習上課內容。

參考文獻

Bouma, Arnold H. Sedimentology of some Flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation. Elsevier. 1962: 168 p.