

出國報告(出國類別：實習)

赴加拿大參加 「褶皺逆衝帶石油系統評估」訓練課程 出國報告

服務機關：台灣中油公司

姓名職稱：黃進達(探採事業部海域處地質師)

蔡默西(探採事業部海域處地質師)

孫立威(探採事業部海域處地球物理探勘師)

鄭舒尹(探採事業部礦區拓展處地質師)

派赴國家：加拿大

出國期間：114年6月21日至114年6月30日

報告日期：114年7月25日

摘要

本次共4名同仁參加哈斯基國際能源公司提供之「褶皺逆衝帶石油系統評估」訓練課程，學習包括：複雜構造區之地質與震測解釋基本概念與專有名詞、擠壓與斷層褶皺關係、逆衝系統、平衡剖面技術、反轉構造、深水褶皺逆衝帶等，認識斷層彎曲褶皺、斷層擴展褶皺、滑脫褶皺等地質模型，並配合課程所學於加拿大落磯山脈地區進行實地野外考察，觀察前陸盆地、麓山帶至前山帶地質特徵，認識特納谷、麋鹿山油氣田的開發史，期望可將所學應用於目前的探勘工作，以利未來勘定油氣藏工作。

目錄

壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
一、實習人員	3
二、室內課程	3
三、野外地質考察課程	29
參、具體成效.....	51
肆、心得及建議.....	52

壹、目的

本公司與哈斯基能源國際有限公司(簡稱 Husky)於101年12月18日簽署台南盆地部分深水礦區合作探採契約(JVC)，契約第6.8條規定在合作案探勘與生產期間每年提供本公司與政府員工訓練，Husky 在今年度預算額度內於加拿大卡加利(Calgary)舉辦「褶皺逆衝帶石油系統評估」訓練課程，本課程為褶皺逆衝帶石油系統之形成理論分析及野外地質考察，期透過課程了解構造理論及地質特性，並實地考察因擠壓所形成褶皺逆衝帶儲集岩之地質特徵，有利進行儲集岩類比、地層構造解釋及油氣資源評估，有效降低探勘風險，對本公司國外礦區及海域礦區未來探勘發展之極有助益。

貳、過程

Husky 舉辦「褶皺逆衝帶石油系統評估」訓練課程，主要內容包括褶皺逆衝帶石油系統之形成理論分析及野外地質考察，期間為114年6月21日至30日。詳如下表：

預定起迄日期	天數	到達地點	詳細工作內容
114.6.21 ~ 114.6.22	2	台北-加拿大 (卡加利)	啟程 課前準備
114.6.23 ~ 114.6.24	2	加拿大 (卡加利)	室內課程： 褶皺逆衝帶石油系統評估的基本原理和技術，並透過世界各地的案例研究進行說明與練習。包括逆衝帶構造的震測解釋和地質平衡剖面。 課程主題： • 不同構造環境下斷層幾何基本概念 • 擠壓構造學與結構基礎 • 擠壓構造和油氣構造圈閉的幾何形狀和演化 • 解釋褶皺逆衝帶的震測與井下資料 • 快速評估褶皺逆衝帶解釋方法 • 分析概念及技術在褶皺逆衝帶的規劃與應用 • 辨識與解釋褶皺反轉構造，以及對油氣儲量的影響 • 與褶皺逆衝斷層構造相關的裂縫性儲層 • 褶皺逆衝帶內的石油系統，以及全球探勘案例研究
114.6.25 ~ 114.6.27	3	加拿大 (卡加利)	野外地質考察課程： 地質考察內容包括：褶皺逆衝帶之沉積物重力流機制與產狀、深水沉積相及沉積體系、水道沉積與儲集岩、濁流岩層序、水流過渡帶海底沉積物、濁流扇等，以了解褶皺逆衝帶岩石組構對油氣流動性的影響、儲油氣層在三維空間之變化，以利未來開發生產井之佈置和穿孔設計。
114.6.28 ~ 114.6.30	3	(卡加利) 加拿大-台北	統整課程資料、總結討論 返程

一、實習人員

姓名	服務單位	職稱
黃進達	探採事業部 海域處	地質師
蔡默西	探採事業部 海域處	地質師
孫立威	探採事業部 海域處	地球物理探勘師
鄭舒尹	探採事業部 礦區拓展處	地質師

二、室內課程

室內課程分為7章節，課程目標如下：

1. 正確識別和解釋逆衝和反轉構造之證據。
2. 從儲層尺度至盆地規模的構造幾何演化有基本了解，以及其油氣探勘意義。
3. 了解並應用建置與回復構造剖面(cross section)之技術。
4. 在單一構造下，利用構造形貌判斷油氣儲集分布。
5. 建立良好的基礎概念針對區域性、好景區及儲層尺度之區域展開解釋工作。
6. 提供常見觀念及用語增進團隊間之技術溝通。
7. 提供足夠的基礎以了解主要問題及適當問題，尋求更進一步的專業技術。

(一) 基本概述

本章節首先介紹不同構造蘊藏量分布百分比(只計算超過30億桶之蘊藏量，如圖1-1)，自1995年來的油氣產量主要來自於傳統油氣，隨著近年來由於非傳統油氣的大量生產，使得前陸盆地的比例增加，並隨著深水礦區的發現與開發，這些以被動大陸邊緣構造為主的比例有增加的趨勢。

1. 應力、破裂與斷層之關係

產生逆衝構造的背後必須首先了解岩石圈、滑脫面及應力的關係(如圖1-2)，以及應力、破裂與斷層之關係，依據其主應力軸方向的不同，會產生伸張、擠壓及走向滑移斷層3種常見的斷層型態(如圖1-3)，由應力方向也解釋了逆衝斷層為何角度較緩(約30度)，伸張斷層角度較陡(約30度)。並且展示斷層在地圖上某一水平層面在斷層兩側的距離，從水平切面上看的是斷層起伏(Heave)，其雖與斷層位移(Net slip)及斷層傾角(Dip)有關，但非真的斷層位移。

解釋上亦須多加注意擠壓和拉伸斷層的走向長度和斷層位移之間的概念關係(如圖

1-4、1-5)，斷層位移從兩端的零增大到中心附近的最大值，與斷層的總長度 L 成正比，且比率與斷層型態、岩石的特性以及變形的情况有關。在這種情況下顯示為 D 的箭頭將大致相當於斷層起伏(heave)，而非總位移，且擠壓及伸張斷層下 L 與 D 的關係也有所不同，此即為弓箭理論(Bow and Arrow)。

2. 區域水平與斷層的關係

某水平地層的區域水準面(regional elevation)是一個構造水平，不受局部斷層或褶皺的結構標高(和傾角)影響。它不一定是一個水平的表面，但本身可能通過均衡學說，熱和彎曲過程中影響岩石圈而變形，通常是一個比斷層相關結構更大的波長。區域 (Regional)是我們對分析斷層結構的基準面。可能需要外推至既有資料之外更遠的地方，或使用該區域的下盤地層直接定義。(即拉張發生之前的沉積層位)。傾向滑移斷層(Dip slip fault)影響區域水準有2種方式(如圖1-6)：

- (1) 上盤抬升在 R 之上=壓縮或逆衝斷層。Regional 可由未變形的前陸和構造最低的下盤與向斜定義出來。
- (2) 上盤降低在 R 之下=張裂斷層，Regional 可由未變形之盆地邊界和構造最高的下盤與背斜定義出來。

3. 斷層面型態和摺皺

傳統上摺皺和斷層被認為是岩石扭曲變形的兩種型態，其為不同的機制反應與應力關係，但現實上摺皺與斷層通常一起發生，所有摺皺在斷層之下且是斷層相關的現象：

- (1) 斷層：發生在相對淺的地殼之地層脆性(Brittle)斷裂。
- (2) 摺皺：發生在更深的地殼之內部韌性(Ductile)形變。

斷層型態和上盤型態關係息息相關，理想的逆衝斷層型態下(如圖1-7)，摺皺型貌完全取決於斷層 Ramp 的位態，同樣道理在伸張斷層下也適用，伸張斷層上盤如果有類似褶皺的型貌必定與斷層 Ramp 與其後的 Flat 有關。

4. 斷層在震測剖面上的顯示比例與解釋要點

我們在震測解釋上，往往會調整剖面比例以方便我們做解釋，但常常因為垂直向的誇大，斷層傾角難以識別，因而解釋出不合理的斷層，且在大尺度上無法看出其構造意義(如圖1-8)。另一種常見尺度問題為郵票(Stamp view)問題，當解釋剖面的壓縮尺度過於細節，那麼將無法完整地看出構造型貌，解釋時也會有更多不確定性或錯誤(如圖1-9)，因此，解釋時須注意以下幾點：

- (1) 「遠觀」對確定層位的區域高度之重要性。

(2) 確定局部構造與毗鄰變形之一致性，如果不一致，嘗試思考為什麼。

(3) 局部理解為整體構造和演化歷史所必需。

最後，現實中許多大區域的露頭其實是可以輔助我們進行震測解釋的(如圖1-10)，找到相同的地層可大大增加震測解釋的精確性，順利找到目標的構造及儲層。

5. 本章節重點整理

如何使用簡單的幾何學技術和洞察：

(1) 避免常見錯誤

(2) 迅速檢查並確認解釋

(3) 建立更加健全的解釋和更好地評估風險

(4) 尋找問題

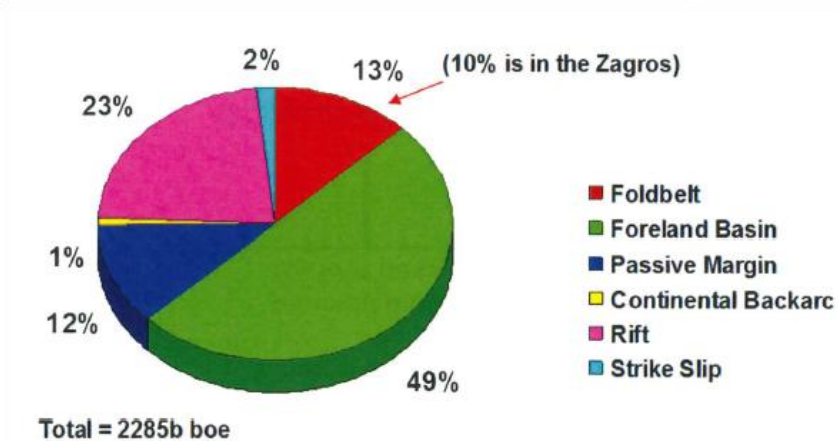


圖1-1 不同構造蘊藏量分布百分比

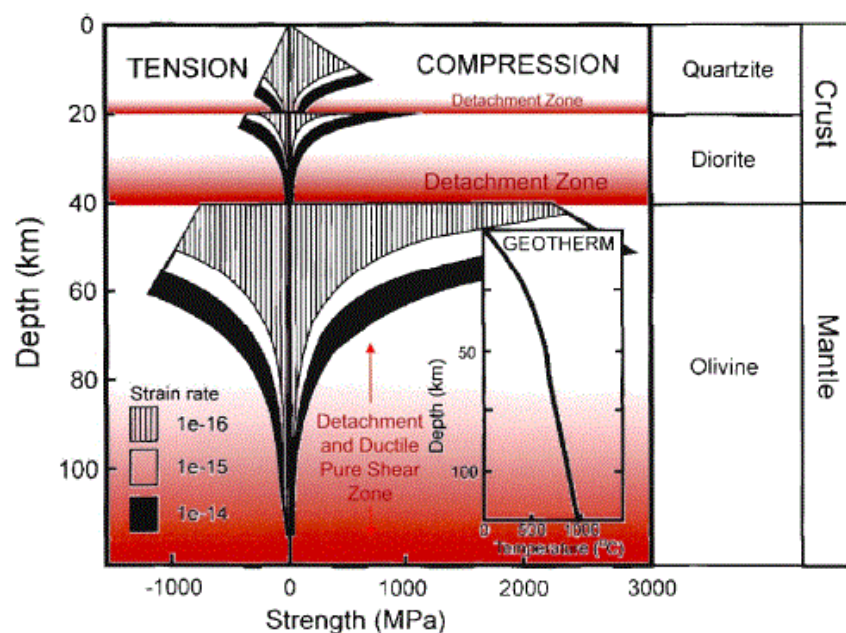


圖1-2 岩石圈隨深度與滑脫面及應力關係圖

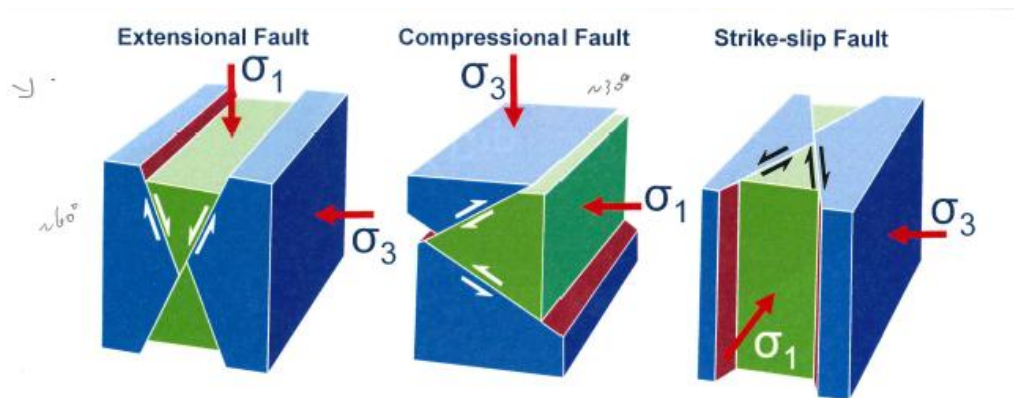


圖1-3 伸張、擠壓及走向滑移斷層

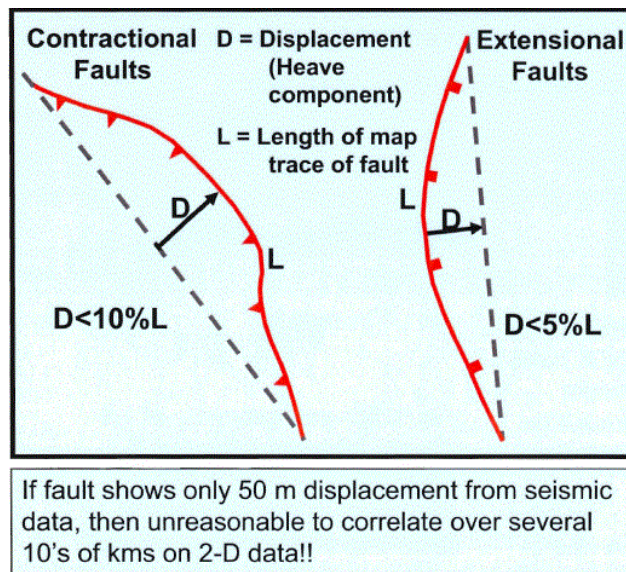


圖1-4 擠壓和拉伸斷層的示意圖

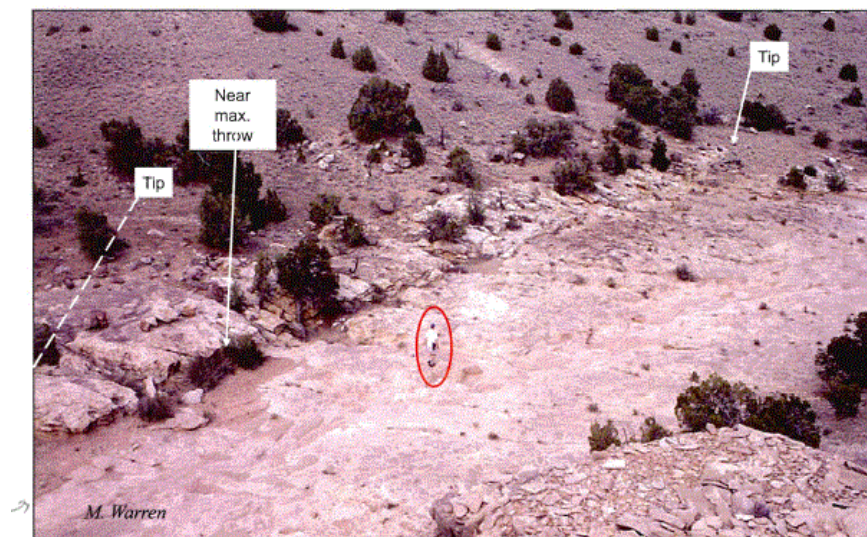


圖1-5 猶他州張裂斷層示意圖

(Tip 為斷層兩端，斷層總長約100~150公尺，最大位移約2公尺)

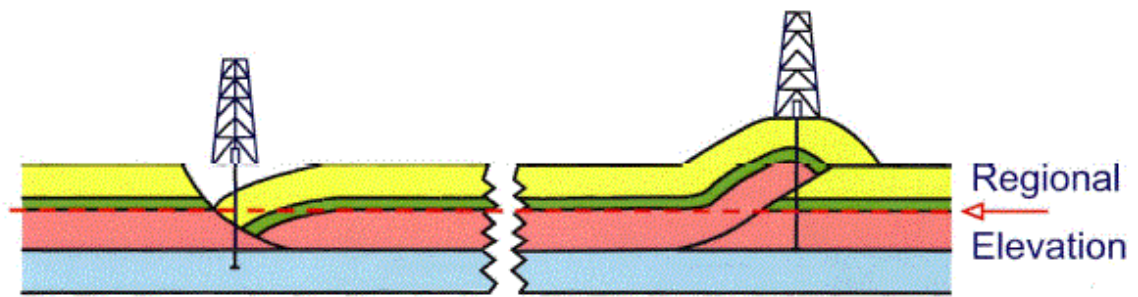


圖 1-6 區域水平和斷層：區分張裂和壓縮斷層

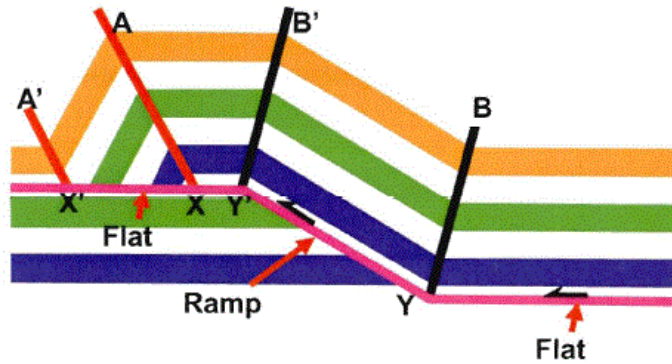


圖1-7 斷層型態和上盤型態關係

Display Scaling Faults on Seismic

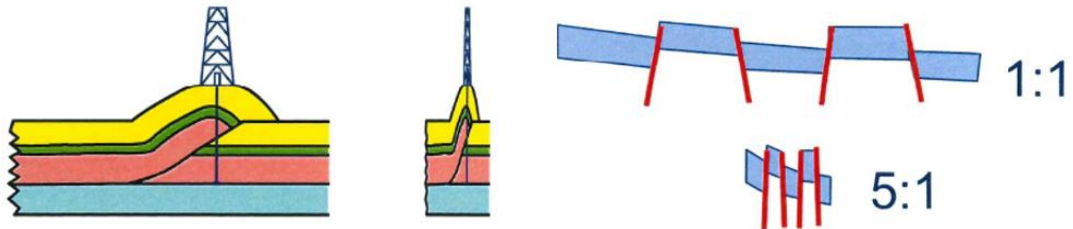


圖1-8 解釋尺度示意圖



圖1-9 Stamp view 示意圖，左：震測剖面；右：局部放大

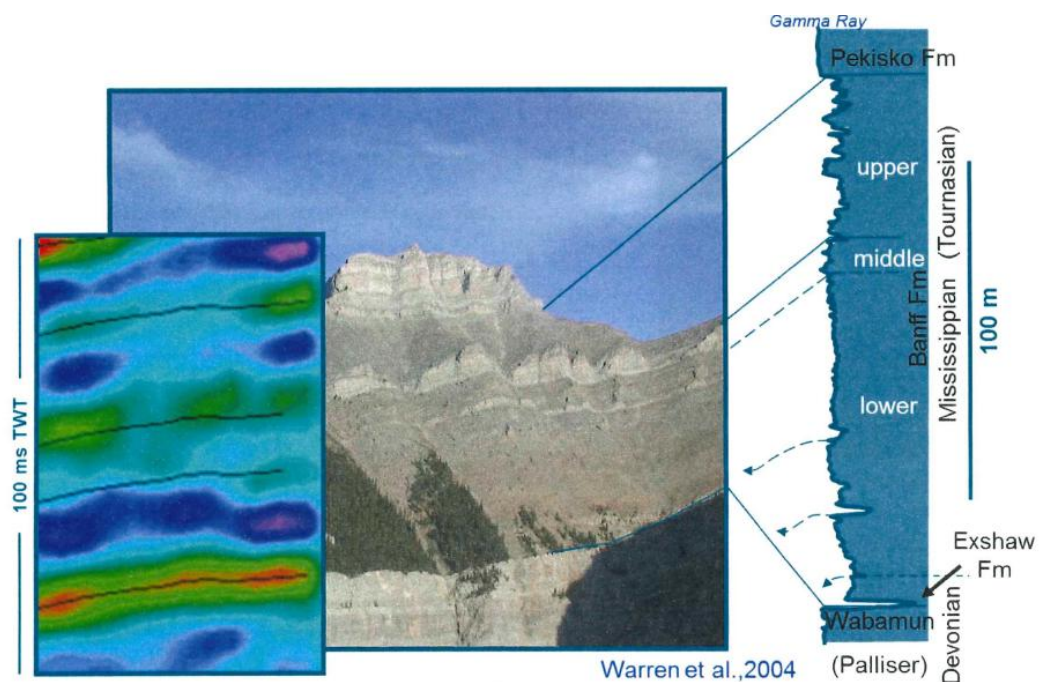


圖1-10 震測尺度的露頭

(二) 二維空間的壓縮斷層系統

1. 逆衝斷層規則:

逆衝斷層的規則主要有以下幾項：

- (1) 逆衝通常將較老的岩石置於較年輕的岩石頂部，地層產生縮短和重複。此規則可被打破，當複雜地層的初始幾何形狀已變形。
- (2) 逆衝將地層提升至區域海拔之上;海拔量取決於逆衝斜坡傾角，坡道的高度和位移量。
- (3) 逆衝斷層沿著方向爬升 - 反向逆衝斷層打破這個規則。
- (4) 逆衝斷層一般有一個斜坡/扁平的幾何形狀;flats 一般發生在弱地層和 ramp 傾向於 cut 主要地層。
- (5) 逆衝產生上盤褶皺的運動和地層縮短。
- (6) 逆衝(方向)通常向前陸按順序傳播。

了解逆衝斷層將對於地質解釋具有重要意義，早期地質學家認為逆衝斷層在露頭上的證據主要有以下兩點(如圖2-1)：

- (1) 老的地層疊至於年輕的地層上。
- (2) 顯示的地層單元重複。

2. 逆衝帶褶皺理論模型

褶皺逆衝帶，現被理解為經由脆性和韌性過程的組合縮短之幾何連結系統，幾何

和演化由幾個基本規則所約束。我們可以利用這些關係來建立和測試地下構造的解釋，褶皺類型的主要差異在於有以下幾種原因：

- (1) 斷層面的幾何形貌
- (2) 斷層擴展與褶皺發育的關係
- (3) 斷層傾角發育
- (4) 對小於震測尺度下的構造影響，例如：裂隙

因此，斷層運動引起的褶皺作用的特性主要可分為以下3種(如圖2-2)：

- (1) 斷層彎曲褶皺(Fault-Bend Fold)
- (2) 斷層擴展褶皺(Fault-Propagation Fold)
- (3) 滑脫褶皺(Detachment Fold)

3. 斷層彎曲褶皺(Fault-Bend Fold)

地層沿著斷層面滑動時，遇到斷層面角度改變(bend)導致地層被迫彎折成褶皺，斷層面可區分為較陡的 Ramp 以及較平緩的 Flat 滑脫面，並依據所在的上下盤與斷層的截切情形可細分不同的構造區，常見於薄皮構造(如圖2-3)。斷層彎曲褶皺隨著時間發育，其前翼(Forelimb)與後翼(Backlimb)長度會愈來愈大直到後翼與斷層長度相同，且此時前翼與後翼的相對距離最近，因此，我們可以藉由觀察斷層褶皺的形貌判斷其發育時間以及斷層的形貌(圖2-4)。

4. 斷層擴展褶皺(Fault-Propagation Fold)

當逆衝斷層未完全突破上覆地層時，斷層前端的地層被推擠，在脆性破裂前產生彎曲而形成褶皺，褶皺位於斷層前端(Fault tip)上，斷層延伸帶動褶皺生長，隨著褶皺生長到一定程度時，前翼會變得更加陡峭甚至可能反轉，並且可能在前翼產生較多的裂隙，這種構造在薄皮與厚皮構造皆有可能產生(圖2-5)。斷層擴展褶皺在現生構造上的幾何形貌差異很大，且因構造複雜較難以用震測資料對其陡峭的前翼前端有良好的成像，在解釋上須多加注意，課堂上也提供了實際震測剖面繪製練習加強對此構造的了解。

5. 滑脫褶皺(Detachment Fold)

地層在一個弱面(如頁岩、鹽層或軟弱地層)上發生滑動或解離，使塑性的地層在滑脫面上發生摺疊，帶動上部地層(大多也可塑性高，但比滑脫面堅硬)產生褶皺，這種構造不會產生 Ramp，隨著應力及環境的不同，再現生環境下的形貌相當多樣，常見於薄皮構造(圖2-6)。

6. 本章節重點整理

- (1) 基準面上區域淨縮短量減少；年老岩層在年輕岩層之上。
- (2) 上盤必須變形以容納斷層縮短。
- (3) 上盤摺皺的型態與斷層類型及岩石變形的機制有關。
- (4) 可發展3種基本類型的單向壓縮斷層與褶皺，但這些構造可能混合發展(圖2-7)。

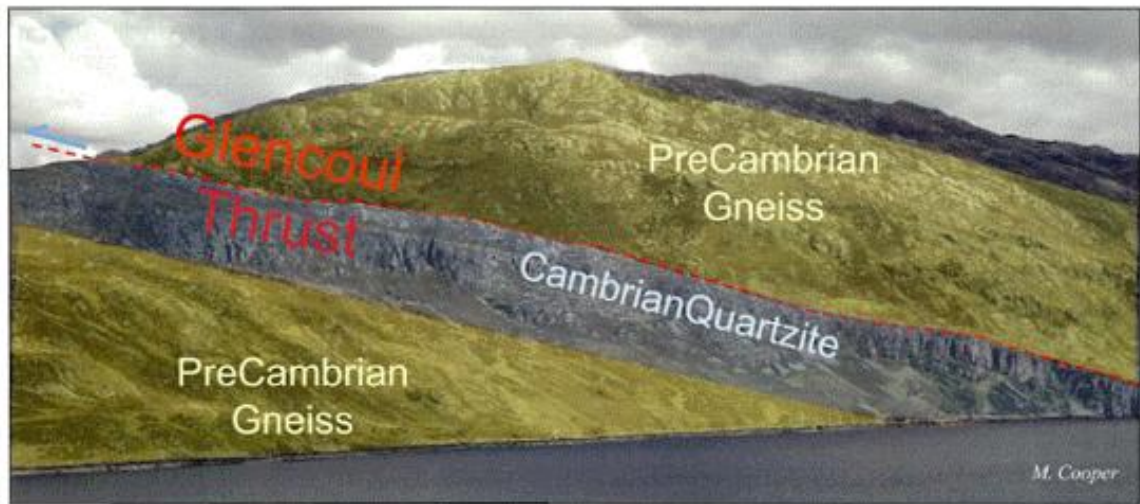


圖2-1 典型逆衝斷層

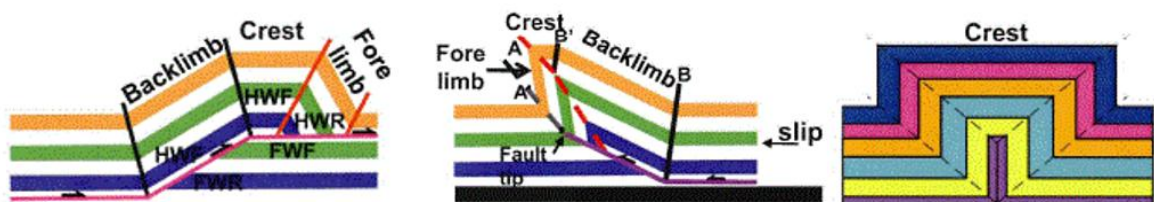


圖2-2 逆衝帶的摺皺型態

(左: Fault Bend Fold；中: Fault Propagation Fold；右: Detachment Folds)

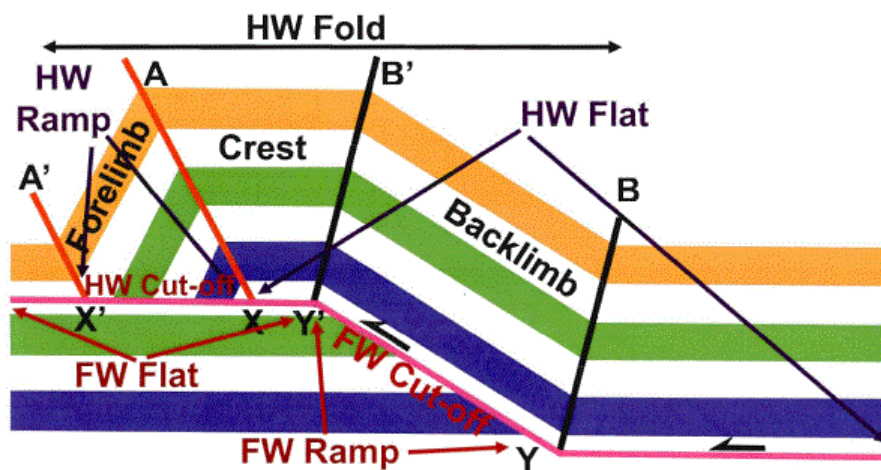


圖2-3 理論逆衝斷層構造組成

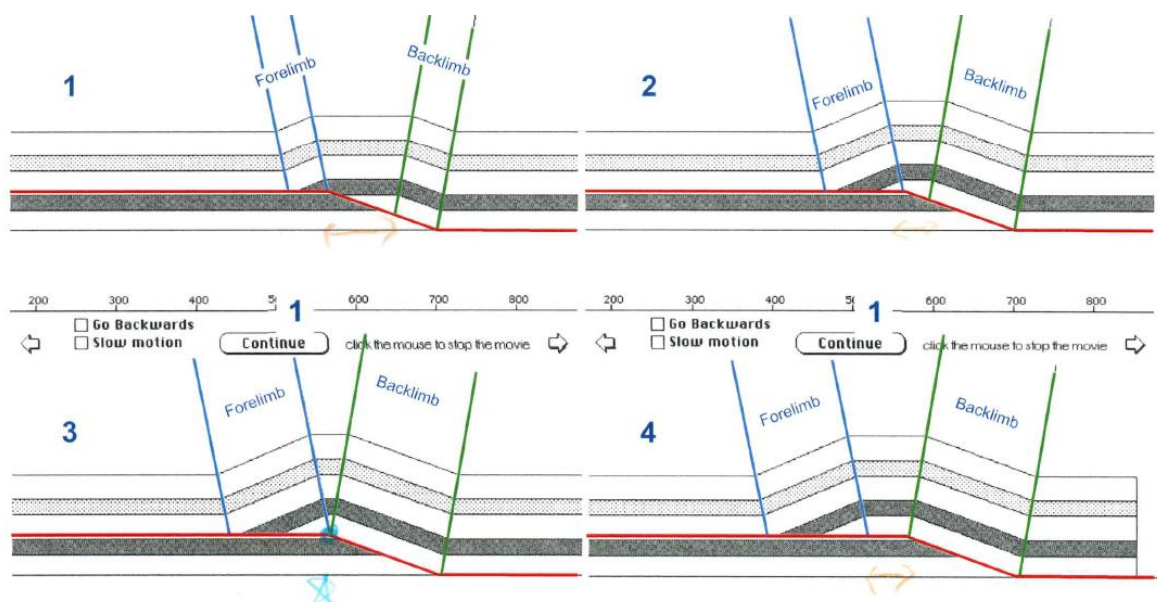


圖2-4 斷層彎曲褶皺發育圖(發育順序1,2,3,4)

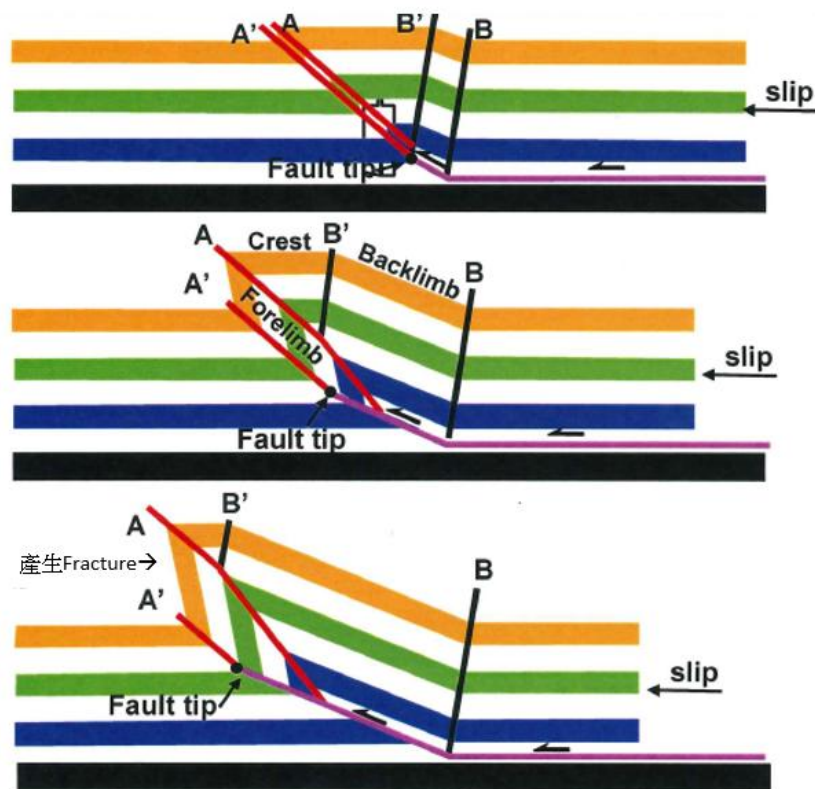


圖 2-5 斷層擴展褶皺發育圖

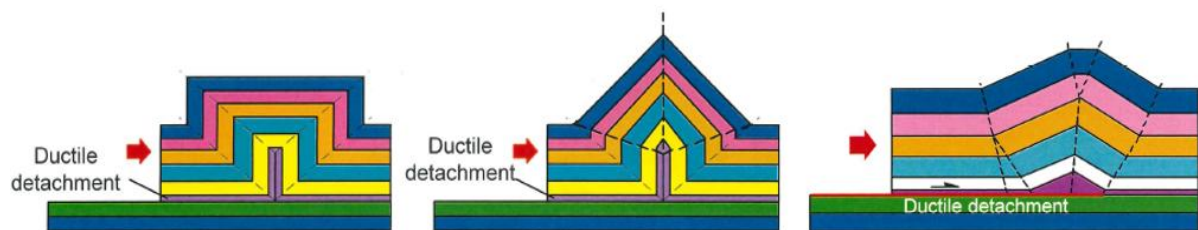


圖2-6 滑脫褶皺的各種型態。McClay, 1991

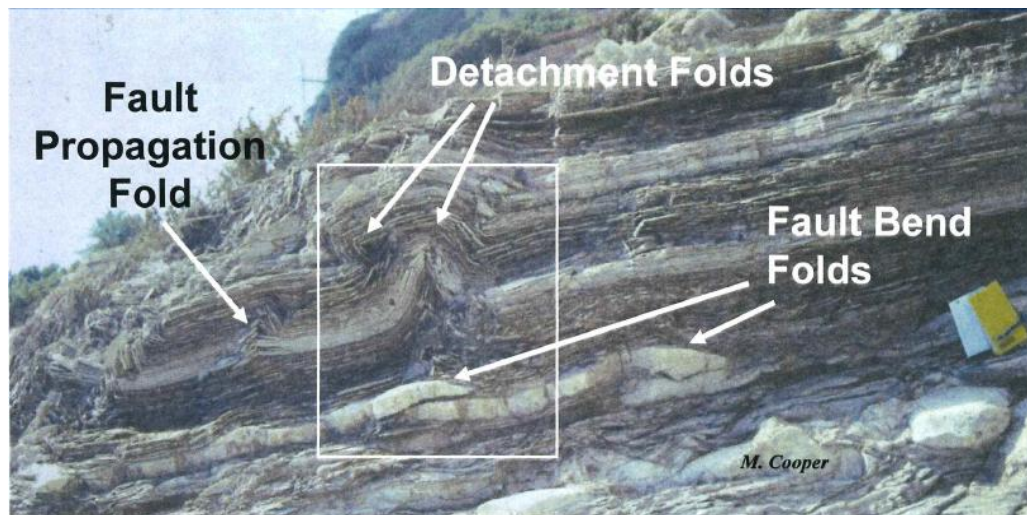


圖2-7 3種褶皺類型同時出現的露頭

(三) 逆衝系統

1. 逆衝系統的基本概念

- (1) 逆衝斷層系統與推力的型態和機制連結密切相關。
- (2) 類型：包括逆衝帶(Thrust belt)，雙重構造(Duplexes)，疊瓦狀逆衝系統(Imbricate thrust systems)和構造三角帶(Triangle zones)。
- (3) 在深部逆衝斷層通常合併成一個單一的逆衝構造，且與板塊構造演化有關(無論是隱沒或碰撞驅動的)。
- (4) 逆衝斷層系統通常隨時間由內陸朝向前陸發展。
- (5) 逆衝位移量向前陸逐漸減小;滑移量透過底部分支的推力轉移到更高的地層，且滑移被內部變形所容納。

課堂上展示了一條由洛磯山脈至卡加利的東西向的薄皮構造剖面，可以清楚的看到由前山帶(Front range)向東經過麓山帶，並至構造三角帶完整的逆衝系統構造形貌(圖3-1)。

2. 雙重構造(Duplexes)與疊瓦狀斷層(Imbricated fault)

在加拿大麋鹿山(Moose Mountain)麓山帶的構造剖面中可以看到一套 Duplexes 與簡單的疊瓦狀構造(圖3-2)，這兩種構造在解釋上常常讓人誤解，Duplex 是由數個 Horses 所組成的多層重疊斷層構造系統，這些 Horses 夾在斷層之間並因逆衝作用將構造上及下的滑脫面連在一起(上滑脫面稱為 Roof thrust) (圖3-3)，至於疊瓦狀構造則沒有 Roof thrust，且斷層時常切穿侵蝕面，在解釋上可依此判斷。亞伯達省(Alberta)許多的油氣構造皆來自這些 Duplex 構造，因此相當重要，野外實地考察時也會實地講解這些油氣田的分布與構造關係。

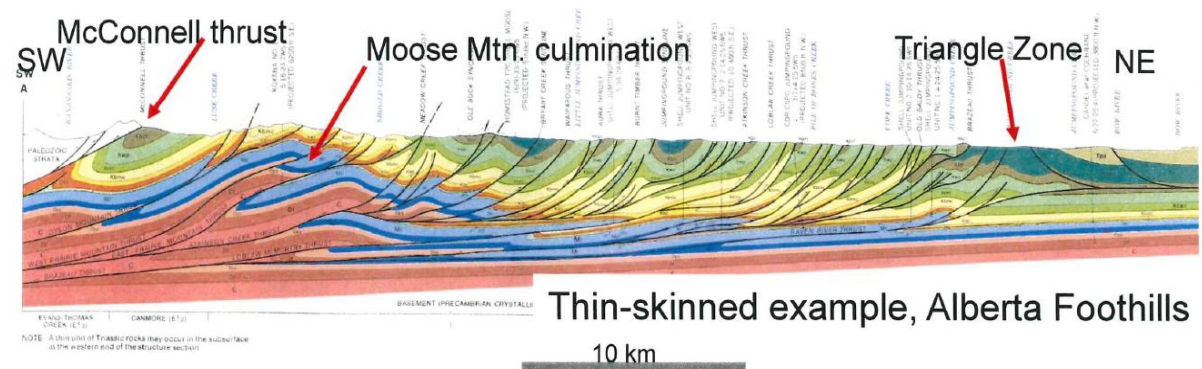
3. 構造三角帶(Triangle zones)

構造三角帶形成於造山帶前緣，當兩個板塊碰撞時，遠處在推擠應力到達極限時，產生反向推力及構造的区域，軸部常伴隨 Duplex 構造發生，其底部時常會有低角度的滑脫面。老師提供了一條構造三角帶的震測剖面，請我們利用已知的井資料震測剖面做解釋(圖3-4)，主要遵循以下規則：

- (1) 尋找地層重複與井中的斷層並且設法利用地層關係連結。
- (2) 辨認每一個主要地層的區域水準。
- (3) 辨認更低的滑脫面; 在哪個事件之下沒有形變。
- (4) 地層有無明顯的傾角變化和斷層。
- (5) Regional 之上的 Elevation 有無明顯的變化？容積空間需要多少重覆。

4. 本章節重點整理

- (1) 儘管褶皺逆衝帶的構造相當複雜，但其仍遵循單一斷層及褶皺系統的規則並發展。
- (2) 山脈尺度下的板塊邊界，所有擠壓所導致地層縮短接與滑脫面有關。
- (3) 構造三角帶與逆衝構造(圖3-5)震測剖面構造繪圖。



Source: Section A-B, GSC Map 1457A (Calgary), N. C. Ollerenshaw, 1975

圖3-1 洛磯山脈至卡加利逆衝系統剖面

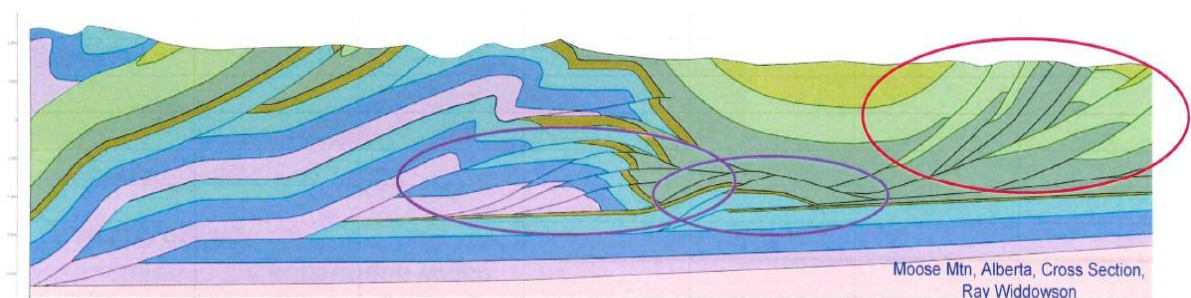


圖3-2 亞伯達麋鹿山雙重構造與疊瓦狀斷層構造

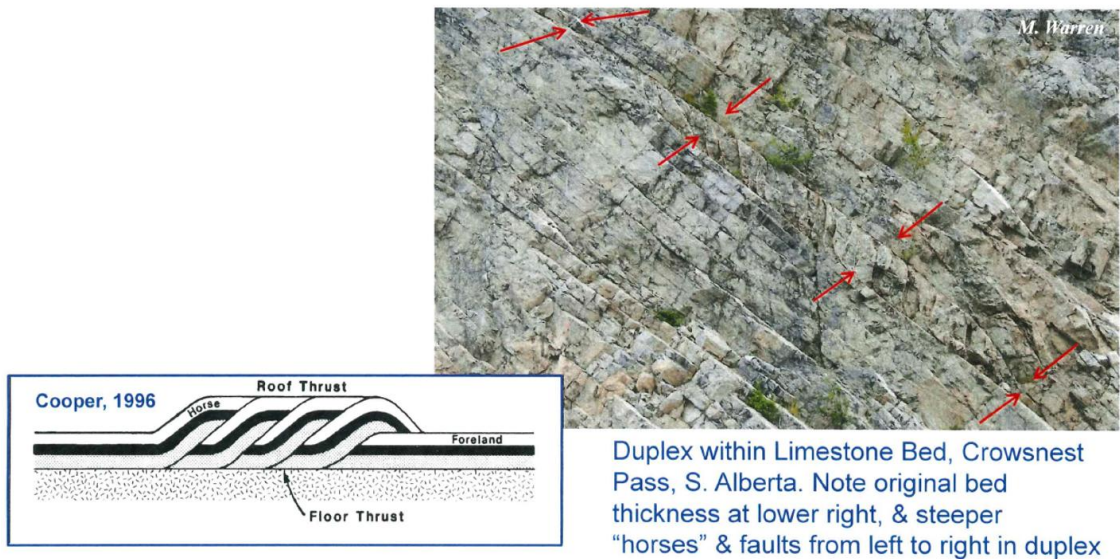


圖3-3 Duplex 構造露頭

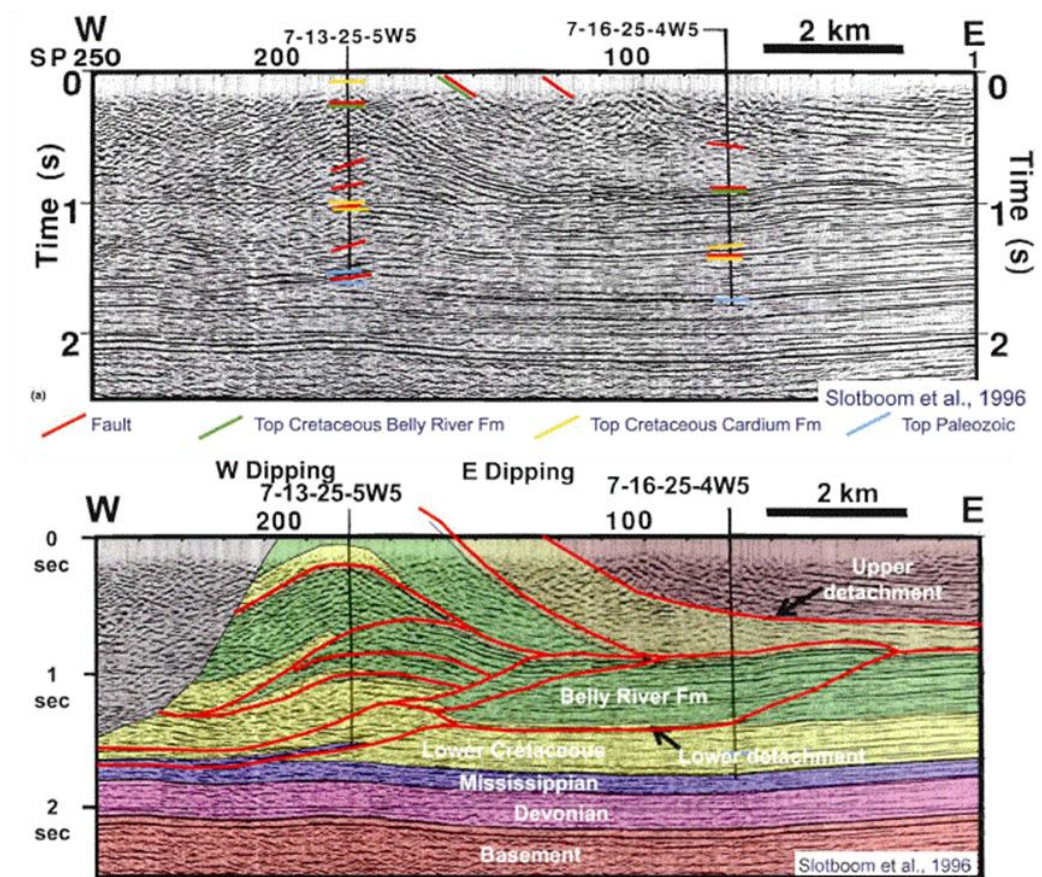


圖 3-4 南亞伯達的三角區域(Triangle Zone)解釋練習

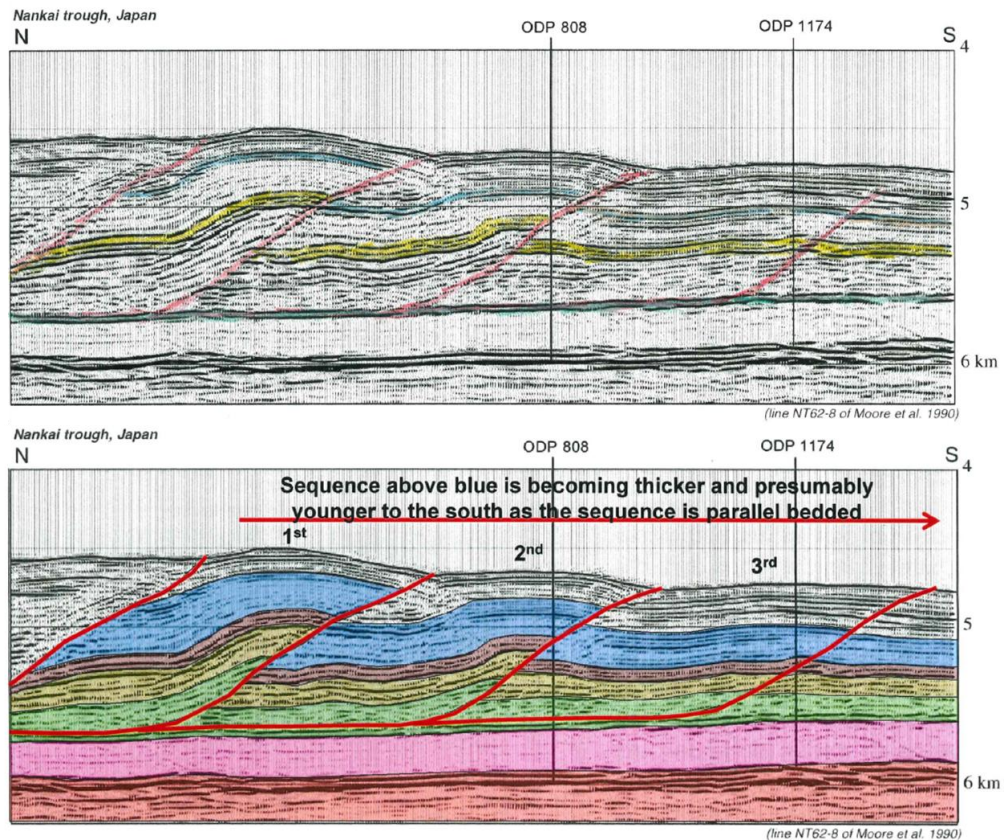


圖3-5 日本南海逆衝構造解釋練習

(四) 剖面建立與平衡

1. 構造剖面建立

在沒有震測剖面的情況下，地質學家往往只能用近地表的露頭及既有的鑽井資料去還原構造剖面，能夠合理的將已知的資料推算出整個地下構造形貌就是一項重要技術，本次課程提供了幾個重要技巧：

- (1) 利用地表地層的層序及斷層位置，推算滑脫面(圖4-1)。
- (2) 傾沒構造(Plunging structure)在二維視角下的扭曲與還原。
- (3) 利用近地表傾角和斷層資料還原構造幾何形貌(圖4-2)。

搭配剖面繪圖練習及討論(圖4-3、4-4)，學員們都能夠很順利推測合理的構造形貌。

2. 「復原」的解釋評估

- (1) 「復原」指的是以各式各樣的技術，通過該構造剖面，震測剖面或地圖，從其目前已變形狀態可被「復原」到其原始的未變形狀態。
- (2) 在此主要說明於全課程，論文和軟體介紹，嚴格的復原技術，超出了我們課堂中討論的範圍。

- (3) 然而，在實際的石油系統評估中，效率往往不全指時間，必要時，甚至需做最嚴謹的復原，以免重做更花時間。
- (4) 如果已有基本原理的理解，復原的過程往往是可以簡單的用肉眼識別或自己構建一個合理的概念，並復原的解釋，或指出一個不可復原構造的錯誤。

3. 為什麼要復原剖面 and 地圖

- (1) 要測試構造解釋的可行性(若無法復原代表解釋有誤)。
- (2) 要了解構造運動的歷史，並以此來預測儲層規模的變形。
- (3) 了解結構隨著時間推移的演變(油氣生成，移棲和圈閉形成的相對時間)。
- (4) 要了解未變形時區域內原有的沉積環境和沉積相關係(生油岩分佈、儲量以及封閉)。

4. 基本剖面平衡

- (1) 平衡剖面的2種方法是：
 - 地層(線)長度平衡而維持地層長度的一致性。
 - 區域平衡而維持截面積的一致性。
- (2) 因此，一個剖面平衡當其地層長度或剖面截面積在其變形和恢復的狀態皆相等。

用一個基本的例子說明(圖4-5)，我們無法將構造解釋成左下角的純褶皺構造，這會導致地層無法平衡，相對的，如果用斷層與滑脫面的概念來解釋，才能保持剖面平衡，會是一個比較合理的解釋。

課堂上也提供台灣的構造剖面讓我們進行地層復原練習，有別於先前的簡單案例及理論，現實中必須考慮地表侵蝕導致地層缺失，必須考慮出露地表的狀態回推侵蝕掉的地層，並表示於平衡剖面上，是相當具有挑戰性的平衡剖面練習(圖4-6)。

5. 本章節重點整理

- (1) 在解釋上檢查復原可行性
 - 在傾角剖面上線的長度和面積應大致一致。
 - 能夠連結摺皺與斷層，反之亦然。
- (2) 快速且「常識」的做法是已是所有需要的80%的解決方案！
- (3) 稍加練習，可以訓練以眼「快速檢查」，甚至複雜的解釋。
- (4) 在應用動力學模型時會有明顯的問題，所有的算法的假設和結果往往不佳。
問題是，我們正在迫使一個動力學模型到恢復過程，在大多數情況下的岩石不是由單一機制變形。

- (5) 除非有大量的數據支持特定的動力學模型，不僅僅依賴於震測解釋而繼續作簡易的恢復，著重了解結構的發展順序，隨時間的圈閉發育和油氣遷移的關係往往是在探索這些構造系統的重大風險。

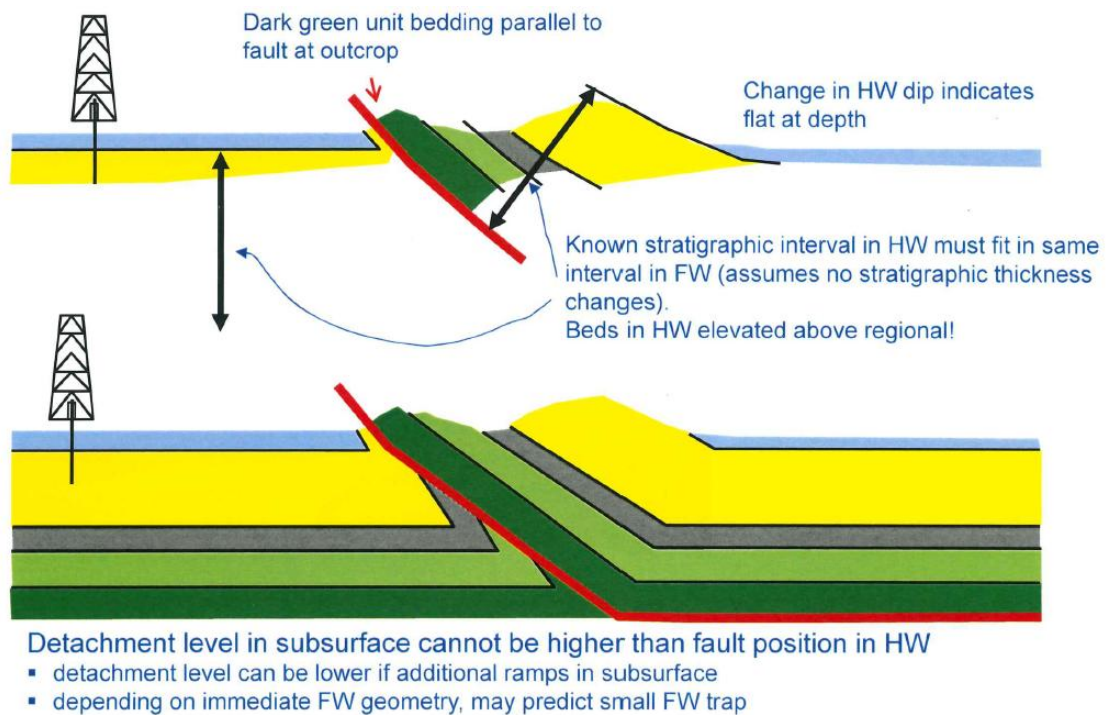


圖4-1 利用地表地層的層序及斷層位置推算滑脫面

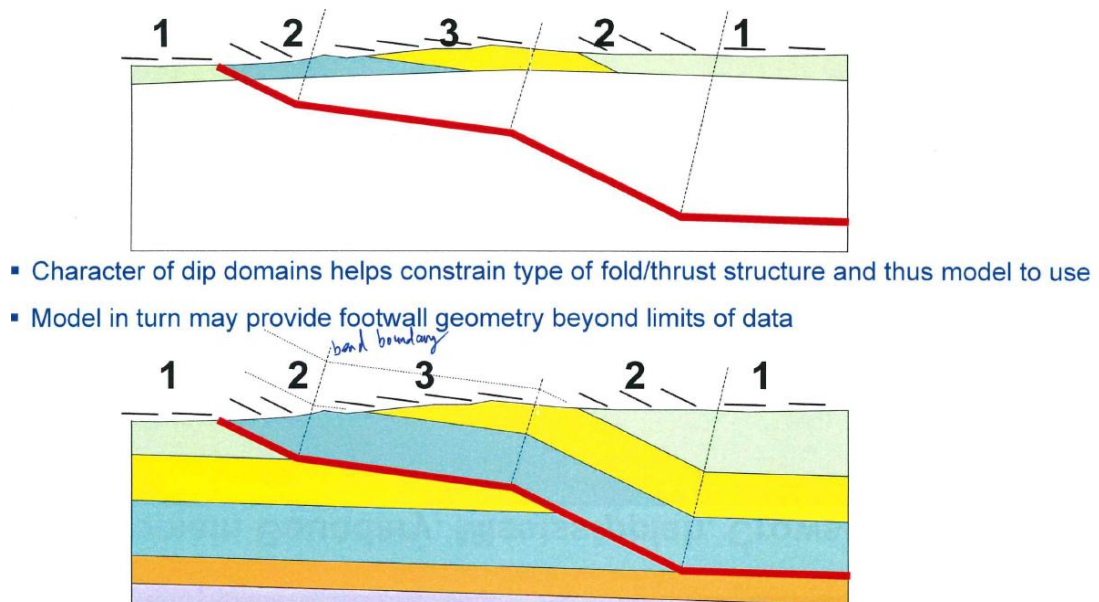


圖4-2 利用近地表傾角和斷層資料還原構造幾何形貌

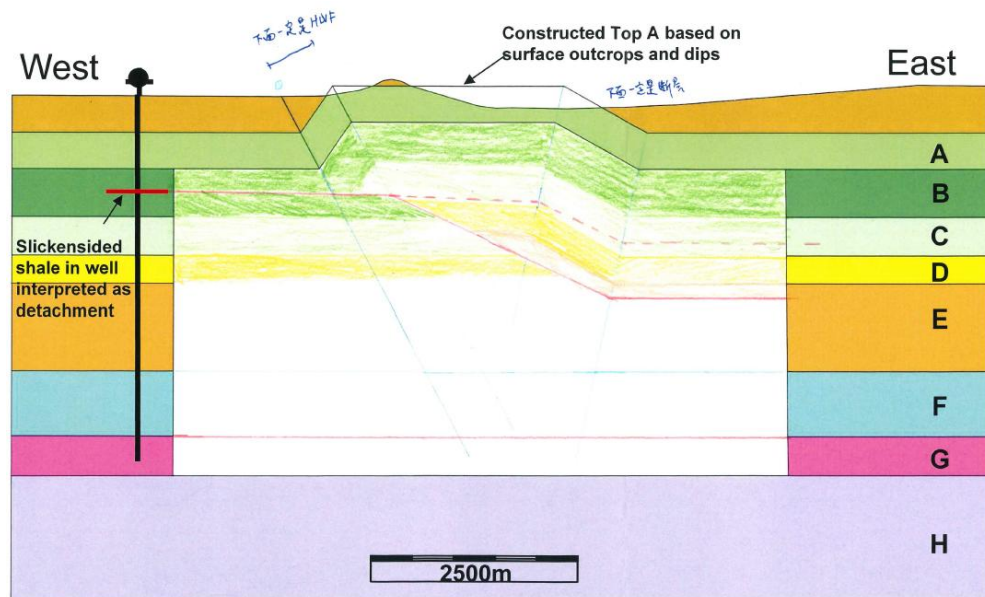


圖4-3 構造剖面還原練習(紅色虛線亦為斷層可能位置)

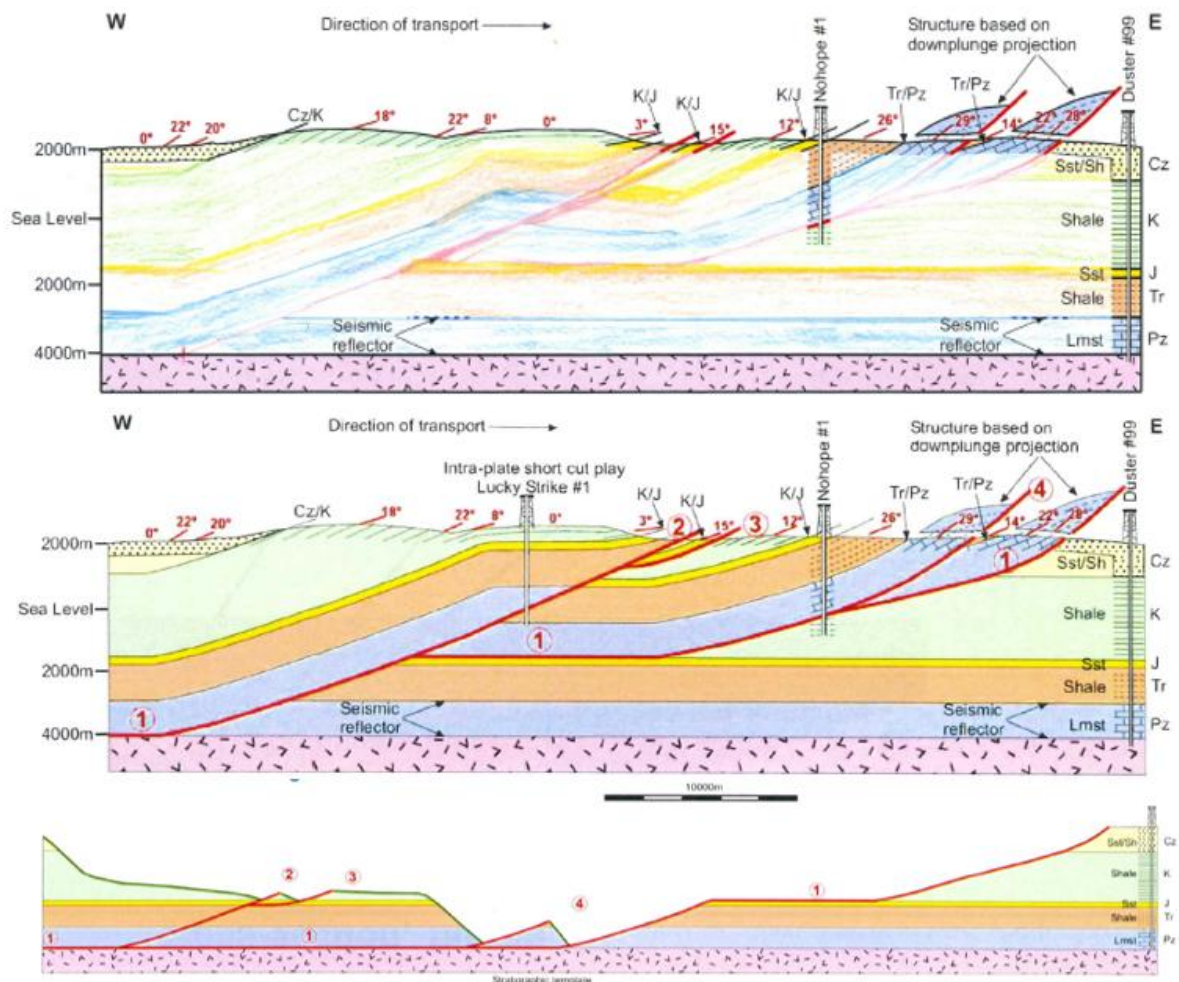


圖4-4 構造剖面解釋練習

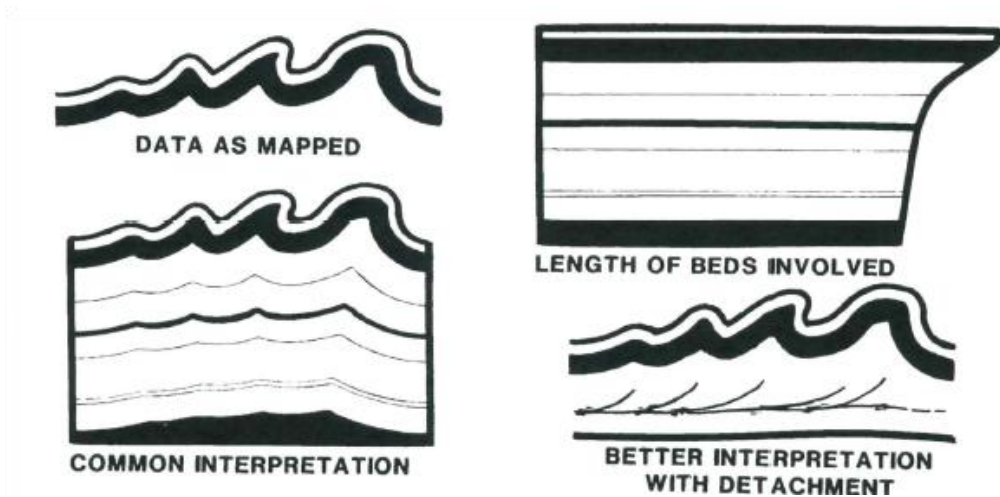


圖4-5 剖面平衡問題

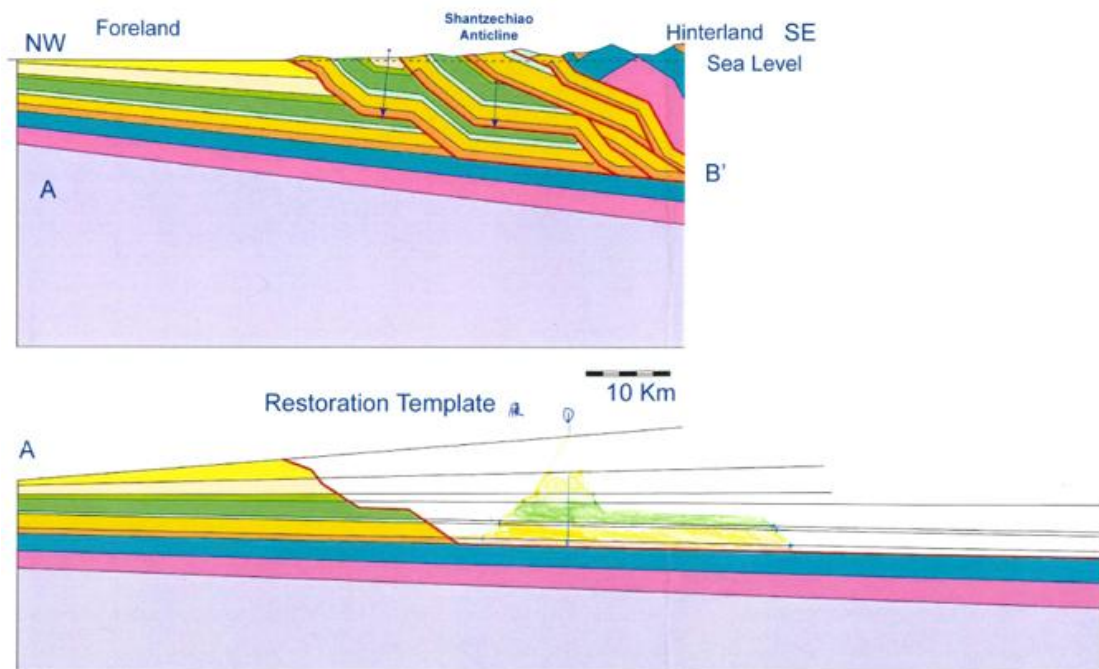


圖4-6 台灣構造平衡剖面與侵蝕量推算練習

(五) 三維空間的逆衝帶與油氣探勘前景

1. 三維尺度下的逆衝斷層

- (1) 走向長度與最大位移成正比(約10：1)。
- (2) 位移在兩端為零；最大在中心附近。
- (3) 推力和上盤褶皺之間的三維空間對應關係。
- (4) 在上盤可能導致4方圈合(或3方，加上斷層封閉)(如圖5-1)。

然而，我們在評估圈閉時，也需要考慮斷層帶來的風險。以墨西哥灣 Perdido 褶皺帶的油藏潛能時間結構圖來說明(圖5-2)，斷層下盤的封閉會由於圈合面積的不同，

導致該構造圈閉有4方圈合及3方圈合(斷層封閉)兩種可能，如果斷層存在且密封，那麼被圈閉潛能區域將比簡單的4方圈合大，反之，如果斷層存在風險(封阻性不確定或成像不佳等)，則會大大減少圈閉的面積，解釋上要特別注意。

2. 側向斷坡(Lateral ramp)

Lateral ramp 是在斷層系統中，沿斷層走向(側向)出現斷層，滑脫構造沿走向改變地層水平的區域。典型的 Ramp 與 Lateral ramp 之特性有以下幾點，以理論模型為例(圖5-3)：

- (1) 與二維空間中相同，Ramp 也會產生褶皺。
- (2) 如果 Ramp 結束褶皺也會結束。
- (3) 在上盤，背斜右翼下有 Footwall ramp；背斜左翼下有 Hanging wall ramp。
- (4) 通過背斜的 Plunge noses 畫一條線可追查出下盤中 Lateral ramp 的位置。
- (5) 所有 Ramp 上的紅色條紋都屬於同一個方位角，可以判斷所有逆衝面運動皆相連。

Lateral ramp 在逆衝構造系統相當常見，切記在解釋時，不會有走向滑移或張裂斷層的運動在上盤背斜產生，由美國田納西州 Pine Mtn.的衛星圖(圖5-4)及亞伯達麓山帶的不同方向的構造剖面(圖5-5)能更加了解其實際的構造形貌。

3. 懷俄明州逆掩帶(Overthrust Belt)小組討論

課堂上老師提供該區域的油氣田分布、鑽井結果、構造圖、地層年代表及數條方向不同之構造剖面(圖5-6、5-7)，請學員們嘗試利用這些資料，分析這些鑽井成功及失敗的可能原因，並分析其石油系統。面對初次接觸的區域，學員們集思廣益，嘗試從石油系統及構造解釋的角度切入，逐漸從生油岩成熟度、構造封閉、移棲路徑等關鍵因素得出答案(圖5-8)。這個小組討論有助於油氣潛能評估概念的培養，能夠從資料上訊息做出正確的判斷，對於未來訂定井位、評估礦區潛能及投資可行性都很有幫助。

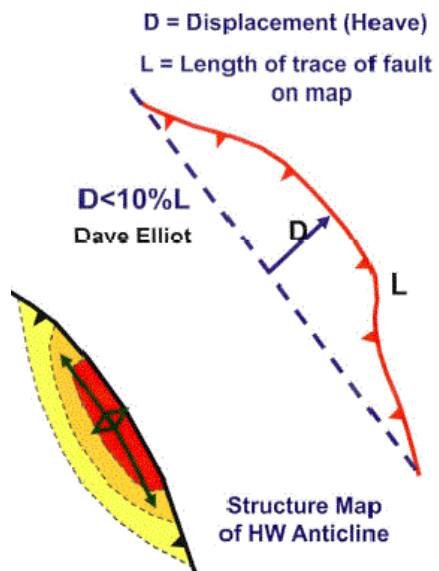


圖5-1 三維空間的逆衝斷層

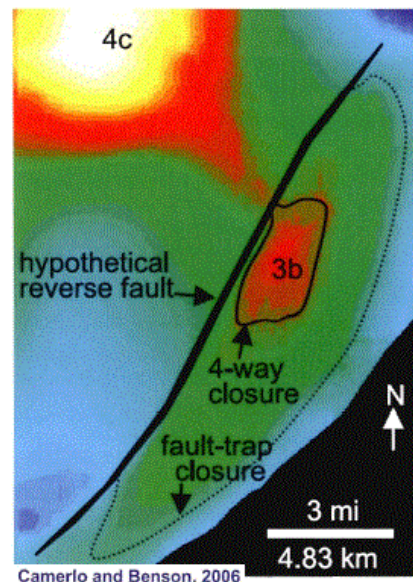


圖5-2 油藏潛能時間結構圖
墨西哥灣 Perdido 褶皺帶

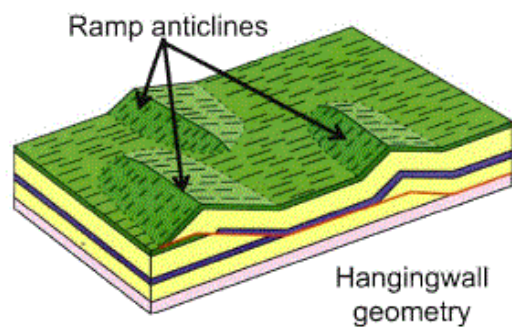
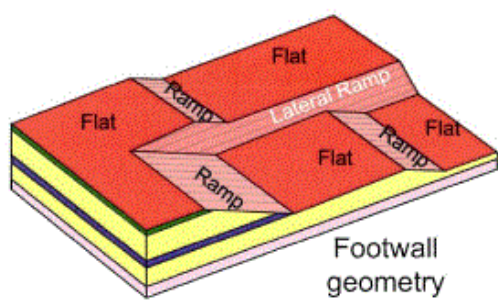


圖5-3 Lateral ramp 的上盤及下盤效應

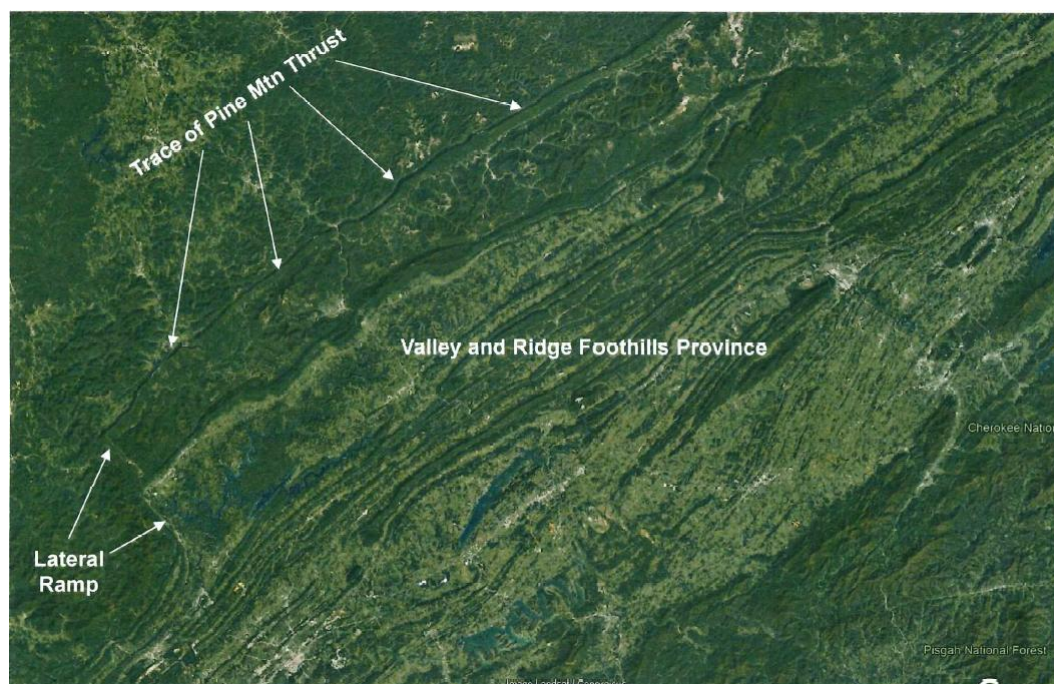


圖5-4 Pine Mtn.的衛星圖

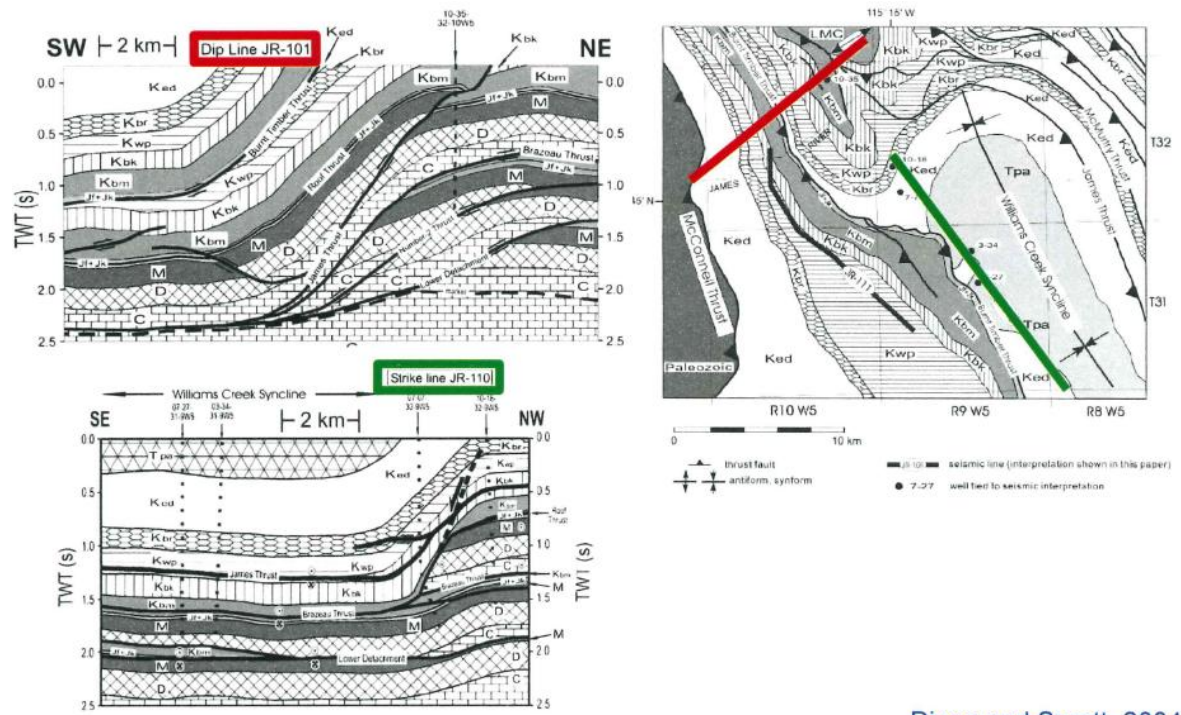


圖5-5 亞伯達麓山帶 Lateral ramp 構造圖及剖面

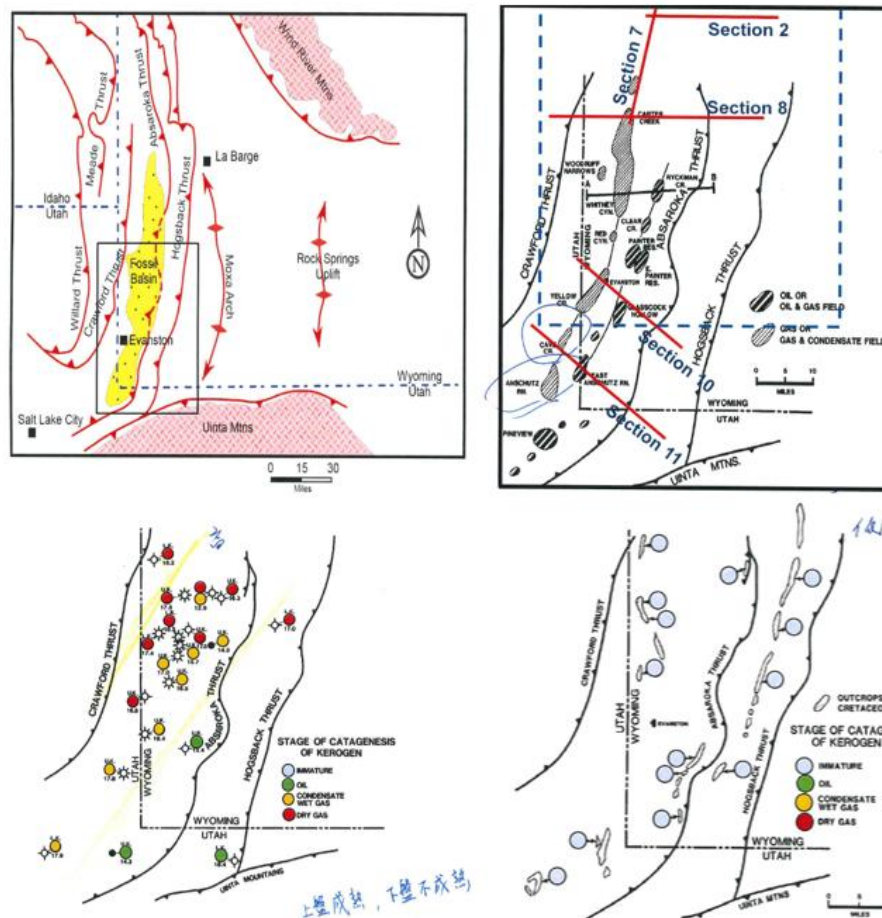


圖5-6 懷俄明州逆掩帶解釋練習。左上：區域構造圖；
右上：油氣田分布與圖5-7剖面位置；下：油氣成熟度分布圖

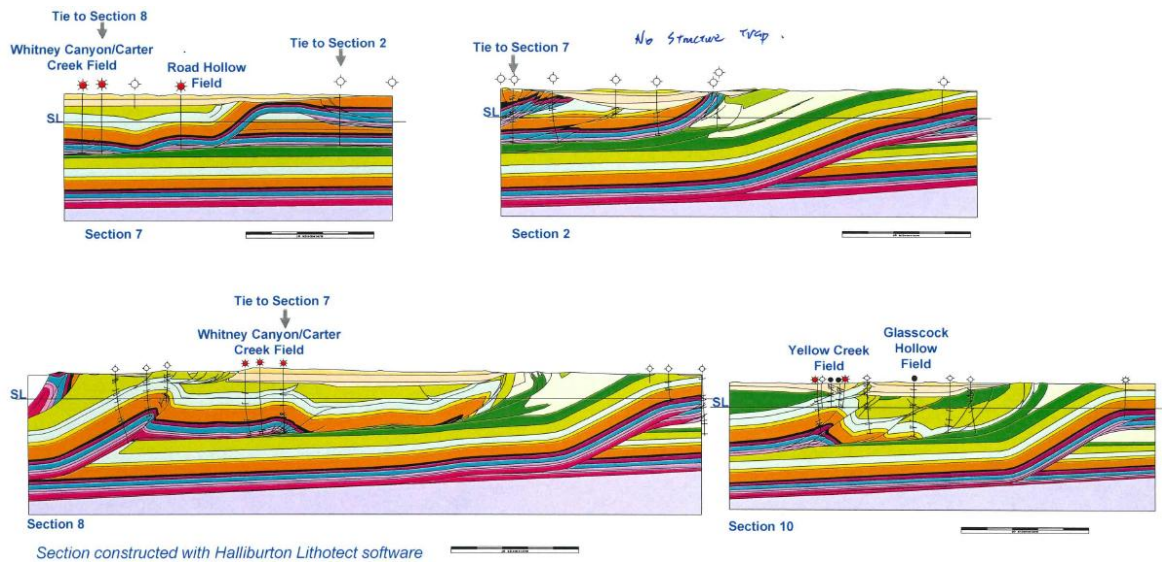


圖5-7 懷俄明州逆掩帶構造剖面

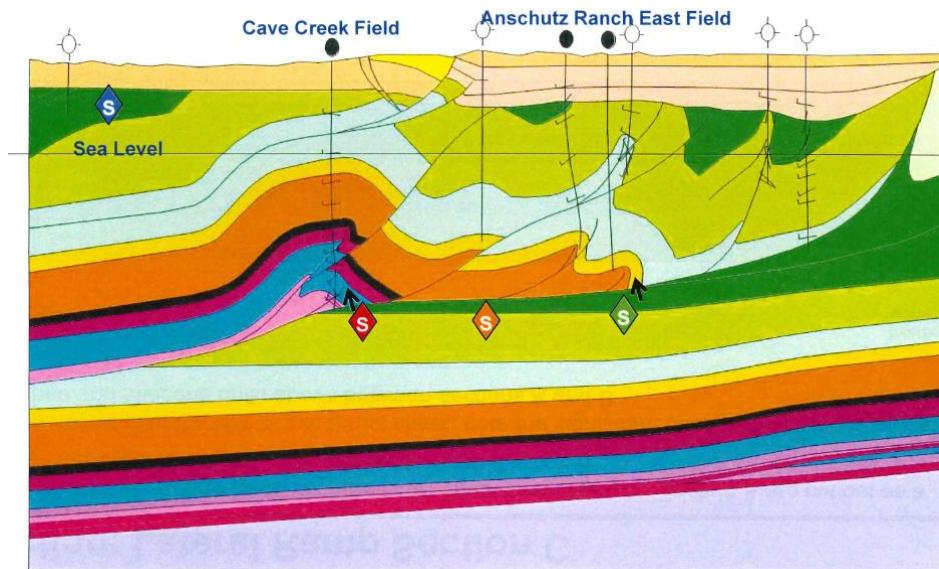


圖5-8 油氣潛能評估結果

(六) 反轉構造(Inversion Tectonics)與石油系統

1. 反轉構造(Inversion Tectonics)

反轉構造為一構造受前存在張裂-拉張走滑(Transtensional)斷層控制，其上盤包含同張裂或被動填充的層序，隨後發生擠壓-擠壓走滑(Transpression)作用造成盆地隆起與部分擠壓。反轉構造需要幾個條件：

- (1) 此盆地發展受控於活動的斷層。
- (2) 有同張裂或被動填充地層層序。
- (3) 區域應力系統改變造成先前存在的斷層再活動，使得抬升過程上盤影響比下盤大。

小到中程度的反轉構造很容易從震測剖面上去理解，而大程度的反轉構造可能因為高角度和許多二次逆衝斷層造成震測剖面不清楚。

從特徵地層(Marker bed)去定義張裂或壓縮斷層，先找一特徵地層去定義區域高度(Regional Elevation)。拉張斷層其上盤特徵地層會低於區域高度，且地層造成缺失並延伸拉長。壓縮斷層其上盤特徵地層會高於區域高度，且地層會造成重複出現並縮短。

反轉構造的觀念依靠區域高度的概念。以一個典型的反轉構造為例(圖6-1)，反轉半地塹模型中斷層上部高於區域高度，斷層下部低於區域高度。其中，上盤中轉換的位置稱為空點(Null point)。在後張裂層序中的非對稱背斜也是一個指示反轉構造的特徵，課堂上震測剖面繪製練習讓我們對反轉構造更加熟悉(圖6-2)。

當一個拉張的半地塹盆地反轉時，常會造成下盤捷徑斷層(footwall shortcut fault)發育(圖6-3)。次水平方向壓應力常容易造成更緩的傾斜斷層軌跡。陡的斷層常容易造成構造抬升，而縮短為次要的。而角度緩的下盤捷徑斷層則容易造成縮短。

我們常利用 Null point 作為判斷反轉程度的方法(圖6-4)，即 Null point 的位置愈高則反轉程度愈低，反之，Null point 假設位於最下層地層的底面，代表所有拉張的地層都已經被推上去了，這個現象我們稱為完全反轉(Total inversion)，也有學者根據 Null point 下仍屬拉張的厚度(de)與整體反轉地層的厚度(dh)的比值去計算 $R_i = (1 - de/dh)$ ，完全反轉 R_i 則為1，無反轉則為0。

在阿根廷的 El Porton 區域可以看到薄皮和厚皮構造的交互作用(圖6-5)。此區域第一次壓縮環境造成薄皮基底褶皺(detachment fold)，第二次壓縮作用造成厚皮反轉斷層延展褶皺(propagation fold)，構造的總壓縮量為37%，粉紅色同張裂地層發生反轉。

2. 反轉構造的石油系統及潛能

同張裂時期較可能產生生油岩，而反轉構造造成構造抬升，使得下盤與部分上盤儲集層提高，造成可能褶皺和斷層封閉。再後張裂層序可能有背斜封閉構造，前張裂層序則有下盤捷徑封閉構造，澳洲的新英格蘭造山帶及是一個成功的例子(圖6-6)。而反轉構造可能造成的風險，抬升作用造成生油岩無法成熟，且侵蝕晚到後張裂封閉或儲集層。油氣可能從原本拉張構造中的封閉再移動或洩漏。反轉構造封閉若太晚形成，可能無法有效儲集油氣。

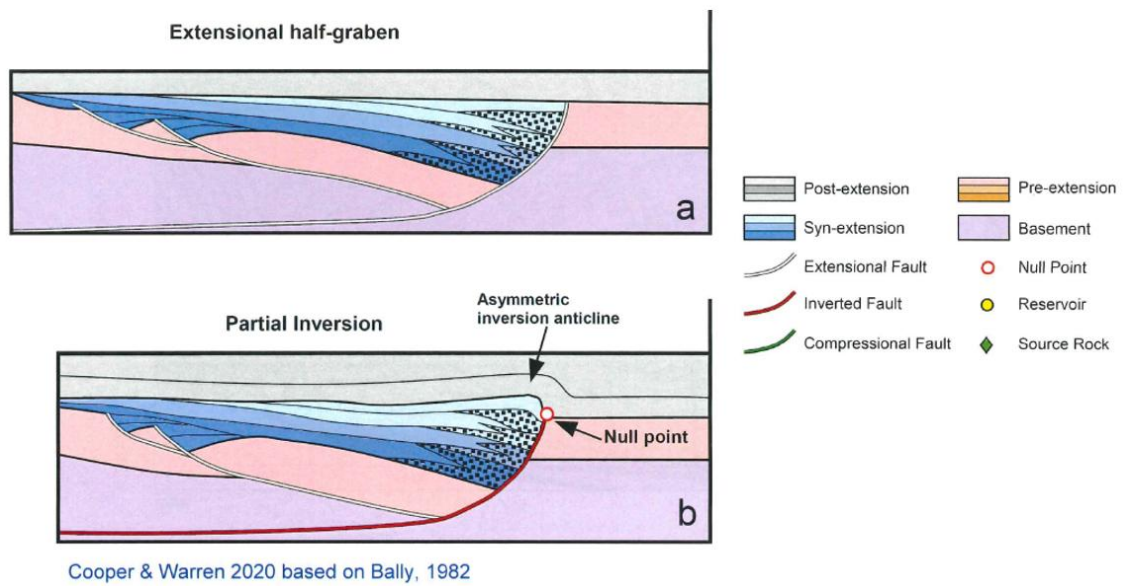


圖6-1 典型反轉斷層

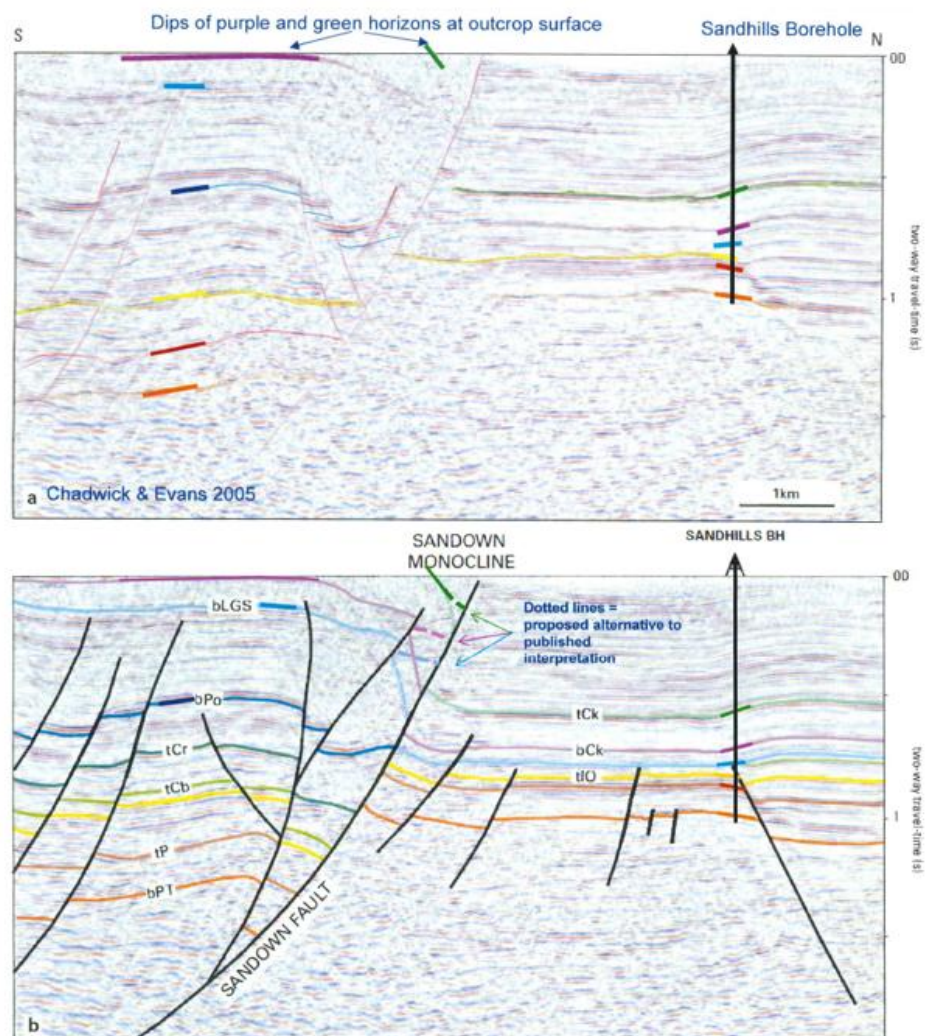


圖6-2 反轉斷層解釋練習

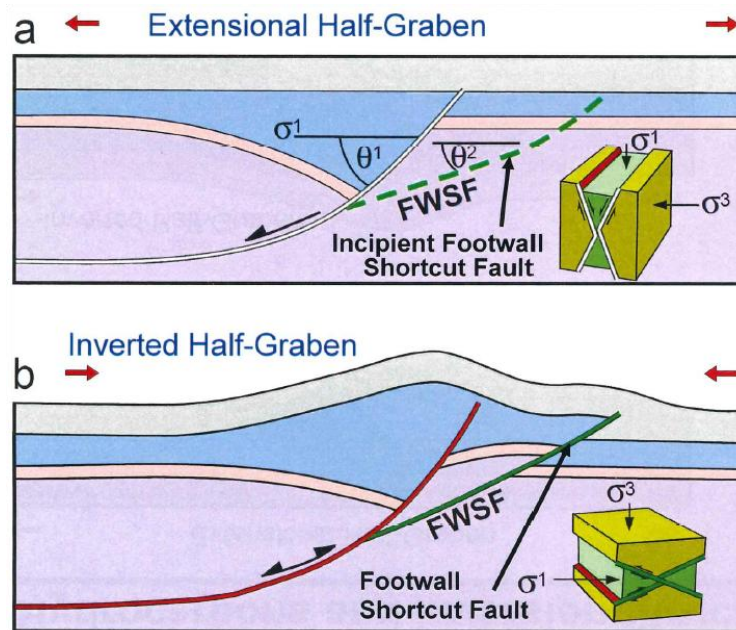


圖6-3 反轉斷層應力作用

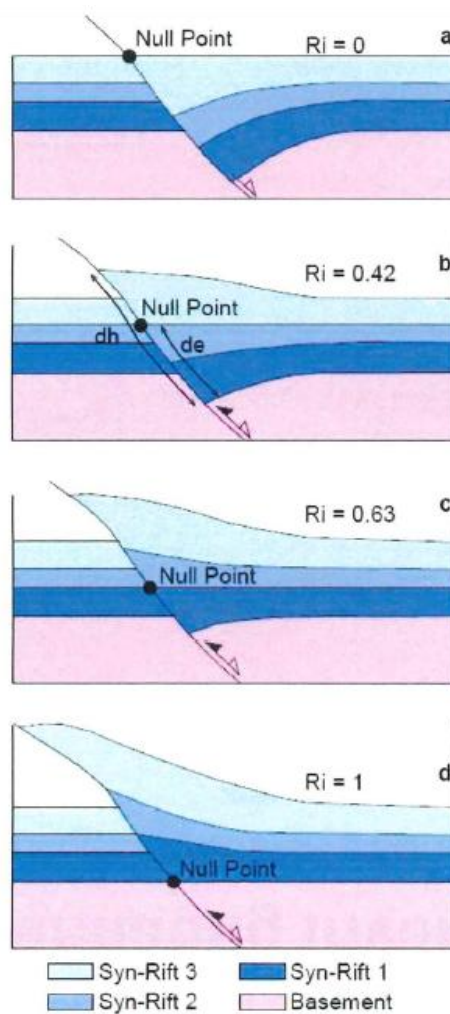


圖6-4 反轉斷層反轉比例示意圖

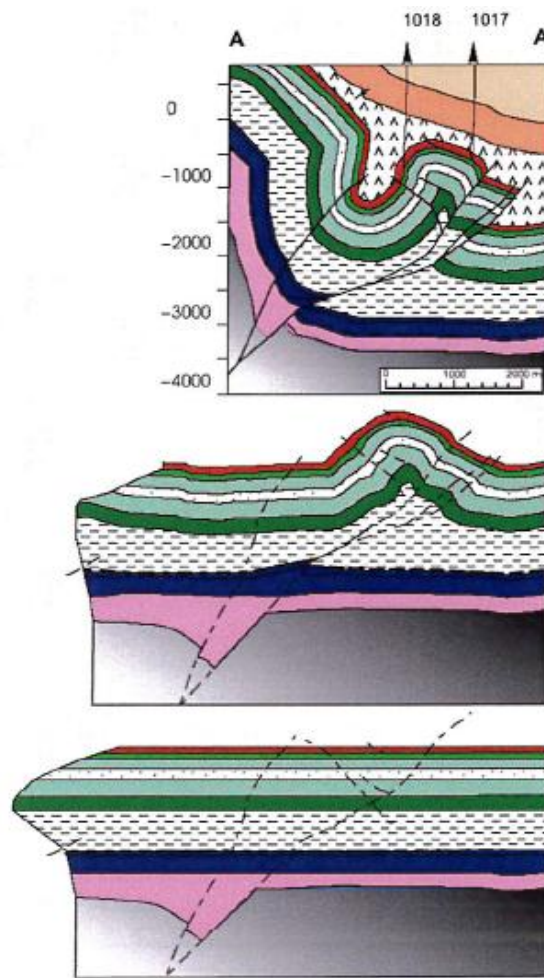


圖6-5 阿根廷 El Porton 區域的薄皮和厚皮構造

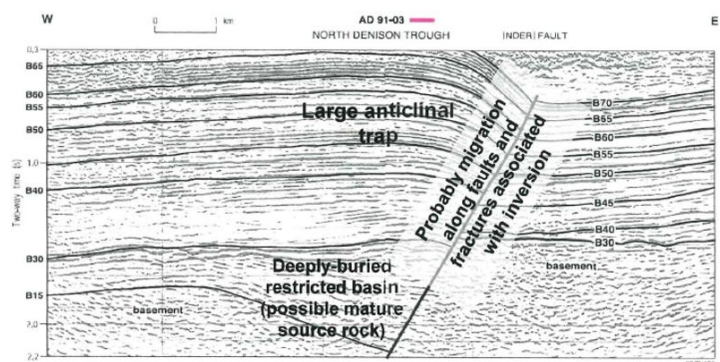
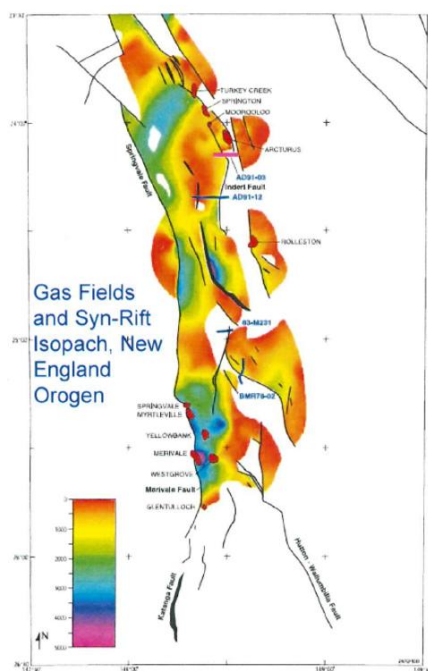


圖6-6 澳洲的新英格蘭造山帶上盤震測剖面

(七) 拉張與擠壓系統與深水褶皺逆衝帶的關聯

深水褶皺逆衝帶構造解釋前須考慮幾項問題：

- (1) 主動還是被動大陸邊緣。
- (2) 鹽、頁岩與其他滑脫面。
- (3) Overpressure 的作用，以尼日三角洲 Overpressure 頁岩為例(圖7-1)。
- (4) 是否有 Mobile shale 或 salt。
- (5) 重力與構造的影嚮程度。
- (6) 動力學前、中及後時期沉積物如何供應。

可能會導致以下幾項影響石油探勘前景的問題：

- (1) Mobile shale 或 salt 導致震測成像困難。
- (2) 生油岩的存在與成熟度(遠端大陸邊緣或前陸海溝較冷等)。
- (3) 移棲路徑與圈閉問題(鹽相關的屏障或圈閉形成時間較年輕等)。
- (4) 應力機制與圈閉內的組成物(缺少上覆岩層或有斷層等)，以 Namibia 伸張與擠壓應力作用之被動大陸邊緣構造為例(圖7-2)。
- (5) 儲集岩能力與來源(火山島弧與大陸地塊的差別)。
- (6) 沒有生物地層學校正震測剖面可能導致解釋具有挑戰性；恢復與回推石油系統時間的正確性。

除以上可能產生的問題外，儘管課堂上提供了很多深水礦區在複雜的應力機制下所形成的油氣構造，在應力變化的系統下，假設沉積環境不同也可能導致油氣蘊藏在風險，由於 Toe thrust 的上覆岩層較少，導致滑脫面的應力也減少，導致未來構造形成時蓋層封阻性及封閉存在疑慮。

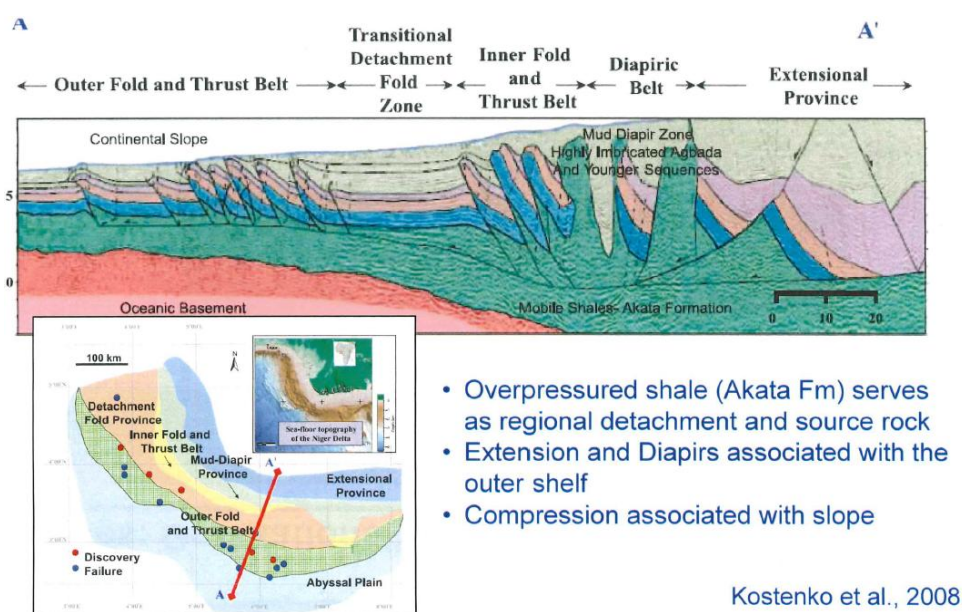


圖7-1 尼日三角洲 Overpressure 頁岩

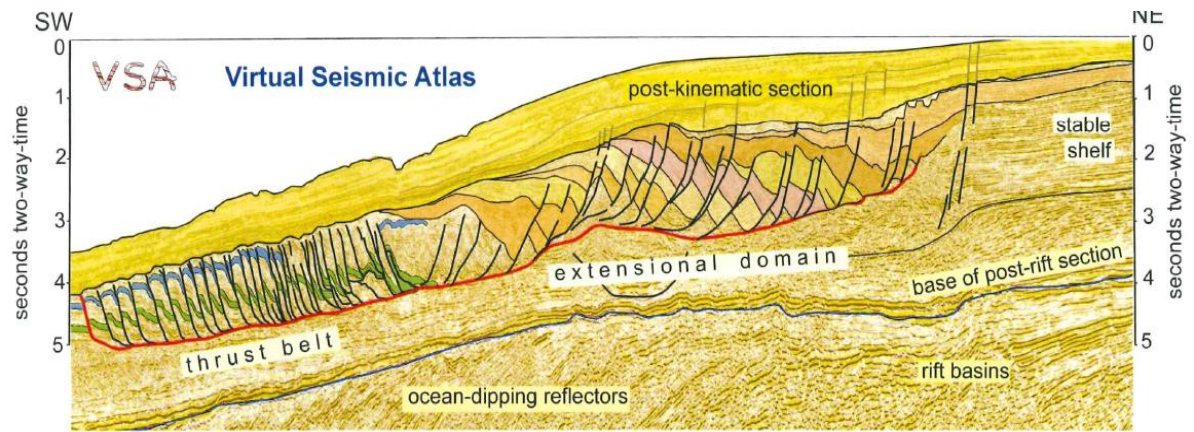


圖7-2 Namibia 連結伸張與擠壓作用之構造

三、野外地質考察課程

野外地質考察課程分三天施行，分別為6月25日-卡加利到班夫剖面、6月26日-坎莫爾和卡那納斯基斯鄉村剖面、6月27日-麋鹿山和特納谷的麓山帶油田。所有停靠點如下圖8-1，詳細內容如下表。

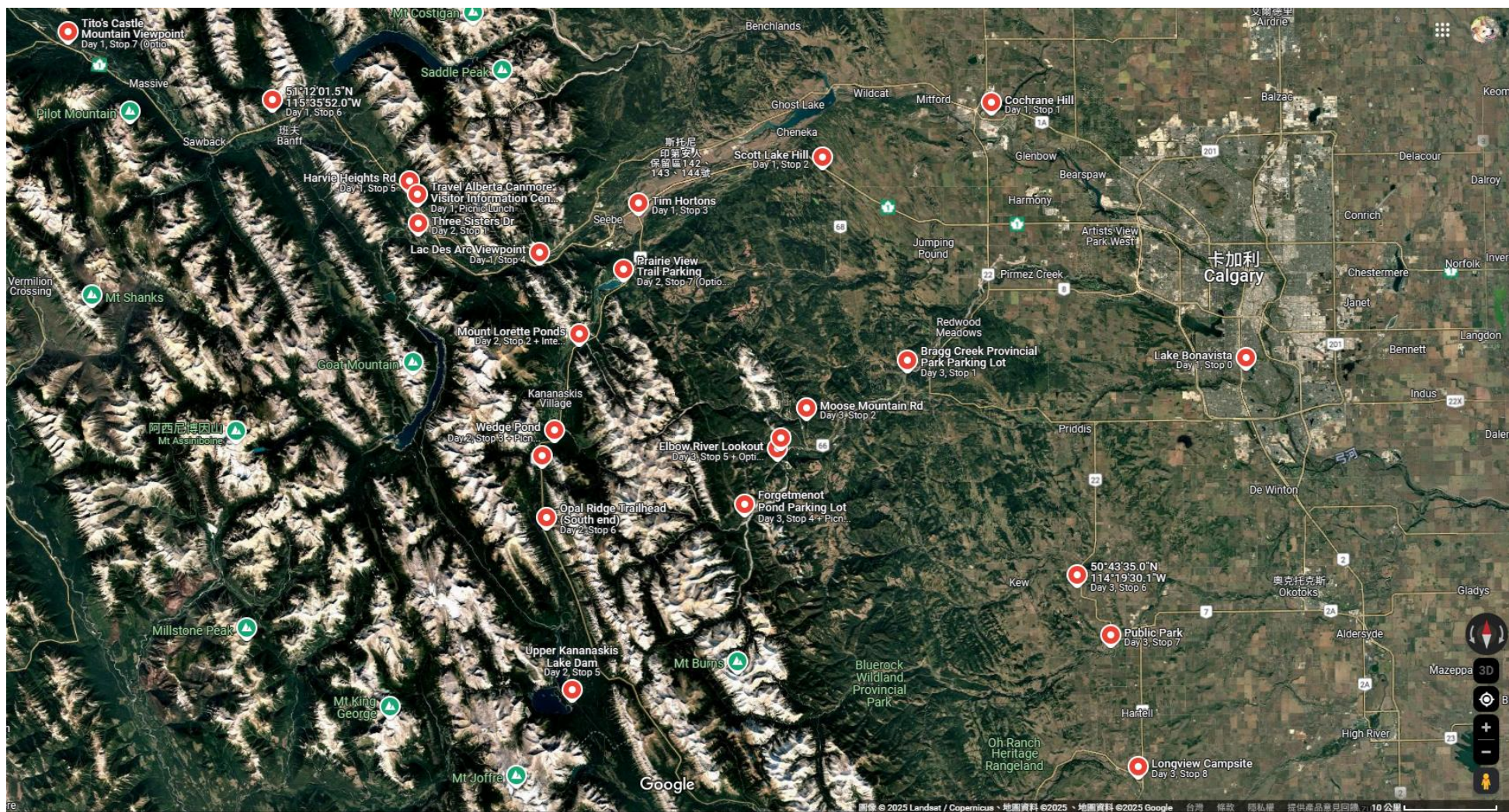


圖8-1 三天野外停留點

第一天 - 6月25日：卡加利到班夫剖面(從卡加利市中心出發)	
第一天沿著構造傾角剖面路線，從未變形平原和前陸盆地穿越麓山帶，到達加拿大洛磯山脈的變形前緣。從卡加利駕車前往班夫以西，參觀一些展示麓山帶和變形前緣關鍵地層、構造和石油地質背景的露頭和觀景點。	
STOP 1	科克蘭(Cochrane)山丘觀景點和麓山帶綜覽(科克蘭 Big Hill Rd 道路盡頭)。 此停靠點介紹此次行程，提供了一個從未變形的古新世前陸盆地橫跨起伏臥的主要白堊紀麓山帶到形成懸崖狀的變形前緣古生代碳酸鹽岩的全景。該地點位於「三角帶(Triangle Zone)」的東傾頂部。三個大型麓山帶天然氣田的基礎設施和地面裝置都可見。
STOP 2	從1號公路 Scott Lake Hill 休息站遠眺麋鹿山(Moose Mountain)。 向南可以看到麋鹿山背斜構造的橫剖面，這個構造是麓山帶內部的一個主要逆衝高區，出露麓山帶主要儲層的密西西比期碳酸鹽岩。
STOP 3	從 Mt Yamnuska 觀景點看 McConnell 逆衝斷層(40號公路，Stoney Nakoda 的 Tim Hortons 附近)。 McConnell 逆衝斷層構成了麓山帶和變形前緣的邊界，將寒武紀地層逆衝於白堊紀地層之上。它在1887年首次被辨識為主要逆衝斷層。在此觀景點可以看到「斜坡-平坦」的斷層幾何構造(ramp-flat geometry)及其沿著走向的變化。
STOP 4	Lac des Arcs 覆瓦狀逆衝斷層觀景點 (1號公路的休息站)。 幾個向西南傾斜的變形前緣逆衝斷層，被推斷是下覆 McConnell 逆衝斷層的分支，造成古生代地層單元重複出現。這個位置有可接近的碳酸鹽岩露頭，代表密西西比期麓山帶儲層。
STOP 5	Rundle 逆衝斷層走向視角(Harvie Heights Rd, Meander 登山口停車場)。 這裡看到 Rundle 逆衝斷層上盤約20公里，以及 Rundle 逆衝斷層下盤的 Mount Allen 向斜的走向視角。展示了主要逆衝斷層的位移梯度，並提供一個與第三天將參訪的特納谷(Turner Valley)等大型上盤背斜油氣田相對應的走向規模構造類比。
STOP 6	Mt. Norquay 觀景點(Mt Norquay 滑雪場道路旁停車場和班夫綜覽)。 此地點位於 Bow 河谷之上的高處，提供了主要變形前緣逆衝斷層的剖面和班夫的壯麗景觀。

第二天 - 6月26日：坎莫爾和卡那納斯基斯鄉村	
第二天重點為觀察變形前緣在露頭尺度與震測尺度下，那些直接控制或影響麓山帶地下石油系統圈閉的構造。	
STOP 1	坎莫爾變形的 Kootenay 地層(742號公路和 Three Sisters Dr 交界處)。 這個露頭展示了在 Rundle 逆衝斷層下盤的中生代碎屑岩和煤層的變形，說明因為地層內部地質力學差異導致儲層/鑽井尺度下的複雜性。
STOP 2	解釋練習。Exshaw 逆衝斷層，40號公路(停車於 Mt Lorette Ponds)。 觀察 Exshaw 逆衝斷層的震測尺度橫剖面，展示一個褶皺-逆衝構造的關鍵部分。次震測尺度構造使整體幾何形貌更加複雜。
STOP 3	Wedge Pond，40號公路。 可以看到 Rundle 逆衝斷層上盤的複雜變形。
STOP 4	基德山(Mt. Kidd)褶皺，Rocky Creek 停車區，40號公路。 震測尺度下密西西比碳酸鹽岩非對稱褶皺，靠近路易斯斷層(Lewis thrust)的北端終止點，這是 Lewis、Rundle、Misty 和 McConnell 斷層之間複雜位移轉移的一部分。
STOP 5	Upper Kananaskis Lake。 Bourgeau 逆衝斷層將上部泥盆系(古生代)碳酸鹽岩覆於中生代碎屑岩之上。一個傾斜下盤坡可以被繪製出來(向北從 Kootenay 群到南邊湖泊附近的 Fernie 群)。在第一天看到的 Sulphur 山脈逆衝斷層在此終止，對現代地形和水系有顯著影響。
STOP 6	三疊紀覆蓋二疊紀與晚石炭紀不整合露頭，40號公路 Fortress Mtn 路口。 這公路旁的露頭位於 Sulphur 山脈逆衝斷層下盤，包括主要的不整合面、有趣的沉積構造和在褶皺致密岩石中儲層尺度裂隙的例子。
第三天 - 6月27日：麋鹿山和特納谷的麓山帶油氣田	
第三天的目標是看見橫加高速公路以南的麓山帶油氣田的設備和地表特徵，並討論探勘/生產歷史和構造模型的演變。	
STOP 1	Bragg Creek 省立公園麓山帶變形型態(758公路旁)。 上部白堊系頁岩和砂岩的直立緊閉型滑脫褶皺，展示了震測數據無法呈現的變形複雜性，與許多深水褶皺-逆衝帶中的變形型態類似。
STOP 2	綜覽麋鹿山氣田/油田及構造隆起概觀(麋鹿山路邊停車區)。

	從麋鹿山構造隆起東翼俯瞰麋鹿山礦區的壓縮站和若干井位。討論地表構造和演進的探勘技術如何影響礦區油氣發現和開發的良好視角。
STOP 3	草原山(Prairie Mountain)逆衝斷層(Powderface Creek 登山口，66號公路)。 位於麋鹿山西翼的草原山逆衝斷層，展示一個密西西比世地層逆衝覆蓋於中生代地層之上的小型上盤斜坡構造。
STOP 4	Dyson Mountain 與 McConnell 逆衝斷層斷片(Forget-Me-Not Pond)。 這個風景如畫的野餐區提供了 McConnell 逆衝斷層的橫剖面，比第一天在 Mt Yamnuska 看到的地層位移更少。
STOP 5	解釋練習。碎屑岩儲層露頭(66號公路)
STOP 6	特納谷構造的北傾和生產景象(Range Rd 32和22號公路交叉口)。 眺望約十億桶地質儲量的特納谷油氣田東北側翼的地表表現。
STOP 7	歷史性天然氣處理廠、鑽井地點與三角帶(鑽石谷的 Decalta 路)。 艾伯塔省的商業油氣產業始於 1914 年 Dingman #1 鑽井發現氣態凝結油，1936年在更深層的密西西比世儲層中發現了石油。這個地點提供了一個在三角帶頂逆衝斷層下盤的地表背斜幾何畫面。
STOP 8	特納谷礦區的南端(位在 Longview 小鎮)。 Longview 小鎮上方的山丘俯瞰特納谷礦區南端，該處的構造結束主要是由於特納谷逆衝斷層斷片的側向斜坡造成。此位置以北數十公里麓山帶密西西比世中有許多大油氣田；以南直到接近美國邊界的區域，則很少有油田。

(一) 野外地質考察-第一天(Field Trip Day 1)

1. STOP 1

首個停靠點是距卡加利西北方約35公里的科克蘭北側山丘，可以往南俯瞰東側的前陸盆地與西側的麓山帶。這個觀景點也清楚呈現了典型的「三角帶」(Triangle Zone)的幾何特徵(圖8-2)，這類構造在艾伯塔麓山帶是經典的油氣圈閉構造。此處還可看到兩個大型天然氣田 Jumpingpound 與 Wildcat Hills。由卡加利驅車至此，可發現地層傾斜方向由向西傾斜轉變為向東傾斜且越往東靠近麓山帶地層傾角越陡(圖8-3)，反映出前陸盆地三角帶影響的地層形貌。

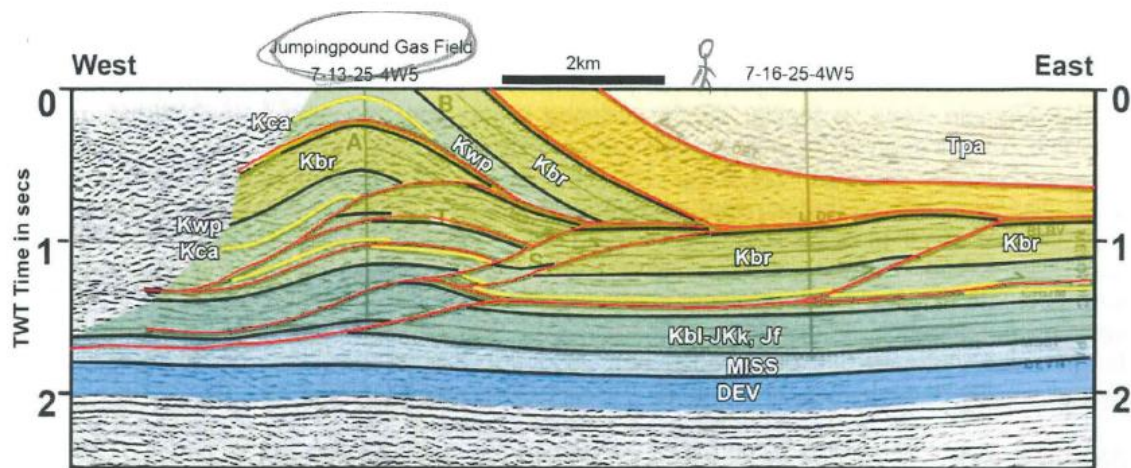


圖8-2 穿越三角帶與 Jumpingpound 天然氣田的震測剖面



圖8-3 科克蘭北側山丘上面向南側，可以觀察地層傾角變化

2. STOP 2

俯瞰過前陸盆地與麓山帶後，接著前往位於加拿大橫貫公路旁的 Scott Lake Hill 休息站。此處是知名的 West JumpingPound 氣田位置。West JumpingPound 氣田是典型的「雙重構造」(Duplexes)造就的油氣圈閉構造(圖8-4)。West JumpingPound 氣田的產層是古生代的密西西比世地層，下往上分別包含了 Exshaw 頁岩層(生油岩)、Banff 層、Rundle 群(Livingstone 層、Mt. Head 層、Etherington 層)，此時期的碳酸鹽岩地層廣泛的分布於亞伯他省南部。

此觀察點提供了麋鹿山地表密西西比世岩層內逆衝斷層的斜向剖面視角(圖8-5)。可以觀察到在主峰下方的地層緩緩向西傾斜，在主峰東側的高大山脊下方，地層向上隆起成一個背斜構造，並向東傾斜，形成陡峭的前翼。該構造包含了多個地底下逆衝斷層中的古生代岩層天然氣藏與一個油藏。麋鹿山露出的是密西西比世 Rundle 組最上部的岩層，海拔高度達2437 公尺。本觀察點下方的密西西比世頂部岩層位於海拔約200 公尺處，由此可知，從此處到麋鹿山頂的密西西比世地層，總共有約2200公尺的構造起伏。若與麓山帶以東的前陸盆地地區相比，麋鹿山頂的密西西比世地層被抬升了超過 4000 公尺。

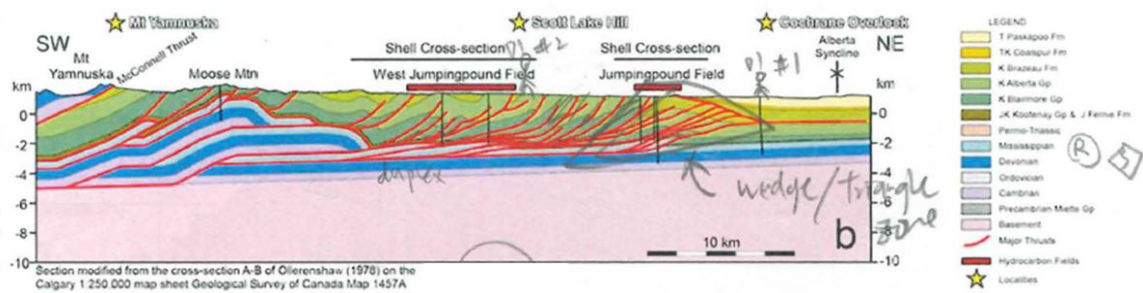


圖8-4 麋鹿山至 JumpingPound 氣田橫剖面構造圖

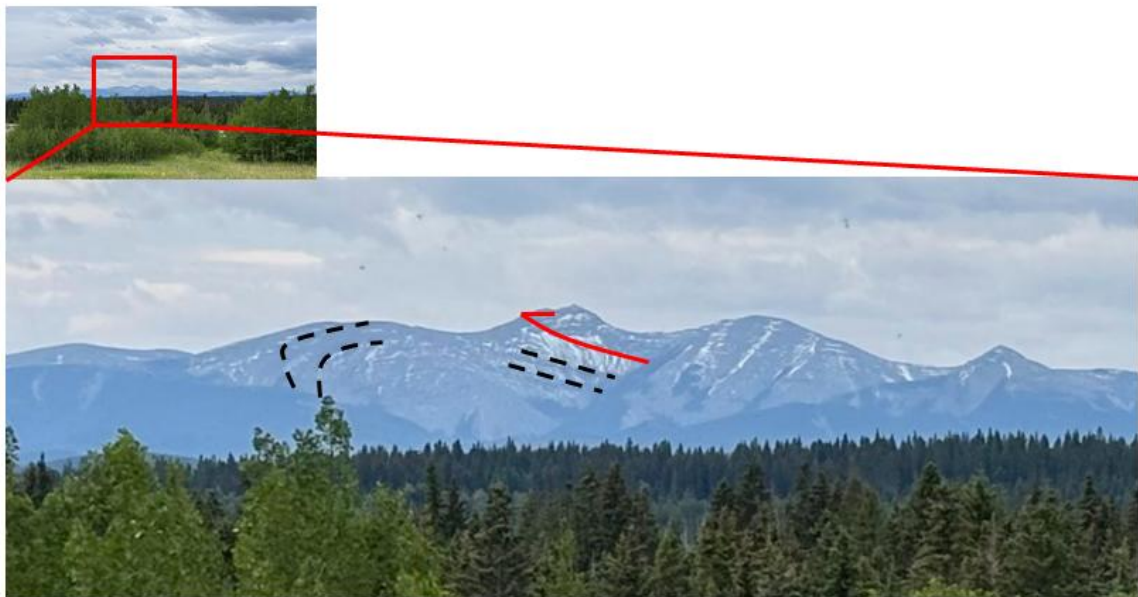


圖8-5 從觀察點遠眺麋鹿山逆衝斷層與背斜構造

3. STOP 3

回到加拿大橫貫公路續往西行，經40號公路抵達 Stoney Nakoda 旁邊的 Tim Hortons，在此可遠眺西側聳立的 Yamnuska 山峰。Yamnuska 山峰裸露的陡壁如側立的鋸子般，但在其半山腰卻有一條似是用直尺橫畫出的分界線，該分界線以下隨即是寬緩的山坡，兩者有著極為顯著的差異(圖8-6)。這兩種不同坡度的分界線間即是 McConnell 逆衝斷層。在分界線以下的是白堊紀的 Belly River 層；分界線以上則是古生代寒武紀的 Eldon 層，順著 McConnell 斷層北往南觀察，可以發現斷層下盤的斷坪與斷坡屬於 Fault bend Fold 形式的逆衝斷層。由於 Eldon 層岩性為含少量白雲岩的泥灰岩，所以在野外露頭上常形成陡峭的山崖；Belly River 層則由砂岩、頁岩與礫石層互層所組成，野外露頭常為緩坡。McConnell 逆衝斷層因斷層傾角較緩，故在地質圖上呈現的是蜿蜒曲折的形貌。

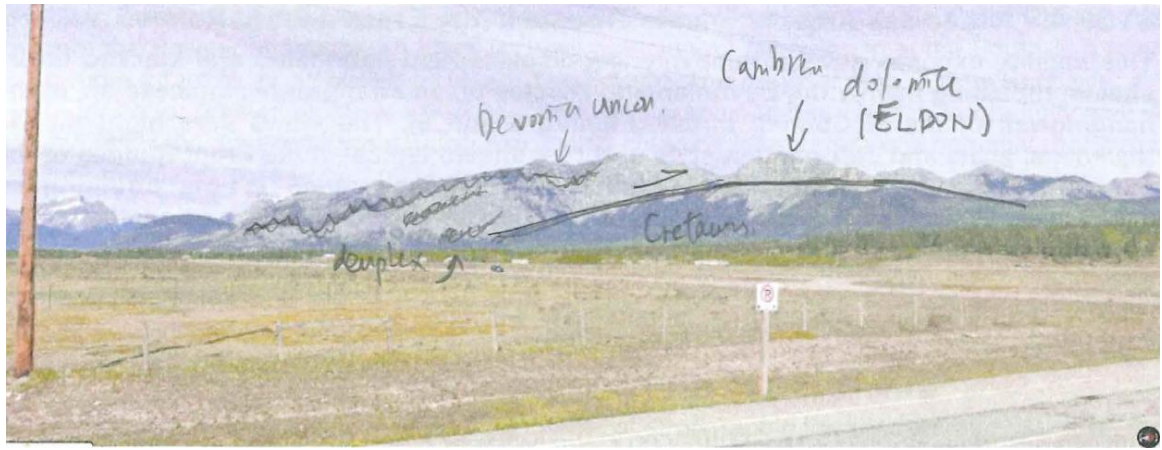


圖8-6 從 Tim Hortons 遠眺西側 Yamnska 山峰以及 McConnell 逆衝斷層幾何形貌

4. STOP 4

我們接著停靠於弓河南岸，北岸有 Canada Cement Lafarge 公司所設立的巨大水泥廠，在水泥廠後方可見三座單斜山脊，地層皆往西傾斜(圖8-7)。Exshaw 逆衝斷層沿著右側山脊與中央山脊間的山谷分布，下盤為 Rundle Group，上盤則是泥盆紀的 Palliser 層(石灰岩)。中央山脊的右側山坡有明顯的鞍部，該鞍部以東為屬於 Rundle Group 的 Livingstone 層和其下的 Banff 層、Palliser 層；鞍部西側則是寒武紀的 Eldon 層。Lac Des Arcs 逆衝斷層即位於該鞍部，此位置可以清楚看到古生代地層重複出現。



圖8-7 Lac Des Arcs 南側眺望北側山脈斷層與地層分布

5. STOP 5

弓河以西經過加拿大橫貫公路的98號交流號後，流向便平行 Rundle 逆衝斷層所造成的構造山谷。跨過坎莫爾小鎮後，第五個停靠點就位於山谷中段加拿大橫貫公路旁 Meander 登山口的路邊休息區。此地點提供了沿斷層走向方向的全景視角，可觀察到長達 20公里以上的 Rundle 逆衝斷層上盤岩層(圖8-8)。由於不同岩性其抗風化侵蝕的能力差異，在地形上常會有山坡坡度的陡緩之別(圖8-9)。Rundle 逆衝斷層上盤出路的地層由下往上依序是：形成緩坡的泥盆紀 Fairholme 群地層、底部為不整合面的泥盆紀 Palliser 層(陡坡)、底部為不整合面的 Exshaw 層(緩坡)、Banff 層下段(緩坡)、Banff 層中段(陡坡)、Banff 層上段(緩坡)、Livingstone 層(陡坡)；逆衝斷層下盤則是侏羅紀的

Fernie 層與侏羅紀-白堊紀的 Kootenay 層(緩坡)。此處的植坡表現上，上盤的寒武紀地層與下盤的 Fernie 層、Kootenay 層披覆了茂密的針葉林，其餘地層則多為裸岩。且下盤的 Fernie 層、Kootenay 層因 Rundle 逆衝斷層的拖曳作用而呈現出倒轉向斜的現象。

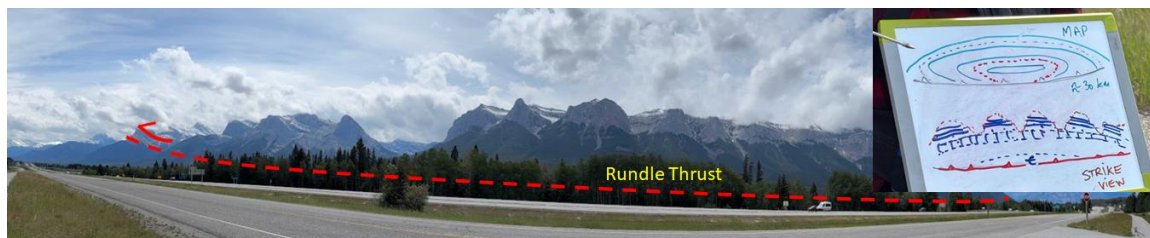


圖8-8 停靠點眺望南側山脈與 Rundle 逆衝斷層，右圖為此構造概念



圖8-9 停靠點望向左側三姊妹山峰(Three Sisters)觀察不同岩性抗風化侵蝕的能力差異

6. STOP 6

最後一個停靠點位於前往 Norquay 山滑雪場的半山腰上，該位置可以綜觀弓河河谷與河谷對面的三個逆衝斷片(圖8-10)。三個逆衝斷片由東而西分別為 Rundle 逆衝斷片、Sulphur 逆衝斷片與 Bourgeau 逆衝斷片，三個相對應命名的逆衝斷層分別位於逆衝斷片東側的山坡坡腳。這些逆衝斷片皆造成單面山脊，西側山坡為順向坡，東側山坡則是逆向坡。以 Bourgeau 逆衝斷層為界，東側稱為前山帶(Front Range)，西側稱作主山脈(Main Range)。Bourgeau 逆衝斷片中，泥盆紀底部不整合面之下的的寒武紀和下部奧陶紀地層相較於東邊三個逆衝斷片而言，厚度多出800公尺以上。雖然整體而言，向西增厚的現象可能來自於地層自身的側向厚度改變及新地層的出現，但是眼前所見厚度上的劇變，代表 Bourgeau 逆衝斷層可能有大於25公里的位移量。

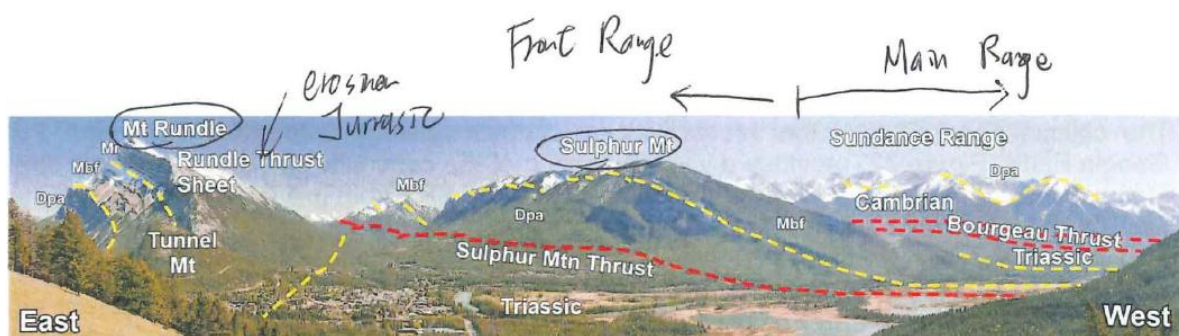


圖8-10 Norquay 山滑雪場的半山腰上眺望南方，綜觀三個逆衝斷片形成之構造分區

(二) 野外地質考察-第二天(Field Trip Day 2)

1. STOP 1

在第一個停靠點，可以觀察到侏儸紀至白堊紀的 **Kootenay** 層。在中生代至第三紀時，東太平洋板塊持續往東與北美大陸板塊碰撞，於加拿大西側形成造山帶與前陸盆地。**Kootenay** 層是該前陸盆地發育時第一個非海相地層，其岩性包括淺海到非海相的砂岩、粉砂岩、頁岩與煤層。這種現象反映出環境自海相轉變為陸相的過程，其陸相的沉積物來源為西側發育的造山帶。**Kootenay** 層下部的煤層，促成了坎莫爾小鎮在 19 世紀末發展成為主要煤礦社區。雖然礦場已經關閉數十年，但在此區仍可見到過去採礦活動的痕跡。此地層受到一系列小規模褶皺與斷層變形，展現出砂岩、頁岩與煤層之間的力學差異所產生的複雜幾何特徵(圖9-1)。此位置位在 **Mt. Allen** 向斜軸心，與主宰坎莫爾小鎮西側天際線的 **Rundle** 逆衝斷層的擠壓運動有關(圖9-2)。

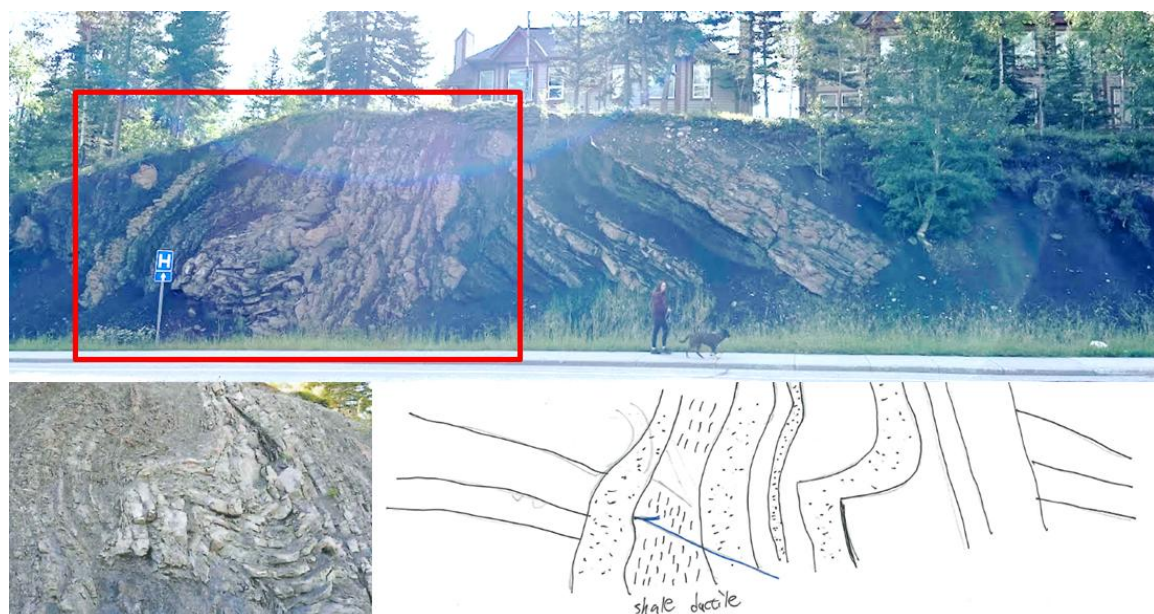


圖9-1 Kootenay 層內因砂頁互層力學差異導致的複雜褶皺變形

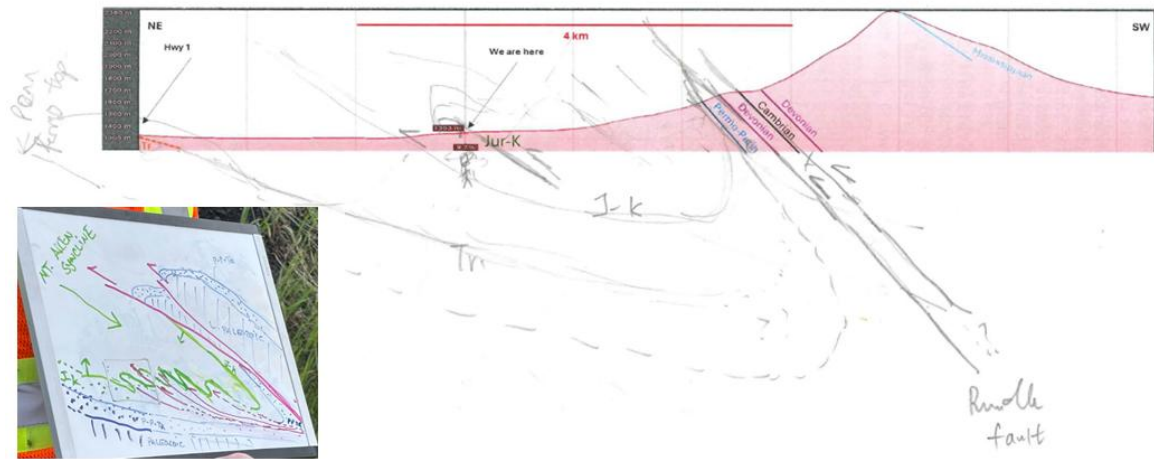


圖9-2 Mt. Allen 向斜軸心與 Rundle 逆衝斷層的擠壓運動

2. STOP 2

此停靠點位於40號公路 Mt Lorette Ponds 附近，此露頭是 Exshaw 逆斷層的上盤，同時也是 Lac Des Arcs 逆斷層的下盤。在 Exshaw 逆衝斷層的上盤，泥盆紀與石炭紀地層大致上是與下方的斷層帶平行的，這說明了該處為上盤平坦段(hangingwall flat)。而在下盤，相對應甚至稍年輕的地層，則明顯被斷層截切，斷層從這些地層中向上斜穿而過，因此清楚界定了一個下盤斜坡(footwall ramp)，此幾何形貌構成了典型的斷層彎曲褶皺(圖9-3)。在下盤的地層截切面與上盤平行傾斜的地層之間，夾有一段灰色石灰岩，其內部岩層呈現出變形、破碎以及傾角略高的特徵。

晚泥盆紀時，北美西部是一個分布廣泛且穩定的碳酸鹽地台，沉積的地層是 Palliser 層。泥盆紀末期至密西西比世早期，海洋地殼的沉降與西部島弧的形成使得原本的地台變成前陸盆地，環境轉為深水的缺氧環境，並沉積了富含有機質的黑色頁岩，亦即 Exshaw 層。密西西比世早期後，前陸盆地逐漸被碎屑岩及燧石填充，組成下段的 Banff 層。Banff 層中段則是具有許多海百合碎屑、水道侵蝕底質的鑄型、海底山崩等沉積構造的海底斜坡環境。在密西西比世時期，多次出現的碳酸鹽地層，組成了目前加拿大東洛磯山脈與前陸盆地部分的儲集層。

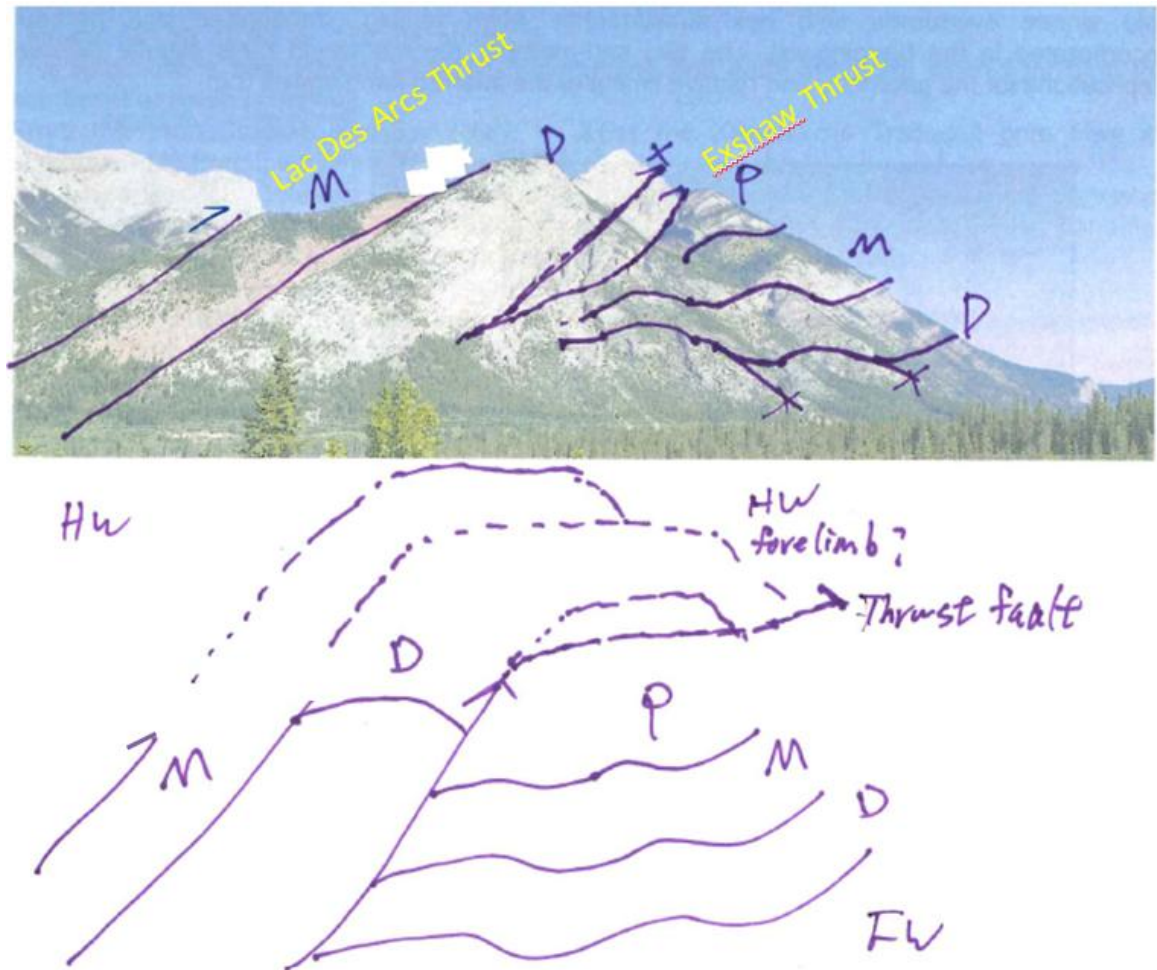


圖9-3 停靠點眺望北側 Mt Lorette，以構造地質角度推測被侵蝕之斷層彎曲褶皺

3. STOP 3

此停靠點位於40號公路 Wedge Pond 旁，提供了 Rundle 逆衝斷層在 Wedge 區域震測尺度下的壯觀視野。可以在斷層上盤看到許多複雜的變形構造(圖9-4)。

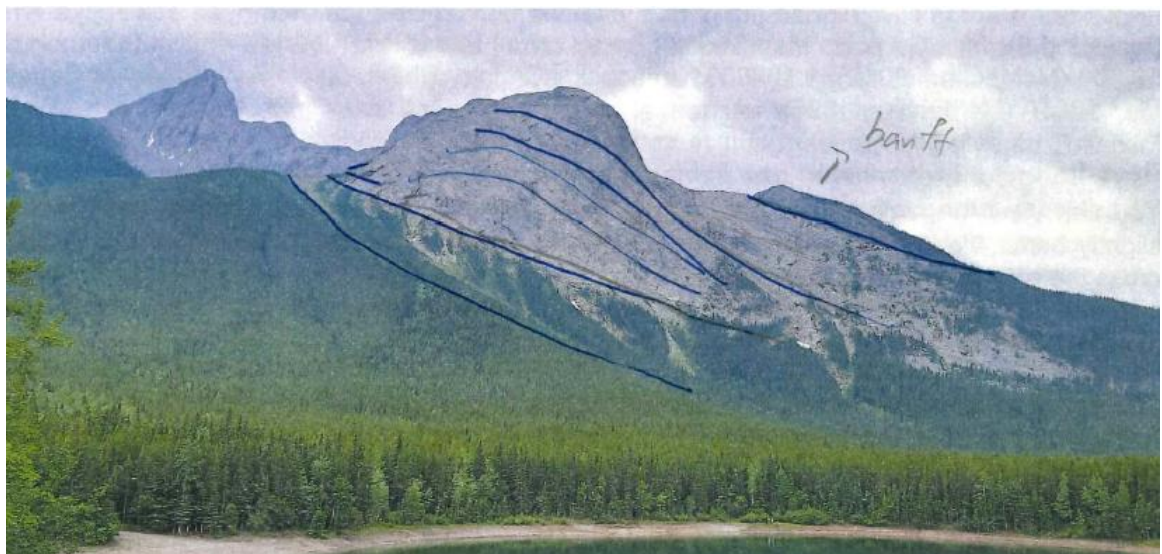


圖9-4 Wedge Pond 旁眺望 Rundle 逆衝斷層構造

4. STOP 4

此停靠點位於40號公路 Rocky Creek 停車區旁，提供了非對稱褶皺景觀，這些褶皺與路易斯斷層的地表終止位置有關。基德山南峰的岩壁露出一組大型、非對稱的背斜一向斜(圖9-5)。路易斯斷層往南延伸到美國境內成為美國洛磯山脈的一條主要斷層，其斷層頂點經此處往北後逐漸消失，故此處可說是路易斯斷層出露的最北端。路易斯斷層可能是典型的斷層擴展褶皺(Fault Propagation Fold)，但有些學者認為基德山的褶皺應該肇因於滑脫斷層(Detachment Fault)；更有些學者認為本露頭出露的僅是路易斯斷層北端所發育一系列與路易斯斷層平行小斷層的其中一支。此處所見的露頭亦位於 Rundle 逆衝斷層的上盤中，並因此被抬升。Rundle 逆衝斷層的位移量在此地點向南突然減少，與此同時，路易斯斷層的位移量則逐漸增加。這兩條斷層的斷層線在距離不到 1 公里的狹窄地帶內重疊超過 5 公里，顯示出斷層間位移的轉移關係(圖9-6)。此處所觀察到的變形，很可能是位移轉移區域中脆性與韌性變形錯綜分佈的結果，而非單一斷層位移量減少以及伴隨的一個褶皺所能解釋的。

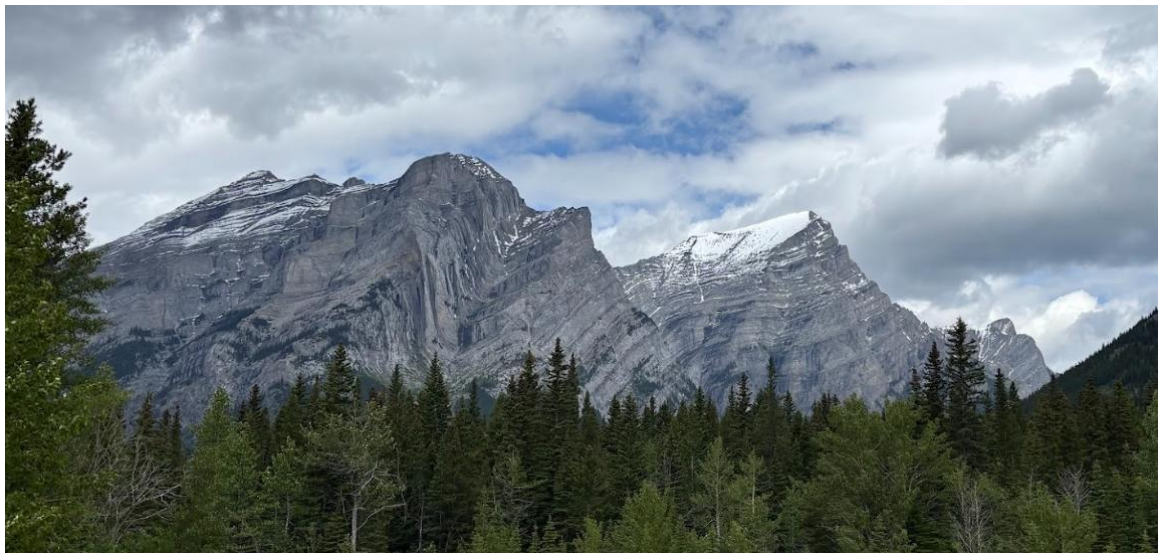


圖9-5 Rocky Creek 停車區眺望基德山南峰的非對稱褶皺景觀



圖9-6 此停靠點斷層與位移關係

5. STOP 5

此停靠點 Upper Kananaskis Lake 為第二天野外考察路線的最南端，本日已走過一條穿越整個前山帶(Front Ranges)的斜向剖面，從 McConnell 逆衝斷層的上盤到 Bourgeau 逆衝斷層的上盤。此處觀察湖北側的 Indefatigable 山(圖9-7)，裸露的岩壁揭露了泥盆紀的 Palliser 層與其上的密西西比世 Exshaw 頁岩層、Banff 層等，Bourgeau 逆衝斷層即位於露頭東側 Palliser 層底部。Bourgeau 逆衝斷層是前山帶最西側的主要斷層，也就是主山脈(Main Ranges)最東側的主要斷層，其延伸長度可自 Banff 北側往南直到加拿大與美國交界。這個構造是個良好的類比範例，在 Bourgeau 逆斷層的上盤，發育一個油田規模背斜構造，含有泥盆紀晚期碳酸鹽岩儲層，上覆 Exshaw 頁岩層作為生油岩，並以 Banff 層下部頁岩作為封蓋條件，形成油氣聚集的良好條件，可對應至地下潛在的四面圈合封閉油氣構造。

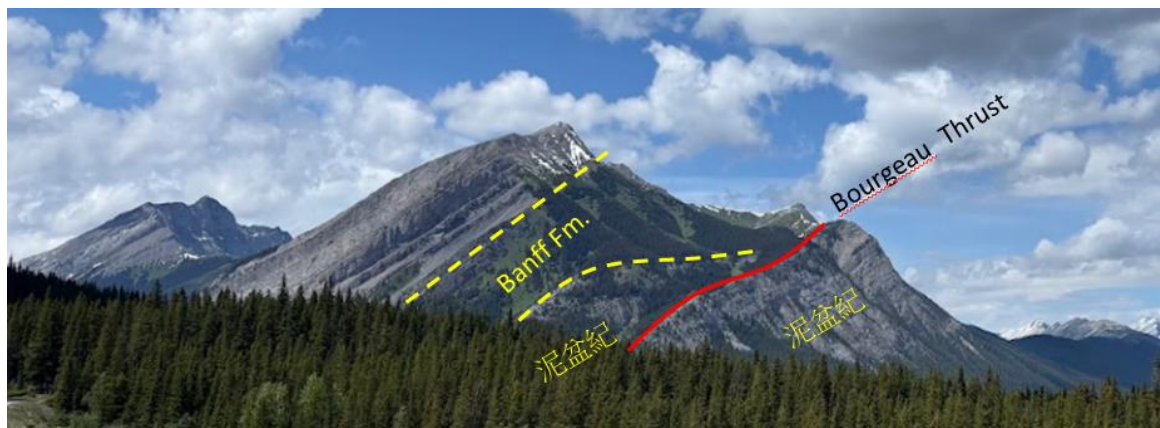


圖9-7 Indefatigable 山與 Bourgeau 逆衝斷層

6. STOP 6

此露頭位於 Fortress 滑雪場下方，40號公路 Fortress Mtn 路口，可清楚觀察到東北東－西南西走向的斷層帶，以及二疊紀 Johnston Canyon 層與晚石炭紀 Kananaskis 層之間的不整合面。此東北東－西南西走向斷層顯示，該斷層帶內包含兩條主要滑移面與夾在中間的脆性剪裂帶，並呈現幾乎正交的兩組裂隙系統(圖9-8)，不論走向如何，在地下都可能具有顯著的流體流動率。

Kananaskis 層的頂部似乎曾遭受生物鑿孔，這些結構被磷質粉砂岩所填充，而上覆二疊紀 Johnston Canyon 層含有大量磷酸鹽物質以及豐富的生痕化石(Zoophycos 等)，顯示屬於 Cruziana 生痕相，這代表底棲生物在相對深水、低能量環境中的活動特徵。晚石炭紀 Kananaskis 層與上覆二疊紀 Johnston Canyon 層之間的不整合面(圖9-9)，為地質時間跨度約 2500 萬年的假整合(Disconformity)或似整合(Paraconformity)。



圖9-8 此露頭顯示幾乎正交的兩組裂隙系統



圖9-9 晚石炭紀 Kananaskis 層與上覆二疊紀 Johnston Canyon 層之間的不整合面

(三) 野外地質考察-第三天(Field Trip Day 3)

1. STOP 1

回到加拿大橫貫公路往東行，沿著22號公路向西再接758公路來到 Bragg Creek，在地質分區上屬於麓山帶。這裡出露的地層是白堊紀的最下部，地層以薄層的砂岩和頁岩為主，附近有許多緊密排列的斷層和緊閉的褶皺。

在 Elbow River 的河岸可觀察到岩層劇烈的變形(圖10-1)，由於褶皺的型態相當對稱，加上褶皺非常緊閉，故可推測此變形構造其可能由於地底下的滑脫斷層所造成。



圖10-1 Bragg Creek 省立公園的滑脫斷層褶皺

2. STOP 2

沿著758公路往西接66號公路，再轉至 **Moose Mountain Road**。從這裡可以一覽整個 **Moose Mountain** (圖10-2)。腳下的地層屬於密西西比世和白堊紀的 **Kootenay** 之交界處。**Moose Mountain** 山脊的岩性是密西西比世的石灰岩，構造上是 **Prairie Mountain thrust** 的上盤，**Prairie Mountain thrust** 的構造作用使得密西西比世重複出現於密西西比世之上。在山峰的高處也會出露泥盆紀的頂部。這裡看到 **Prairie Mountain thrust** 把密西西比世抬升到密西西比世上面，但更往南，密西西比世抬到侏羅系和下部白堊系上面，地層落差變小，所以有一些位移轉移掉了，再更南邊就消失掉了。西邊不遠處，有另一個逆衝斷層將密西西比世抬上來，是 **Dyson Mountain Thrust**。

這裡的第一口井，**Moose Oil #1** 鑽於1929年，之後陸續鑽了幾口井(圖10-3)。早期的鑽井只鑽穿最表面的逆衝斷層帶，只有出現微量的油氣徵兆，其中一口井共只產了數萬桶油。後來隨著科技進步以及新的地質概念衍生，開始往地層深部鑽探，打穿第二個逆衝斷層帶，鑽到密西西比世，終於發現大的氣田(圖10-4)。



圖10-2 向西遠眺 **Moose Mountain** 以及其中一個油氣生產設施



圖10-3 **Moose Mountain** 鑽了幾口井，是尚在生產之油氣田

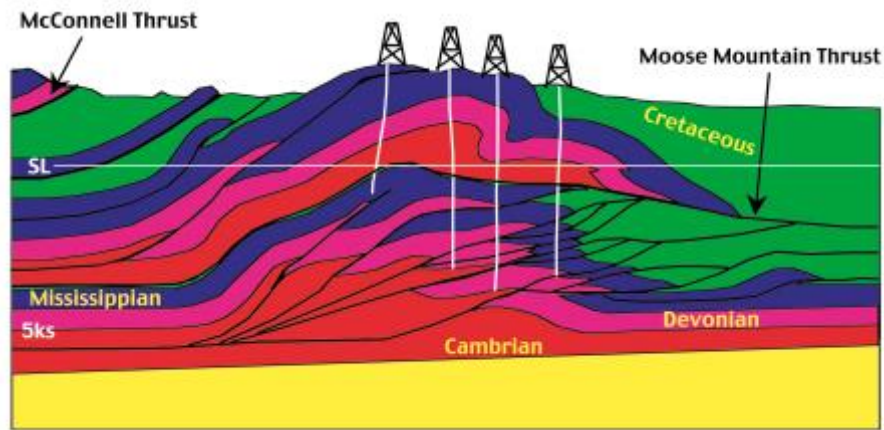


圖10-4 Moose Mountain 地質剖面

3. STOP 3

沿著66號公路繼續往西走約3公里，抵達 Powderface Creek 登山口的停車場。此處位於 Moose Mountain 的西南翼，岩層向西傾斜。從停車場往東看山壁上的露頭，最上面的較堅硬的岩壁是密西西比世的碳酸鹽，其下疏鬆、部分風化的岩層是白堊紀和侏羅紀的 Fernie-Kootenay，兩者之間的交界為 Prairie Mountain thrust。斷層上盤的密西西比世的碳酸鹽岩層內部有一些小規模的變形和斷層(圖10-5)。

此處已接近 Moose Mountain 的南端，地勢漸漸變低，這是因為出露的地層為白堊紀和侏羅紀而容易被侵蝕。Prairie Mountain thrust 的位移量也往南漸漸減少而逐漸在 Kootenay 層中消失。

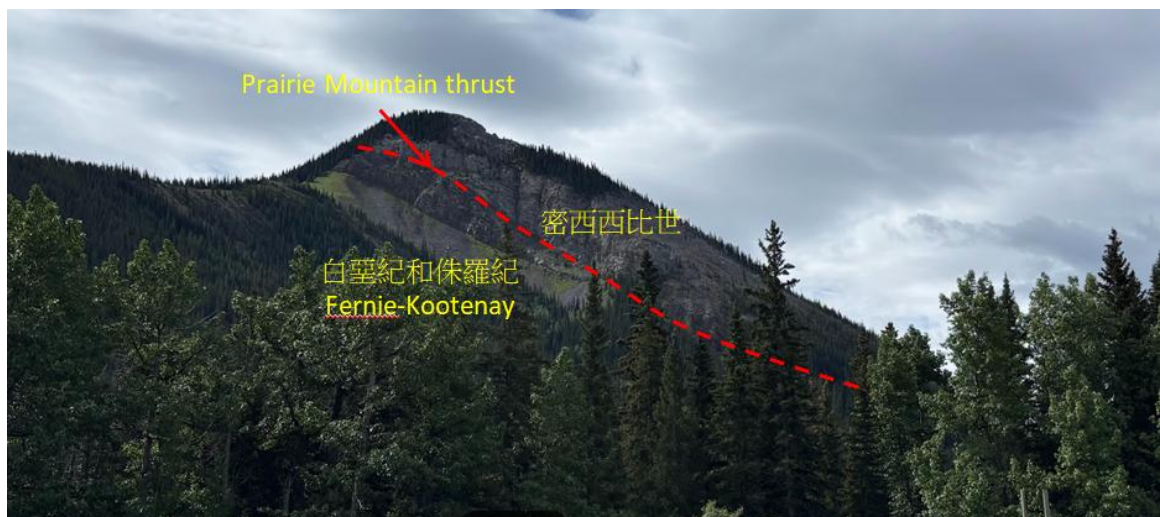


圖10-5 Prairie Mountain thrust 的露頭

4. STOP 4

沿著66號公路繼續往西南走，來到 Forget-Me-Not Pond。從這裡往東看，可看到

Dyson Mountain thrust 上盤的密西西比世頂部的地層，因較不受風化侵蝕成為一個山脊；其西側是較年輕的侏羅紀和白堊紀之地層，部分已被侵蝕(圖10-6)。

往西望，可看到白雪皚皚的綿延山脈，那是 **McConnell** 逆衝斷層將泥盆紀 **Palliser** 和密西西比世地層抬升到白堊系之上(圖10-7)。在地質圖上，可以看到在 **McConnell** 逆衝斷層的上盤，**Palliser** 沿著斷層的走向出露一段非常長的距離，意味著上盤平坦段；而在下盤的地層，地層延伸不遠就被 **McConnell thrust** 所截切，意味著下盤斜坡。



圖10-6 Forget-Me-Not Pond 向東看 **Dyson Mountain thrust** 上盤的地層



圖10-7 Forget-Me-Not Pond 向西看 **McConnell thrust**

5. STOP 5

離開 Forget-Me-Not Pond 之後，沿著66號公路接近 Beaver Flats 的路邊露頭，進行解釋練習。此露頭提供井測尺度下從侏羅紀至白堊紀地層特徵，可以觀察到砂頁互層碎屑岩、直徑約30公分的結核以及疑似圓丘狀交錯層(**Hummocky cross-stratification**)或水道(**Channel**) (圖10-8)，推測沉積環境從深水至河流沖積(**Fluvial**)，為前陸盆地初期常見沉積環境演進。



圖10-8 66號公路路邊露頭可觀察侏儸紀至白堊紀之沉積環境變化

6. STOP 6

沿著66號高速公路往回走接22號公路，一路向南抵達 Range Rd 32路口附近，可以發現到周圍開始出現許多的井(圖10-9)，現在已經進入特納谷的東北端，這是一個背斜構造，軸部的地層是白堊紀的 Wapiabi，在其兩翼是更年輕的 Belly River。沿著背斜的走向往東南走，軸部會出現更老的 Cardium 和 Blackstone。這個油氣田最早在1914年被發現，是第一個在亞伯達省商業化的油田。當時是生產白堊紀地層的油，後來到1970年代後才往更深處地層探勘。

特納谷油氣田的構造模型有很多，圖10-10的 a 地質剖面是1959年提出，利用當時已鑽探的數百口井的資料，解釋為斷層擴展褶皺，可以看到密西西比世的上盤斜坡。但此模式中，從上盤斷點(cutoff)到下盤 cutoff，密西西比世有很大的位移，然而在地表上出露的地層都是第三系，位態向東傾，且沒有斷層出露，若用斷層擴展褶皺模式難以解釋如何從深部數公里的位移快速地變化到地表幾乎沒有位移。後來陸續有更多模式提出，圖10-10的 b、c 為2001年所提出的剖面，可以看到密西西比世被抬升，並且產生雙重構造(Duplexes)。地表背斜軸部出露的是白堊紀。這模式認為有一條未出露地表的背衝斷層(backthrust)，即是三角帶的頂部斷層(roof thrust)。



圖10-9 特納谷隨處可見的磕頭機

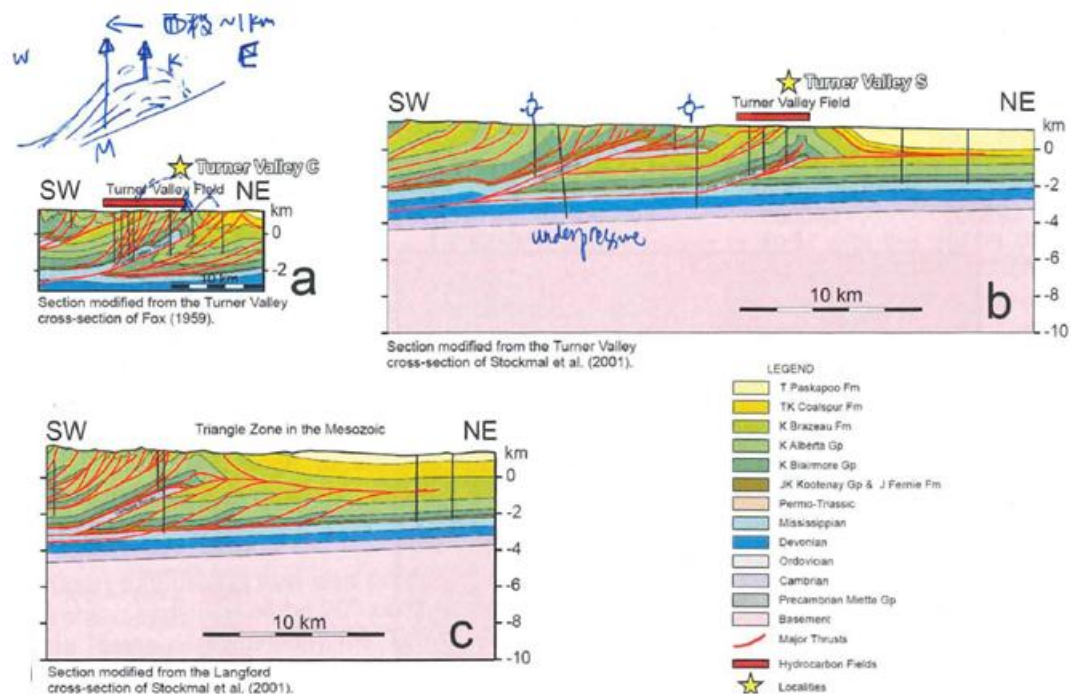


圖10-10 特納谷的地質構造解釋

7. STOP 7

續延22號公路南行，來到特納谷南邊 Decalta 路。特納谷是一個巨大型的油氣田，第一口發現油氣的井在1914年，於白堊紀地層中發現原油。1921以後，開始往深部鑽探，後來在密西西比系發現天然氣與凝結油。在1942年時，特納谷原油的產量就佔了加拿大原油總產量的90%。特納谷同時也生產了天然氣，但由於20世紀初天然氣的經濟價值不高，大部分產出的天然氣就直接燒掉了，這也使得地層壓力急遽下降，

無法使石油繼續產出。根據計算，地層中應有數十億桶的石油，而最終能夠被生產出來的只是其中的一小部分而已。在溪流旁出露的地層向西傾(圖10-11)，而在天然氣廠後面的地層卻向東傾(圖10-12)，這個構造是三角帶，這個地點剛好可看到三角帶的兩側。



圖10-11 特納谷小鎮南邊天然氣廠下方，河流邊出露向西傾之地層



圖10-12 特納谷天然氣廠後面山壁地層向東傾

8. STOP 8

沿著22號公路繼續往南至 LongView 小鎮北側，可以看到地勢逐漸變低，視野很廣，這也是當地地名 LongView 的由來(圖10-13)。在這裡特納谷構造逐漸向南 die out，這構造總長度大約40公里。



圖10-13向南眺望 Longview 小鎮

參、具體成效

本次出國人員參加「褶皺逆衝帶石油系統評估」訓練課程及野外地質課程，學習褶皺逆衝帶石油系統評估的基本原理和分析技術，了解褶皺逆衝帶岩石組構對油氣流動及儲存之影響，並藉野外實地課程考察地質構造於三維空間之變化，未來能將所學應用於各礦區之探勘、開發及生產工作，以利進行油氣藏評估、開發設計及油氣生產。具體成效如下：

1. 瞭解深水沉積特徵。
2. 實證理論並與礦區地質模型之對比。
3. 能增廣視野並提昇地質專業知識。
4. 有利進行儲集岩類比、地層構造解釋及油氣資源評估
5. 提升本公司未來國際級野外地質解說能力。

肆、心得及建議

在這次「褶皺逆衝帶石油系統評估」的訓練中，我們覺得一切都近乎完美，除了不可控的幾場大雨，整體符合我們對課程的期待，不僅可提升解釋工作之能力，也藉此機會與 Husky 母公司 Cenovus 公司交流，了解該公司的規模及礦區拓展的想法，以增進未來合作發展機會。

兩位講師(Marian and Mark)在室內課程講解的很清楚易懂，說明構造演變的過程與理論基礎，透過斷層彎曲褶皺、斷層擴展褶皺、滑脫褶皺等模型，搭配加拿大及世界各地震測剖面，使理論與真實案例有深度連結，此外講師規劃的各種習題演練，讓學員們實際操作透過地表傾角資料還原構造幾何、構造平衡剖面等，並相互討論參數假設差異，在同一種模型下得出不同結果，該結果會影響儲層是否成藏，使我們觀念更加清楚深刻。我們與講師互動良好，問題與討論讓我們很有收穫。

野外課程準備的非常充分，大海報、白板講解與實際情況的對照，讓我們更容易想像與了解。野外地質考察停靠點從前陸盆地、麓山帶至前山帶等不同的地質單元，從基德山、麋鹿山所看到的褶皺，以及 Rundle 逆衝斷層、McConnell 逆衝斷層、Bourgeau 逆衝斷層對構造的影響，創造了非常壯觀的地質構造。藉由地表上構造立體的呈現，讓我們對地底下構造解釋更合理、更容易想像，講師也分享過去與現在震測資料演進與解釋的變化，特納谷、麋鹿山油氣田的開發史與解釋模型演進對探勘的益處，這次課程對於尋找油氣構造非常有幫助。

我們對於硬體設施及老師的專業知識、教學品質、互動都非常欣賞，希望 Husky 能繼續舉辦這樣優良的訓練課程，增進彼此討論機會，讓更多地質地物人員增進技術能力。

感謝主管與同仁們努力地爭取此次培訓機會，使我們得以經由這種方式往外吸取經驗，以近距離接觸教科書等級的壯觀地質構造，以及親眼見到億萬年來的構造演化過程，期許能透過此經驗，將這些地質構造類比台灣海域前陸盆地至前山帶，並應用在海域探勘以尋找良好油氣構造，為公司提升獲利。整體而言，這次是一個非常棒的訓練課程，感謝 Husky、講師的付出、感謝公司的核派。

我們覺得建議的部分包括：

1. 增加一至三天課程時間，使課程時程不這麼緊湊，更容易吸收課程專業技術。
2. 課程時間避開旅遊熱門時段，以降低住宿及機票費用，如提早到五月底或六月初。
3. 卡加利海拔高度約1000公尺，即使出差期間在六月，最低溫度還是10度以下，平時溫度約在5-15度，必須準備冬季服裝。
4. 未來與其他國際油公司之合作案，可將此次參與 Husky 課程的模式列為契約內容，讓更多專業探勘人員參與課程充實專業技術，可以認識國際油公司及專業顧問如何準備培訓課程，並與其他公司交流增加同仁經驗。