

# 探測台灣莫荷面

王乾盈<sup>1</sup> 顏宏元<sup>1</sup> 呂佩玲<sup>2</sup> 張建興<sup>2</sup>

中央大學地球物理所<sup>1</sup> 中央氣象局地震測報中心<sup>2</sup>

## 摘要

Pn 波一向被公認為指示莫荷面最佳的震波信號，該波是沿著地殼底部（即莫荷不連續面）前進，再返回地表的折射波。1909年，克羅埃西亞籍的莫霍洛維奇（Mohorovičić）發現莫荷面（Moho）或地殼構造，用的就是 Pn 波。在莫荷研究後100年，2008~2009年台灣執行 TAIGER 計畫，利用人工爆炸、空氣槍震源，及大量密集觀測儀器，希望能找到台灣的地殼構造。但是，TAIGER 計畫並沒有收集到足夠的 Pn 波。由簡單的單層地殼模型（35km 厚，地殼地函 P 波速度為 6及 8 km/sec）預測 Pn 波需在 170km 以外才可能以初達波出現，2008年 TAIGER 實驗不完備的原因有二：1) 台灣島東西寬只有 130km，不足以展現 Pn 波，2) 台灣南北雖有 400km 長，但側向構造複雜，嚴重耗散 Pn 波。

2010年，我們有很好的機會，獲得台灣底下的 Pn 波。經過多年努力，兩岸合作進行：跨越台灣海峽震測實驗計畫（ATSEE），在大陸福建省釋放一序列的高爆炸（1~3 ton），在台灣則安排密集線形儀器陣列接收信號，測線從福建，經台灣海峽（布海底地震儀），到台灣島東海岸，長達500km。由於距離足夠，因此得以產生明確的 Pn 波，此組 Pn 資料（其中包括 CWBSN 即時資料）發現南台灣莫荷面速度 7.8 km/sec（福建為 8.0 km/sec），地殼厚度最多不超過 45km，而且明顯指出南台灣山脈底下有山根，且山根往西偏了 25km。

關鍵字：TAIGER，ATSEE，台灣莫荷面

## 一、前言

台灣地下地殼的厚度（即莫荷面深度）及其變化情形，為關係到台灣板塊構造最基本的資料，過去都以地震波到時進行速度構造反演（tomography）來推測，但因震源及測站分佈不均，使得不同研究所獲得的構造有所差異，若以速度 7.6km/sec 為準，台灣島的地殼厚度可以從30km到 50km 不等，其實，速度構造掃描只是反演出速度分佈，並無地層的觀念，因此不足以指出莫荷面位置所在。最近利用接收函數（receiver function）來推演，更是粗糙，地殼厚度可以從 20km 到 60km。台灣地體構造複雜，不能以水平層來近似，因此以接收函數推測台灣地殼厚度，並不是可以信賴的方法。

2008年執行 TAIGER 計畫（Taiwan Integrated Geodynamic Researches），為台美合作計畫，目的之一在探測莫荷面，計畫分五部分進行：1) 天然地震密集寬頻網觀測，2) 陸上人工爆炸海上空氣槍觀測，3) 大地電磁剖面，4) 構造演化數值模擬，5) 非均向性觀測及岩石分析。其中，利用人工爆炸及空氣槍震源，在線形儀器陣列仔細觀測下，以初達波到時及少數可辨認的反射信號，測繪台灣地下的莫荷面構造。初步結果顯示台灣莫荷面深度最多不超過 45km，在西部底下約 36km，中軸山脈底下約 42km，東部底

下約 26km，中軸分為北中南三段，中段稍厚，中段及南段底下有明顯山根，北段則無。在淺部 10km 以上出現若干明顯的低速帶，可能與破碎帶有關。

觀測地殼厚度（即莫荷面深度）最可靠的波相為 Pn 波，也就是沿著莫荷面跑的折射波，當初莫霍洛維奇在歐洲發現地殼底部，用的就是 Pn 波。Pn 波以初達波出現的距離約為地殼厚度的5倍，也就是若地殼厚30km，則需在 150km 以外才看得到 Pn，圖一說明此距離為 Pn 波早於 Pg 波到達的距離，稱為交叉距離（cross-over distance），在交叉距離之後，Pn 波才可能以初達波出現，而被明確辨認。圖二顯示兩個例子，說明高爆炸震測實驗中，交叉距離很容易辨認，並可藉以估計地殼厚度。

台灣島東西寬度最多只有120km，因此東西向測線沒有機會看到 Pn，必須依靠夠遠的外來震源。2010年啟動 ATSEE 計畫（Across Taiwan-Strait Explosion Experiment），為兩岸合作計畫，這是在中央氣象局與國內學界長期努力下，與大陸的中國地震局首次實質合作的科學研究計畫，意義重大。ATSEE 計畫由大陸福建釋放1~3公噸的爆炸，在台灣海峽及台灣陸地接收，從福建沿海到台灣西岸有 200km 以上，因此得以產生明確的 Pn 波，此組 Pn 資料（包括 CWBSN 即時資料）將有機會一舉解決「台灣莫荷面位置」的百年地球科學問題。

## 二、2008~2009年 TAIGER 實驗

2008年執行TAIGER計畫的台灣陸上高爆實驗，沿著北中南三條東西向橫跨台灣島的測線(測線位置參考圖五)，每線各4個炸點，共14個炸點，炸藥量1~3公噸，測站為TEXAN儀器，200m間距，共800台。2009年則實施海陸聯炸，垂直海岸線施放空氣槍震源，約40m一炮，陸地布設 Reftek 地震儀，2km間距。這兩次實驗的產出，構成一套很大的資料庫，必須動用很多人力及時間來處理。圖三為北線(N-line)的情形，使用到的資料包括：1) 800台TEXAN收到的4個炸點紀錄，2) 4台陸上地震儀所收到來自東部外海的空氣槍資料，3) 10台布於台灣海峽收到高爆的信號，經挑選約5000筆初達波到時，進行速度構造反演逆推(tomography)，結果如圖三之下圖所示。在淺部10公里波線密集，解析極佳(紅匡為陸地部分)，但深部則波線覆蓋不足，無法解析，但仍依稀可見 Pn 信號所呈現的莫荷面，深度不超過40km，因該組資料的初達波信號對下部地殼解析不足，圖三之結果僅供參考。

在測線縱深不夠的情況下，欲探討深部構造，則須依賴反射波，即經由地殼內不同地層所反射的 PiP 波及由莫荷面所反射的 PmP 波，如圖四所示。前述的 Pg 或 Pn 波為初達波，波相容易辨認，到時挑選也較正確，但反射波則掩埋於眾多信號之中，很不容易辨認，必須依賴其走時曲線的關係(雙曲線)，加以模擬比較及推估。台灣地體構造複雜，反射波信號縱使存在，亦很紊亂。圖四之結果係利用波線追跡法(ray tracing)，經多次測試而得，先以圖三之初達波逆推所得的淺部10km構造為基礎，利用PiP到時，測試出該界面位置，其中並計算出的 P<sub>1</sub>P 到時，回原剖面尋找最佳的 P<sub>1</sub>P 波相，如此多次反覆，始確定第一層構造。接著計算 P<sub>2</sub>P 關係到的第二層，測試出合適的地層速度及找出合理的反射波相，並依此往下計算其他層次，直到獲得合理的最終構造。圖四所獲之北台灣地殼構造，莫荷面最深約 42km，沒有明顯的山根。另外，值得注意的是：在梨山斷層東側的中央山脈地質區，其淺部 5km有明顯的低速帶，可能導因於地層破碎帶，此測線附近有宜蘭清水地熱，相信也與此低速帶有密切關係，很值得地熱研究注意。

## 三、2010年 ATSEE 實驗

上述 TAIGER 計畫之北台灣測線，由於缺乏足夠的 Pn 波，對下部地殼的控制不足，因此所獲之地殼構造尚無絕對的把握。探測莫荷面還是需要夠遠震源來的 Pn 信號，也就是，對台灣島而言，必須藉諸於外來的，例如大陸福建來的信號。

2010年起，我們有絕佳的機會得到來自大陸方面的奧援。在 2008 年 TAIGER 實驗時，亦邀請大陸福建省地震局布設陸地測站，所收到台灣高爆信號資料，已可推測大致的台灣海峽地殼厚度(小於30km)。到 2010 年，由於大陸福建省新設立數位寬頻地震網，亟需精確的地殼速度構造，省局遂啟動五年期的地殼探測計畫，利用分隔福建省為四橫四縱的網格狀觀測網，以每年四炮的進度來進行探測。對兩岸合作而言，此即從1998年即著手規劃的 ATSEE 計畫，可視為 TAIGER計畫的延伸。ATSEE 計畫於2010~2013分年實施，2010年進行南線，2011年進行北線，2012及2013年則進行中線。

圖五為ATSEE2010計畫所規劃的震源及測線，震源從廈門、龍岩到長汀，共四炮(SP41~SP44)，炸藥量為1300~3000kg，在台灣海峽有 CWBSN 的金門站及澎湖站，並布設 10 台海底地震儀(OBS)，測站間距 15km，可惜的是：實驗過程中，遭遇颱風，10台OBS只回來3台，損失慘重。在台灣陸地則設計兩條測線，沿著原 TAIGER 實驗的南線(S-line)及中線(M-line)，以 2km 間距共布出 50 台地震儀(Q330或CMG)，地震儀中間則插入 2 台TEXAN，相距 400m，共使用 74 台TEXAN。測線長度達500km以上，尤其從廈門到台灣東海岸約 400km，很適合產生 Pn 波。

ATSEE2010實驗所獲資料之一例，如圖六所示，此為炸點 SP41(廈門)到達台灣中線的震波紀錄，包括臨時布設的地震儀、TEXAN 及 CWBSN 測站。聯合所有紀錄可以清楚表現出明顯的 Pn 初達波，波速為 7.8km/sec，這是到目前為止，台灣所獲得的最明確的莫荷面速度。另外，亦有若干 Pg 波及 PmP 波可以使用，注意：圖六在台灣東海岸附近，Pn 信號到時明顯延遲，相當特別。圖七為圖六剖面的 Pn 波到時分析解釋，以簡單的單層模型推測福建、台灣海峽、到台灣島可能的地殼構造變化。圖七之上圖的走時紀錄圖中，扭曲的平行四邊形為 SP41 震源西側的大陸福建的紀錄(曾出現於圖二b)，但翻轉置於東側，以便與台灣部分比較，可看出大陸的 Pn 速度是 8.0 km/sec，地殼厚度約 33km。台灣海峽地殼厚度約 26km，進到台灣西部平原為32km，但到台灣山區，則加深到40km。圖七中的東台灣測站顯現 Pn 波有0.8sec的「到時延遲」，代表台灣山脈底下地殼厚度多了約 3km，也就是，台灣山脈底下有「山根」，這是台灣島有山根的確鑿證據。

ATSEE2010實驗提供了莫荷面 Pn 波控制，將此加入 TAIGER 實驗南線所獲得的所有可辨識的震波到時資料，即可進行地殼構造逆推。先進行淺部 Pg 波的速度構造反演，建立初始速度模型，並逐步加入 Pn 波及各層的 PiP 反射波紀錄，以波線追跡法計算及模擬地殼速度構造，終得南台灣最佳的地殼

構造，如圖八所示。南台灣地殼最深約42km，具有明顯的山根，但山根最深處並不在中央山脈的正下方，而往西偏了25km，反映出台灣造山運動過程中，台灣山根被作用力來自東方的板塊運動碰撞，山根因而向西偏移。

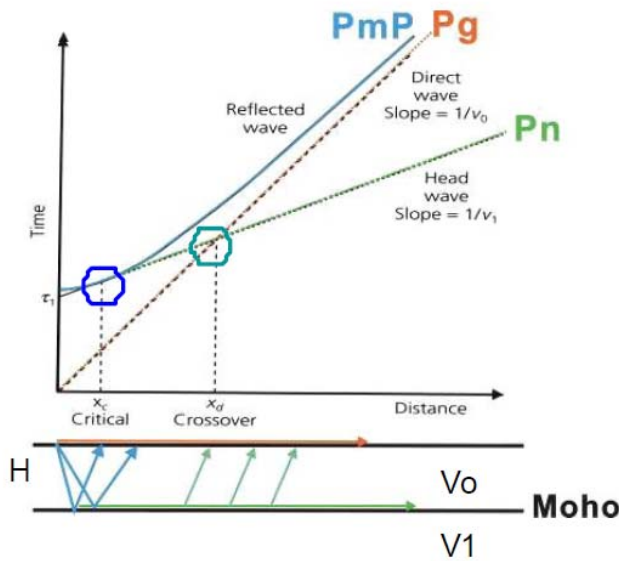
#### 四、結論

2008年TAIGER實驗利用人工爆炸及密集觀測，建立台灣最完整的人控震源震波紀錄資料庫，提供台灣北中南三條精細的構造剖面，尤其是淺部10km的構造。2010年開始的ATSEE實驗則接續提供Pn波資料，給予深部構造有效的控制。近年來的這些大規模實驗，動員了台灣地球科學界各單位，與國際及兩岸密切合作，期望對台灣地殼構造提供最好的資料，完成莫荷面搜尋的任務（Moho hunter）。

本研究獲得有關台灣地殼構造及莫荷面的初步成果：

- 1) 莫荷面在西部底下約 36km，中軸山脈底下約 42km，東部底下約 26km，中軸分為北中南三段，中段稍厚，中段及南段底下有明顯山根，北段則無。
- 2) 在淺部 10km 以上出現若干明顯的低速帶，可能與破碎帶有關，也關係到地熱分佈。
- 3) 從大陸福建來的高爆信號，提供明確的 Pn 波，指出南台灣莫荷面速度為 7.8 km/sec，深度最深為 42 km。
- 4) 南台灣地殼構造呈現明顯的山根，但山根並非位於高山的正下方，而是往西偏移 25km，表現出台灣山脈受到板塊碰撞，引起的地殼扭曲。

# A simple crust model



$$X_c = H \cdot 2 \sqrt{\frac{V_0}{V_1^2 - V_0^2}}$$

$$X_d = H \cdot 2 \sqrt{\frac{V_1 + V_0}{V_1 - V_0}}$$

$$V_0 = 6 \text{ km/s} \quad X_c = H \times 2.2$$

$$V_1 = 8 \text{ km/s} \quad X_d = H \times 5.3$$

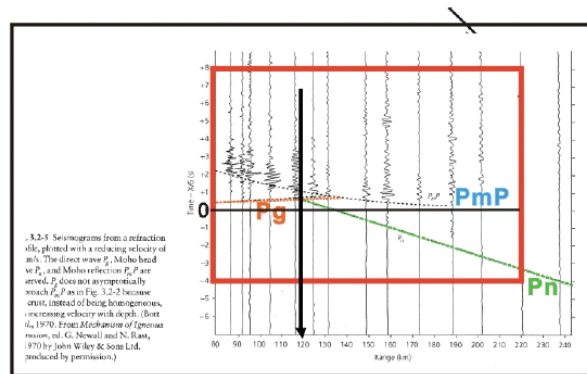
$$\text{critical angle } \theta = 50^\circ$$

$$\sin \theta = 0.75$$

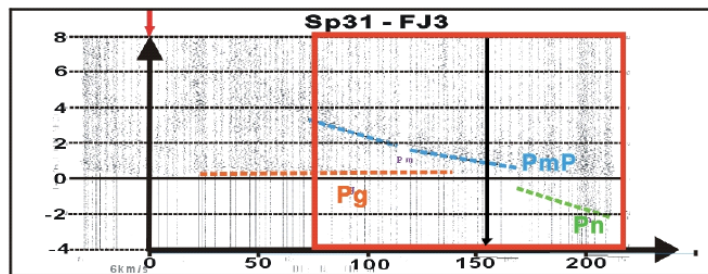
$$\cos \theta = 0.66$$

圖一：簡單的單層地殼模型顯示三種主要的震波走時曲線：直接波 Pg，反射波 PmP，及折射波 Pn。Pn 波行經莫荷面，故最能指示莫荷面的位置，但 Pn 必須在交叉距離（cross-over distance）之後才能成為初達波，而被明確辨認出來。

(a)

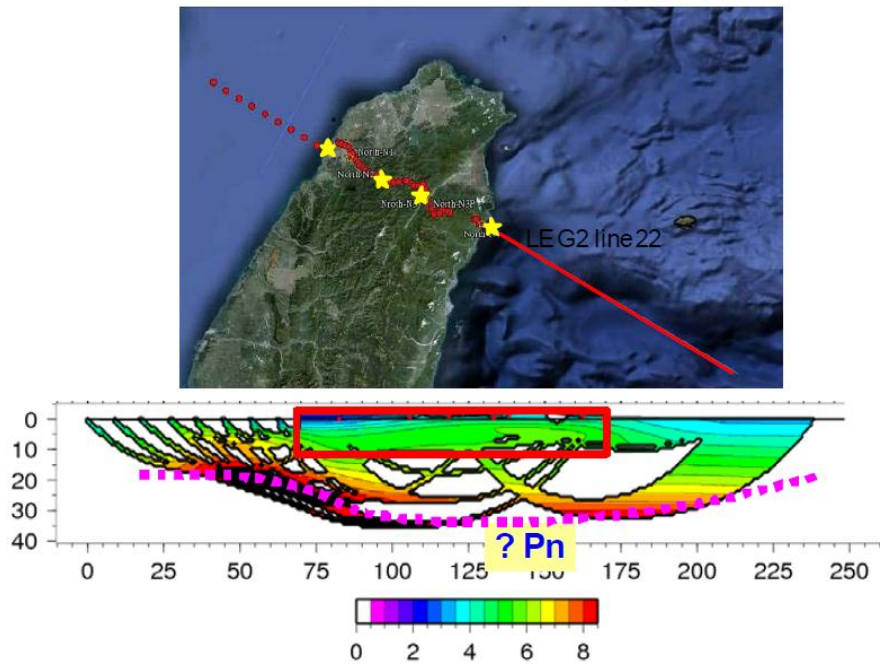


(b)



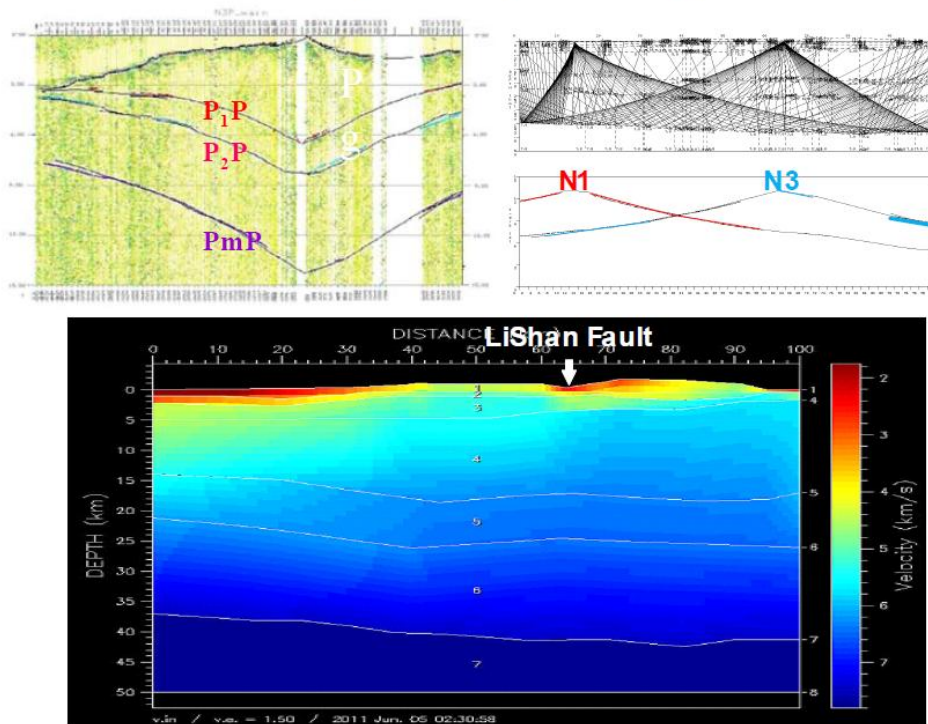
圖二：(a) 在英國執行之廣角反射實驗所獲的震波紀錄，及辨認出的走時曲線，由交叉距離在120公里，可推測英倫半島的莫荷面深度約24公里（120公里 / 5.3）。(b) 在中國福建省所獲的震波紀錄及辨認出的走時曲線，由交叉距離在160公里，可推測其莫荷面深度約30公里。

## First Arrival Time Tomography



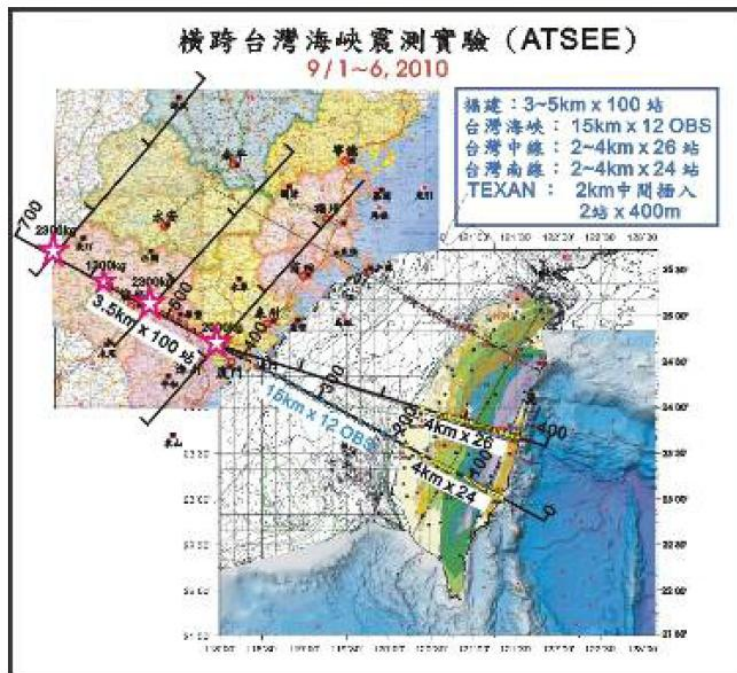
圖三：2008及2009年實施之 TAIGER 實驗之北線，震源包括陸地4個炸點及海上空氣槍，接收器則陸地有地震儀（2km間距）及TEXAN（200m間距），海上布OBS（10km間距）。將所有震波資料，挑出初達波，進行速度構造反演（tomography），所得之構造影像如下圖所示。在淺部10公里解析極佳（紅匡為陸地部分），但深部則波線覆蓋不足，無法解析，但仍可依稀有Pn所呈現的莫荷面。

## Ray Tracing Modeling

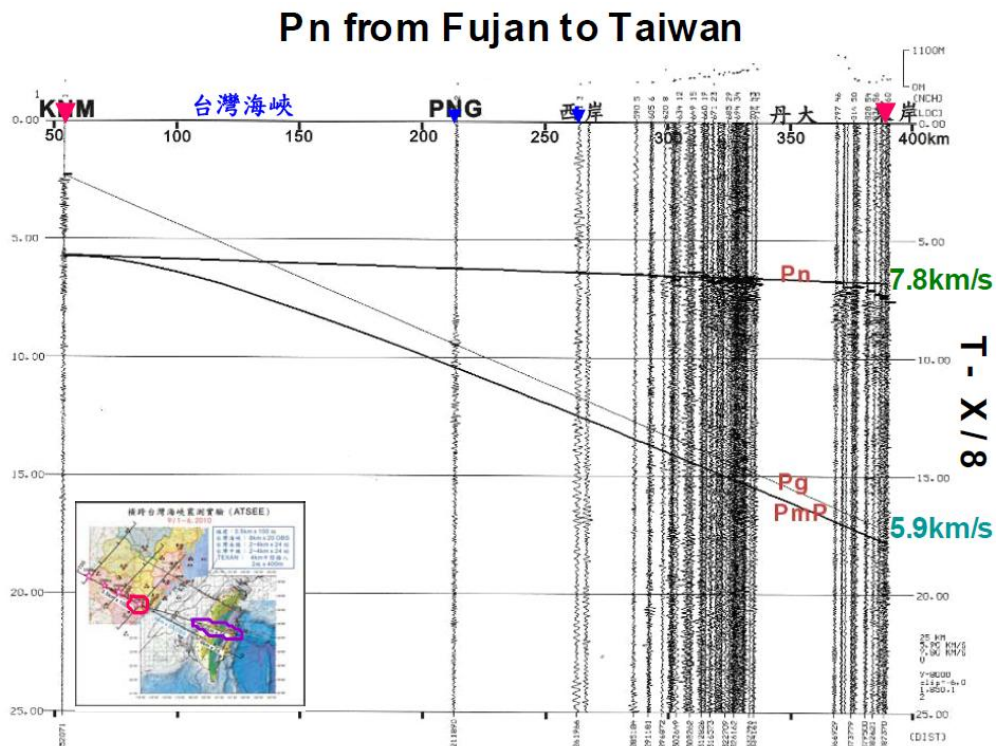


圖四：利用圖三所獲之淺部構造，加上N1及N3炸點所展現的可能反射波（PiP及 PmP）（左上圖），進行波線追跡模擬（右上圖），推測下部地殼構造，並獲得可能的莫荷面位置（下圖）。北台灣莫荷面最深約42公里，但其形貌仍待遠地震源來的Pn信號，才能確定。



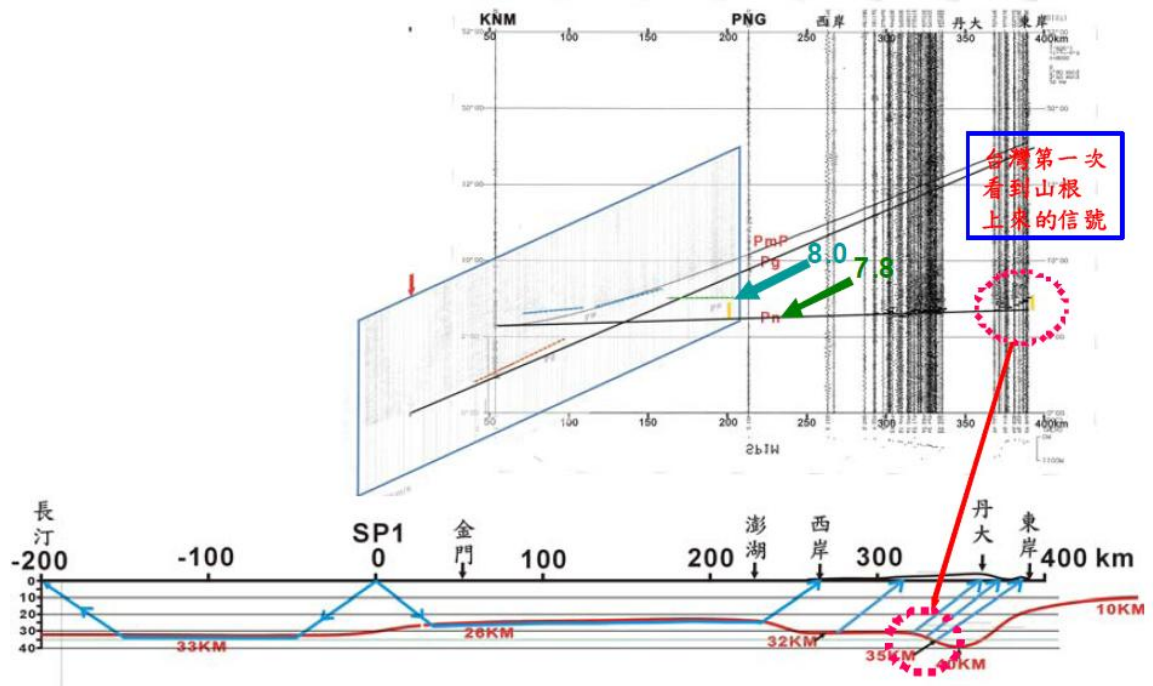


圖五：2010年執行的 ATSEE 計畫，在大陸福建釋放四個炮點（2000~3000公斤），台灣則沿著原 TAIGER 的南線及中線布站，共布出50台地震儀及74台 TEXAN，台灣海峽則布設10台 OBS，因實驗過程中遭遇颱風，遺失7台 OBS，損失慘重。幸好，陸上儀器收到明顯的 Pn 波，堪足稱慰。



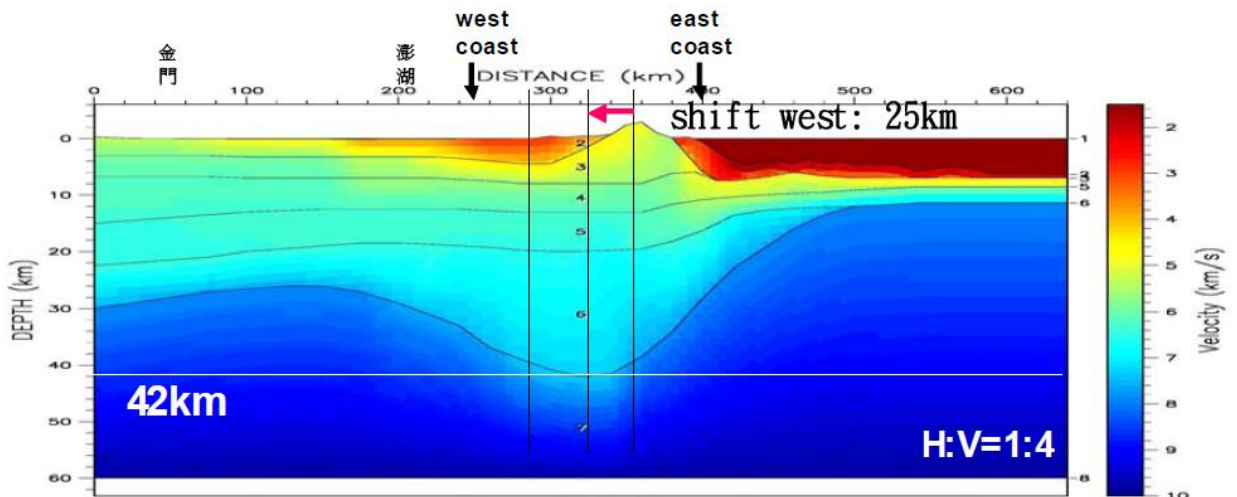
圖六：ATSEE2010所收到的來自大陸福建炮點的震波信號，Pn 波非常明顯，波速7.8 km/sec，是到目前為止，所知道的最確定的莫何面速度。注意在東台灣的測站，Pn 到時延遲，應該是信號行經台灣山根所致。

# Taiwan Mountain Root



圖七：以簡單的單層模型推測福建、台灣海峽、台灣島的地殼構造變化。上圖的走時紀錄圖中，平行四邊形為震源西側的大陸福建的紀錄，但翻轉置於東側，大陸的 Pn 速度是 8.0 km/sec，地殼厚度約 33km。台灣海峽地殼厚度約26km，進到台灣西部平原為32km，但到達山區，則加深到40km。圖六提到的東台灣 Pn 到時延遲，則反映山根多深了3km。

# Southern Taiwan Crust Model



圖八：利用來自大陸福建的 Pn 波作為控制，將 TAIGER 實驗所有資料加入計算，所獲得的南台灣地殼構造。南台灣地殼最深約42km，具有明顯的山根，但山根最深處並不在中央山脈的正下方，而往西偏了25km，反映出台灣造山運動過程中，台灣山根被作用力來自東方的碰撞，山根因而向西偏移。