

# 地球脈動探測解密：從地震學基礎知識、地球內部非均向性結構到互動式震源機制分析

## 臺北市立大學地球環境暨生物資源學系

作者：u11310021 何宣樂

email: u11310021@go.utapei.edu.tw

### ABSTRACT

本研究系統性地彙整現代地震學的核心理論與實際應用，涵蓋三大核心範疇。首先，探討地震學的基礎社會安全應用，深入剖析地震危害 (Hazard) 與風險 (Risk) 之本質差異、地震波能量之幾何與內在衰減機制、土壤液化之動力物理學過程，並對比天然地震與核子試爆在觀測波形上的本質區別。其次，深入地球深部動力學構造，解析震測折射與反射法在莫氏不連續面 (Moho) 及核幔邊界 (CMB) 發現中的關鍵角色，並進一步探討球面慢度守恆下的走時三叉現象、地函低速帶與過渡帶的礦物相變、以及利用 SKS 波探測地函深處的剪力波分離與非均向性特徵。最後，引入一新型態的互動式數位學習科技，展示一基於 Hugging Face Space 虛擬雲端託管的互動式震源機制球 (Beachball) 產生器。此系統容許使用者即時反演斷層走向、傾角及滑移角之三維應力面解，成功建立起理論地震學與直觀教學之間的科技橋樑。

**Key words:** 地震學 (Seismology), 地球內部構造 (Earth's Interior), 非均向性 (Anisotropy), 剪力波分離 (Shear-Wave Splitting), 震源機制球 (Beachball)

## 1 INTRODUCTION

地震學 (Seismology) 作為固體地球物理學的核心分支，不僅是全人類透視地底深處結構的「X 光」，更是維護現代社會安全、評估地質災害與落實工程防災的關鍵科學依據。

傳統地震觀測聚焦於動態震源參數的測定與走時曲線的反演。然而，隨著全球寬頻地震觀測網的演進與高解析度震測探勘技術的突破，現代地震學的研究範疇已跨足至精細的三維地球層析成像、岩石圈應力非均向性動力學、乃至於全面禁止核試驗條約 (CTBT) 下的全球核爆監測。

本報告旨在整合觀測地震學、物理地震學、工程地震學以及現代互動式計算工具，全方位呈現固體地球內部波動傳播的物理本質。文章首先將對社會防災應用中常被混淆的危害與風險概念進行釐清，並從流體力學及固體力學視角分析土壤液化與波動衰減。隨後，我們將深入剖析球狀地球模型的射線理論，詳述科學家如何利用  $P_g$ 、 $P_n$ 、 $PKP$  及  $SKS$  等複雜核心波相，逐步勾勒出核幔邊界、地函相變帶及地心固態內核的物理圖像。最後，我們介紹如何利用當代雲端運算架構，將複雜的斷層走向、傾角與滑移角三維面解，轉化為直觀的互動式震源機制球反演元件。

## 2 THEORY AND FUNDAMENTALS

### 2.1 地震危害度與社會風險之物理架構

在工程地震學與防災決策中，必須嚴格區分地震危害 (Seismic Hazard) 與地震風險 (Seismic Risk)。地震危害是指自然現象本身所帶來的潛在物理威脅，如特定重現期下地表的最大加速度 (PGA)、斷層錯動量或次生海嘯。危害屬於地質界客觀存在的能量釋放，人類無法消除。

相對地，地震風險是指人類社會在該危害下可能遭受的生命財產損失。其數學物理架構可由下式表達：

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Exposure} \times \text{Vulnerability} \quad (1)$$

其中  $\text{Exposure}$  為人口與基礎建設的暴露度， $\text{Vulnerability}$  為結構物的脆弱度。透過加強結構物耐震剛性或減少人口暴露，人類能顯著降低地震風險。

## 2 學號：u11310021

### 2.2 地震波能量之衰減機制

當波動在真實地球介質中傳播時，其振幅與能量會隨著傳播距離的增加而逐漸衰減。振幅隨距離的波動方程式模型可描述為：

$$A(r) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \cdot e^{-\alpha r} \quad (2)$$

此處的衰減包含兩個本質截然不同的物理過程：

(i) **幾何擴散 (Geometrical Spreading)**：波動自點震源向外以球面波前輻射，總能量因分配至不斷增大的球面面積（正比於  $r^2$ ）而稀釋，導致其波幅與傳播距離  $r$  成反比減少。這是能量衰減的主導因素。

(ii) **內在衰減 (Intrinsic Attenuation) 與散射**：地球介質為非完美彈性體，當波動通過時，岩石晶界間的摩擦與流體剪切會將部分機械能轉化為熱能消散，即非彈性效應 (Anelasticity)。此外，地層中的微小不均勻體會引起散射。在數學上由指數衰減項  $e^{-\alpha r}$  調變， $\alpha$  為衰減係數。

### 2.3 建築物共振與土壤液化理論

結構物具有其固有的自然結構週期 (Natural Period)，通常樓層越高，其自然週期越長。當地震波的主導頻率與建築物自然週期重疊時，將觸發強烈的共振效應 (Resonance)，造成劇烈損毀。堅硬地盤傾向放大高頻（短週期）地震波，使低矮建物受損；而軟弱地盤（如台北盆地沉積層）則顯著放大低頻（長週期）地震波，對高樓大廈造成致命威脅。

在飽和砂土地層中，強烈地震引起的快速反覆剪切作用會引發土壤液化 (Soil Liquefaction)。其物理歷程為：

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

當強震使鬆散砂土顆粒傾向密實，孔隙地下水來不及排出，導致孔隙水壓  $u$  瞬間劇增。當  $u$  增加至等於總應力  $\sigma$  時，有效應力  $\sigma'$  降至零。砂土顆粒完全被水頂開，地層瞬間喪失抗剪強度並呈現液態流體行為，導致噴砂、地基不均勻沉降與建物傾斜。

## 3 EARTH'S DEEP STRUCTURES AND PHASE TRANSITIONS

### 3.1 莫氏面與核幔邊界之震測發現

1909 年，莫霍洛維奇 (Mohorovičić) 分析觀測紀錄時發現，在近距離測站直達波 (Pg, 約 6.0 km/s) 最先抵達，而在遠距離測站則由沿地函頂部滑行折射的 Pn 波 (約 8.0 km/s) 率先到達。這證實了地殼與地函間存在一波速躍升的物理界面，即莫氏不連續面 (Moho)。

1914 年，古登堡 (Gutenberg) 觀測到在距震央  $103^\circ$  至  $143^\circ$  的範圍內，直達 P 波訊號完全消失，形成了顯著的「P 波陰影區」。此現象源於地震波深入地下遇到液態外核時，其波速自地函底部的 13.7 km/s 驟降至外核頂部的 8.0 km/s，從而發生強烈的向心地心折射，證實了核幔邊界 (CMB) 的存在。

### 3.2 球狀地球射線參數與三叉現象

在完美的球對稱地球模型中，考慮到半徑變化與地球曲率，依據斯涅爾定律 (Snell's Law)，任一特定地震射線在傳播路徑上的水平慢度，即射線參數 (Ray Parameter,  $p$ )，皆滿足守恆常數：

$$p = \frac{r \sin i}{v} = \text{Constant} \quad (4)$$

當地震射線穿過地函內部 410 公里與 660 公里的礦物相變帶時 (例如橄欖石相變為瓦茲利石與林伍德石)，地下波速隨深度急遽遞增。這種高速度梯度帶會引發射線的強烈向上彎曲，使得不同出射角的射線在地表同一距離區間內發生軌跡交疊，在走時曲線上呈現「三叉現象」(TriPLICATION)，即單一測站會觀測到同一個波相在不同時間多次抵達。

### 3.3 地函非均向性與 SKS 剪力波分離

當剪力波 (S 波) 通過具有晶格應力規律排列 (LPO) 的非均向性介質時，波動會分裂為兩束偏振方向互相垂直、且傳播速度不同的快剪力波 ( $S_1$ ) 與慢剪力波 ( $S_2$ )，此現象稱為剪力波分離 (Shear-Wave Splitting)，如同光學中的雙折射現象。

在全球地震學研究中，通常指定使用 SKS 波相來反演測站下方的地函非均向性。這是因為 SKS 波在穿透液態外核

時，因液態不抗剪而強制轉化為純 P 波，從而完全消除了震源端所產生的任何複雜剪力波殘留。當它穿出外核重新轉化為 S 波並進入接收端地函時，其初始偏振方向被嚴格限制在徑向平面內。因此，觀測到的快慢波到時差與極化方位角，能精確且乾淨地反映測站下方上部地函的局部應力場與慢流動力學特徵。

#### 4 INTERACTIVE BEACHBALL EXPERIMENT AND IMPLEMENTATION

本研究的一大科技突破在於開發了一套數位互動式震源機制球 (Beachball) 產生器。震源機制解通常由三個核心幾何角度所定義：走向 (Strike,  $\phi$ )、傾角 (Dip,  $\delta$ ) 以及滑移角 (Rake,  $\lambda$ )。這三個角度決定了斷層破裂面在三維空間中的位態，並控制了初動 P 波在震源球上的壓縮 (Compression, 通常填色) 與膨脹 (Extension, 通常留白) 象限分布。

為了提供地球科學教育者與研究人員一個直觀的反演環境，我們利用 Python 的 'ObsPy' 地震學套件與 'Gradio' 前端架構，建構了互動式網頁 App，並將其託管於 Hugging Face Space 雲端平台上 (專案名稱: 'u11310021/HW9')。

使用者可透過滑桿即時調變角度參數。系統在後台即時求解斷層面幾何方程式，並更新震源球。目前，主網頁 ('index.html') 的內嵌架構已完成最佳化配置：

Embed Source = <https://u11310021-hw9.hf.space> (5)

透過將 'index.html' 第 51 行的 '<iframe>' 的 'src' 屬性由預設空白導向此特定網址，成功實現了跨平台、零延遲的網頁互動式地震學學習環境。

#### 5 DISCUSSION

從地震學觀測資料的整體分析來看，地球內部的物理特性存在強烈的區域不均勻性。以品質因子 ( $Q$  值，與衰減成反比) 為例，美國西部因處於活躍板塊邊界、地熱梯度高，介質呈現高衰減與低  $Q$  值特徵，觀測波形中的高頻訊號極易散失；反觀古老穩定的美國中東部地塊，則呈現低衰減與高  $Q$  值，波形尖銳且高頻成分豐富。

這種星體介質的本質差異在地球與月球的對比中更為極端。地球因內部含有豐富流體且構造連續，地震尾波衰減迅速；然而月球表面極度乾燥且岩石因長時間隕石撞擊而極度破碎，缺乏流體吸收機械能。這導致月震波動在破碎裂隙間發生極其強烈且不失真之多次幾何散射，使得規模微小的月震尾波得以在月球內部持續震盪長達 60 分鐘以上，呈現獨特的紡錘狀波形特徵。

此外，本研究建立的地震學分析方法亦可直接應用於全面禁止核試驗的國防監測。核子試爆作為單一球體膨脹源，其激發的 P 波初動在全球地震儀上皆呈現向上的「純壓縮波」，且因瞬間引爆，其體波規模  $m_b$  遠大於表面波規模  $M_s$ ，並嚴重缺乏餘震系列。這與天然斷層剪切錯動所產生的四象限推拉交替初動、發達的表面波與豐富的餘震序列有著非對稱的物理特徵，為全球和平監測提供了堅實的科學盾牌。

#### 6 CONCLUSIONS

本研究成功將地震學的核心理論、觀測物理與當代前端雲端互動技術進行跨領域整合。我們不僅從理論層面詳述了波動隨幾何擴散與物質非彈性衰減的衰減方程式，亦全面釐清了危害度與社會風險的耦合關係。在地球內部構造反演方面，詳盡論證了慢度守恆射線參數、相變帶三叉現象、以及利用外核 P 波轉換之 SKS 波進行地函非均向性雙折射觀測的科學優勢。最後，透過將 Hugging Face Space 的 Gradio 計算元件成功內嵌至 GitHub Pages 網頁，實踐了走向、傾角與滑移角的三維幾何可視化。這項成果不僅提升了地震學在基礎科學教育中的直觀性，更為未來高階地學資料的即時雲端反演與視覺化奠定了可行的工程架構基礎。

#### 7 ACKNOWLEDGEMENTS

感謝國立臺灣大學地震學課程教學團隊所提供的指導與講義資源，同時感謝 GitHub Pages 及 Hugging Face 平台提供開放原始碼的託管與雲端運算環境，使得本互動式地震學成果報告得以順利部署與呈現。

#### REFERENCES