姓名：洪淑蕙

學歷：

Ph.D., Brown University (1998)

現職及經歷：

台大地質科學系副教授(2005/8-)

台大地質科學系助理教授(2001/2-2005/7)

Princeton University 博士後研究(1998/8-2001/1)

著作名稱：

1. Hung, S.-H., Y. Shen, L.-Y. Chiao (2004), Imaging seismic velocity structure beneath the Iceland hot spot: a finite frequency approach, J. Geophys. Res., 109, B08305, doi:10.1029/2003JB002889.
2. Hung, S.-H., E.J. Garnero, L.-Y. Chiao, B.-Y. Kuo, and T. Lay (2005), Finite-frequency tomography of D'' shear velocity heterogeneity beneath the Caribbean, J. Geophys. Res., 110, B07305, doi:10.1029/2004JB003373.

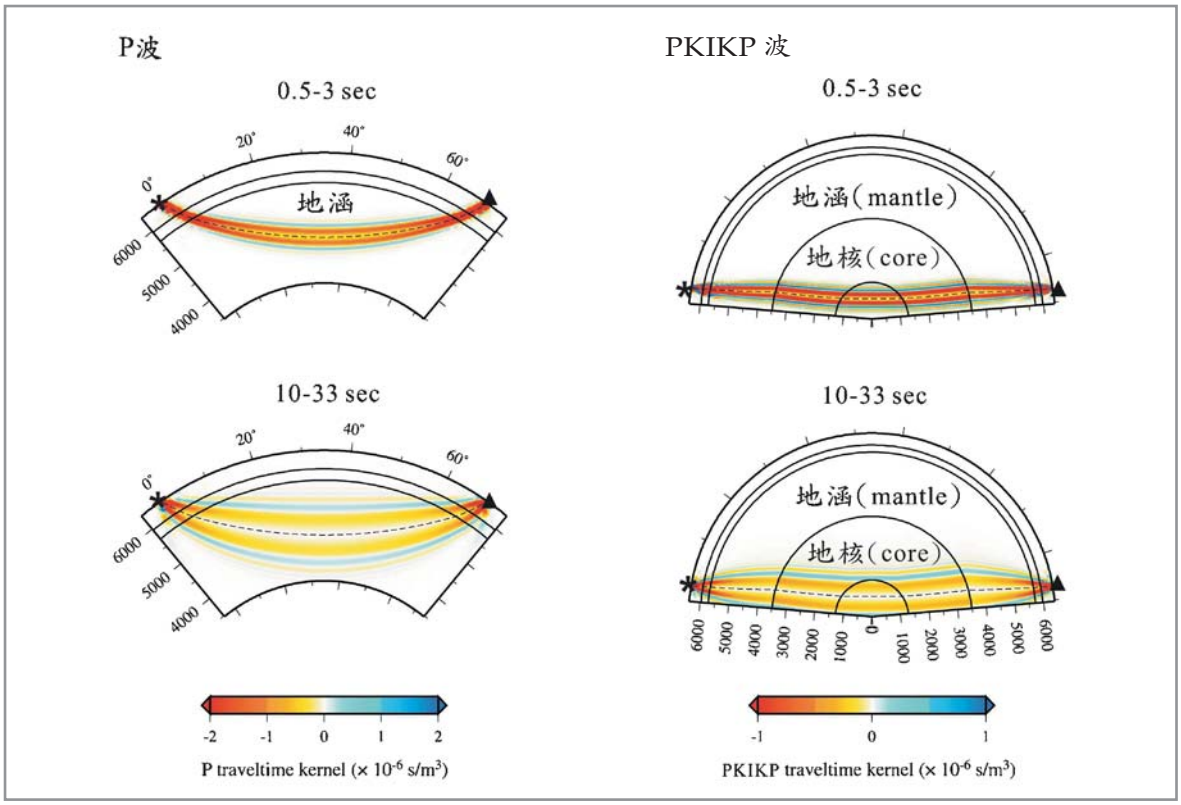
中文簡介：

由於地球內部的組成結構和動力系統與地表的地貌起伏、地層變動、火山地震等自然現象的成因息息相關，探索地球內部一直是了解活躍的地質作用以及地球演化歷史的重要指標。受限於地球內部的高溫高壓，地震波是目前唯一能直接完整地透視地球內部物理結構、性質和狀態的工具。地震發生時釋放的部分能量以波的形式在地球內部傳遞，如同水波和光波一樣，當傳波介質的組成、結構或性質改變時會產生反射、折射、繞射波等現象。地震學家藉由地震儀記錄這些地震波傳回地表時的振動位移，透過類似醫學上的人體電腦斷層掃瞄技術，將地表不同位置測站所觀察的震波走時變化進行交叉比對，回推地球內部震波速度結構的方法，稱之為震波走時層析成像(seismic traveltime tomography)。

震波走時層析成像自 70 年代開始發展

以來，主要是根據波線理論(ray theory)，將地震波視同無限高頻的光波，以沿著費時最短的波線路徑在地球內部傳遞，震波到時在不同測站的差異完全取決於所行經波線路徑的震波速度結構。然而該理論只適用於假設地球內部的速度變化平緩，且快慢速度變化的尺度必須遠大於震波本身的波長，因此限制了波線理論用於解析細微速度構造的能力。

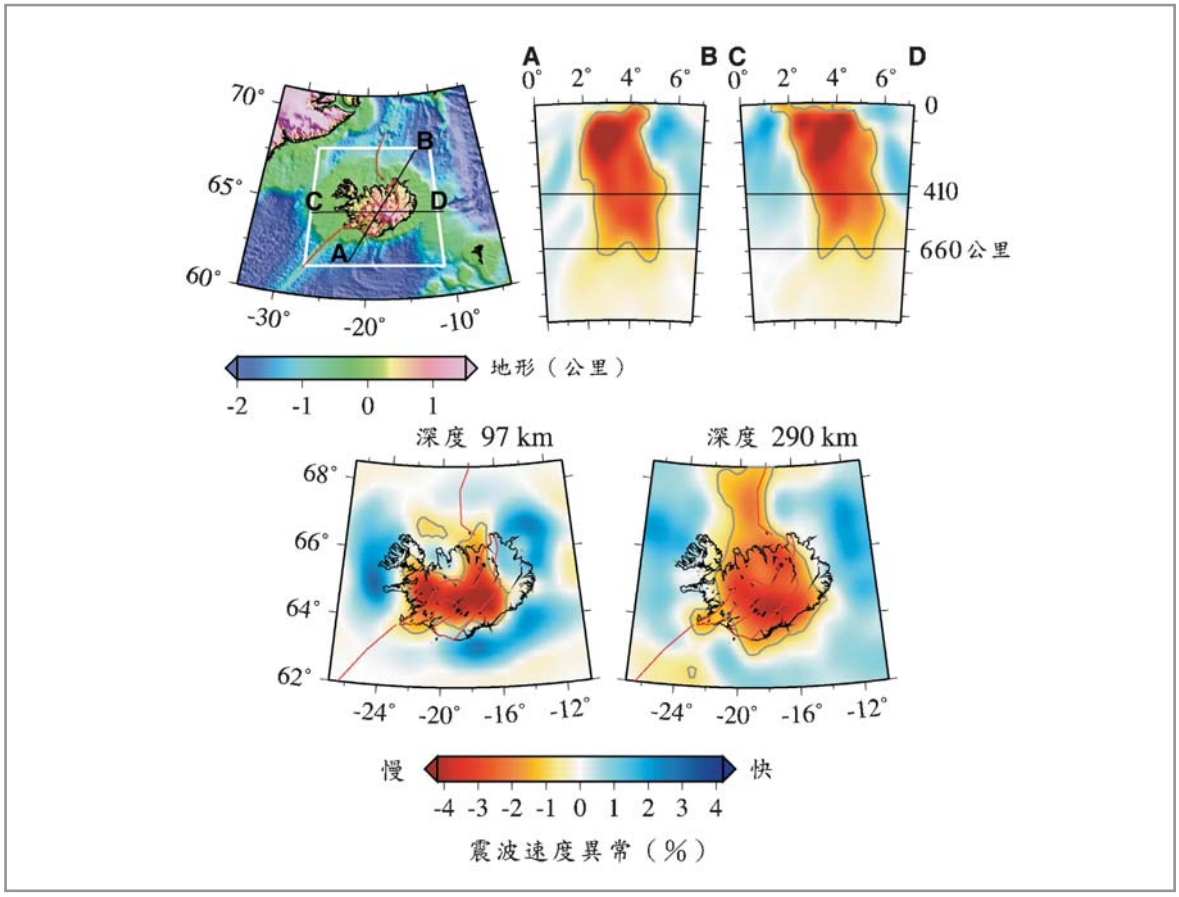
由於震波訊號一般能觀測的頻寬介於數秒到數百秒之間，其所對應的波長為數十到數千公里，為了提高震波速度影像的解析度與準確性，發展符合震波波動性質的層析成像理論，個人與普林斯頓大學研究團隊合作發展出可有效應用於層析成像研究的有限頻寬理論(finite-frequency theory)。此理論針對地震波天生具備的有限頻寬特性，考慮地震波在非均質介質的繞射(diffraction)作用所產生的波前復原(wavefront healing)效應，以及不同頻率散射波經相互干射對有限頻寬走時的影響。理論計算結果指出由震波波形所決定的有限頻寬走時完全不受波線上的速度構造影響，實際上反而是對環繞在波線周圍區域的速度構造最為敏感。由於震波走時所感應的地球三維速度構造分布呈現如香蕉-甜甜圈的幾何形狀，如圖一所示，因此有限



圖一：根據香蕉-甜甜圈理論計算不同週期的震波走時對地球內部速度構造的敏感程度。P和PKIKP波分別是在離震源（如*所示）約70和160度距離的測站（如▲所示）所接收到最早抵達的壓縮波訊號。虛線代表這些波在地涵和地核傳遞的波線路徑，波線理論不考慮有限頻寬效應，僅波線路徑上的速度結構影響震波走到時；反之，有限頻寬理論認為真正影響震波走時的速度構造是落在波線以外的紅藍色區域，且紙波傳遞距離愈遠、波長愈長所影響的範圍愈寬。

頻寬理論又被稱之為香蕉－甜甜圈理論(banana-doughnut theory)。

地球表面主要由大小不同形狀的板塊所拼湊而成，地球內部物質受熱產生類似煮水沸騰的對流現象，並驅動板塊緩慢移動。大多數的地體構造和地質作用，如海床擴張、造山、地震、火山熔岩噴發都與板塊的分裂、隱沒、聚合和碰撞運動有關。但在一些長期活躍的火山活動地區，除顯示異常的地熱跡象，地殼增厚和地形隆起之外，通常在沿板塊運動的方向會出現鏈狀分布的火山序列，且年齡隨離火山噴發點距離增加而逐漸變老，如太平洋的夏威夷群島、大西洋的冰島和北美大陸黃石公園等處。Wilson在1963提出固定熱點(hotspot)的假說，認為火山鏈是板塊移動時經過地底下一個固定的熱點所遺留下來的軌跡。1971年Morgan更進一步闡釋熱點的源頭可能來自近三千公里深的地核(core)- 地涵(mantle)邊界，地涵底部的岩石受高溫加熱變輕形成向上湧升的地涵柱(mantle plume)。由於震波在經過高溫熱流區時速度會減慢，透過震波速度的層析影像



圖二：利用有限頻寬震波走時層析成像方法探測冰島熱點底下的震波速度變化。左上圖描繪冰島地區附近的地形變化。右上方兩圖則代表不同方向深度切面（如左圖AB，CD線所示）的震波速度影像。從圖中可看出冰島底下存在垂直柱狀的低速構造（如紅色區域所示），由淺部延伸至650公里深左右。另外從100和300公里等深度的平面圖可看出低速帶在100公里以下大致呈圓柱形，但在接近地表淺部時則集中在中洋脊張裂的地區（如紅線所示）。

可用來追蹤地涵柱的結構和分布情形。而有限頻寬層析成像具備解析小尺度構造的優勢，因此成為透視狹窄的地涵柱的重要工具。

Hung *et al*. (2004)的研究工作就是利用有限頻寬層析成像的方法重建冰島底下高解析度的震波速度影像。冰島座落在熱點與大西洋海洋板塊張裂的中洋脊交會處，層析成像結果顯示冰島底下存在一直徑約 300 公里垂直柱狀的低速帶，從上部地涵底部 650 公里深度附近向上沿伸至淺部地涵（見圖二），此低速區印證冰島底下確實存在高溫、部分熔融的地涵柱，為岩漿向上湧升至地表的通道，並造成冰島附近台地地形的隆起，以及較一般正常海洋地殼厚約五倍的地殼。另一相關的研究 (Hung *et al*., 2005) 則是透過震波速度層析影像來了解中美洲加勒比海底下地核-地涵邊界層(core-mantle boundary)的複雜結構和動力型態。由於該處可能是古老的太平洋板塊隱沒下沉最終的棲息地以及附近熱點地涵柱的起源地，同時橫跨核涵邊界地帶也是地球內部化學組成、溫度、密度和震波速度變化最劇的地區，在行星演化過程中扮演著關鍵性的角色。目前，地震學家已體認到有限頻寬效應對震波速度構造層析成像的重要性，愈來愈多的研究開始以香蕉-甜甜圈理論取代狹義的波線理論，重新檢視地球內部三維的速度結構，以期更能深入了解地球動力演化的內涵。

評審簡評：

探索地球內部結構，唯有透過地震波從震源到達地表測站的走時，以回推傳波路徑所經過的地球內部速度構造，即震波走時層析成像(seismic travel time tomography)。自70年代以來，大多數的震波層析成像研究採用波線理論(ray theory)。洪淑蕙助理教授在2004年發表有限頻寬震波走時層析成像理論(finite-frequency theory for travel time tomography ，該理論亦稱為 banana-doughnut theory，即香蕉-甜甜圈理論），改善古典波線理論的缺陷。

該理論針對地震波所具有的有限頻寬特性，考慮地震波經過非均質速度構造時產生的散射現象，瞭解震波走時實際上是受到波線周圍的三維速度構造影響，而非如波線理論所描述僅由波線上的速度決定震波走時;另外，有限頻寬效應使得震波之前受到速度異常擾動的波前在長距離的傳遞過程中逐漸復原，此波前復原(wavefront healing)效應對小尺度的構造特別明顯，但被高頻近似的波線理論所忽略，因此過去依據波線理論所逆推的層析成像速度模型可能低估了地球內部非均質性(heterogeneity)的程度。

新發展的有限頻寬震波走時層析成像理論（或香蕉-甜甜圈理論）提高了瞭解地球內部更細微構造的解析度，並已成功應用於冰島熱點(Iceland hotspot)底下地幔(Hung *et al*., 2004)和中美洲加勒比海(the Caribbean; Huang *et al*., 2005)附近底下離地表近 3000 公里深的地幔 - 地核邊界層(core-mantle boundary)。高解析度的震波影像有助於了解地表火山岩漿活動成因、動力來源以及可能為隱沒海洋板塊的終極地和地幔熱柱的起源區域。

以上研究成果均發表在地球科學頂尖學術期刊 Journal Geophysical Research ，表現優異，值得鼓勵並加以肯定。