聆聽火星內部的迴響

文／吳育雅

正當全球耐著性子對抗嚴峻的疫情時，今年初在火星登場的人類圓夢熱潮稍微平緩了我們的嘆息聲浪。首先是 2 月 9 日阿聯酋的希望號(Hope)抵達，隔日中國的「天問一號」也到了火星旁打轉，準備等五月下旬放下登陸車，之後是美國航太總署(NASA) 2 月 18 日順利著陸的毅力號捷報。不僅如此，令人興奮的其他消息之一，是人類火星探測五十年來，首次得知火星內部分層的訊息，靠的是『洞察號」從 2018 年底以來努力的聆聽與調查，終於獲得可靠的資料推算出火星表面之下的「火」殼、「火」函和「火」核的大小。火星因而成為地球和月球之外，第三個人類根據實際數據調查出內部分層的星球。

如何「窺看」星球的內部？火星現在還有火星震嗎？探測火星內部有多難？洞察號的任務設計如何進行？或許你更好奇，只有洞察號一個地震站，怎麼定出震央震源的？本文將逐一說明這些方法，並討論火星內部調查目前得到的結論。

探測行星內部的物理方法

大家都知道地球內部可分成地殼、地函（幔[*1]）與地核，就如同雞蛋有蛋殼、蛋白與蛋黃一樣。即使地球沒有辦法像雞蛋那樣敲開來，我們不可能親眼看見地下分層，為何對這樣的結論卻顯少懷疑呢？

教科書上的說明指出探測地球內部的方法和醫生聽診的原理類似，醫生可以學習「理論」，再透過聽診器依據「經驗」分辨病患心臟有什麼問題？胸腔裡的肺部有沒有積水？氣管裡有沒有阻塞？聽診的類比是將地震波（從地球內部傳出來的）視為脈動，地震儀就如耳朵通過聽診器取得內部傳遞情形的訊息。當中最重要的判準就是震波速率，地球物理學研究不同的岩石、實驗金屬材料和溫度壓力的改變怎麼影響波速，建立各種不同內部構造模式的假設，再分析地震站所接收到的地震圖譜(seismograph)，決定地震波來源（震源位置），計算震波走了多遠的距離，和理論的預期相比較，進一步推敲經過什麼性質的材料，來參透地下不同深度的震波速率。

那麼，透過地震儀接收地震波，是如何解鎖地球內部的震波速率變化呢？

首先，我們可以提出一個最最簡單的模型假設：「如果地表到地心的物質完全相同都沒有變化，震波在地球內部傳播速率就不會改變」。以這個模型為前提，任一地震發

[1] 地函(mantle) 也稱為地幔

生之後，只要知道震源位置，即可由距離算出震波傳遞到地震站所需要的時間。現在若有三個地震站，相對位置和震源的距離是 1:2:3（圖一(a)），設震波等速傳遞，則三個站接收地震波的時間會出現$(T_1-T_0) : (T_2-T_0) : (T_3-T_0)= 1:2 :3$ 的關係（圖一(b)）。

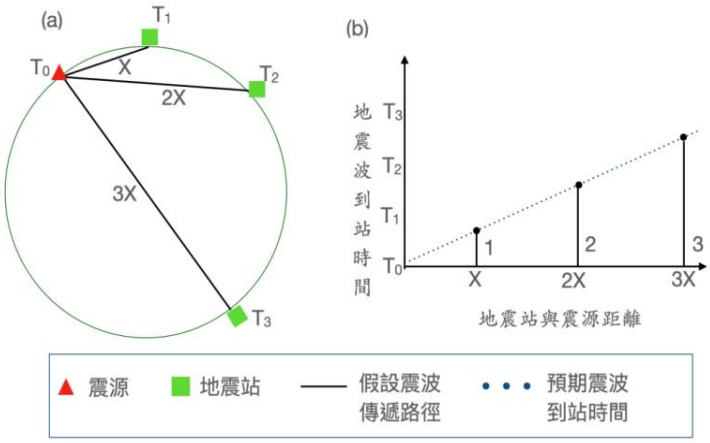

圖 1. 假設內部物質完全相同，震波維持不變的模型(a)與地表接收地震波抵達預期時間(b)

一旦有地震發生，即可收集全球地震站（圖二 a）所接收的震波圖譜（圖二 b）查看以上假設是否屬實？目前全球的地震觀測站超過二萬個，地震發生後，從地震站與震源的相關位置去查照地震波傳播時間，就會發現地球內部並非那麼單純，在圖二（c）橢圓虛線框的範圍震波比理論的時間還要久，可見走到這裡的震波速率是比預期慢的，因此必須由實際觀測去修正理論模式（圖二 d）。

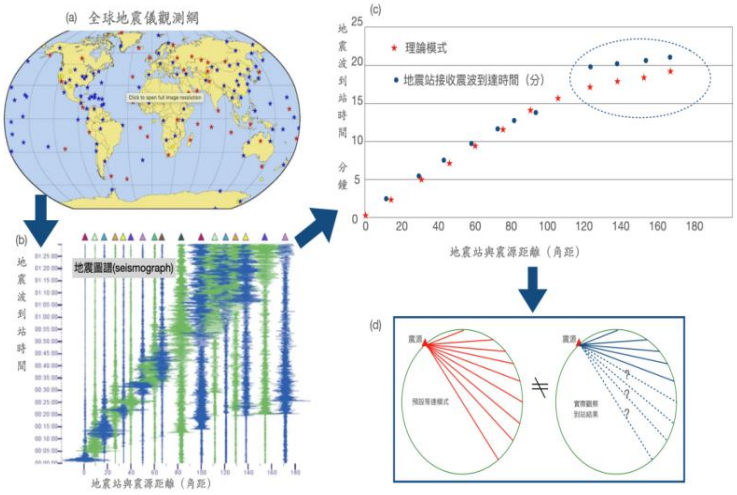

圖 2. 根據全球地震站觀測網(a)不同地點所接收的地震圖譜(b)，繪製震波到站時間與震源距離關係(c)和理論模式對照，以檢驗理論假設的虛實(d)。

b 圖取自 IRIS 網站教育推廣資料，c、d 作者自繪

地表岩石比重大約是 3，但是從地球的質量和體積得出平均比重為 5.5，可合理推論地球內部肯定是比較緻密的物質。因此我們可分別假設「地球內部材料是逐漸變為越來越緻密」、或「地球內部有明顯不同的分層」，去建立不同的構造模型，再比較震波紀錄以驗證哪一個與實際觀測結果比較接近。若是由不同材料的分層構成，根據波動的性質，震波傳遞遇到不同的材料應會折射與反射（圖三）。地球上地震很頻繁，光是芮氏規模為 4 的地震每年即成千上萬筆，可以提供豐富的震波數據，從各樣的模型假設與真實觀測資料來解鎖地球內部構造，地球物理學家得以一再檢驗與修正各種理論模式。

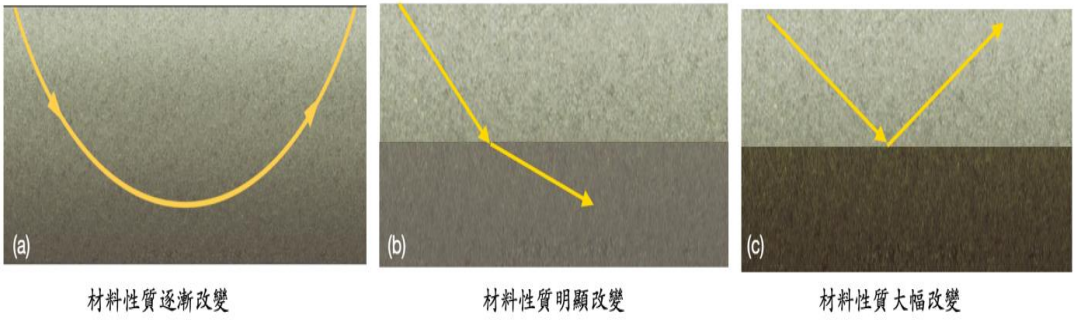

圖 3. 震波傳播在不同的介質中改變傳遞方向，逐漸緻密的物質會使波緩緩折射(a)明顯變化的介面則會折射(b)甚至完全反射(c)。

另一個要了解的問題是在多深的位置出現改變？地核的大小是如何靠震波分析出來呢？地震波不只一種，例如每逢地震發生，少數靈敏的人會注意先有一個微小的震動，這個經過地下物體震動最快到地表的是 P 波（壓縮波，P 代表 Primary，因為是第一個到地表的波動）因為震動幅度比較不明顯，平常大家並不一定會察覺。之後另一個 S 波（剪力波，S 代表 Shear，或是 Secondary）到達時震幅比 P 波來得大，甚至引起大家高喊「地震、地震喔」的騷動。這兩種波還有一個性質很不同，P 波像聲波可以在空氣（氣態）、在水裡（液態）傳播，但是 S 波只能藉由固體才能傳遞下去。根據觀測在地震發生之後，和震源的地心夾角大於103度的地震觀測紀錄中，S波沒有出現（圖四(a)），這個現象是全球性的，都是在角度相距 103 度之後，S 波就不見了（圖四(b)），圖四(b)灰色區域的地表代表收不到 S 波的區域，稱為 S 波陰影區。

為何 S 波消失了呢？合理的推測是在某個深度之下，不再是固態的物質，是 S 波無法傳播的介質。這個非固態介質在多深的地方呢？其實你可以自己試著去估計，方法如下：畫一個圓代表地球，在地表任一點作為震源，依據和震源的地心夾角，找出左右相距 103 度的地表位置，以震源為中心畫出兩線條（圖四(c)），這線條用來區別可接收到 S 波的區域和收不到紀錄的 S 波陰影區。因為全球各地都有相似的現象，在你繪的地球圓形上多找幾個不同點作為震源，重複一樣的過程，當你畫出越來越多的線條之後，很快便會看出交會出一個中央沒有線條通過的核心（圖四(d)），根據你所繪出的圓形半徑和地球半徑相比，你就能估算出地核位在地下多深的地方了！

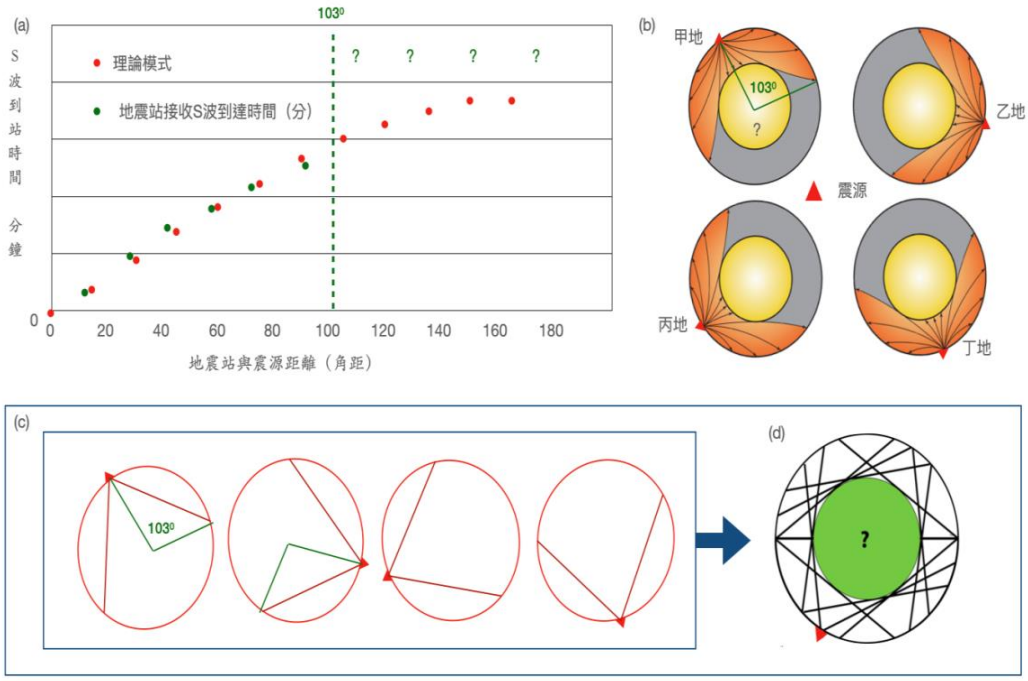

圖 4. 繪製跨越全球的地震站所接收的 S 波到站時間與震源距離關係(a)

灰色區域的地面代表收不到 S 波的區域，這個區域的地震站與震源的地心夾角都大於 103 度(b)。以震源為中心，找出左右相距 103 度的地表位置，畫出兩條線(c)。重複(c)的方式畫出更多線之後，沒有線條通過的代表非固態核心(d)。

地球內部分層不僅有非固態的核心，1939 年雷嫚(Inge Lehmann)發表地球核心內部是固態的，因此地核區分成液態的外核與更深處固態的內核，今年初澳大利亞大學 Stephenson 領導的團隊發現震波速率與地球自轉軸不同夾角的方向有差異，建議地球內部最深處可能還有一層半徑 650 公里的最內核存在。

火星也有不同分層嗎？

沒有地震波紀錄之前，我們只能透過火星體積與公轉推敲火星平均比重是 3.96，比地球的 5.5 略小，因而猜測若不是火星的核比較小，就是組成的材料要比地核的物質輕。

在火星軌道太空船成功繞轉之後，能夠進一步根據火星表面的地形起伏以及自轉的轉動慣性去估計它的重力場。以火星的地形來說，它有一個高達 27 公里的奧林帕斯火山，及附近方圓達 4000 公里的塔西斯高地(Tharsis Bulge) 。北半球地勢深陷但地形較平坦，南半球則是多坑洞的高地，暗示著組成火星殼的組成物質或是火殼厚度在南北半球有別。

然而沒有確實的詳細數據，科學家僅能在不同條件下，推測火殼厚度的可能範圍，

2020 年一群以 Wieczorek 為首的研究者共同發表，他們鎖定一地點的地殼厚度，推估南北半球的火殼密度與火殼厚薄的關係，當組成密度一致時，北半球和南半球的厚度差異可能達 90 公里（圖五）。如果能進一步得出南北半球火殼物質的密度，就可以更細緻去分析各地的火殼厚度。目前像這樣的研究都有非常多項假設，火殼厚度和火殼密度是互相依賴的關係，獲得其中一項數據，才能推算另一項性質。若是想要得知更深層的火幔(mantle)有沒有分層，只能建立更多項的假設和推測。

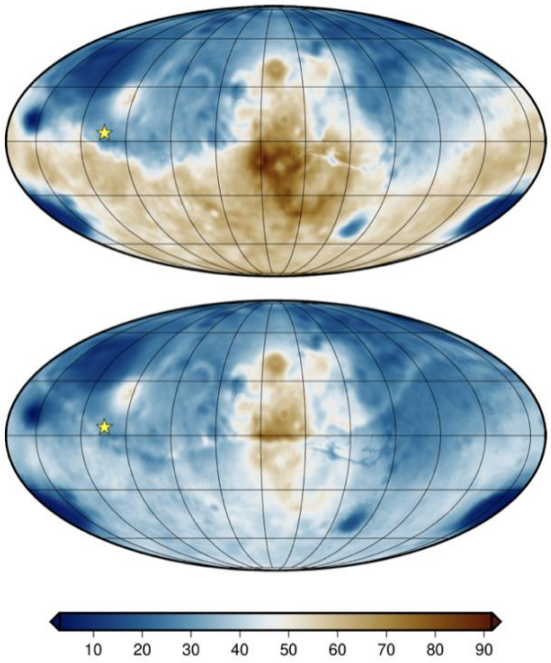

圖 5. 鎖定洞察號登陸位置的火殼厚度，能推估地殼密度與厚度的關係。

若地殼組成密度一致，北半球和南半球的厚度差距可能達 90 公里（上），如果北半球低地為較重的物質、南半球高地地殼材料較輕，則厚度變化較小（下）(Wieczorek et.al., 2020)

最好的線索就是火星的震波資料，因為我們已經有豐富的地球內部震波探測知識，有能力將地球震波的原理應用在其他星球上！人類並非不曾想過調查火星構造，1976 年的維京號太空船就嘗試傾聽火星震，裝備的火震儀認真監聽了 19 個月，當時任務科學家們也認認真真整理了至少 640 小時的紀錄，但絕大多數紀錄的是風聲和氣溫變化造成的噪音，僅僅有一個可以被確認是火星內部產生的「火星震」，相較在地球上每年芮氏規模 4 的地震可以有數萬筆，這項結果足足讓人心涼了大半！

過了二十年後，巴黎地球物理研究所主導推動火星內部調查，他們設計的寬頻帶地

震儀(broad band seismometer)搭載在 1996 年由俄羅斯發射的 Mars96 計畫升空 ，非常不幸的是 Mars96 發射時，火箭點火發生問題，最後整個炸成碎片散落。

第三度嘗試火星內部研究是「Netlander」計劃，預訂設四個地震站連成網路，這項計畫因為花費太昂貴而被中止。第四度是參與 ExoMars 的「洪堡酬載」(Humboldt payload)，又因經費過於龐大被取消。可以想見，探測車多次順利上了火星，卻不得一窺內堂奧秘，欲知火星內部的好奇心，已度過漫長的四十年煎熬等待，對於設計火震儀設備的科學家，四十年相當於一輩子的職涯歲月啊！2018 年的洞察號計畫，由兩百位科學家與超過一千位工程師參與，想要獲得火星內部震動消息，只好在經費限制下妥協，先送上一個火星儀，多站連網以後再說吧！

洞察號上的「火震儀」

洞察號登陸在火星位於赤道附近的艾里申平原上(Elysium Plantitia, 4^0N)，赤道附近有足夠的陽光可提供能量，這個位置大致是火星南北半球地形高低的邊界，在艾里申平原東北方有火星第二大的 Elysium 火山群，平緩的艾里申平原上有彎曲的河道，也有稍皺褶的起伏地形。

洞察號(InSight)的全名是 Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport，他的任務是應用震波、測地學和熱傳導對火星進行內部調查。這項任務發射前的成本花費達美金 8.3 億元，最亮眼的裝載是火震儀 (Seismic Experiment for Interior Structure, SEIS，火星內部結構地震實驗儀) ，這是一件工程與科學上的傑作，繼承從 Mars96 以來二十年的精緻化改良設計，比起 1976 年維京號的靈敏度好上一千倍，非常精確也非常複雜，只要震動幅度大於一個氫原子的寬度都可被偵查，讓火星上任何最微弱的運動都無法遁形。由於火星在日夜轉變時溫度變化很大，溫度變化也改變錘擺最靈敏的感應頻率，為了克服種種對靈敏度的的影響，裝備了數層的絕熱罩與蜂窩狀真空結構套在外面，到現場組裝時還利用火星稀薄的大氣再做進一步隔熱。

當年維京號的感應地震儀直接放在登陸艇內，而洞察號的火震儀設計是完全獨立站立在火星表面，火星儀需要從洞察號搬出來，用一條像臍帶的纜線與洞察號連接。這看似很容易的一件事，卻沒法像月震儀直接由登月太空人執行安裝，洞察號浩費了兩個多月才自行完成火震儀的部署。

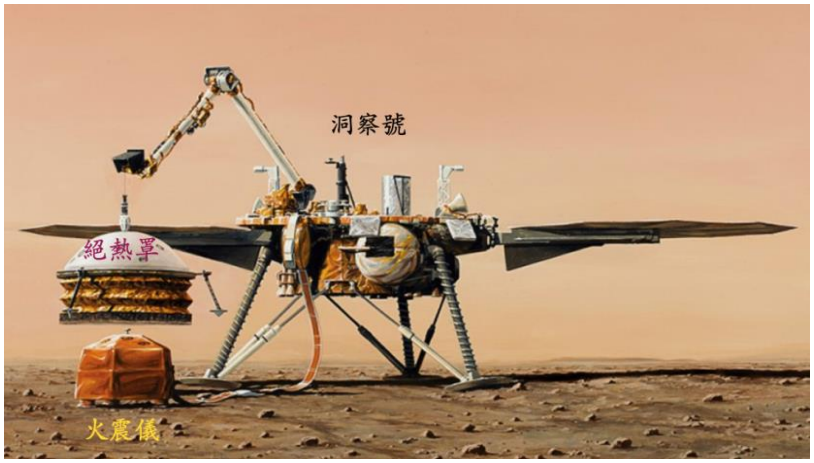

圖 6. 洞察號的機器手臂將火震儀安置在火星表面，並套上多層絕熱罩的操作過程示意圖。

參考 https://www.seis-insight.eu/@IPGP/Manchu/Bureau 21

2018 年 11 月 26 日洞察號在火星落地後，地球上的控制室也根據洞察號傳回來的火星現場影像，佈置地球上的火星工程組件實驗室，實驗室裡有一部與洞察號完全相同的雙胞胎登陸艇，可跟著火星上的洞察號做一樣的動作。在地球組件控制車幾公尺範圍內佈置成與火星艾里申平原幾乎完全相同的狀態，擺上形狀與大小類似的石塊、紅色細沙。有了與現場一致的模擬環境，才開始下達部署指令，伸出機器手臂搬運火震儀出來，調整三腳架的水平、層層放置風罩與隔熱罩等（圖六），許多細節確實執行並再三檢驗，才能發揮火震儀的精確與高靈敏度的功能。

在地球上地震是尋常的現象，大多發生在板塊邊界與活動火山區域。可是火星沒有板塊運動，火山噴發也近乎停止，火星發生震動的機會不大，然而學者們還是透過衛星影像找到火星上的斷層；況且火星大氣稀薄，隕石重擊也會造成震動，因而洞察號預計在火星上除了監測來自內部的震動，還可監收隕石撞擊的震波，以及火衛一佛伯斯(phobos)和火星之間的引潮力、大氣層的微弱抖動。

單獨一架火震儀的研究結果與現況

地震發生後，首先需要了解震波從哪裡發出來，也就是定出震源位置。地球有超過 25000 個地震波接收站連成網絡，和震源距離不同的地震站接收到震波的時間有別，很快能找到震源。而火星上只有單獨一座位在艾里申平原上的洞察號火震儀，得用其他方法尋找震源。

火震儀是三軸（上／下、東／西、南／北三個方向）精密的擺錘構成，精確的三軸初動方位可以找出震波來自哪個方位，定位大約可在 10 度範圍之內，也再參考表面波從震源兩側繞火星表面到洞察號的時間差異（圖八(a)）。最準確的定位是隕石撞擊所造

成的震波，因為隕石坑在火星表面，新出現的隕石坑能透過火星上的軌道衛星定位（圖七(b) ）。也有不少地球物理學家應用在地球上眾多的地震個案，透過分析過濾地球上不同的震波形式，尋求各種可以解算震波反射深度的演算法，已經有非常多發展成熟的分析技術，都可拿來應用在火星震解算分析。

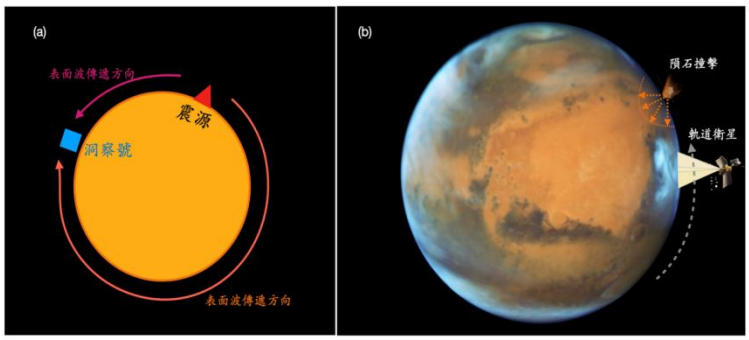

圖 7. 火星半徑小，表面波從震央附近出發，沿著火星表面從不同方向傳到洞察號所在位置

會在先後不同時間抵達(a)隕石撞擊產生的震動，藉由軌道衛星偵察新形成的坑洞，可以得知震源位置(b)。

火星內部活動平靜，但仍有震動。地球上芮氏規模達到 5 的地震每年有 1500 次以上，規模越小的震動越多，規模 4 的至少達數萬筆。洞察號首次發表火星震是 2019 年 4 月 6 日，發生在洞察號抵達火星的第 128 個火星日，這個火星震其實微弱極了，以地球上的地震儀是絕對偵測不到的。即使火震儀如此靈敏，到今年（2021）三月以來規模落在 2-4 之間的震動也僅五百次，大約有 50 筆紀錄勉強達可以提供內部訊息的強度，任務科學家用其中較可靠的三筆初步演算火星內部分層，發表在三月的 Nature 期刊上，顯示在火星地表下 700-800 公里以上是火星的上部火函(upper mantle)，其中還包含一層震波速度下降的厚層物質，類似地球軟流圈（也是震波低速帶）的構造可能也存在於火星。推算出火核的半徑大約 1810-1860 公里（圖八），比過去所預期的大一些，意味著火核的組成或許不僅僅是金屬，可能也含有比較輕的物質，例如硫化鐵。

根據洞察號的資料對於火星最表層的火殼也有新的看法，德國科隆大学的地震学家 Brigitte Knapmeyer-Endrun 提出火殼平均不超過 70 公里，可能由兩層或三層構成，就如同地球的海洋地殼與大陸地殼的差異，火殼厚度在火星各處也有所不同，詳細情況有待正在評審中的期刊論文發表。

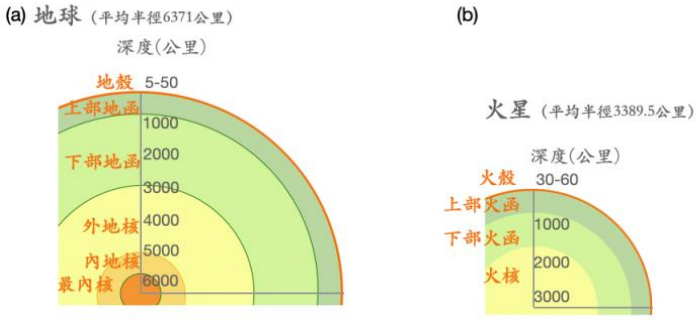

圖 8. 地球內部分層，參考 Stephenson 等人提出的地球最內層(a)與洞察號所推算的火星分層(b)。

從太陽系起源與類地行星形成的理論，科學家猜測火星也有火殼、火函（幔）與火核的分層。火星內部的研究不僅是想要得知各分層的存在與深度，火星內部對行星的起源有地球無法解答的重要訊息。地球因為內部活躍的熱對流，早期分層的痕跡已經完全被重新洗牌，火星比地球小，誕生之後比較快速冷卻，可能保留早期冷卻過程的記錄，若能了解火函分層細節，或是金屬核與岩質函如何分離的過程，對於行星誕生與起源都能提供很多關鍵證據。

洞察號的任務科學家提出規劃時，原期望能有十筆規模大於 3 或更強的震波來確認火星地下構造，然而目前結論只有三筆規模大於 3 的紀錄。由於火星目前正前往軌道遠日點移動，洞察號所在地點的風力將會比較安靜，噪音不再如前干擾，但它的太陽能板現在已佈滿火星塵埃，越來越遠離太陽又使太陽能板接收的能量更少，發電能力會持續降低，科學家只能節省其他儀器的使用，等候任務期滿結束前還能捕捉到更多的地震訊號，並祝禱今年新加入的火星觀測計畫隊友，能有更好的發現來提供火星深層的研究！

吳育雅

臺大師培中心兼任助理教授

參考資料

[1] Alexandra Witze (2021) Mars’s core has been measured — and it’s surprisingly large. Nature 592,514-515.

[2] Knapmeyer-Endrun B, Kawamura, T. (2020) NASA’s InSight mission on Mars—first glimpses of the planet’s interior from seismology *Nature Communications* 11, 1451.

[3] Knapmeyer-Endrun B. (2020) New seismological constraints on the crustal structure of Mars and the Moon，2020 年 12 月 15 日發表在美國地球物理聯合視訊會議預錄演講.

[4] Stephenson, J., Tkalcic, H., &Sambridge, M. (2021) Evidence for innermost inner core: Robust parameter search for radially varying anisotropy using the neighborhood algorithm. Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 126, e2020JB020545

[5] Wieczorek, M.A., Plesa, A.C., Knapmeyer-Endrum, B., McLennan, S.M., Nimmo,F., Michaut, C.,Broquet, A., Smrekar, S., and Banerdt, W.B.（2020）Global Crustal Thickness Modeling of Mars Using InSight seismic constrains.　51st Lunar and Planetary Science Conference