

點石沉金：謎樣的橄欖隕鐵

文—陳君榮、黃克峻
圖—陳君榮、陳宜君、張介宇

橄欖隕鐵的分類

橄欖隕鐵因具有詭麗的外表而常受到人們的矚目，其本體主要由毫米到厘米大小的橄欖石晶體以及鎳鐵金屬所組成(圖1、3、4)。橄欖隕鐵不僅非常漂亮，亦相當罕見稀有，在地球目前已知的5萬6千多顆隕石中，橄欖隕鐵僅約百件，其總重僅佔所有隕石總重量的2.4%。本館「早期的地球：前

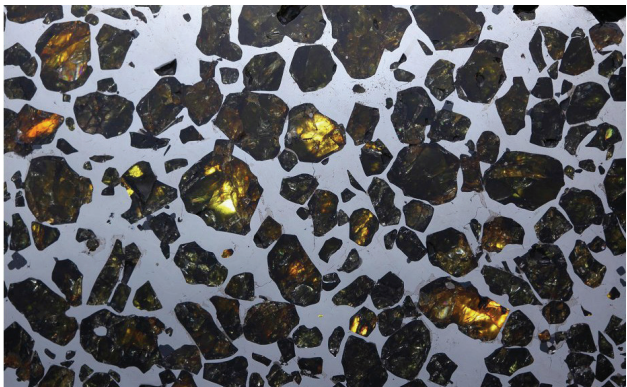


圖1 阿根廷沙漠發現的Esquel 橄欖隕鐵被認為是最美麗的石鐵隕石之一。金屬內具有許多達公分大小的黃綠色橄欖石晶體，形狀大多不規則且為多角形。此蒐藏品目前於「早期的地球：前寒武時期」特展中展示。照片寬約12公分(張介宇攝)。

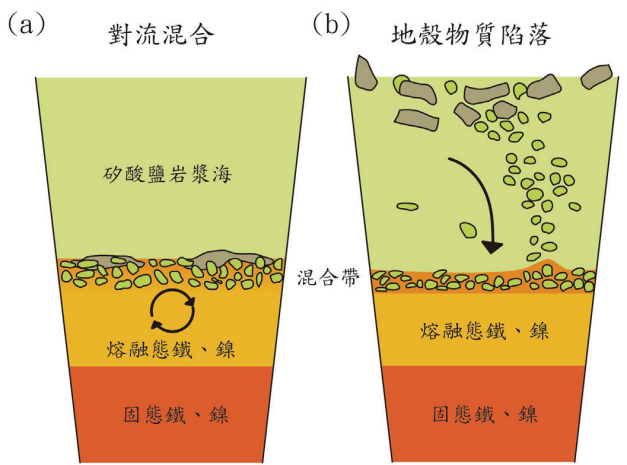


圖2 由地核-地幔邊界產生橄欖隕鐵示意圖：(a)熔融金屬的熱對流導致地幔底部形成的橄欖石受到擾動而與熔融金屬混合，混合帶逐漸冷卻後即形成橄欖隕鐵。(b)過程與(a)相似，不同之處在於橄欖石源自地殼，掉落至地幔後逐漸累積在核幔交界處。



圖3 肯亞Sericho 橄欖隕鐵，雖然被當地居民發現已數十年，一直到2017年才被確認為石鐵隕石並以地名命名，目前發現總重達2.6公噸，在已知的石鐵隕石中排名第二重。其橄欖石晶體通常為0.5至1公分大小，呈圓滑狀外形。標本寬15公分，高12公分。



圖4 俄羅斯Seymchan 石鐵隕石，1967年被發現時被認為是鎳鐵隕石，但在2004年新找到的標本中約有兩成含有橄欖石，因此被重新歸類為橄欖隕鐵。此標本金屬區域可見鐵紋石以特定方向生長所造成的韋德曼交紋圖案。其橄欖石晶體外形相當不規則，以圓滑狀為主，局部呈多角狀。標本高14公分、寬10公分。

寒武時期」特展中所展示的Esquel 橄欖隕鐵更是被認為最美麗的隕石之一(圖1)，其發現總重僅有755公斤，本館所蒐藏的這一巨型切片就佔了6.4公斤，是世界上難得一見的標本。橄欖隕鐵基於氧同位素、礦物相及金屬成分的差異，可再區分成主要群、鷹站群及輝石群3個子群，以及不屬上述3群的未分類群。9成以上的橄欖隕鐵成員被歸類為「主要群」，Esquel 橄欖隕鐵即是其中之一。鷹站群有5個成員，其鈦跟鎳的含量明顯比主要群成員高，且氧同位素也明顯與主要群成員不同。輝石群則僅有兩個成員，特徵為輝石含量較高。由於相同的子群中的成員可能來自相同的母星體，加上無法歸類的8個未分類群成員，橄欖隕鐵可能源自10個以上不同的母星體。另外，主要群橄欖隕鐵金屬部分的鈦含量，落在IIIAB 群鎳鐵隕石鈦濃度範圍低濃度端處，加上兩者氧同位素難以區分，因此，主群橄欖隕鐵與IIIAB 群鎳鐵隕石被認為很有可能是源自同一個小行星體。

來自核幔邊界的產物

橄欖隕鐵中橄欖石與鎳鐵金屬之共存現象看似簡單，其成因卻是令人困惑。由於鎳鐵金屬代表著已分化小行星的地核，而橄欖石可能是地幔岩漿高度分化而成，因此，過去科學家們認為這兩種材料的組合，最可能發生在已分化小行星的地幔與地核的交界處。橄欖石受熱對流的擾動而被往下帶入地核的熔融態金屬中，然後又受浮力影響，被往上帶回到石質為主的地幔，又隨著星體熱源消逝，核幔交界處的鎳鐵金屬逐漸冷卻並凝固住其周圍的橄欖石，混合帶即是橄欖隕鐵形成的區域(圖2)。儘管過去核幔邊界的形成機制以如此吸引人的方式解釋了橄欖隕鐵的主要特性，但有些證據使得這樣的說法必須重新考慮。例如橄欖石的鋁含量過低，與矽酸鹽岩漿通常形成的富鋁橄欖石不同，表示橄欖隕鐵的橄欖石來自接近地殼的低溫環境，因此有學者認為橄欖石應是由地殼陷落至地幔，累積於核幔邊界後再與熔融金屬混合(圖2b)。甚至，有些證據更是反駁上述說法。例如橄欖隕鐵中磷酸鹽礦物含有高濃度的稀土元素，反映其曾含有少量殘存的矽酸鹽岩漿，而這富含稀土元素的岩漿應該存在於地殼附近，而不是接近地核。主要群橄欖隕鐵成員的橄欖石外形，有以多角形為主的(如Esquel 橄欖隕鐵；圖1)，也有以圓滑狀外形為主的(如Sericho 橄欖隕鐵；圖3)，這樣的差異可能與其形成的深度有關，混合帶較深處溫度較高，原本多角狀的橄欖石可因高溫變質作用，使部分熔融而形成圓滑狀橄欖

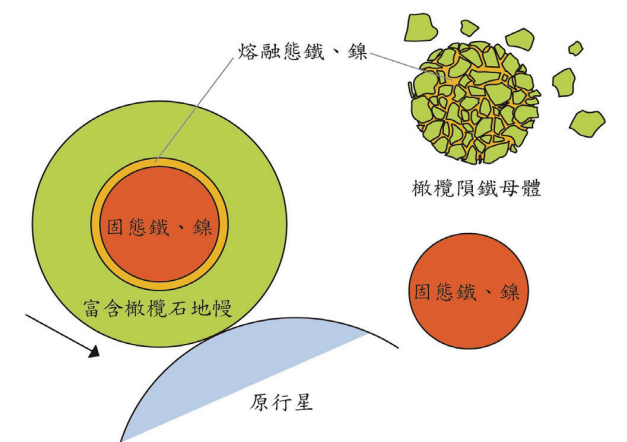


圖5 行星碰撞形成橄欖隕鐵示意圖。已分化之小行星與原行星強烈碰撞後，破碎的橄欖石與核心殘存的熔融態金屬重新混合，形成橄欖隕鐵母體。

石。然而Seymchan 橄欖隕鐵卻可在很小的，數十公分的範圍內，同時具有兩種外形迥異的橄欖石(圖4)，為何不同深度形成的橄欖石聚集一起呢？另外，橄欖石為何會有如此破碎的外形呢(圖1)？似乎暗示著可能與撞擊事件有關。

巨大碰撞裡裂外合

除了橄欖石所帶來的困惑，鎳鐵金屬部分，亦有人難解的情況。一般而言，小行星地核的金屬熔體應是由核幔邊界逐漸向核心內部冷卻，因此核幔邊界熔體所先形成的金屬結晶，其含鎳應不高，然而，橄欖隕鐵卻富含鎳，具有熔體晚期結晶之特性。透過量測韋德曼交紋中鎳紋石生長情形可計算出橄欖隕鐵的金屬冷卻速率(圖4；見館訊「從地心冷卻」一文)，研究結果發現，主要群橄欖隕鐵的冷卻速率範圍為每百萬年下降2.5度至20度，變化相當明顯。如果橄欖隕鐵是在核幔邊界形成，預期其冷卻速率應相當一致。更令人驚訝的是，原本被認為是主要群橄欖隕鐵母體地核部分的IIIAB 群鎳鐵隕石卻具有相對快速的冷卻速率(百萬年下降50度至350度)。這與一般星體由外至內冷卻的情況不同，因此，IIIAB 群鎳鐵可能不是過去所認為來自同一母體的幔核關係，甚至毫無關聯。隨著情況越來越複雜，於是有科學家大膽提出：橄欖隕鐵應是已分化小行星受到如月亮大小的原行星碰撞所造成(圖5)。小行星因猛烈撞擊而嚴重破損，其尚未固化的熔融金屬飛濺後與粉碎的橄欖石重新組合，冷卻後即為橄欖隕鐵母體，此說似乎較能解釋橄欖隕鐵不均勻的冷卻速率，及其同時混雜有地殼附近及不同深度的物質的情況。

異心入侵石鐵交融

最近的研究發現，橄欖隕鐵橄欖石中的鎳鐵粒子包裹體具有良好的磁性，顯示鎳鐵隕石曾受古地磁影響，這使得橄欖隕鐵的成因又有了戲劇化的發展。由於小行星若具有磁場，顯示其地心金屬外核仍呈熔融狀態且不斷的流動，但此時核幔邊界溫度可高達攝氏930度，在這樣的高溫條件下，包裹體物質是無法產生磁性的(超過居禮溫度會破壞鐵磁性)。這意味著橄欖隕鐵必須是在地幔中的較淺位置(溫度較低)生成。因此，科學家們再提出了新的想法：橄欖隕鐵是由於小行星的熔融金屬核心，經撞擊注入到原行星地幔較淺處，與橄欖石混合而成(圖6)。由於此機制也可合理解釋先前的說法與所提之證據，而不受橄欖隕鐵源自星體核幔邊界的說法所侷限。如此一來，橄欖隕鐵的石鐵交融，可能代表著不同星體間因猛烈碰撞所造成的物質交流，橄欖隕鐵的星路歷程也因而重新改寫。

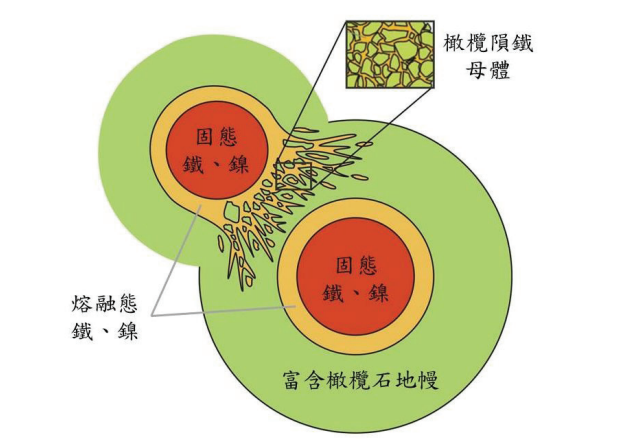


圖6 異星碰撞入侵形成橄欖隕鐵示意圖。已分化之小行星與具地磁的原行星碰撞後，小行星地核中熔融態鎳、鐵注入至被撞擊的原行星地幔中，並與橄欖石混合形成橄欖隕鐵母體。橄欖隕鐵形成於溫度不高的地幔淺處，因此橄欖石中鎳鐵粒子包裹體可受原行星地磁影響而具有磁性。