

文/ 高銘鴻

隕石是來自外太空的岩石，在未墜落前與大氣層產生劇烈交互作用，於高溫、高速運動的作用下，小顆粒的岩石大都燃燒成灰燼，消失不見；比較大顆粒的岩石墜落後，會撞擊地表形成巨大坑洞——此即為隕石坑。此類撞擊事件，在地殼上產生的變質作用既複雜且變化多，僅以單純型態的變質分類為依據，難以解釋隕石撞擊所經歷過的變質效應。

隕石撞擊後 礦石的變質效應

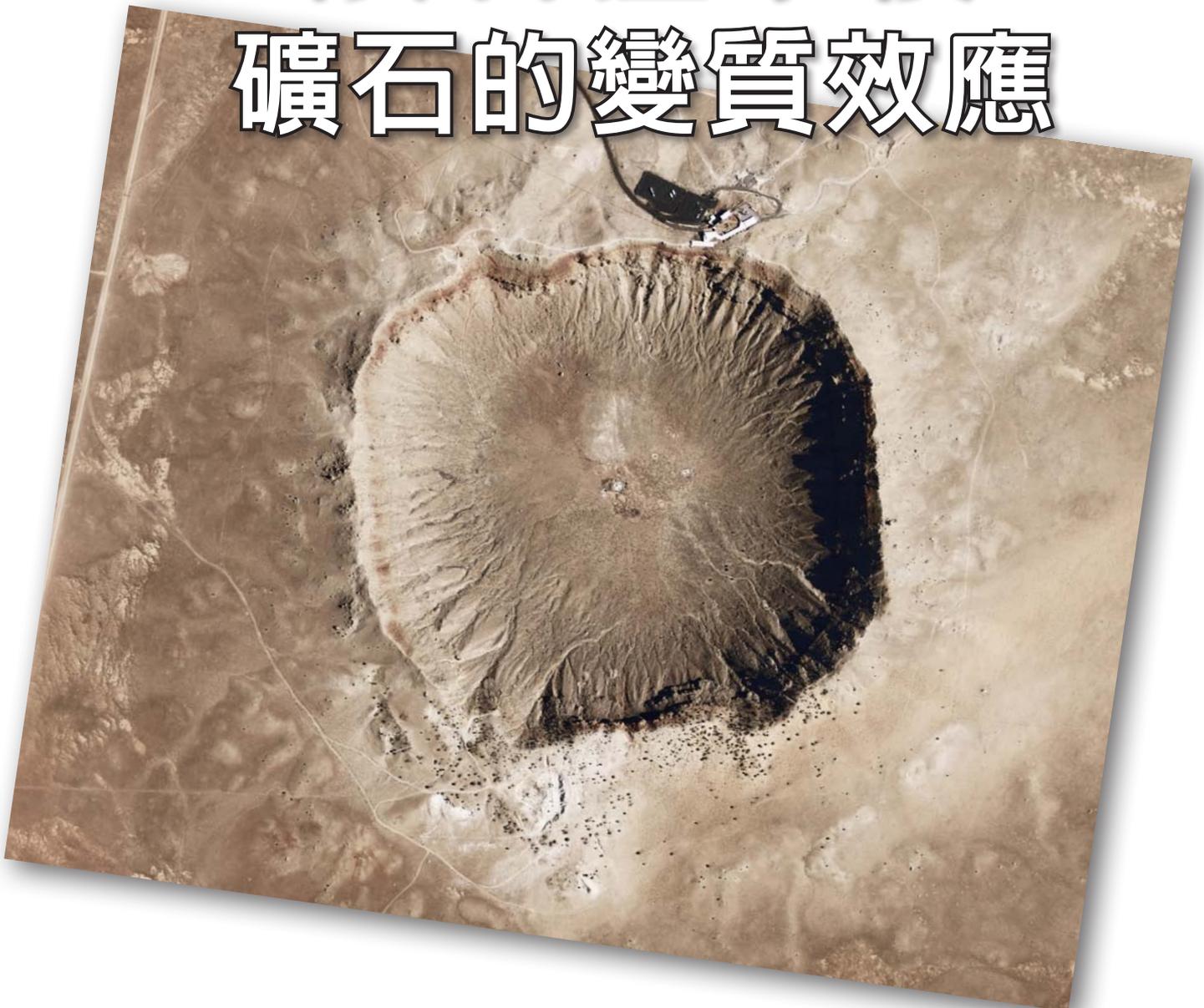




圖1. 三大岩石種類：沈積岩（Sedimentary Rock）、火成岩（Igneous Rock）、變質岩（Metamorphic Rock）。圖片來源：zme science

三大岩石種類 沈積岩、火成岩、變質岩

地球的構造由外而內可分為三大層：地殼（Earth Crust）、地函（Mantle）、地核（Core）。地殼的組成物質是岩石，岩石是礦物的集合體，岩石因地質作用的關係，依據其成因可分成三大類：沈積岩、火成岩、變質岩（圖1）。隕石因來自外太空，不同於三大岩類，是一種獨特的岩石，科學家們研究隕石除了可以瞭解太陽系的演化歷史，研究隕石坑的礦石亦可探討撞擊區域的變質效應。

沈積岩（Sedimentary Rock）

地表上的岩石，受到陽光、空氣、水、冰川及生物等自然營力的作用影響，沈積物由沈積作用深埋而固結，再經壓密、膠結等作用而形成沈積岩。

火成岩（Igneous Rock）

地球內部的岩漿沿裂隙上升，或停留在地殼內，或噴出地表，經火成作用而形成火成岩。有些岩漿在地殼內固化，最後形成深成岩；有些岩漿則噴出地表，而形成火山岩。

變質岩（Metamorphic Rock）

地球的內部的岩石，因深埋於地底下受到高溫、高壓環境的影響，產生變質作用而形成變質岩。在不同的地質狀況下的變質作用，會造成岩石在成份與組織構造都發生變化，甚至於會產生某些特殊的構造或獨特變質的礦物。

變質作用分類

一般而言，變質作用的類型可分為：接觸變質作用（Contact Metamorphism）、深埋變質作用（Burial Metamorphism）、區域變質作用（Regional Metamorphism）、熱液變質作用（Hydrothermal Metamorphism）、動力變質作用（Dynamic Metamorphism）等（圖2）。隕石撞擊地球的衝擊變質作用（Impact Metamorphism）較為複雜，於下一段落再加以說明。

接觸變質作用

當變質作用發生在比較高溫的地方，小區域範圍內就會發生接觸變質作用，一般發生在侵入火成岩體地溫梯度較高的區域。例如：海底隱沒帶的岩漿上升到地表時，影響地表岩石，發生接觸變質作用。

深埋變質作用

沈積岩如果沉積得足夠深，熱和壓力會導致礦物重新結晶並生出新礦物，岩石將產生深埋變質作用。深埋變質作用是由上覆沈積物和沈積岩施加的熱和壓力作用所引起，是一種相對溫和的變質作用。雖然礦物結構可能會發生部分改變，但層理和其他沈積結構通常會被保留。

區域變質作用

地體構造運動發生造山的過程中，當溫度和壓力升高時，於地殼內部的岩石，就會發生區域變質作用。一般而言，區域變質作用影響的範圍，比接觸變質作用影響域範圍還要廣大。海底的隱沒帶與造山運動等地體構造運動活躍的區域，常常會發生區域變質作用。

熱液變質作用

在海底的中洋脊中，海水受高溫加熱滲透到地殼裂隙玄武岩，並和玄武岩接觸產生化學變化，因此導致玄武岩變質，此即所謂熱液變質作用（圖3）。在地殼中的岩石，因火成岩侵入，亦有可能發生熱液變質作用。此外，溫泉附近的地區，由於熱水流過岩石，使得這些岩石也有機會發生熱液變質作用。

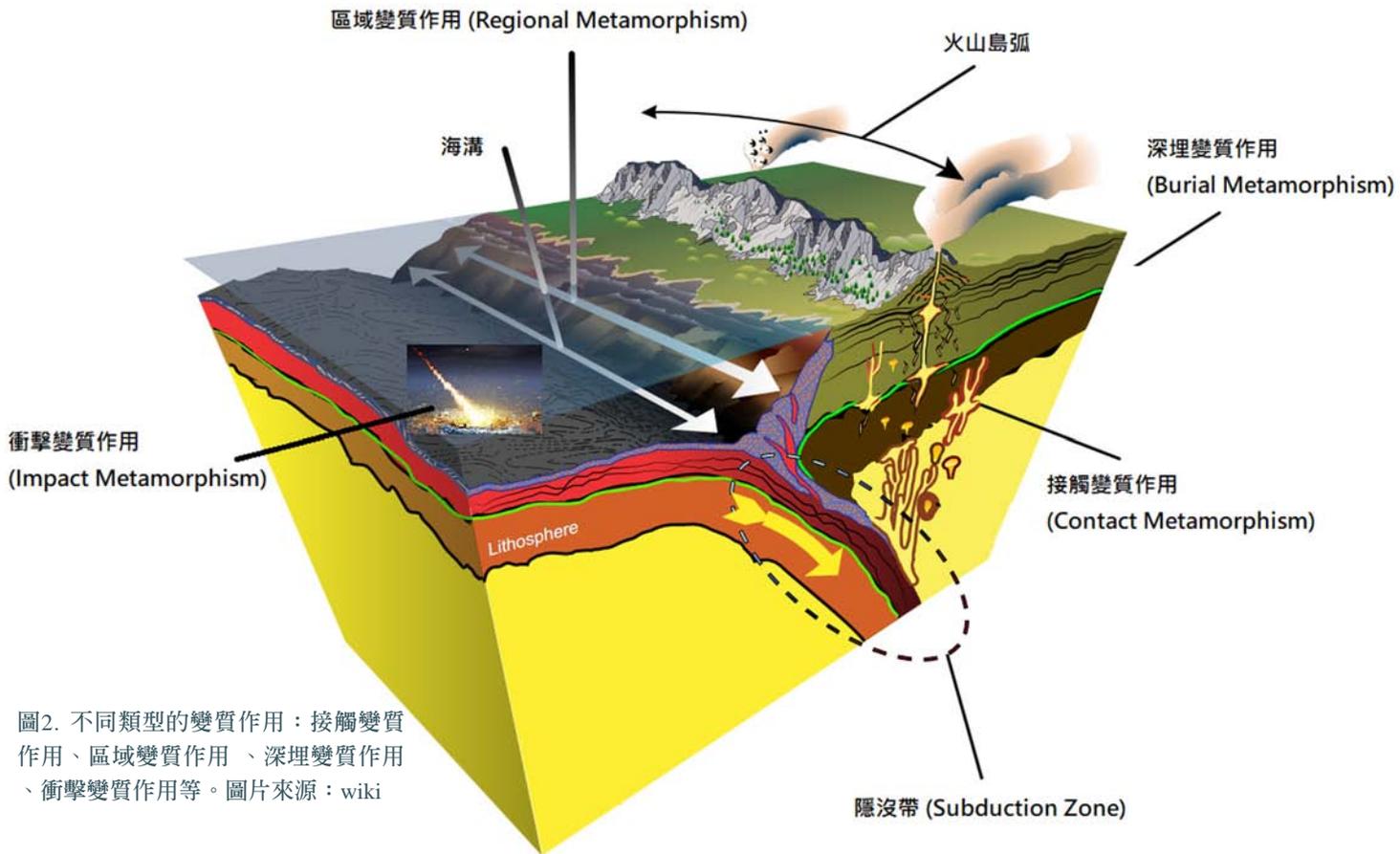
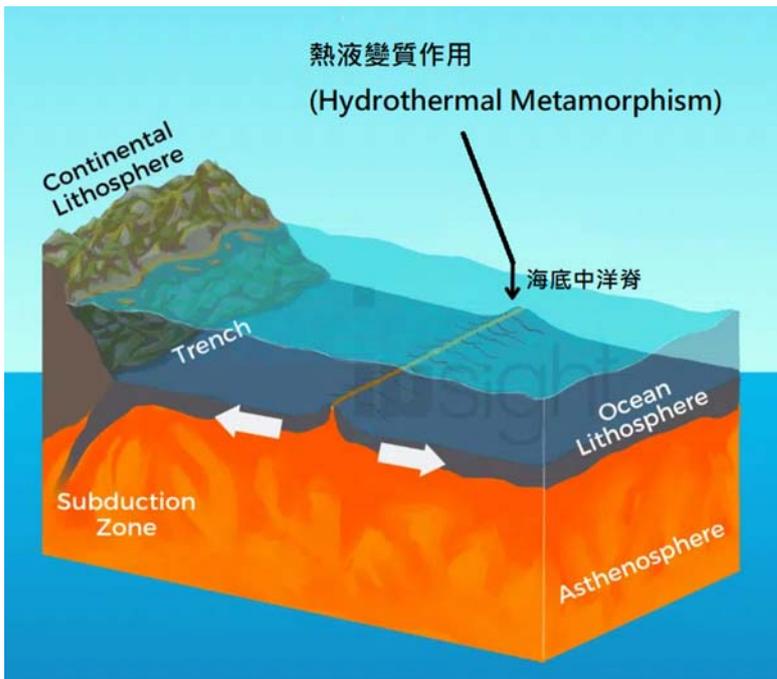


圖2. 不同類型的變質作用：接觸變質作用、區域變質作用、深埋變質作用、衝擊變質作用等。圖片來源：wiki

動力變質作用

動力變質作用常發生於斷層帶附近，當岩石互相作用磨擦時，因應力變化影響而發生此類型態的動力變質作用，也稱為碎裂變質作用（cataclastic

metamorphism）。地殼內的岩石經過動力變質作用後，會產生細長礦物顆粒和粒狀岩石，有時也會形成新的變質礦物（圖4）。



↑圖4. 石英岩因動力變質作用而變形。圖片來源：Search Library
 ←圖3. 海底中洋脊處，海水受高溫 and 玄武岩接觸產生熱液變質作用。圖片來源：Marine Insight



圖5. 隕石撞擊事件於地表上的隕石坑保存許多衝擊變質的證據。圖片來源：CAMLab

衝擊變質作用與其效應

太陽系的歷史，科學家們普遍認為就是星體間互相碰撞的複雜歷史，月球的隕石坑提供了部分歷史紀錄。地球過去的演化史中，隕石撞擊的事件亦曾發生，地表上的隕石坑就保存許多衝擊變質上的證據。在地質歷史中，造成白堊紀末的生物大滅絕（包含恐龍）的地層—K-T邊界層（介於白堊紀和第三紀之間的界線）含有衝擊變質礦物，此K-T邊界即與隕石撞擊事件有關（圖5）的極佳證據。

衝擊變質作用

隕石或小行星撞擊地球時，因為溫度和壓力巨大的改變，於高溫、高壓的條件下，使得撞擊地區的岩石與礦物產生衝擊變質效應。隕石撞擊地球讓地殼的岩石除了產生破碎和變形的物理變化外，隕石的衝擊變質作用也會造成其他形式的化學變化。當隕石撞擊產生的變質作用隨著溫度和壓力的變化，不同條件下就會產生不同型態的變質作用，因此以衝擊變質作用來定義此類複雜又獨特的變質作用。衝擊變質作用的效應，可能包括產生高壓變質礦物，例如柯石英或石英石。衝擊變質作用後，岩石會呈現高度粒狀化、變形和破碎等現象，有時也會出現稱為破碎錐的結構。

衝擊變質效應

小隕石的撞擊事件產生的隕石坑，因地球環境的變化與地質作用的影響，隕石坑容易被侵蝕或掩蓋。較大隕石的撞擊事件由於高溫、高壓的影響，產生巨大隕石坑，造成的衝擊變質效應包含地層的破裂、平面狀變形特徵（PDF, Planar deformation features）的形成（圖6）、高壓變質相的生成及岩石礦物的融化和汽化。由於異常高的衝擊壓力，大部分隕石被熔化或蒸發。隕石坑附近蒐集的隕石碎片，有些便具有其他衝擊變質特徵，包括衝擊合成鑽石或新生成的高溫高壓礦石等。



圖6. 石英受衝擊變質作用後產生的平面狀變形特徵。

圖片來源：Wiki

案例：新礦物誕生—玲根石

1977年中央研究院地球科學研究所前研究員劉玲根（Liu, Lin-gun, 2007年退休）因為要探討各種鈉鋁矽酸鹽礦物相互間的關係，以及在高壓下是否有可能產生新的物質？在實驗室裡應用鈉鋁矽酸鹽做許多高溫高壓的實驗後，鑑定出三種共存的礦物（其中有一為翡翠），當時他就發現了一種新的物質。

隔一年（1978）劉玲根發表的論文中，就提出其研究結果有新物質的證據。2000年，一組法國、德國和中國的科學家共同在《Science》期刊上發表論文，該論文中主張在中國的隕石中，發現了一種新礦物，此礦物的晶體結構、晶格和化學組成都和劉玲根1978年論文中所發表的新物質相同。這組科學家的研究結果支持劉玲根的發現，這也是該新物質在自然界首次被發現。2005年三月國際礦物協會通過查證，以劉玲根研究員的名字命名這新礦物為「玲根石」（Lingunite, 圖7），劉玲根成為臺灣第一位以個人名字，用於新礦物命名的科學家。

高銘鴻：臺北市立天文科學教育館

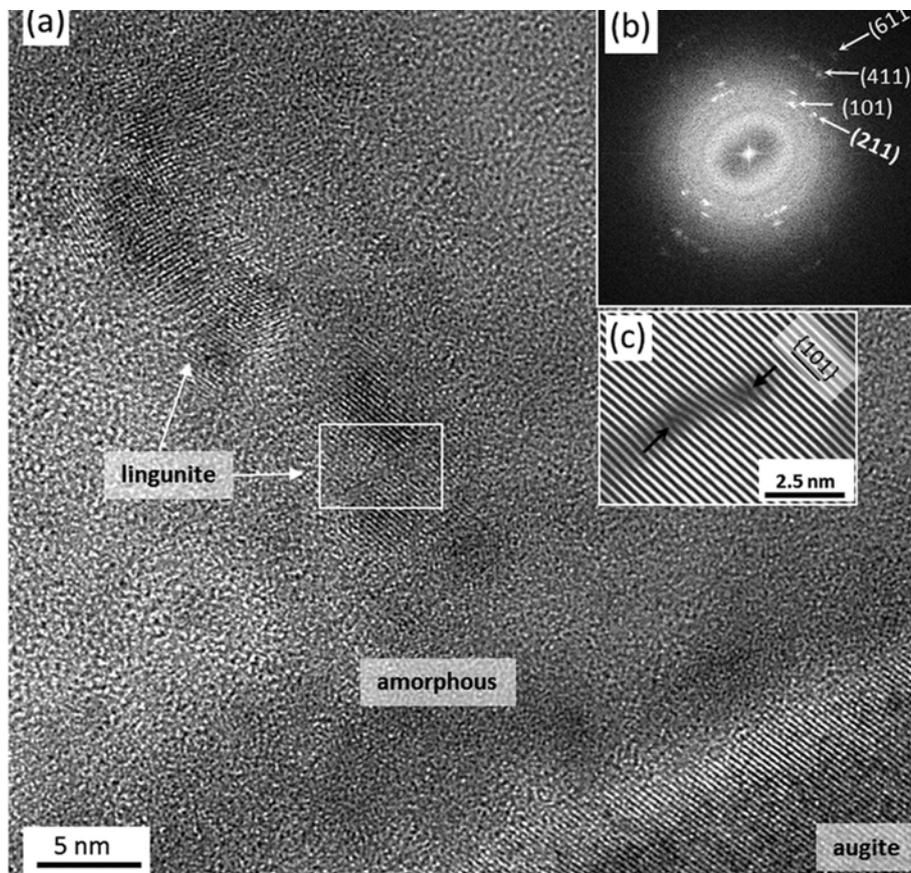
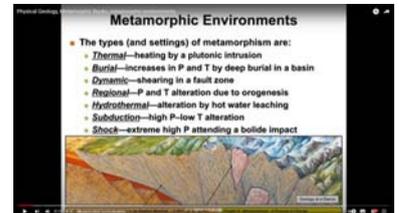


圖7. 在高解像能電子顯微鏡觀察下的新礦物玲根石。圖片來源：Naturesre

參考資料：

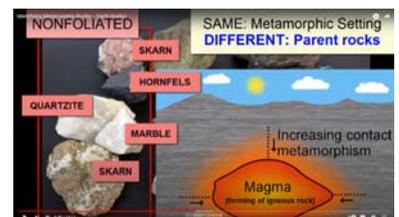
1. 阮國全（2000）地球區文字導覽手冊，臺北市立天文科學教育館。
2. 何春蓀（1981）。普通地質學。五南圖書出版公司，臺北。
3. 中山自然科學大辭典第六冊 地球科學（1973）臺灣商務印書館，臺北。
4. Spence, Pam（1996）The Universe, Chancellor Press, London, UK

YouTube相關影片：



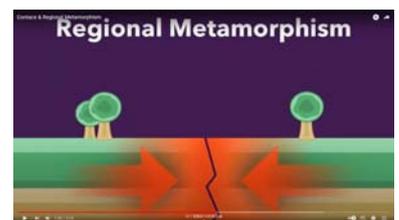
Physical Geology, Metamorphic Rocks, metamorphic environments

<https://www.youtube.com/watch?v=iPoxlxJLDWY>



Metamorphism

<https://www.youtube.com/watch?v=N7SiZSa5csA>



Contact & Regional Metamorphism

<https://www.youtube.com/watch?v=Bbw8BiZhGg0>