

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

佳作

040507

角力—秀姑巒溪口角閃石之破裂成因

學校名稱：國立臺南第一高級中學

作者： 高二 張孟淞 高二 陳威宇	指導老師： 施怡如
-------------------------	--------------

關鍵詞：角閃石、破裂、應力

摘要

秀姑巒溪口左岸的海蝕平台屬於都巒山層中的石門火山角礫岩，為海岸山脈的火山在淺海噴發堆積而成。其岩性屬於安山岩質，其中所含的角閃石具有許多裂痕。因此希望透過實地觀察量測與角閃石擠壓實驗來瞭解角閃石的裂痕成因。

由周圍岩石的裂痕方向可以推知此地擠壓的方向為西北西、東南東，和文獻吻合。而在研究過程中得知角閃石的 c 軸是堅韌的矽氧四面體雙鏈延伸，而 a、b 軸上金屬離子較少的 a、b 位址最為脆弱，受外力作用時，易斷裂形成解理。經測量發現當地角閃石破裂方向在東西向及西北東南向分布各約 30%，並由角閃石受壓應力破裂實驗結果推知：礦物受外力除沿本身結構的弱面即解理面破裂外，也有機會因為應力作用而沿特定方向裂開形成節理。

壹、 研究動機

在一次野外地質觀察的活動中，我們來到秀姑巒溪出海口左岸觀察當地的岩層。在岩層中我們發現當地角閃石與周圍岩石均有許多裂痕，由地科第四章地球的結構與第六章固體地球的變動得知台灣位於板塊交界，而此處正是板塊交界附近，是因為板塊擠壓產生這些裂痕嗎？角閃石與周圍岩石之裂痕成因都一樣嗎？裂痕與當地受力方向有關嗎？



圖 1 秀姑巒溪出海口左岸的海蝕平台

貳、 研究目的

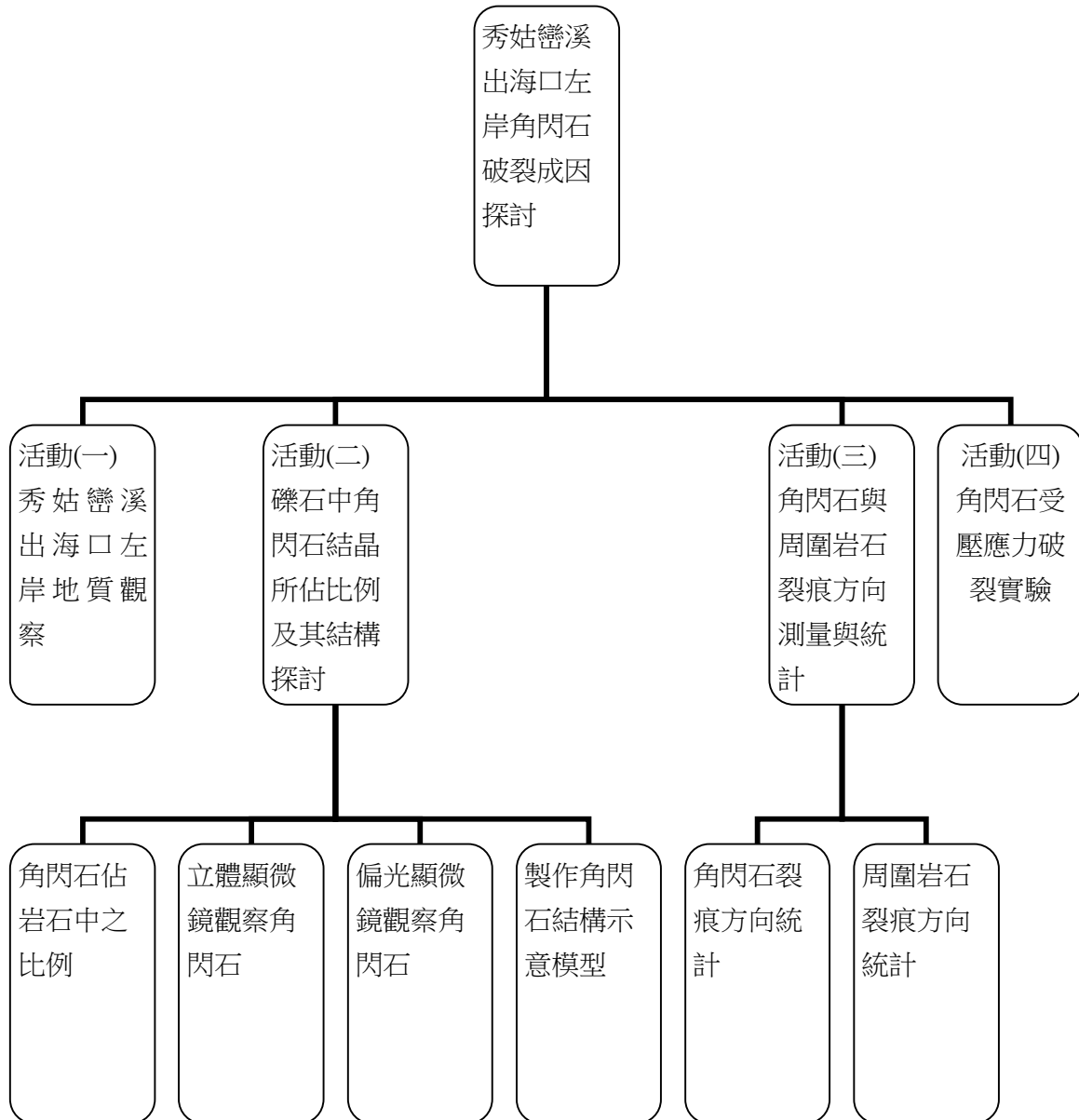
- 一、 以定向採樣器三角定位法定位，並測量當地角閃石結晶與周圍岩石之裂痕方向。
- 二、 從岩石的節理推測當地應力方向，並與文獻比對。
- 三、 探討角閃石的裂痕和其結構及所受應力方向之關係。

參、 研究設備及器材

- 一、 秀姑巒溪出海口左岸採集的火山角礫岩及角閃石標本。
- 二、 地質鎚、自製定向採樣器、自製方位測量膜。
- 三、 實體顯微鏡、偏光顯微鏡、22 倍放大鏡。
- 四、 保麗龍球、牙籤、珍珠板、西卡紙。
- 五、 篩網、研鉢。
- 六、 珍珠板、可調式固定器。

肆、 研究過程及方法

一、 研究架構



二、活動(一)秀姑巒溪出海口左岸地質觀察

(一)、研究地點位於豐濱鄉港口村與靜埔村中間，如圖所示：

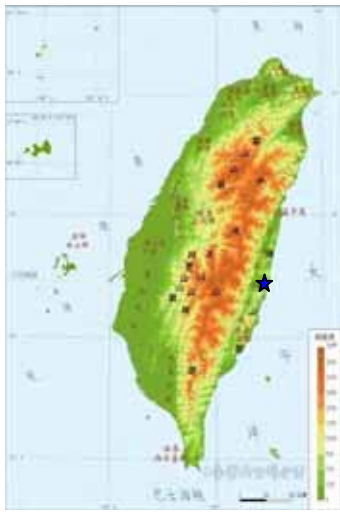


圖 2 秀姑巒溪河口位置(藍星處) (取自台灣大百科全書)



圖 3 秀姑巒河流域圖 (取自經濟部水利署第九河川局,95 年 4 月)



圖 4 從地質圖可看出當地屬都巒山層 (取自數位典藏與數位學習成果入口網)

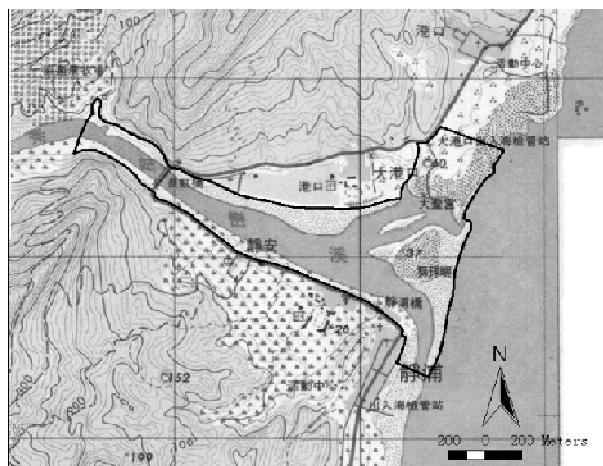


圖 5 Google Earth 上的海蝕平台及河口等高線圖(取自 <http://www.geog.ntu.edu.tw/main/paper/r87228001/chap5-4.htm>) 紅圈處為採集地點(23°28' 03.75" 北, 121°30' 07.69" 東)

三、活動(二) 礫石中角閃石結晶所佔比例及其結構探討

(一)、估算角閃石在安山岩中所佔的比例：

- 1、取 10 個採回的安山岩質角礫岩，並以研鉢打碎。
- 2、以不同粒徑的篩網過篩。
- 3、取 0.297~0.210mm 的顆粒在顯微鏡下觀察，計算顆粒的總數和角閃石及疑似角閃石的數目，並算出百分比。(在此粒徑下顆粒不致過小且各礦物多已分離)。

(二)、使用立體顯微鏡觀察角閃石

(三)、使用偏光顯微鏡觀察角閃石

(四)、製作角閃石示意模型（製作模型之參考資料位於：捌、附錄）

1、模型 1 製作方法：

- (1)將保麗龍球塗上不同的顏色，代表不同的原子或填充位址。
- (2)依照文獻所述將角閃石立體結構以竹籤和保麗龍球串接組合而成。

2、改良後的模型 2 製作方法：

- (1)以西卡紙折成四面體代表矽氧四面體，並黏貼於珍珠板上。
- (2)以竹籤將各色保麗龍球串接在 2 層珍珠板中，代表各離子填充位址。
- (3)組合成角閃石的立體結構示意模型。

四、活動(三)角閃石與周圍岩石裂痕方向測量與統計

(一)、三角定位與裂痕統計。

1、定向採樣器製作與使用

- (1)在木板上做一邊長 8cm 的正三角形，在三頂點打洞。
- (2)在三個洞分別釘入下端削尖的木釘，釘尖用膠帶保護防止磨損，洞兩邊木釘 套上塑膠管以白膠固定。
- (3)在上面黏上兩個相垂直的水平儀，將指北針的圓心對準三角形的中垂線並黏牢。
(另外為平面較小的標本製作邊長 6cm 的定位器)。
- (4)使用時將指北針的北方對準三角中垂線的頂點 N。
- (5)左右前後調整定位器，使其自然放置時，兩個水平儀皆顯示水平。
- (6)當指北針指著頂點 N，兩水平儀顯示水平時，將定位器下三支木釘站立的位置做記號，並標示 N 點。



圖 6 自製定向採樣器



圖 7 將定向採樣器調整至水平



圖 8 在三個角上畫上記號



圖 9 N 點朝北

2、方位測量膜製作與使用

(1) 將不具彈性的塑膠膜剪成半圓形。

(2) 把半圓塑膠膜分成南北向、東西向、西北東南向、東北西南向四個區域，每個區域涵蓋該方向 ± 22.5 度的範圍。

(3) 把薄膜放置到結晶上，測量結晶的裂痕方向在哪一區域內。



圖 10 自製方位測量膜



圖 11 90° 對準 N，以測出裂痕方位



圖 12 用放大鏡觀察裂痕方位

3、角閃石周圍岩石之裂痕的測量

(1)用類似測量結晶裂痕的方法，測量角閃石周圍岩石之裂痕方向。

4、數據記錄與分析方法

(1)測得的岩石或結晶若有兩組節理，且其中所夾銳角 $<60^\circ$ 度，推斷其受壓應力方向如圖 13.14。

(2)若無法推斷受壓應力方向者，則記錄何種方向有出現裂痕(分為顯著的節理和不明顯的節理)，然後將所有的數據加總，算出各方向裂痕的比例。

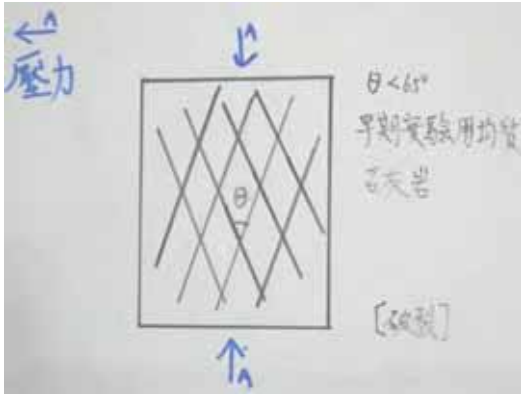


圖 13 均質岩體在受到一組壓應力時，易破裂形成兩組節理，此二組節理的角平分線方向即為壓應力方向。(其夾角小於 60 度)

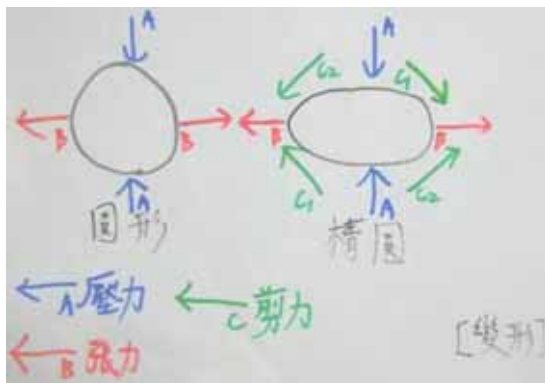


圖 14 岩體在受到一組壓力時，在其垂直方向可能產生一組張力，而這兩組力可以合成兩組剪力，而使岩體產生形變或破碎。



圖 15 礫石破碎情形複雜，無特定的裂痕方向(圖中黃色三點各相距 8 公分，N 點和另兩點的中點連線方向即指向南)



圖 16 礫石可看出兩組裂痕方向，一組東西向，一組東南西北向(圖中黃色三點各相距 8 公分，N 點和另兩點的中點連線方向即指向南)

五、活動(四) 角閃石受壓應力破裂實驗

(一)、方法：

- (1)用立體顯微鏡觀察擠壓前的角閃石顆粒並拍照。
- (2)利用可調式固定器作為擠壓工具。
- (3)將角閃石顆粒夾在薄層的材料中以模擬其在岩塊的受壓情形，將顆粒受擠壓的方向定為前後向，並將其垂直方向定為左右向。
- (4)旋轉固定器擠壓角閃石直到裂痕出現為止。
- (5)用立體顯微鏡觀察角閃石破碎的情況。
- (6)重複 1 至 5 的步驟，但是改變角閃石的擺放方向使其 C 軸和擠壓方向(即前後向)分別平行、垂直和夾 45 度，每種角度至少各做 10 次。
- (7)統計角閃石上出現各方向裂痕(前後向、左右向、右前左後向及左前右後向)的百分比
- (8)和野外觀察到破裂情形比較。



圖 17 以可調式固定器來對角閃石進行加壓

(三)、改進：

- (1)剛開始使用的擠壓工具是鉗子，後來改用鋸木用的可調式固定器。
- (2)我們剛開始試用了多種材料來固定角閃石，其中木頭加壓時角閃石不易碎裂，而海棉過軟且破碎的角閃石會卡在海綿絲中，而珍珠板較適合作為模擬周圍岩石的材料。

伍、研究結果與討論

一、活動(一)秀姑巒溪出海口左岸地質觀察：

(一)、出海口左岸地質觀察結果：

- 1、出海口左岸的露頭是一片略為平坦的海蝕平台的地形，範圍不大，大約只有數百平方公尺的大小。
- 2、左岸的地層中，有很多礫石鑲嵌在岩層的基質中，這些礫石粒徑大小不一，但多大於 64mm，其形狀多有稜角，顯示未經長距離的搬運。
- 3、將礫石膠結的是細小的紅褐色及黑褐色顆粒，有可能為火山灰，而其中膠結的礫石大多呈灰色，表面有黑色和白色的斑晶嵌在基質中，斑晶大小不一，大者達 2、3 公分以上。(如圖 21)多數斑晶為黑色，具有光澤，側面呈柱狀，橫截面為六角柱狀，應為角閃石的結晶，其中有部份結晶群落較大。
- 4、左岸上另有一些圓滑的礫石，應為秀姑巒溪搬運而來的產物，這些礫石分為 2 類，其中白色、綠色及黑色者較為圓滑，而圓滑程度較低者為含有大量白色斑晶的火成岩。
- 5、角礫岩層中有一些小型的斷層，其中的礫石也有很多受應力而破碎，並從觀察海蝕崖可知此地應長期受到內外營力共同作用。



圖 18 在野外進行實地觀察研究



圖 19 秀姑巒溪口海蝕平台實景



圖 20 秀姑巒溪口海蝕崖和海蝕平台



圖 21 秀姑巒溪口火山角礫岩

(二)、出海口左岸地質觀察之討論：(參考文獻位於捌、附錄)

- 1、此地屬於都巒山層中的石門火山角礫岩，其中的礫石以安山岩為主，粒徑大小不一，但多大於 64mm，形狀屬不規則形，代表已經固化的岩塊被火山噴發出後堆積，

未經長距離搬運。

- 2、 在左岸的岩塊上，有許多圓滑的礫石，為秀姑巒溪所搬運而來，其中有多斑狀安山岩，在比對流域圖和地質圖後，認為來源可能是海岸山脈的其他火成岩體，而亦有許多變質岩如大理岩、綠色片岩、黑色片岩等等的礫石，可能來自中央山脈的變質岩帶。
- 3、 左岸的鵝卵石大小並不一致，可能是因為中央山脈帶來的材料經較長搬運或是抗蝕能力不同而造成斑狀安山岩的顆粒多較大，而變質岩較小。
- 4、 此火山角礫岩原來在淺海堆積，經地殼抬升後露出水面，期間不斷受到內、外營力的作用。火山角礫岩層中的小斷層，和秀姑巒溪不斷帶來的礫石堆積及海浪持續侵蝕的痕跡都是證據之一。

二、 活動(二) 礫石中角閃石結晶所佔比例及其結構探討。

(一)、 礫石中角閃石結晶所佔之比例：

1、 結果

表 1 角閃石結晶在岩石中所佔之比例統計表

編號\統計	角閃石	疑似角閃石	總數	百分比
1	31	9	339	9.1~11.8
2	19	16	373	5~9.4
3	12	5	316	3.8~5.4
4	35	12	439	8~10.7
5	30	9	407	7.4~9.6
6	17	9	393	4.3~6.6
7	21	9	294	7.1~10.2
8	18	6	298	6.0~8.1
9	11	5	308	3.6~5.2
10	20	10	310	6.5~9.7
合計	214	80	3477	6.2~8.5



圖 22 顯微鏡下的安山岩顆粒(0.297~0.210mm)，圖中的黑色顆粒為角閃石(放大倍率 40X)

2、 發現：

- (1)角閃石在此安山質的火山角礫岩中所佔的比例大約是 7.4%，每塊岩石略有差異，從 4%~10%都有。

(2)打碎後的角閃石顆粒六角柱狀和光澤等特性多相當明顯，顯示其有一定純度。

(二)、使用立體顯微鏡觀察角閃石：

1、結果

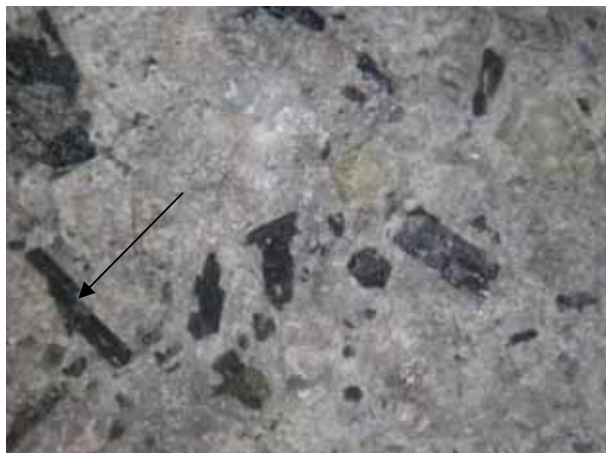


圖 23 左下角有受力錯開的角閃石(40X)

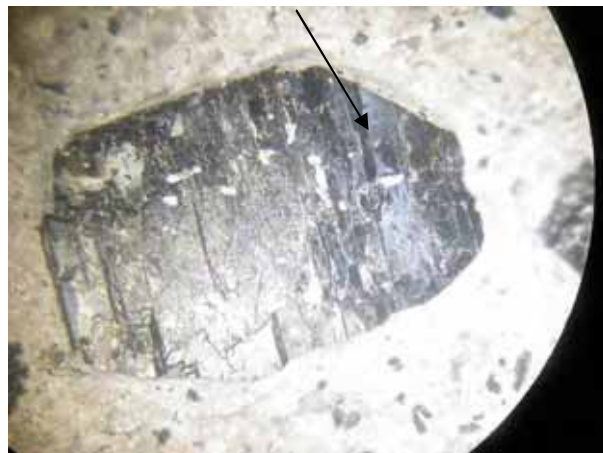


圖 24 可看出角閃石的結晶呈現柱狀 (40X)



圖 25 有部分柱狀結晶受力錯開(40X)

2、發現

- (1)結晶多為柱狀，皆朝同一方向排列，兩組解理明顯，有部分結晶斷裂或是受力錯開，其斷裂面不平整。
- (2)部份結晶排列方向與岩石表面夾角甚大，可以看出不同軸上的破裂情形。
- (3)角閃石較大的結晶群落並非全部朝向一個方向，而是同一塊小區域的柱狀結晶排列方向相同，而整塊結晶沒有固定的排列方向。
- (4)部份較大的結晶群落雜質多，呈白色塊狀、顆粒狀、條狀或柱狀，與角閃石緊密連結，有時也會出現在角閃石的縫隙中，其成分可能為長石。
- (5)雜質較多的結晶只有少數區域有較完整的晶形，其它地方有些只能勉強辨出柱狀，而其它地方更可能只有黑色顆粒而沒有明顯晶形，沒有反光的現象，可能是純度不高所造成。
- (6)角閃石少有大片平整的晶面，表面多崎嶇不平沿解理面破裂嚴重，甚至部份柱狀結晶有缺損，可能是其結晶部分鍵結較弱，容易破碎。

(7)許多結晶相對於周圍岩石都有凹陷的現象，可能是其抬升至陸地後，由於結晶較周圍岩石脆弱，而受海水的差異侵蝕所致。

(8)被侵蝕的結晶有許多縱向溝紋，可能是海水夾帶泥沙沿結晶破裂的方向侵蝕的結果。

(9)在結晶柱狀朝向的垂直方向上之裂痕多為鋸齒狀。

(10) 出現在周圍岩石的裂痕上或破裂面上常有結晶。

(三)、使用偏光顯微鏡觀察角閃石：

1、結果



圖 26 偏光顯微鏡下（平行偏光）安山岩（左下）及富角閃石團塊（右上）

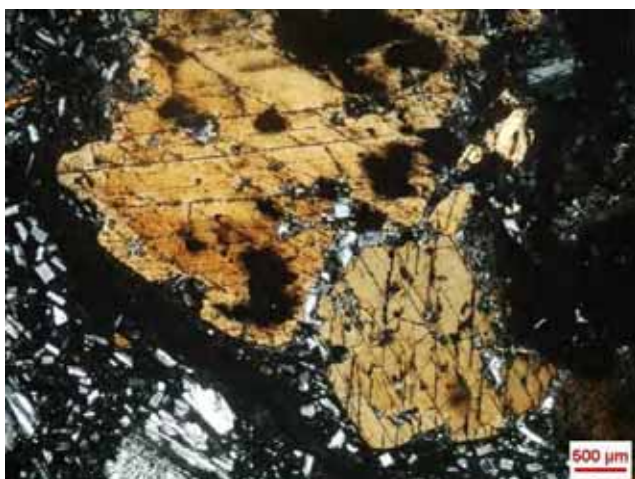


圖 27 偏光顯微鏡下（正交偏光）安山岩（左下）及富角閃石團塊（右上）



圖 28 偏光顯微鏡下（正交偏光）可見安山岩主要由斜長石組成，少數之暗色礦物以角閃石及輝石為主

2、發現：

(1)角閃石在正交偏光下明顯的和周圍岩石不同，更容易看出兩者的區別。

(2)正交偏光下，角閃石呈褐色至黃褐色。其中可看出有兩組破裂方向，一個細長且裂面平整，裂痕亦延伸較完整，另一個較粗糙而裂面鋸齒。

(3)其岩體脆弱而不易製成玻片標本，角閃石與周圍岩石接觸帶尤易鬆動。

(四)、製作角閃石示意模型：(參考文獻：玖、附錄)

- 1、製作原因：從角閃石結構平面圖中很難描述填充位址。在空間中的位置及佔位狀況，為了能更明瞭角閃石的立體結構以及在實驗結果的說明上更為容易，於是我們製作了角閃石結構模型。
- 2、角閃石的特性：參照玖、附錄
- 3、角閃石結構圖

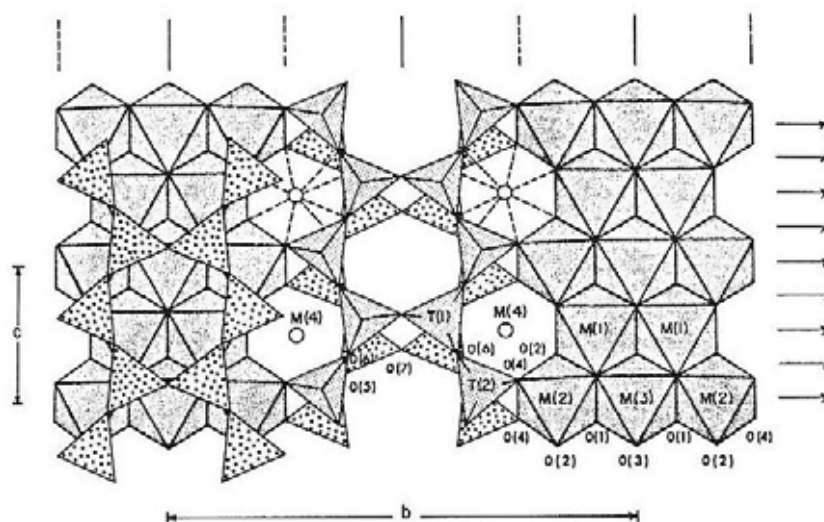


圖 29 角閃石在 a 軸投影之結構圖。在此結構圖中，可看出角閃石結構中陽離子佔位情形。包括 T 位址、M1、M2、M3、M4 位址以及 A 位址（取自 Hawthorne,1983）

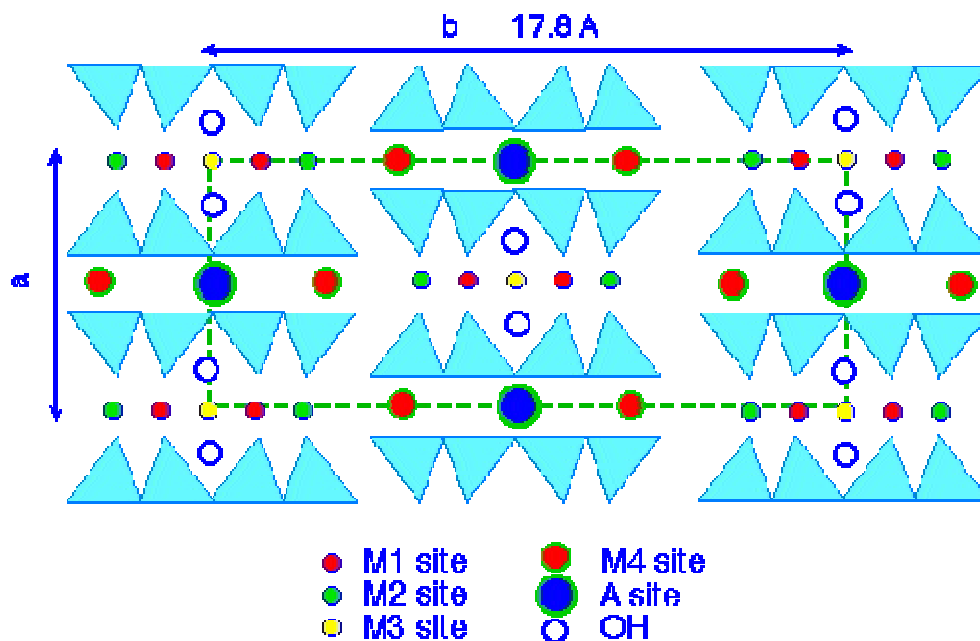


圖 30 從 a 軸- b 軸剖面俯視角閃石(取自 The University of Melbourne : school of earth science)

4、自製角閃石示意模型 1



圖 31 角閃石示意模型，紅色保麗龍球代表 A site，藍色保麗龍球代表 B site，黑色保麗龍球代表 C site，而黃色保麗龍球則代表 D site

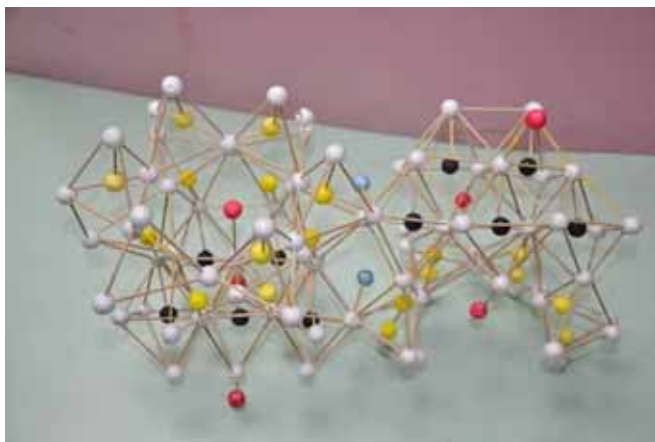


圖 32 角閃石示意模型，五個黑色保麗龍球由左而右分別是 C site 中的 M2 site、M1 site、M3 site、M1 site、M2 site

5、自製角閃石示意模型 2（改良版）



圖 33 新版角閃石示意模型，OH 是中間紅白色的保麗龍球，A 位址為紫色，B 位址為藍色，C 位址中的 M1 位址是黑色，M2 位址是綠色，M3 位址是黃色。



圖 34 新版角閃石結構示意模型，此圖為角閃石在 c 軸的投影(即 a、b 剖面)，圖中黑線為角閃石解理的破裂方向

(五)、角閃石結晶結構探討之討論。

- 1、觀察到的角閃石純度較高者解理發育明顯，可以大約看出 56° 和 124° 的夾角，同一簇結晶排列方向一致呈現平行排列的黑色柱狀結晶，且具有光澤。
- 2、雜質較高者晶形不完整，光澤亦不明顯，會和可能是長石的白色顆粒錯雜排列。
- 3、安山岩中的角閃石較大的結晶群落形成的可能原因為：一開始岩漿處的位置冷卻較慢，但溫度較高，於是熔點高的角閃石析出結晶或由其他礦物晶包溫反應序列而得角閃石，再形成較大的結晶群落，而後可能因接觸海水等原因快速冷卻而剩下的礦物形成微晶質的石基。
- 4、角閃石的結構為雙鏈狀的矽氧四面體堆疊起來，在雙鏈間形成不少的位址供金屬離子填充，離子填充較少處強度較弱，是角閃石較易斷裂之處。
- 5、角閃石有 a、b、c 三軸，其中 c 軸是矽氧四面體雙鏈延伸的方向，最為強韌不易斷裂。
- 6、將角閃石投影在 a、b 軸平面上可以發現鏈結強度最弱的 a、b 位址的排列在此平面上排成菱形，在斷裂時恰可造成 56° 和 124° 的解理，更能由 a、b 位址的斷裂畫出晶胞的形狀為六角柱狀，也驗證了巨觀上觀察到的結構。
- 7、找出角閃石的結構及各鏈結強度的差異，可以應用於裂痕方向的分析，較弱的鏈結應較易斷裂。
- 8、從偏光顯微鏡觀察角閃石，切片可見兩組裂痕。角閃石平行 c 軸方向因多長鏈而易生裂痕，其裂痕多平整貫穿，而另一方向的裂痕應是由應力造成的，該方向結構較堅固，使其裂痕粗大而不平整。
- 9、從結構的觀察中我們認為角閃石應該會容易沿著 a、b 軸上 a、b 位址的位置形成裂痕，這樣的裂痕從 a、b 兩軸方向俯視為皆互相平行的裂痕，而從 c 軸往下看則可發現有兩組互相平行的裂痕把角閃石分割成許多小菱形。

三、活動(三) 角閃石與周圍岩石裂痕方向測量與統計

(一)、依據兩組節理夾角推測出的受力方向結果。(依據第 7 頁圖 13.14 之理論)

表 2 依據兩組節理夾角推測出的周圍岩石受力方向統計表

	不可辨別	北北西	北北東	西北西	東北東
岩石受壓應力方向	10	0	1	7	1
%	53%	0%	5%	37%	5%

註:不可辨別者代表其無兩組明顯的節理

表 3 依據兩組節理夾角推測出的單一結晶受力方向統計表

	不可辨別	北北西	北北東	西北西	東北東
結晶受壓應力方向	34	3	3	6	1
%	73%	6%	6%	13%	2%

註:不可辨別者代表其無兩組明顯的節理

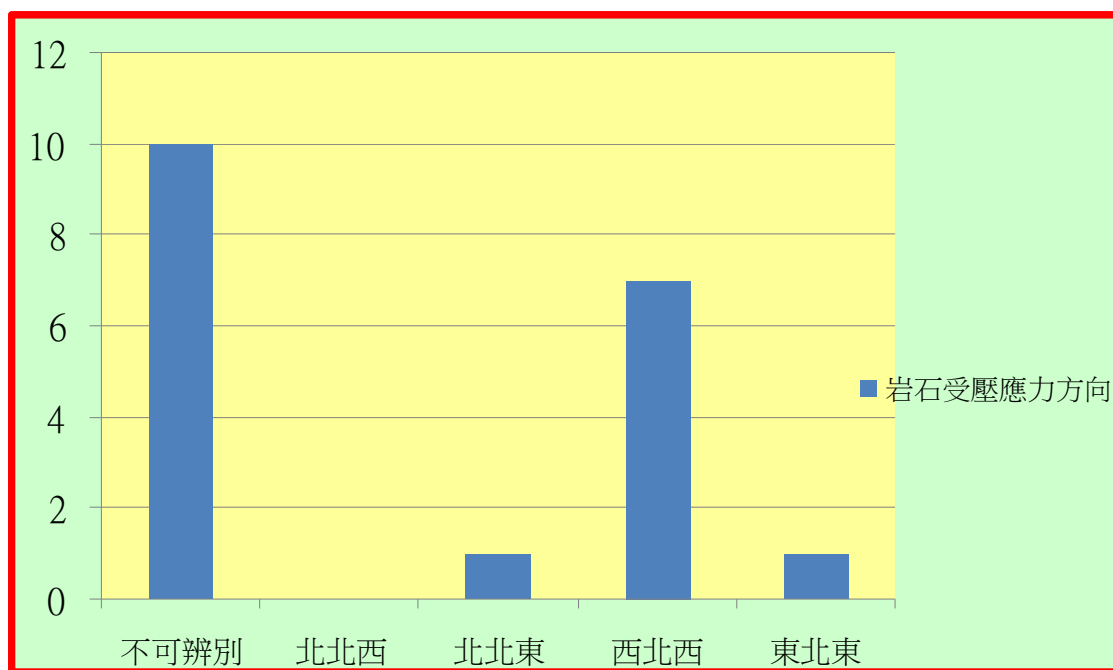


圖 35 依據兩組節理夾角推測出的周圍岩石受力方向統計圖 (個數)

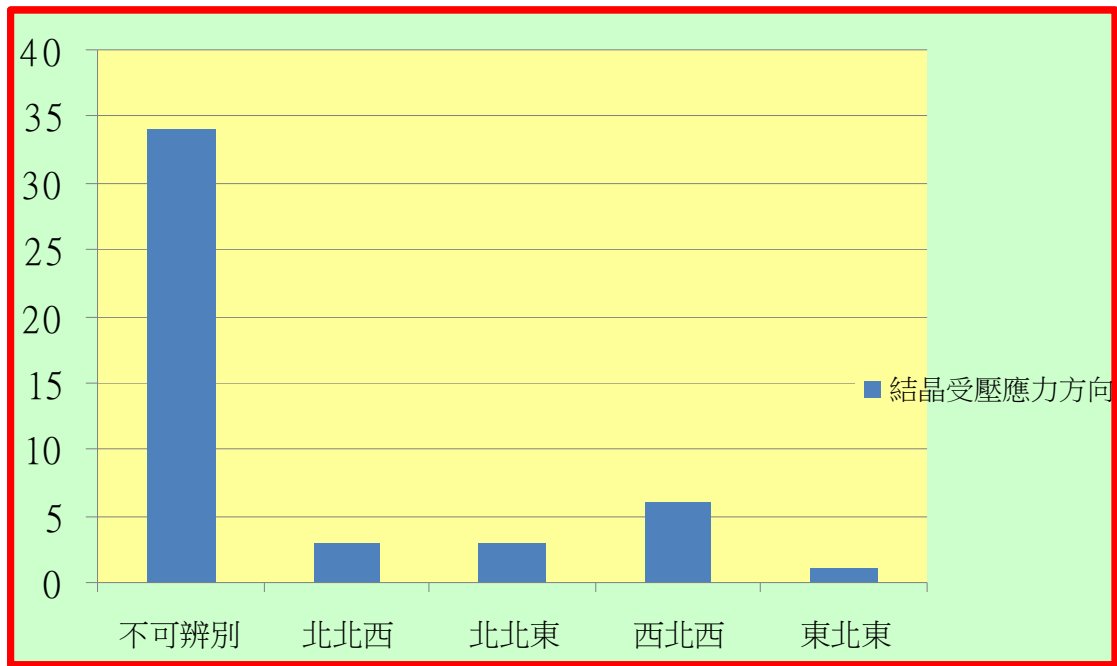


圖 36 依據兩組節理夾角推測出的單一結晶受力方向統計圖（個數）

(二)、問題與改進

- 1、能以兩組節理判斷出受力方向的結晶之百分比不足，尚無法說明破裂的趨勢，還需要其他統計方式輔助。
- 2、於是我們將所有裂痕依照其破裂方向進行加總，並計算裂痕在各方向上的百分比。

(三)、加總後的裂痕方向統計

表 4 周圍岩石加總後的裂痕方向統計表

		東西向	南北向	東北西南向	東南西北向
破裂的方向性	顯著	9	3	2	9
	些微	8	5	9	7
所占比例	只考慮顯著	39%	13%	9%	39%
	全部	33%	15%	21%	31%

表 5 角閃石結晶加總後的裂痕方向統計表

		東西向	南北向	東北西南向	東南西北向
破裂的方向性	顯著	22	16	13	22
	些微	4	5	5	7
所占比例	只考慮顯著	30%	22%	18%	30%
	全部	28%	22%	19%	31%

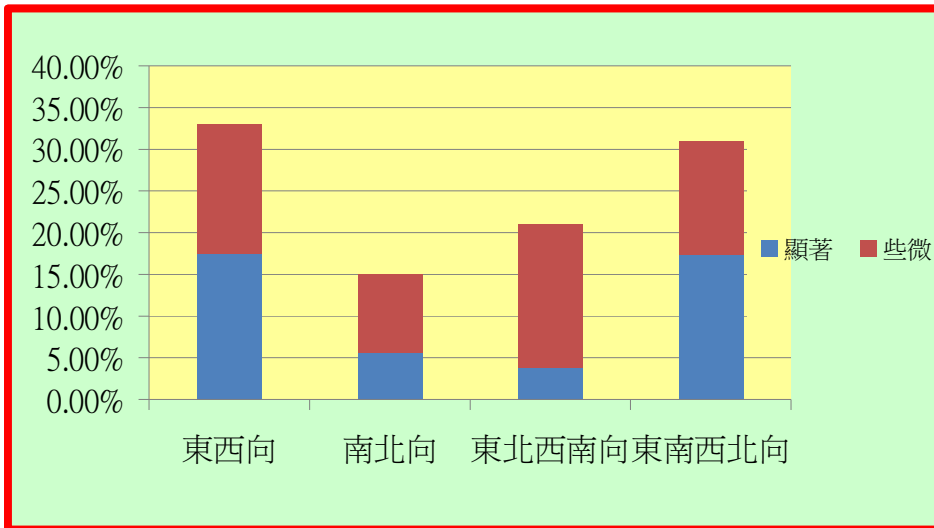


圖 37 周圍岩石加總後的裂痕方向統計圖

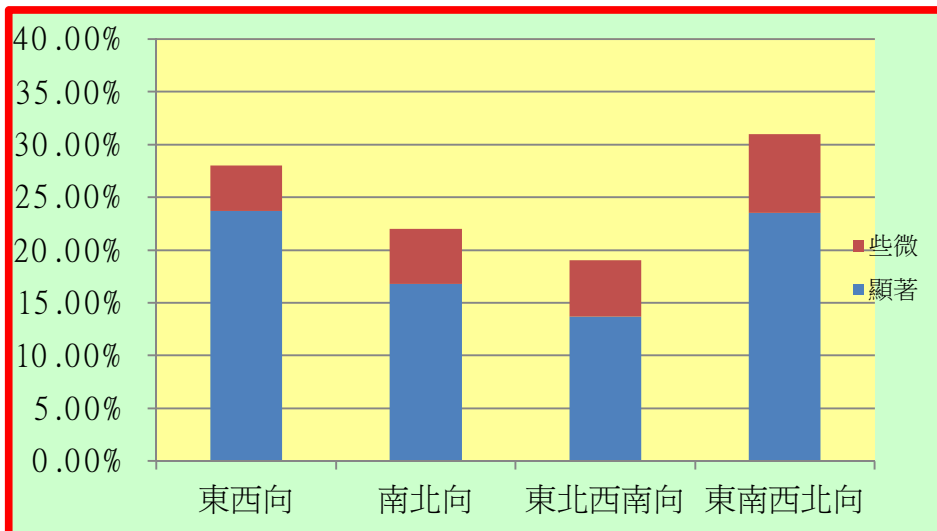


圖 38 角閃石結晶加總後的裂痕方向統計圖

(四)、 從文獻中探討裂痕方向和當地板塊受力的關係。

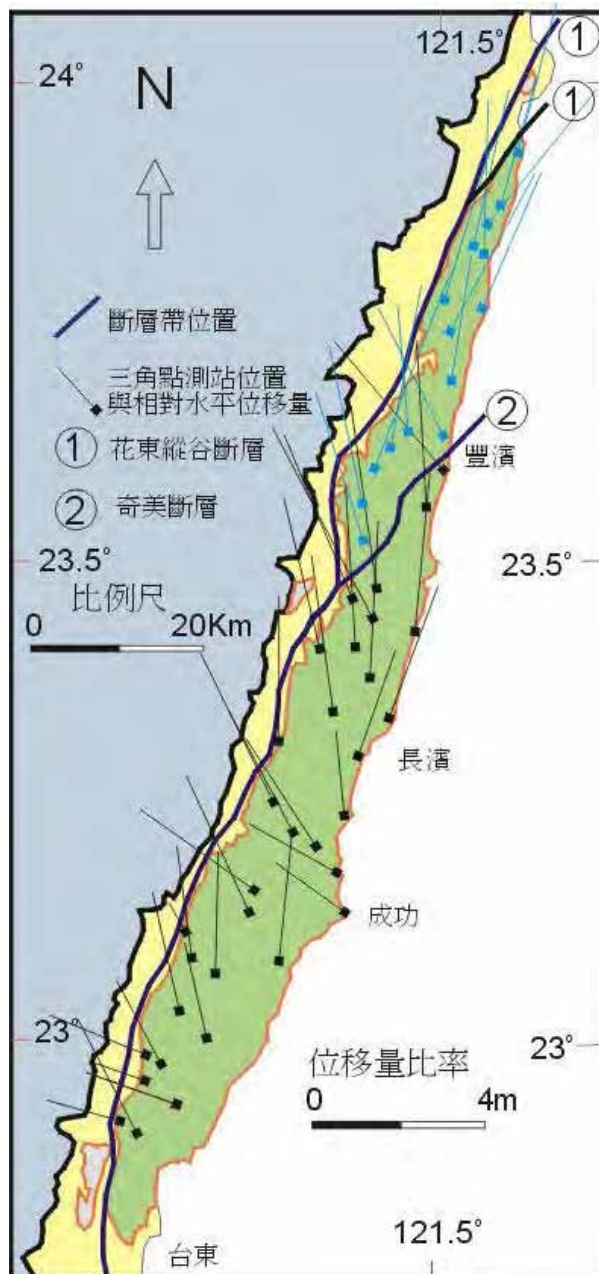


圖 39 根據 1914 年至 1979 年之間相隔約 60 年的三角點測量資料，可以發現海岸山脈相對中央山脈的移動是以花東縱谷斷層為界，但海岸山脈的變動亦以奇美斷層為界，將海岸山脈劃分為南北兩段，相對於中央山脈的水平位移方向有極大的差異；北段以北偏東 10° 方向移動，南段為北偏西約 20° 方向移動。(取自阿山的地科教室)

(五)、 角閃石與周圍岩石裂痕方向討論

- 1、 依照兩組所夾銳角($<60^\circ$ 為佳)方向為受壓應力方向的推斷，能鑑別出的受力方向的角閃石結晶大約只有 3 成，數量並不是很多，其中以西北西最多，約占了可以辨別方向者的一半即總數的 13%。
- 2、 周圍岩石的大約有一半可判定出受力方向，而可鑑別出者幾乎都是西北西-東南東方向(佔總數的 37%)，和文獻資料中當地的斷層方向、擠壓方向的資料相符。
- 3、 在所有裂痕的統計資料中，周圍岩石的趨勢比較顯著。東西向和東北西南向所

占百分比約各為 40%，而南北向和東北西南向所占比例各只有約 10%；而角閃石結晶的趨勢較不顯著，東西向和東北西南向約各占 30%，而南北向和東北西南向則各占約 20%。

- 4、從角閃石結晶破裂方向統計數據得知東西向的裂痕佔全部裂痕約 28%~30%，而東南-西北向的約 30%~31%，推測最可能應力方向為東南東-西北西。而周圍岩石東西向的裂痕以 33%~39%，東南-西北 31%~39%最明顯，推測壓應力方向與角閃石晶體一致。
- 5、由周圍岩石的數據，可知此地擠壓的方向為西北西、東南東，和文獻吻合，而由角閃石結晶的數據也可發現可能由此方向擠壓造成的裂痕最多，但是並不如周圍岩石顯著，代表尚有其它因素造成角閃石結晶的破裂。
- 6、大部份的角閃石結晶都沿著解理方向裂開，可能在受較弱之力或非主要破碎方向之力擠壓後就會破裂，表示角閃石的結構在結晶裂痕方向上扮演重要的角色。
- 7、在觀察時發現角閃石的長柱狀方向不容易斷裂，此方向即為其 c 軸方向，為矽氧四面體雙鏈延伸之方向，鍵結強度最強。此一結果可以和文獻所述互相呼應。
- 8、角閃石的斷裂多發生於其 a、b 軸上金屬離子填充較少的 a、b 位址之處，顯示這裡的鍵結確實較弱，和角閃石結構模型相符。
- 9、在周圍岩石的破裂方向上，明顯的裂痕和擠壓方向一致，可是尚有許多不顯著的裂痕分布方向並不規則，表示還有其他地質現象如成分的均勻性會影響其破裂。
- 10、有些裂痕無法辨識其應力，在一個方向上只有一兩條、或數個小片段裂痕，可能是該方向受力後因鍵結較堅固而節理發育不良或是受侵蝕作用而產生解壓解理。
- 11、有些角閃石晶體裂痕為鋸齒狀，應是在其堅固處遇到大的應力，使其強迫順從應力斷裂，實則遷就易斷裂的方向左右鋸齒，避開較堅固的象限。
- 12、角閃石結晶抬升上陸地後，亦受到海水的侵蝕，在先前的觀察中發現角閃石有受到差異侵蝕而凹陷的現象，侵蝕後除了造成解壓張裂的現象外，也可能加深原本的裂痕。
- 13、當地地層受壓力方向為西北西-東南東(圖 39)，但因為受歐亞大陸板塊阻擋使之在垂直方向產生一組張力，這兩個力會合成 2 組斜向的剪力(圖 14)，圖 38 中的地塊向北北西飄移的現象可以以此來解釋。
- 14、產生的這組剪力也可能會導致角閃石的破碎，斜向的剪力在擠壓方向的分量會造成兩組節理(圖 13)。
- 15、角閃石除了解理容易裂開外，原本較堅固的鍵還是可能受力斷裂而形成節理。
- 16、角閃石的裂痕方向的形成並不單純，除了歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊西北西、東南東方向的長期擠壓和其造成的剪力外，也受到其解理方向、成分的均勻性和海水侵蝕等因素的影響。

四、活動(四)角閃石受壓應力破裂實驗

(一)、角閃石受壓應力破裂實驗結果：



圖 40 擠壓前的角閃石結晶



圖 41 擠壓後破碎的角閃石結晶

1、壓應力平行 C 軸的擠壓裂痕方向統計

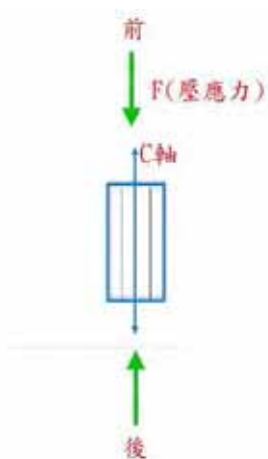


圖 42 我們將擠壓的方向定為前後向，而將其垂直方向定為左右向，以定出右圖 4 種方位此圖為壓應力平行 C 軸的擠壓，C 軸朝向為前後向

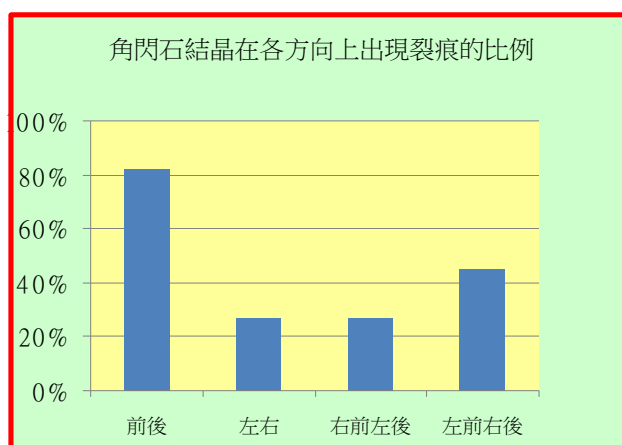


圖 43 平行 C 軸擠壓時角閃石結晶在各方向上出現裂痕的比例

2、壓應力垂直 C 軸的擠壓裂痕方向統計

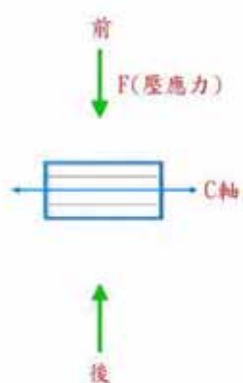


圖 44 我們將擠壓的方向定為前後向，而將其垂直方向定為左右向，以定出右圖 4 種方位此圖為壓應力垂直 C 軸的擠壓，C 軸朝向為左右向

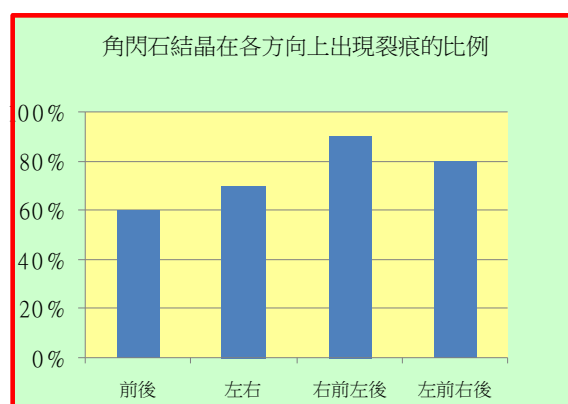


圖 45 垂直 C 軸擠壓時角閃石結晶在各方向上出現裂痕的比例

3、 壓應力和 C 軸夾 45 度的擠壓裂痕方向統計

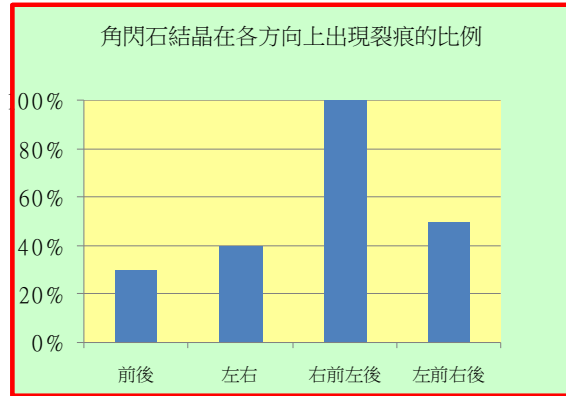
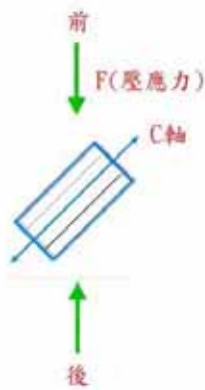


圖 46 我們將擠壓的方向定為前後向，而將其垂直方向定為左右向，以定出右圖 4 種方位此圖為壓應力和 C 軸夾 45 度的擠壓，C 軸朝向我們統一放置為右前左後向

圖 47 和 C 軸夾 45 度擠壓時角閃石結晶在各方向上出現裂痕的比例

(二)、角閃石受壓應力破裂實驗討論：

- 1、 平行 C 軸方向的擠壓使得大多數角閃石顆粒(82%)都有沿 C 軸方向(前後向)的裂痕，驗證其解理方向確實較為脆弱。
- 2、 平行 C 軸方向的擠壓也使角閃石顆粒在右前左後和左前右後方向(即節理方向)有不少的裂痕，其破裂程度較非解理與非節理方向者明顯，但在裂痕數量上較難呈現此一結果。
- 3、 在垂直 C 軸方向的擠壓上，解理和節理方向的裂痕亦較佔優勢，顯示此 2 因素確實對角閃石破裂有重大影響。
- 4、 在和 C 軸夾的 45 度角的擠壓中，其中右前左後為解理方向亦接近節理方向，故其破裂的比例達 100%，而另一組節理方向亦有 50%的顆粒破裂。
- 5、 在平行 C 軸及和 C 軸夾 45 度的擠壓中，因為解理和節理方向接近，故角閃石較容易破裂，造成其中特定方向出現裂痕的百分比明顯高於其他方向，而和 C 軸垂直者因解理和節理方向差距較大而使角閃石較不易碎裂，並使得各方向破裂比例較為接近。
- 6、 部分角閃石斷裂時會有一些垂直 C 軸的裂痕，且通常不明顯，我們認為可能是柱狀結晶在斷裂時因其形狀之故，較易沿著其橫截面斷裂，所以當角閃石相對於 C 軸產生斜向斷裂時，有時會形成垂直 C 軸和平行 C 軸的裂痕交替出現的鋸齒狀結構。
- 7、 雜質有時會影響實驗結果，若裂痕延伸時遇到結構較穩固的雜質，則可能會造成裂痕改變方向，而部分雜質如只附著在結晶表面者，則可能被裂痕貫穿。
- 8、 以此方法模擬角閃石受壓應力的情形和實際上還是略有不同，實驗室中的壓力作用較為短促而變化強烈，且範圍甚小，不能完全模擬野外大規模的地質變化，故所造成的裂痕也不會完全相同，實驗室中的裂痕較野外延伸更完整且更深入結晶。
- 9、 角閃石在顆粒受壓應力時，若解理方向和節理方向相近時，角閃石很容易從解理方向裂開，而當二者方向有一定差距時，角閃石受此二因素影響而裂開的傾向皆顯著。

(三)、 展望：

因為實驗室中模擬的裂痕破裂和實際情形還有一段距離，所以希望模擬出的擠壓情形更接近真實的情況，例如找到顆粒更大純度更高的角閃石、使用細的石英砂和角閃石顆粒膠結以模擬角閃石在周圍岩石中的狀況，以及更精密的擠壓器材，使我們能夠更精確的控制不同擠壓方向和強度，以探討應力對角閃石破裂的影響。

陸、 結論

- 一、 秀姑巒溪口左岸海蝕平台的地層屬於都巒山層的石門火山角礫岩，其中的礫石含有許多角閃石，含量約 7.4%，常可觀察到排列規則的黑色柱狀結晶群落，其晶形和解理明顯，具有光澤。
- 二、 角閃石的長柱狀方向即為其 c 軸，為矽氧四面體雙鏈延伸的方向，其鍵結強度最強，故此方向上觀察到的破裂較少且不明顯受力不易斷裂，而 a 和 b 兩軸金屬離子填充較少處較弱，會造成解理，大部份的結晶都沿著此方向裂開，表示角閃石的結構、解理在結晶裂痕方向上扮演重要的角色。
- 三、 由周圍岩石的裂痕方向可以發現此地擠壓的方向為西北西、東南東，和文獻吻合，而由角閃石結晶的裂痕方向也可發現由此方向應力擠壓的可能性最大，但是並不如周圍岩石顯著。
- 四、 角閃石結晶抬升上陸地後，一直受到海水的侵蝕，在觀察中發現角閃石有受到差異侵蝕而凹陷的現象，亦發現角閃石抵抗風化侵蝕能力較周圍岩石弱而容易破碎，故在侵蝕過程可能也會加深原本的裂痕。
- 五、 角閃石的裂痕方向成因並不單純，外力不但容易將解理方向的鍵結打斷，歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊西北西、東南東方向的長期擠壓還有機會打斷非解理方向的鍵而形成節理。
- 六、 角閃石在顆粒受壓應力時，若解理方向和節理方向相近時，角閃石很容易從解理方向裂開，而當二者方向有一定差異時，角閃石受此二因素影響而裂開的傾向皆顯著。

柒、 參考文獻

一、中文部分

- 1、 何春蓀 (1990) 普通地質學。五南圖書出版股份有限公司。台北。共 751 頁。
- 2、 宋聖榮 (2006) 台灣的火山。遠足文化事業有限公司。台北。共 202 頁
- 3、 莊文星 (1999) 台灣之火山活動與火成岩。國立自然科學博物館。台中。共 319 頁。
- 4、 黃怡禎 (2002) 礦物學。地球科學文教基金會。台北。共 686 頁譯。
- 5、 陳肇夏 (1999) 大地的結晶。中華民國礦岩協會。台北。第 29-35 頁。
- 6、 黃恩萍 (2003) 角閃石類礦物之拉曼光譜研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文。第 4~7 頁。
- 7、 劉聰桂、楊燦堯、吳文雄 (2006) 台灣的岩石。遠足文化事業有限公司。台北。第 74~99 頁。
- 8、 阿山的地科研究室
http://ashan.gl.ntu.edu.tw/chinese/GeoPark/RuiSui/index-RuiSui_for_subpage_usage.html
- 9、 <http://catalog.digitalarchives.tw/item/00/44/c0/2d.html>
- 10、 <http://digimuse.nmns.edu.tw/Default.aspx?tabid=369&ObjectId=0b00000181da5421&Domain=g&Field=ri&ContentType=Exhibit&Language=CHI&FieldName=http://ics.wrap.gov.tw/icsweb/kriver2370.asp>
- 11、 <http://taiwanpedia.culture.tw/web/content?ID=1403>
- 12、 http://www.feng-bin.gov.tw/content_edit.php?menu=20&typeid=733
- 13、 <http://www.geog.ntu.edu.tw/main/paper/r87228001/chap5-4.htm>

二、英文部分

- 1、 Hawthorne, F. C. (1983) The crystal chemistry of the amphibole: a review., *Canadian Mineral.*, vol. 21
- 2、 Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps. C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M.C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J. O., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W., Youzhi, G., (1997) Nomenclature of amphiboles, *Canadian Mineral.*, vol. 35, pp. 219-246
- 3、 The University of Melbourne : school of earth science
- 4、 <http://jaeger.earthsci.unimelb.edu.au/msandifo/Teaching/Minerals/amphibole.html>

捌、 附錄

(一)、秀姑巒溪出海口地質概況：

秀姑巒溪河口兩岸及其中央奚卜蘭島由都巒山層火山集塊岩所構成，因岩質堅硬而形成突出的地形。由附近地區的地質與構造推測大港口斷層由奚卜蘭島的西側通過，都巒山層則沿著此斷層逆衝至蕃薯寮層之上。其東側面海，受到海水的侵蝕作用與地殼隆起的影響，形成兩階海蝕平台，在海蝕平台內側並形成高度約 2 公尺的海蝕凹壁。海蝕平台上，沿著節理多發育成蝕溝，規模較大的發育成海蝕洞，高度約為 1 公尺。
(取自 <http://www.geog.ntu.edu.tw/main/paper/r87228001/chap5-4.htm>)

1. 左岸之基岩概況：

基岩	
地層	都巒山層
岩性	火山集塊岩
化石	無
岩石軟硬	硬
物理性質	顏色：黑、褐色 顆粒度：粗粒至巨礫 膠結程度：良好 硬度：硬

2. 都巒山層概況：

左岸屬都巒山層中的石門火山角礫岩，形成年代約在 550~1660 萬年前，即中新世中期至中新世晚期。其組成礫石大小變化相當大，數公分到十公尺都有，且有離開奇美地區顆粒越來越小之趨勢，推測奇美地區可能是這些火山碎屑物的來源地。石門火山角礫岩含有厚層的火山角礫岩、礫岩及凝灰岩和薄層火山熔岩流，顯示其爆發指數相當高，為淺於氣泡碎屑度的淺海所噴發。其均質火山角礫岩主要含有緻密、多氣孔的兩輝安山岩，主要斑晶為斜長石、普通輝石和紫蘇輝石，石基為隱晶質到微板狀斜長岩，常含多量輝長石捕獲體和角閃石的巨晶。(整理自宋聖榮 2006)

(二)、角閃石特性(取自黃怡禎 2002)：

- 1、單斜晶系。
- 2、結晶柱狀或纖維狀，粗至細粒狀。
- 3、二組解理，交 56 度。
- 4、硬度 5~6。
- 5、比重 3.0~3.4。
- 6、玻璃光澤纖維狀者呈絲絹光澤。
- 7、深綠至黑色，半透明，薄稜邊處透光。
- 8、火層岩與變質岩內，角閃岩的辨識礦物。
- 9、常出現於中性的火成岩中，如安山岩。

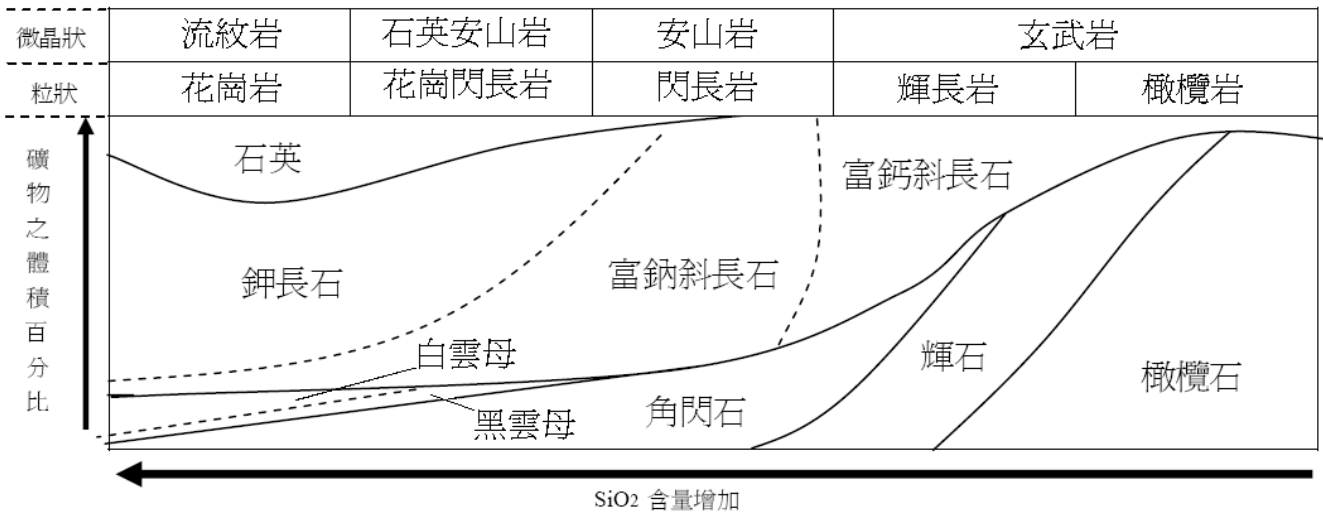


圖 48 不同種類火成岩中各礦物百分比變化圖由此可知安山岩中角閃石含量約佔 20%以下 (修改自網路)

(三)、從文獻中初步探討角閃石的結構(主要取自黃恩萍 2003)：

角閃石結構為平行c軸 Si_4O_{11} 之雙鏈矽酸鹽類礦物，含有結晶水。因其結晶構造可容納多種離子進入或進行置換 (substitution)，故使其化學成分變化極為複雜。

角閃石礦物分子式之通式為 $AB_2C_5T_8O_{22} (OH)_2$ ，其中A表示A-Site，與氧(O)與(OH)形成十到十二配位，在單位化學式中至多提供1個位置。B提供2個M4位置，為六到八配位。C為六配位提供5個位置，包括：2個M1、2個M2以及1個M3，彼此藉著共享稜邊形成平行於c軸之八面體帶狀構造。T則主要為鏈狀結構中之四面體配位，提供8個位置，另外OH群則位於鏈間形成的大洞中心 (黃怡禎，2002)。各種離子佔位情形詳見表6。

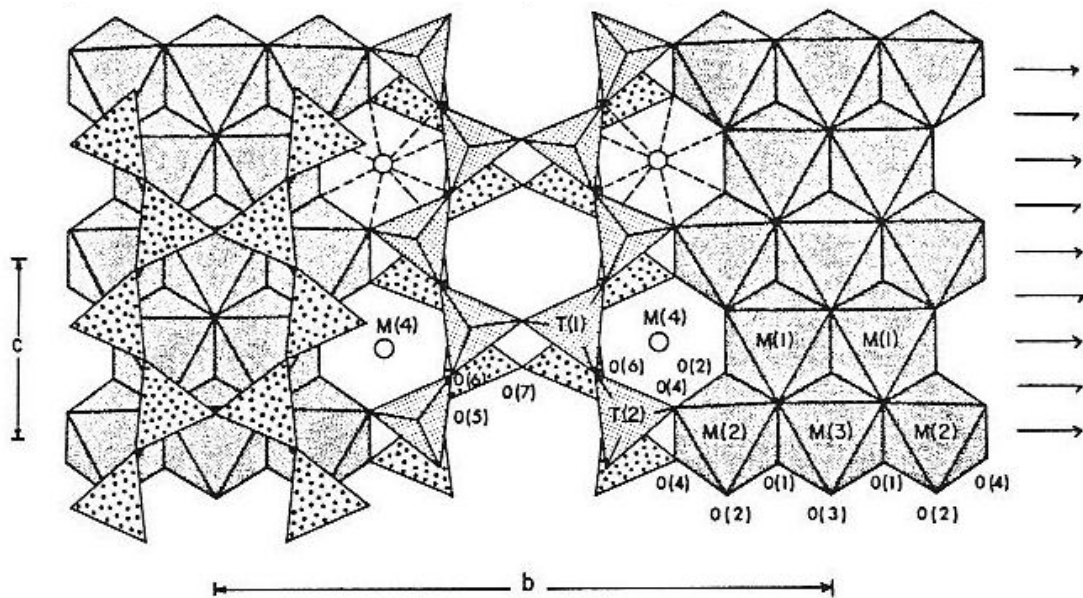


圖49 空間群為 $C2/m$ 的角閃石，在a軸投影之結構圖。在此結構圖中，可看出角閃石結構中陽離子佔位情形。包括T位址、M1、M2、M3、M4位址以及A位址 (取自Hawthorne,1983)

表6 角閃石類礦物中離子佔位情形 (Leake et al., 1997)

陽離子在角閃石晶體內之佔位順序，必須遵守下列原則：(一)T位置總和為8且Si離子為優先填充，再者為Al，再者為Ti，在不考慮特殊狀況下取代Si者往往不超過2個位置。(二)T位填充後，過剩的Al和Ti會填充至C位置，然後是三價的離子 Zr^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} ，以及 Mg , Fe^{2+} , Mn^{2+} 等L-type 離子，若未達5時，則Li離子也可充填在此位置。(三)當C位置填滿後，剩下的離子就進入B位置，然後填入Ca離子、再填入Na離子。(四)若Na過量，就會填充至A位置，或許還有K離子的加入，但總合不能超過1，相對而言，若Na的量不足以及無K離子的進入，此時A 位置則會形成空位 (Leake et al., 1997)。

離子型態	離子	可佔位置
	□(空位)和K	只佔A
	Na	可佔A或B
	Ca	只佔B
低價電離子 (L-Type)	Mg, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Li和其他少數離子 如：Zn	可佔C或B
中價電離子 (M-Type)	Al Fe^{3+} ,和少數的 Mn^{3+} , Cr^{3+}	可佔C或T 只佔C
高價電離子 (High-valency)	Ti^{4+} Zr^{4+} Si	可佔C或T 只佔C 只佔T
陰離子	OH, F, Cl, O	佔OH位置

從上述看來，角閃石類礦物離子之間雖然容易互相取代，卻也必須遵守基本的結晶原則，此原則與離子價數及離子大小有密切的關係，並非任何離子皆可隨意進入空間位置中。以鐵鎂離子為例， Fe^{2+} 及 Mg^{2+} 半徑相近且價數相等，就容易互相置換。此外 Fe^{3+} 及 Al^{3+} 進入C位置取代部分 Fe^{2+} 及 Mg^{2+} ，也是因為 Fe^{3+} 的半徑為 0.654\AA ， AlVI 的半徑為 0.53\AA ，前者與 Mg^{2+} 半徑只差 0.075\AA ，而後者雖然相差較大，但是當溫度升高之後由於離子振盪幅度加大，有增加離子半徑的效果，還是可以佔據C位置。同樣情形，雖然 AlIV 的半徑 0.39\AA 和 SiIV 的半徑 0.26\AA 相差甚大，但是當溫度增高之後， SiO_4 四面體的中心空間加大，或是 Si-O 鍵比較鬆動，就可以有較多的取代。

換句話說，一些Al明顯取代Si的礦物多半表示生成於較高溫的環境。另外在壓力方面的影響，以藍閃石為例，在高壓環境下C位置的空間被壓縮，正好適合 Al 離子佔據，所以有五分之二為Al所充填，但為了維持電價不變， Na^+ 就容易取代B位置上的 Ca^{2+} ，這種置換方式是很自然的在進行著（陳肇夏，1999）。

因此，觀察角閃石中離子互相取代的情形，亦可以了解地質環境的溫度及壓力的變化。

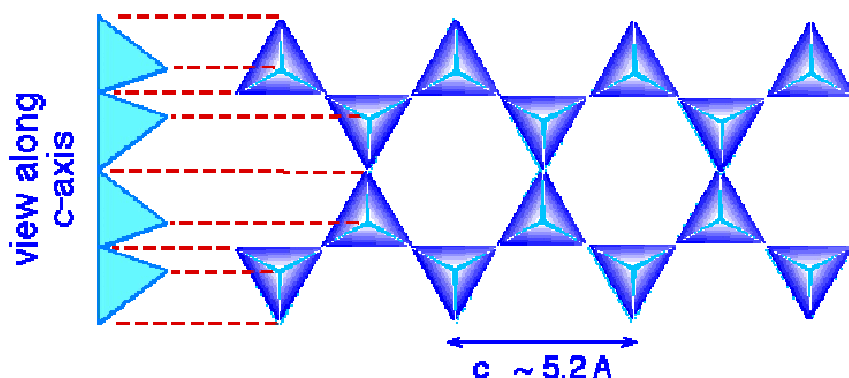


圖 50 從 b 軸-c 軸剖面俯視角閃石的雙鏈狀結構(取自 The University of Melbourne : school of earth science)

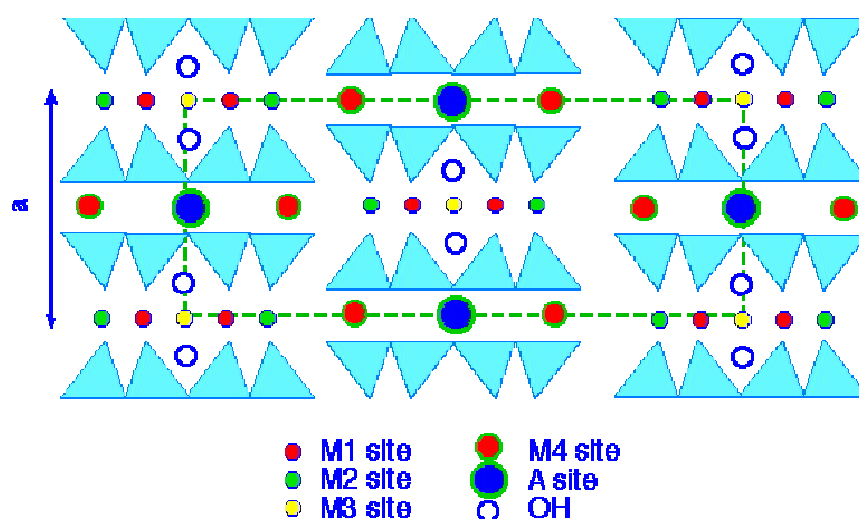


圖 51 從 a 軸-b 軸剖面俯視角閃石(取自 The University of Melbourne : school of earth science)

【評語】 040507

秀姑巒溪口角閃石之破裂成因之探討，極具鄉土性與自然環境探索性的科學研究。學生透過自然觀察、量測分析其與板塊擠壓錯動極弱面的關聯。唯大範圍的板塊互動與小尺度角閃石破裂面的關係推論可能還需更明確的證據。分析樣本樹若能增加，對統整的推論會較有說服力。野外工作多，會自製設備及利用簡單的顯微鏡進行研究分析，觀察結果有意義，團隊合作佳，鄉土性高。