

太魯閣國家公園  
立霧溪峽谷岩性及岩石成因  
片麻岩篇

計畫主持人：王執明

專任研究助理：謝玄聰

內政部營建署委託  
中國地質學會研究  
中華民國七十八年三月

楔子	_____	i
第一章 摘要	_____	2
第二章 地質概述與岩層分布	_____	
第一節 地理概述	..... 4	
第二節 岩層分布	..... 7	
第三章 岩石的變質作用	_____	
第一節 岩石的種類	..... 11	
第二節 變質作用的種類	..... 11	
第四章 顯微鏡下的世界	_____	
第一節 偏光顯微鏡下的礦物觀察	..... 14	
第二節 礦物個論	..... 14	
第五章 礦物化學分析	_____	
第一節 電子微探儀	..... 30	
第二節 礦物分析	..... 31	

## 第六章 多次變質作用

---

第一節	片麻岩的變質作用	
	與礦物的化學	..... 50
第二節	片麻岩中變質作用	
	指標礦物個論	..... 51
第三節	多次變質作用	..... 55

## 第七章 太魯閣峽谷之地史

---

第一節	化石證據	..... 65
第二節	放射性定年資料	..... 65
第三節	歷史背景	..... 67
第四節	太魯閣地史	..... 69

# 楔子

石頭，在一般人眼中只不過是一堆了無生氣、平躺在河床上——灰白、其貌不揚的傢伙是也。沿著西部縱貫線，無論是高速公路旁青灰色的層狀岩石或是林口台地上的紅土層，甚至高雄壽山塵天漫漫的石灰岩層、你我舉目所見皆是色調如此單存的岩石，難道所有的岩石都長的這般嗎？繞過東北角，走過蘇澳，無論是行車於太平洋旁的蘇花公路上或是穿梭在山洞連綿的北迴鐵路上，你會發現周圍的岩石景觀變了，看到的岩層或是呈薄片狀緊密地排列壓著，或是呈雪白渾厚巨大的大山壁狀，或是可以清楚望見其中碩大的結晶顆粒，這些岩石群是由不同於西部麓山帶的變質岩所組成。隨著鐵、公路不斷的南行來到了太魯閣峽谷，我們正不自覺中穿入了時光隧道，在時間坐標上，我們已往回走了兩億多年——這比恐龍最早出現的時代都還久遠，最令人咋舌的是，我們腳踏的這塊岩石是來自數千公里外的赤道，在兩億多萬年前，隨著一場地質大變動，它誕生了，經過了漫長的豐富之旅，一份曠世不朽、睥睨萬物的完美作品——太魯閣峽谷終於完成了。

# 第一章 摘要

本工作之目地，是為研究峽谷中片麻岩的岩性及其成因。由偏光顯微鏡下的觀察，電子微探儀的礦物化學分析及多次變質作用的証據，比對中國東南沿海及東南亞之地質特性，再輔以同位素的定年資料，進而探討形成片麻岩的構造運動及其地史。

本區的片麻岩可以依照原岩成因的不同而分為一．溪畔片麻岩；二．開南崗片麻岩。前者是由入侵的火成岩體經變質而成的，外形上，不具有強烈之葉理，顏色灰白，結晶顆粒則由中粗到粗粒皆有；後者是由沉積岩變質而成的，具有強烈的葉理，顏色由青灰到灰色，結晶顆粒的分布則粗、細皆有。顯微鏡下的觀察發現許多礦物都具有環帶狀現象（zoning），化學分析也顯示不同顏色的環帶有著不同的元素含量，根據這些証據，歸納出這些片麻岩曾受過三次強度不同的變質作用，稱為  $M_1$ ， $M_2$ ， $M_3$ 。第一期變質是屬於中低度變質相，溫度與壓力狀態較不明顯；第二期變質則屬於高度變質相，其中又有兩種可能的狀態，當水壓等於全壓的狀態下，壓力則為 3.5 到 7.3 千巴，溫度則為 620 °C 到 725 °C 之間，當水壓等於 0.6 倍全壓時，壓力為 4.0 ~ 8.3 千巴，溫度則為 670 °C 到 750 °C；第三期變質屬於低度變質相，壓力在 4.1 到 4.5 之間，溫度則由 420 °C 到 480 °C。

中國東南沿海及東南亞各地的地質分布與大南澳地區的化石証據、定年資料，可以推定出太魯閣的歷史：

在兩億多年前的印支運動後，中國東南大陸板塊開始侷裂，形成了邊緣海，及一塊微的陸板塊（以下稱為大南澳古陸）。在低緯度的古陸周圍有大量的碳酸岩沉積，在邊緣海中則沉積了許多半深海相的沉積物。

在一億三千萬年前早期燕山運動作用，使大南澳古陸再度向中國東南古陸推進，將天祥海消滅掉，存在大陸間的沉積物則被擠壓、變形，並且將許多海洋板塊的超基性岩石推上了陸地。

在八千萬到九千萬年前的晚期燕山運動則造成了劇烈的火成活動，中國東南沿海及溪畔地區都有火成入侵的証據。到了新生代早期，南中國海板塊張裂並且將古台灣島、民多羅島及北巴拉望分離，將古台灣島推向北去，其他則向南推。

到了四百萬年前的蓬萊運動，菲律賓海板塊撞上了古台灣島，造山運動以及變質、變形作用，使得中央山脈高聳，並且在地殼劇烈抬昇與河流下切迅速的作用下，太魯閣終於形成了。

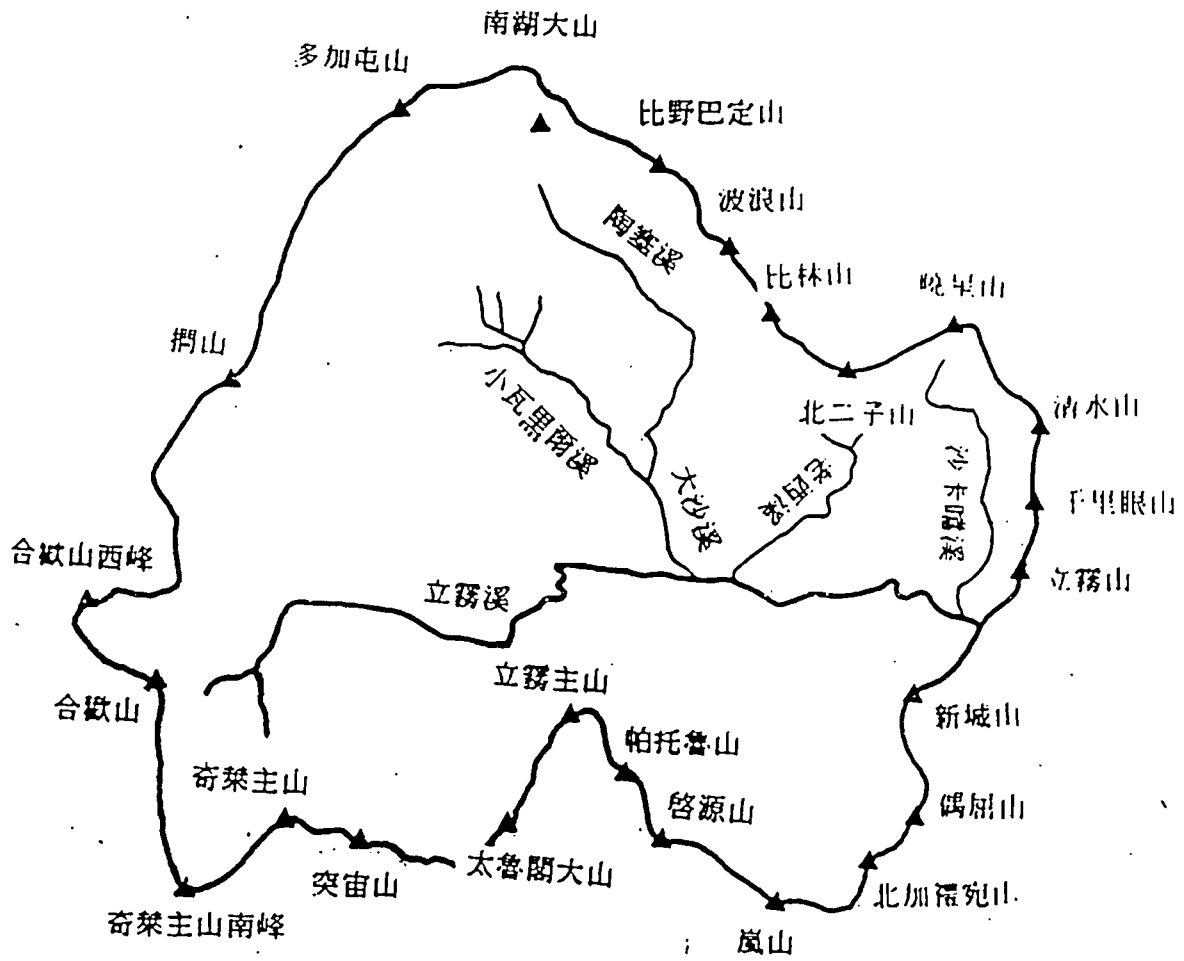
# 第二章 地質概述與岩層分布

## 第一節 地理概述

鳥瞰整個太魯閣國家公園除了地理景觀有它吸引人的一面外，在地質學家的眼中它擁有最古老多變的地層最複雜的地質構造以及最撲朔迷離的歷史。區內的太魯閣峽谷，每年更是吸引無數的觀光客前來一睹它的廬山真面目。

太魯閣國家公園範圍北以南湖大山為界向東南沿著稜線接比林山、北二子山、曉星山至清水山。東則沿清水山、千里眼山、新城山一路往南到北加裡宛山。南則由嵐山、帕托魯山、立霧主山、太魯閣大山以至奇萊主山南峰連成一條曲線。再由奇萊山南峰往北經合歡山、合歡西峰、合歡北峰的天然稜線向北延伸經捫山、多加屯山與南湖大山形成一個面積廣達九百四十八平方公里的多元化公園（圖一）。這個公園內包含了第三紀的板岩區以及台灣島最古老的地層——古生代晚期到中生代的大南澳變質岩群（圖二）。在佔地如此廣闊的土地上，立霧溪——這個區域中最閃爍的一條星河，它造就了舉世讚嘆的太魯閣峽谷。

立霧溪，發源於合歡山與奇萊主山北峰之間，向東切穿山脈，一路奔流至天祥附近匯集北來的陶塞溪以及西北來的小瓦黑爾溪，水勢更加地盛大。東流到了慈母橋，荖西溪加入了東流的陣容。自此以後，立霧溪流入了大理岩區及片麻岩區，曲折蜿蜒地流了十多公里，聚集了切穿神秘谷的沙卡噹溪後，滿足、無悔地流過太魯閣口的錦文橋，在新城北方流入太平洋。全長五十三公里，不過最讓人醉心觀賞的則是那自天祥以降短短的十八公里。造成這些景觀的岩層，是不可遺漏的重點，本報告主要針對台灣最古早的岩石——片麻岩，加以詳細的介紹，圖三則是表示整個太魯閣地區的岩性分布情形。

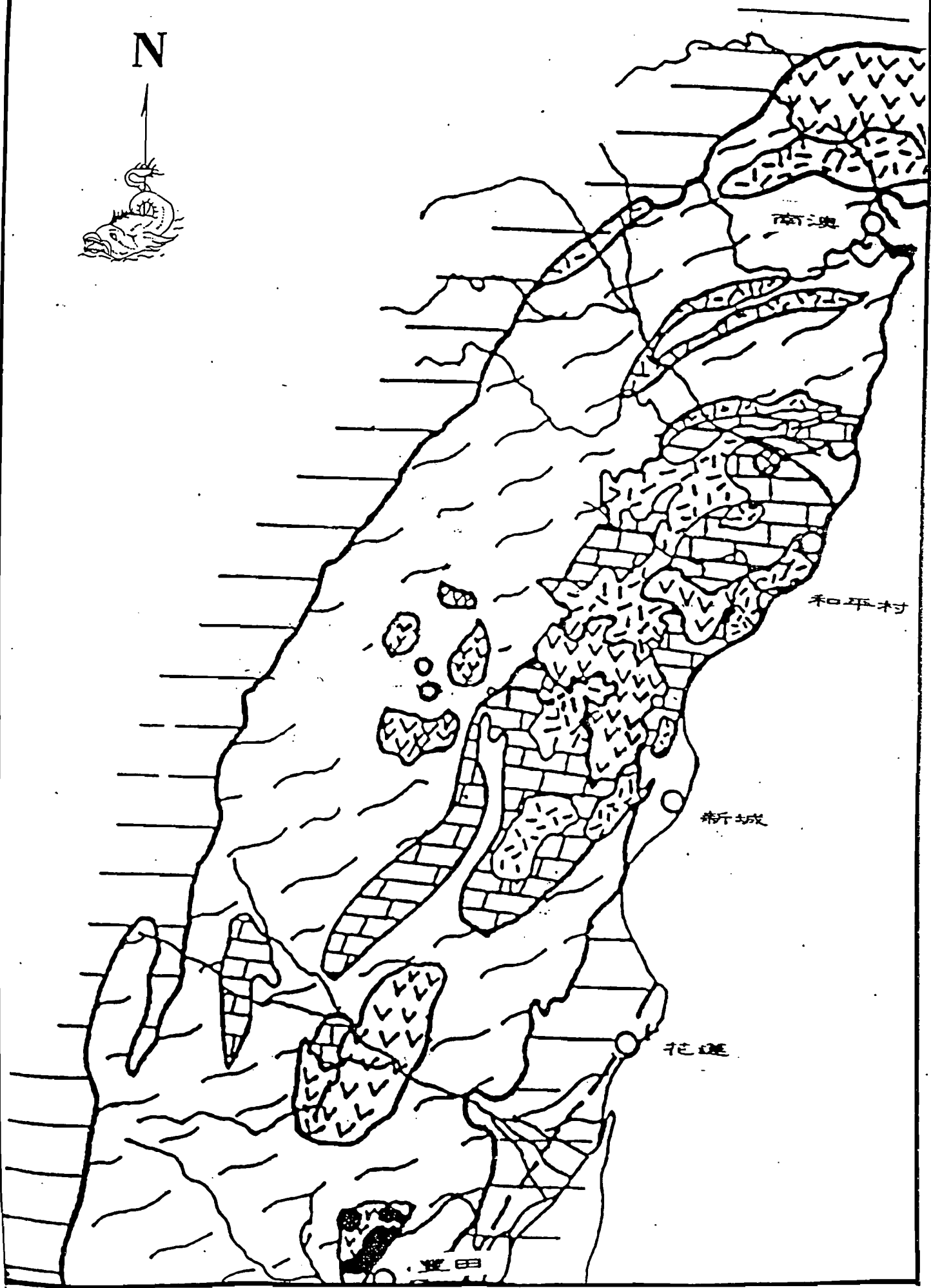
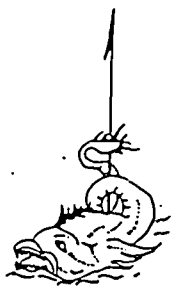


圖一 太魯閣國家公園重要山系及水系





N



高澳

和平村

新城

花蓮

雙田

## 第二節 岩層分布

太魯閣地區的片麻岩可分為二類，第一類片麻岩由南澳南方的源頭山起，到飯包尖山、開南岡溪及和平溪上游地區、和仁、清水到太魯閣口南北岸再自西出露在上溪橋及燕子口之間。這類片麻岩在外觀上顏色呈青灰到灰色，結晶顆粒則由粗自細皆有，並具強烈的葉理，因在開南溪出露，故稱開南溪片麻岩（圖版一及圖版二）。由化學

岩R及產狀，發現它的原岩是來自沉積岩，再經變質而成的片麻岩。另一類片麻岩分布於白沙橋東方一公里處向西延伸至上溪橋而止，途中經過溪畔發電場，故名曰溪畔片麻岩，是由火成岩入侵再經變質而成的片麻岩，顏色為灰白色，結晶由中粒到粗粒都有（圖版三）。在白沙橋下的河床中大理岩及片麻岩接觸面帶，發現許多外形如大理岩但內部卻已被換質的石英岩（圖版四）。除此外，這類片麻岩體中常包裹成份為綠色片岩或大理岩的捕獲岩，說明它的原岩是火成侵入岩（圖版五）。這些岩層的分布如同是散在海中星羅棋布的小島一樣。



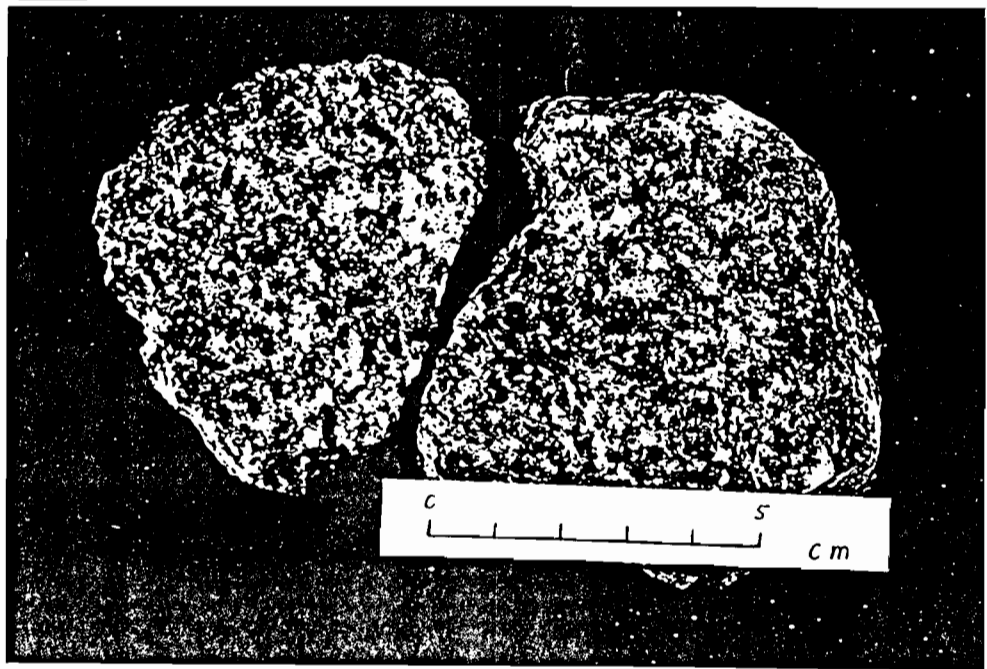
圖版一

開南崗片麻岩



圖版二

開南崗片麻岩



圖版三 溪畔片麻岩



圖版四

形如大理岩但內部已經被換質為石英岩



圖版五

在溪畔片麻岩中常見的捕獲岩

# 第三章 岩石的變質作用

## 第一節 岩石的種類

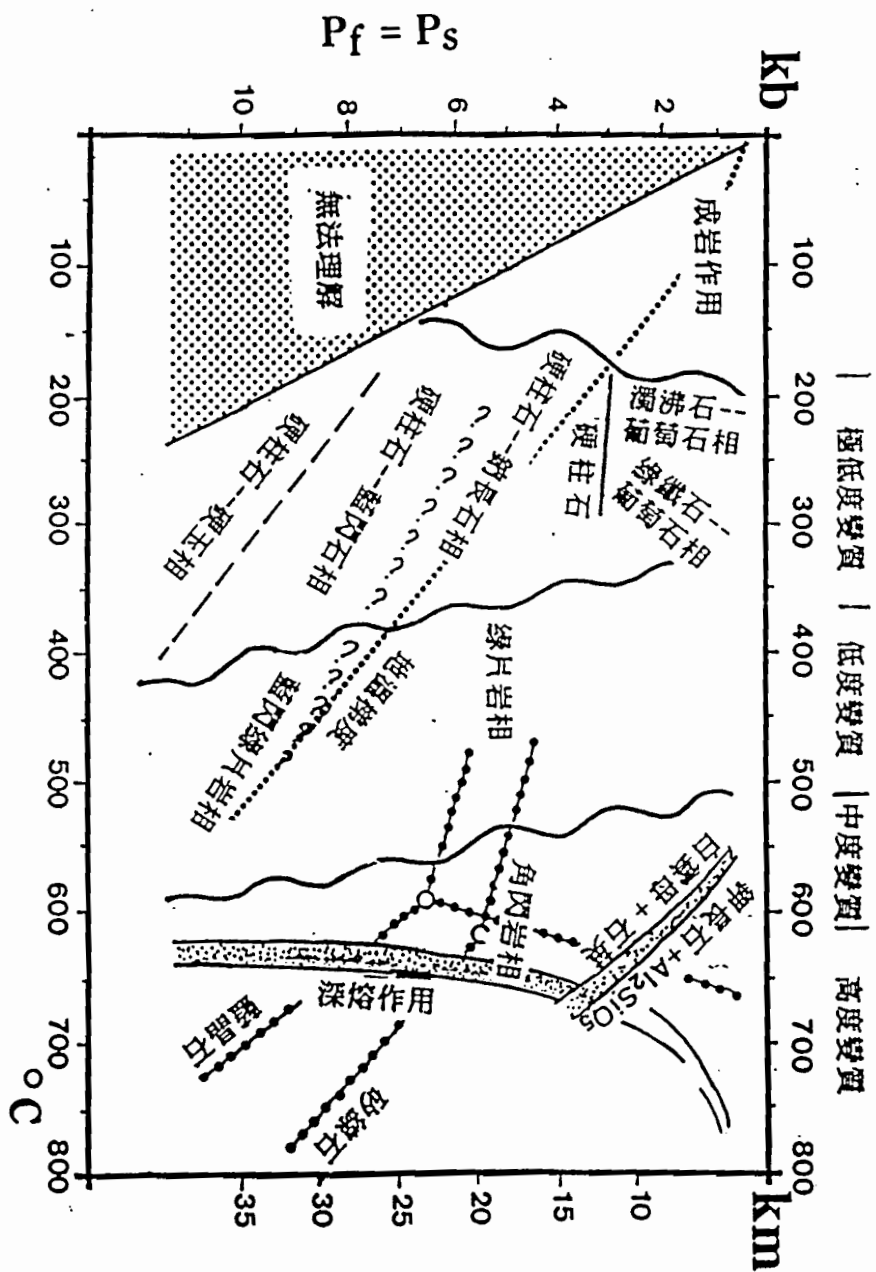
在你我的四周有著形形色色的岩石，依照它們的成因可分為三大類，第一類為火成岩，第二類為沉積岩，第三類為變質岩。在太魯閣峽谷裡所見到的片麻岩，在分類上屬於變質岩類。顧名思義，它是由別種岩石變質而成的，那到底它是如何產生的呢？

變質岩是三種岩石中成因最複雜的，而它的特徵又是如何？讓我們從火成岩、沉積岩的成因開始。眾人皆知，地球內部是熱滾滾的岩漿，它們被局限在地殼深部一定的空間中，當這個封閉空間內熱岩漿的壓力達到飽和狀態後，便向上竄升，有的經過岩間縫隙一路直達地表，噴發而成火山岩，有的侵入岩層形成火成侵入岩，而有的岩漿則在深處冷卻成深成岩。至於沉積岩，最簡單的說法，就是地表各種岩石經風化、侵蝕、搬運、堆積，隨著沉積物不斷的增加，經成岩作用而成沉積岩。

火成岩主要由熔融狀岩漿冷卻而成；沉積岩主要由風化沉積物膠結成岩而成。但是，談到變質岩則有完全不同的成岩機制。變質岩是岩石經過變質作用而形成的。所謂變質作用是在固體狀態下改變岩石中礦物組成及排列構造的一種過程，所以風化及成岩作用並不能稱為變質作用。

## 第二節 變質作用的種類

變質作用的發生通常是由岩石的熱力及壓力等營力作用，使得原岩所處的物理、化學環境改變，進而轉變成他種岩石。就不同的營力及多變質的規模，我們可以將變質作用分為三類：接觸變質、動力變質及區域變質作用。



圖四 變質作用與溫度壓力的關係



### 一. 第一類為接觸變質作用

發生在岩漿侵入圍岩的變質作用。特徵為變質範圍小，接觸面的變質度呈環帶狀分佈，愈遠離侵入岩漿主體，則變質度愈低。中橫公路白沙橋河床上的片麻岩與大理岩接觸的露頭，有接觸變質的現象（圖版四），另一個露頭則是北部濱海公路三貂角附近桀桀海邊的一條東西向的火成入侵岩脈體（dyke），它周圍的沉積岩有環狀接觸變質現象產生。

### 二. 第二類為動力變質作用

出現在斷層或逆衝斷層附近，是由於岩石受擠碎壓力或剪力造成的。在斷層帶中發現的斷層角礫岩便是。此外，變質帶由於沒有足夠的熱產生，所以只是外形上有所改變並不會在礦物之間有更進一步的化學反應發生。

### 三. 第三類為區域變質作用

岩石受溫度及壓力兩種因素作用產生較大範圍且岩性複雜的變質作用。今天太魯閣峽谷中出露的岩石便是區域變質作用的產物。區域變質作用的原動力來自規模龐大作用時間長久的構造運動或深埋作用，涵蓋的面積為數百數甚至可達數千平方公里，所產生的岩石種類如片麻岩、片岩等，除了肉眼可見的平行葉理外，礦物也都重新結晶、岩石組織也改變了。

藉著以下幾章的敘述我們將從礦物種類、產狀，化學元素的組成及礦物間變質度的差異，進而了解更多關於片麻岩的歷史及成因。

# 第四章 顯微鏡下的世界

## 第一節 偏光顯微鏡下的礦物觀察

從灰白的外表，你絕對無法想像片麻岩在顯微鏡下是如何地精彩，偏光顯微鏡是觀察岩石、礦物標本最直接的儀器。在觀察它之前，必須先將標本切成厚度約 0.03 公釐左右的薄片。它的觀察原理是利用裝備有兩片偏振方向彼此垂直偏光鏡的顯微鏡觀察礦物由不同結晶構造下，所表現出之不同的光學性質及結晶外形，運用這些特性便可以初步了解岩石的組織及其中所含礦物的種類。

片麻岩是高度變質作用的產物，太魯閣地區的片麻岩在顯微鏡下可以發現它的礦物大多有環帶狀（zoning）現象；礦物的周圍也常有被後生礦物取代的痕跡並且同一種礦物有不同的結晶外形。

## 第二節 礦物個論

片麻岩中常見的七種礦物為：石英、雲母類、長石類、角閃石類、柘榴子石、綠泥石以及綠簾石分別做介紹。

### 一. 石英類（quartz）：

在片麻岩中，石英是最常見的礦物，屬於單斜晶系（圖版六）。平面偏光時為無色，垂直偏光時則為第一階灰色、白色或略帶黃色，顆粒呈次圓到多角狀，並且互相鑲嵌在一塊，表面上少解理。由於變質作用的關係，轉動載物台可以發現波浪般的消光現象。在顯微鏡下所見的石英，少見取代現象，而且罕見雙晶。

### 二. 雲母類（mica group）：

在片麻岩中，結晶形狀最富變化的便是雲母類。屬於單斜晶系。由外形及光性可以發現三種雲母，一是黑雲母，二



### 圖版六

右方為變質岩中的石英結晶。  
垂直偏光下顏色為白、灰色或  
土黃色，因為變質作用的緣故  
常呈波狀消光。

( 標本編號 CL 74-35, 0.85 x 0.55 mm, 垂直偏光 )

是白雲母，三是白矽雲母。在平面偏光黑雲母時呈褐、黃褐或紅褐色之多色性，而白雲母、白矽雲母則無多色性特徵。發達的解理是所有雲母共有的特徵。在垂直偏光下，它的干涉色可達第二階的紅紫色。在平行解理的方向可以觀察到全消光（稱為平行消光）。在結晶外形上，分為三：(1). 體積較大並在岩石組織中呈現不規則排列的斑狀變晶雲母（porphyroblastic mica）（圖版七），(2). 結晶較細長且多平行於岩石片理方向排列的細晶雲母（tiny mica）（圖版八及圖版九），(3). 被包圍在鉀長石或斜長石中的殘存雲母結晶（relic mica）（圖版十及圖版十一）。

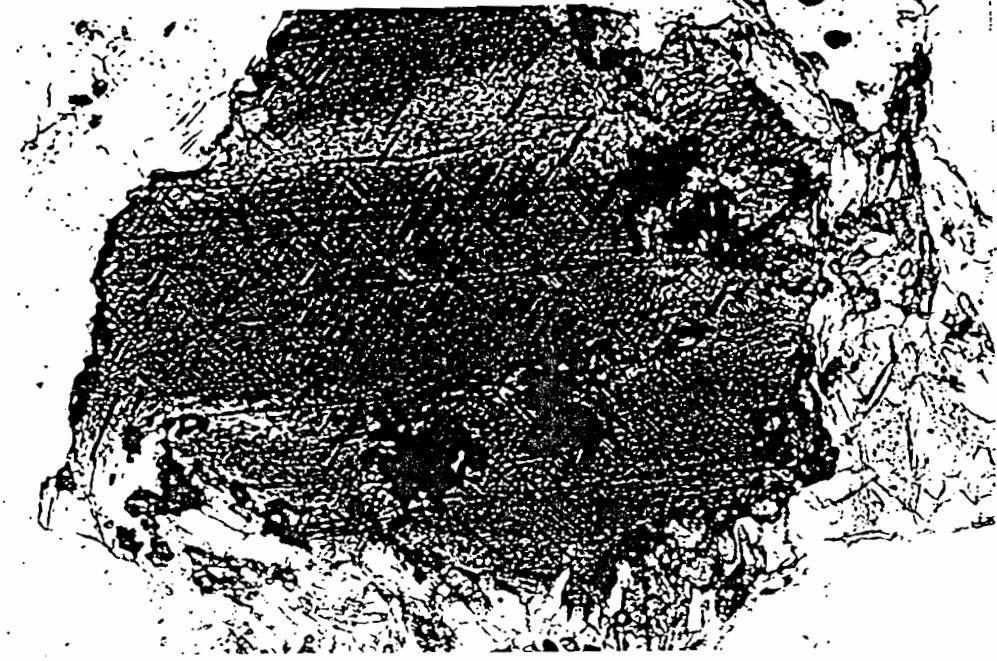
一般而言，黑、白雲母的結晶較大，而白矽雲母的結晶顆粒則多破碎、細小並成帶狀平行於岩石的片理排列（圖版十二），常在白雲母或黑雲母、角閃石的外圍出現（圖版十三）。在顯微鏡下還發現在白雲母的邊緣有被黑雲母取代的現象（圖版十四及圖版十五）。

### 三. 長石類（amphibole group）：

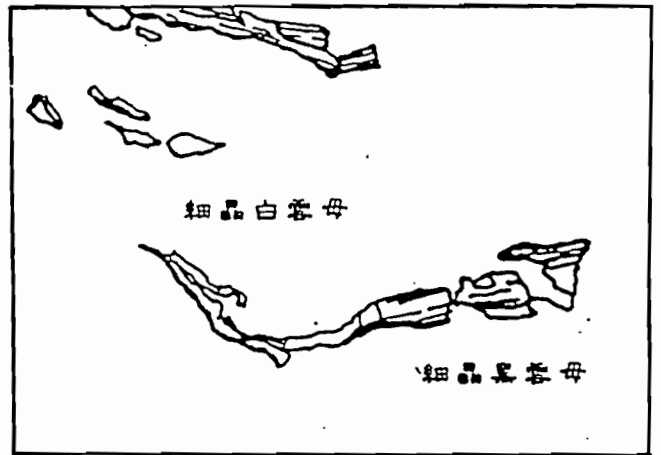
片麻岩中可以觀察到正長石或斜長石，前者屬於單斜晶系，後者則是三斜晶系。在平面偏光下，兩者都是無色，垂直偏光下，它的干涉色呈第一階的灰、白色，或淡黃色，與石英的干涉色很類似，但長石易被他種礦物取代，而石英則不易。正長石外形常呈片狀或成條紋狀(perthitic)（圖版十六及圖版十七）；斜長石外觀則以雙晶為特徵。一條黑帶，一條白帶的斜長石在垂直(010)面的方向形成雙晶（圖版十八）。在顯微鏡下常可見到被白矽雲母取代的長石，可以說明白矽雲母比長石後生成（圖版十九）

圖版七

褐色的黑雲母斑狀變晶。常發現有成交錯狀的礦物在它的表面生成，在邊緣則有被矽雲母取代的現象，在中央偏下方的黑色暈圈是受到雲母中鋁石所含之放射性破壞造成的。



(標本編號 CL 75-268, 0.85 x 0.55 mm, 平面偏光)



圖版八

平行於片理排列的細晶雲母。  
褐色為黑雲母，淺色為白雲母  
或白矽雲母。



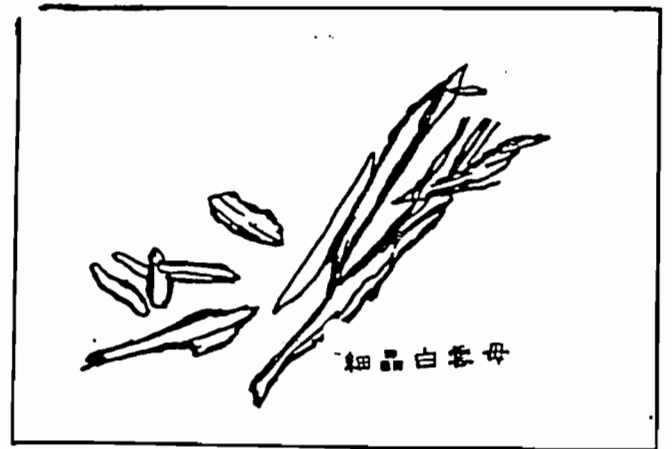
(標本編號 CL 75-145, 0.85 x 0.55 mm, 平面偏光)

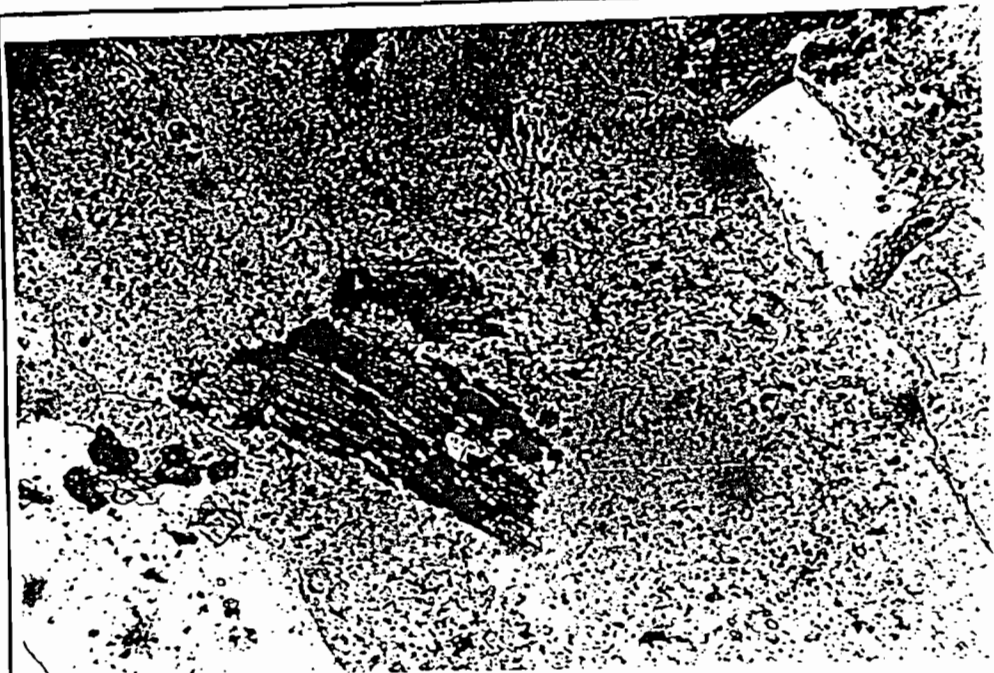


圖版九

平行片理排列的細晶雲母。

( 標本編號 CL 75-145, 0.85 x 0.55 mm, 平面偏光 )

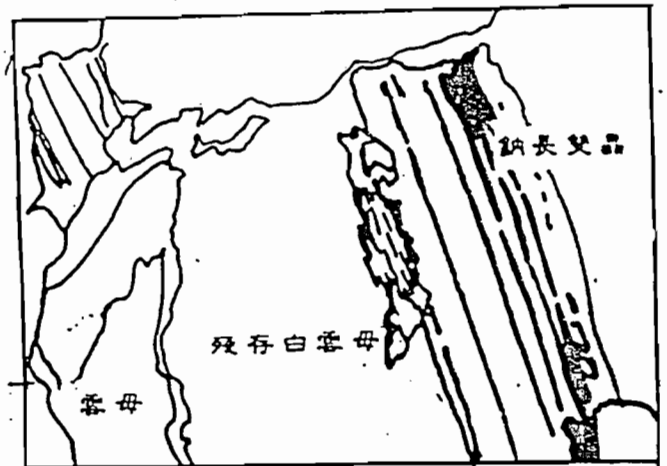
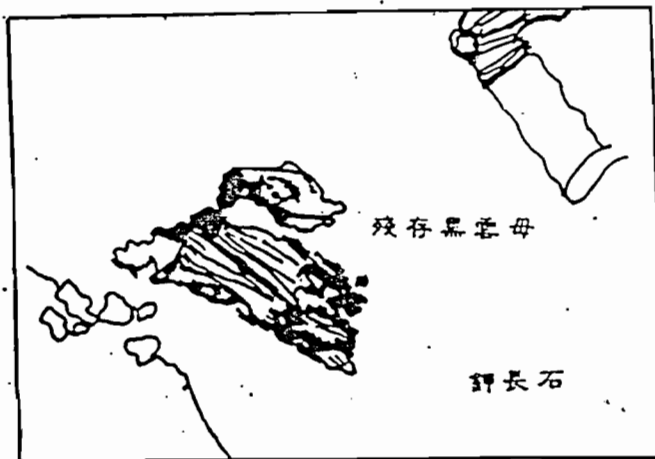




圖版十

被長石包圍的白雲母。在中央呈二階藍綠色的白雲母被周圍白、灰色相間的斜長石所包圍。我們常可以由此判斷礦物生成的先後次序。

(標本編號 H6-216, 0.86 x 0.55 mm, 平面偏光)



圖版十一

被長石包圍的黑雲母。在中央偏左有紅褐到綠色多色性表現的黑雲母被灰色或黃色的鉀長石所包圍。



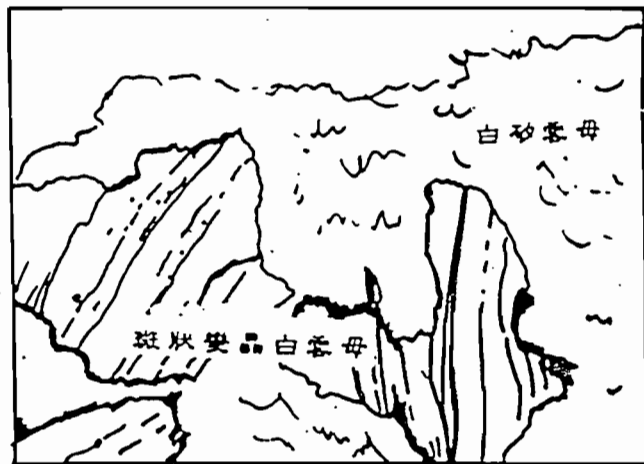
(標本編號 H6-216, 0.86 x 0.55 mm, 平面偏光)

圖版十三



解理發達的白雲母。白砂雲母  
取代斑狀變晶狀之白雲母，取  
代後之白砂雲母，結晶顆粒小  
，顏色鮮豔。

( 標本編號 CL 75-81, 0.85 x 0.55 mm, 垂直偏光 )



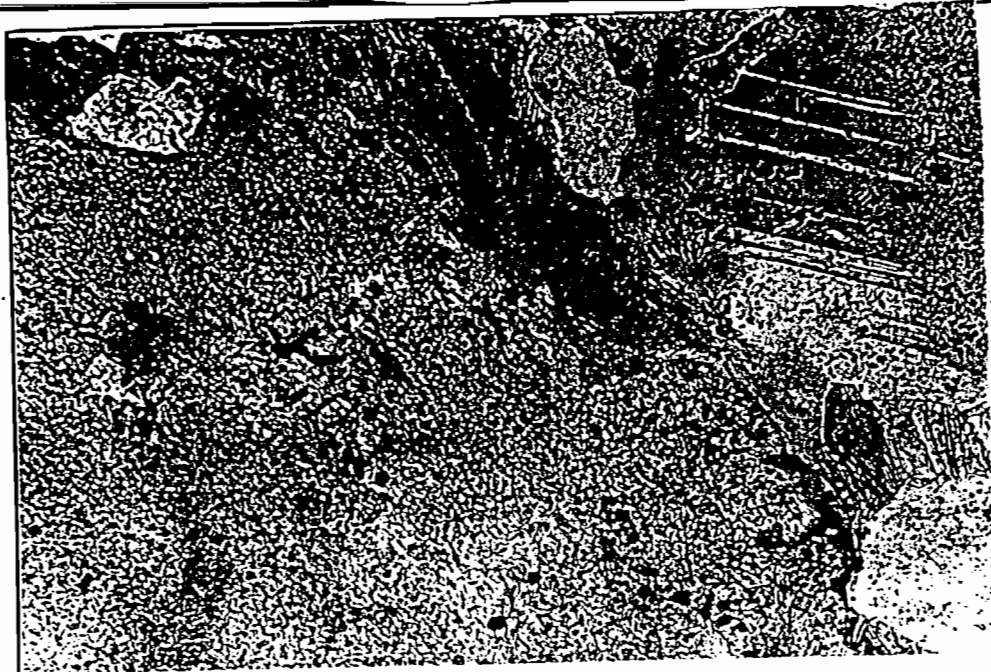
圖版十二

結晶細小的白砂雲母。白砂雲  
母常隨片理排列。



( 標本編號 KL 78-47, 2.67 x 1.78 mm, 平面偏光 )





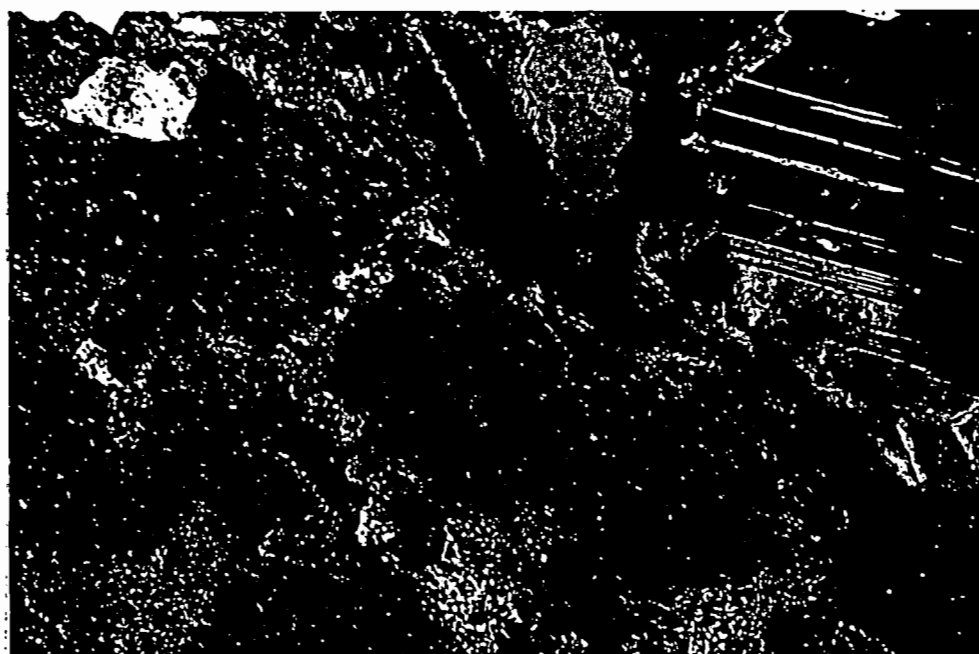
圖版十四

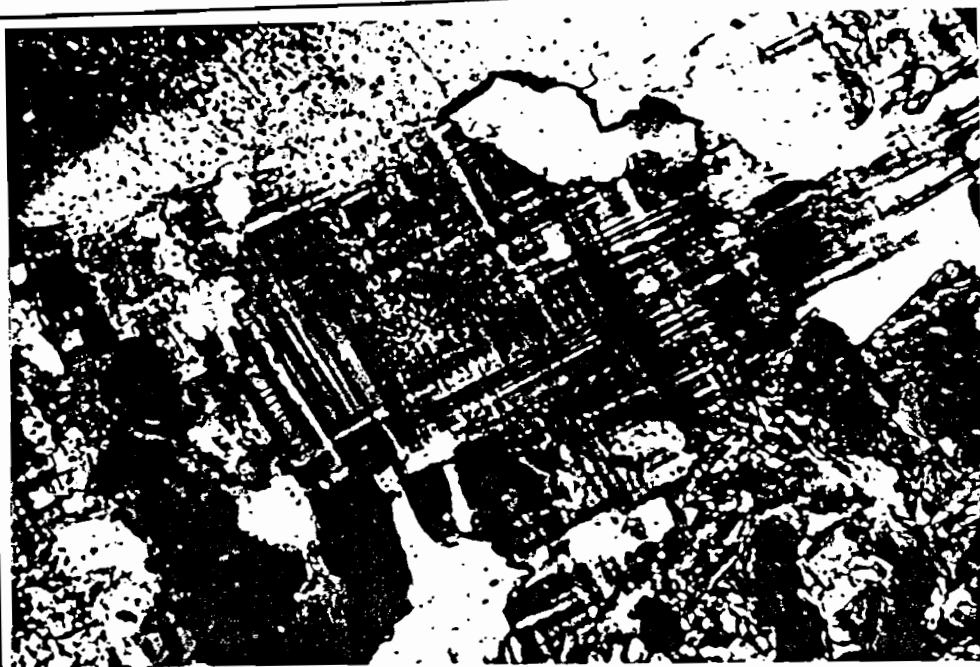
雲母間之取代作用。在平面偏光下，褐色的礦物為黑雲母，它取代左邊淡色的白雲母而生成的。右邊為雙晶斜長石。

( 標本編號 H6-216, 1.10 x 0.72 mm,  
圖版十四為平面偏光, 圖版十五為垂直偏光 )



圖版十五





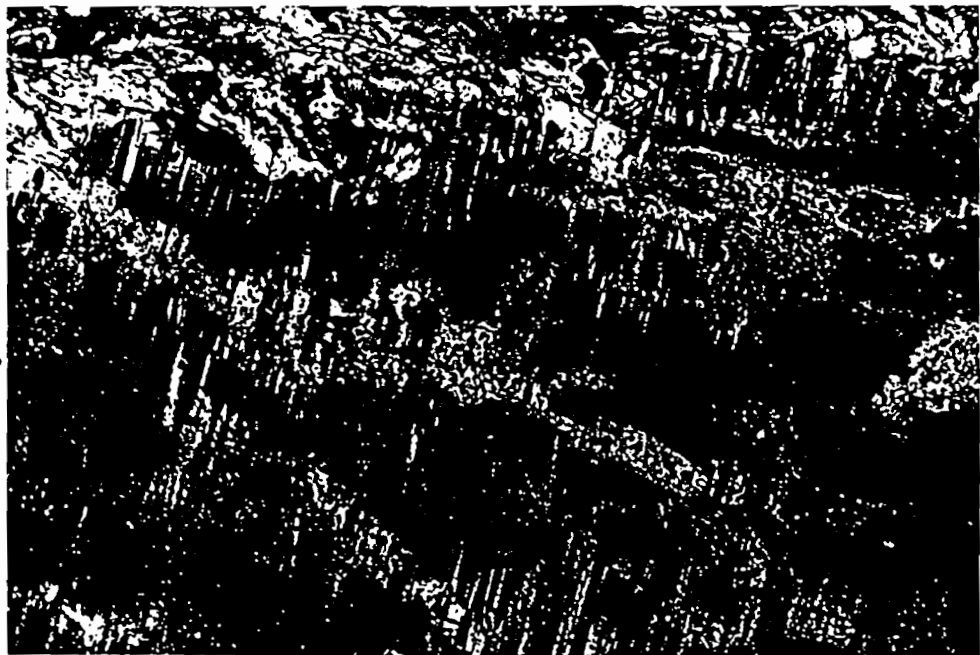
圖版十六

鉀長石中常見的交錯雙晶 ( gridiron structure )。由互相垂直的雙晶造成；另一個方向是沿著鈉長雙晶律 ( albite twinning ) -  $\{ 010 \}$  為雙晶面；另一個方向是沿著倍利雙晶律 ( pericline twinning ) 生長 -  $[ 010 ]$  為雙晶軸。通常這一類的雙晶紋層都呈紡錘狀並且有波狀消光現象。

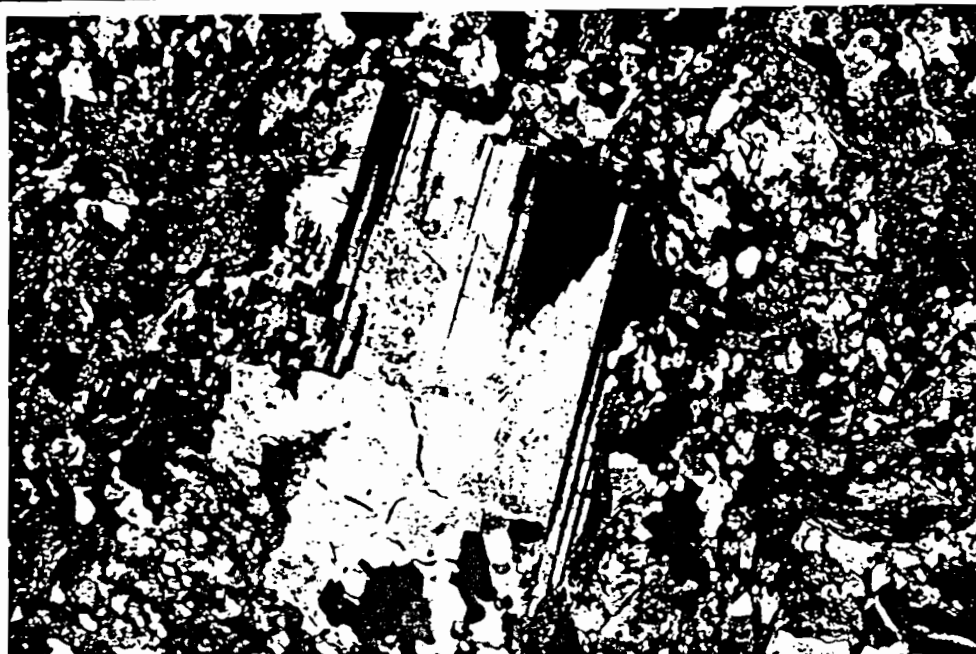
( 標本編號 CL 75-81, 0.56 x 0.37 mm, 垂直偏光 )

圖版十七

長石中常見的條紋狀構造 ( perthitic structure )。



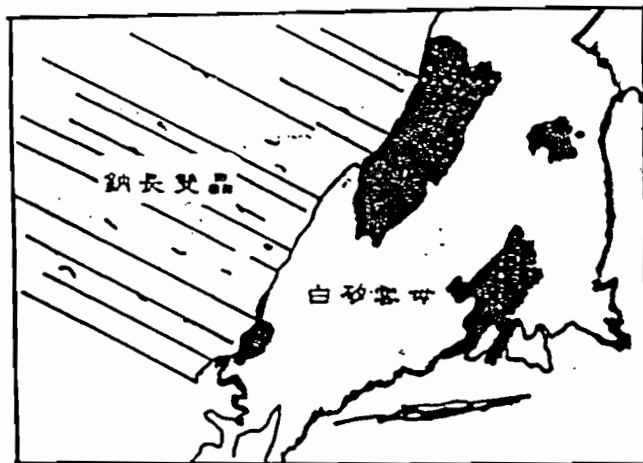
( 標本編號 CL 75-81, 0.85 x 0.55 mm, 垂直偏光 )



圖版十八

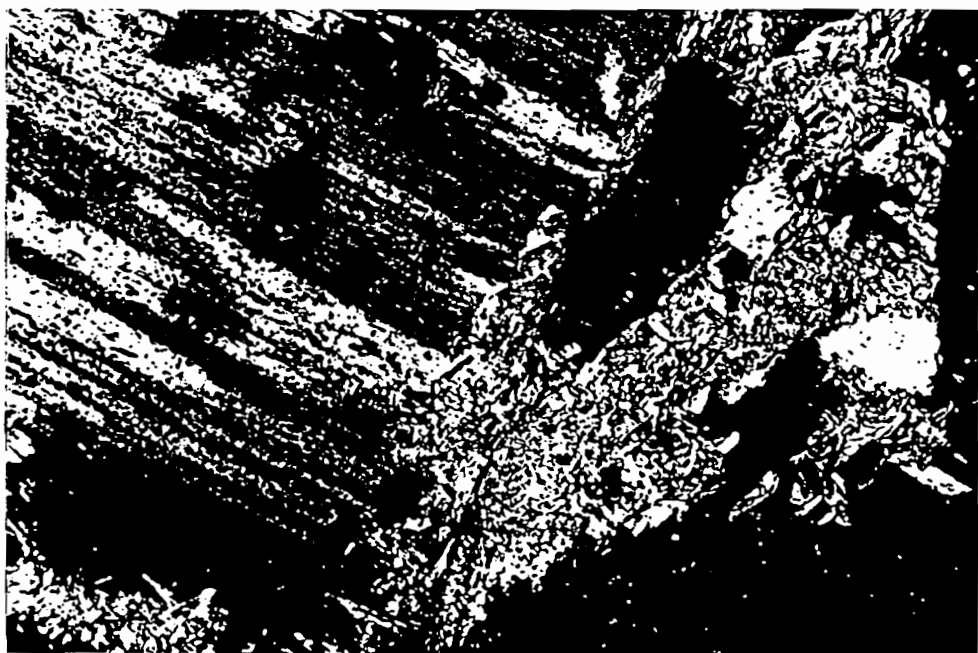
斜長石中最常見的鈉長雙晶。  
圖版中央的白黑色色條紋的結晶是斜長石。呈現一白一黑的條紋其特徵。在它周圍次圓帶黃土、灰白的顆粒則是石英結晶。

( 標本編號 KL 78-3, 2.67 x 1.78 mm, 垂直偏光 )



圖版十九

鈉長雙晶及白砂雲母取代現象。  
在左側有灰白及白色條紋的是鈉長雙晶造成的斜長石，右側顏色鮮豔、結晶細小的是白砂雲母，它常出現在長石邊緣，取代長石而生成。這種生成的關係常作為判斷結晶次序的依據。



( 標本編號 H6-216, 0.85 x 0.55 mm, 垂直偏光 )

#### 四. 角閃石 ( hornblende ):

仔細觀察片麻岩中的角閃石型式，會發現角閃石結晶常呈二個環帶或三個環帶（圖版二十及圖版二十一），外形常呈長條狀平行長軸的解理或是結晶六角形，表面有兩組互相夾  $68^\circ$  角的解理出現（圖版二十二）。平面偏光時可發現紅棕色及綠色的多色性，垂直偏光下，干涉色則是鮮豔的二階綠色到綠棕色。同樣地，角閃石的外圍常常會發現有白矽雲母取代（圖版二十三）。

#### 五. 柘榴子石 ( garnet ):

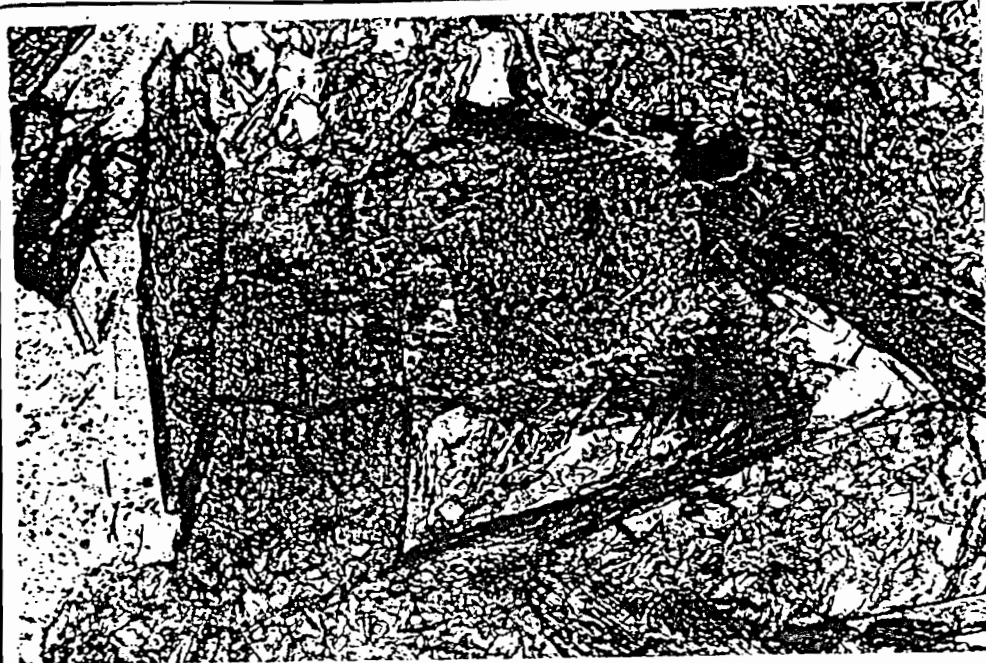
等軸晶系的柘榴子石常在變質岩中出現。在平面偏光下，柘榴子石結晶為無色或略帶淺粉紅色，若在垂直偏光下便成了不透明的黑點。本區的柘榴子石可觀察到有環狀現象，並且由於邊緣被他種礦物取代，所以常有黑灰色的外環。

#### 六. 綠泥石 ( chlorite ):

為單斜晶系。在化學成分上屬於雲母類。常為風化或變質後的次生礦物，在平面偏光時帶有綠色多色性（圖版二十四），並且在垂直偏光下會有詭異的暗藍灰色出現（圖版二十五）。長片狀聚晶或呈細小的扇狀聚晶是明顯的特徵（圖版二十六）。

#### 七. 綠簾石 ( epidote ):

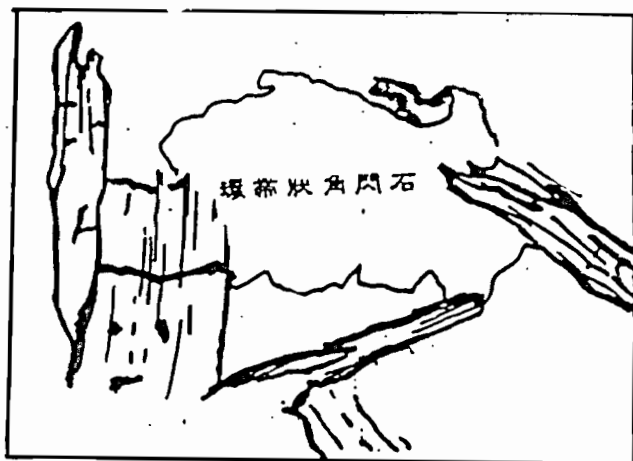
為單斜晶系。在平面偏光時略帶多色性，周圍常被黑色礦物取代，結晶為顆粒狀或是長條狀聚晶，高差 ( relief ) 極為明顯，垂直偏光干涉色在二階到三階之間，在片麻岩體中，常在許多礦物中發現它的蹤跡（圖版二十七及圖版二十八）。



圖版二十

環帶狀的角閃石。在片麻岩中可以發現角閃石外有二種或三種不同顏色的色環。中央長條形的結晶便是角閃石，內圈呈黃綠色，外緣為藍綠色。

( 標本編號 KL 78-47, 0.85 x 0.55 mm, 平面偏光 )



圖版二十一

環帶狀角閃石。由核心到外緣有三種色環分布 — 核心為深黃綠色；中圈為淡黃綠色；外緣則為藍綠色。



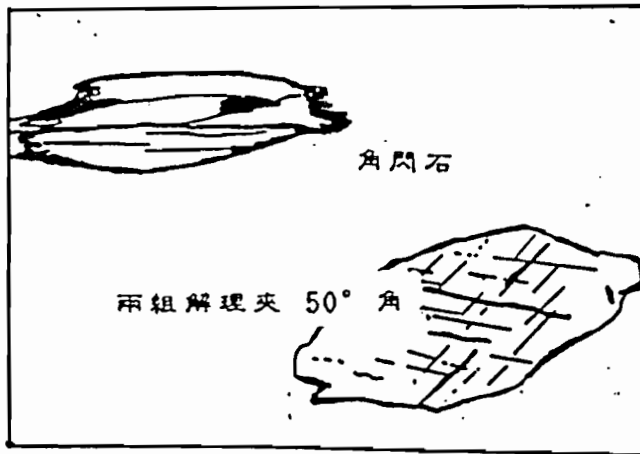
( 標本編號 KL 78-47, 0.85 x 0.55 mm, 平面偏光 )



圖版二十二

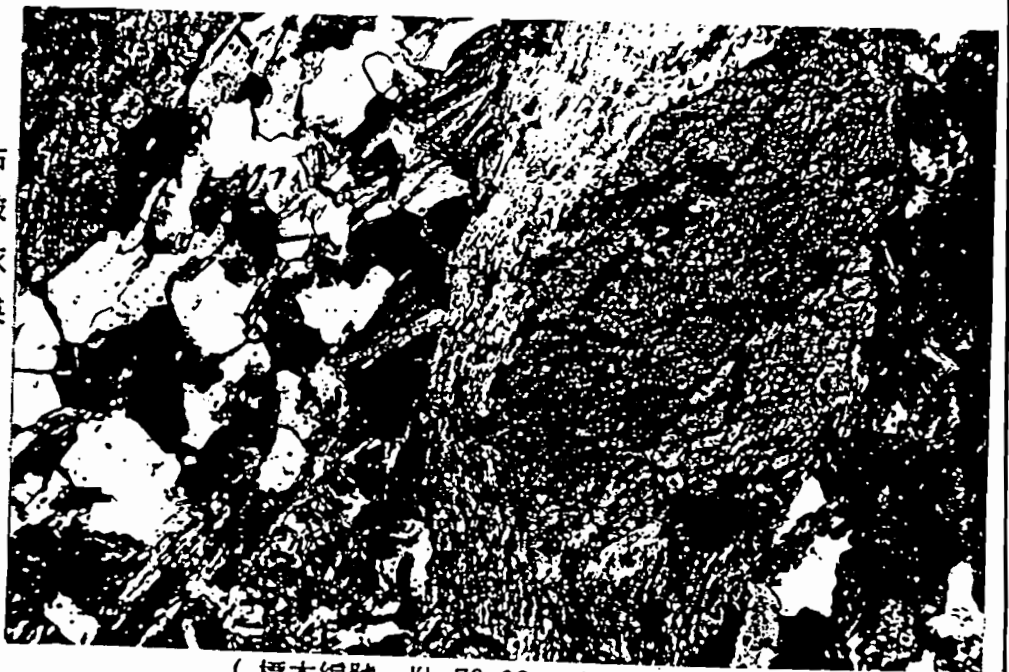
角閃石兩種不同的外形。左上角呈深藍色，帶有少許解理的長條狀角閃石；而右下角土黃色的六角形結晶則是垂直C 軸切割造成的，在面上可以發現夾  $56^\circ$  及  $124^\circ$  左右的兩組解理。

(標本編號 KL 75-145,  $0.85 \times 0.55 \text{ mm}$ , 垂直偏光)



圖版二十三

被白矽雲母取代的角閃石。右側土黃色者為角閃石結晶，被白矽雲母所取代。左側白、灰或黑色，次圓顆粒結晶為石英。



(標本編號 KL 78-03,  $0.85 \times 0.55 \text{ mm}$ , 垂直偏光)

圖版二十四

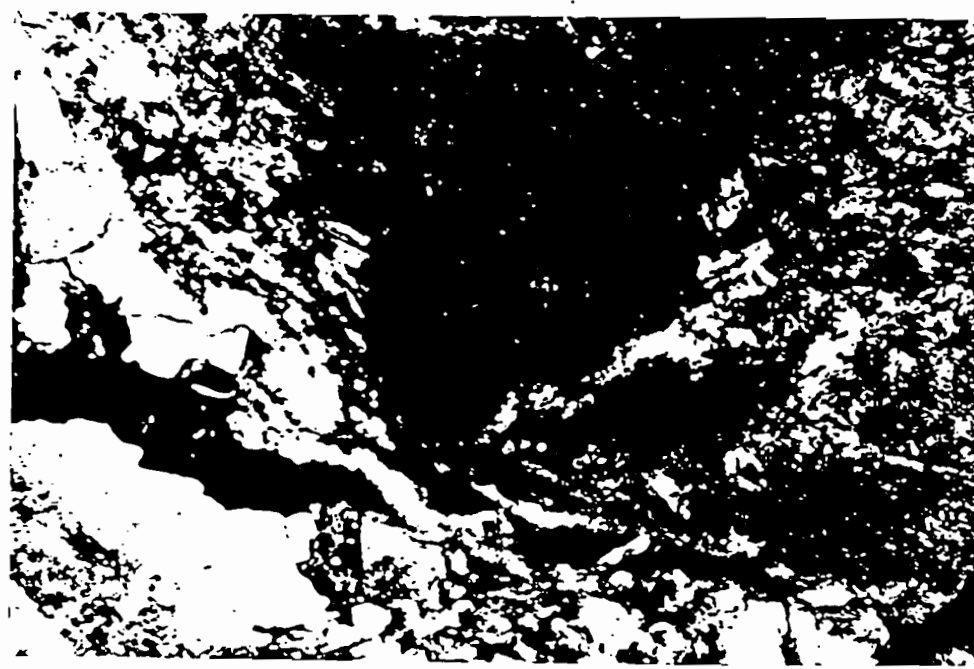
被綠泥石取代的黑雲母。左上方綠色的礦物為綠泥石，轉動載盤會發現輕微的多色性。綠泥石周圍褐色礦物是被取代的黑雲母，在表面亦可發現有凝析的礦物（exsolution）條痕。



( 標本編號 CL 74-35, 2.67 x 1.78 mm, 平面偏光 )

圖版二十五

垂直偏光下的綠泥石。一種不尋常暗藍灰色出現在圖版中央，是綠泥石的特徵之一。



( 標本編號 CL 74-35, 2.67 x 1.78 mm, 垂直偏光 )

圖版二十六

夾在黑雲母中的綠泥石。紅褐色長條狀的黑雲母中有綠泥石出現。



( 標本編號 CL 74-35, 1.10 x 0.72 mm, 平面偏光 )

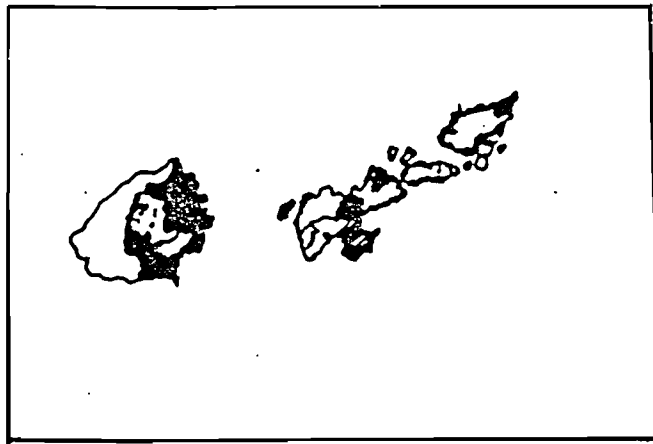




(標本編號 CL 74-34, 2.67 x 1.78 mm, 平面偏光)

圖版二十七

綠簾石圖版中深色顆粒皆為綠泥石。綠簾石的結晶形狀從顆粒到長條聚晶都有，平面偏光呈無色到淡黃綠色，有很輕微的多色性，在它的邊緣常被黑色礦物取代。



圖版二十八

為圖版 27 中黑色框中的放大照片。



(標本編號 CL 74-35, 1.10 x 0.72 mm, 平面偏光)

# 第五章 礦物化學分析

在偏光顯微鏡下，各種不同的光性及外形，讓我們認識了岩石的捨握佬q物的種類，但是卻無法知道這些礦物實際的化學成分。因此借用電子微探儀的使用來了解各礦物中元素的分布情形，但是，最重要的是想進一步了解顯微鏡下普遍存在的環帶現象以及不同的結晶外形與礦物化學成分的關連，有助於對變質史、地史的更進一步解釋。

## 第一節 電子微探儀

利用電子微探儀分析礦物的化學成份。使用前需將岩石標本用膠封住，並且雙面皆打磨光滑，成品就好比是圓形透明的餅乾中夾著薄薄的一片夾心，準備好的標本片送上 Shimadzu ARL Model EMX 電子微探儀上分析。在分析的過程中是以直徑 10 ~ 30 微米的電子束打在薄片上，由於本型儀器配備四個波長分光器，一次只可分析四個元素，所以一個標本須分數次進行。片麻岩中所含礦物常有環帶狀特徵，因此，需以坐標法比照各組織在偏光顯微鏡與微探儀中反射式顯微鏡的觀察位置以方便分辨正確的照射位置。操作時，通過 15 千伏的加速電壓以 0.01 微米的樣本電流在 20 秒內照射 5 次，預備標本的同時也必須準備已知份量的標準礦物，包括：正長石、鈦鐵礦、鈉長石、角閃石、柘榴子石、藍晶石、薔薇輝石等。操作狀態整裡如表一，礦物受波長為  $k\alpha$  照射後，所釋放出的不同強度  $x$  光，由計數器紀錄然後與標準礦物比較，則可以知道分析礦物之元素含量。對均質礦物作分析通常在二、三個礦物顆粒分布的區間中計數五次；但如果是環狀礦物則從核心到邊緣計數二十五次。在照射時，需控制實驗時間，最好在四十五分鐘之內完成，並且能在標本計算結束後，再校正一次標準礦物含量並可同時檢驗儀器的穩定度；由於含鉀、鈉

元素容易因電子束照射而氣化，影響結果，因此在測定鉀、鈉等元素時，最好將照射時間控制在四十到五十秒間。在實驗中，儀器所測得的原始資料常受電流穩定度、測定時間、背景（background）、螢光及儀器吸收影響，必須加以修正。依 Ruchidge Gasparini（1969）所設計的程式，對主要元素而言有 3% 左右的估計誤差存在；對微量元素則有 5% 的誤差存在。

## 第二節 礦物分析

我們在片麻岩出露的地區採樣，採樣地點如（圖五）。取二十個標本作電子微探儀分析。在此類岩石中，最常見的礦物組合為石英、鉀長石、斜長石、白雲母、黑雲母、角閃石、綠簾石、矽線石、綠泥石及柘榴子石。最常見的附生礦物（accessory mineral），則包括方解石、鋯石、榭石、金紅石、電氣石、褐簾石、鈦鐵礦、磁黃鐵礦、閃鋅礦、石墨等。代表性礦物的化學分析結果如表二。以下討論六種具代表性，並對了解岩石形成歷史有關的礦物：

### 一、雲母類：

依顯微鏡下觀察可分為黑雲母、白雲母以及白矽雲母三種。黑雲母依顏色外形分為：（1）暗紅色或棕色，沒有特定方向排列之斑狀變晶雲母；（2）顏色較淺，結晶較小、平行片理排列的細晶雲母以及（3）出現在鉀長石或斜長石中的殘留雲母。這三種形態的黑雲母經  $TiO_2$  對  $(100Fe^{+2}) / (Fe^{+2} + Mg^{+2})$  作圖的結果顯示，成分都落入黑雲母系列中〔根據 Leer et.al.（1962）的分類〕（圖六）。由元素分析的結果：鐵（Fe）、鎂（Mg）、錳（Mn）、鈣（Ca）、鉀（K）、鈉（Na）及  $Mg / Fe^{+2}$  的量都很接近，但在鈦（Ti）、矽（Si）及全量鋁（ $\Sigma Al$ ）的含量上則斑狀變質比細晶較高。在顏色上，帶紅棕色的黑雲母中

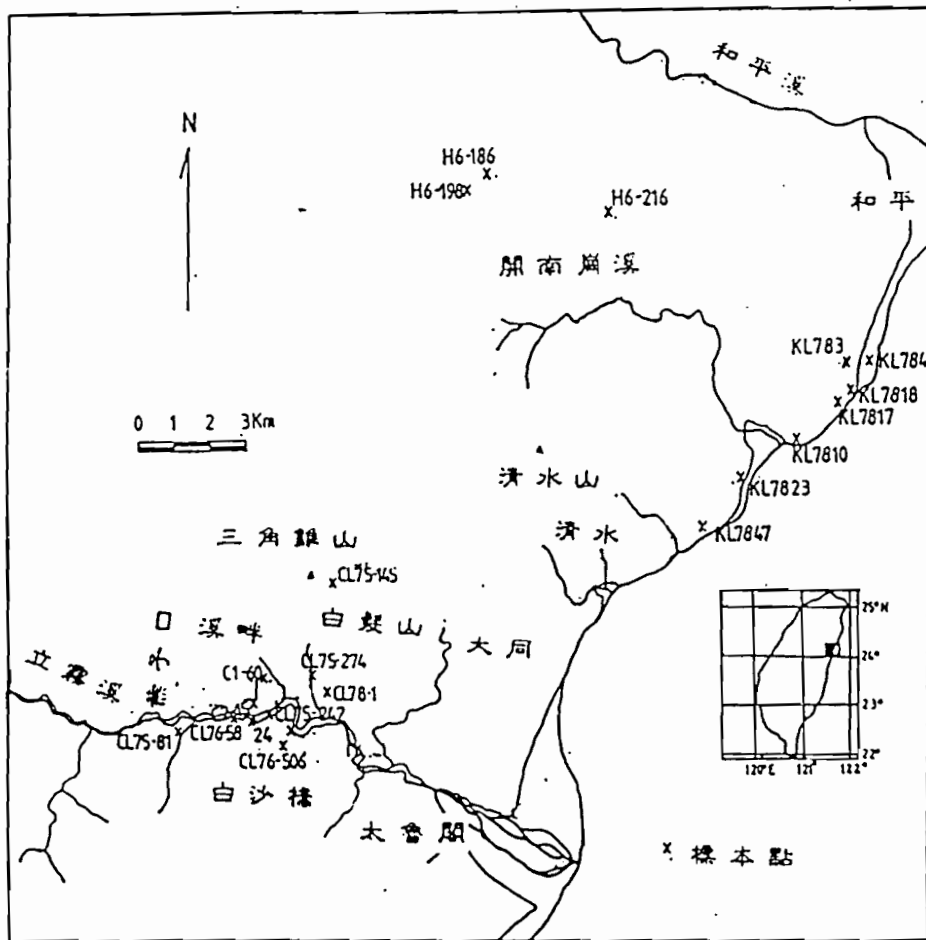
元素	分光計所使用 之結晶	加速電壓 ( 千伏 )	標本電流 ( 微安 )
Si	ADP	25, 15	0.2, 0.3
Al	RAP	25, 15	0.2, 0.3
Ti	LIF	25, 15	0.2, 0.3
Fe	LIF	25, 15	0.2, 0.3
Mg	RAP	25, 15	0.2, 0.3
Mn	LIF	25, 15	0.2, 0.3
Cr	LIF	25, 15	0.2, 0.3
Ca	ADP	25, 15	0.2, 0.3
Na	RAP	15	0.3
K	ADP	15	0.3

表一 電子微探儀分析狀態表

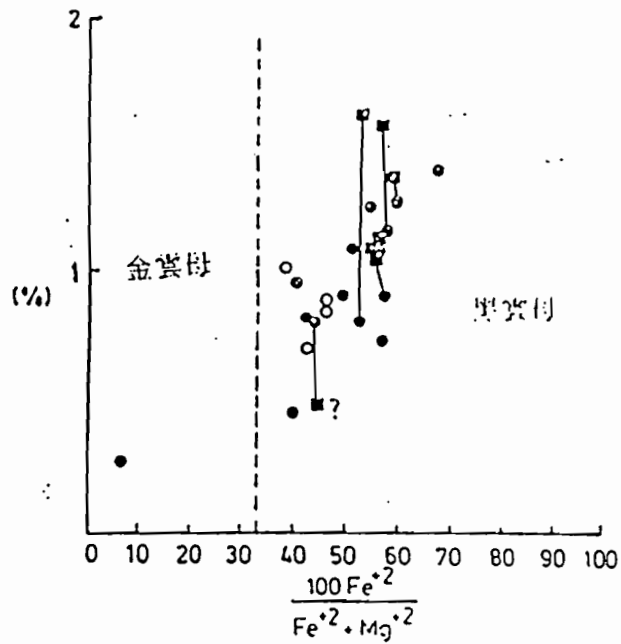
標本編號	CL76-1 斑狀變晶 黑雲母	CL76-1 細晶 黑雲母	H6-216 白雲母	116-216 白砂雲母	KL78-47 角閃石 最內圈	KL78-47 角閃石中圈
SiO <sub>2</sub>	35.18	35.77	44.39	48.33	53.64	51.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.00	15.71	34.35	28.35	3.13	4.06
TiO <sub>2</sub>	1.13	1.05	0.83	0.14	0.40	0.70
FeO	21.58	21.33	2.29	2.95	12.76	15.23
MgO	9.05	9.47	1.57	3.75	14.05	13.86
MnO	0.48	0.49	0.01	0.03	0.48	0.50
CaO	0.31	0.23	0.01	0.02	11.41	11.26
K <sub>2</sub> O	9.85	9.81	10.20	9.89	0.27	0.38
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.04	0.46	0.24	0.66	0.71
Anhydrous Total	93.61	93.90	94.11	93.70	96.80	97.98
Si	2.836	2.863	2.967	3.225	7.800	7.407
Al <sup>IV</sup>	1.164	1.137	1.033	0.775	0.200	0.593
Al <sup>VI</sup>	0.356	0.345	1.673	1.454	0.336	0.098
Fe <sup>2+</sup>	0.000	0.000	0.128	0.165	0.000	0.472
Ti	0.069	0.062	0.042	0.007	0.044	0.076
Mg	1.088	1.130	0.156	0.373	3.045	2.984
Fe <sup>3+</sup>	1.455	1.428	0.000	0.000	1.552	1.368
Mn	0.033	0.033	0.006	0.002	0.059	0.061
Ca	0.027	0.020	0.007	0.001	1.778	1.743
Na	0.005	0.006	0.060	0.031	0.186	0.199
K	1.013	1.002	0.870	0.842	0.050	0.070

標本編號	KL78-47 角閃石外緣	116-198 柘榴子石 核心	H6-198 柘榴子石 外緣	116-198 綠泥石	116-186 綠簾石核心	116-186 綠簾石外緣
SiO <sub>2</sub>	54.84	36.62	36.62	23.71	37.64	38.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.87	22.48	21.98	21.53	27.68	26.98
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.14	0.03	0.03	0.14	0.18
FeO	14.13	18.30	32.22	28.81	7.22	8.53
MgO	15.05	0.40	4.63	13.20	0.01	0.02
MnO	0.46	11.27	3.75	0.47	0.16	0.22
CaO	10.33	11.75	1.30	0.02	25.02	25.10
K <sub>2</sub> O	0.11	—	—	—	—	—
Na <sub>2</sub> O	1.17	—	—	—	—	—
Anhydrous Total	97.99	100.96	100.53	87.77	97.88	99.17
Si	7.675	2.983	2.901	2.541	2.913	2.925
Al <sup>IV</sup>	0.325	0.107	0.099	1.459	0.087	0.075
Al <sup>VI</sup>	0.157	1.886	1.953	1.261	2.438	2.364
Fe <sup>2+</sup>	0.464	0.005	0.043	0.193	0.310	0.547
Ti	0.003	0.008	0.002	0.002	0.008	0.010
Mg	3.198	0.047	0.547	2.109	0.001	0.002
Fe <sup>3+</sup>	1.221	1.204	2.091	2.390	0.000	0.000
Mn	0.056	0.754	0.252	0.043	0.011	0.014
Ca	1.578	0.995	0.110	0.002	2.075	2.062
Na	0.323	—	—	—	—	—
K	0.020	—	—	—	—	—

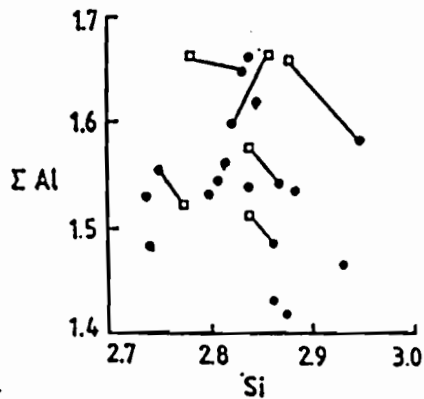
表二 東部地區和平到溪畔之片麻岩代表性礦物分析



圖五 標本點地圖



圖六 黑雲母中的  $TiO_2$  對  $100 Fe^{2+} / Fe^{2+} + Mg^{2+}$  作圖。圖中虛線為金雲母與黑雲母的分界。實心方塊表示帶紅棕色或棕色的斑狀變晶黑雲母；實心圓代表棕色的細晶黑雲母；空心圓表示綠棕色的細晶黑雲母；？表示綠泥化黑雲母；實線所連接的是共存的斑狀變晶及細晶黑雲母。



圖七 黑雲母中全量鋁對矽的作圖。圖中方塊表示斑狀變晶黑雲母；實心圓表示細晶黑雲母；實線所連接的是共存的斑狀變晶及細晶黑雲母。

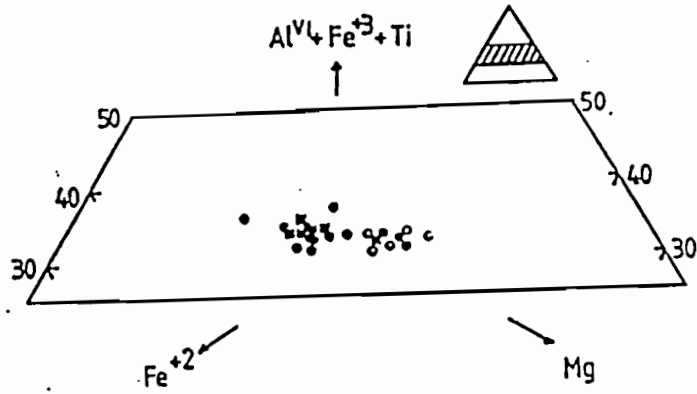
所含的鈦 ( Ti )、鐵 ( Fe ) 量略高於綠棕色的黑雲母。

白雲母以及白矽雲母的分析上，兩種都與理想成份值很接近，即使它們在外形上有所差異 ( 圖九 )。在元素分析上則可以發現白雲母中鈦 ( Ti )、鈉 ( Na ) 及全量鋁 (  $\Sigma Al$  ) 含量比白矽雲母為高而 Fe + Mg + Mn 的含量則較低 ( 圖十 )。

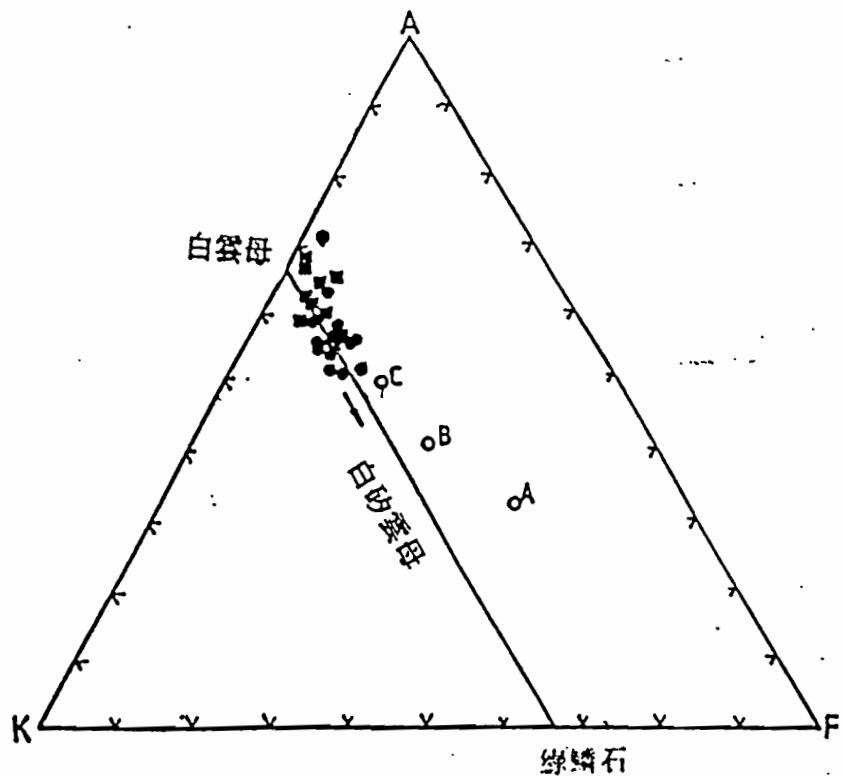
## 二. 角閃石類:

顯微鏡下的觀察發現角閃石有很明顯的環帶現象並且還有二環帶及三環帶之分。根據 Leak ( 1978 ) 的分類標準，這些角閃石可歸納為鈣質角閃石。由三氧化二鋁 (  $Al_2O_3$  ) 對二氧化矽 (  $SiO_2$  ) 含量的作圖知道隨著  $SiO_2$  量的增加  $Al_2O_3$  有減低的趨勢 ( 圖十一 )。至於其它的元素分布可以由分析圖得知 ( 圖十二 )。由角閃石環帶的種類可分為三類。第一類環帶：( 可在 KL 78-18 標本中發現 ) — 分為核心及外緣。核心的鈉 ( Na )、全量鐵 (  $\Sigma Fe$  )、鈦 ( Ti ) 及全量鋁 (  $\Sigma Al$  ) 的含量很高，但是鈣 ( Ca )、矽 ( Si )、鎂 ( Mg ) 含量則很少 ( 圖十三 )。由 ( 圖十四 ) 的元素分析發現外緣成分與陽起石 ( actinolite ) 及透閃石 ( tremolite ) 很相似。也就是說，在黃綠色的核心部分所發生的鎂閃石取代 ( tschermakite replacement ) 作用比呈無色針狀的外緣來得顯注。這類現象常被發現在片麻岩的帶狀角閃石中。第二類環帶：( 可在 KL-78-47 標本中觀察到 ) — 也分為核心及外緣。與第一類環帶的核心部分比較，顯然第二類環帶的核心中鈣 (  $Ca^{+}$  )、鈦 ( Ti )、鐵 ( Fe ) 及三價鋁 (  $Al^{+3}$  ) 含量更高，但是，在鈉 ( Na )、鎂 ( Mg )、六價鋁 (  $Al^{+6}$  )、矽 ( Si ) 含量則低於第二類的外緣 ( 圖十三 )。由圖十五可以發現，黃綠色核心部分還是以鎂閃石取代較顯注，藍綠色外緣則是以藍閃

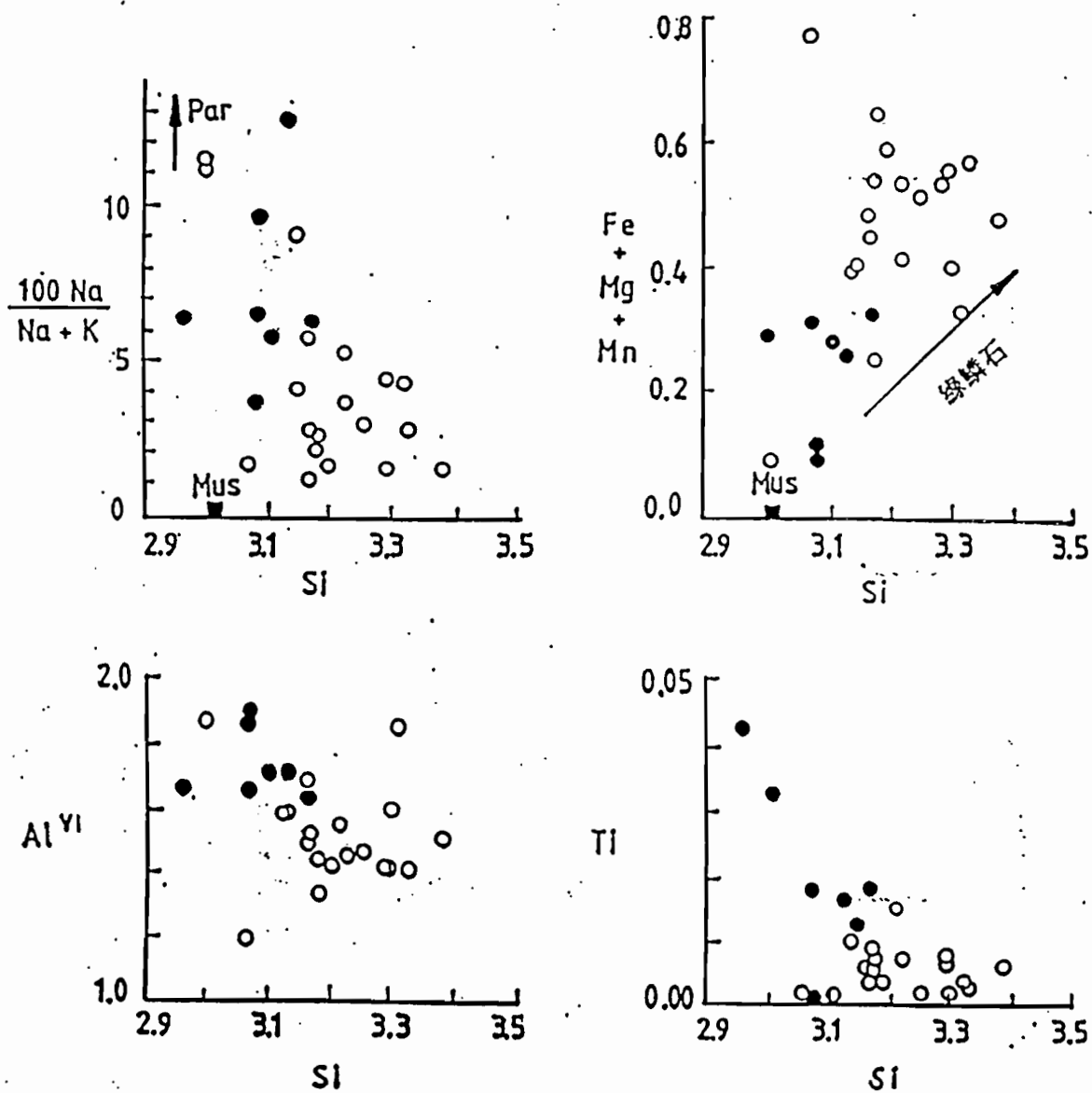




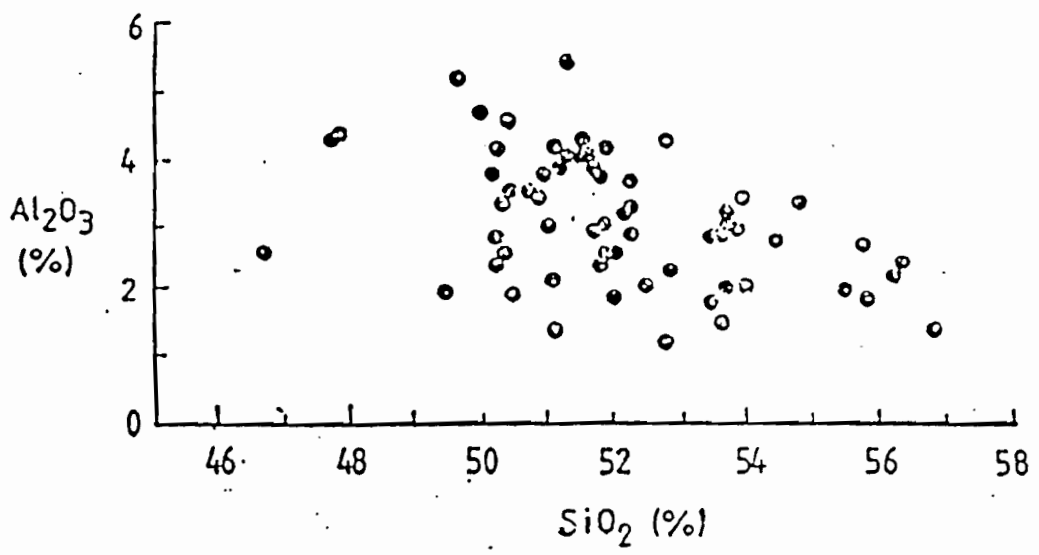
圖八 黑雲母的  $R^{2+}$  ( $Al^{VI} + Fe^{+3} + Ti$ ) -  $Fe^{+2}$  - Mg 三角作圖。實心方塊表示帶紅棕色或棕色的斑狀變晶黑雲母；實心圓代表棕色細晶黑雲母；空心圓表示綠棕色的細晶黑雲母。



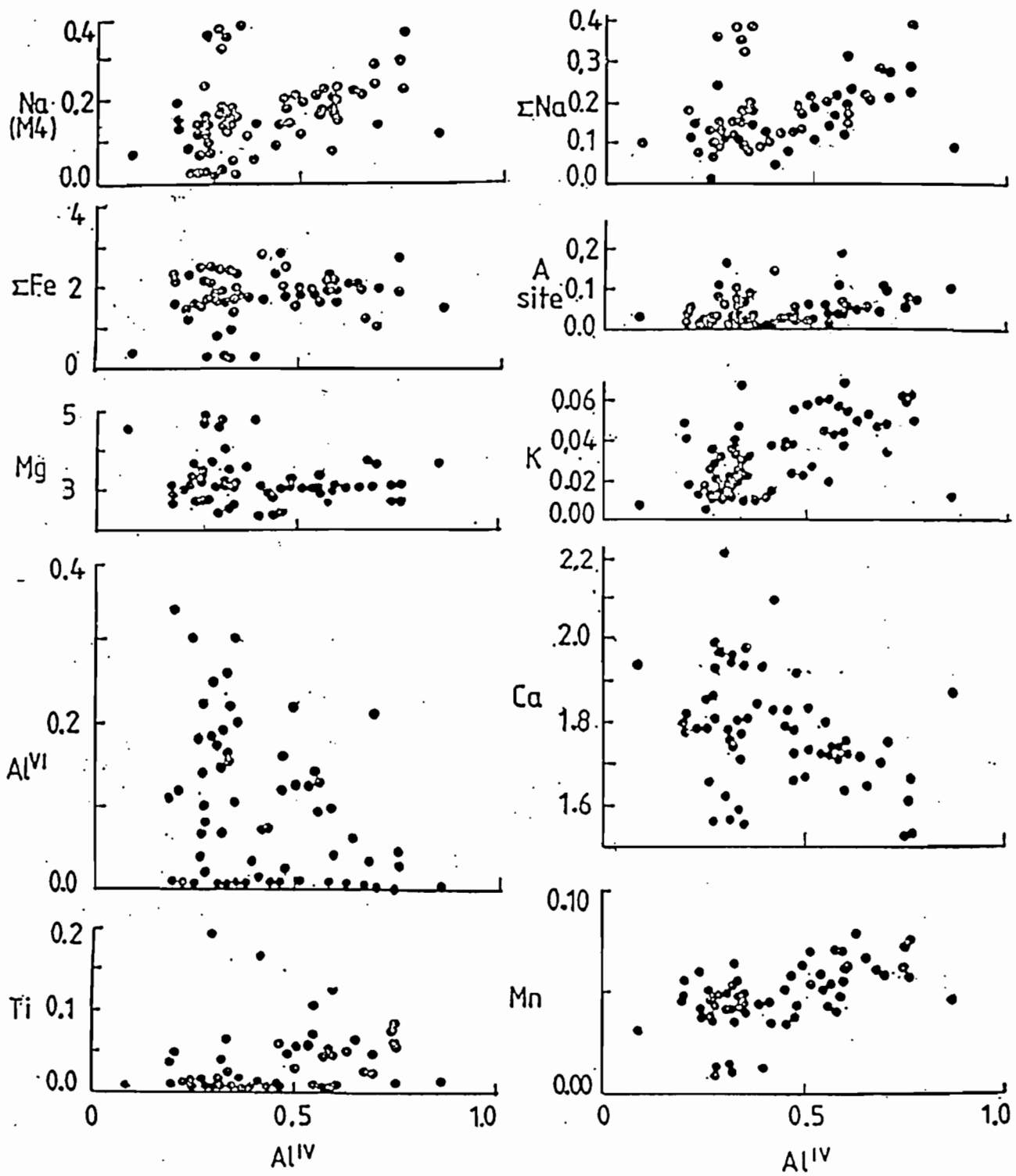
圖九 白雲母之 AKF  $A = \{ (Al_2O_3) + (Fe_2O_3) \} - \{ (Na_2O) + (K_2O) \}$ ;  $K = (K_2O)$ ;  $F = (FeO) + (MgO) + (MnO)$  三角圖。A 表示位於綠泥石帶上部的白砂雲母固熔體 (solid solution) 界限；B 表示位於黑雲母帶上部的白砂雲母固熔體界限，C 表示位於柘榴子石上部的白砂雲母固熔體界限，在 Dalradian rocks 中 (Mather, 1970)。實心方塊表示分析的白雲母；實心圓表示分析的白砂雲母。



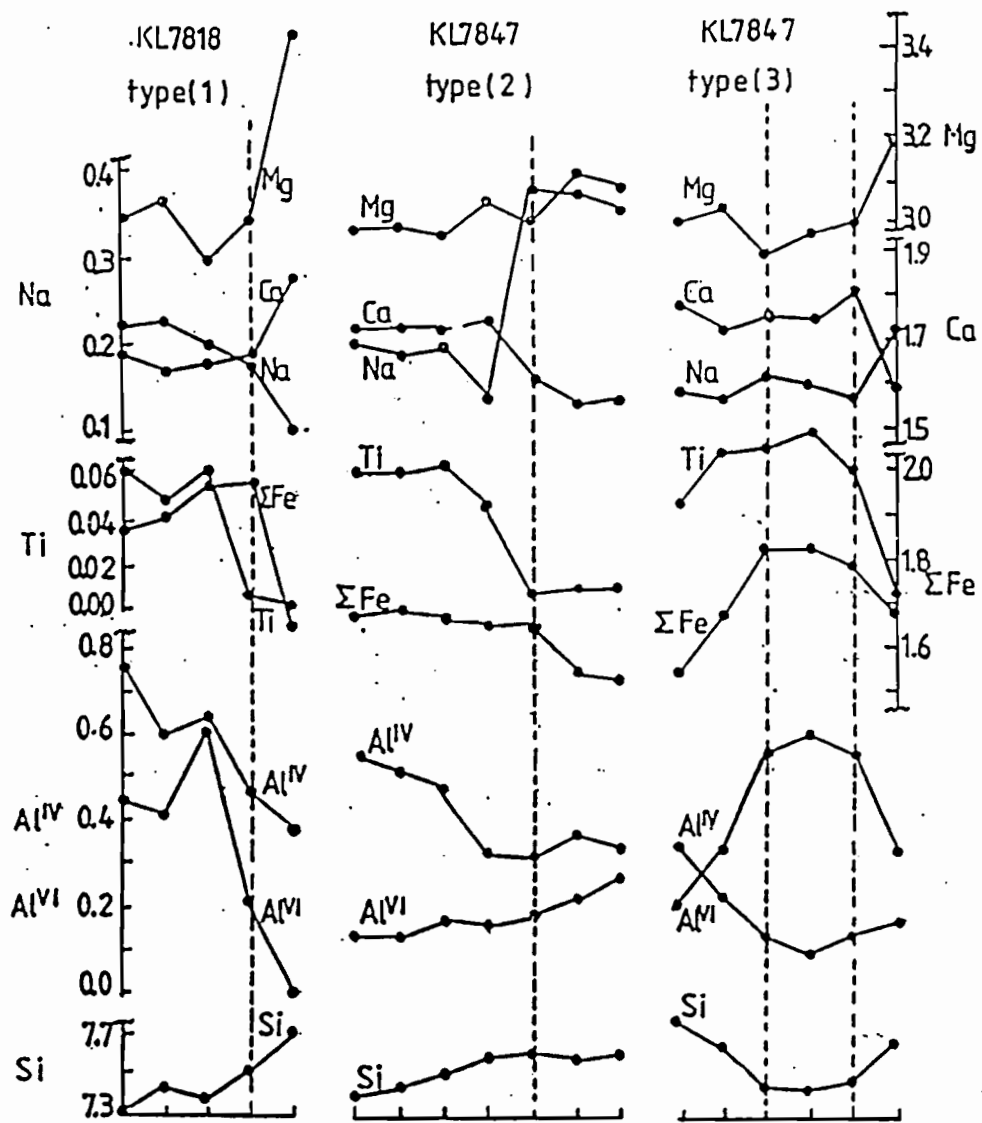
圖十 白雲母中各種陽離子對矽含量的作圖。實心圓表示白雲母；空心圓表示白矽雲母；Mus：表示白雲母；Par：鈉雲母。



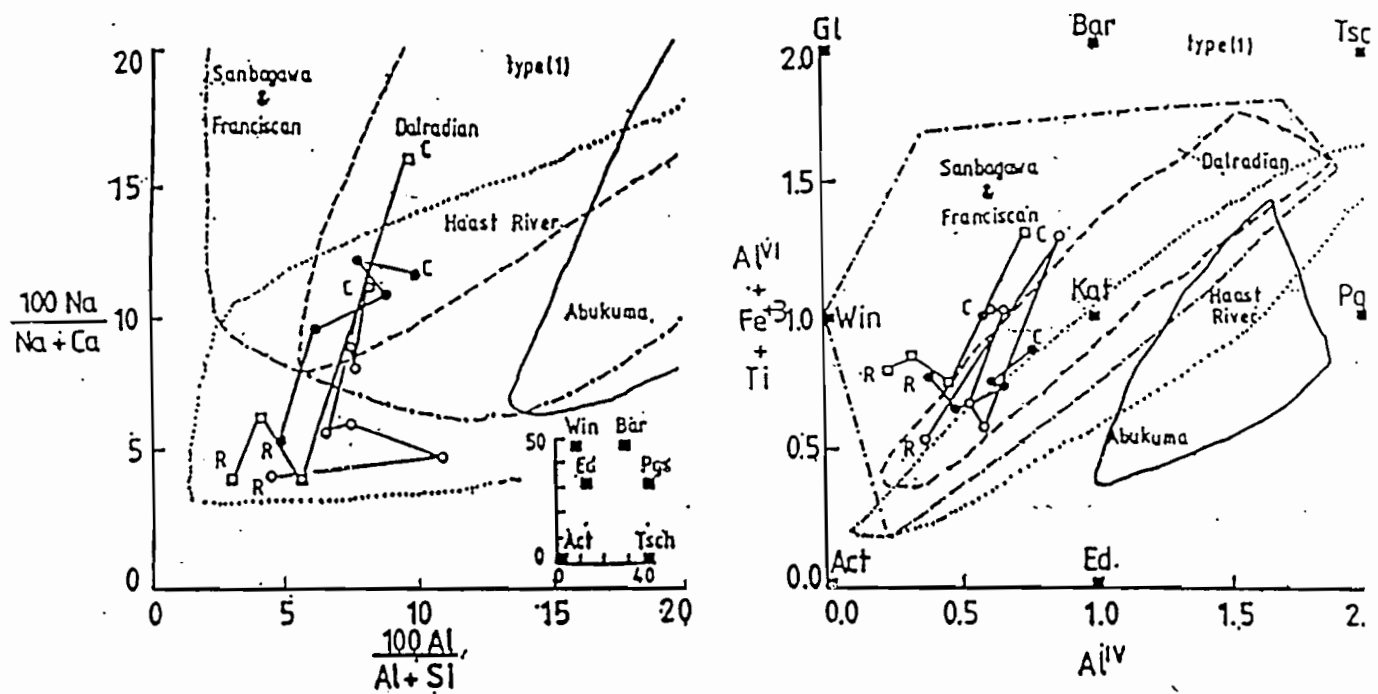
圖十一 角閃石中二氧化鋁對二氧化矽作圖結果。



圖十二 角閃石中各種不同陽離子對  $Al^{IV}$  作圖結果。



圖十三 環帶狀角閃石成分剖面圖。



圖十四 第一類環帶狀角閃石的  $\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}$  對  $\text{Al}^{\text{IV}}$  及  $100 \text{ Na} / (\text{Na} + \text{Ca})$  對  $100 \text{ Al} / (\text{Al} + \text{Si})$  作圖結果。由各種型態的線包圍的區域包括高壓相的 Sanbagawa 地層(日本)及 Franciscan 地層(加州); 中壓相的 Dalradian 地層(蘇格蘭)及 Haast River 地層(紐西蘭); 低壓相的 Abukuma 地層(日本)(Laird 及 Albee, 1981b)。Act: 陽起石; Bar: barrosite; Ed: 綠閃石; 藍閃石; Kat: 紅閃石; Pgs: 鉍角閃石; Tsch: 鎂閃石; Win: winchite。

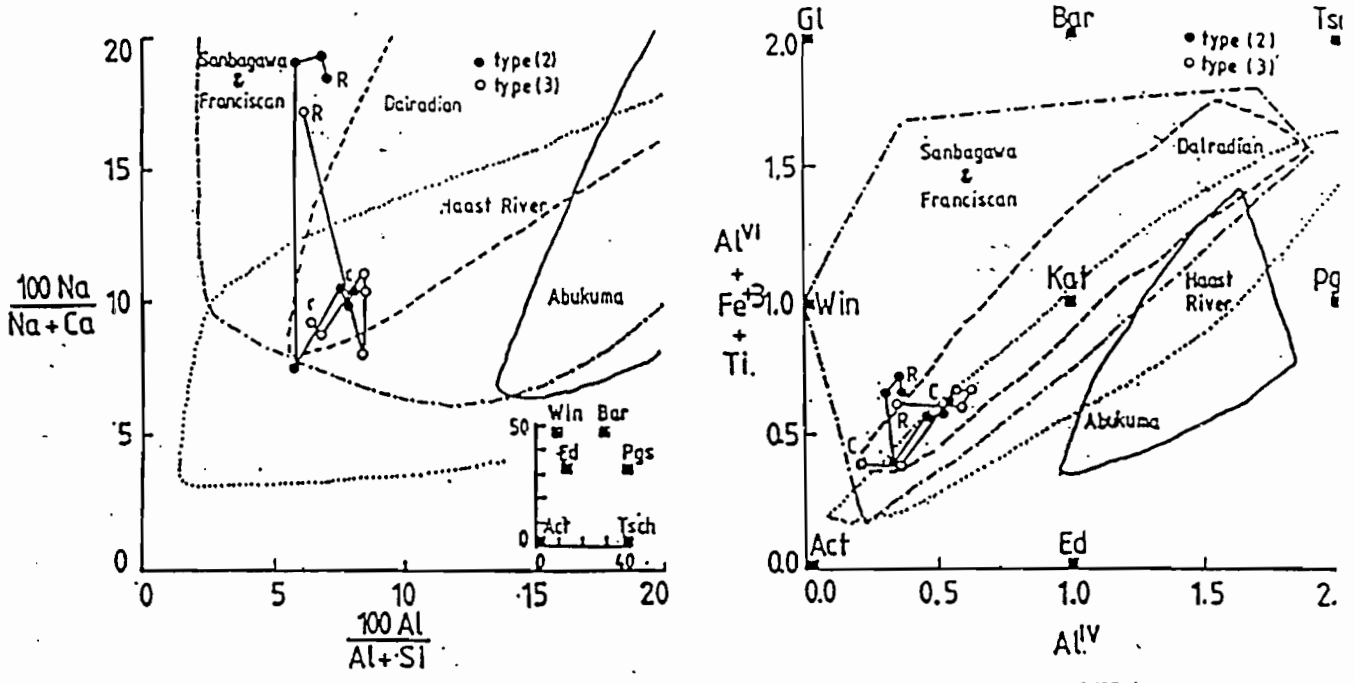
石 ( glaucophane ) 取代為主。第三類環帶：( 可在 KL78-47 標本中觀察到 ) - 分為核心、中圈及外緣。鈣含量集中在核心及中圈而外圈幾乎沒有；鎂含量則外緣比中圈及核心為高；鈉含量集中於外緣；中圈及核心則少見；鈦 ( Ti )、鐵 ( Fe ) 及三價鋁 ( Al<sup>3+</sup> ) 含量集中在中圈，而核心及外緣部分則少；六價鋁 ( Al<sup>6+</sup> ) 及矽 ( Si ) 含量在中圈、外圈很低 ( 圖十三 )。由於各種元素多寡則可以發現鎂閃石取代以中圈最顯注；藍閃石取代以外圈最顯注。成分上，核心部分偏向於透閃石或陽起石成分 ( 圖十五 )。顏色上，中心及中圈部分為黃色；外圈為藍綠色。造成藍綠色的原因可能是來自較高的鈉 ( Na ) 元素含量；而黃綠色則是導因於鈦 ( Ti ) 及鐵 ( Fe ) 的含量。第三類環帶僅在片麻岩所包裹的綠色火成岩中被發現。

### 三. 柘榴子石：

在片麻岩中柘榴子石多以自形晶的形態出現，並帶著淺淺的粉紅色及環帶 ( 圖十六 )。它在片麻岩的包裹岩 - 大理岩中以及一般片麻岩中都有發現。不過，包裹岩中的柘榴子石顆粒較大，無色並且幾乎都是很純的鈣鋁榴石成分，沒有發現環帶現象。但是在片麻岩中觀察到的柘榴子石便有以下特徵：鐵 ( Fe ) 及鎂 ( Mg ) 的含量由核心向邊緣逐漸增加，在這同時，鈣 ( Ca ) 和錳 ( Mn ) 則由邊緣向核心逐漸增加，因此，在核心部分以鈣鋁榴石 ( grossularite ) 及錳鋁榴石 ( spessartine ) 成分為主；邊緣則是以鐵鋁榴石 ( almandine ) 和鎂鋁榴石 ( pyrope ) 成分為主 ( 圖十七 )。比較這些片麻岩中柘榴子石的化學成分大都落入 Eastern Otago 變質岩的範圍中 ( 圖十八 )。

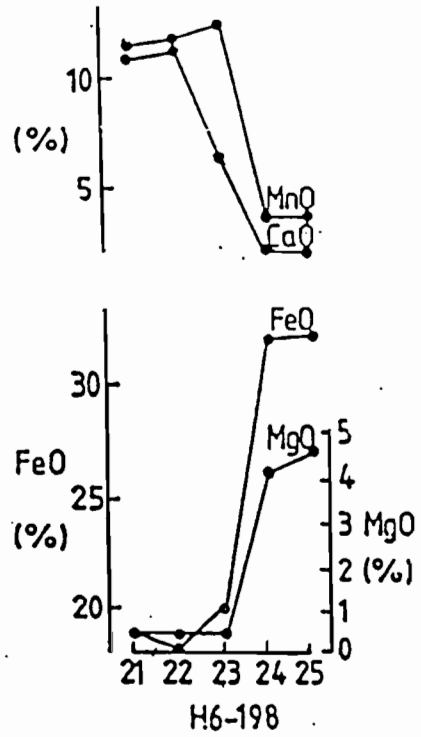
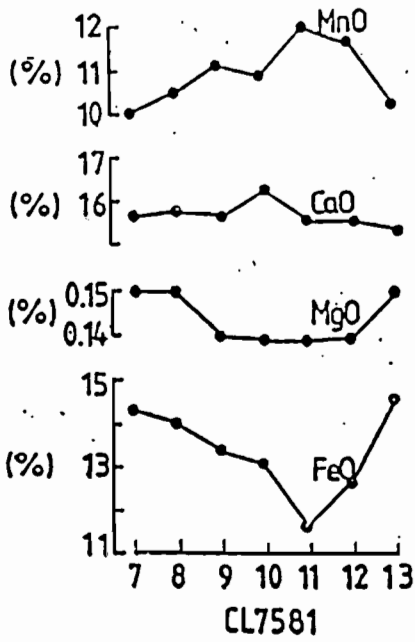
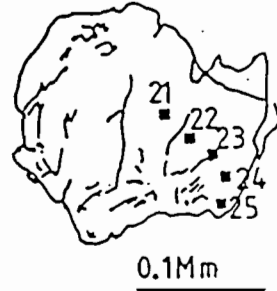
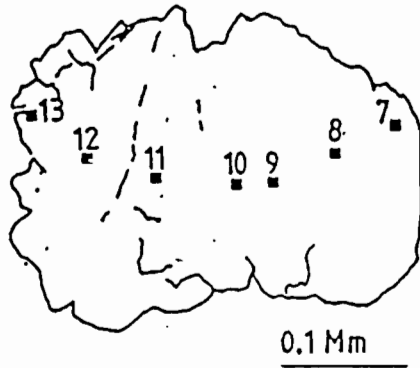
### 四. 長石類：

斜長石在顯微鏡下呈環帶狀：核心部分幾乎完全被白雲

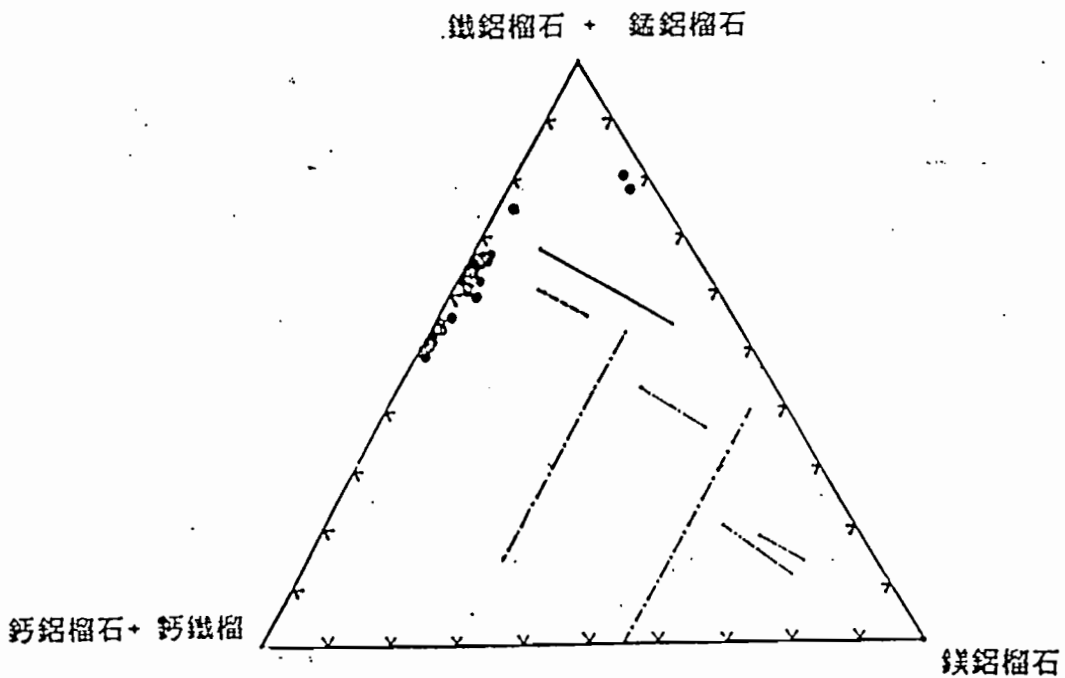


圖十五 第一類及第三類環帶狀角閃石之化學式比例圖。解說部分請看圖十四

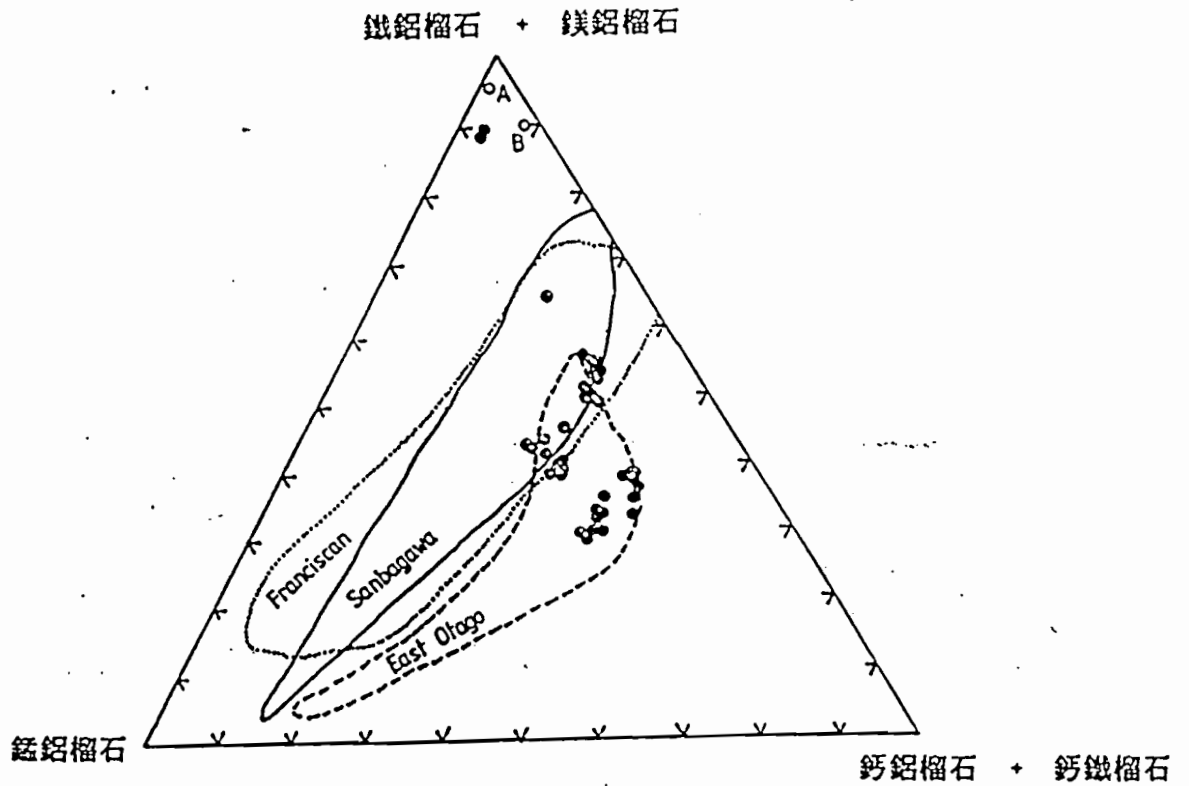




圖十六 環帶狀柎榴子石成分剖面圖



圖十七 柘榴子石之鐵鋁榴石 + 錳鋁榴石 - 鎂鋁榴石 - 鈣鋁榴石 + 鈣鐵榴石之三角圖。虛線：角閃石岩相 ( amphibolite facies ) 柘榴子石中之鎂鋁榴石出現範圍；實線：粒變岩相 ( granulite facies ) 柘榴子石中之鎂鋁榴石出現範圍；點線：榴輝岩相 ( eclogite ) 柘榴子石中之鎂鋁榴石出現範圍。



圖十八 鐵鋁榴石 + 鎂鋁榴石 - 錳鋁榴石 - 鈣鋁榴石 + 鈣鐵榴石成分三角圖。A: 砂線石帶內之柘榴子石成分 (New Hampshire); B: 含砂線石及藍晶石之泥質片岩中的柘榴子石成分 (Scottish Highland)。實線所包圍的柘榴子石成分範圍是來自 Sanbagawa 帶 (日本); 由點所包圍的柘榴子石成分範圍是來自 Franciscan (加州); 虛線所包圍的柘榴子石成分範圍來自 Eastern Otago ..

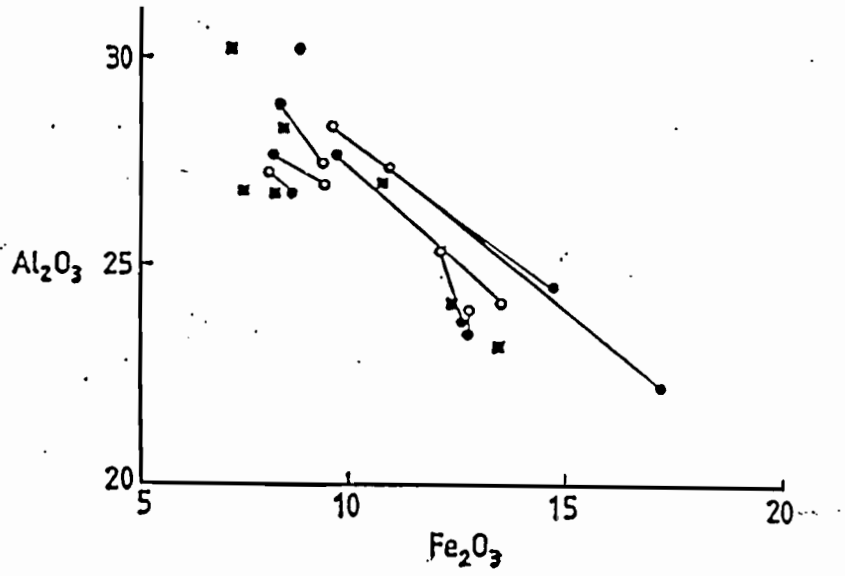
母、勳簾石 (zoisite) 以及方解石所取代；邊緣部分則以純鈉長石成分為主。觀察發現長石常包圍在黑雲母、白雲母、勳簾石、斜長石、方解石及石英外生長。在大部分的標本中鈣長石含量皆在 10% 以下，只有在二個標本中發現含鈣長石量在 21% 及 26% 的標本(標本編號為 CL 76-01 以及 CL 75-145)。

#### 五. 綠泥石：

在許多標本中發現綠泥石取代黑雲母的現象。在分類上，根據 Foster (1962)，這些綠泥石分屬於斜綠泥石 (clinochlorite)、鐵綠泥石 (ripidolite) 及 brunsvigite。斜綠泥石多出現在片麻岩及大理岩的熱力接觸帶。

#### 六. 綠簾石：

長被包裹在黑雲母及斜長石中，有時並且沿著岩石的片理出現自形晶之綠簾石。三氧化二鋁 ( $Al_2O_3$ ) 隨著三氧化二鐵 ( $Fe_2O_3$ ) 含量的增加逐漸減少 (圖十九)。雖然也有環帶現象發生，不過並未發現有一定的規則可尋，通常紅簾石 (piedmonite) 含量皆少於 1% 而綠簾石 (pistacite) 成份則在 11.3% 到 32.0% 之間。



圖十九 綠簾石中  $Al_2O_3$  對  $Fe_2O_3$  作圖。實心圓：帶狀綠簾石之核心；空心圓：帶狀綠簾石之外緣成分；實心方塊：均質綠簾石之成分；實線：連接環帶狀綠簾石之核心及外緣成分。

# 第六章 多次變質作用

當片麻岩這個古老的岩石呈現在眼前，我們由岩石的成因特徵——知道它是經過變質而成的岩石；由岩石切片的顯微鏡下觀察——我們又看到各種形狀，並帶著五彩顏色的礦物，我們也看到許多礦物如角閃石、綠簾石、柘榴子石等帶著不同顏色的環帶；當我們將這些礦物放在電子探儀上——我們更知道了它們的化學元素組合。了解這些現象，分析結果，無非希望進一步推論出這些片麻岩生成的歷史。在片麻岩形成的過程中，礦物們經過“適者生存”天律的淘選，也因此留下了它們生存過程中的眾生相——這些礦物或被取代、或被置換、或形成更新的礦物、或消失在礦物的群落中。地質現象的奧秘，並非死寂的沙石所能完全代表的，在整個片麻岩生成時間的座標上，礦物是個活生生的紀錄，透露了它那複雜、詭譎的多次的變質的歷史。

## 第一節 片麻岩的變質作用 與礦物的化學

敘述變質作用本身便是很複雜的，而真正想了解太魯閣內片麻岩的變質作用，則必須從岩石的變質作用開始，進而了解礦物結晶的先後關係，並熟悉岩石的變質作用及礦物化學分析，才能對它多些認識。

綜合礦物觀察以及礦物化學分析資料，做成以下的整理：

- 一．斑狀變晶黑雲母中全量鋁（ $\Sigma Al$ ）與鐵（Fe）含量高於細晶形黑雲母。
- 二．斑狀變晶白雲母中鈦（Ti）、鈉（Na）及全量鋁（ $\Sigma Al$ ）的含量高於那些結晶細小且常平行片麻岩理排列的白砂雲母。

- 三. 在化學成份上，片麻岩中的白雲母與理想的白雲母化學組成非常接近。只不過，鈦（Ti）及鐵（Fe）的含量上稍微高些。
- 四. 呈環帶狀的柘榴子石中，由核心到邊緣的成份有以下趨勢：氧化鈣（CaO）及氧化錳（MnO）含量遞減，但氧化鐵（FeO）及氧化鎂（MgO）含量則遞增，核心部分鈣鋁榴石及錳鋁榴石的成份較多；邊緣部分則以鎂鋁榴石及鐵鋁榴石的成份居多。
- 五. 複雜的角閃石包括三種不同的環帶類型。
- 六. 鈣長石的含量通常少於 10%。不過，有兩個較少鈉鋁矽石化作用的鈣鈉長石層在鉀長石中被發現。
- 七. 綠簾石有不規則的環帶狀成份分佈。

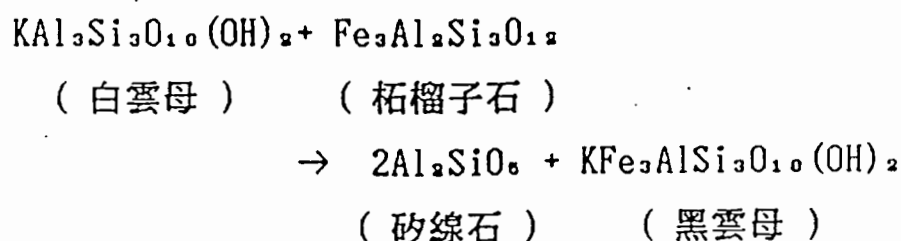
## 第二節 片麻岩中變質作用 指標礦物個論

根據一、礦物中所含之元素分布，二、環帶狀之柘榴子石及角閃石，三、礦物生成之不連續反應及四、岩石組織間彼此的關係來推斷，太魯閣地區的片麻岩至少受過三次變質作用。這三期變質作用依先後次序稱為  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 。上述四種可以由各種變質作用的指標礦物中得到証實。

### 一. 環帶狀柘榴子石：

成環帶的柘榴子石可以作為多次變質的證據 [ Yardleg (1977), Olimpio and Anderson (1978) ]。隨著鈣（Ca）、氧化錳（MnO）含量的遞減及氧化鎂（MgO）、氧化鐵（FeO）含量的遞增，柘榴子石的變質度有增加的趨勢 [ Sturt (1962), Nandi (1967), Miyashiro and Shido (1973) ]。由太魯閣地區片麻岩的分析指出：由

核心到邊緣，氧化鎂（ $MgO$ ）及氧化鐵（ $FeO$ ）的含量遞增而氧化錳（ $MnO$ ）及氧化鈣（ $CaO$ ）含量遞減。因此，推論  $M_2$  變質度邊緣高於  $M_1$  變質度邊緣。此外，在柘榴子石邊緣上發現有綠簾石取代出現，這些綠簾石則可作為  $M_2$  變質作用的產物。有些柘榴子石核心周圍有許多的黑雲母及矽線石包圍著。因此，推論這些黑雲母、矽線石為  $M_2$  變質作用的產物，由化學式：



認為由  $M_1$  到  $M_2$  是個前進變質作用（prograde metamorphism）(Yardley et al.)。

## 二. 環帶狀角閃石：

在角閃石中所發現的環帶也是由變質作用過程中，物理、化學狀態改變造成的〔Grapes and Graham (1978), Ernst (1979), Laird and Albee (1981)〕。同樣利用角閃石作為多次變質的證據。世界各地變質岩的分析，將含鐵質片岩中的角閃石分為兩種：一為藍閃石 — 作為壓力指標；二為淡閃石及鎂閃石 — 作為溫度指標。

在此區角閃石分析中知道，第一類、第二類角閃石的核心部分與第三類中圈部分鈦（Ti）含量較高，依 Rasse (1974) 所提：鈦（Ti）含量隨變質度的增加而遞增，所以推論它們比第一類、第二類角閃石邊緣及第三類角閃石外圈部分有較明顯的藍閃石及鎂閃石取代作用發生〔羅清華



及王執明 ( 1981a ) ] 。第三類角閃石環帶的核心是屬於  $M_1$  變質作用產物；而第一、第二類核心及第三類中圈部分則為  $M_2$  變質作用造成；第一、第二類外圍及第三類外圍則為  $M_3$  變質作用造成。由於  $M_2$  變質作用所含的鈦 ( Ti ) 含量多於  $M_3$  作用，故推論  $M_2$  變質度高於  $M_3$  變質度，亦高於  $M_1$  變質度。

### 三. 黑雲母：

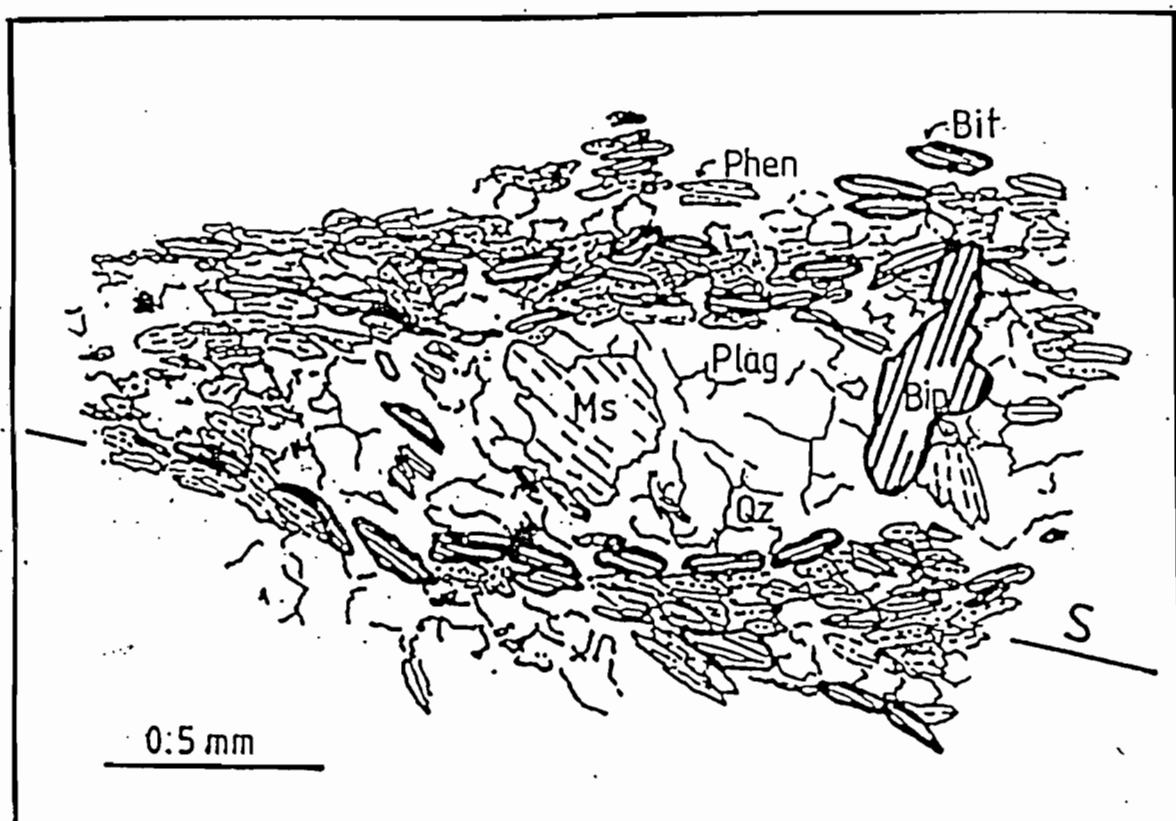
在斜長石與鉀長石中發現的殘留黑雲母，依礦物結晶的先後次序，這些長石為  $M_2$  變質作用產物，而殘留其中的黑雲母則稱為  $M_1$  的產物。在黑雲母結晶外形上有斑狀變晶及細晶，由斑狀變晶並不平行片理排列而細晶黑雲母則平行片理排列的情形來看，細晶的生成時間較斑狀變質岩來得晚 ( 圖二十 )。斑狀變晶黑雲母為  $M_2$  變質產物；細晶黑雲母則為  $M_3$  變質產物。此外斑狀晶周圍可以發現綠泥石取代現象但細晶周圍則無此現象出現，因此也將綠泥石當作  $M_3$  變質作用產物。

除了礦物組織觀察變質先後次序外，由鈦 ( Ti )、三價鋁 (  $Al^{+3}$  ) 含量及  $Mg / ( Mg + Fe^{+2} )$  的遞增與錳 ( Mn )、 $Fe^{+3} / ( Fe^{+3} + Fe^{+2} )$  含量的遞減有變質度遞增的趨勢來看。斑狀變晶黑雲母中比細晶黑雲母中的鈦 ( Ti ) 及三價鋁 (  $Al^{+3}$  ) 含量高，指示  $M_2$  變質度高於  $M_3$  變質度。

在斑晶的邊緣發現有礦石顆粒及白雲母，並且在聚集斑晶中也有被礦石顆粒及白雲母分開的現象。這些不尋常的礦物結晶組織，顯示在  $M_2$  變質作用的過程中曾經歷了石英—長石類岩石之部分熔融 ( partial melting ) 階段。

### 四. 白色雲母：

白雲母很明顯地被斜長石或鉀長石包含在中央。並且有



圖二十 粗粒白雲母 ( Ms ) 及斑狀變晶之黑雲母 ( Bip ) 常常與 Ms 的片理排列方向 ( S ) 不一致，白矽雲母 ( Phen ) 及細晶黑雲母 ( Bit ) 則常構成片理。 Qz: 石英; Plag: 斜長石。

部分白雲母被鉀長石所取代，指出  $M_2$  變質時間的溫度 — 壓力狀態已超過了穩定範圍。在斑狀黑雲母中發現被斑狀白雲母取代的情形，因此這些白雲母是在斑狀黑雲母及矽線石形成後才生成的（圖二十一）。白雲母存在於  $M_1$  及  $M_2$  變質過程中，不過由於有長石取代白雲母的狀況出現， $M_2$  變質作用高峰期似乎已經高於白雲母存在的界限。在斑狀變晶白雲母的顯微鏡觀察，可以看到被平行片理排列的白矽雲母取代，所以推論白矽雲母為  $M_3$  變質作用的產物。

#### 五. 細晶黑雲母與白矽雲母共存：

由這二種礦物共存下所作的全量鋁（ $\Sigma Al$ ）圖形分析，約有 1.56 斜率表現（圖二十二），由 Wenk（1970）的解釋得知：這二種礦物是處在化學平衡狀態。

#### 六. 長石類：

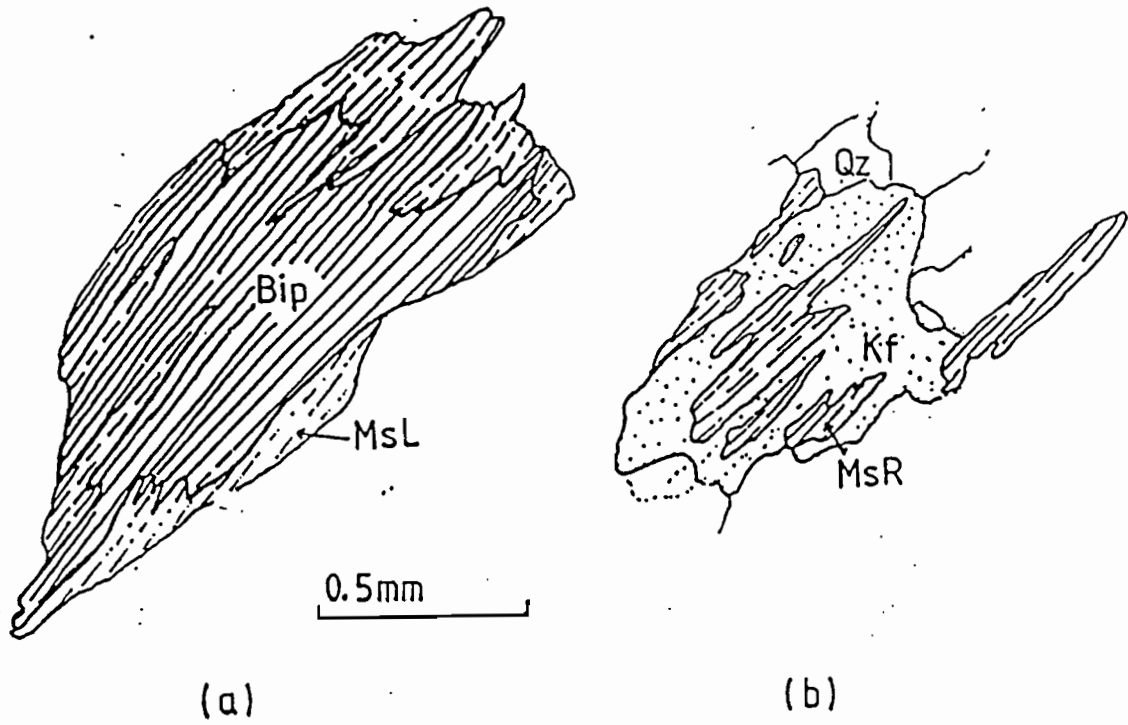
在顯微鏡下觀察到殘留在鉀長石中的黑雲母及白雲母，這些殘留的白雲母有的被鉀長石所取代。因此，鉀長石在白雲母之後形成。鈣含量高的斜長石在鉀長石中被發現，指示鈣斜長石曾存在於  $M_1$  及  $M_2$  的變質作用中，這說明了  $M_1$  及  $M_2$  的變質程度大於以鈉斜長石為主的  $M_3$  變質作用。

### 第三節 多次變質作用

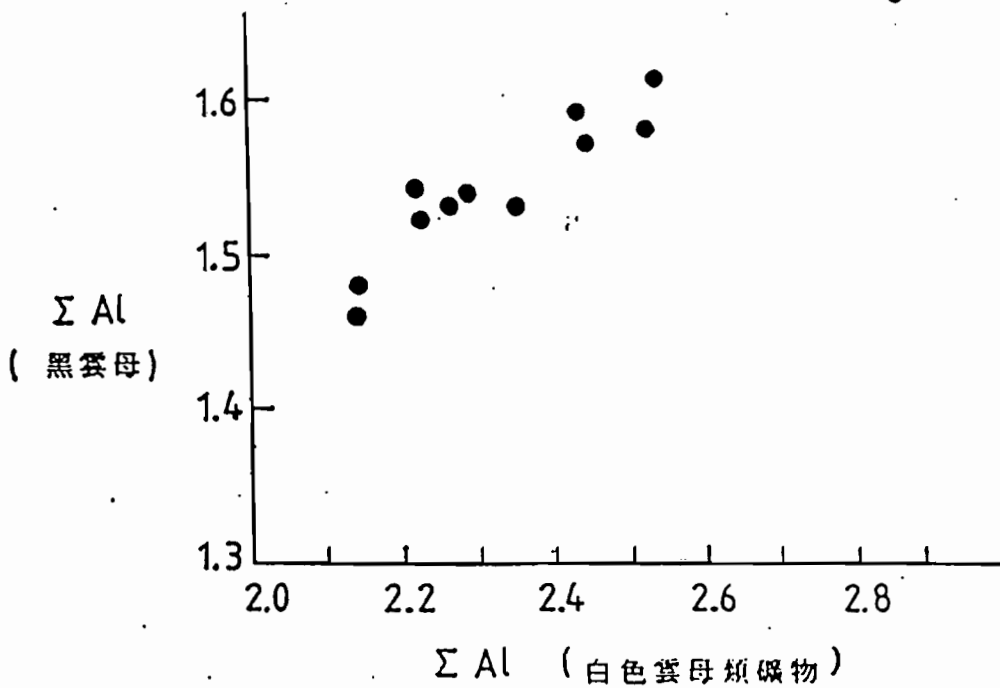
由圖二十三可以清楚地比對各種礦物在不同變質期出現的情形。當了解這些礦物與變質作用的關係，便可以歸納出這三種變質作用的礦物組合：

#### 一. $M_1$ 變質作用：

此期作用的證據可以在（1）柘榴子石的核心部分，（2）第二類角閃石的核心，（3）殘留在鉀長石及斜長石中的白雲母和黑雲母，（4）鉀長石中高鈣含量的斜長石包容物中發現



圖二十一 (a) 斑狀變晶黑雲母 ( Bip ) 的邊緣常有後期產生的白雲母 ( MsL ) 縫飾。( 標本編號為 CL 75 - 81 ) (b) 殘存的白雲母 ( MsR ) 被 M<sub>2</sub> 變質相的鉀長石 ( Kf ) 所取代 ( 標本編號 CL 78 - 1 )。



圖二十二. 黑雲母的鋁含量對白砂雲母的鋁含量作圖。

變質相 礦物	M1 中低度變質	M2 高度變質	M3 低度變質
石英			
斜長石	An > 17	An > 17	An < 10
鉀長石			
矽線石			
柘榴子石	鈣鋁榴石+錳鋁榴石	鐵鋁榴石+鎂鋁榴石	
角閃石	陽起石質的角閃石	角閃石	鈉含量高的陽起石
黑雲母			
白雲母		白雲母	白矽雲母
綠簾石			
綠泥石			

圖二十三 多次變質作用片麻岩中的共生礦物（和平—溪畔地區的片麻岩）。

An: 鈣長石

。他們的礦物組合為：柘榴子石 + 黑雲母 + 白雲母 + 斜長石 + 石英 ± 角閃石類 ± 綠簾石。由柘榴子石，角閃石以及鈣質斜長石的存在指示  $M_1$  變質作用是屬於中低度變質作用 [ Winkler ( 1979 ) ] 。

## 二. $M_2$ 變質作用：

此期作用的証據可在環帶狀柘榴子石邊緣處發現，成份屬於鐵鋁榴石 + 鎂鋁榴石。氧化鐵 (  $FeO$  )、氧化鎂 (  $MgO$  ) 含量高於其核心部分，推論  $M_2$  的變質作用高於  $M_1$  之變質作用。礦物組成為：黑雲母 + 白雲母 + 矽線石 + 柘榴子石 + 斜長石 + 石英 ± 角閃石 ± 鉀長石 ± 白雲母 ± ( 熔解 ) 。由礦組成可以了解它是屬於高度變質作用。

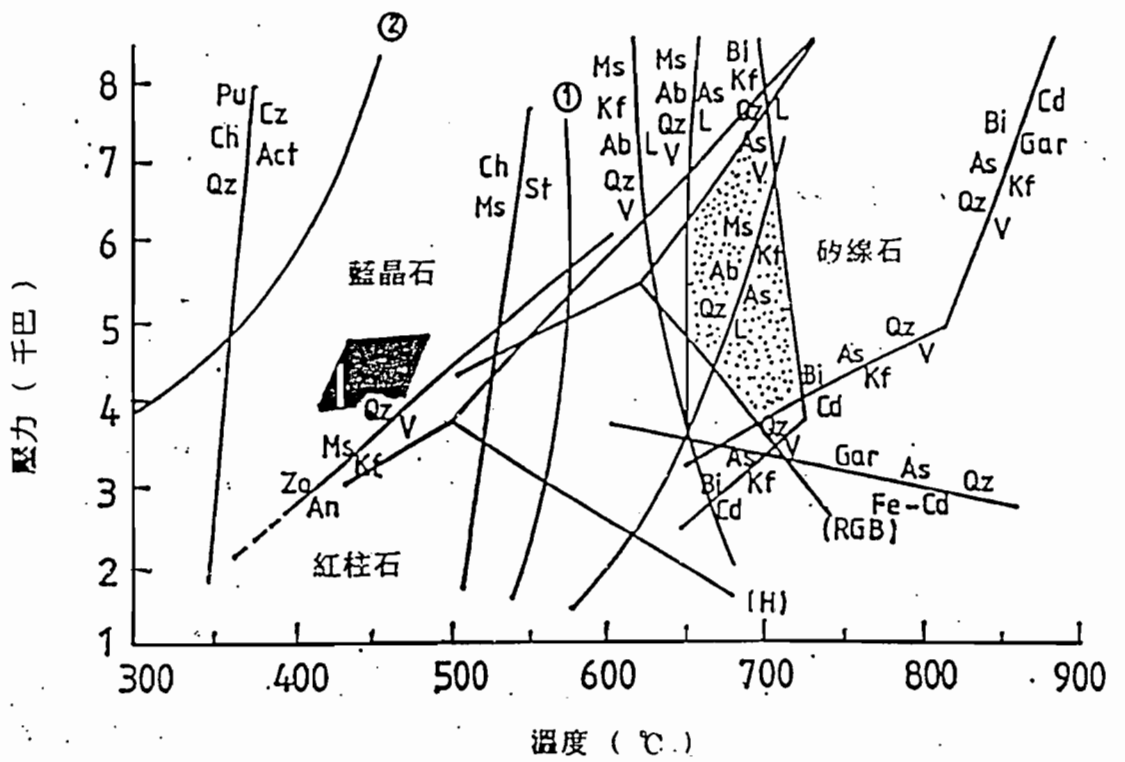
## 三. $M_3$ 變質作用：

判斷  $M_3$  變質作用的証據來自 (1) 礦物周圍的綠泥化作用，(2) 細晶雲母及白矽雲母的產生，同時，(3) 環帶狀角閃石邊緣，(4) 綠簾石環帶及 (5) 出現在斜長石邊緣由變質作用產生的鈉斜長石。由以上証據指示出  $M_3$  變質度低於  $M_2$  變質作用。它的礦物組成為：綠泥石 + 黑雲母 + 白矽雲母 + 綠簾石 + 鈉長石 + 石英 + 陽起石或透閃石。這些組合是屬於低度變質的產物。

由  $M_1$  ,  $M_2$  ,  $M_3$  的礦物組合了解片麻岩多次變質作用的強度，但是對於更確切的溫度 - 壓力環境，則需靠其中所存在的礦物生成條件而定。

因為片麻岩受到多次變質作用，保留在礦物形狀上的特徵很複雜，所以對於  $M_1$  的變質作用僅止於知道它低於  $M_2$  變質作用，至於詳細溫度 - 壓力條件則不明。

至於  $M_2$  的變質狀態則可利用角閃石當作溫度 - 壓力的指標， $M_2$  的變質狀態如 ( 圖二十四及圖二十五 ) 所示。在片麻岩之變質基性包裹岩中所發現的角閃石是屬於中度變質相。而擁有高鈦 (  $Ti$  )

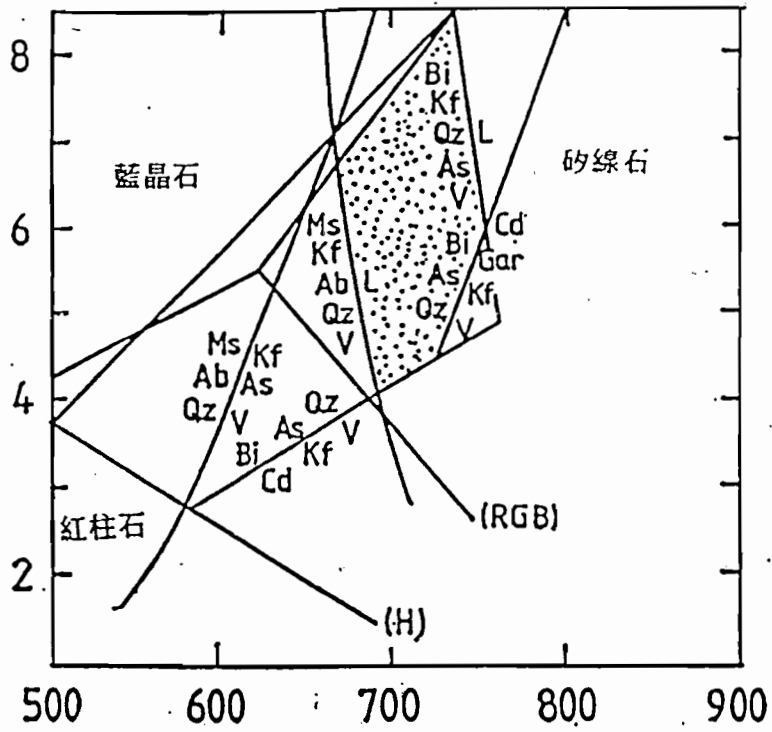


圖二十四

第二期及第三期變質作用可能存在的溫度-壓力範圍。(水壓=全壓)  
 點狀區域表示第二期變質作用可能的溫度、壓力範圍。

陰影區域表示第三期變質作用可能的溫度、壓力範圍。

Ab: 鈉長石    And: 紅柱石    As: 含鋁矽酸鹽    Bi: 黑雲母    Cd: 螢青石  
 Ch: 綠泥石    Cz: 斜矽葉石    Gar: 柘榴子石    kf: 鉀長石    Ky: 藍晶石  
 Ms: 白雲母    Pu: 綠纖石    Qz: 石英    Sill: 矽線石    St: 十字石    Zo: 矽葉石



圖二十五 當水壓為 0.6 倍全壓時之第二期變質作用溫度、壓力條件。點狀區域表示可能的範圍。各項說明及縮寫請見圖二十四。

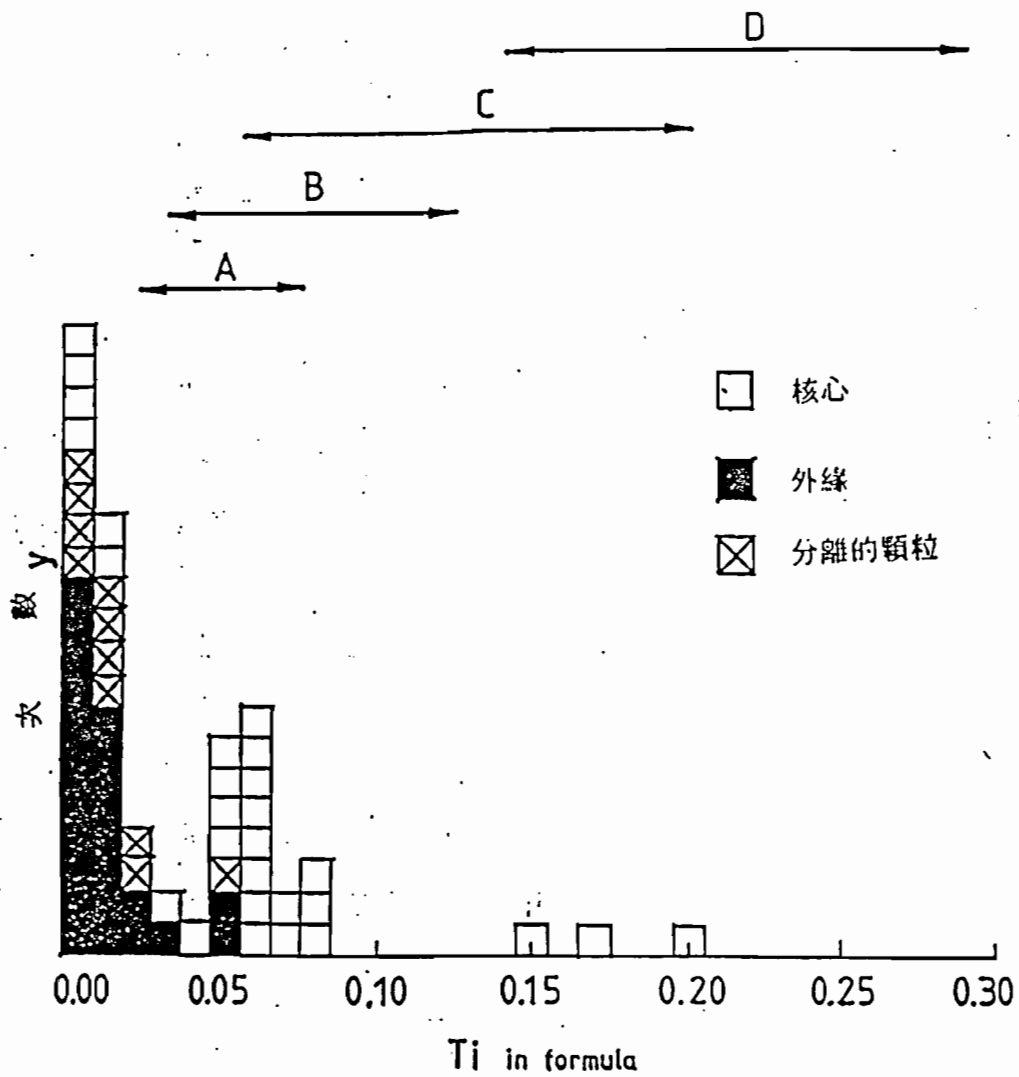


含量的角閃石則屬於高度變質相的產物（圖二十六）。除了角閃石證據外，白雲母的化學組成亦可作為溫度指標，由  $\text{Na} / (\text{Na} + \text{K})$  的比率得到 0.009 至 0.128 之間的實驗值，推論它的變質溫度在 620 °C 左右 [Eugster et. al. (1972)]。如果進一步詳細考慮白雲母  $\text{Na} / (\text{Na} + \text{K})$  值 0.019，再加上與矽線石、鉀長石及斜長石所做的比較，其變質溫度落在 620 °C 到 640 °C 間。由礦物不穩定程度及礦物組織可以假設當水壓與全壓相等時，則溫度區間在 630 °C 到 725 °C，壓力範圍則在 3.5 到 7.3 千巴；當水壓等於 0.6 倍的全壓時，推算出溫度在 673 °C 到 750 °C，而壓力則在 4.0 到 8.3 千毫巴之間。

在  $M_3$  變質作用中也可以用角閃石壓力指標；白矽雲母則作為溫度指標。角閃石邊緣的化學成份經分析後落在 Sanbagawa 及 Franciscan 的高壓變質相內；由  $\text{Na} (M_4)$  對  $\text{Al}^{3+}$  作圖的結果，其數值在 0.32 到 0.38 之間，由此可以推算出壓力範圍在 4.1 千巴到 4.5 千巴之間（圖二十七）。如果使用白矽雲母做為溫度指標，含鈉（Na）範圍在 0.01 到 0.11 之間，溫度約在 420 °C 左右；再對比白矽雲母中的矽（Si）含量約在 3.01 到 3.80，推測溫度為 480 °C，歸納  $M_3$  的溫度狀態在 420 °C 到 480 °C；而壓力在 4.1 到 4.5 千巴。

總結多次作用下片麻岩的變質度為（圖二十八）：

- 一.  $M_1$  是中低度變質相。但溫度 - 壓力狀態不清楚。
- 二.  $M_2$  是高度變質相。變質溫度 - 壓力有兩種情況：一為水壓等於全壓時，壓力在 3.5 到 7.3 千巴間，溫度為 620 °C 到 725 °C；二為水壓等於 0.6 倍的全壓時，壓力在 4.0 到 8.3 千巴之間，溫度則為 675 °C 到 750 °C。
- 三.  $M_3$  是屬於低度變質相，變質壓力在 4.1 到 4.5 千巴間，溫度則為 420 °C 到 480 °C。



圖二十六 角閃石鈦含量之直方圖。A: 綠色片岩 - 角閃石轉變相; B: 低度角閃石相; C: 高度角閃石相; D: 粒變岩相。( Rasse, 1974 )

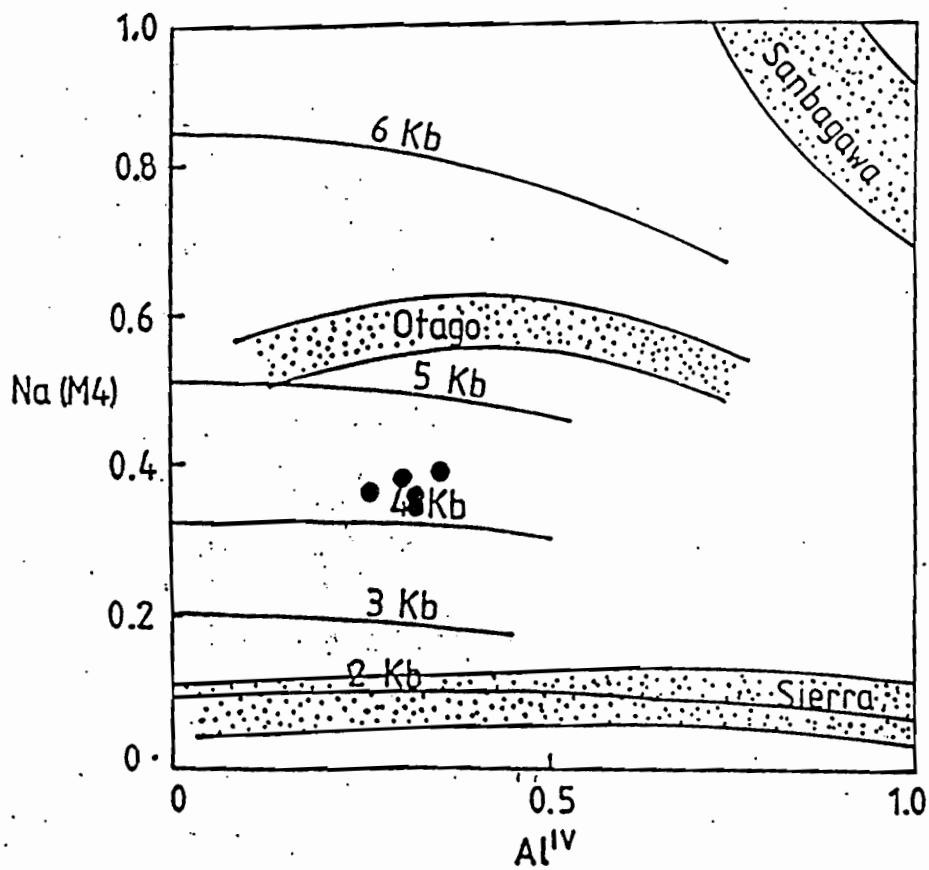
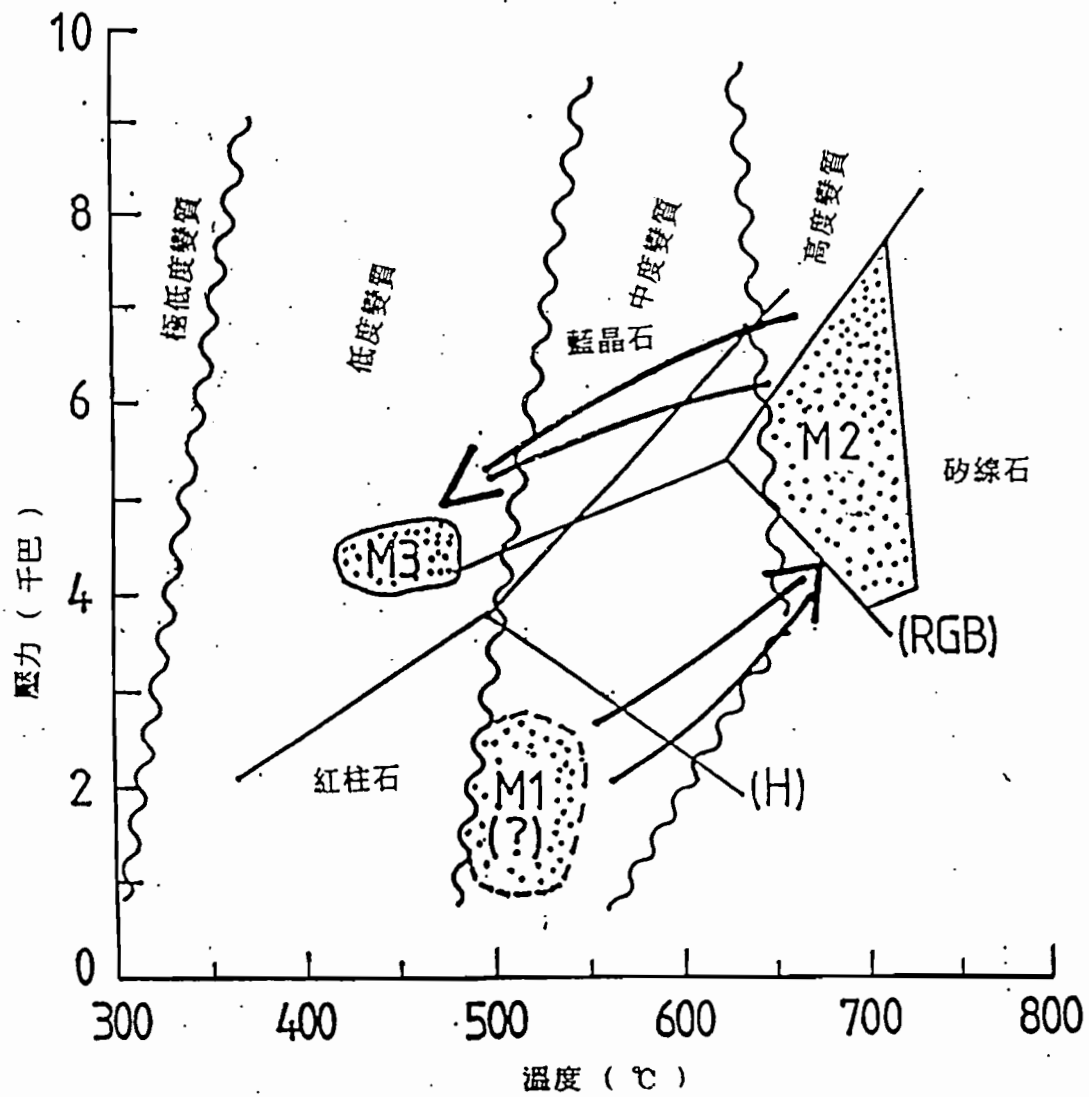


Fig. 8. 圖二十七 第二類角閃石邊緣及第三類角閃石外緣的 Na (M<sub>4</sub>) 對 Al<sup>IV</sup> 的作圖。



圖二十八 多次變質作用之壓力 - 溫度圖表。變質度界限是採 Winkler (1979)；含鋁矽酸鹽之穩定曲線是採 Richardson, Gelbert 及 Bell (1969) (RGB) 和 Holdaway (1979) (H)。

# 第七章 太魯閣峽谷之地史

## 第一節 化石證據

在沉積岩地區，地層的新舊關係可以由岩層上下的相對位置得之。不過，在東部變質岩區域中，岩性複雜、多變，許多岩石沒有明顯層理等因素，“不能用現在出露地層上下接觸的關係去相互對比”便成了變質岩分層的最大特性之一。當直接由岩層對比無法重整地層次序時，則希望從“化石證據”上去尋找答案，但由於經多次變質作用，化石的痕跡幾乎蕩然無存。唯曾在大理岩中找到相當於二疊紀的化石，可指示大南澳群至少有部分是屬於古生代晚期（顏滄波等，1951）（圖二十九）；最近在在石英—雲母片岩中則發現相當於中生代的雙鞭毛藻化石（劉平妹、盧佳遇，未正式發表），可以知道天祥片岩原岩生成時代為中生代。

## 第二節 放射性定年資料

除化石外，岩石的同位素定年測定，亦為研究其岩漿活動、變質時代、地殼變動和構造演變的主要根據。由得到的定年資料其時代範圍，從三百萬到九千萬年前皆有，但仍可提供若干參考數據，嘗試推定台灣變質岩系的變質和構造發育情形。表三為莊文星和貝隆(1986)，將台灣發表的變質岩系岩石的放射性定年資料整理所得之表格再加以修定結果。

利用放射性定年所得的年代是火成岩侵入、變質岩作用和造山運動等發生的時間，而不能如化石一般提供完整的地史記錄。根據發表過的有關文獻，大南澳片岩至少有三期的熱力構造運動：第一期為八千萬到九千萬年前，代表第一期區域變質作用，包括花崗岩的侵入和

區 域	岩 類 及 礦 物	年 齡 (百 萬 年)	資 料 來 源
東 澳 — 南 澳 (太 魯 閣 帶)	角閃岩	82.5—86.5	(5)
	偉晶花崗岩中之白雲母	74.5—86	(1)(5)
	混合岩中之黑雲母	58—64	(5)
	混合岩、片麻岩、偉晶花崗岩	39—40	(4)
	片麻岩中之黑雲母	30—39	(1)(2)(5)
	片岩中之陽起石	35	(5)
	輝綠岩	32.1—33.9	(5)
	變質輝綠岩	13	(5)
溪 畔 — 太 魯 閣 (太 魯 閣 帶)	變質基性岩類 (陽起石)	24—29	(5)
	片麻岩中之黑雲母	6.5—9.6	(5)
	花崗岩質變質岩、片麻岩	2.6—6.5	(4)
瑞 穗 — 玉 里 (玉 里 帶)	綠簾石角閃岩	79	(3)
	藍閃石片岩	8—14	(3)
	雲母片岩	6—10	(5)
	綠簾石角閃岩	4.6	(3)

資料來源：(1)顏滄波、羅森本 (1964)，鉀氬法

(2)阮維周、周敏章、羅煥記 (1972)，鉀氬法

(3)江博明、劉忠光 (1977)；江博明、劉忠光、長澤宏 (1981)，鈷鋇法

(4)江博明等 (1986)，鈷鋇法

(5)莊文星、貝隨 (1986)，鉀氬法

### 表 三

台灣變質岩的放射性年齡表

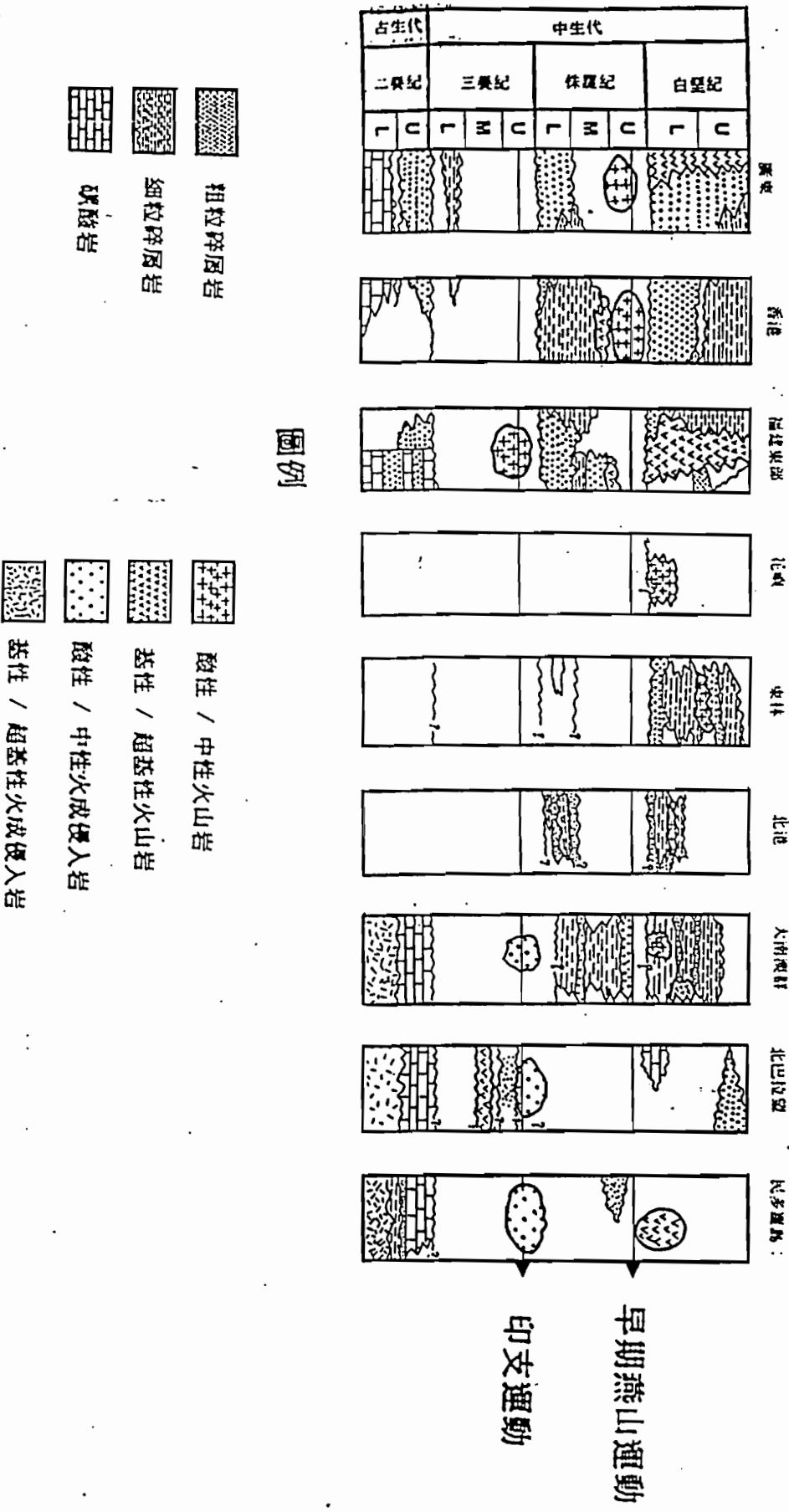
基性岩盤的變質作用。第二期為三千五百萬年前到四千萬年前，代表第二期區域變質作用。第三期為現在到一千萬年前，代表第三期區域變質作用，也是台灣主要的新生代後期弧碰撞時期。

### 第三節 歷史背景

太魯閣峽谷在地質區域分布上是屬於大南澳變質群中的一部分，因此，整個太魯閣峽谷的發育史便與大南澳群的構造史有密切的關連。在開始重演歷史之前，首先必須了解歷史發生時的時、空、背景以及創造歷史的四次構造運動。

在地理位置上，故事的舞台是位於東南亞低緯度地區及赤道附近，也就是在花崗岩基盤的華南古陸東南側，並且在古陸周圍伴隨著有大量的碳酸岩沉積。在年代上，太魯閣地區的大理岩中發現二疊紀化石；並且在東南中國沿海、及緯度  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$  附近的菲律賓民多羅島 (Mindoro Is.) 及北巴拉望島 (North Palawan Is.) 的地下鑽井資料中顯示有二疊紀系的火成岩基盤及碳酸岩沉積 (圖三十)。在蔴荖什硤F南沿海曾發生過的四次巨大構造運動，深深地影響了中國東南沿海與東南亞的地質構造及地理景觀：第一次運動是發生在三疊紀晚期 (late Triassic)，相當於二億到二億五千萬年前的印支運動 (Indosinian)，這次的運動可以對比到歐洲的海西寧運動 (Hercynian)；第二次運動是發生在侏儸紀晚期 (late Jurassic)，距今約一億三千萬年前的早期燕山運動 (early Yenshanian)；第三次運動是發生在白堊紀晚期 (late Cretaceous)，約八千萬到九千萬年前的南澳運動；第四次運動則是影響太魯閣峽谷地形最巨的蓬萊運動，發生時間則在上新到更新世間，距今約四百萬年前。

圖三十 中國大陸東南部及台灣地區地層柱狀圖





## 第四節 太魯閣地史

故事便從中國東南板塊的分裂開始。

話說二億多年前 ……………。

第一階段（圖三十一（a））：

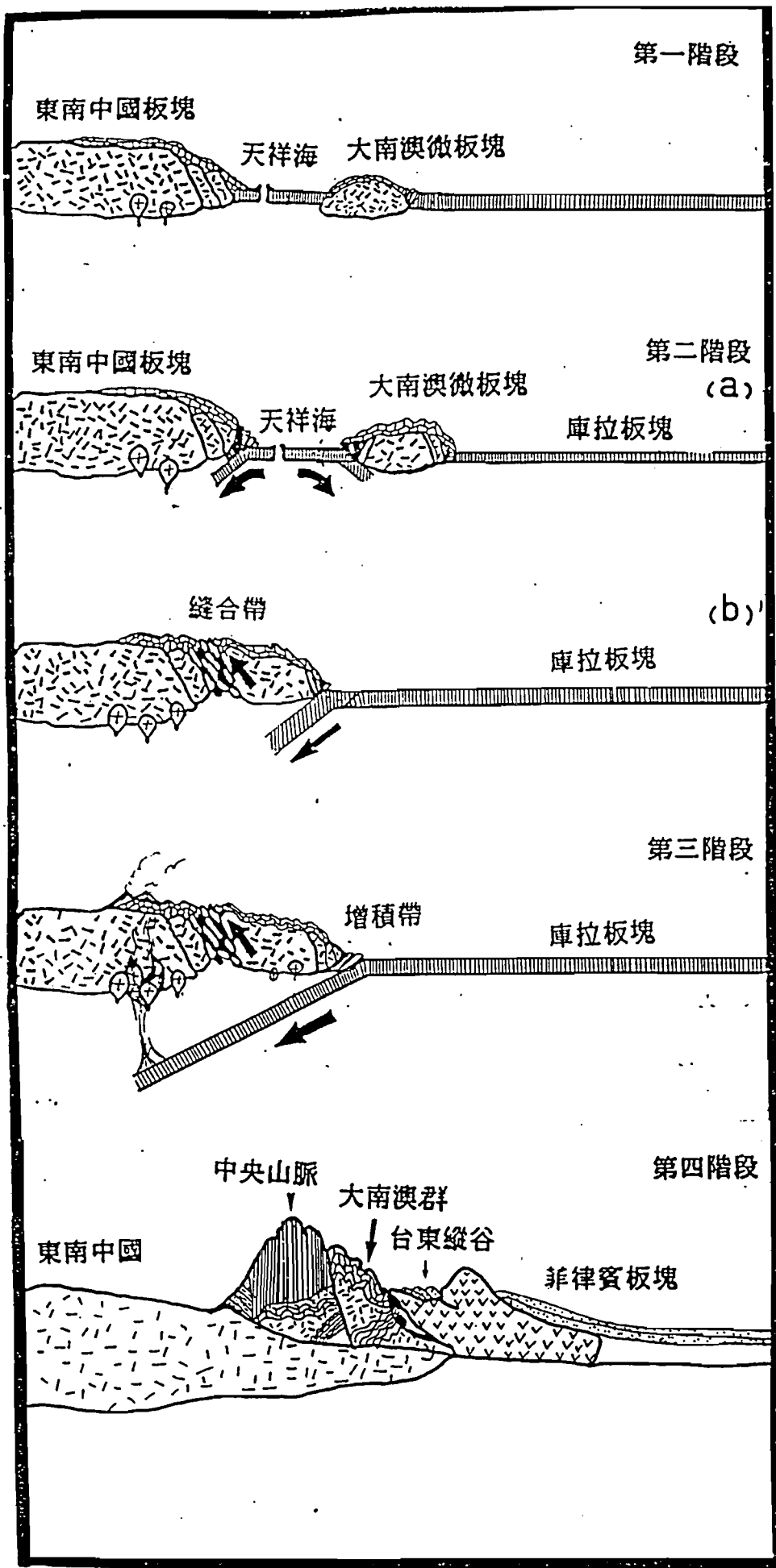
印支運動使得華南古陸在二疊系上部出現了一個很明顯的區域性侵蝕風化不整合 — 在距今二億五千萬到二億年前的印支運動作用後，東南大陸板塊開始張裂，原來的古陸邊緣分出了一塊微小的花崗岩板塊，以下便稱為大南澳微板塊，因位於低緯度的關係分裂出來的板塊，邊緣有大量的碳酸岩沉積。小板塊逐漸向東南方向移動，與古陸間形成了邊緣海，來自兩邊的侵蝕物質都被搬運到這個稱為天祥邊緣海中沉積。

第二階段（圖三十一（b））：

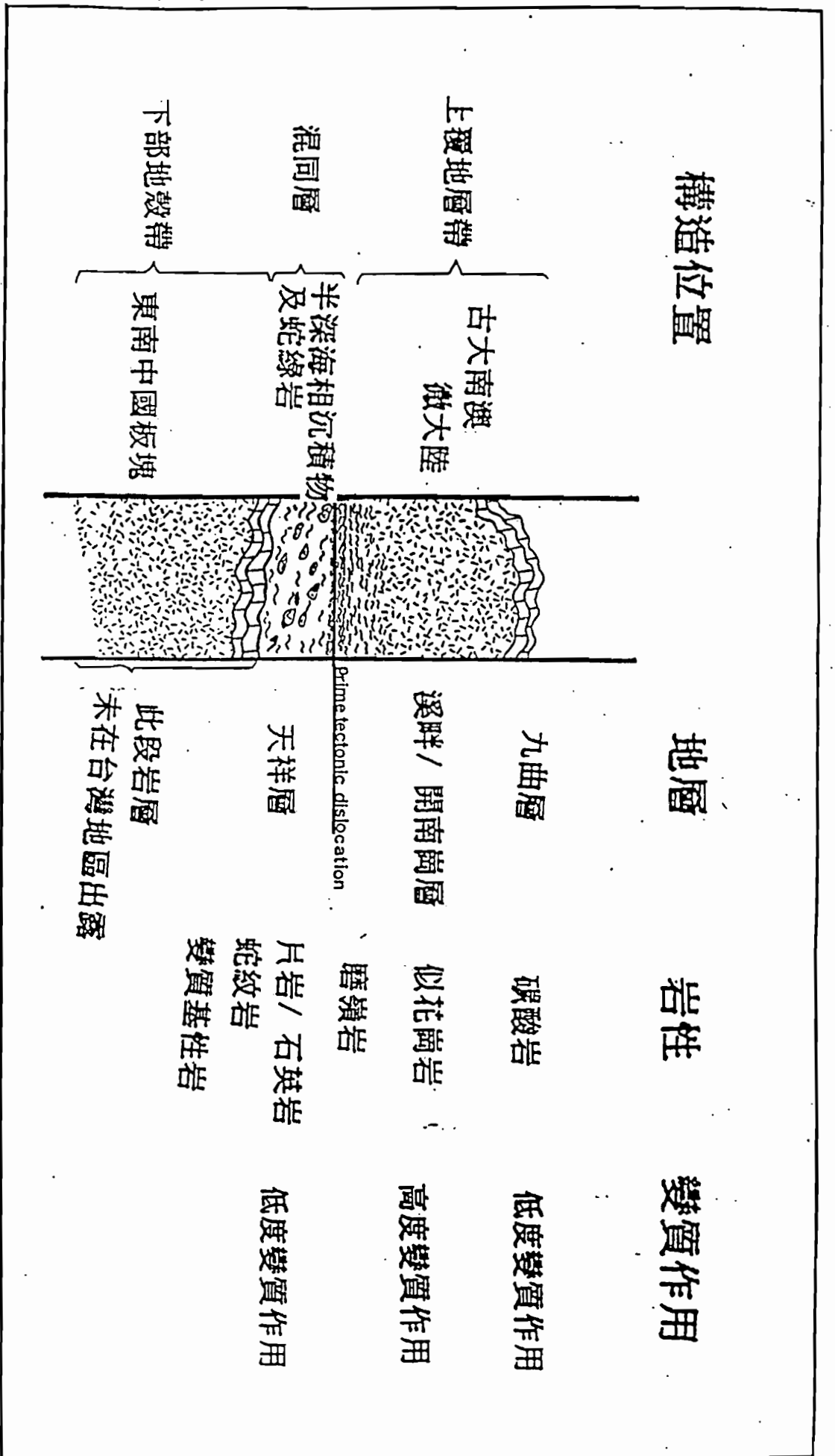
天祥海可真是個壽命不長的邊緣海，在侏儸紀晚期，發生了第一次的燕山運動 — 早期燕山運動，將中國東南板塊以及大南澳微板塊，又再度推攏，存在天祥海間的海洋板塊受力隱沒到陸地下。天祥海逐漸變小而至消失，當天祥海被消滅，整個構造運動依舊進行著，東南側的拉庫海板塊繼續向西作用，也因此大南澳板塊繼續被推上了大陸，海中沉積物以及海板塊物質也都被擠壓、攪碎，為混同層，在台灣東部的南澳、豐田、萬榮、向陽等地見到的超基性蛇紋岩便是存在兩大陸間的縫合帶內，並且在這個微板塊底部常發現有磨巖岩（mylonite）及天祥混同層中受強裂剪裂作用的半深海岩石。這些板塊縫合帶內的岩石種類及構造特性可以藉著柱狀岩石分布圖加以說明（圖三十二）。

第三階段（圖三十一（c））：

隨著時間的更替，到了白堊紀晚期（相當於八、九千萬年以前），燕山第二期 — 也就是晚期燕山運動，造成劇烈的火成活動，在大陸邊緣發生新的隱沒作用，火成入侵，火山活動活躍，



圖三十一 大南澳群形成示意圖



圖三十二 大南澳群垂直剖面岩性柱狀圖

福建沿海有 I - 型花崗岩 ( I - type granite ) 出現及台灣東部南澳、溪畔等地發現的 I - 型花崗片麻岩。除了岩石型態上的對比外，由岩石的定年資料得到的年代也在九千萬年左右。

由於東邊的海洋板塊隱沒在西邊的大陸板塊之下，這次運動也稱為南澳運動，造成的變質岩群通稱為大南澳群。包括原來的厚層石灰岩被擠壓變質成今日九曲洞所見的厚層大理岩；海洋地殼及上覆沉積物也都變質成蛇紋岩、角閃石、綠色片岩、薄層大理岩及變質隕石等。除了角閃石岩相及綠色片岩岩相的變質作用外，岩石亦受褶皺，並且陸塊抬升作用也同時進行著。到了新生代早期，南中國海板塊開始張裂，將古台灣島、民多羅島及北巴拉望島逐漸分離，古台灣島向北推去，其他二島則漸漸向南推到現在的位置。

第四階段 ( 圖三十一 (d) ):

在新生代，約六千五百萬年前，台灣已經露出了水面，並且接受侵蝕，在其上同時沉積現在台灣島西部的第三紀砂岩、粉砂岩、頁岩、礫岩及石灰岩等。平靜的沉積環境持續了六千多萬年，直到四百萬年前，一次對台灣影響最大的造山運動發生了……。菲律賓海板塊由東南方斜撞上了台灣東部，一時之間台灣島山崩地裂，基盤岩石急速隆起，大南澳群的岩石又再次受到變質及變形作用的影響，地盤急驟隆起，形成今日中央山脈。持續不停的抬升作用使得北部、南部許多海岸都露出了水面，鵝鑾鼻附近海洋的珊瑚礁如今都可以在墾丁社頂公園內發現，驚人的上昇速度顯示台灣島正活潑的地上升著，這個激烈的構造運動稱為“蓬萊運動”。立霧溪隨著地殼的抬升而加速了下切的速率，在大理岩區河水的側蝕作用被下切作用所取代，河流不斷地下切加上台灣島不斷地隆起，使得太魯閣峽谷形成了今日雄偉的地質奇觀。

## 後記

或許在中橫路上你已不知來回走了多少趟，而你可能只是帶著走馬看花的心情，匆匆地開始旅程卻又草草地結束它。你可曾想過美麗峽谷下奔流的溪水，不僅是景色的一部分，更是歷史的述說者，它日出日落地流過大地，切過數億年前構造運動的遺蹟。大自然永遠都有著訴說不盡的故事，雄偉壯觀的峽谷除了用我們的眼睛、心靈去感受外，何妨大膽地用科學的角度去分析它，或許在地質學家們的會診下，你會發現它只不過是含有複雜礦物成分，受過多次變質作用及構造運動的結合體。但是，無論如何，當你更深一步地了解了它的歷史後，太魯閣的美會更吸引你我的注意力。