

國立成功大學
地球科學研究所
碩士論文

角閃石類礦物之拉曼光譜研究

Raman Spectroscopic Study of
Amphiboles

研究生：黃恩萍

指導教授：余樹楨、黃怡楨

中華民國九十二年七月

國立成功大學
地球科學研究所
碩士論文

角閃石類礦物之拉曼光譜研究
Raman Spectroscopic Study of Amphiboles

研究生：黃恩萍

本論文業經審查及口試合格特此證明
論文考試委員

黃怡禎 李連興

李佩倫 李樹楨

指導教授：黃怡禎 李樹楨
所 長：

中華民國 92 年 7 月 21 日

中文摘要

本實驗主要目的是在常溫常壓下對各種不同固溶系列之角閃石類礦物進行拉曼光譜之量測並探討頻譜的變化。以 X 光繞射法 (XRD) 分析求得結構參數, 以及電子微探分析 (EPMA) 確定化學成分; 對角閃石礦物群拉曼光譜之振動模進行初步比對, 並進一步找出角閃石拉曼光譜與化學成分之關聯性, 繼而建立角閃石之拉曼光譜資料庫。

本研究共收集 29 種角閃石礦物。在進行拉曼光譜分析前已由 XRD 及 EPMA 資料確定其礦物化學及結構。對照 Leake 等人 (1997) 之分類, 可分成六個部分來探討。1. 褐閃石系列 2. 透閃石系列 3. 普通角閃石系列 4. 氧角閃石系列 5. 鎂紅閃石 6. 鈉質角閃石系列 (包括: 藍閃石及鎂鋁鈉閃石)。

角閃石類礦物之拉曼光譜, 在單一結構下(單斜晶系 $C2/m$), 隨著不同的化學成分, 光譜特徵即有所差異。以 $Si-O_b-Si$ 之振動模最為明顯, 範圍為 $665\sim675\text{cm}^{-1}$, 再配合高頻 OH (3600cm^{-1}) 振動模之個數即可區分出不同固溶系列之角閃石。在半定量的研究上, 以透閃石系列較可行, 不過也只能估計鎂鐵含量的變化。因為此系列可觀察到高頻 OH 振動模 隨鐵含量的增加 ($Mg/(Mg+Fe^{+2})$ 之比例分別在 95.8 以上 92.3~95.8 之間及 92.3 以下), 從一個轉變成三個振動模。另外, 藍閃石系列中, 對照 Wang (1988) 之理論計算, 本研究更測出了離子於 (M1 M1 M3) 佔位之 $(Fe^{2+} Fe^{2+} Fe^{2+})$ 及 $(Fe^{2+} Fe^{2+} Al^{3+})$ 的兩種組態。

Abstract

Raman spectroscopic method was applied to study the Raman shifts of a number of solid solution series in amphiboles. Each sample was examined by EPMA and XRD techniques for the identification of its structure and chemical composition.

There are 29 amphibole samples in this study. The structure of these amphiboles belongs to space group C2/m. The amphiboles investigated in this work include two solid solution series: cummingtonite-grunerite and tremolite-actinolite, and four individual species: hornblende, oxyhornblende, magnesio-katophorite and glaucophane.

The most distinct Raman peak detected in the amphiboles is around $665\sim 675\text{ cm}^{-1}$, which is associated with the Si-O-Si bending mode. In addition to the Si-O-Si bending mode, the low frequency Raman peaks vary in frequency, with respect to a variation in their chemical composition. The identity of each amphibole species can be qualitatively identified on the basis of their characteristic Raman modes in both low-wavenumber region and high-wavenumber region around 3600 cm^{-1} , where the OH stretching modes occur.

Using Raman spectroscopic method for semi-quantitative analysis is feasible in solid solution series of the C2/m amphiboles. However, this application is limited to major elements composition such as Fe and Mg. In the tremolite-actinolite series, we observed the splitting of OH stretching mode with an increase in Fe-content. When $\text{Mg\#}=(\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ is above 95.8, there is only one OH mode. Two OH modes show up when Mg# is between 92.3 and 95.8. When Mg# is lower than 92.3, three OH peak are observed. In glaucophane, we detected all the possible OH modes for every configuration of cation site occupancy predicted by Wang et al (1988) based on theoretical calculation.

誌謝

在恩師 余樹楨 老師及 黃怡楨 老師的教導下，總算完成了碩士學位。雖然很辛苦卻讓我學到了更多，不僅僅是論文上的幫助，更重要的是讓我體會到「科學的精神」。感謝老師！

特別感謝中研院地科所 藍晶瑩 老師，以及屏東師院 李建興 老師和文化大學地質系 吳樂群 老師提供我實驗的標本；另外也感謝美國康乃爾大學同步輻射中心的 查長生 先生、成大地科所岩礦室及中山大學貴儀中心在儀器分析上的幫助。感謝 李佩倫 老師在論文上的細心指導。感謝我在地質知識方面上的啟蒙老師 羅偉老師、吳樂群老師及蔡裕偉老師。謝謝他們辛苦的幫我打下良好的基礎。

感謝成大 CVD 實驗室的學長姊-永欣、慶祥、淑櫻、秀芳、映如、冠益；以及金寶、國芳學長。不斷的幫我校稿及指證錯誤；感謝盈璇學妹陪我熬夜寫論文，還得幫我磨薄片。感謝佩珊學姊、旭立、育震、南殼、裕宏、晉耀學長在生活上的幫忙與照顧。謝謝你們！感謝我六年來的好朋友-宜慧、博翔、柏村，一路走來，總是在我最需要你們的時候，在我身邊。我會永遠記住我們的友誼。還有親愛的淑美、慧雯、蜀圓、怡靜、佩儀、佩芬、少薇、正帥、國榕、小健、坤璋、如玉學姊、小 P 學姊、勇全、致遠、阿驊學長總是默默的關心我。感謝歐耀駿同學兼好友，我會永遠想你的。

最重要的感謝我的爸爸、媽媽，辛苦的養育我、教育我。從來不曾抱怨。一直一直支持我！我愛你們。

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第一章 前言.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 角閃石類礦物.....	3
1-3 Leake 分類法.....	7
1-4 前人研究.....	8
1-5 研究目的.....	10
第二章 實驗原理與方法.....	11
2-1 實驗原理.....	11
2-1.1 拉曼光譜原理.....	11
2-1.2 X 光繞射原理.....	14
2-1.3 電子顯微分析原理.....	15
2-2 實驗條件.....	16
2-2.1 拉曼光譜實驗.....	16
2-2.2 X 光繞射實驗.....	19
2-2.3 電子顯微分析實驗.....	19
2-3 實驗標本.....	21
2-3.1 標本描述.....	21
第三章 實驗結果.....	24
3-1 X 光繞射實驗結果.....	24
3-2 電子顯微分析實驗結果.....	26
3-3 拉曼光譜實驗結果.....	30
3-3.1 褐閃石-鐵閃石系列.....	45
3-3.2 透閃石系列.....	46
3-3.3 普通角閃石系列.....	47

3-3.4	氧角閃石系列	48
3-3.5	鎂紅閃石	49
3-3.6	藍閃石及鎂鋁鈉閃石	50
第四章	討論	51
4-1	褐閃石系列	51
4-2	透閃石系列	54
4-3	普通角閃石系列	64
4-4	氧角閃石系列	69
4-5	鎂紅閃石系列	71
4-6	藍閃石、鎂鋁鈉閃石	72
4-7	綜合討論	74
4-7.1	鎂鐵變化造成拉曼光譜的影響	74
4-7.2	鈣含量造成拉曼光譜的影響	75
4-7.3	四配位的鋁取代矽之影響	76
第五章	結論	87
	參考文獻	91
	附錄	96

圖目錄

圖 1-1	空間群為 $C2/m$ 的角閃石	4
圖 1-2	角閃石類礦物之成份分布	4
圖 2-1	拉曼散射原理與過程	13
圖 2-2.1	拉曼儀器圖 (正面)	17
圖 2-2.2	拉曼實驗中雷射光射出之情形	17
圖 2-2.3	拉曼儀器圖 (反面)	18
圖 3-1	標本成份以 $CaO-MgO-FeO$ 之三角圖表示	28
圖 3-2	角閃石分類圖	29
圖 3-3.1	褐閃石系列之拉曼光譜低頻部分	36
圖 3-3.2	透閃石系列之拉曼光譜低頻部分	37
圖 3-3.3	普通角閃石系列之拉曼光譜低頻部分	38
圖 3-3.4	氧角閃石系列之拉曼光譜低頻部分	39
圖 3-3.5	鎂紅閃石之拉曼光譜低頻部分	40
圖 3-3.6	藍閃石、鎂鋁鈉閃石之拉曼光譜低頻部分	40
圖 3-4.1	褐閃石系列之拉曼光譜高頻部分	41
圖 3-4.2	透閃石系列之拉曼光譜高頻部分	42
圖 3-4.3	普通角閃石系列之拉曼光譜高頻部分	43
圖 3-4.4	鎂紅閃石之拉曼光譜高頻部分	44
圖 3-4.5	藍閃石、鎂鋁鈉閃石之拉曼光譜高頻部分	44
圖 4-1	透閃石系列之拉曼低頻振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢	59
圖 4-1.1	振動模頻率 ($200cm^{-1} \sim 500cm^{-1}$) 隨鎂含量之變化趨勢	60
圖 4-1.2	振動模頻率 ($500cm^{-1} \sim 800cm^{-1}$) 隨鎂含量之變化趨勢	61
圖 4-1.3	振動模頻率 ($800cm^{-1} \sim 1500cm^{-1}$) 隨鎂含量之變化趨勢	62
圖 4-2	透閃石系列之拉曼高頻振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢	63
圖 4-3	普通角閃石拉曼低頻振動模頻率隨鎂含量變化之趨勢	67
圖 4-4	普通角閃石拉曼低頻振動模頻率隨矽含量變化之趨勢	68
圖 4-5	氧角閃石拉曼低頻振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢	70
圖 4-6	標本成分以 $CaO-MgO-FeO$ 之三角圖表示, 且將固定某成分的標本圈出	78
圖 4-7	普通角閃石與氧角閃石及透閃石系列之拉曼低頻振動模隨鎂含量之變化趨勢	80
圖 4-7.1	普通角閃石與氧角閃石及透閃石系列之拉曼低頻振動模隨鎂含量之變化趨勢	81
圖 4-8	為頻率在 $200cm^{-1} \sim 500cm^{-1}$ 之間隨鈣含量變化的趨勢	83
圖 4-9	將標本以 SiO_2 含量與 $Al_2O_3+SiO_2$ 含量之比例投圖	84

圖 4-10	普通角閃石系列之低頻拉曼光譜， 由矽含量由下往上遞增	86
圖 5-1	利用拉曼光譜區分出不同固溶系列之角閃石	89

表目錄

表 1-1	角閃石類礦物中離子佔位情形.....	5
表 2-1	標本之分類及描述.....	21
表 3-1	由 X-光繞射實驗之 d 值，與 ICDD 資料庫比對， 所得之晶體參數值.....	24
表 3-2	角閃石成分表.....	27
表 3-3	角閃石之拉曼峰值.....	31
表 4-1	#1-1 與 #1-2 低頻譜之 assignment.....	53
表 4-2	#1-1 與 #1-2 之高頻譜.....	53
表 4-3	透閃石系列標本之低頻拉曼峰值.....	58
表 4-4	透閃石系列標本之高頻拉曼峰值.....	63
表 4-5	普通角閃石系列標本之低頻拉曼峰值.....	66
表 4-6	藍閃石於 (M1 M1 M3) 佔位之離子組態.....	73
表 4-7	普通角閃石，氧角閃石及透閃石系列之拉曼峰值，隨鎂含量增高 趨勢排列.....	79
表 4-8	隨鈣含量變化之拉曼峰值.....	82
表 4-9	不同角閃石系列中，最明顯之 Si-O _b -Si 振動模峰值.....	85

第一章 前言

1-1 研究動機

角閃石類礦物有較廣的生長環境（P-T environments），普遍存在於地殼各種岩石之間。由於內部結構可容許一些常見的陽離子進行置換，因而形成多種固溶體系列。而這些離子的置換是受控於當時生成的溫壓條件，並具有一定比例的取代。例如：角閃石與平衡共存之石榴子石進行鐵鎂交換，而鐵鎂元素在二礦物相中之分配係數受控於溫度。因此石榴子石-角閃石平衡礦物組合常被利用來作為地質溫度的指示計（Graham and Powell, 1984）。所以角閃石類礦物對於研究其母岩生成之溫壓環境是很重要的。

在前人文獻中可發現，有關角閃石的的研究偏向礦物化學成分的定性及定量（使用電子顯微分析，EPMA），以及 X 光繞射分析（XRD）解決結構的問題等，但在這些分析方法中大多數為破壞性，且標本之前處理工作也顯得繁瑣。本研究之主要目的為發展一更方便、迅速且又不失其準確性的方法來辨別不同固溶系列之角閃石，以供後繼的科學研究工作。而拉曼光譜分析法便是具有：1.非破壞性；2.樣本無須前處理且無厚度的限制；3.儀器操作容易；4.分析快速等特性，可有效的補足其他儀器的不足。

拉曼光譜是電磁波的非彈性散射效應所形成，是探測物質內原子與分子間振動模式之有效方法。早在 1928 年，印度物理學家拉曼（C.V. Raman）首先從液體介質中觀察到這種效應（徐濟安，1996）。但是再往後的數十年，拉曼光譜並無太大的進展，主要是因為拉曼散射的強度約為入射光的 10^{-6} ，而不易偵測。直到雷射的出現，提供了理想的激發光源，加上偵測器的進步，配合晶格動力學之理論，才使得拉曼光譜被

拿來應用，做為研究物體晶格振動的利器（McMillan and Hofmeister, 1988）。

Born and Huang（1954）也指出在晶格動力的理論與振動光譜學的相互配合之下，可了解物質中的各種振動模式，倘若知道所有振動模頻率的分布，是可從中導出熱力學參數，例如：熱膨脹係數、格里乃森等參數。就固態物理來說也深具意義。而 Malezieux（1990）針對固溶體系列中陽離子之間互換所造成之振動行為的改變進行研究（特別是鎂與二價鐵），以了解之間的變化關係。除此之外，拉曼光譜在礦物的定性定量、液包體、晶體相變等相關研究上也有重大的貢獻（Kieffer, 1979；Hofmeister et al., 1987；Hofmeister and Chopelas, 1991）。近年來更被廣泛地運用在寶石方面的鑑定上（徐濟安，1996）。

綜合上述，拉曼光譜分析法可以應用在很多方面。然而角閃石類礦物群在拉曼光譜的研究上，至今只有零星的研究尚無整體性的討論，尤其是台灣本地的角閃石更是缺乏這方面的資料。因此現階段利用拉曼光譜分析法來作為研究角閃石的工具是非常適合的。而首要工作便是在常溫常壓下，從拉曼光譜的變化，去比對角閃石類礦物的化學成分，找出相關的趨勢，以作為日後深入探討的基本資料；另一方面，也可對未知成份的角閃石進行鑑定的工作。

1-2 角閃石類礦物

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。空間群有三種對稱方式，兩種屬單斜晶系空間群為 $C2/m$ （圖 1-1）及 $P2_1/m$ 和一種屬斜方晶系空間群為 $Pnma$ 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 (圖 1-2)。

角閃石礦物分子式之通式為 $\text{AB}_2\text{C}_5\text{T}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ，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 1-1。

在角閃石結構中，空間群 $C2/m$ 是最為常見的。而 $P2_1/m$ 空間群主要見於某些富鎂之褐閃石，乃因 M4 位置容納了較小的 Mg 和 Fe^{2+} 離子而稍微崩垮所致。斜方晶系 $Pnma$ 構造則見於 $\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 至 $\text{Fe}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 系列之直閃石、鋁直閃石等礦物，是由於較小陽離子存在於 M4、M3、M2 和 M1 位址內，使其成為斜方而非單斜之構造 (黃怡禎，2002)。

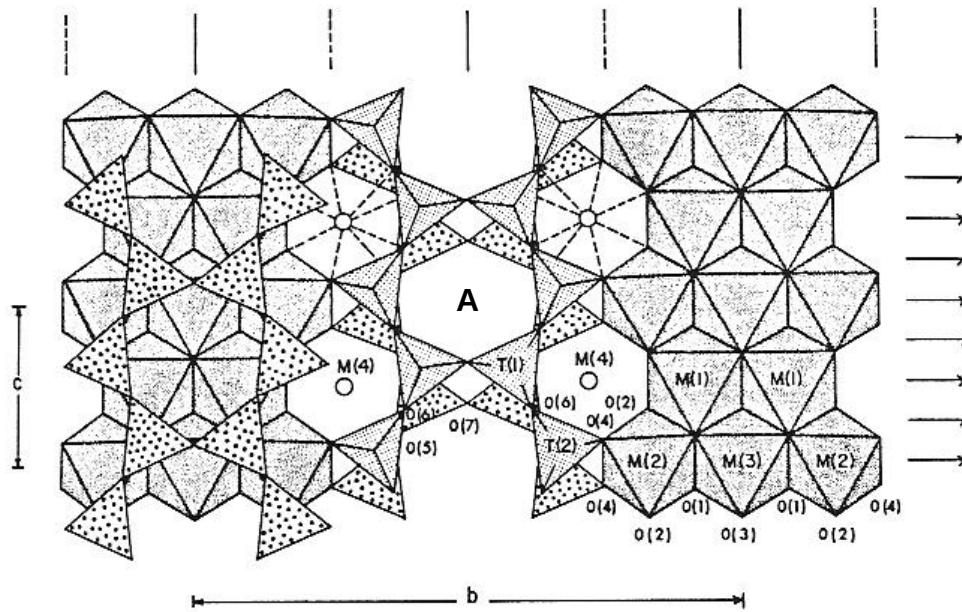


圖 1-1 空間群為 $C2/m$ 的角閃石，在 a 軸投影之結構圖。在此結構圖中，可看出角閃石結構中陽離子佔位情形。包括 T 位址、M1、M2、M3、M4 位址以及 A 位址(取自 Hawthorne,1983)

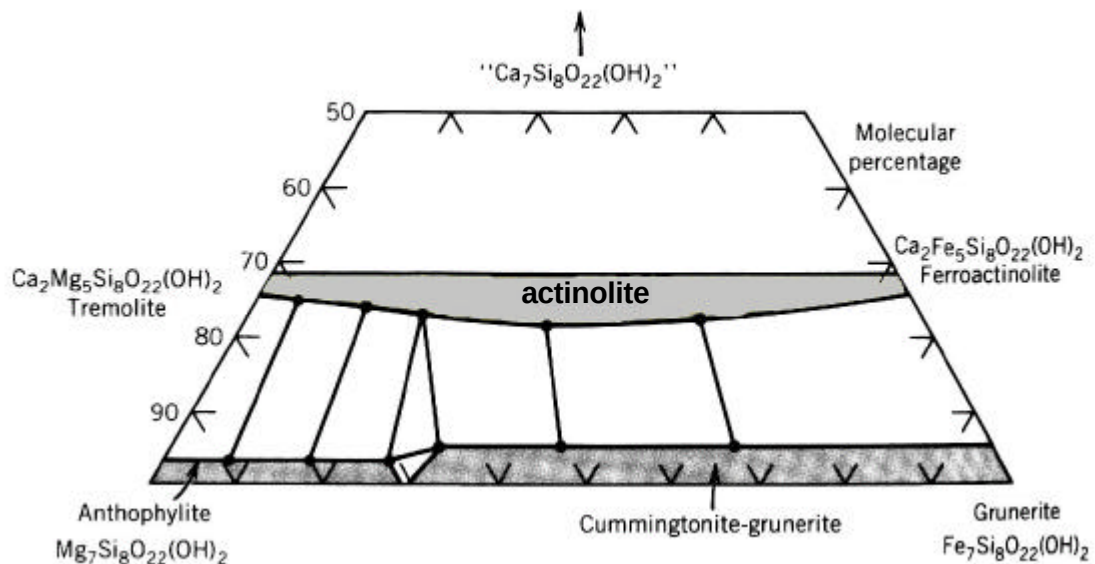


圖 1-2 在 $Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$ - $Fe_7Si_8O_{22}(OH)_2$ - $Ca_7Si_8O_{22}(OH)_2$ 系統內各角閃石類礦物之成份分布。自然界並無以此端成份- $Ca_7Si_8O_{22}(OH)_2$ 之礦物出現(黃怡禎, 2002)。

表 1-1 角閃石類礦物中離子佔位情形 (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	可佔 C 或 T
	Fe^{3+} , 和少數的 Mn^{3+} , Cr^{3+}	只佔 C
高價電離子 (High-valency)	Ti^{4+}	可佔 C 或 T
	Zr^{4+}	只佔 C
	Si	只佔 T
陰離子	OH, F, Cl, O	佔 OH 位置

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 位充填後，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)。

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 $0.654\text{\AA}$ ， Al^{3+} 的半徑為 $0.53\text{\AA}$ ，前者與 Mg^{2+} 半徑只差 $0.075\text{\AA}$ ，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 Al^{3+} 的半徑 $0.39\text{\AA}$ 和 Si^{4+} 的半徑 $0.26\text{\AA}$ 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。

1-3 Leake 分類法

Leake 等人在 1976 年於美國加州史丹福大學的 IMA (International mineralogical Association) 會議上，針對角閃石類礦物，以化學組成為依據做一系統性分類，隨即被廣泛的採用。直到 1997 年再次修正小部分的缺失。

主要分成四大類。首先考慮離子在 B 址佔位的情形：

- (1.) 當 $(Ca+Na)_B < 1.00$ 且 $L\text{-type 離子}(Mg, Fe, Mn, Li)_B \leq 1.00$ 時，屬於鎂-鐵-錳-鋰質角閃石類礦物 (Mg-Fe-Mn-Li Amphibole)。
- (2.) 當 $(Ca+Na)_B \geq 1.00$ 且 $Na_B < 0.50$ 時，屬於鈣質角閃石類礦物 (Calcic Amphibole)。
- (3.) 當 $(Ca+Na)_B \geq 1.00$ 且 $0.50 \leq Na_B < 1.50$ 時，屬於鈉-鈣質角閃石類礦物 (Sodic-Calcic Amphibole)。
- (4.) 當 $Na_B \geq 1.50$ ，屬於鈉質角閃石礦物群 (Sodic Amphibole)。

之後，再以矽 (Si) 和 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 等含量再予細分。詳細分類見附錄 A。

1-4 前人研究

關於角閃石類礦物的研究，多集中在地質產狀、成因及礦物化學上的探討（Holland and Richardson, 1979；Brown, 1977；Stout, 1972）。至於拉曼光譜上的研究，只有零星的報導（Karr, 1975；Lazarev, 1972），也缺乏整體性的討論。

拉曼光譜及紅外光譜是研究氫氧鍵的最好工具（Blaha and Rosasco, 1978）。而拉曼在氫氧鍵振動頻率，高頻（ $\nu > 3000\text{cm}^{-1}$ ）範圍內的解析度較紅外光譜佳（Wang et al, 1988）。但因紅外光譜方面的研究行之有年，因此相較之下，關於角閃石之拉曼光譜資料便顯得缺乏。除了 Blaha and Rosasco（1978）曾發表過透閃石無偏振拉曼頻譜；再者 Wang et al（1988）發表的褐閃石（Cumingtonite）、陽起石（Actinolite）、藍透閃石（Winchite）、鎂質普通角閃石（Magnesio-hornblende）、藍閃石（Glaucophane）等五種角閃石礦物之偏振拉曼頻譜。其主要是利用拉曼光譜分析陽離子分布於 M1、M3 之組態對 OH 鍵的影響來確定陽離子在角閃石結構中佔位情形。

之後，沈(1997) 針對閃玉的固溶系列之拉曼光譜做相關的探討。發現隨二價鐵含量增高，在低頻（ $\nu < 1200\text{cm}^{-1}$ ）振動模有線性變化的趨勢而高頻（ $\nu > 3000\text{cm}^{-1}$ ）也從一個振動模轉變為三個。

由上述可知，在角閃石礦物中，透閃石-陽起石系列這部分擁有比較多的前人研究是有較多的資料。至於其他的角閃石固溶系列，則無太多的文獻。

Kieffer（1980）曾提到研究鏈狀或片狀矽酸鹽類的光譜變化時低頻

部分，會有幾個問題亟待進一步解決：

- 一、 礦物之圖譜研究和振動模配置之確認不易。
- 二、 Si-O-Si 之橋鍵模（bridging modes）和 Si-O 之非橋鍵模（non-bridging modes）及其他 Si-O 振動模是非常複雜的。
- 三、 Si-O 橋鍵模和陽離子佔位導致振動模分裂現象（稱 Cation deformation modes）等之振動模重疊，增加確認之複雜性。
- 四、 礦物本身複雜之化學組成及雜質等，增加資料解釋的困難。

也因為上述的問題，我們可以了解到角閃石類礦物的光譜研究，為何還必須討論高頻部分（ $\nu > 3000\text{cm}^{-1}$ ）氫氧鍵的變化。

1-5 研究目的

從拉曼光譜中，針對角閃石類礦物做整體性的討論。在單一結構下找出化學成份與光譜之間的相關趨勢。目的有下述幾點：

- (1) 由 Leake 等人所提出的角閃石分類，是否也可從其拉曼光譜中區分出來。
- (2) 觀察並討論角閃石類礦物之拉曼頻譜，是否有隨著鎂 (Mg) - 鐵 (Fe) 之間取代的比例，或矽 (Si) 元素含量或鈣 (Ca) 元素含量等的變化而變化。試著找出相關性，以用來作為半定量的工具。
- (3) 建立各種不同固溶系列角閃石礦物之拉曼光譜資料庫。在晶格動力學之研究上，提供相關的實驗數據。

第二章 實驗原理與方法

本研究以天然角閃石標本，分別進行三部分的實驗：(1.) 拉曼光譜實驗。(2.) X 光繞射實驗 (XRD) 以及(3.)電子顯微分析 (EPMA) 實驗。其中 EPMA 分析主要目的為確定礦物之化學成分，而 XRD 為確定本實驗角閃石樣本屬於空間群 $C2/m$ 之晶體結構。

2-1 實驗原理

2-1.1 拉曼光譜原理

當頻率為 ν_0 的入射光經物質散射後，應含有頻率為 $\nu_0 \pm \Delta \nu$ 的輻射。其中 $\Delta \nu$ 是由於內部的原子、分子振動所造成。其頻率的大小與原子間鍵合的強度直接相關，因而晶格動力學便是最重要的理論基礎 (Kieffer, 1985 ; McMillan and Hofmeister, 1988)。

簡單的來說，頻率 ν_0 的單色光入射到物質時，通常會有一部分的入射光通過物質，而一部分的光則在物質的界面上產生反射；此外，還會在該物質的不同方向上出現相當微弱的散射光。實驗分析發現這些散射光是由不同頻率所組成，大部分散射光的頻率與原入射光的頻率 ν_0 相同，只有少部分散射光的頻率與 ν_0 不同 (Fadini & Schnepal, 1989 ; McMillan, 1985)。

當一個光子與處於基態的分子相互作用，可將一個分子激發到高能態 (即不穩定態)。當分子離開不穩定態時，如果是回到基態，便產生瑞利 (Rayleigh) 散射，此時，入射光頻率 ν_0 與散射光頻率相同，故為彈性散射。相對而言，當分子離開不穩定態時，如果不回到基態，而是一個激發的振動態，即散射的光子能量與原入射光子能量間有一能階差 (ΔE)。此時，入射光頻率 ν_0 與散射光頻率不同，即非彈性散射，而拉

曼光譜即為此種。當入射光和物質內分子、原子的運動（如：轉動、振動等）相互作用便會形成拉曼散射。由於拉曼散射和物質內部原子、分子的振動密切相關，因此，可由測量到的拉曼光譜，推測物質內分子、原子的振動情況（Fadini & Schnepel, 1989；McMillian, 1985）。

拉曼散射又分兩種，當散射光頻率比入射光低，其散射峰稱為斯托克斯線（Stokes lines）；反之，若散射光的頻率比入射光高，稱反斯托克斯線（anti-Stokes lines）。在常溫常壓下，處於基態的分子佔大多數，因此斯托克斯線的強度遠大於反斯托克斯線（Fadini & Schnepel, 1989；McMillian, 1985）（圖 2-1）。

通常由分子轉動所造成的拉曼譜線僅可在氣體分子中觀察到，而且含分辨不清的側峰。對於液體、固體而言，由於內部存在的近程或長程的相互作用，並沒有自由的轉動，所以與拉曼散射相關的運動以振動為主。這些振動受原子和原子間的相互作用力控制。因此，拉曼散射的研究可以提供人們對於此種作用力性質的了解（李佩倫，2000）。

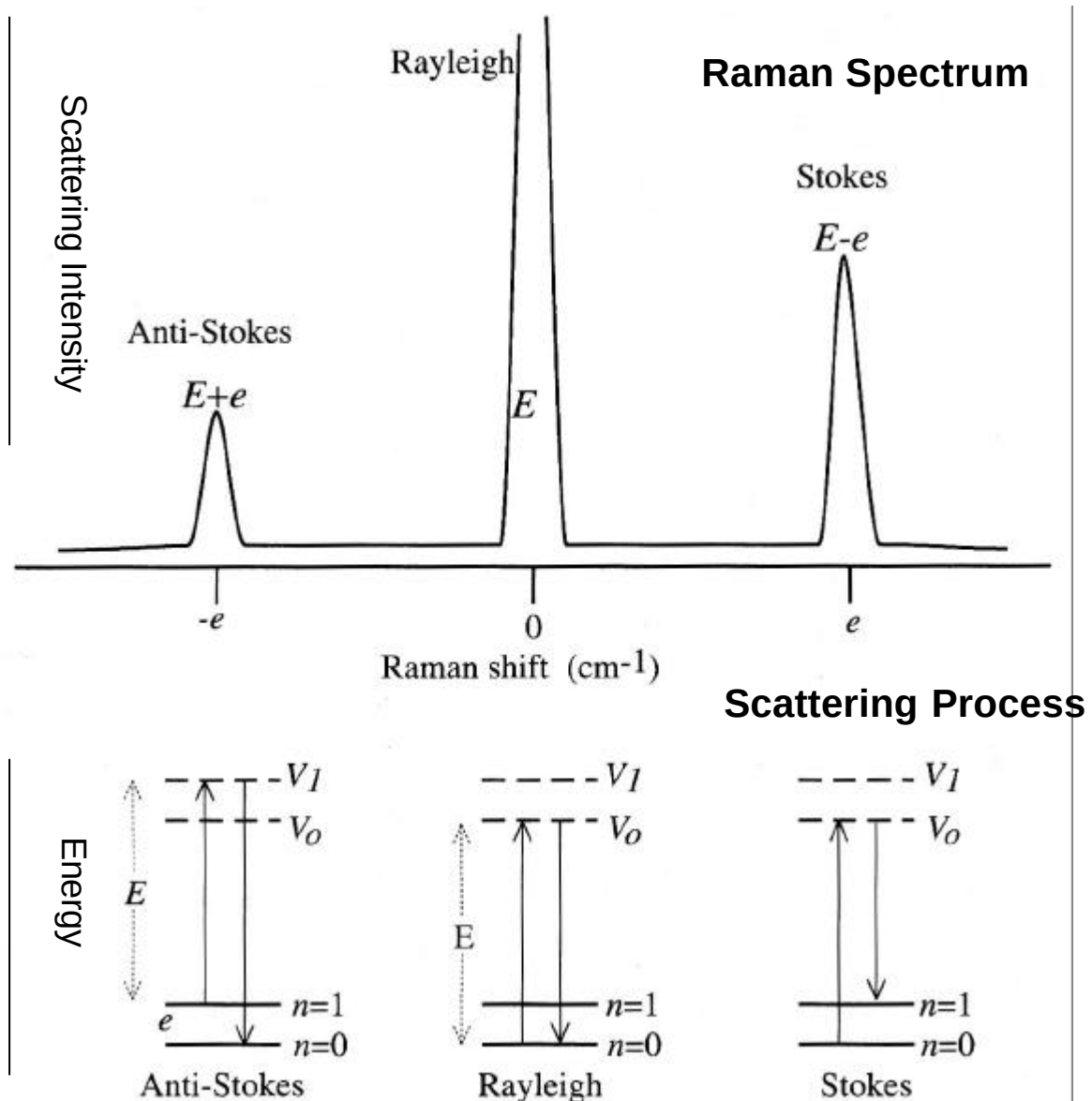


圖 2-1 拉曼散射原理與過程。上圖表示能量與光譜之位置分布圖，下圖表示振動能階的改變所造成的拉曼峰在 $E+e$ 、 $E-e$ 或入射光能量 (E)，造成瑞利彈性散射（修改自 McMillian, 1985）。

2-1.2 X 光繞射原理

在 1895 年德國物理學家倫琴 (Wilhelm Roentgen) 發現了 X 光，直到二十世紀初期 X 光結晶學的發展，才透過 X 光繞射技術進一步間接的探討物質內部的結構 (許樹恩、吳泰伯，1996；黃怡禎，2002)。

X 光不僅可以用來量測晶體內部原子層面間之距離，也可定出其內部原子或離子的位置，藉此來判定結晶之結構。X 光只佔電磁波光譜的一小部分，其波長範圍為 $0.1\sim 100\text{\AA}$ 。而用來研究晶體的 X 光波長為 $1\text{\AA}$ 左右。晶體具有有序之三度空間結構，沿結晶軸晶體組成原子或分子有特定的週期性排列現象。當 X 光束打在這種三度空間排列之結構就會使其行進路徑所遇到的電子跟著 X 光之頻率振動。這些振動中之電子吸收 X 光之部分能量，然後像光源產生波前一樣再放出此能量 (即散射)，釋出同樣波長和頻率的 X 射線。這樣的波大部分彼此互相造成破壞性干涉，但在某些特定的方向它們會彼此疊加造成建設性干涉，這種效應即為「繞射」 (黃怡禎，2002)。

晶體中原子的規則排列，形成了所謂的原子面。原子面本身並非一個平滑面，但是我們可以假想各原子面上的各原子中心位於此一平面上，這些假想的平面亦與結晶面一樣使用米勒指數 (hkl) 表示。所謂原子面間距指的就是這假想面間的距離 (垂線距離)，通常以符號 d_{hkl} 表示 (hkl) 原子面的面間距 (余樹禎，1987)。原子面會使得 X 光散射彼此間發生干涉，形成繞射現象，這樣的繞射現象遵守布拉格 (Bragg) 方程式。

$$\lambda = 2d\sin \theta$$

λ : 入射 X 光的波長

d : 原子面間距

2θ : 入射波與繞射波之夾角

X 光繞射之能量分散分析法：能量分散分析法是以 X 光白光作為入射光源，入射角 θ 固定（亦即繞射 X 光偵測器的位置固定），將布拉格公式代入下式得到 d 值。

$$E = h \nu = hc/\lambda = hc/2d\sin\theta$$
$$\therefore E d \sin\theta = hc/2 = 6.2 \text{ (Å) (KeV)}$$

E ：繞射峰的能量
 h ：蒲朗克常數
 ν ：頻率

不同的繞射點（線），其繞射能量不同。 d 值較小的繞射峰其能量較大； d 值大的繞射峰能量則較小。

此種分析法的優點是快速，在短時間內即可得到繞射圖譜，但是解析度相對的也較低（余樹楨，1987）。

2-1.3 電子顯微分析（EPMA）原理

鎢絲在極高的溫度下，加上極高的電位差作用會產生自由電子。利用此能源，可將欲分析之樣本內各元素之內層電子敲擊出來。經由一組組的電磁透鏡的聚焦作用，便可使電子形成一道極細的電子束打在欲測的樣本上，使樣本之組成原子的內層電子產生位移。外層電子則會因填回這些內層空位之時，失去能量而放出特徵 X 光線譜，利用光譜儀去偵測，若是偵測波長者為波長分散光譜儀(wavelength dispersive spectrometer, 簡稱 WDS)，若是偵測能量者，屬能量分散光譜儀(energy dispersive spectrometer, 簡稱 EDS)。利用各元素之特徵光譜，即可用於定性分析。至於定量分析尚包括一些複雜的校正步驟，在此將不詳細描述。利用此分析方法可精確鑑定出礦物的化學成分。（黃怡禎，2002）。

2-2 實驗條件

2-2.1 拉曼光譜實驗

儀器機型：拉曼光譜儀為 Dilor XY 型，以氬離子雷射源(波長 514.5nm)照射樣品，散射後的拉曼訊號則由電荷耦合元件(CCD)接收(圖 2-2.1，圖 2-2.2，圖 2-2.3)。

儀器操作及標本製作：標本無須特別處理，分析時將樣品放於顯微鏡之載台(stage)上。之後，從電視螢幕上觀察標本並調整顯微鏡焦距，找出最清晰的礦物平面即可分析。而每次實驗前皆須以矽晶片(520cm^{-1})做為校正試樣，當其訊號誤差範圍在 $\pm 1\text{cm}^{-1}$ 之間時才可進行實驗。

實驗條件：雷射功率 100mW，接收時間為 720 秒，接收波段則在 $200\sim 1500\text{cm}^{-1}$ 以及 $3450\text{cm}^{-1}\sim 3750\text{cm}^{-1}$ 之間。每個標本均測量三個不同位置以作為對照。之後，資料經電腦程式處理後即可得到精確的拉曼峰值。

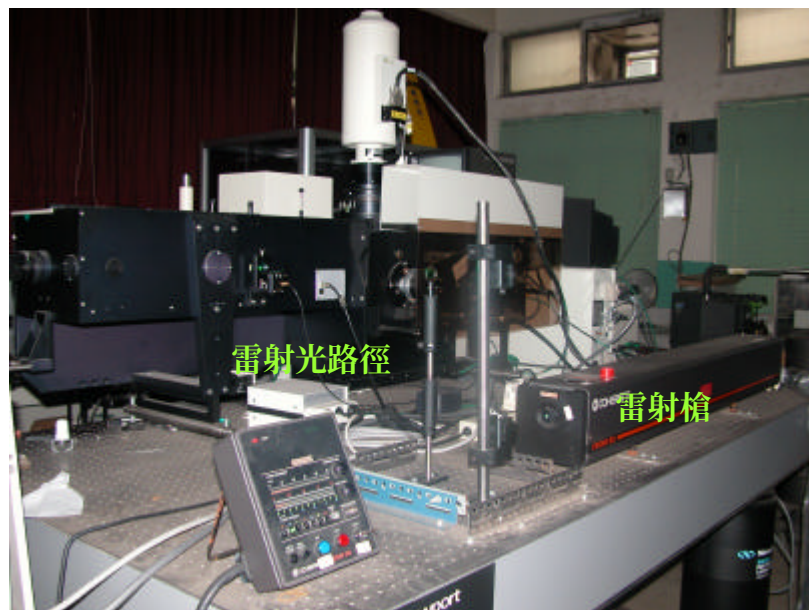


圖 2-2.1 拉曼儀器圖（正面）。雷射槍將氫離子激發產生雷射光並射出。雷射光經濾片過濾後，行經光學路徑，即可產生入射光用於分析標本。

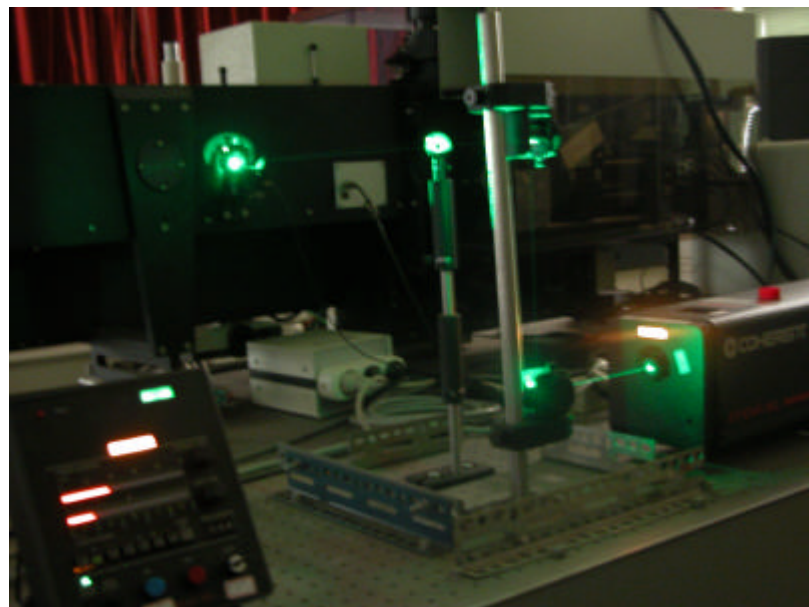


圖 2-2.2 為雷射光射出之情形。



圖 2-2.3 拉曼儀器圖（反面）。標本放於顯微鏡上，配合電視螢幕上顯現標本之影像，調整最理想焦距。之後操作電腦主機，即可進行分析實驗。

2-2.2 X-光繞射 (XRD) 實驗

儀器機型：使用位於美國紐約州綺色佳的康乃爾大學 CHESS (Cornell high energy synchrotron source)之同步輻射 X 光源的 B1 光束線實驗室進行繞射實驗。

儀器操作及標本製作：將標本磨成粉末後，置入鑽石高壓砧，即可上機。

(本實驗非屬於高壓實驗卻採用鑽石高壓砧，原因為：把標本放入高壓砧時，只需微量粉末，是確保實驗之角閃石標本不受同一標本中其他不同種類的角閃石顆粒粉末混染。)

實驗條件：利用能量分散分析法 (EDXRD) 原理進行實驗，X 光光束大小約為 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 。在樣品後方與直進光成 9 度 (2 θ) 的方向放置一個固態鉅能譜探測器 (solid state Ge detector)。接收時間為 30 分鐘，以得到清晰的 X 光繞射圖譜。之後，利用 X 光繞射光譜去比對國際繞射資料中心 (international center for diffraction data. 簡稱 ICDD) 出版之粉晶繞射圖譜資料庫，目的為確定角閃石標本之結構。

2-2.3 電子顯微分析 (EPMA) 實驗

儀器機型：實驗於中山大學貴儀中心之波長分散光譜儀 (wavelength dispersive spectrometer. 簡稱 WDS)，所使用的儀器為日本 JEOL JXA-8900R 型電子微探儀。另一部分實驗於成功大學地球科學系之能量分散光譜儀 (energy dispersive spectrometer. 簡稱 EDS)。儀器機型為 JEOL 牌 JSM-840A 型掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope. 簡稱

SEM), 附加英製 LINK 牌之能量分散分析系統(EDS)。

標本製作：首先必須從天然岩石標本中挑出角閃石礦物晶體顆粒。之後，將晶體置於圓柱狀模型中(直徑為 25mm)，使用 AB 膠以 15:4 的比例將其固定形成試片(灌膠)，再以顆粒大小為 0.25 μ m 的鑽石膏進行拋光直到表面平滑。最後，利用鍍碳機於表面鍍碳，即為待測成份之標本。

儀器操作：中山大學貴儀中心之波長分散光譜儀(WDS)的實驗是由技師操作。而成功大學地球科學系之能量分散光譜儀(EDS)則屬自行操作，操作步驟如下：

1. 以氧化鋯(ZrO_2)校正電子束的位置，並將電子束聚焦在試片表面上。
2. 以 Co Ka peak，進行原點位置及強度的校正 (gain calibration)。
3. 用已知成份的礦物做標準試片(standard)，校正電流，將分析所得資料作 ZAF 校正，以求得氧化物成份的重量百分比。
4. 利用 X-ray 能量分散系統(EDS)作礦物化學定性及定量分析以確定礦物化學組成。

實驗條件：中山大學貴儀中心之波長分散光譜儀(WDS)，加速電壓為 20KV，電子束之電流為 $3.5\sim4\times10^{-8}A$ ，電子束大小為 0~2 μ m，接收時間為 2~3 分鐘。至於成功大學地球科學系之能量分散光譜儀(EDS)，加速電壓為 20KV，電子束之電流為 $4\times10^{-8}A$ ，電子束大小為 1~2 μ m，接收時間為 100 秒。

2-3 實驗標本

本研究共分析了 29 個實驗標本，皆為天然角閃石礦物。附錄 B 為標本之圖片。在分析的過程中就必須先確定有無分析錯誤，所使用方式為：先從手標本中初步判斷為角閃石礦物顆粒，再利用拉曼光譜分析，當光譜中出現 $660\text{cm}^{-1}\sim 670\text{cm}^{-1}$ 的拉曼峰時，便將其顆粒挑出以進行 XRD 分析及 EPMA 分析，經過此三部分分析後，方可確定為角閃石礦物無誤。

2-3.1 標本描述

以 Leake (1997) 分類法為依據，將所實驗之角閃石類礦物標本描述如表 2-1：

表 2-1 標本之分類及描述

第一類 Mg-Fe-Mn-Li Amphiboles				
編號	礦物名稱	產地	產狀	描述
#1-1※	Grunerite 鐵閃石	美國 南達科塔州	針狀	晶體外形-自形晶 (Euhedral)。 拉曼光譜實驗時，有分析到碳物質。
#1-2※	Cummingtonite 褐閃石	美國 密西根州	塊狀	晶體外形-半自形 (Subhedral)。
第二類 Calcic Amphiboles				
透閃石 (Tremolite) -陽起石 (Actinolite) 系列				
編號	礦物名稱	產地	產狀	描述
#2-1*	Actinolite 陽起石	台灣 南澳	針狀 產於異? 鈣榴輝 長岩 (Rodingite) 中。	晶體外形- 半自形
#2-2	Nephrite 閃玉	台灣 豐田	纖維狀， 常與石綿共生。	晶體外形- 半自形 分析任意三點， 成分皆同。

#2-3	Nephrite 閃玉	台灣 豐田	纖維狀，常與石綿 共生。色澤較淡。	同 上
#2-4*	Tremolite 透閃石	台灣 南澳	長柱狀，產於蛇紋岩 (Serpentinite) 中。	晶體外形- 半自形
#2-5	Tremolite 透閃石	台灣 萬榮	針狀明顯， 與蛇紋石共生。	晶體外形-半自形， 顏色較深的部份是 蛇紋石。
#2-6*	Tremolite 透閃石	台灣 玉里	針狀，產於異？鈣榴輝 長岩 (Rodingite) 中。	晶體外形- 半自形
#2-7※	Tremolite 透閃石	美國 紐約	白色塊狀，易碎。	晶體外形-他型 (Anhedral)。 成份均一。
普通角閃石 (Hornblende) 系列				
#3-1*	Pargasite 韭閃石	金 門	粒狀，產於片麻岩 (Gneiss) 中。	晶體外形-半自形， 化學成份採用 (Lan 1997)。
#3-2*	Pargasite 韭閃石	台灣 南澳	粒狀，產於片麻岩 (Gneiss) 中。	多數為黑雲母，只有 小部分是角閃石。 晶體外形-半自形
#3-3	Ferro- hornblende 鐵質普通 角閃石	大陸 蘇魯	粒狀，產於榴輝岩 (Eclogite) 中。	晶體外形-半自形， 成份均一。
#3-4*	Ferro- hornblende 鐵質普通 角閃石	金 門	粒狀，產於片麻岩 (Gneiss) 中。	晶體外形-他型 化學成份採用 (Lan 1997)。
#3-5	Edenite 淡閃石	台灣 玉里	長條狀，產於藍閃石片 岩中 (GL. Schist) 中。	晶體外形-他型 無分析到 藍閃石。
#3-6	Pargasite 韭閃石	芬 蘭	薄板狀。	晶體外形-自形晶， 成份均質。
#3-7*	Magnesio- hornblende 鎂質普通 角閃石	台灣 飯包 尖山	粒狀，產於角閃岩 (Amphibolite) 中。	晶體外形-他型 化學成份採用 (Lan 1992)。
#3-8	Edenite 淡閃石	台灣 利吉	柱狀，與沸石等 礦物共生。	晶體外形-自形晶， 成份均一。

#3-9◎	Pargasite 韭閃石	台灣 敦敘	長條狀，產於安山岩 (Andesite) 中。	晶體外形-自形晶， 但成份不均一。
#3-10	Magnesio- hornblende 鎂質普通 角閃石	台灣 東澳	長條狀，產於角閃岩 (Amphibolite) 中。	晶體外形-半自形， 成分均一。
#3-11	Pargasite 韭閃石	芬 蘭	短柱狀。	晶體外形-自形晶， 成分均一。
#3-12	Pargasite 韭閃石	台灣 電光	柱狀，與沸石等 礦物共生。	晶體外形-自形晶， 成分均一。
#3-13*	Magnesio- hornblende 鎂質普通 角閃石	台灣 飯包 尖山	粒狀，產於角閃岩 (Amphibolite) 中。	晶體外形-他型 化學成份部分 採用 (Lan 1992)。
#3-14	Edenite 淡閃石	台灣 豐濱	長條狀，產於安山岩 (Andesite) 中。	晶體外形-半自形
氧角閃石 (Oxyhornblende) 系列				
#4-1	Edenite 淡閃石	台灣 小油坑	柱狀，為火成岩中 之特殊產物。	晶體外形- 自形晶，
#4-2◎	Edenite 淡閃石	台灣 冷水坑	柱狀，為火成岩中 之特殊產物。	晶體外形- 自形晶，
#4-3※	Pargasite 韭閃石	日本 熊本縣	柱狀，為火成岩中 之特殊產物。	晶體外形- 自形晶，
第三類 Sodic-Calcic Amphiboles				
#5-1※	Magnesio- Katophorite 鎂紅閃石	加拿大 安大略	條狀，含有磁性。	晶體外形-半自形 成分均一。
第四類 Sodic Amphiboles				
#6-1	Glaucophane 藍閃石	美國 加州	柱狀。	晶體外形-自形晶， 成分均一。
#6-2	Eckermannite 鎂鋁鈉閃石	美國 加州	針狀。	晶體外形-半自形， 成分均一。
註：記號* 標本者，為中研院 藍晶瑩 老師 所提供。 記號※ 標本者，為屏東師院 李建興 老師 所提供。 記號◎ 標本者，為文化大學 吳樂群 老師 所提供。				

第三章 實驗結果

3-1 X 光繞射 (XRD) 實驗結果

利用能量分散分析法所求得的 d 值, 去比對 ICDD 資料庫 (表 3-1), 找出礦物之晶軸值, 確定各個角閃石標本之結構為單斜晶系, 空間群 C2/m。另一方面, 從繞射實驗資料中發現, 當實驗條件皆同的狀況下, 相較於其他礦物之光譜, 本研究之天然角閃石類礦物的光譜較不呈現清楚、尖銳的特徵峰值。可能是成份較複雜或結晶度不佳的緣故。X 光繞射光譜圖附於附錄 C。

表 3-1 由 X-光繞射實驗所求得的 d 值, 與 ICDD 資料庫比對後, 所得到的晶體參數值。

#1-1※	Grunerite 鐵閃石	資料庫編號 : 31-631 空間群 : C2/m
#1-2※	Cummingtonite 褐閃石	資料庫編號 : 42-545 空間群 : C2/m
#2-1*	Actinolite 陽起石	資料庫編號 : 31-631 空間群 : C2/m
#2-2	Nephrite 閃玉	無資料
#2-3	Nephrite 閃玉	無資料
#2-4*	Tremolite 透閃石	資料庫編號 : 03-0490 空間群 : C2/m
#2-5	Tremolite 透閃石	無資料
#2-6*	Tremolite 透閃石	資料庫編號 : 09-0437 空間群 : C2/m
#2-7※	Tremolite 透閃石	資料庫編號 : 23-0666 空間群 : C2/m
#3-1*	Pargasite 韭閃石	資料庫編號 : 26-1372 空間群 : C2/m
#3-2*	Pargasite 韭閃石	無資料
#3-3	Ferro-hornblende 鐵質普通角閃石	無資料

#3-4*	Ferro-hornblende 鐵質普通角閃石	資料庫編號：29-1258 空間群：C2/m
#3-5	Edenite 淡閃石	資料庫編號：23-1405 空間群：C2/m
#3-6	Pargasite 韭閃石	資料庫編號：09-0434 空間群：C2/m
#3-7*	Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石	資料庫編號：11-0493 空間群：C2/m
#3-8	Edenite 淡閃石	無資料
#3-9◎	Pargasite 韭閃石	無資料
#3-10	Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石	無資料
#3-11	Pargasite 韭閃石	資料庫編號：23-1406 空間群：C2/m
#3-12	Pargasite 韭閃石	資料庫編號：45-1371 空間群：C2/m
#3-13*	Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石	$a=9.783$ $b=17.935$ $c=5.297$ $\beta=104.6$ C2/m
#3-14	Edenite 淡閃石	無資料
#4-1	Edenite 淡閃石	$a=9.85$ $b=18.07$ $c=5.307$ $\beta=104.95$ C2/m
#4-2◎	Edenite 淡閃石	無資料
#4-3※	Pargasite 韭閃石	資料庫編號：20-0481 空間群：C2/m
#5-1※	Magnesio-Katophorite 鎂紅閃石	無資料
#6-1	Glaucophane 藍閃石	資料庫編號：20-0616 空間群：C2/m
#6-2	Eckermannite 鎂鋁鈉閃石	資料庫編號：20-386 空間群：C2/m

3-2 電子顯微分析 (EPMA) 實驗結果

29 個天然角閃石標本，成分分析列於附錄 D。在分析的過程中，每個標本皆分析 3 點以上，以確定成份的準確性。而於中山大學貴儀中心實驗所得資料，礦物的整體重量百分比有偏低的現象，可能與電流大小、標本之拋光度、標本表面的鍍碳及標準樣本 (standard) 的建立等因素有關。雖是如此，各個標本在多次分析之後，所測到的值變化不大，表示儀器精確性是可信的。所有標本之成份資料取其一為代表列於表 3-2 且將成份以 CaO-MgO-FeO 之三角圖來表示 (圖 3-1)，可清楚看出標本成份變化的趨勢，方便與拉曼分析所得之光譜資料作對照，以探討其相關性。

依照 Leake (1997) 分類法，將所分析之角閃石標本投於圖 3-2。可觀察到本研究標本之成分於四大類皆有。尤其以鈣質角閃石部份最密。再進一步區分發現：

- (1) 紫紅色半滿圓為褐閃石 (Cumingtonite) 系列，將其編號為 #1-1、#1-2，共 2 個標本。
- (2) 深藍綠色半滿圓為透閃石 (Tremolite) 系列，將其編號為 #2-1~#2-7，共 7 個標本。
- (3) 棕色空圓成分變化較廣，有屬於韭閃石 (Pargasite) 或淡閃石 (Edenite) 等系列 (詳細描述於 2-3 節實驗標本部份)，因此，為了方便討論故將其當作同一個系列，屬於普通角閃石 (hornblende)，將其編號為 #3-1~#3-14，共 14 個標本。
- (4) 鮮紅色全滿圓雖與上述系列類似。但拉曼光譜 (見下一章節) 之特徵有明顯的不同，且標本產於火山地區。認為應屬於氧角閃石 (Oxyhornblende) 系列。因此將其獨立出來討論。編號為 #4-1~#4-3，共 3 個標本。
- (5) 淡藍色半滿圓為鈉鈣質角閃石 (Sodic-Calcic Amphiboles)，將其編

號為#5-1，僅 1 個標本。

(6)灰色半圓為鈉質角閃石（Sodic-Calcic Amphiboles），將其編號為
#6-1、#6-2，共 2 個標本。

表 3-2 角閃石成分表

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CrO ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	total	Mg#
#1-1	50	0.48	0	0	40.06	0.44	6.43	0.36	0	0	97.7	22.2
#1-2	50.10	0.8	0	0	35.29	0	9.32	0	0	0.11	95.62	32
#2-1*	56.97	1.84	0.03	0.14	4.29	0.04	21.55	12.72	0.14	0.01	97.73	90
#2-2	55.94	0.33	0	0.23	4.2	0	21.06	12.95	0	0	96.03	89.9
#2-3	55.1	0.5	0	0	3.39	0	21.05	13.01	0	0	94.13	91.7
#2-4*	55.69	3.01	0.17	0.36	2.75	0.06	23.2	12.46	0.09	0.08	97.87	93.8
#2-5	54.81	0.98	0	0	2.11	0.05	22.15	12.6	0.32	0.09	93.11	94.9
#2-6*	58.01	0.08	0	0.05	1.83	0.11	23.50	13.43	0.17	0.02	97.20	95.8
#2-7	57	0.26	0.06	0	0.08	0.07	25	12.6	0.28	0.19	95.54	99.8
#3-1*	39.54	12.45	0.78	0.04	26.64	0.76	3.7	10.77	1.49	1.57	97.74	19.8
#3-2*	40.42	16.87	0.32	0	20.19	0	5.11	11.37	1.55	0.74	96.57	31.1
#3-3	40.7	8.9	0.7	0	19.8	0.38	8.06	10.5	0.2	1.4	90.64	42.1
#3-4*	44.44	11.43	1	0.04	16.98	0.6	8.42	10.66	1.23	1.23	96.03	46.9
#3-5	45.56	13.05	0.21	0	13.5	0.29	10.19	9.26	3.61	0.45	96.12	57.4
#3-6	40.3	10.9	1	0	13.47	0.2	11.4	11.9	1.6	2	92.77	60.1
#3-7*	45.15	11.68	1.59	0.12	13.38	0.42	11.77	11.48	1.13	0.71	97.43	61.1
#3-8	12.21	10.06	2.37	0	12.7	0.17	12.9	9.58	2.4	0.08	92.47	64.4
#3-9	42.2	12.34	1.52	0	11.43	0.32	13.02	9.35	1.88	0.56	92.62	67
#3-10	47.7	10.4	0.6	0.02	10.92	0.18	13.26	12.09	1.61	0.09	96.87	68.4
#3-11	40.06	13.52	0.78	0	9.81	0	12.64	12.16	2.38	1.84	93.19	69.7
#3-12	43.95	10.81	2.95	0	10.29	0	14.34	10.43	3.51	0	96.28	71.3
#3-13	48.69	8.77	0.89	0.01	9.71	0.25	13.72	11.85	1.46	0.19	98.17	71.6
#3-14	46.3	10.13	1.56	0.03	10.6	0.13	15.41	10.81	2.24	0.08	97.29	72.2
#4-1	45.88	8.23	1.91	0	12.76	0.24	14.07	11.28	1.59	0.59	96.55	66.3
#4-2	47.2	7.88	1.61	0	13.01	0.39	14.83	11.19	1.59	0.5	98.20	67
#4-3	43.43	11.46	1.93	0	11.88	0	14.61	11.34	2.71	0.46	97.88	68.7
#5-1	46.33	5.24	0.96	0	18.15	1.2	10.47	5.54	7.01	1.27	97.77	50.7
#6-1	55.2	8.74	0	0	14.32	0.25	8.64	1.5	6.67	0	95.32	51.8
#6-2	54.1	8.11	0	0	8.54	0	6.6	11.41	7.33	0	96.09	57.9
記號者，為 藍晶螢 所分析的資料，Mg# = $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 單位 (wt%)												

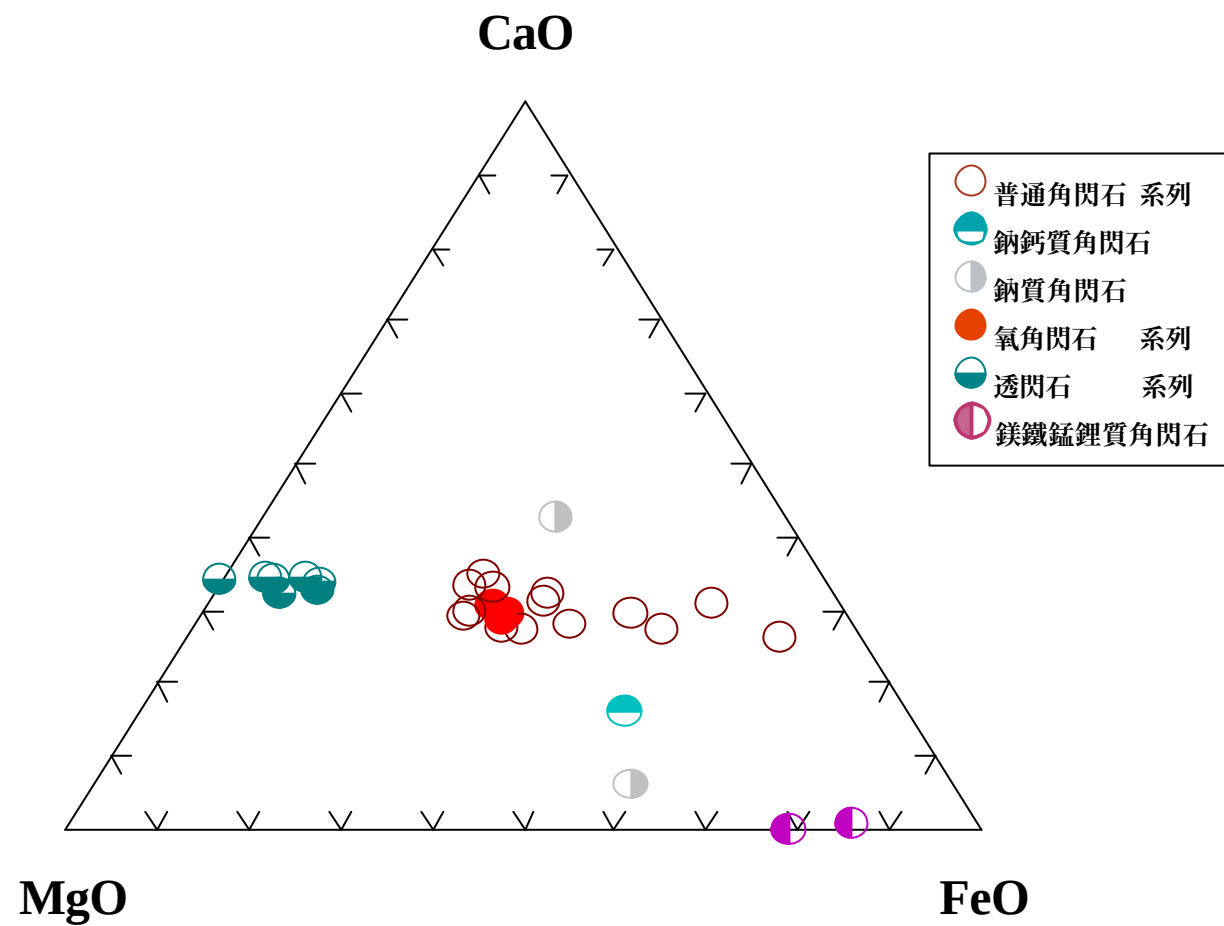


圖 3-1 標本成份以 CaO-MgO-FeO 之三角圖表示

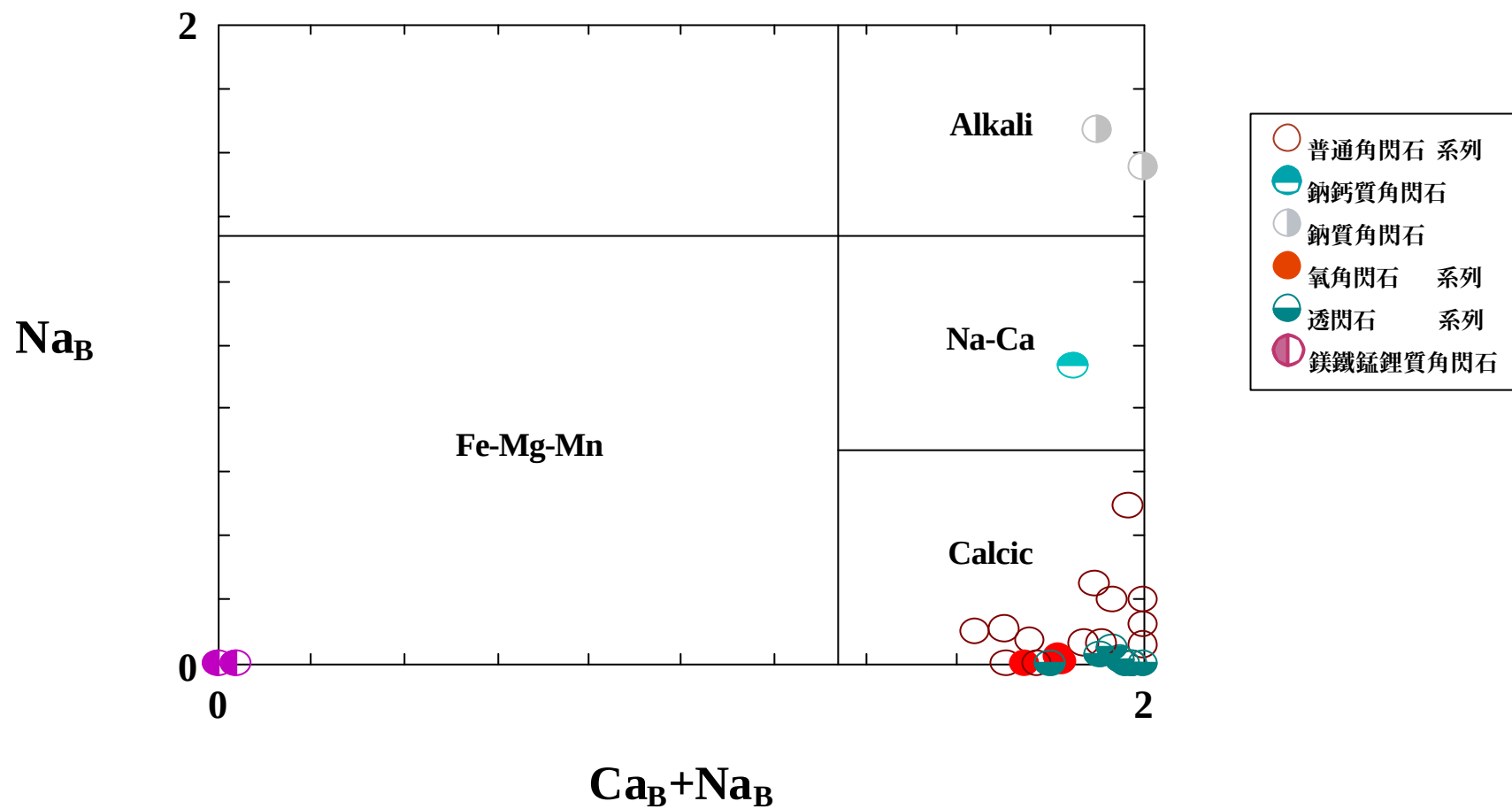


圖 3-2 本研究之角閃石分類圖。

3-3 拉曼光譜實驗結果

將 29 個標本之拉曼峰值依照 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 之比例由低至高排列（註：為方便描述以下將 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 用 $\text{Mg\#}$ 代表），列於表 3-3，並將其拉曼光譜圖分低頻部分頻譜（ $200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$ ）（圖 3-3.1, 3-3.2, 3-3.3, 3-3.4, 3-3.5, 3-3.6）及高頻部分頻譜（ $3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$ ）（圖 3-4.1, 3-4.2, 3-4.3, 3-4.4, 3-4.5）來觀察，觀察高頻部分的原因，目的在於探討結晶水在角閃石礦物中的情形。依據拉曼頻譜變化的趨勢，並且對照 3-2 節之分類，可分成六個部分來進行討論。

- (i) 褐閃石 (Cummingtonite) 系列。
- (ii) 透閃石 (Tremolite) 系列。
- (iii) 普通角閃石 (Hornblende) 系列。
- (iv) 氧角閃石 (Oxyhornblende) 系列。
- (v) 鎂紅閃石 (Magnesio-Katophorite)。
- (vi) 藍閃石 (Glaucophane)、鎂鋁鈉閃石 (Eckermannite)。

從拉曼光譜中發現，不同固溶系列之角閃石類礦物，在常溫常壓下，拉曼光譜即有明顯的不同。低頻部分，最明顯之拉曼特徵峰，皆出現在 $660\text{cm}^{-1} \sim 675\text{cm}^{-1}$ 之間，為 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ bend modes (White, 1975)。只有第 (iv) 部分在 $575\text{cm}^{-1} \sim 585\text{cm}^{-1}$ 之間，出現較寬的明顯峰值（圖 3-3.4），與其他類差異甚大，因故將其歸類為氧角閃石系列之原因。高頻部分，以第 (vi) 部分有最多個數的拉曼振動模。而氧角閃石部分則無偵測到拉曼振動模。

表 3-3 角閃石之拉曼峰值 單位:cm⁻¹ (低頻 200cm⁻¹ ≤ ν ≤ 1500cm⁻¹)

編號	#3-1	#1-1	#1-2	#3-2	#3-3	#3-4	#5-1
Mg#	19.8	22.2	33	38.5	42.1	46.9	50.7
SiO ₂	39.54	50	50.1	40.42	40.7	44.44	46.33
CaO	10.77	0.36	0	11.37	10.5	10.66	5.54
拉曼峰值 ν ₁				200.31		206.5	
ν ₂					221.16		224.49
ν ₃							
ν ₄							
ν ₅				271		271.82	
ν ₆							
ν ₇					294.97		302.4
ν ₈							
ν ₉							
ν ₁₀		351.74	349.05				359.94
ν ₁₁		368.94	366.3	364.03	361.57	360.75	
ν ₁₂							
ν ₁₃		408	403.06	420.32		415.44	
ν ₁₄		425	422.59				432.5
ν ₁₅							
ν ₁₆		510.85	509.13				
ν ₁₇	539.73	530.92	530.01	549.34	531.72	544.54	539.7
ν ₁₈							
ν ₁₉							
ν ₂₀	671.55	662.89	660.49	669.98	664.46	673.92	673.92
ν ₂₁							
ν ₂₂				718.66	731.95	718.66	
ν ₂₃		746	746.81				
ν ₂₄	766.25	763.92	763.95	772.47		772.47	
ν ₂₅							
ν ₂₆	911.85	910.33	907.41			895.05	
ν ₂₇				920.24			
ν ₂₈							
ν ₂₉		969	969.04				967.35
ν ₃₀	1013.6			995.39	1013.6		
ν ₃₁		1023.4	1021.1	1020.4		1021.7	
ν ₃₂							1058.9
ν ₃₃				1093.5			
ν ₃₄							

表 3-3 (續)							
#6-1	#3-5	#6-2	#3-6	#3-7	#3-8	#3-9	#4-1
52	57.4	57.9	60.1	61.1	64.4	67	66.3
55.2	45.56	54.1	40.3	45.15	42.21	42.2	45.88
1.5	9.26	11.41	11.9	11.48	9.58	9.35	11.28
208.66		208.66		200.31			
226.99	222				222		
			232.82			231.15	
254.42		255.25					246.95
				265.2			
						286.71	
		304.05					298.27
					323.82		
336.15		335.33				334.51	
							356.66
	369.76		360.75	364.05	375.48		
386.1		385.29	380.39			399.15	
404.86		404.86					
445.48		445.48	430.88				
		488.31					482.67
							513.26
520.49		525.31	535.73		535.73		
558.13	545.34	554.93		554.13	564.52		581.27
609.1		608.3					
668.4	669.2	668.4	666.04	670.7	666.83	666.83	671.55
681.78		683.36	684.14				
739.76			734.39	719.44	732.73		
		742.1		774.02			763.92
775.58		775.58	785.67		794.98		784.9
788.77		787.22					
895		887.4	919.48				885.1
					929.38		
985.5		985					
1007.5		1005			1011.3		
	1031		1021.9		1025.7	1006.8	1021.2
1045.4		1045.4					
1104		1103.3					

表 3-3 (續)							
#4-2	#4-3	#3-10	#3-11	#3-12	#3-13	#3-14	#2-1
67	68.7	68.4	69.7	71.3	71.6	72.2	89.9
47.2	43.43	47.7	40.06	43.95	48.69	46.3	56.97
11.19	11.34	12.09	12.16	10.43	11.85	10.81	12.72
		224.96		223.66	222.83		222
			227.82			225.33	231.15
243.62	241.96						249.44
							262.71
289.19	289.19		294.97				303.22
			320.53	313.94		319.7	
	326.29						
344.36							347.6
	372.21	367.77		368.12	366.48	371.39	370.58
382.84		385.75	378.75	384.47	386.92	389.37	393.45
		415.09				418.69	415.44
			431.69				434.13
	520.49	535.4	537.33	536.53	532.92	536.53	528.51
585.25	587.64	568.19					
669.98	664.46	669.68	666.83	666.04	670.77	668.4	673.13
			688.07				
			724.43	736.64			
761.58						746	749.12
784.12	778.69		805.82	794.2		796.5	
			922.53	917.95			
						930.9	929.38
		942.06					946.87
	1023.5	1031.8	1021.9	1025.7	1029.5	1021.9	1027.2
					1054.4		1056.8

表 3-3 (續)					
#2-2	#2-3	#2-4	#2-5	#2-6	#2-7
90	91.7	93.8	95	95.8	100
55.94	55.1	55.69	54.81	58.01	57
12.95	13.01	12.46	12.6	13.43	12.6
222	219.5	221.16	221.16	222	223.66
230.32	227.82	230.2	228.66	231.99	231.99
247.78	245.69	250.27	248.61	250.27	
	264.37			265.2	
286	286.71	288.37	287.54		
300.58	298.27			301.58	
	329.58	332			
	341.08	342.72	341.08		
350.1	347.64		349.28	350.92	
368.12	365.67	368.12	367.3	368.94	
391.82	390.18	392.63	391.82	393.45	394.26
413.81	412.18	414.63	413.81	415.44	417.88
434.94	433.31	434.13	433.31	434.95	
	511.65		513.26	516.7	
527.71	525.3	522.9	526.91	529.31	
653.42	651.05	653.42	651.84	653.42	
673.13	669.98	672.34	672.34	673.92	674.7
738	738.2	739.4	738.98	741.35	
747.56	747.56	749	747.56	749.9	
929.38	927.86	929.38	929.38	930.9	930.14
946.11	943.83	945.3	945.35	946.87	
1028	1025.7	1027.3	1028.7	1029.5	1028.7
1057.4	1055.2	1056.8	1058.9	1058.9	1059.7

表 3-3 (續) (高頻 $3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$)															
編號	#3-1	#1-1	#1-2	#3-2	#3-3	#3-4	#5-1	#6-1	#3-5	#6-2	#3-6	#3-7	#3-8	#3-9	#4-1
Mg #	19.8	22.2	33	38.5	42.1	46.9	50.7	52	57.4	57.9	60.1	61.1	64.4	67	66.3
SiO ₂	39.54	50	50.1	40.42	40.7	44.44	46.33	55.2	45.56	54.1	40.3	45.15	42.21	42.2	45.88
CaO	10.77	0.36	0	11.37	10.5	10.66	5.54	1.5	9.26	11.41	11.9	11.48	9.58	9.35	11.28
ν_{35}		3619.3	3619.3					3617.7		3618.8					
ν_{36}								3623.6		3623.6					
ν_{37}		3638.5	3637.4					3634.2		3633.7					
ν_{38}								3644.5		3644.9					
ν_{39}		3655	3653.9					3649.5		3650.2					
ν_{40}	3659.8	3668.8	3667.2		3660		3666.9	3662.4	3660	3663		3660	3666		
ν_{41}															

表 3-3 (續)													
#4-2	#4-3	#3-10	#3-11	#3-12	#3-13	#3-14	#2-1	#2-2	#2-3	#2-4	#2-5	#2-6	#2-7
67	68.7	68.4	69.7	71.3	71.6	72.2	89.9	90	91.7	93.8	95	95.8	100
47.2	43.43	47.7	40.06	43.95	48.69	46.3	56.97	55.94	55.1	55.69	54.81	58.01	57
11.19	11.34	12.09	12.16	10.43	11.85	10.81	12.72	12.95	13.01	12.46	12.6	13.43	12.6
							3644.9	3644.9	3643.3				
		3660.8				3664	3660.8	3660.8	3658.7	3660.9	3660.8	3661	
							3674.6	3674.6	3672.5	3673.5	3674.7	3675	3674.6

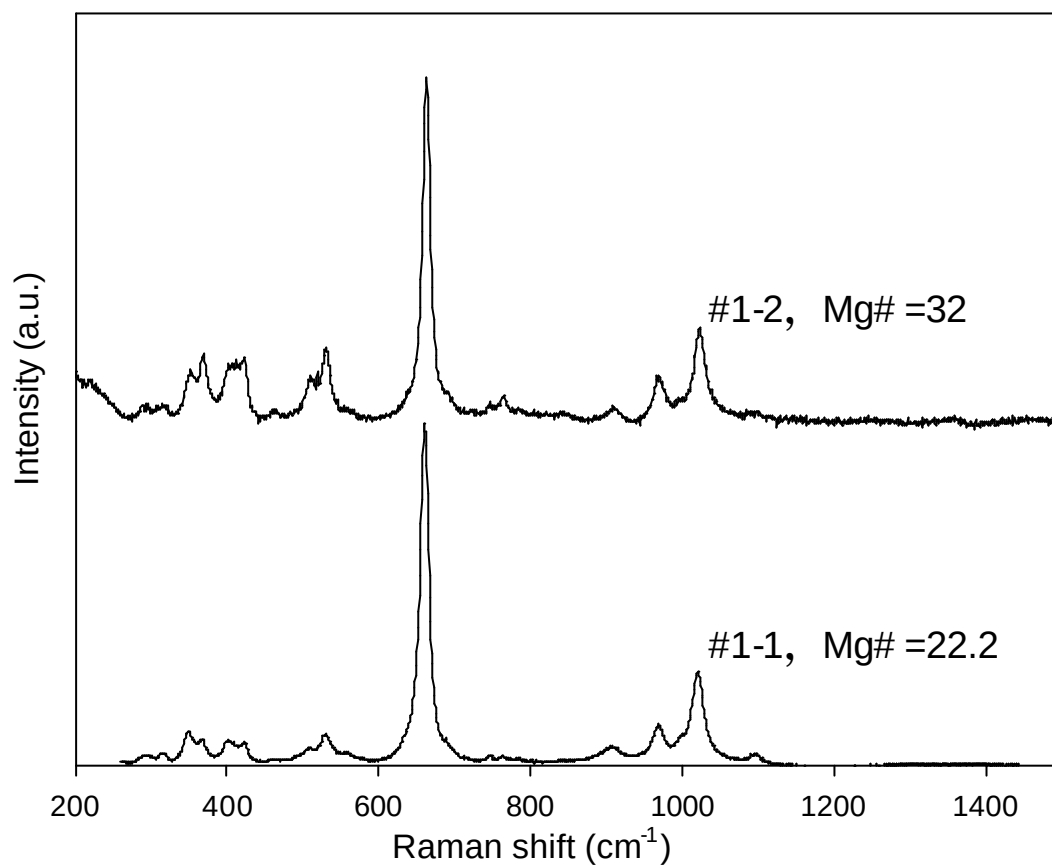


圖 3-3.1 褐閃石系列之拉曼光譜
低頻 ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 部分。

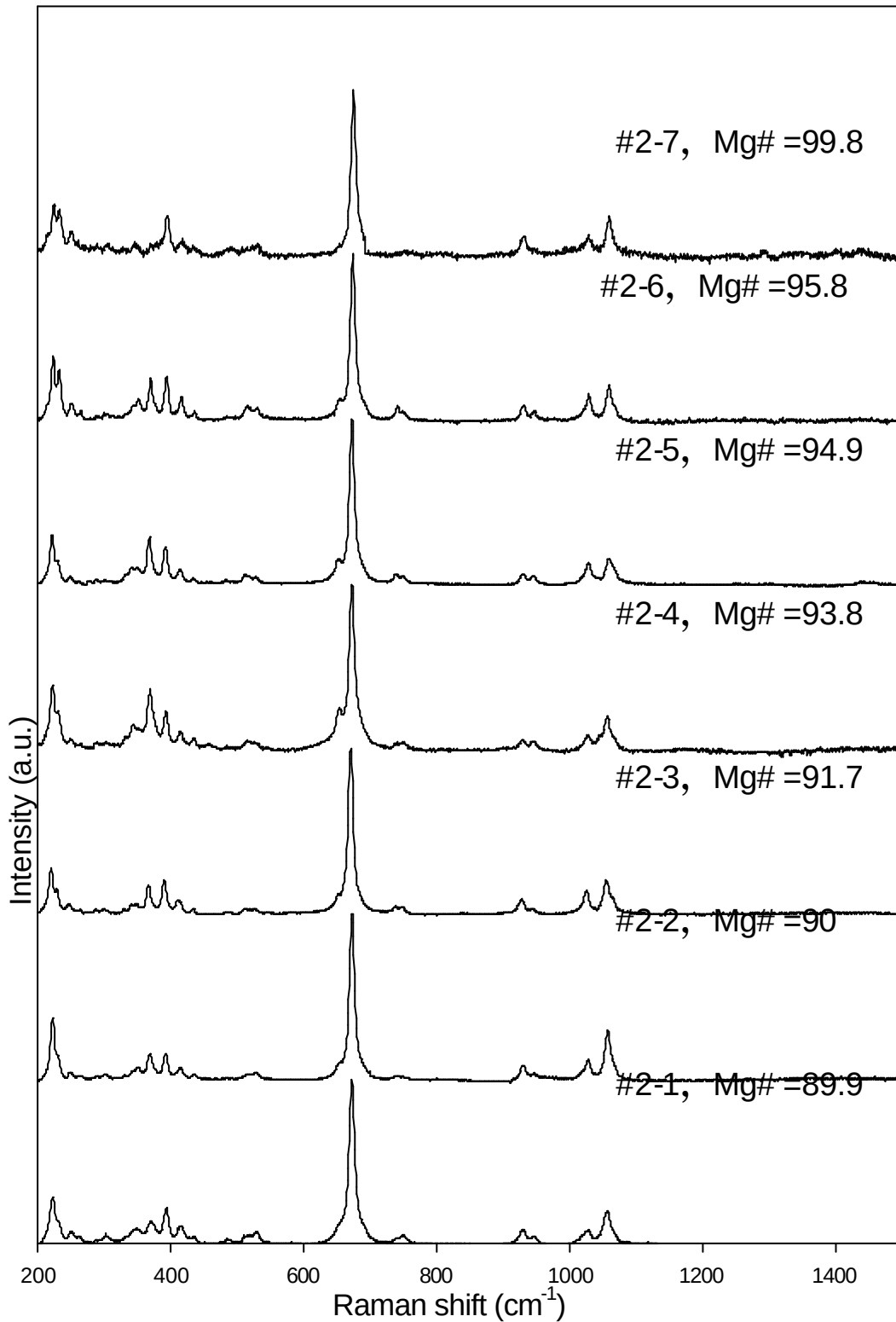


圖 3-3.2 透閃石系列之拉曼光譜低頻 ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 部分。

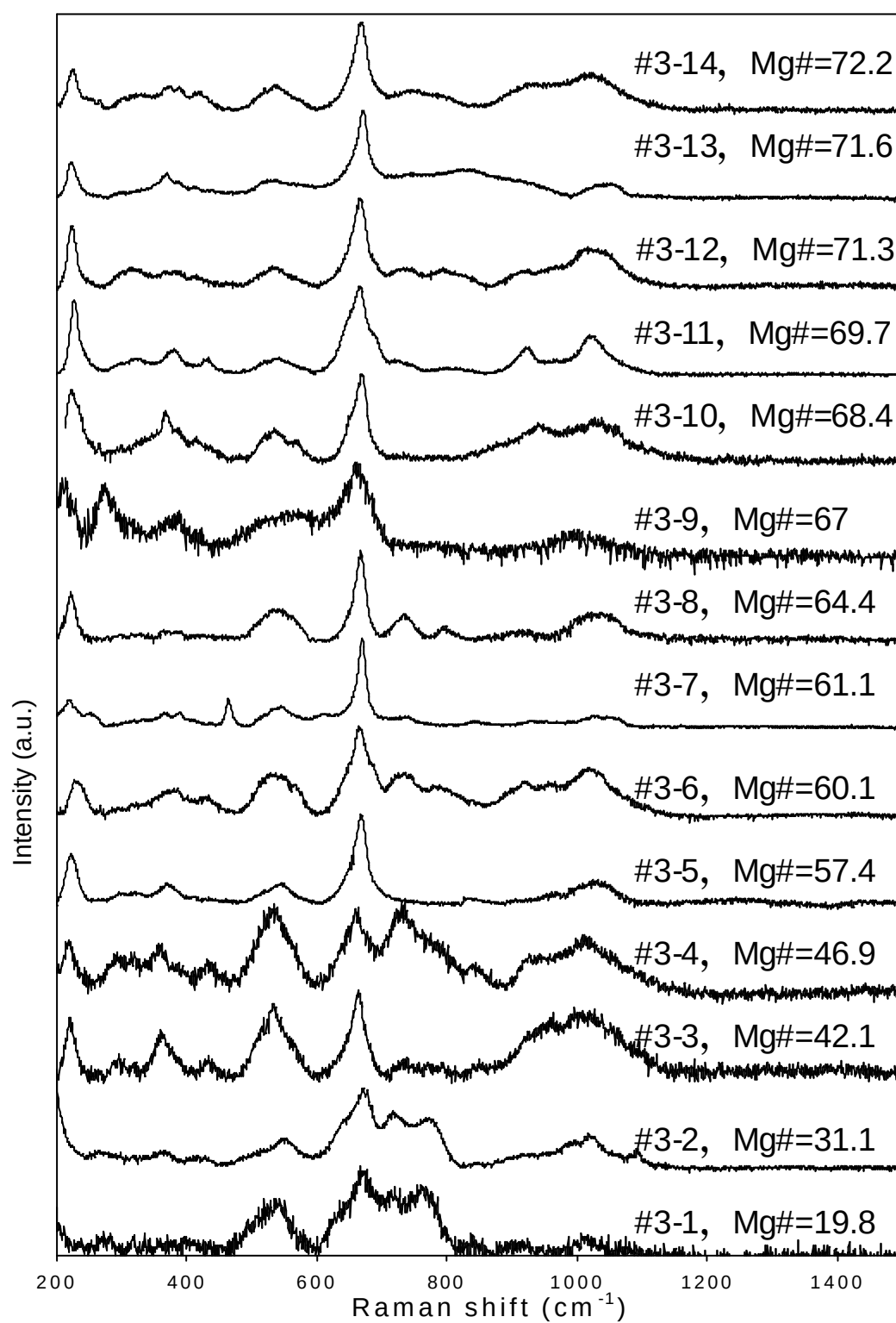


圖 3-3.3 普通角閃石系列之拉曼光譜低頻
($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 部分。

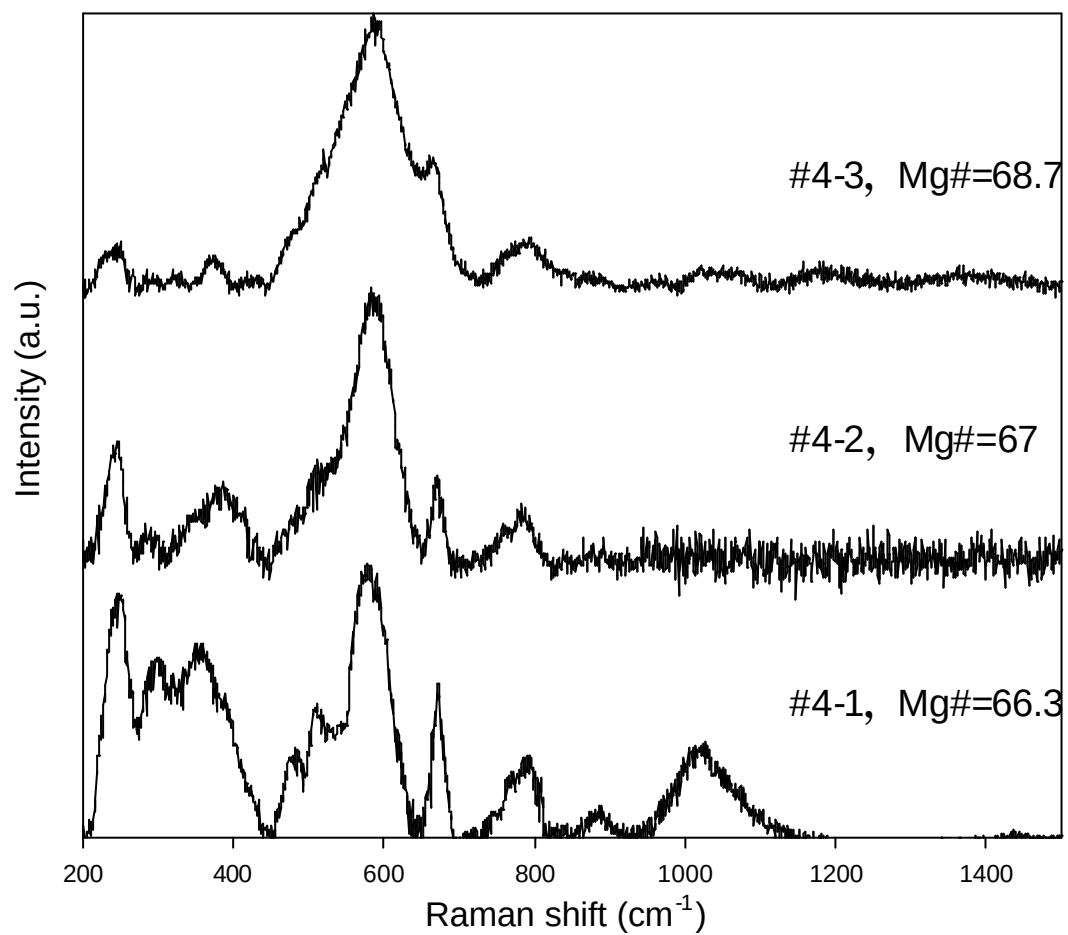


圖 3-3.4 氧角閃石系列之拉曼光譜低頻
($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 部分。

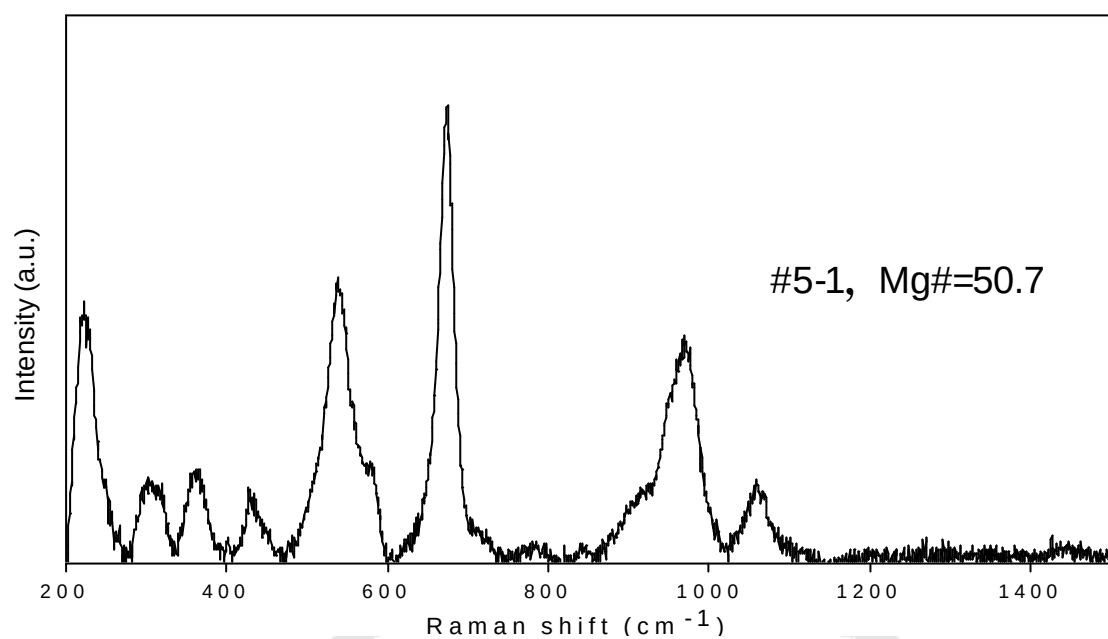


圖 3-3.5 鎂紅閃石之拉曼光譜低頻 ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 部分。

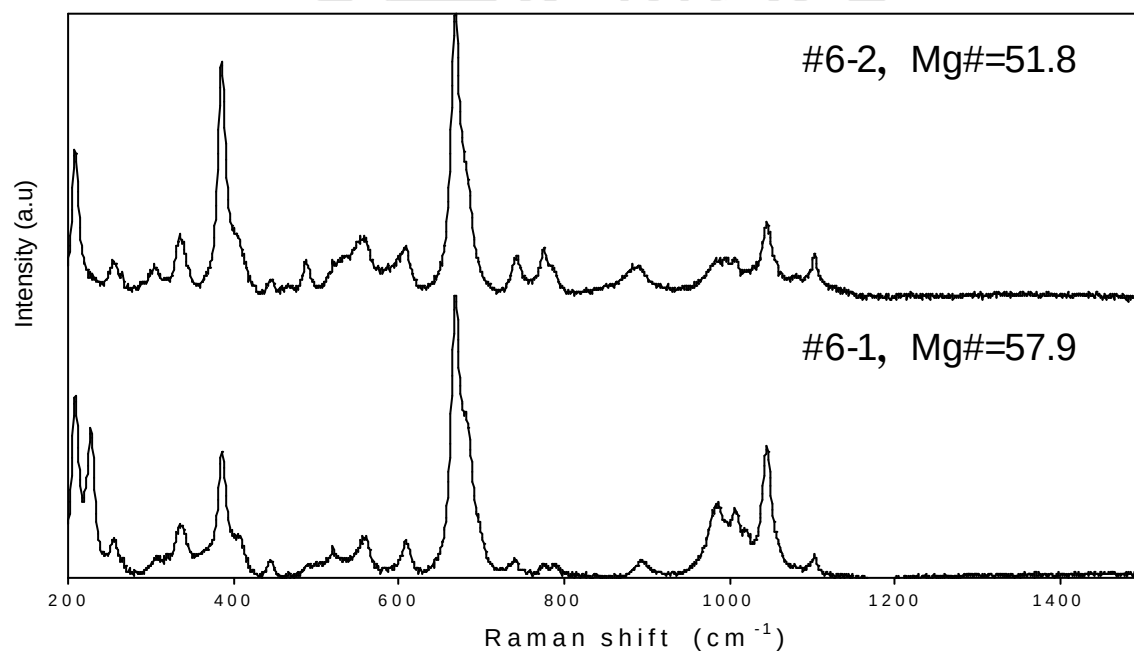


圖 3-3.6 藍閃石、鎂鋁鈉閃石之拉曼光譜低頻 ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 部分。

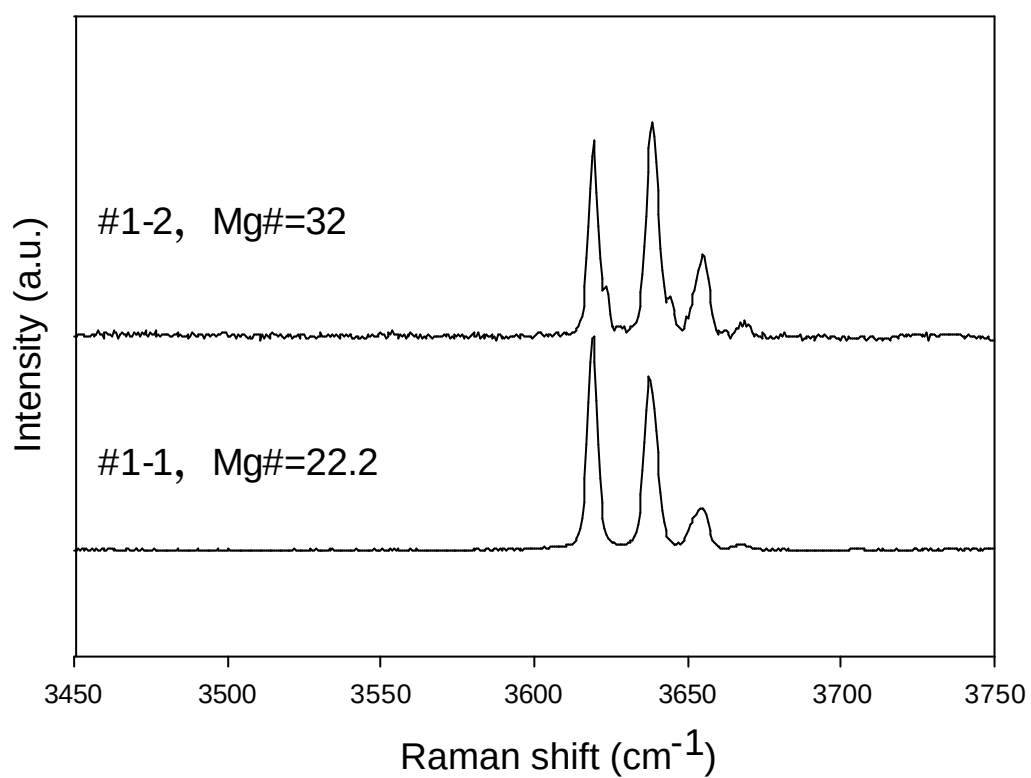


圖 3-4.1 褐閃石系列之拉曼光譜高頻($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$)部分。

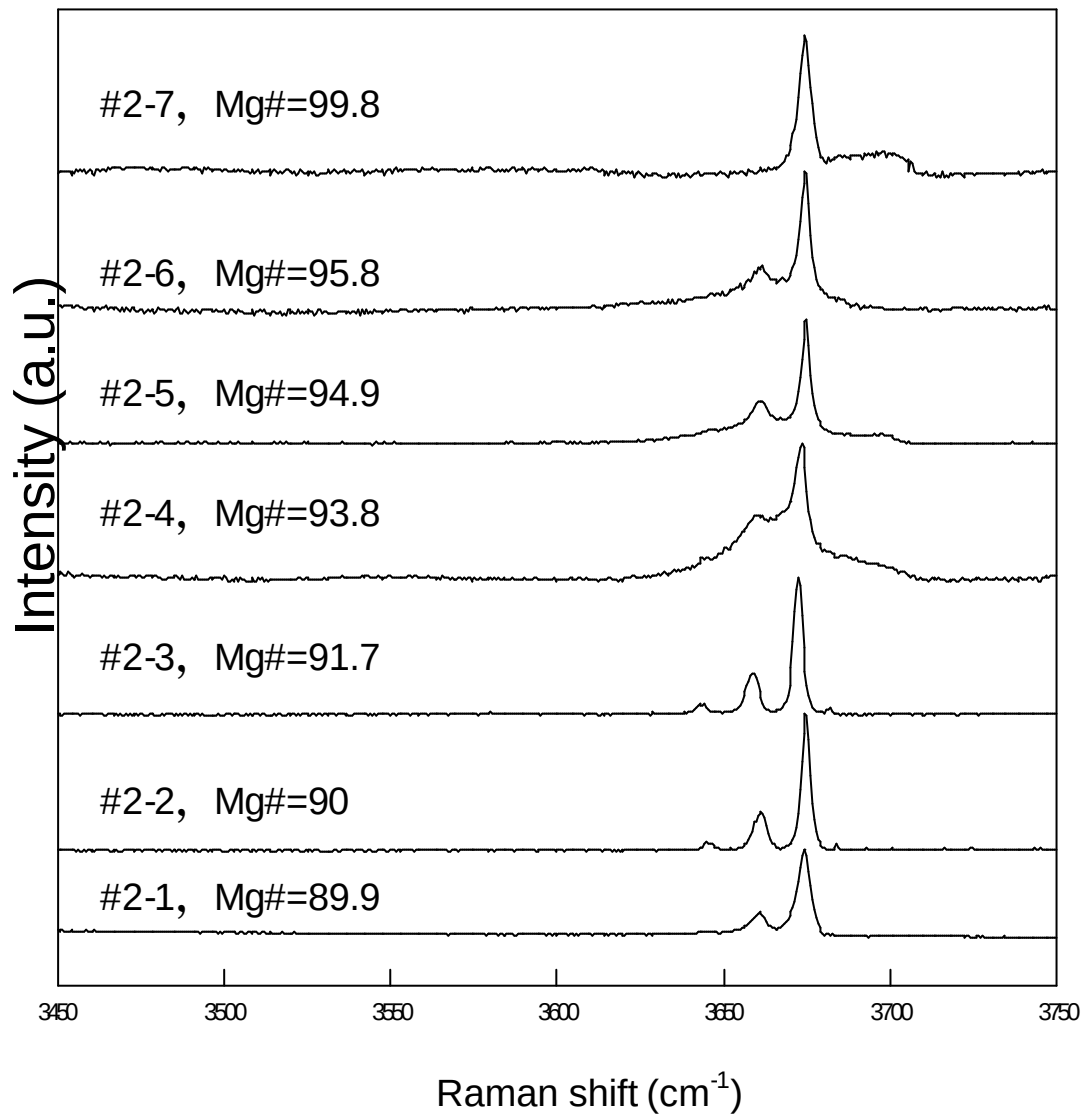


圖 3-4.2 透閃石系列之拉曼光譜高頻($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$)部分。

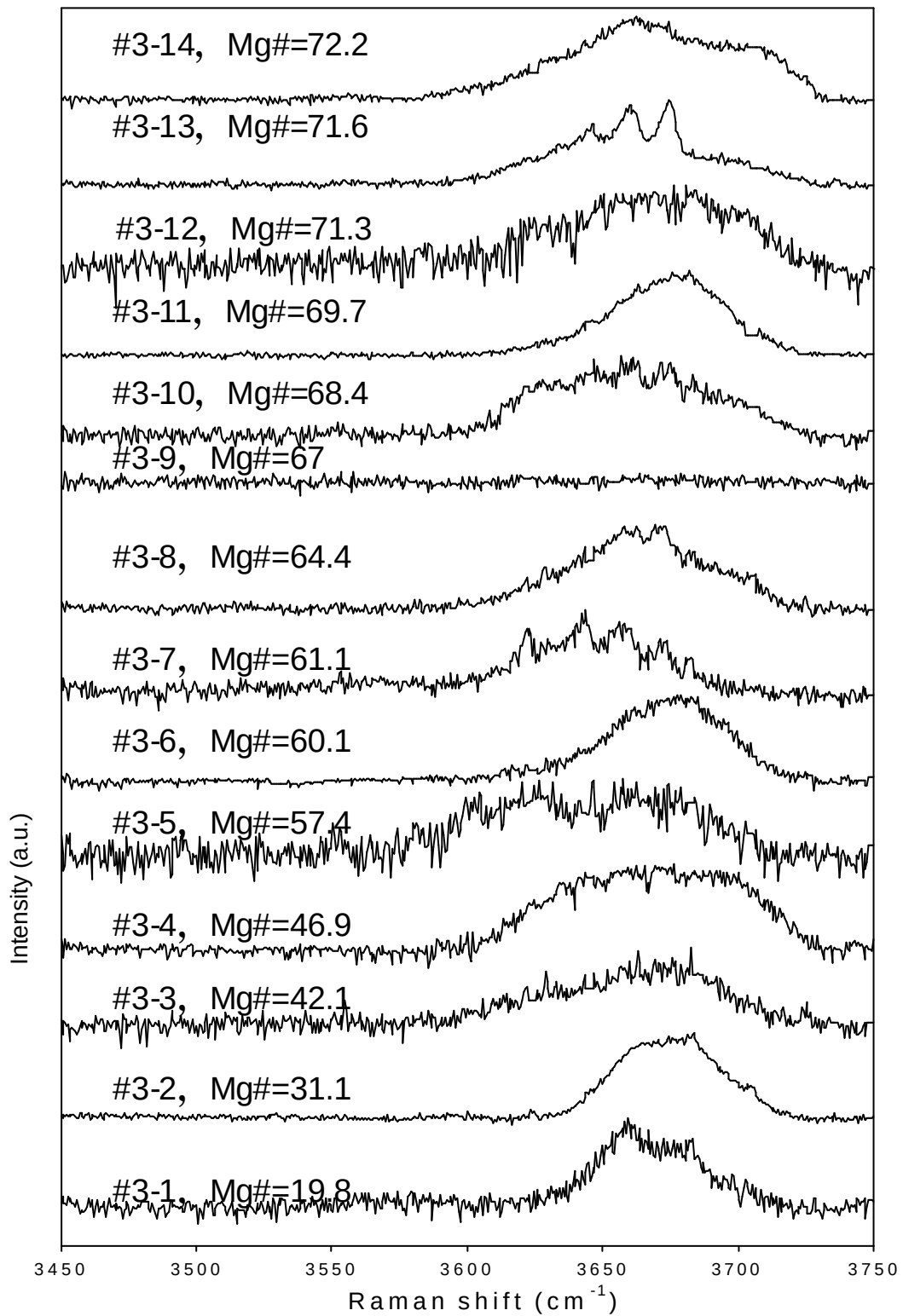


圖 3-4.3 普通角閃石系列之拉曼光譜高頻
($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$) 部分。

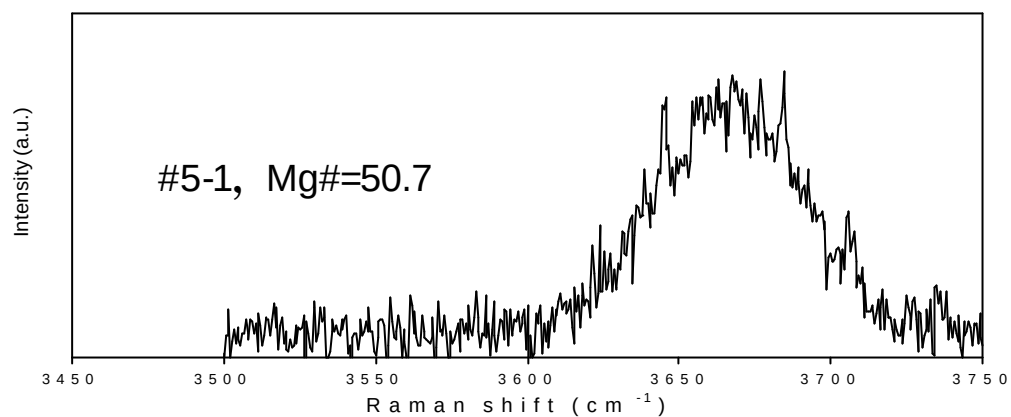


圖 3-4.4 鎂紅閃石之拉曼光譜高頻 ($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$) 部分。

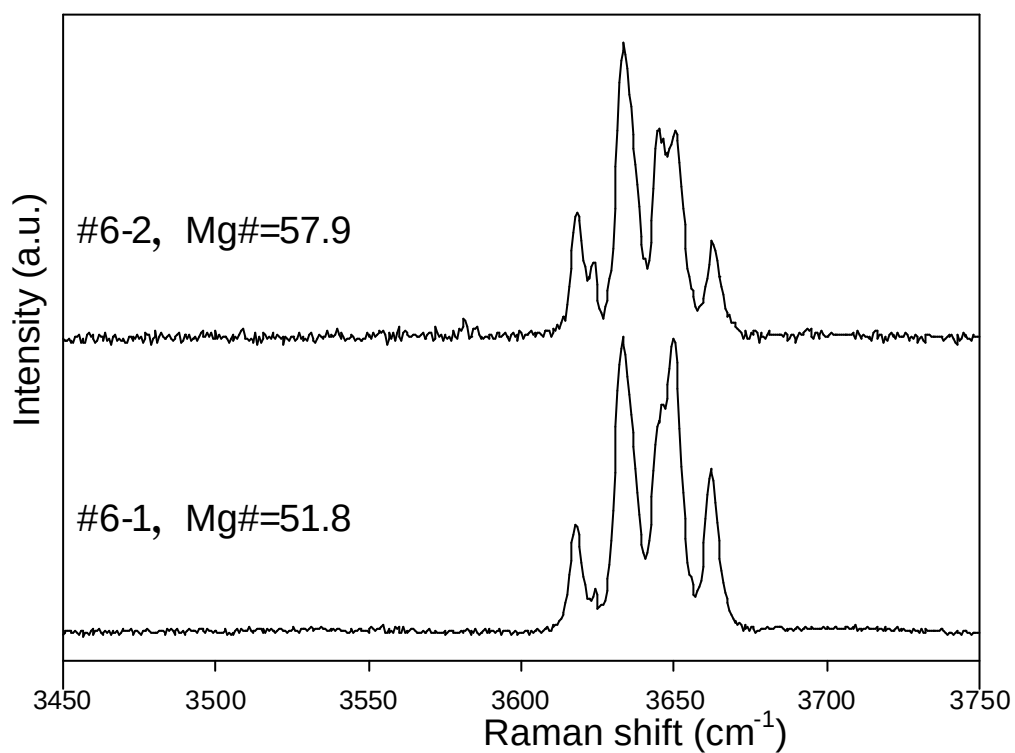


圖 3-4.5 藍閃石、鎂鋁鈉閃石之拉曼光譜高頻
($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$) 部分。

3-3.1 褐閃石– 鐵閃石系列

此系列之成份，最大差異在於 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 含量之比例，幾乎不含鈣，而矽含量約含有 50 wt%。

在低頻部分，#1-1 褐閃石與#1-2 鐵閃石圖譜相似（圖 3-3.1），可發現 12 個拉曼峰（表 3-3），以 662cm^{-1} 附近之峰值最為明顯，為 Si-O_b-Si bend 之振動模；在高頻部分，兩者皆有 4 個拉曼振動模（表 3-3 高頻部分），以 3619cm^{-1} 左右及 3638cm^{-1} 左右之峰值最為明顯（圖 3-4.1）。

3-3.2 透閃石系列

標本編號為#2-1 至#2-7, 此系列之成份, 差異也在於 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 含量的比例。本研究標本 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 之範圍落於 90~100 之間。而鈣含量為 13 wt% 左右。

在低頻部分, 可發現 23 個拉曼峰 (圖 3-3.2, 表 3-3)。以 673cm^{-1} 附近之峰值最為明顯, 為 $\text{Si-O}_b\text{-Si bend}$ 之振動模。而其他低頻部分之特徵峰, 分別在 $200\text{cm}^{-1}\sim 225\text{cm}^{-1}$ 之間、 $290\text{cm}^{-1}\sim 550\text{cm}^{-1}$ 之間和 $700\text{cm}^{-1}\sim 1100\text{cm}^{-1}$ 之間也出現數根明顯的拉曼振動模。且一部分之振動模峰值有隨著鎂含量的增加而往高頻方向移動的趨勢。在高頻部分, 隨著二價鐵含量的增加, 拉曼振動模從一個轉變為三個 (圖 3-4.2)。

3-3.3 普通角閃石系列

標本編號為#3-1 至#3-14，此系列的成份變化較廣。 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 之範圍落於 19.8~72.2 之間，而鈣含量約為 9~12 Wt% 之間，且部分的矽被四配位的鋁所取代。

在低頻部分（圖 3-3.3，表 3-3），拉曼光譜以 660cm^{-1} 附近之峰值較為明顯，且拉曼峰形與其他系列相比有較寬的現象，為 Si-O_b-Si bend 之振動模。其他低頻部分之特徵峰，分別在 200cm^{-1} ~ 225cm^{-1} 之間和 540cm^{-1} ~ 560cm^{-1} 之間也出現明顯的拉曼振動模。另外，高頻部分的峰值則不明顯，僅呈現半高寬較寬的峰形（圖 3-4.3）。

3-3.4 氧角閃石系列

標本編號為#4-1 至#4-3，此系列的成份變化近似於普通角閃石。以 Leake 等人（1997）之分類是屬於淡閃石的部分。 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 之範圍約在 67 左右，但必須提的是，此鐵鎂值的比例是將電子探針（EPMA）所分析出來的鐵含量全部當成二價來計算。因為電子探針無法分析出三價鐵及二價鐵的差別。而從前人礦物化學上的研究（黃怡禎，2002）中可知道，氧角閃石系列是有較高含量的三價鐵。相對而言，為達電價平衡，會有部分結晶水（OH）被氧（O）所取代，這也是為何會被稱作為氧角閃石之故。

在本研究中，雖然無分辨出三價鐵及二價鐵的含量，但從拉曼光譜所顯示的資料上，是與其他角閃石系列相當不同的。再加上產於火山地區，因此便認為是屬於氧角閃石系列之礦物。

在低頻部分（圖 3-3.4, 表 3-3），拉曼光譜最明顯的峰值出現在 585cm^{-1} 附近。相較之下，在 670cm^{-1} 附近之 Si-O_b-Si bend 振動模則較不明顯。另外，在高頻部分，無偵測到任何結晶水之振動模。也符合上述所提到之部分結晶水被氧所取代的現象。

3-3.5 鎂紅閃石

標本編號為#5-1，根據 Leake (1997) 之分類法，是屬於鈉鈣質角閃石的部分。Mg/ (Mg+Fe²⁺) 值為 50.7。鈉含量為 7.01 wt%，部分取代了 B 位址的鈣。

在低頻部分（圖 3-3.5，表 3-3），拉曼光譜以 673cm⁻¹之峰值最為明顯，為 Si-O_b-Si bend 之振動模。其他低頻部分之特徵峰，分別在 200cm⁻¹~225cm⁻¹之間 540cm⁻¹~560cm⁻¹和 970cm⁻¹附近也出現明顯的拉曼振動模。另外，高頻部分的峰值則不明顯，僅呈現半高寬較寬的峰形（圖 3-4.4），與普通角閃石系列相似。

3-3.6 藍閃石、鎂鋁鈉閃石

標本編號為#6-1 及#6-2，根據 Leake (1997) 之分類法，是屬於鈉質角閃石的部分。Mg/ (Mg+Fe²⁺) 值分別為 51.8 及 57.9；鈣含量則為 1.5 及 11.41 wt%，差異甚大；而鈉含量為 6.67 及 7.33 wt%。因此，標本#6-1 有較多的鈉取代了 B 位址的鈣，標本#6-2 只有少部分的鈉取代了 B 位址的鈣，其他多餘的鈉便填至 A 位址中（可參考 1-2 節的部分）。

在低頻部分（圖 3-3.6，表 3-3），拉曼光譜以 668cm⁻¹ 之峰值最為明顯，為 Si-O_b-Si bend 之振動模。其他低頻部分之特徵峰，分別在 200cm⁻¹~225cm⁻¹ 之間和 385cm⁻¹ 之間也出現明顯的拉曼振動模。另外，高頻部分則清楚的出現了 5 個以上的 OH 振動模（圖 3-4.5）。

第四章 討論

從 X 光繞射實驗中得知，本研究之角閃石類礦物結構屬於 C2/m。Wang 等人 (1988) 根據空間群為 C2/m 之結構因子 (Factor-group)，以角閃石中 A 位址的陽離子，理論計算其振動模式為：

$$\Gamma_{\text{vib}} = 30A_g(R) + 30B_g(R) + 28A_u(IR) + 35B_u(IR)$$

其中 A_u 和 B_u 為紅外激活模 (Infrared-active modes)； A_g 和 B_g 為拉曼激活模 (Raman-active modes)。而在雙鏈結構中 $\text{Si}_4\text{O}_{11}^{4-}$ 離子之內模 (Internal modes)：

$$\Gamma_{\text{inter.}}(\text{Si}_4\text{O}_{11}^{4-}) = 20A_g(R) + 19B_g(R) + 19A_u(IR) + 20B_u(IR)$$

另外，OH 在角閃石結構中的情形為：

$$\Gamma_{\text{inter.}}(\text{OH}^-) = A_g(R) + B_u(IR)$$

在上述公式中，還必須考慮 M1 和 M3 與氧離子之間的距離。當距離不同時，振動模之個數就會超過 2 個以上，例如：褐閃石 (Cummingtonite) 之 O(3)-M(1) 距離為 2.098Å，O(3)-M(3) 距離為 2.0Å，因此，在拉曼光譜實驗上，就可偵測到 2 個以上的振動模。而 M1 和 M3 與氧離子之間的距離又會因不同佔位的原子有所改變。換句話說，研究 OH 振動模的變化，是可以了解角閃石中陽離子佔位的情形 (Wang 等人, 1988)。

4-1 褐閃石系列

#1-1 褐閃石與 #1-2 鐵閃石圖譜相似 (圖 3-3.1)，可發現 12 個拉曼峰 (表 4-1)，以 662cm^{-1} 附近之峰值最為明顯 (圖 3-3.1)，為 Si-O_b-Si bend 之振動模。

對於此系列的拉曼振動模並沒有前人做過詳細的指認 (assignment) 工作，Wang (1988) 也只討論到褐閃石高頻部分 (OH) 的變化。因此，

在少數的研究下，只能利用相似的固溶系列的角閃石，推測各振動模所代表的振動種類及形式（表 4-1）。另外，本研究中，高頻部分，將 Fe、Mg 離子排列在 M1、M1、M3 三個位址上的組態，依序以 A (Mg Mg Mg)、B (Fe^{2+} Mg Mg)、C (Fe^{2+} Fe^{2+} Mg)、D (Fe^{2+} Fe^{2+} Fe^{2+}) 四種來表示。與 Wang（1988）所測得之拉曼峰有相同的結果（圖 3-4.1；表 4-2）。

表 4-1 #1-1 與 #1-2 低頻譜之 assignment (單位: cm^{-1}) ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$)

	M2-O Stretch		Mg-O Stretch		Si-O-Si bend (bridge O)					O-Si-O Stretch (non-bridge O)		
#1-1	351.74	368.94	408	425	510.85	530.92	662.89	746	763.92	910.33	969	1023.4
#1-2	349.05	366.3	403.06	422.59	509.13	530.01	660.49	746.81	763.95	907.41	969.04	1021.14

表 4-2 #1-1 與 #1-2 之高頻譜 (單位: cm^{-1}) ($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$) , 與前人研究比較。

	組態	D (Fe Fe Fe)	C (Fe Fe Mg)	B (Fe Mg Mg)	A (Mg Mg Mg)
Wang (1988)	Cummingtonite	3616.75	3637.06	3652.90	3665.87
#1-1	Grunerite	3619.3	3638.5	3654.99	3668.78
#1-2	Cummingtonite	3619.3	3637.4	3653.92	3667.19

4-2 透閃石系列

在角閃石礦物中, 此系列是有最多的前人研究(Kieffer, 1979; Kieffer, 1980; McMillan and Hofmeister, 1988; 沈, 1997), 所以資料比對上是最完整的。其中沈(1997)主要研究的是閃玉的部分, 化學成分上範圍雖然較窄, 但是分析的資料點最密。因此他觀察到了一些變化, 包括: 某些拉曼峰值會隨著鎂與二價鐵含量的變化而藍移(往高頻方向移動)或紅移(往低頻方向移動)。並且也發現了當鎂含量增高時, 高頻(OH)振動模會從3個減少至1個振動模。利用此性質, 便可以做半定量的工作。

在此系列中, 本研究共分析到7個標本, 標本編號從#2-1至#2-7。低頻部分, 可發現23個拉曼峰(圖3-3.2, 表4-3); 而高頻部分, 振動模會從3個減少至1個振動模(圖3-4.2, 表4-4)。將拉曼低頻($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$)峰值及高頻($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$)峰值與 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 含量比例做圖(圖4-1, 圖4-2)。用以探討拉曼振動模頻率與鎂含量之變化趨勢。根據前人研究, 此系列分子間的振動, 包括 Mg、Fe、Ca、Al、Na 等原子與 O 之間模的振動在 $0\sim 600\text{cm}^{-1}$; 而分子內的振動有 Si 與 O 的振動在 $600\sim 1200\text{cm}^{-1}$ 以及 $3600\sim 3800\text{cm}^{-1}$ 的 OH 鍵拉伸振動模(Kieffer, 1979; Kieffer, 1980; McMillan and Hofmeister, 1988)。因此, 將其分成四組頻率範圍來討論。

a、 $200\text{cm}^{-1}\sim 500\text{cm}^{-1}$ 之間(圖4-1.1):

此範圍的拉曼振動模包括 Fe、Mg 等陽離子與氧(O)離子的振動(M-O)。M1、M2、M3 即假八面體(Pseudo-octahedron), 所有 M1-O, M2-O, M3-O 之鍵長隨佔位離子半徑增加而呈線性增加(Hawthorne, 1981)。由於二價鐵離子半徑較鎂離子半徑大且 Fe 與 Mg 離子佔 M1 與

M3 的比例較 M2、M4 為高 (Wilkins, 1970)。且 Burns and Greaves (1971) 亦發現 Fe 離子佔位結晶位址比例為 $M1 > M3 > M2$ 。由於 Fe 離子佔據 M1、M2、M3 位址，導致此三個八面體體積變大，使鍵長增長，所以除了 $\sim 302\text{cm}^{-1}$ 及 $\sim 367\text{cm}^{-1}$ 拉曼振動模頻率以外，其餘的拉曼振動模會往低波數移動。

另外，因 Fe 離子佔位比例在結晶位址中為 $M1 > M3 > M2$ (Burns and Greaves, 1971)。表示當 M3-O 之鍵長變大時，佔 M2 位置之陽離子的離子半徑會漸漸變小 (Hawthorne, 1981) 也就是 Fe 含量增加時偏向佔 M1 和 M3 的位址，導致 M3 體積增加，而比鄰的 M2 之假八面體便受到擠壓，M2-O 變短，才使得 $\sim 302\text{cm}^{-1}$ 及 $\sim 367\text{cm}^{-1}$ 的拉曼振動模頻率，當 Fe 含量增加時，反而往高波數方向移動。

b、 $500\text{cm}^{-1} \sim 800\text{cm}^{-1}$ (圖 4-1.2)

此範圍的拉曼振動模為對稱性 (Symmetric) 矽氧四面體彎曲振動模 (Si-O_b) (White, 1975)，根據前人針對角閃石之拉曼光譜研究，發現在 $\sim 670\text{cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰是專屬 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 對稱拉伸振動模，與透輝石-鈣鐵輝石之拉曼光譜在 $670 \sim 680\text{cm}^{-1}$ 出現之拉曼振動模 (Kieffer, 1979; Kieffer, 1980; White, 1975) 相似。

此部分之振動模峰值變化亦隨 Fe 含量之增加，而拉曼峰值往低波數方向移動 (圖 4-1.2)。當 $\text{Si}_b\text{-O}$ 鍵相對 O-Si-O 鍵角角度變化呈負相關，M4 佔位陽離子的型式對 β 角有很重要的影響，而鏈錯動 (chain displacement) 增加，M(4)-O(5) 的鍵長亦會增加 (Hawthorne, 1981)，再根據 Goldman and Rossman (1977) 報導， Fe^{2+} 離子在陽起石裡佔位 M4 比例增加時會造成 $\text{Fe}^{2+}\text{-O}(5)$ 鍵長增加，導致 M4 八面體扭曲變形，對 Si-O 四面體鏈狀結構造成推擠，使 O-Si-O 鍵角變小， $\text{Si}_b\text{-O}$ 鍵長增加，

故隨 Fe 含量增加振動模頻率便往低波數方向移動。

c、 $800\text{cm}^{-1}\sim 1200\text{cm}^{-1}$ (圖 4-1.3)

此範圍的拉曼振動模為反對稱性 (anti-symmetric) 矽氧四面體振動, 為 Si-O-Si 拉張振動模 (stretching mode) 以及矽氧四面體中 (Si-O_{nb}) 的拉張振動 (Kieffer,1979), 此範圍振動模的變化, 主要受到雙鏈聚合程度 (polymerization) 和 Al 取代 Si 影響 (Kieffer,1980)。後者在此系列中影響甚微, 因為 Al 之含量甚少。

由圖 4-1.3 得知, 此範圍裏四個振動模峰值變化隨著 Mg 含量之增加除 $\sim 942\text{cm}^{-1}$ 呈現負相關之趨勢, 其餘則呈正相關, 當 $\text{Si}_{\text{nb}}\text{-O}$ 鍵相對 O-Si-O 鍵角角度變化呈負相關, M4 佔位陽離子的型式對 β 角有很重要的影響, 如鏈錯動 (chain displacement) 增加, M(4)-O(5) 的鍵長亦會增加 (Hawthorne,1981), 而根據 Goldman and Rossman (1977) 報導, Fe^{2+} 離子在陽起石裡佔位 M4 比例增加會造成 $\text{Fe}^{2+}\text{-O}(5)$ 鍵長增加, 導致 M4 八面體扭曲變形由於其對 Si-O 四面體鏈狀結構造成推擠, 使 O-Si-O 鍵角變小, Si-O_{nb} 鍵長增加, 振動模便往低波數方向移動。而 $\sim 942\text{cm}^{-1}$ 隨 Fe 含量增加, 頻率往高波數方向移動與 O-Si-O 鍵角變大, Si-O_{nb} 鍵長受壓縮變短之一端有關。

迴歸線斜率趨勢近似水平線, 但各點分部相差的範圍較大, 各點排列並不完全成一線性分佈, 這表示雙鏈狀構造在結構上較不如單鏈狀構造輝石類礦物來的嚴謹, 也就是說閃石類礦物在佔位陽離子方面較為多元化, 表示在結構上對於佔位陽離子選擇性較其他如輝石類礦物嚴謹以致閃石類礦物眾多, 另一原因由複雜的佔位陽離子可知其結構較為鬆散在結構空間上伸縮範圍較大的緣故, 所以在成份範圍甚窄 (89~100 Mg mole%) 的情況下, 峰值隨 Fe 含量的增加, 變化較不如單鏈狀之輝石類

礦物來的顯著。

d、 $3450\text{cm}^{-1}\sim 3750\text{cm}^{-1}$ 之間 (圖 4-2)

此範圍之拉曼振動模為氫氧鍵的拉伸振動。在本研究中發現，鎂與鎂加上二價鐵之比例高於 95.8 的標本皆呈現單一振動模；鎂與鎂加上二價鐵之比例在 92.2~93.8 之間時，為二個振動模。而低於 92.3 鎂與鎂加上二價鐵之比例時為三個振動模，而沈 (1997) 文中亦發現此現象。但因其成份範圍在 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 為 92.2~97.8 之間時，無分析到標本，所以只能估計此變化範圍在 93~97Mg (mole %) 之間。而本研究在此範圍之標本點較密，恰可補其缺乏之成份範圍。

根據 Burns and Strens (1966) 利用紅外光譜研究高頻部分之氫氧鍵振動模，也發現隨著 Fe 含量之增加，振動模數目會有變化。主要因角閃石類礦物中 OH^- 佔結晶位址 O(3)，與其關係最密的結晶位置即為二個 M1 和一個 M3。另一方面，在此固溶系列中 Mg 與 Fe 會先佔 M1 和 M3 (Bancroft et al, 1967 ; Wilkins, 1970)，尤其以 Fe 離子更是 (Burns and Greaves, 1971) 會先佔據 M1 和 M3。再加上 Fe 離子陰電性較 Mg 離子高，當 Fe 離子含量逐漸的增加，產生的拉力除了使 OH 鍵鍵長增長外。也使得 OH 鍵產生不對稱拉力，單一振動模便分裂 (splitting) 成三個振動模。

另一方面，將 Fe、Mg 離子排列在 M1、M1、M3、三個位址上的組態，依序以 A (Mg Mg Mg)、B (Fe^{2+} Mg Mg)、C (Fe^{2+} Fe^{2+} Mg)、D (Fe^{2+} Fe^{2+} Fe^{2+}) 四種來表示。本研究拉曼光譜實驗結果與之相符 (圖 4-2)，只有組態 D (Fe Fe Fe) 並未出現。是由於實驗標本 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 之比例只到 89.9 之緣故。

由上述可知，隨著 Fe 含量增加時，佔據 M1、M2 陽離子陰電性愈大，對 OH 鍵會產生拉長作用，使鍵長增長，所以頻率便往低波數方向移動。

表 4-3 透閃石系列標本之低頻拉曼峰值（單位: cm^{-1} ）

	#2-1	#2-2	#2-3	#2-4	#2-5	#2-6	#2-7
Mg#	89.9	90	91.7	93.8	95	95.8	100
Lattice mode	222	222	219.5	221.16	221.16	222	223.66
Fe ²⁺ -O Stretch	231.15	230.32	227.82	230.2	228.66	231.99	231.99
	249.44	247.78	245.69	250.27	248.61	250.27	
	262.71		264.37			265.2	
		286	286.71	288.37	287.54		
	303.22	300.58	298.27			301.58	
Ca-O Stretch			329.58	332			
			341.08	342.72	341.08		
	347.6	350.1	347.64		349.28	350.92	
	370.58	368.12	365.67	368.12	367.3	368.94	
Mg-O Stretch	393.45	391.82	390.18	392.63	391.82	393.45	394.26
	415.44	413.81	412.18	414.63	413.81	415.44	417.88
	434.13	434.94	433.31	434.13	433.31	434.95	
Si-O-Si Bend (bridge O)			511.65		513.26	516.7	
	528.51	527.71	525.3	522.9	526.91	529.31	
		653.42	651.05	653.42	651.84	653.42	
	673.13	673.13	669.98	672.34	672.34	673.92	674.7
		738	738.2	739.4	738.98	741.35	
O-Si-O Stretch (non-bridge O)	749.12	747.56	747.56	749	747.56	749.9	
	929.38	929.38	927.86	929.38	929.38	930.9	930.14
	946.87	946.11	943.83	945.3	945.35	946.87	
	1027.2	1028	1025.7	1027.3	1028.7	1029.5	1028.7
	1056.8	1057.4	1055.2	1056.8	1058.9	1058.9	1059.7



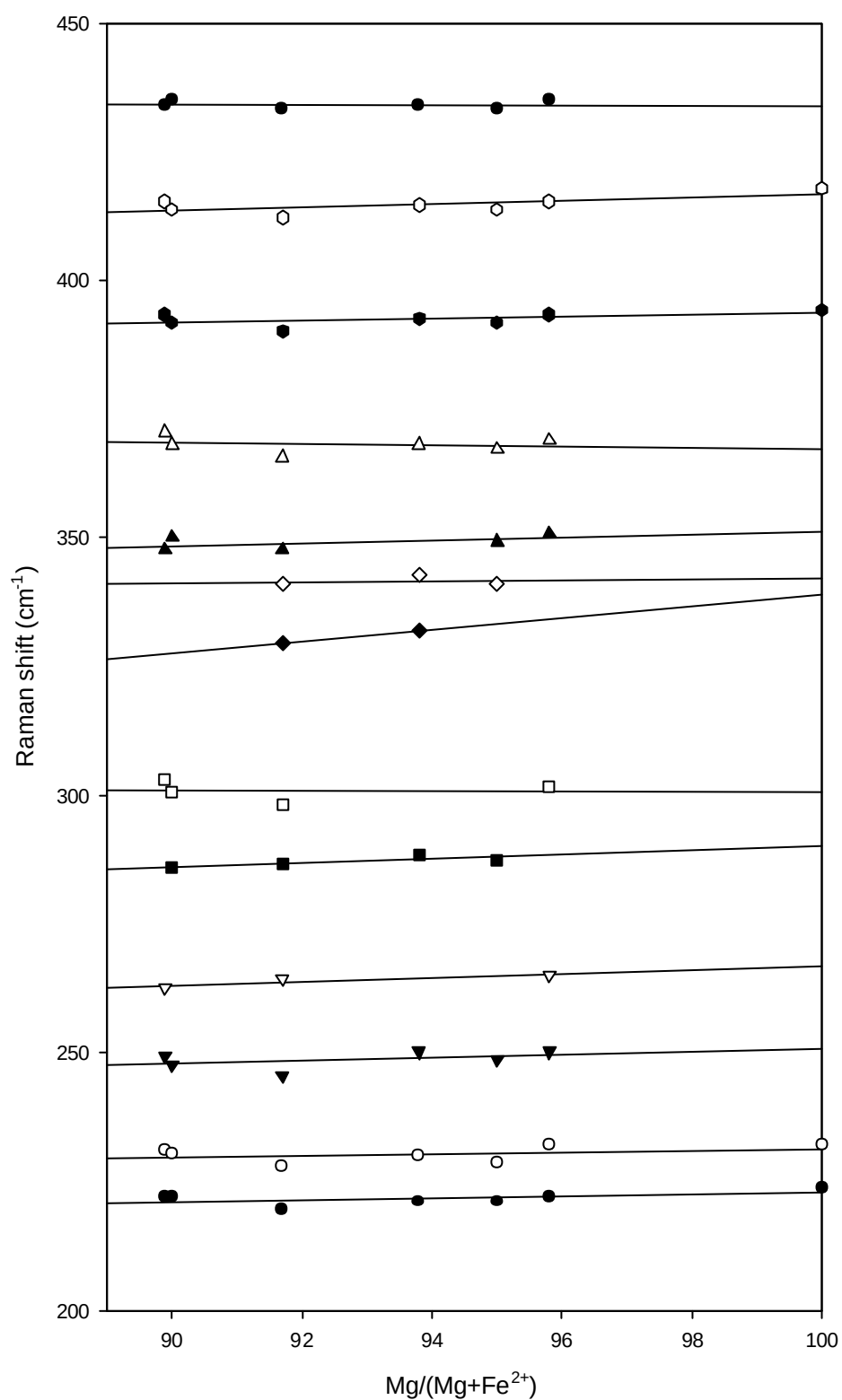


圖 4-1.1 透閃石系列之拉曼低頻振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢。 $(200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 500\text{cm}^{-1})$

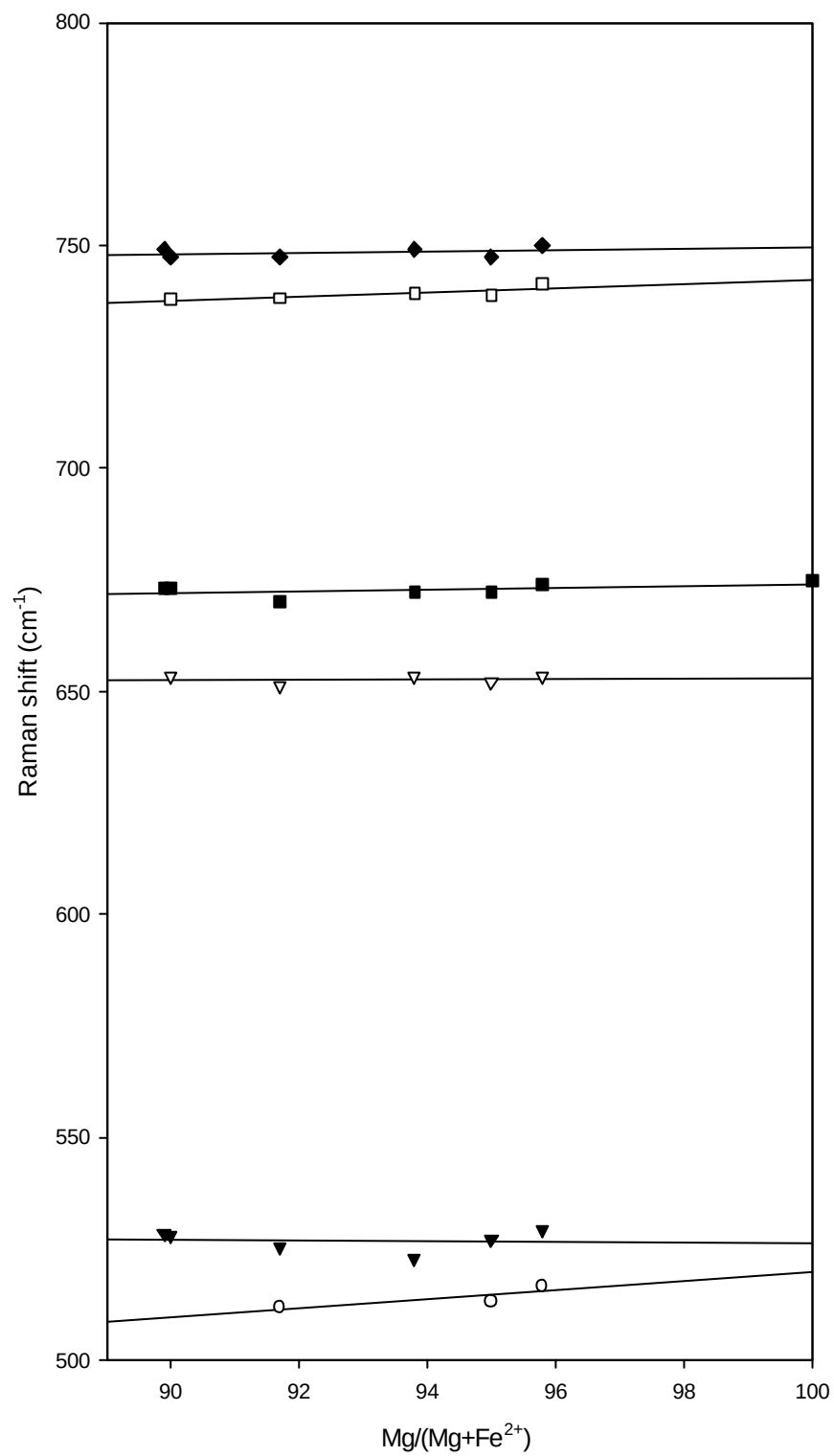


圖 4-1.2 透閃石系列之拉曼低頻振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢。 $(500\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 800\text{cm}^{-1})$

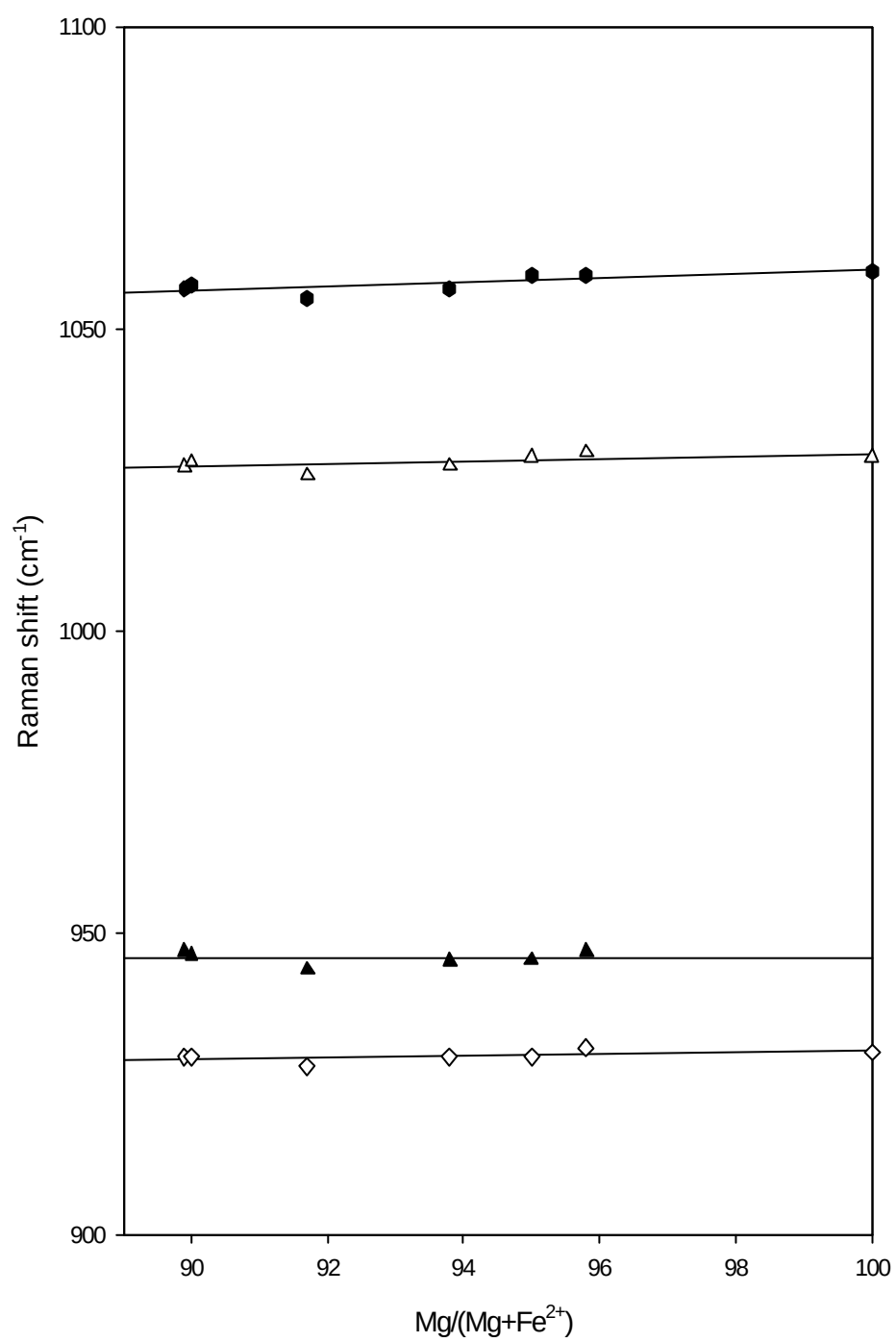


圖 4-1.3 透閃石系列之拉曼低頻振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢。 $(800\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1})$

表 4-4 透閃石系列標本之高頻拉曼峰值 (單位:cm⁻¹)

	#2-1	#2-2	#2-3	#2-4	#2-5	#2-6	#2-7
mg#	89.9	90	91.7	93.8	95	95.8	100
O-H stretch	3644.9	3644.9	3643.3				
	3660.8	3660.8	3658.7	3660.9	3660.8	3661	
	3674.6	3674.6	3672.5	3673.5	3674.7	3675	3674.6

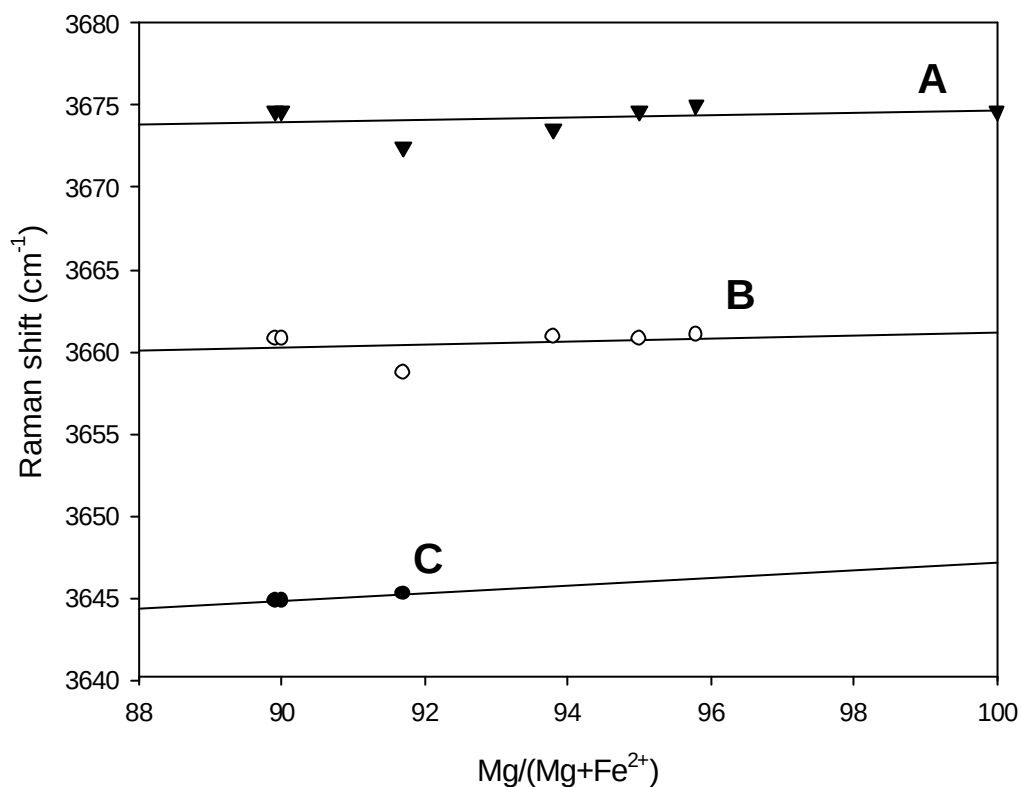


圖 4-2 透閃石系列之拉曼高頻 ($3450\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 3750\text{cm}^{-1}$) 振動模頻率隨鎂含量之變化趨勢。A、B、C 振動模的鎂鐵離子佔位於(M1 M1 M3)組態，分別為(Mg Mg Mg)、(Mg Mg Fe)、(Mg Fe Fe)。

4-3 普通角閃石系列

標本編號為#3-1 至#3-14，此系列的成份變化較廣。 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 之範圍落於 19.8~72.2 之間。而鈣含量約為 9~12 Wt% 之間，且部分的矽被四配位的鋁所取代。因此，其拉曼光譜相較其他角閃石系列有明顯的與眾不同（圖 3-3.3）。

此系列中，拉曼光譜的訊號，解析度比其他系列之角閃石差。且強度也較弱。可能是晶體本身所造成的因素，例如：結晶度不佳，或者礦物含有其他雜質等，皆會影響所偵測到的光譜訊號。而上列因素在 XRD 中發現標本峰值有明顯寬化，背景值（background）增高的現象，表示礦物結晶度較差。另外，在（EPMA）附設之（SEM）影像中，此系列之礦物晶體有成分不均勻的現象，也指出礦物顆粒中含有部分雜質。

低頻部分（ $200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 500\text{cm}^{-1}$ ）（圖 3-3.3，表 4-5），拉曼光譜以 660cm^{-1} 附近之峰值較為明顯，為 Si-O_b-Si bend 之振動模；而拉曼峰形之半高寬與其他系列相比有寬化的現象（最寬者之半高寬可達 50cm^{-1} ）；且此峰值隨鎂含量增加而往低頻方向移動（圖 4-3），與其他系列是相反的趨勢。雖是如此，若考慮四配位的 Al 取代 Si 的比例（圖 4-4）時，則此峰值趨勢又會往高頻方向移動。因此在普通角閃石系列中無法只考慮一種成份的變化。而這時就必須清楚知道各個振動模的意義。例如：上述 660cm^{-1} 附近之峰值，為 Si-O_b-Si bend 之振動模，屬內模（internal modes），這時四配位 Al 取代 Si 比例的影響就較為重要。換句話說，因為四配位的 Al（ $Al^4=0.39$ ）比四配位的 Si（ $Si^4=0.26$ ）原子半徑較大，當 Si 被 Al 取代愈多時，振動頻率會愈慢。與圖 4-4 之趨勢相同。而其他低頻部分之特徵峰，分別在 $200\text{cm}^{-1}\sim 225\text{cm}^{-1}$ 之間和 $540\text{cm}^{-1}\sim 560\text{cm}^{-1}$ 之間也出現明顯的拉曼振動模。另外，高頻部分的峰值則不明顯，僅呈現

寬化的峰形（圖 3-4.3），因此，高頻部分所能提供的訊息顯得有限。

雖然在這系列的前人研究甚少，但因同屬於角閃石 $C2/m$ 之結構，空間位址上只是出現較多種不同離子的取代。而眾多離子互相取代中，若離子物理性質（例如：質量、陰電性等）相似，影響拉曼振動模的情形會較不明顯。相對而言，若離子物理性質差異大，峰值的變化就更複雜，以致於難以判斷峰值是受何種離子取代所影響。

低頻部分，在 $200\text{cm}^{-1}\sim 225\text{cm}^{-1}$ 之間出現的明顯振動模，屬於分子間的振動（lattice mode）。此一振動模，不隨鎂鐵含量變化產生有系統變化之趨勢。而在 $540\text{cm}^{-1}\sim 560\text{cm}^{-1}$ 之間也出現明顯特徵峰，且此拉曼峰有寬化的現象（半高寬最寬者在 70cm^{-1} 以上）。此峰值隨鎂含量增加有往高頻方向移動的趨勢。但若考慮鋁取代矽的比例愈多，峰值應會往低頻方向移動，但從實驗數據上顯示為相反的結果。因此，本研究認為，在普通角閃石系列中，探討拉曼峰值的變化是較困難的，因為一種以上的離子取代，是會互相影響其振動模。此時就必須清楚的知道各個不同標本之角閃石離子佔位的情形，方可釐清各因子對振動模的影響。

表 4-5 普通角閃石系列標本之低頻 ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 拉曼峰值 (單位: cm^{-1})

編號	#3-1	#3-2	#3-3	#3-4	#3-5	#3-6	#3-7	#3-8	#3-9	#3-10	#3-11	#3-12	#3-13	#3-14
Mg/Mg+Fe ²⁺	19.8	38.5	42.1	46.9	57.4	60.1	61.1	64.4	67	68.4	69.7	71.3	71.6	72.2
SiO ₂	39.54	40.42	40.7	44.44	45.56	40.3	45.15	42.21	42.2	47.7	40.06	43.95	48.69	46.3
CaO	10.77	11.37	10.5	10.66	9.26	11.9	11.48	9.58	9.35	12.09	12.16	10.43	11.85	10.81
Lattice mode		200.31	221.16	206.5	222	232.82	200.31	222	231.15	224.96	227.82	223.66	222.83	225.33
Fe ²⁺ -O stretch		271	294.97	271.82			265.2		286.71		294.97			
Ca-O stretch								323.82	334.51		320.53	313.94		319.7
		364.03	361.57	360.75	369.76	360.75	364.05	375.48		367.77		368.12	366.48	371.39
Mg-O stretch						380.39			399.15	385.75	378.75	384.47	386.92	389.37
		420.32		415.44		430.88				415.09	431.69			418.69
Si-O-Si bend (bridge O)	539.73	549.34	531.72	544.54	545.34	535.73		535.73		535.4	537.33	536.53	532.92	536.53
							554.13	564.52		568.19				
	671.55	669.98	664.46	673.92	669.2	666.04	670.7	666.83	666.83	669.68	666.83	666.04	670.77	668.4
						684.14					688.07			
		718.66	731.95	718.66		734.39	719.44	732.73			724.43	736.64		
O-Si-O stretch (non-bridge O)							774.02							746
	766.25	772.47		772.47		785.67		794.98			805.82	794.2		796.5
	911.85	920.24		895.05		919.48		929.38		942.06	922.53	917.95		930.9
	1013.6	995.39	1013.6					1011.3						
		1020.4		1021.7	1031	1022.3		1025.7	1006.8	1031.8	1022.3	1025.7	1029.5	1022.3
		1093.5											1054.4	

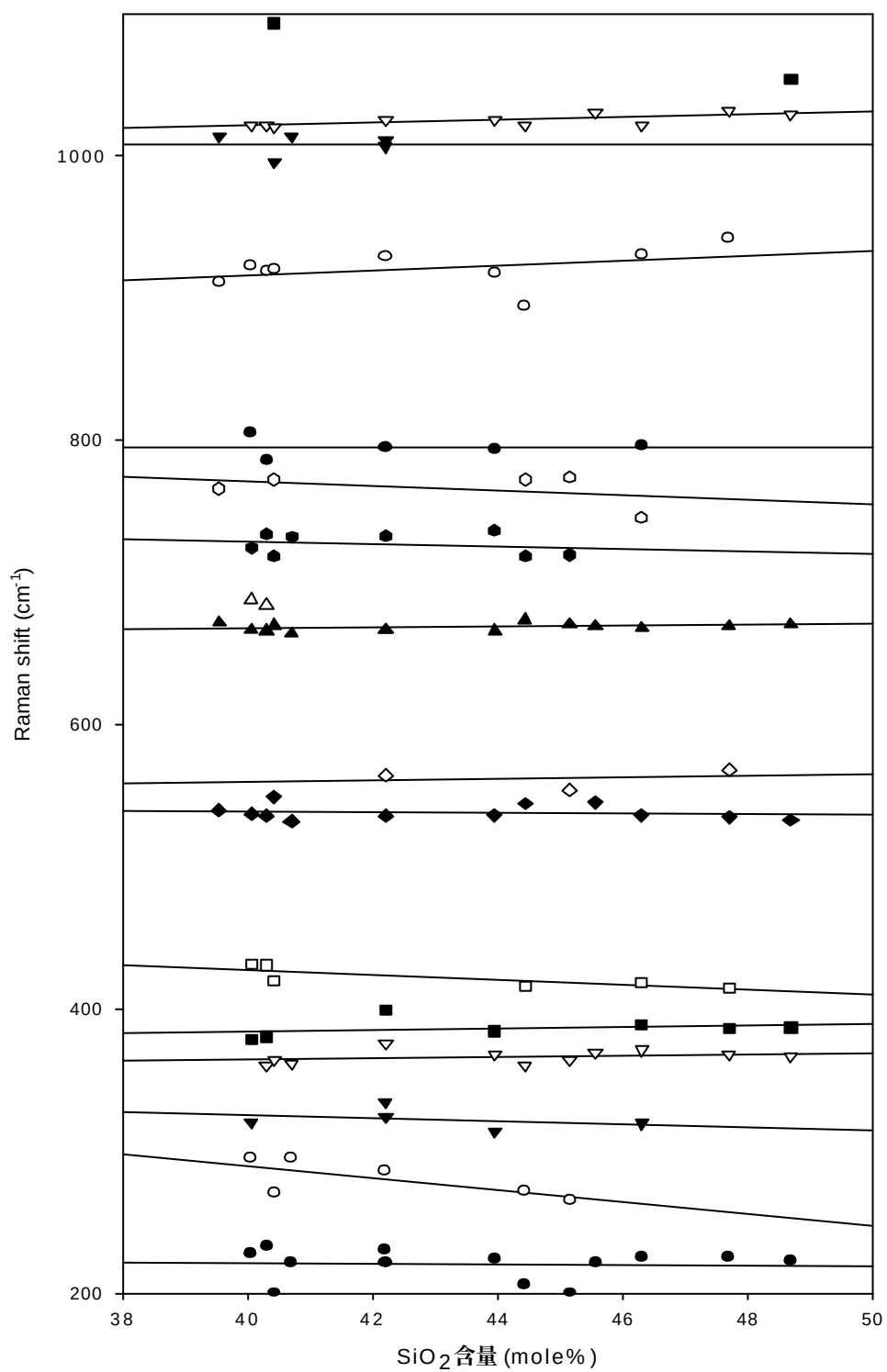


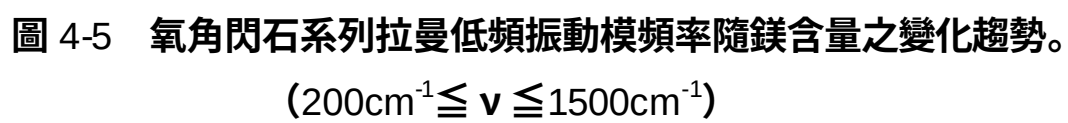
圖 4-4 普通角閃石系列拉曼低頻振動模頻率隨矽含量變化之趨勢。

$$(200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1})$$

4-4 氧角閃石系列

標本編號為#4-1 至#4-3。此系列之前人研究資料甚少。由於產於火山地區，氧角閃石含較高的三價鐵及缺少部分的結晶水。至於結構上的研究，到目前為止無完整的資料。因此，在拉曼振動模之判讀上，顯得困難。

從拉曼光譜資料上發現，在低頻部分（圖 3-3.4，圖 4-5），拉曼光譜最明顯的峰值出現在 580cm^{-1} 附近。而隨著鎂含量增加，此峰值有明顯變寬的情形；且只有此峰值隨鎂含量增加而往高頻移動的趨勢。其餘振動模則隨鎂含量增加而往低頻移動。因此本研究認為，影響振動模的變化，可能還必須考慮三價鐵離子的因素。而 Wang (1988) 針對三價鐵於角閃石中佔位的情形，做相關性的探討，發現高頻 (OH) 之振動模，在 (M1 M1 M3) -OH 組態下，三價鐵離子可能為 (Mg Mg Fe^{3+}) -OH、(Mg Fe^{2+} Fe^{3+}) -OH 的鍵結組態，故拉曼光譜在高頻部分就會出現 3650cm^{-1} 及 3635cm^{-1} 兩個拉曼振動模。但因此系列高頻部分無偵測到訊號，因此無法用於研究三價鐵佔位於角閃石中的狀況。



4-5 鎂紅閃石

本研究在此系列中只分析到一個標本（圖 3-3.5），標本編號為#5-1。根據 Wang（1988）對於相同系列的藍透閃石（Winchite）所做的研究，發現藍透閃石在高頻的部分與透閃石相似，可觀察到三個振動模，屬於（Mg Mg Mg）、（Mg Mg Fe²⁺）及（Mg Fe²⁺ Fe²⁺）之組態。但本研究之鎂紅閃石（Magnesio-Katophorite）在高頻部分無法分辨出來（圖 3-4.4）。應為標本本身的成分不均勻所致，以至於影響高頻 OH 振動模的解析；因在分析時發現，此標本含有磁性，且進行 X 光繞射實驗時（XRD），光譜訊號差，無法求得 d 值。另外，電子顯微分析（EDS）所測得的化學成分是綜合的結果，只能證實屬於何種角閃石，卻無法顯示出是何種雜質。因此，便無法從高頻部分得到更多的訊息。

4-6 藍閃石、鎂鋁鈉閃石

此系列分析到兩個標本，編號分別為#6-1 及#6-2。二者在低頻部分顯示出有相似的拉曼峰（圖 3-3.6），且拉曼光譜訊號清楚，在低頻部分（ $200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$ ），可觀察到 20 個拉曼振動模。

高頻部分，根據 Wang（1988）對於藍閃石所做的研究，其發現藍閃石在高頻的部分，出現了四個振動模，屬於（Mg Mg Mg）、（Mg Mg Fe^{2+} ）、（Mg Mg Fe^{3+} ）及（Mg Fe^{2+} Fe^{2+} ）之組態。但在本研究上卻觀察到了六個 OH 振動模。對照 Wang（1988）之理論計算，在本研究上更測出了離子於（M1 M1 M3）佔位之（ Fe^{2+} Fe^{2+} Fe^{2+} ）及（ Fe^{2+} Fe^{2+} Al^{3+} ）的兩種組態（表 4-6）。

表 4-6 藍閃石於 (M1 M1 M3) 佔位之離子組態

		(Fe ²⁺ Fe ²⁺ Fe ²⁺)	(Fe ²⁺ Fe ²⁺ Al ³⁺)	(Mg Fe ²⁺ Fe ²⁺)	(Mg Mg Fe ³⁺)	(Mg Mg Fe ²⁺)	(Mg Mg Mg)
Wang (1988)	Glaucophane	---	----	3635.6	3646	3650	3663.3
#6-1	Glaucophane	3618.8	3623.6	3633.7	3644.9	3650.2	3663
#6-2	Eckermannite	3617.7	3623.6	3634.2	3644.5	3650.2	3662.4

4-7 綜合討論

綜合前面所提，可發現角閃石類礦物之拉曼光譜，即使在不同固溶系列之下，雖有多種的離子取代其間仍有相關的趨勢。若再更進一步思考，這些系列，皆屬於相同的結構，因此在拉曼光譜上一定有相似趨勢存在。故下列將綜合探討不同固溶系列的角閃石類礦物之拉曼光譜特徵。

從化學成份上以 CaO-MgO-FeO 為三個主要端成分（圖 4-6），分別討論角閃石礦物中，(i) 當 Ca 含量一致，拉曼光譜隨 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 含量的變化所產生的趨勢。(ii) 當 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 含量一致，拉曼光譜隨 Ca 含量的變化所產生的趨勢。另外，也必須討論 (iii) 四配位的鋁取代矽所產生的影響（圖 4-9）。

4-7.1 鎂鐵變化造成拉曼光譜的影響

將圖 4-6 中相近 Ca 含量的標本以灰色圓框圈出，以探討隨 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 成分比例變化（表 4-7），所造成拉曼光譜的影響。此範圍主要為透閃石系列，普通角閃石系列及氧角閃石系列（圖 4-7，圖 4-7.1）。

圖 4-7 中可觀察到拉曼振動模在 $200\text{cm}^{-1}\sim 500\text{cm}^{-1}$ 之間，有較密的分佈，表示被偵測到之拉曼峰個數較多；而前人研究中指出，角閃石之拉曼光譜以低頻 $200\text{cm}^{-1}\sim 500\text{cm}^{-1}$ 之間的振動模較可顯示出 Fe、Mg 等陽離子與氧（O）離子的振動（M-O）。因此，圖 4-7.1 為頻率在 $200\text{cm}^{-1}\sim 450\text{cm}^{-1}$ 之間隨鎂含量變化的趨勢。大致上會隨著鎂含量增加而往高頻方向移動的趨勢。只有 $\sim 350\text{cm}^{-1}$ 及 $\sim 430\text{cm}^{-1}$ 附近之振動模無顯示出此性質。

在透閃石系列中以 $\sim 302\text{cm}^{-1}$ 及 $\sim 367\text{cm}^{-1}$ 之振動模，會隨鎂含量增加往低頻移動，原因為 Fe 含量增加時導致 M3 體積增加，使比鄰的 M2 八面體受到擠壓，鍵長變短之故。但在加入普通角閃石及氧角閃石的分析結果來討論時。反而皆隨鎂含量增加往高頻移動的趨勢。以拉曼光譜分析而言，其所偵測到的為原子或分子間的振動，只要原子或分子相互鍵結有變化即可反應於光譜上。因此，在探討其振動行為時，不但會受本身鍵結的影響，也會受其他鄰近的原子或分子所影響；而以角閃石類礦物來說，其結構中任何陽離子皆有可能充填其中；在低頻 $200\text{cm}^{-1}\sim 500\text{cm}^{-1}$ 之間雖以陽離子與氧（O）離子的振動（M-O）為主，大趨勢是符合常理，會隨鎂含量增加而往高頻方向移動。至於少部分無顯示出此性質的振動模可能還受其他原子或分子振動所影響。另外，也可能是資料點的不足，導致判斷上的錯誤。例如： $\sim 350\text{cm}^{-1}$ 及 $\sim 420\text{cm}^{-1}$ 之振動模，在資料點不足的情況下，以至於無法採用其變化趨勢。

4-7.2 鈣含量造成拉曼光譜的影響

將圖 4-6 中相近 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 成分比例的標本圈出，並探討隨 Ca 含量變化，所造成拉曼光譜的影響。主要礦物為編號#5-1、#6-1、#3-5、#6-2 及#3-6、#3-7 等 6 個標本，其 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 比例在 50.7~61.1 範圍內，以鈣含量增高趨勢列於表 4-8。

在角閃石結構中，鈣原子主要佔於 M4 位址（詳？ 1-2 節）。當含量不足 2 時，鈉原子即會填充進 M4 位址。而鈉原子的重量小於（22.99）鈣原子重量（40.078），因此，理論上當鈉原子取代愈多時，振動頻率會愈快。從前人研究中指出，在低頻 $300\text{cm}^{-1}\sim 400\text{cm}^{-1}$ 之間的振動模較可顯示出鈣與氧（Ca-O）的離子振動。故將針對此部分作討論（圖 4-8）。

以 360cm^{-1} 附近之峰值資料點最密，但在圖中顯示出並非有上述的趨勢，可能為資料點的不足，或者是在上述的假設中不單純只是考慮原子重量，可能還有一些性質會影響振動模的變化；例如：原子半徑的大小鈉大於鈣（八配位的鈉為 1.18，鈣為 1.12），而造成 M4 位址之離子間距變短，導致振動頻率加快。因此，還必須進一步釐清這些因素中何者為最重要的；而本研究中尚無法解釋。

4-7.3 四配位的鋁取代矽之影響

將標本以 SiO_2 含量與 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 含量之比例投於圖 4-9，並探討矽含量變化，所造成拉曼光譜的影響。從前人研究中指出，在低頻 $500\text{cm}^{-1} \sim 800\text{cm}^{-1}$ 之間的振動模，屬於 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 對稱拉伸振動模。因此，當矽被四配位的鋁取代時在此範圍中即會明顯的反應出來，尤其以之 670cm^{-1} 附近的峰值最為明顯。

圖 4-9 顯示透閃石系列之標本，具有最高的 SiO_2 含量，表示幾乎沒有被鋁取代， $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 最明顯之振動模出現於 673cm^{-1} 左右（表 4-9）。而鈉質角閃石系列（標本#6-1、#6-2）中，矽含量僅次於透閃石系列，雖然鋁含量偏高，但卻是屬於六配位的鋁，非充填於 T 位址。因此，較不影響 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 之振動模，故此系列 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 最明顯之振動模出現在 668cm^{-1} 附近。褐閃石系列， $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 最明顯之振動模出現在 662cm^{-1} 附近。至於普通角閃石系列、氧角閃石系列及鎂紅閃石等礦物則範圍較廣，為 $660 \sim 673\text{cm}^{-1}$ 之間。以普通角閃石系列來做比較，隨著矽含量增加（表示鋁取代的愈少），拉曼峰值也是有往高頻方向移動的趨勢（圖 4-4），且峰形愈顯得尖銳（圖 4-10）；

因此，本研究發現當矽被四配位的鋁取代愈多時， $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 最明顯之

振動模，頻率有往低頻方向移動的趨勢。且以普通角閃石系列中更可觀察到峰形的變化由尖銳轉變為寬化的現象。相對而言，此振動模受鎂鐵含量的影響反而不如四配位鋁取代矽來的明顯。

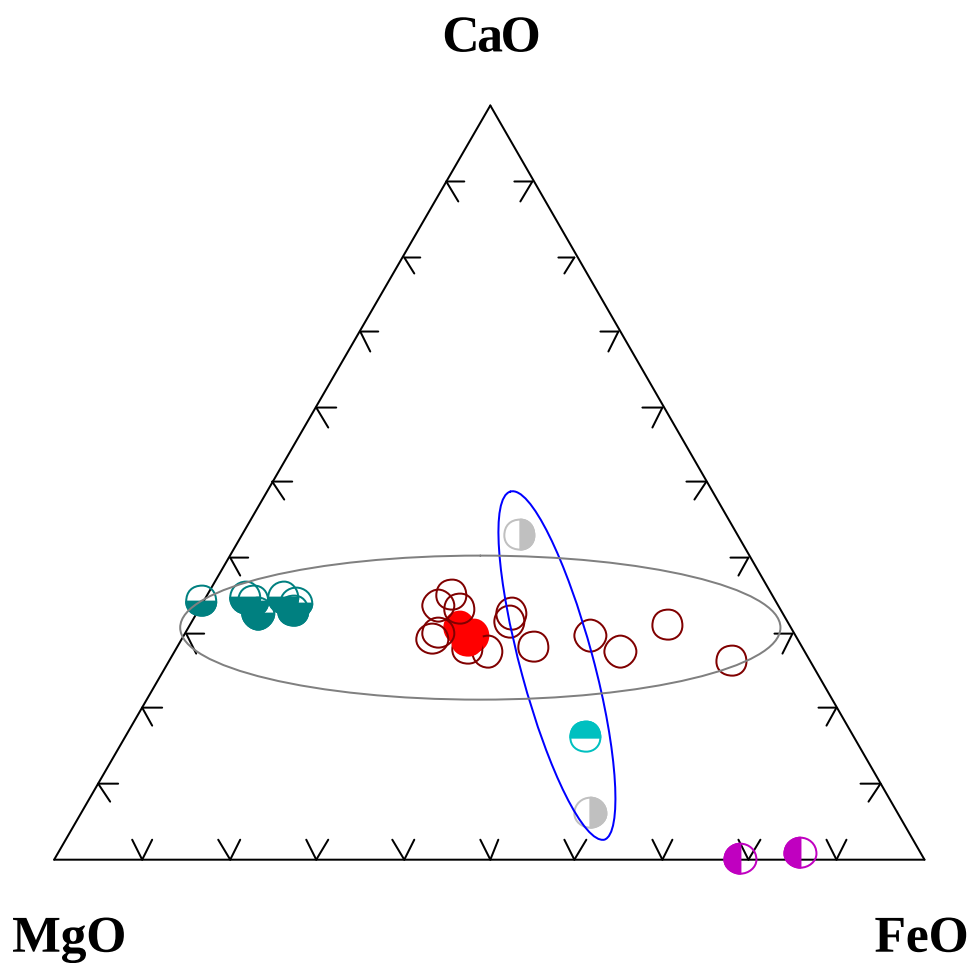


圖 4-6 標本成分以 CaO-MgO-FeO 之三角圖表示。將固定某成分的標本圈出。灰色圈為相近之 Ca 含量，可用來討論 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 成分的變化；藍色圈為相近之 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 成分比例，以用來討論 Ca 含量的變化。

表 4-7 普通角閃石，氧角閃石及透閃石系列之拉曼峰值，隨鎂含量增高趨勢排列。

編號	#3-1	#3-2	#3-3	#3-4	#3-5	#3-6	#3-7	#3-8	#3-9	#4-1	#4-2	#4-3	#3-10	#3-11	#3-12	#3-13	#3-14	#2-1	#2-2	#2-3	#2-4	#2-5	#2-6	#2-7
Mg#	19.8	38.5	42.1	46.9	57.4	60.1	61.1	64.4	67	66.3	67	68.7	68.4	69.7	71.3	71.6	72.2	89.9	90	91.7	93.8	95	95.8	100
		200.3	221.2	206.5	222		200.3	222					225		223.7	222.8		222	222	219.5	221.2	221.2	222	223.7
									231.2					227.8			225.3	231.2	230.3	227.8	230.2	228.7	232	232
						232.8				247	243.6	242						249.4	247.8	245.7	250.3	248.6	250.3	
																		262.7		264.4			265.2	
		271		271.8			265.2		286.7										286	286.7	288.4	287.5		
										298.3	289.2	289.2		295				303.2	300.6	298.3			301.6	
			295					323.8						320.5	313.9		319.7			329.6	332			
									334.5			326.3								341.1	342.7	341.1		
										356.7	344.4								347.6	350.1	347.6		349.3	350.9
								375.5				372.2	367.8		368.1	366.5	371.4	370.6	368.1	365.7	368.1	367.3	368.9	
		364	361.6	360.8	369.8	360.8	364.1		399.2		382.8		385.8	378.8	384.5	386.9	389.4	393.5	391.8	390.2	392.6	391.8	393.5	394.3
						380.4							415.1				418.7	415.4	413.8	412.2	414.6	413.8	415.4	417.9
		420.3		415.4		430.9				482.7				431.7				434.1	434.9	433.3	434.1	433.3	435	
										513.3										511.7		513.3	516.7	
								535.7				520.5	535.4	537.3	536.5	532.9	536.5	528.5	527.7	525.3	522.9	526.9	529.3	
	539.7	549.3	531.7	544.5	545.3	535.7	554.1	564.5		581.3	585.3	587.6	568.2											
																			653.4	651.1	653.4	651.8	653.4	
								666.8	666.8	671.6	670	664.5	669.7	666.8	666	670.8	668.4	673.1	673.1	670	672.3	672.3	673.9	674.7
	671.6	670	664.5	673.9	669.2	666	670.7							688.1										
						684.1		732.7						724.4	736.6				738	738.2	739.4	739	741.4	
		718.7	732	718.7		734.4	719.4			763.9	761.6						746	749.1	747.6	747.6	749	747.6	749.9	
	766.3	772.5		772.5		785.7	774	795		784.9	784.1	778.7		805.8	794.2		796.5							
	911.9			895.1		919.5		929.4		885.1				922.5	918		930.9	929.4	929.4	927.9	929.4	929.4	930.9	930.1
		920.2												942.1				946.9	946.1	943.8	945.3	945.4	946.9	
								1011																
	1014	995.4	1014					1026	1007	1021		1023	1032	1022	1026	1030	1022	1027	1028	1026	1027	1029	1030	1029
		1020		1022	1031	1022										1054		1057	1057	1055	1057	1059	1059	1060
		1094																						

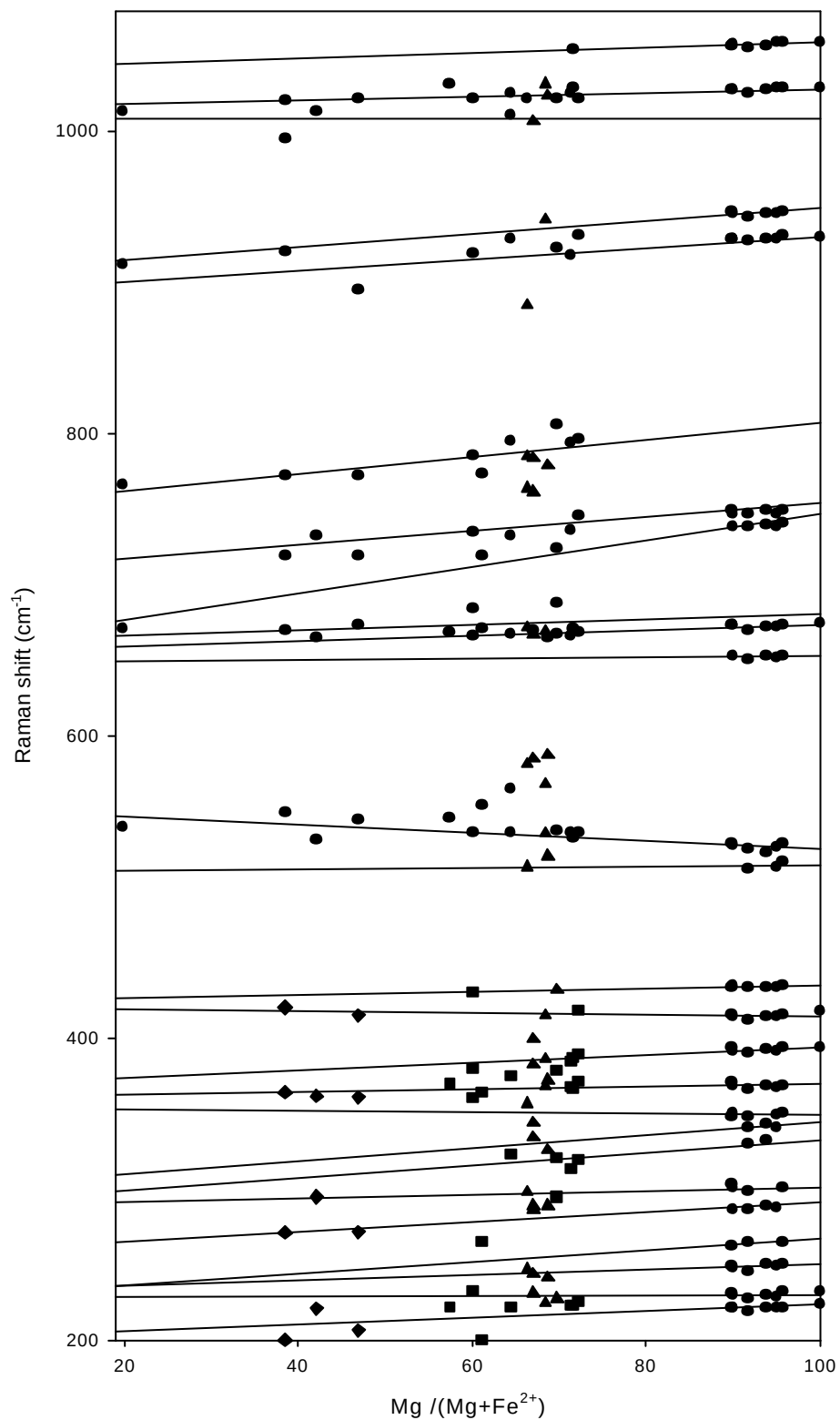


圖 4-7 普通角閃石（方框）與氧角閃石（三角形）及透閃石系列（圓圈）之拉曼低頻振動模 ($200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 1500\text{cm}^{-1}$) 隨鎂含量之變化趨勢

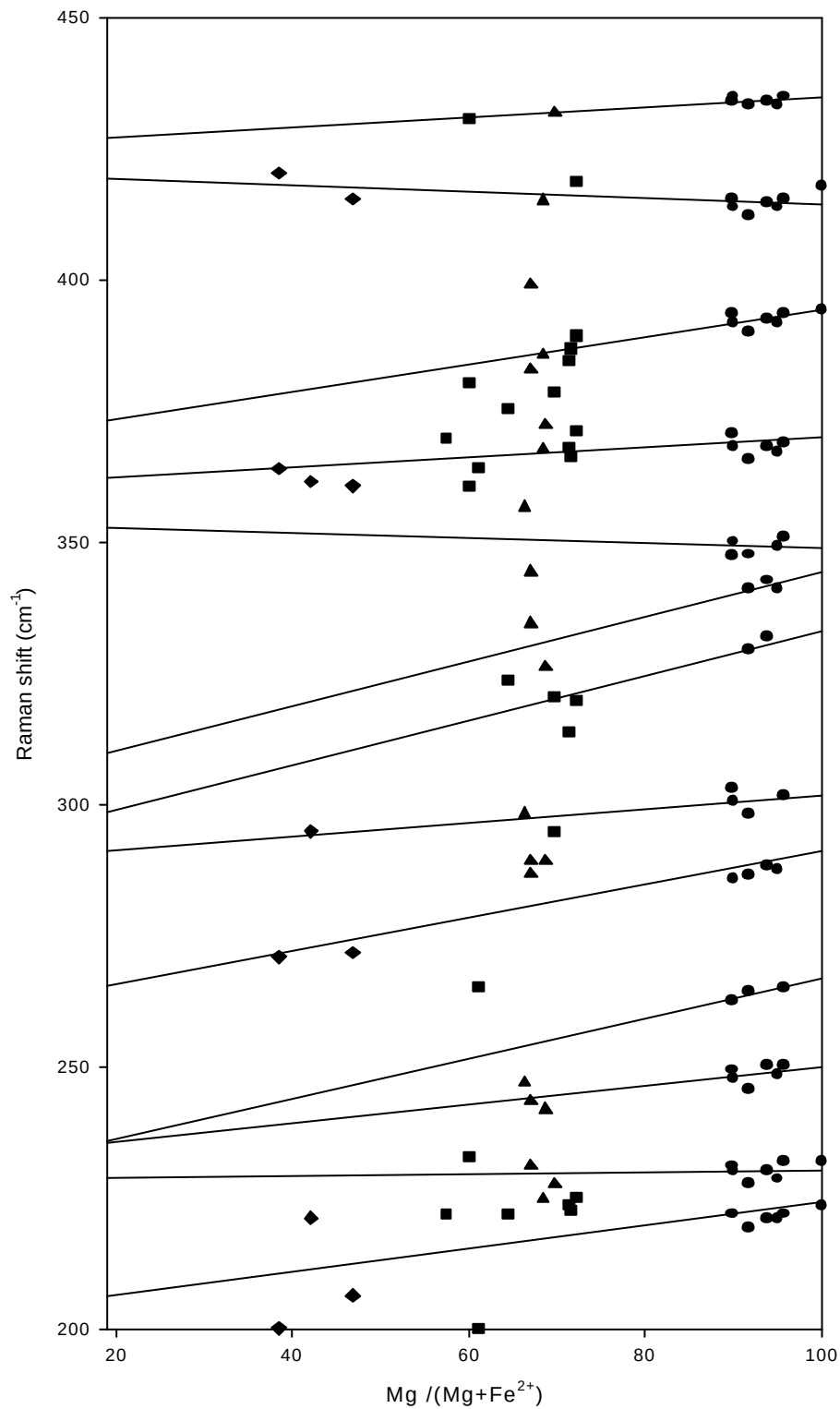


圖 4-7.1 普通角閃石（方框）與氧角閃石（三角形）及透閃石系列（圓圈）之拉曼低頻振動模（ $200\text{cm}^{-1} \leq \nu \leq 450\text{cm}^{-1}$ ）隨鎂含量之變化趨勢。

表 4-8 隨鈣含量變化之拉曼峰值

	#6-1	#5-1	#3-5	#3-6	#3-7	#6-2
CaO	6	16	28	32	31	43
振動模峰值 (單位: cm^{-1})	208.66				200.31	208.66
	226.99	224.49	222	232.82		
	254.42				265.2	255.25
		302.4				304.05
	336.15					335.33
		359.94	369.76	360.75	364.05	
	386.1			380.39		385.29
	404.86					404.86
	445.48	432.5		430.88		445.48
						488.31
	520.49	539.7	545.336	535.73		525.31
	558.13				554.13	554.93
	609.1					608.3
	668.4	673.92	669.2	666.04	670.7	668.4
	681.78			684.14		683.36
	739.76			734.39	719.44	742.1
	775.58				774.02	775.58
	788.77			785.67		787.22
	895			919.48		887.4
	985.5	967.35				985
	1007.53					1005
	1045.37	1058.94	1031	1021.93		1045.37
	1104.02					1103.27

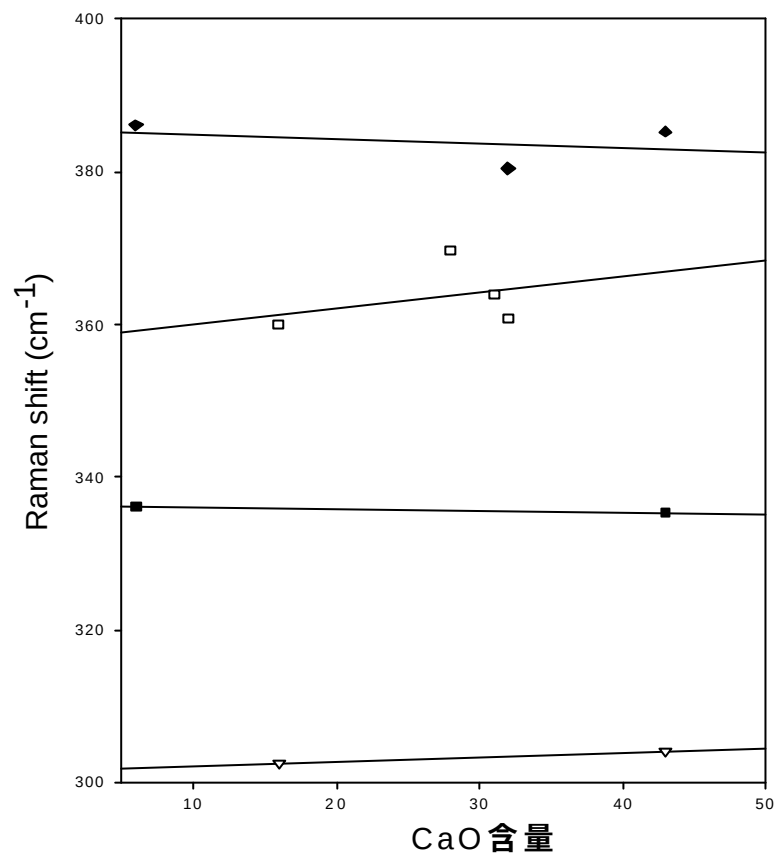


圖 4-8 為頻率在 $200\text{cm}^{-1}\sim 500\text{cm}^{-1}$ 之間隨鈣含量變化的趨勢。

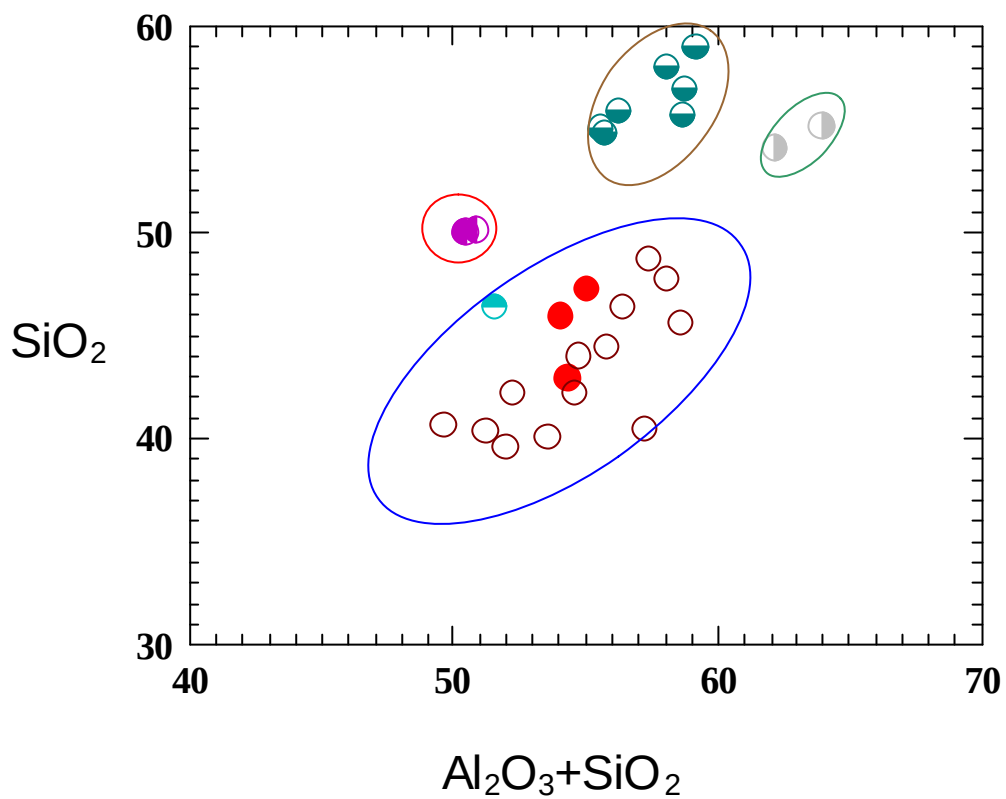


圖 4-9 將標本以 SiO_2 含量與 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 含量之比例投圖，以看出不同固溶系列之角閃石矽含量的變化。
 棕色框裡的標本為透閃石系列，
 綠色框裡的標本為鈉質角閃石系列，
 紅色框裡的標本為褐閃石系列，
 藍色框裡的標本為普通角閃石系列、
 氧角閃石系列及鎂紅閃石。

表 4-9 不同角閃石系列中，最明顯之 Si-O_b-Si 振動模峰值。

	Si-O _b -Si 振動模峰值
透閃石系列	673 cm ⁻¹
鈉質角閃石系列	668 cm ⁻¹
褐閃石系列	662 cm ⁻¹
普通角閃石系列	660~673 cm ⁻¹

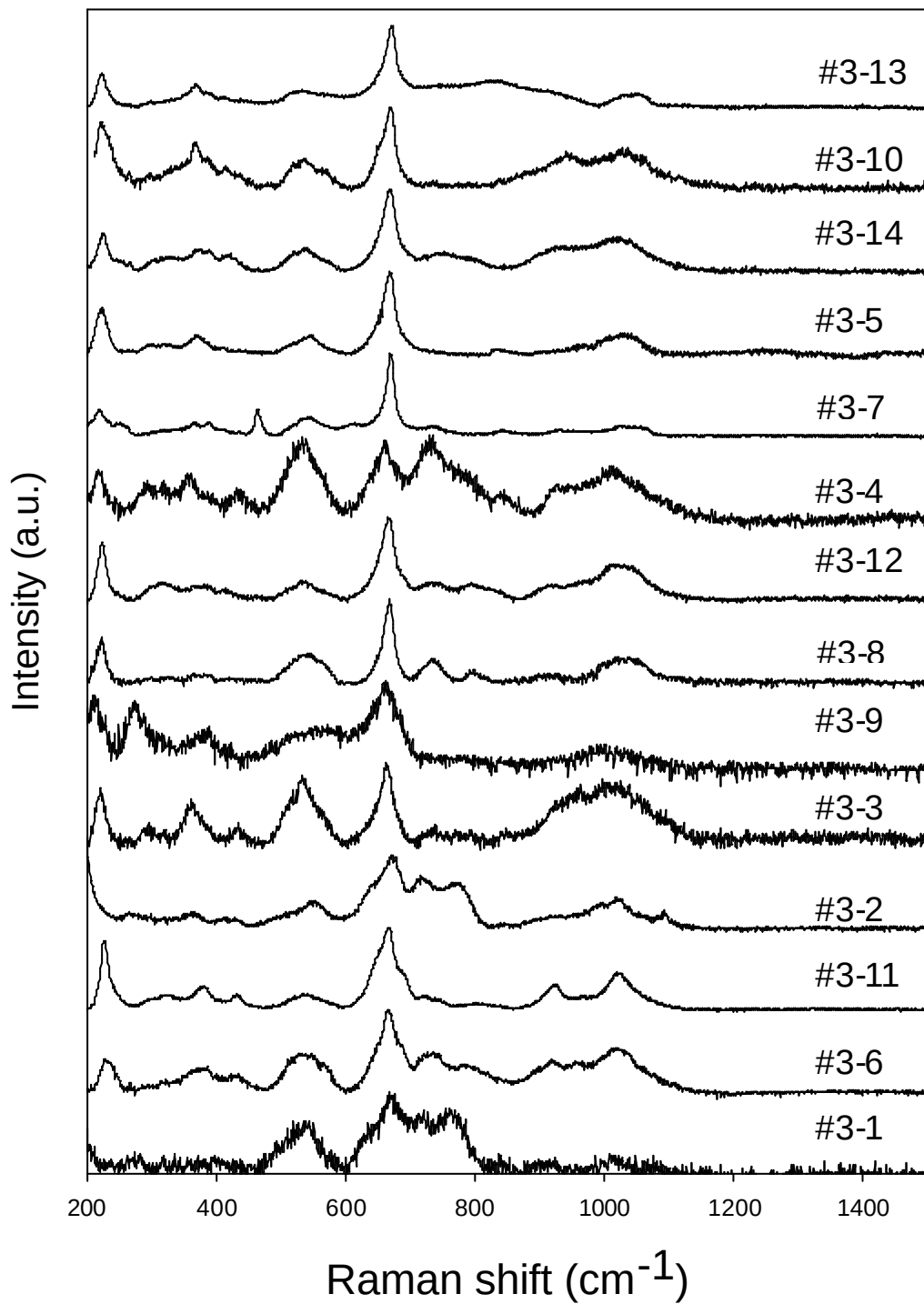


圖 4-10 普通角閃石系列之低頻拉曼光譜，由矽含量由下往上遞增。

可看出 Si-O_b-Si 最明顯之振動模，
隨著矽含量增加，峰形愈顯得尖銳。

第五章 結論

(1.) 角閃石類礦物之拉曼光譜，在單一結構下(單斜晶系 $C2/m$)，隨著不同的化學成分，有著明顯的變化。

A、低頻部分：

- a. 褐閃石系列中， $Si-O_b-Si$ 之拉曼振動模出現在 $662cm^{-1}$ 附近。
- b. 透閃石系列中， $Si-O_b-Si$ 之拉曼振動模出現在 $673cm^{-1}$ 左右。
- c. 普通角閃石系列中， $Si-O_b-Si$ 之拉曼振動模，隨鋁取代矽愈多，而有往低頻移動的趨勢；且峰形有從尖銳轉變為寬化的現象。
- d. 氧角閃石系列中， $Si-O_b-Si$ 之拉曼振動模差異較大。而拉曼峰在 $580cm^{-1}$ 附近，出現較明顯且較寬的峰值（半高寬最寬者可達 $100cm^{-1}$ ）。
- e. 鎂紅閃石礦物中， $Si-O_b-Si$ 之拉曼振動模出現在 $673cm^{-1}$ 左右。
- f. 鈉質角閃石（包括藍閃石及鎂鋁鈉閃石）系列中， $Si-O_b-Si$ 之拉曼振動模出現在 $668cm^{-1}$ 左右。

B、高頻部分：只有三種系列可觀察到 OH 振動模

- a. 褐閃石系列可觀察到四個 OH 拉曼振動模。
- b. 透閃石系列可觀察到一至三個 OH 拉曼振動模。
- c. 藍閃石可觀察到六個 OH 拉曼振動模。對照 Wang (1988) 之理論計算，本研究更測出了離子於 (M1 M1 M3) 佔位之 ($Fe^{2+} Fe^{2+} Fe^{2+}$) 及 ($Fe^{2+} Fe^{2+} Al^{3+}$) 的兩種組態。

- (2.) 角閃石礦物之拉曼光譜，最明顯的特徵為 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 之對稱拉伸振動模，其出現在 $660\text{cm}^{-1}\sim 675\text{cm}^{-1}$ 之間。此振動模隨著不同固溶系列而有不同。且配合高頻 OH 振動模，便可大致將不同系列之角閃石類礦物區分出來（圖 5-1）。另外，也可利用不同固溶系列之角閃石在低頻部分之光譜圖形之差異性，來作為輔助與對照（圖 5-2）。
- (3.) Wang (1988) 認為陽離子在角閃石結構中佔位情形，可從高頻 OH 鍵來探討。與本研究中所分析的褐閃石、透閃石及藍閃石系列，有一致的結果。但因普通角閃石及氧角閃石系列，在高頻部分之振動模訊號不明顯甚至無偵測到振動模。故無法探討 OH 振動模的變化。
- (4.) 利用拉曼光譜對角閃石類礦物進行成份的半定量估計，以透閃石系列較可行。原因為此系列標本數量上較多、分析點較密；且可從高頻 OH 振動模中看出成份上的變化。不過也只能估計鎂鐵含量的變化。在 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 高於 95.8 的標本皆呈現單一振動模，比例在 92.3~95.8 之間時，為二個振動模。而低於 92.3 比例時為三個振動模。
- (5.) 角閃石類礦物因其成份之複雜性，表現於拉曼光譜上也顯得複雜；在研究峰值的變化時，就不只一個控制因素。例如：以 $\text{Si-O}_b\text{-Si}$ 之振動模中，鋁取代矽的影響比鎂鐵含量的比例更加顯著；而低頻 $200\text{cm}^{-1}\sim 500\text{cm}^{-1}$ 之間，又以鎂鐵含量的比例之影響較為顯著。因此要討論角閃石類礦物之振動模的變化時，要考慮的就不僅一種離子取代，其他的離子的取代也會影響到振動模的變化。

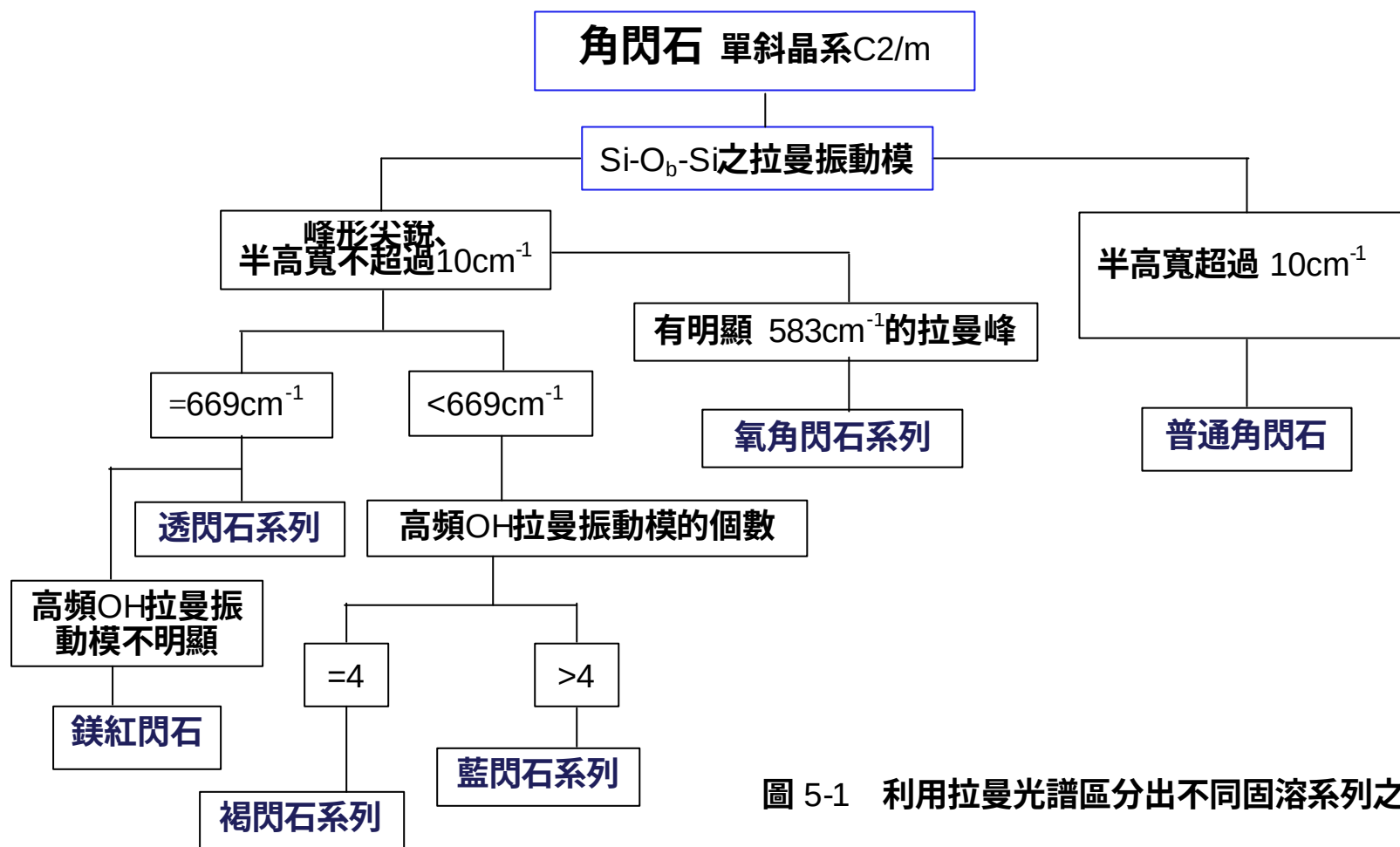


圖 5-1 利用拉曼光譜區分出不同固溶系列之角閃石。

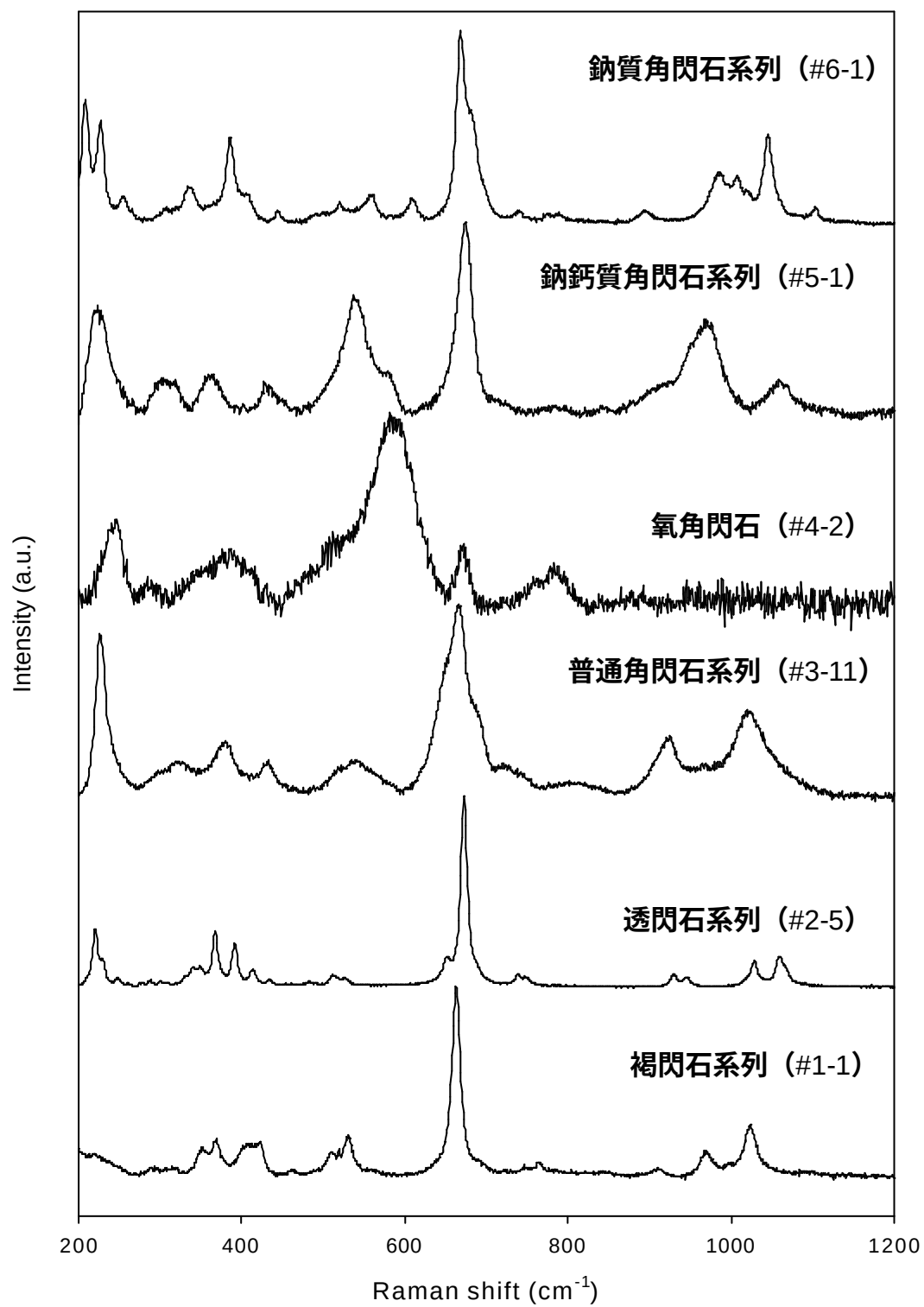


圖 5-2 不同固溶系列之角閃石的低頻部分之光譜圖。

參考文獻

中文部分

余樹楨 (1987) 晶體之結構與性質, 渤海堂文化事業有限公司, 台北, 第 474-481 頁。

沈俊生 (1997) 閃玉之光譜學研究, 國立台灣大學地質學研究所碩士論文, 共 95 頁。

李佩倫 (2000) $\text{BaSO}_4\text{-PbSO}_4$ 固溶系列之高溫高壓相變研究, 國立成功大學地球科學研究所博士論文, 第 14-15 頁。

徐濟安 (1996) 紅外吸收和拉曼光譜原理與測量, 吳照明珠寶學刊, 第 26 期, 第 22-29 頁。

黃怡禎 (2002) 礦物學, 地球科學文教基金會, 台北, 共 686 頁譯。

陳肇夏 (1999) 大地的結晶, 中華民國礦岩協會, 台北, 第 29-35 頁。

許樹恩、吳泰伯 (1996) X 光繞射原理與材料結構分析, 中國材料科學學會, 台北, 第 3-4 頁。

英文部分

- Bancroft, G. M. Burns, R. G. and Maddock, A. G. (1967) Determination of cation distribution in the cummingtonite-grunerite series by Mössbauer spectra, *Amer. Mineral.*, vol. 52, pp. 1009-1026.
- Blaha, J. J. and Rosasco, G.J. (1978) Raman microprobe spectra of individual microcrystals and fibers of talc, tremolite and related silicate minerals, *Anal. Chem.*, vol.50, pp.892-896.
- Born, M. and Huang, K. (1954) "Dynamical Theory of Crystal Lattices", Oxford University Press, Oxford, England.
- Burns, R. G. and Greaves, C. J. (1971) Correlations of infrared and Mössbauer site population measurements of actinolite, *Amer. Mineral.*, vol. 56, pp. 2010-2033.
- Burns, R. G. and Strens, R. G. J. (1966) "Infrared study of the hydroxyl bonds in clinoamphiboles", *Science*, vol. 153, pp. 890-892.
- Brown, E. H. (1977) The Crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism, *J. of Petrology*, vol.18, pp.53-72.
- Fadini, A. and Schnepel, F. M. (1989) "Vibrational Spectroscopy-Methods and Applications", Ellis Horwood Limited, England, 205p.
- Graham, C. M. and Powell, R (1984) A garnet-hornblende geothermometer : Calibration, testing, and application to the Pelona schist, Southern California, *J. Metamorphic Geol.*, vol. 2, pp.13-21.
- Goldman, D. S. and Rossman, G. R. (1977) The identification of Fe^{2+} in the M(4) site of calcic amphiboles, *Amer. Mineral.*, vol. 62, pp. 205-216.
- Hawthorne, F. C. (1981) "Amphibole Spectroscopy", in "Rev. in

Mineral.", vol. 19A, ed. by Veblen D. R., Mineral. Soc. Amer., pp. 205-216.

Hawthorne, F. C. (1983) The crystal chemistry of the amphibole: a review., Canadian Mineral., vol. 21

Hofmeister, A. M., Hoering, T. C. and Virgo, D., (1987) Vibrational spectra of beryllium aluminosilicates: heat capacity calculations, Phys. Chem. Minerals., vol. 14, pp.205-224.

Hofmeister, A. M. and Chopelas, A., (1991) Vibrational spectroscopy of end member silicate garnet, Phys. Chem. Minerals., vol. 17, pp.503-526.

Holland, T. J. B. and Richardson, S. W. (1979) Amphibole zonation in metabasites as a guide to the evolution of metamorphic conditions, Contr. Mineral. Petrol., vol. 70, pp.143-148.

Karr, C., (1975) "Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Minerals", Academic Press, New York.

Kieffer, S. W., (1979) Thermodynamics and lattice vibrations of minerals: vibrational characteristics of silicates, Rev. Geophys. Space Phys., vol. 17, pp.20-34.

Kieffer, S. W., (1980) Thermodynamics and lattice vibrations of minerals: applications to chain and sheet silicates and orthosilicates, Rev. Geophys. Space Phys., vol. 4, 862-886.

Kieffer, S. W., (1985) Heat capacity and entropy: systematic relations to the lattice vibrations, in "Rev. in Mineral., vol. 14, ed. by Veblen, D. R., Mineral. Soc. Amer., pp. 65-126.

Lan, C. Y. and Liou, J. G. (1981) occurrence, petrology and tectonics of serpentinites and associated rodingites in the Central Range, Taiwan, Memoir of the Geol. Soc. China, pp. 343-389.

- Lan, C. Y., (1982) Mineral chemistry of Yuantoushan gneiss, Nanao area, I-Lan, northeastern Taiwan, Proc. of the Geol. Soc. China, pp. 38-52.
- Lan, C. Y. and Lee, C.W., (1992) The mineral chemistry of Fanpaochienshan gneiss and associated amphibolite, northeastern Taiwan, Geol. Soc. China, vol. 35, pp. 45-76.
- Lan, C. Y., Chung, S. L and Mertzman, S. A., (1997) Mineralogy and geochemistry of granitic rocks from chinmen, Liehyu and Dadan islands, Fujian, Journal of the Geological society of China, vol. 40, pp. 527-558.
- Lazarev, A. N. (1972) "Vibrational Spectra and Structure of Silicates", Consultants Bureau, New York, 302p.
- 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.
- Malezieux, J. M. (1990) "Absorption Spectroscopy in Mineralogy, Contribution of Raman microspectrometer to mineral studies, ed. by Mottana, A. and Burragate, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, pp. 39-60.
- McMillan, P. F. (1985) Vibration spectroscopy in the mineral sciences, in "Rev. in Mineral.", vol. 14, ed. by Veblen, D. R., Mineral. Soc. Amer., pp. 9-63.
- McMillan, P. F. and Hofmeister, A.M. (1988) Infrared and Raman spectroscopy, in "Rev. in Mineral.", vol. 18, ed. Hawthorne, F. C., Mineral. Soc. Amer., pp. 99-160.
- Stout, J.H. (1972) Phase petrology and mineral chemistry of coexisting

amphiboles from Telemark, Norway, J. Petrol., vol.13, pp. 99-145.

Wang, A., Dhamelincount, P. and Turrell, G. (1988) Raman micro-spectroscopic study of the cation distribution in amphiboles, Applied Spectroscopy, vol. 42, pp.1441-1450.

White, W. B. (1975) Structure interpretation of lunar and terrestrial minerals by Raman spectroscopy, in "Infrared and Raman spectroscopy of lunar and terrestrial minerals", ed. by Karr, C. Jr., Academic Press, New York, pp. 325-358.

Wilkins, R. W. T. (1970) Iron-magnesium distribution in the tremolite-actinolite series, Amer. Mineral., vol. 55, pp. 1993-1998.

附錄

附錄 A 角閃石礦物之分類 (Leake et al., 1997) ...1

附錄 B 標本圖片5

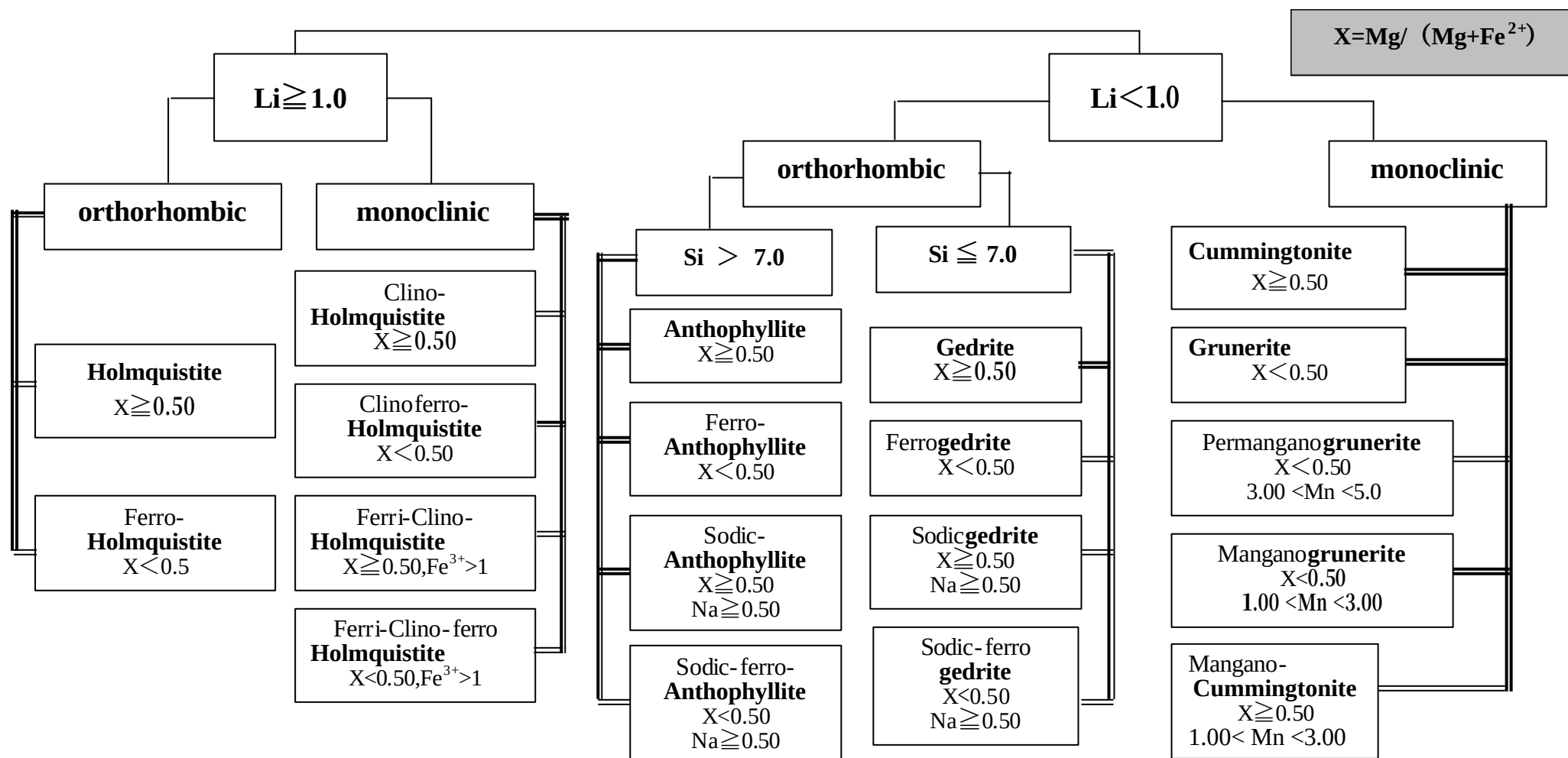
附錄 C X-光繞射 (XRD) 實驗光譜圖9

附錄 D 標本之化學成份分析資料11

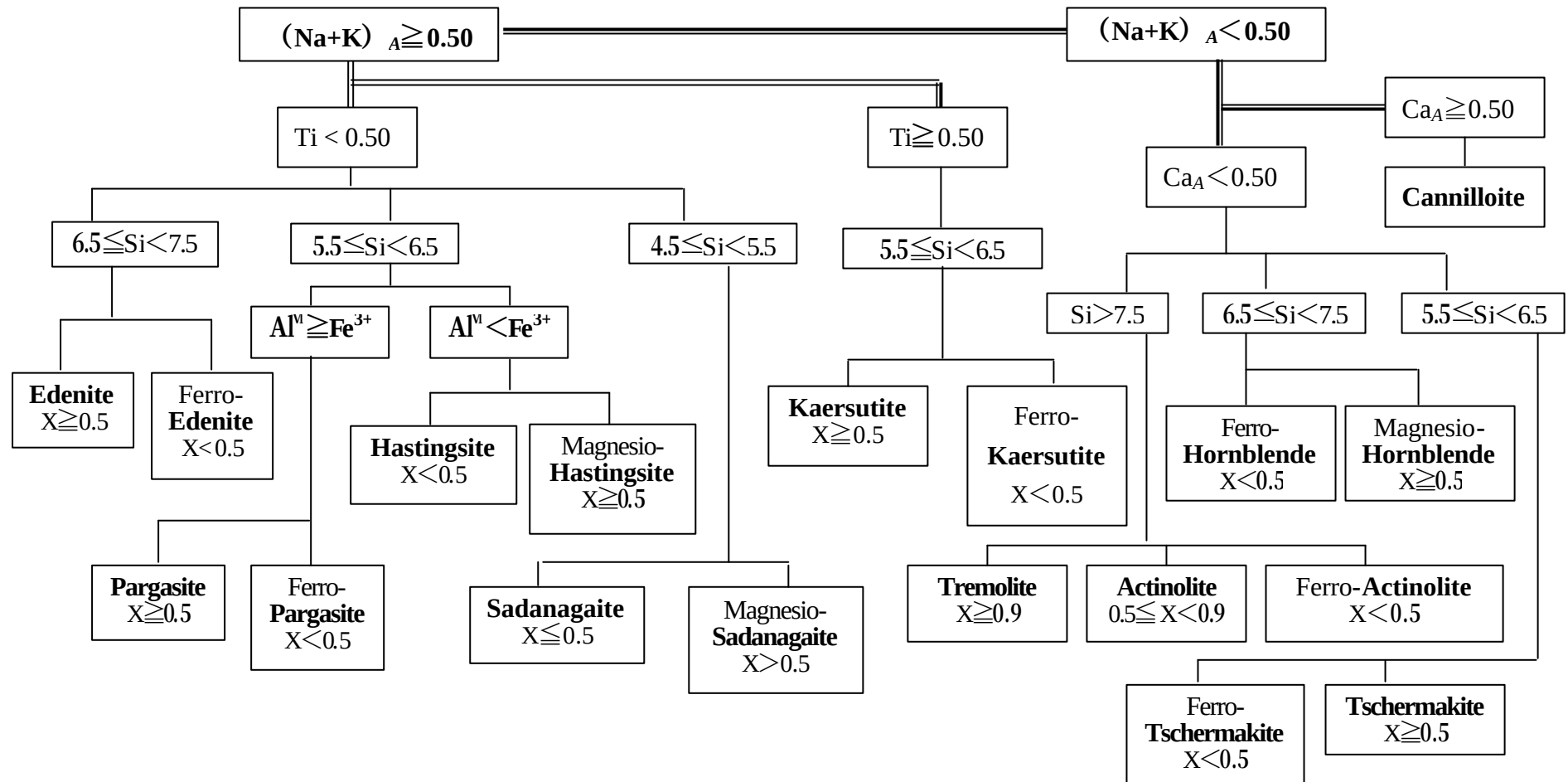
註:打* (星點) 符號者表示所採用的是
藍晶瑩 女士所分析的成份資料。

附錄 E 拉曼實驗光譜圖18

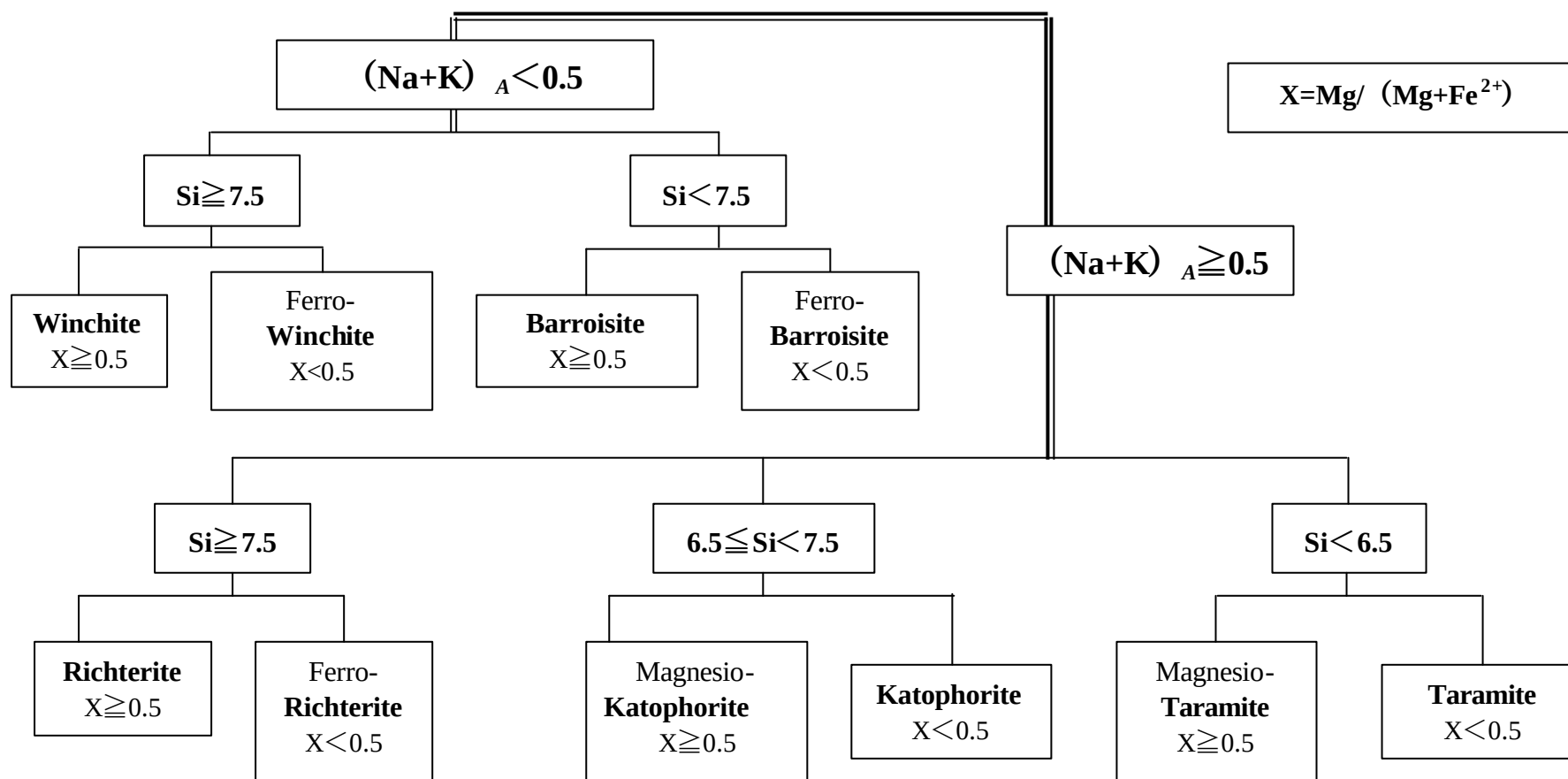
I . Mg-Fe-Mn-Li Amphiboles $(Ca+Na)_B < 1.00$ $(Mg,Fe,Mn,Li)_B \geq 1.00$



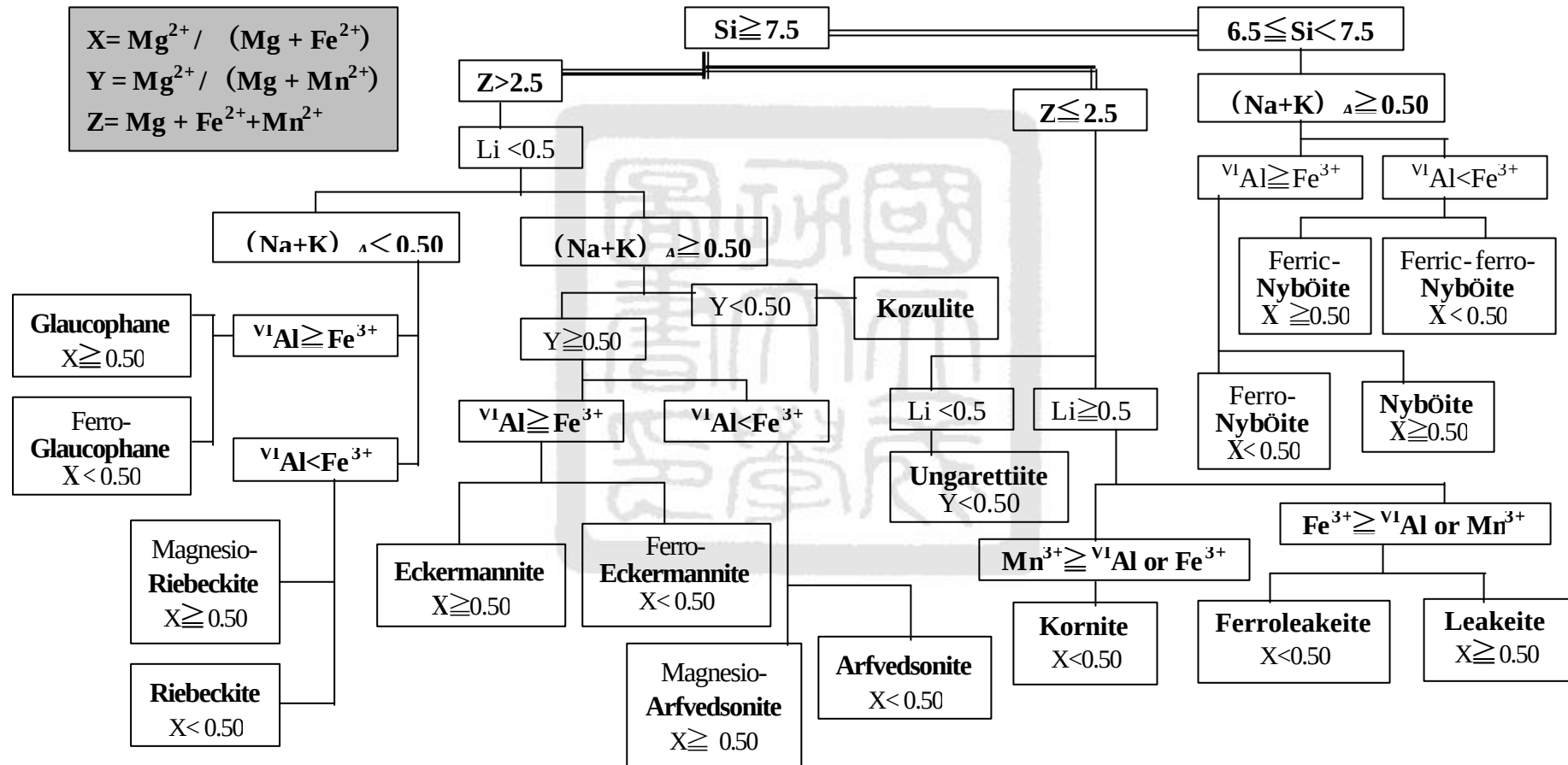
II. Calcic Amphiboles $(Ca+Na)_B \geq 1.00$; $Na_B < 0.50$; $Ca_B \geq 1.50$



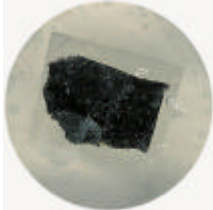
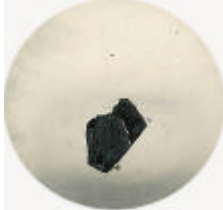
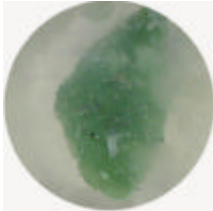
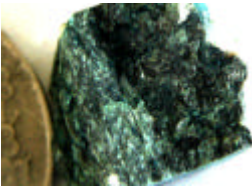
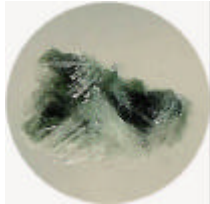
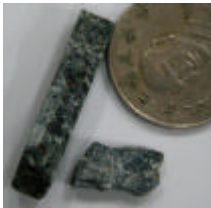
III. Sodic-Calcic Amphiboles $(\text{Ca}+\text{Na})_B \geq 1.00$ and $0.50 \leq \text{Na}_B < 1.50$

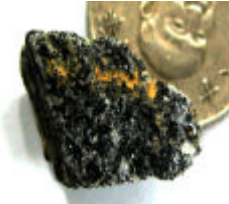
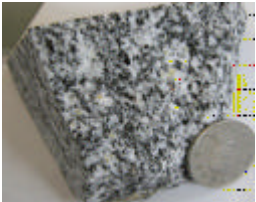
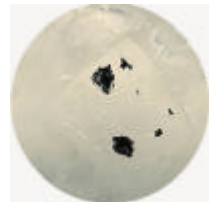
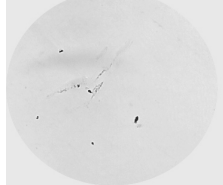
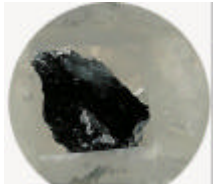


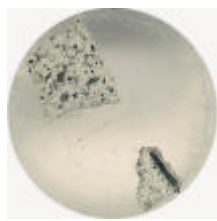
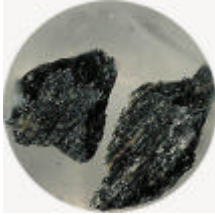
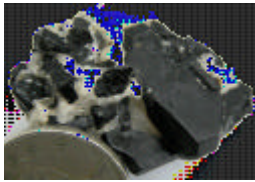
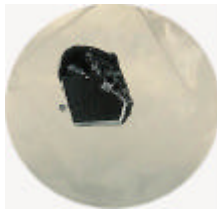
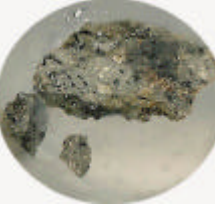
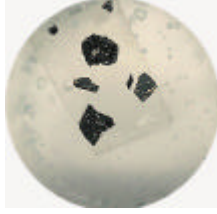
IV. Sodic Amphiboles $\text{Na}_B > 1.50$

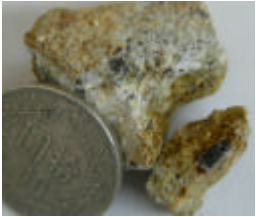
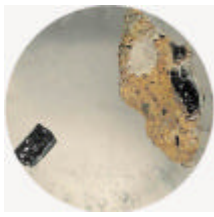
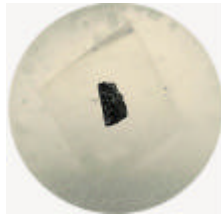
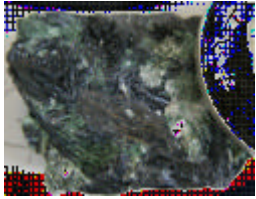
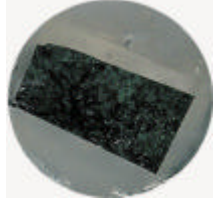


標本圖片

#1-1※ Grunerite 鐵閃石		#1-2※ Cummingtonite 褐閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#2-1* Actinolite 陽起石		#2-2 Nephrite 軟玉	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#2-3 Nephrite 軟玉		#2-4* Tremolite 透閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#2-5 Tremolite 透閃石		#2-6* Tremolite 透閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			

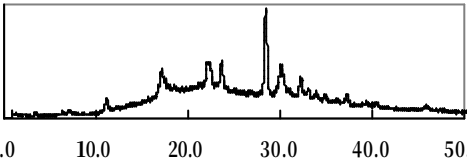
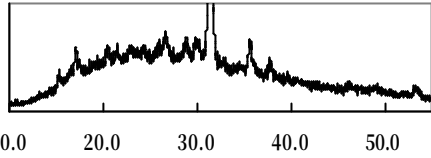
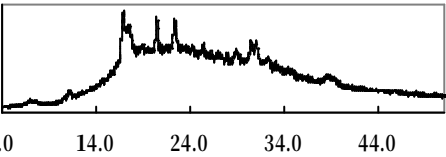
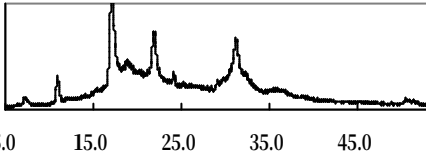
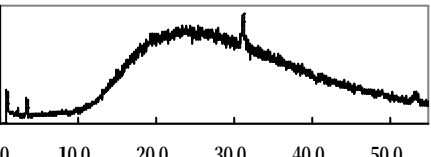
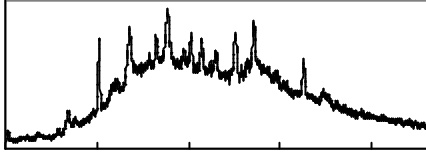
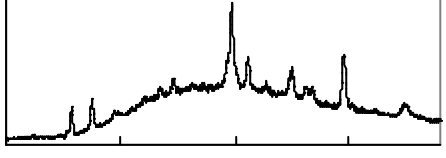
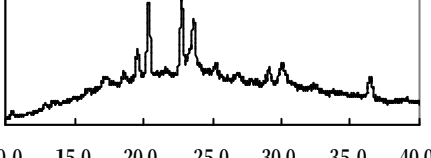
#2-7※ Tremolite 透閃石		#3-1* Pargasite 韭閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			無分析
#3-2* Pargasite 韭閃石		#3-3 Ferro-hornblende 鐵質普通角閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#3-4* Ferro-hornblende 鐵質普通角閃石		#3-5 Edenite 淡閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
	無分析		
#3-6 Pargasite 韭閃石		#3-7* Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#3-8 Edenite 淡閃石		#3-9◎ Pargasite 韭閃石	

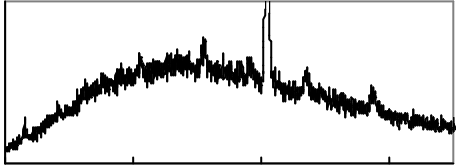
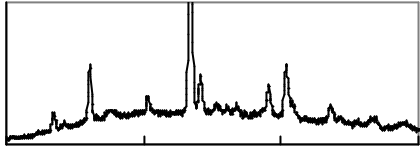
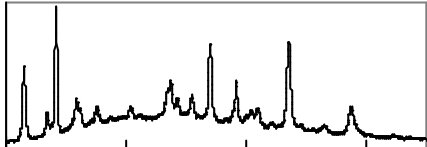
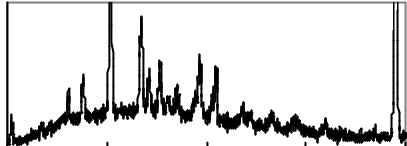
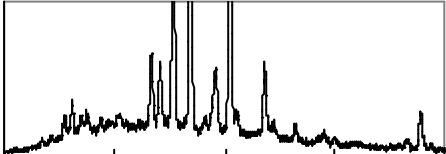
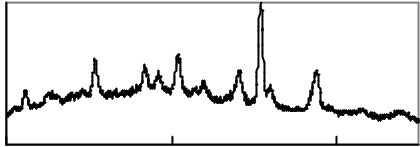
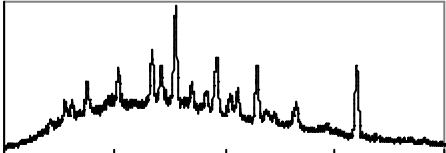
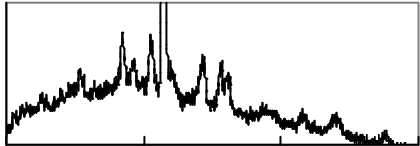
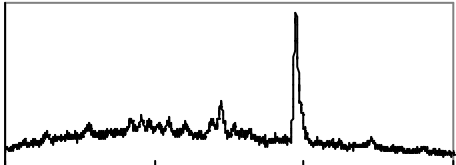
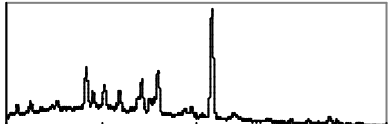
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#3-10 Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石		#3-11 Pargasite 韭閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#3-12 Pargasite 韭閃石		#3-13* Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#3-14 Edenite 淡閃石		#4-1 Edenite 淡閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#4-2 Edenite 淡閃石		#4-3 Pargasite 韭閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片

			
#5-1※ Magnesio-Katophorite 鎂紅閃石		#6-1 Glaucophane 藍閃石	
原岩照片	灌膠後圖片	原岩照片	灌膠後圖片
			
#6-2 Eckermannite 鎂鋁鈉閃石			
原岩照片	灌膠後圖片		
			

X-光繞射 (XRD) 實驗光譜圖

(註: 光譜圖之縱軸單位為 (KeV)、橫軸單位為 (Intensity)。)

#1-1※ Grunerite 鐵閃石 	#1-2※ Cummingtonite 褐閃石 
#2-1* Actinolite 陽起石 	#2-4* Tremolite 透閃石 
#2-6* Tremolite 透閃石 	#2-7※ Tremolite 透閃石 
#3-1* Pargasite 韭閃石 	#3-4* Ferro-hornblende 鐵質普通角閃石 
#3-5 Edenite 淡閃石	#3-6 Pargasite 韭閃石

 10.0 20.0 30.0 40.0	 10.0 20.0 30.0 40.0
#3-7* Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石	#3-11 Pargasite 韭閃石
 10.0 20.0 30.0 40.0	 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0
#3-12 Pargasite 韭閃石	#3-13* Magnesio-hornblende 鎂質普通角閃石
 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0	 15.0 25.0 35.0
#4-1 Edenite 淡閃石	#4-3※ Pargasite 韭閃石
 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0	 15.0 25.0 35.0 45.0
#6-1 Glaucophane 藍閃石	#6-2 Eckermannite 鎂鋁鈉閃石
 15.0 25.0 35.0 45.0	 15.0 25.0 35.0 45.0 55.0

Mg-Fe-Mn-Li 質之角閃石成份附表

wt%	#1-1	#1-1	#1-1	#1-2	#1-2	#1-2
SiO ₂	50	48.87	49.99	50.10	51	49.9
Al ₂ O ₃	0.48	0	0.6	0.80	0.7	0.54
TiO ₂	0	0	0	0.00	0	0
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0.00	0	0
FeO	40.06	39.59	39.34	35.29	34.84	35.31
MnO	0.44	0	0.35	0.00	0.51	0
MgO	6.43	5.75	6.16	9.32	9.75	9.7
CaO	0.36	0	0.32	0.00	0	0
Na ₂ O	0	0	0	0.00	0	0
K ₂ O	0	0	0	0.11	0	0
Total	97.77	94.21	96.76	95.62	96.80	95.45
Numbers of ions on the basis of 23O						
Si	7.948	8.062	7.998	7.942	7.961	7.929
⁽⁴⁾ Al	0.052	(0.062)	0.002	0.058	0.039	0.071
⁽⁶⁾ Al	0.038	0.062	0.111	0.091	0.090	0.030
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	5.325	5.462	5.263	4.678	4.548	4.692
Mn ²⁺	0.059	0.000	0.047	0.000	0.067	0.000
Mg	1.524	1.414	1.469	2.203	2.269	2.298
Ca	0.081	0.000	0.055	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000
Total	15.007	14.938	14.946	14.995	14.974	15.020
Mg/Mg+Fe	22.2	20.6	21.8	32.0	33.3	32.9

Total Fe as FeO

Calcic質之角閃石成份附表 (Tremolite-Actinolite 系列)

wt%	#2-1*(藍1981)	#2-1*(藍1981)	#2-1*(藍1981)	#2-2	#2-2	#2-2	#2-3	#2-3
SiO ₂	52.17	50.04	50.97	55.94	56.07	57.68	55.1	56.01
Al ₂ O ₃	3.91	0.17	1.84	0.33	0.4	0.5	0.5	0.3
TiO ₂	0.15	0	0.03	0	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0.43	0.07	0.14	0.23	0.27	0	0	0
FeO	4.61	6.18	4.29	4.2	3.63	3.89	3.39	3.43
MnO	0.09	0.17	0.04	0	0	0	0	0
MgO	20.6	20.98	21.55	21.06	20.55	21.48	21.05	21.24
CaO	12.28	13	12.72	12.95	13.44	13.47	13.01	13.44
Na ₂ O	0.8	0.02	0.14	0	0	0	0	0
K ₂ O	0.09	0.04	0.01	0	0	0	0	0
Total	95.13	96.67	97.73	96.03	94.94	97.66	94.13	95.44
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	7.470	7.908	7.850	7.966	7.998	7.994	7.958	7.977
⁽⁴⁾ Al	0.530	0.094	0.150	0.034	0.002	0.006	0.042	0.023
⁽⁶⁾ Al	0.130	(0.066)	0.149	0.021	0.065	0.076	0.044	0.028
Ti	0.016	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.049	0.008	0.015	0.026	0.030	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.552	0.729	0.494	0.500	0.433	0.451	0.409	0.409
Mn ²⁺	0.011	0.020	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	4.398	4.413	4.427	4.471	4.370	4.438	4.533	4.510
Ca	1.884	1.965	1.878	1.976	2.054	2.000	2.013	2.051
Na	0.222	0.005	0.037	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.016	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	15.262	15.082	15.007	14.994	14.953	14.965	14.999	14.997
Mg/Mg+Fe	88.8	85.8	90.0	89.9	91.0	90.8	91.7	91.7

Total Fe as FeO

(接續上頁)

wt%	#2-3	#2-4*(藍1981)	#2-4*(藍1981)	#2-5	#2-5	#2-6*(藍1981)	#2-6*(藍1981)	#2-7
SiO ₂	56.2	55.69	56.14	54.81	55.08	58.01	58.44	58
Al ₂ O ₃	0	3.01	1.71	0.98	0.56	0.08	0.34	0.18
TiO ₂	0	0.17	0.16	0.00	0.00	0.00	0	0.22
Cr ₂ O ₃	0	0.36	0.23	0.00	0.00	0.05	0.06	0
FeO	3.16	2.75	3	2.11	1.84	1.83	2.07	0
MnO	0	0.06	0.13	0.05	0.07	0.11	0.16	0.1
MgO	21.19	23.2	23.71	22.15	22.31	23.50	24.02	25
CaO	13.1	12.46	12.33	12.60	12.62	13.43	13	13
Na ₂ O	0	0.09	0.29	0.32	0.38	0.17	0.2	0.23
K ₂ O	0	0.08	0.02	0.09	0.05	0.02	0.01	0.16
Total	94.81	97.67	97.72	93.11	92.91	97.20	98.30	96.89
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	8.045	7.633	7.719	7.877	7.921	7.968	7.937	7.928
⁴¹ Al	(0.045)	0.367	0.281	0.123	0.079	0.032	0.063	0.072
⁶³ Al	0.045	0.119	(0.004)	0.043	0.016	(0.019)	(0.009)	(0.043)
Ti	0.000	0.018	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023
Cr	0.000	0.039	0.025	0.000	0.000	0.005	0.006	0.000
Fe ²⁺	0.378	0.315	0.345	0.254	0.221	0.210	0.235	0.000
Mn ²⁺	0.000	0.007	0.015	0.006	0.009	0.013	0.018	0.012
Mg	4.522	4.740	4.860	4.745	4.783	4.812	4.863	5.095
Ca	2.009	1.830	1.816	1.940	1.945	1.977	1.892	1.904
Na	0.000	0.024	0.077	0.069	0.106	0.045	0.053	0.061
K	0.000	0.014	0.004	0.016	0.009	0.004	0.002	0.028
Total	14.955	15.088	15.138	15.093	15.089	15.047	15.060	15.056
Mg/Mg+Fe	92.3	93.8	93.4	94.9	95.6	95.8	95.4	100.0

Total Fe as FeO

Calcic質之角閃石成份附表 (Hornblende 系列)

wt%	#2-7	#2-7	#3-1*(藍1997)	#3-1*(藍1997)	#3-2*(藍1982)	#3-2*(藍1982)	#3-3	#3-3
SiO ₂	57	59	37.76	39.54	43.13	40.42	40.84	40.7
Al ₂ O ₃	0.26	0.21	12.47	12.45	12.15	16.87	10.18	8.9
TiO ₂	0.06	0.16	0.85	0.78	1.49	0.32	0.30	0.7
Cr ₂ O ₃	0	0	0.02	0.04	0	0	0.08	0
FeO	0.08	0	26.78	26.64	20.43	20.19	19.59	19.8
MnO	0.07	0.07	0.93	0.76	0	0	0.46	0.38
MgO	25	25	3.85	3.7	7.18	5.11	8.00	8.06
CaO	12.6	13	11.18	10.77	11.29	11.37	10.22	10.5
Na ₂ O	0.28	0.25	1.51	1.49	1.28	1.55	2.09	0.2
K ₂ O	0.19	0.2	1.65	1.57	1.25	0.74	1.94	1.4
Total	95.54	97.89	97	97.74	98.2	96.57	93.7	90.64
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	7.905	7.971	6.104	6.283	6.530	6.206	6.562	6.714
⁴¹ Al	0.095	0.029	1.896	1.717	1.470	1.794	1.438	1.286
⁶³ Al	(0.052)	0.005	0.479	0.615	0.698	1.258	0.490	0.445
Ti	0.006	0.016	0.103	0.093	0.170	0.037	0.036	0.087
Cr	0.000	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.010	0.000
Fe ²⁺	0.009	0.000	3.620	3.540	2.587	2.592	2.633	2.732
Mn ²⁺	0.008	0.008	0.127	0.102	0.000	0.000	0.063	0.053
Mg	5.169	5.035	0.928	0.877	1.621	1.170	1.916	1.982
Ca	1.872	1.862	1.936	1.834	1.832	1.870	1.760	1.856
Na	0.075	0.065	0.473	0.459	0.376	0.461	0.651	0.064
K	0.034	0.034	0.340	0.318	0.241	0.145	0.398	0.295
Total	15.115	15.030	15.907	15.750	15.355	15.497	15.920	15.428
Mg/Mg+Fe	99.8	100.0	20.4	19.8	38.5	31.1	42.1	42.1

Total Fe as FeO

(接續上頁)

wt%	#3-3	#3-3	#3-4*(監1997)	#3-4*(監1997)	#3-5	#3-6	#3-6	#3-6
SiO ₂	41.8	40.84	44.44	45.16	45.56	40.3	40.2	40.7
Al ₂ O ₃	8.7	10.18	11.43	10.78	13.05	10.9	11.2	11.1
TiO ₂	0.5	0.3	1	0.98	0.21	1	1.2	0.9
Cr ₂ O ₃	0.04	0.08	0.04	0.02	0	0	0.004	0.013
FeO	19.4	19.6	16.98	16.60	13.5	13.47	13.44	12.8
MnO	0.46	0.7	0.6	0.64	0.29	0.2	0.16	0.2
MgO	8.46	8	8.42	8.58	10.19	11.4	11.4	11.25
CaO	10.5	10.22	10.66	10.96	9.26	11.9	11.9	11.8
Na ₂ O	2	2.09	1.23	1.20	3.81	1.6	1.5	1.6
K ₂ O	1.3	1.94	1.23	1.23	0.45	2	2	2
Total	93.16	93.95	96.03	96.15	96.12	92.77	93.004	92.363
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	6.722	6.553	6.756	6.843	6.763	6.376	6.339	6.433
⁴¹ Al	1.278	1.447	1.244	1.157	1.237	1.624	1.661	1.567
⁶³ Al	0.371	0.478	0.804	0.768	1.046	0.408	0.420	0.501
Ti	0.060	0.036	0.114	0.112	0.023	0.119	0.142	0.107
Cr	0.005	0.010	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002
Fe ²⁺	2.609	2.630	2.159	2.104	1.676	1.782	1.772	1.692
Mn ²⁺	0.063	0.095	0.077	0.082	0.036	0.027	0.021	0.027
Mg	2.028	1.914	1.908	1.938	2.255	2.689	2.680	2.651
Ca	1.809	1.757	1.736	1.779	1.473	2.017	2.011	1.998
Na	0.624	0.650	0.363	0.353	1.039	0.491	0.459	0.490
K	0.267	0.397	0.239	0.238	0.085	0.404	0.402	0.403
Total	15.775	15.931	15.290	15.265	15.611	15.817	15.706	15.705
Mg/Mg+Fe	43.7	42.1	46.9	48.0	57.4	60.1	60.2	61.0
Total Fe as FeO								

wt%	#3-7*(監1992)	#3-8	#3-8	#3-8	#3-8	#3-9	#3-9	#3-9
SiO ₂	45.15	42.65	42.21	42.00	41.04	42.20	39.18	39.10
Al ₂ O ₃	11.68	9.65	10.06	10.21	10.10	12.34	12.32	14.23
TiO ₂	1.59	2.52	2.37	3.06	3.10	1.52	1.59	1.68
Cr ₂ O ₃	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	13.38	11.99	12.70	13.00	12.87	11.43	10.37	12.54
MnO	0.42	0.19	0.17	0.20	0.25	0.32	0.29	0.20
MgO	11.77	13.08	12.90	12.91	12.38	13.02	14.56	12.45
CaO	11.48	10.10	9.58	10.21	10.23	9.35	9.32	11.15
Na ₂ O	1.13	2.16	2.40	2.23	2.24	1.88	2.01	1.73
K ₂ O	0.71	0.06	0.08	0.11	0.14	0.56	0.46	1.11
Total	97.43	92.39	92.47	96.87	96.76	95.62	96.80	95.45
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	6.639	6.593	6.542	6.435	6.410	6.473	6.198	6.018
⁴¹ Al	1.361	1.407	1.458	1.565	1.590	1.527	1.802	1.982
⁶³ Al	0.663	0.351	0.379	0.279	0.270	0.704	0.495	0.599
Ti	0.176	0.293	0.276	0.353	0.364	0.175	0.189	0.195
Cr	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.645	1.550	1.646	1.666	1.681	1.466	1.372	1.614
Mn ²⁺	0.052	0.025	0.022	0.026	0.033	0.042	0.039	0.026
Mg	2.580	3.014	2.981	2.949	2.883	2.977	3.434	2.857
Ca	1.809	1.673	1.591	1.676	1.712	1.537	1.580	1.839
Na	0.322	0.647	0.721	0.662	0.676	0.559	0.617	0.516
K	0.133	0.012	0.016	0.022	0.028	0.110	0.093	0.218
Total	15.218	15.272	15.356	15.280	15.285	15.395	15.629	15.609
Mg/Mg+Fe	61.1	66.0	64.4	63.9	63.2	67.0	71.5	63.9
Total Fe as FeO								

(接續上頁)

wt%	#3-10	#3-10	#3-10	#3-11	#3-11	#3-11	#3-11	#3-11
SiO ₂	46.55	47.94	47.7	40.83	40.08	41	40.28	40.91
Al ₂ O ₃	10.89	10.92	10.4	13.71	13.52	13.91	14.02	13.41
TiO ₂	0.43	0.56	0.6	0.76	0.78	0.82	0.7	0.84
Cr ₂ O ₃	0.02	0.05	0.02	0	0.00	0	0	0
FeO	10.59	10.73	10.92	9.96	9.81	10.26	10.12	9.85
MnO	0.21	0.20	0.18	0	0.00	0	0	0
MgO	13.07	13.23	13.26	12.82	12.64	13.07	12.98	13.07
CaO	11.87	11.86	12.09	12.05	12.16	12.12	11.92	12.31
Na ₂ O	1.70	1.75	1.61	2.36	2.38	2.44	2.12	2.37
K ₂ O	0.07	0.08	0.09	1.94	1.84	1.78	1.79	1.91
Total	95.40	97.32	96.87	94.43	93.19	95.40	93.93	94.67

Numbers of ions on the basis of 23O

Si	6.865	6.917	6.929	6.222	6.194	6.189	6.169	6.222
⁴⁶ Al	1.135	1.083	1.071	1.778	1.806	1.811	1.831	1.778
⁶³ Al	0.758	0.774	0.709	0.685	0.658	0.663	0.699	0.626
Ti	0.048	0.0					0.081	0.096
Cr	0.002	0.0	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.306	1.2			1.295	1.295	1.296	1.253
Mn ²⁺	0.026	0.0			0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	2.874	2.8			2.941	2.941	2.964	2.964
Ca	1.876	1.8			1.960	1.960	1.956	2.006
Na	0.486	0.4			0.714	0.714	0.629	0.699
K	0.013	0.0			0.343	0.343	0.350	0.371
Total	15.341	15.1	15.341	15.09	15.341	15.341	15.894	15.918
Mg/Mg+Fe	68.8	68	68	68	68	68	69.6	70.3

Total Fe as FeO

wt%	#3-11	#3-12	#3-13	#3-13(臨)	#3-14	#3-14	
SiO ₂	40.55	43	43.49	45.45	51.49	46.30	46.02
Al ₂ O ₃	13.58	10	13.76	13.81	10.66	10.13	9.36
TiO ₂	0.73	3.1	0.32	0.0	0.49	1.56	1.38
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0.01	0.03	0
FeO	9.37	10				10.60	10.93
MnO	0.18	0.31	0	0	0.29	0.13	0.17
MgO	12.89	13.4	14.49	14.34	13.72	15.41	15.41
CaO	12.14	10.45	11.41	10.43	11.85	10.81	10.88
Na ₂ O	2.34	3.51	3.21	3.51	1.46	2.24	2.14
K ₂ O	2.03	0	0.13	0	0.19	0.08	0.07
Total	93.81	96.15	96.69	96.28	98.17	97.95	96.36

Numbers of ions on the basis of 23O

Si	6.218	6.399	6.400	6.479	7.121	7.257	6.713	6.755
⁴⁶ Al	1.782	1.601	1.600	1.521	0.879	0.743	1.287	1.245
⁶³ Al	0.673	0.309	0.267	0.358	0.633	1.028	0.443	0.374
Ti	0.084	0.397	0.368	0.327	0.098	0.052	0.170	0.152
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.009	0.003	0.000
Fe ²⁺	1.202	1.365	1.216	1.269	1.188	1.169	1.285	1.342
Mn ²⁺	0.023	0.039	0.000	0.000	0.031	0.029	0.016	0.021
Mg	2.947	2.969	3.179	3.152	2.992	2.675	3.331	3.372
Ca	1.995	1.664	1.799	1.648	1.857	1.688	1.679	1.711
Na	0.696	1.012	0.916	1.003	0.414	0.276	0.630	0.609
K	0.397	0.000	0.024	0.000	0.035	0.027	0.015	0.013
Total	15.932	15.358	15.402	15.429	15.151	14.901	15.402	15.442
Mg/Mg+Fe	71.0	68.5	72.3	71.3	71.6	69.6	72.2	71.5

Total Fe as FeO

(接續上頁)

Calcic質之角閃石成份附表 (Oxyhornblende 系列)

wt%	#3-14	#4-1	#4-1	#4-1	#4-2	#4-2	#4-2	#4-2
SiO ₂	45.24	45.69	45.88	44.34	46.27	47.2	46.14	46
Al ₂ O ₃	10.05	8.47	8.23	9.39	8.37	7.88	8.28	8.07
TiO ₂	1.57	2.03	1.91	2.11	1.6	1.61	1.71	1.52
Cr ₂ O ₃	0.03	0	0	0.00	0	0	0	0
FeO	10.28	12.51	12.76	12.94	13.39	13.01	13.57	13.16
MnO	0.13	0.31	0.24	0.26	0.43	0.39	0.28	0.29
MgO	15.5	14.25	14.07	13.16	14.08	14.83	14.21	14.4
CaO	10.53	11.19	11.28	10.98	11.19	11.19	11.22	11.11
Na ₂ O	2.15	1.45	1.59	1.91	1.92	1.59	1.84	1.94
K ₂ O	0.07	0.67	0.59	0.72	0.51	0.5	0.47	0.5
Total	95.55	96.57	96.55	95.81	97.76	98.20	97.72	96.99
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	6.676	6.771	6.806	6.657	6.801	6.874	6.787	6.809
^{IV} Al	1.324	1.229	1.194	1.343	1.199	1.126	1.213	1.191
^{VI} Al	0.423	0.250	0.245	0.319	0.251	0.227	0.222	0.217
Ti	0.174	0.226	0.213	0.238	0.177	0.176	0.189	0.169
Cr	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.269	1.550	1.583	1.625	1.646	1.585	1.669	1.629
Mn ²⁺	0.016	0.039	0.030	0.033	0.054	0.048	0.035	0.036
Mg	3.410	3.148	3.112	2.946	3.085	3.220	3.116	3.178
Ca	1.665	1.777	1.793	1.766	1.762	1.746	1.768	1.762
Na	0.615	0.417	0.457	0.556	0.547	0.449	0.525	0.557
K	0.013	0.127	0.112	0.138	0.096	0.093	0.088	0.094
Total	15.414	15.308	15.332	15.382	15.441	15.368	15.424	15.474
Mg/(Mg+Fe)	72.9	67.0	66.3	64.5	65.2	67.0	65.1	66.1
Total Fe as FeO								

wt%	#4-2	#4-2	#4-2	#4-2	#4-2	#4-2	#4-3	#4-3
SiO ₂	47.94	46.26	46.28	46.38	46.38	48.1	42.9	42.95
Al ₂ O ₃	7.44	8.21	7.1	7.1	8.09	6.92	11.8	11.41
TiO ₂	1.49	1.63	1.36	1.47	1.55	1.26	2.1	2.22
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	12.68	13.41	12.36	13	13.03	12.79	11.75	11.74
MnO	0.21	0.33	0.38	0.47	0.37	0.5	0.25	0.19
MgO	14.5	14.29	14.22	14.49	14.8	15.08	14.07	14.2
CaO	11.1	11.36	10.98	11.35	11.1	11.13	11.01	11.46
Na ₂ O	1.54	1.76	1.12	1.49	1.93	1.62	2.61	2.63
K ₂ O	0.45	0.51	0.38	0.35	0.43	0.42	0.49	0.45
Total	97.35	97.76	94.20	95.10	97.68	97.82	97.1	97.19
Numbers of ions on the basis of 23O								
Si	7.008	7.470	7.906	7.850	7.966	7.998	7.994	7.958
^{IV} Al	0.992	0.530	0.094	0.150	0.034	0.002	0.006	0.042
^{VI} Al	0.289	0.130	(0.086)	0.149	0.021	0.065	0.076	0.044
Ti	0.164	0.016	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.550	0.552	0.729	0.494	0.500	0.433	0.451	0.409
Mn ²⁺	0.026	0.011	0.020	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	3.160	4.398	4.413	4.427	4.471	4.370	4.438	4.533
Ca	1.738	1.884	1.965	1.878	1.976	2.054	2.000	2.013
Na	0.436	0.222	0.006	0.037	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.084	0.016	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	15.284	15.262	15.082	15.007	14.994	14.953	14.965	14.999
Mg/(Mg+Fe)	67.1	88.8	85.8	90.0	89.9	91.0	90.8	91.7
Total Fe as FeO								

Sodic- Calcic質之角閃石成份附表

wt%	#4-3	#4-3	#4-3	#4-3	#5-1	#5-1	#5-1	#5-1
SiO ₂	42.79	43.43	42.9	43.56	46.33	47.13	47.2	46.66
Al ₂ O ₃	11.41	11.46	11.44	11.83	5.24	5.09	5.04	5.47
TiO ₂	2.04	1.93	2.09	2.06	0.96	0.89	0.73	0.85
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	11.66	11.88	11.87	11.85	18.15	18.5	17.41	17.84
MnO	0.26	0	0.27	0.18	1.2	1.3	1.2	1.25
MgO	14.5	14.61	14.3	14.53	10.47	10.62	10.57	10.2
CaO	11.44	11.34	11.47	11.04	5.54	5.54	5.28	5.37
Na ₂ O	2.72	2.71	2.57	2.63	7.01	7.11	7	6.88
K ₂ O	0.51	0.46	0.48	0.54	1.27	1.2	1.11	1.23
Total	97.39	97.88	97.5	98.17	97.77	94.21	95.54	95.75
Numbers of ions on the basis of 230								
Si	6.324	6.370	6.336	6.358	7.165	7.198	7.291	7.219
⁽⁴⁾ Al	1.676	1.630	1.664	1.642	0.835	0.802	0.709	0.781
⁽⁶⁾ Al	0.311	0.351	0.327	0.393	0.121	0.114	0.209	0.216
Ti	0.227	0.213	0.232	0.226	0.112	0.102	0.085	0.099
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.441	1.457	1.466	1.446	2.348	2.363	2.249	2.308
Mn ²⁺	0.033	0.000	0.034	0.022	0.157	0.168	0.157	0.164
Mg	3.195	3.195	3.149	3.162	2.414	2.418	2.434	2.353
Ca	1.812	1.782	1.815	1.727	0.918	0.907	0.874	0.890
Na	0.779	0.771	0.736	0.744	2.102	2.105	2.097	2.064
K	0.096	0.086	0.090	0.101	0.251	0.234	0.219	0.243
Total	15.667	15.642	15.617	15.595	16.310	16.309	16.238	16.238
Mg/Mg+Fe	68.9	68.7	68.2	68.6	50.7	50.6	52.0	50.5

Total Fe as FeO

Sodic質之角閃石成份附表

wt%	#5-1	#5-1	#5-1	#5-1	#6-1	#6-1	#6-1	#6-1
SiO ₂	46.51	47.35	47.43	46.21	55.2	55.32	56.48	56.03
Al ₂ O ₃	5.07	5.23	5.37	5.07	8.74	9.46	9.54	9.37
TiO ₂	1.09	1.12	1.03	0.84	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0	0.00	0	0.19	0	0	0	0
FeO	18.94	18.72	17.66	18.29	14.32	14.07	13.56	12.6
MnO	1.17	0.99	1.1	1.19	0.25	0	0.2	0
MgO	10.76	10.41	10.53	10.4	8.64	8.81	8.14	8.7
CaO	5.62	5.45	5.46	5.36	1.5	1.41	0.22	0.26
Na ₂ O	6.73	6.55	6.63	6.33	6.67	7.02	7.44	7.44
K ₂ O	1.17	1.22	1.24	1.17	0	0	0	0
Total	97.06	97.04	96.45	95.05	95.32	96.09	95.58	94.60
Numbers of ions on the basis of 230								
Si	7.142	7.231	7.255	7.215	7.965	7.923	8.073	8.065
⁽⁴⁾ Al	0.856	0.769	0.745	0.785	0.015	0.077	(0.073)	(0.065)
⁽⁶⁾ Al	0.059	0.172	0.223	0.148	1.475	1.520	1.680	1.654
Ti	0.126	0.129	0.119	0.099	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.432	2.391	2.259	2.388	1.732	1.685	1.621	1.541
Mn ²⁺	0.152	0.128	0.143	0.157	0.031	0.000	0.024	0.000
Mg	2.463	2.370	2.401	2.421	1.863	1.881	1.734	1.867
Ca	0.925	0.892	0.895	0.897	0.232	0.216	0.034	0.040
Na	2.004	1.939	1.966	1.916	1.871	1.949	2.062	2.076
K	0.229	0.238	0.242	0.233	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	16.264	16.130	16.128	16.184	15.205	15.253	15.155	15.179
Mg/Mg+Fe	50.3	49.8	51.5	50.3	51.8	52.7	51.7	54.8

Total Fe as FeO

wt%	#6-2	#6-2	#6-2	#6-2	#6-2
SiO ₂	53.42	54.1	53	55.96	54.6
Al ₂ O ₃	8.11	8.11	7.79	8.22	7.99
TiO ₂	0.00	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0.00	0	0	0	0
FeO	8.95	8.54	6.52	9.7	10.2
MnO	0.00	0	0	0	0
MgO	6.52	6.6	8.02	6.3	6.51
CaO	11.73	11.41	12.05	12.08	11.55
Na ₂ O	6.96	7.33	6.84	7.56	7.59
K ₂ O	0.00	0	0	0	0
Total	95.69	96.09	94.22	99.82	98.44
Numbers of ions on the basis of 23O					
Si	7.791	7.833	7.778	7.837	7.786
⁽⁴⁾ Al	0.209	0.167	0.222	0.163	0.214
⁽³⁾ Al	1.185	1.217	1.125	1.194	1.129
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.092	1.034	0.800	1.136	1.216
Mn ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	1.418	1.425	1.755	1.315	1.384
Ca	1.833	1.770	1.895	1.813	1.765
Na	1.968	2.058	1.946	2.053	2.098
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	15.496	15.504	15.521	15.511	15.592
Mg/Mg+Fe	56.5	57.9	68.7	53.7	53.2
Total Fe as FeO					

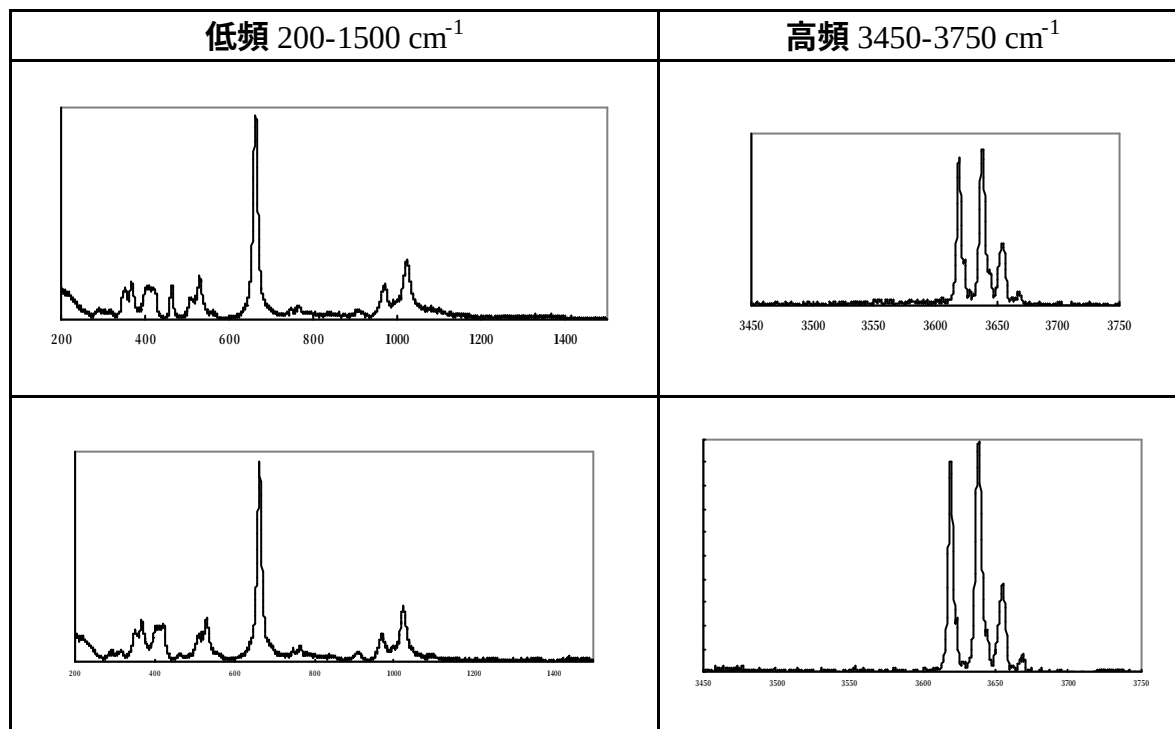
一、 鎂鐵錳鋰質角閃石類

(Mg-Fe-Mn-Li Amphiboles)

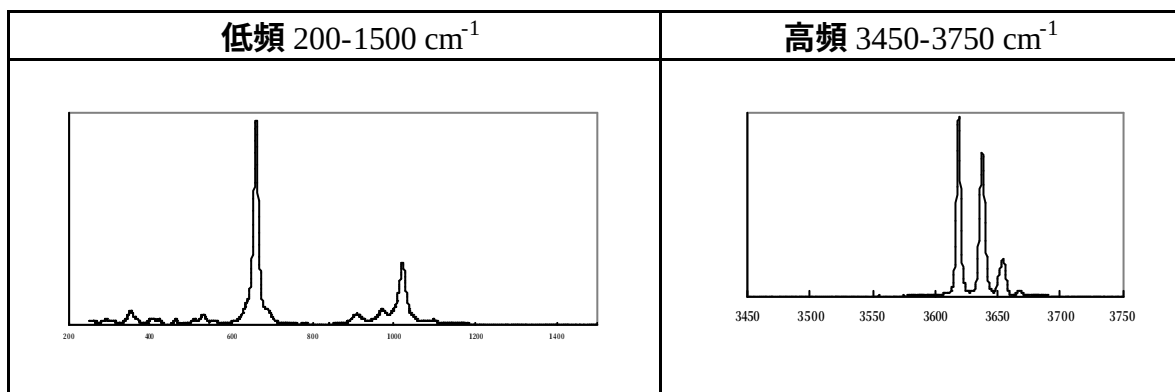
褐閃石 (Cummingtonite) -- 鐵閃石 (Grunerite) 系列

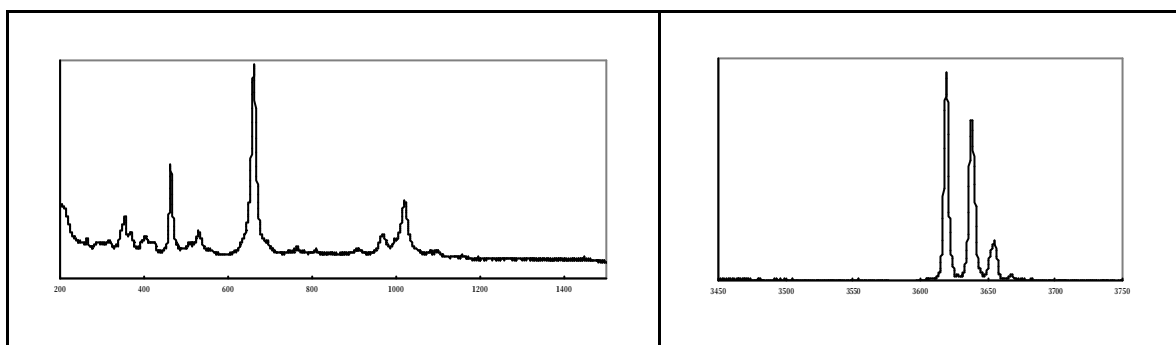
(註:光譜圖之縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1}), 橫軸單位為 Intensity (a.u.))

#1-1



#1-2



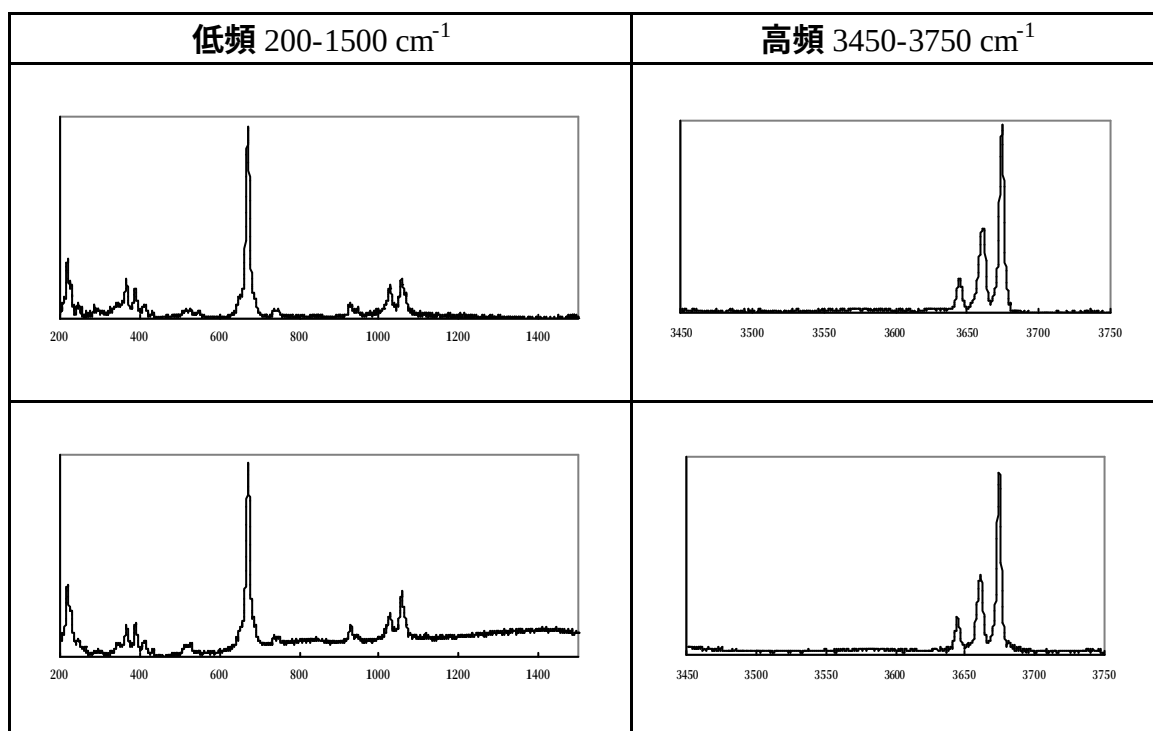


二、 鈣質角閃石類

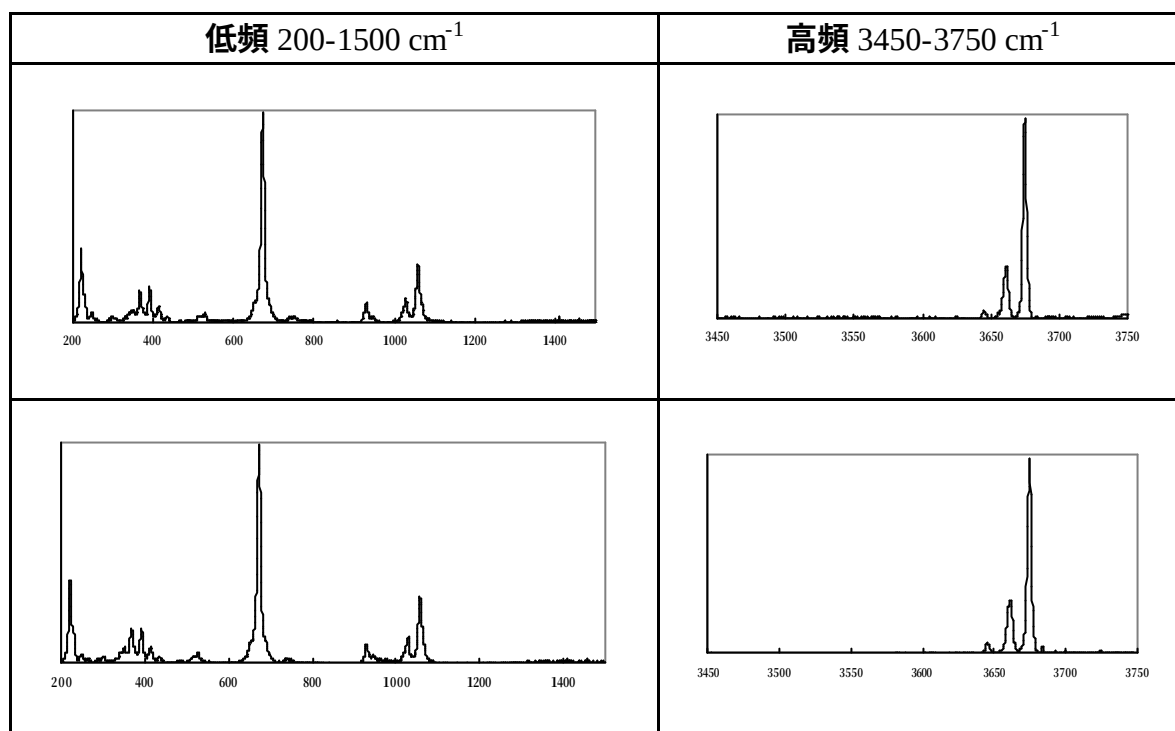
(Calcic Amphiboles)

透閃石 (Tremolite) -- 陽起石 (Actinolite) 系列

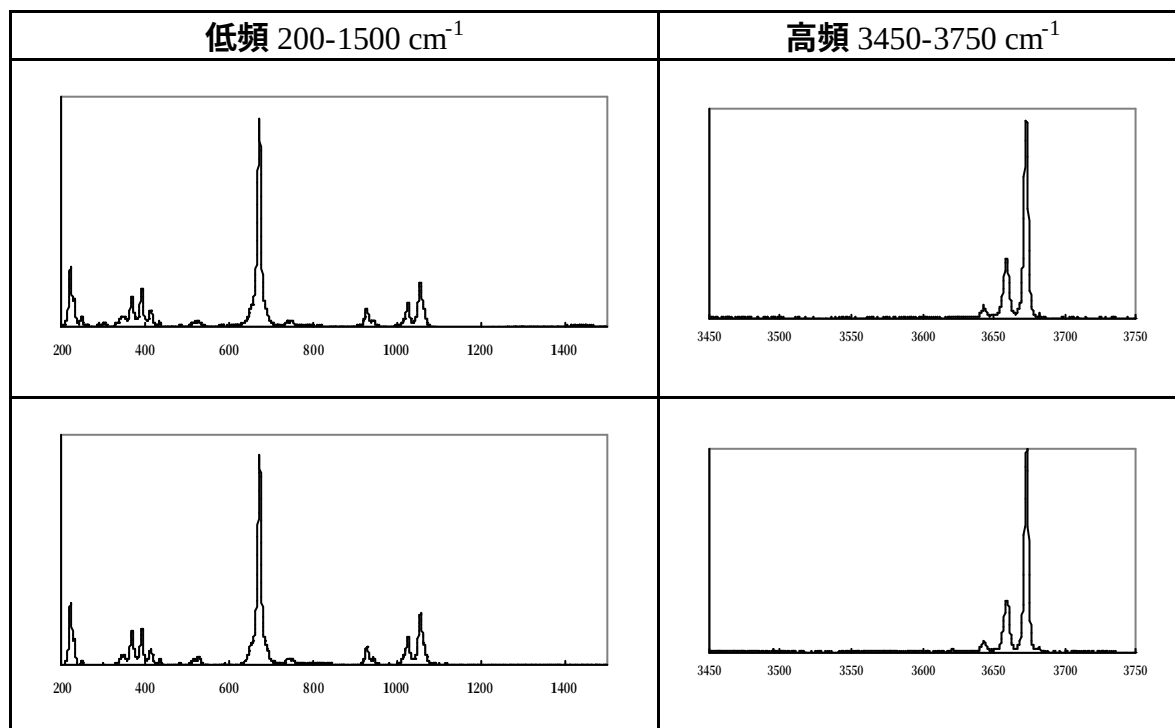
#2-1 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



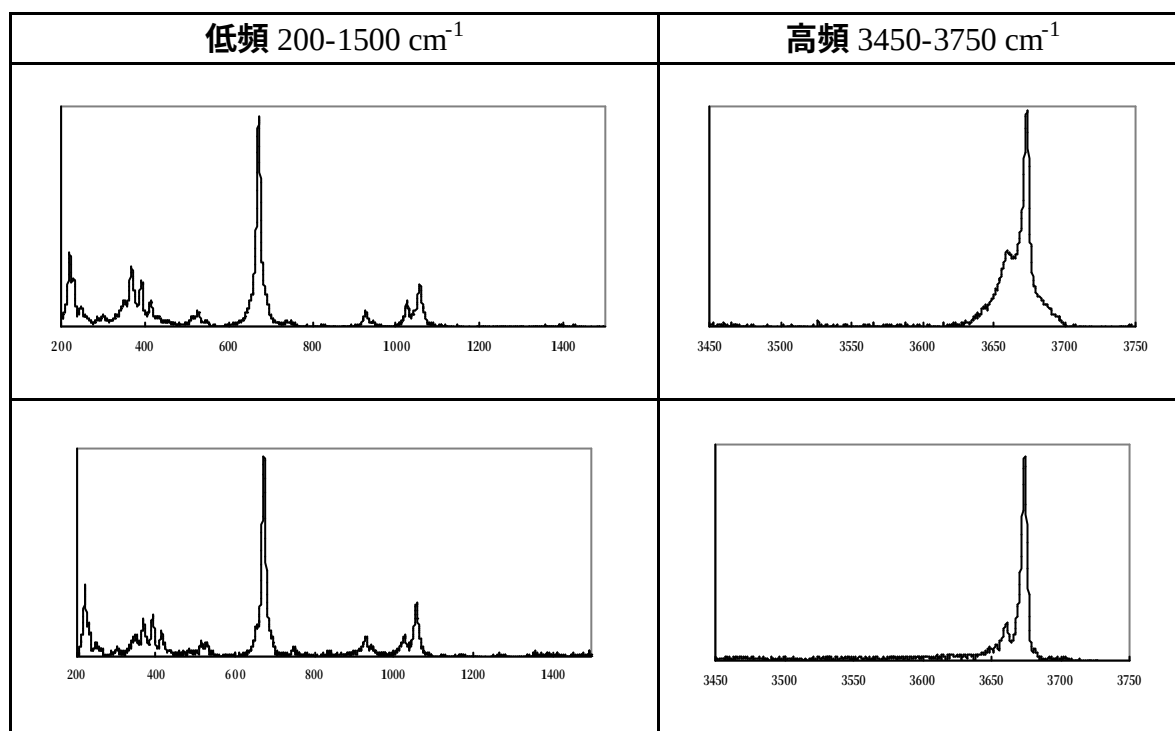
#2-2 （縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。 ）



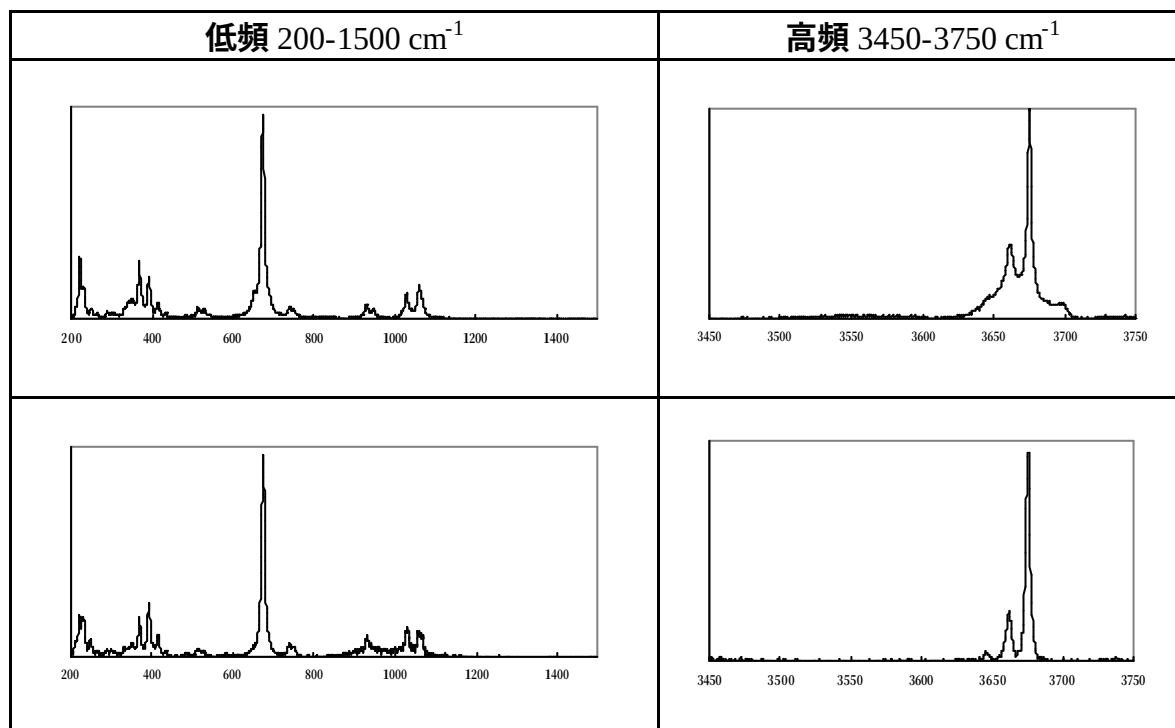
#2-3



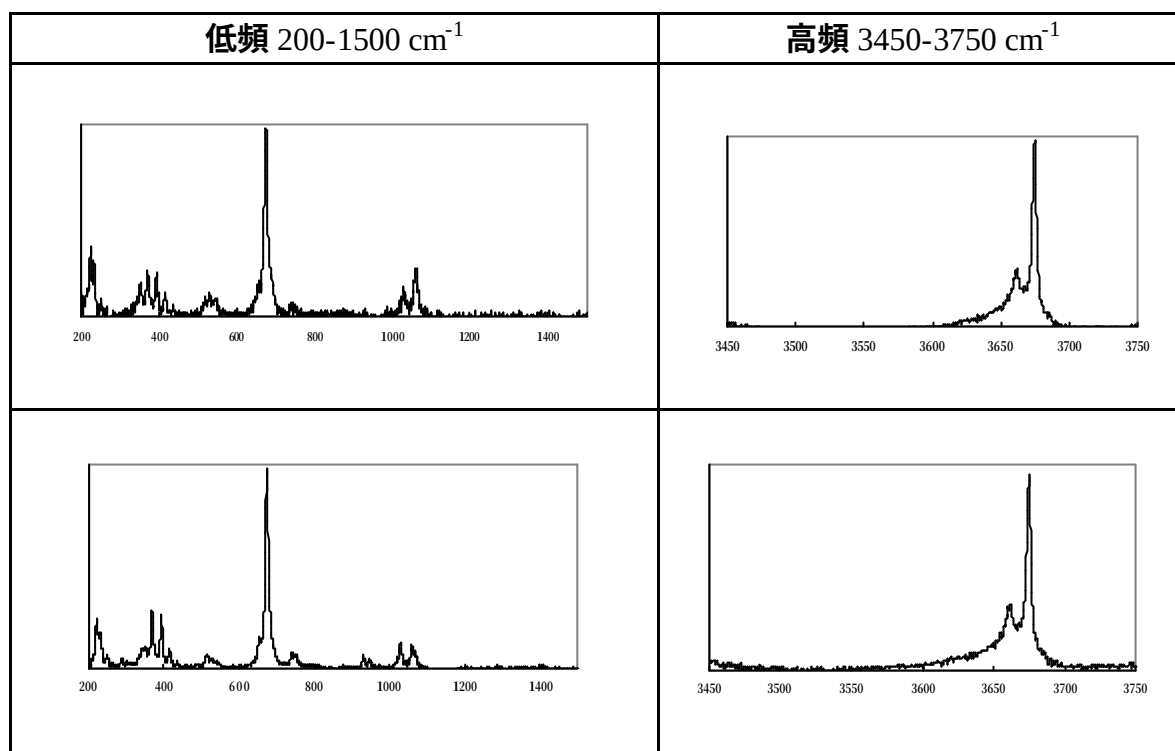
#2-4 （縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。 ）



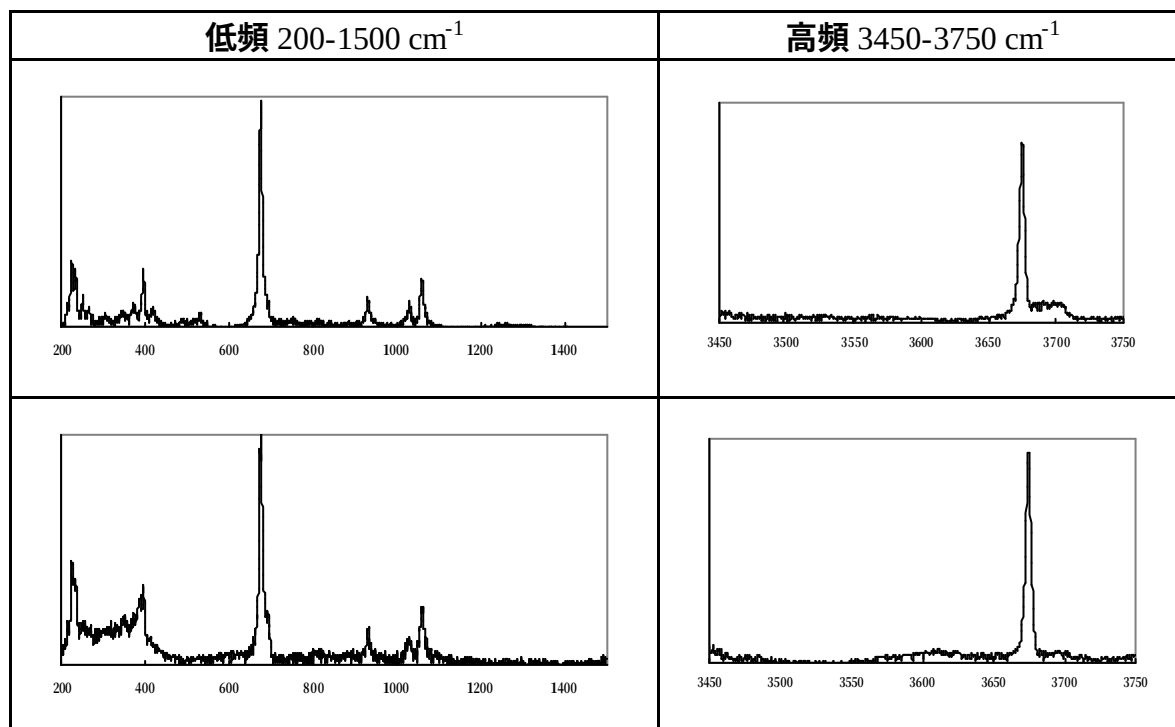
#2-5



#2-6 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)

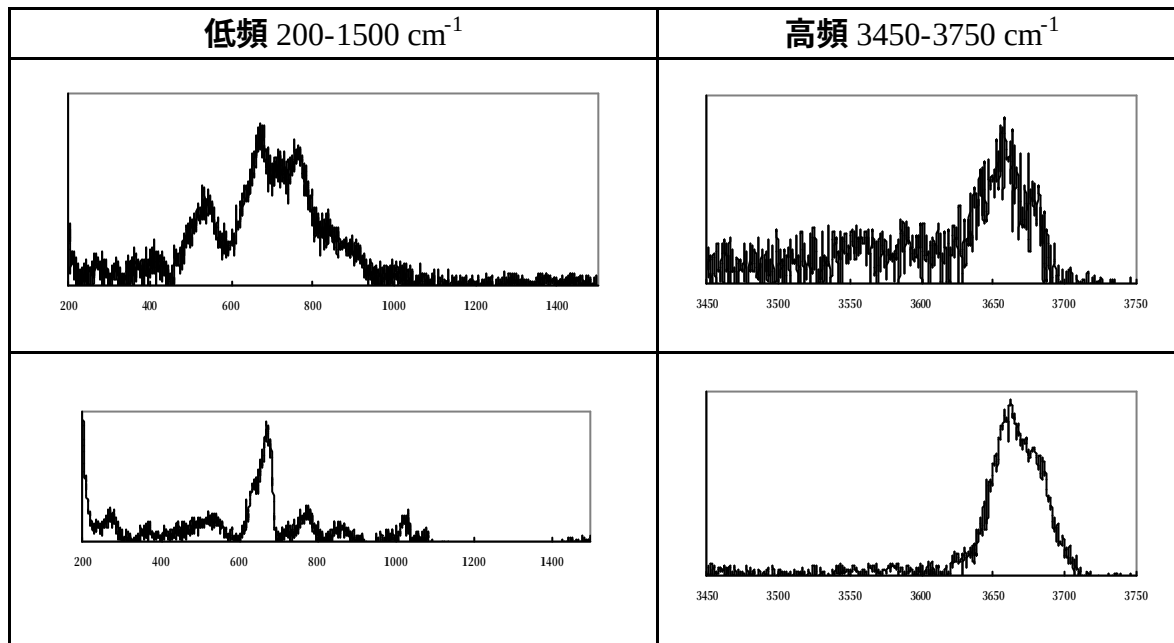


#2-7

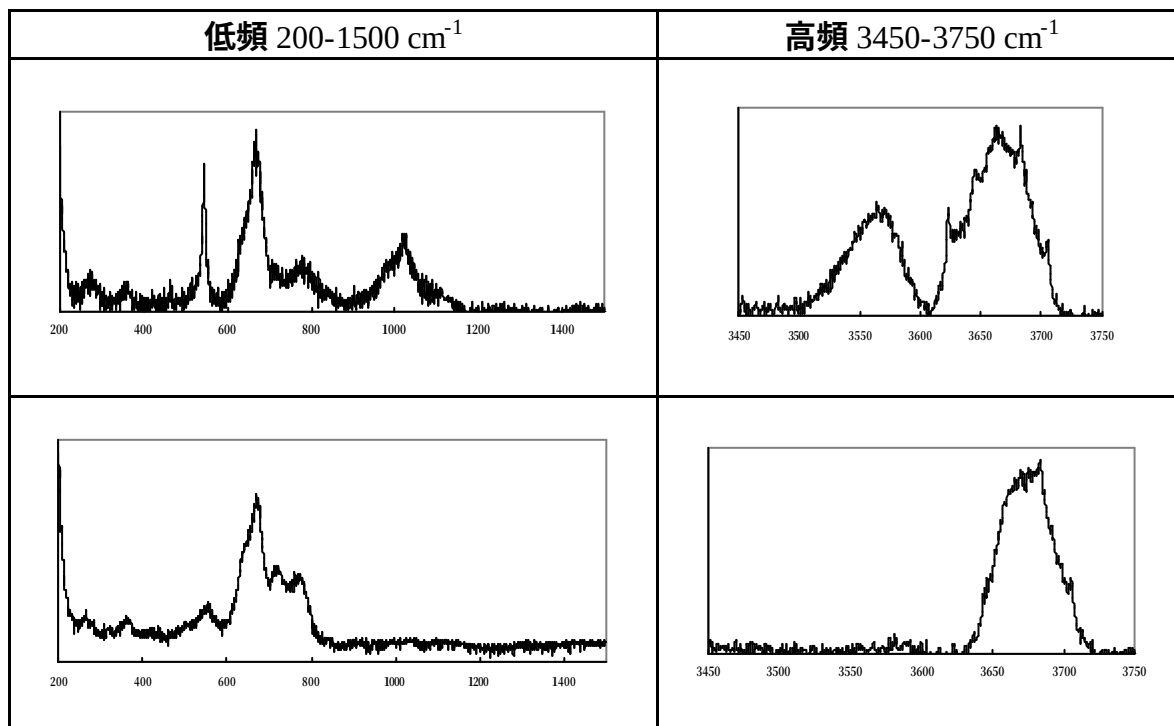


普通角閃石（Hornblende）系列

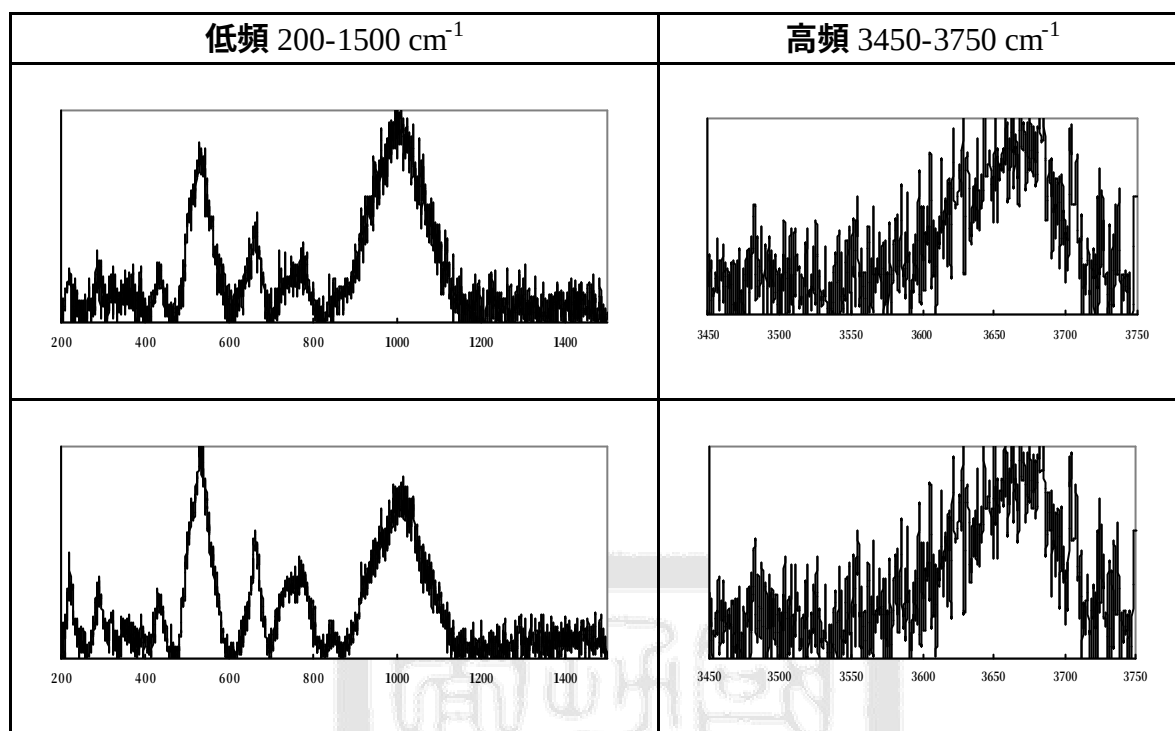
#3-1（縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



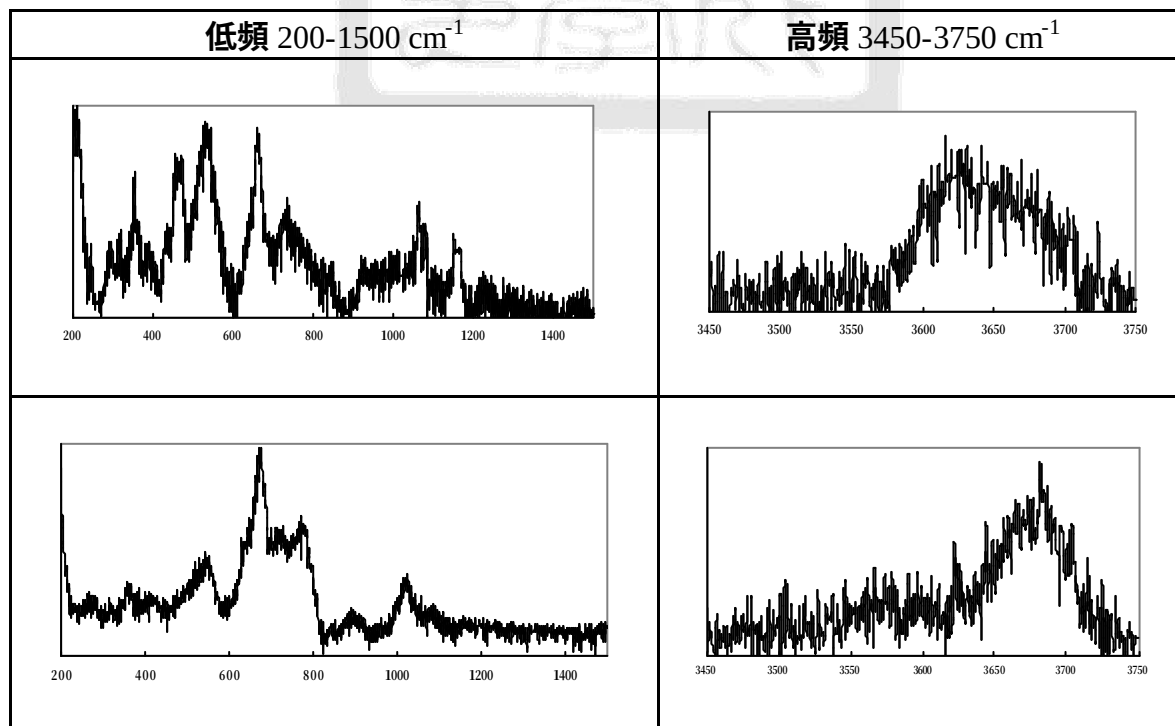
#3-2



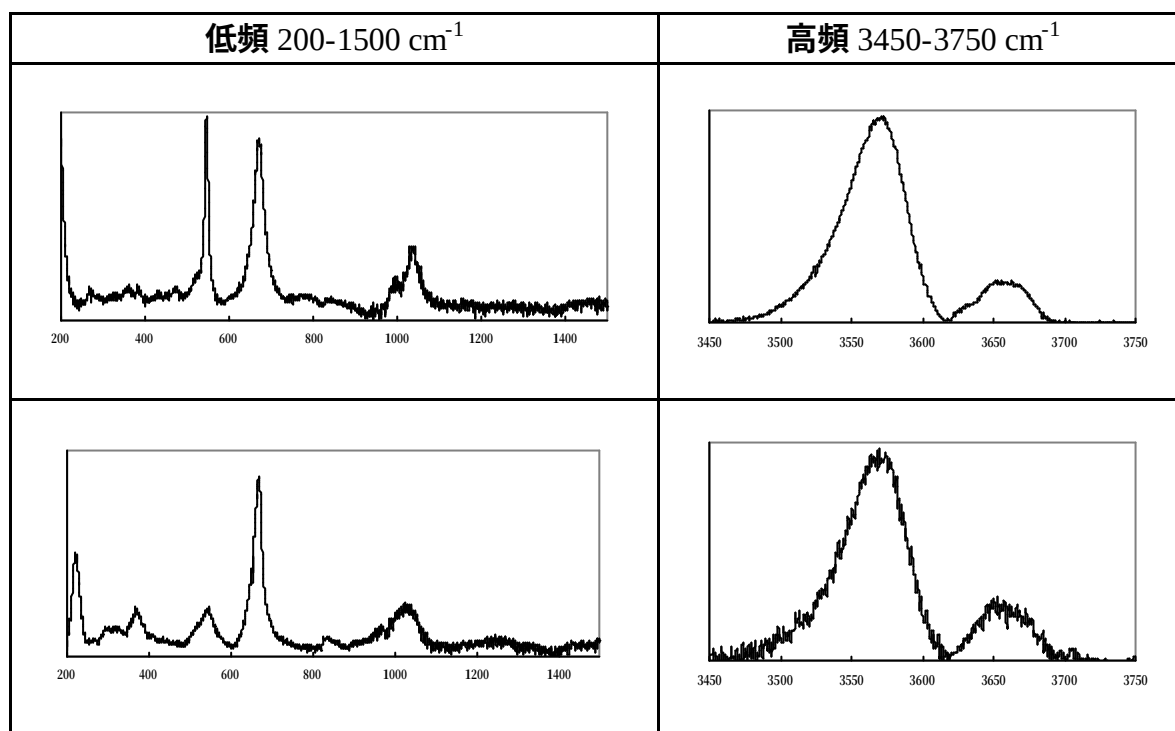
#3-3 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



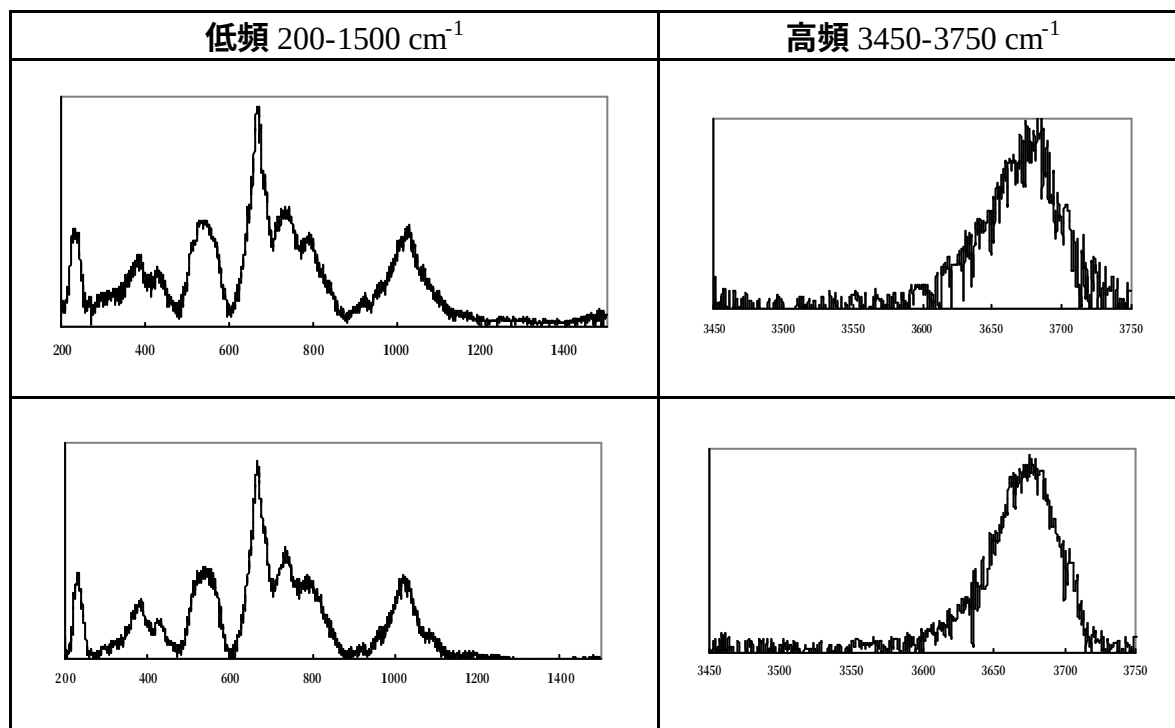
#3-4



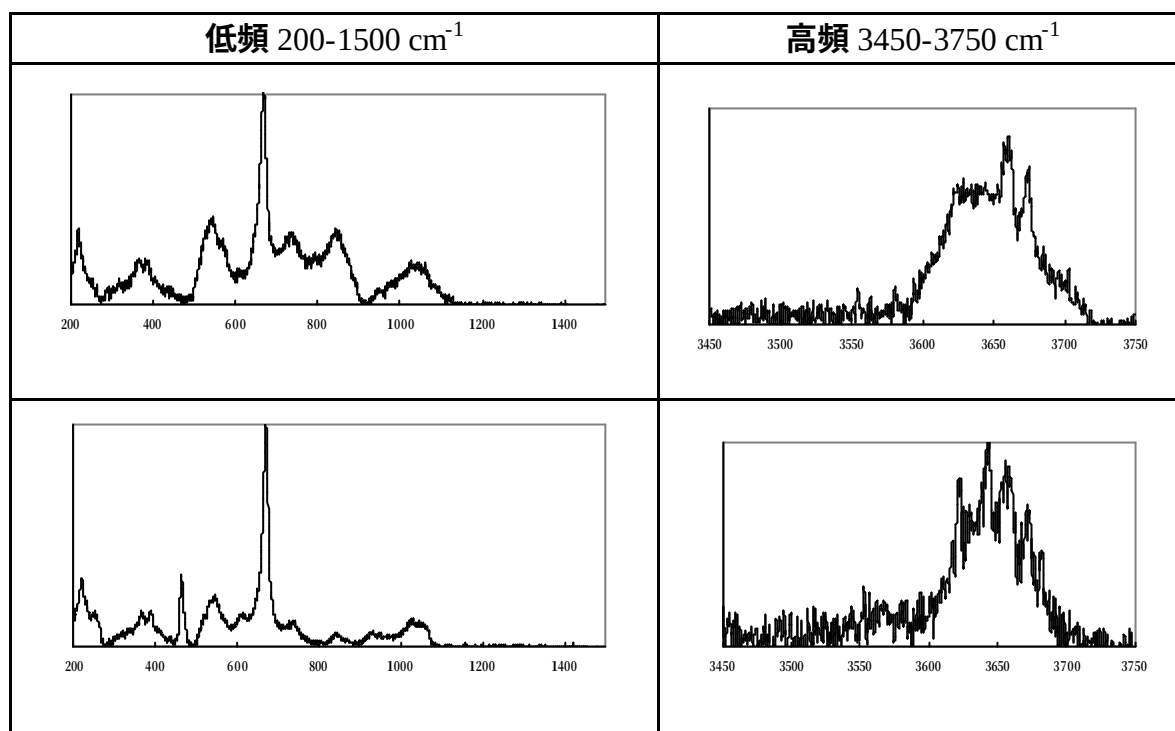
#3-5 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



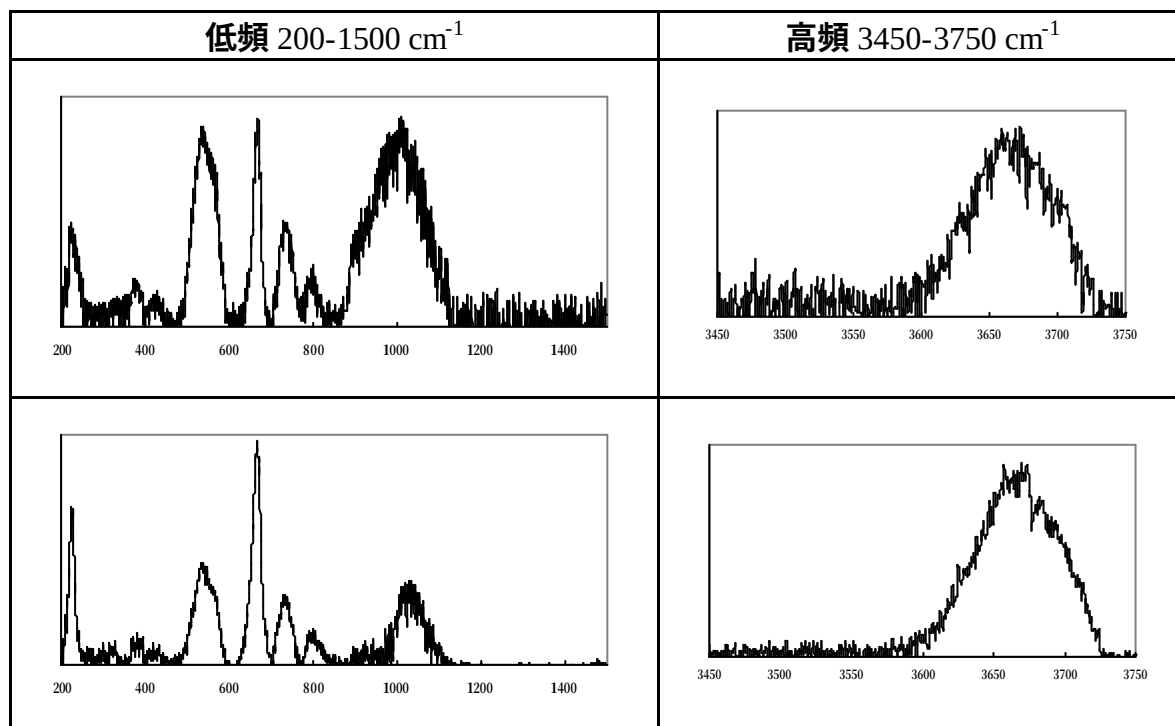
#3-6



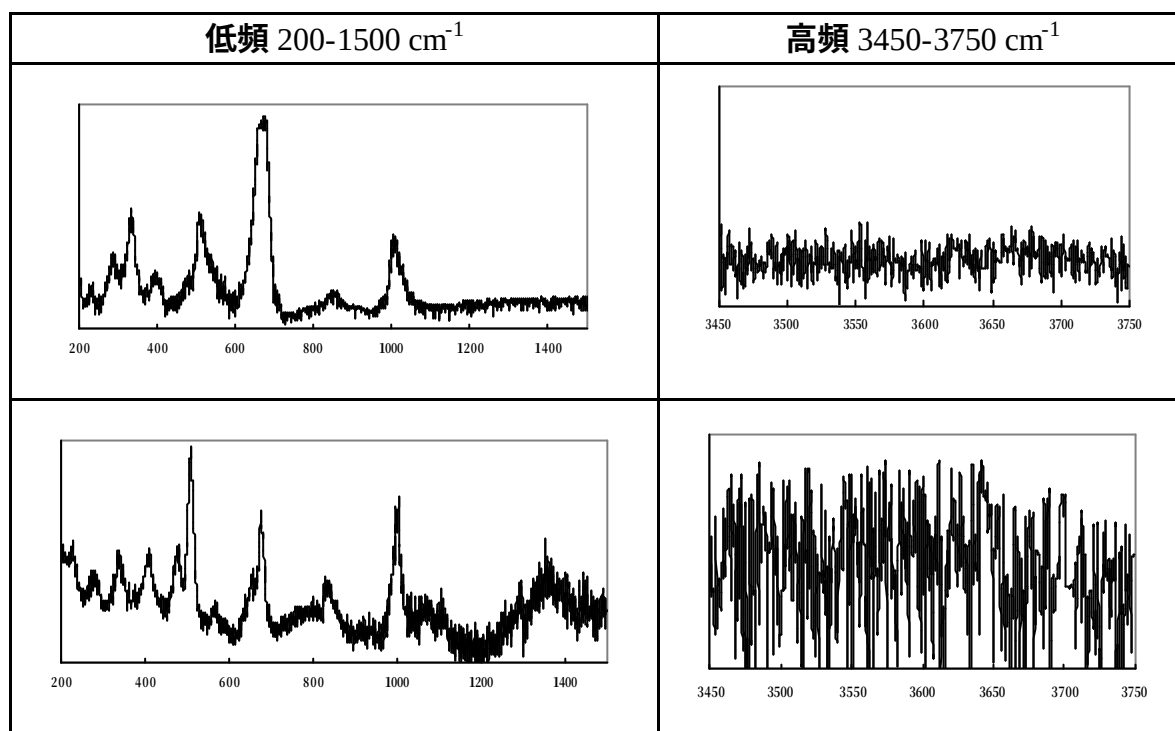
#3-7 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



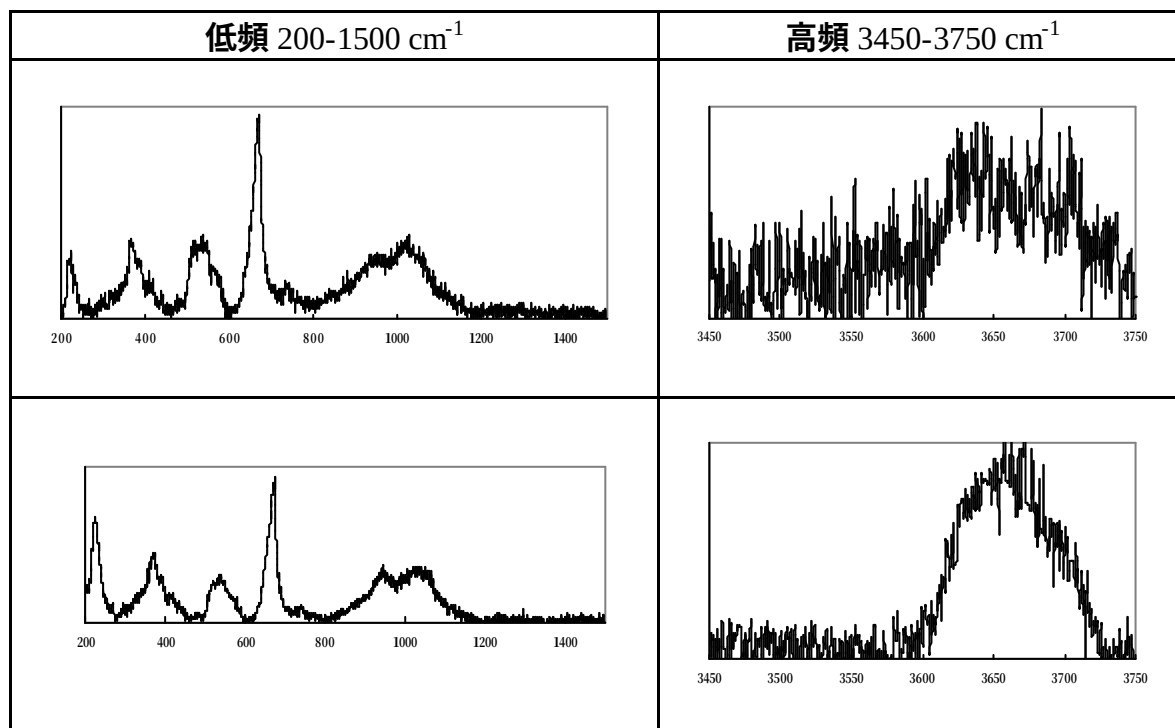
#3-8



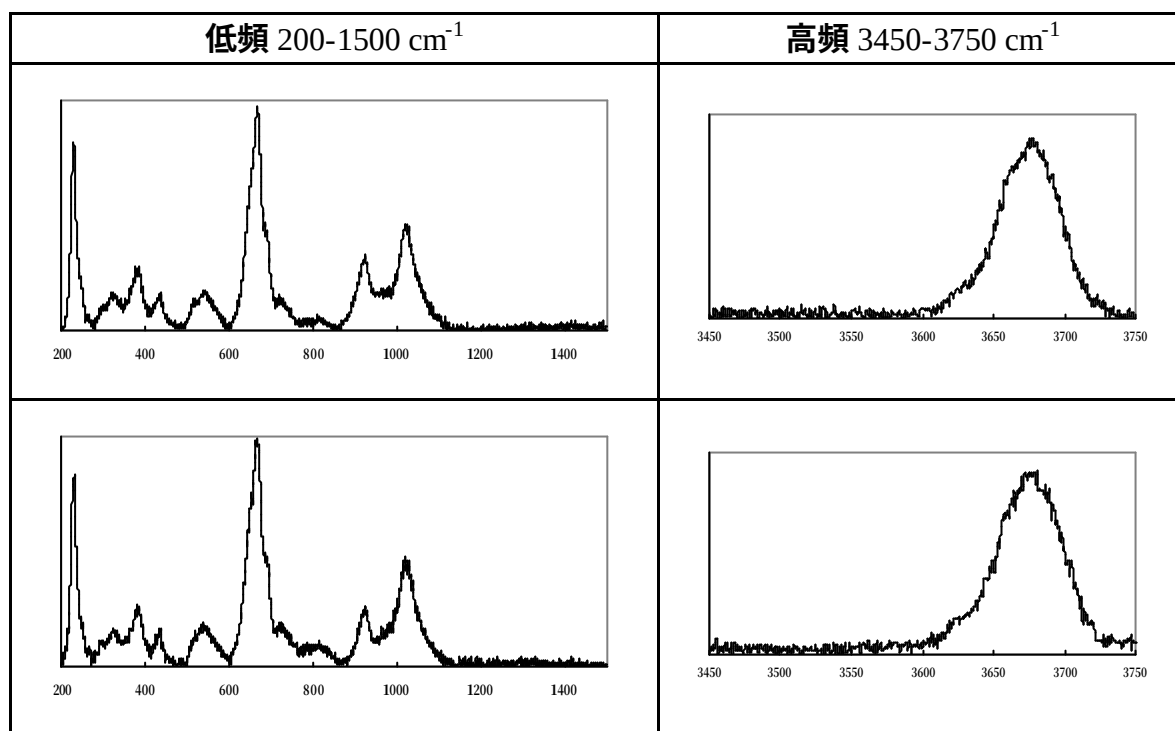
#3-9 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



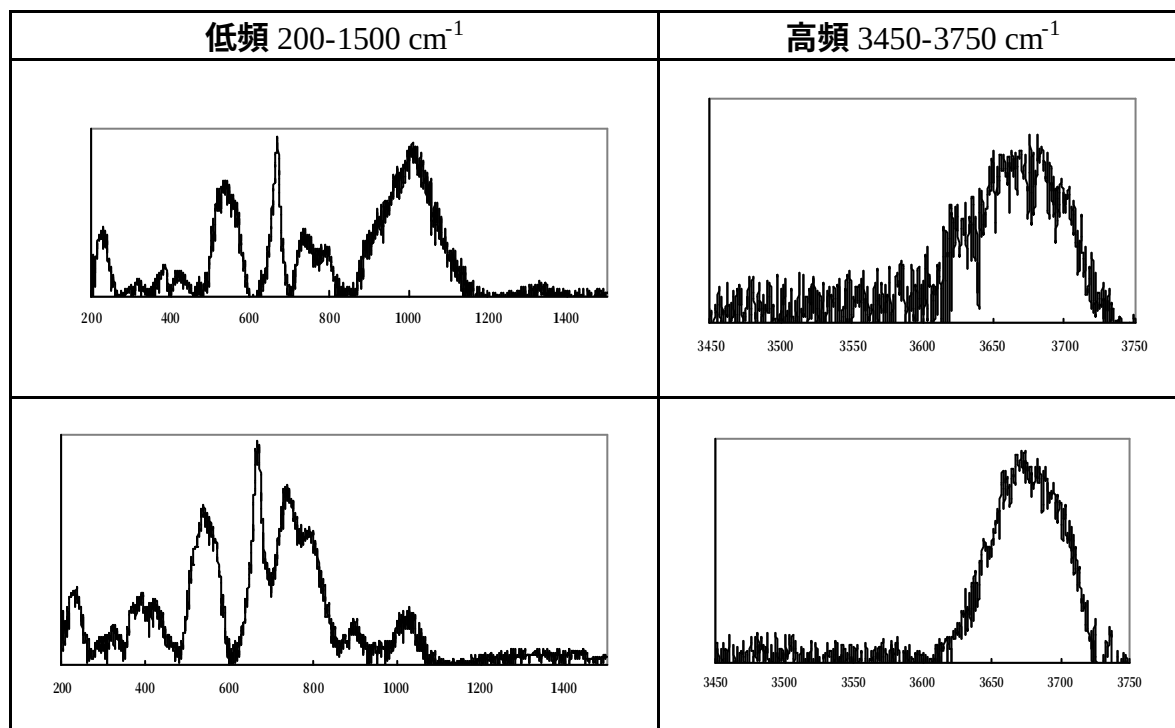
#3-10



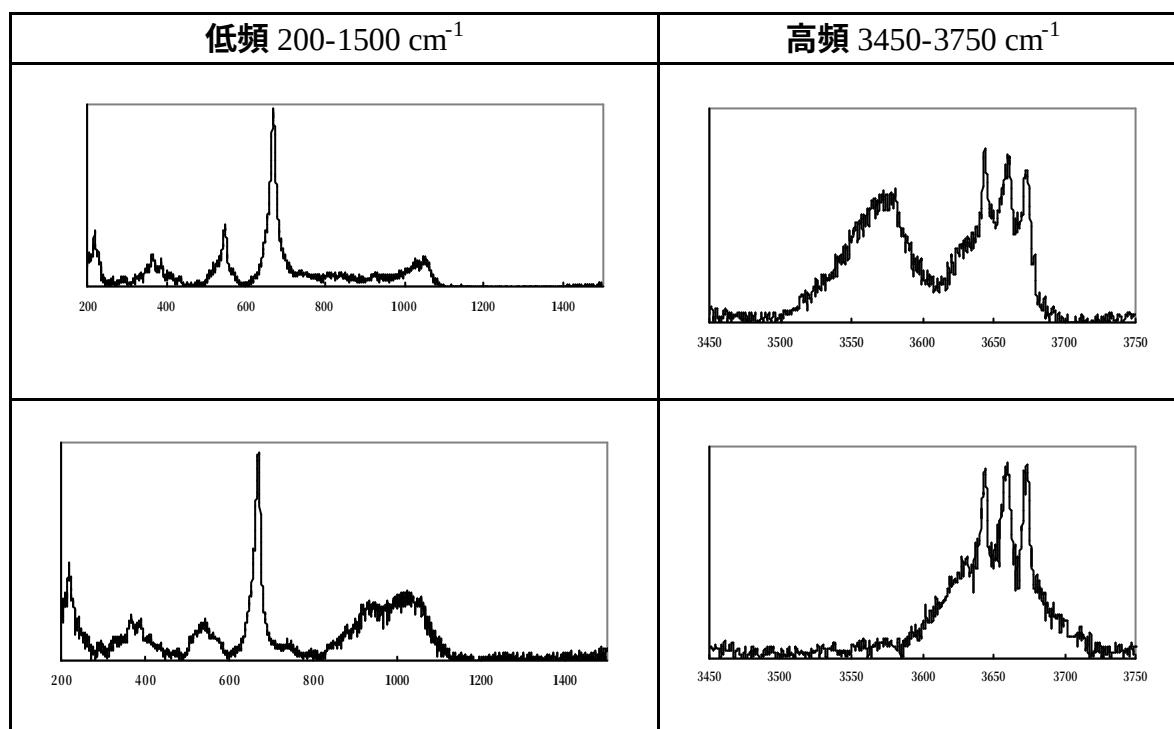
#3-11 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



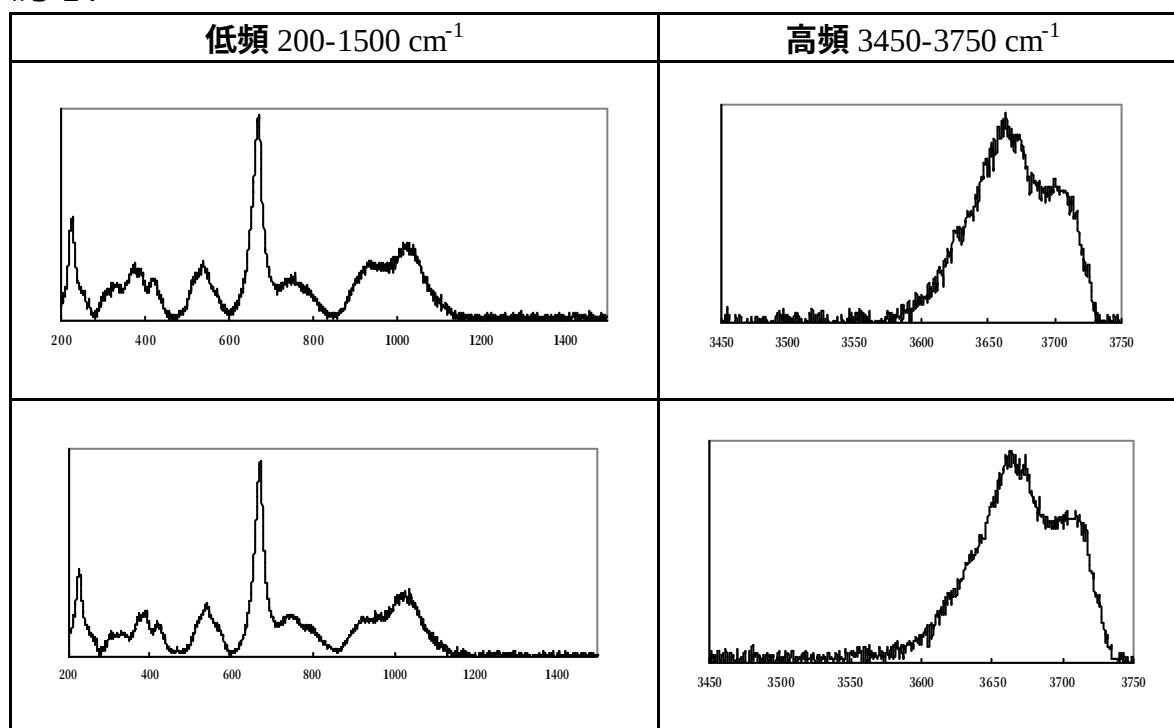
#3-12



#3-13 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)

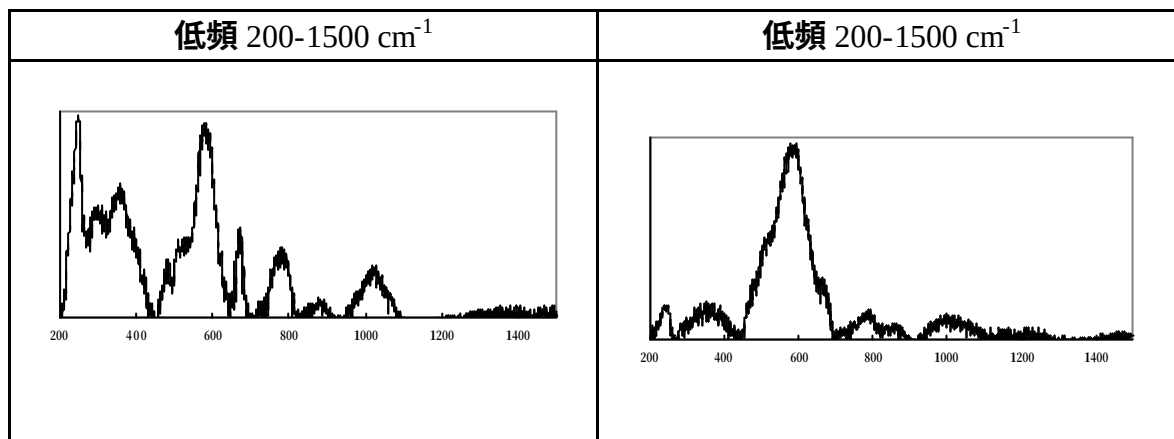


#3-14

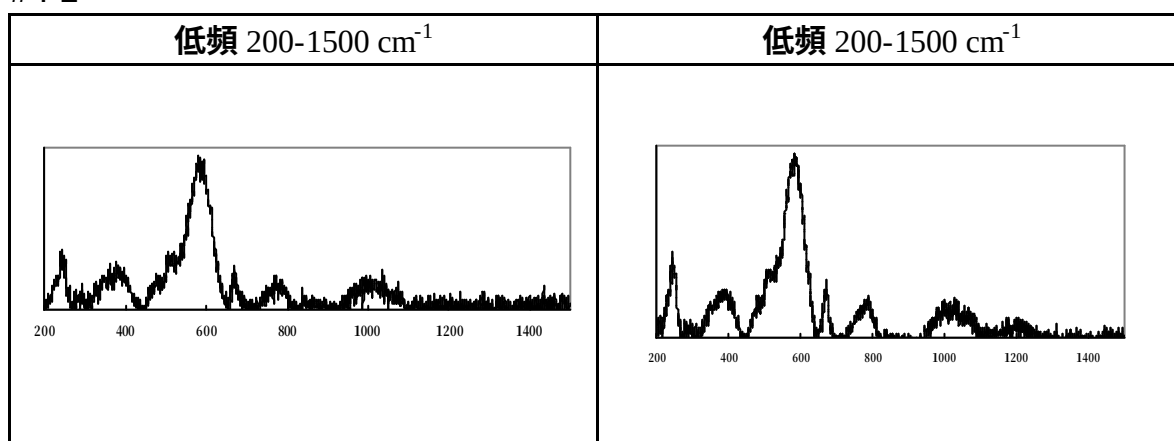


氧角閃石（Oxyhornblende）系列

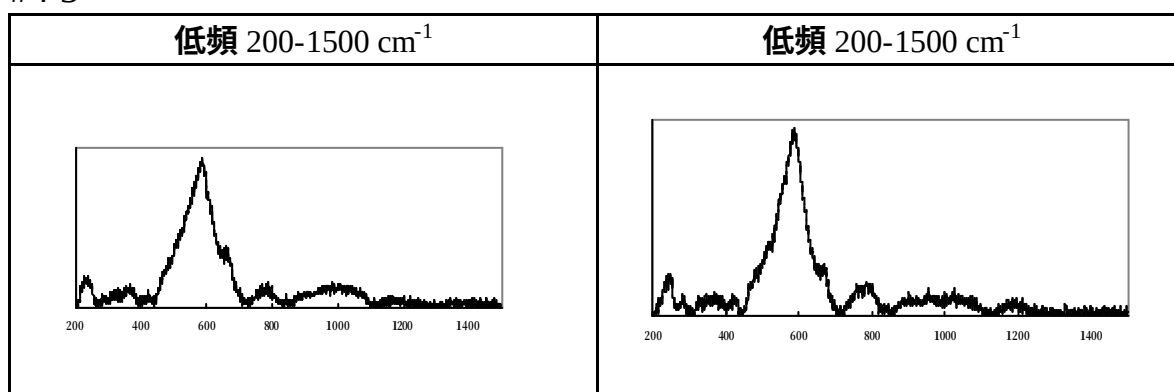
#4-1（縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)



#4-2



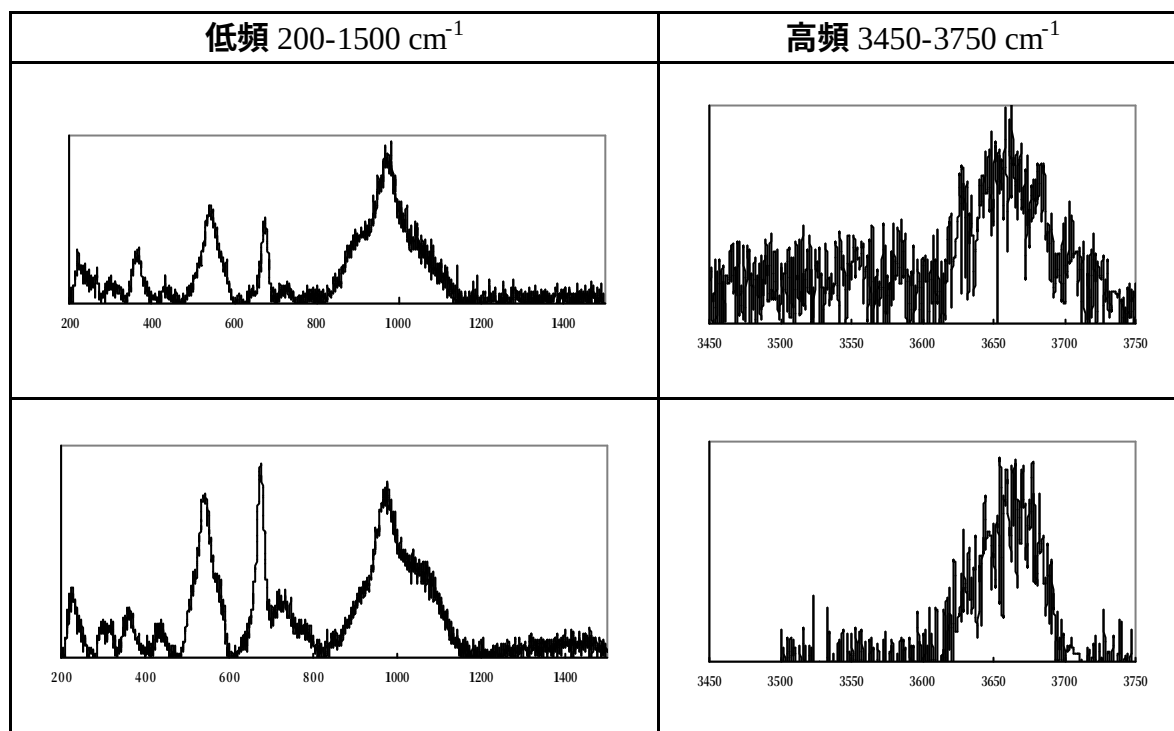
#4-3



三、 鈉鈣質角閃石類

(Sodic-Calcic Amphiboles)

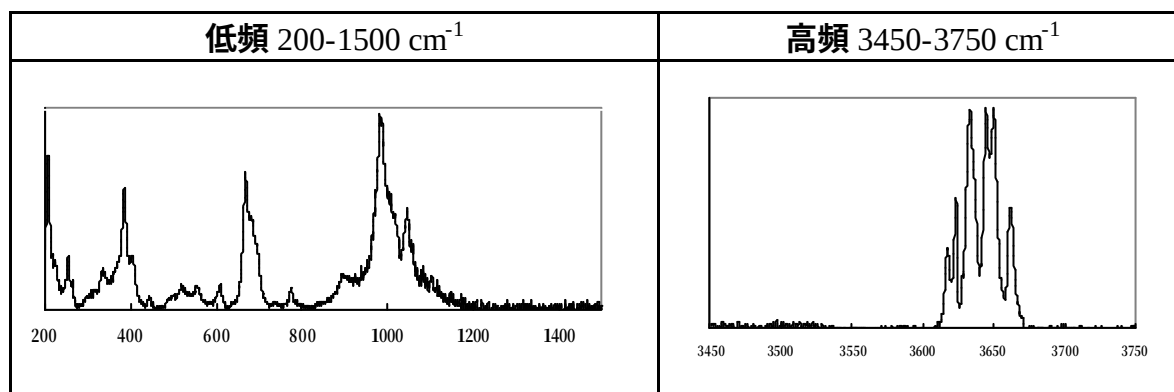
#5-1 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)

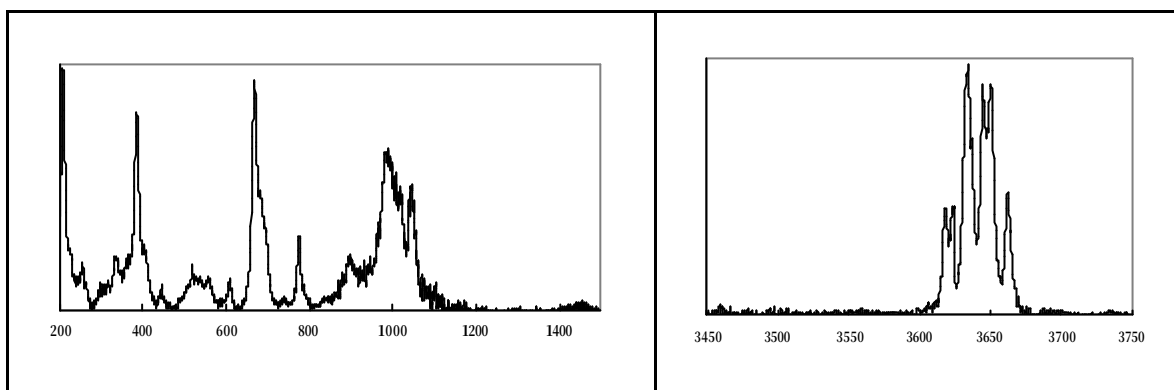


四、 鈉質角閃石類

(Sodic Amphiboles)

#6-1 (縱軸單位為 Raman Shift (cm^{-1})、橫軸單位為 Intensity (a.u.)。)





#6-2

