

國立臺灣博物館97年度研究計畫報告

出土閃玉之白化現象研究-硬度及拉曼光譜之研究

Study of whitened nephrite article-Hardness and Raman Spectra of the Nephrite



執行人：方建能

典藏管理組

本年度期程：97年01月01日至97年12月31日止

總計劃期程：97年01月01日至98年12月31日止

目錄

一、 中文摘要.....	3
二、 英文摘要.....	4
三、 前言.....	5
四、 研究材料.....	7
五、 研究方法.....	11
六、 結果.....	13
七、 討論與結論.....	15
八、 參考文獻.....	22

出土閃玉之白化現象研究-硬度及拉曼光譜之研究

方建能

摘要

根據前人研究資料顯示，新鮮的閃玉摩氏硬度在 5 至 7 之間，經過風化作用的閃玉的硬度會變低，台灣花蓮縣出土卑南文化時代閃玉玉器也有這樣的現象。本研究選擇卑南文化時代閃玉玉器廢料標本，進行維克氏硬度量測，以了解歷經長時間掩埋後，閃玉的硬度變化情形。

在 12 件閃玉玉器廢料標本進行量測的實驗中，使用拉曼光譜儀鑑定閃玉礦物種類及維克氏硬度計測定硬度。研究結果顯示 12 件閃玉標本礦物種類大致分屬透閃石及陽起石閃玉，大致在其 $b(010)$ 結晶面之維克氏硬度由 710 降至 405-67，相當於摩氏硬度由 5.8 降至 4.6-2.3，表示閃玉歷經數千年掩埋於土壤或暴露大氣中，其硬度已明顯降低。

本文並探討 Dana 與 Deer 等人所列之閃玉摩氏硬度並非新鮮的台灣、紐西蘭及中國大陸之閃玉的硬度之原因。

關鍵詞：臺灣，卑南文化，閃玉，硬度，拉曼光譜

Study of whitened nephrite article-Hardness and Raman Spectra of the Nephrite

Fang Jiann-Neng

Abstract

Various studies show that the Mohs hardness scale of fresh nephrite is between 5 to 7. Through weathering, the hardness of nephrite is reduced. The same effect is found in the nephrite artifacts excavated from the Peinan Culture site in Taiwan.

In this study, 12 fragment samples of nephrite wares from the Pin-lin site in the Hualien county of Taiwan were selected and measured by a Vickers hardness tester and a Raman spectrometer. The purpose was to examine the hardness and make appraisals of those minerals. The results reveal that these nephrite samples are of tremolite and actinolite, with hardness on $b(010)$ crystallographic face reduced from 710 to 405-67, equivalent to Mohs scale from 5.8 to 4.6-2.3. Evidently, after approximately 3,500 years of underground burying, the hardness of the polished nephrite was significantly reduced.

This paper also discusses the reason that the Mohs hardness of nephrites given by Dana and Deer et al. is not that of the fresh nephrites from Taiwan, New Zealand and mainland China.

Key words: Taiwan, Peinan Culture, Nephrite, Hardness, Raman Spectra

前言

玉是八千年來最能代表中華文化的物質，也是國人最喜愛珍藏與佩帶的寶石。歷年於故宮及各大博物館的典藏展示，與各遺址所出土的文物，就有為數眾多的玉器。這些歷經數千埋藏與保存的玉器，其材質種類與物性的變化，也是文物保存相當重要的一環。在清朝晚葉以前的玉，有廣義與狹義兩種說法。廣義的玉可以依據東漢許慎的「說文解字」，稱玉為「石之美者」，也就是說漂亮的石頭就是玉，然而漂亮的標準則隨人而異，所以此說並不科學。根據古墓出土的器物判斷，楊伯達【1】及錢憲和等人【2】指出古代的玉石主要包括透閃石、陽起石、蛇紋石、石英（含水晶、瑪瑙與玉髓）及土耳其玉（松石或綠松石）。聞廣【3】更指出古墓出土的古器物材質，包括超過二十種的礦物。而狹義的玉是專指今日礦物學所指的寶石級的閃玉（Nephrite）及輝玉（Jadeite）。

由 E.S. Dana 在 1898 年【4】所著的號稱礦物學聖經的「A Textbook of Mineralogy」，Nephrite 被定義為一種堅韌緻密而細粒的透閃石或陽起石，許多礦物學或寶石學書以此作為 Nephrite 定義的主要依據；此書又將 Nephrite 歸類為玉（Jade）之一種。Dana 以為 Nephrite 的硬度為 6 至 6½，而 Jadeite 為 6 至 7，所以日人將 Nephrite 譯為軟玉，Jadeite 則譯為硬玉，國人數十年前多依此譯名。譚立平等人【5】在 1978 年指出過去以摩氏硬度計量測的方法不準確，而過去的硬度測定祇針對少數特定標本，因而部份所謂「軟玉」比「硬玉」都硬，這種不合理的譯名應該更改。

台大地質科學系譚立平【6】根據其所屬礦物種類不同，重新加以分類命名，即將礦物種類屬於 Amphibole（閃石類）的 Nephrite 稱為閃玉，此 Amphibole 包括由透閃石和陽起石的固溶體系列；而將礦物種類屬於 Pyroxene（輝石類）的 Jadeite 稱為輝玉，目前此種中文譯稱已廣為認可使用【7】。

臺灣花蓮坪林地區一般以為是台東卑南玉器的製作場【8】，本研究選擇由該區出土的閃玉玉器及廢料標本，配合拉曼光譜儀以鑑定樣品的材質（礦物種類），也就是希望硬度的比較是在相同礦物種類的基準上；進而建立針對珍貴玉石器物硬度的分析模式。這就是本研究的目的。

研究材料

為了要了解台灣卑南文化時代出土閃玉玉器的硬度，有幾個問題要先提出說明：1.卑南文化出土閃玉玉器，其玉器母材來源應是臺灣東部出產的閃玉【9】。但台灣閃玉常含有蛇紋石、滑石、鉻鐵礦等多種礦物包體【10】，這些包體的硬度比閃玉低。所以要確定進行硬度測定的實驗點都是閃玉，而不是包體；2.要進行絕對硬度實驗時，實驗樣品必須有已磨平之光滑面才能進行，如此得到的硬度數據方能正確而精準，但如果是用出土之玉加以磨平的程序，則會磨掉器物已風化變軟的表面，其硬度數據值得懷疑，所以本研究挑選在出土時已具有古代磨平光滑面的標本，以便得到正確的硬度數據加以比較；3.由於譚立平等【5】以偏光顯微鏡觀察，發現台灣有些閃玉的結晶在有方向性的排列，在各方向之硬度不同，而在 $b(010)$ 晶面的，通常就是扁平閃玉塊的扁平方向，此現象亦已經 X 光繞射方法鑑定。所以本研究皆選擇標本之 $b(010)$ 結晶面（即扁平面）測定，以便比較討論。

本次實驗標本來自屬花蓮縣萬榮鄉西林村附近坪林地區的卑南文化時代遺址，其位置約於北緯 23 度 48 分 25 秒；東經 121 度 25 分 47 秒，海拔高度在 200 300 公尺之間。該區為壽豐溪流域的低位河階地形，分佈範圍估計約長 500 公尺，寬 800 公尺。該遺址從日據時期開始，即見於鹿野忠雄的調查記錄，此後有劉茂源做過發掘，以及多位考古學者的調查研究【8】。該處的地表上和地下淺層散佈著各種史前的玉料、玉器與玉廢材，故被推測可能是一處過去的玉器製造場所，但現在則作為旱地種作玉米。玉廢材等有時埋在

地下，有時翻土後被掀至地面。玉石可能源自坪林附近的知阿干溪和往北約 10 公里的荖溪河川的閃玉礫石，一般又認為其內涵屬於史前時代分布於花東地區的卑南文化，這個文化期約自 5,300 至 2,300 年之前【9】，而最興盛期約在距今 3000 多年前，卑南文化時代遺址的出土遺留可為其典型，其中如板岩組合成的石板棺及大量的玉器都是主要特色。

本研究挑選 12 件出土時已具有扁平的磨光面的閃玉廢料標本（圖 1）以方便量測，其尺寸及描述如表 1 所列。12 件標本以肉眼觀察，皆有受風化作用影響，編號 3、9 及 11 號標本白化現象明顯。

圖 1. 12 件閃玉廢料標本圖示

Figure 1. Photos of 12 samples of the wastes of the nephrite artifacts.

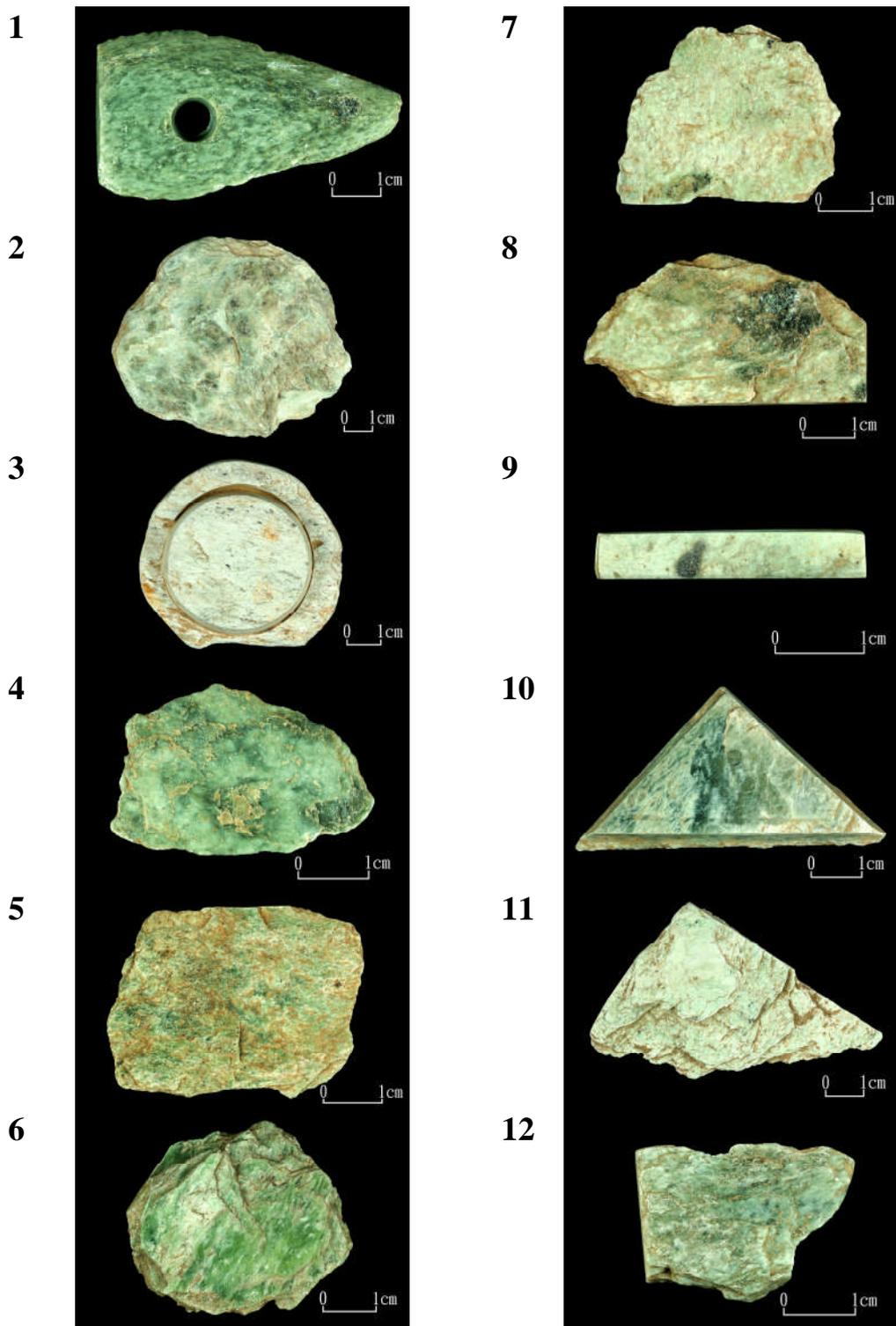


表 1. 12 件閃玉廢料標本尺寸及描述

Table 1. Sizes and descriptions of 12 samples of nephrite wastes.

標本 編號	尺寸 (長 × 寬 × 高mm)	描述
1	54.6×6.4×30.9	矛頭玉片
2	90.2×10.8×79.8	板狀廢料玉片
3	70.5×18.6×65.2	圓核廢料玉片，白化現象明顯
4	33.2×2.4×21.9	板狀廢料玉片
5	47.8×4.1×36.7	板狀廢料玉片
6	42.5×8.9×40.8	板狀廢料玉片
7	42.3×4.7×33.7	板狀廢料玉片
8	53.8×4.1×29.4	板狀廢料玉片
9	32.9×5.6×7	長柱狀廢料玉片，白化現象明顯
10	52.7×13×28	三角板狀廢料玉片
11	96.7×16.6×58.5	三角板狀廢料玉片，白化現象明顯
12	30.1×3.5×22.3	板狀廢料玉片

研究方法

本研究主要使用儀器為測量絕對硬度用的維克氏 (Vickers) 硬度計及鑑定礦物種類的拉曼光譜儀 (Raman spectrometer) 兩項儀器。以拉曼光譜儀分析鑑定其礦物種類，如非閃玉礦物者，其硬度不予測定。

硬度實驗使用國立台灣大學地質科學系的日本 Matsuzawa Seiki 公司製造的維克氏硬度計。維克氏硬度試驗於西元 1925 年由英國 R. Smith 及 G. Sandland 所發明的，使用金剛石正方錐為壓痕器。維克氏試驗之原理係將壓痕器以荷重為 300 公克 (gf) 壓入樣品表面，加壓時間 10 秒，使之產生正方形之壓痕，用計測用顯微鏡以 0.001mm 單位測定壓痕兩對角線之長度，求其平均長度 d 值，再經換算即得維克氏硬度值 H_v 。每一標本測 10 點，計算其平均 H_v 值。測量數值換算公式如下：

$$\begin{aligned} H_v &= P/A \\ &= (2P \sin 136^\circ / 2) / d^2 \\ &= 1.8544 (P / d^2) \end{aligned}$$

其中

H_v : 維氏硬度值(kgf/mm²)

P : 作用負荷 kgf²)

A : 壓痕表面積 (mm²)

:對角線夾角 136°

d : 壓痕的對角線長度 (mm)

a : 量測接目鏡的讀值

當採用 40 倍的物鏡觀察時， $d = a / 2$ ($d : \mu m$)

$$Hv = 1854.4 (P / (a / 2)^2)$$

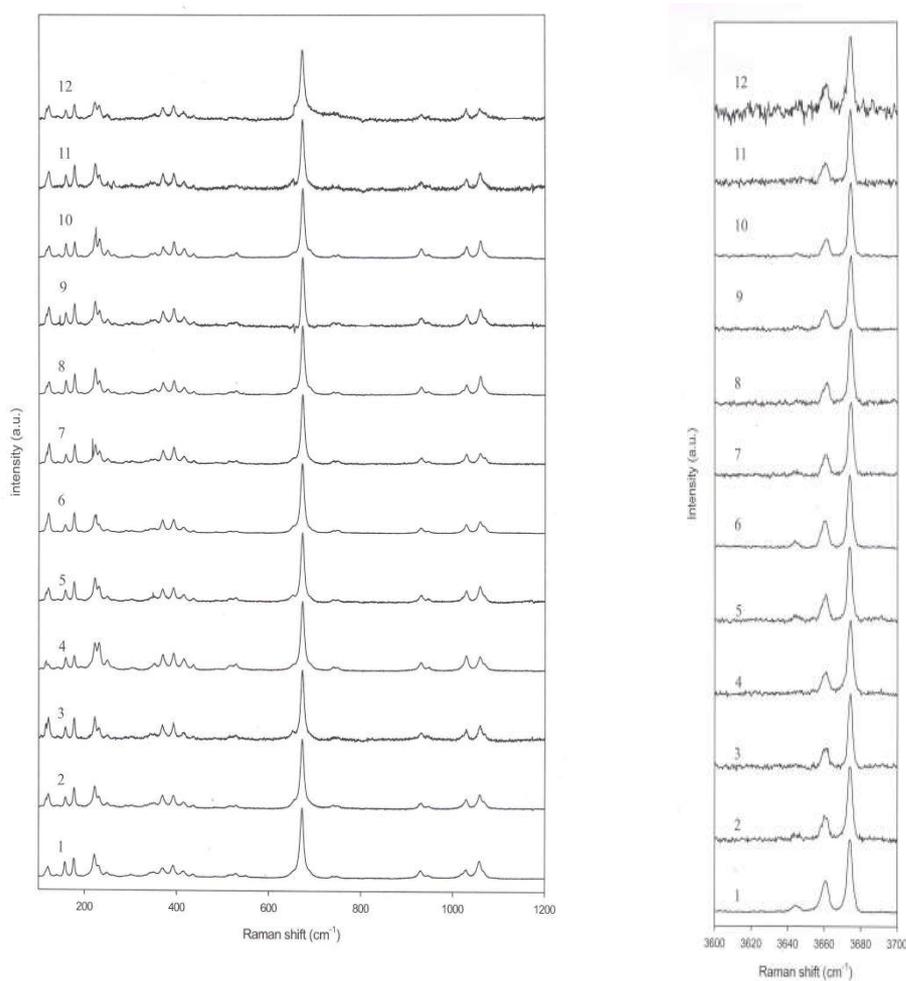
拉曼光譜分析利用國立臺灣博物館之 Jobin Yvon 拉曼光譜儀 (UV-VIS LABRAM HR)，主要配備 17 mW 綠光 (514.5 nm) 的氬離子雷射，標靶直徑約為 2 微米，解析度 0.5 cm^{-1} per pixels，分析範圍依據閃玉的特性，分別設定在低頻位置 $100\text{-}1200 \text{ cm}^{-1}$ ，高頻位置在 $3600\text{-}3700 \text{ cm}^{-1}$ ，誤差 $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$ ，顯微鏡目鏡使用 100 倍鏡頭。近年來拉曼光譜儀已成為古器物與玉石鑑定的新利器，其最大好處是非破壞性，測定時不需要從古器物與玉石樣品上取樣，也不需要進行特殊的樣本表面處理(包括拋光、鍍膜)，只要控制激發光源的能量，被測量的古器物件可以做到絲毫無損，無論是大宗物件或是細微標本均可測量，操作相當簡便，一個測點常只要數分鐘即可得到實驗數據，判別非常迅速，是快速且具科學證據力的鑑定工具。本研究即利用拉曼光譜儀，確認這些經硬度計測定之測定點皆為相同礦物種類，避免因不同礦物種類造成硬度數值差異所出現誤判的疑慮。

結果

本研究利用拉曼光譜儀分析鑑定 12 件卑南文化遺址的閃玉玉器廢料標本，分兩段量測待測點之拉曼頻譜，低頻位置在 $100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ ，高頻位置在 $3600\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ ，其結果分見圖 2，由拉曼光譜頻譜位置對比。

本研究樣品之拉曼峰為：221, 230, 246, 286, 301, 351, 368, 391, 413, 435, 528, 654, 673, 737, 748, 929, 946, 1027, 1057, 3645, 3660, 3675 (底線標示為研究用主要的拉曼峰之波數)。

圖 2. 12 件閃玉廢料標本拉曼頻譜
Figure 2. Raman Spectra of 12 samples.



依 Xu et al.【11】及沈俊生【12】等人研究，閃玉的拉曼光譜有 671 cm^{-1} （強度 100）， 225 ± 5 （22）， 386 ± 9 （15）， 1024 ± 4 （14）， 366 ± 3 （12）， 175 ± 5 （12）， 3643 ± 3 （最強）， 3657 ± 4 （中）， 3673 ± 4 （弱）等波峰。由拉曼光譜對比研究證明本研究標本皆為閃玉。

討論與結論

在古玉研究中，如何正確地區別閃玉是透閃石或陽起石是一個很重要的問題。純透閃石(Tremolite)化學方程式是 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ，而陽起石(Actinolite)的定義則變化極大，若不說清楚讀者可能不知何指？最初 R.Kirwan 於 1794 年【13】在 *Elements of Mineralogy* 一書中首先提出 Actynolite 這個礦物，然後 J.D.Dana 於 1837 年【14】加以修正，改名為 Actinolite，將其化學成份定為 $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{OH})_2(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$ ，然而在 1959 年哥倫比亞大學的 P.F. Kerr【15】將 Actinolite 化學方程式改定為 $\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 。Kerr 的 *Optical Mineralogy* 一書廣泛的在日本及台灣使用，所以台灣地質界數十年來均使用此一定義。直至 1978 年，Tan *et al.*【5】開始使用 Deer *et al.*(1963)【16】的定義，而同年 B.E.Leake【17】也提出另一定義，後者為國際礦物學會(International Mineralogical Association)採納，使用至今【18】。Actinolite 的定義簡述如次：

1837	J.D. Dana	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{OH})_2(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$
1946	N. Suidius	理論上，含鐵份子端成份 100%的礦物
	【19】	稱 Ferroactinolite $\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
1959	P.F. Kerr	Actinolite 是含鐵份子端成份 50-100%
1963	Deer <i>et al.</i>	Actinolite 含鐵份子端成份 20-80%
1978	Leake	Actinolite 含鐵份子端成份 11-50%， Tremolite 0-11%，Ferroactinolite 50-

100%

這些演變詳見 Clark【20】、Kerr【15】及 Fleischer【18】。Tremolite-Actinolite-Ferroactinolite 為 Mg-Fe-Al 閃石類之固溶體。

徐濟安等人【11】曾經指出透閃石在高頻之拉曼光譜的頻譜中代表 OH 拉張模的 3600 cm^{-1} 波段附近，只有一個拉曼峰在 3673 cm^{-1} 附近出現。Fe 在取代晶格中 Mg 原子的同時，造成透閃石晶格中對稱性的破壞，而反應在晶格上的現象則是高頻中 OH 拉張模第二個，甚至第三個拉曼峰的出現【12】。而隨這第二、第三峰的出現，標誌著由於 Fe 可全部含量增加所造成的由透閃石向陽起石的變化。因此定義透閃石為只具有一個 OH 拉張模拉曼峰之成份，而將 Fe 含量高到造成兩個 OH 拉張模拉曼峰之成份者定義為陽起石。

由中央研究院徐濟安及黃怡禎所指導的台灣大學研究生沈俊生【12】將 21 個透閃石及陽起石的拉曼高頻光譜($3500\text{-}3800\text{cm}^{-1}$)列入他的碩士論文的圖十四。這些閃石類的 Mg mole % 自 99.4% 至 79.0%，即 Fe mole % 自 0.6% 至 21%。由圖十四可見，Mg mole % 高於 97.8% 的，只有一個波峰。隨 Fe 的增加或 Mg 的減少，在 Mg mole % 低於 92.2% 時，另一波峰出現，而且愈來愈明顯。比對沈【12】的圖十四及本文的圖二，本文所研究的 12 件卑南古玉的拉曼高頻光譜波峰，大致與沈的 Fe mole % 約 11 的相似。換言之，卑南古玉的礦物大致為透閃石/陽起石分界點的成份，這顯示卑南古玉的礦物成份大致與花蓮豐田的閃玉相似【5】。此一研究大致與徐濟安【11】的初步研究相

同。

以維克氏硬度計分析 12 件卑南文化時代遺址的閃玉玉器廢料標本硬度結果如表二所示，維克氏硬度值（Hv）也同時換算成摩氏硬度值（Hm）。

表 2. 本研究維克氏硬度計實驗數據。

Table 2. Experiment data of hardness in this research.

編號	exp 1	exp 2	exp 3	exp 4	exp 5	exp 6	exp 7	exp 8	exp 9	exp 10	Hv*	Hm**
1	107	110	89.1	114	107	102	114	120	120	117	109	3.0
2	252	287	301	287	287	263	275	263	252	263	274	4.2
3	61	70	62	70	73	69	70	66	64	69	67	2.3
4	232	275	171	165	184	132	124	120	155	145	173	3.8
5	263	348	406	348	579	366	454	406	385	315	395	4.6
6	263	366	331	366	287	242	287	579	275	334	333	4.4
7	890	511	618	454	198	206	177	263	331	214	405	4.6
8	177	40	57.9	52.4	28	38.6	37.4	56.8	96.3	68.7	65	2.3
9	86.9	481	177	242	511	177	214	315	348	331	284	4.3
10	315	315	191	232	165	366	275	331	263	206	273	4.2
11	214	385	263	206	301	263	385	348	275	242	293	4.3
12	232	287	206	223	214	242	348	315	252	257	258	4.2

*Hv 代表維克氏硬度平均值

**Hm 代表換算之摩氏硬度平均值

有關閃玉的硬度，前人有許多的資料。本文之緒文中已提到 E.S. Dana【4】，在 1898 年所著的「A Textbook of Mineralogy」中提到 Nephrite 的硬度為 6 至 6½；1963 年 Deer 等人【16】在「Rock Forming Minerals」鉅著中，重新修定 Nephrite 的硬度為 5 至 6。

相較於 Dana【4】及 Deer 等人【16】以較模糊的摩氏硬度來表示，近年有比較準確的維克氏硬度的數據出現。根據 Hutchison 於 1973 的研究【21】，摩氏硬度表之 2、3、4、5、6 和 7 之硬度分別約列相等維克氏硬度

50、110、190、550、750 及 1100。本文的維克氏及摩氏硬度值換算，係依 Hutchison 引用之數值。譚立平等人【5】發現台灣有些閃玉的纖維有方向性的排列，在不同晶軸方向有不同之硬度表現，他們利用維克氏硬度計在不同晶軸方向各量 10 次後的平均值相當摩氏硬度的數值如下：在 a (100) 結晶面為 7.1，b (010) 結晶面為 5.8，c (001) 結晶面為 6.1。Beck 於 1984 年【22】在「New Zealand Jade」書中也到紐西蘭閃玉的硬度一般是 6.5，部份則約為 7。楊伯達 1991 年【23】在「中國和闐玉」一書中指出和闐玉的硬度約 6.5-6.9，于闐阿拉瑪斯白玉的硬度是 6.5-6.7，青白玉 6.6-6.8，青玉 6.5-6.9。因此綜合台灣、紐西蘭和中國大陸的閃玉資料得知，上述新鮮閃玉硬度平均大致是約在 6-7 之間，與上述 Dana 及 Deer 等人不同。譚、Beck、楊等人以維克氏硬度計測量硬度，應該比 Dana 及 Deer 諸人以老式摩氏硬度計為準。

閃玉(Yu 或西人所稱之 nephrite)不是礦物的單晶，而是透閃石/陽起石的微晶集合體。生成玉的環境，一般地質學家均指出是低溫高壓(Low T / High P)。在高壓之下，微晶被壓實，變得緻密，硬度高。當玉在地下被採出，或為河床中的巨礫開採後被鋸成薄片之時，壓力減低，微晶變鬆散，密度低，因而硬度亦隨之變低。

最明顯的例子是台灣貓眼玉的戒指面，通常其底面平行 b(010)結晶面的方向，以往珠寶商常將這些戒指面的底面黏在紙上發售。通常經過 5-10 年，將貓眼玉戒指面從厚紙上撕下時時常剝落一小薄片的貓眼玉，可見閃玉很容易

自 b(010)面剝落。

有一個例子是貓眼閃玉的硬度在儲存 20 年後的下落。譚立平等在 1977 年測定一塊貓眼閃玉，維克氏硬度 10 次，平均之，換算摩氏硬度為 5.8，此一閃玉是以膠鑲嵌在直徑約 1 英吋的銅套中。時至 1997 年，再以維克氏硬度計測定此一標本 10 次，平均摩氏硬度，已降至 5.0。

硬度降低最明顯的例子是在台灣大學人類學系一塊卑南古玉編碼 PN2038【9】。在這塊古玉廢料之上，有一條細脈。由結構上觀察，也是貓眼玉，這種現象在花蓮豐田的閃玉礦中常見。然而，這條貓眼玉細脈之風化呈白色。譚立平以手指甲輕劃，得一道深痕，顯然較硬度為 1 度的滑石為軟。上述說明貓眼玉易在 b(010)晶面方向剝離成薄片，在卑南古墓中加速風化，硬度陡降。

摩氏硬度計的原理是以一組礦物標準，刮磨欲測硬度的礦物平面。不被刮損之礦物，其硬度比此標準硬，能被刮出一道細痕的，則此一被測礦物的硬度比標準低。經反覆測試，而得的結果。例如長石硬度標準為 6，石英標準為 7，比長石硬而比石英軟的某一閃玉的硬度即為 6½。上述 Dana 和 Deer 等人【4】【16】所測的硬度是這樣測出來的，誤差通常為½度。維克氏硬度的測定已如前述，每次測定 10 次，只記錄此 10 次之平均值。據筆者等之經驗，若換其為摩氏硬度，誤差通常在 0.1 度之內。

以閃玉之最高摩氏硬度而論，上述 Dana【4】為 6.5 左右，Deer 等人【16】為 6；而 Tan *et al.*【5】為 7.1，Beck 為 7【22】，楊伯達【23】為

6.9。彼此最大差異可達 1.1 度左右。這種較大的差異，應該不是由於實驗方法的不同，而是可能由於下列原因所造成。

由上述說明，閃玉開採出來以後，不必經過風化作用，過了 20 年，其硬度就可以有明顯的降低。在前述不產閃玉的美東(Dana)【4】及英國(Deer *et al.*)【16】，他們所測的閃玉，硬度顯然較生產閃玉的台灣(Tan *et al.*)【5】、紐西蘭(Beck)【22】及中國大陸(楊伯達)【23】為低。這些摩氏硬度的差異，遠比實驗誤差為大。硬度數值不同的原因，推測是 Dana 和 Deer 等使用博物館或實驗室儲藏了幾十年的閃玉標本，其中的透閃石/陽起石纖維狀微晶的織造或連鎖構造已經發生鬆散，導致硬度略微下降。

徐濟安(J.A. Xu)發現在高壓之下，礦物的密度會增加。如壓力減低，則密度亦會再下降(1996 年口頭討論)。理論上密度高，單位面積的原子數目，硬度會略高；密度低時，單位面積的原子數目減少，硬度就略低，這也是硬度在減壓下可能變低的原因之一。

本研究之 12 件卑南文化時代出土的閃玉玉器廢料標本測量 $b(010)$ 結晶面之硬度，其中以編號測量結果 3 及編號 8 之硬度 2.3 為最低，編號 7 之硬度 4.6 為最高。此結果表示閃玉在琢磨後歷經數千年掩埋於地底及暴露於大氣中，其絕對硬度明顯降低。

以肉眼觀察，編號 3、編號 9 及編號 11 閃玉標本白化現象明顯，但其編號 9 及編號 11 標本硬度皆為 4.3，未如編號 3 之硬度降至 2.3。

聞廣【3】觀察到良渚殘刻花管表層變色為『雞骨白』與『象牙白』，同時比重降至 2.41，表層硬度劇降。錢與林【24】在電子顯微鏡下觀察白化的玉器，發現晶體的排列、緻密度等在新鮮的玉石與白化的玉石中是不同的，新鮮玉石的晶體為細葉片狀排列緻密，經風化白化後即變得疏鬆，同時晶形改變為長柱狀或粗纖維狀【25】【26】。也就是說礦物晶體間的空隙大量增加，是造成白化的原因；而改變的程度與風化程度有關。透閃石玉石組成礦物的顯微結構在受到次生變化後，礦物成分未變，但顯微結構明顯地變得疏鬆，因而孔隙度增加，造成折光率改變，而造成外表顏色改變。更需要一提的是這時所測量的已不是礦物的比重，而是玉石的容積（總體）密度（bulk density），它因顯微結構疏鬆後孔隙度加大，而造成密度降低，因此用所謂的比重來鑑定受沁了的玉石的組成礦物的種類有時是不可靠的。而這時的硬度，應稱為視硬度（apparent hardness），僅是玉石的表面，而不是礦物或礦物集合體的實際硬度【23】。

總結來說，古玉硬度的降低，除了因為透閃石/陽起石的纖維狀微晶，在玉石脫離礦脈之後，壓力減低所造成的鬆散與風化作用的加速所致；表面部分礦物的溶蝕，也可造成視硬度的降低【24】。

參考文獻

- 【1】楊伯達，1992，中國古代玉器概述，中國玉器全集，河北美術出版社，第2期，頁1-2。
- 【2】錢憲和，譚立平，羅煥記，林泗濱，徐濟安，黃怡禎，余炳盛，方建能，1998，玉質的認識與鑑定，中國古玉鑑--製作方法與礦物鑑定，錢憲和與方建能編輯，初版，地球出版社，台北，頁1-12。
- 【3】閻廣，1993，玉與，故宮文物月刊，第124期，頁126-137。
- 【4】Dana, E.S., 1898, A Textbook of Mineralogy. 1st ed. John Wiley and Sons, New York.
- 【5】Tan, L.P., C. Wang Lee, and P.L. Tien, 1978, Mineralogy of the Fengtien nephrite Deposits of Hualien, Taiwan. National Science Council Spec., Publ. No. 1, pp.1-30.
- 【6】譚立平，1984，寶石學，徐氏基金會，台北，頁131-161。
- 【7】譚立平，黃怡禎，徐濟安，陳其瑞，沈俊生，1998，閃玉（角閃玉、軟玉），中國古玉鑑--製作方法與礦物鑑定，錢憲和與方建能編輯，初版，地球出版社，台北，頁33-40。
- 【8】宋文薰，尹建中，黃士強，連照美，臧振華，陳仲玉，劉益昌，1992，台灣地區重要考古遺址初步評估第一階段研究報告，內政部，行政院文化建設委員會委託，中國民族學會執行，頁261-262。
- 【9】連照美，譚立平，余炳盛，1998，台灣卑南遺址出土玉器材料來源之初步研究，中國古玉鑑--製作方法與礦物鑑定，錢憲和與方建能編輯，初版，地球出版社，台北，頁41-50。
- 【10】Wang Lee, C., P.L. Tien, and T.F. Yui, 1978, Minerals Associated with the Nephrite in the Fengtien Area, Hualien, Taiwan. National Science Council Spec. Pub., No.1, pp.42-60.
- 【11】Xu, J.A., E. Huang, C.H. Chen, L.P. Tan. and B.S. Yu, 1996, A Raman Spectroscopic Study of Archaic Jades, Acta Geologica Taiwanica, No.32, pp.11-42.
- 【12】沈俊生，1997，閃玉之光譜學研究，國立台灣大學碩士論文，95頁。
- 【13】Kirwan, R., 1794, Elements of Mineralogy, 2nd Ed., Nichols, London, Vol. 1, 510p.
- 【14】Dana, J.D., 1837, System of Mineralogy, 1st ed., New Haven, 211p.

- 【15】 Kerr, P.F., 1959, *Optical Mineralogy*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 442p.
- 【16】 Deer, W., A., R.A. Howie, and M.A. Zussman, 1963, *Chain Silicates. Rock- Forming Minerals.*, Longmans, No.2, pp.249-262.
- 【17】 Leake, B.E., 1978, *Nomenclature of amphiboles*. *American Mineralogist*, No.63, 1023-1052.
- 【18】 Fleischer, Michael, 1991, *Glossary of Mineral Species*. The Mineral Record Inc., Tucson, 256p.
- 【19】 Sundius, N., 1946, *The Classification of the Hornblendes and the Solid Solution Relations in the Amphibole Group*. *Arsbok Sveriges Geol. Undershkning*, Vol. 40, No. 4, 36p.
- 【20】 Clark, A. M., 1993, *Hey's Mineral Index*. Chapman & Hall, 848p.
- 【21】 Hutchison, C.S., 1973, *Laboratory handbook of Petrographic Techniques*. New York: John Wiley, 507 p.
- 【22】 Beck, R.J., 1984, *New Zealand Jade*, Wellington. A.H. and A.W. Reed.
- 【23】 楊伯達, 1991, 中國和闐玉, 地球出版社, 頁 109。
- 【24】 錢憲和, 林泗濱, 1997, 透閃石玉器的次生變化初探, 台灣博物季刊, 第 16 卷, 第 2 期, 頁 42-49。
- 【25】 錢憲和, 1994, 古玉的玉質與製玉工藝技術--兼談古玉的鑑賞, 吳照明珠寶學刊, 第 18 期, 頁 46-58。
- 【26】 Tsien H.H., L.P. Tan. and J.G. Douglas, 1996, *Geology of Tremolite Rock and Petrofabrics of Archaic Jades*. in Tsien(ed.), *Mineralogical Studies of Archaic Jades*. *Acta Geol. Taiwanica*, No.32, pp.85-101.