

國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

博士論文

School of Forestry and Resource Conservation College of Bioresources  
and Agriculture

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

柳杉在不同生育地及疏伐作業之材質探討  
Properties of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)  
plantation from different growing sites and thinning  
treatments

陳勁豪

Jin-Hau Chen

指導教授：王松永 博士

Advisor: Song-Yung Wang, Ph.D.

中華民國 98 年 7 月

July, 2009

## 誌 謝

本論文係筆者在博士班七年的修業期間之研究結果，此段期間多承諸位師長及親朋好友之關懷與協助是能順利完成，特藉此表達衷心感謝之意。

在博士班的修業期間，承蒙恩師 王松永教授的悉心指導，無論在研究方向、資料蒐集、試驗進行、結果分析及論文撰寫方面，均蒙王老師多方教誨，謹致最誠懇之謝忱。

論文初稿承蒙劉正字老師、黃耀富老師、邱志明老師、林振榮老師、卓志隆老師、葉民權老師、張上鎮老師及蔡明哲老師之批閱斧正，使本論文更臻完美，特申萬分謝忱。

試驗進行期間，感謝法勤學長、崇彬學長、德新學長及詹明勳博士對試驗進行的全力支援及指導，對試驗結果分析的建議與指正，以及對論文撰寫的修正及指教；同時亦特別感謝幫忙試驗進行的佳偉、育謙、佩鈺、惠今、小鈞、承安、苑琳、敦傑、瑞宏、小卷、東霖等學弟妹，以及台大實驗林、台灣林業試驗所、德豐木業和曹師傅，因為有你們的幫忙、關心及勉勵，使得本試驗能夠如此順利的完成，在此併申十二萬分的謝意。其中特要感恩佩鈺和惠今，在日常生活上給在下許多的協助、鼓勵與同甘共苦，有你們真好。

最後感謝父母的栽培、支持與鼓勵，同時，更要感謝光平與小女姿好在這段時間內給我的支持、陪伴、鼓勵及許許多多的建議及幫助，使我能渡過愉快的博士班生活。僅以本成果獻給最敬愛父母、家人及所有關心我的人。

陳勁豪 謹致於

國立台灣大學森林環境暨資源學研究所  
生物材料物理研究室  
中華民國九十八年七月

## 摘 要

本研究針對棲蘭山區與對高岳山區的柳杉(*Cryptomeria japonica*)進行非破壞(超音波和表面硬度儀)與破壞性檢測(動彈性模數和縱向壓縮強度),藉以瞭解不同疏伐處理(帶狀疏伐和下層疏伐)與同一林分中不同生長狀況(優、中、劣勢木)對機械性質、木材組織與固碳量的影響,進而建立起破壞與非破壞試驗的關係。

位於棲蘭山區不同帶狀疏伐強度的柳杉造林木試驗結果顯示:在機械性質部分,縱向超音波速度、徑向超音波速度、動彈性模數、縱向壓縮強度及木材表面刺入深度值,由分析的結果,沒有顯著性的差異存在;而在木材組織部分,年輪密度(RD)與早材密度(ED)、晚材密度(LD)、最低密度(Dmin)、最高密度(Dmax)及晚材率(LWP)之間有顯著正相關性存在。除此之外,同一地區不同條件兩樣區,在年輪密度、縱向超音波速度、木材表面刺入深度值、動彈性模數和縱向壓縮強度皆有顯著差異,同時邊材和心材在不同樣區,則有不同的結果。年輪密度與縱向壓縮強度間和動彈性模數與縱向壓縮強度間,都存在正相關,胸高直徑(DBH)與超音波波速間、木材表面刺入深度值與縱向壓縮強度間和木材表面刺入深度值與動彈性模數間,都存在負相關。

位於對高岳山區不同強度的下層疏伐對柳杉造林木的機械性質影響如下:以未處理區(不進行任何疏伐處理)的平均胸徑最小,同時其標準差又最大。伐採後原木縱向超音波波速在樹高方向與直徑方向各有四種型態的變化。此外,在對高岳山區也探討栽植密度的影響,在不同栽植密度 2200 株(Type A)與 3000 株(Type B)之間,有顯著的差異存在,且在抗壓強度與微破壞強度上,Type B 皆大於 Type A。成熟材與未熟材的強度不分軒輊。最後木材之抗壓強度與比重有顯著的線性正相關。在木材組織部分,栽植密度為 Type B 的平均管胞長度皆大於栽植密度為 Type A 的平均管胞長,成熟材管胞長也有此趨勢,而未成熟材管胞長則不一定;六區未成熟材管胞長與第一次疏伐後不同栽植密度下各區的管胞長度,皆沒有顯著差異,但栽植密度為 Type B 的管胞長度大於栽植密度為 Type

A 的管胞長度。管胞長會由髓心向樹皮方向增加，其長度與生長年齡呈現高度線性相關，約在 15-22 年之間趨於緩和，之後其長只有小幅度的變動並沒有明顯的增加。未成熟材及成熟材管胞的管胞長度，兩者有顯著差異。三種定年方法算出的成熟材與未成熟材境界約在 19 年左右，三種方法間沒有顯著的差異。

對高岳營林區平均每公頃的材積數為  $354.4 \text{ m}^3$ ，而此林分為 36 年生林分，換算為平均每年每公頃的樹幹材積固碳量約 2.45 ton。而樣木整體平均製材率為 39%。整體之總消耗電量而換算成釋出之碳素量為 8.93 kg，淨固碳重為 457.77 kg。棲蘭山的柳杉平均每年每公頃的樹幹材積固碳量約 2.38 ton，而對高岳營林區和棲蘭山的柳杉，兩者每年每公頃的固碳量無差。

當含水率低於纖維飽和點時，縱向抗壓強度與含水率間呈現負線性相關。若以 12% 含水率為基準，含水率每增減 1% 時，平均縱向抗壓強度減增 3.60%；若以絕乾含水率為基準時，當含水率增減 1% 時，平均縱向抗壓強度會減增 2.52%。含水率在高於纖維飽和點時，縱向抗壓強度與含水率沒有明顯的相關性。以破壞型態則以壓碎型抗壓破壞出現的頻率為最高，當碎裂型抗壓破壞出現時，其抗壓強度較大；而剪斷型抗壓破壞出現時，其抗壓強度較小。

**【關鍵詞】** 柳杉、疏伐、非破壞檢測、抗壓強度、固碳量

# Abstract

The study used nondestructive testing (ultrasonic instrument and Pilodyn) and destructive testing (longitudinal compressive strengths, LCS) to research the effect of different thinning treatments and grown condition (dominant, intermediate and suppressed trees) on the mechanical properties, wood anatomy and carbon storage of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) located at Chilanshan area and Dweigaoyuei area. Additionally, the study also established the relation between nondestructive and destructive testing.

The mechanical properties of Japanese cedar located at Chilanshan area with different strip thinning intensities showed that the longitudinal ultrasonic velocities, longitudinal dynamic moduli of elasticity (DMOE), radial ultrasonic velocities, radial DMOE, longitudinal compressive strengths and penetration depths subjected to stripe thinning of various intensities 16 years prior to the study were analyzed using the ANOVA method. No significant difference among the variables was detected. Positive correlations existed between the wood ring densities (RD) and earlywood densities (ED), latewood densities (LD), minimum densities (Dmin), maximum densities (Dmax), and latewood proportions (LWP), however.

Samples from 2 plots at the same region but with different growth conditions tended to significantly differ in densities, longitudinal ultrasonic velocities, surface hardness penetration depths, DMOE and longitudinal compressive strengths. Also, sapwood and heartwood from the different plots exhibited different results as well. Wood density correlated positively with the DMOE and compressive strengths. Whereas, DBH of the trees showed negative correlations with the ultrasonic velocities, wood surface hardness penetration depths correlated negatively the compressive strengths of the sapwood. So was that between the wood surface hardness penetration depth and their DMOE.

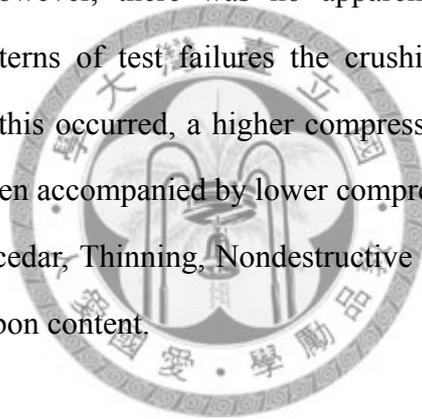
Japanese cedar trees from the untreated plots of the Dweigaoyuei experimental forest had the least DBHs and the greatest standard deviations. The harvested logs exhibited 4 types of ultrasonic velocity patterns each both along the steams and across the stems. Among the logs from different planting densities, there were marked difference between the Type A and Type B planting densities. All Type B logs had greater compressive strengths and micro destructive test strengths than those of Type A. There was no apparent distinction between mature wood and juvenile wood, however. The compressive strengths of the wood had a significant linear correlation with the wood densities. The influences of tending practices on the lengths of tracheids could be separated into the planting densities and thinning effects. The average tracheid lengths of planting density Type B were all greater than those of the Type A density. The tracheids of mature wood tended to maintain the trend. In juvenile wood, the pattern was indistinct. Juvenile tracheids from the 6 plots and those from the post-first thinning having different planting densities all were not significantly different. Yet, the tracheid lengths of trees from the planting density Type B were greater than those of the trees from planting density Type A. Tracheid lengths increased from pith outward to the bark, the lengths showed a highly linear correlation with the tree ages, which started to moderate between 15 to 22 years of age. Afterward, there were only minor fluctuations without notable increases. There were distinct differences between the tracheid lengths of the mature and juvenile woods. Boundary of mature and juvenile wood as determined by 3 different methods indicated that the transition occurred at ca. 19<sup>th</sup> year. There was no significant difference among the results of the methods.

The timber volume stocked at the Dweigaoyuei forest averaged 354.4 m<sup>3</sup>/ha. Based on the stand age of 36 years, it translated to an annual incremental tree stem carbon sequestration rate of 2.45 ton/ha. The sampled logs had an overall lumber output of 39%, and electricity consumption equal to 8.93 kg carbon emission. There was a net

carbon sequestration of 457.77 kg from the logs. On the other hand, Japanese cedar forest of Chilanshan averaged 2.38 ton/ha per year from increments of stem volumes. There were no differences between the forest carbon sequestration capacities of these 2 regional forests.

When the moisture content (MC) of the logs was below the fiber saturation point, there was a negative linear correlation between the MC and the longitudinal compressive strength. If MC of 12% was taken as the basis, every percentage increase in MC caused an increase of 3.6% in the average longitudinal compressive strength. If over-dry MC was taken as the basis, then every percentage change in MC entailed a modification of average longitudinal compressive strength of 2.52%. At MC above the fiber saturation point, however, there was no apparent correlation between the variables. As for the patterns of test failures the crushing failure occurred at the highest frequency. When this occurred, a higher compressive strength was observed. Whereas shear failures often accompanied by lower compressive strengths.

**【Key words】** Japanese cedar, Thinning, Nondestructive test, Compressive strength, Fixed carbon content.



# 目 錄

誌謝	i
摘要	ii
Abstract	iv
目錄	vii
表目錄	xi
圖目錄	xvii
I、前言	1
II、前人相關研究	5
(一) 非破壞性檢測之定義與種類	5
(二) 疏伐及修枝處理對於針葉樹材性質的影響	18
III、材料與方法	28
(一) 試驗地	28
1. 棲蘭山試驗地—不同帶寬之帶狀疏伐試驗地	28
2. 棲蘭山試驗地—未疏伐試驗地	29
3. 對高岳試驗地	29
(二) 試驗儀器與方法	30
1. 超音波測定儀 (Ultrasonic meter) 檢測	30
2. 木材表面穿透深度測定儀 (Pilodyn) 檢測	33
3. 固碳量計算 (Carbon fixation)	34
4. 微破壞試驗 (Fractometer testing)	35
5. 軟 X-ray	36
6. 抗壓試驗 (Compression testing)	40
7. 抗彎試驗	41
(1) 實大樑試材	41
(2) 無缺點小試材	41

8. 管胞長度與微纖維傾斜角試驗	42
9. 目視分等	44
(1) CNS14631 框組壁工法結構用製材乙種框組材分等標準	44
(2) CNS 444 製材之分等標準	46
10. 打音頻譜與振動試驗	47
(1) 打音頻譜 (Tap tone instrument, Tt)	47
(2) 振動 (Tap vibration instrument, Tv)	47
IV、結果與討論	48
(一) 棲蘭山試驗地—不同帶寬之帶狀疏伐試驗地	48
1. 胸高直徑 (DBH)	48
2. 立木超音波速動彈性模數及縱向微破壞抗壓強度	49
3. 年輪特徵值	52
4. 年輪特徵值之間的關係	55
5. 縱向微破壞抗壓強度在樹幹橫向的變異性	56
6. 年輪特徵值在樹幹橫向的變異性	57
(二) 棲蘭山試驗地—未疏伐試驗地	59
1. 立木狀態	59
(1) 立木之胸高直徑	59
(2) 第一區與第二區立木之各項性質比較	60
(3) 第一區與第二區立木不同位置量測之差異	61
(4) 第一區與第二區立木之各項性質之相關性比較	62
(5) 優中劣勢木立木之超音波波速、Pilodyn 與抗壓強度之比較	69
2. 小試材試驗	70
(1) 第一區與第二區邊材與心材的抗壓強度差異	70
(2) 優中劣勢木小試材之各項性質之比較	71
(3) 小試材試驗之各項性質之相關性	73
3. 九個年輪特徵值	79

(1) 優中劣勢木九個年輪特徵值之差異性	79
(2) 優中劣勢木之年輪數與年輪寬之關係	81
(3) 優中劣勢木之年輪數與年輪寬累加之關係	82
(4) 優中劣勢木之年輪數與年輪距髓心的距離相關性	83
(三) 對高岳試驗地	84
1. 不同栽植密度與下層疏伐強度	84
(1) 立木胸高直徑 (DBH)	84
(2) 栽植密度及不同疏伐度與木材密度之關係	84
(3) 不同疏伐度對超音波速之影響	87
(4) 栽植密度及不同疏伐度與抗壓強度及微破壞抗壓強度之關係	89
(5) DMOE 與 Pilodyn	92
(6) 不同疏伐度的木材密度在徑向之變化	93
2. 管胞長	96
(1) 成熟材與未成熟材及其界定年份與方法	96
a. 成熟材與未成熟材之界定	96
b. 年輪寬的變化	100
c. 利用年輪寬定年	102
d. 成熟材與未成熟材之強度	104
(2) 栽植密度與早晚材管胞長變化之關係	104
(3) 栽植密度、不同疏伐度與管胞長度之關係	107
3. 固碳量與製材率	111
(1) 立木材積與固碳量	111
(2) 柳杉材製材耗電量與製材率	113
4. 立木到製材品各階段之超音波波速檢測	118
(1) 立木與原木超音波	118
(2) 立木、原木、鼓型材與 2''*4'' 製材品之超音波波速比較	123
5. 製材分等非破壞與破壞強度	125

(1) CNS14631 分等標準	125
(2) CNS444 分等標準	126
(3) 超音波，機械分等	127
6. 木材縱向抗壓破壞類型	129
7. 含水率對強度之影響	130
(1) 抗壓強度與含水率	130
(2) FSP 以下與 FSP 以上之抗壓強度與密度	132
(3) 不同密度之含水率、抗壓強度與平均密度	133
(4) FSP 以下與 FSP 以上之不同密度群的抗壓強度與含水率	134
(5) 比強度與含水率	135
(6) 抗壓強度與氣乾密度	135
8. 邊材與心材之含水率與強度	137
(1) 邊材與心材之含水率	137
(2) 邊材與心材之強度	138
(四) 不同生育地之樣區比較	140
V、結論	145
VI、參考文獻	148

## 表 目 錄

表 1 森林每公頃每年之碳素涵存量 (ton/ha.yr) .....	3
Table 1 Carbon content of the forest	
表 2 國內曾採用之非破壞性檢測技術 .....	7
Table 2 Nondestructive testing techniques that have been used in Taiwan	
表 3 木材物理力學性質的分級 .....	23
Table 3 Grades of wood strength property	
表 4 各樣區疏伐處理程度 .....	30
Table 4 Situations of the sample sites` thinning treatments	
表 5 CNS14631 框組壁工法結構用製材分等標準 (乙種框組材) .....	44
Table 5 CNS14631 structural sawn lumber used in platform construction grading rules	
表 6 CNS 444 製材之分等 .....	46
Table 6 CNS444 grading rules for sawn lumber	
表 7 各樣區之樣木胸高直徑 (DBH) Tukey 分析 .....	48
Table 7 The DBH of the sample trees in various sites by Tukey analysis	
表 8 不同強度帶狀疏伐樣木之超音波速、動彈性模數、微破壞抗壓強度與刺入深度 .....	50
Table 8 Dynamic modulus of elasticity and compressive strength of standing trees obtained from different row thinning regimes	
表 9 不同帶狀疏伐立木之年輪九個特徵值 .....	54
Table 9 Nine ring characteristics of standing trees obtained from different row thinning regimes	
表 10 樣木年輪之九個特徵值間的相關係數 .....	55
Table 10 Coefficients of correlation among nine ring characteristics of sample trees	
表 11 未疏伐試驗地立木之胸高直徑 .....	59
Table 11 The DBH of the stands from unthinning forests.	

表 12 未疏伐優、中、劣勢木之胸高直徑比較表	60
Table 12 Compared with suppressed, middle, and dominant wood	
表 13 第一區與第二區樣木柳杉的各種性質比較	60
Table 13 Comparing the properties of Japanese-cedar between site 1 and site 2	
表 14 比較第一區與第二區樣木不同位置量測的差異	61
Table 14 Comparing the ultrasonic and pilodyn values at different positions between site1 and site2	
表 15 第一區與第二區樣木各項性質相關式	62
Table 15 Relations of the properties of standings from site 1 and site 2	
表 16 優、中、劣勢木超音波波速、抗壓強度之 Tukey 檢定分析	69
Table 16 Difference of ultrasonic wave velocity and compressive strength among dominant, intermedia and suppressed wood	
表 17 第一區與第二區木材邊材與心材的抗壓強度差異	71
Table 17 Comparing site 1 with site 2 the compression properties of sapwood and heartwood	
表 18 優、中、劣勢木小試材試驗之 Tukey 檢定分析	72
Table 18 Difference of sample wood's properties among dominant, intermedia, and suppressed wood	
表 19 未疏伐小試材試驗之 r 值分析表	73
Table 19 The r values of the sample wood properties	
表 20 優、中、劣勢木九個年輪特徵值之差異性	79
Table 20 Difference of the nine ring characteristics among dominant, intermedia and suppressed wood	
表 21 優、中、劣勢木之年輪數與年輪距髓心的距離相關性	83
Table 21 Relationships between distance from pith and ring numbers among dominant, intermediate and suppressed wood	
表 22 兩種不同栽植密度下之第 1~22 年生之密度與抗壓強度	85
Table 22 Density and compressive strength of wood from two initial spacing levels of	

plantations

表 23 兩種不同栽植密度下之第 23~32 年生之密度與抗壓強度 ..... 85

Table 23 Density and compressive strength of the 2 plantation spacing levels and low-thinning treatment

表 24 不同栽植密度與疏伐度處理之密度、抗壓強度與動彈性模數 ..... 86

Table 24 Density, compressive strength, and dynamic modulus of elasticity of the various plantation spacing levels and thinning treatments

表 25 各樣區橫向超音波之 Tukey 分析 ..... 87

Table 25 The difference of sample sites' transverse in ultrasonic wave velocity

表 26 不同栽植密度與疏伐度下的密度、抗壓強度、動彈性模數和刺入深度...92

Table 26 Density, compressive strength, dynamic modulus of elasticity, and penetration depth of the various plantation spacings and thinning treatments

表 27 柳杉成熟材與未成熟材之界定 ..... 98

Table 27 To distinguish mature and juvenile wood

表 28 各樣區管胞長度 (y) 與距髓心年輪 (x) 之單對數趨勢線 ..... 100

Table 28 The logarithmic line of the relationship between sites' tracheid and distance from pith

表 29 年輪寬與距髓心距離之迴歸式與其  $R^2$  值 ..... 100

Table 29 The regression and  $R^2$  of the ring width in radial direction

表 30 肥大生長變化率 ..... 102

Table 30 Varied ratio of the added ring width

表 31 三種試驗方法判定成熟材與未成熟材境界 ..... 103

Table 31 Three kinds methods distinguished mature and juvenile wood

表 32 未成熟材與成熟材抗壓強度之 t 檢定比較 ..... 104

Table 32 The compressive strength of mature and juvenile wood analyzed by t test

表 33 早晚材管胞長 t 檢定表 ..... 105

Table 33 The tracheid length of earlywood and latewood analyzed by Tukey test

表 34 在不同栽植密度下早晚材管胞相差值作 t 值檢定 ..... 106

Table 34	The difference of the tracheid length of earlywood and latewood analyzed by t test in various thinning treatments	
表 35	各區 1991 年前管胞長 Tukey 分析	107
Table 35	The tracheid length before 1991 of the sample sites analyzed by Tukey test	
表 36	栽植密度 3000 株/ha 第一次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果	108
Table 36	The tracheid length after the first thinning analyzed by Tukey significantly different test at 3300 tress/ha site	
表 37	栽植密度 2200 株/ha 第一次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果	108
Table 37	The tracheid length after the first thinning analyzed by Tukey significantly different test at 2200 tress/ha site	
表 38	兩栽植密度的第一次疏伐後管胞長作 t 值檢定	109
Table 38	The tracheid length after the first thinning of two kinds plantation sites analyzed by t test	
表 39	栽植密度 3000 株/ha 第二次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果	110
Table 39	The tracheid length after the second thinning analyzed by Tukey significantly different test at 3300 tress/ha site	
表 40	栽植密度 2200 株/ha 第二次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果	110
Table 40	The tracheid length after the second thinning analyzed by Tukey significantly different test at 2200 tress/ha site	
表 41	對高岳試驗地各樣區立木材積與固碳量	112
Table 41	Standing volume and carbon storage of every sample sites	
表 42	棲蘭山試驗地各樣區材積與固碳量	112
Table 42	The sample sites' wood volumes and fixed carbon contents in Cilan area	
表 43	各樣區原木材積製材時耗電量、製材品材積與製材率	114
Table 43	Energy consumption of sawn-lumber, volume of lumber and sawn-lumber yield for each sample sites	
表 44	立木縱向超音波速與原木縱向超音波速之 t 檢定	118
Table 44	The longitudinal ultrasonic wave velocity of standing woods and logs	

analyzed by t test

表 45 立木到製材品之縱向超音波速 ..... 124

Table 45 The longitudinal ultrasonic velocity of standing woods to products

表 46 立木、原木、鼓型材和製材品間之相關式表 ..... 124

Table 46 The relations between standing woods and products

表 47 目視分等 CNS 14631 分等標準之乙種框組材實大樑之抗彎性質 Tukey 分析結果 ..... 125

Table 47 Analysis of Tukey significantly different test of bending properties for the four different lumber grades (CNS 14631)

表 48 目視分等 CNS 444 分等標準造林木之實大樑之抗彎性質 Tukey 分析結果 ..... 127

Table 48 Analysis of Tukey significantly different tests of bending properties for the four different lumber grades (CNS 444)

表 49 目視分等，超音波分等標準實大樑之抗彎性質 Tukey 分析結果 ..... 128

Table 49 Analysis of Tukey significantly different test of bending properties for the four different lumber grades (ultrasonic wave velocity)

表 50 縱向抗壓強度與含水率之不同破壞型態間 Tukey 分析 ..... 129

Table 50 Tukey analysis of compression strength and MC in different crack Type

表 51 含水率高於 FSP 與低於 FSP 之柳杉材縱向抗壓強度與密度 t 檢定 ..... 132

Table 51 The density and compressive strength of Japanese cedar analyzed by t test during moisture content above and under FSP

表 52 不同密度之含水率、抗壓強度與平均密度之 Tukey 分析 ..... 133

Table 52 The moisture content, compressive strength and density of the various densities analyzed by Tukey significantly different test

表 53 含水率高於 FSP 與低於 FSP 之不同密度群的縱向抗壓強度與含水率關係式 ..... 134

Table 53 The relationship between moisture content and compressive strength of the various densities during moisture content above and under FSP

表 54 柳杉邊、心材含水率之 t 檢定 .....	137
Table 54 The moisture content of the sapwood and heartwood of Japanese cedar analyzed by t test	
表 55 邊心材縱向抗壓強度 t 檢定 .....	138
Table 55 The compressive strength of the sapwood and heartwood of Japanese cedar analyzed by t test	
表 56 不同生育地之柳杉年輪特徵與材質比較表 .....	140
Table 56 Compared with the Japanese cedar's properties of the different sites	
表 57 不同地區木材性質比較 .....	142
Table 57 Compared with properties of different sites	
表 58 不同地區每五年林木肥大生長比對表(單位: mm) .....	143
Table 58 The grown width of the different sites	



# 圖目錄

圖 1 立木超音波測定方法及位置 .....	31
Fig. 1 Standing timber test position and method of ultrasonic wave	
圖 2 原木超音波測定方法及位置 .....	32
Fig. 2 Log's test position and method of ultrasonic wave	
圖 3 試驗流程圖 .....	33
Fig 3 Flow chart that outlines this study	
圖 4 IML 微破壞儀 (Fractometer) .....	35
Fig. 4 IML Fractometer instrument	
圖 5 微破壞儀樹蕊試材量測圖 .....	36
Fig. 5 Using fractometer instrument tested cores	
圖 6 樹蕊利用 X-ray 拍出的照片 .....	38
Fig. 6 The picture taken by X-ray	
圖 7 打音頻譜量測儀 .....	47
Fig. 7 Tap tone instrument	
圖 8 振動試驗量測儀 .....	47
Fig. 8 Tap vibration instrument	
圖 9 柳杉早晚材境界密度和最高與最低密度平均值之關係 .....	53
Fig. 9 Relationship between the density boundary of early wood and late wood and $(D_{min}+D_{max})/2$ density for Japanese cedar	
圖 10 微破壞抗壓強度的橫向變化 .....	56
Fig. 10 Transversal variation of compressive strength obtained from fractometer	
圖 11 年輪數與其距髓心距離之關係 .....	57
Fig. 11 Relationship between ring number and distance from pith	
圖 12 樣木年輪寬、早材寬和晚材寬的橫向變化 .....	58
Fig.12 Transversal variation of ring, earlywood, and latewood width of sample trees	
圖 13 樣木年輪密度、早材密度與晚材密度的橫向變化 .....	58

Fig. 13 Transversal variation of ring, early, and latewood density of sample trees	
圖 14 樣木晚材率的橫向變化	59
Fig. 14 Transversal variation of latewood percentage of sample trees	
圖 15 第一區樣木之木材密度與微破壞抗壓強度之關係	64
Fig. 15 Relationship between wood density and compression strength of sample trees at site 1	
圖 16 第二區樣木之木材密度與微破壞抗壓強度之關係	64
Fig. 16 Relationship between wood density and compression strength of sample trees at site 2	
圖 17 第一區樣木胸徑與其超音波波速之關係	65
Fig. 17 Relationship between DBH and ultrasonic wave values of sample trees at site 1	
圖 18 第二區立木胸徑與其超音波波速之關係	65
Fig. 18 Relationship between DBH and ultrasonic wave values of sample trees at site 2	
圖 19 第一區木材表面硬度穿透深度與邊材微破壞抗壓強度之關係	66
Fig. 19 Relationship between pilodyn values and sapwood compression strength of sample trees at site 1	
圖 20 第二區木材表面硬度穿透深度與邊材微破壞抗壓強度之關係	66
Fig. 20 Relationship between pilodyn values and sapwood compression strength of sample trees at site 2	
圖 21 第一區立木動彈性模數與木材表面硬度穿透深度之關係	67
Fig. 21 Relationship between DMOE and pilodyn values of sample trees at site 1	
圖 22 第二區立木動彈性模數與木材表面硬度穿透深度之關係	67
Fig. 22 Relationship between DMOE and pilodyn values of sample trees at site 2	
圖 23 第一區立木動彈性模數與微破壞抗壓強度之關係	68
Fig. 23 Relationship between DMOE and compression strength of sample trees at site 1	



圖 24 第二區立木動彈性模數與微破壞抗壓強度之關係	68
Fig. 24 Relationship between DMOE and compression strength of sample trees at site 2	
圖 25 木材平均密度與抗壓強度 ( $\sigma_{cf}$ ) 之關係	77
Fig. 25 Relationship between wood density and $\sigma_{cf}$	
圖 26 刺入深度與抗壓強度之關係	78
Fig. 26 Relationship between pilodyn and $\sigma_{cf}$	
圖 27 優、中、劣勢木之年輪數與年輪寬之關係	81
Fig. 27 Relationships between ring numbers and ring width among dominant, intermediate and suppressed wood	
圖 28 優、中、劣勢木之年輪數與年輪寬累加之關係	82
Fig. 28 Relationships between ring numbers and <u>accumulated</u> ring width among dominant, intermediate and suppressed wood	
圖 29 直徑方向木材密度 N 型態	94
Fig. 29 Type N of wood density in radial direction	
圖 30 直徑方向木材密度倒 N 型態	94
Fig. 30 Type reversed N of wood density in radial direction	
圖 31 直徑方向木材密度拱形型態	95
Fig. 31 Type arch of wood density in radial direction	
圖 32 直徑方向木材密度 W 型態	95
Fig. 32 Type W of wood density in radial direction	
圖 33 直徑方向木材密度上升階梯型態	96
Fig. 33 Type upward stair of wood density in radial direction	
圖 34 Type B2 管胞長散佈圖	97
Fig. 34 The tracheid length of Type B2	
圖 35 方法一界定成熟材與未成熟材	98
Fig. 35 The first method distinguished from mature and juvenile wood	
圖 36 Type B2 林木之肥大生長曲線圖	101

Fig. 36 The grown curve of Type B2	
圖 37 製材之耗電比例	116
Fig. 37 The rate of consumptive electricity of sawn lumber	
圖 38 原木末徑與製材率之關係	117
Fig. 38 Relation of end diameter of log and sawn-lumber yield	
圖 39 特定原木末徑下與製材率之關係	118
Fig. 39 Relation of certain end diameter of log and sawn-lumber yield	
圖 40 在樹高方向之縱向超音波速呈 W 型態	120
Fig. 40 Type W of ultrasonic wave values in longitudinal direction	
圖 41 在樹高方向之縱向超音波速呈 N 型態	120
Fig. 41 Type N of ultrasonic wave values in longitudinal direction	
圖 42 在樹高方向之縱向超音波速呈拱形型態	121
Fig. 42 Type arch of ultrasonic wave values in longitudinal direction	
圖 43 在樹高方向之縱向超音波速呈下降階梯型態	121
Fig. 43 Type downward stair of ultrasonic wave values in longitudinal direction	
圖 44 在直徑方向之縱向超音波速呈飽和曲線型態	122
Fig. 44 Type saturated curve of ultrasonic wave values in longitudinal direction	
圖 45 在直徑方向之縱向超音波速呈 S 型態	122
Fig. 45 Type S of ultrasonic wave values in radial direction	
圖 46 在直徑方向之縱向超音波速呈下降型態	123
Fig. 46 Type downward of ultrasonic wave values in radial direction	
圖 47 抗壓強度與含水率之關係	131
Fig. 47 Relationship between moisture content and compressive strength	
圖 48 比強度與含水率之關係	135
Fig. 48 Relationship between moisture content and specific strength	
圖 49 抗壓強度與氣乾密度之關係圖	136
Fig. 49 Relationship between air density and compressive strength.	

## I、前言

木材為一種可再生性 (Renewable) 的材料，木材本身材質變異性相當地大，即便生長在同一個地區，即使用同一樹種，其大小與樹形都相當的兩棵樹，也無法保證會有一致的性質。另一方面，在品管與成本因素的考量下，林產工業為求木材資源的有效利用，歐美各國及日本正積極研究以非破壞性試驗來得知木材的性質。所謂非破壞性試驗 (Nondestructive test, NDT) 是在不損壞材料既定用途前提下，藉由非破壞性試驗方法來評價材料的性質或是其內部構成的一種檢測工作。此項檢測工作的目的，主要用來檢查材料內在或外在的瑕疵、測量厚度，決定材料的結構特性或組成、測量或檢查物質的性質等 (柯志裕，1995)。

有關於影響木材的性質，包括有遺傳、環境生育地、及育林施業等因素，一般樹木生長主要受到造林技術的控制影響，這包括有栽植距離、疏伐及修枝處理等重要作業，此亦影響商業性造林木材之生產。一些報告指出生長空間對胸高直徑有較大的影響作用，而疏伐及修枝處理是兩種重要的經營作業，有利於良質用材的生產，疏伐處理有助於增加材積生長，而修枝有助於改良用材品質，這些撫育的措施對林木的生長影響及對材質造成的變異為何是急需瞭解的。

木材生產及多樣性保育是很重要的森林經營策略，未來造林木在提供木材資源上將扮演舉足輕重的角色，對於木材生產工業而言，材積生長及木材品質是重要的，正確適當的造林作業系統建立，不僅可以增加生物量，同時亦可達成改善造林木品質目標。特別是最近京都議定書已於 94 年 2 月 16 日開始執行，所以必需考慮有關於碳儲藏在森林及林產製品中的問題，有關現行森林蓄積及生長潛力應該在造林時即進行評估，使造林木生產力的改良可以增強 CO<sub>2</sub> 在森林中的吸存量潛在效益，撫育處理能增進林木的固碳速度，同時也要兼顧林木的品質的課題是目前相當重要的一環。

### 京都議定書條文

- (一) 確保於 2008 年至 2012 年時，承諾將人為排放之溫室氣體排放總量，控制在該國家以 1990 年排放水準，平均再削減 5.2%，並採行動差異性削減目標方式。

- (二) 管制二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亞氮(N<sub>2</sub>O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)等六種溫室氣體，其中二氧化碳、甲烷、氧化亞氮管制基準年訂為1990年，而氫氟碳化物、全氟碳化物與六氟化硫管制基準年為1995年。
- (三) 確認碳排放權可交易制度，在國與國之間可進行碳排放交易。
- (四) 成立「清潔發展機制」(Clean Development Mechanism; CDM)，來認可共同減量計畫，並將減量成果分配給出資國，獲得的任何排放減量單位或分配數量，納為其減量成果。
- (五) 1990年以後所進行之非林地造林(Afforestation)、更新造林(Reforestation)及森林伐採(Deforestation)，即ARD活動，和森林管理活動之二氧化碳吸收或排放之淨值，可併入排放減量值計算。
- (六) 生效：當認可議定書國家達55國，且認可國家中「附件一成員」之1990年CO<sub>2</sub>排放量須至少占全體「附件一成員」當年排放總量之55%，則議定書於其後第90天開始生效。

近年來，由於人類生活環境持續惡化，而最受矚目之一當屬全球氣候變遷議題，其中造成地球溫暖化氣體中，以二氧化碳佔55%最為嚴重，而二氧化碳的來源80%來自能源部門。1996年臺灣產業中，木紙業二氧化碳排放量只佔總排放量3%，明顯低於石化業16%、鋼鐵業14%以及水泥業7%，所以相較之下，木紙業對環境的影響遠較其他產業為低。

在1997年氣候公約第三次締約國會議，更肯定森林生長對環境的貢獻，先進各國除了增進本國內的森林建造經營，更計畫到其他國家進行海外造林，為了在面臨未來二氧化碳排放權交易的問題做事前準備。另一方面就能源的觀點來看，森林屬於再生性能源，一般社會大眾都認為森林砍伐了就消失，殊不知森林也會老化，因林木為一種生命體，其新陳代謝亦會顯示生命週期，即幼齡期、壯齡期、老齡期。於幼齡期因新陳代謝旺盛，所累積之生物量會急速上升，壯齡期後，生長趨於緩和，反而其枯死、被動物攝食，菌蟲養分解會增加，使得總生產量，純生產量雖為一定，但其現存量則於到達最大後，反而會逐漸減少，亦即每

年森林所能涵存之碳素量，有隨林齡增加而降低之趨勢。此在日本曾提出表 1 之資料，由表 1 可知。

表 1 森林每公頃每年之碳素涵存量 (ton/ha.yr)

Table 1 Carbon content of the forest

樹種	約 20 年生	約 40 年生	約 60 年生	約 80 年生
柳杉	3.3	2.3	1.1	0.8
檜木	3.1	2.0	1.1	0.3
天然生闊葉樹	1.4	1.0	0.3	0.1

欲透過森林吸收大氣中的 CO<sub>2</sub>，以減緩地球溫暖化，即所謂減碳效果，則需於林木生長量達最大值之適當時其進行砍伐，重新再造林，才能維持永續生產性，而所砍伐木材，不但其構成元素有 50% 碳素，當作材料使用時，其加工所消費能源較其他材料低甚多，因此，如能大量使用於建築、建材、家具、景觀、古蹟等領域，將可達到減低地球溫暖化之目標，亦即木材在防止地球溫暖化之功能，有 (1) 省能源，CO<sub>2</sub> 減量效果，(2) 碳素貯藏效果，(3) 石化燃料之替代效果。

全球環境保護的重視及木材資源短缺的狀況下，台灣地區人工林經營管理又需符合大眾期待的生態系經營，其目標是使森林經營能符合生態、社會、經濟三方面的永續性功能發揮，為此森林中樹木健康性評估及木材資源須更有效的運用。栽植密度、疏伐處理等育林撫育措施，不但會影響到林分整體之材積收穫量，並因所培育之立木胸高直徑與樹形會有所差異，而因其所生產原木之製材率亦將不同。另外原木製材加工工程將會消耗能源，進而排放二氧化碳，對環境造成影響。

本研究目的在使用超音波技術、微破壞儀 (Fractometer)、木材表面穿透儀 (Pilodyn)、及 X-ray 掃描及樹輪分析技術等非破壞檢測方法，評估不同帶狀疏伐，及不同栽植密度與疏伐強度之柳杉造林木材質，及其製材品之非破壞性與破壞強度之關係，並從材質資訊的觀點提供林業經營、育林實務或木材利用的重要

依據。另外本研究更進一步探討生長在不同栽植密度、疏伐度之柳杉林分，所產生之原木製材加工能源損耗、CO<sub>2</sub> 排放、製材率，並由立木材積推估對碳素固定效應，作為森林之含碳效應評估與柳杉育林永續經營之參考。並進行含水率對強度的影響以及成熟材及未成熟材的特性研究等等，期能提供柳杉造林木利用的基本資訊。



## II、前人相關研究

### (一) 非破壞性檢測之定義與種類

獲得在造林立木階段的材質狀況，具有很多的優勢之處，並且進一步可以提供林業經營及利用的重要資訊（邱志明等，2004），而立木材質評估的重要關鍵技術之決定在應用非破壞性技術（Nondestructive techniques, NDT），在過去數十年中，木材科學家已發展及使用 NDT 工具廣泛應用從木質材料到立木材質的評估（Wang *et al.*, 2001；Wang *et al.*, 2005），特別是對於具有低成本、簡便有效的評估技術。

非破壞性檢測或稱非破壞性評估（Nondestructive Evaluation, NDE）、非破壞檢查（Nondestructive Examination, NDE）、非破壞檢驗（Nondestructive Inspection, NDI）等是指在不破壞材料未來有效性之下，藉由非破壞性方法來評估材料的性質或是其內部構造之所有測試方法的總稱（Ross and Pellerin, 1991；侯國深，1992）。其相關說明簡述如下：非破壞性檢測是在不損害材料既定用途之前提下的一種檢測工作；此項檢測工作的目的，可以用來檢查內在或外在的瑕疵、測量厚度、決定材料的結構或組成、測量或檢查物質的性質（曾逸仁，1997）。此外，黃純夫（1983）也指出：『運用各種不同之物理方法對材料、零件或成品，在不破壞其組織，不影響其性能，不干擾其運用下來檢探隱藏潛伏表面或內部的缺陷及其變移，量度在不同情況下之物性及其變化，測量各種之尺寸及其變動，最後將所獲得之資料加以研判鑑定，來決定其品質完整性及使用可靠性』。蔡錫堯（1996）則表示：『運用各種不同的物理方法或技術，用以檢測材料、零件或成品在加工過程或表面或底部之間斷（瑕疵、缺陷）以及量度其物理性質—測量、膜厚測量、導電率、彈性模數，而不破壞其原有組織、性能、品質及可用性，進而分析其間斷（瑕疵、缺陷）的尺寸、位置、變化情形，以作為品質可靠度鑑定之依據，稱此為非破壞性檢測（驗）』。

林振榮（2004）將非破壞性檢測依不同考量方向做進一步分類：

1. 缺點的種類及性質區分為定性、定量與合理性（綜合性）檢測評估。
2. 材料對象區分新木料的檢測與應用及舊木料的維護管理。

3. 各種儀器或設備。
4. 檢測最終目的或目標加以區分。
5. 非破壞性檢測技術的原理與檢測方式。

莊世滋 (1999) 指出，常作為木材非破壞性檢驗的方法有：

1. 施加小載重：此係在彈性限度內對試材施以靜載重，通常以抗彎的方式，由其載重及撓度關係，計算彈性模數。
2. 振動法：使試材產生自由振動或強制振動，藉自然頻率或共振頻率來求出彈性模數。
3. 超音波法：在木材的一端產生超音波，在另一端接收，由超音波傳遞時間(速度)來計算彈性係數，儀器有 Pundit、Sylvatest 超音波(黃彥三等, 1993; 1997; 林法勤, 1992; 莊世滋, 1999; Sandoz, 1994)。
4. 應力波法：敲擊試材使其產生應力波，藉應力波傳播速度求出彈性模數(名波等, 1992a; b; Ross *et al.*, 1996; Yamamoto *et al.*, 1998)。
5. 打音法：在試材一端敲擊使其產生振動，在另一端面附近以麥克風接收木材中的彈性波打擊音之傳播，利用頻譜分析儀 (FFT) 將瞬間發生的打音波形分解成頻譜，求出自然振動，再求出音波及彈性模數 (黃彥三等, 1996)。

再者，將非破壞性檢測分為四類方式進行評估。首先為針對木材表面之顏色及缺點存在做目視分等評估；次為物理測試，即利用電阻方式、誘電率、振動特性、音波傳遞、音射、X-ray 等方式進行測試；第三類為化學測試，即利用木材之組成成份或木材經防腐處理及耐燃處理後之分析；第四類為機械性質測定，分為抗彎、抗壓、探針、鑽孔等四大類。而從科學的觀點來看，非破壞性檢測的原理，係量測木材中的能量儲存 (Storage) 及散失 (Dissipation) 的性質，這些性質和決定這些材料靜力性質是由同一機制所控制，所以這些性質和靜力性質之間的數學關係可以用統計迴歸分析加以達成。此外，黃純夫 (1983)、葉競榮 (1983)、曾逸仁 (1997)、蔡明哲等 (2000)、陳俊宇 (2003)、李佳如 (2006) 等人，過去曾整理目前各國普遍應用之非破壞性檢測方面的研究與探討資料，以及國內常用於木構造之非破壞性檢測的種類、特性、及優缺點，如表 2 所示。

表 2 國內曾採用之非破壞性檢測技術

Table 2 Nondestructive testing techniques that have been used in Taiwan

非破壞檢測技術	優缺點分析	
目視檢測法	特性	(1) 不需特別的設備或儀器，具經濟性 (2) 觀察或檢測的過程安全 (3) 目視觀察已經驗及知識為背景加以判斷，並以文字敘述說明材質狀況
	優點	(1) 簡單便利可行 (2) 敘述值的基本資料可與其他檢測法相輔相成
	缺點	(1) 僅能觀測材料外觀，無法判斷內部材質 (2) 古蹟木構件隱蔽部份無法觀測 (3) 缺乏科學實證證明，僅就現象以經驗及常識判斷結果，主觀性強 (4) 無法完整呈現材料材質變化狀態
敲擊檢測法	特性	(1) 僅需使用敲擊工具 (2) 對木構件及人員具安全性 (3) 依音響特性及以經驗及知識為背景加以判斷，簡便可行，並以文字敘述說明評估
	優點	(1) 敲擊法簡便可行 (2) 敘述值的基本資料可助於其他檢測法檢測判斷
	缺點	(1) 無法全面實施，木構件隱蔽部份無法實測 (2) 內部損壞種類及程度無法判斷 (3) 缺乏量化數值證明，僅以經驗及常識判斷結果，過於主觀 (4) 單一描述性檢測，無法完整呈現材質狀態，需配合其他方法

探針檢測法	特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 僅需使用探針為工具</li> <li>(2) 對木構件及人員具安全性</li> <li>(3) 以探針檢測與經驗及知識為背景加以判斷，簡便可行，並以文字敘述說明評估</li> </ul>
	優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 工具為探針，簡便可行</li> <li>(2) 可測量損壞深度及瞭解材質危害狀況</li> </ul>
	缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 僅可適用於具外部（表面）損害缺點探測，內部損壞程度受限</li> <li>(2) 探針亦有破壞木構件之可能性</li> <li>(3) 探針測量的深度，缺乏精確量化資訊</li> <li>(4) 探針法判斷木構件損壞程度，過於主觀</li> <li>(5) 需配合其它方法，方可完整評估材質</li> </ul>
聽診器檢測法	特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 僅需使用聽診器為檢測工具，簡易方便</li> <li>(2) 對人員及木構件均具安全性</li> <li>(3) 依生物活動聲響性與以經驗及知識為背景加以判斷，簡便可行，並以文字敘述說明評估</li> </ul>
	優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 聽診器檢測法簡便可行</li> <li>(2) 可以確認蟲蟻等生物性的活動</li> </ul>
	缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 僅侷限在生物性危害，必須配合其他方法檢測材質狀況</li> <li>(2) 僅限於生物性活動期間</li> <li>(3) 易受環境其他雜音干擾</li> <li>(4) 聽診器法依據聲響判斷木構件損壞程度或種類，多賴經驗及常識判斷結果，其過程過於主觀</li> </ul>

γ 射線照射檢測法	特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 設備費高、專業性高、判讀時間長</li> <li>(2) γ 射線照射對人體有相當之危害，操作需注意安全性</li> <li>(3) 比其他射線法所需之主要儀器及附件體積與重量尚屬便利</li> <li>(4) 判讀及操作之專業性高</li> <li>(5) 經分析確認可獲得木構件內部實際狀況，惟對天然瑕疵、生物性破壞等缺點，仍缺乏完整解析能力</li> <li>(6) 處理時間長，部份木構件的銜接處無法處理</li> </ul>
	優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 儀器適合現場檢測木構件</li> <li>(2) 可有效詳細檢測出內部材質狀況</li> <li>(3) 可以依據檢測資料建立基本資料庫</li> </ul>
	缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 設備費較高、判讀時間長、專業性高</li> <li>(2) γ 射線照射對人體或木構件具有危害，操作需注意安全</li> <li>(3) 判讀及操作需較高之專業性</li> <li>(4) 經分析確認可獲得木構件內部實際狀況，惟對天然瑕疵、生物性破壞等缺點，仍缺乏完整解析能力</li> <li>(5) 處理時間長、成本較高、部份木構件厚度、銜接處或部份構件無法檢測</li> </ul>

構件損壞評估法	特性	<p>(1) 所需器材僅需探針、榔頭及小鐵尺等物，攜帶方便，評估方式簡單，操作迅速</p> <p>(2) 對材料及人員具安全性</p> <p>(3) 僅可實施於表面損壞可質量測部份，未能全面包含所有狀況</p> <p>(4) 無法判斷損壞原因，程度的評估僅限於剩餘載重，與實際值的差異不得而知</p>
	優點	<p>(1) 簡便、經濟、安全</p> <p>(2) 可獲得定量評估值作為參考</p>
	缺點	<p>(1) 需配合其他方法檢測加以評估</p> <p>(2) 損壞分類過於主觀</p> <p>(3) 損壞評估較粗放，內部損壞無法評估，損壞原因無法判斷</p> <p>(4) 剩餘載重評估與實際承載值的差異無法確定</p>
超音波檢測法	特性	<p>(1) 超音波器材體積小、重量輕，方便攜帶</p> <p>(2) 超音波對人員及試材具安全性</p> <p>(3) 操作及判讀容易</p> <p>(4) 嚴重缺點時，無法傳遞能量，因此無法獲得準確的檢測數值</p> <p>(5) 部份木構件隱蔽處無法檢測，如木構件交接處無法判斷缺點的種類</p> <p>(6) 可獲得整體材質的狀況</p>
	優點	<p>(1) 體積小、重量輕、便利可行，操作及判讀容易，且不論室內外皆可使用。</p> <p>(2) 檢測時對人員及試材不會造成危害</p> <p>(3) 具有良好的穿透能力，甚至可檢測距材料表面</p>

		<p>20 公尺內部深處缺陷</p> <p>(4) 檢測時不會產生噪音</p> <p>(5) 反應速度快，可立即讀取數據加以分析</p> <p>(6) 靈敏度高，可偵測出非常細微的缺陷</p> <p>(7) 可檢測木構件整體的材質狀況，評估材質情形，並建立基本資料庫</p>
<p>缺 點</p>		<p>(1) 無法判斷缺點種類及大小</p> <p>(2) 音波非線性傳播的現象，有時會限制高能量波遠距傳播的能力</p> <p>(3) 易受木構件基本材質的影響，如：木理、比重、含水率等之影響</p> <p>(4) 部份無法施放探頭的地方（如樁接獲隱蔽處）則無法進行檢測</p> <p>(5) 需配合其他檢測法進行評估，提高評估材質準確性</p> <p>(6) 由於音波無法在真空中或空氣稀薄處傳遞，甚至缺點嚴重時無法測定</p> <p>(7) 超音波路徑會因受缺點損壞程度不一或受外加物之干擾，而影響檢測值</p> <p>(8) 雖然有靈敏性高的優點，但也產生能量大量衰減的負面效應</p> <p>(9) 雖然超音波的靈敏性高是其可利用之處，半有時靈敏性過高造成的過度反應，造成檢測結果難以區分訊息真正代表的意義。</p>

除上述的種類之外，超音波檢測法亦是作為評估材料的物理性質有用的非破壞性技術，從以往的研究成果中，已建立並提供 NDT 參數與木材密度或機械強度性質之間的關係性 (Peterson, 1994; Bucur, 1995b; Pellerin and Ross, 2002; 2005; Wang *et al.*, 2005)，而大部份的報告指出木材動彈性模數與抗彎彈性模數之間具有良好的相關性存在 (Schad *et al.*, 1995; Cai *et al.*, 2000; Ross and Hunt, 2000; Ross *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2001; Emerson *et al.*, 2002; Leichti *et al.*, 2005)。

超音波檢測係利用高頻振動的音波導入材料內部，藉以檢測材料表面或內部缺陷之非破壞性檢測方法。所謂音波，是指透過具有慣性的介質，例如空氣、水等，當空氣或水產生壓縮時，透過分子的運動而有波動產生，因此音波無法在真空中進行傳遞。此外，由於音波是藉由彈性物體相鄰介質中，原子或分子的機械震盪，而不斷的將能量轉移所形成，故稱為機械波、彈性波或應力波。而應用於木材非破壞性檢測則屬於固態應力波。

所謂超音波即是指頻率超過一般人耳聽力範圍 (16 KHz~20 KHz) 之音波，即包含所有頻率高於 20 KHz 之音波。超音波屬於力學波的一種，可分為三種波形，分別為縱波 (物質粒子振動方向與波行進方向平行)、橫波 (物質粒子振動方向與波行進方向垂直) 及表面波 (波沿著物體表面傳送)。

同一波形的超音波在同一物質中的傳遞速度接近定值，而不同波形的超音波傳遞速度略有不同，一般在同一均質材料中，縱波波速為橫波波速的兩倍，表面波波速則略小於橫波波速。

超音波產生的原理是由探頭中的壓電晶片通以電壓後不斷的高頻振動，壓電材料 (Piezoelectric material) 是種具有將電能與機械能互換的材料，因此超音波探頭又稱為換能器 (Transducer)，由於壓電材料具方向性，當施加電壓後，會造成壓電片不同方向之變形而產生波動。而超音波接受端探頭即是藉由壓電材料之正壓電效應，將接收到之機械性震盪轉換成電能，並產生與音波頻率相同之交流電壓信號。

一般常見的超音波檢測可分類為 (曾逸仁, 1997; 侯國探, 1992)：

### 1. 脈波回波法

利用脈波超音波束經由耦合劑送入試件，經由試件背面或瑕疵的反射回波由同一換能器或另一換能器接收，利用示波器等儀器量測起始脈波與回波的時間差及波形之改變，綜合判斷穿透時間及缺點的位置。

### 2. 共振法

利用超音波的回波不循原路或傳遞中受瑕疵干擾而減弱共振現象，其能量可由示波器上顯示，經觀察波形的變化檢測缺點的方法。

### 3. 穿透法

使用發射及接收兩種探頭，利用穿透能量因瑕疵的阻礙而減少能量的傳遞來檢測缺點或瑕疵。此方法使用時，必須將兩個探頭盡量平行置放，且耦合要完全，否則信號的接收會受到影響。

### 4. 傳送時間法

利用超音波在物體內傳送的所需時間來探測試材的厚度，或利用超音波接觸瑕疵而繞道增加傳遞時間的特性來檢測。

有關超音波檢測法的應用於古蹟建築及大木構件之實例，以蔡明哲等 (1998a ; b) 分別針對台北大龍峒保安宮之維修、板橋林家三落大厝、台灣布政使司衙門、台南興濟宮、台南大觀音亭利用構件各單元之徑向剩餘超音波傳播速度比檢測評估材質現況；故利用超音波法檢測傳播速度可作為評估古蹟建築木材或木構件的腐朽程度一種指標。

根據林振榮 (2004) 所整理出之相關資料作為參考，進一步的將有關超音波技術檢測應用於木質材料所產生的因子做一說明，應用超音波技術檢測木質材料的主要影響因子如下：

#### 1. 生長應力、樹木自重及樹幹振動特性

Curtu *et al.* (1996) 利用超音波法檢測樹木伐前、伐後及原木的差異性存在。Manada *et al.* (1984) 曾對柳杉造林木進行研究，其被認為樹冠內重心點下方加以牽引時，其機械性質隨著載重增加而直線狀增大。不同樹木、生育地及環境下其樹幹具有一定的自然頻率及阻尼比之存在特性的樹木振動特性，此與樹木尺寸

大小間的關係可作為樹木形態健康之指標。如此不同生育地、樹木、樹體部份可能會有不一致性的存在。

## 2. 含水率

超音波應用做為評估木質材料的物理性質時，當使用在立木、生材原木或木材時，超音波顯著性被木材中的含水率影響，很多研究者有觀察超音波速度及含水率間的關係（Gerhards, 1975；Ross 及 Pellerin, 1991b；Sandoz, 1993；Bucur, 1995；Booker *et al.*, 1996；Mishiro, 1996a, b, c；Wang 及 Chuang, 2000；Wang *et al.*, 2002），其結果顯示出速度與含水率的關係（0%至 FSP 與 FSP 至接近飽水狀況，有兩個直線方程式的變化），其變化趨勢為：從爐乾重（約絕乾重 0%時）至含水率為 FSP（%）時，超音波速度隨著含水率的增加呈線性地降低，而從 FSP 至接近飽水狀況（%）間其縱向、徑向及弦向試材間有相當大的差異存在，在縱向試材之超音波速度隨著含水率增加而減少（線性），而在徑向試材大致呈常數之變化趨勢，而在弦向試材則隨含水率之增加而增加（Wang *et al.*, 2002）。

Beall (2002) 報告指出木材水分梯度與平均含水率對超音波速度在不同方向的脫濕狀況下有相似影響，惟在脫濕的過程因為含水率的不同，其水份梯度影響到縱向速度結果，有關此點目前尚未明瞭。另外含水率存在樹幹內部的變異也可能受樹種的影響而不一致的結果。

## 3. 密度

密度對超音波速度主要受樹種、木材結構及測定方向作用的影響（Gerhards, 1982；Bucur, 1995；Mishiro, 1996d），雖然，木材超音波速度是受樹種、含水率、溫度、木理方向、缺點、年輪特性及組織之影響，但密度是其中一項重要性質常作為評估木材之指標，Mishiro (1996d) 指出三種關係存在超音波速度及密度間，(1)音速隨著密度增加而增加，(2)未受密度影響，及(3)隨密度的降低而降低，此意味密度及速度間無明確的相關性存在於縱向或橫向試材中，故木材之含水率及密度對超音波速度或特性的影響應該加以瞭解，以為評估之依據基礎。

#### 4. 木理方向

Beall (2002) 報告指出生長輪角度及木理方向影響超音波傳播，影響的生長輪角度在針葉材約在 45~60 度間，惟依樹種不同而異，在闊葉材方面超音波速度與年輪及木理角度愈大時呈線性降低。Gerhards (1982) 發現木理方向接近節部影響音速測定，Sandoz (1989) 指出當增加節面積時會降低音速在縱向試材之音速。Mishiro (1996d) 指出木理與年輪傾斜角對超音波速度的影響發現是由縱向往徑向及弦向的超音波速度會急速下降，在 60 度時較為緩和。Gerhards (1982) 發現木材中若有節或交錯木理時，應力波之傳遞受到影響而改變結果使應力波速度亦隨著變化。

#### 5. 木材品等、腐朽及缺點

超音波特性受不同木材缺點或品等的影響，木材品等下降時，超音波特性會受影響而下降 (Wang and Lin, 1996)。節的存在、孔洞、木理角度與木材縱、徑及弦方向會影響應力波速及超音波檢測值 (陳載永, 1996; 黃彥三, 1997; Rajesjwar *et al.*, 1997; Kabir *et al.*, 1997; Bucar, 1995)。Beall (2002) 綜合許多研究結果指出超音波速度降低及衰減隨著存在的腐朽而增加，超音波速度改變情形需視腐朽程度、菌類的類型及樹種而異，同時影響程度的多寡隨著腐朽狀況而改變。

#### 6. 木材組織

超音波的傳播及接收以最快速度接收為路徑，並非是最短距離路線，故是透過某些排列或某些組織來達成，Urakami and Asai (1996) 指出超音波在木材縱向傳遞時，主要藉由晚材部份來移動。但 Gerhards (1978) 利用應力波之衰減來計算彈性係數，Sensor 位於早材或晚材時，經量測後並無影響存在。而在木材徑向之評估，目前還未有明確的解釋加以說明，Watanabe *et al.* (2002) 發現徑向彈性係數與早材細胞形狀在針葉樹材中有具有某些關係存在；Burgert *et al.* (2001) 指出在木材徑向之木質線組織對徑向彈性係數有關係存在。浦上弘幸及

淺井圭一（1996）指出不同密度及彈性係數的早晚材所構成的層狀構造，值得探討。由於音速在徑向傳遞的結果不同於木材縱向，因為音波透過最快速的路徑，由一些報告中得知木材徑向細胞間的排列規則性或細胞構造，對音波的傳播速度有影響。還有早晚材比例的變化不同時亦有影響檢測的結果。

## 7. 材質狀況

木材表面（缺點）、木理方向、試材長度、測定溫度等將影響檢測的結果，三城昭義及三輪雄四郎（1994）探討試材表面與 Sensor 之接合方式、試材長度、木材表面特性、測定溫度及使用頻率對超音波傳播速度的影響。Beall（2002）指出檢測木材材料的物理結構將影響超音波傳播，例如木質層積，每一層界面造成反射、折射及模式波的改變，一個類似的影響發生在層層材料的膠合層中，諸如合板、層積材、膠合層等，當超音波傳遞時及能量的轉變將受一定程度的改變。

## 8. 檢測儀器

由於不同儀器中的特性如頻率（或波長）、Sensor、及結合操作性不同，而有不同評估結果或準確性，這些應於試驗之前先予以校對或消除，或許有些應為檢驗目的為目標選擇使用適當的或較具實用性的工具。

此外，動彈性模數與抗彎彈性模數間亦有良好的相關性，因此由縱向超音波速度來評估木材的強度是可信賴的指標。由於超音波在木材中進行縱向傳播時，主要是經由晚材部份傳遞（Mishiro, 1995；1996a, b, c, d），因此縱向超音波速度越快，表示該材料之縱向動彈性模數越佳（卓志隆，1998）。

以非破壞性之超音波和應力波法，探討不同栽植距離柳杉之立木材質，結果發現栽植距離較小與胸高直徑較小之立木，其超音波波速值與動彈性模數值均較大（莊世滋與王松永，1997）。在非破壞試驗技術應用於原木材質評估之可行性研究中提到，經由原木斷面橫向超音波穿透時間的測定，可探知原木內部腐朽或孔洞之有無，並加以定位。同時原木斷面直徑方向之超音波時間，會隨內部腐朽

或孔洞存在而增加 (黃彥三等, 1993)。同時超音波非破壞試驗技術除可應用於木材力學性質之評估外, 並可應用於樹木樹幹內部是否腐朽之生物品質評估, 並指出原木徑向超音波穿透時間與原木直徑成顯著直線相關性 (黃彥三等, 1997)。

就實木而言, 橫向超音波速約在 1~2 km/s, 徑向波速比弦向波速約大於 50 % (Beall, 2002)。由木理平行方向 (縱向) 所測得之超音波速會明顯大於弦向及徑向者, 其原因係為縱向細胞沿著軸向排列, 提供一個連續的路徑; 纖維長度和縱向超音波速間有一密切的相關性。而超音波在徑向傳遞時, 係藉由束狀結構 (木質線) 移動, 但是在弦切面則完全沒有這種組織, 所以超音波在徑向波速又會大於弦向波速; 除了木質線組織存在於徑向外, 尚有年輪構造 (早材、晚材) 及介於弦、徑切面中幾何排列不同的細胞, 影響著木材的異方性。木材三方向的超音波音速間的比值,  $L : R : T \approx 3 : 2 : 1$ , 因此木材之異方性可以利用三方向之超音波速的比值加以評估, 而且結果合乎木材力學性質 (Bucur, 1995a)。

木材表面穿透儀 (Pilodyn) 是一種經濟性、可攜性、容易操作的商品化非破壞性儀器, 主要利用探針穿入材料的深度作為指標, 其與材料的密度間有密切的相關性存在, 並已應用於木質電線杆 (柱) 折減強度的測試 (Smith and Morrell, 1989), 及作為林業經營中疏伐選木或材質評估的檢測項目中 (Rozenberg and de Sype, 1996; Wang *et al.*, 1999; Hansen, 2000; Jacques *et al.*, 2004)。

另外, 微破壞儀 (Fractometer) 儀器是使用徑向樹芯 (5 mm 直徑) 為試材, 測定其縱向抗壓強度的技術, 是相對較為快速、容易使用, 其雖有最小樹芯立木取樣損害, 但最重要的是其直接強度測定的優點。一些研究中, 這個設備或利用樹芯試材測定的方法, 已經應用到評估抗壓強度及監測樹木品質 (Mattheck *et al.*, 1995; Dolwin, 1996; Matheny *et al.*, 1999; Kasal, 2003; Mattheck and Breloer, 2003; 林振榮等, 2004)。利用樹蕊進行微破壞 (抗壓和引張) 與 ASTM 標準試片比較發現, 抗壓試驗在兩者間有高度相關性, 引張試驗時兩者間也有相關性, 但不如抗壓試驗者高, 另外在彈性模數 (MOE) 的表現上亦具有高度相關性 (Bo Kasal, 2003)。

而利用 X-ray 樹輪分析技術檢測年輪特徵值作為造林木材質評估或年輪氣候

學之研究，也有具體的研究成果(Yasue *et al.*, 1997; Koga and Zhang, 2002; Zhang, 1997; Olsson *et al.*, 2001; Bergsten *et al.*, 2001; Bucur *et al.*, 1997)。

## (二) 疏伐及修枝處理對於針葉樹材性質的影響

疏伐處理是一項相當基本的育林經營作業，其中帶狀疏伐是一種對環境干擾很低的育林作業，可以進行林相改良營建複層林(羅卓振南等，1997)，但是，不同的帶狀疏伐寬度對柳杉造林木材質的影響，目前並沒有相關報告。不過，疏伐處理之後，對林木的生長會有一定的影響。

### 1. 胸高直徑

Wang *et al.* (2003) 指出 20 年的台灣杉疏伐處理中重度疏伐的胸徑大於中度疏伐大於未疏伐者，未疏伐的胸徑對其他兩者有顯著的差異存在，修枝處理中未處理區大於中度處理區大於重度疏伐，但三者間無顯著的差異。更顯示出疏伐處理對林木肥大生長有正面的效果。

王松永與林法勤(1994)在台灣栽植柳杉之栽植距離對其密度與樹種強度性質之影響中指出，栽植距離大的林木多進行肥大生長，故胸徑較大。陳麗琴等人(1996)在栽植密度對六龜地區台灣杉生長的影響中提到台灣杉的平均胸徑隨栽植密度的增加而降低，隨林齡增加而上升，28 年以後仍在繼續增加中。王松永等人(2005)在桃芝颱風所引起土石流對人工林台灣杉性質之影響中指出，土石流後所引起的帶狀衝擊下，距離帶狀空曠區近者，胸徑較大，越遠離者胸徑越小。Zobel and van Buijtenen (1989) 指出不同的育林措施對林木的影響具有變異性存在，其中胸徑大者因為生長快速而生長輪寬大、纖維短、纖維傾斜角大和比重比較小，而生長慢者反之。Wang and Lin (1996) 指出，栽植距離小的 DBH 小，同時其抗壓強度、抗彎強度、動彈性模數及衝擊性能試材較栽植距離大的柳杉高。

### 2. 年輪寬

強度疏伐比中度及無疏伐處理產生較寬廣的年輪寬度，一般較寬大生長輪是

發生自較寬廣的林木生長空間，疏伐樣區比中度及無疏伐處理樣區有較寬的生長空間，相類似結果已由 Wang and Chen (1992) 及 Koga *et al.* (1997) 報告提出，前者，他們指出日本柳杉生長在相對較寬空間有較寬的生長輪，後者則研究疏伐處理對 Japanese larch 的影響，他們發現樹木在疏伐樣區中顯示出疏伐後會增加年輪寬度、早材寬度及晚材寬度。

疏伐處理後的生長空間變大，受光量較大，土壤養分，水分競爭少，故促進林木生長，致產生較寬廣的生長年輪寬度，惟其影響於未成熟材林分中時，將延長未成熟材的形成時間，同時，疏伐處理在林木生長季節中將促進早材的增加，處理實施在夏季後期將促進晚材的發生 (Yang, 1987)。

而在修枝方面，林木經修枝處理後會比未修枝處理的林木形成較窄的年輪寬度，相類似的結果由 Zobel and van Buijtenen (1989) 提出，他們指出早材比例在 Radiata pine 年輪中藉由修枝處理將會降低。

### 3. 晚材率

疏伐處理對晚材率的影響由 Koga *et al.* (1997) 報告中指出 Japanese larch 疏伐後不會影響晚材率，其它研究者亦提出疏伐處理沒有或僅有些許影響到晚材率 (Cown, 1973; Taylor and Burton, 1982; Moschler *et al.*, 1989; Cregg *et al.*, 1988; Markstrom *et al.*, 1983)。但若以栽植距離而言，Wang and Chen (1992) 指出較小距離林分之林木，木材晚材率有較大的趨勢。一般林木生長下，疏伐後有較低的晚材率趨勢，若於夏季晚期實施疏伐，將促進晚材發生，使晚材率的變化則較緩和或不顯著，而在被壓木經疏伐後則有高的晚材率產生 (Yang, 1987)。而修枝處理方面，Zahner and Oliver (1962) 研究 *Pinus resinosa* 及 *Pinus banksiana* 修枝有增加其晚材率的趨勢，惟並不具有顯著性的差異存在。

### 4. 管胞長度及微纖維傾斜角度

疏伐處理後的生長空間變大，進而促進林木生長，致有較大的生長年輪寬度發生，此現象結果促使管胞長度藉經疏伐處理後會降低，Cown (1974) 報告

指出 *Pinus radiata*，強度疏伐後管胞長度降低 8%，惟此現象隨著林木生長之林分又逐漸鬱閉過程對管胞長度的影響程度又逐漸變小 (Yang, 1987)，Taylor and Burton (1982) 對 *Pinus taeda* 報告指出，晚材管胞長度至疏伐第 8 年降低率有變小的趨勢。若從不同栽植距離的觀點來看，Wang and Chen (1992) 與邱志明及王松永 (1986) 指出柳杉不同栽植距離或不同疏伐處理林木的管胞長度並沒有統計上差異存在。

而 Zobel and van Baijtenen (1989) 指出林木經疏伐後而促進生長，對於微纖維角度僅輕微的增加，且僅在數年之內，而其它一些樹種的年輪寬度是藉由疏伐處理而增加，但疏伐與未疏伐處理間，密度、晚材率、管胞長或微纖維傾斜角度並無顯著性統計差異存在。Wang and Chiu (1988) 針對四種疏伐密度間之微纖維傾斜角的差異亦少。

在細胞壁纖維素結晶化度方面，Wang and Chiu (1990) 指出強度疏伐會使結晶度減低，但中度疏伐與弱度疏伐間則無顯性差異存在，成熟材部份之高度法結晶度與面積法結晶度各為 61.5~64.5 % 及 52.9~55.6 %，未成熟材部份則各為 56.7~58.8 % 及 45.0~50.0 %。

## 5. 未成熟材

疏伐處理後導致較大的生長空間，增進具有活力的林冠層進而促進及延長未成熟材 (Juvenile wood) 的期間發展，並指出疏伐處理後會產生短管胞和較大的寬度的早材，導致低密度與低晚材率。(Zobel and van Baijtenen, 1989)，惟一些學者則提出相反意見指出，未成熟材區域與未成熟材期間並無直接關係存在 (Yang, 1987)，另外 Wang and Chen (1992) 指出柳杉在不同栽植距離的未成熟材及成熟材境界，以管胞長度的變化為觀點而言，林木生長快慢並沒有顯著不同產生，惟若區分在實生苗林木，其未成熟材範圍之距離，在弱度疏伐為 6.6~9.3 cm，中度下層疏伐為 6.4~10.2 cm，強度疏伐為 7.1~11.1 cm，中度上層疏伐為 6.7~9.7 cm，各疏伐度間差異極顯著，以年齡表示時，弱度疏伐試材最大，平均 20 年，中度 (下層) 疏伐最小，平均 17.75 年，差異顯著，其它則不顯著，而

在插條苗林木各疏伐度間，弱度疏伐 6.5~10.9 cm，中度下層疏伐 7.2~11.6 cm，強度疏伐 7.9~12.9 cm，中度上層疏伐 7.1~11.0 cm，差異均不顯著。而以栽植距離而言，距離較大林分之柳杉，其生長快速，年輪寬較大者，故未成熟材範圍較大（邱志明及王松永，1986）。

## 6. 心材率及邊材寬度

台灣杉經過疏伐處理後將增大心材率，且因林木生長較快時，其胸徑較大者會有較大的心材率、心材量及斷面積（Gominho 及 Pereira, 2000）。台灣杉不同修枝處理間的心材率並沒有顯著性差異存在（邱志明等，2000），而心材率隨著樹高之增高會有減少的趨勢。以從柳杉林木在不同栽植密度林分而言，在林木胸高斷面部份之心材率約在 45 %~60 %，其會隨樹高增加而急速減低，而在樹高 1.3 m 處的心材率約為 25 %~35 %，而心材率與栽植距離之間亦會存在正線性關係，最小的心材率（35.85 %）會出現在 2 m × 2 m 的栽植林分中（Wang and 及 Chen, 1992）。

疏伐處理後將刺激林木生長，導致增加較寬的邊材帶，此與樹冠幅的增大有密切相關（Yang, 1987）。而 Yang *et al.* (1985) 指出 Jack pine 在不同疏伐、修枝處理的造林木邊材寬沒有顯著性差異存在，亦即邊材寬在樹幹內約保持一定值之變化相同，此可能係邊材寬度亦受平均生長速率、斷面大小、樹高關係及樹齡等因素之影響所致（Wellwood and Jurazs, 1968；Smith *et al.*, 1966；Hazenber and Yang, 1991；Sellin, 1996）。

邊材寬不僅會受到遺傳性質影響，亦會受到外在因子如生育地，氣候因子及環境因子之影響，一般邊材最主要作用是從土壤將所需物質及水份輸送至樹冠之通導作用。在樹葉量及邊材寬之間其有正線性關係存在，可加以證明，此意味著柳杉邊材寬在相同樹齡，其邊材寬會隨著胸高直徑（DBH）值增加而增大，但是，此並非意味著心材率會隨 DBH 增加而減少，因為樹木具有較大 DBH 者會有較大的心材及邊材，因此心材率與 DBH 之間亦有正線性關係存在。在邱志明（1987）不同疏伐度對柳杉的影響中指出，疏伐度重度的胸徑大於中度下層疏伐

大於中度上層疏伐大於弱度疏伐。

## 7. 密度

無疏伐處理林木的平均密度在年輪中是顯著性較大於強度疏伐後的林木，亦即強度疏伐處理將降低平均年輪密度 (Koga *et al.*, 1997)，而早材密度受疏伐處理之影響較小，但晚材密度則會輕微降低 (Wang *et al.*, 1993b; Megraw and Nearn, 1972)。

由於疏伐效應將促進單株林木直徑生長，一般一個較寬的年輪是經常發生來自較寬的栽植空間，因疏伐處理樣區比無疏伐處理樣區有較寬的生長空間，故疏伐處理將具有減低平均年輪密度的趨勢，Wang 及 Chen (1992) 報告指出此傾向是歸因於樹木 (柳杉) 生長相對較寬空間時有較寬的年輪寬度，因林木年輪寬度增加時，相對的會反應出其密度降低的趨勢。Yang (1987) 指出疏伐處理後的生長空間變大，受光量較大，土壤養分，水分競爭少，促進林木生長，致有較大的生長寬度發生，而疏伐將促進早材的生長，以致於產生較低的木材比重。Zobel and van Buijtenen (1989) 指出因疏伐處理，木材密度降低 8~10 %，並指出此現象是因為疏伐處理後將產生較短管胞，較大寬度的早材，及較多未成熟材，進而導致產生較低密度發生。另外，一些研究報告指出疏伐對 *Pinus radiata* 及 *Pesudotsuga menziesii* 樹種木材密度產生輕微降低 (Cown, 1974; Erickson and Harrison, 1974; Barbour *et al.*, 1994)，針葉樹年輪寬度之增加，主要是在早材部，晚材部變動較少，疏伐促進年輪寬增大，主要是增加在早材部，因此木材密度會降低。Yang (1987) 指出疏伐處理後將刺激早材發生，以致有較低的木材密度，惟若疏伐處理在夏季，則會產生較多的晚材，使整體的年輪密度增加或不會降低的結果，另外是密度的增加可能是因被壓木發生而導致此增加的現象。

而不同修枝處理間的平均密度的變化，需視修枝處理對樹冠影響大小，其會直接影響到林木生長勢，而間接對林木密度有不同的影響。修枝處理影響的效應，可能主要來自於改變林木活樹冠層，致使其光合作用的養份作用累積改變，而反應至材質或密度值變化結果，Zobel and van Baijtenen (1989) 指出移除樹冠

層大於 1/3 及 1/2 時，對林木生長及材質有改變之影響，可能會降低生長勢，其亦指出修枝處理對一些樹種的年輪密度有增加的影響，因為修枝處理顯然地促使未成熟材提早結束，而減少年輪寬、增加晚材及增加管胞長度，此點與活樹冠層留存部位是未成熟材有關，惟他們亦指出修枝對 *Eucalyptus grandis* 密度沒有影響。此可能修枝部份僅限於枯枝條部位或少部份活枝條時，則對密度沒有影響。

氣乾密度是木材一個非常重要又易於測定的物理指標，所用試片少，甚至可以不砍伐樹木從立木取樣。木材密度與物理力學性質關係密切，常可通過氣乾密度與其物理力學性質的相關關係式進行預測（卓志隆，1998）。當木材含水率在 FSP 以內，應力波傳遞時間會隨含水率下降而減少，當木材含水率在 FSP 以上時，應力波傳遞速度只會有微小的變化或無變化。由此可大致瞭解應力波之非破壞性試驗方式，當含水率在纖維飽和點以內時，大致可評估材質之優劣（Ross and Hunt, 2000）。從鮑甫成，江澤慧（1998）研究結果顯示（表 3）：平行木理抗壓強度、抗彎強度與氣乾密度關係最為密切，其相關係數分別為 0.78 和 0.70，在  $\alpha = 0.05$  水平上檢驗，迴歸顯著，而抗彎彈性模數與氣乾密度間迴歸效果較差。

表 3 木材物理力學性質的分級

Table 3 Grades of wood strength property

物理力學性質	甚小	小	中	大	甚大
氣乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	≤0.350	0.351~0.550	0.551~0.750	0.751~0.950	>0.950
平行木理抗壓 強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	≤245	246~343	344~549	550~824	>824
抗彎強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	≤500	510~800	810~1200	1210~1700	>1700
抗彎彈性模數 (GPa)	≤9.0	9.1~12.0	12.1~15.0	15.1~19.0	>19.0

## 8. 纖維飽和點

對於含水率的研究方面，含水率是決定木材強度及各項利用之極重要因子，木材於纖維飽和點以內木材乾燥時其微細胞間之結合力會變強，故木材之機械強度亦會隨之增加。纖維飽和點以上時則幾乎不變。纖維飽和點以內，木材機械強度是會隨著含水率的增加而減少，而一般木材含水率每增減1%會使其各項機械強度性質減增的百分率，概算時，抗壓強度6%、抗壓彈性模數4%、靜彈性模數2%、硬度2.5%（王松永，1986）。而木材之音速會隨含水率的增加而降低。含水率在纖維飽和點以內時，木材強度會隨含水率增加而減少，含水率到達纖維飽和點以上時，水分的增加對強度影響不大，然會使密度增加。

邱志明及王松永（1990）指出柳杉纖維飽和點（FSP），A種疏伐度（弱度疏伐）為24.89%，B種疏伐度（中度疏伐，下層疏伐）為26.48%，C種疏伐度（強度疏伐）為25.74%，D種疏伐度（中度疏伐，上層疏伐）為26.50%。可發現以強度及弱度疏伐林分之柳杉之FSP較小，而以中度疏伐之FSP較高。

一般而言，針葉樹在心材化的過程中，心材的管胞會被抽出物填充，所以心材的含水率遠低於邊材，但柳杉的心材管胞被發現，其心材化的過程中，抽出物不全然填滿管胞，而導致其心材的含水率較高（Fujii *et al.*, 1997）。Hillis（1987）調查12種針葉樹中只有兩種樹種，其心材含水率超過100%以上，柳杉就是其一，其他的樹種的心材含水率就比較乾，而如果其為黑心柳杉，心材含水率則高達200%以上。陳玉秀等人（1998）在柳杉生材水分分佈與比重變異中指出，水分在徑向分布有乾材和溼材帶，心材與邊材間的移行材在立木狀態下水分梯度突降，邊、心材皆以溼部狀態呈現，其邊材含水率為107.95%，心材含水率為109.3%，但兩者無顯著的差異存在。而柳杉心材在橫向上有5種基本溼部的型，樹高方向有7種變化型態，溼部和木材含水量有高度的相關（Nakada *et al.*, 2003）。Nakada *et al.*（1998）調查柳杉19品種之含水率，發現邊材含水率在95.9~333.4%，心材含水率在45.2~253.5%，邊、心材轉移帶含水率在52~183%。

## 9. 製材率

不同疏伐、修枝處理的原木製材率方面，Lowell and Dwyer (1988) 報告疏伐及修枝不會影響到製材品的生產量及製材率，一般而言，製材率隨著原木直徑級的增加而較大的趨勢，直徑級較小，其差異性愈小，反之其差異愈明顯 (Steele *et al.*, 1988; Murarta *et al.*, 1990; Gronlund, 1989; Williston, 1978; Pnevmaticos, 1970; 林振榮, 1992)，強度疏伐留存木有較大的直徑級原木，故強度疏伐較中度及無疏伐有較高的製材率，惟由於末端直徑間的差異太小，故製材率並未因原木末徑的增加而有明顯的變化。

若以立木製材率表示在不同疏伐、修枝處理間的結果，疏伐處理促進單株林木的胸徑生長，故強度疏伐處理較未疏伐及中度疏伐有較高的製材率；而修枝處理較未修枝者有較為圓滿的樹幹，Lowell and Dwyer (1988) 報告指出疏伐處理對於原木製材率之影響沒有顯著差異，但疏伐處理後可增加立木胸徑而增加單株樹木的製材量生產。

以不同栽植距離而言，Wang and Lin (1996) 指出，1 m × 1 m 栽植距離的柳杉林木有較高的品等製材率，而 5 m × 5 m 栽植距離的柳杉林木之品等製材率較低，此應該是林木間自然修枝的作用大小所造成。

## 10. 超音波性質

Wang *et al.* (2001) 亦指出較低密度林分顯示有降低的應力波速度及靜抗彎性質的傾向。Chuang and Wang (2001) 報告指出，柳杉在不同栽植距離的栽植空間生長時，因林木生長速度不同時所產生材質，是中勢木及劣勢木的縱向超音波傳播速度是較優於優勢生長的林木，Wang and Lin (1996) 與 Wang and Ko (1998) 亦指出柳杉在栽植距離較小的林木有較佳的抗彎性質，而較大栽植距離的林木則抗彎性質有較差的趨勢。

Bucur (1995) 指出測定修枝後樹木之超音波速度會增加係因改良木材品質，及修枝後的木材品質之變異性會較未修枝處理的樹木小。此可能修枝後的主要效應對木材品質是在枝節性缺點移除、未成熟材的降低及改良物理性質，例如密度

及收縮性質 (Bucur, 1995; Zobel and van Buijtenen, 1989)，故修枝的強度及對林木生長影響的程度應加以考慮。

台灣杉不同疏伐及修枝處理的立木及實木試材，利用超音波波速與動彈性模數發現，經過疏伐處理後的樣木較未處理區樣木有較低的趨勢，亦即未處理區有較佳的木材超音波性質值 (林振榮等，2002)。

## 11. 強度性質

Wang and Chiu (1993a; b) 指出不同疏伐度間，強度疏伐柳杉之強度值會較弱度疏伐柳杉為小，而中度疏伐之上層及下層疏伐間則無顯著性差異存在，破壞係數與氣乾密度成正相關，而破壞係數與年輪寬，年輪寬度與管胞長度間成負相關關係存在，彈性係數與氣乾密度、彈性係數與管胞長度成正相關，而彈性係數與微纖維傾斜角成負相關關係存在。另外，疏伐密度對彈性係數影響不明顯。

以不同栽植距離而言，Wang and Lin (1996) 指出，1 m × 1 m 栽植距離的柳杉林木的抗彎彈性係數、抗彎強度、動彈性係數、抗壓強度及衝擊性能均較 5 m × 5 m 栽植距離的柳杉林木之性質高。

Wang and Chiu (1993a; b) 亦指出不同疏伐度間，重度疏伐柳杉的強度值較弱度疏伐柳杉為小，而中度的上層疏伐及下層疏伐間則無顯著性差異，而破壞強度與微纖維傾斜角及氣乾比重成正相關，而破壞強度與生長輪寬及管胞長成負相關，彈性模數與氣乾比重、生長輪寬及管胞長成正相關，而與微纖維傾斜角有負相關的存在。

疏伐度越大則林木之間的競爭少，會促進林木的生長，增加早材的生長而使晚材率下降，導致抗壓強度變小。

林振榮等人 (2004) 指出不同疏伐度的台灣杉造林木木材的強度會不同，有未處理區 > 中度疏伐 > 重度疏伐之趨勢。

Wang *et al.* (2003) 指出木材的動彈性模數、抗彎彈性模數及抗彎強度是直徑偏大者較小，而抗彎性質是較大的傾向。

## 12. 固碳量與碳排放量

就不同栽植密度與疏伐度柳杉立木及其木製品固碳量與碳排放量的研究，顏添明與黃凱洛（2005）探討杉木之碳貯存量，以數學模式建立碳貯存量及其他相關介量之關係式，結果顯示：（1）碳濃度在直徑級及林木不同部位皆呈現顯著性的差異，在各直徑級之順序皆呈現：葉>枝>幹，而在枝及幹部之碳濃度亦皆隨直徑級之增加而增加。（2）其所建立之模式，可藉由胸徑推估林木之葉、枝、幹及地上部碳貯存量。（3）材積量和地上部碳含量之轉換係數為  $190.35 \text{ kg/m}^3$ 。

林國銓與何淑玲（2005）研究指出，不同林分碳貯存量亦不同，天然林可由  $37.7\sim 254 \text{ ton/ha}$ 。但以先驅樹種組成的山黃麻其貯存量極低，其餘中後期演替樹種貯存量皆在  $170 \text{ ton/ha}$  以上。人工林的變異也很大，主要受樹齡和密度的影響，但大多低於成熟的天然林，顯示國內人工林以現有資料，尚未累積大量的碳。其中溪頭 35 年生的柳杉碳貯存量最高，達  $216 \text{ ton/ha}$ 。

Brown *et al.*（1986）指出，一般幹材材積轉換係數為全株材積（含根部）的係數，其平均值為 1.65。

Fukuda *et al.*（2003）所估算柳杉 20 年生以後根部約佔全株生物量之比例約 20.4%，且維持穩定比例，且用以估算各部位佔全株生物量比例，以與日本柳杉同齡林分之估算比例相互比較。獲悉葉部比例幾近相同，枝條比例略高於日本柳杉 1%，樹幹比例略低約 1%。自此結果推測，日本試驗林分之根部生物量佔全株生物量比例以日本柳杉的估計值 20.4% 來代替，供估算全株林分生立木生物量，可信度甚高。

### III、材料與方法

#### (一) 試驗地

##### 1. 棲蘭山試驗地—不同帶寬之帶狀疏伐試驗地

本研究試驗地位於森林保育處太平山事業區第 20 林班，海拔高約 1100 m，坡向為東東南向，林地坡度約為 15°~35°之間，地質屬石英岩及頁岩，土壤為灰色粘壤土及黃褐色粘壤土，表土深而肥沃。本研究區域年平均降雨量約 3070 mm，且多集中於 7 月至 10 月，其中以單月降雨量 1252 mm 為全年之最；年平均溫度為 11.9°C，最高溫為 8 月的 16.8°C，最低溫為 1 月的 5.1°C，冬季偶有降雪（棲蘭山地區氣象站，2004）。

該造林地原為蓄積豐富之針闊葉樹混交林，經皆伐後於 1966 年栽植柳杉 (*Cryptomeria japonica*)，造林行距為 1.5 × 2.0 m，迄於 1990 年實施帶狀疏伐時，該柳杉人工林之林齡為 24 年生，而至本試驗進行時 (2004 年)，林齡為 38 年生。每公頃林木株數約為 1900 株，立木材積約為 280 m<sup>3</sup>/ha。

柳杉造林木的疏伐處理，採行列帶狀疏伐方式，試驗地約有 2.5 ha，計分為以下 4 種處理以及未處理區，每種處理有 3 種重複，每重複的樣區為 0.1 公頃：

- (1) 疏伐帶寬度 6 m，保留帶寬度 10 m，即砍 2 行留 6 行。
- (2) 疏伐帶寬度 8 m，保留帶寬度 10 m，即砍 3 行留 6 行。
- (3) 疏伐帶寬度 10 m，保留帶寬度 10 m，即砍 4 行留 6 行。
- (4) 疏伐帶寬度 12 m，保留帶寬度 10 m，即砍 5 行留 6 行。
- (5) 未處理區。

試驗標準樣木的選擇來自於每一個樣區中的五株中勢木，共有 15 個小樣區，因此共有 75 株樣木作為本研究之材料，提供後續立木超音波檢測、木材表面穿透儀 (Pilodyn) 測定、鑽取樹蕊提供微破壞儀 (Fractometer) 檢測及 X-ray 掃描年輪特徵值。

## 2. 棲蘭山試驗地—未疏伐試驗地

本研究之試驗地位於棲蘭山林區，其行政區域屬宜蘭縣、新竹縣、桃園縣等三縣之交界處，地理位置位於中央山脈西翼地質區內的雪山山脈帶北段保育處棲蘭山工作區 100 線 16 k 400 m 處，海拔 1750 m 之柳杉造林成功地樣區（太平山事業區 32 林班）。本實驗用柳杉造林地第一區於 1964 年栽植，每公頃林木株數為 3300 trees/ha，2006 年調查時，平均胸高直徑 23.2 cm、每公頃斷面積（林分密度）52.2 m<sup>2</sup>/ha、每公頃林木株數為 1153 trees/ha。第二區柳杉於 1966 年栽植，每公頃林木株數為 3300 株/ha，2006 年調查時，平均胸高直徑 19.1 cm、每公頃斷面積 53.6 m<sup>2</sup>/ha、每公頃林木株數為 1530 trees/ha。試驗標準樣木的選擇來自於每一個樣區中的 30 株樣木，樣木檢測及取樣時間在 2006 年，因此其樹齡分別為 42、40 年生。本研究區域年平均降雨量約 3070 mm，且多集中於 7 月至 10 月，其中以月單月降雨量 1252 mm 為全年之最；年平均溫度為 11.9°C，最高溫為 8 月的 16.8°C，最低溫為 1 月的 5.1°C，冬季偶有降雪（棲蘭山地區氣象站，2004）。地質大部分都經過變硬或變質的第三紀巨厚泥質沈積岩組成，包括深灰或黑灰色劈理良好得硬頁岩（Argillite）、板岩（Slate）以及千枚岩（Phyllite）等；土壤質地多屬玢質壤土或玢質黏壤土，少部分地區為砂質黏壤土，土壤多成強酸性，pH 值常在 3.4~4.5。

## 3. 對高岳試驗地

本試驗所採用的材料取自於南投縣信義鄉台大實驗林對高岳營林區第 28 林班之柳杉造林木，栽植年份為 1969 年 6 月，栽植密度為每公頃 2200 株（Type A）以及每公頃 3000 株（Type B）。此林分依 GPS 定位（X：233072，Y：2603041，海拔 1825 m），佔地 13.05 公頃，土壤為植質土，年均溫 17.9°C，年雨量約 1900 mm（和社農業氣象站，2005），於 1991 年經過一次相同強度的下層疏伐，並於 2001 年秋季 10 月進行第二次下層疏伐。試驗立木於 2007 年春天砍伐，為 36 年生。本試驗林地依航照圖以電腦系統取樣方式，設立 6 個樣區，每個樣區大小 40 m × 40 m，經每木調查得知其胸高直徑、株數，樣區基本資料與林木平均胸高

直徑 (DBH) 如表 4 所示。弱度疏伐係依原樣區生長林木採 10% 之疏伐度，中度疏伐為 25% 之疏伐度，強度疏伐則為 40% 之疏伐度。之後由各樣區中選取 30 棵中勢木做為樣木，進行非破壞性試驗後，再由各樣區中選取要伐採之樣木 3 棵，進行超音波試驗，隨後進行製材與切取圓盤，以進行各項試驗。

表 4 各樣區疏伐處理程度

Table 4 Situations of the sample sites' thinning treatments

樣區	栽植密度 (1969~1991)	第一次疏伐 留存木 (1991~2001)	第二次疏伐 留存木 (2001~2005)	平均胸高直徑 (cm)
Type A1	2200 株/ha (Type A)	550 株/ha	340 株/ha	28.14 <sup>a</sup> (1.95)
Type A2			413 株/ha	27.65 <sup>a</sup> (1.75)
Type A3			512 株/ha	26.97 <sup>a</sup> (1.67)
Type B1	3000 株/ha (Type B)	750 株/ha	612 株/ha	27.35 <sup>a</sup> (1.44)
Type B2			628 株/ha	25.34 <sup>a</sup> (1.06)
Type B3			738 株/ha	24.65 <sup>b</sup> (5.35)

## (二) 試驗儀器與方法

### 1. 超音波測定儀 (Ultrasonic meter) 檢測

超音波法是依據超音波在木材內部傳播速度與其機械性質之間的關係之物理原理，藉由超音波法可以求得木材之音速、動彈性模數。本試驗採用瑞士 SANDES SA 公司生產之 Sylvatest 超音波測定儀 (16 KHz)。試驗之際，先於各樣木胸高直徑 (130 cm) 處，依方向分，以 45° 角為一點，預鑽深度約 2 cm，直徑約 0.8 cm 之超音波發振器 (Pulse generator) 與接受器 (Pulse receiver) 偵測孔，橫向鑽取 8 點，縱向則以胸高直徑處為基準，往下 60 cm 處鑽取 4 點 (東、西、南、北)，繼而將超音波發振器與接受器密接於立木之偵測孔上，共測得 4 個橫向與縱向之超音波傳遞時間，如圖 1 所示。

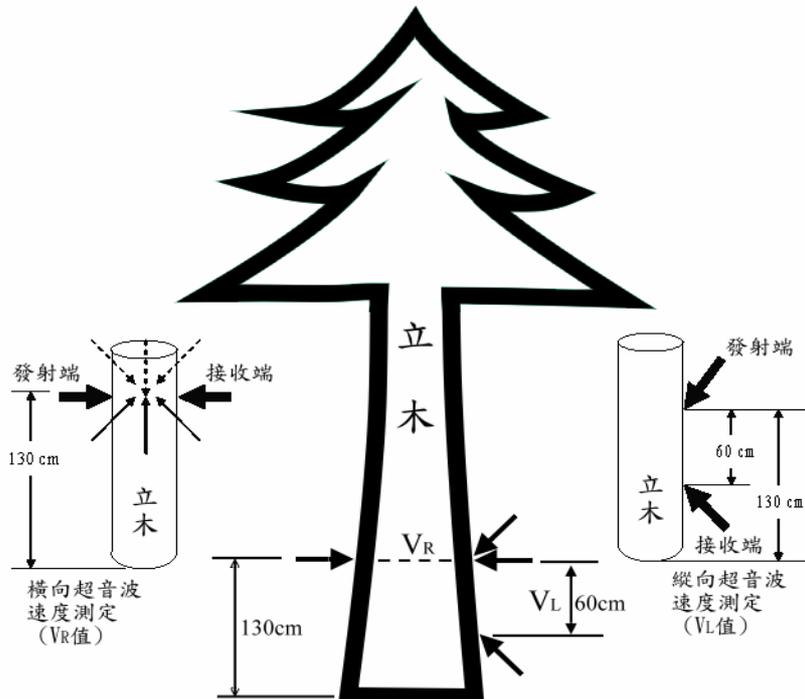


圖 1 立木超音波測定方法及位置

Fig. 1 Standing timber test position and method of ultrasonic wave

再根據下式計算超音波傳遞速度：

$$V = \frac{l}{t}$$

$V$ ：超音波傳播速度 (m/sec)， $t$ ：傳播時間 (sec)

$l$ ：脈波發振器與接收器之間距 (m)

並依下式求得動彈性模數：

$$V = \sqrt{\frac{\text{DMOE}}{\rho}}$$

$V$ ：超音波縱向與橫向傳遞速度 (m/s)

DMOE：動彈性模數 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\rho$ ：質量密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

由每區所選取之樣木，經伐採後於現場造材成原木段 (2.3 m)，依樹高造材成五段至七段不等，進行伐採後原木縱向超音波試驗，胸高直徑部位為第一段，

依上述縱向與橫向超音波速測量點再次加以測定比較砍伐前與砍伐後超音波速之變化情形外，此外每一段之原木亦分別測量邊材、邊心材境界及心材與髓心等不同部位之縱向超音波速度，如圖 2 所示，以比較樹高方向與直徑方向之縱向超音波速變化情形。

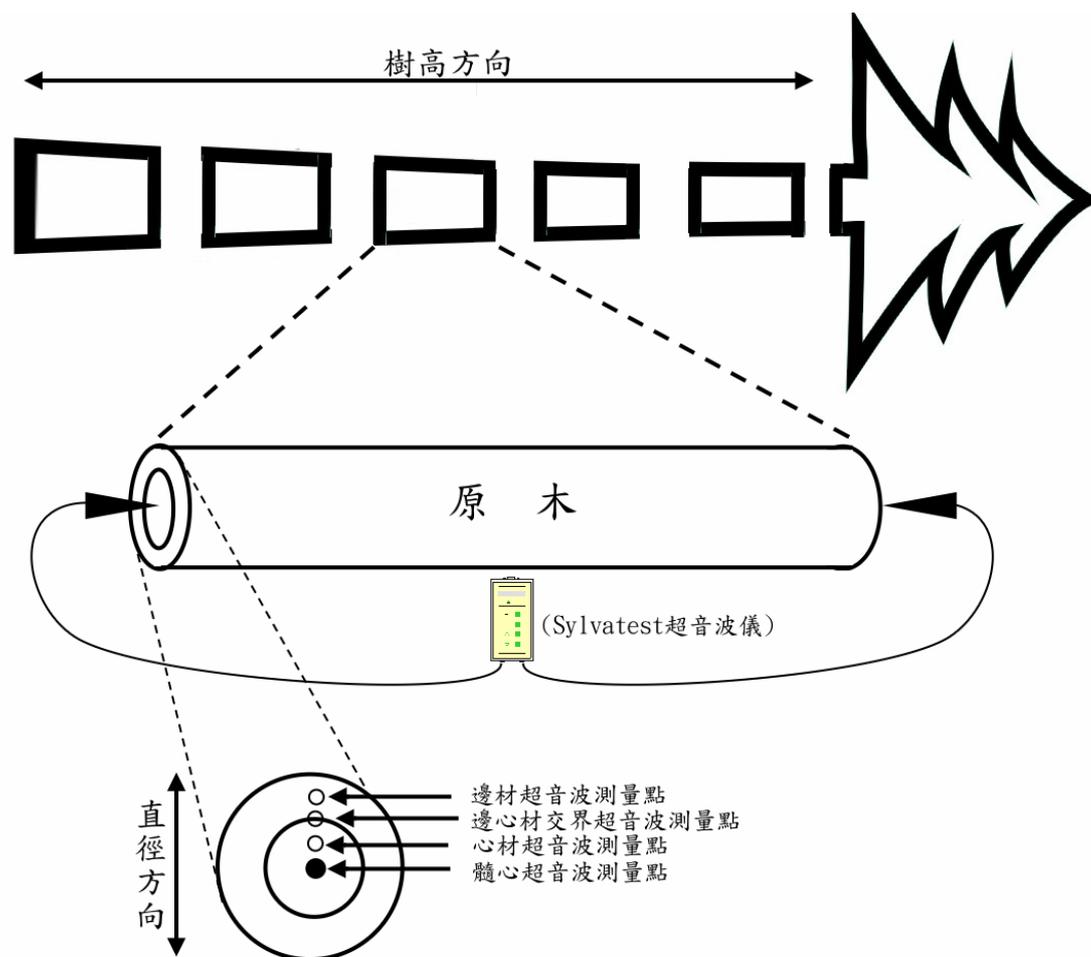


圖 2 原木超音波測定方法及位置

Fig. 2 Log's test position and method of ultrasonic wave

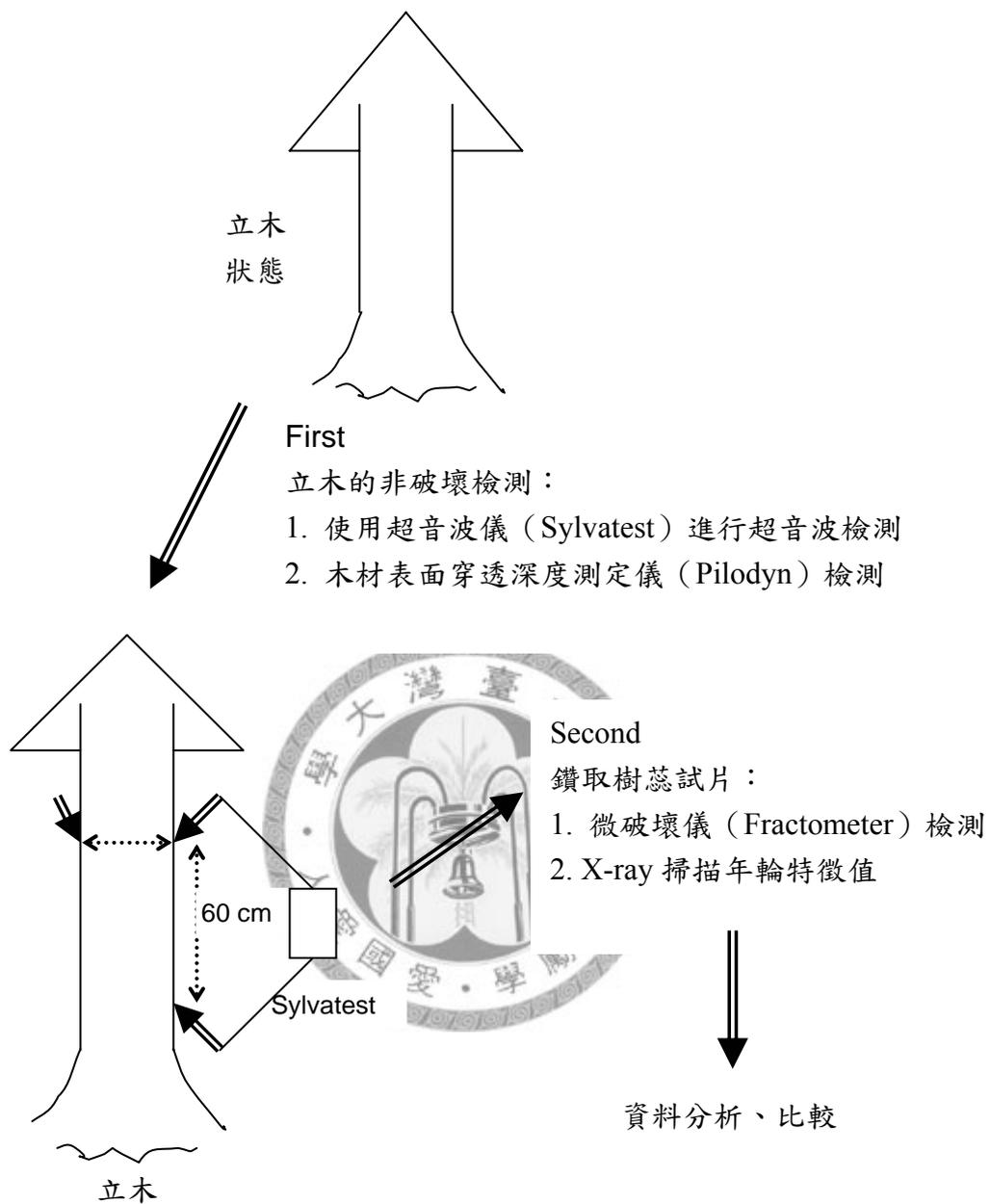


圖 3 試驗流程圖

Fig 3 Flow chart that outlines this study

## 2. 木材表面穿透深度測定儀 (Pilodyn) 檢測

Pilodyn 最初發展源自瑞士 (Switzerland)，一般利用固定能量 6 焦耳 (Joules) 打擊針 (Striker pin) 動力評估測定穿透木材的深度。本試驗使用木材表面穿透深度測定儀 (Pilodyn 6J，瑞士製造)，探針為直徑 3 mm，長度 4 cm，檢測位置

在胸高位置處，經去除檢測點的樹皮後，測定在立木的弦切面，因此，探針穿透方向為徑向，由木材表面穿透儀讀出穿透深度 (mm)，記錄並計算每株樹木的平均 Pilodyn 穿透深度。

### 3. 固碳量計算 (Carbon fixation )

比較上年度與本年度之材積生長，計算有關木材生產及利用過程中碳素儲存變化。以下利用生物量法加以計算，碳總儲存及 CO<sub>2</sub> 總儲存效果，依下式分別加以推算總計 (白石則彥等，2004)。

$$C = C_s + C_\gamma = C_s + \alpha C_s$$

C：林分之固碳量 (ton)，C<sub>s</sub>：林分內樹幹材積中固碳量 (ton)

C<sub>γ</sub>：林分枝、葉、根部分之固碳量 (ton)，α：換算係數

其中，因樹木之材積僅能把握樹幹材積，如能將其乘上換算係數 α，則依上式亦能計算出枝、根部分所包含之碳素蓄積量 (ton)。依日本林野廳試算之換算係數 α 在人工林為 1.7、天然林為 1.9。

$$C_s = V_g \times R \times \beta$$

V<sub>g</sub>：樹幹生材材積 (m<sup>3</sup>)

R：容積密度或基本密度 (kg/m<sup>3</sup>) (R=Wo/Vg)

β：木材含碳量轉換模數 (一般樹木含碳比例 50%，所以為 0.5)

而 R 與 r<sub>0</sub> (絕乾比重) 之關係如次式，

$$R = r_0 \frac{100}{100 + 28 \cdot r_0}$$

$$r_u = r_0 \frac{100 + u}{100 + 0.84 \cdot r_0 \cdot u}$$

r<sub>u</sub>：纖維和點以下時含水率為 u (%) 時之比重

u：含水率

若要由胸高直徑與樹高求出材積 (直徑 4~60 cm) 時，

$$\log V = 1.8344 \log d + 1.0988 \log h - 4.344$$

V：材積 (m<sup>3</sup>)，d：胸高直徑 (cm)，h：樹高 (m)

最後，由林分內樹幹材積中固碳量  $C_s$  推算二氧化碳吸存量  $C_{CO_2}$  (ton) 時，可由此式加以計算。

$$\text{二氧化碳吸存量 } C_{CO_2} = (44/12) \times C_s$$

根據臺灣電力公司的計算基準，可計算出：

$$\text{耗電量 (度)} \times 549 = \text{釋出之 C 量 (g)}$$

$$\text{釋出之 } CO_2 \text{ 量 (g)} \times (12/44) / 1000 = \text{釋出之 C 量 (kg)}$$

#### 4. 微破壞試驗 (Fractometer testing)



圖 4 IML 微破壞儀 (Fractometer)

Fig. 4 IML Fractometer instrument

柳杉立木進行超音波試驗後，以 5.15 mm 口徑之生長錐鑽取通過髓心之樹蕊，每個樣區中的每株標準樣木，在胸高部位處利用生長錐分別鑽取二支樹蕊，作為微破壞儀(Fractometer)檢測及 X-ray 掃描年輪特徵值的試材，鑽取方向固定在坡面的兩側相同方向，其鑽取從髓心到樹皮側的直徑 5 mm 之樹芯。樹芯試材置放於控制環境條件為 20°C 及相對濕度 65% 的恆溫恆濕箱進行調濕作用約二個月，使樹芯試材達到含水率 12%，取出先行標示纖維方向後，再應用微破壞儀 (Fractometer, IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Germany, 圖 4) 檢測樹蕊材質，如圖 5 所示，自髓心至樹皮側依序試驗，以求出縱向微破壞抗壓強度

( $\text{kgf/cm}^2$ )，每次檢測樹蕊試材距離為 6 mm。

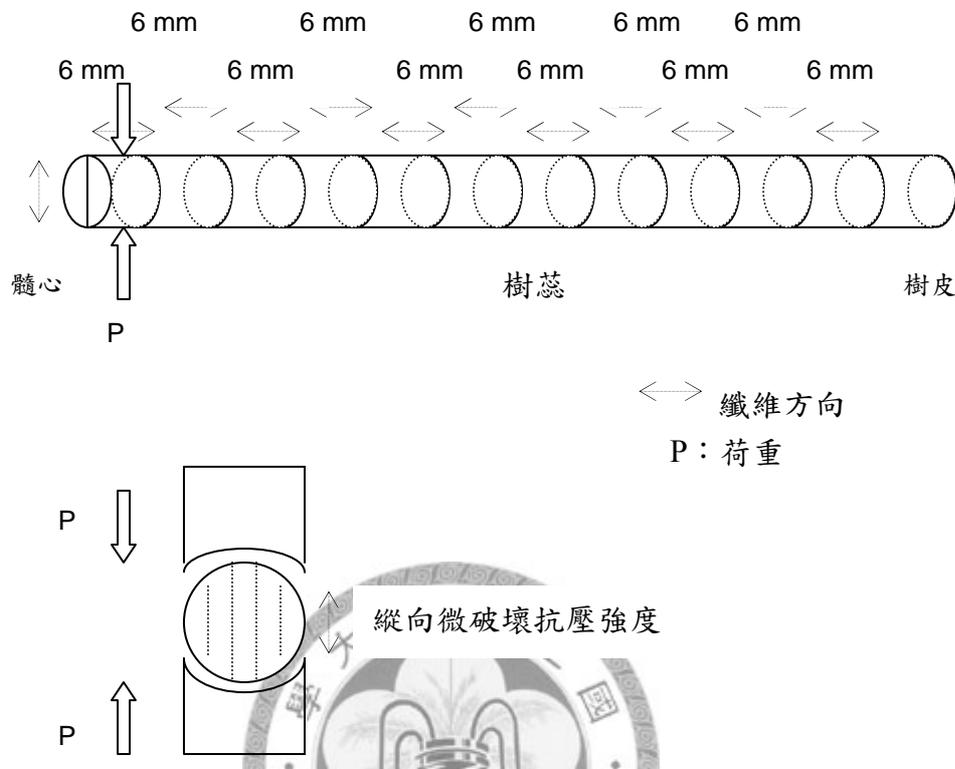


圖 5 微破壞儀樹蕊試材量測圖

Fig. 5 Using fractometer instrument tested cores

## 5. 軟 X-ray

利用生長錐在各樣木之胸高直徑部位鑽取樹蕊，先利用軟 X-ray (Soft X-ray) 照射，獲得 X 光底片，經微密度計 (Microdensitometer) 掃描，分析其早晚材之密度曲線，求出其年輪寬，早晚材境界，晚材率。

### (1) 原理

軟 X-ray 微密度測定法，可以對木材密度最準確的測定，對於一些傳統測定法較難完成的項目，如年輪連續性密度變異、樹輪內及樹輪間密度的變異，可以配合微密度計精確測定，獲得樹輪的特徵值 (樹輪密度、寬度) 是樹輪學相關研

究一項重要的工具。

軟 X-ray 一般原理，其中軟 X-ray 與硬 X-ray 之主要差別，是依據穿透力的大小區分，軟 X-ray 的穿透力較弱而硬 X-ray 的穿透力較強，前者能夠穿透 7 mm 的木材，而無法穿透 7 mm 的鋁片，硬 X-ray 就能穿透 7 mm 的鋁片。再以波長區分時，軟 X-ray 的波長大約在 3~12 Å 之間，而硬 X-射線在 3 Å 以下。

軟 X-ray 微密度測定法，是將樹蕊試片置於軟 X-ray 與負片之間，當 X-ray 穿透樹蕊試片時，因樹蕊試片各部分密度不同，使穿透的光量不同，而使負片的感光程度有所差異。再利用微密度計將負片加以掃描解析，則可將感光程度，用光學濃度 (AD) 表示出。

樹蕊試片內高密度的部分，X-ray 透射較少，使負片粒子感光較少，造成感光粒子殘留於負片之量較少，因此高密度的部分如晚材，在負片的濃度較低 (顏色較淺)；而低密度的早材，在負片上的濃度較高 (顏色較深)。

當入射 X-ray 的強度為  $I_0$ ，穿透厚度  $d$  (mm) 與密度  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 的樹蕊試片時，樹蕊試片會吸收 X-ray 的能量，透過試片後，X-ray 的強度只會剩下  $I$ 。

$$I_n = \frac{I}{I_0}$$
，其中  $I_n$  稱為光學濃度，是微密度計解析負片所得的記錄，依

Beer 法則，材料密度與  $I_n$  會成正比，所以密度愈大的部分，其 X-ray 透過強度  $I$  愈小，所以負片感光程度較低，而呈現較淺顏色。因此樹蕊試片之密度  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 與光學濃度  $I_n$  成正比，所以可利用光學濃度之差異判定樹蕊試片的密度變化。

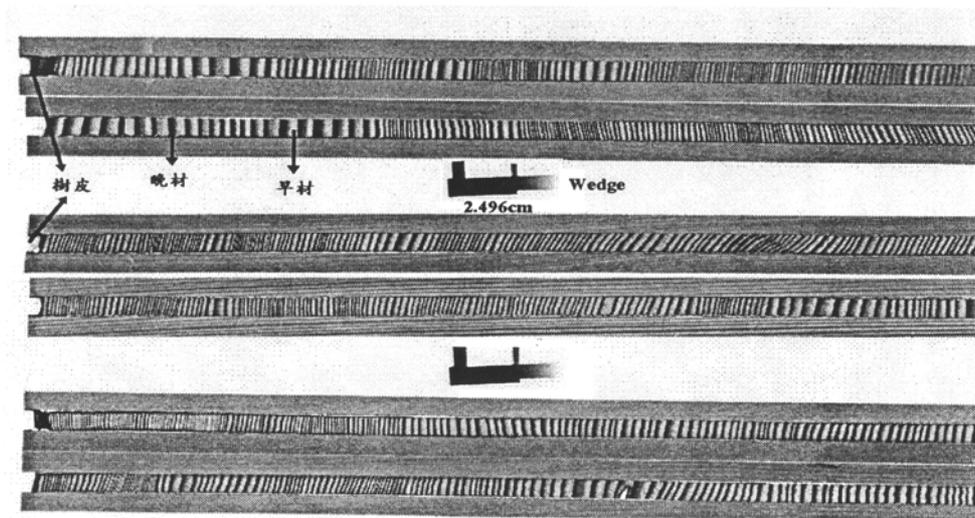


圖 6 樹蕊利用 X-ray 拍出的照片

Fig. 6 The picture taken by X-ray

## (2) 照射 X-ray 及樹輪分析器

照射 X-ray 及樹輪分析器使用 QMS Tree Ring Analyzer (型號：QTRS-01X) (Quintek Measurement Systems, Inc., Knoxville, TN, USA) (QMS, 1999) 測定密度量變曲線 (Density profile) 資料，試材經過預先處理後，由 QMS 儀器掃描試材，並經分析軟體解析後，可以獲得密度量變曲線 (Density profile)，事先預備試驗的掃描中發現，為了達到較佳的密度量變曲線圖結果，因此將質量吸收係數 (Mass absorption coefficient) 預先設定為 3.00，藉由 QTRS-01X 掃描系統對木材密度決定的原理，是基於 X-ray 衰減及密度間的關係可以表達為如下方程式。

$$I/I_0 = e^{-\mu\lambda t}$$

這個式子中，

$I$  = 徑向光束 (Radiation beam) 在穿透通過試片的濃度 (Intensity)

$I_0$  = 徑向光束沒有穿過試片的濃度

$\mu\lambda$  = 樣本線性衰減係數 (Linear attenuation coefficient) ( $\text{cm}^{-1}$ )

$t$  = 樣本厚度 (cm)

$e$  = 自然對數基數 (Natural logarithm base)

當  $I$  及  $I_0$  是被測定在每一個點的量變曲線 (Profile) 中,  $\mu\lambda$  是被計算在量變曲線中的每一個點。線性衰減係數 ( $\mu\lambda$ ) 與木材密度間的關係可以表達如下方程式。

$$\mu\lambda = \mu_m \times \rho$$

這個式子中,

$$\mu_m = \text{樣本質量衰減係數 (Mass attenuation coefficient) (cm}^2/\text{g)}$$

$$\rho = \text{樣本密度 (Sample density) (g/cm}^3\text{)}$$

當樣本質量衰減係數 ( $\mu_m$ ) 已知, 由決定好的樣本線性衰減係數 ( $\mu\lambda$ ) 在量變曲線 (Profile) 中可以計算樣本密度 ( $\rho$ ), 進而建立木材密度曲線 (Density profile), 其精確度為 0.04 mm。

QMS 測定系統操作電壓值可達 25 千伏特值 (k volts), 標準視準器 (Collimator) 提供 QTRS-01X 型 X-ray 在檢測器 (Detector) 測定 0.0038 cm 寬及 0.159 cm 高度。其精確度可達 0.002 cm, QMS 測定系統包括了樹輪分析器 (Tree Ring Analyzer), 樹輪分析器可以藉由一定量樣本, 進行標準化測定方法以符合實際樣本密度 (Actual sample density) (QMS, 1999), 由於處理大量資料及精確判斷年輪位置, 資料數據先經過轉換後, 再由 Excel 軟體計算及分析。

### (3) X-ray 掃描及分析樹輪特性之步驟

- a. 利用直徑 5 mm 的生長錐鑽取樹蕊, 鑽樹蕊時, 要保持生長錐與樹幹盡量垂直。
- b. 樹蕊試材先經過甲醇 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ , 濃度為 98%) 抽出處理, 以 1 L 的量筒作為容器, 量筒開口上裝冷凝管, 並以膠帶封口, 隔水加熱, 水溫  $70^\circ\text{C}$ , 將樹蕊試片浸泡至甲醇液中, 抽出液更換直到甲醇透明不再變色為止, 若抽出顏色變為深褐色時, 應將抽出液更新。木材抽出物抽取完成, 之後, 以蒸餾水進行抽出處理, 同樣步驟直到冷水不再變色為止。
- c. 取出置於  $20^\circ\text{C}$ 、65% 相對濕度的恆溫恆濕箱中, 調整含水率至 12%。
- d. 將樹蕊試片利用動物膠固定於有凹槽的木製砧板上, 植入時以橫切面向外。  
木製砧板的材料以無節, 且材質切割性佳為考慮要點, 本試驗使用阿拉斯加

扁柏 (*Chamaecyaris nootkatensis*) 作為木製砧板的材料。

- e. 利用圓鋸機切割樹蕊，將樹蕊切成厚 2 mm、寬 5 mm 的試片，且必須保持兩面光滑，所以切割時要注意切割速度。
- f. 將試片以 20°C，相對濕度 65% 調濕至含水率 12 ~ 15%，再將樹蕊試片置於 X-ray 和負片間，而 X-ray 距離樹蕊試片 62.5 cm，照射底片範圍 25.4 cm × 11.5 cm。
- g. 沖洗底片，並利用微密度計分析底片上的光學濃度。如此便就可得到早晚材之密度曲線，求出年輪寬及晚材率。

## 6. 抗壓試驗 (Compression testing)

參照 CNS453 木材抗壓試驗法進行縱向抗壓試驗。本試驗係採用 SHIMADZU 1991 年出廠之加長型萬能強度試驗機，藉由 GPIB 介面 (IEEE-488) 由微電腦控制，可選擇三種載重模式：1. 固定應力速度，2. 固定位移速度，3. 固定應變速度，本試驗採固定應力速度載重模式，將試片置於平面鋼板間，載重方向與纖維方向平行，載重速度為每分鐘 100 kgf/cm<sup>2</sup>，再由次式求出各試片之抗壓強度及抗壓彈性模數。

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

$$E_c = \frac{\Delta P \cdot l}{\Delta l \cdot A}$$

$\sigma_c$ ：抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_c$ ：抗壓彈性模數 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\Delta P$ ：比例限度內兩載重之差 (kgf)

$\Delta l$ ：與  $\Delta P$  相對應之長度縮小量 (cm)

$l$ ：試片長度 (cm)

$P$ ：最大載重 (kgf)

$A$ ：試片橫斷面積 (cm<sup>2</sup>)

## 7. 抗彎試驗

本試驗係採用 SHIMADZU 1991 年出廠之加長型萬能強度試驗機，參照 CNS454 木材抗彎試驗法進行抗彎試驗。

### (1) 實大樑試材

實大樑試材尺寸之橫斷面大於 38 mm × 8.9 mm，長度 (L) 為跨距與 2 倍橫斷面長邊之和，跨距為短邊或長邊之 14 倍以上，利用萬能強度試驗機將實大樑試材進行四點載重 (三等分載重) 抗彎試驗，求出其比例限度載重與撓曲，再由載重與撓曲曲線圖求出抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR)、抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity in bending, MOE)。

$$MOR = \frac{3P(l-l')}{2bh^2} = \frac{P \times l}{bh^2} \text{ (kgf / cm}^2\text{)}$$

$$MOE = \frac{P_p(l-l')[2l^2 + 2ll' - l'^2]}{8\delta_p bh^3} = \frac{23P_p \times l^3}{108\delta_p bh^3} \text{ (kgf / cm}^2\text{)}$$

P 為最大載重(kgf)

l' 為載重點間距離 (cm)

l 為跨距 (cm)

b 為試片長方形斷面之寬(cm)

h 為試片高度(cm)

P<sub>p</sub> 為比例限度載重(kgf)

δ<sub>p</sub> 是為 P<sub>p</sub> 載重時，在載重點之下 (跨距中央) 之撓曲(cm)

### (2) 無缺點小試材

無缺點小試材橫斷面為正方形，斷面邊長 (a) 為 20 mm，長 (L) 為跨距 + 2a，跨距為斷面邊長之 14 倍。將無缺點小試材進行中央集中載重抗彎試驗，求出其比例限度載重與撓曲，再由載重與撓曲曲線圖求出抗彎強度 (MOR)、抗彎彈性模數 (MOE)。

$$\text{MOR} = \frac{3Pl}{2bh^2} (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

$$\text{MOE} = \frac{P_p l^3}{4\delta_p bh^3} (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

P 為最大載重(kgf)

l 為跨距 (cm)

b 為試片斷面之寬(cm)

h 為試片高度(cm)

$P_p$  為比例限度載重(kgf)

$\delta_p$  是為  $P_p$  載重時，在載重點之下（跨距中央）之撓曲(cm)

#### 8. 管胞長度與微纖維傾斜角試驗

- a. 取圓盤：就對高岳試驗地每一個樣區，伐倒三棵樣木並於胸高直徑處取得圓盤，總共六區，總計 18 棵。
- b. 年輪寬測定：取通過髓心，切取 3 cm 寬，1 cm 厚包含髓心的木條，由橫斷面和年輪垂直方向，用比較測長器量出每一年輪年輪寬。
- c. 管胞長度的測定：取自髓心向樹皮方向，每一年輪，自早、晚材交界處，向早、晚材部份各 1/5 處切取厚約 500  $\mu\text{m}$ ，長約 1.5 cm 的弦切面木絲，使用 Franklin's Method，即於 1 份過氧化氫，5 份冰醋酸，4 份蒸餾水之解離液中進行解纖。試管使用矽膠製，於 40°C 烘箱中放置 7 天左右(或 60°C 中約 48 小時)，至木絲呈透明白色，取出一部份纖維狀之管胞於載玻片上，用番紅(Safranin-o)染色後，在 Nikon 投影機 (Profile projector) 下，每一樣品取 60 根，並分別量測早材及晚材管胞長度，以其平均長度，代表該樣品之管胞長度；若將信心水準設為 95%，依據公式  $N \geq 2 (CV/d\%)^2 \times (t_1+t_2)^2$  則每一試材每一年輪所取的管胞樣本數為 20 根即可，也就是早材管胞 20 根，晚材管胞 20 根，共 40 根；但若將信心水準設為 99%時，則每一試材每一年輪所取的管胞樣本數為 60 根，早晚材合計共 120 根，所以在時間和人力的考量之下，每一試材每一

年輪所取的管胞樣本數為 30 根，早晚材合計共 60 根，因為取樣 30 根不僅達到 95% 的信心水準，也符合中央極限值定理，確保樣本為常態分配。

d. 資料分析：

- (a) 以管胞長度在徑向變化之情形和計算管胞長伸長率降至 1% 時，視為未成熟與成熟材境界。
- (b) 以測得的年輪寬和管胞長度，分析其相關性並與疏伐度、栽植密度作探討。
- (c) 分析疏伐度、栽植密度對成熟年齡的影響進而了解成熟材率。
- (d) 分析不同疏伐度及栽植密度對於管胞長度和距髓心出現境界的距離是否有影響。



## 9. 目視分等

### (1) CNS14631 框組壁工法結構用製材乙種框組材分等標準

根據 CNS14631 框組壁工法結構用製材乙種框組材分等標準 (CNS14631 structural sawn lumber used in platform construction grading rules, 如表 5), 將實大樑試材, 經由目視分等區分成結構材 (Construction)、標準材 (Standard) 及普通材 (Utility), 若試材經由目視分等後之結果, 無法進入等級內, 則併入等外材 (Out of grade) 中。

表 5 CNS14631 框組壁工法結構用製材分等標準 (乙種框組材)

Table 5 CNS14631 structural sawn lumber used in platform construction grading rules

區分		結構級 (Construction)	標準級 (Standard)	普通級 (Utility)	
節或穴孔	在寬度有關材面者	節	最大直徑是在 38 mm 以下	最大直徑是在 51 mm 以下	最大直徑是在 64 mm 以下
		穴孔	最大直徑是在 25 mm 以下	最大直徑是在 32 mm 以下	最大直徑是在 38 mm 以下
		集中節	在 15 cm 長度之材面所存在節之直徑合計不超過 76 mm 者	在 15 cm 長度之材面所存在節之直徑合計不超過 102 mm 者	在 15 cm 長度之材面所存在節之直徑合計不超過 128 mm 者
		穴孔數目	每 90 cm 長度之材面在 1 個以下者	每 60 cm 長度之材面在 1 個以下者	每 30 cm 長度之材面在 1 個以下者

		在厚度有關材面者	在寬度有關材面置換成節者之最大直徑是在 38 mm 以下者。但是，如為橫斷寬度材面之流節時，是為相當徑比之 1/4 以下者	在寬度有關材面置換成節者之最大直徑是在 51 mm 以下者。但是，如為橫斷寬度之材面之流節時，是為相當徑比之 1/3 以下者	在寬度有關材面置換成節者之最大直徑是在 64 mm 以下者。但是，如為橫斷寬度之材面之流節時，是為相當徑比之 1/2 以下者
	腐朽		無	輕微	不顯著
	變色		在 固心材部位以外知心材部位不變色	在 固心材部位以外知心材部位不變色	--
	邊		厚度 邊及寬度 邊為 1/4 以下。但對於批量之 5% 以下者，在材長之 1/4 以下，厚度 邊可為 1/2 以下，寬度 邊可為 1/3 以下	厚度 邊及寬度 邊為 1/3 以下。但對於批量之 5% 以下者，在材長之 1/4 以下，厚度 邊可為 7/8 以下，寬度 邊可為 3/4 以下	厚度 邊及寬度 邊為 1/2 以下。但對於批量之 5% 以下者，在材長之 1/4 以下，厚度 邊可為 7/8 以下，寬度 邊可為 3/4 以下
割裂	穿割裂	橫斷面	割裂長度在該製材之寬度以下	割裂長度在該製材之寬度 1.5 倍以下	割裂長度在該製材之寬度 1/6 倍以下
		材面	無	割裂長度之合計在 60 cm 以下	割裂長度之合計在該製材長度之 1/3 以下
	其他割裂	橫斷面	深度在該製材厚度之 1/2 以下	深度在該製材厚度之 1/2 以下	--
		材面	割裂長度之合計在 60 cm 以下	割裂長度之合計在 90 cm 以下	--
	加工上之缺點		不顯著	利用上無礙	利用上無礙

彎曲	0.2% 以下	0.5% 以下	0.5% 以下
反 與 曲	輕微	不顯著	利用上無礙
纖維 向 之 傾斜	170 mm 以下	250 mm 以下	250 mm 以下
其他缺點	輕微	不顯著	利用上無礙

## (2) CNS 444 製材之分等標準

依據 CNS 444 製材之分等標準中之造林木針葉樹製材分等標準的割材類(如表 6)，進行目視分等，將實大樑區分成一等材、二等材、三等材及等外材。目視分等主要以節徑比來判定，即以材面最大節的長徑與材寬之比例(徑比)而定。若此最大節為拔節、腐節或易拔節之徑，視為實測徑的兩倍。如果此節 穿其他材面者，視為實測徑之四倍。

表 6 CNS 444 製材之分等

Table 6 CNS444 grading rules for sawn lumber

缺點 品等	節	邊	鋸口縱裂	腐朽、蟲孔、 缺、穴	其他
一等	節徑比 30% 以下 (長徑在 3 cm 以下)	5% 以下	5% 以下	無	極輕微
二等	節徑比 50% 以下 (長徑在 6 cm 以下)	20% 以下	10% 以下	節徑比 40% 以下 (長徑在 6 cm 以下)	輕微
三等	超過上列限度	超過上列限 度	超過上列限 度	超過上列限度	較顯著

## 10. 打音頻譜與振動試驗

### (1) 打音頻譜 (Tap tone instrument, Tt)

小試材橫斷面為正方形，斷面邊長 (a) 為 20 mm，長 (L) 為跨距 + 2a，跨距為斷面邊長之 14 倍。本試驗係採用 EN-338 打音頻譜測定儀，進行小試材之打音頻譜試驗 (如圖 7)，所得之數值 (F)，經由公式  $Tt = 2 F \times L$ ，計算出打音頻譜的數值 (Tt)。

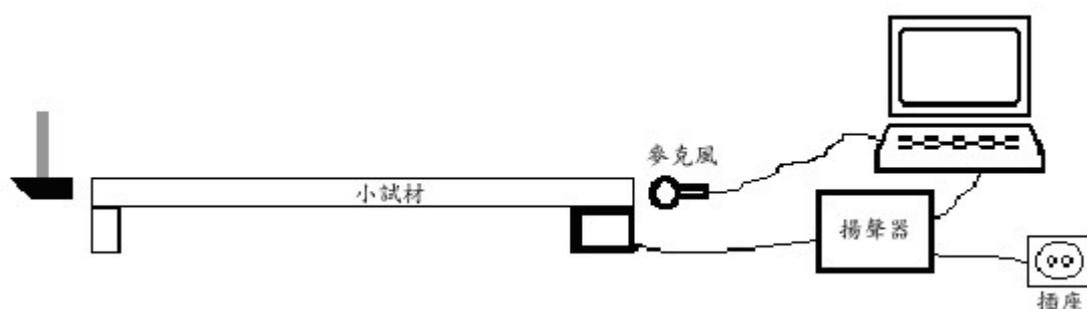


圖 7 打音頻譜量測儀  
Fig. 7 Tap tone instrument

### (2) 振動 (Tap vibration instrument, Tv)

將打音頻譜儀中的麥克風換成加速規，進行小試材的振動試驗 (如圖 8)。小試材橫斷面為正方形，斷面邊長 (a) 為 20 mm，長 (L) 為跨距 + 2a，跨距為斷面邊長之 14 倍。所得之數值 (F)，經由公式  $Tv = 2 F \times L$ ，計算出振動試驗的數值 (Tv)。

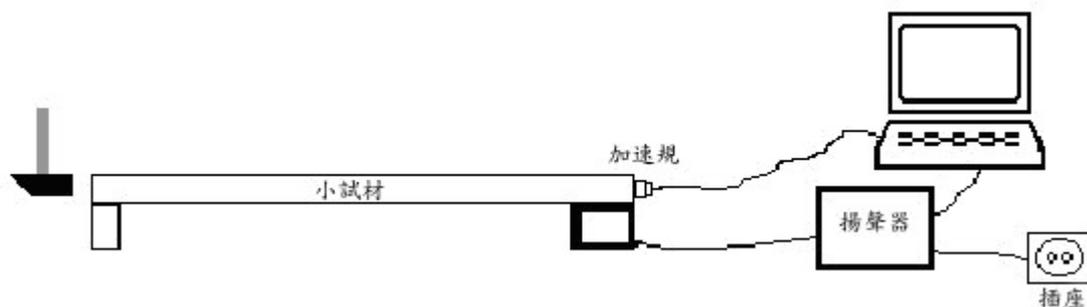


圖 8 振動試驗量測儀

Fig. 8 Tap vibration instrument

#### IV、結果與討論

##### (一) 棲蘭山試驗地—不同帶寬之帶狀疏伐試驗地

##### 1. 胸高直徑 (DBH)

表 7 各樣區之樣木胸高直徑 (DBH) Tukey 分析

Table 7 The DBH of the sample trees in various sites by Tukey analysis

樣區	樣本數	DBH (cm)	標準差
未處理區	15	24.4 <sup>a</sup>	2.17
疏伐帶寬度 6 m	15	28.1 <sup>b</sup>	3.00
疏伐帶寬度 8 m	15	28.7 <sup>b</sup>	3.22
疏伐帶寬度 10 m	15	30.3 <sup>b</sup>	5.18
疏伐帶寬度 12 m	15	30.6 <sup>b</sup>	2.56

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

由表 7 中顯示出帶狀疏伐越強則其胸徑越大，其中未處理區的胸徑最小為 24.4 cm，疏伐帶寬度 12 m 的樣區（砍五留六的樣區）胸徑最大為 30.6 cm，未處理區的胸徑與其他四區有顯著的差異，所以經帶狀疏伐處理後，胸徑皆會明顯增大，此係當進行帶狀疏伐後，林木就有較多 光、養分和水分等資源，故對其林木肥大生長有正面的幫助，所以當疏伐度越大，其所得資源也越多，競爭變小，胸徑也就越大。王松永與林法勤（1994）在臺灣栽植柳杉之栽植距離對其密度與樹種強度性質之影響中指出，栽植距離大的林木多進行肥大生長，故胸徑較大。陳麗琴等人（1996）在栽植密度對六龜地區台灣杉生長的影响中提到台灣杉的平均胸徑隨栽植密度的增加而降低，隨林齡增加而上升，28 年以後仍在繼續增加中。王松永等人（2005）在桃芝颱風所引起土石流對人工林台灣杉性質之影響中指出，土石流後所引起的帶狀衝擊下，距離帶狀空曠區近者，胸徑較大，越遠離者胸徑越小。邱志明（1987）不同疏伐度對柳杉的影響中指出，強度疏伐度林木的胸徑大於中度下層疏伐、中程度上層疏伐、弱度疏伐林木。Yang（1987）指出疏伐處理後的生長空間變大，受光量較大，土壤養分，水分競爭少，促進林木生長，

致有較大的生長寬度發生，而疏伐將促進早材的生長，以致於產生較低的木材比重。Wang *et al.* (2003) 指出由於疏伐度較強時所形成的空間變大促進有大的胸徑，而木材的動彈性模數、抗彎彈性模數及抗彎強度是直徑偏大者會較小，而抗彎的胸徑大於中度疏伐，大於未疏伐者，未疏伐的胸徑對其他兩者有顯著的差異存在。更顯示出疏伐處理對林木肥大生長有正面的效果。Zobel and van Buijtenen (1989) 指出不同的育林措施對林木的影響具有變異性存在，其中胸徑大者因為生長快速而生長輪寬大、纖維短、纖維傾斜角大和比重比較小，而生長慢者反之。

就標準差而言，以疏伐帶寬度 10 m (砍四留六) 的樣區，其標準差比其他的樣區大，而以未處理區為最小。此標準差之所以是未處理區的最小，係因為帶狀疏伐是帶狀的皆伐但並未疏伐到保留樣區內的林木，所以該保留區內的林木仍維持原本林木的標準差，而不對高岳營林區樣區的疏伐，其是針對樣區內林木進行不同程度的疏伐，故其經疏伐後，疏伐區的標準差會比未處理區來的小，也使得樣區內的林木差異變小。故如經帶狀疏伐後，保留樣區的標準差比未處理區的標準差大是正常的現象，所以也因不同的疏伐處理所造成不同林木生長的影響。

## 2. 立木超音波速動彈性模數及縱向微破壞抗壓強度

於立木狀態下，不同帶狀疏伐強度的柳杉造林木之平均縱向超音波速、縱向動彈性模數、徑向超音波速、徑向動彈性模數、縱向微破壞抗壓強度及木材表面穿透儀 (Pilodyn) 刺入深度值，顯示在表 8 中。

平均縱向超音波速為 2628.1~2878.9 m/s，疏伐帶寬度 6 m 的樣區 > 未處理區 > 疏伐帶寬度 12 m 的樣區 > 疏伐帶寬度 10 m 的樣區 > 疏伐帶寬度 8 m 的樣區；平均縱向動彈性模數為 33063~43582 kgf/cm<sup>2</sup>，疏伐帶寬度 6 m > 未處理區 > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m > 疏伐帶寬度 8 m；Zobel and van Buijtenen (1989) 指出疏伐處理後會產生短管胞和寬度較大的早材，導致低密度與低晚材率。因此疏伐強度的增大會使縱向超音波速下降，而縱向超音波是測量立木纖維方向的超音波速，通常縱向超音波速越快，表示該材料之縱向動彈性模數越佳(卓

志隆，1998)，且動彈性模數與抗彎彈性模數間有良好的相關性，因此由縱向超音波速來評估木材的強度是可信賴的指標。

表 8 不同強度帶狀疏伐樣木之超音波速、動彈性模數、微破壞抗壓強度與刺入深度

Table 8 Dynamic modulus of elasticity and compressive strength of standing trees obtained from different row thinning regimes

	不同帶狀疏伐強度				
	Control	6 m	8 m	10 m	12 m
Vl (m/s)	2865.1 (381.8)	2878.9 (585.3)	2628.1 (313.1)	2652.5 (453.2)	2665.0 (503.5)
DMOEl (kgf/cm <sup>2</sup> )	41674 (10169)	43582 (17178)	33063 (7779)	34322 (11231)	38571 (13718)
Vr (m/s)	1512.2 (107.7)	1642.8 (86.0)	1559.4 (113.0)	1477.0 (157.8)	1571.1 (166.4)
DMOEr (kgf/cm <sup>2</sup> )	11510 (1631)	13633 (2462)	11654 (2318)	10530 (2387)	13270 (3094)
Fcf (kgf/cm <sup>2</sup> )	386 (66)	350 (73)	359 (84)	330 (71)	333 (80)
P (mm)	20.1 (2.8)	17.3 (1.7)	16.3 (2.1)	16.1 (1.8)	16.3 (2.3)

Vl：縱向超音波波速(m/s)

DMOEl：縱向動彈性模數(kgf/cm<sup>2</sup>)

Vr：橫向超音波波速(m/s)

DMOEr：橫向動彈性模數(kgf/cm<sup>2</sup>)

Fcf：微破壞抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

P：Pilodyn 刺入深度(mm)

由於立木超音波在木材中進行縱向傳播時，主要是經由晚材部份傳遞 (Mishiro, 1995；1996a, b, c, d)，因此若縱向超音波速度越快，則可推論其晚材率可能較高，亦有可能是其木理傾斜角較小。Bucur (1995a) 則指出由木理平行方向 (縱向) 所測得之超音波速會明顯大於弦向及徑向者，其原因係為縱向細胞

沿著軸向排列，提供一個連續的路徑；纖維長度和縱向超音波速間有一密切的相關性。而超音波在徑向傳遞時，係藉由束狀結構（木質線）移動，但是在弦切面則完全沒有這種組織，所以超音波在徑向波速又會大於弦向波速；除了木質線組織存在於徑切面外，尚有年輪構造（早材、晚材）及介於弦、徑切面中幾何排列不同的細胞，影響著木材的異方性。木材三切面的超音波音速間的比值， $L:R:T=3:2:1$ ，因此木材之異方性可以利用三方向之超音波速的比值加以評估，而且結果合乎木材機械性質。本試驗中縱向與橫向超音波的比為 1.56~1.89 間，實屬合理之範圍。林振榮等人（2002）指出台灣杉不同疏伐及修枝處理的立木及實木試材，利用超音波波速與動彈性模數發現，經過疏伐處理後的樣木較未處理區樣木有較低的趨勢，亦即未處理區有較佳的木材超音波性質值。

平均徑向超音波速度為 1477.0~1642.8 m/s，疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 8 m > 未處理區 > 疏伐帶寬度 10 m；平均徑向動彈性模數為 10530~13633 kgf/cm<sup>2</sup>，疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 8 m > 未處理區 > 疏伐帶寬度 10 m；Beall（2002）指出，就實木而言，橫向超音波速約在 1~2 km/s，徑向波速比弦向波速約大於 50 %。此與 光平（2003）、陳與黃彥三（2002）、陳勁豪（2002）所得結果相似。

平均縱向微破壞抗壓強度為 330~386 kgf/cm<sup>2</sup>，未處理區 > 疏伐帶寬度 8 m > 疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m；Wang and Chiu（1993a, b）指出不同疏伐度間，重度疏伐柳杉的強度值較弱度疏伐柳杉為小，而中度的上層疏伐及下層疏伐間則無顯著性差異，而破壞強度與微纖維傾斜角及氣乾比重成負相關，而破壞強度與生長輪寬及管胞長成正相關，彈性模數與氣乾比重、生長輪寬及管胞長成正相關，而與微纖維傾斜角有負相關的存在。疏伐度越大則林木之間的生長競爭少，會促進林木的肥大生長，所增加者為早材而使得晚材率會下降，導致抗壓強度變小。Wang and Lin（1996）指出，栽植距離小的 DBH 小，其木材之抗壓強度、抗彎強度、動彈性模數及衝擊性能均會較栽植距離大的柳杉為高。Wang *et al.*（2001）亦指出較低密度林分顯示有應力波速度及抗彎性質會降低的傾向。林振榮等人（2004）指出不同疏伐度的台灣杉造林木木材的強度會

不同，有未處理區 > 中度疏伐 > 重度疏伐之趨勢。Kasal Bo (2003) 指出，利用樹蕊進行微破壞（抗壓和抗拉）與 ASTM 標準試片比較發現，抗壓試驗在兩者間有高度相關性，引張時兩者間也有相關性但沒有抗壓試驗高，而在彈性模數的表現上亦有高度相關。因此以樹蕊的縱向抗壓強度來做為評估立木強度的指標具有代表性，同時以超音波來評估材質的強度與均質性也是可靠的方式之一。

Pilodyn 刺入深度為 16.1~20.1 mm，未處理區 > 疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 8 m = 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m。經由統計 ANOVA 分析的結果，並沒有顯著性的差異存在，由此得知，不同帶狀疏伐強度對柳杉造林木的各種檢測材質數值並沒有影響。

### 3. 年輪特徵值

X-ray 掃描樹輪的九個年輪特徵值，首先需要調整實際的木材密度值，再者，需要決定早晚材境界密度值，前者，可以由一定數量的試片，進行標準化測定方法以符合實際樣本密度，後者，早晚材境界密度有固定門 (Fixed threshold) 及 動門 (Floating threshold) 兩種，為了確實決定早晚材境界密度以推算年輪密度特徵值，作為評估材質的指標，由推算的年輪密度量變曲線 (Density profile) 為基礎，使用比較測長器 (Comparator)，觀察記錄部份試材的年輪早晚材境界點位置，由相關位置獲得相對應的推算密度值。另外，由推算的年輪密度量變曲線中，獲取年輪內最高及最低密度值加以平均，與年輪早晚材境界密度兩者之間，進行直線迴歸統計，其結果如圖 9 所示，並藉由此結果推算實際的境界密度值，以決定九個年輪特徵值。

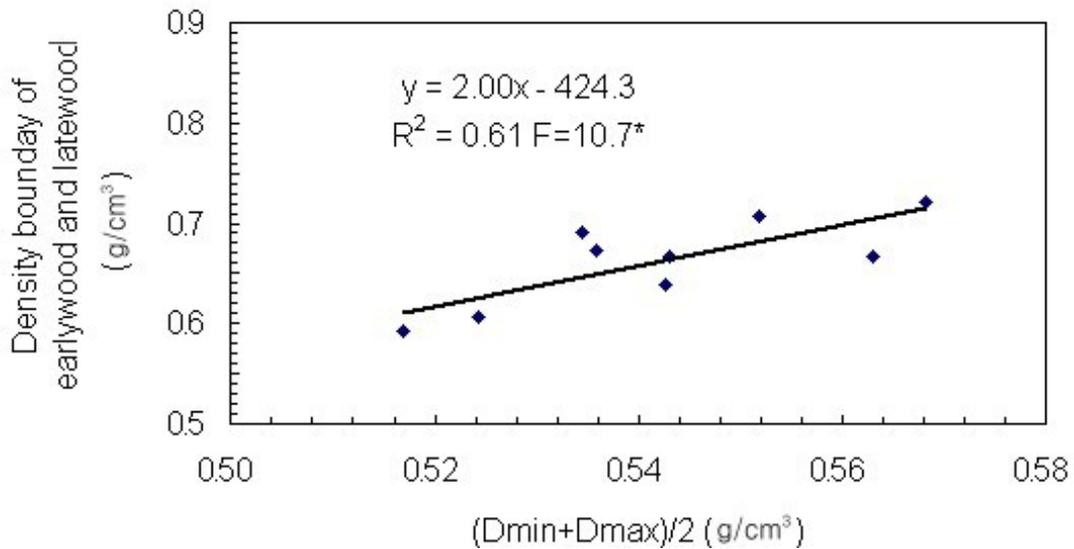


圖 9 柳杉早晚材境界密度和最高與最低密度平均值之關係

Fig. 9 Relationship between the density boundary of early wood and late wood and (Dmin+Dmax)/2 density for Japanese cedar

不同帶狀疏伐強度的柳杉造林木之平均年輪寬度、早材寬度、晚材寬度、年輪密度、早材密度、晚材密度、最低密度、最高密度及晚材率，顯示在表 9 中，經由統計 ANOVA 分析的結果，並沒有顯著性的差異存在，由此得知，不同帶狀疏伐強度對柳杉造林木的九個年輪特徵值並沒有影響。

平均年輪寬度為 2.02~3.26 mm，疏伐帶寬度 8 m > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m > 疏伐帶寬度 6 m > 未處理區；平均早材寬度為 1.42~2.33 mm，疏伐帶寬度 8 m > 疏伐帶寬度 6 m = 疏伐帶寬度 10 m > 疏伐帶寬度 12 m > 未處理區；平均晚材寬度為 0.61~1.05 mm，疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 8 m > 疏伐帶寬度 6 m = 疏伐帶寬度 10 m > 未處理區；平均年輪密度為 0.478~0.587 g/cm<sup>3</sup>，疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 8 m = 疏伐帶寬度 10 m > 未處理區；平均早材密度為 0.320~0.399 g/cm<sup>3</sup>，疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 8 m > 疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 10 m > 未處理區；平均晚材密度為 0.838~0.962 g/cm<sup>3</sup>，疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m > 疏伐帶寬度 8 m > 未處理區；平均最高密度為 0.964~1.120 g/cm<sup>3</sup>，疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m > 未處理區 > 疏伐帶寬度 8 m；平均最低密度為 0.214~

0.247 g/cm<sup>3</sup>，疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 8 m > 未處理區 > 疏伐帶寬度 10 m；平均晚材率為 31.2~35.5%，疏伐帶寬度 12 m > 疏伐帶寬度 10 m > 未處理區 > 疏伐帶寬度 6 m > 疏伐帶寬度 8 m。

表 9 不同帶狀疏伐立木之年輪九個特徵值

Table 9 Nine ring characteristics of standing trees obtained from different row

thinning regimes

	不同帶狀疏伐強度				
	Non	6 m	8 m	10 m	12 m
RW (mm)	2.02 (1.01)	3.12 (0.83)	3.26 (0.77)	3.13 (1.44)	3.23 (1.13)
EW (mm)	1.42 (0.86)	2.20 (0.73)	2.33 (0.69)	2.20 (1.09)	2.18 (0.89)
LW (mm)	0.61 (0.23)	0.92 (0.36)	0.94 (0.16)	0.92 (0.45)	1.05 (0.32)
RD (g/cm <sup>3</sup> )	0.478 (0.064)	0.544 (0.064)	0.509 (0.060)	0.509 (0.048)	0.587 (0.073)
ED (g/cm <sup>3</sup> )	0.320 (0.056)	0.353 (0.048)	0.361 (0.047)	0.352 (0.032)	0.399 (0.080)
LD (g/cm <sup>3</sup> )	0.838 (0.093)	0.962 (0.135)	0.839 (0.100)	0.864 (0.120)	0.937 (0.111)
Dmax (g/cm <sup>3</sup> )	0.978 (0.126)	1.120 (0.144)	0.964 (0.130)	0.998 (0.134)	1.090 (0.112)
Dmin (g/cm <sup>3</sup> )	0.214 (0.044)	0.234 (0.042)	0.222 (0.038)	0.213 (0.026)	0.247 (0.048)
LWP (%)	31.8 (7.8)	31.6 (7.7)	31.2 (5.3)	32.1 (6.2)	35.5 (6.3)

RW：平均年輪寬度(mm)；EW：平均早材寬度(mm)；LW：平均晚材寬度(mm)；  
RD：年輪平均密度(g/cm<sup>3</sup>)；ED：平均早材密度(g/cm<sup>3</sup>)；LD：平均晚材密度(g/cm<sup>3</sup>)；  
Dmax：單一年輪內最高密度(g/cm<sup>3</sup>)；Dmin：單一年輪內最低密度(g/cm<sup>3</sup>)；  
LWP：晚材率(%)

#### 4. 年輪特徵值之間的關係

由於不同帶狀疏伐強度對柳杉造林木的九個年輪特徵值並沒有影響，因此，將所有九個年輪特徵值相互之間的關係，進行直線迴歸分析並求出相關係數值 ( $r$ )，其結果如表 10 所示，年輪寬度 (RW) 與早材寬度 (EW) 或晚材寬度 (LW) 之間存在正相關性，而 RW 與 EW ( $r=0.98$ ) 間的相關性較 RW 與 LW ( $r=0.45$ ) 高。因此，EW 對 RW 的影響較為重要。另外，RW 與晚材率 (LWP) ( $r=-0.41$ )；EW 與 LWP ( $r=-0.55$ ) 之間有顯著性的負相關性存在；而 LW 與 LWP ( $r=0.42$ ) 之間則有顯著性的正相關性存在。

表 10 樣木年輪之九個特徵值間的相關係數

Table 10 Coefficients of correlation among nine ring characteristics of sample trees

相關性	RW	EW	LW	RD	ED	LD	Dmin	Dmax	LWP
RW									
EW	0.98*								
LW	0.45*	0.24*							
RD	-0.24*	-0.32*	0.24*						
ED	0.18*	0.18*	0.08*	0.59*					
LD	-0.19*	-0.14*	-0.25*	0.44*	0.15*				
Dmin	0.01	0.01	0.03	0.51*	0.72*	0.14*			
Dmax	-0.14*	-0.13*	-0.08*	0.44*	0.08*	0.90*	0.09*		
LWP	-0.41*	-0.55*	0.42*	0.68*	0.01	-0.04*	0.14*	0.05*	

\* 顯著相關性在 5% 以內 ( $p < 0.05$ )；

RW：平均年輪寬度(mm)；EW：平均早材寬度(mm)；LW：平均晚材寬度(mm)；RD：平均密度( $g/cm^3$ )；ED：平均早材密度( $g/cm^3$ )；LD：平均晚材密度( $g/cm^3$ )；Dmax：單一年輪內最高密度( $g/cm^3$ )；Dmin：單一年輪內最低密度( $g/cm^3$ )；LWP：晚材率(%)

年輪密度 (RD) 與早材密度 (ED,  $r=0.59$ )、晚材密度 (LD,  $r=0.44$ )、最低密度 (Dmin,  $r=0.51$ )、最高密度 (Dmax,  $r=0.44$ ) 及晚材率 (LWP,  $r=0.68$ )

之間有顯著的正相關性存在(表 10)，因此，在本研究中 ED, LD, LWP, Dmin, Dmax 及 LWP 是決定年輪密度的五個重要參數。ED 與 Dmin ( $r = 0.72$ ) 之間；LD 與 Dmax ( $r = 0.90$ ) 之間有顯著性的正相關存在。

利用逐步迴歸，可以得到年輪密度與其他特徵值的相關性如下式所示：

$$RD = 0.625 ED + 0.009 LWP + 0.239 LD - 0.072 LW + 0.007 EW, R^2 = 0.973$$

### 5. 縱向微破壞抗壓強度在樹幹橫向的變異性

由於不同帶狀疏伐強度對柳杉造林木的縱向微破壞抗壓強度並沒有影響，因此，將所有縱向微破壞抗壓強度加以計算，顯示在樹幹橫向從髓心到樹皮側的變異性情形，其結果如圖 10 所示，縱向微破壞抗壓強度從髓心開始往樹皮側，先會增加到大約距髓心 85~135 mm 處後，再逐漸下降到樹皮側。

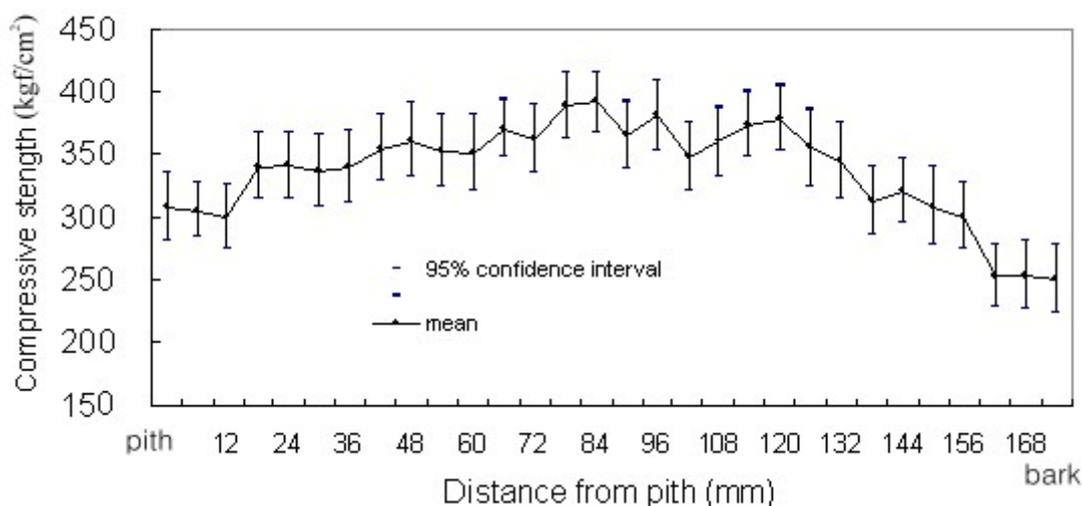


圖 10 微破壞抗壓強度的橫向變化

Fig. 10 Transversal variation of compressive strength obtained from fractometer

距髓心位置推估的樹木年齡大小，可以從累積的年輪寬度與年輪數(林齡)之間的關係，如圖 11 所示，透過統計方程式評估，大約是 11 到 24 年生，此時可能是柳杉鬱閉狀況及漸漸進入成熟材的階段，而 24 年生之後，則或許可能受到在 24 年生時進行帶狀疏伐及 1/3 下層疏伐的影響所導致由於疏開的林分影響材質的結果。

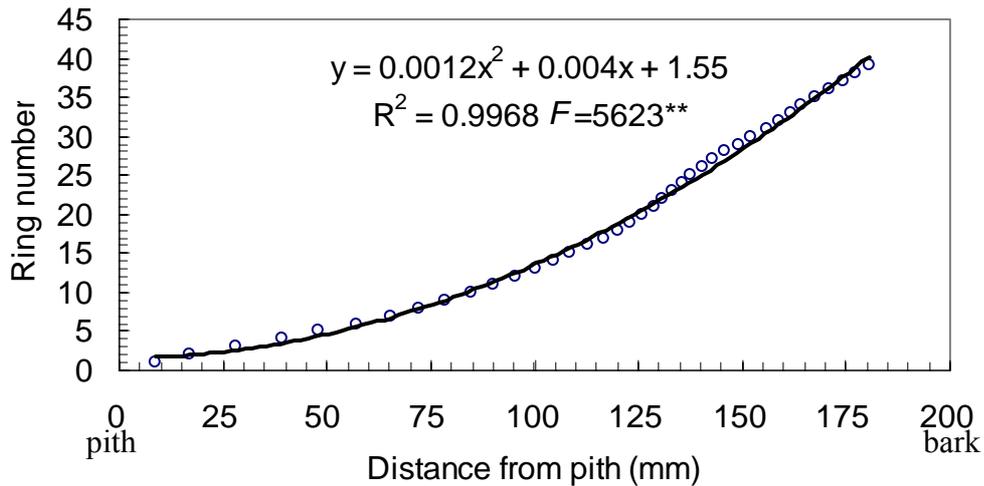


圖 11 年輪數與其距髓心距離之關係

Fig. 11 Relationship between ring number and distance from pith

## 6. 年輪特徵值在樹幹橫向的變異性

由於不同帶狀疏伐強度對柳杉造林木的年輪特徵值並沒有影響，因此，將所有年輪特徵值加以計算，以顯示在樹幹橫向從髓心到樹皮側的變異性情形，其結果如圖 12~12 所示。從圖 12 可看出年輪寬度及早材寬度從髓心到樹皮側的變異性，在髓心至 4 年間呈現不規則變化，之後往樹皮側逐漸減少至約 25 年生，之後，再緩慢增加到樹皮側。而晚材寬度則是先增加到第 2 年，之後，再緩慢的減少到樹皮側為止。柳杉在 25 年生之後，年輪寬度及早材寬度略為增加，可能是受到 1/3 下層疏伐的影響，但是，晚材寬度幾乎沒有受到影響。

圖 13 表示最高密度及晚材密度從髓心到樹皮側的變異性，在髓心與第 4 年間呈現不規則變化，之後往樹皮側緩慢增加至樹皮側。年輪密度從髓心至樹皮側的變異性，在前 4 年呈現不規則變化，之後，緩慢增加至 25 年生，之後，再不規則的減少到樹皮側。早材密度及最低密度從髓心到樹皮側的變異性，在前 4 年呈現不規則變化，之後，緩慢減少到樹皮側。而晚材率從髓心到樹皮側的變異性（圖 14），在前 4 年呈現不規則變化，之後，逐漸增加到 25 年生，之後，再不規則的減少到樹皮側。

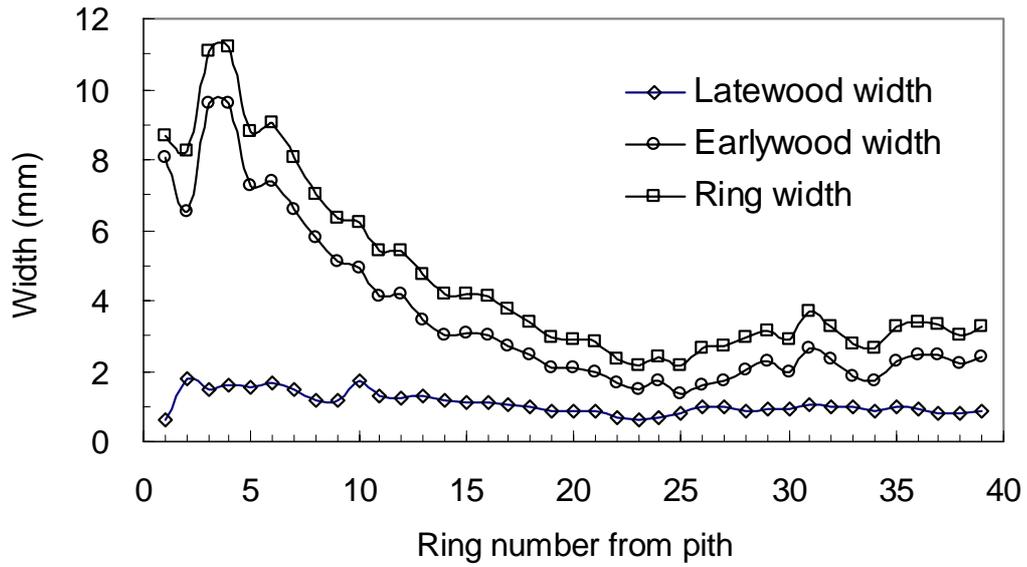


圖 12 樣木年輪寬、早材寬和晚材寬的橫向變化

Fig. 12 Transversal variation of ring, earlywood, and latewood width of sample trees

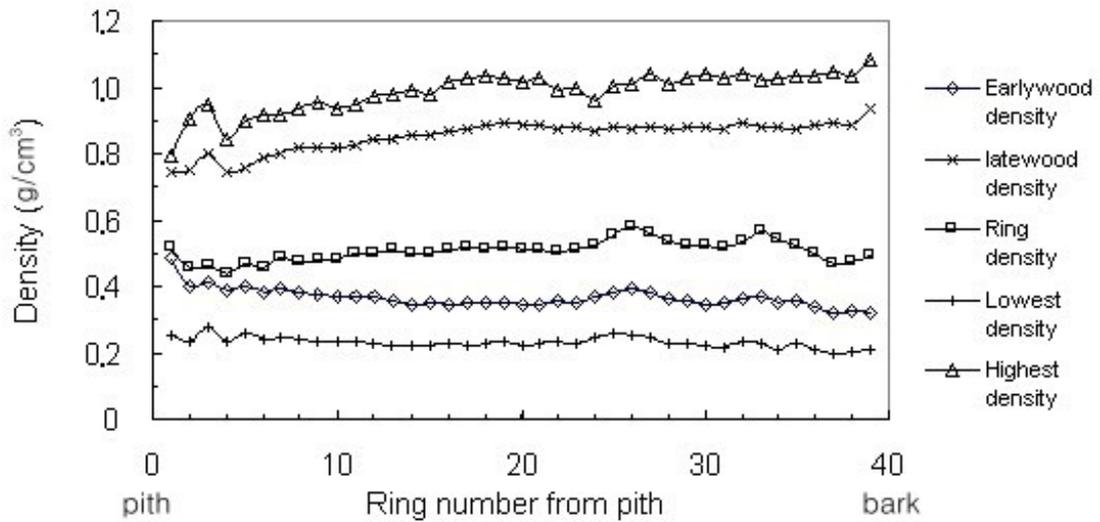


圖 13 樣木年輪密度、早材密度與晚材密度的橫向變化

Fig. 13 Transversal variation of ring, early, and latewood density of sample trees

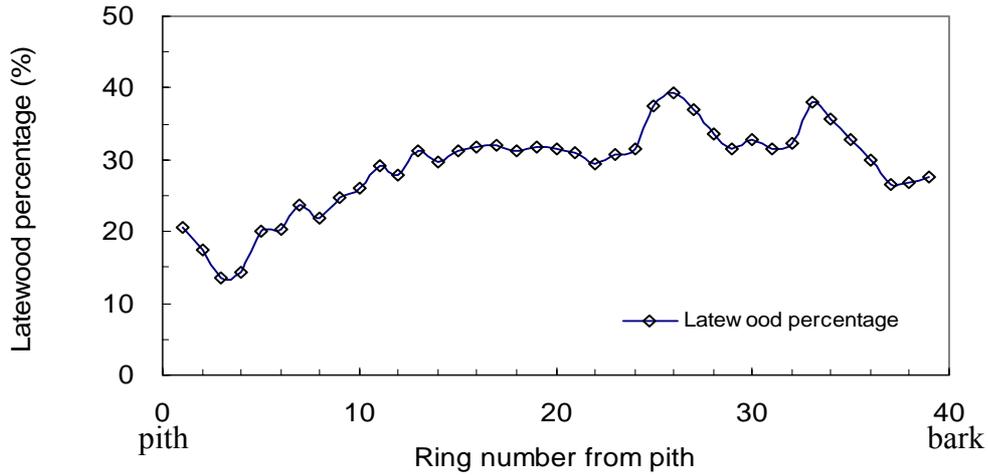


圖 14 樣木晚材率的橫向變化

Fig. 14 Transversal variation of latewood percentage of sample trees

(二) 棲蘭山試驗地—未疏伐試驗地

1. 立木狀態

(1) 立木之胸高直徑

棲蘭山未疏伐柳杉造林地共有兩個小區，代表不同樹齡及不同林分密度，實驗設計已說明在第一區 1964 年栽植，每公頃立木斷面積（林分密度）為 52.2 m<sup>2</sup>/ha。第二小區柳杉於 1966 年栽植，每公頃立木斷面積為 53.6 m<sup>2</sup>/ha。

表 11 未疏伐試驗地立木之胸高直徑

Table 11 The DBH of the stands from unthinning forests.

平均 DBH (cm)	標準差 (cm)	變異數	度	偏態	最小值	最大值	個數	信賴度 (95.0%)
26.36	6.66	44.39	-0.77	0.03	15.8	40.7	30	2.49

本試驗地的林木平均胸高直徑（如表 11 所示）為 26.36 cm，標準差為 6.66 cm，最大的樹木胸高直徑為 40.7 cm，最小的林木胸高直徑 15.8 cm，共 30 棵樣木，信賴度是採 95%信賴區間，由 度-0.77 來看，此分佈較常態分佈平緩而廣，再由偏態度為 0.03 而言，本試驗地的林木算是符合接近常態分佈的狀況，試驗

地接近常態分配的情形，會使所得到調查資料更可靠。

表 12 未疏伐優、中、劣勢木之胸高直徑比較表

Table 12 Compared with suppressed, middle, and dominant wood

平均 DBH (cm)	
優勢木	32.51 <sup>a</sup>
中勢木	25.24 <sup>b</sup>
劣勢木	17.64 <sup>c</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b 和 c 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

表 12 所示，優勢木的平均胸高直徑最大 (32.51 cm)，其次是中勢木 (25.24 cm)，最小的是劣勢木 (17.64 cm)，且三者有顯著性差異，優勢木基本上就是競爭中獲得大量資源的林木，所以進行肥大生長和伸長生長上有一定的優勢，同時樹冠幅也會較其他的樹種大。故優勢木生長比較快速，相對的內部的密度，一般而言是比其他兩者為低，反之，劣勢木就是生長上受到壓力的樹種，所以生長速度比較慢。中勢木是介於兩者間，所以當要瞭解此一林分整體的表現時，中勢木就是選出來代表該林分的所處的狀況。

## (2) 第一區與第二區立木之各項性質比較

表 13 第一區與第二區樣木柳杉的各種性質比較

Table 13 Comparing the properties of Japanese-cedar between site 1 and site 2

	D ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	V (m/s)	P (mm)	DMOE ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	Fcf ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
第一區	0.47 <sup>a</sup>	2762 <sup>a</sup>	21.5 <sup>a</sup>	36820 <sup>a</sup>	296 <sup>a</sup>
第二區	0.58 <sup>b</sup>	3120 <sup>b</sup>	18.4 <sup>b</sup>	56630 <sup>b</sup>	370 <sup>b</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每行相互間之顯著差異性

D：密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；V：超音波波速(m/s)；P：Pilodyn 刺入深度(mm)

DMOE：動彈性模數( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )；Fcf：微破壞抗壓強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

試驗檢測（如表 13）的立木密度、縱向超音波速度、木材表面硬度刺入深度（P）、動彈性模數（DMOE）、縱向微破壞抗壓強度在第一區分別為 0.47 g/cm<sup>3</sup>、2762 m/sec、21.5 mm、36820 kgf/cm<sup>2</sup>、296 kgf/cm<sup>2</sup>，第二區則為 0.58 g/cm<sup>3</sup>、3120 m/sec、18.4 mm、56630 kgf/cm<sup>2</sup>、370 kgf/cm<sup>2</sup>，而第二區的立木密度大於第一區的密度，密度大者通常材質也會比較佳，也因為密度大而其縱向超音波波速就比較快，同時密度大者木材的在單位體積內所容納的質量大，故當進行表面刺入深度時也會比較淺，因為密度和超音波速會影響動彈性模數，所以密度大與超音波速大者，其動彈性模數就會大，最後影響強度的表現，本試驗中兩區有顯著的差異，也如同預期般的密度大、超音波波速快、穿透深度淺、動彈性模數大和強度強的現象。由於兩區有顯著的差異存在，也就是說就算生長於同一地區的林分，其各樣區因不同的生長海拔、樹齡、林分密度與生長條件，而造成林分的變異，故柳杉的生長變異會使得各個樣區，所表現的強度與性質上有所不同。

第一區的栽植密度是每公頃 1153 株，而第二區的栽植密度是每公頃 1563 株，因此栽植密度大者，木材密度比較大，同時又其抗壓強度就會比較強，此與柯志裕（1995）、林淑華（1994）、林法勤（1992）及 光平（2003）所得到的結果相似。

### （3）第一區與第二區立木不同位置量測之差異

表 14 比較第一區與第二區樣木不同位置量測的差異

Table 14 Comparing the ultrasonic and pilodyn values at different positions between site1 and site2

		V (m/s)	P (mm)
第一區	上下	2729 <sup>a</sup>	21.25 <sup>a</sup>
	左右	2794 <sup>a</sup>	21.75 <sup>a</sup>
第二區	上下	3132 <sup>a</sup>	18.14 <sup>a</sup>
	左右	3110 <sup>a</sup>	18.73 <sup>a</sup>

T 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a 表示每行相互間之顯著差異性

V：縱向超音波波速(m/s)；P：Pilodyn 刺入深度(mm)

就同一區的未疏伐柳杉進行進一步的探討，本試驗進行縱向超音波與木材表面硬度穿透深度時，依照坡的上、下、左、右，四個方向來進行檢測（如表 14），而不論是第一區還是第二區，上和下所量測到縱向超音波波速與左和右所測的沒有顯著的差異存在，一般若有反應材的現象時，抗壓材側會因長素和抗長激素因重力作用不均分布，而產生長激素很多而生長快速，進而影響檢測的情形，但是本試驗沒有顯著性差異，也可推論此區的林木反應材的現象應該比較少或無，木材表面硬度穿透深度也是一樣的結果，換言之，同一區內的樹木由坡上、下與左、右所量取的數值差不多。

#### (4) 第一區與第二區立木之各項性質之相關性比較

表 15 第一區與第二區樣木各項性質相關式

Table 15 Relations of the properties of standings from site 1 and site 2

相關式	第一區	第二區
D 與 Fcf	$y=800x-83, R^2=0.74^*$	$y=688x-22, R^2=0.30^*$
DBH 與 V	$y=-0.018x+77.5, R^2=0.52^*$	$y=-0.013x+65.5, R^2=0.36^*$
P 與邊材 Fcf	$y=-17x+641, R^2=0.59^*$	$y=-28x+903, R^2=0.43^*$
DMOE 與 Fcf	$y=0.02x+206, R^2=0.31^*$	$y=0.02x+237, R^2=0.30^*$
P 與 DMOE	$y=-26716x+957350, R^2=0.43^*$	$y=-24749x+1037720, R^2=0.31^*$

\* 顯著相關性在 5% 以內 ( $p < 0.05$ )

D：密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；Fcf：微破壞抗壓強度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

DBH：胸高直徑(cm)；V：超音波波速(m/s)

P：Pilodyn 刺入深度(mm)；DMOE：動彈性模數( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

由表 15 得知無論是第一區（圖 15）還是第二區（圖 16），在密度與微破壞抗壓強度上有線性的正相關存在，也就是說隨密度的增加，抗壓強度也會隨之上升，此與卓志隆（1998）所做結果相似，其柳杉氣乾密度與縱向抗壓強度有線性

相關，其  $R^2=0.72$ 。另外 木滋彥 (1991) 收集日本 60 多種柳杉的密度中，密度與縱向抗壓強度的相關係數約為 0.6；立木胸高直徑與其超音波波速間也是有線性的負相關 (圖 17、圖 18)，胸徑越大，超音波的速度就會變小，此係因為胸徑大，而生長比較快速，生長很快速，則組織較 散，所以超音波傳遞速度就比較慢，此結果相似於 Wang and Chen (1992) 與 Chuang and Wang (2001)。Chuang and Wang (2001) 的報告指出同齡林中有較高的胸高直徑時，通常有較低的密度、超音波速和動彈性模數，同時不同栽植密度的栽植生長空間中，因林木生長速度不同所產生的材質，是中勢木及劣勢木的超音波傳遞速度大於優勢木；木材表面硬度刺入深度 (P) 與邊材抗壓強度間有負相關 (圖 19、圖 20)，刺入深度越深，其強度越弱，此係能被穿刺的深，表示材質不夠 密，所以強度也會比較低，而穿刺立木時，因為穿刺的部位在邊材，所以刺入深度和邊材的抗壓強度會有線性的關係；木材表面硬度刺入深度 (P) 與動彈性模數間有負相關 (圖 21、圖 22)，動彈性模數受密度與超音波的影響，材質越好越 密，其密度高，傳遞速度快，所以對穿刺的 抗就比較強；動彈性模數與抗壓強度間有正相關 (圖 23、圖 24)，亦即動彈性越好，抗壓強度越強，而顯示動彈性模數是可以評估木材強度的重要方式之一，此與 光平 (2003)、陳勁豪 (2002) 與卓志隆 (2000) 所做結果中，動彈性模數與破壞強度間有正相關，就決定係數而言，第一區的決定係數皆大於第二區。

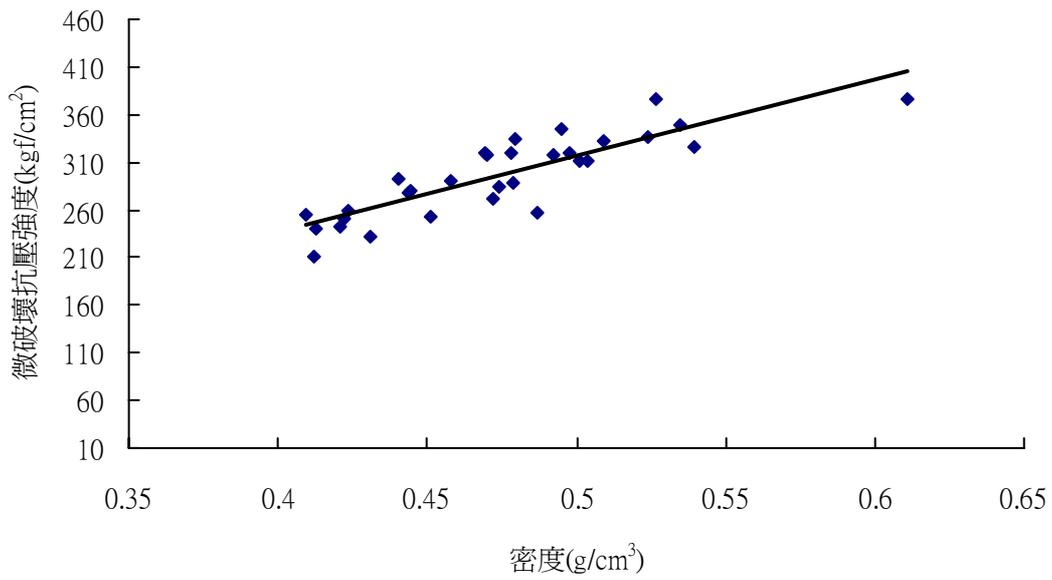


圖 15 第一區樣木之木材密度與微破壞抗壓強度之關係

Fig. 15 Relationship between wood density and compression strength of sample trees

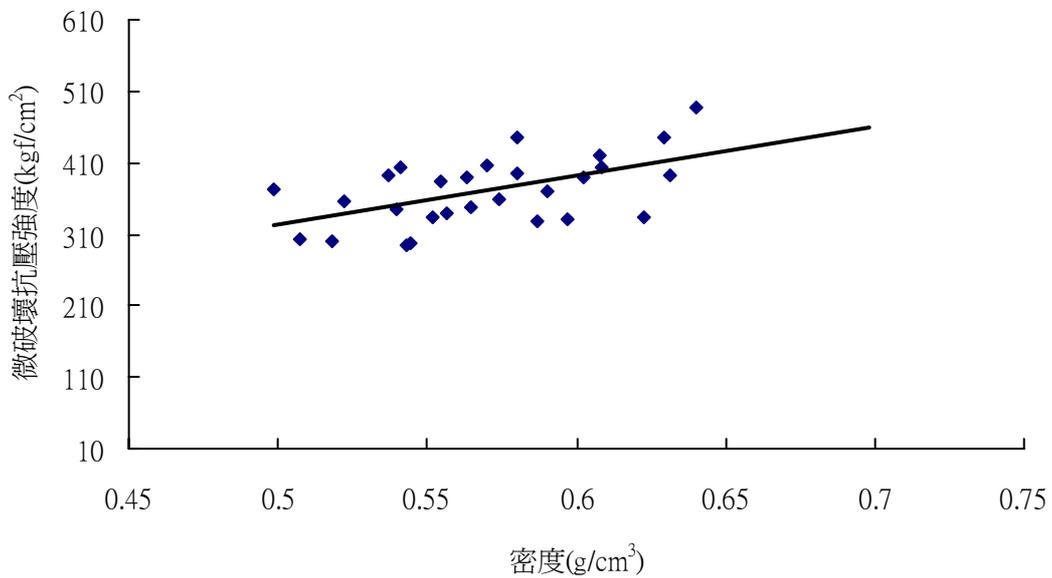
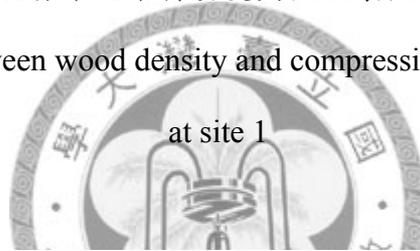


圖 16 第二區樣木之木材密度與微破壞抗壓強度之關係

Fig. 16 Relationship between wood density and compression strength of sample trees

at site 2

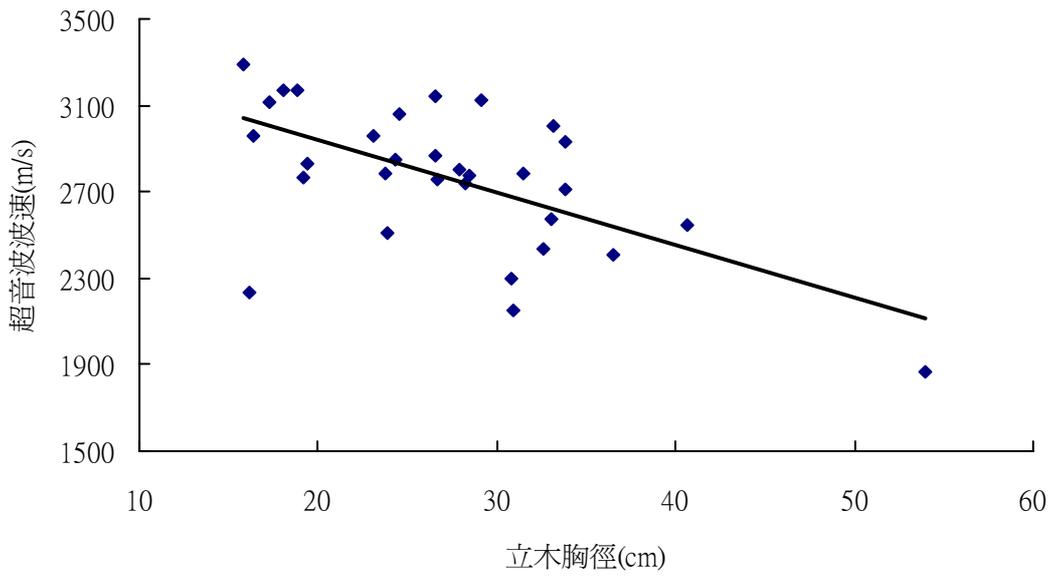


圖 17 第一區樣木胸徑與其超音波波速之關係

Fig. 17 Relationship between DBH and ultrasonic wave values of sample trees

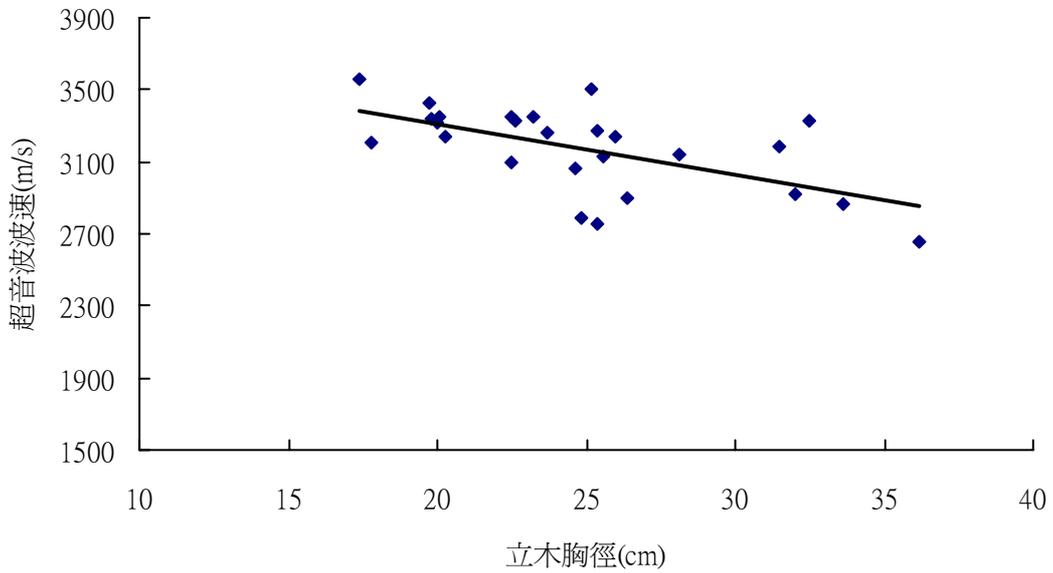


圖 18 第二區立木胸徑與其超音波波速之關係

Fig. 18 Relationship between DBH and ultrasonic wave values of sample trees

at site 2

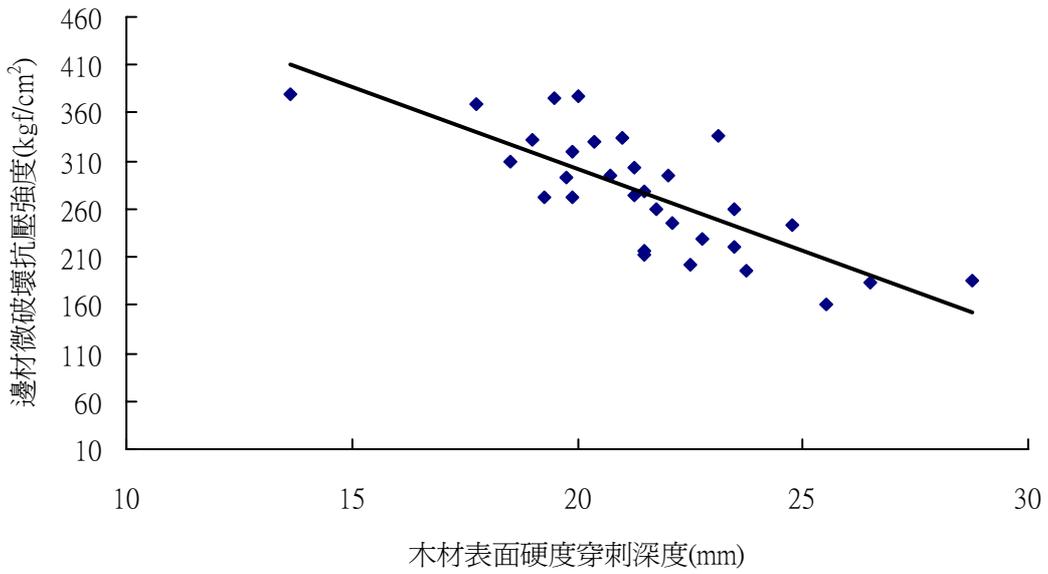


圖 19 第一區木材表面硬度穿透深度與邊材微破壞抗壓強度之關係

Fig. 19 Relationship between pilodyn values and sapwood compression strength of sample trees at site 1

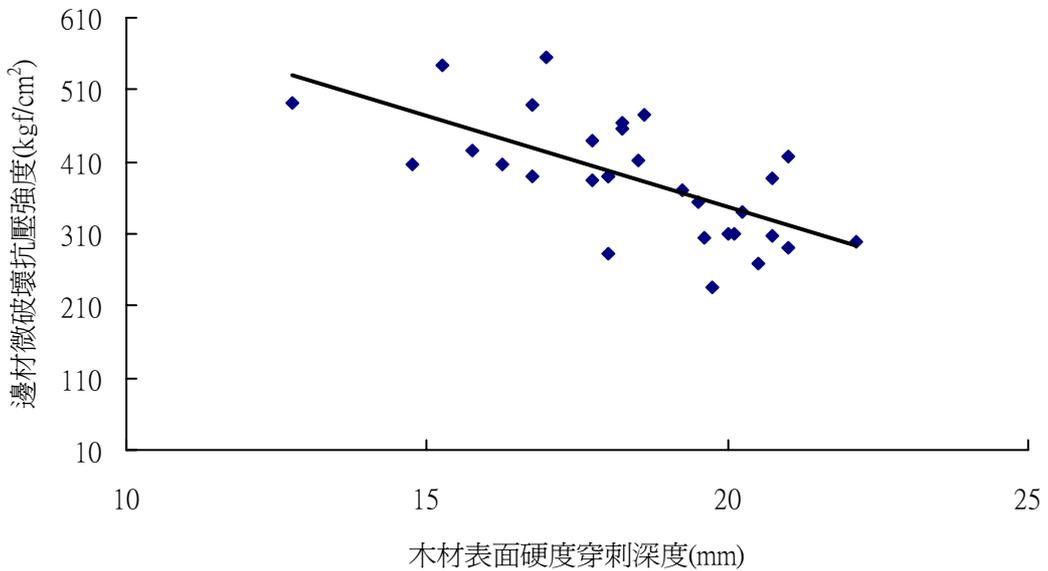


圖 20 第二區木材表面硬度穿透深度與邊材微破壞抗壓強度之關係

Fig. 20 Relationship between pilodyn values and sapwood compression strength of sample trees at site 2

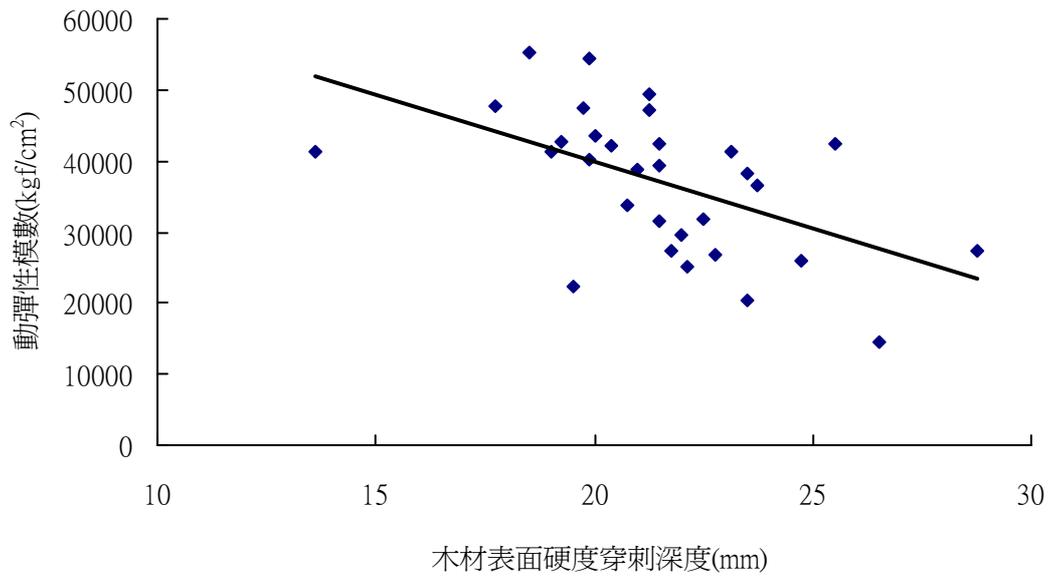


圖 21 第一區立木動彈性模數與木材表面硬度穿透深度之關係

Fig. 21 Relationship between DMOE and pilodyn values of sample trees at site 1

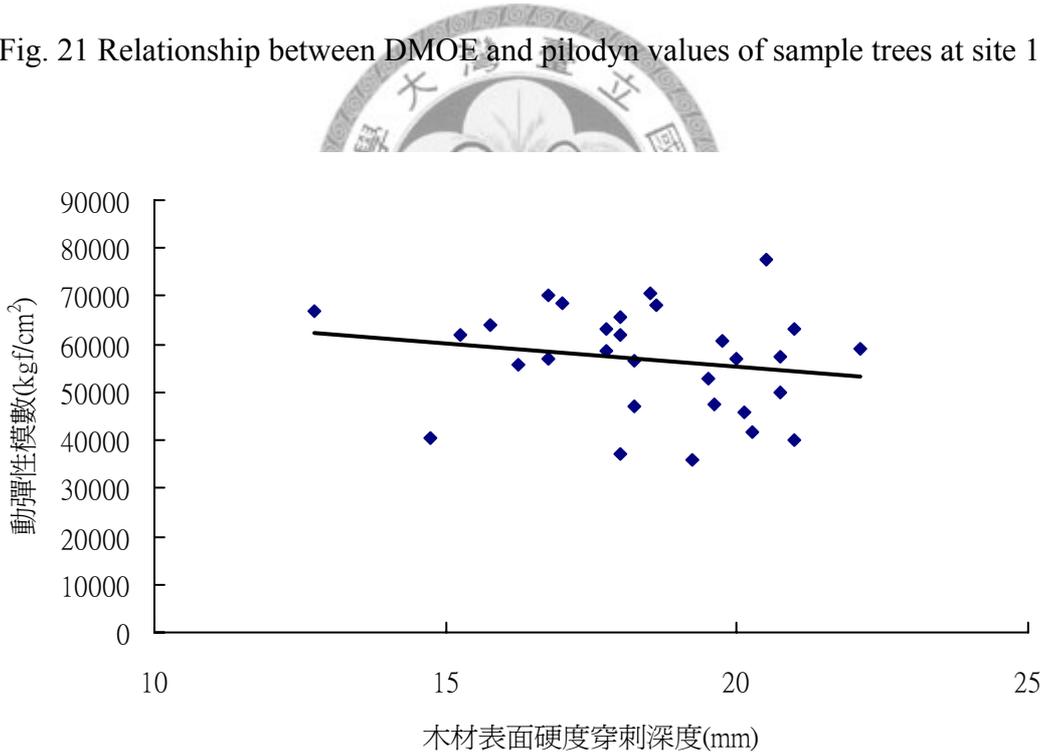


圖 22 第二區立木動彈性模數與木材表面硬度穿透深度之關係

Fig. 22 Relationship between DMOE and pilodyn values of sample trees at site 2

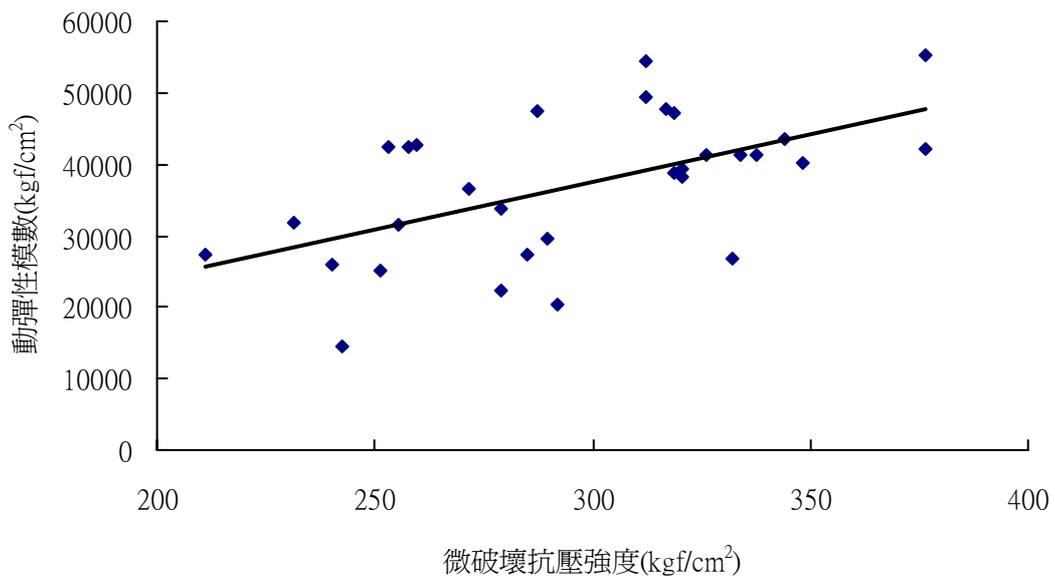


圖 23 第一區立木動彈性模數與微破壞抗壓強度之關係

Fig. 23 Relationship between DMOE and compression strength of sample trees

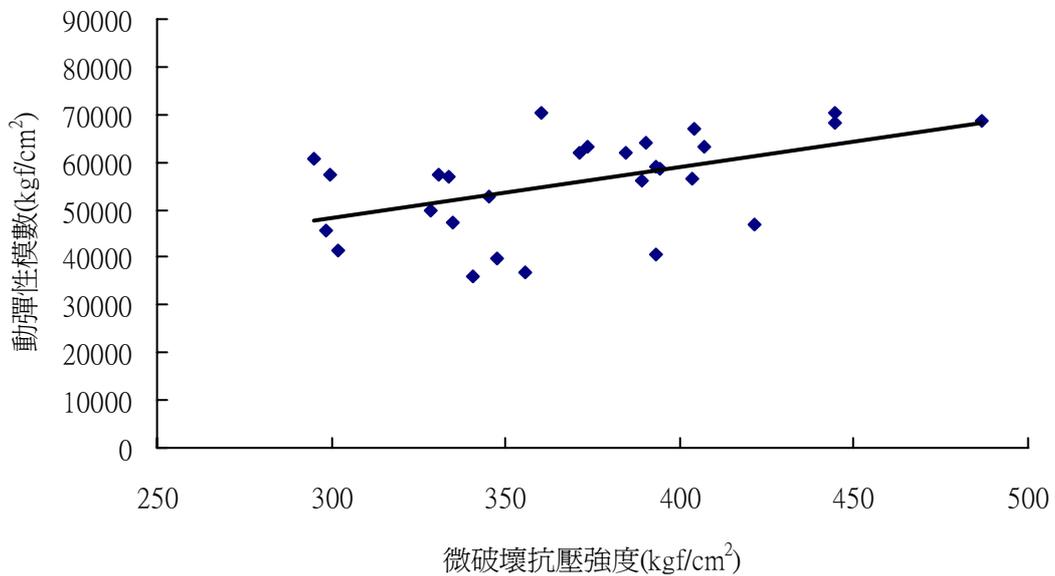


圖 24 第二區立木動彈性模數與微破壞抗壓強度之關係

Fig. 24 Relationship between DMOE and compression strength of sample trees

at site 2

### (5) 優中劣勢木立木之超音波波速、Pilodyn 與抗壓強度之比較

表 16 優、中、劣勢木超音波波速、抗壓強度之 Tukey 檢定分析

Table 16 Difference of ultrasonic wave velocity and compressive strength among dominant, intermedia and suppressed wood

	V (m/s)	P (mm)	$\sigma_{cf}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
劣勢木	2976 <sup>a</sup>	19.44 <sup>a</sup>	320 <sup>a</sup>
中勢木	2834 <sup>ab</sup>	22.20 <sup>ab</sup>	288 <sup>ab</sup>
優勢木	2614 <sup>b</sup>	23.79 <sup>b</sup>	268 <sup>b</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每行相互間之顯著差異性

V：超音波波速(m/s)；P：Pilodyn 刺入深度(mm)； $\sigma_{cf}$ ：抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

在立木狀態下，利用非破壞檢測發現（如表 16），超音波波速以劣勢木最快（2976 m/s），其次是中勢木（2834 m/s），最慢的是優勢木（2614 m/s），且劣勢木對優勢木有顯著性的差異，中勢木對兩者無顯著性的差異，莊世滋（1999）指出在應力波的表現上，劣勢木（3272 m/s）和中勢木（3282 m/s）的應力波波速比優勢木（3084 m/s）快，劣勢木和中勢木兩者對優勢木有顯著的差異，而在超音波波速的表現上，超音波波速在縱向傳遞的速度在 2211 m/s-4048 m/s，當五種栽植距離的林分之立木的縱向和橫向超音波波速的表現上，除了栽植距離 5 m × 5 m 的林分外，其餘的都沒有顯著的差異，而栽植距離 5 m × 5 m 林分的立木，縱向超音波波速的快到慢順序為：劣勢木 > 中勢木 > 優勢木，劣勢木和優勢木有顯著性差異，其結果與本研究相同。超音波在木材中進行縱向傳播時，主要是經由晚材部份傳遞（Mishiro, 1995），晚材率高者，縱向傳遞速度較快，故一般胸徑大者，其晚材率就會較胸徑小者為低，所以縱向的超音波會隨著胸徑的增大，而導致波速有下降的趨勢，詹明勳等人（2005）指出柳杉立木的縱向超音波的數值，實生林的超音波波速在 2300~3000 m/s，插條林在 2100~2900 m/s。本研究的縱向超音波波速與前人研究相符。Pilodyn 試驗，則是以劣勢木最小（19.44

mm)，其次是中勢木 (22.20 mm)，最大的是優勢木 (23.79 mm)，劣勢木和優勢木有顯著性差異，中勢木對其他兩者則無顯著性差異，而 Pilodyn 和強度間有良好的相關性，Chudnoff *et al.* (1984) 指出抗壓強度和 Pilodyn 間，全部樹種的決定係數為 0.61，闊葉樹的決定係數為 0.67，針葉樹的決定係數為 0.5。因此由 Pilodyn 試驗結果來說，劣勢木的抗壓強度應該最大。抗壓強度上，如 Pilodyn 所推測，劣勢木的抗壓強度最大 (320 kgf/cm<sup>2</sup>)，其次是中勢木 (288 kgf/cm<sup>2</sup>)，優勢木最小 (268 kgf/cm<sup>2</sup>)，而劣勢木和優勢木間有顯著性差異，中勢木對優勢木和劣勢木則無顯著性差別。就顯著性而言，年輪平均密度、年輪寬、超音波波速、Pilodyn 和抗壓強度，此五者都是劣勢木和優勢木具有顯著性差異，而中勢木對優勢木和劣勢木則無顯著性差異。劣勢木密度上大，超音波波速就越快，因密度大對 Pilodyn 能刺入的深度比較淺，故劣勢木在刺入深度表現的最淺，而 Wang and Chiu (1993) 曾探討柳杉實生苗與插條苗林木之抗壓與抗彎性質，亦指出其縱向抗壓強度及彈性模數與氣乾比重之間有正線性關係。卓志隆 (1998) 研究栽植距離對柳杉強度的變異性中指出，無缺點小試片之氣乾密度和抗壓強度間有高度正相關。因此密度越大者抗壓強度就越強，劣勢木是三者中密度最大者，所以抗壓強度最大，反之，優勢木密度最小，故其抗壓強度最小，本試驗中密度與各項非破壞試驗間的變化，和前人研究相符。

## 2. 小試材試驗

### (1) 第一區與第二區邊材與心材的抗壓強度差異

本試驗就採伐樣木製作成小試片，可得知邊材與心材的抗壓強度(如表 17)，第一區的樣木邊材縱向抗壓強度為 276 kgf/cm<sup>2</sup>，心材的縱向抗壓強度為 304 kgf/cm<sup>2</sup>，心材的強度大於邊材，兩者有顯著性差異存在。第二區的邊材縱向抗壓強度為 387 kgf/cm<sup>2</sup>，心材的縱向抗壓強度為 361 kgf/cm<sup>2</sup>，雖邊材的強度大於心材，但兩者沒有顯著性差異存在。而兩區的變異數皆是心材比較小，此意味著心材的材質比較均質所致。本試驗樣區分別為 43 年生與 41 年生，都已經達到成熟材的階段，因此邊材部大多是成熟材的區域，而心材在 20 年生以前大多都是

未成熟材，雖然如此，但是其他影響強度的因子也很多，例如密度、微纖維傾斜角等等，所以就會造成同一地區不同林分內邊、心材的抗壓強度上的表現，邊材和心材的強度不同，同時第一區還有差異的存在，而對高岳試驗區的柳杉邊材與心材的狀況，因為兩者地區的生長條件，如坡度、光、降雨、溫度、林分密度等不同，可能與棲蘭山柳杉邊材與心材強度的情形有所不同。

表 17 第一區與第二區木材邊材與心材的抗壓強度差異

Table 17 Comparing site 1 with site 2 the compression properties of sapwood and

heartwood		
樣區	邊心材	$\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
第一區	邊材	276 <sup>a</sup>
	心材	304 <sup>b</sup>
第二區	邊材	387 <sup>a</sup>
	心材	361 <sup>a</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )  
 $\sigma_c$ : 抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

## (2) 優中劣勢木小試材之各項性質之比較

小試材的密度上 (如表 18) 以劣勢木最高 (0.412 g/cm<sup>2</sup>)，但三者間沒有顯著性差異，而密度和強度間會以良好的相關性存在 (林振榮, 1992; Ishiguri F. *et al.*, 2006)，因此由密度來推估 MOR，三者應該無顯著性差異，在 MOR 的表現上，也是劣勢木最高 (601 kgf/cm<sup>2</sup>)，其次是中勢木 (581 kgf/cm<sup>2</sup>)，最弱的是優勢木 (571 kgf/cm<sup>2</sup>)，但三者也和密度一樣，無顯著性差異存在。

表 18 優、中、劣勢木小試材試驗之 Tukey 檢定分析

Table 18 Difference of sample wood's properties among dominant, intermedia, and suppressed wood

	D (g/cm <sup>3</sup> )	V (m/s)	DMOE (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tv (m/s)	Tt (m/s)	P (mm)	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	MOE (kgf/cm <sup>2</sup> )
劣勢木	0.412 <sup>a</sup>	4405 <sup>a</sup>	82330 <sup>a</sup>	4039 <sup>a</sup>	4419 <sup>a</sup>	13.88 <sup>a</sup>	601 <sup>a</sup>	52980 <sup>a</sup>
中勢木	0.408 <sup>a</sup>	4334 <sup>a</sup>	80960 <sup>a</sup>	3968 <sup>a</sup>	4338 <sup>a</sup>	14.48 <sup>ab</sup>	581 <sup>a</sup>	52010 <sup>a</sup>
優勢木	0.406 <sup>a</sup>	3991 <sup>b</sup>	70820 <sup>b</sup>	3670 <sup>b</sup>	3938 <sup>b</sup>	15.36 <sup>b</sup>	571 <sup>a</sup>	43060 <sup>b</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每行相互間之顯著差異性

D：密度(g/cm<sup>3</sup>)；V：超音波波速(m/s)；DMOE：動彈性模數(kgf/cm<sup>2</sup>)；

Tv：振動(m/s)；Tt：打音頻譜(m/s)；P：Pilodyn 刺入深度(mm)；

MOR：抗彎強度(kgf/cm<sup>2</sup>)；MOE：抗彎彈性模數(kgf/cm<sup>2</sup>)

由非破壞檢測中，超音波波速，劣勢木最快(4405 m/s)，其次是中勢木(4334 m/s)，最慢的優勢木(3991 m/s)，且優勢木對劣勢木和中勢木有顯著性差異，劣勢木和中勢木間無顯著性差異，這可能是因為優勢木生長太快所致，動彈性模數上和超音波波速有很高的相關性(光平，2003；卓志隆，1998)，所以動彈性模數的結果也和超音波波速一致。又超音波波速、打音頻譜和振動間都有良好的相關性，因此振動和打音頻譜的結果亦和超音波波速的結果一樣，劣勢木 > 中勢木 > 優勢木，而優勢木對中勢木和劣勢木有顯著性差異，中勢木和劣勢木間則無顯著性差異。動彈性模數和 MOE 間又有良好的相關性，故動彈性模數和 MOE 的結果也是一致的，劣勢木(52980 kgf/cm<sup>2</sup>)最好，其次是中勢木(52010 kgf/cm<sup>2</sup>)，最差的是優勢木(43060 kgf/cm<sup>2</sup>)，優勢木依然對其他兩者有顯著性差異，但劣勢木和中勢木間則無顯著性差別。

Pilodyn 的刺入深度以優勢木刺最深(15.36 mm)，中勢木其次(14.48 mm)，最淺的是劣勢木(13.88 mm)，其中優勢木和劣勢木間有顯著性差異存在，而中勢木和其他兩者間則無顯著性差異。

### (3) 小試材試驗之各項性質之相關性

表 19 未疏伐小試材試驗之 r 值分析表

Table 19 The r values of the sample wood properties

	D	V	DMOE	Tv	Tt	MOR	MOE	P
D	1							
V	-0.03	1						
DMOE	0.31	0.93	1					
Tv	0.02	0.98	0.93	1				
Tt	-0.04	0.96	0.89	0.97	1			
MOR	0.56	0.43	0.60	0.48	0.44	1		
MOE	0.33	0.79	0.87	0.82	0.78	0.61	1	
P	-0.55	-0.49	0.29	-0.48	-0.49	-0.11	0.19	1

D：密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；V：超音波波速( $\text{m}/\text{s}$ )；DMOE：動彈性模數( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )；  
Tv：振動( $\text{m}/\text{s}$ )；Tt：打音頻譜( $\text{m}/\text{s}$ )；MOR：抗彎強度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )；  
MOE：抗彎彈性模數( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )；P：Pilodyn 刺入深度( $\text{mm}$ )

表 19 中顯示出兩因子間的線性相關程度，其中密度和 MOR 有正的直線相關，其 r 值為 0.56，密度和 Pilodyn 深度間是負的直線相關， $r = -0.55$ ，而密度越大時，表示單位體積內的物質比較多，空隙就比較少，能承受的抗或載重就會比較大，因此隨著密度的增大，MOR 就增大，Pilodyn 的刺入深度會比較淺是合理的，Ishiguri F. *et al.* (2006) 指出 64 年生的樹木密度與 MOR 有直線的相關性，其 r 值為 0.511，林振榮 (1992) 亦指出柳杉的氣乾密度越大時，則 MOR 就會隨之增大，相關係數為 0.69，杉木的相關係數則是 0.56，又 Schneidet and Sebastian (1991) 指出 Caribbean pine 之比重與中央集中荷重抗彎強度之間皆成顯著正相關，若將樹幹橫切面分為外與內側，其相關係數，外側材質為 0.84，內側材質為 0.31。因此密度是對抗彎強度而言，其為重要的因子，但影響抗彎強度的因子還有很多，如含水率、木理傾斜角、纖維素結晶度、纖維長、年輪寬、晚材率、微纖維傾斜角等組織物理或化學性質所影響。此外，Yamashita *et al.* (2000)

指出闊葉樹與針葉樹因品種和產地會不同，但由放射方向穿刺，刺入深度和容積密度間是呈現高度負相關，柳杉生材原木之密度和刺入深度依然是高度的負相關，而既往的迴歸式中常用的有三種，一次的直線式、倒數關係式及指數關係式，且另外可用刺入深度來進行容積密度的推估，本試驗的迴歸式是屬於一次的直線式。卓志隆（1998）指出氣乾密度和抗彎強度間有直線的相關性，其  $R^2=0.58$ ，因此密度是評估材質的重要指標。木滋彥（1991）整理日本 60 多品種柳杉的密度與多種強度的關係，皆呈顯著的正相關關係。密度和超音波波速間無相關的存在，此與 Mishiro（1996a）所指出的密度和超音波存在三種關係，（1）密度增加而音速增大，（2）未受影響，（3）隨密度降低而降低，而本試驗中顯示與（2）的情況相符合。密度對打音頻譜和振動也沒有相關性的存在，因此柳杉的密度不是超音波、打音頻譜和振動的主要決定因子，此與 Chen and Yen（1996）的研究相應。比重和動彈性模數的相關性不高，是因動彈性模數尚受木材中細胞纖維長度、細胞壁微纖維傾斜角、細胞壁纖維素結晶度及纖維向等所影響。Wang and Ko（1998）研究顯示，比重對 MOE 和 MOR 都是直線的迴歸式，有顯著性相關，決定係數分別為 0.477 和 0.757，其均比重和動彈性模數之決定係數來的大，此結果和本試驗相似。

超音波波速和超音波動彈性模數間有高直線相關性，因為動彈性模數是密度乘上超音波波速的平方，所以超音波波速對超音波動彈性模數而言是很重要的影響因子，此結果與卓志隆（1998）的結果相符，其指出以超音波檢測木材時，木材纖維方向所測得的超音波速度和縱向動彈性模數呈正比的關係。Sandoz（1989）以超音波測定音速，對 spruce 木材進行分等，其音速與 MOE 之關係，相關係數高達 0.9。此外，木材動彈性模數與靜彈性模數間亦有良好的關係。超音波波速與打音振動及打音頻譜間都有高度的線性相關，超音波與應力波都是以波的形式來進行檢測，音波的前進中只要是縱波為主，所以超音波與應力波間有高度相關是合理的，同時更可以瞭解到超音波與應力波間，因有高度相關，所以若有要檢測時，兩者間可選用一種檢測方式即可，而超音波波速和 MOE 有高度的線性相關，可利用超音波波速來進行 MOE 的推估，此與 光平（2003）的結果相合。

超音波動彈性模數和應力波的打音頻譜和振動都具有高度的直線正相關，而  $r$  值都接近或超過 0.9，所以無論是打音頻譜和振動都是良好的推估超音波動彈性模數的方式，超音波動彈性模數和抗彎彈性模數間有高度的正線性相關，陳勁豪（2002）指出杉木的動彈性模數、振動和 MOE 相互間所得的直線迴歸式均具有顯著的相關性，超音波動彈性模數和 MOR 間也是有正的直線相關，故動彈性模數是良好的強度推估指標，此結果也與林振榮（1992）的結果相符。卓志隆（2000）指出柳杉縱向動彈性模數與 MOR 間，呈現正的直線相關，其決定係數為 0.372。黃彥三等人（1990）利用 FFT 測定紅木之動彈性模數對 MOE 和 MOR 都有顯著的正相關，故可以利用打音法來推定抗彎強度。卓志隆（1986）指出動彈性模數和 MOE 有高相關，但和 MOR 間的相關性，會因選材的關係，導致部分有相關，部分則無，光平（2003）指出動彈性模數對 MOE 和 MOR 都有顯著正直線相關。莊世滋（1999）亦指出實大樑的動彈性模數和 MOE 間有顯著的正直線相關，小試材也有正的直線相關，而小試材的決定係數為 0.82。王仁等人（1992）指出以台灣杉做為試驗材料中，分別以比重、MOE 和動彈性模數為非破壞的檢定參數，發現此等參數與抗彎強度的相關性中，最佳的是動彈性模數，依次是比重和 MOE。超音波動彈性模數與 Pilodyn 深度間沒有相關性的存在。一般動彈性模數都會比 MOE 來的大，此係抗彎試驗含有剪力成分，致使變形增大，又變形之測定包含受力點之局部壓凹陷變形以及載重時間長，會有潛變的產生所致。

振動和打音頻譜有高度的直線正相關，振動也和 MOE 有高度的直線正相關，此與陳勁豪（2002）相符。光平（2003）指出橫向振動與 MOE 間有直線的正相關，且利用橫向振動來評估 MOE 是可靠的。卓志隆（2007）指出三種測定木材彈性的方法中，縱向振動所得的試驗彈性模數最高，以抗彎試驗所得的試驗彈性模數是最低的，由不同試驗方法所得到之試驗彈性模數間之差異百分比值會隨  $E_b/G$  值增加而增加，其中縱向振動的的彈性模數和  $E_b$  差 8.8%，其差異大小順利為  $\Delta E (\%) EL vs. Es > \Delta E (\%) Eb vs. Es > \Delta E (\%) Eb vs. EL$ ，五種樹種的彈性模數的  $\Delta E$  中，柳杉比紅檜和扁柏大，但是比杉木和木來的小。林振榮（1992）指出橫向振動和 MOE 間有正直線相關的存在。Chen and Yen（1996），

調查三種非破壞性檢測儀發現，打音頻譜方法，大於實際值 18~58%，視樹種而有所變化，而應力波計時儀最接近實測值，但動彈性模數和抗彎彈性模數的關係以打音頻譜方法最高，因打音頻譜之靈敏性和再現性最佳。

打音頻譜和 MOE 有正的直線相關，以結果與黃彥三（1990）所做的結果相合外，永富一之等人（1992）以打音頻譜和四點荷重的 MOE 有極顯著的正相關，相關係數為 0.75~0.97，而和三點荷重的 MOE 也是有正相關，其相關係數為 0.59。綜合上述研究，打音頻譜是推估 MOE 數值的好方式。

MOR 與 MOE 間有正的直線相關，相關係數是 0.61，Hoyle（1968）指出有關應力分等的木材，大部分報告是討論彈性模數與抗彎強度間的關係，而僅有少數的研究是以彈性模數來作為推估強度的依據，其中以 松或 Western hemlock 及 13 種針葉樹材，其相關係數分為弦、徑面板，得到較高的相關性。林振榮（1992）、陳勁豪（2002）和 光平（2003）的結果也和本試驗相合。Tsushima *et al.*（2006）指出五個檜木實生林的林分調查，五種林分的栽植密度和生育條件都不同的狀況下，就五區的氣乾狀態下的木材而言，五區的 MOR 和 MOE 都是是正的直線相關，且都有顯著性，而相關係數在 0.53~0.83 間，同時栽植密度最小的林分，其氣乾密度、MOE 和 MOR 都比其他的四個林分來的小，但其 MOR 標準差也是最小的，MOR 的 CV 值也是最小的。邱志明和林振榮（2000）以為試驗材料時指出，MOR 與 MOE 間有顯著的正直線相關，其決定係數是 0.706。MOE 和 Pilodyn 間的相關性很低，其相關係數為 0.19，而 Chudnoff *et al.*（1984）指出針葉樹的 MOE 和 Pilodyn 的決定係數為 0.24，全部樹種的決定係數是 0.3，闊葉樹的決定係數為 0.5，其中 木的決定係數高達 0.7，而南方松和 lodgepole pine 的決定係數都低於 0.2。卓志隆（2000）指出柳杉氣乾材 MOR 和 MOE 間有存在一正的直線關係，其相關係數為 0.71，生材狀況下，MOR 和 MOE 也是一正的直線迴歸式，但其相關係數為 0.31。莊世滋（1999）指出無論是在實大樑還是小試材，MOE 和 MOR 都是顯著的直線正相關。

當利用逐步迴歸分析時，可得知下式關係：

$$\text{MOR} = 0.001 \text{ MOE} + 1114.218 \text{ D} + 0.076 \text{ Tt} - 219.241, \text{ F} = 165.28$$

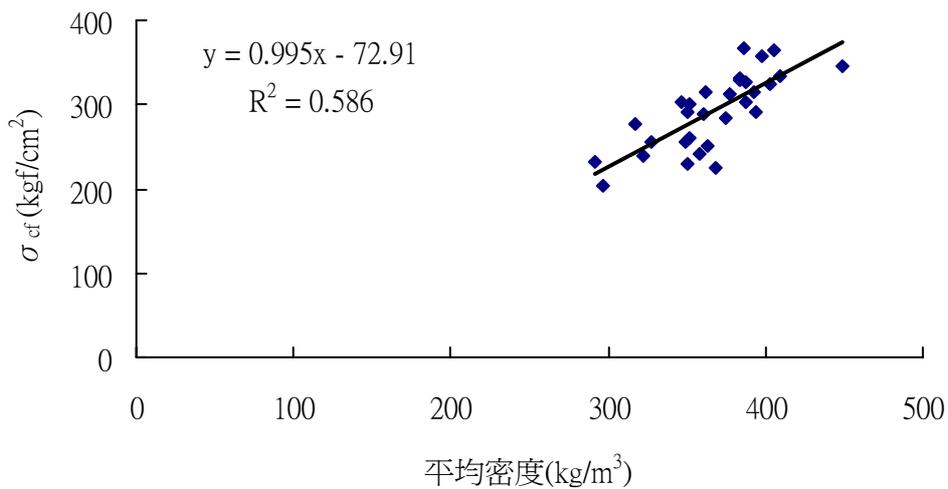


圖 25 木材平均密度與抗壓強度 ( $\sigma_{cf}$ ) 之關係

Fig. 25 Relationship between wood density and  $\sigma_{cf}$

林木的生長受到許多因子的影響，如栽植密度、水、光、本身的基因、天然害等等。但這些因子都會影響樹木的生長，最直接的反應就在細胞生成上，細胞在環境優良時，會大量的分裂，在環境不良時，就會減少分裂的次數，甚至於進入 的狀況，而林木細胞又是由許多的纖維所組成，單位面積下能 入的纖維多，而空 少或間 小的則其密度就會高，反之，密度就會低，本試驗的微破壞抗壓強度是指縱向的，一般而言，當進行抗壓試驗時，若單位體積內的纖維量多時，則能 抗抗壓的強度就越大，換言之，密度越大則抗壓強度越大，而本試驗所得結果亦是如此，抗壓強度 =  $0.9948 \times$  密度 - 72.91 的直線迴歸式(圖 25)，而決定係數為 0.586，其中本試驗的抗壓強度在 190~390 kgf/cm<sup>2</sup>，密度在 0.29~0.45 g/cm<sup>3</sup> 之間。卓志隆 (1998) 研究栽植距離對柳杉強度的變異性中指出，無缺點小試片之氣乾密度和抗壓強度間有高度正相關 ( $R^2=0.724$ )。王松永 (1975) 曾對於 39 種南 材之抗壓性質進行探討，得到其縱向抗壓及弦向抗壓強度 ( $\sigma_c$ ) 及彈性模數 ( $E_c$ ) 均與其氣乾比重之間有正線性關係存在。王松永、曾偉宏 (1993) 等曾探討杉木之縱向抗壓強度變異性，亦指出縱向抗壓強度及彈性模數與其氣乾比重之間均有正相關之線性關係，其相關係數 ( $r$ )；縱向抗壓強度為 0.440~0.905。Wang and Chiu (1993) 曾探討柳杉實生苗與插條苗林木之抗

壓與抗彎性質，亦指出其縱向抗壓強度及彈性模數與氣乾比重之間有正線性關係，其相關係數各為 0.911 及 0.640，經 F 值測驗均有極顯著性相關。由上述的研究可知，密度是抗壓強度重要的指標，故亦可以利用密度這個因子來推估抗壓強度。

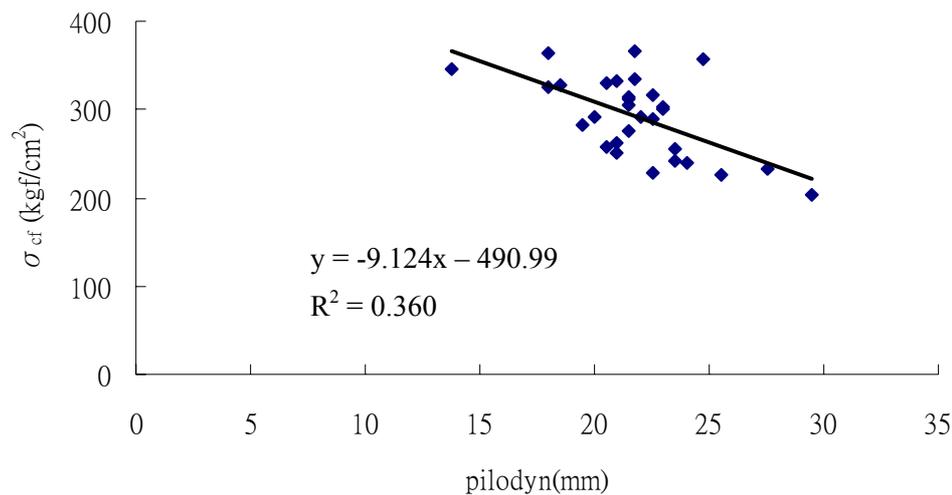


圖 26 刺入深度與抗壓強度之關係

Fig. 26 Relationship between pilodyn and  $\sigma_{cf}$

利用 Pilodyn 的測試中，當穿刺的深度的越小則邊材微破壞抗壓就越強，兩者呈現負的直線相關（圖 26），其  $R^2 = 0.360$ ，因此刺入深度可以當成評估邊材抗壓強度的一項因子，當在立木狀況下，Pilodyn 只能檢測到木材邊材的部份，Pilodyn 能刺入的深度淺，表示該部份的木材抗穿刺的能力強，而 Pilodyn 和密度有正相關，也就是密度越大時，刺入的深度越短，進一步密度越大，則抗壓強度就會比較強，因此 Pilodyn 刺入深度短，則抗壓強度強是合理的，本試驗抗壓強度在  $180 \sim 350 \text{ kgf/cm}^2$ ，刺入深度在  $13 \sim 30 \text{ mm}$ ，Futoshi Ishiguri *et al.* (2006) 指出無論是 16 年生還是 64 年生的樹木邊材內 1 公分的密度和刺入深度間是呈現負的直線相關，其中 16 年生的  $r$  值為  $-0.578$ ，而 64 年生的  $r$  值為  $-0.588$ ，故密度越大則刺入深度就越小。Chudnoff *et al.* (1984) 指出抗壓強度和 Pilodyn 間，全部樹種的決定係數為 0.61，闊葉樹的決定係數為 0.67，針葉樹的決定係數為 0.5，

松類的樹種又是最低的 0.42，而 木和 木則達到 0.75。

### 3. 九個年輪特徵值

#### (1) 優中劣勢木九個年輪特徵值之差異性

表 20 優、中、劣勢木九個年輪特徵值之差異性

Table 20 Difference of the nine ring characteristics among dominant, intermedia and suppressed wood

	RW (mm)	RD (g/cm <sup>3</sup> )	ED (g/cm <sup>3</sup> )	LD (g/cm <sup>3</sup> )	Dmax (g/cm <sup>3</sup> )	Dmin (g/cm <sup>3</sup> )	LWP (%)
劣勢木	3.55 <sup>a</sup>	0.396 <sup>a</sup>	0.291 <sup>a</sup>	0.640 <sup>a</sup>	0.774 <sup>a</sup>	0.205 <sup>a</sup>	30.25 <sup>a</sup>
中勢木	3.74 <sup>ab</sup>	0.364 <sup>ab</sup>	0.273 <sup>a</sup>	0.771 <sup>b</sup>	0.879 <sup>b</sup>	0.163 <sup>b</sup>	18.38 <sup>b</sup>
優勢木	4.43 <sup>b</sup>	0.348 <sup>b</sup>	0.262 <sup>a</sup>	0.753 <sup>b</sup>	0.869 <sup>b</sup>	0.177 <sup>b</sup>	17.47 <sup>b</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每行相互間之顯著差異性

RW: 年輪平均寬度(mm); RD: 年輪平均密度(g/cm<sup>3</sup>); ED: 早材平均密度(g/cm<sup>3</sup>);

LD: 平均晚材密度(g/cm<sup>3</sup>); Dmax: 單一年輪內最高密度(g/cm<sup>3</sup>);

Dmin: 單一年輪內最低密度(g/cm<sup>3</sup>); LWP: 晚材率(%)

未疏伐的林木在生長環境相同的狀況下，剩下來的就是林木在林地內的競爭情形，優勢木、中勢木和劣勢木的區分是以胸徑大小來加以區分，一般林木的胸徑越大就是在競爭的過程中，得到了比較豐厚的資源，所以在相同的年份下能長得比較大，相對的劣勢木所爭取到的資源是最少的，而優勢木所得資源多，所以細胞的分裂會比較快速，因此優勢木的密度是比較小的，其次是中勢木，最大的是劣勢木，本試驗的結果(表 20)正是如此，同時在年輪平均密度上劣勢木(0.396 g/cm<sup>3</sup>)和優勢木(0.348 g/cm<sup>3</sup>)是有統計上顯著性的差異存在，中勢木(0.364 g/cm<sup>3</sup>)和兩者沒有顯著性的差別。在早材密度上，早材是細胞分裂最旺盛之時，所以其密度是相較於晚材或平均密度來的比較低，而優勢木的早材密度依然是最低的(0.262 g/cm<sup>3</sup>)，其次是中勢木(0.273 g/cm<sup>3</sup>)，最大的劣勢木(0.291 g/cm<sup>3</sup>)，

但三者間沒有顯著性的差異。晚材密度上，劣勢木為最小 ( $0.640 \text{ g/cm}^3$ )，且對優勢木 ( $0.753 \text{ g/cm}^3$ ) 和中勢木 ( $0.771 \text{ g/cm}^3$ ) 有顯著性的差異，而中勢木和優勢木間無顯著性的差異存在。年輪平均密度是由早材密度和晚材密度所組成，而由年輪平均密度大到小的順利，和早材密度的順序一致，故年輪平均密度受早材密度影響比晚材密度為大。最大密度和最小密度是整棵樹中密度最大的一點和最小的一點，在本試驗中最大密度和最小密度都是劣勢木明顯的和優勢木和中勢木有差異，中勢木和劣勢木的差異不存在。

年輪寬方面，因優勢木的生長快速，細胞的積較多，而樹木生長旺盛又是在春天，所以早材的寬度就會因生長快而變大，導致年輪寬就著變寬，故優勢木的平均年輪寬 ( $4.43 \text{ mm}$ ) > 中勢木的平均年輪寬 ( $3.74 \text{ mm}$ ) > 劣勢木的平均年輪寬 ( $3.55 \text{ mm}$ )，顯著的差異情形同年輪平均密度。晚材率是估計材質中很重要的影響因子，劣勢木的晚材率 ( $30.25\%$ ) > 中勢木 ( $18.38\%$ ) > 優勢木 ( $17.47\%$ )，劣勢木的晚材率明顯的對中勢木及優勢木存在顯著性差異，若以晚材率來推估強度，依序應是劣勢木 > 中勢木 > 優勢木。

Yamashita K. *et al.* (2007) 指出兩個 Boka-sugi 生育地所產的圓盤密度為  $0.276 \text{ g/cm}^3$ ，和  $0.326 \text{ g/cm}^3$ ，早材密度為  $0.251 \text{ g/cm}^3$ ，和  $0.313 \text{ g/cm}^3$ ，晚材密度為  $0.812 \text{ g/cm}^3$ ，和  $0.850 \text{ g/cm}^3$ ，年輪寬為  $3.96 \text{ mm}$  和  $2.72 \text{ mm}$ ，晚材率為  $10.4\%$  和  $17.1\%$ ，而另外還有兩個 Aya-sugi 生育地所產的圓盤密度為  $0.376 \text{ g/cm}^3$ ，和  $0.393 \text{ g/cm}^3$ ，早材密度為  $0.3 \text{ g/cm}^3$ ，和  $0.309 \text{ g/cm}^3$ ，晚材密度為  $0.908 \text{ g/cm}^3$ ，和  $0.899 \text{ g/cm}^3$ ，年輪寬為  $1.93 \text{ mm}$  和  $1.78 \text{ mm}$ ，晚材率為  $28.6\%$  和  $29.7\%$ 。

## (2) 優中劣勢木之年輪數與年輪寬之關係

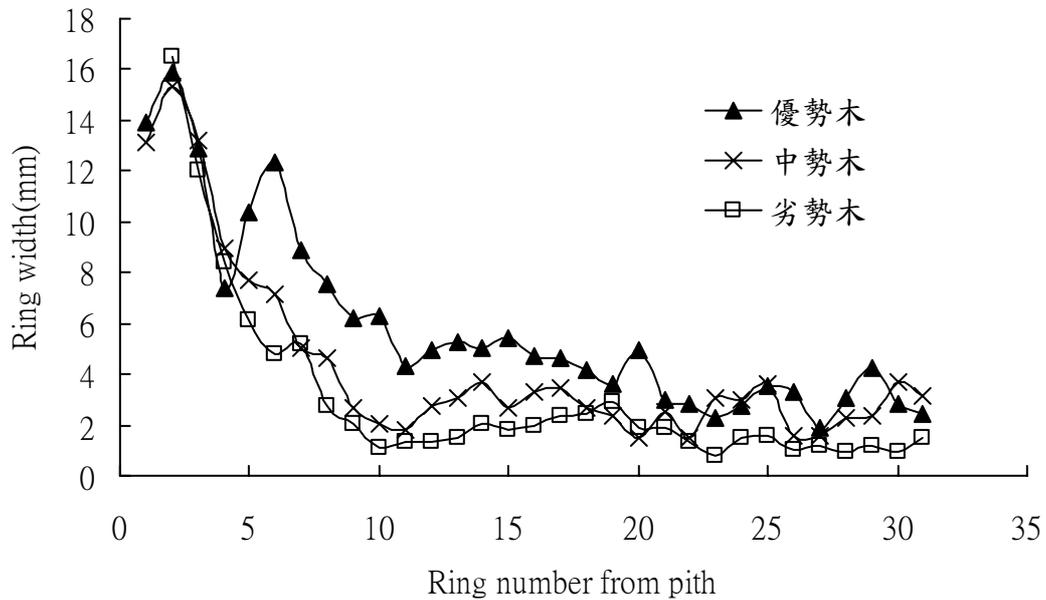


圖 27 優、中、劣勢木之年輪數與年輪寬之關係

Fig. 27 Relationships between ring numbers and ring width among dominant, intermediate and suppressed wood

就年輪寬度 (圖 27) 而言，無論是優勢木、中勢木、劣勢木皆是在第 2 年的年輪寬較大，優勢木在第 5 年、第 6 年出現另一個高；中勢木、劣勢木則從第 2 年後，年輪寬逐漸減少，再第 5 和 6 年時，中勢木和劣勢木並沒有優勢木一樣的產生小高，但年輪寬下降的速度有趨緩或為平的現象，第 10 年後，年輪寬的生長趨於比較穩定，中勢木的年輪寬在 2~4 mm 之間變動，劣勢木的年輪寬在 1~3 mm 之間變動。而優勢木的年輪寬雖然在第 10 年後有較低的趨勢，但是其變動的幅度大於中勢木及劣勢木變動的幅度，此可以顯示出，優勢木的生長受到環境變動的影響，比中勢木及劣勢木的影響來得大，換言之，優勢木的生長對於環境的改變較為敏感，因此若需要瞭解該林分的所受的影響或林分內環境的變化時，所選擇的樹種就應該以優勢木為主，而中勢木則在優勢木與劣勢木間，若了解此林分整體的特性，可選擇中勢木為代表。

### (3) 優中劣勢木之年輪數與年輪寬累加之關係

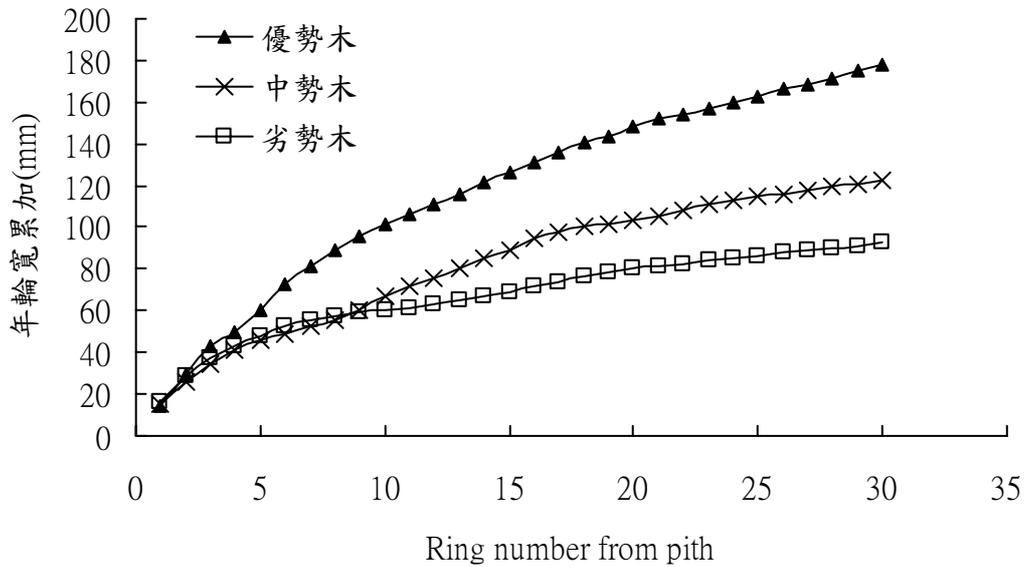


圖 28 優、中、劣勢木之年輪數與年輪寬累加之關係

Fig. 28 Relationships between ring numbers and accumulated ring width among dominant, intermediate and suppressed wood

由圖 28 可知，優勢木從第 3 年開始的生長幅度就大於中勢木與劣勢木，並一直領先到最後，而一開始中勢木和劣勢木的生長速度差不多，但到了第 10 年開始，中勢木開始領先劣勢木，並在 10 年後生長幅度一直比劣勢木快，此原因可能是一開始栽植時，樹冠尚未鬱閉，所以各自發揮，而中勢木在樹高上可能佔據優勢，所以當樹冠開始接觸或準備鬱閉時，樹高上的優勢便展現出來，所以能夠得到比劣勢木更多的資源，而生長累加量可視為肥大生長亦可看出，三者的前期生長較快，之後的生長幅的生長速度就比較趨緩。

(4) 優中劣勢木之年輪數與年輪距髓心的距離相關性

表 21 優、中、劣勢木之年輪數與年輪距髓心的距離相關性

Table 21 Relationships between distance from pith and ring numbers among dominant, intermediate and suppressed wood

相 關 式		
優勢木	$y = 53.69 \ln(x) - 14.817$	$R^2 = 0.967$
中勢木	$y = 36.14 \ln(x) - 6.760$	$R^2 = 0.945$
劣勢木	$y = 22.70 \ln(x) + 11.319$	$R^2 = 0.981$

x：年輪數；y：年輪距髓心的距離

年輪寬本身即是一種重要的生長指標，因此可以採用年輪寬來界定成熟材與未成熟材境界。表 21 所示，將累加的年輪寬作對數趨勢線 ( $R^2 = 0.945 \sim 0.981$ )，並和原本以管胞長定的年份相較，發現當累加的年輪寬增加比例約為 2 % 時，和以管胞長判定的成熟與未成熟材境界大約相符，優勢木根據此種規則， $y = 53.69 \ln(x) - 14.817$ ，當累加的年輪寬增加比例約為 2 % 時，約在 18 年生左右，中勢木， $y = 36.14 \ln(x) - 6.760$ ，當累加的年輪寬增加比例約為 2 % 時，約在 17 年生左右，劣勢木， $y = 22.70 \ln(x) + 11.319$ ，約在 14 年生左右。Zobel (1995) 研究指出皆認為一般針葉樹的未成熟材在 5~20 年之間，而闊葉樹此方面的資料比較缺乏。據 Bendtsen and Senft (1986) 以纖維長和比重決定 cottonwood 之未成熟材境界為 17 年。曾偉宏 (1984) 以杉木做為研究對象指出，以管胞長伸長率為 1% 時，做為成熟材與未成熟材境界的標準時，杉木的成熟材與未成熟材的境界為 18~20 年。

### (三) 對高岳試驗地

#### 1. 不同栽植密度與下層疏伐強度

##### (1) 立木胸高直徑 (DBH)

經每木調查，不同栽植密度各樣區林木之胸高直徑 (DBH) 如表 4 所示，Type A 及 Type B 不同的疏伐處理後之平均胸高直徑有下列趨勢：重度疏伐 (Type A1) > 中度疏伐 (Type A2) > 弱度疏伐 (Type A3) 與中度疏伐 (Type B1) > 弱度疏伐 (Type B2) > 未處理區 (Type B3) 的趨勢。平均胸高直徑在未處理區與中度和弱度疏伐有顯著性差異，然而在其他不同強度的疏伐處理之間，胸高直徑無顯著性差異。胸徑的大小也意味著生長量的多寡，所以從平均胸徑而言，未處理區的生長量最小，而 Type A1 的生長量最大，而對二氧化碳的吸存量除了胸徑大小外，尚需了解其密度後方能計算。

就標準差而言，未處理區最大，其次分別為 Type A1、Type A2、Type A3、Type B1，最小的是 Type B2，標準差的大小代表此林分結構的均質性，標準差越小則林木平均胸徑變異小，此林分則較均質，而未處理區平均胸徑小同時標準差又大，代表此林分林木生長量小又林木生長情形有不均質的情形產生，換言之此林分所存在的林木大小差異很大，又因其未處理，所以此林分小徑木的分佈較多。

綜合上述資料得知，林木在未處理的情形下，其平均胸徑最小變異最大，而經過疏伐處理後不僅使平均胸徑的徑級增大，同時也使得標準差縮小，因此適當的撫育措施對植物的生長量有助益，所得林分的林木品質也比較均質。

Macdonald and Hubert (2002) 指出栽植距離主要的效應會影響林木早期的生長速率。Wang *et al.* (2003a, b) 報告中指出，胸高直徑會因為疏伐處理而增加。由此可見，疏伐處理可以增加林木的生長空間，使林木快速的生長而得到較大的胸高直徑數值，相對的較窄的生長空間，林木的胸高直徑也就比較小。

##### (2) 栽植密度及不同疏伐度與木材密度之關係

在本試驗中如表 22 所示，1~22 年的柳杉平均木材密度在不同的栽植密度中有 Type B ( $0.486 \text{ g/cm}^3$ ) > Type A ( $0.463 \text{ g/cm}^3$ ) 的趨勢，然而根據統計分

析，Type A 與 Type B 則無顯著性差異存在。

由表 23 所示，在 23~32 年的柳杉試材經過第一次弱度疏伐之後（栽植密度在 Type A 為 550 trees/ha 及 Type B 為 750 trees/ha），其平均木材密度在兩者無顯著性差異（Type B 為  $0.487 \text{ g/cm}^3 >$  Type A 為  $0.460 \text{ g/cm}^3$ ）。

表 22 兩種不同栽植密度下之第 1~22 年生之密度與抗壓強度

Table 22 Density and compressive strength of wood from two initial spacing levels of plantations

栽植密度 (1~22 年生)	D ( $\text{g/cm}^3$ )	$\sigma_c$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Fcf ( $\text{kgf/cm}^2$ )
2200 trees/ha	0.463 <sup>a</sup> (0.038)	338.0 <sup>a</sup> (37.1)	324.1 <sup>a</sup> (54.0)
3000 trees/ha	0.486 <sup>a</sup> (0.034)	366.9 <sup>b</sup> (35.3)	376.4 <sup>b</sup> (77.7)

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每行相互間之顯著差異性

D：密度( $\text{g/cm}^3$ )； $\sigma_c$ ：抗壓強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )；Fcf：微破壞抗壓強度( $\text{kgf/cm}^2$ )

表 23 兩種不同栽植密度下之第 23~32 年生之密度與抗壓強度

Table 23 Density and compressive strength of the 2 plantation spacing levels and low-thinning treatment

栽植密度	第一次疏伐留存木 (23~32 年生)	D ( $\text{g/cm}^3$ )	$\sigma_c$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Fcf ( $\text{kgf/cm}^2$ )
2200 trees/ha	550 trees/ha	0.460 <sup>a</sup> (0.053)	362.6 <sup>a</sup> (58.8)	343.0 <sup>a</sup> (61.5)
3000 trees/ha	750 trees/ha	0.487 <sup>a</sup> (0.053)	397.3 <sup>a</sup> (49.1)	397.7 <sup>a</sup> (55.6)

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a 表示每行相互間之顯著差異性

D：密度( $\text{g/cm}^3$ )； $\sigma_c$ ：抗壓強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )；Fcf：微破壞抗壓強度( $\text{kgf/cm}^2$ )

表 24 不同栽植密度與疏伐度處理之密度、抗壓強度與動彈性模數

Table 24 Density, compressive strength, and dynamic modulus of elasticity of the various plantation spacing levels and thinning treatments

樣區	第二次疏伐 留存木 (33~36 年生)	D (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Fcf (kgf/cm <sup>2</sup> )	V (m/s)	DMOE (kgf/cm <sup>2</sup> )
Type A1	340 trees/ha	0.432 <sup>a</sup> (0.048.4)	328.6 <sup>a</sup> (45.1)	320.1 <sup>a</sup> (79.9)	2186.7 <sup>a</sup> (187.1)	20660 <sup>a</sup> (1777)
Type A2	413 trees/ha	0.453 <sup>a</sup> (0.040)	363.5 <sup>a</sup> (45.5)	352.0 <sup>a</sup> (40.4)	2520.2 <sup>b</sup> (288.7)	28770 (3296)
Type A3	512 trees/ha	0.512 <sup>b</sup> (0.039)	403.2 <sup>b</sup> (31.1)	351.2 <sup>a</sup> (66.1)	2391.9 <sup>b</sup> (325.2)	29300 <sup>b</sup> (3985)
Type B1	612 trees/ha	0.466 <sup>a</sup> (0.045)	356.5 <sup>a</sup> (54.7)	347.9 <sup>a</sup> (65.3)	2506.4 <sup>a</sup> (337.5)	29250 (3949)
Type B2	628 trees/ha	0.482 <sup>a</sup> (0.042)	407.2 <sup>a</sup> (26.9)	425.5 <sup>b</sup> (25.3)	3024.0 <sup>b</sup> (252.1)	44060 (3670)
Type B3	738 trees/ha	0.490 <sup>a</sup> (0.049)	399.0 <sup>a</sup> (31.7)	406.7 <sup>a</sup> (60.4)	2502.0 <sup>a</sup> (386.4)	30700 (4735)

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每行相互間之顯著差異性

D：密度(g/cm<sup>3</sup>)； $\sigma_c$ ：抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)；Fcf：微破壞抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)；

V：超音波波速(m/s)；DMOE：動彈性模數(kgf/cm<sup>2</sup>)

在第二次疏伐之後（第 33 年~36 年），不同疏伐強度試材之強度結果由表 24 所示。由表中可以看出，平均木材密度在 Type A 樣區中，經過疏伐處理後，有下列的趨勢：弱度疏伐（Type A3）> 中度疏伐（Type A2）> 重度疏伐（Type A1）。在 Type B 樣區中，平均木材密度的趨勢如下：未處理區（Type B3）> 弱度疏伐（Type B2）> 中度疏伐（Type B1）。而在 Type A 的結果中，弱度疏伐對中度及重度疏伐的結果有顯著性差異存在，而其他樣區之間則無顯著性差異。

Koga *et al.* (1997) 指出無疏伐處理林木的平均密度顯著大於重度疏伐後的林木，亦即重度疏伐處理將降低木材平均年輪密度。林振榮等人 (2002) 指出台

灣杉疏伐處理對林木有減低平均年輪密度的趨勢，此因疏伐處理樣區比未處理區有較寬的生長空間，此時年輪寬度就會增大，相對的反應出比重下降的現象。Zobel 及 Buijtenen (1989) 亦指出林木疏伐處理後，木材密度會降低 8~10%，是因為疏伐後產生較短的管胞，較寬的早材，及較多的未成熟材，導致低密度發生。Yang (1987) 則指出疏伐處理將促進早材生長，而降低木材的密度，但若疏伐是在夏季，則會產生較多的晚材，使整體的年輪密度增加或不降低的結果，另外木材密度的增加可能是因被壓木的發生導致此種現象。本次試驗與上述學者的研究成果一致。Wang and Chen (1992) 指出，柳杉之成熟材以及未成熟材境界約在 17~22 年。在本試驗中，第一次疏伐之前的試材 (22 年生) 不包含成熟材。因此，在本試驗中，所有的試片包含極高的未成熟材，使得木材的性質，受到未成熟材的影響。已知未成熟材在木材利用方面的性質較成熟材差。Wang and Chiu (1993) 的報告指出，在相同密度的木材試片中，未成熟材的機械強度性質較成熟材差。

### (3) 不同疏伐度對超音波速之影響

表 25 各樣區橫向超音波之 Tukey 分析

Table 25 The difference of sample sites' transverse in ultrasonic wave velocity

樣區	Vr(m/s)	標準差	同質性
Type A1	1206	174.4	a
Type A2	1486	285.9	b
Type A3	1225	136.7	a
Type B1	1228	145.4	a
Type B2	1236	107.4	a
Type B3	1217	247.7	a

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

Vr：橫向超音波波速(m/s)

表 25 所示為試驗林地林木之橫向超音波速 ANOVA 多變異分析結果，其中 Type A1、Type B3、Type A3、Type B1 和 Type B2 間無明顯差異性存在，但 Type A2 和其他五區有顯著性差異，由此分析結果而言，Type A2 的林木材質應該最佳，然 Type A2 的變異 是最大，此可表示 Type A2 林木的材質可能較不均質，但整體材質的強度是最好的。

因 Type A1、Type B3、Type A3、Type B1 和 Type B2 間無明顯性差異存在，故由標準差的角度而言，Type B3 大於其他四區，故其材質相對其他四區可能較不均質，而 Type A1 之橫向超音波值最差，且標準差次序為第三大，然其平均胸徑又達 28.14 cm (表 4)，這也許是因為 Type A1 有兩條林道經過，其中一條是林道的回頭彎，因此本林分有人為干擾，使其林地較為開闊，致使其胸徑大而超音波值低，是故其材質應屬最差。而橫向超音波的數值介於 1200~1500 m/s 間，此與 光平 (2003)、陳 與黃彥三 (2002)、陳勁豪 (2002) 所得結果相似，同時 Beall (2002) 指出，就實木而言，橫向超音波速約在 1~2 km/s，故此試驗之橫向超音波傳遞速度實屬合理。

探討疏伐後各區的縱向超音波速之變化，不同疏伐強度(在第二次疏伐之後)之平均超音波速 (V) 及超音波動彈性模數 (DMOE) 如表 24 所示。在 Type A 中，不同疏伐強度的 DMOE 值有次述趨勢：弱度疏伐 (Type A3) > 中度疏伐 (Type A2) > 重度疏伐 (Type A1)。在 Type B 中，不同疏伐強度 (在第二次疏伐之後) 的 DMOE 值有弱度疏伐 (Type B2) > 未處理區 (Type B3) > 中度疏伐 (Type B1) 的趨勢。在統計上，Type A 樣區中，弱度與中度疏伐對強度疏伐有顯著性差異，在 Type B 樣區中，弱度疏伐對中度疏伐及未處理區有顯著性差異存在。而其他的區域則無顯著性差異。此趨勢顯示，弱度疏伐的處理比其他的處理可以得到較大的動彈性模數。

在本試驗中，立木所得到的結果比 Chuang and Wang (2001) 報告中的數值來得小。立木有著高含水率，當含水率增加時，縱向的超音波速會降低。Lei *et al.* (2005) 指出，許多森林研究學者認為，有強的相關性及回 機制在不同的變異之間，用來描述木材特性中之 MOR 及 MOE 的相關性。MOR 與 MOE 和栽植密

度、胸高直徑、樹高、樹冠高度、樹冠寬度、主要的五根最大的枝條以及樹幹的削度都有線性的方程式存在。在 Macdonald and Hubert (2002) 的報告中指出，栽植方式使生長環境不同，間接的影響林木的樹冠層及根系的木材品質。

Wang and Chen (1992) 指出可能是因為疏伐度越大，導致林木微生態有所改變，使得林木突然可獲得大量的養份、光與水，同時競爭變少，如此林木可以快速生長增大材積，並造成林木的年輪寬增大、比重變小。Yang (1987) 指出疏伐處理會促進早材的發生。

林振榮等人 (2002) 指出台灣杉不同疏伐及修枝處理的立木及實木試材，利用超音波速與動彈性模數評估後發現，經過疏伐處理後的樣木較未處理區樣木有較低的趨勢，亦即未處理區有較佳的木材超音波性質。此與本試驗結果相符。Wang *et al.* (2001) 亦指出較低密度林分顯示有應力波速度及抗彎性質降低的傾向。邱志明等 (2000) 檢測台灣杉造林木，發現縱向超音波速隨林分密度的增加而減少，惟決定係數 ( $R^2=0.25$ ) 偏低。Urakami and Asai (1996) 則指出音波在木材縱向傳遞時，主要藉由晚材部分來移動。故由超音波波速來推估，可能未處理區的晚材率會較其他經疏伐處理區為大，而重度疏伐後的晚材率為最小。

#### (4) 栽植密度及不同疏伐度與抗壓強度及微破壞抗壓強度之關係

伐採的 18 棵樣木，經製作為抗壓試片後進行抗壓試驗 (CNS453)，並利用生長錐取出樹蕊，利用樹蕊檢測木材的抗壓強度 (微破壞抗壓強度試驗)，所以對林木的破壞性小，又可進行比較細部的分析，而此方法為較新的技術，所以與傳統的抗壓試驗是否有顯著相關性存在，是必須探討的課題。

不同栽植密度之 1~22 年的柳杉試材其平均抗壓強度及微破壞抗壓強度 (表 22)，Type A (栽植密度 2200 株/ha) 之抗壓強度與微破壞抗壓強度分別為 338.0 kgf/cm<sup>2</sup> 及 324.1 kgf/cm<sup>2</sup>，Type B (栽植密度 3000 株/ha) 之抗壓強度與微破壞抗壓強度分別為 366.9 kgf/cm<sup>2</sup> 及 376.4 kgf/cm<sup>2</sup>，Type B 皆大於 Type A，且在 Type A 與 Type B 之間，有顯著性差異存在 ( $p < 0.05$ )。也就是說，栽植距離較小，林木生長空間較小的樣區，比栽植距離大，生長空間較大的樣區，有較高的抗壓

強度結果。

由表 23 所示，在 23~32 年的柳杉試材經過第一次弱度疏伐之後（栽植密度在 Type A 為 550 trees/ha 及 Type B 為 750 trees/ha），在抗壓強度與微破壞抗壓強度方面，Type B（750 株/ha）之抗壓強度與微破壞抗壓強度分別為 397.3 kgf/cm<sup>2</sup> 及 397.7 kgf/cm<sup>2</sup>，Type A（550 株/ha）之抗壓強度與微破壞抗壓強度分別為 362.0 kgf/cm<sup>2</sup> 及 343.0 kgf/cm<sup>2</sup>，Type B 的強度仍大於 Type A，而 Type B（750 株/ha）與 Type A（550 株/ha）兩者間沒有顯著性差異存在。在本試驗中，雖然第一次弱度疏伐之後，使栽植密度變成原來的 25%（分別為 550 及 750 trees/ha），兩者沒有顯著性差異，但對抗壓強度與微破壞抗壓強度上，仍有些許的影響。

在第二次疏伐之後（第 33 年~36 年），不同疏伐強度試材之強度結果由表 24 所示。平均抗壓強度在 Type A 樣區中，有弱度疏伐 (Type A3) > 中度疏伐 (Type A2) > 重度疏伐 (Type A1) 的趨勢存在。在 Type B 樣區中，平均抗壓強度有弱度疏伐 (Type B2) > 未處理區 (Type B3) > 中度疏伐 (Type B1) 的趨勢。根據這樣的趨勢，弱度疏伐的樣區有較好的木材品質。在統計上，Type A 樣區的抗壓強度 ( $\sigma_{cm}$  值)，弱度疏伐對中度與重度疏伐有顯著性差異，在 Type B 樣區則是微破壞抗壓強度 (Fcf 值)，弱度疏伐對中度疏伐與未處理區有顯著性差異，但在其他的樣區之間則無顯著性差異存在。此趨勢顯示出，弱度疏伐的處理，比其他的處理方式有較大的抗壓強度存在。

本試驗所得到的微破壞抗壓強度 (320.1~425.5 kgf/cm<sup>2</sup>) 和 Wang and Chiu (1993b) 的報告中所得到的值 (328~444 kgf/cm<sup>2</sup>) 有相似的結果。抗壓強度 ( $\sigma_{cm}$ ) 和胸高直徑 (DBH) 的相關性分析，兩者之間有線性的關係存在，當胸高直徑增大時，抗壓強度會降低，其線性關係式如下：

$$\sigma_{cm} = -15.7 \times DBH + 781.1, R^2 = 0.33, F = 78.1^{**}$$

另外，柳杉的抗壓強度數值 ( $\sigma_{cm}$ ) 會隨著其木材密度 (D) 的增加而增加，兩者之間的線性關係式如下：

$$\sigma_{cm} = 809 \times D - 12.6, R^2 = 0.55, F = 444.2^{**}$$

根據 F 值，兩者間有顯著性差異存在。這和 Wang and Chen (1992) 以及 Chuang

and Wang (2001) 報告中所提到較高的胸高直徑有較低的密度、較低的抗彎強度以及較低的抗壓強度有相似的結果。

本試驗中，平均抗壓強度數值顯示在未處理區低於弱度疏伐的樣區，可能是因為在未處理區（33~36 年生）的栽植密度較為 密，造成未處理區的林木生長受到限制。由表 24 與表 25 的結果顯示，未處理區（Type B3）原本的栽植密度為每公頃 3000 株，在 22 年生時經過第一次疏伐，剩下每公頃 750 株，在 32 年生時，經由自然的疏伐後剩下每公頃 738 株。同時，未處理區的平均木材密度高於中度疏伐的樣區，然而在平均抗壓強度及其彈性模數，則是中度疏伐的樣區高於未處理區，因此未處理的樣木其分布較為密集，而形成其生長被壓制，造成其強度低於其他有疏伐過的樣區，因此未處理區的樣木比弱度疏伐樣區的樣木之木材品質較差。

在本試驗中所使用的是無缺點的試材，因此節對木材密度以及抗壓強度的效應無法有效的表達出在不同栽植密度所造成的影響。事實上我們知道，有節的木材會有較低的強度以及較高的木材密度。在 Wang *et al.* (2003a, b) 指出，重度疏伐的樣區比中度疏伐或未處理區，有較多的節以及較大直徑的節。相對的，立木在較寬闊的生育地，較利於林木生長，因此會產生較多的節（枝條）以及較大直徑的節。另外，在不同疏伐之後樹冠大小（代表生長力或光合作用效率）對胸高直徑以及木材性質的影響是相當重要的。Pape (1999) 指出，較高的栽植密度造成的結果是增加林木生長的競爭效應，限制樹冠的生長。

Kasal (2003) 指出，利用樹蕊所進行微破壞（抗壓和抗拉）試驗與 ASTM 標準試片比較，發現抗壓試驗在兩者間有高度相關性，引張試驗時兩者間也有相關性，但不如抗壓試驗者高，另外在抗壓彈性模數的表現上亦具有高度相關性。依本試驗結果，顯示抗壓強度和微破壞抗壓強度間具高度相關性且無顯著性差異，所以由微破壞試驗所得之抗壓強度可用以代替一般抗壓試驗所得之抗壓強度。

Wang and Chiu (1993a, b) 指出不同疏伐度間，重度疏伐柳杉的強度值較弱度疏伐柳杉為小，而中度的上層疏伐及下層疏伐間則無顯著性差異。破壞強度與

微纖維傾斜角及氣乾比重成正相關，破壞強度與生長輪寬及管胞長成負相關，彈性模數與氣乾比重、生長輪寬及管胞長成正相關，而與微纖維傾斜角有負相關的存在。表示疏伐度越大則林木之間的競爭少，會促進林木的生長，增加早材的生長而使晚材率下降，導致抗壓強度變小，所以重度疏伐與中度疏伐的抗壓強度小於未處理區和弱度疏伐是合理的。Wang *et al.* (2005) 亦指出不同疏伐度的台灣杉造林木木材的強度會不同，有未處理區 > 中度疏伐 > 重度疏伐之趨勢，本試驗結果與之類似。

### (5) DMOE 與 Pilodyn

表 26 不同栽植密度與疏伐度下的密度、抗壓強度、動彈性模數和刺入深度

Table 26 Density, compressive strength, dynamic modulus of elasticity, and penetration depth of the various plantation spacings and thinning treatments

栽植密度 (1~36 yr old)	Type A	Type B
D (g/cm <sup>3</sup> )	0.463	0.485
$\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	357	387
Fcf(kgf/cm <sup>2</sup> )	338	395
V (m/s)	2366.3	2677.5
DMOE (kgf/cm <sup>2</sup> )	26240	34670
P (mm)	19.5	17.9

D：密度(g/cm<sup>3</sup>)； $\sigma_c$ ：抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)；Fcf：微破壞抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)；  
V：超音波波速(m/s)；DMOE：動彈性模數(kgf/cm<sup>2</sup>)；P：Pilodyn 刺入深度(mm)

利用 Sylvatest 超音波及 Pilodyn 測定儀所得到的 DMOE 與 Pilodyn 刺入深度對 開始的栽植密度與疏伐後柳杉立木(樣本樹木約在 1~36 年生)的生長有不同的結果。DMOE 與 Pilodyn 的比較結果如表 26 所示，在 Type A 和 Type B 之間沒有顯著性的差異存在。不同的栽植距離 36 年生的柳杉，其密度和抗壓強度的整體比較如表 26 顯示。其結果在 Type A 和 Type B 之

間也沒有顯著的差異。

雖然木材密度和抗壓 度在年輕柳杉最初的生長空間有 2 種栽植密度上的不同，在之後 23 年的木材性質仍不受影響。所有的木材性質對於在不同造林法 1~36 年生的立木樣本中的分析，Type A 和 Type B 沒有顯著的差異。所以，我們建議這樣的造林技術可以使用，不用考慮木材密度、抗壓強度或是彈性模數。較長的輪伐期林分經營，可減少未成熟材的比例，進而更使未成熟木材密度及抗壓強度的影響降低。

#### (6) 不同疏伐度的木材密度在徑向之變化

各樣區的木材密度在直徑方向的變異性可分為五種型態，第一種型態為 N 型（圖 29），由髓心方向往樹皮先升高後下降再上升，Type B2 和 Type A3 各有 1 棵、Type A2 有 2 棵樣木屬於此型態；第二種型態為倒 N 型（圖 30），由髓心方向往樹皮先微降後升到高點後再下降，Type A2 和 Type B3 各有 1 棵、Type B2 有 2 棵樣木屬於此型態；第三種型態為拱形（圖 31），由髓心方向升高至高點後下降至樹皮處，Type A2 和 Type B3 各有 1 棵、Type B2 有 2 棵樣木屬於此型態；第四種型態為 W 型（圖 32），由髓心往樹皮方向先微降再上升到高點，而後降至最低點再上升，Type A1 和 5 區各有 2 棵樣木屬於此型態；第五種型態為上升階梯型（圖 33），由髓心往樹皮方向先升，而中途有減緩上升速度後再上升到樹皮，Type A3 各有 2 棵樣木屬於此種型態。

密度在樹幹橫切面會產生變異性，可能是受到細胞大小形狀、細胞厚度、晚材率與木質線百分率等木材解 性質的影響。王松永（1988）曾對九種省產針葉樹材（扁柏、紅檜、鐵杉、 杉、 杉、冷杉、柳杉、杉木及台灣杉）單株內密度在橫向（直徑方向）與軸向的變異做探討，得知密度在橫向的變化歸納成五種類型。本試驗結果與之有類似之處。

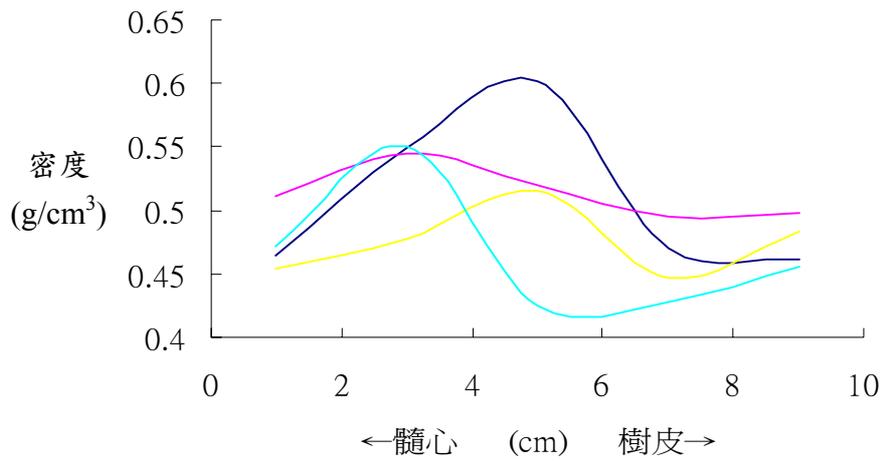


圖29 直徑方向木材密度N型態

Fig. 29 Type N of wood density in radial direction

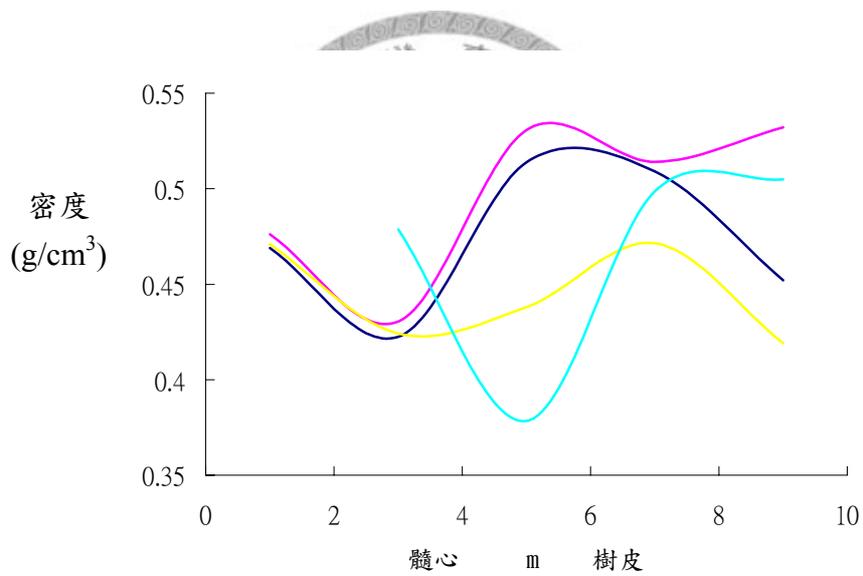


圖30 直徑方向木材密度倒N型態

Fig. 30 Type reversed N of wood density in radial direction

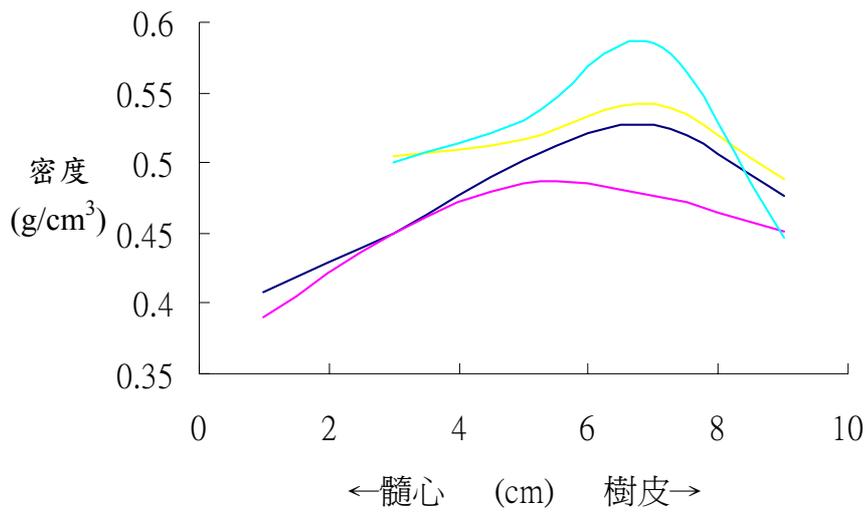


圖31 直徑方向木材密度拱形型態

Fig. 31 Type arch of wood density in radial direction

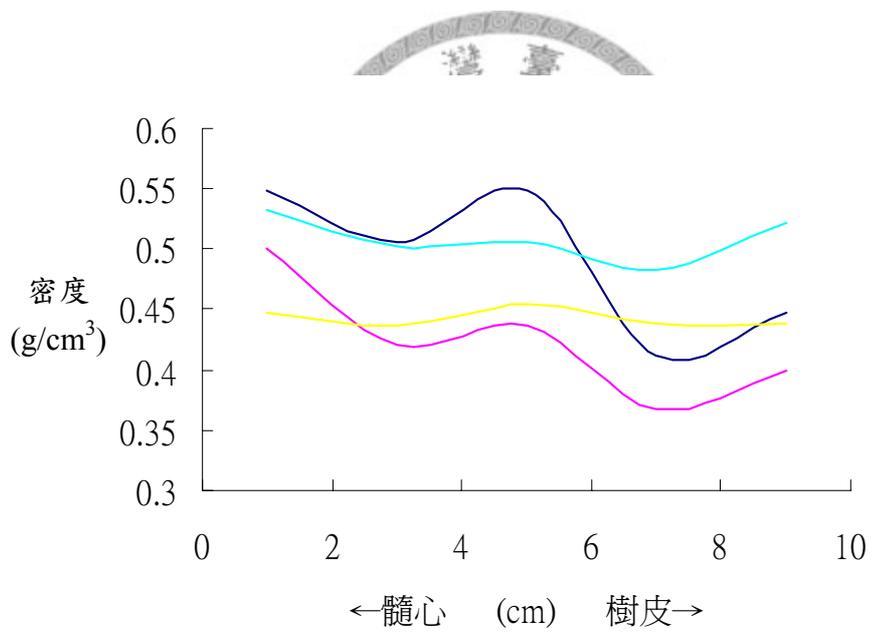


圖32 直徑方向木材密度W型態

Fig. 32 Type W of wood density in radial direction

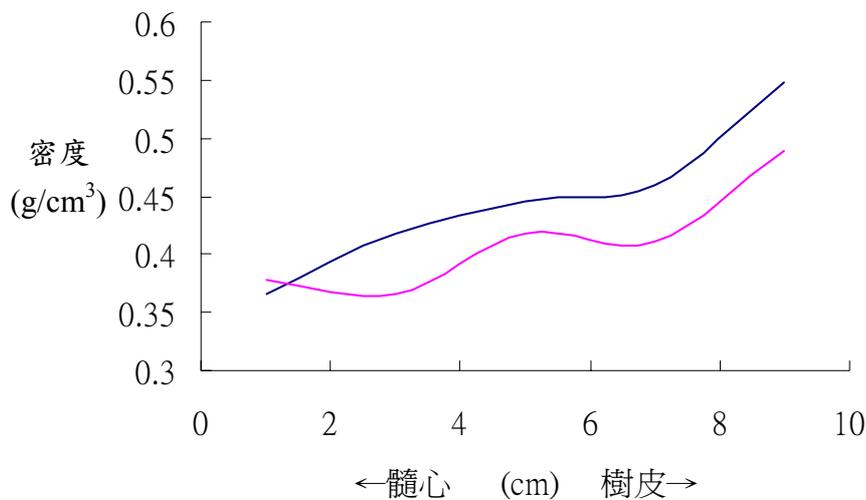


圖33 直徑方向木材密度上升階梯型態

Fig. 33 Type upward stair of wood density in radial direction

## 2. 管胞長

### (1) 成熟材與未成熟材及其界定年份與方法

#### a. 成熟材與未成熟材之界定

陳建 (1991) 指出柳杉的成熟年齡平均值如下，1 m × 1 m 者，19.7 年、2 m × 2 m 者，19.3 年、3 m × 3 m 者，19.3 年、4 m × 4 m 者，19.0 年、5 m × 5 m 者，18.0 年，差異不顯著。Zobel and Buijtenen (1989) 之研究認為一般針葉樹之未成熟材界為 5~20 年間。因此二直線交會法以 20 年為界，前 20 年生者為未成熟材。

由圖 34 可以看出在髓心附近的管胞最短而後向樹皮的方向會急速增加，到一定年齡後，管胞長的增長變化趨緩，此與 Chiu *et al.* (2005) 所得台灣杉管胞長的變化趨勢相同，Saren *et al.* (2001) 並指出管胞長會在 5 到 10 年間快速增加，10 到 30 年間則開始穩定，30 年之後會再緩慢的增加。而二直線交會法管胞長度與生長年齡呈現很好的線性關係，約在 14~22 年之間趨於緩和，之後管胞長度只有小幅度的動並沒有明顯的增加，髓心附近的管胞長約在 0.90~1.46 mm 之間，而達穩定時約在 2.87~3.08 mm 之間。

參考邱志明與林振榮(2000)利用分段迴歸判斷成熟材與未成熟材境界的方式，二直線交會法係在1995~2000年間取平均值，並在平均值上下取標準差，從髓心往樹皮方向取10年作趨勢線和平均值範圍的交點而視為成熟材與未成熟材的境界(圖35)。傳統方法是利用對數趨勢線(圖34)，採管胞伸長率降低至1%時之年輪數作為成熟材與未成熟材之境界區分標準，兩者所判斷的成熟材與未成熟材的境界年份非常相似，但二直線交會法的方法是比傳統方式來的比較節省時間，同時效果也一致，亦是一種科學的方式。

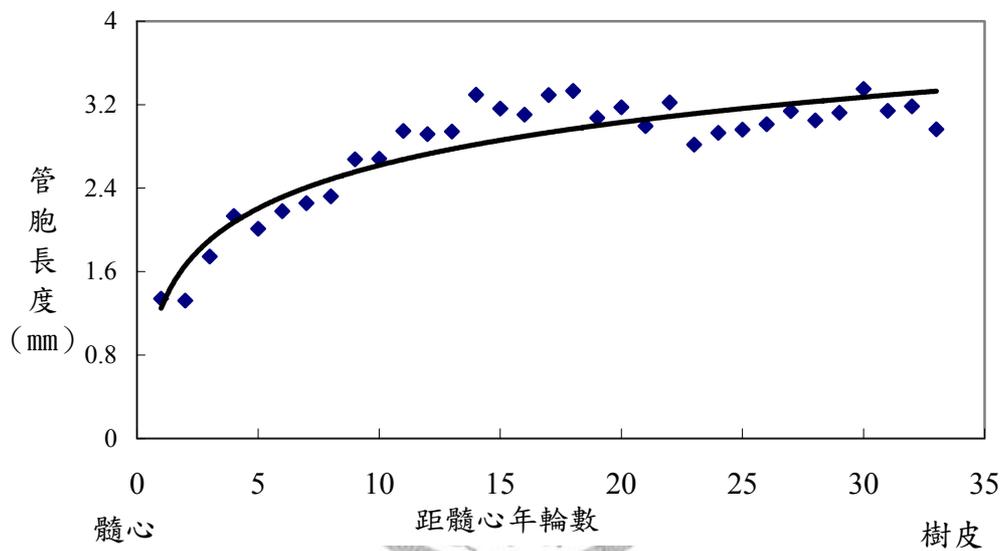


圖 34 Type B2 管胞長散佈圖

Fig. 34 The tracheid length of Type B2

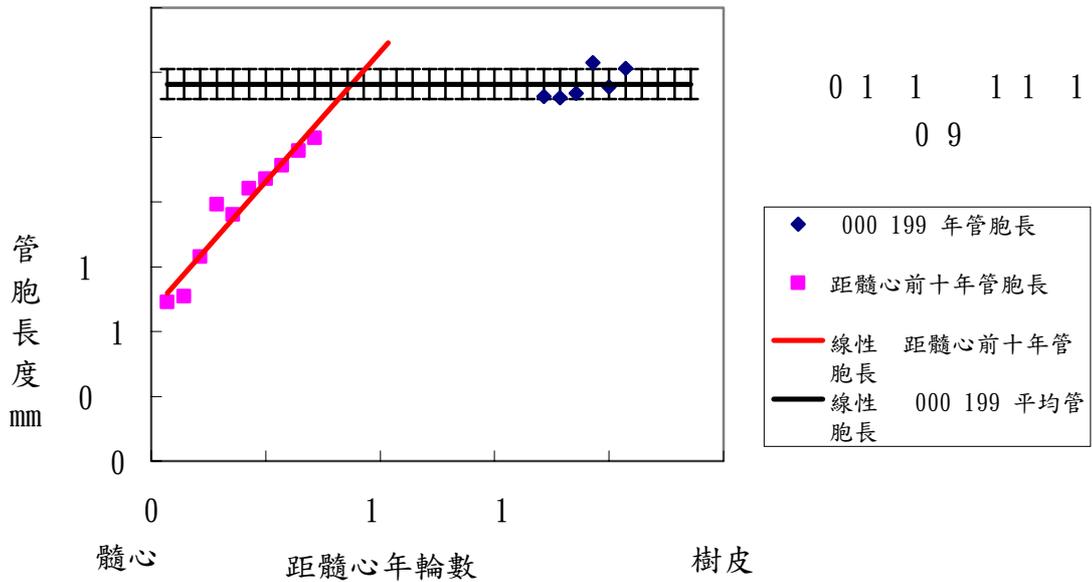


圖 35 方法一界定成熟材與未成熟材

Fig. 35 The first method distinguished from mature and juvenile wood

前人研究推論值：18~20 年（陳建，1991）

表 27 柳杉成熟材與未成熟材之界定

Table 27 To distinguish mature and juvenile wood

樣區	二直線交會 法(年)	傳統方法 (年)	成熟材之平 均管胞長 (mm)	未成熟材之 平均管胞長 (mm)	t 值
Type A1	19	20	2.55 <sup>a</sup>	1.97 <sup>b</sup>	2.65
Type A2	18	20	2.53 <sup>a</sup>	1.70 <sup>b</sup>	4.14
Type A3	21	22	2.68 <sup>a</sup>	2.00 <sup>b</sup>	2.72
Type B1	18	16	2.73 <sup>a</sup>	2.12 <sup>b</sup>	2.90
Type B2	16	17	2.84 <sup>a</sup>	2.01 <sup>b</sup>	3.74
Type B3	17	22	2.81 <sup>a</sup>	1.92 <sup>b</sup>	6.23

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b 表示每列相互間之顯著差異性

由表 27 得知利用二直線交會法而得到的成熟年份是 16~21 年，平均為 18 年，此與陳建（1991）所推估的在 19 年是相近的，故此分段迴歸方式是可信賴的，Csoka *et al.* (2005) 另一以傅立葉分析判定柳杉成熟材與未成熟材境界的方法，約 70 年生的柳杉境界為 21 年，約 94 年生的柳杉境界為 15 年，98 年生的柳杉境界約為 16 年，和二直線交會法的結果相應；二直線交會法中利用 Tukey 多變域分析得知六區的未成熟材與成熟材的境界並沒有顯著的差異，本高明等 (2005) 指出未成熟材與成熟材的境界主要受到親代遺傳的影響，由上可知可能遺傳的影響因素是未成熟材與成熟材的境界重大因子之一。

同時每一樣區的成熟材管胞長比未成熟材的長，且兩者間有顯著的差異存在，陳建（1991）在報告中指出未成熟材之平均管胞長皆小於成熟材之平均管胞長。Yang (2002) 指出白杉幼齡木及成熟木管胞的平均長度分別是 1.8~2.0 mm 和 2.9~3.0 mm，而表 27 顯示柳杉幼齡木及成熟木管胞的平均長度分別是 1.70~2.12 mm 和 2.53~2.84 mm，所以未成熟材的管胞長皆小於成熟材的管胞長。成熟材管胞長：Type B2 > Type B3 > Type B1 > Type A3 > Type A1 > Type A2；未成熟材管胞長：Type B1 > Type B2 > Type A3 > Type A1 > Type B3 > Type A2，可以從成熟材管胞長看出其受到栽植密度的影響，其中 Type B2、Type B1、Type B3 為相同的栽植密度 (3000 株/ha)，Type A3、Type A1、Type A2 為相同的栽植密度 (2200 株/ha)，因而可以看出栽植密度較大的也會有較長的管胞長；而未成熟材管胞長因為林分還未鬱閉所以栽植密度的影響的趨勢沒有表現出來。

表 28 顯示二直線交會法各試材管胞長與生長年份的關係可用下式表示：

$$T = a + b \ln(x)$$

其中，T 為管胞長度 (mm)

x 為距髓心年輪數

a 為相當於第一年輪的管胞長

b 為管胞之伸長係數

表 28 各樣區管胞長度 (y) 與距髓心年輪 (x) 之單對數趨勢線

Table 28 The logarithmic line of the relationship between sites' tracheid and distance from pith

樣區	迴歸方程式	決定係數
Type A1	$y = 0.55 \ln(x) + 1.24$	$R^2 = 0.88$
Type A2	$y = 0.66 \ln(x) + 0.67$	$R^2 = 0.89$
Type A3	$y = 0.65 \ln(x) + 1.04$	$R^2 = 0.94$
Type B1	$y = 0.49 \ln(x) + 1.45$	$R^2 = 0.89$
Type B2	$y = 0.60 \ln(x) + 1.25$	$R^2 = 0.85$
Type B3	$y = 0.62 \ln(x) + 1.16$	$R^2 = 0.92$

由圖 34 亦可看出生長初期管胞長會急速上升，隨著生長年份的持續增加，管胞長度增長速度會漸漸變小；每一樣區的管胞長的對數圖的決定係數在 0.85 ~ 0.94 之間，顯示出管胞長的變化與生長年份呈現對數的高度相關。

#### b. 年輪寬的變化

表 29 年輪寬與距髓心距離之迴歸式與其  $R^2$  值

Table 29 The regression and  $R^2$  of the ring width in radial direction

樣區	髓心至第 6 年輪範圍		第 7 年輪至樹皮外側範圍	
Type A1	$y = 0.18x + 0.043$	$R^2 = 0.83$	$y = -0.44 \ln(x) + 1.630$	$R^2 = 0.72$
Type A2	$y = 0.25x - 0.033$	$R^2 = 0.54$	$y = -0.26 \ln(x) + 1.117$	$R^2 = 0.72$
Type A3	$y = 0.27x - 0.283$	$R^2 = 0.95$	$y = -0.73 \ln(x) + 2.406$	$R^2 = 0.77$
Type B1	$y = 0.63x - 0.450$	$R^2 = 0.99$	$y = -0.52 \ln(x) + 1.810$	$R^2 = 0.83$
Type B2	$y = 0.19x - 0.029$	$R^2 = 0.72$	$y = -0.48 \ln(x) + 1.708$	$R^2 = 0.76$
Type B3	$y = 0.28x - 0.250$	$R^2 = 0.55$	$y = -0.52 \ln(x) + 1.710$	$R^2 = 0.82$

當觀察年輪寬在徑向之變化，由圖 36 可看出，在最初的 6 年間，由髓心向樹皮外側會成直線狀的增加，可求出直線迴歸式，其  $R^2$  值在 0.54~0.99 之間，而當年輪寬達最大值後，則向樹皮外側會呈自然對數型的下降，可求出單對數迴歸式時，其  $R^2$  值在 0.72~0.83 之間，皆有良好的相關性（表 29）。

林木初始因生長空間寬裕，所以年輪的生長會非常快速，而至第 6 年後，林木間產生了競爭的態勢，故年輪的寬度漸漸的縮小，而最後有趨於一定的狀況，Koubaa *et al.* (2005) 所做之黑 杉年輪寬會隨著年齡，一開始到第 6 年呈現增大的情形，而後逐年的下降。陳勁豪 (2002) 指出杉木的 林與實生林，其年輪寬皆有相同的趨勢，即年輪寬離髓心越遠者越小，約在 10~15 年後變成和緩，15 年後有趨於一定的態勢，其年輪寬的衰減亦呈自然對數的趨勢下降。由所定的成熟材與未成熟材的境界而言，未成熟材的年輪寬比成熟材的來得大，此與陳建 (1991) 所做的試驗結果相符。

當將樹幹橫斷面之距髓心各年輪之年輪寬依序累加之曲線可表示該樹木之肥大生長趨勢，如圖 36 所示，可看出在距髓心第 10~15 年輪附近，距髓心之距離 (cm) 會以直線狀增大，其後增大趨式會漸趨緩和。

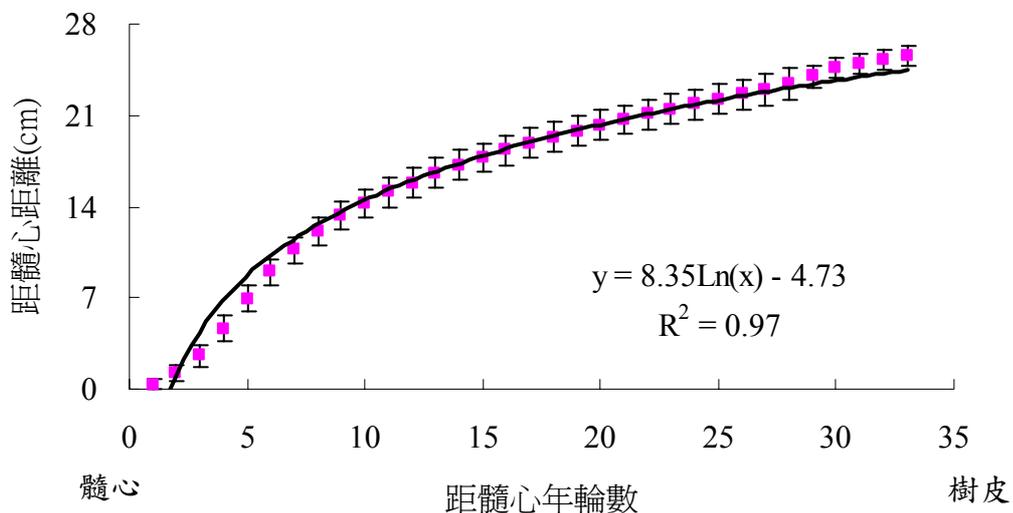


圖 36 Type B2 林木之肥大生長曲線圖

Fig. 36 The grown curve of Type B2

在未成熟材區域，其肥大生長相當快速，此係林木初始生長空間寬裕，所以

年輪生長會非常快速，其後因林木間產生了競爭的態勢，故年輪的寬度漸漸的縮小，而最後有趨於一定的狀況。

年輪寬與管胞長度呈現相反的趨勢，靠近髓心部分的管胞長度比較短，而年輪寬 是比較寬的，隨著年齡的增加，管胞長度增加時年輪寬 變窄，而達到一定年齡之後，管胞長及年輪寬都會趨於一定的值。此趨勢是受到形成層林齡的影響，近髓心附近之形成層始原細胞尚未成熟，分裂出來的子細胞較短，當樹齡由髓心向外增加，形成層始原細胞長度隨之增加，所以分裂出來的管胞長度亦隨之增加，此趨勢 好與年輪寬的趨勢相反。Koga *et al.* (1996) 亦指出生長的速率

管胞長度是呈現負相關。Chiu *et al.* (2005) 所做臺灣杉的管胞長 年輪寬的變化與二直線交會法亦相符，其更指出管胞長的值如果增加，則微纖維傾斜角就會下降。

### c. 利用年輪寬定年

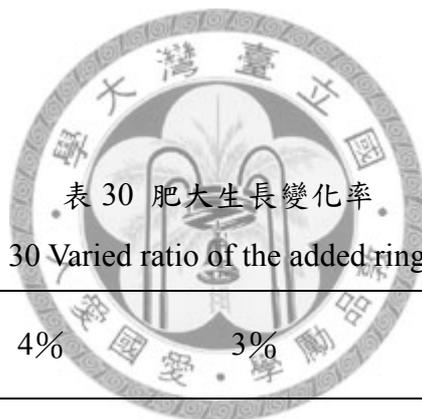


表 30 肥大生長變化率

Table 30 Varied ratio of the added ring width

肥大生長變化率	4%	3%	2%	管胞伸長 1%
達到變化率的年份	12 <sup>a</sup>	14 <sup>b</sup>	19 <sup>c</sup>	20 <sup>c</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b 和 c 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

年輪寬本身即是一種重要的生長指標，若採用年輪寬定成熟材與未成熟材境界則時間可以縮短並節省資源，因此，將累加的年輪寬作對數趨勢線，並和原本以管胞長定的年份相較，發現當累加的年輪寬增加比例約為 2 %時，和以管胞長判定的成熟與未成熟材境界大約相符，且兩者間沒有顯著的差異，但累加的年輪寬增加比例 3%與 4 ，皆對管胞定年有顯著的差異，有成熟年份提早的狀態，故以累加的年輪寬增加比例 2%時，做為成熟材與未成熟材的區分點，各區所判定的年齡如表 30 所示。

表 31 三種試驗方法判定成熟材與未成熟材境界

Table 31 Three kinds methods distinguished mature and juvenile wood

樣區	二直線交會法 (年)	管胞長伸長率 1%定年(年)	以年輪寬定年 (年)
Type A1	18 <sup>a</sup>	21 <sup>a</sup>	19 <sup>a</sup>
Type A2	18 <sup>a</sup>	21 <sup>a</sup>	19 <sup>a</sup>
Type A3	19 <sup>a</sup>	20 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>
Type B1	18 <sup>a</sup>	19 <sup>a</sup>	18 <sup>a</sup>
Type B2	16 <sup>a</sup>	18 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>
Type B3	19 <sup>a</sup>	22 <sup>a</sup>	22 <sup>a</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示

a 表示每列相互間之顯著差異性

由表 31 得知，三者算出的成熟材與未成熟材境界約在 19 年左右，經 Tukey 分析之後，三種方法間沒有顯著的差異，所以利用年輪寬也是判斷成熟材與未成熟材境界的方式之一，同時年輪寬的方式比其他兩種來的便利，更可節省解纖的時間，由趨勢來看，以管胞長伸長率 1%定年的年份會最慢；各區中最快成熟的為 Type B2，時間為 16 年，最慢的為 Type B3，時間為 22 年；據 Bendtsen and Senft (1986) 以纖維長及比重決定 Cottonwood (*Populus deltoides*) 之成熟材與未成熟材境界為 17 年，和二直線交會法所得到的成熟材與未成熟材境界接近，另邱志明和王松永 (1986) 指出柳杉弱、中度疏伐後各區平均境界約為 17~20 年間，而 Zobel and Sprague (1998) 更提出林齡會因為樹種、遺傳及撫育方法之不同而變化；若以距髓心的距離來看，髓心距離未成熟境界平均約為 8.8 ± 0.9 cm。

#### d. 成熟材與未成熟材之強度

表 32 未成熟材與成熟材抗壓強度之 t 檢定比較

Table 32 The compressive strength of mature and juvenile wood analyzed by t test

	$\sigma_c$ 平均數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準差	樣本數	自由度	t 統計	P(T≤t)	臨界值：
未成熟材	358.8	37.28	50	16	0.0426	0.483	1.746
成熟材	358.0	48.43	14				

如表 32 所示，未成熟材與成熟材兩者經 t 檢定後發現無顯著性差異存在，同時成熟材的標準差又比未成熟材的來的大，所以成熟材的抗壓強度散佈性比未成熟材大，可能是因為本試驗樣區進行疏伐處理的效益，而使成熟材的強度有所下降。又從樣本數而言，未成熟材和成熟材的比例約為 3:1，未成熟材佔林木較多的比例，此因林木在幼齡期快速生長，而至成熟期生長趨緩，而出現此種比例。又因為柳杉密度的變化是在心材部較高，所以其未成熟材的強度上和成熟材的差異變小。

#### (2) 栽植密度與早晚材管胞長變化之關係

從表 33 看出不論在各區，晚材管胞長均有大於早材管胞長的趨勢，再經由設變異數不相等的 t 檢定得知，在 95% 信心水準之下早晚材管胞長具有顯著性差異，並且由早晚材的平均 CV 值得知早材的變異係數大於晚材的變異係數，也就是說晚材具有較長的管胞，且每一個年輪內的變異較小，早材則反之。此現象是因為春季適於生長，形成層的活力強，始原細胞兩次平 分裂（Periclinal division）之間隔時間短，當新生之母細胞未完全伸長時，又開始進行第二次分裂，故此所分裂之早材管胞短；而生長季節末期，氣溫低、雨量少、形成層活動力弱，所產生的母細胞有充分時間伸長，故晚材之管胞較長。

表 33 早晚材管胞長 t 檢定表

Table 33 The tracheid length of earlywood and latewood analyzed by Tukey test

栽植 密度 (株/ha)	早材之平 均管胞長 (mm)	晚材平均 管胞長 (mm)	總平均 (mm)	t 值	早材平均 CV 值	晚材平均 CV 值
Type A1	2.472	2.775	2.623 <sup>a</sup>	2.733	14.287	11.841
Type A2 2200	2.463	2.738	2.600 <sup>a</sup>	2.211	13.622	10.89
Type A3	2.475	2.796	2.636 <sup>a</sup>	2.176	13.556	10.769
Type B1	2.525	2.804	2.653 <sup>a</sup>	2.685	13.047	10.147
Type B2 3000	2.595	2.851	2.723 <sup>a</sup>	2.624	13.083	10.848
Type B3	2.568	2.814	2.691 <sup>a</sup>	2.049	12.947	10.333

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

就早材而言，早材之平均管胞長(表 33): Type B2 > Type B3 > Type B1 > Type A3 > Type A1 > Type A2；就晚材而言，晚材之平均管胞長：Type B2 > Type B3 > Type B1 > Type A3 > Type A1 > Type A2，所以早晚材管胞長各區比較的趨勢差不多，最大的為 Type B2 (2.595 mm) (2.851 mm)，最小的是 Type A2 (2.463 mm) (2.738 mm)。張義雄等人 (1997) 指出柳杉管胞長度：約介於 2~4 mm 之間，且隨著樹木的生長而增長成對數型的生長模式，此實驗結果和我們的實驗結果相應；另外，林世 (1989) 指出若以管胞長度觀點而言，則是 2 m × 2 m 的栽植密度可得到最大的柳杉管胞長度，而 2 m × 2 m 換算成栽植密度則是 2500 株/ha。

其中 Type B2、Type B1、Type B3 為相同的栽植密度 (3000 株/ha)，Type A3、Type A1、Type A2 為相同的栽植密度 (2200 株/ha)，可以看到 Type B2、Type B1、Type B3 的管胞長度大於栽植密度較為 散的 Type A3、Type A1、Type A2，但在經過 t 值檢定之後之後，不同的栽植密度並無顯著性差異，但仍然可以看到其趨勢；在較早期的研究認為，較大的栽植密度會得到較長的管胞，因為當生長速率加快時， 橫向分裂的頻率會升高，其使形成層始原細胞分裂成兩個相等或不等

長度的始原細胞，而這兩個新細胞會較始原細胞伸長 10%~15%，長度比原來長度長，故大栽植密度的林木管胞長較長。本試驗中栽植密度為 3000 株/ha 的管胞長皆大於栽植密度為 2200 株/ha 的管胞長，即與前面的論點 合。

早材的平均 CV 值：Type A1 > Type A2 > Type A3 > Type B2 > Type B1 > Type B3，晚材的平均 CV 值：Type A1 > Type A2 > Type B2 > Type A3 > Type B3 > Type B1，而且早材的平均 CV 值皆大於晚材平均 CV 值，以單一區來看早材管胞相較於晚材管胞是不均質的，以各區相較可以看出當早材的變異比較大時，晚材的變異也會比較大，而且管胞長比較短的本身的變異性也比較大，例如 Type A1、Type A2、Type A3 區本身的管胞比較短，而這三區的變異性也就比較大；因此可由上推論，栽植密度不僅會影響到管胞的長度也會影響到管胞的變異性。

表 34 在不同栽植密度下早晚材管胞相差值作 t 值檢定

Table 34 The difference of the tracheid length of earlywood and latewood analyzed by t test in various thinning treatments

栽植密度 (株/ha)	平均數 (mm)	變異數	觀察值個數	自由度	t 統計	臨界值
2200	0.30	$5 \times 10^{-4}$	3	4	2.38	2.78
3000	0.26	$3 \times 10^{-4}$	3			

在栽植密度為 3000 株/ha 時，早晚材管胞長相差 0.26 mm (表 34)，栽植密度為 2200 株/ha 時，早晚材管胞長相差 0.30 mm，經過變異數不相等的 t 值檢定，兩者並無顯著性差異，但仍可看出其趨勢，所以栽植密度較大時，早晚材管胞長的差異就會變小；除此之外，也可見到當栽植密度較大的試區，試區與試區之間的變異數也會比較小。陳宏和 順昭 (1992) 指出柳杉的細胞壁厚度隨著細胞直徑由髓心向樹皮方向會增大，其早材厚度為 2.274  $\mu\text{m}$ ，晚材為 3.992  $\mu\text{m}$ 。所以晚材的管胞厚度和長度都大於早材，也就說明了晚材的密度會大於早材的原因，而密度與強度之間有良好的線性關係存在，亦即密度越大者強度也會越好，所以晚材的強度應該會大於早材，故晚材率越高的木材強度也會越好。

### (3) 栽植密度、不同疏伐度與管胞長度之關係

表 35 各區 1991 年前管胞長 Tukey 分析

Table 35 The tracheid length before 1991 of the sample sites analyzed by Tukey test

樣區	樣本數	平均未成熟管胞長(mm)
Type A1	11	1.97 <sup>a</sup>
Type A2	13	1.70 <sup>a</sup>
Type A3	13	2.00 <sup>a</sup>
Type B1	12	2.12 <sup>a</sup>
Type B2	11	2.01 <sup>a</sup>
Type B3	12	2.13 <sup>a</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

要討論疏伐與栽植密度對於各區的影響之前，必須先確定各區的材料具有同質性，如果材料是異質性的在設計的時候就有不同的設計方法，因此針對六區的未成熟材部分作 95% 信心水準的 Tukey 分析，而分析的數據範圍是各區的未成熟管胞長，由表 35 得知全六區並無顯著性差異，所以我們設在進行處理之前，六區的材料是同質的。

雖然並沒有顯著的差異，但是可以看出各區之間的趨勢為，Type B3 (2.13mm) > Type B1 (2.12 mm) > Type B2 (2.01 mm) > Type A3 (2.00 mm) > Type A1 (1.97 mm) > Type A2 (1.70 mm)，如同之前所說過的，栽植密度越密管胞長度越長，而栽植密度沒有造成 Tukey 分析有所區分的原因，可能是因為初期林分尚未鬱閉所以差異並不顯著；也可以因此推估，六區的未成熟材強度應該沒有顯著性差異，因為此時各區環境相同，據 Wolcott *et al.* (1987) 指出，此時主要影響未成熟材的應是遺傳因子。

表 36 栽植密度 3000 株/ha 第一次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果

Table 36 The tracheid length after the first thinning analyzed by Tukey significantly different test at 3300 tress/ha site

栽植密度 3000 株/ha		1991 年疏伐強度
Type B1	2.89 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐
Type B2	2.93 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐
Type B3	3.06 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

表 37 栽植密度 2200 株/ha 第一次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果

Table 37 The tracheid length after the first thinning analyzed by Tukey significantly different test at 2200 tress/ha site

栽植密度 2200 株/ha		1991 年疏伐強度
Type A1	2.72 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐
Type A2	2.74 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐
Type A3	2.86 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

於 1991 年各區皆實施弱度疏伐，所討論的數據範圍是從 1991 年至 2000 年的管胞長度；結果由表 36 與表 37 得知，因實施同一強度疏伐所以經過 95% 信心水準的 Tukey 分析之後，同栽植密度下，各區的管胞長度並沒有顯著性差異，更證明在同栽植密度下，未成熟材管胞長本就沒有差異，而再經過一樣強度的疏伐，導致各區間也就無顯著性差異實屬合理，因此在經過 2001 年不同強度的疏伐之前，在各栽植密度範圍之內各區是具有同質性的；由表中得知趨勢和未成熟的管胞長度趨勢略有不同，在栽植密度為 3000 株/ha 的管胞長度變為 Type B3 (3.06 mm) > Type B2 (2.93 mm) > Type B1 (2.89 mm)，Type B2 和 Type B1

的平均值差為 0.04 mm，在栽植密度為 2200 株/ha 的管胞長度變為 Type A3(2.86 mm) > Type A2(2.74 mm) > Type A1(2.72 mm)，最大的平均值差為 0.14 mm。

表 38 兩栽植密度的第一次疏伐後管胞長作 t 值檢定

Table 38 The tracheid length after the first thinning of two kinds plantation sites analyzed by t test

栽植密度	平均數 (mm)	變異數	觀察值個數	自由度	t 統計	臨界值
2200 株/ha	2.77	0.03	30	47	-3.38	2.01
3000 株/ha	2.91	0.01	20			

表 38 是在不同栽植密度下，進行 1991 年至 2000 年的管胞長度，兩母體變異數不相等的 t 檢定，可以看到實際 t 為 3.38，臨界 t 為 2.01，實際 t 大於臨界，所以兩栽植密度有顯著性差異，換說，栽植密度為 3000 株/ha 的管胞長度會顯著大於栽植密度為 2200 株/ha 的管胞長度，一般而言管胞長度越大通常機械性質越好，所以栽植密度大林木之木材的機械性質越佳，除此之外 Alexander *et al.* (1994) 曾對德達松 (*Pinus taeda*) 栽植密度及疏伐對木材品等及強度之影響進行研究，顯示栽植密度較大者可產生較高品等之木材，因此推測本試驗栽植密度 3000 株/ha 的木材品等應會大於栽植密度為 2200 株/ha 的木材，另根據 光平 (2003) 指出，栽植密度大的木材，其木材超音波速、動彈性模數 (Edu)、橫向振動動彈性模數 (Edt)、抗彎強度 (MOR) 與比強度皆會有顯著較佳的情形，所以栽植密度大林木之木材力學強度性質也較好。

表 39 栽植密度 3000 株/ha 第二次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果

Table 39 The tracheid length after the second thinning analyzed by Tukey significantly different test at 3300 tress/ha site

栽植密度 3000 株/ha		2001 年疏伐強度
Type B1	2.92 mm <sup>a</sup>	中度疏伐
Type B2	3.11 mm <sup>b</sup>	弱度疏伐
Type B3	3.44 mm <sup>c</sup>	未處理

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b 和 c 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

表 40 栽植密度 2200 株/ha 第二次疏伐後的管胞長度之 Tukey 分析結果

Table 40 The tracheid length after the second thinning analyzed by Tukey significantly different test at 2200 tress/ha site

栽植密度 2200 株/ha		2001 年疏伐強度
Type A1	2.33 mm <sup>a</sup>	重度疏伐
Type A2	2.62 mm <sup>a</sup>	中度疏伐
Type A3	2.84 mm <sup>a</sup>	弱度疏伐

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

最後要討論的是第二次疏伐，也就是 2001 年實施的不同強度的疏伐，由表 39 可以看到經過 Tukey 分析之後三區有顯著性差異，疏伐強度越大則管胞長（2001 年至 2004 年）越短，呈現未處理區（3.44 mm）>弱度疏伐區（3.11 mm）>中度疏伐區（2.92 mm）的趨勢；而由表 40 中得知，經過 Tukey 分析之後不同的疏伐強度對於管胞長度並無顯著性差異，但還是有弱度疏伐區（2.84 mm）>中度疏伐區（2.62 mm）>重度疏伐區（2.33 mm）的趨勢，所以疏伐度越大的，就會造成林木較大的衝擊，也就是管胞長越短，而相較於 Chiu *et al.* (2005) 結果為疏伐對於管胞長的影響，在 Tukey 多變域分析中並不顯著，但是仍有未處理

區 > 中度疏伐區 > 重度疏伐區的趨勢，和本試驗栽植密度為 2200 株/ha 的結果相同，不僅如此，在 Chiu *et al.* (2005) 的試驗材料中提到，未處理區、中度疏伐區、重度疏伐區的留存樹幹橫斷面積分別為 44 m<sup>2</sup>/ha、33 m<sup>2</sup>/ha、28 m<sup>2</sup>/ha，若將本試驗栽植密度，換算成留存樹幹橫斷面積時，未處理區、弱度疏伐區、中度疏伐區、重度疏伐區的栽植密度分別為 38.3 m<sup>2</sup>/ha、31.7 m<sup>2</sup>/ha、31.9 m<sup>2</sup>/ha、25.5 m<sup>2</sup>/ha，而兩者間皆有疏伐度越大則管胞長越小的趨勢。

造成表 38 與表 39 有如此的差異，是因為兩者的栽植密度不同，當栽植密度較密的時候，疏伐使得生長空間突然大進而對於管胞長度的影響也就較大，反之，當栽植密度較寬的時候，疏伐對於生長空間的大並沒有很顯著的變化，所以管胞長度也就無顯著性差異。

表 39 和表 40 中，最大的平均值差為 0.52 mm 與 0.51 mm，遠大於之前第一次疏伐的平均值差，所以當疏伐度加大的時候，差異也會加大。

另外也可藉由管胞長度預測強度趨勢，一般而言當管胞長度越短，強度越小，因為疏伐將空間疏開之後，林木會加速橫向的生長，年輪寬也隨之變大，因此預期弱度疏伐的強度會大於中度疏伐，而對強度疏伐所帶來的衝擊更為巨大，未處理區的部分則因為栽植密度較大，完全沒有經過疏伐，所以不該只考量管胞長度，也須要先考慮是否為被壓木的可能性。

### 3. 固碳量與製材率

#### (1) 立木材積與固碳量

表 41 表示對高岳試驗地各林分每公頃之立木材積大小依序為：Type B2 > Type B1 > Type A1 > Type B3 > Type A3 > Type A2，平均每公頃立木材積為 354.4 m<sup>3</sup>，而此林分為 36 年生柳杉林，因此可換算為平均每年每公頃柳杉樹幹材積固碳量約 2.45 公噸，可換算成二氧化碳的吸存，平均每年每公頃約為 8.98 ton，由表 42 顯示出棲蘭山試驗地每公頃的材積數，大小依序為疏伐帶寬度 12 m 的樣區 > 疏伐帶寬度 8 m 的樣區 > 疏伐帶寬度 6 m 的樣區 > 疏伐帶寬度 10 m 的樣區 > 未處理區，此林分為 38 年生的林分，換算為平均每年每公頃的樹幹材積固碳量

約 2.38 公噸，而二氧化碳的吸存，平均每年每公頃約為 8.58 公噸，而對高岳營林區和棲蘭山的柳杉，兩者的每年每公頃的固碳量差不多，而對高岳營林區的柳杉每年每公頃多約 0.07 公噸，再換算成二氧化碳的吸存則多了約 0.4 公噸。

表 41 對高岳試驗地各樣區立木材積與固碳量

Table 41 Standing volume and carbon storage of every sample sites

樣區	疏伐度	栽植密度 (株/ha)	每公頃立木材積 (m <sup>3</sup> )	每公頃樹幹固碳量(ton)	平均每年每公頃樹幹固碳量 (ton)	平均每年每公頃樹幹吸存CO <sub>2</sub> 量(ton)
Type A1	重度	2200	381.5	95.4	2.6	9.5
Type A2	中度	2200	230.0	57.5	1.6	5.9
Type A3	弱度	2200	312.8	78.2	2.2	8.1
Type B1	中度	3000	431.4	107.9	2.9	10.6
Type B2	弱度	3000	455.0	113.8	3.2	11.7
Type B3	—	3000	315.5	78.9	2.2	8.1
平均			354.4	88.6	2.45	8.98

表 42 棲蘭山試驗地各樣區材積與固碳量

Table 42 The sample sites' wood volumes and fixed carbon contents in Cilan area

樣區	每公頃材積數 (m <sup>3</sup> )	平均每株材積數 (m <sup>3</sup> )	平均每年每公頃樹幹材積固碳量(ton)	平均每年每公頃樹幹材積吸存 CO <sub>2</sub> 量(ton)
疏伐帶寬度 6 m	395.2	0.593	2.6	9.4
疏伐帶寬度 8 m	410.4	0.607	2.7	9.7
疏伐帶寬度 10 m	319.2	0.563	2.1	7.6
疏伐帶寬度 12 m	416.3	0.618	2.7	9.7
未處理區	273.6	0.436	1.8	6.5
平均	362.9	0.563	2.38	8.58

由上述可知，一般同樹種之木材蓄積量越大則能固定的二氧化碳越多，所以森林對二氧化碳吸存與固定有相當的貢獻，主要是林木本身的生理特性進行光合作用吸收二氧化碳，所儲存的二氧化碳轉化成有機物質儲存於植物體內，同時林裕仁等人（2002）指出一般的材積轉變碳素是以 50% 為轉換基準，但經過其研究指出柳杉的轉換值為 49.03%。此外，Moffat（1997）指出本大學學者全球性的研究顯示，全球森林的固碳量以仍年輕而正成長的溫帶林而言，每年可固定約 7 公噸的碳，依據聯合國農組織統計，2000 年全世界森林面積為 386900 萬公頃（FAO, 2001），換算每年每公頃的林分固碳量約 0.2 公噸，本試驗所得結果若以日本人工林之換算係數  $\alpha$  為 1.7 加以計算，則每年每公頃的林分固碳量約 6.3 公噸。幸榮等人（2005）研究於新竹林區管理處竹東事業區觀音地區柳杉人工林內進行林木生物量調查及碳貯存量估算指出，以 BEF 值所計算之平均每公頃生物量及碳貯存量分別為 282.9 Mg 及 141.5 Mg。

林俊成等人（1999）以生物量法估算林齡為 7~81 年生之柳杉人工林之碳及 CO<sub>2</sub> 儲存效果，結果顯示柳杉人工林儲存碳量為 161.24 Mg/ha，換算儲存 CO<sub>2</sub> 量為 591.21 Mg/ha。李國輝等人（2000）估算林齡為 13~23 年生之臺灣杉人工林 CO<sub>2</sub> 吸存量為 281.6 Mg/ha，且由於造林地之林木尚未達成熟之狀態，仍持續生長中，故若能提高林地生產力，將可提高碳的吸存；初步的估算結果，目前不同造林地每公頃碳總吸存量在 32.58~133.05 之間，平均每公頃為 76.8 公噸。林裕仁等人（2002）以生物量與材積關係式推估臺灣森林區域林木碳儲存量，結果顯示臺灣地區林木平均碳儲存含量約為 71.68 Mg/ha。

林國銓、何淑玲（2005）指出，在各生育地森林類型碳累積量之推估（Mg/ha）中，於溪頭、南投生育地 20~40 年生柳杉林地上部之碳累積量介於 83.9~165.0 Mg/ha。Maclaren（1996）分析西蘭人工林地碳的吸存量，當輪伐期為 20~50 年時，平均每公頃碳的吸存量約在 72~187 Mg 之間。

## （2）柳杉材製材耗電量與製材率

各樣區砍伐 3 棵樣木，並於現場依每 2.5 m 進行原木段的製材後送至工廠，

以便進一步製成製材品，各樣區之原木製材時之耗電量、原木材積、製材品總材積及整體製材率，由表 43 所示。

表 43 各樣區原木材積製材時耗電量、製材品材積與製材率

Table 43 Energy consumption of sawn-lumber, volume of lumber and sawn-lumber yield for each sample sites

樣區	原木製材時 耗電量 (KWh)	原木材積 (m <sup>3</sup> )	製材品總材積 (m <sup>3</sup> )	整體製材率 (%)
Type A1	3.0	1.451	0.550	37.92
Type A2	2.6	1.439	0.536	37.27
Type A3	3.0	1.394	0.558	40.04
Type B1	2.8	1.444	0.542	37.54
Type B2	2.7	1.304	0.556	42.64
Type B3	1.8	0.71	0.274	38.55

本試驗由原木製作成鼓型材，在製作成 2''×4'' 框組壁工法製材品 (38×89 mm 斷面)

各林分木材之整體製材率大小依序為：Type B2 > Type A3 > Type B3 > Type A1 > Type B1 > Type A2，整體平均製材率為 39%。王松永等人 (2005) 指出柳杉疏伐木製材成 D-log 之製材率為 24.6%，但如製作成木製校式井字型土工法之原木材料之製材率為 25.33%。評 (2001) 指出製材廠所生產臺灣杉製品之製材率為 39.26%，杉木製品之製材率為 34.91%。在製材廠的利用率 35%~39% 均較低，主要由於製造此批 2''×4'' 框組壁工法製材的原料為 20 多年生的中小徑木，在除樹皮及未達規材之後，利用率通常不高。而本試驗亦是製作成 2''×4'' 框組壁工法製材品，其製材率為 39%，尚屬合理。

本試驗各林分樣區的原木材積大小依序為：重度疏伐 (Type A1) > 中度疏伐 (Type A2, Type B1) > 弱度疏伐 (Type B2, Type A3) > 未處理區 (Type B3)。

其中樣區 Type B3 的原木材積特別小，只有 0.71 m<sup>3</sup>，其原木製材時所耗之

電量也較其他區為小，只有 1.8 度。而整個由鼓型材製成 2”×4”的總耗電量為 15.9 度，整體製材之總材積為 3.02 m<sup>3</sup>。

製材時耗電量：Type A3=Type A1 > Type B1 > Type B2 > Type A2 > Type B3。

製材品總材積：Type A3 > Type B2 > Type A1 > Type B1 > Type A2 > Type B3。

依製材後的總材積為 3.02 m<sup>3</sup>，其能固定之碳重為 466.7 kg，整體之總消耗電量而換算成釋出之碳素量為 8.73 kg，淨固碳重為 457.77 kg，由此可知，平均每 1 m<sup>3</sup> 材積可固定 151.58 kg 之碳。王松永等人 (2005) 指出，若以密度 0.35 g/cm<sup>3</sup> 之柳杉材為例，會貯藏 175 kg/m<sup>3</sup> 碳素。因此木材以固體型態利用，實際就是將碳素固定下來，使碳素不會立即迴歸大氣中，因此木材的利用即可當作碳的儲藏庫，而被砍伐地又可再造林，進行吸存二氧化碳，此舉對溫室氣體減量有正面的效益。又原木製材加工時因耗電所釋出的碳素低，所以使用木質材料可說對環境的負 甚低。

蔡俊 (2001) 調查臺灣地區製材工廠之能源消耗，並計算其 CO<sub>2</sub> 排放量與碳素貯存量，得知製材工廠生產單位產品之能源消耗為 55.15 kw-h/m<sup>3</sup>。依台電基準換算而得結果，製材工廠生產單位產品之 CO<sub>2</sub> 排放量約為 31.45 kg/m<sup>3</sup>，而會貯存碳素量則約為 255.22 kg/m<sup>3</sup>。此與本試驗製材中所排放之 CO<sub>2</sub> 為 32.72 kg 相當接近。

臺灣杉、杉木的 2”×4”製材程序為大 (具有送材 的帶鋸機)、帶鋸 (不具送材 )，從圖 37 可以看出此批製材的耗電比例，以大 機 54.53% 較高，而小 帶鋸 45.47% 較低，大 耗電 32.5 度，換算釋出 4.87 kg 的碳素量；小 耗電 27.1 度，換算釋出 4.06 kg 的碳素量，主要因為大 的主 達及送材 使用大 力的 達，而且當調整製材材面時， 達仍然繼續運作，使得製材時的能源消耗均集中於此製程，另外帶鋸的使用時間較短，而且 達 力數均低於大 ，所以節省能源的方法，就是大 機器由經驗佳的操作員來操作， 具每半天研 一次，這樣才能有效增加能源的使用效率。本次試驗所製出之 2”×4” Type A1 有 52 根，Type A2 有 51 根，Type A3 有 51 根，Type B1 有 50 根，Type B2 有 52 根，Type B3 有 23 根，總共 279 根，壁板共 138 片。

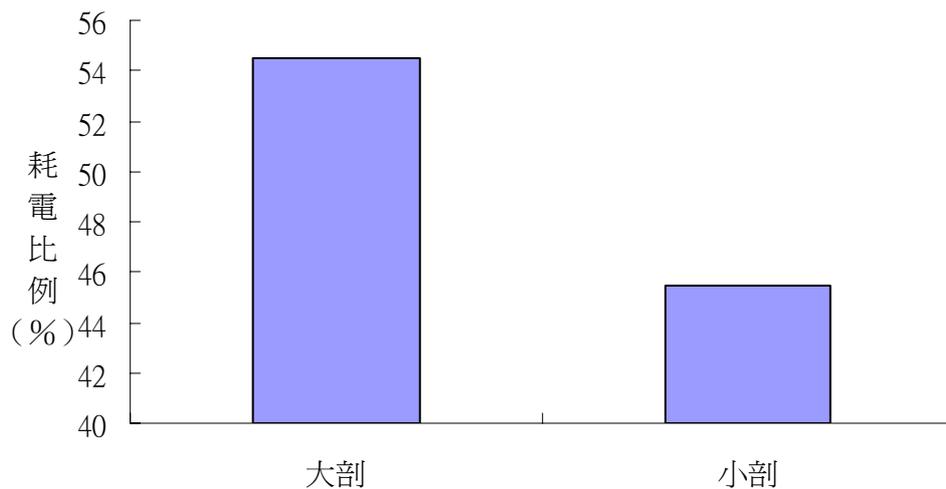


圖 37 製材之耗電比例

Fig. 37 The rate of consumptive electricity of sawn lumber

當就原木末徑與製材率之關係進行探討時，由圖 38 可看出，製材率會隨原木末徑增加而呈直線狀的增大，可以次述直線迴歸式表示，即：製材率 =  $1.1956 \times$  末徑 + 10.838， $R^2 = 0.246$ ，整體而言，可看出隨著原木末徑越大，製材率也有增大之趨勢，兩者之間呈現顯著之線性正相關。當在製材設計的時候，因為原木有首徑與末徑，一般而言首徑會大於末徑，若在製材設計時以首徑為基準，製材時會因為末徑尺寸不足而失，故本試驗以末徑作為製材的設計基準。林振榮（1991）指出，杉木與柳杉的材積，與價值利用率均以原木長度較短者而直徑較大者會較高，而原木的品等較佳時，其壁板材積與價值利用率也會比較高。此結果與本試驗相符，也就是當徑級越大時，製材率會越高，也有更多設計選擇。而製材率越高表示能製成材也越多，製材品的增加也意謂著碳素儲存於木材內，形成所謂的碳素行。



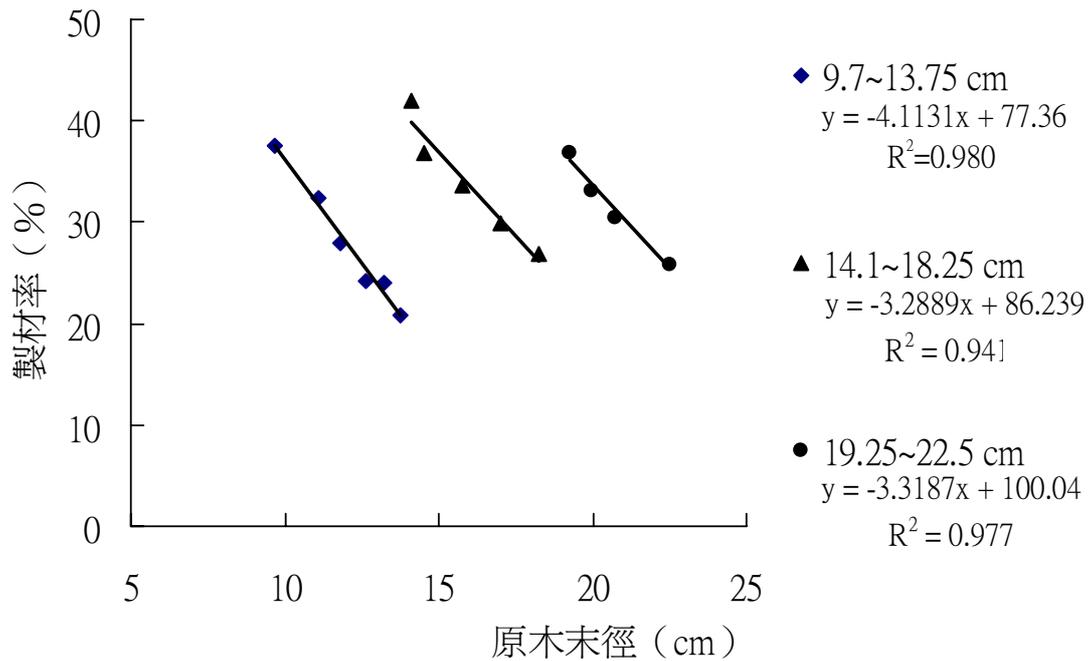


圖 39 特定原木末徑下與製材率之關係

Fig. 39 Relation of certain end diameter of log and sawn-lumber yield

#### 4. 立木到製材品各階段之超音波波速檢測

##### (1) 立木與原木超音波

表 44 立木縱向超音波速與原木縱向超音波速之 t 檢定

Table 44 The longitudinal ultrasonic wave velocity of standing woods and logs analyzed by t test

樣 木	平均數(m/s)	標準差	樣本數	自由度	t 統計	P(T<=t) 單	臨界值： 單
立木超音波速(m/s)	2511.6	392.33	159	87	0.5594	0.289	1.663
原木超音波速(m/s)	2460.1	523.77	70				

本試驗共伐採 18 棵樣木，每區 3 棵，每棵原木除第一段外，其餘每段原木 (2.3 m) 均進行造材，隨後進行縱向超音波試驗，測量邊材、邊心材交界、心

材與髓心之超音波速，並由每一段超音波速進行樹高方向及髓心到樹皮的直徑方向變異性分析。

首先比較立木與伐採原木第一段之縱向超音波速，瞭解伐採後木材超音波速之變化。如表 44 所示，立木所測得縱向超音波速為 2511.6 m/s，伐採後原木所測得的縱向超音波速為 2460.1 m/s，兩者間經 t 檢定後顯示無顯著性差異，顯示在立木狀態以非破壞性檢測方法即可評估原木之材質。Sasaki *et al.* (1997) 曾探討木材受纖維方向抗壓應力，平行超音波縱波傳遞時之應力，其利用 0.5 MHz，直徑 1 英吋的壓電型的超音波。結果顯示，隨著抗壓應力的增大，超音波速亦增大，而到比例限度附近時為最大，之後會隨著應力的增壓，超音波速以線性方式逐漸下降。樹木伐採前後主要的差異在於，伐採前在立木上方會有樹冠或大量的枝條及本身材積所產生的生長應力和自重，伐採後上方的壓力解除，細胞可以回到正常的狀態，而使超音波傳遞路徑略微加長，導致伐採後原木的縱向超音波速下降。本試驗所得結果符合前人之研究。

其次針對各原木段在樹高方向縱向超音波速之分析顯示，由基部向上達頂部的超音波速變化，大致可歸類成四種型態。第一種型態為 W 型 (圖 40)，此型態基部的超音波速由高到低，而後升高再降低後再升高，而形成類似 W 的型態，Type B2 和 Type A3 各有兩棵樣木呈現此種型態；第二種型態為 N 字型 (圖 41)，此型態由基部開始向上升高而後降低，最後又再度升高，此種型態是本試驗樣區的樣木中出現最頻率的型態；第三種型態為拱形 (圖 42)，此型態先升後降，Type A1 樣木有一棵、Type B3 樣木有兩棵出現此種型態；第四種型態為下降階梯型態 (圖 43)，此型態由基部開始下降，而後停止下降或上升一點再下降到低點，而後維持在此低點附近，Type A2 有兩棵樣木出現此種型態。

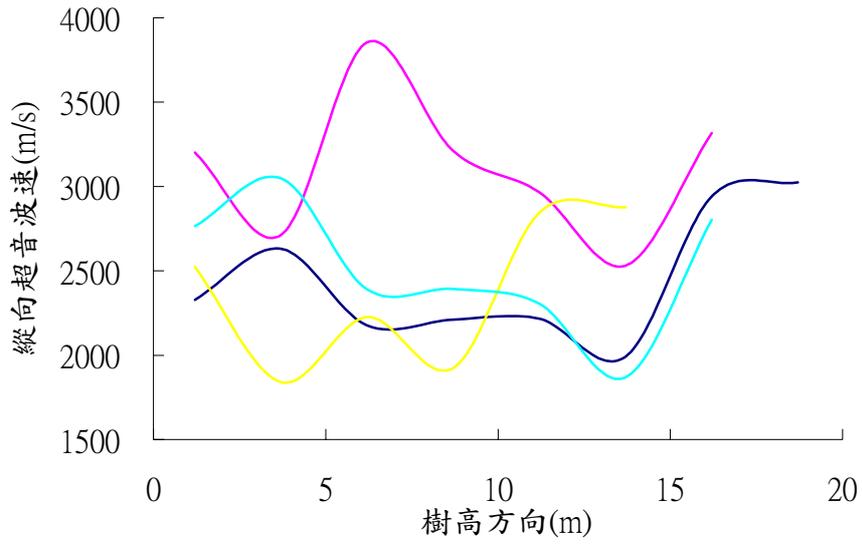


圖40 在樹高方向之縱向超音波速呈W型態

Fig. 40 Type W of ultrasonic wave values in longitudinal direction

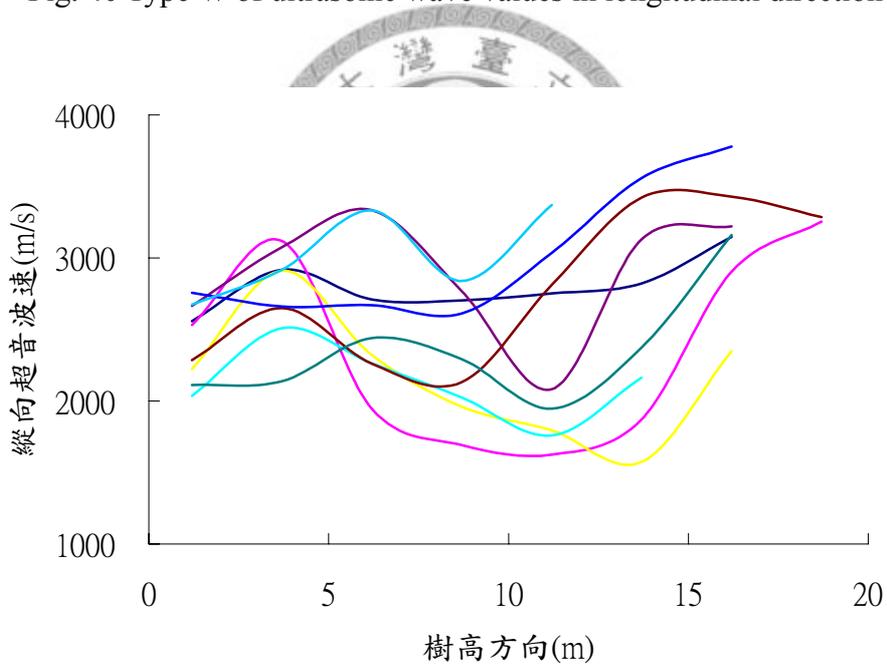


圖41 在樹高方向之縱向超音波速呈N型態

Fig. 41 Type N of ultrasonic wave values in longitudinal direction

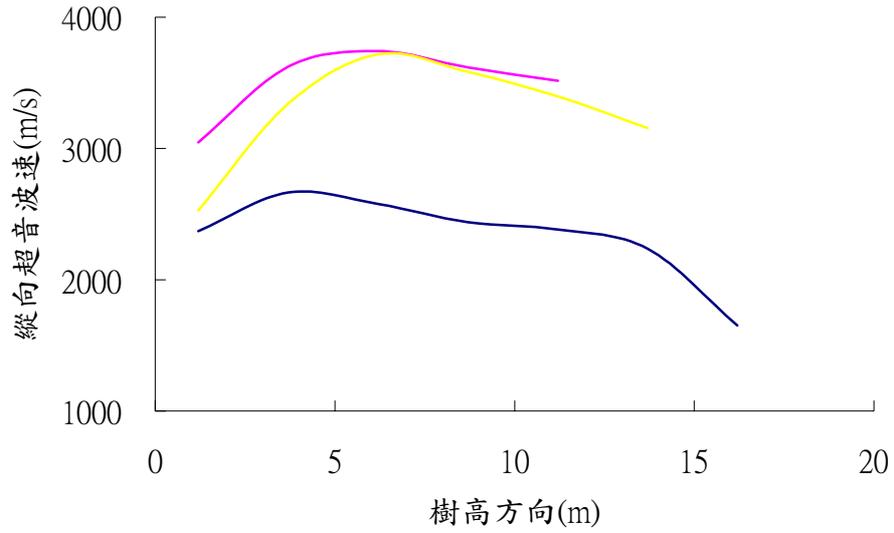


圖42 在樹高方向之縱向超音波速呈拱形型態

Fig. 42 Type arch of ultrasonic wave values in longitudinal direction

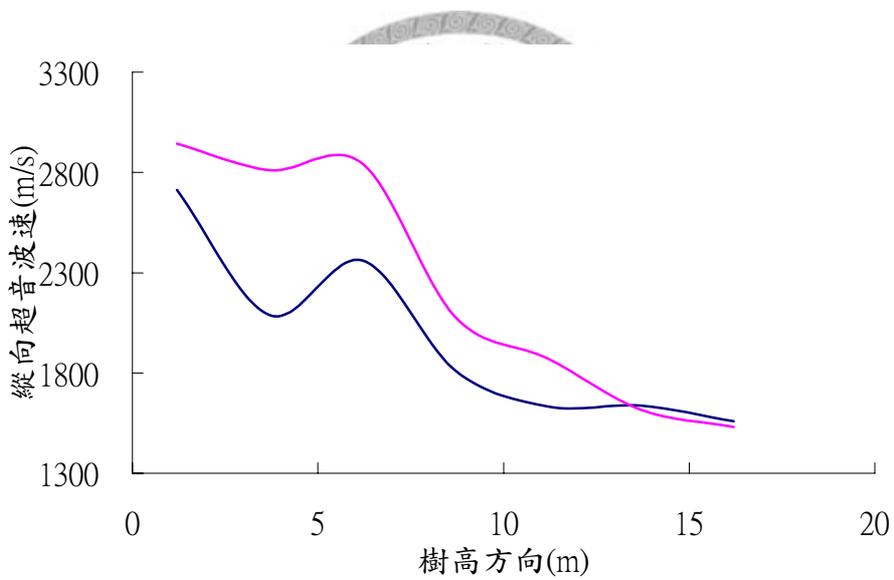


圖43 在樹高方向之縱向超音波速呈下降階梯型態

Fig. 43 Type downward stair of ultrasonic wave values in longitudinal direction

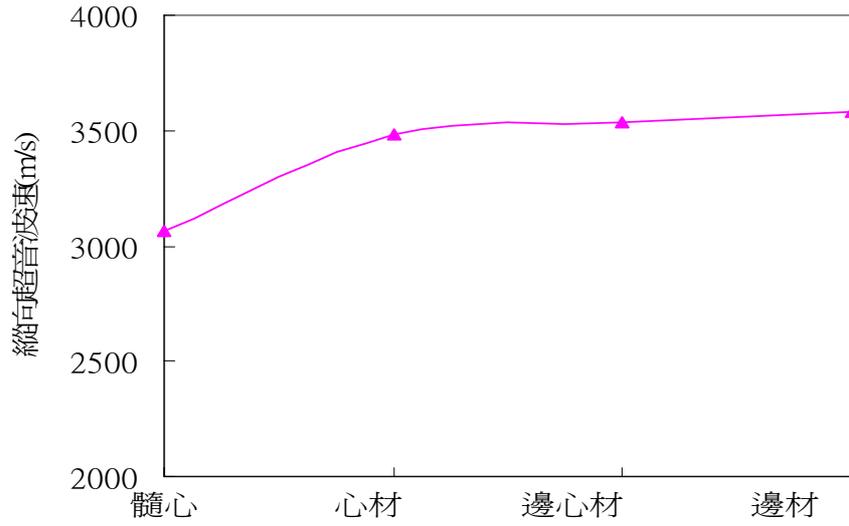


圖44 在直徑方向之縱向超音波速呈飽和曲線型態

Fig. 44 Type saturated curve of ultrasonic wave values in longitudinal direction

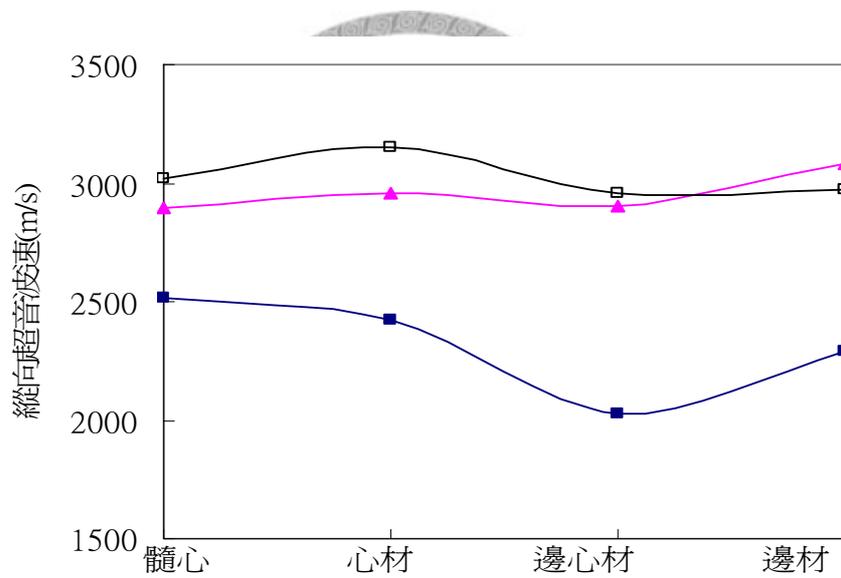


圖45 在直徑方向之縱向超音波速呈S型態

Fig. 45 Type S of ultrasonic wave values in radial direction

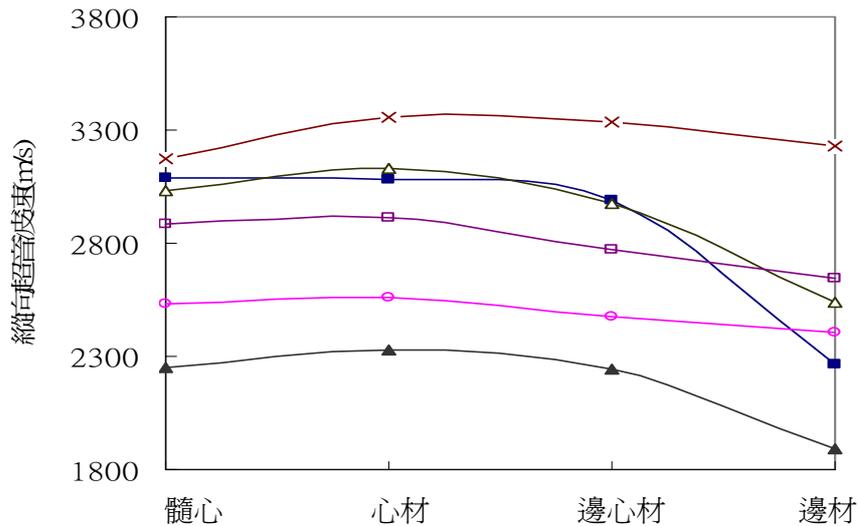


圖46 在直徑方向之縱向超音波速呈下降型態

Fig. 46 Type downward of ultrasonic wave values in radial direction

而髓心到樹皮的直徑方向縱向超音波速變化型態分析而言，主要為下降型態，此型態由髓心向樹皮方向開始向上升高而後降低或由髓心向樹皮遞減，此種型態為本試驗樣區的樣木中出現最頻的型態，如圖 46 僅選擇各樣區一棵樣木為代表；其他較特殊之型態，如圖 44，Type B3 樣木呈飽和曲線型態，此型態由髓心開始增加，之後增加幅度慢慢減少；另一型態為圖 45，Type B1、Type B3 之樣木為 S 型，此型態由髓心向樹皮方向先升後降再上升。除了圖 44 與圖 45 之樣木外，其餘各樣木由髓心到樹皮的直徑方向縱向超音波速變化型態均屬於下降型態之樣木。

## (2) 立木、原木、鼓型材與 2''\*4'' 製材品之超音波波速比較

將所砍伐樣木，由立木狀況到製材品的情形，進行瞭解（表 45），立木所量測的超音波波速為 2512 m/s，原木段則是到製材場後兩個月所量測的超音波波速，其波速為 2933 m/s，而製材時，先將原木製成鼓型材，而後 接著製成所需的製材品（2''\*4'' 製材），鼓型材的超音波波速為 3921 m/s，最終的製材品的超音波波速為 3809 m/s，原木的超音波波速比立木的大，此係因木材內的含水率下降所致，木材水分越少則音波傳遞時間就會越快，此與莊世滋（1988）的結果相符

合，其中立木與原木、鼓型材和 2''\*4''製材有顯著的差異，原木與鼓型材和 2''\*4''製材的超音波波速有顯著的差異，鼓型材和 2''\*4''製材間沒有顯著差異。

表 45 立木到製材品之縱向超音波波速

Table 45 The longitudinal ultrasonic velocity of standing woods to products

	超音波波速 (m/s)
立木	2512 <sup>a</sup>
原木	2933 <sup>b</sup>
鼓型材	3921 <sup>c</sup>
2''*4''製材	3809 <sup>c</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b 和 c 來顯示 (P ≤ 0.05)

表 46 立木、原木、鼓型材和製材品間之相關式表

Table 46 The relations between standing woods and products

相關式			
立木	原木	$y = 0.9249x + 606.05$	$R^2 = 0.43^*$
立木	鼓型材	$y = 0.7839x + 1948.1$	$R^2 = 0.30^*$
立木	2''*4''製材	$y = 0.6738x + 2113.6$	$R^2 = 0.44^*$
原木	鼓型材	$y = 0.5343x + 2353.3$	$R^2 = 0.28^*$
原木	2''*4''製材	$y = 0.421x + 2574.1$	$R^2 = 0.34^*$

如表 46 所示，立木與原木間的超音波波速有正的直線相關，其決定係數為 0.43，立木與鼓型材間的超音波波速也是正的直線相關，其決定係數為 0.30，立木與 2''\*4''製材間的超音波波速也是正的直線相關，其決定係數為 0.44，故立木和原木、鼓型材與 2''\*4''製材均正直線相關，所以由立木狀況下所量測的超音波波速，是可以推估到製材品的超音波波速，因此立木狀態下的所量測到的超音波波速是有其代表性的，而原木與鼓型材間也是正的直線相關，其決定係數為

0.28，原木與 2”\*4”製材間也是正的直線相關，其決定係數為 0.34，原木的量測超音波，到製材品間有相關性的存在，因此在原木的狀況下所進行的超音波試驗，是可以推算到製材品的超音波波速，本試驗的結果，顯示出超音波的試驗是有一性的，因此立木量測到超音波波速是可以與最終製材品產生相關的狀態。

## 5. 製材分等非破壞與破壞強度

### (1) CNS14631 分等標準

表 47 目視分等 CNS 14631 分等標準之乙種框組材實大樑之抗彎性質 Tukey 分析結果

Table 47 Analysis of Tukey significantly different test of bending properties for the four different lumber grades (CNS 14631)

目視分等	結構材	標準材	普通材	等外材
支數(支)	8	20	64	95
密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.499 <sup>a</sup>	0.479 <sup>a</sup>	0.495 <sup>a</sup>	0.480 <sup>a</sup>
應力波波速(m/s)	4377.8 <sup>a</sup>	4364.1 <sup>a</sup>	4178.3 <sup>a</sup>	4172.8 <sup>a</sup>
應力波動彈性模數(kgf/cm <sup>2</sup> )	98460 <sup>a</sup>	94820	89050	86320 <sup>a</sup>
超音波速(m/s)	4661.1 <sup>ab</sup>	4864.0 <sup>b</sup>	45004.3 <sup>a</sup>	4535.2 <sup>a</sup>
超音波動彈性模數(kgf/cm <sup>2</sup> )	111620 <sup>a</sup>	117190	104250	101300 <sup>a</sup>
MOR(kgf/cm <sup>2</sup> )	569.2 <sup>a</sup>	542.4 <sup>a</sup>	542.7 <sup>a</sup>	459.4 <sup>a</sup>
MOE(kgf/cm <sup>2</sup> )	100270	86220 <sup>a</sup>	89530 <sup>a</sup>	84610

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 (P ≤ 0.05)

a、b 表示每列相互間之顯著差異性

實大樑依據 CNS14631 標準之乙種框組材進行分等，其結果如表 47 所示，在密度有：結構材 > 普通材 > 等外材 > 標準材趨勢，但四者無顯著性差異。而應力波速和應力波動彈性模數之趨勢為結構材 > 標準材 > 普通材 > 等外材，同時四者間亦無顯著性差異。超音波速的變化則為標準材 > 結構材 > 等外材 > 普通材，而結構材與標準材間無顯著性差異，不過標準材與普通材和等外材有顯著性差異，而 MOR 與 MOE 上顯示出，結構材 > 普通材 > 標準材 > 等外材，但四者間無顯著性差異。而王仁與陳柏（1990）指出杉木經過目視分等後沒有顯著性的關係，並指出目視分等雖然可以略減低在等級內的變異，然而人為主觀判斷及材料強度與木材缺點間的關係未被正確的定量化所造成。Wang and Lin（1996）指出其強度值與分等間沒有顯著的關係存在，可能是因為節的評估指標與 DMOE、MOR 與 MOE 間沒有相關，可是被當做機械性質的指標使用，並當做目視分等標準之一，並未能完全反應出材質的強度特性，或者可能受未成熟材有較大變異的影響。

## (2) CNS444 分等標準

實大樑依據 CNS444 標準之造林木材進行分等，其結果如表 48 所示，在密度有：二等材 > 三等材 > 一等材，但四者無顯著性差異。應力波速、應力波動彈性模數、超音波速、超音波動彈性模數、MOR 與 MOE 的變化趨勢都一樣，皆為一等材 > 二等材 > 三等材，其中應力波速、應力波動彈性模數、超音波速在不同等級間的差異為一等材與二等材無顯著性差異，而一等材和三等材有顯著性差異存在。而不同等級間的 MOR，其差異為一等材和二等材間無顯著性差異，三等材對其他兩者有顯著的差異存在。而不同等級的超音波動彈性模數與 MOE 間沒有差異存在。林淑華（1994）指出柳杉在 MOE 與 MOR 方面，以特等材最大，其次為一等材、二等材，最差為三等材，此與本試驗相呼應。利用 CNS444 進行造林木材分等，可發現其目視所區分的等級與非破壞和破壞強度等級一致，再相對於 CNS14631，CNS14631 的分等與破壞強度就不太一致。因此於本試驗區的柳杉而言，利用 CNS444 之造林木材分等較能反應出目視分級與機械強度間

的等級變化。

表 48 目視分等 CNS 444 分等標準造林木之實大樑之抗彎性質 Tukey 分析結果

Table 48 Analysis of Tukey significantly different tests of bending properties for the four different lumber grades (CNS 444)

目視分等	一等材料	二等材料	三等材料
支數(支)	62	27	79
密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.484 <sup>a</sup>	0.500 <sup>a</sup>	0.483 <sup>a</sup>
應力波波速(m/s)	4358.0 <sup>a</sup>	4213.6 <sup>ab</sup>	4081.4 <sup>b</sup>
應力波動彈性模數(kgf/cm <sup>2</sup> )	94582 <sup>a</sup>	91487 <sup>ab</sup>	83441 <sup>b</sup>
超音波速(m/s)	4686 <sup>a</sup>	4609 <sup>ab</sup>	4447 <sup>b</sup>
超音波動彈性模數(kgf/cm <sup>2</sup> )	109570 <sup>a</sup>	109160 <sup>a</sup>	98650 <sup>a</sup>
MOR(kgf/cm <sup>2</sup> )	565.2 <sup>a</sup>	521.8 <sup>a</sup>	444.1 <sup>b</sup>
MOE(kgf/cm <sup>2</sup> )	91470 <sup>a</sup>	89390 <sup>a</sup>	83550 <sup>a</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a 和 b 來顯示 (P ≤ 0.05)

a、b 表示每列相互間之顯著差異性

### (3) 超音波，機械分等

利用超音波的非破壞性，以此對實大樑進行超音波機械分等，本試驗先算出整體超音波的平均波速，除此為基準外，向上和向下各加上一個標準差，產生四個等級，分別為 A 等、B 等、C 等和 X 等，其中 A 等最好，其次為 B 等與 C 等，X 等最差，如表 49 顯示，在密度有 B 等 > A 等 > C 等 > X 等，而 X 等對其他三者有顯著的差異存在，而應力波、應力波動彈性模數、超音波動彈性模數、MOR 以及 MOE 等趨勢均有 A 等 > B 等 > C 等 > X 等的順序，而應力波和應力波動彈性模數的不同等級的差異，則是四個等級間皆有差異的存在，不同等級的 MOR

間，A 等對 C 等與 X 等有顯著性差異存在，B 等對 X 等有差異，不同等級的 MOE 間，A 等對 C 等與 X 等有差異的存在，B 等對 X 等有差異，C 等也對 X 等有差異。由上可知超音波機械分等和破壞強度一致，而且對照目視分等 (CNS444)，在 MOR 和 MOE 的等級間的差距，機械分等比目視分等的級距更為明顯，而且機械分等可以使數據量化，相對於目視分等上來的科學，不過目視分等有較為方便和簡單的優點，因此機械分等的準確性由本試驗中可以得到驗證。

表 49 目視分等，超音波分等標準實大樑之抗彎性質 Tukey 分析結果

Table 49 Analysis of Tukey significantly different test of bending properties for the four different lumber grades (ultrasonic wave velocity)

超音波分等	A 等材	B 等材	C 等材	等外材
支數(支)	29	62	56	27
密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.496 <sup>b</sup>	0.500 <sup>b</sup>	0.482 <sup>b</sup>	0.453 <sup>a</sup>
應力波波速(m/s)	4718.1 <sup>d</sup>	4347.6 <sup>c</sup>	4040.1 <sup>b</sup>	3672.1 <sup>a</sup>
應力波動彈性模數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	112660 <sup>d</sup>	96490 <sup>c</sup>	80760 <sup>b</sup>	62790 <sup>a</sup>
超音波動彈性模數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	134780 <sup>d</sup>	112660 <sup>c</sup>	93960 <sup>b</sup>	74420 <sup>a</sup>
MOR(kgf/cm <sup>2</sup> )	579.1 <sup>c</sup>	525.6 <sup>bc</sup>	447.4 <sup>ab</sup>	410.8 <sup>a</sup>
MOE(kgf/cm <sup>2</sup> )	102600 <sup>c</sup>	94130 <sup>bc</sup>	82350 <sup>b</sup>	65090 <sup>a</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b 和 c 來顯示 (P ≤ 0.05)

a、b、c 表示每列相互間之顯著差異性

## 6. 木材縱向抗壓破壞類型

表 50 縱向抗壓強度與含水率之不同破壞型態間 Tukey 分析

Table 50 Tukey analysis of compression strength and MC in different crack Type

破壞型態		C+F	A+C	F	B+F	A	D+F	A+D
抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	頻率%	2.67	1.54	25.51	2.47	64.51	1.75	1.54
	平均值	194.4 abc	241.3 abc	303.9 abcd	317.6 abcd	323.2 abcd	383.1 abcd	482.4 de
含水率 (%)	頻率%	2.67	1.54	25.51	2.47	64.51	1.75	1.54
	平均值	164.2 ef	104.0 bcde	51.5 abcd	117.6 bcdef	29.7 abc	38.3 abc	4.5 a

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b、c、d、e 和 f 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b、c、d、e、f 表示每列相互間之顯著差異性

A 為壓碎型抗壓破壞，B 為端部裂開型抗壓破壞，C 為剪斷型抗壓破壞，

D 為碎裂型抗壓破壞，E 為木理平行的抗壓與剪斷型抗壓破壞，

F 為末端轉型抗壓破壞，以符號「+」相連為複合型抗壓破壞。

依 ASTM Designation D 143-52 將木材縱向抗壓破壞類型，區分為六種類型，即 (A) 壓碎型 (Crushing)：裂 靠近兩端而成水平狀者。(B) 端部裂開型 (Wedge splite)：在平行木理壓力中常見之，即材料之破壞面與材料成一之角度者。(C) 剪斷型 (Shearing)：力之破壞與裂開同時存在者。(D) 碎裂型 (Splitting)：試品乾燥時常發生沿著縱軸產生裂開，此種現象在木質線與管胞、木纖維之接觸部易發生。(E) 木理平行的抗壓與剪斷型 (Compression and shearing parallel to the grain)：有斜 木理之木材常發生此種現象，即在木材縱向有抗壓及剪力之二種裂 者。(F) 末端轉型 (Brooming and endrolling)：高含水率時常出現之破壞型態。

由表 50 可得知，碎裂型抗壓破壞 (D) 出現於含水率較低時，發生於木質線與管胞之接觸部易產生應力處，故含有碎裂型破壞型態者，其抗壓強度會較大；剪斷型抗壓破壞 (C) 出現於含水率較高時，主要是由於木材 抗應力中，

對於剪斷力的抗最小，故其抗壓強度應較小；由端部裂開型抗壓破壞（B）的出現更可以證明，本試驗是屬於縱向抗壓試驗，而因為本試驗有探討高含水率的狀態，所以末端轉型抗壓破壞（F）的個數是僅次於壓碎型（A）。A型及F型之抗壓破壞，其在抗壓強度分別為323.2 kgf/cm<sup>2</sup>、303.9 kgf/cm<sup>2</sup>，含水率分別為29.7%、51.5%，皆無顯著差異。A型與A+D複合型態抗壓破壞（抗壓強度482.4 kgf/cm<sup>2</sup>，含水率4.5%）分別與C+F複合型態之抗壓破壞（抗壓強度194.4 kgf/cm<sup>2</sup>，含水率164.2%）以及A+C複合型態之抗壓破壞（241.3 kgf/cm<sup>2</sup>，含水率104.0%），在抗壓強度與含水率方面皆有顯著差異。

## 7. 含水率對強度之影響

### （1）抗壓強度與含水率

由圖47可知，當含水率小於28%時（FSP，即纖維飽和點以內），抗壓強度（ $\sigma_c$ ）與含水率（MC）呈現線性關係，其相關式為： $\sigma_c = -12.82 \times MC + 509.0$ ， $R^2 = 0.624^*$ ，當含水率上升時，抗壓強度會呈下降的趨勢，造成此現象主要是由於在纖維飽和點以內，木材中所含有的水分，即結合水會進入到其非結晶領域，藉極性會凝著而使細胞壁發生，因此，當含水率愈多時其強度會愈低。Green and Kretschmann（1994）指出，縱向抗壓強度在纖維飽和點內與其含水率呈線性的關係，而含水率愈高則強度愈小，此觀點與本試驗結果相符。在此以12%含水率為基準的抗壓強度時，平均縱向抗壓強度於生材時比12%含水率之抗壓強度少59%；在18%含水率時，強度則少36%；在7%含水率時，則增加28%的抗壓強度；在4%含水率時，則增加47%的抗壓強度。就縱向抗壓彈性模數而言，並未呈現線性的關係，以12%含水率的抗壓彈性模數為基準時，生材狀態下則減少52%之抗壓彈性模數；18%含水率時，則減少30%之抗壓彈性模數；於7%含水率時，則抗壓彈性模數增加5%；在4%含水率時，則增加8%之抗壓彈性模數。

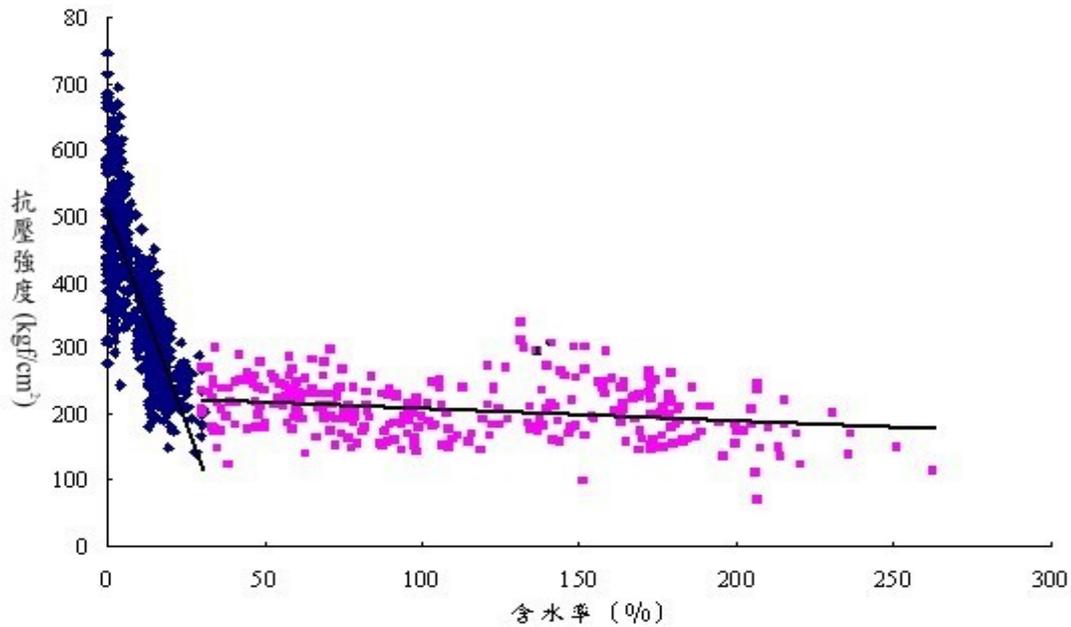


圖 47 抗壓強度與含水率之關係

Fig. 47 Relationship between moisture content and compressive strength

本試驗若以 12% 含水率為基準的抗壓強度時，由圖 47 之相關式得知，當含水率增減 1% 時，平均縱向抗壓強度會減增 3.6%。若以絕乾含水率為基準的抗壓強度時，當含水率增減 1% 時，平均縱向抗壓強度會減增 2.52%。王 霖(1995) 指出柳杉之破壞強度變化率平均值為 2.7%，皆較王松永(1986) 指出一般木材含水率每增減 1% 會使其各項機械強度性質減增的百分率，概算時，抗壓彈性模數 4%、靜彈性模數 2%、硬度 2.5%、抗壓強度 6% 之值為小。本試驗縱向抗壓強度較理論值的 6% 為低，降幅為 40%，而從王 霖(1995) 之抗壓彈性模數與理論值相較之降幅亦約為 40%，故本試驗所做之研究是屬合理之範。

當含水率大於 28% 時，抗壓強度多在  $300 \text{ kgf/cm}^2$  以下，造成此現象主要是由於當含水率超過纖維飽和點時，其纖維吸滿水份，自由水充於細胞與間，而自由水不具有支撐的能力，故其抗壓強度雖然隨著含水率的增加而呈現略為下降的趨勢，其相關式為： $\sigma_c = -1.882 \times MC + 2275.9$ ， $R^2 = 0.06$ ，但兩者之間並沒有相關性，換言之，當含水率超過纖維飽和點後，生材含水率增加時，抗壓強度已維持一定值。

## (2) FSP 以下與 FSP 以上之抗壓強度與密度

表 51 含水率高於 FSP 與低於 FSP 之柳杉材縱向抗壓強度與密度 t 檢定

Table 51 The density and compressive strength of Japanese cedar analyzed by t test during moisture content above and under FSP

		平均數	變異數	樣本數	自由度	t 值	單 臨界值
抗壓 強度 kgf/cm <sup>2</sup>	FSP 以下	367.9	1282.9	690	968	32.88	1.65
	FSP 以上	206.3	170.6	306			
密度 g/cm <sup>3</sup>	FSP 以下	0.44	0.003	690	328	-30.90	1.65
	FSP 以上	0.80	0.041	306			

FSP 即纖維飽和點

由表 51 可得知，在纖維飽和點以下之抗壓強度平均值為 367.9 kgf/cm<sup>2</sup>，纖維飽和點以上之抗壓強度平均值為 206.3 kgf/cm<sup>2</sup>，以 t 檢定後之結果顯示兩者有顯著之差異 ( $t=32.88 > 1.65$ )，而纖維飽和點以下之抗壓強度變異數為 1282.9，遠超過纖維飽和點以上之抗壓強度變異數 170.6，主要原因是由於當含水率超過纖維飽和點時，抗壓強度維持在一大概範圍內，不會有明顯的改變，而在纖維飽和點以下時，抗壓強度會隨著含水率的減低而呈線性增大。在纖維飽和點以下之密度平均值為 0.44 g/cm<sup>3</sup>，纖維飽和點以上之密度平均值為 0.80 g/cm<sup>3</sup>，以 t 檢定後之結果顯示兩者有顯著之差異 ( $t=30.90 > 1.65$ )，而纖維飽和點以下之密度變異數為 0.003，遠小於纖維飽和點以上之密度變異數 0.041，主要原因是由於在纖維飽和點以下時，水分並未充滿於纖維內，而當到達纖維飽和點以上時，自由水充於細胞間且持續增加，加上水的比重大 ( $d=1$ )，故使得纖維飽和點以上之密度變異數較大。

### (3) 不同密度之含水率、抗壓強度與平均密度

表 52 不同密度之含水率、抗壓強度與平均密度之 Tukey 分析

Table 52 The moisture content, compressive strength and density of the various densities analyzed by Tukey significantly different test

	含水率(%)			抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )			平均密度(g/cm <sup>3</sup> )		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
樣本數	254	335	407	254	335	407	254	335	407
平均值	59.3 <sup>a</sup>	43.4 <sup>b</sup>	30.9 <sup>c</sup>	244.1 <sup>a</sup>	307.8 <sup>b</sup>	376.2 <sup>c</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.54 <sup>ab</sup>	0.57 <sup>b</sup>

A group：12%含水率時其密度 0.4 g/cm<sup>3</sup> 群，B group：12%含水率時其密度為 0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> 群，C group：12%含水率時其密度 >0.45 g/cm<sup>3</sup> 群

若以 12%含水率時的密度為基準，由表 52 可知，當 12%含水率時的密度區分成 0.4g/cm<sup>3</sup> (A group)；0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> (B group)；>0.45 g/cm<sup>3</sup> (C group) 三群時，其含水率分別為 59.3%；43.4%；30.9%，三群之間有顯著差異，且可看出含水率會隨著密度的上升而有下降的趨勢；當 12%含水率時的密度 0.4 g/cm<sup>3</sup>；0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup>；>0.45 g/cm<sup>3</sup> 三群時，其抗壓強度分別為 244.1 kgf/cm<sup>2</sup>；307.8 kgf/cm<sup>2</sup>；376.2 kgf/cm<sup>2</sup>，三群之間也有顯著差異，當 12%含水率時的密度越大時，其抗壓強度呈上升的趨勢；而在平均密度方面，當 12%含水率時其密度 0.4 g/cm<sup>3</sup> 與 0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> 時，其平均密度分別為 0.53 g/cm<sup>3</sup> 及 0.54 g/cm<sup>3</sup>，兩者之間無顯著差異，當 12%含水率時的密度為 0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> 與 >0.45 g/cm<sup>3</sup> 時，其平均密度分別為 0.54 g/cm<sup>3</sup> 及 0.57 g/cm<sup>3</sup>，兩者之間無顯著性差異，當 12%含水率時的密度 0.4 g/cm<sup>3</sup> 與 >0.45 g/cm<sup>3</sup> 時，其平均密度分別為 0.53 g/cm<sup>3</sup> 及 0.57 g/cm<sup>3</sup>，兩者之間有顯著性差異。若結合含水率與抗壓強度一同比較，當含水率較高時，抗壓強度比較低，即抗壓強度會隨著含水率的上升而有下降的趨勢。

(4) FSP 以下與 FSP 以上之不同密度群的抗壓強度與含水率

表 53 含水率高於 FSP 與低於 FSP 之不同密度群的縱向抗壓強度與含水率關係式

Table 53 The relationship between moisture content and compressive strength of the various densities during moisture content above and under FSP

	FSP 以下	FSP 以上
A	$\sigma_c = -9.8228MC + 405.40$ , $R^2 = 0.753^*$	$\sigma_c = -1.035MC + 182.13$ , $R^2 = 0.0723$
B	$\sigma_c = -12.873MC + 499.23$ , $R^2 = 0.787^*$	$\sigma_c = -0.131MC + 205.73$ , $R^2 = 0.0007$
C	$\sigma_c = -13.974MC + 563.80$ , $R^2 = 0.706^*$	$\sigma_c = -0.089MC + 248.03$ , $R^2 = 0.0002$

A group : 12% 含水率時其密度 0.4 g/cm<sup>3</sup> 群, B group : 12% 含水率時其密度為 0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> 群, C group : 12% 含水率時其密度 >0.45 g/cm<sup>3</sup> 群  
 $\sigma_c$  : 抗壓強度 (kgf/cm<sup>2</sup>), MC : 含水率 (%)

由表 53 可知, 在纖維飽和點以下之抗壓強度與含水率有高度的線性關係, 當 12% 含水率時的密度為 0.4 g/cm<sup>3</sup> 群者 (A group), 其含水率每增減 1%, 以 12% 為基準的抗壓強度會減增 3.4%; 當 12% 含水率時的密度為 0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> 群者 (B group), 其含水率每增減 1%, 以 12% 為基準的抗壓強度會減增 3.7%; 當 12% 含水率時的密度 >0.45 g/cm<sup>3</sup> 群者 (C group), 其含水率每增減 1%, 以 12% 為基準的抗壓強度會減增 3.5%。若以絕乾含水率為基準的抗壓強度時, 當含水率增減 1% 時, 平均縱向抗壓強度, 三群分別會減增 2.42%、2.58% 以及 2.48%。在纖維飽和點以上之抗壓強度與含水率皆沒有任何相關性, 強度維持在一定範圍之內。在絕乾的狀態下, 可得知當 12% 含水率時其密度為 0.4 g/cm<sup>3</sup> 群, 其抗壓強度為 405.40 kgf/cm<sup>2</sup>; 當 12% 含水率時的密度為 0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup> 群 (B group), 其抗壓強度為 499.23 kgf/cm<sup>2</sup>; 當 12% 含水率時的密度為 >0.45 g/cm<sup>3</sup> 群 (C group), 其抗壓強度為 563.80 kgf/cm<sup>2</sup>, 故在纖維飽和點以下時, 密度愈大則抗壓強度也隨之愈大, 也可看出當密度愈大, 其受含水率之影響也愈大。在纖維飽和點以上時, 也可看出密度愈大其抗壓強度之變化量也愈大之趨勢, 且強度下降的趨勢也比較緩。

### (5) 比強度與含水率

由於在分析實際資料時，發現比重仍有極大的變異性，故將比重一同考慮進來，利用比強度和含水率來做分析（圖 48），可得到以下之結果，當含水率在纖維飽和點以下時之關係式： $\sigma_c/\gamma_u = -367.99 \times MC + 12589$ ， $R^2 = 0.817^*$ ，當含水率上升時，比強度會呈下降的趨勢，其下降的比例為每增減 1% 含水率時比強度會減增 4.5%；若以絕乾含水率為基準的比強度時，當含水率增減 1% 時，平均縱向抗壓強度會減增 2.92%。當含水率超過纖維飽和點時之關係式： $\sigma_c/\gamma_u = -12.858 \times MC + 4166.7$ ， $R^2 = 0.799^*$ ，當含水率上升時，比強度亦呈下降的趨勢，會造成此結果主要是由於在纖維飽和點以上之抗壓強度維持在一定範圍內，但比重還是會因為水分的增加而增加，故比強度會隨著含水率的上升而下降。

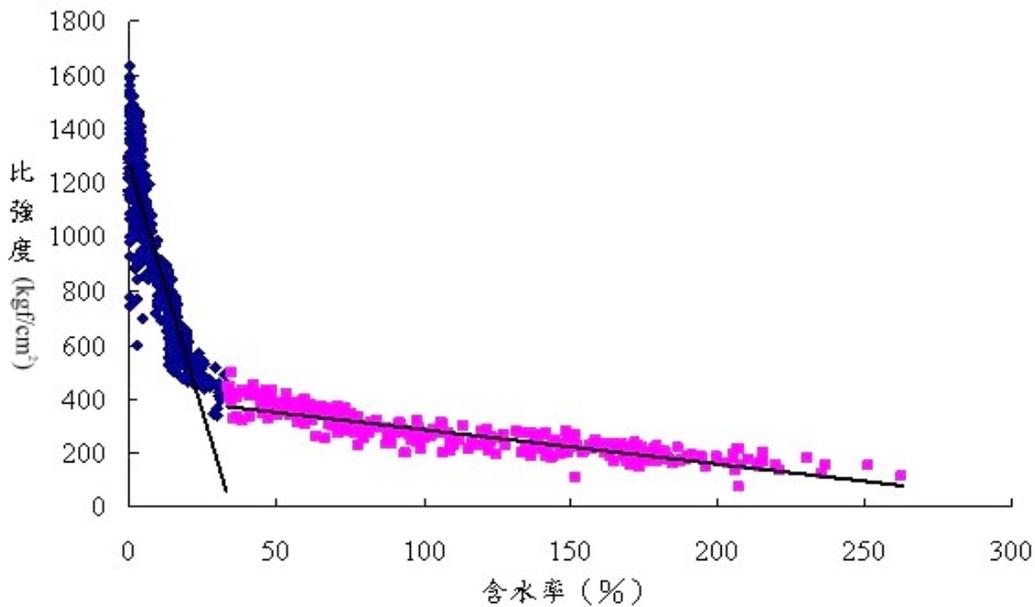


圖 48 比強度與含水率之關係

Fig. 48 Relationship between moisture content and specific strength

### (6) 抗壓強度與氣乾密度

由圖 49 顯示出木材的抗壓強度 ( $\sigma_c$ ) 與氣乾密度 ( $\rho_u$ ) 有高度的線性正相關，其相關式如下：

$\sigma_c = 6355 \times \rho_u + 143.2$ ， $R^2 = 0.399^*$ 。卓志隆（1998）研究栽植距離對柳杉強

度的變異性中指出，無缺點小試片之氣乾密度和抗壓強度間有高度正相關 ( $R^2 = 0.724$ )。密度越大則抗壓強度越大，是因為木材密度越大，則細胞壁實質成分比例高，纖維較飽滿，空隙率愈小，相對的能抗載重能力增大使得機械強度增加。木滋彥 (1991) 收集文獻整理日本 60 多種柳杉的密度與多種強度的關係，亦指出密度與木材強度皆成顯著正相關的線性關係。本試驗結果與其相符，皆是隨密度的增加而抗壓強度也隨之增加的情形。

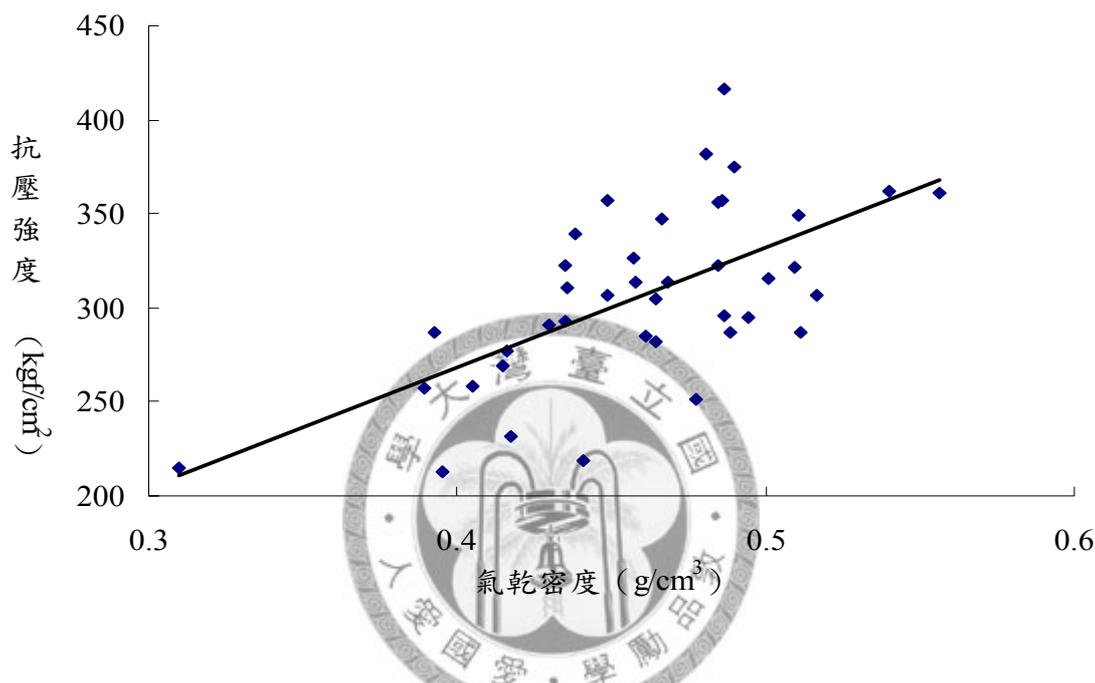


圖 49 抗壓強度與氣乾密度之關係圖

Fig. 49 Relationship between air density and compressive strength

王松永 (1975) 曾對於 39 種南材之抗壓性質進行探討，得到其縱向抗壓及弦向抗壓強度 ( $\sigma_c$ ) 及彈性模數 ( $E_c$ ) 均與其氣乾比重之間有正線性關係存在。王松永與曾偉宏 (1993) 等曾探討杉木之縱向抗壓強度變異性，亦指出縱向抗壓強度及彈性模數與其氣乾比重之間均有正相關之線性關係，其相關係數 ( $r$ )；縱向抗壓強度為 0.440~0.905，而彈性模數為 0.521~0.950，經 F 值測驗，其均有極顯著相關。Wang and Chiu (1993b) 曾探討柳杉實生苗與插條苗林木之抗壓與抗彎性質，亦指出其縱向抗壓強度及彈性模數與氣乾比重之間有正線性關係，其相關係數各為 0.911 及 0.640，經 F 值測驗均有極顯著性相關。這些均和本試驗

相一致。

## 8. 邊材與心材之含水率與強度

### (1) 邊材與心材之含水率

表 54 柳杉邊、心材含水率之 t 檢定

Table 54 The moisture content of the sapwood and heartwood of Japanese cedar analyzed by t test

含水率(%)	平均數 (%)	標準差	樣本數	自由度	t 統計	P(T<=t)	臨界值：
邊材	122	0.087	17	32	2.83	0.008	2.04
心材	152	0.102	17				

本研究進行柳杉立木生長錐鑽取樹蕊的時間點為 12 月，季節為冬天。含水率測定後經 t 檢定分析顯示（表 54），邊材含水率為 122 %，心材含水率為 152 %，邊材比心材的含水率為低，邊材與心材的含水率兩者有顯著性差異，此合乎柳杉之基本特性，詹明勳等人（2005）指出溪頭營林區第六林班的柳杉邊材含水率為 170%，心材含水率為 190%，且兩者有顯著的差異，標準差也顯示出邊材比心材小。

其他原因可能係季節進入冬天，台灣已進入降雨量偏低的時節，就樹木而言，木質部位於邊材是主要運送水分的地方，因此當降雨量一減少時，會率先衝擊木質部的水分，故邊材含水率比心材含水率少實屬合理，同時就變異數而言，邊材含水率的變異也比心材含水率小，意味著邊材含有的水分量就算在不同樹木間也差不多，即此試驗區的柳杉的邊材含水率較穩定。陳玉秀等人（1998）在柳杉生材水分分佈與比重變異中指出，水分在徑向分布有乾材和溼材帶，心材與邊材間的移行材在立木狀態下水分梯度突降，邊、心材皆以溼部狀態呈現，其邊材含水率為 107.95%，心材含水率為 109.3%，但兩者無顯著的差異存在。Fujii *et al.*（1997）指出，一般而言，針葉樹在心材化的過程中，心材的管胞會被抽出物填

充，所以心材的含水率遠低於邊材，但柳杉的心材管胞被發現，其心材化的過程中，抽出物不全然填滿管胞，而導致其心材的含水率較高。Hillis (1987) 調查 12 種針葉樹中只有兩種樹種，其心材含水率超過 100% 以上，柳杉就是其一，其他的樹種的心材含水率就比較乾，而如果其為黑心柳杉，心材含水率則高達 200% 以上。Nakada *et al.* (2003) 指出柳杉心材在橫向上有 5 種基本溼部的型，樹高方向有 7 種變化型態，溼部和木材含水量有高度的相關。Nakada *et al.* (1998) 調查柳杉 19 品種之含水率，發現邊材含水率在 95.9~333.4%，心材含水率在 45.2~253.5%，邊、心材轉移帶含水率在 52~183%。本試驗的柳杉邊材與心材的含水率與上述研究報告相符。

## (2) 邊材與心材之強度

表 55 邊心材縱向抗壓強度 t 檢定

Table 55 The compressive strength of the sapwood and heartwood of Japanese cedar analyzed by t test

	$\sigma_c$ 平均數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	標準差	樣本數	自由度	t 統計	P(T<=t)	臨界值：
邊材	358.6	126.2	556	1184	1.6378	0.0478	1.6461
心材	369.8	137.1	1146				

進一步以 t 檢定分析縱向抗壓試驗之結果，如表 55 所示，邊材的縱向抗壓值為 358.6 kgf/cm<sup>2</sup>，心材的縱向抗壓值為 369.8 kgf/cm<sup>2</sup>，兩者間無顯著性差異，而心材的標準差比邊材大，心材的材質強度雖比邊材大，但心材的強度偏差較大，換言之，也就是心材的材質較邊材來的不均質。一般而言，柳杉成熟材的出現約在 18~20 年，本試驗的柳杉為 36 年生，故已經有成熟材出現，邊材應多為成熟材，因成熟材的強度一般比未熟材來的大，但是除此因子外，密度這項因子也是相當重要而需被考慮的，陳建 (1991) 指出密度在年輪內之變異，從一個年輪開始之早材部分，密度 微往下降然後 往上升，且在一定範圍內波動，

當到達早晚材境界時，密度則急 上升到原來的 2.0~2.5 倍，然後急 下降直到一個年輪結束，同時柳杉密度徑向上的變化為由髓心向外增加後一路遞減到樹皮處。因此心材部的密度應比邊材大，而密度和強度間有著相關性，所以心材的強度大於邊材的強度就為合理。同時再比對棲蘭山地區的邊、心材差異，其中第二區的邊、心材強度沒有差異的存在，和本樣區的邊、心材情況相符。而且棲蘭山第二區的強度也和本樣區的強度差不多。



#### (四) 不同生育地之樣區比較

表 56 不同生育地之柳杉年輪特徵與材質比較表

Table 56 Compared with the Japanese cedar's properties of the different sites

	EW	LW	RW	LWP	Fcf
帶狀疏伐	2.89 <sup>a</sup>	1.17 <sup>a</sup>	4.07 <sup>a</sup>	32.88 <sup>a</sup>	311 <sup>a</sup>
未疏伐	3.28 <sup>a</sup>	0.76 <sup>b</sup>	4.02 <sup>a</sup>	19.06 <sup>b</sup>	307 <sup>a</sup>
TYPE B	3.05 <sup>a</sup>	1.46 <sup>a</sup>	4.60 <sup>a</sup>	34.37 <sup>a</sup>	374 <sup>b</sup>

	ED	LD	RD	Dmax	Dmin
帶狀疏伐	0.318 <sup>a</sup>	0.737 <sup>a</sup>	0.433 <sup>a</sup>	0.869 <sup>a</sup>	0.216 <sup>a</sup>
未疏伐	0.276 <sup>b</sup>	0.773 <sup>b</sup>	0.369 <sup>b</sup>	0.884 <sup>a</sup>	0.178 <sup>b</sup>
TYPE B	0.372 <sup>c</sup>	0.740 <sup>a</sup>	0.489 <sup>d</sup>	0.889 <sup>a</sup>	0.286 <sup>d</sup>

Tukey 檢定下類別顯著性以 a、b、c 和 d 來顯示 ( $P \leq 0.05$ )

a、b、c、d 表示每行相互間之顯著差異性

EW：平均早材寬度(mm)；LW：平均晚材寬度(mm)；RW：平均年輪寬度(mm)；

LWP：晚材率(%)；Fcf：微破壞抗壓強度(kgf/cm<sup>2</sup>)；ED：平均早材密度(g/cm<sup>3</sup>)；

LD：平均晚材密度(g/cm<sup>3</sup>)；RD：年輪平均密度(g/cm<sup>3</sup>)；

Dmax：單一年輪內最高密度(g/cm<sup>3</sup>)；Dmin：單一年輪內最低密度(g/cm<sup>3</sup>)

由於所有的樣區要進行比較時，其中對高岳地區的樣木，是在 22 年生時進行疏伐，其他棲蘭山的帶狀疏伐是在 24 年生，未疏伐更是沒有疏伐的記錄，因此所有的樣區要在相同標準下進行比較，故全都採用 1~22 年生間的柳杉材質來比較，未疏伐樣區的有優、中、劣勢木，其中以中勢木來代表該樣區的材質，表 56 所示，微破壞抗壓強度以未疏伐的樣區 (307 kgf/cm<sup>2</sup>) 最低，其次是棲蘭山 (311 kgf/cm<sup>2</sup>)，最高的是對高岳的 Type B (374 kgf/cm<sup>2</sup>)，而 Type B 對其他三區有顯著的差異，而棲蘭山和未疏伐間沒有顯著的差異。

年輪寬度上而言，也就是肥大生長的情形，平均年輪寬中，對高岳的 Type B 大於生育地在棲蘭山的帶狀疏伐與未疏伐的樣區，但三者間沒有顯著的差異，換言之，三者肥大生長上是差不多的情形。平均早材寬上，三者間沒有顯著的差異，

平均晚材寬上，未疏伐的晚材寬最小 (0.76 mm)，且與其他兩區有顯著的差異，但其他兩區間沒有顯著的差異，晚材越寬者，其抗壓強度也就越大。晚材率上，抗壓強度最大的，其晚材率就是最大的，抗壓強度最小的樣區，其晚材率就是最小的。

平均密度上 (表 56)，未疏伐的年輪平均密度最小 ( $0.369 \text{ g/cm}^3$ )，其次是棲蘭山帶狀疏伐 ( $0.433 \text{ g/cm}^3$ )，最高的密度是對高岳的 Type B 試驗地 ( $0.489 \text{ g/cm}^3$ )，其中以棲蘭山的柳 密度低於對高岳的，此可能在於水份的多寡所致，水份源自於降雨量，棲蘭山的降雨量大於對高岳地區，水份越多則形成層活動會比較興盛，形成層活動興盛只要是在春天，因此早材因快速的細胞分裂導致早材比較多，進而使的晚材率下降，如此則會導致年輪內的平均密度下降。而密度和抗壓強度有高度的正相關，而本試驗抗壓強度的強弱順序，排列與密度一樣。平均密度上，三者的密度間有顯著的差異。

早材的密度上，未疏伐試驗地的試材密度最低 ( $0.276 \text{ g/cm}^3$ )，對高岳試驗地 Type B 的試材密度最高 ( $0.372 \text{ g/cm}^3$ )，兩者有顯著的差異存在，因早材和抗壓強度兩者間有高度相關，所以早材的密度高到低的變化順序與抗壓強度的高低變化順利一致。在晚材的密度上，以未疏伐試驗地的試材密度最大 ( $0.773 \text{ g/cm}^3$ )，棲蘭山帶狀疏伐的試材密度最低 ( $0.737 \text{ g/cm}^3$ )，且兩者有顯著的差異存在。

最高密度上，三者間沒有顯著的差別。最低密度的表現上，未疏伐試驗地 ( $0.178 \text{ g/cm}^3$ ) 帶狀疏伐試驗地 ( $0.216 \text{ g/cm}^3$ ) Type B ( $0.286 \text{ g/cm}^3$ )，此等順序與抗壓強度相同，而三者間有顯著的差異存在。

Pilodyn 的試驗中，隨著刺入深度不同，瞭解木材對穿刺的 抗情形，而穿透深度深者，其強度就會比較小，而對高岳地區的樣木穿透深度 (14 mm) 比同齡級地區 (18 mm) 的淺，且兩者間有顯著的差異，變異數則是對高岳的柳杉大於未疏伐的柳杉。

表 57 不同地區木材性質比較

Table 57 Compared with properties of different sites

		平均數	變異數	t 統計	臨界值
Pilodyn (mm)	對高岳	14	19.3	3.454	1.717
	未疏伐	18	12.8		
MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	對高岳	692	33431	9.648	1.647
	未疏伐	588	19363		
MOE (kgf/cm <sup>2</sup> )	對高岳	66380	7.06E+08	9.327	1.647
	未疏伐	52330	3.03E+08		

由表 57 得知，MOE 的表現上，對高岳地區的柳杉抗彎模數 (66380 kgf/cm<sup>2</sup>) 大於未疏伐的柳杉 (52330 kgf/cm<sup>2</sup>)，變異數上也是有相同的情形，而兩者間有顯著的差異存在，抗彎彈性模數和抗彎強度間有良好的相關性，故由此可以推論，抗彎強度的結果與抗彎彈性模數相似。

在小試材的 MOR 上，對高岳地區的柳杉抗彎強度 (692 kgf/cm<sup>2</sup>) 大於未疏伐的柳杉 (588 kgf/cm<sup>2</sup>)，同時經過 t 檢定後，兩者有顯著的差異，而抗彎的結果，也與 MOE 和抗壓的結果一致，此原由係於栽植密度上，對高岳地區的柳杉大於未疏伐的柳杉所致，同時 MOR 與 Pilodyn 呈現相反的現象，當 Pilodyn 刺入的深時，表示木材表面上能抗穿刺的能力小，而木材表面在進行抗彎強度時，更是應力較大的地方，所以當刺入深度大，則 MOR 較小是符合木材物理的行為，MOR 和 MOE 間本來就有良好的相關性存在，故 MOE 大時，MOR 就會比較大，反之，MOE 小，則 MOR 就會比較小，本試驗中也顯示出，對高岳地區的 MOE 與 MOR，也都同步比未疏伐來的大，在變異數上也是有相同的情形，且 MOE 上，兩區有差異，同時 MOR 上也顯示出有差異的存在。

表 58 不同地區每五年林木肥大生長比對表(單位: mm)

Table 58 The grown width of the different sites

年輪數	對高岳	帶狀疏伐	未疏伐
31~35	9.61	13.49	13.09
26~30	8.24	16.06	13.37
21~25	9.56	14.93	13.66
16~20	11.69	11.79	11.89
11~15	16.16	14.39	15.34
06~10	21.89	18.84	17.42
01~05	49.43	40.05	43.31

由表 58 可看出無論一區的柳杉，其生長速度前面五年最快，而後生長速度開始下降，這是因為當林木生長到一定的程度後，林木開始有鬱閉的情形，林木間的競爭也就展開，所以開始競爭後，林木的生長也就慢下來了，除非有所干擾，才能使生長加快。生長速度的大小，也牽動著固碳速度的快慢，對溫室氣體減量上有重大的影響。

1 到 5 年，生長最快的是對高岳地區的柳杉，其次是未疏伐的柳杉，最慢的是帶狀疏伐的樣區，但這五年內半徑上都增加 40 mm 以上。6 到 10 年，依然是對高岳地區最大，其次是帶狀疏伐，最後的是未疏伐地區。11 到 15 年間，對高岳地區還是生長最快的，到了 16~20 年，三區間的生長速度則差不多，同時棲蘭山地區的帶狀疏伐與未疏伐區，已經達到生長速度的最低點。

21~25 年，對高岳地區的生長速度持續下降，其生長速度在此年限間是最慢的，最大的是帶狀疏伐的地區，26~30 年，對高岳地區雖然有在生長 22 年時有一個弱度下層疏伐，但生長速度依舊持續下降，達到最低點 (8.24 mm)，而未疏伐區的柳杉，和前面五年差不多的生長速度，都在 13~14 mm 間，並持續到 31~35 年 (13.09 mm)，而同樣位於棲蘭山的帶狀疏伐樣區，在 24 年生時，進行了帶狀疏伐，生長速度有所提升到 16.06 mm，因此帶狀疏伐因疏伐後，導致

競爭者少，林木可以獲得的資源就增加，所以帶狀疏伐是有促進肥大生長的效果，故固碳的速度也相對的加快。31~35 年生時，對高岳地區還是最小的（9.61 mm），但對高岳地區在 32 年生時就進行第二次的下層疏伐，所以生長速度上比前面五年來的快，因此疏伐是能促進林木肥大生長的，而帶狀疏伐在此時，生長速度比前面十年還慢，與未疏伐地區的柳杉生長速度差不多。



## V、結論

在棲蘭山地區不同帶狀疏伐強度的柳杉造林木之平均縱向超音波速度、縱向動彈性模數、徑向超音波速度、徑向動彈性模數、縱向抗壓強度及木材表面硬度儀 (Pilodyn) 穿透深度值，經由統計 ANOVA 分析的結果，並沒有顯著性的差異存在。年輪密度 (RD) 與早材密度 (ED)、晚材密度 (LD)、最低密度 (Dmin)、最高密度 (Dmax) 及晚材率 (LWP) 之間有顯著的正相關性存在。ED 與 Dmin 之間有顯著性的正相關存在，而 LD 與 Dmax 之間有顯著性的正相關存在。

縱向抗壓強度在樹幹橫向的變異性從髓心開始往樹皮側先會增加到大約距髓心 85~135 mm 處後，再逐漸下降到樹皮側。年輪寬度及早材寬度從髓心到樹皮側的變異性，在前 4 年呈現不規則變化，之後往樹皮側逐漸減少到約 25 年生，之後再略為增加到樹皮側。最高密度及晚材密度從髓心到樹皮側的變異性，在前 4 年呈現不規則變化，之後往樹皮側緩慢增加到樹皮側。年輪密度及晚材率，在前 4 年呈現不規則變化，之後緩慢增加約 25 年生，之後再不規則的減少到樹皮側。早材密度及最低密度從，在前 4 年呈現不規則變化，之後緩慢減少到樹皮側。

同一地區不同生長條件兩樣區間，其在密度、縱向超音波速度、木材表面硬度穿透深度、動彈性模數和縱向抗壓強度上皆有顯著的差異，同時邊材和心材在不同樣區，則有不同的結果。而就檢測的方位上，坡的上下與左右的數據是沒有差異的存在。密度與抗壓強度間和 DMOE 與抗壓強度間，都存在正相關，但胸高直徑與超音波間、木材表面硬度穿透深度與邊材抗壓強度間和木材表面硬度穿透深度與 DMOE 間，都存在負相關的關係。優勢木和劣勢木在平均密度與強度上有顯著的差異存在，而劣勢木又大於優勢木，但就生長速度而言，優勢木比劣勢木生長得快。優、中、劣勢木三者之肥大生長，皆呈對數趨勢。

對高岳試驗地中，以未處理區的平均胸徑最小且與其疏伐樣區間有顯著的差異，同時其標準差又最大，故以超音波評估林木材質是可信賴的。伐採後原木縱向超音波在樹高方向與直徑方向各有四種型態的變化。在不同栽植密度 Type A 與 Type B 之間，有顯著性的差異存在，且在抗壓強度與微破壞強度上，Type B 皆大於 Type A。成熟材與未熟材的強度不分軒輊。最後木材之抗壓強度與比重

有顯著的線性正相關。第二次疏伐後，其密度變化為 Type A3 > Type A2 > Type A1 和 Type B3 > Type B2 > Type B1，在抗壓強度與動彈性模數上變化為：Type A3 > Type A2 > Type A1 和 Type B2 > Type B3 > Type B1，撫育措施方面對管胞長度的影響，區分成栽植密度和疏伐的影響，栽植密度方面，栽植密度為 Type B 的平均管胞長度皆大於栽植密度為 Type A 的平均管胞長，成熟材管胞長也有此趨勢，而未成熟材管胞長則不一定；六區未成熟材管胞長與第一次疏伐後同栽植密度下各區的管胞長度，皆沒有顯著差異，但栽植密度為 Type B 的管胞長度大於栽植密度為 Type A 的管胞長度。管胞長會由髓心向樹皮方向增加，其長度與生長年齡呈現高度線性相關，約在 15~22 年之間趨於緩和，之後管胞長度只有小幅度的變動並沒有明顯的增加。而早晚材兩者的管胞長具有顯著的差異，將管胞長度分以未成熟材及成熟材管胞的平均長度視之，兩者也有顯著的差異存在。三種定年方法算出的成熟材與未成熟材境界約在 19 年左右，三種間沒有顯著的差異，所以利用年輪寬也是判斷成熟材與未成熟材境界的理 方式之一。

而伐採後立木與伐採原木第一段之縱向超音波速經 t 檢定後顯示無顯著差異，表示在立木狀態以非破壞性檢測方法即可評估原木之材質。

對高岳營林區平均每公頃的材積數為 354.4 m<sup>3</sup>，而此林分為 36 年生林分，換算為平均每年每公頃的樹幹材積固碳量約 2.45ton，所以森林對二氧化碳吸存與固定有相當的貢獻。樣木整體平均製材率為 39%。原木材積以未處理區的材積特別小，其製材所耗之電量也較其他區為小。整體之總消耗電量而換算成釋出之碳素量為 8.93 kg，淨固碳重為 457.77 kg。棲蘭山的柳杉平均每年每公頃的樹幹材積固碳量約 2.38 ton，而二氧化碳的吸存，平均每年每公頃約為 8.58 ton，而對高岳營林區和棲蘭山的柳杉，兩者的每年每公頃的固碳量差不多。

含水率低於纖維飽和點時，縱向抗壓強度與含水率間呈現負線性相關。若以 12% 含水率為基準，含水率每增減 1% 時，平均縱向抗壓強度減增 3.6%；若以絕乾含水率為基準時，當含水率增減 1% 時，平均縱向抗壓強度會減增 2.52%。含水率在高於纖維飽和點時，縱向抗壓強度與含水率沒有明顯的相關性。若將 12% 含水率時木材的密度區分成 0.4 g/cm<sup>3</sup>；0.4~0.45 g/cm<sup>3</sup>；以及 >0.45 g/cm<sup>3</sup>

三群時，三群之間的生材含水率與抗壓強度皆有顯著性差異，若以絕乾含水率為基準的抗壓強度時，當含水率增減1%時，平均縱向抗壓強度，三群分別會減增2.42%、2.58%以及2.48%。以破壞型態則以壓碎型抗壓破壞出現的頻率為最高，當碎裂型抗壓破壞出現時，其抗壓強度較大；而剪斷型抗壓破壞出現時，其抗壓強度較小。

栽植密度在棲蘭山未疏伐中展現出強度的差異，而其再對照棲蘭山不同帶狀疏伐強度的對照區，因其為1900株/ha，所以此區的強度又更大於未疏伐的樣區，同時在對高岳的樣區中也顯示出栽植密度大者強度強。在相同栽植密度下，帶狀疏伐對林木材質的影響有限，而以對高岳樣區中Type B中不同疏伐度下微破壞抗壓強度沒有差異的存在，而Type A中，強度、中度和弱度疏伐在標準抗壓試片的強度上沒有顯著的差異。但是無論是不同強度的疏伐或者是帶狀不同疏伐強度，都會促進林木的材積生長。



## VI、參考文獻

1. CNS444 (2003) 製材之分等。經濟部標準檢驗。
2. CNS451 (2005) 木材密度試驗法。經濟部標準檢驗。
3. CNS453 (2005) 木材抗壓試驗法。經濟部標準檢驗。
4. CNS14631 (2002) 框組壁工法結構用製材，經濟部標準檢驗。
5. 王仁、陳柏 (1990) 等級內木材強度分佈之變異研究，林產工業 9(2): 97-109。王松永 (1975) 南材之物理性質與機械性質之研究。臺大實驗林研究報告，116: 373-419。
6. 王仁、陳柏、陳宏 (1992) 台灣杉等級內強度分佈變異數研究。林產工業 11(1): 63-76。
7. 王松永 (1986) 木材物理學。國立，第 545-582 頁。
8. 王松永 (1988) 台灣主要經濟樹種材質基本研究 (III)。台大實驗林研究報告 2(2): 7-26。
9. 王松永 (1975) 南材之物理性質與機械性質之研究。臺大實驗林研究報告，116: 373-419。
10. 王松永，曾偉宏 (1993) 杉木之縱向抗壓與抗彎強度之變異性探討。臺大實驗林研究報告，7(1): 65-77。
11. 王松永，林法勤 (1994) 台灣栽植柳杉之栽植距離對其密度與數種強度性質之影響，台大農學院研究報告 34(2): 124-125。
12. 王松永，林法勤，崇彬 (2005) 疏伐木在生態工法應用對於 CO<sub>2</sub> 減量效應。森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集，pp.230-244。
13. 王松永，張上鎮，陳勁豪，林法勤，森松，崇彬 (2005) 桃芝颱風所引起土石流對人工林台灣杉性質之影響。台大實驗林，19(4): 261-269。
14. 王霖 (1995) 纖維飽和點以下含水率對木材強度及砂性質關係之探討。國立台灣大學士論文。73 頁。
15. 李國，林俊成，陳麗琴 (2000) 台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析。臺灣林業科學。15(1): 115-123。

16. 卓志隆 (1986) 木材之動力學與音響特性學之研究，國立台灣大學森林學研究所 士論文。
17. 卓志隆 (1998) 栽植距離對柳杉強度變異性影響之研究 ( I ) 靜力機械性質。林產工業 17 ( 3 ) : 453-470。
18. 卓志隆 (2000) 栽植距離對柳杉強度變異性影響之研究 ( 2 ) 動彈性係數與靜彈性係數。林產工業 19 ( 1 ) : 9-22。
19. 卓志隆 (2007) 三種測定木材彈性模數方法之比較。台灣林業科學 22 ( 3 ) : 297-306。
20. 林世 (1989) 不同栽植距離下柳杉林分之生長及其養分動態之研究，台灣大學森林學研究所博士論文。
21. 林俊成、李國、林裕仁 (1999) 柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究。臺大實驗林研究報告。13 ( 1 ) : 51-60。
22. 林振榮 (1991) 柳杉、杉木造林木之原木品等與製材率、製材品等與抗彎性質之研究。國立台灣大學森林學研究所 士論文。
23. 林振榮，邱志明，王松永 (2002) 六龜地區台灣杉造林木的疏伐及修枝對密度，形狀比，心材率及邊材寬之影響。中華林學季 35 ( 1 ) : 75-84。
24. 林振榮，王松永，邱志明 (2004) 微破壞儀評估台灣杉造林木之抗壓強度。林產工業。23 ( 1 ) : 23-31。
25. 林振榮 (2004) 非破壞性技術評估疏伐修枝處理對台灣杉造林木材質之影響。台灣大學森林學研究所博士論文。157 pp。
26. 林國銓，何淑玲 (2005) 由生物量推估台灣不同林分之碳貯存量。森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集，pp.97-108。
27. 林裕仁，李國，林俊成 (2002) 以生物量與材積關係式推估臺灣地區森林林木碳貯存量之研究。臺大實驗林研究報告。16 ( 2 ) : 71-79。
28. 邱志明，王松永 (1986) 柳杉種子苗與插條苗林木之材質研究 ( I ) 木材管胞長之變異性。台大農學院研究報告 26 ( 2 ) : 77-93
29. 邱志明 (1987) 柳杉種子苗林木與插條苗林木生長與材質之研究。台灣大學

- 森林學研究所博士論文。
30. 邱志明，王松永，林振榮（2000）台灣杉造林木密度對超音波速度及動彈性模數之影響。中華林學季 33（4）：585-590。
  31. 邱志明，林振榮（2000）天然林 機械性質變異與未成熟材境界之探討。林產工業 19（2）：183-194
  32. 邱志明、王松永、林振榮（2004）森林經營的立木材質評估。林產工業。23（3）：263-274。
  33. 侯國深 Warren J. McGonnagle 著（1992）非破壞性檢測法。 基 會。496 pp。
  34. 柯志裕（1995）栽植距離對柳杉實大樑抗彎及動彈性模數的影響，台灣大學森林學研究所 士論文。
  35. 光平（2003）不同栽植密度對台灣杉立木與木材性質之影響，台灣大學森林學研究所 士論文。
  36. 莊世滋、王松永（1997）應力波時間差法應用於材質評估之研究（1），林產工業 16（4）：681-696。
  37. 莊世滋（1999）應力波及超音波法評估木材及不同撫育處理之立木材質研究，國立台灣大學森林學研究所博士論文。
  38. 張義雄，陳柏 ，陳 宏（1997）造林木材之組織特性與力學性質的評價（I）-柳杉，杉木 之組織特性與力學性質 國立中興大學實驗林研究 19（1）：35-51
  39. 評（2001）林產工業製程中能源消費與二氧化碳釋放量。國立臺灣大學森林學研究所 士論文，p.1。
  40. 幸榮， 新 ，張照群， ， 偉，張恆 ， 年鈞， 世豪（2005）柳杉人工林生物量及碳貯存量之估算-以觀 地區為例。森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集，pp.23-35。
  41. 陳玉秀，黃彥三，陳 （1998）A Study on Moisture Distribution of Green Wood and Variations of Specific Gravity in *Crytomeria Japonica* D. Don。台灣

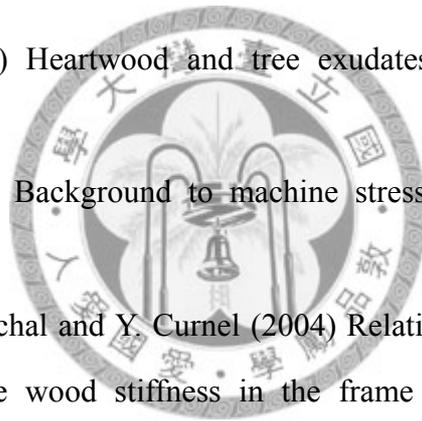
- 林業科學。13：2，民 87.06，頁 91-100。
42. 陳     ，黃彥三（2002）栽植距離與季節對針葉樹造林木材質超音波非破壞評估之影響，中華林學季 35（1）：85-90。
  43. 陳 宏、 順昭（1993）影 分析技術在針葉樹材之解 單元量測的應用研究，林產工業 12（3）：1-27。
  44. 陳建   （1991）柳杉栽植距離對管胞長度，密度，年輪寬，晚材率，心材率影響之研究。台灣大學森林學研究所 士論文。
  45. 陳俊宇（2003）鑽孔 抗法應用於木構件腐朽評估之研究。台灣大學森林學研究所 士論文。72 pp。
  46. 陳勁豪（2002） 林與實生林杉木材質之研究，台灣大學森林學研究所 士論文。
  47. 陳載永（1996）樹種對三種非破壞測定儀檢測木材彈性係數之影響。林產工業 15（3）：285-294。
  48. 陳麗琴，黃進   ，張添榮， 富文（1996）栽植密度對六龜地區台灣杉生長之影響，台灣林業科學 11（1）：1-11。
  49. 曾逸仁（1997）台灣古蹟大木構件破壞類型及其非破壞檢測法之探討。國立成功大學建築研究所 士論文。194 pp。
  50. 黃彥三、 如   、陳     （1990）打音頻譜分析應用於材質評估之可行性，林產工業 9（1）：43-54。
  51. 黃彥三、陳     、     （1993）非破壞性試驗技術應用於原木材質評估之可行性研究，林業試驗所研究報告季 8（1）：85-98。
  52. 黃彥三、陳     、張 成、何逸民（1997）超音波應用於木麻黃立木樹幹心腐之探測，中華林學季 30（4）：445-450。
  53. 詹明勳，曾     ，蔡明哲，高 謙，李佳   ， 佩鈺，黃     （2005）三種非破壞檢測儀器應用於柳杉造林木立木材質之評估。台大實驗林研究報告。19（3）：207-216。
  54. 黃純夫（1983）非破壞檢測儀具設備概述。科儀產品新知 4（3）：48-52。

55. 詹明勳、陳勁豪、 德新、王松永、曾 、 崇彬、李 玲 (2005) 超音波技術應用於造林木材質檢測之探討。中華林學季 38 (4): 485-496。
56. 葉競榮 (1983) 超音波檢測原理與儀器簡介。科儀產品新知 4 (3): 53-59。
57. 鮑甫成、江澤慧 (1998) 中國主要人工林樹種木材性質。中國林業出版社，第 267 頁。
58. 蔡錫堯 (1996) 非破壞性檢測實驗。文京圖書有限公司。p. 25-30。
59. 蔡明哲、 崇彬、蔡 (2000) 古蹟及 建築大木構造防 科技探討。九二一震 週年紀 文化資產維護的回顧與展 國際研討會論文集。p. 301-316。
60. 蔡俊 (2001) 製材工業耗能與二氧化碳釋出量之研究。國立台灣大學森林學研究所 士論文，67PP。
61. 顏添明、黃凱洛 (2005) 杉木地上部碳貯存量之推估。森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集 第 36-48 頁。
62. 羅卓振南、 和、邱志明、黃進 (1997) 棲蘭山林區柳杉人工林帶狀疏伐營造複層林之研究。台灣林業科學 12 (4): 459-465。
63. 三城昭義、三輪雄四郎 (1994) 木材中 超音波傳播速度 各種因子 影響。新 大學演 林研究報告 27: 49-56。
64. 白石則 、土 子、 佳子、 木誠 (2004) 東京大 千葉演 林 素蓄積量 推定—1995 年 1909 年 比較—。東大演報(112): 11-34。
65. 永富一之、 彥、番 、 安英 (1992) 乾燥過程 14 品種 打擊音 係數 測定。木材工業 47(2): 70-73。
66. 木滋彥 (1991) 標準試驗體木材 科學 利用技術。日本木材學會研究分科報告書: 68-71。
67. 本高明，安 ，來 和人，內山和子，黑 ，小 一幸 (2005) Genetic variation in the age of transition from juvenile to mature wood in hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L.kaempferi*) F1。木材學會誌 51 (2): 85-91

68. Alexander, C. III, J. R. Saucier, V. C. Baldwin and D. R. Bower (1994) Effect of initial spacing of loblolly pine. *F. P. J.* 44(11/12):14-20
69. Beall, F.C. (2002) Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology* 36(2):197-212.
70. Bendtsen, B. A. and J. Senft (1986) Mechanical and automatic properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cotton wood and loblolly pine. *Wood and Fiber Science.* 18(1):23-38
71. Bergsten, U., J. Lindeberg, A. Rindby and R. Evans (2001) Batch measurements of wood density on intact or prepared drill cores using x-ray microdensitometry. *Wood Science Technol.* 35:435-452.
72. Brown, S., A. E. Lugo and J. Chapman (1986) Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 390-394.
73. Bucur, V. (1995a) *Acoustics of Wood.* CRC press, Inc. pp.177-196.
74. Bucur, V. (1995b) *Acoustics of wood.* Boca Raton, FL: CRC Press. p.185-192.
75. Bucur, V, S. Garos, A. Navarrete, M. T. de Troya and R. Guyonnet (1997) Kinetics of wood degradation by fungi with x-ray microdensitometric technique. *Wood Science Technol.* 31:383-389.
76. Burgert, I., A. Bernasconi, K. J. Niklas and D. Eckstein (2001) The influence of rays on the transverse elastic Anisotropy in green wood of Decidulous trees. *Holzforschung* 55(5):449-454.
77. Cai, Z., M. O. Hunt, R. J. Ross and L. A. Soltis (2000) Static and vibration moduli of elasticity of salvaged and new joists. *Forset Prod. J.* 50(2):35-40.
78. Chudnoff, M., W. E. Eslyn and D. B. McKeever (1984) Decay in mine timbers part III. Species-independent stress grading. *Forset Prod. J.* 34(3):43-50.
79. Chen, T.Y. and J. H. Yen (1996) Influence of wood species on the modulus of elasticity of wood with three kinds of nondestructive test instruments. *For Prod*

- Ind 5(2):285-294.
80. Chuang, S. T. and S. Y. Wang (2001) Evaluation of standing tree quality of Japanese cedar grown with different spacing using stress-wave and ultrasonic-wave methods. *Journal of Wood Science* 47(4):245-253.
  81. Chiu, C. M., C. J. Lin and S. Y. Wang (2005) Tracheid length and microfibril angle of young *Taiwania* grown under different thinning and pruning treatments. *Wood and Fiber Science* 37(3):437-444
  82. Csoka, L., J. Zhu and K. Takata (2005) Application of the Fourier analysis to determine the demarcation between juvenile and mature wood. *Journal Wood Science* 51:309-311
  83. Curtu, I., C. Rosca, M.C. Barbu, L.A. Curtu and R.L. Crisan (1996) Research regarding the growth stress measurement in beech using ultrasound technique. NDT 1996 10th International symposium on Nondestructive testing of wood. pp.117-123.
  84. Dolwin, J. A. (1996) Evaluation of internal defects in trees and the legal implications. *J Arboricult* 20(2):173-8.
  85. Emerson, R. D. Pollock, D. Mclean, K. Fridley, R. Pellerin and R. J. Ross (2002) Ultrasonic inspection of large bridge timbers. *For Prod J*; 52(9):88-95.
  86. FAO (2001) *State of the World's Forests 2001*, Rome:Food and Agricultural Organization.
  87. Fujii, T., Y. Suzuki and N. Kuroda (1997) Bordered pit aspiration in the wood of *Cryptomeria japonica* in relation to air permeability. *IAWA J.* 18(1):69-76.
  88. Fukuda, M., T. Iehara and M. Matsumoto (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *For. Ecol. And Manage.* 184:1-6.
  89. Futoshi, I., J. Eizawaa, Y. Saito, K. Iizuka, S. Yokota and N. Yoshizawa (2006) Comparison of Wood Properties of Hinoki Small Diameter Logs Collected from Different Tree Ages and Heights. *Mokuzai Gakkaishi* 52(6):383-388.

90. Gerhards, C.C. (1978) Effects of earlywood and latewood on stress wave measurement Parallel to the grain. *Wood Science* 11(2):69-72.
91. Gerhards, C.C. (1982) Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. *Forest Product Journal* 32(2):20-25.
92. Green, D.W. and D.E. Kretschmann (1994) Moisture Content and the Properties of Clear Southern Pine. Res. Pap. FPL-RP-531. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. pp.28.
93. Hansen, C. P. (2000) Application of the Pilodyn in forest tree improvement. DFSC Series of Technical Notes. TN55. Danida Forest See Centre, Humlebaek, Denmark.
94. Hillis, W. E. (1987) Heartwood and tree exudates. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
95. Hoyle, R. J. (1968) Background to machine stress grading. *Forest Products Journal* 18(4):87-97.
96. Jacques, D., M. Marchal and Y. Curnel (2004) Relative efficiency of alternative methods to evaluate wood stiffness in the frame of hybrid larch (*Larix × eurolepis* Henry) clonal selection. *Ann. For. Sci.* 56 (2) 35–43.
97. Kana, Y., N. Okada and T. Fujiwara (2007) Use of the Pilodyn for Estimating Basic Density and Its Applicability to Density-based Classifying of *Cryptomeria japonica* Green logs. *Mokuzai Gakkaishi* 53(2):72-81.
98. Kasal, B. (2003) Semi-destructive Method for In-situ Evaluation of Compressive Strength of Wood Structural Members. *Forest Products Journal* 53:55~58.
99. Koga, S., J. Tsutsumi, K. Oda and T. Fujimoto (1996) Effects of thinning on basic density and tracheid length of Karamatsu (*Larix leptolepis*). *Mokuzai Gakkaishi* 42(6):605-611
100. Koga, S. and S. Y. Zhang (2002) Relationships between wood density and annual



- growth rate components in balsam fir (*Abies balsamea*). Wood Fiber Science. 34(1):146-157.
101. Koga, S., K. Oda, J. Tsutsumi and T. Fujimoto (1997) Effect of thinning on the wood structure in annual growth rings of Japanese larch. IAWA J. 18(3):281-290.
102. Koubaa, A., N. Isabel, S. Y. Zhang, J. Beaulieu and J. Bousquet (2005) Transition from juvenile to mature wood in black spruce(*Picea mariana*(Mill.)B.S.P.)Wood and Fiber Science 37(3):445-455
103. Lei, Y. C., S. Y. Zhang and Z. Jiang (2005) Models for predicting lumber bending MOR and MOE based on tree and stand characteristics in black spruce. Wood Sci Technol 39:37-47
104. Leichti, R. J., M. Meisenzahl and D. Parry (2005) Structural timbers from retired Douglas-fir utility poles. For Prod J; 55(3):61-66
105. Macdonald, E. and J. Hubert (2002) A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. Forestry 75:107-138.
106. Manada, S., Y. Kawamura, M. Yashiro and T. Taniguchi (1984) The strength of plantation Sugi rees. Mokuzai Gakkashi 30(7):530-537.
107. Maclaren, J. P. (1996) Plantation forestry-its role as a carbon sink: conclusions from calculations based on New Zealand's planted forest estate. In: Apps MJ, Price DT, editors. Forest Ecosystems, forest management and the global carbon cycle. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. pp.257-270.
108. Matheny, N.P., J. R. Clark, D. Attewell, K. Hillery, A. W. Graham and G. Posner (1999) Assessment of fracture moment and fracture angle in 25 tree species in the United States using the fractometer. J Arboricult 25(1):18-23.
109. Mattheck, C.G., H. Breloer, K. A. Bethge, W. A. Albrecht and A. W. Zipse (1995) Use of the fractometer to determine the strength of wood with unipient decay. J Arboricult 21(3):105-12.

110. Mattheck, C.G. and H. Breloer (2003) The body language of trees. A handbook for failure analysis. London: Office of the Deputy Prime Minister, the Stationery Office. pp. 202-209.
111. Mishiro, A. (1995) Ultrasonic velocity in wood and its moisture content (I) Effect of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi* 41(12):1086-1092.
112. Mishiro, A. (1996a) Effects of grain and ring angles on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi* 42(2):211-215.
113. Mishiro, A. (1996b) Ultrasonic velocity and moisture content in wood II. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (1); moisture content below the fiber saturation point. *Mokuzai Gakkaishi* 42(6):612-617.
114. Mishiro, A. (1996c) Ultrasonic velocity and moisture content in wood III. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (2); during desorption from a water-saturated condition. *Mokuzai Gakkaishi* 42(10):930-936.
115. Mishiro, A. (1996d) Effect of density on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi* 42(9):887-894.
116. Moffat, A. S. (1997) Resurgent forests can be greenhouse gas sponges. *Science* 277: 315-316.
117. Nakada, R., Y. Fujisawa, Y. Hirakawa and K. Yamashita (1998) Longitudinal change of the green moisture content in the stem of *Cryptomeria japonica* D. Don. *Mokuzai Gakkaishi* 44(6):395-402.
118. Nakada, R., Y. Fujisawa, K. Yamashita and Y. Hirakawa (2003) Changes in water distribution in heartwood along stem axes in *Cryptomeria japonica*. *Journal of Wood Science*. 49; 107-115.
119. Olsson, T., M. Megnis, J. Varna and H. Lindberg (2001) Measurement of the

- uptake of linseed oil in pine by the use of an X-ray microdensitometry technique. *Journal of Wood Science* 47:275-281.
120. Pape, R. (1999) Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scand J Forest Res* 14:38-50.
121. Pellerin, R. F. and R. J. Ross (2003) Nondestructive evaluation of wood. For Prod Soc, USA. 20 Ross RJ, Yang VW, Illman BL, Nelson WJ. Relationship between stress wave transmission time and bending strength of deteriorated oriented strandboard. *For Prod J* 53(3):33-35.
122. Peterson, K. R. (1994) The role of nondestructive evaluation in assuring the wise use of our timber resource. *NDT 1994 9th International Symposium on the Nondestructive Testing of Wood*. pp. 7-9.
123. QMS (1999) QMS Tree Ring Analyzer Users Guide Model QTRS-01X , Quintek Measurement Systems, Inc. Knoxville, TN, USA .
124. Rajesjwar, B., D. A. Bender and D. E. Bray (1997) An ultrasonic technique for predicting tensile strength of Southern Pine lumber. *Transactions of the ASAE* 40(4):1153-1159.
125. Ross, R. J. and R.F. Pellerin (1991) NDE of Green Material with Stress Waves: Preliminary results using dimension lumber. *J.* 41(6):57-59.
126. Ross, R.J., D.W. Green, K.A. McDonald and K.C. Schad (1996) NDE of logs with longitudinal stress waves. *DNT 1996 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. pp.117-123.
127. Ross, R.J. and M. O. Hunt (2000) Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structure. United State Department of Agriculture Research paper. FPL-RP-119.
128. Ross, R. J., R. F. Pellerin, J. W. Forsman, J. R. Erickson and J. A. Lavinde (2001) Relationship between stress wave transmission time and compressive properties of timbers removed from service. Forest Products Laboratory, Forest Service,

- US Department of Agriculture. General Technical Report FPL-RN-0280.
129. Ross, R. J., J. I. Zerbe, X. Wang, D. W. Green and R. F. Pellerin (2005) Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores. *Forest Products Journal*. 55(3):90-94.
  130. Rozenberg, P. and H. V. de Sype (1996) Genetic variation of the pilodyn-girth relationship in Norway spruce (*Picea abies* L). *Ann. Sci. For.* 53:1153-1166.
  131. Sandoz J. L. (1989) Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology* 23(1):95-108.
  132. Sandoz, J. L. (1993) Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science Technology* 27:373-380.
  133. Saren, M. T., R. Serimaa, S. Andersson, T. Paakkari, P. Saranpaa, and E. Pesonen (2001) Structural variation of tracheids in Norway spruce (*Picea abies* L Karst). *Struct Biol. J.* 136:101-109.
  134. Sasaki, Y., T. Iwata, K. Kuraya and K. Ando (1997) Acoustoelastic Effect of Wood I . Effect of compressive stress on the velocity of ultrasonic longitudinal waves parallel to the longitudinal direction of the wood. *Mokuzai Gakkishi* 43(3):227-234.
  135. Schad, K. C., D. E. Kretschmann, K. A. McDonald, R. J. Ross and D. W. Green (1995) Stress wave techniques for determining quality of dimensional lumber from railroad ties. Forest Products Laboratory, Forest Service, US Department of Agriculture. General Technical Report FPL-RN-0265.
  136. Schneidet, M. H. and L.P. Sebastian (1991) Bending strength and stiffness of Caribbean pine from Trinidad and Tobago. *Wood and Fiber Science* 23(4):468-471.
  137. Smith, S. M., and J. J. Morrell (1989) Comparing full-length bending strength and small-scale test strength of western redcedar poles. *Forest Products Journal*. 39(3): 29-33.

138. Syunji T., Y. Fujioka, K. Oda, J. Matsumura and S. Shiraishi (2006) Variation of wood properties in forests of seedlings and cutting cultivars of Hinoki. *Mokuzai Gakkaishi* 52(5):227-284.
139. Urakami, H. and K. Asai (1996) Sound Velocity of Wood with Layer Construction. *Mokuzai Gakkaishi* 42(10):921-929.
140. Wang, S. Y. and K. N. Chen (1992) Effects of Plantation spacing on Tracheid Lengths, Annual-ring Widths, and Percentages of Latewood and Heartwood of Taiwan-grown Japanese cedar. *Mokuzai Gakkaishii*, 38(7): 645-656.
141. Wang, S.Y. and C.M. Chiu (1993a) Variation of the modulus of toughness and wind resistance of Taiwan-grown Japanese cedar originated by seed and vegetative reproduction, *Mokuzai Gakkaishii*, 39(11):831-836.
142. Wang, S.Y. and C.M. Chiu (1993b) The wood properties of Japanese cedar origination by seed and vegetative reproduction in Taiwan VI; Compression and bending properties, *Mokuzai Gakkaishii*, 39(10):1128-1139.
143. Wang, S. Y. and S. H. Lin (1996) Effects of plantation spacing on the quality of visually graded lumber and mechanical properties of Taiwan-grown Japanese cedar. *Mokuzai Gakkaishii* 42(5):435-444.
144. Wang, S.Y. and C.Y. Ko (1998) Dynamics modulus of elasticity and bending properties of large teams of Taiwan-grown Japanese cedar from different plantation spacing sites. *Journal of Wood Science* 44:62-68.
145. Wang, S. Y. and S.T. Chuang (2000) Experimental data correlation of the dynamic elastic moduli, velocity and density of solid wood as a function of moisture content above fiber saturation point. *Holzforschung* 54:309-314.
146. Wang, S. Y., C. M. Chiu and C. J. Lin (2002) Variations in ultrasound and dynamic Young's modulus with moisture content for Taiwan plantation lumber. *Wood Fiber and Science* 34(3):370-381.
147. Wang, S. Y., C. M. Chiu and C. J. Lin (2003a) Application of the drilling

- resistance method for annual ring characteristics evaluation of *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides* Hay.) trees grown in different thinning and pruning treatments. *Journal of Wood Science*. 49(2):116-124.
148. Wang, S. Y., C. J. Lin and C. M. Chiu (2003b) Effects of thinning and pruning on knots and lumber recovery of *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides* Hay.) planted in the Lu-Kuei area. *Journal of Wood Science*. 49:444-449.
149. Wang, S. Y., C. J. Lin, C. M. Chiu, J. H. Chen and T. H. Yung (2005) Dynamic modulus of elasticity and bending properties of young *Taiwania* tree grown with different thinning and pruning treatments. *Journal of Wood Science* 51(1):1-6.
150. Wang, S. Y., C. J. Lin and C. M. Chiu (2005) Evaluation of wood quality of *Taiwania* trees grown with different thinning and pruning treatments using the ultrasonic-wave method. *Wood Fiber and Science* 37(2):192-200.
151. Wang, T., S. N. Aitken, P. Rozenberg and M. R. Carlson (1999) Selection for high growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships. *Can. J. For. Res.*29:434-445.
152. Wang, X., R. J. Ross, M. McClellan, R. J. Barbour, J. R. Erickson, J. W. Forsman and G. D. McGinnis (2001) Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science* 33(4): 522-533.
153. Wolcott, M. P., R. K. Shepard and J. E. Shottafer (1987) Age and thinning effects on wood properties of red spruce (*Picea rubens* sarg). *Maine Agricultural Exp. Sta. Uni of Maine, Orono, Maine 04469, Technical Bulletin*.127:17
154. Yamashita, K., Y. Hirakawa, Y. Fujisawa and R. Nakada (2000) Effects of microfibril angle and density on variation of Modulus of elasticity of Sugi (*Cryptomeria japonica*) logs among eighteen cultivars. *Mokuzai Gakkaishii* 46(6): 510-522.
155. Yang, K. C. (1987) Wood properties, wood qualities and silvicultural treatments. *Q. Jour. Chin For.*, 20(20):7-28.

156. Yang, K. C. (2002) Impact of spacing on juvenile wood and mature wood properties of White Spruce (*Picea glauca*), Taiwan Journal Forest Science 17(1): 13-29
157. Yasue, K., R. Funada, K. Fukazawa and J. Ohtani (1997) Tree-ring width and maximum density of *Picea gleh nii* as indicators of climatic changes in northern Hokkido, Japan. Can. J.For. Res. 27:1962-1970.
158. Zhang, S. Y. (1997) Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak: implications in dendroclimatology. Wood Science Technol. 31:63-72.
159. Zobel, B. J. and J. P. Buijtenen (1989) Wood variation its cause and control. Bruhlsche Universitatsdruckerei, Giessen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. pp.318-348.
160. Zobel, B. J. and J. R. Sprague (1998) Juvenile wood in forest trees. Springer-Verlag. Berlin Heideberg. Germany:300

