

臺灣杉及紅檜人工林疏伐作業之綜合效益評估委託研究

成果報告書



委託機關：林務局屏東林區管理處

執行機關：國立屏東科技大學森林系

中華民國 104 年 04 月

摘要

疏伐(Thinning)作業為人工林經營之重要過程，其目的在於提升林木的生長量，營造健康的立木生長環境及建立優良的林木品質。但因疏伐作業亦會造成短暫性的生態衝擊，而疏伐作業屬於技術性高的森林作業法，因此在現今以森林生態系經營的理念下，疏伐作業之前後應設置疏伐監測樣區，一方面在疏伐前可藉由監測樣區的林分結構(Stand Structure)分析，瞭解疏伐的必要性、疏伐強度的設定及疏伐木選擇基準的判定，另一方面在疏伐後可藉由疏伐監測樣區的連續性調查資料，監測疏伐效益及進行第二次疏伐的時間評估。過去疏伐監測樣區之調查採用傳統方式，利用直徑尺及測高器進行每木調查，其調查的準確度及其所能提供資訊，對於疏伐效益評估及疏伐作業的參考較為有限。本研究試圖針對疏伐作業，引進高科技的調查儀器及資料分析方法，其目的在於提升疏伐監測的樣木測計準確度，並提高疏伐效益監測的向度(Dimension)，包括林木生長、林分結構、立木健康度(Tree Health)、地被覆蓋度及立木材質的監測。本研究以荖濃溪事業區 98、99 及 100 林班之紅檜及臺灣杉人工林，設置 8 個疏伐監測樣區為研究材料，研究結果顯示，地面光達掃描之點雲(Point Cloud)資料，選擇固定拍攝地點，可定期取得監測樣木資料，其對於胸徑、樹高之測計可提升其測計精度，對疏伐作業之立木生長效益評估，將可縮短監測時期；而本研究所建立之立木外觀健康評估表，可藉由調查項目及調查人員的訓練，進行立木健康狀態的量化評估，其可供為疏伐木選擇之重要參考標準，亦可供為疏伐效益中，有關林木生長活力提升的量化指標；而監測樣區所收集的立木位置圖及直徑株數分布資料，利用林木競爭指數及 Weibull 機率密度函數進行模擬分析，其資訊可供為林分層級之疏伐效益評估；而非破壞性的材質檢測法，其對於立木材質監測，可提供立木木質部的材質狀況，可提早瞭解立木生長的健康性。本研究並提出一套多向度的疏伐效益監測模式，對於疏伐作業、疏伐效益評估，提供未來疏伐監測樣區設置，資料分析與應用之參考。

關鍵字：疏伐作業、疏伐效益、地面光達、非破壞性的材質檢測法、林木健康、林分結構

目錄

摘要	I
目錄	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VIII
壹、 前言	1
貳、 文獻回顧	2
一、 疏伐理論與疏伐效益	2
二、 高科技量測儀器在單木與林分監測之應用	12
參、 計畫目標	19
肆、 工作項目	20
一、 研究流程	20
二、 研究區域概況	22
三、 地面樣區規劃	24
四、 林木競爭指數	28
五、 林木健康調查	29
六、 疏伐監測樣區之林分結構及地面光達掃描	34
七、 非破壞性材質檢測法應用疏伐立木之健康度檢測	36
八、 疏伐監測樣區之地被物種多樣性調查	42
九、 疏伐撫育作業之綜合效益評估	43
伍、 結果與討論	44

一、疏伐監測樣區之設置	44
二、地面光達系統在疏伐監測樣區樣木測計之應用	46
三、以林分結構分析評估疏伐效益	56
四、疏伐監測樣區之立木健康調查	63
五、地被多樣性及覆蓋度	68
六、林木競爭與林分密度管理	70
七、疏伐效益綜合評估	76
八、疏伐監測樣區之調查方法及流程	78
九、教育訓練課程	91
陸、結論與建議	93
柒、參考文獻	96
附錄一、疏伐監測樣區之立木健康度調查資料	100
附錄二、疏伐作業之現場照片	110
附錄三、計畫說明書評審會議委員意見與書面答覆	111
附錄四、期中評審會議委員意見與書面答覆	114
附錄五、期末評審會議委員意見與書面答覆	116

圖目錄

圖 1 不同 a 參數 Weibull 函數圖形	5
圖 2 不同 b 參數 Weibull 函數圖形	6
圖 3 不同 c 參數 Weibull 函數圖形	7
圖 4 林分密度管理圖	8
圖 5 光達建置模型過程	12
圖 6 殼斗科單株立木三維點雲資料(A)落葉前(B)落葉後	13
圖 7 殼斗科單株立木點雲剖面資料(A)落葉前(B)落葉後	14
圖 8 日本落葉松林之精度 8mm 地面光達假色資料	15
圖 9 日本落葉松林之立木位置圖與碳蓄積量	16
圖 10 研究流程圖	21
圖 11 荖濃溪事業區 98 及 99 林班	22
圖 12 荖濃溪事業區 98-100 林班已疏伐位置	24
圖 13 根部狀態判定圖	30
圖 14 冠層狀態示意圖	31
圖 15 樹冠密度示意圖	31
圖 16 樹冠梢枯判定圖	31
圖 17 活冠層樣式及量測位置	32
圖 18 數位探針儀及阻抗分布曲線	37
圖 19 音頻快速傅立葉轉換	38
圖 20 樹木內部音頻傳導路徑	40
圖 21 地被樣區設置	42
圖 22 臺灣杉光達點雲林木位置圖	47
圖 23 地面光達與實地調查資料之立木位置誤差值	48

圖 24 拍攝位置與誤差立木相關位置圖	48
圖 25 臺灣杉光達測量胸徑差異	51
圖 26 紅檜光達測量胸徑差異	52
圖 27 臺灣杉光達測量樹高差異	53
圖 28 臺灣杉光達低估樹高之區間	54
圖 29 紅檜光達測量樹高差異	54
圖 30 臺灣杉生立木及枯立木點雲(1000 株/ha).....	55
圖 31 臺灣杉生立木密度模擬點雲(500 株/ha).....	55
圖 32 紅檜未疏伐林分直徑分布	57
圖 33 紅檜 97 年疏伐林分直徑分布	58
圖 34 紅檜 98 年疏伐林分直徑分布	58
圖 35 紅檜 101 年疏伐林分直徑分布	59
圖 36 紅檜 102 年疏伐林分直徑分布	60
圖 37 紅檜 103 年疏伐林分直徑分布	60
圖 38 臺灣杉 96a 年疏伐林分直徑分布	61
圖 39 臺灣杉 96b 年疏伐林分直徑分布	62
圖 40 65 株不同圓周之紅檜敲擊 DFr 值分布	63
圖 41 紅檜敲擊 DFr 值分布	64
圖 42 臺灣杉敲擊 DFr 值分布	65
圖 43 97 疏伐區第 16 號阻抗分布	66
圖 44 未疏伐樣木 38 號阻抗分布	67
圖 45 未疏伐樣木 23 號阻抗分布	67
圖 46 不同樣區之地被覆蓋度	69
圖 47 紅檜未適時修枝所產生之分岔木(左)及臺灣杉枯枝(右).....	70

圖 48 紅檜人工林之林分密度管理圖	71
圖 49 臺灣杉徑級林木位置圖	72
圖 50 利用地理資訊系統運算林木競爭指數	73
圖 51 臺灣杉人工林疏伐監測樣區林木競爭指數分布圖	74
圖 52 一般疏伐樣區設置流程	80
圖 53 監測型樣區設置流程	82
圖 54 每木位置測量	83
圖 55 林木競爭工具模組的操作方式	88
圖 56 等距分布樣點	88
圖 57 葉面積指數計算方式	89
圖 58 覆蓋度及物種數量判釋	90
圖 59 早上學員簽到及上課情形	91
圖 60 複習各式測高方式	92
圖 61 講解立木材質檢測及林木健康評估方式	92
圖 62 練習 DmP 立木檢測方式	92
圖 63 練習敲擊式立木檢測儀及課後全員合照	92

表目錄

表 1 一般非破壞檢測法的種類	18
表 2 不同生長類型胸高直徑量測方法	26
表 3 森林健康觀測分級項目	29
表 4 敲擊高度修正係數	41
表 5 荖濃溪事業區紅檜及臺灣杉人工林疏伐監測樣區之基礎資料 ..	44
表 6 地面光達與實地調查之立木位置距離誤差表	49
表 7 地被調查分析.....	68
表 8 林木競爭指數.....	75
表 9 紅檜及臺灣杉人工林疏伐監測樣區之各項指標	76
表 10 疏伐樣區應調查項目	78
表 11 疏伐樣區調查表格.....	81
表 12 森林健康評估等級	84
表 13 監測樣區外業調查表格	85
表 14 監測樣區內業整理表格	85
表 15 葉面積指數計算範例	89
表 16 教育訓練時數	91

壹、前言

臺灣 2012 年進口木材 618.3 萬 m^3 ，相對自產材僅 4.6 萬 m^3 (0.75%)，其中林務局生產部分佔自產材 39.1%，而國際熱帶木材組織 (International Tropical Timber Organization, ITTO) 已訂出未來之木材貿易對象，將以永續性經營森林 (Sustainable Forest) 所生產木材為目標，臺灣當前應盡力符合未來潮流。臺灣人工林的經營近年來因受到環保意識高漲，被認為疏伐會對生態環境產生衝擊，造成人工林無法正常且全面性的進行中後期疏伐撫育，使部分人工林生長停滯，其林分生長量與枯死量相抵，呈現老化、劣化現象，經過多年來的試驗研究，已證明適當的疏伐撫育，對於生態環境不會造成不可恢復性的影響，且對於生物多樣性、碳吸存及水文循環皆可帶來正面之效益。人工林中後期撫育作業因林分狀態 (如樹種組成、林分結構及林齡) 及森林經營目標之不同，其所採取之作業方式會有所不同，因此中後期疏伐撫育作業之前，必須進行人工林生長狀態之調查，依據林分狀態及經營目標之設定，研擬適當的疏伐撫育作業模式，疏伐撫育作業實施後進行綜合性之疏伐撫育作業效益評估，建立人工林中後期疏伐撫育之標準作業程序，為當前人工林經營之重要工作。

本計畫目標為因應目前森林經營管理政策，探討人工林經營之趨勢與角色定位，在減低調查人力及物力之前提下，以創新技術進行人工林疏伐作業監測，以非破壞性的方式進行疏伐林分性態值精準監測，並評估疏伐前後林分及生態環境變化，進一步蒐整調查資料，建立人工林疏伐作業之效益評估模式。

貳、文獻回顧

一、疏伐理論與疏伐效益

(一) 疏伐之定義

疏伐(Thinning)亦稱間伐為森林撫育作業方式之一，其目的以撫育為主，係將林分透過伐木處理調整林分密度，並且伐除受害木、被壓木與生長狀態不佳之林木，以利保留木生長，其中又可透過間伐來獲得主伐以外之部份收益，透過疏伐可保留良好之林木，使其材積量增加、促進良好形質、提昇整體產量、維持適當蓄積與抵抗各種危害等(Amateis *et al.*, 1996)。

(二) 人工林疏伐之種類

疏伐之方式大致可分成定性疏伐與定量疏伐兩類，定性疏伐主要係以森林經營之策略選定應伐除何種類型之林木，再決定伐除量，主要依照樹冠級與胸高直徑級來實行，而疏伐木選定方式可依照下層疏伐(Low Thinning)，依照樹冠級低之樹種，如被壓木、傷害木、枯死木、瀕死木與生長狀態不佳等予以伐除；上層疏伐(Thinning from Above)，伐採中等及中上樹冠級與胸高直徑級之立木，促進下層生長健全之中庸木可繼續維持生長；選擇疏伐(Selective Thinning)，依照經營策略進行疏伐；機械疏伐(Mechanical Thinning)，依照一定之栽植距離，選擇伐採與保留之立木，形成條帶狀之疏伐方式。定量疏伐主要配合定性疏伐所訂定之伐採質與量而實行，疏伐方式可依照株數、胸高直徑、林木間距、樹高、胸高斷面積來訂定(顏添明，1993；吳學平，2001)。

(三) 林木競爭對生長之影響

林木之間常以陽光、水分與養分為競爭之對象。競爭結果，林木之間雖然未直接干擾對方，但均受到互相抑制作用。當生態棲位(Ecological Niche)越接近時，林木競爭(Tree Competition)現象則會越明顯(Weatherley, 1963)。林木競爭之現象直接衝擊到的則是林木的健

康狀態，故林木競爭指數可用來代表林木健康情形(羅時凡等，2008)。

林木間競爭是不對稱的，生長優勢較佳之優勢樹種，會有較高的生長速率，且具有競爭上的優勢。林木間競爭模式，可根據生長結構與樹種間的數目加以推導，而林分競爭程度的高低，則取決各單木間競爭的總和(Damgaard, 1999)。透過林木大小、數量、距離與空間分布即可推估林分競爭現況，亦可預測林分未來的生長狀態 (Moravie *et al.*, 1999)。

(四) 立木位置分布與林木競爭之關係

林木競爭係為林木生長重要影響因子之一，競爭度較高之林分，對於內部立木生長會產生抑制作用，故瞭解林木競爭之情形，即可瞭解林木生長趨勢，而透過林分之立木位置圖，即可瞭解每株林木於林分中分布情形，再依據林木競爭指標計算，可瞭解林木間優勢木與被壓木之關係，對疏伐作業具有一定之實用性。傳統立木位置的繪製，係由以平板儀放射法或以羅盤儀進行測繪，不論是平板儀放射法或羅盤儀前進法，在立木位置繪製上，必須花費大量的人力以及物力，目前利用全球衛星定位系統(Global Position System, GPS)與雷射測距儀，進行立木位置的繪製，可大幅度提昇精確度與節省大量的時間(馮豐隆、李宣德，2000)。

(五) 林木健康評估

林木健康評估，一般使用視覺判定(Visual Estimator)法，即利用立木之葉、樹枝、樹幹、樹冠和根的生長狀態，以視覺調查法(Visual Inspections)觀測林木遭受生長環境壓力，並將觀測資料以系統化的分析立木的健康指標，其中以樹冠進行視覺判釋，所建立之立木健康指標被廣泛的使用(王兆桓、陳子英，2002)，其主要原因在於林木健康與否，最顯而易見的是當林木生長發生異常時，林木會產生落葉或葉色發生變化等症狀，其為樹冠外觀上最明顯的徵兆，因此當林木遭受逆境時出現這些症狀，外觀可經由葉子掉落、變色、根部裸露情形、樹冠密度及透視度、及稍枯情形等，加以量化調查，即可比較林木的

健康狀況，許多研究指出，林木健康調查，應將重點放在林木健康調查時，如何以圖表方式，來取得客觀的林木健康指標，而林木健康監測的調查方式的建立、調查評估表的製作及調查人員的訓練，為達成林木健康之標準化指標的重要過程，如此方可進行林木健康狀態的評估。

林木健康狀況的程度，可以使用不同的變數來描述，歐洲與北美的森林健康監測，其在評估林木健康所使用的變數是以樹冠狀況為主，例如樹冠密度、樹冠透視度、或樹冠梢枯等指標，作為不同程度的分類，森林健康監測計畫是全國性的調查，評估林木樹冠的狀況通常針對密度、透視度、梢枯進行調查，森林健康調查資料的特性取決於林木狀況的主觀詮釋，會因觀測者的經驗、觀測者的偏見、分類時的氣候及林木的外觀等因素，而造成判釋上的誤差，而這些因素可藉由量化而試圖降低其影響性，然樹冠密度與樹冠透視度兩者的精確測計有其困難性，容易受到人為主觀性的影響，而產生誤差，目前並無精確的測定技術，唯有透過專家指導，經過一連串的訓練、再訓練，將誤差降低。

所有林木健康監測所使用的指標，是透過精確、量化指標發展的過程而得，指標產生的過程必須經由初步的選定、篩選、論證到達最後的使用，而準則的建立有助於指標評估的有效性。指標及評估方法的選定，可參考國內外相關森林健康文獻，藉由同行審查、專家意見作為選用指標的重要依據，並透過野外實際操作後，選出適合國內森林健康監測的一套規則，並整理成手冊，在後續執行森林健康研究時，可參考此手冊的方法及準則，而健康指標的建立，在未來有潛力成為研究林木健康及了解衰退現象的最佳工具。

(六) 林分結構在疏伐作業上的應用

在林木調查中，胸徑為一容易測量之介量，此介量在生長收穫之研究上具有重要意義，如其與樹高或材積間具正相關，透過胸徑-樹高曲線式與胸徑-材積式之推估，可由胸徑求得樹高及材積，而各別樹種之胸徑分布可描述族群消長，若能歸納林分胸徑分布之變化，於

純林可闡述疏伐度對材積生長之影響 (陳朝圳，1985) 及預估未來的蓄積量；而對於混淆林利用各樹種之林分結構變化，可解釋各別樹種在該林分中之消長變化 (劉瑋育，2008)。

有關林分結構之模擬 Bailey and Dell (1973) 提出 Weibull 機率密度函數 (式 1) 具有高度適應性，能模擬各種不同森林狀態下之直徑分布，包括天然林的倒 J 型分布、人工林的左偏、右偏及常態分佈，而模式之參數容易求解，且參數值對於林分生長及競爭具有生態上的意義。

$$f(x) = \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \dots\dots\dots (1)$$

a 參數決定曲線起始之位置，稱之為位置參數，Weibull 機率密度函數應用在直徑分布上，a 參數為描述直徑分布可能之最小直徑，故 x-a 為正值，一般在天然林之林分結構中，因有小徑木不斷產生，其最小直徑之林木胸徑常趨近於零，此時之 a 參數值可以省略為 2 參數之 Weibull 函數；而人工林疏伐後 2-3 年，因空間增大獲取天然資源的機會增加，促使小徑木之直徑成長，因此 a 值遞增 (劉浚明，1996)。當 b=30、c=3.6 時，越大的 a 值使曲線的起始點越大 (圖 1)。

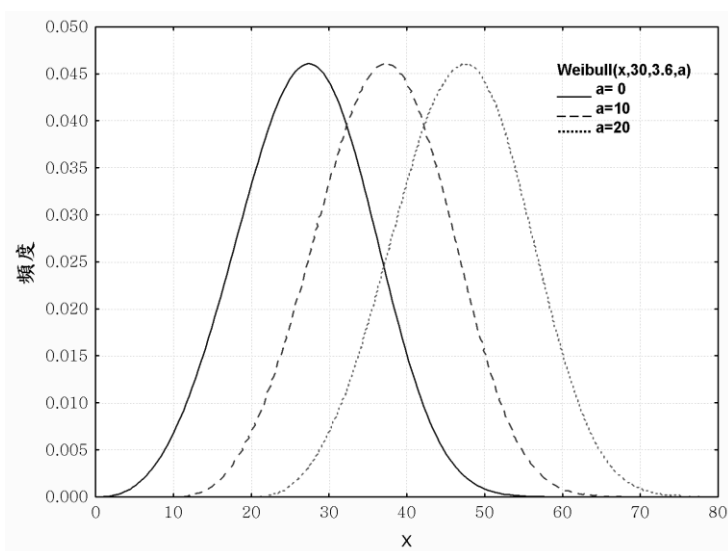


圖 1 不同 a 參數 Weibull 函數圖形

b 參數決定曲線尺度大小，b 參數恆為正值，當資料的趨中性越高 b 值越小，假設 $a=0$ 、 $c=3.6$ 固定不變時，b 值由小而大變化，平均值或眾量增大且其涵蓋範圍則由小變大 (圖 2)。王成泰 (2007) 研究大雪山天然林，天然林中的優勢樹種，b 值有逐年遞增現象，而未疏伐純林，b 值亦逐年遞增 (劉浚明，1996；劉瑋育，2008)。

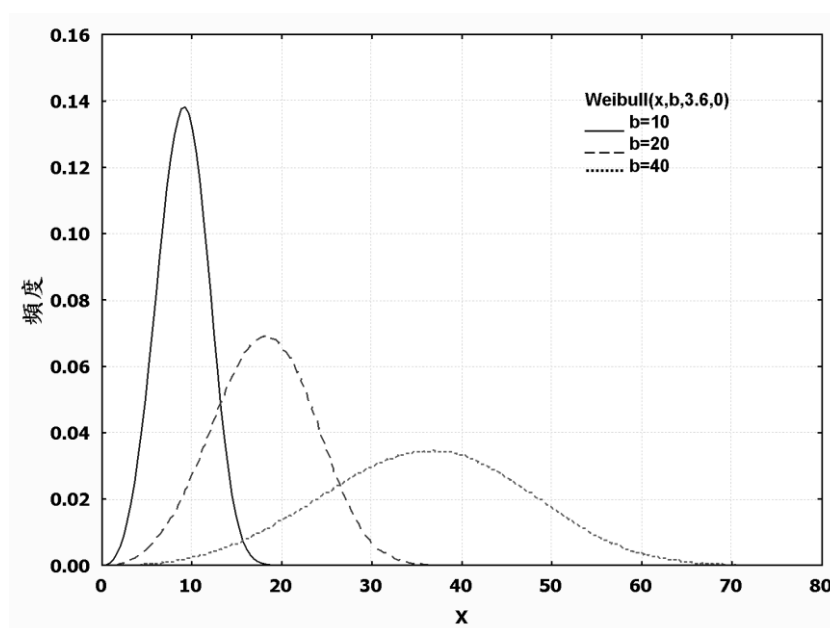


圖 2 不同 b 參數 Weibull 函數圖形

c 參數決定曲線形狀，c 參數為正值，當 $c \leq 1$ 時為倒 J 型曲線，應用於異齡天然林之直徑分布，如王成泰 (2007) 於大雪山天然林研究，林下小徑木較多呈倒 J 分布。當 $1 < c < 3.6$ 為右偏分布，一般同齡人工純林為右偏至常態分布，c 值大於 1 且趨近 3.6 (顏添明，1997)，而未疏伐林份 c 值則隨林齡增加而遞減呈右偏分布 (陳朝圳，1985)。而 $c=3.6$ 時為常態分布， $c > 3.6$ 時為左偏分布 (圖 3)。李久先、陳朝圳，1990)曾利用 Weibull 機率密度函數應用於人工林疏伐作業，並以大雪山紅檜人工林之疏伐試驗樣區為材料，建立如何應用 Weibull 機率密度函數之 b, c 參數，推導最佳林分結構下各直徑階之疏伐率，提供現場進行疏伐作業選擇疏伐木之參考。

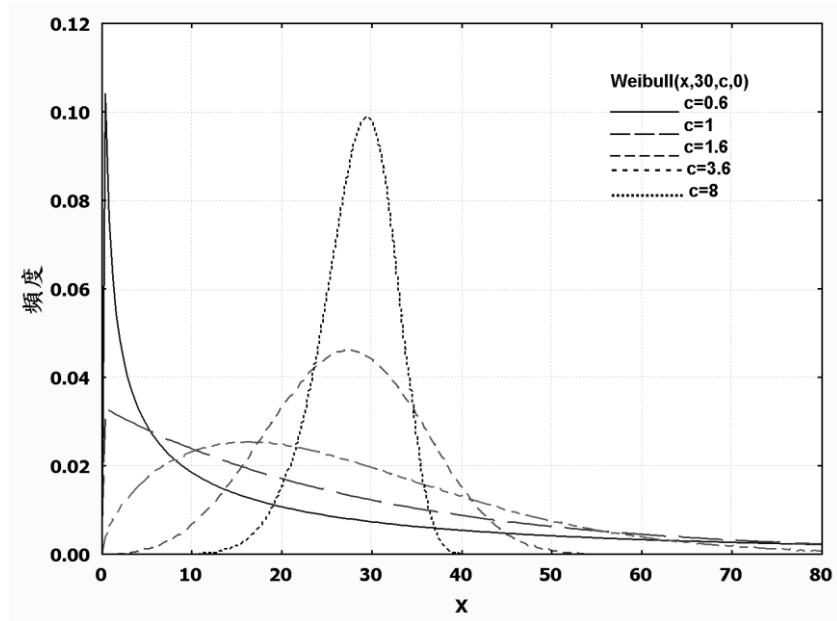
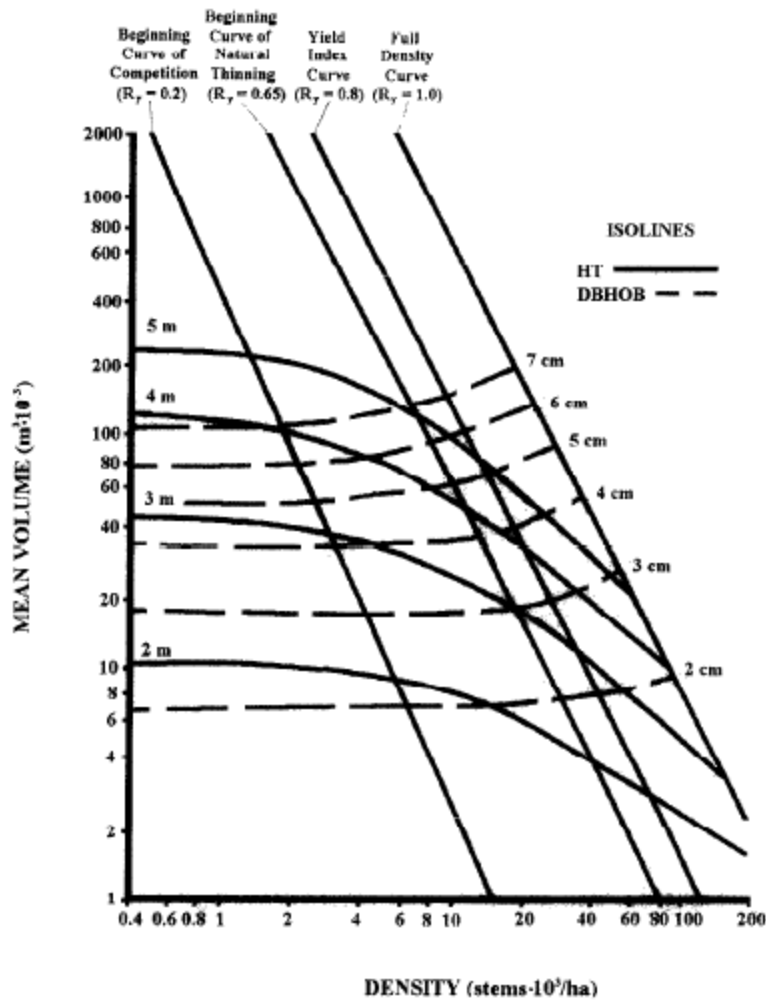


圖 3 不同 c 參數 Weibull 函數圖形

(七) 林分密度管理在疏伐作業上的應用

森林中各個林木的根系及樹冠所佔據空間，以其自律機能決定，構成很複雜的幾何模式，但林木生育所需空間應與林木大小成正比。因此，林分撫育時二株林木間的間隔，即株距(Spacing)，可根據測定林木大小的數據，如直徑、樹高、樹冠擴展及樹冠體積為函數來決定，做為決定蓄積與空間管理之指示準則。林木經營為使林木生長能充分發揮林木生產力，必須藉由疏伐調整空間，而疏伐之時間與疏伐度的抉擇，將影響疏伐效果，因此如何藉由空間管理來訂定疏伐準則，是一項重要工作。1960 年日本首先使用林分密度管理圖(Stand Density Management Diagrams, SDMD)，進行林分密度管理。SDMD 是以林分層級模式之圖解方式，說明所有林分發展階段之收穫、密度與枯死相互間的關係，如圖 4。



此圖說明下列各種關係(1)競爭開始曲線(2)自然疏伐開始曲線(3)在不同競爭下之收穫指數曲線(4)全立木度曲線(-3/2 自我疏伐定律)(5)競爭密度效果，優勢木高度等值線(HT)與(6)林分直徑等值線(DBHOB)。

圖 4 林分密度管理圖

林分密度管理圖最初之主要元素包括代表樹冠鬱閉度之大小-密度關係；自我疏伐之最大與最小情況；競爭-密度效果之等值收穫線。1970 年至 1980 年間對於最初的模擬方法，有進一步的修改，將材積-密度經驗方程引入，使用不同的相對密度指標與林木大小變數，進而將森林生產理論家加整合。到 1990 中後期，使用較早的模擬方法，發展不同樹種之 SDMD，包括混淆林分的發展林分密度為單位面積上林木疏密程度，也就是林木疏伐量占林地生長面積的程度。林分密度可顯示林木在該地位的生長狀態，以及顯示林木彼此之間的競爭程度。收穫量為平均單木材積與密度相乘之積，假設生產要素相同時，

一般密度越高之林分利用地力越高，林分蓄積量也越高，但栽植密度高之林分多為小徑木，對生產木材之經濟價值反而無助益，如 28 年生之臺灣杉林分，每公頃密度 1,111-4,444 株之蓄積量漸增為 382-660 m^3 ，胸徑漸減為 27-20 cm (陳麗琴等，1996)。林分密度管理可視為天然疏伐之延伸，林木若不加以管理，因逐年天然生長致使競爭日益漸增，最終仍導致天然疏伐，過份擁擠之森林，將造成樹幹纖細。研究林分密度管理，可瞭解林木在不同時期密度之變化，以適時規劃疏伐作業之施行。

(八) 人工林疏伐監測與其效益

臺灣禁止砍伐天然林之後，人工林之經營對林木生產而言相對重要，透過疏伐作業可提供更多樹冠孔隙與樹冠層空間，加速枯枝落葉層分解，使土壤更加肥沃增進林木生長；改善留存木的生長空間，提升林木品質；而對於生態環境亦可使昆蟲、鳥類與小型哺乳類有更多空間使用。雖然人工林無法完全取代天然林之功能，但仍舊可以提供合適之環境給野生動物棲息(Reitsma et al., 2001)。例如 Donner and Running (1986)藉由疏伐前後之黑松林地進行比較，發現黑松林因葉片光合作用與光照增強造成其季節性光合作用速率比未疏伐之區域高 21%。Waltz and Covington (2004)於美國亞利桑那州進行疏伐作業，疏伐後發現，樹冠孔隙所造成之光度增加可提昇蝴蝶多樣性與豐度。Ohsawa (2004)人工林疏伐後所增加的樹冠層空間可增加某些鞘翅目昆蟲之多樣性，且偏好闊葉樹種之甲蟲亦會出現。Hagar et al. (2004)疏伐後使樹冠孔隙增加，使林分被草本灌木植物更能夠生長良好，進而提供鳥類所需食物與棲息環境，有助於增加鳥類的多樣性。袁孝維等(2004)棲蘭山檜木林枯立倒木整理移除作業，造成林地孔隙增加，確實對鳥類活動分布造成影響，但整體而言僅是改變棲地上的鳥類組成。Sullivan et al. (2005)人工林透過疏伐作業有助於提昇小型哺乳類多樣性與豐度。

而在林木生長方面，因植物生長受生育地各項因子所影響甚大，若林地內各種生育地因子無法發揮其最大效益，需要藉由人為來進行

調節或改進，即可稱為林地之撫育或維護，育林者常藉由控制林分組成與林分鬱閉度，達到調節與改進生育地因子之目的，以利於林木生長、發育、分布與更新等(王子定，1964)。鬱閉之林分經疏伐後，林地內部光度增強，氣溫上升，使土壤含水率增加，有助於林木光合作用。而傘伐施行分期伐之目的，在於增進有效因子之作用，增強光合作用之活動，有利於林分更新使其可快速建成幼林(王子定，1964)。

實施疏伐作業可減少林木根系對於土壤之競爭，並且調節與改進其生育地因子，雖然疏伐作業可提供更多陽光進入林地內，但其主要作用，則是在減少林木間之競爭，增加土壤與水分之供給。疏伐林地表枝葉層之分解速率相較於未疏伐之林地而言較為快速，分解枯枝落葉層後更可使土壤更加肥沃，利於林木生育(王子定，1964)。

人工林之物種組成雖然較為單純，理論上不利於生物多樣性之維持與保護，但透過許多人工林植群更新動態研究報告可知，實際上人工林中還是保有許多植物群落多樣性(游漢明等，2008)。林木之生長隨著林齡而改變，若錯過最佳撫育時間，即使施行疏伐撫育作業，對保留木而言，也不易再去利用此資源，即增加林木胸高直徑生長之疏伐效益會隨林齡增加而減少(楊榮啟等，1976)。林子玉等(1972)調查經疏伐後4年之杉木人工林生長情形，根據其研究結果顯示，疏伐對平均樹高無顯著差異，但對總材積生長量與胸高斷面積總生長量有顯著差異，且與疏伐強度成正比。

臺灣杉樹形高大且材性優良，因此人工林之經營應以生產長伐期高品質之大徑材為目標，而期中撫育之施行，則應以培植幹材為導向。在人工林疏伐及修枝試驗中，強度疏伐(斷面積保留 $30 \text{ m}^2/\text{ha}$)和中度疏伐(保留 $35 \text{ m}^2/\text{ha}$)處理，均可明顯增進臺灣杉林木胸徑和樹高的生長，並提高林分胸高斷面積和材積之生長量，強度疏伐對斷面積和材積之生長潛能具最大助力，至第5年時其生長曲線仍呈顯著上升之趨勢，而其他處理已呈平緩現象，因此，就疏伐撫育目標而言，強度疏伐應為最佳之疏伐度。另外臺灣杉林木之側枝眾多，未作修枝之對照區林木，冠層下方之側枝約於11年生時即逐漸乾枯，但至19年

生時其枯枝仍殘留於幹上而無法自助脫落，致成死節，此點顯示臺灣杉人工林實施人工修枝確實必要(鍾旭和等，1992)。在碳吸存效益方面，臺灣杉人工林不同強度疏伐試驗，若將疏伐之林木搬出利用，以林產品之形式儲存，則二次疏伐累積之淨碳吸存量加上疏伐木之碳貯存量，至 40 年生時，強度疏伐區之碳吸存量為對照區的 140%，中度疏伐為對照區之 127%，弱度疏伐為對照區之 109%。而 50 年生之紅檜人工林疏伐強度分別為對照區(斷面積保留 52 m²/ha)、強度(30 m²/ha)、中度(35 m²/ha)及弱度(40 m²/ha)，經疏伐 25 年後，其每公頃之碳吸量和對照區之比，強度疏伐區為未疏伐區之 140%，中度為 130%，弱度 120%，且林齡愈大差距愈大，由此可知疏伐之效果(邱志明，2009)。

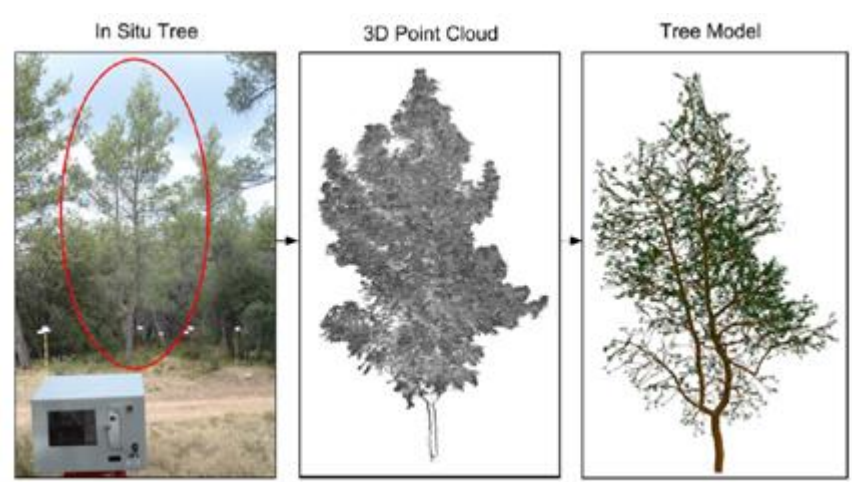
在水土保持方面，減少雨滴直接衝擊地表的樹冠層、地被、枯枝落葉層及腐質層，而後三者又可以增加水分入滲及減少地表逕流，運材時會造成土壤壓實及裸露，但疏伐降低鬱閉度後，可增加地被覆蓋度(陳明杰，2007)。

疏伐作業雖對林木生長有促進作用，且對生育環境的衝擊有限，由過去的疏伐監測研究，可顯示疏伐作業，不但未造成生物多樣性的降低，反而有利於生物多樣性的提升。由於疏伐作業為一高技術性的森林作業法，在林分密度控制、疏伐木的選擇及疏伐後的生態環境變化，必須設置監測樣區，以利於進行疏伐前後之林木生長及生態環境變異的監測。而如何有效快速收集監測樣區資料、如何分析資料以掌握疏伐效益資訊，為疏伐監測樣區設置之重要工作，而現今量測技術精進，透過光達系統，進行疏伐林分之樣木生長監測，以探討疏伐作業對林木生長效益評估，為本計畫執行之工作項目之一。

二、 高科技量測儀器在單木與林分監測之應用

(一) 地面光達系統在監測樣區測計之應用

傳統在紀錄林地樣區的資訊係以二維的方式呈現，而二維資料能提供的資訊非常有限，並無法再次的測量林分性態值。現今技術的突破三維技術以由土木工程、基礎建設、建築、考古、刑事鑑定以及管線、地形、土方、礦區、工程等測量漸漸應用於林業。三維重建模型皆以規則形狀的物體為主，具有一定的規則，但林木生長具有高度的多變性與複雜性，在重建上較為困難。目前有幾種方式可以重建模型，一種方法是利用人工測量並以手繪方式慢慢將模型建立，此種方法雖然普遍但卻較為費工，且較容易出現誤差，而另一種三維重建技術主要為利用地面光達掃描物體的精確座標，因為此種方法可得較高精確度。Côté *et al.* (2009)提出一個新的方法以地面光達來重建林木結構，在地面光達點雲中，此方法是健全的並且對於風相對不敏感，使重建物件得以密合，而依良好的拍攝目標分布進行結構屬性的量化估算，像是垂直的葉子與林木外型。由於在野外獲得可靠與精確估計參數是困難的，創新的估計法是選擇以地面光達重建以及將林木建立在虛擬的環境底下。而其估算的結果證明對於重建林木的模式產生其結構與雷射複製的可靠性，並以植物與林冠結構型態存在是合適的，如圖5。



林木現地狀況(左)林木三維點雲(中)林木模型(右)(Côté *et al.*, 2009)

圖5光達建置模型過程

Mariano et al.(2011)透過地面光達技術評估樹冠燃料之特性，包括了樹高、樹冠覆蓋與樹冠高度，透過地面光達可以多角度分析燃燒的方向及位置。

1. 高精度單木測計

地面光達可以提供表面特徵 0.05-10 cm 之更高的精準且細緻之單株立木三維空間資料。三維資料被產生，由一些系統提供一些資訊像是林木與每個樹高可以被影像萃取或其他變因(Omasa et al., 2002 ; Urano and Omasa, 2003)。Hosoi and Omasa (2006)利用地面光達拍攝殼斗科單株立木，拍攝落葉前與落葉後之影像進行四個相同位置(a-d)比對可進行落葉量與葉面積指數之探討，結果顯示地面光達所提供之影像解析度為 8 mm，如下圖 6。

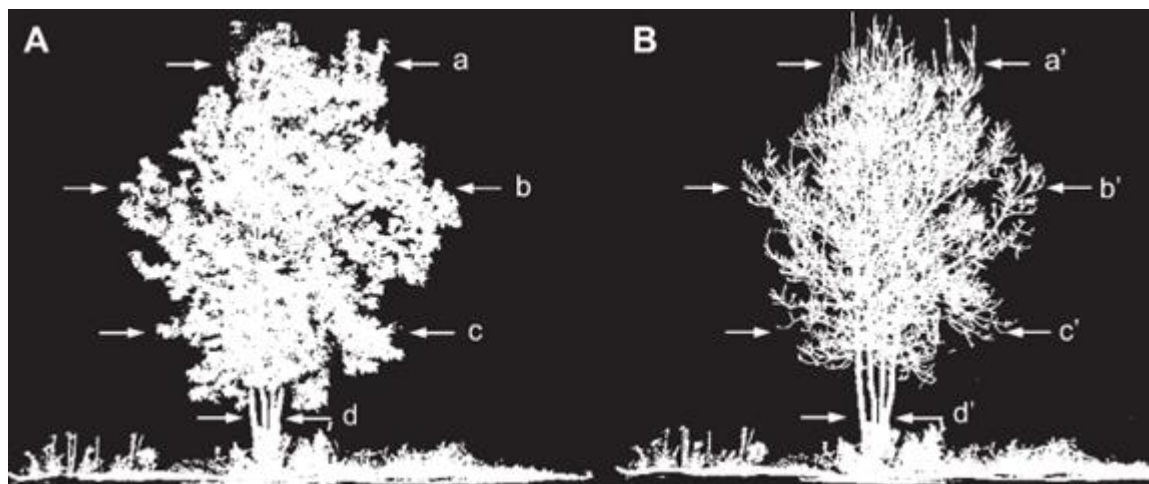


圖 6 殼斗科單株立木三維點雲資料(A)落葉前(B)落葉後(Hosoi and Omasa, 2006)

註：a-d 為落葉前之四個位置，a' -d' 為落葉後之四個位置

目前臺灣在利用地面光達於森林內進行探討之部份以樹高為主，陳永寬等(2005)運用地面雷射掃瞄系統進行樹高估算，發現量測樹高最佳準確度，可達全株實測高度之 5%以下，也希望未來進一步發展適合臺灣之演算法，進行樹幹剖面、胸高斷面積、枝梢率、樹冠直徑與地上部生物量等議題之探討。

2. 樹冠動態變化監測

疏伐作業對林地保留木而言，最直接能提供之益處為增加生長空間與減少陽光、水、養分之競爭，使林木可生長的更好。Makinen and Isomaki (2004)透過不同強度進行歐洲赤松之疏伐作業發現，疏伐區林木死亡率低於未疏伐區域，並且疏伐區之林木直徑級隨著疏伐強度提高而有增加的現象。未施行整理作業與施行整理作業之區域若可以以鑲嵌式的方式交錯處理，在大尺度地景的多樣性之下，對野生動物之生物歧異度不見得會造成負面影響，係因各種物種對於生態棲息環境之需求不盡相同(袁孝維，2002；袁孝維，2001)。

由此可見疏伐作業會對生態系所造成改變，故疏伐作業之監測對於森林而言格外重要。Suter(1993)監測之意義在於長期計量環境特性，以確定環境品質在某些方面的現況或趨勢。

Hosoi and Omasa (2006)藉由影像處理可將相同位置之點雲萃取出來，利用立體結構之立體像素(Voxels)，進行相同位置落葉前後之點雲剖面統計分析，以探討葉面積變化情況，故透過地面光達監測樹冠結構之改變，如圖 7。

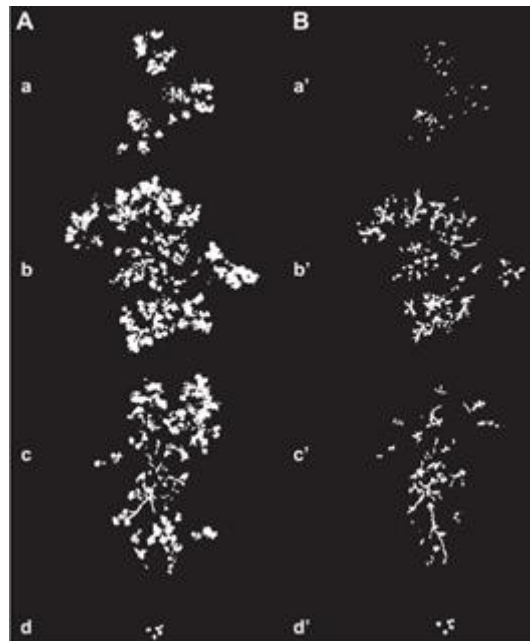


圖7殼斗科單株立木點雲剖面資料(A)落葉前(B)落葉後 (Hosoi and Omasa, 2006)

3. 立木位置及林木競爭

人工林生長量為一動態變化現象，必須透過精密的測量樹高與胸高直徑資料，才能掌握其動態變化資訊；運用地面光達可快速且準確獲得目標物之高密度點雲座標，對林木而言，不需透過調查立木樹高與胸高直徑，即可利用不同時期之三維立體空間立木圖估測林木材積或進行樹幹解析，獲得年生長量，即可求得樣區內總材積生長量與地被植物生長情形。

利用地面光達掃描全區林木最大之困難點，通常在於林分密度過高，當林分密度過高時，必須透過更多個點進行點雲資料拍攝，再將所有點雲資料以座標概念重組全區資料。Omasa *et al.* (2002)透過地面光達拍攝日本落葉松林，以獲得該區之點雲資料，進行立木距離、立木位置、植被分布與植被生長狀態之探討，如圖 8 所示。

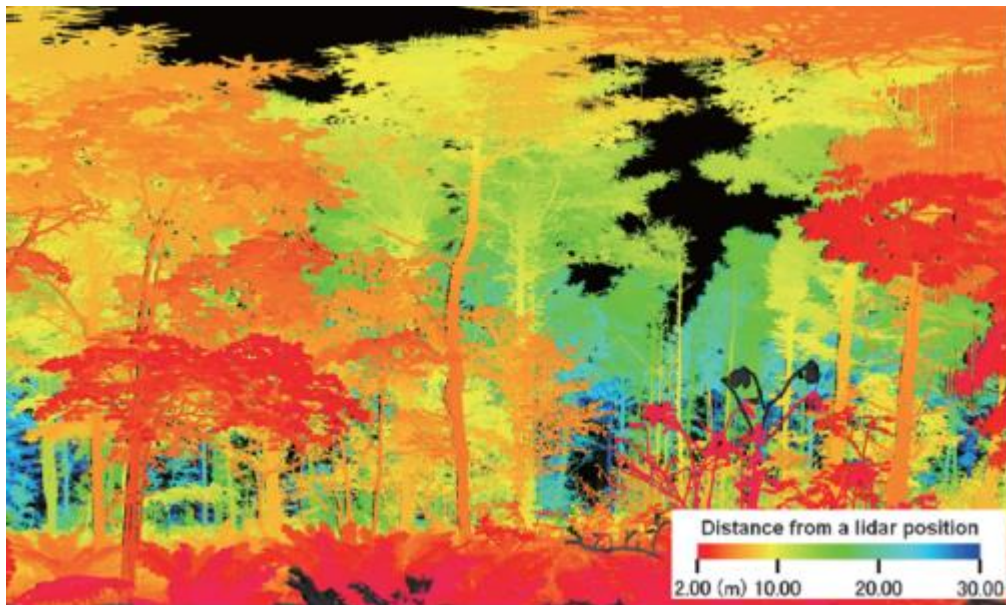


圖8日本落葉松林之精度8mm地面光達假色資料(Omasa *et al.*, 2002)

註：顏色代表距離(紅至藍表示近到遠)

4. 碳蓄積量、生物量估算及疏伐作業之應用

於森林地區進行調查的範圍有限，必須透過取樣的概念進行推

估。地面光達資料可精確呈現林地三維立體模型，可直接比較林木直徑生長及高生長狀況，對於樣區長期變遷監測頗有幫助；此外，亦可與空載光達、航空照片與衛星影像等空拍遙測技術相輔相成，以雙重取樣法進行林分材積之推估。

配合京都議定書所規定之條文，可透過森林資源達到碳吸存、碳保存與碳代替之減量目的，對人工林而言，更為重要，不同之經營策略對碳減量亦會造成不同影響，如疏伐時間、疏伐數量、疏伐木選擇與主伐時間等，故透過地面光達即可模擬各種疏伐情形所造成之影響。

Omasa *et al.* (2002)藉由地面光達資料建構日本落葉松林之立木位置圖，透過樹高與胸高直徑以圓柱體之方式表示林木分布位置與地上部碳蓄積量，如圖 9 所示。

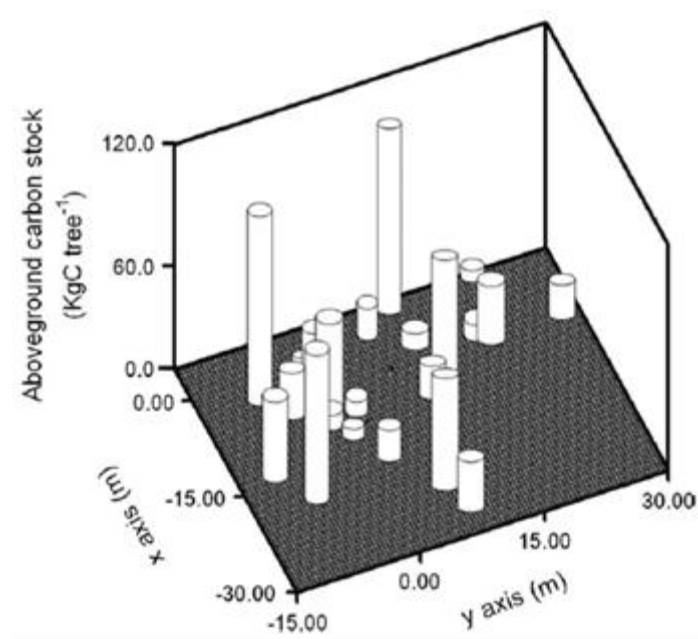


圖9日本落葉松林之立木位置圖與碳蓄積量 (Omasa *et al.*, 2002)

Keir and Gerald (2010)透過三腳架掃瞄系統(Tripod LiDAR)即地面光達進行葡萄掃瞄，其光達體積與真實生物量兩者間具有高度相關性，並且認為此種非破壞性的方法適合應用於其他果園或森林。

除了上述應用外，亦發展出許多有關生態系永續經營的應用面向，如應用地面光達永久記載林木結構，透過其參數測量森林立木結構(Simonse *et al.*, 2003；Hopkinson *et al.*, 2004)；單木葉子面積密度(Hosoi and Omasa, 2006)；測量林木冠層以及孔隙分布(Danson *et al.*, 2007)；利用地面光達重建林木樹幹與枝條 Pfeifer *et al.*, 2004；Cheng *et al.*, 2007；Côté *et al.*, 2009)。

(二) 非破壞性檢測儀在立木材質監測上之應用

在早期林木進行內部評估時，主要可分成兩種檢測方法，第一為破壞性檢測(Destructive Test, DT)；第二為非破壞性檢測(Non-destructive Test, NDT)，其兩者檢測方式差異極大。破壞性檢測是將林木砍伐下來擷取木材橫斷面進行觀測，此方法可直接觀測木材內部構造及腐朽程度但對於林木傷害為最大，也無法大面積的檢測；非破壞性檢測則是以不會破壞結構體之方式來檢測結構物內部之劣化現象及程度之一種檢測方式，其原理是藉著某種媒介物(Medium)，例如聲、光、電、磁等媒介進行間接之檢測，較其他一般直接檢測方式，更具靈敏與快速的特性。此檢測方式應用的範圍很廣，可用在橋梁、建築、木材、土木工程、馬路、森林、混擬土等方面上。

近年來非破壞性檢測方式逐漸取代破壞性檢測，應用領域亦相當廣泛，其中也包含森林及木材方面，檢驗之方式上有應力波、超音波、阻抗圖譜儀、音速分析儀、軟 X-ray 微密度計及透地雷達對根域範圍的評估等，皆可於林木健康上可進行評估生長情形、樹齡、主幹腐朽空洞及木材機械強度等相關健康指標，這些資訊亦可協助對林木健康指標更加瞭解並提供立地環境的改善，對珍貴林木施以必要的輔助措施使達到實質保護珍貴林木的目的。黃純夫(1983)指出國內一般常見的非破壞檢測種類有 20 種(表 1)，並依照不同對象物之性質有不同的延伸發展。

表 1 一般非破壞檢測法的種類

項目	種類	項目	種類
1	目視觀察法	11	過濾粒子測試法
2	敲擊法	12	紅外線照像法
3	聽診器法	13	微波檢測法
4	超音波檢測法	14	液晶測試法
5	射線檢測法	15	脆膜層測試法
6	中子射線檢測法	16	光彈性膜測試法
7	探漏檢測法	17	電阻應變劑測試
8	探針檢測法	18	滲透檢測法
9	音射法	19	渦電流檢測法
10	全像攝影術	20	磁粒檢測法

參、計畫目標

- 一、 探討當前人工林經營趨勢，蒐整目前林業經營於人工林經營及撫育之目標與方法，建立符合當前人工林經營趨勢及森林經營管理政策之綜合性效益評估模式。
- 二、 設置永久監測樣區，使用地面光達技術及非破壞性立木材質檢測技術，應用於人工林疏伐作業林分性態值監測，監測目標包括有單木及林分生長量、林分密度及生態環境變化，並將調查資料建立林分性態值資料庫，並進行後續相關資料分析。
- 三、 應用綜合性效益評估模式，建立林分密度管理模式，針對不同樹種、林齡或其它林分性態相關因子進行綜合評估。探討紅檜及臺灣杉人工林不同經營目的之中後期撫育之作業模式，並建立人工林疏伐作業之效益評估模式及林分密度管理模式。綜合以上研究成果評估疏伐撫育作業之綜合效益。
- 四、 將調查技術與方法移轉予機關，建立一套調查作業流程及標準化表格，針對此作業流程進行室內 3 小時之課程，以及戶外實習 4 小時課程，並將調查照片、課程照片及影音資料彙整至成果驗收中。

肆、工作項目

一、研究流程

本研究針對未疏伐或已疏伐之臺灣杉及紅檜人工林地，蒐集疏伐前之樣區資料及疏伐木之樣木資料，分析疏伐前林木性態值，推估原本蓄積量及採伐量。針對疏伐後之林地，設置樣區監測，總共設置 8 個 0.05 公頃樣區。

樣區調查加入林木健康調查項目，除了既有的胸徑、樹高、樹冠幅及枝下高等資料，加入活冠層比、樹梢枯損及根部枯損之項目，透過因素分析建立單株林木之健康度。同時也針對生立木進行非破壞性立木檢測，使用兩種儀器，分別是數位探針式木材強度檢測及敲擊式立木內部檢測，分析木材力學強度及木材內部腐朽暨中空程度。

所選之單一樣區以光達掃描拍攝，並同時拍攝彩色環景像片進行點雲染色，提升點雲視覺化程度，林分光達資料進行立體結構分析，除傳統調查項目外，亦可從三維結構中推估更接近真值的單木材積、樹冠投影面積及相位關係，以探討林木於垂直及平面空間上之競爭。

所得之文獻回顧、調查及分析結果，探討中後期撫育之作業模式及林分密度管理模式，並綜合評估疏伐作業效益，過程編入疏伐調查作業流程及訓練課程，彙整於成果報告中呈現，研究流程如圖 10。

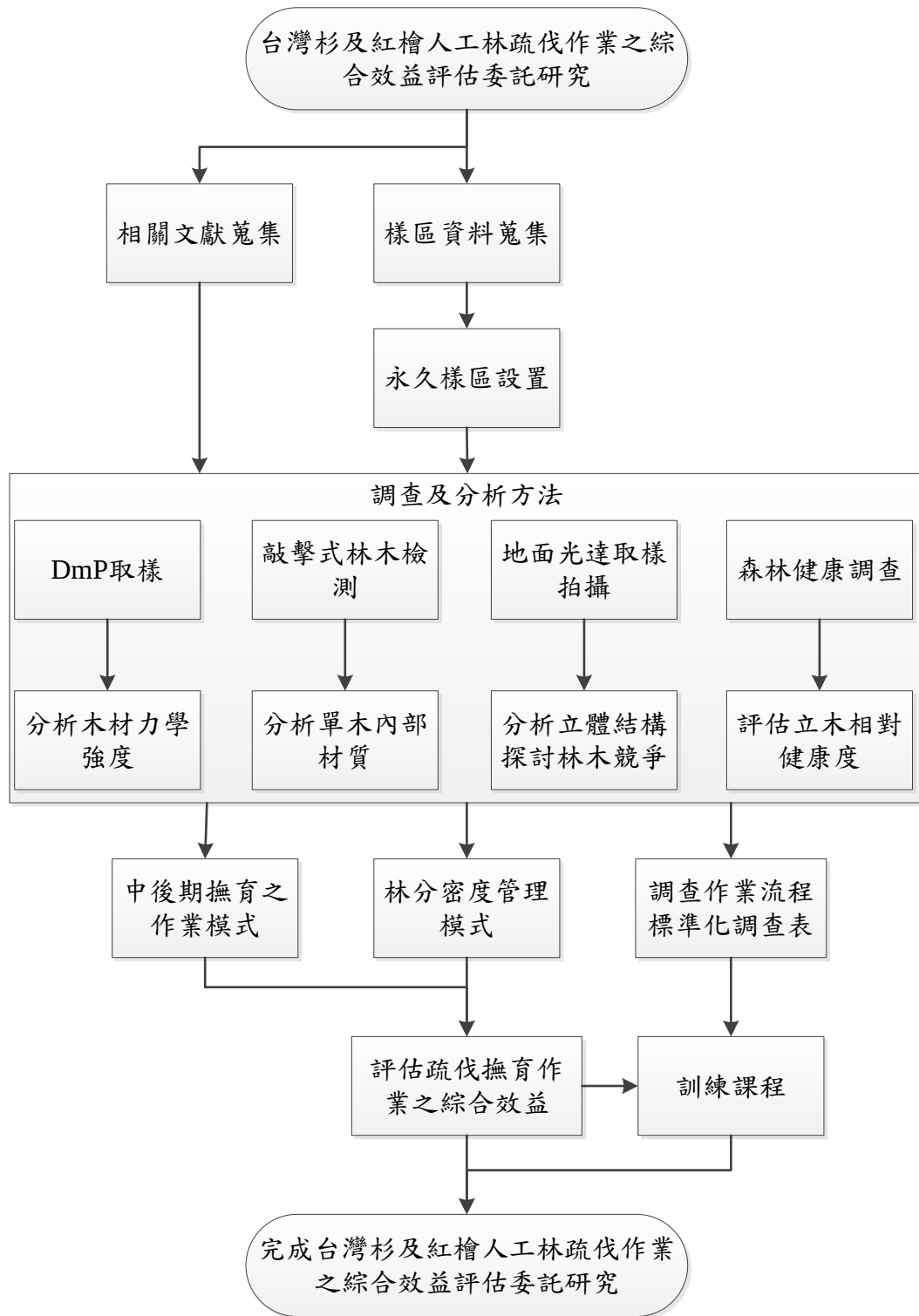


圖 10 研究流程圖

二、 研究區域概況

本研究區域沿小關山林道至屏東林管處管轄之荖濃溪事業區。荖濃溪主要由唯金溪、拉克斯溪、寶來溪、邦腹溪、濁口溪、馬里山溪、萬山溪等匯集而成，地勢由東向西逐漸緩降，呈現險緩斜型，主要山脈為關山(3,668 m)、小關山(3,249 m)、卑南主山(3,294 m)、出雲山(2,772 m)、遙拜山(2,415 m)、東藤枝山(1,805 m)、新集山(1,560 m)，區內高低起伏較大，最低處為屏東縣茂林鄉海拔約為 390 m，最高處為關山海拔約為 3,668 m。

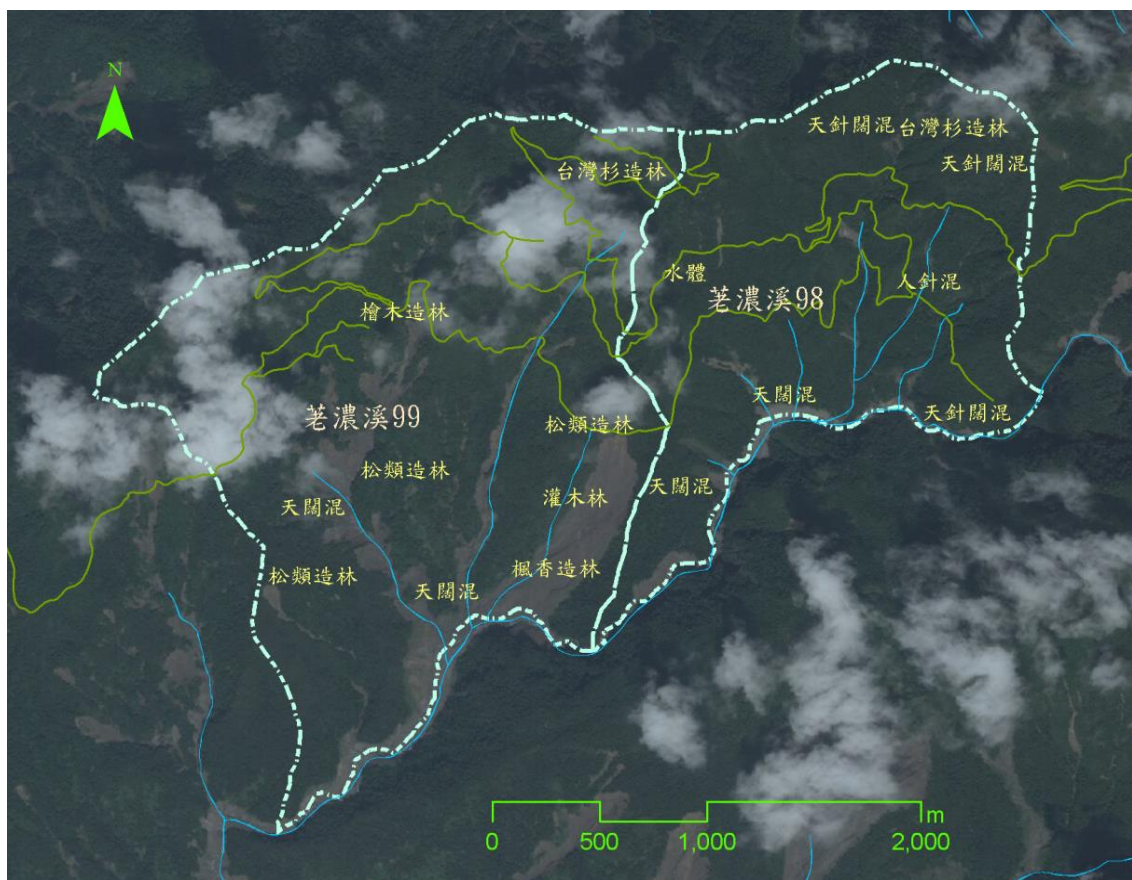


圖 11 荖濃溪事業區 98 及 99 林班

氣候方面，六龜區位於高雄市東北部，東鄰桃源區、茂林區，西鄰甲仙區、杉林區、美濃區，南接屏東縣高樹鄉。六龜區位居屏東平原與中央山脈之丘陵交會地，地處六龜地塹帶，荖濃溪縱谷西岸河階上，南北狹長。本區在氣候上屬熱帶季風氣候，高溫多雨，年均溫為 23°C，每年 5-9 月為雨季，降雨量全年約 1,500-2,000 mm。年平均最

低溫為 21.6℃，年平均最高溫 28.4℃。而小關山林道位於北回歸線以南，屬亞熱帶型氣候區，全年平均溫度等溫線，以 20℃ 等溫線與海拔 1,000 m 等高線相疊合，10℃ 等溫線與海拔 2,500 m 等高線相疊合，而 1,000 m 以下則隨季節變化常在 20℃ 上下之間。年雨量約 2,700 mm，年平均降雨天數約 140 天，5-9 月為雨季，降雨量佔全年總雨量 85%，10 月至翌年 4 月為乾旱季，雨量相當集中，降雨分布不均，海拔越高之處降雨量越高。

土壤與植物資源方面，荖濃溪事業區土壤以砂壤土(Sandy Loam)為主，壤土(Loam)次之，土壤深度及濕度均適中，小關山以北地勢急峻，表土淺，多以石礫為主，小關山以南濕度高、坡度緩。海拔高 2,500 m 以上區域除了棕色森林土以外，有乾性、濕性灰化土及石質土。其中灰化土出現在 2,800 - 3,000 m，其特性為土壤表面之枯枝落葉層產生有機酸，隨雨水滲入土壤中，將土中鐵、鋁離子析出，而沉積在酸性較弱之 B 土層中，並氧化成顏色鮮艷之鐵鏽色，顏色鮮艷，而表土中之 A2 層溶脫後，存留矽化合物呈灰白色。

荖濃溪事業區海拔高度差異較高，故依照臺灣植物垂直分布區分，包括熱帶林、暖帶林、溫帶林與寒帶林等天然林與人工林，熱帶林分布範圍為海拔 500 m 以下，主要樹種包括楠木類、榕屬類、茄苳、九芎、無患子、木棉、油桐、野桐、山黃麻、竹類與其他闊葉樹等；暖帶林分布範圍為海拔 500 - 1,800 m，主要樹種包括松類、臺灣檫、紅檜、肖楠、臺灣杉、杉木、柳杉、竹類等人工林，天然林則以樟類、楠木類與殼斗科等混交林為主，松類、紅檜、鐵杉等混交林為次要；溫帶林分布範圍為海拔 1,800 - 3,000 m，主要天然林林相以樟類、楠木類與殼斗科為主，次要為松類、紅檜、鐵杉與臺灣杉等所組成，珍貴樹種包括紅豆杉與牛樟，人工林則為紅檜、臺灣杉、松類與雲杉等；寒帶林分布範圍為海拔 3,000 m 以上，以雲杉、松類為主，鐵杉、樟楠類、殼斗科與其他針葉樹次之(行政院農業委員會林務局屏東林區管理處，1994)，目前積極進行復育造林、人工林疏伐及林下栽植試驗。

三、 地面樣區規劃

樣區設置根據先前疏伐之樣區的系統，選定合適的疏伐樣區進行調查。運用主管單位提供之先前疏伐調查之基礎資料做為參考之依據，進行後續樣區調查及資料分析之依據。

8 個 0.05 ha 樣區分別設立於未疏伐區、96 年兩個、97 年、98 年、101 年、102 年級 103 年之疏伐區域，其疏伐時間通常為案號之翌年完成。

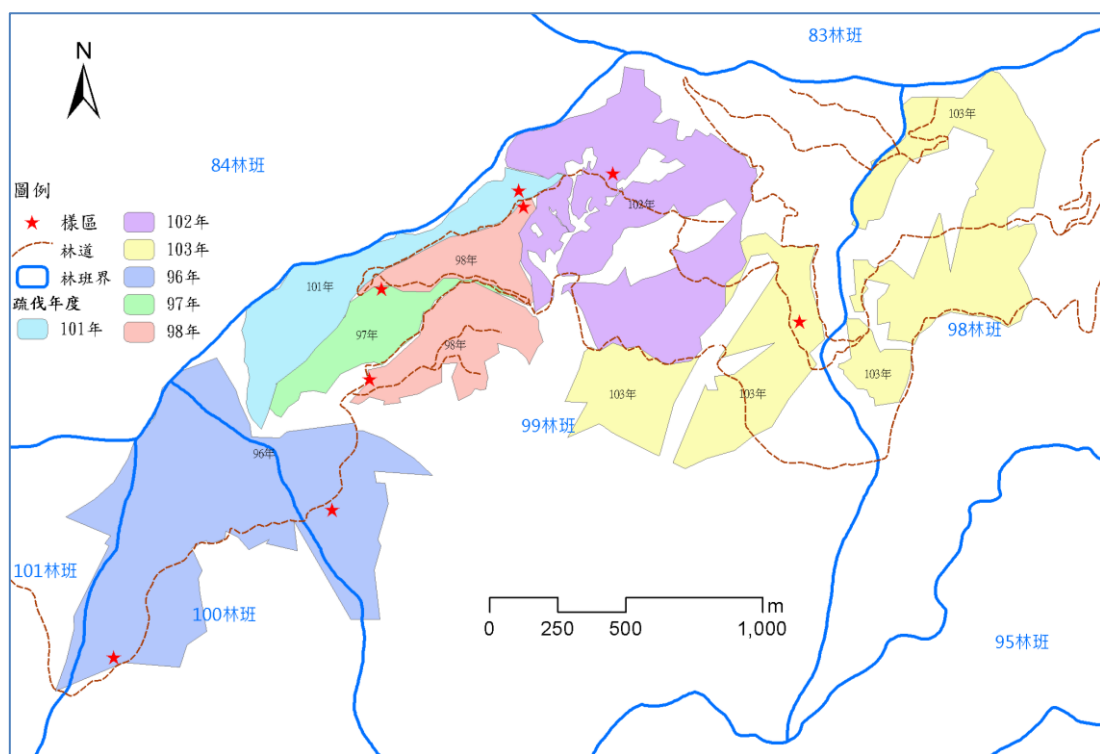


圖 12 荖濃溪事業區 98-100 林班已疏伐位置

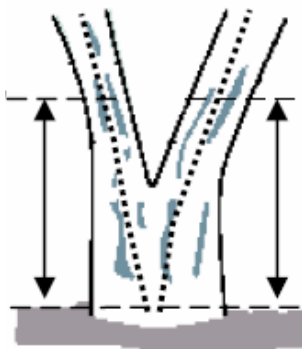
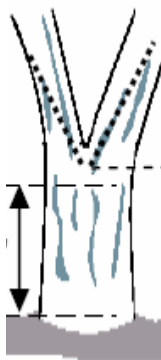
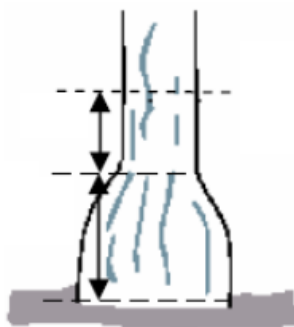
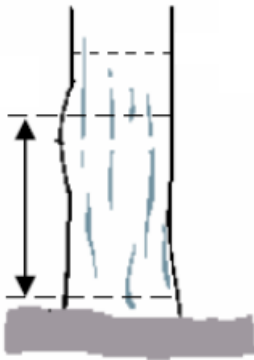
樣區基本資料可分為樣區基本資料與每木調查(每木屬性)兩大項，樣區基本資料包括樣區記敘資料(樣點編號、林區代碼、事業區代碼、林班、調查日期與樣區面積)、座標系統(GPS 橫座標、GPS 縱座標與座標系統)、位置資料(海拔高、坡度、土地利用型、地形、造林年度、樹冠密度、林分級、主要地表物、次要地表物、地表植物密度、地表植物高度、土壤性質、土壤濕度與土壤含水率)、環境資料(溫度、濕度與葉面積指數)。

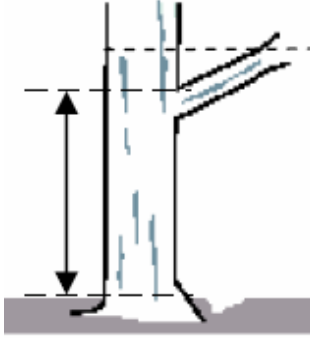
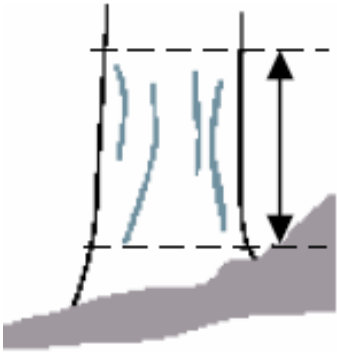
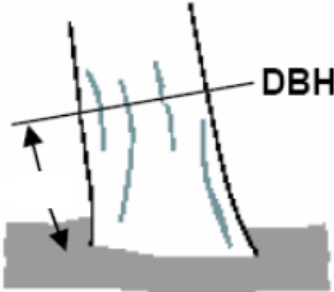
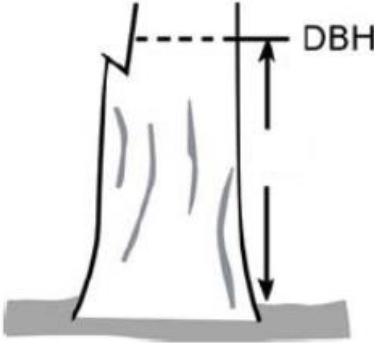
樣區立木資料係透過全站儀、光達掃描之相對座標輸入 ArcGIS 套裝軟體繪製立木位置空間分布圖，透過座標進行樣區內每木屬性(樹種、胸高直徑、樹高、樹冠高、樹冠級與林木健康度等)串連到立木位置圖之屬性表欄位，即可透過 ArcGIS 套裝軟體探討立木空間位置相互之間之關係與快速查詢立木屬性資料。

胸高直徑測量方式參照美國農業部林務署(United States Department of Agriculture Forest Service)之標準，以地面垂直向上約 4.5 feet(約 1.3m)為標準，透過胸高直徑尺進行直徑測量，並記錄數據至小數點第一位，若有藤本或附生植物應予去除後，再進行測量。當林木生長特殊時，必須配合生長方式進行測量，大致可分成林木分岔、根株萌芽、基部膨大、胸高直徑處生長不規則、生長於斜坡、林木傾斜與樹幹剝皮凹陷等(United States Department of Agriculture Forest Service, 2007)。

依照分枝髓心連線交點若於 0.3 m 以下或表面分岔點在 1.3 m 以下，則分枝皆測量；若交點介於 1.3-1.6m，則向下避開膨大節點，量測 1m 處；當林木基部膨大時，測量膨大結束處上方 0.3 m 處；若林木 1.3 m 處出現不規則生長，如有結、膨大、凹陷(樹皮剝落)與分枝等現象，則直接測量不規則生長處上方不受影響之正常生長處；若林木生長於斜坡處，則以斜坡上方處為基準，進行 1.3 m 處測量；若林木生長歪斜成傾斜狀態，則依照傾斜角度成直角於 1.3 m 處測量；當林木樹幹出現剝皮凹陷之現象，則直接測量 1.3 m 處(表 2)。

表 2 不同生長類型胸高直徑量測方法

生長情形	測量方式	圖示
林木分岔 (根株萌芽)	分枝髓心連線交點若於 0.3 m 以下，量測每段分支，註記同株。	
林木分岔	分支髓心交點介於 1.3-1.6m，向下避開膨大節點，量測 1m 處。	
基部膨大	1.3 m 以下具板根或明顯膨大，上移 0.3-0.45 m 量測。	
胸高直徑處生長不規則	1.3 m 有結或膨大，上移 0.3-0.45 m 量測。	

生長情形	測量方式	圖示
分枝	避開分支部分。	
生長於斜坡	以上坡面計算胸高。	
林木傾斜	平地時，以距離地面最近之胸高。	
樹幹剝皮凹陷	量測無剝落或均質之直徑。	

四、 林木競爭指數

林木競爭指數主要可以分成距離獨立(Distance Independent)競爭指數，其不考慮林木空間分布情形，將林木視為均勻分布狀態，以及距離從屬(Distance Dependent)競爭指數，此競爭指數會考慮林木空間分布情形，其對於模擬會有較佳結果(Porte and Bartelink, 2002)。

本研究探討距離從屬之競爭狀態，故以 Hegyi 指數(式 2)，利用固定搜尋半徑 3.05 m 為搜尋半徑，將範圍內之林木選為競爭木(Hegyi, 1974)，再計算其競爭指數，代表林地內林木競爭情形，並透過地面調查之胸徑與立木距離資料，與地面光達所獲得之資料，計算距離從屬競爭指數，並以 T 檢定探討兩者間競爭指數之關係。

$$CI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_j}{D_i} \right) \times \left(\frac{1}{L_{ij}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

D_i 為主體木之胸徑(cm)， D_j 為競爭木之胸徑(cm)， L_{ij} 為競爭木 j 與主體木 i 之間的距離(m)。

五、 林木健康調查

林木健康度的評量參考國內外森林健康文獻，藉由同行審查、專家意見作為選用指標的重要依據，並透過野外實際操作後，選出適合國內鄉村及平地樹木健康監測的一套規則，而健康指標的建立在未來及有潛力成為研究林木健康及了解衰退現象的最佳工具。

(一) 林木健康調查

表 3 為健康調查指標及評分標準，主要以視覺判斷為主，準確的將林木進行健康評分，其中根部依受害情形的不同分為 4 級；冠層狀態為落葉比例，分為 7 級；冠層密度為枝葉層之密度百分比，分為 11 級；樹冠枯梢為末端開始之乾枯狀態，是發生於枝梢末端持續朝向樹幹或由樹頂向下縱向的枯死，分為 8 級；樹冠重疊為立木與鄰木的冠層重疊情形，分為 7 級；活冠層比是活枝條佔樹高的比例，分為 9 級；另外有無新葉及葉無退色各分為 2 級，上述 8 項健康指標調查項目在野外調查時由專業人員進行評估。

表 3 森林健康觀測分級項目

I 根部		II 冠層狀態		III 樹冠密度		IV 樹冠稍枯		V 樹冠重疊		VI 活冠層比例			
3	正常	6	無落葉	10	95%	7	無	6	上層木	8	91-100%		
2	裸露無傷	5	25%	9	85%	6	1-15%	5	與鄰木樹冠重疊少於 1/4	7	76-90%		
1	裸露有傷	4	26-50%	8	75%	5	16-30%	4	與鄰木樹冠重疊等於 1/4	6	61-75%		
0	根部死亡	3	51-75%	7	65%	4	31-45%	3	與鄰木樹冠重疊等於 1/2	5	46-60%		
		2	76-90%	6	55%	3	46-60%	2	與鄰木樹冠重疊等於 3/4	4	31-45%		
VII有無新葉		1	90%以上	5	45%	2	61-75%	1	樹冠完全被覆蓋	3	16-30%		
1	有新葉	0	枯死	4	35%	1	76-90%	0	枯死	2	1-15%		
0	無新葉			3	25%	0	91-100%			1	完全落葉		
VIII葉無退色				2	15%					0	枯死		
1	無退色			1	5%								
0	退色			0	枯死								

根部損傷指標為重要解釋因素之一，主要評估林木根部之健康狀

態與否，並給予健康等級，評估時依據林木間盤根、根部裸露及根張等情形產生，會導致林木無法吸收養分與水份，容易影響林木的健康狀態評定。由於根部裸露及根外部受傷情形，容易以肉眼判釋，但其生長於土中根部之受損情形，無法以肉眼判釋，但如根部有受損則易反應於冠層上。依根部受害情形的不同，分為以下四級，分別是代碼 3:正常無損傷(根系完全埋在土中)；代碼 2:根部裸露但無損傷(板根、氣根類等，只要根系裸露出地面亦算)；代碼 1:裸根有損害(板根、氣根類等，只要根系裸露出地面有損傷情形，例如磨損、病害、天然災害造成等)；代碼 0:根部死亡。

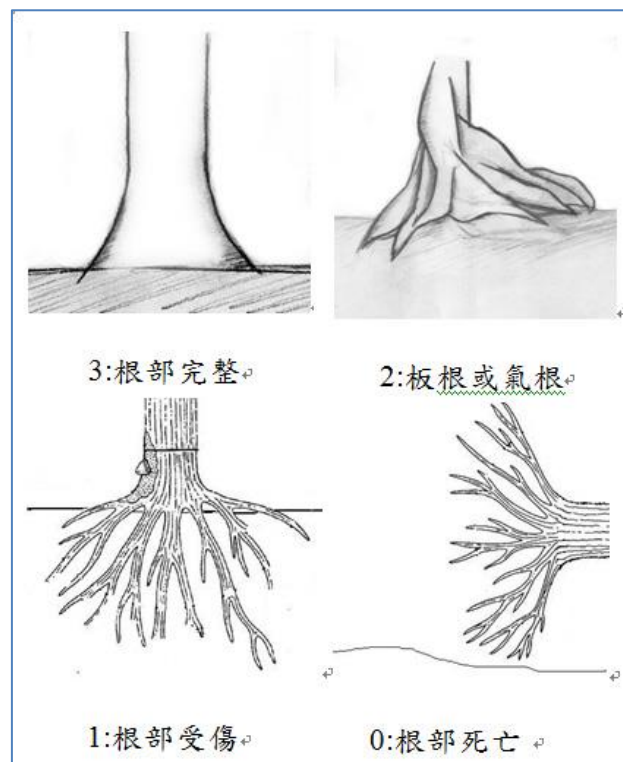


圖 13 根部狀態判定圖

冠層狀態為活冠層以上的落葉情形，受生長季節或病害影響，適合評估常綠樹種，並依照不同落葉情形給予分級，葉子掉落程度越嚴重，代表林木活力愈低落，表示林木遭受劣化的影響，並且可明顯的辨識出落葉所佔比例。

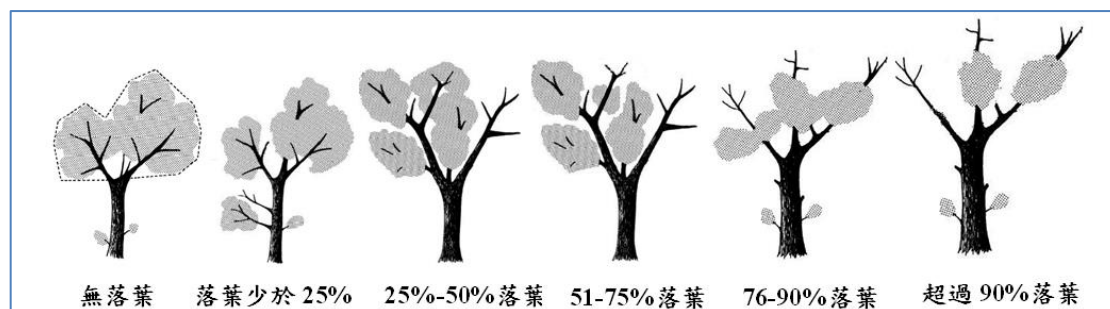


圖 14 冠層狀態示意圖

樹冠密度之測定，主要利用所製作之透明卡套疊於冠層上，計算活樹冠正常有葉透光之孔隙率及樹冠缺失百分比，並扣除樹冠重疊的部分，與林木活力有強烈的相關性，樹冠密度越高，則表示樹冠之活力愈健康，因此可藉由此透明卡精確的評估。

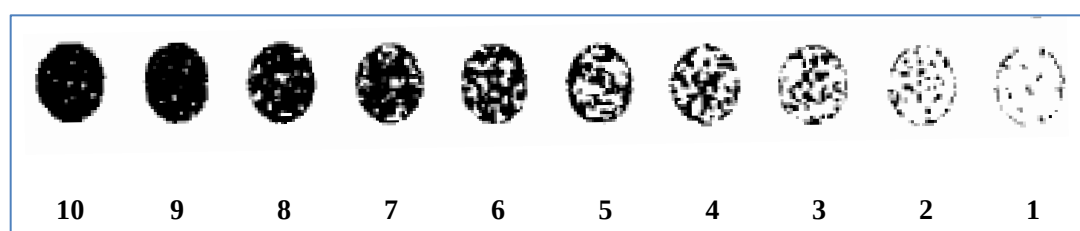


圖 15 樹冠密度示意圖

樹冠梢枯以整株林木的枯枝佔整個冠層的比例，發生於橫向枝稍末端持續朝向樹幹或由樹頂向下縱向的枯死，常出現在樹冠上半部和外部，樹冠梢枯是林木衰退徵兆敘述的最佳特徵。

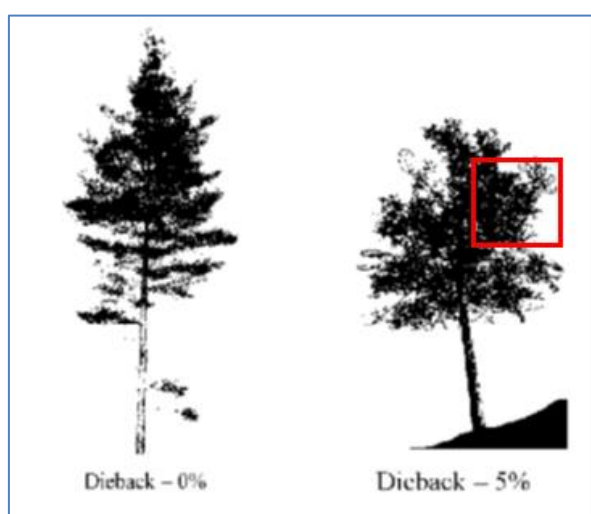


圖 16 樹冠梢枯判定圖

活冠層比指標為生長葉至樹冠頂佔整株林木之比例，而不包含枯萎及枯死的枝條，纏繞林木的藤蔓類植物亦必須排除在活冠層比的計算內，活冠層的取樣會因林木的樹高不同而不同，其活冠長比例愈低則表示活力愈低，活冠層比的計算方法如所示，林木實際總長度視為 y ，活冠層比率視為 x ，將 x 除以 y 乘以 100 就可得到活冠層比率。為活冠長佔全樹高的比例，此變數易顯現出林木活力。

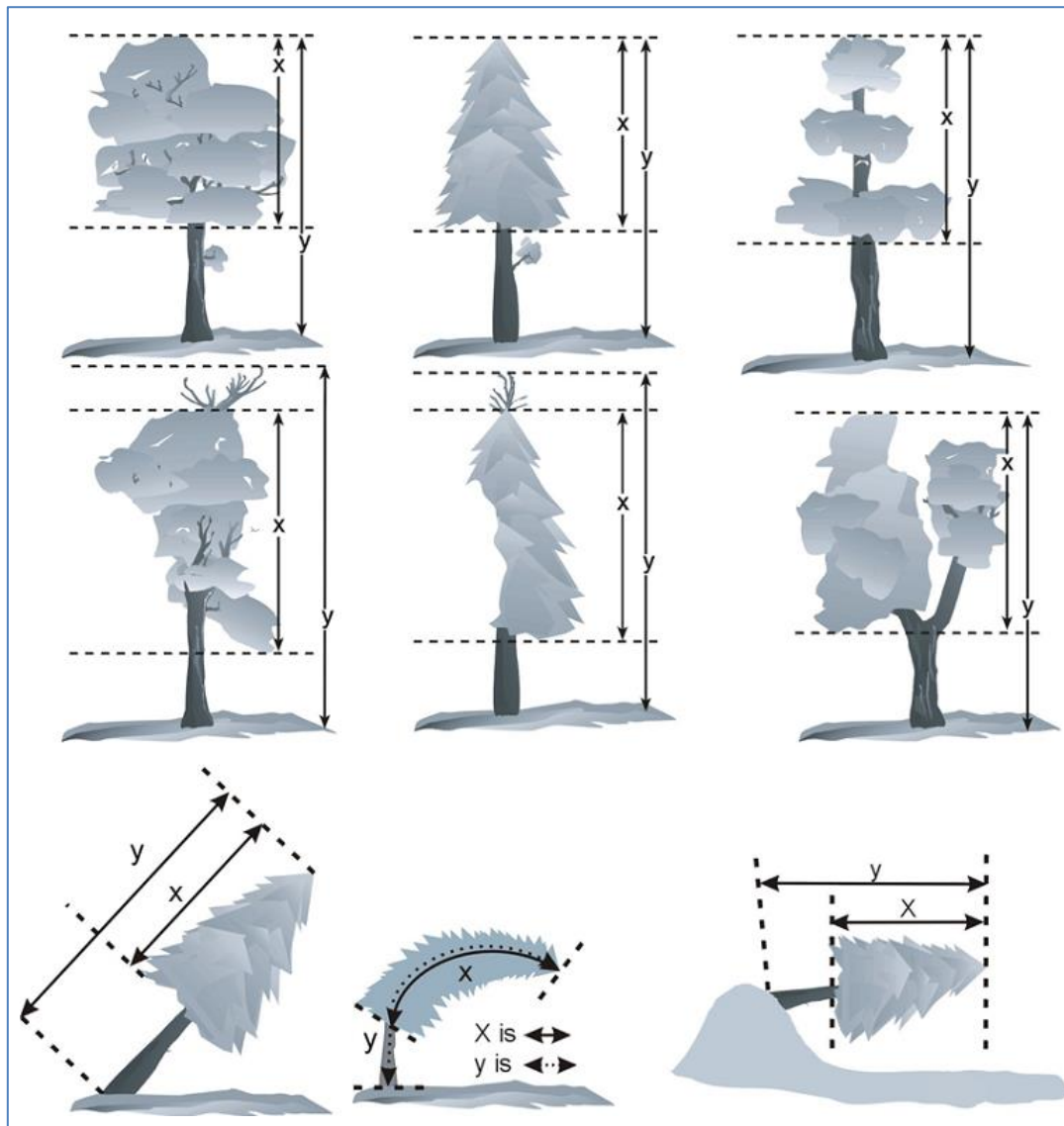


圖 17 活冠層樣式及量測位置

(二) 林木健康調查資料分析

透過量化指標與可實測的變數，進行個別林木健康狀態的評估。林木健康形態是無法經由人為主觀決定其健康程度，但可經由各種指標加以衡量，如根部有無損傷、落葉的程度及枝梢枯萎等，以整體性的觀點判定林木健康的優劣，將是進行森林健康調查的重點。

為簡化計算方式，8 項評估分數以加權方式計算，公式為(根部損傷/4+冠層狀態/6+樹冠密度/10+樹冠枯梢/7+樹冠重疊/6+活冠層比/8+0.5+有無新葉/2+葉無退色/2)/7。

$$FH = \left(\frac{I}{4} + \frac{II}{6} + \frac{III}{10} + \frac{IV}{7} + \frac{V}{6} + \frac{VI}{8} + \frac{VII}{2} + \frac{VIII}{2} \right) / 7 \dots\dots\dots (3)$$

六、疏伐監測樣區之林分結構及地面光達掃描

(一) 林分結構分析

疏伐後之林分結構改變，將促使留存木加速生長，本研究從林分結構為描述一樣區胸徑大小的分布情形，以 Weibull 機率密度模擬胸徑頻度分布，3 參數之 Weibull 密度函數如式 17，a 表示位置參數，參數求解以 Cheng and Amin (1983) 提出之方法，b 尺度參數及 c 形狀參數以最大概似法求解時，須定義最大概似方程式，再以牛頓疊代法逼近參數值 (式 6)。

$$\text{Weibull}(x, b, c, a) = \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \dots\dots\dots (4)$$

a, b, c：模式參數

$$a = \frac{x_1 \cdot x_n - x_2^2}{x_1 \cdot x_n - 2x_2} \dots\dots\dots (5)$$

xi：依胸徑升序排列，第 i 株林木之胸徑

$$cp_i = -e^{-\left(\frac{DBH_i - a}{b}\right)^c} \dots\dots\dots (6)$$

cp_i：依胸徑升序排列，第 i 株林木之累積機率

(二) 地面光達應用於疏伐監測樣木之生長量測計

光達(雷射掃瞄)測量原理係透過三維空間中已知之座標與該點至地面點之向量(距離與角度)，透過飛行時間法(Time of Flight)，即可計算出其距離，再透過架站的已知點(X₁, Y₁, Z₁)，即可求出未知點座標(X₂, Y₂, Z₂)。光達點雲主要由許多點構成，每筆資料均由非常密集之點所形成，數量數以萬計，故亦稱點雲，資料中每個掃瞄點均離散分布，任意一點均具有準確座標，若點雲密度越高，則越能完美反應物體形狀，故可提供建立精確度較高之林木資訊，如樹高、胸高斷面積、樹冠幅與立木材積等。本研究使用的 3D 地面光達是由法國 Mensi SA

所製造的 Trimble GS200 系統。此掃瞄器可水平轉 360 度與垂直 60 度掃瞄。掃瞄距離為 2 到 200 m 之間的距離測量，儀器與目標距離 100 m，掃瞄的光源大小為 3 mm；測量距離的標準差為單束 6 mm，地面光達掃瞄速度為每秒 5,000 點。資料收集時，可透過校準影像快照擷取 768 × 576 像素之影像，點雲會依照其相對位置萃取影像中自然色資料，並自動產生於電腦中，方便觀測掃瞄資料與後續作業。

掃瞄之樣區大小為 20 m×25 m，共選定三個樣區，分別位於臺灣杉 96 年疏伐區、紅檜預定 104 年疏伐區及紅檜 98 年疏伐區。

地面光達之林地立木點雲資料，以 0.1 m × 0.1 m 之運算視窗，尋找視窗範圍內高程最低點之點雲，將其分類為地面點，其餘則為林木點；根據點雲空間分布狀態，以人工判釋方式選取每株林木位置，再依照點雲之自然色，去除樹葉與多餘的枝條，篩選出立木幹材。以地面點為基準，利用電腦自動化之方式切取離地 1.3 m 處之光達點雲橫切面，三維立體立木模型幹材部份之胸徑圓盤點雲，並測量圓盤直徑與立木位置中心；亦依據相同方式測量立木樹高。

最大外切圓擬合法透過已知的各項座標值(X, Y)，求空間中未知三點 a_1 、 a_2 、 a_3 座標，以線性代數分離未知已知項目再用最小平方迴歸法求出擬合 a_1 、 a_2 、 a_3 ，擬和圓求中心後 再求各點半徑最大值 即可求最大外切圓。

$$\begin{aligned}
 x^2 + y^2 + a_1x + a_2y + a_3 &= 0 \\
 \Rightarrow \left(x^2 + a_1x + \frac{a_1^2}{4}\right) - \frac{a_1^2}{4} + \left(y^2 + a_2y + \frac{a_2^2}{4}\right) - \frac{a_2^2}{4} + a_3 &= 0 \\
 \Rightarrow \left(x + \frac{a_1}{2}\right)^2 - \frac{a_1^2}{4} + \left(y + \frac{a_2}{2}\right)^2 - \frac{a_2^2}{4} + a_3 &= 0 \\
 \Rightarrow \left(x + \frac{a_1}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{a_2}{2}\right)^2 = \frac{a_1^2 + a_2^2}{4} - a_3 \Leftrightarrow (x - a)^2 + (y - b)^2 &= R^2
 \end{aligned}$$

$$Q \text{ circle } _x = -\frac{a_1}{2}, \text{ circle } _y = -\frac{a_2}{2}, \text{ circle } _r = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2}{4} - a_3} \dots\dots\dots (7)$$

X、Y: 已知的各項座標值

a_1 、 a_2 、 a_3 : 未知解算值

Circle_x: 圓中心 x 座標值

Circle_y: 圓中心 y 座標值

Circle_r: 圓半徑值

七、非破壞性材質檢測法應用疏伐立木之健康度檢測

(一)數位探針式木材強度檢測

數位探針儀如圖 18，該儀器係利用配備馬達搭配手動推進，使探針鑽入林木中，測得林木對探針之鑽孔阻抗強度，並記錄阻抗強度之曲線分布，藉由阻抗強度分布曲線，探究林木材質變化。其儀器長 70cm，探針頭為扁平匙狀，長度為 250-1,000 mm(本研究採用 375mm)。其配備還包括充電式鋰電池及金屬電流探測器等，但此儀器須與電腦進行連線才能運作，並能以 1:1 比例表示出腐朽的空洞及木材年輪寬。

本研究所使用之 DmP 非破壞檢測系統，是利用配備的馬達驅動探針鑽入木構件中，測得木構件對探針的鑽孔阻抗強度。其探針頭為扁平匙狀，藉助此儀器與電腦連線，可瞭解木構件劣化之程度與損壞位置，可提供後續構件修復之重要參考資料，當探針遇到密度較高的部分時，鑽孔阻力增加，探針旋轉的次數就會增加，相對的當探針遇密度較低之木材時（如腐朽），鑽孔阻力下降，探針旋轉的次數便會減少。樣木取樣位置位於 1.3 m 處。

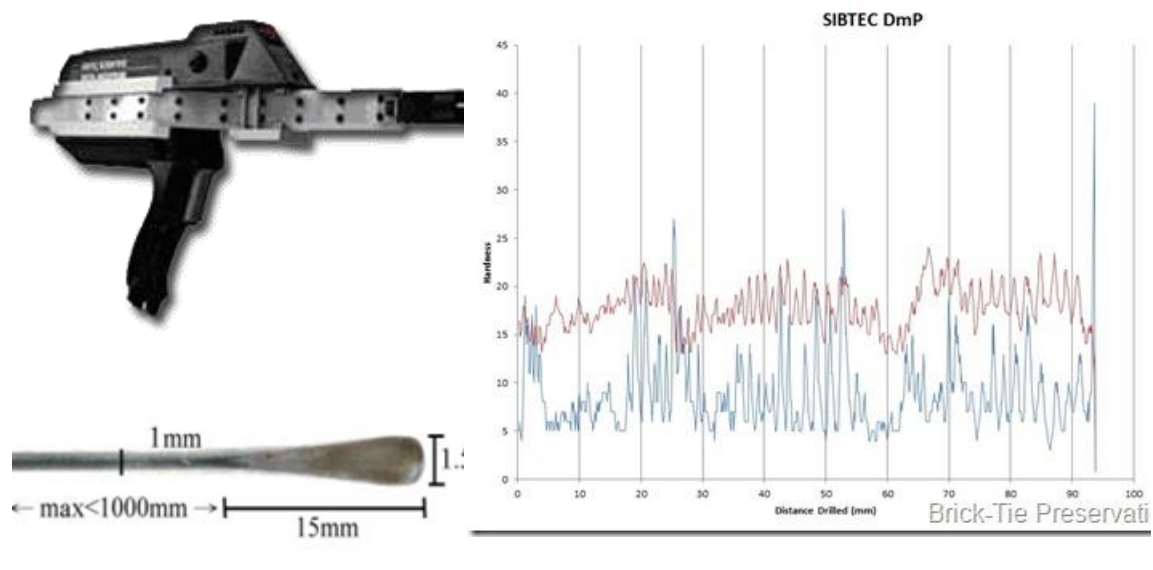


圖 18 數位探針儀及阻抗分布曲線

(二) 敲擊式林木檢測

敲擊式樹內腐朽簡易診斷裝置功能是一種透過敲擊林木樹幹所產生的音波，進行林木內部腐朽程度的判斷，其特點是能快速、簡易、輕便及不用破壞林木就能檢測出林木內部腐朽程度情況。本儀器是利用橫向敲擊共振法之測定原理來進行林木腐朽程度判定。此測定方法是利用敲擊林木後所產生的音波進行錄音，並將聲音波型透過快速傅立葉轉換(FFT)進行聲頻分布分析。並將聲頻分布中頻率最大的峰值分析出來，經由和林木直徑數據及調查樹種健康林木的標準值進行比較，將林木內部異常現象判斷出來之儀器。音頻在經快速傅立葉轉換(FFT)將波形放大後，呈現如下圖 19 所示。其中，波段中最高的波峰(為紅線所表示的 1.55 kHz 部份)

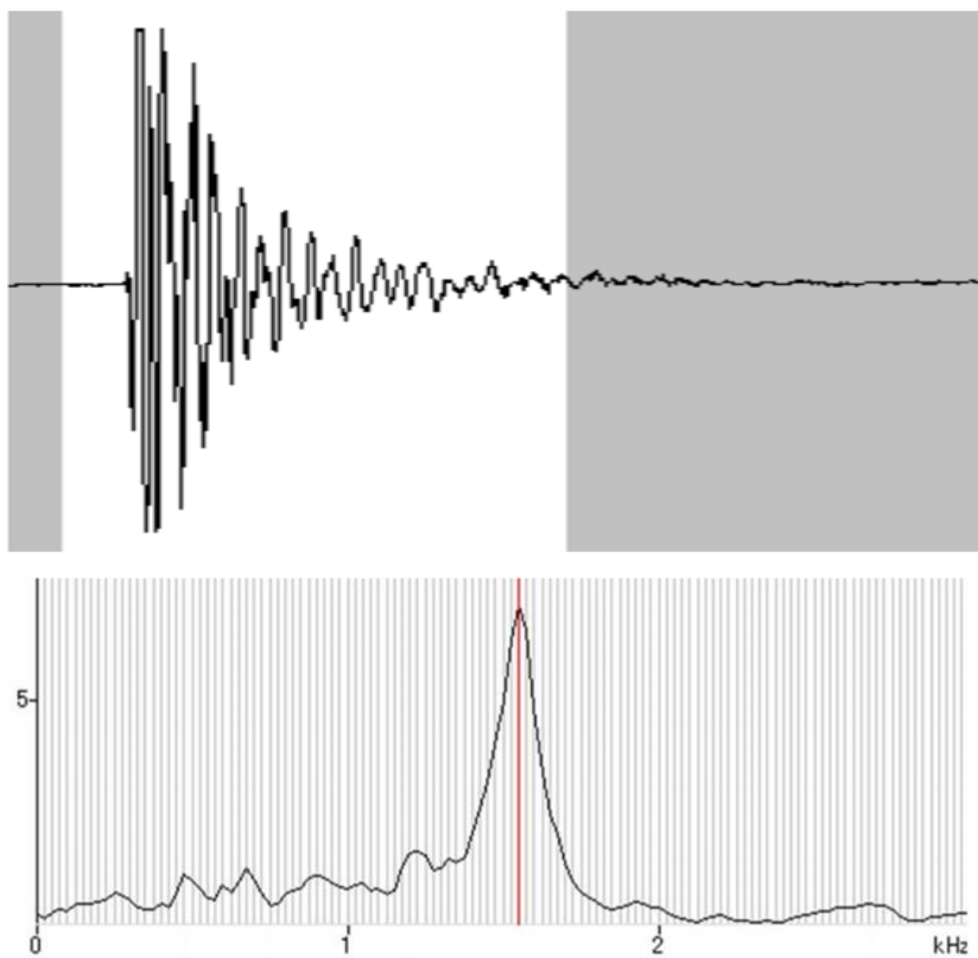


圖 19 音頻快速傅立葉轉換

以 Matlab 處理敲擊資料，進行快速傅立葉轉換與製圖。

```
1) clear;
2) list=dir('0*.dat');%讀取所有的.dat列表
3) hz=10:10.77:11029;%11015分1024階之近似值
4) hz2=hz(10:210);%取區間
5)
6) for i=1:length(list)
7)     name=list(i).name;
8)     s1=importdata(name);
9)     s2=s1.data(7:1030);%7以後才是數字
10)    f2=fft(s2);
11)    f22=abs(f2(10:210));
12)    [m1, m2]=max(f22);%找出最大值的索引
13)
14)    plot(hz2,f22);
15)    set(gca, 'xtick', hz2(m2));%畫上虛線
16)    grid on;
17)    xlabel('Hz')%x軸單位
18)    title(['Title: ' name(1:4)]);
19)
20)    print('-dpng',name(1:4));%輸出檔案
21)
22) end
```

例如敲擊健康的樹木時，音波能用最短距離通過林木內部；反之不健康的樹木內部產生空洞(腐朽)造成音波傳導延遲。也就是無異常現象之健康的林木，共振波長呈現出最短直徑長度方向。如果林木出現內部異常的清況。由於異常部並不會傳導振動，音波振動會繞過異常的部份，造成共振波長出現變長的清況，因此使共振頻率產生較低的現象。樣木取樣位置位於 1.3 m 處，若訊號不明確，則增加敲擊次數或於 0.3-1.3m 端增加敲擊及記錄。

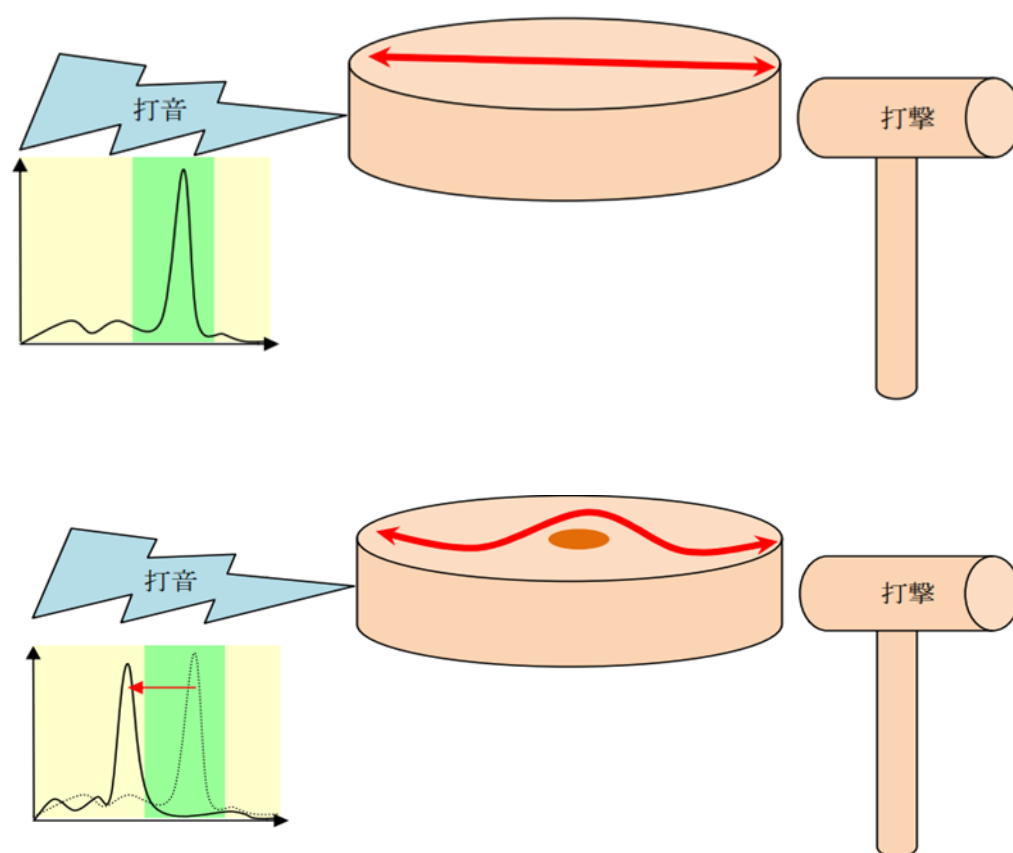


圖 20 樹木內部音頻傳導路徑

本儀器通常在 90 cm 以上之高度(地上高)進行敲擊，如在低於 90 cm 以下位置進行檢測的時候，檢測係數會有所不同，因此依敲擊高度不同需要進行係數上的修正。

表 4 敲擊高度修正係數

地上高(m)	係數(h ₁)
1.0	1.00
0.9	1.00
0.8	1.01
0.7	1.02
0.6	1.04
0.5	1.05
0.4	1.08
0.3	1.12
0.2	1.14
0.1	1.28

診斷指標公式如下：

$$DF_r = D \times F_r \times h_1$$

D: 直徑(cm)

F_r: 共振頻率最大值(kHz)

h₁: 敲擊高度小於 90 cm 的修正係數

八、疏伐監測樣區之地被物種多樣性調查

為符合現今人工林永續發展—生態系經營之理念，實有必要對現存之人工林實施疏伐作業，配合林下人工間植或天然更新方式形成混濇或複層林，以增加人工林結構之異質度和生物多樣性，達到生態系經營之目的。然而該如何疏伐，不同疏伐處理對生物多樣性及森林功能的影響為何，對原生樹種更新及復育的影響又為何，現今這方面的基本資料極度不足。現存的人工林與適地的未來人工林建造，在某些程度都屬復育森林生態系的範疇，需生態科學的知識，並需科學資料的提供，始能釐定這方面的經營法則與實施方法。

小苗的建立與生長受地被層微環境的篩選，影響樹冠層樹種的更新、結構及空間分布，進而影響著森林的演替趨勢（Denslow *et al.*, 1991；George and Bazzaz, 1999）。因此調查地被層植物是瞭解森林生態系動態變化的基礎，有助於瞭解森林中各種植物之小苗建立及更新過程（Maguire and Forman, 1983）。不同疏伐處理後，地被層植物的種類及覆蓋度的變化，以瞭解原生樹種更新之瓶頸及困境，根據先前設立之木本樣區的系統，在每一樣區內設置 12 個 1×1m 之地被層樣區，調查不同疏伐程度之地被層小樣區植物種類組成，並估計覆蓋度。



圖 21 地被樣區設置

九、疏伐撫育作業之綜合效益評估

疏伐撫育為人工林經營過程中，提升林木品質生長及營造健康森林環境的必要工作。疏伐作業因涉及林木的移除，疏伐初期對林地及生態環境會帶來負面的衝擊，且因疏伐強度及疏伐作業方法對於留存木及其生育環境之影響，會產生不同的疏伐效果，因此設置疏伐監測樣區，進行疏伐前及疏伐後定期的監測調查，並評估其疏伐效益評估，為森林生態系經營理念下，對人工林進行適應性經營的重要體現。疏伐作業因立木生長空間的調整，提升留存木之胸徑生長、立木健康度及林下地被植物物種多樣性，本研究以調查結果建立新科技測計儀器應用於疏伐效益之監測方式。

伍、結果與討論

一、疏伐監測樣區之設置

本計畫於荖濃溪事業區 98-100 林班之紅檜及臺灣杉人工林，設置 8 個不同年度之疏伐監測樣區，其中有 1 個紅檜人工林未疏伐樣區，供為未疏伐林分之對照樣區，該監測樣區目前已進行疏伐木選定工作，預計於 2015 年進行疏伐，而有 5 個曾於 2008-2014(民國 97-103 年)疏伐之紅檜疏伐樣區，以及 2 個 2007(民國 96 年)曾疏伐之臺灣杉樣區，此一監測樣區之設置，可供荖濃溪事業區之紅檜及臺灣杉人工林疏伐效益之監測。疏伐監測樣區之基礎資料如表 5；樣區位置如圖 12。

表 5 荖濃溪事業區紅檜及臺灣杉人工林疏伐監測樣區之基礎資料

主要樹種	紅檜	紅檜	紅檜	紅檜
座標	230316, 2561103	230360, 2561103	230879, 2561737	230863, 2561794
疏伐年度	預定 104	97	98	101
林齡(年)	43	43	43	43
胸徑(cm)	32.4±8.4	34.9±8.4	36.3±8.2	30.2±6.6
株數(N/ha)	1,008(496)	500	360	600
蓄積(m ³ /ha)	696.6	470.2	304.3	375.4
株數疏伐率(%)	50.8	50.0 ^{*1}	64.0 ^{*1}	47.2 ^{*2}
材積疏伐率(%)	36.5	36.0 ^{*1}	46.0 ^{*1}	33.5 ^{*2}
方形間距(m)	3.2(4.5)	4.5	5.3	4.1
地被 D _{Si}	0.68	0.89	0.70	0.77
地被覆蓋度(%)	95	95	85	95

註 1：以疏伐前密度 1000/ha 估算，材積含枯立木。

註 2：以疏伐預定案資料計算，材積含枯立木。

續表 5 荖濃溪事業區紅檜及臺灣杉人工林疏伐監測樣區之基礎資料

主要樹種	紅檜	紅檜	臺灣杉 a	臺灣杉 b
座標	231207, 2561857	231892, 2561315	229379, 2560084	230179, 2560625
疏伐年度	102	103	96	96
林齡	43	43	21	21
胸徑(cm)	28.0±6.9	28.6±6.9	28.1±7.5	27.8±10.1
株數密度(N/ha)	480	460	940	980
蓄積(m ³ /ha)	236.3	249.7	537.0	525.7
株數疏伐率(%)	41.3 ^{*2}	54.0 ^{*1}	20 ^{*2}	20 ^{*2}
材積疏伐率(%)	16.7 ^{*2}	39.4 ^{*1}	-	-
方形間距(m)	4.9	4.7	3.3	3.2
地被 D _{Si}	0.77	0.69	0.64	0.64
地被覆蓋度(%)	82	25	50	50

註 1：以疏伐前密度 1000/ha 估算，材積含枯立木。

註 2：以疏伐預定案資料計算，材積含枯立木。

43 年生之紅檜人工林樣區，其所留存木株數介於每公頃 360-600 株之間，屬於低林分密度的強度疏伐；而 21 年生臺灣杉的林分密度約為每公頃 1000 株屬於中密度，根據李隆恩與顏添明(2010)研究，強度疏伐、中度疏伐材積年增率分別為 6.08%、6.12%，因此已疏伐之樣區，每公頃每年將有 14.4-32.9 m³ 之材積生長量。

二、 地面光達系統在疏伐監測樣區樣木測計之應用

疏伐監測樣區之立木屬性包括立木位置、胸徑、樹高、枝下高及樹冠幅之量測，為疏伐留存木生長特性監測之重要數據。傳統上樣區立木測計皆採用利用直徑尺、測高器進行每木調查法，並以方位距離測量法繪製立木位置圖，此種調查法因受限於儀器設備，其精確度無法進行短期間林木生長效益之評估。如何尋找最新之科技儀器，讓疏伐監測樣區之立木屬性調查，更趨精確其為本研究之重點工作之一。

(一) 立木位置測量準確性評估

2014 年針對臺灣杉監測樣區之立木之光達點雲資料，除去立木之枝葉及地被後，殘存的樹幹點雲，可清楚提供精確定位，樹幹點雲進行數化即可製成林木位置圖，圖 22 為全站儀測量之林木位置圖套疊至光達點雲上，幾乎重疊一致。

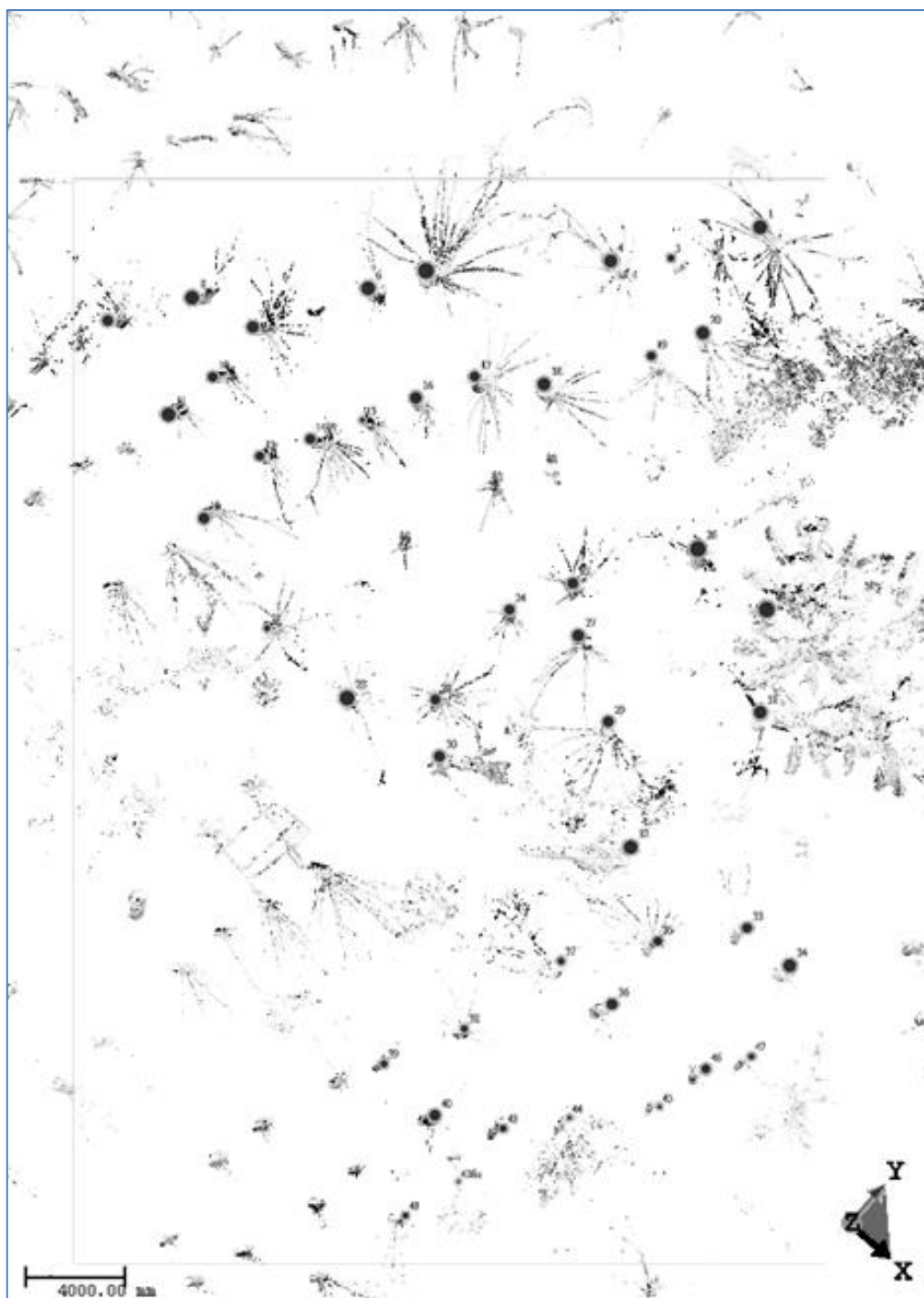


圖 22 臺灣杉光達點雲林木位置圖

而有關地面光達對於立木位置圖製作之準確地分析，本研究利用 46 株紅檜立木實測座標值與地面光達點雲資訊所獲得之立木位置，進行比對分析，結果顯示地面光達之 X 座標最大誤差為 2.1660 m，最小誤差為 0.0140 m，平均誤差 0.3422 m；Y 座標最大誤差為 3.5900 m，最小誤差為 0.0000 m，平均誤差 0.4418 m，如下圖 23 所示。圖

23 顯示共有 5 株立木座標誤差大於 1 m，41 株小於 1 m；究其原因，係樣區內林木互相遮蔽，而在光線直線前進的特性下，部份立木點雲數目較為稀少(甚至無法判斷確切位置)，導致誤差較大(圖 23)。

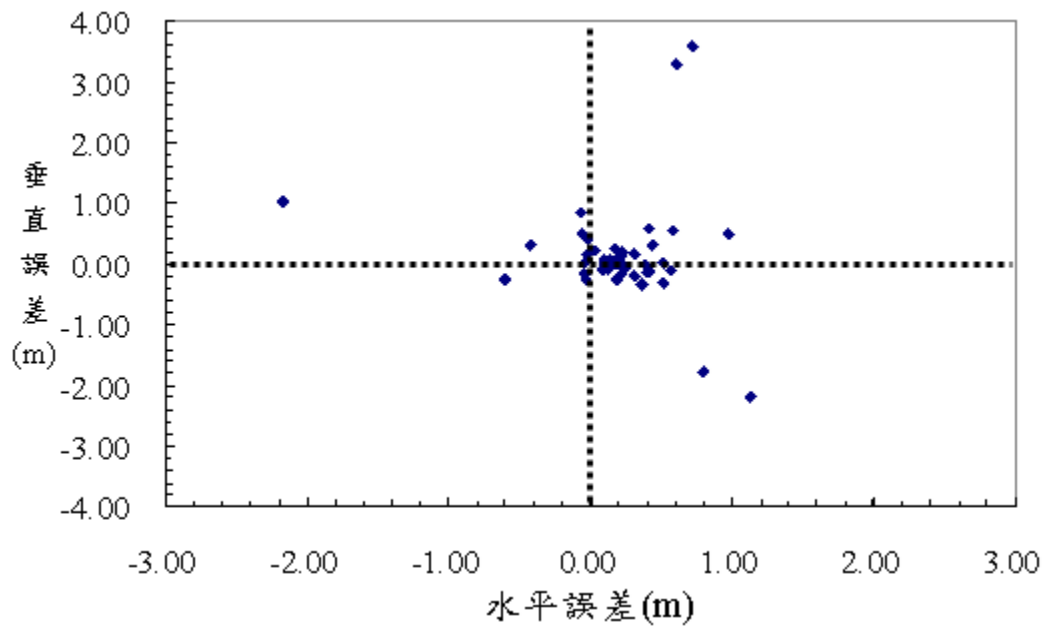


圖 23 地面光達與實地調查資料之立木位置誤差值

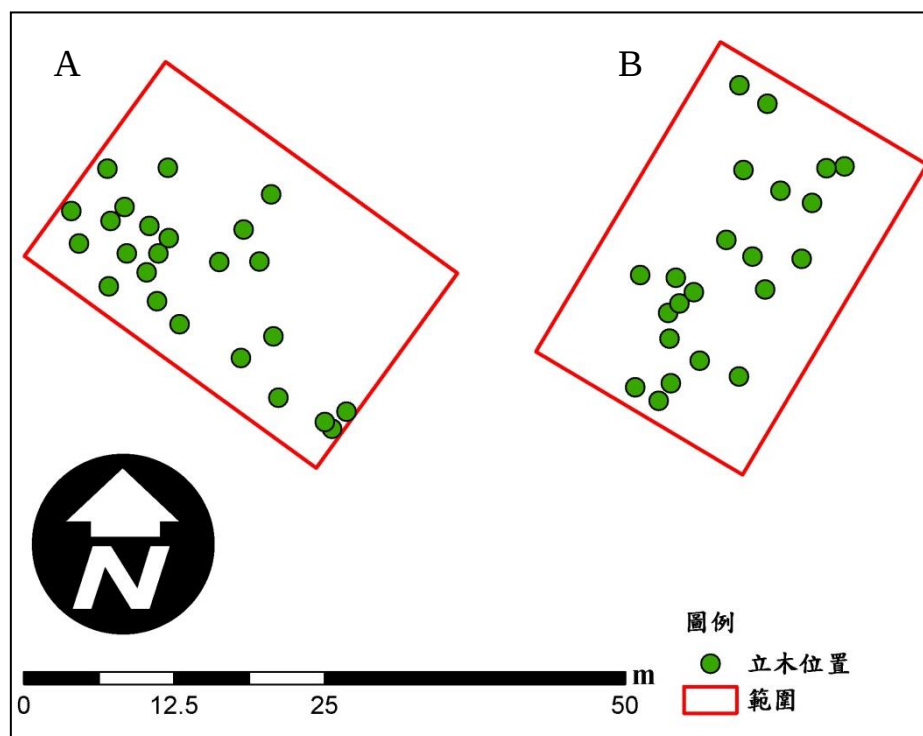


圖 24 拍攝位置與誤差立木相關位置圖

由圖 24 可知，樣區中林木空間分布情形，透過 2 個樣區中(A 與 B)，共 46 株紅檜立木之實測值與地面光達點雲資訊所獲得之立木位置相比較(表 6)，結果顯示 X 座標最大誤差為 2.1660 m，最小誤差為 0.014 m，平均誤差 0.3422 m；Y 座標最大誤差為 3.5900 m，最小誤差為 0.0000 m，平均誤差 0.4418 m，而統計其誤差分布(表 6)情形可知，水平誤差絕對值 0.1 m 以下共有 13 株(28.26%)；垂直誤差絕對值 0.1 m 以下共有 15 株(32.61%)，而水平誤差絕對值 0.5 m 以下共有 35 株(76.09%)；垂直誤差絕對值 0.5 m 以下共有 38 株(82.61%)。

表 6 地面光達與實地調查之立木位置距離誤差表

誤差絕對值(m)	水平		垂直	
	數量(株)	百分比(%)	數量(株)	百分比(%)
0.1 以下	13	28.26	15	32.61
0.1-0.5	22	47.83	23	50.00
0.5-1	9	19.57	3	6.52
1-1.5	1	2.17	1	2.17
1.5-2	0	0.00	1	2.17
2-2.5	1	2.17	1	2.17
2.5 以上	0	0.00	2	4.35
合計	46	100.00	46	100.00

根據現場林木生長情形與實際掃瞄點雲分布狀況探討誤差較大之立木分布位置，共有 5 株立木其水平及垂直座標誤差大於 1 m，41 株小於 1 m。

Strahler *et al.* (2008) 比較地面光達與傳統林分面積調查儀之結果，發現由光達單一視角所掃瞄之斷面積與樹幹密度因受到遮蔽與實際相較大約減少 10%。Lovell *et al.* (2011)指出可利用地面光達之回波強度頻度圖藉由一個簡單的閾值來自動化偵測位置和樹幹直徑，且成功識別大部分的樹，包括一些部分遮蔽的位置。

透過完整高密度的點雲資料可直接以點雲測量樹幹直徑 (Bucksch *et al.*, 2009; Rahman *et al.*, 2009)，但實際上，必須注意點雲資料的完整性以及所受到遮蔽的問題。本研究 5 株立木誤差較大之原因，根據現場實際勘查為樣區內雜草雜木阻擋與林木互相遮蔽情形，又其中一樣區因具有一定坡度，故當測站由上方向下掃瞄時，所造成影響亦增加遮蔽的效果，根據上述觀察結果與點雲實際狀況指出誤差較大之立木，均屬於點雲數量較為稀少導致誤差形成。若區域內有完善撫育使地被不至於過度雜亂產生遮蔽，若樣區存在於具有坡度之位置，本研究建議多增加測站確保點雲數量足夠減少遮蔽產生。

立木位置測量準確性評估方面，透過地面光達確實可正確獲得立木資訊。但由於掃瞄點位會受到林木遮蔽所影響造成誤差，且樣區面積若過大則需要新增多處掃瞄點位，透過多次取樣才能得到良好點雲。對於本研究而言，利用 7 處不同掃瞄點位，即可控制 1 m 以上誤差低於 11%。根據研究結果，若拍攝點位足夠，應用地面光達資料萃取立木位置實為可行，而立木位置準確度亦為遮蔽程度之指標，若立木位置準確度足夠，則表示該林木胸徑圓盤萃取具有一定準確程度，未來以地面光達獲取林分資料時，除可以非破壞性的方式獲得較為準確的三維資訊外，亦可使用取樣之概念配合模式進行推估。

(二) 胸徑測量

利用地面光達點雲可直接測量立木胸徑，本研究分別選擇臺灣杉及紅檜人工林之監測樣區之地面光達掃描資料，進行樣木之以地面光達量測胸高直徑之精確度評估，臺灣杉人工林之測計結果如圖 25，大部分胸徑與實測誤差在 4.2 cm 以下，誤差值平均為 0.6 cm，標準偏差 ± 1.4 cm。而紅檜人工林樣區的測計結果如圖 26，不同方法測量胸徑的差值平均為 0.7 cm，標準偏差 ± 1.9 cm，4 cm 以上之誤差來自於邊緣木，因光達點雲資料龐大(32.8 GB)，必需減少資料量以符合電腦及軟體處理效能，減點係擴大夾角以減少資料量，對距離儀器較遠的邊緣木影響甚鉅。

利用地面光達掃描監測疏伐樣木之胸徑資料，其目的在於精密監測立木年生長量，由於過去傳統上以直徑尺進行測計時，受限於量測

位置及直徑尺的精度，往往會造成測計誤差過大，無法於短時間內取得立木之生長資料，由本研究所取得之地面光達點雲資料，去除因掃描遮蔽或因邊緣木無法取得足夠點雲資料，其測計誤差較大之外，其他樣木之胸徑測計在兩次重複測計時其誤差可控制在 0.1cm 以下，該精密度可供樣木胸徑年生長量監測之用，以本研究為例，臺灣杉人工林樣木編號 2,3,8,25,27,28,30,31,32,38,39,40,41,46,47，紅檜人工林樣木編號 1,3,4,5,7,9,13,15,18,20,24,27,28,29,31,33,35,36,37,38,39 可選擇為胸徑生長之監測樣木，未來定時於相同位置擺設地面光達進行掃描，可取得誤差值小於 0.1cm 之胸徑資料。

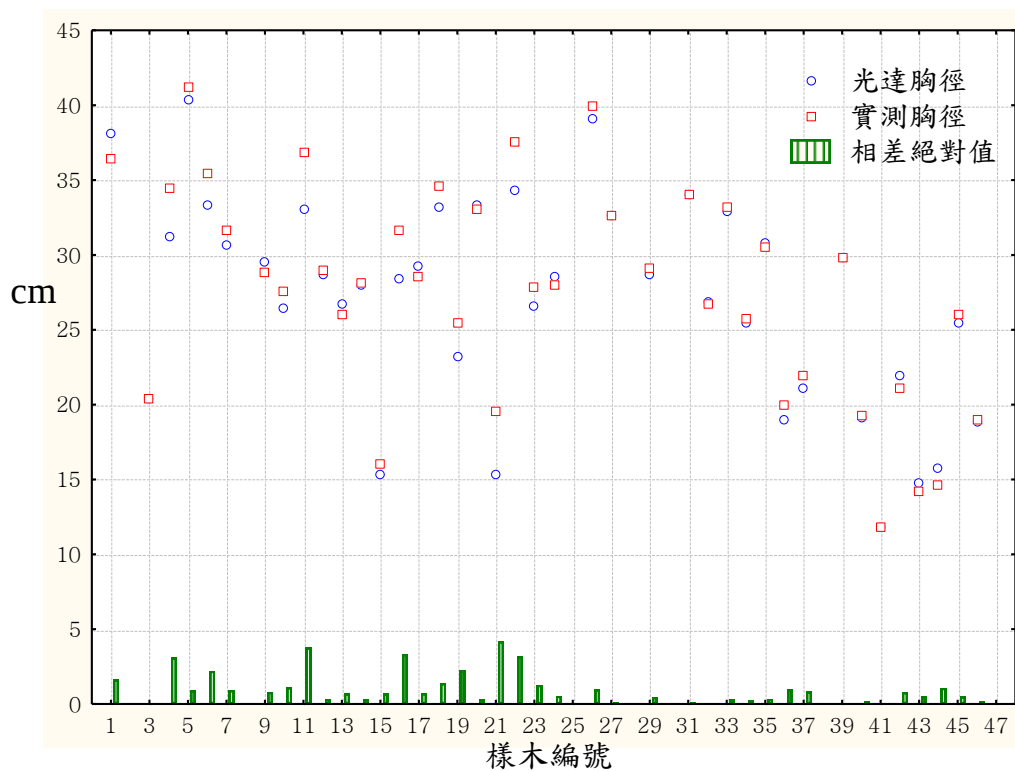


圖 25 臺灣杉光達測量胸徑差異

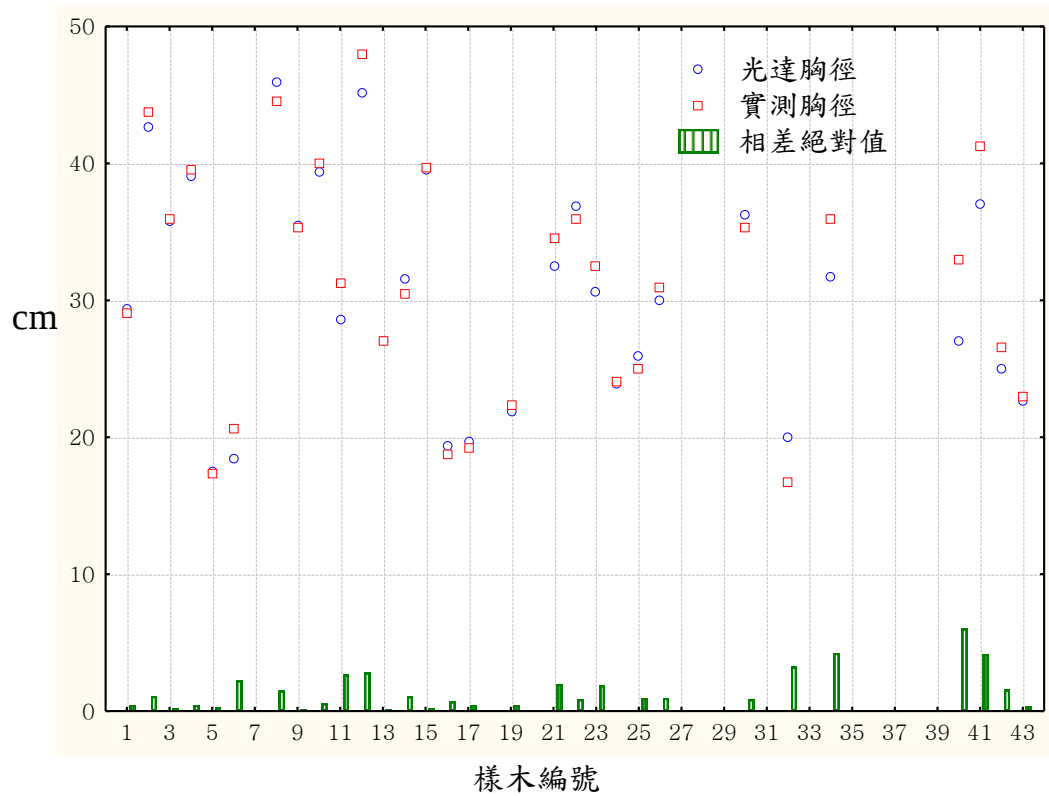


圖 26 紅檜光達測量胸徑差異

(三) 樹高測量

以地面光達點雲資料直接測量立木樹高時，臺灣杉人工林未疏伐監測樣區之測計結果如圖 27，地面光達會低估立木樹高，差值平均 5.8 m，標準差 ± 2.1 m，其主要原因在於未疏伐之臺灣杉人工林其枝葉層較密，地面光達點雲無法穿透單株立木之頂層，造成單木量測的誤差較大。當林間有透空之處時，林木上部會有零星的點雲資料(圖 28)，因此可取得林分的平均高度量測。

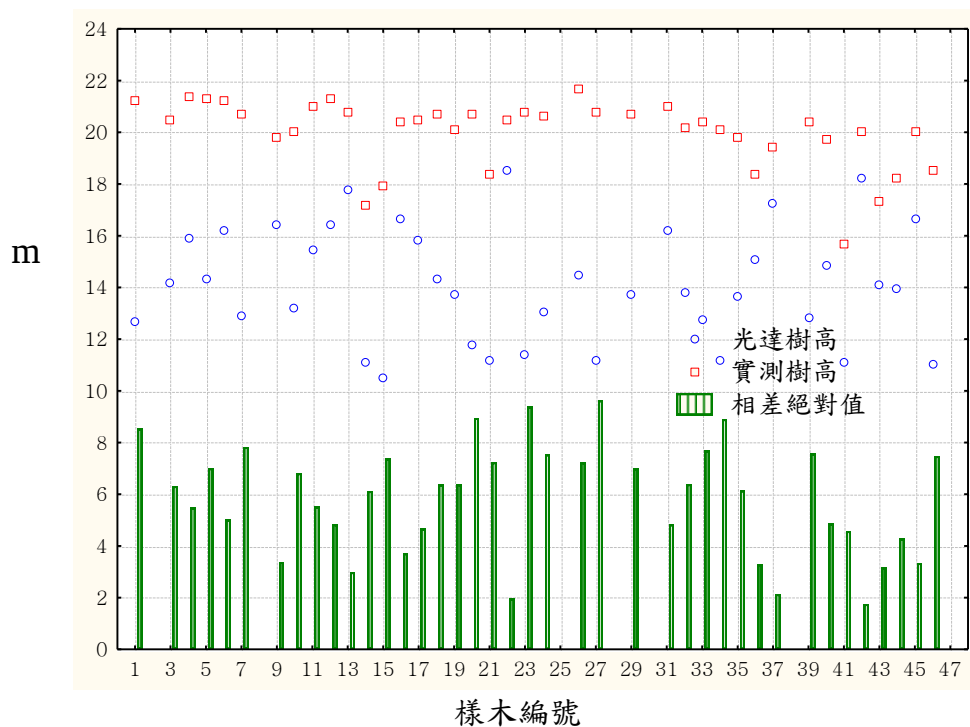


圖 27 臺灣杉光達測量樹高差異



圖 28 臺灣杉光達低估樹高之區間

而紅檜人工林疏伐監測樣區，其樹高測計結果如圖 29，大部分樹高與實測誤差在 2 m 以下，差值平均 0.9 m，標準偏差 ± 1.4 m，2 m 以上之誤差來自於樣區其中一角的邊緣木，其頂部的枝葉距離儀器較遠，且仰角較低所造成。

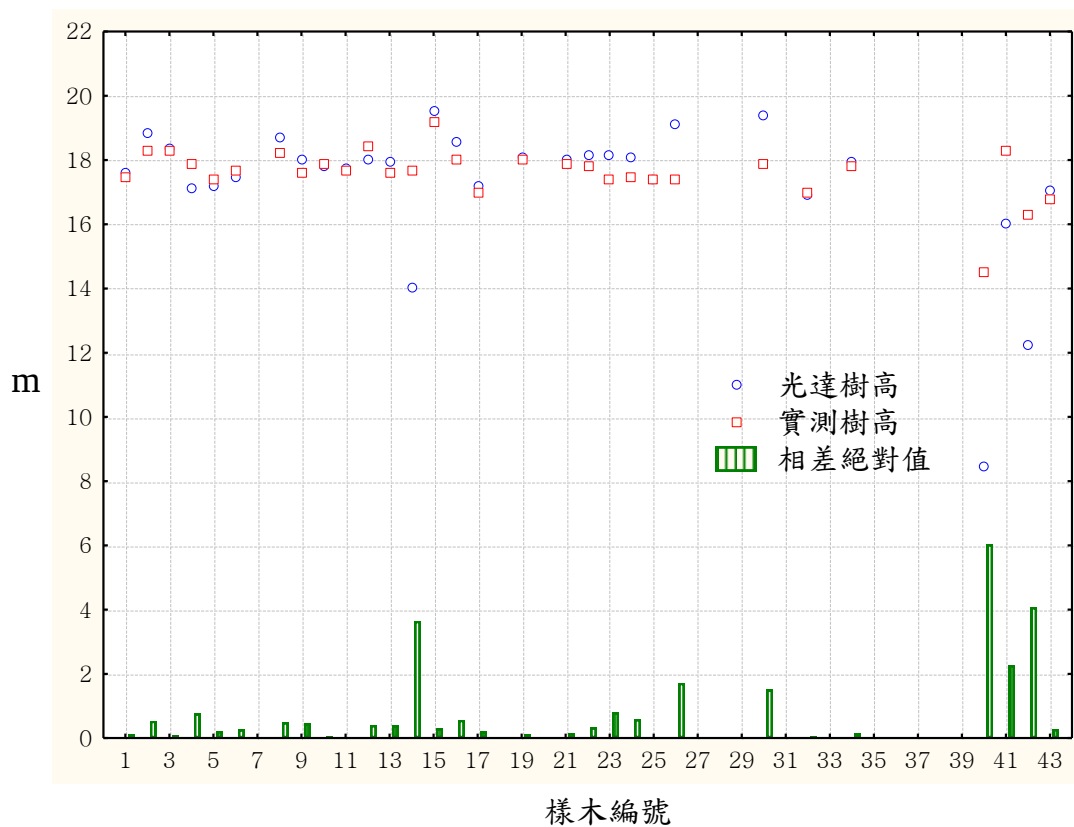


圖 29 紅檜光達測量樹高差異

(四) 疏伐度模擬

臺灣杉目前的密度約為 1000/ha，約有 1/10 為枯立木，因此未來 10 年間可能進行疏伐，此時光達點雲資料可提供立木的密度模擬，例如去除劣木、枯立木及部分立木，結果比對如圖 30 及圖 31。

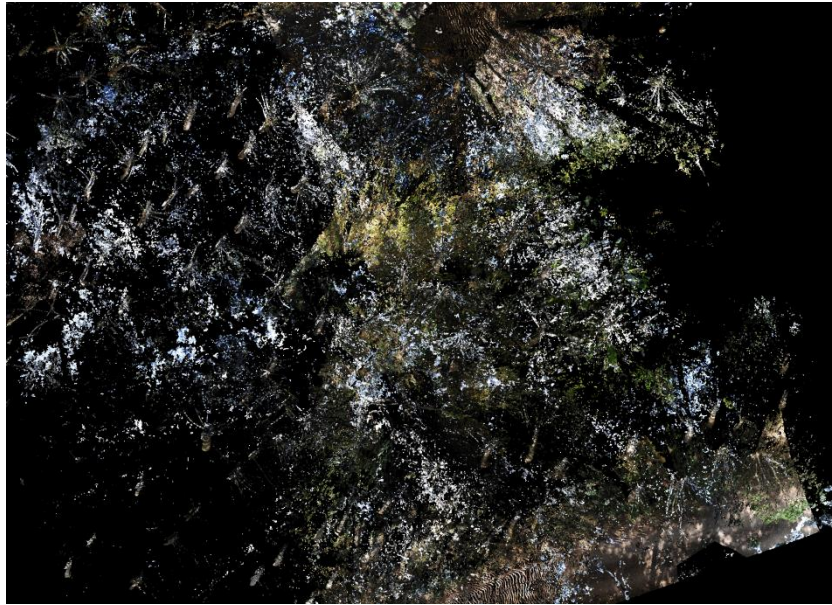


圖 30 臺灣杉生立木及枯立木點雲(1000 株/ha)

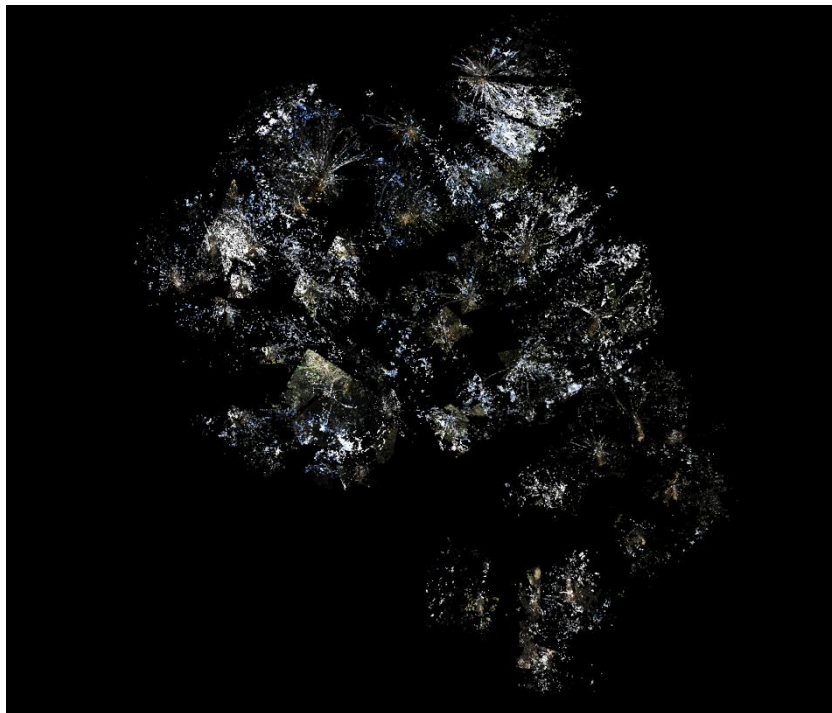


圖 31 臺灣杉生立木密度模擬點雲(500 株/ha)

利用監測樣區所建置之地面光達資料，因可建構 3D 的立木生長配置圖，利用該樣區所測計之立木胸徑及樹高資料，可快速估測林分蓄積量，而利用電腦可模擬疏伐木選擇後，於電腦系統中加於伐除後再次進行林分蓄積量估測，因此可快速計算疏伐強度及估算立木空間距離。此種利用監測樣區之疏伐模擬可訓練疏伐作業人員如何選取疏伐木，如何配置疏伐木位置及立木空間距離，其對於現場進行疏伐木選擇時會有較為精確之標準。

三、以林分結構分析評估疏伐效益

所謂林分結構(Forest structure) 係指林分之直徑分布現況，對於人工林而言，因林分屬於同齡林，理論上如果林木生長特性相同、不具有生長競爭之情況下，林分結構會呈現均一分布(Uniform distribution)，但因為雖然同一樹種仍具有不同的遺傳基因，會產生不同的生長特性，再加上提供林木生長的環境資源有限，立木於生長期間會產生可供生長之資源競爭，造成物競天擇(Natural selection)現象，因此人工林生長一段時間後會產生優勢木、次優勢木、中庸木及被壓木之林分結構。林分結構可以利用林分不同胸高直徑級之株數分布來表達，Bailey and Dell (1973) 提出 Weibull 機率密度函數，因該函數具有高度的彈性，可描述不同型態的林分結構狀態，且函數的推估參數具有林分生長狀態的生態意涵，因此利用 Weibull 直徑分布推估不同強度疏伐，對於減低立木競爭之效益，為一簡便的方法。

(一) 紅檜未疏伐林分

未疏伐及預計疏伐後之林分結構如圖 32，以 Weibull 函數模擬結過，c 參數低於 3.6(常態分布)，顯現林木間過度競爭，有天然疏伐的趨勢，林內也出現許多健康度低的劣木、枯死木，應積極進行疏伐作業，移出部分木材使用，促進留存木生長，不含枯死木之胸徑平均為 32.4 cm，未來預計會伐除形質為枯死木、分岔木及樹冠級劣木與部分中木，而保留較大徑級之林木，c 參數變化較少，a 參數增大，顯示最小徑級向右，以生產優良大徑木為方向，疏伐後胸徑平均 37.5 cm。

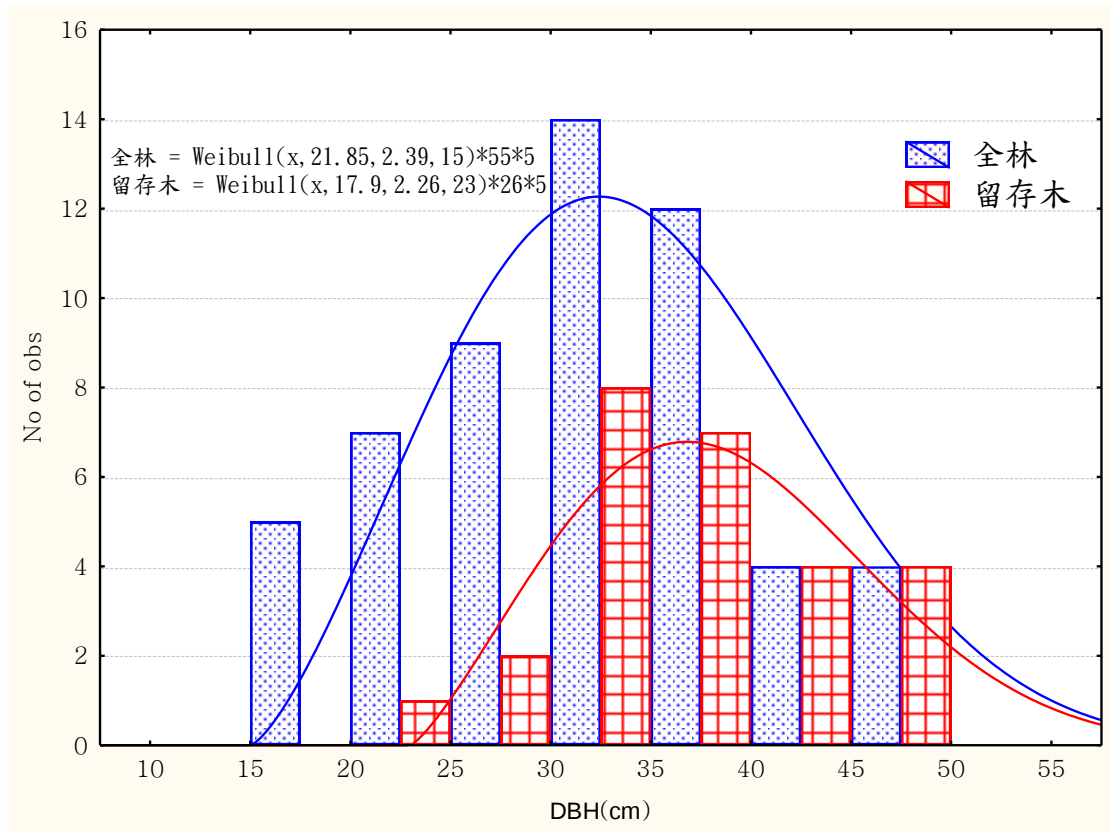


圖 32 紅檜未疏伐林分直徑分布

(二) 紅檜已疏伐林分

疏伐 5 年以上之林分結構如圖 33，c 參數 1.78，林分結構逐漸趨向右偏型態，而其最小徑 15 cm 是因為保留天然更新之闊葉樹所致，平均胸徑 34.9 cm。疏伐 4 年之紅檜林分結構如圖 34，胸徑皆在 20 cm 以上，平均胸徑 36.3 cm，大徑木比例較未疏伐林分高。

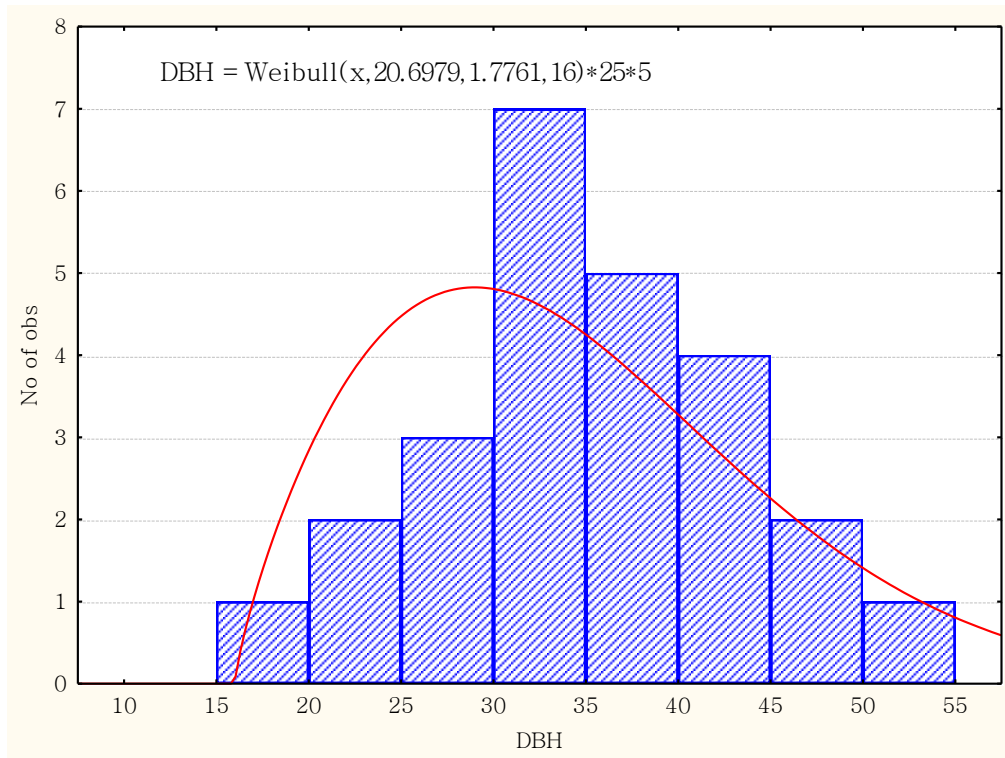


圖 33 紅檜 97 年疏伐林分直徑分布

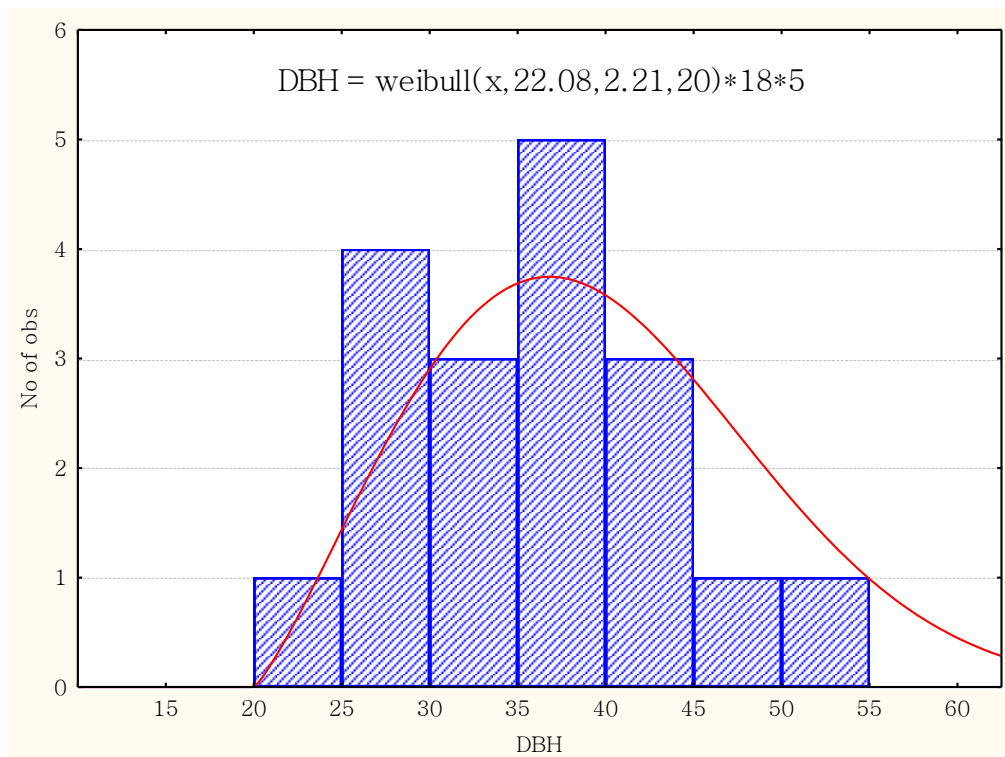


圖 34 紅檜 98 年疏伐林分直徑分布

已疏伐兩年之樣區林分結構如圖 35，胸徑皆在 18 cm 以上，平均 30.2 cm。已疏伐一年之樣區林分結構如圖 36，疏伐較小徑級立木後，以 Weibull 函數模擬結過，c 參數 2.09，林分結構程趨向右偏型態；疏伐未滿半年的樣區如圖 37，c 參數 2.71，較接近常態分布，該樣區因調整密度需要，保留了兩株小徑木，整體平均胸徑 28.6 cm。

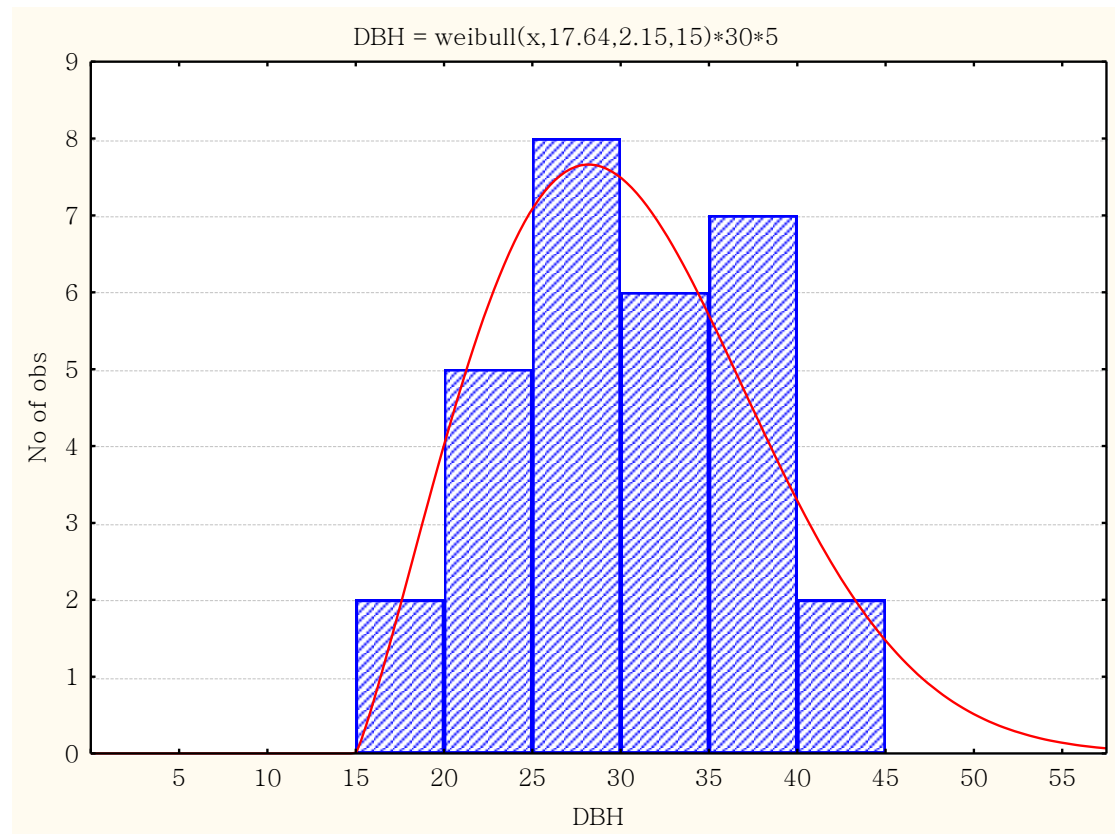


圖 35 紅檜 101 年疏伐林分直徑分布

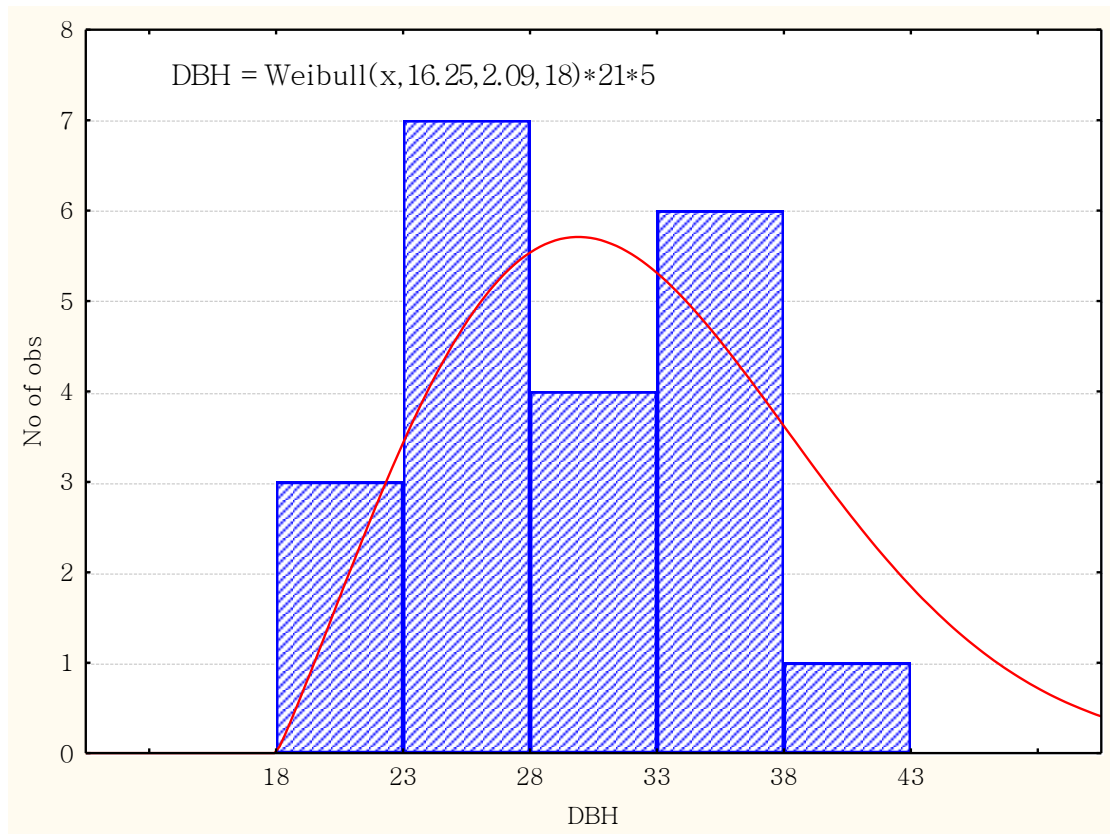


圖 36 紅檜 102 年疏伐林分直徑分布

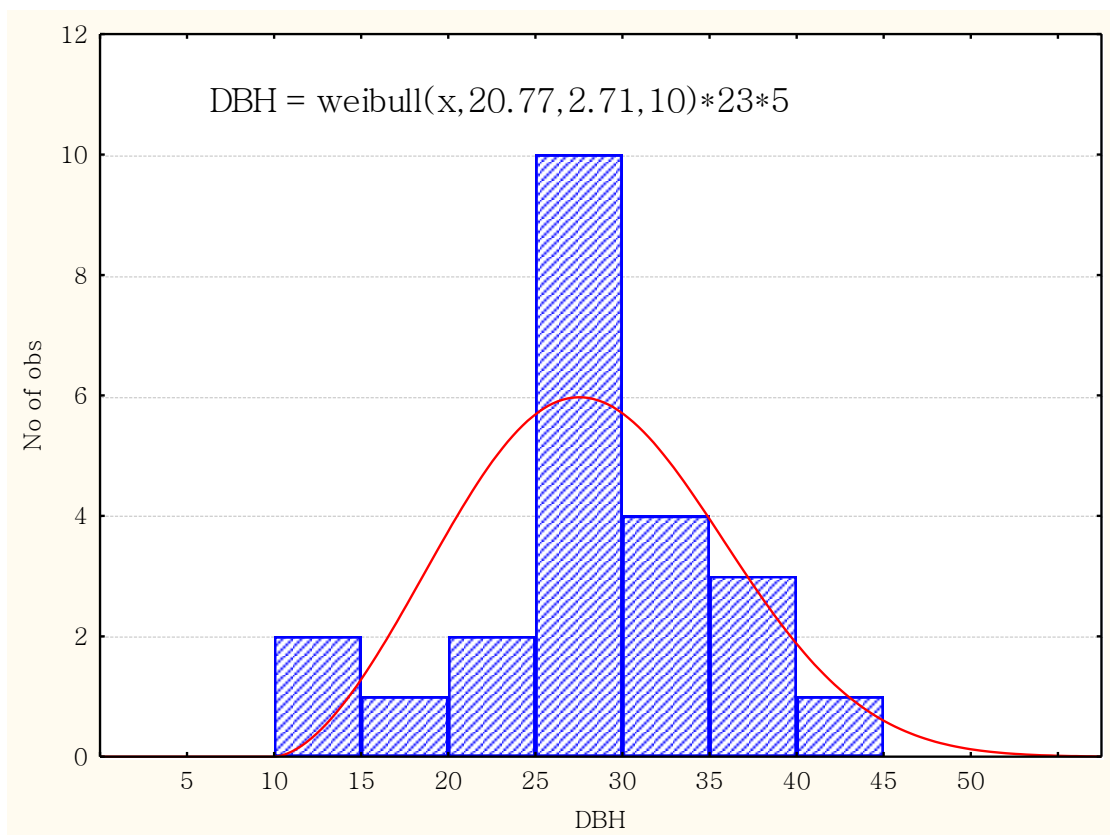


圖 37 紅檜 103 年疏伐林分直徑分布

(三) 臺灣杉已疏伐林分

臺灣杉疏伐 6 年以上之林分結構如圖 38、圖 39，整體密度較紅檜已疏伐林分高，c 參數較小，兩個樣區都是右偏分布，圖 39 中除了兩株胸徑較大的樹是零星分布的臺灣二葉松，整體以中小徑木為主，未來可再次疏伐，促進林木生長，以培育優良大徑木為方向。

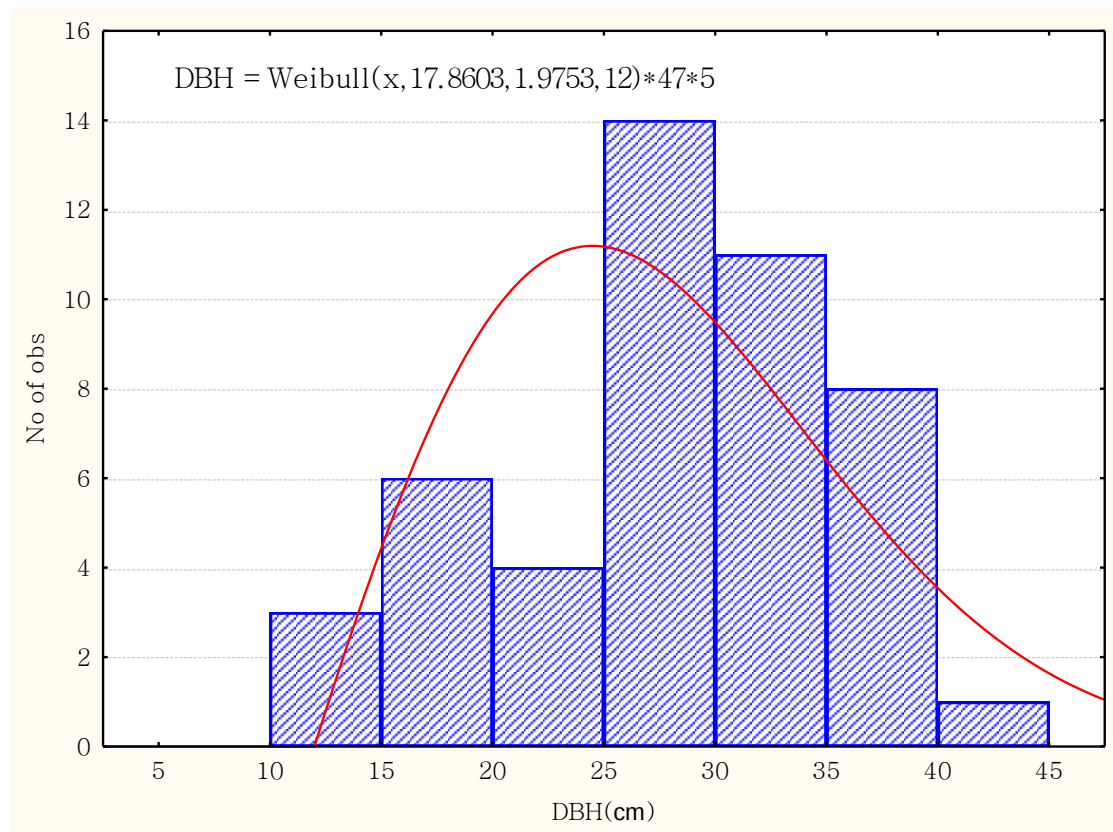


圖 38 臺灣杉 96a 年疏伐林分直徑分布

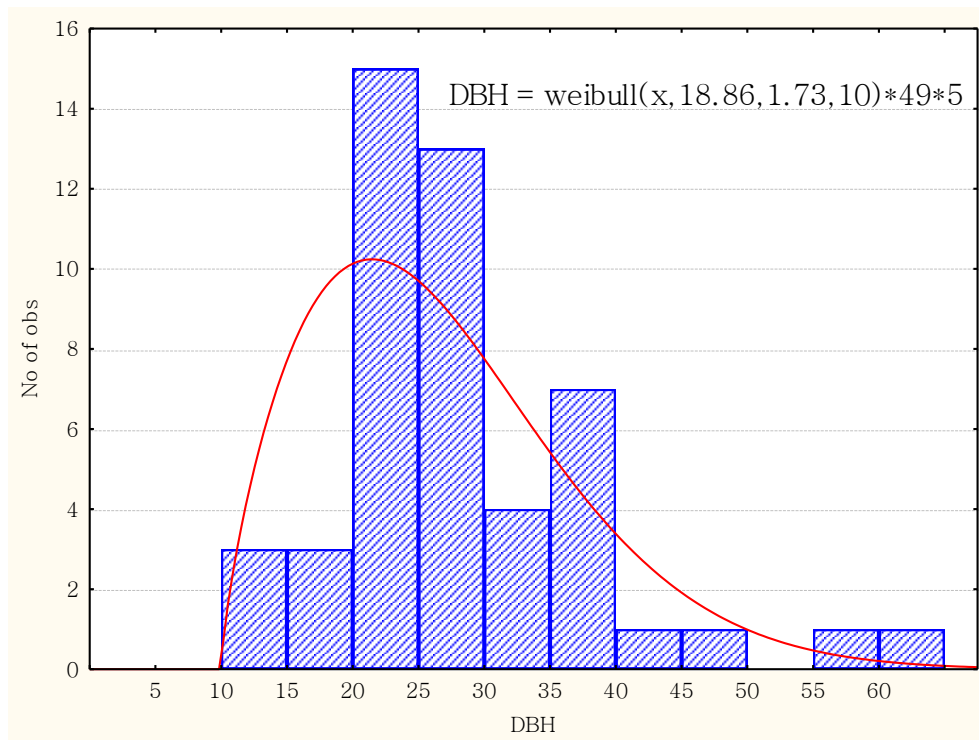


圖 39 臺灣杉 96b 年疏伐林分直徑分布

綜合上述，林木間競爭較劇烈的林分，c 值較低，即林分結構為右偏分布(圖例...)，經疏伐調整後，林分結構分布較原先更為左偏(圖例---)，或是最小胸徑向右移動(a 值變高)，因此未來監測同一林分時，分析林分結構之變化，即可判定是否再次進行疏伐。

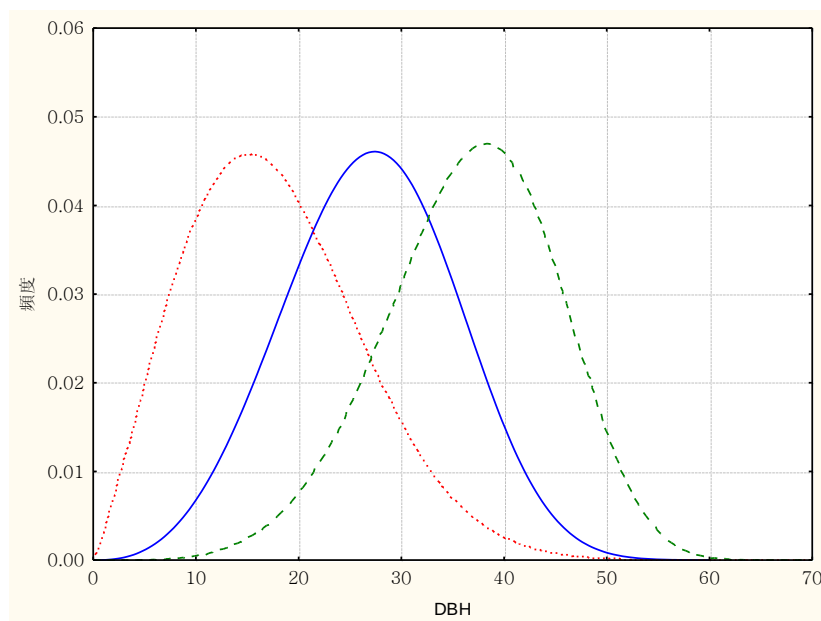


圖 40 林分結構變化示意圖

四、疏伐監測樣區之立木健康調查

將 8 項外觀評估得分，以加權得分表示每株立木的健康程度(調查資料如附件一)，以未疏伐樣區為例，健康度較低的前 24%都已列入未來即將伐除的林木，充分證明現場選木之林業人員具有精湛的專業能力，而其它已疏伐樣區之林木健康度較高，顯示有疏伐之森林較為健康，因此林木健康度也可以做為疏伐選木參考數據之一。

(一) 敲擊式立木檢測

儀器標準編制有「標準值」、「計算值」兩種方式，而標準值和計算值是腐朽判定指標，後者會受到實測 DFr 決定值不同而有差異，其中各樹種之『標準值』為儀器公司收集的樣本資料所統計的數值。『計算值』則是根據現場調查所設定的資料，統計所有樣本所計算出來的數值。以所有樣本區間為全部範圍，9 以下為一紅色區間，代表明顯腐朽或變質，9-18 及 40 以上之黃色範圍代表可能發生腐朽或變質；18-40 之綠色區間為正常材質。

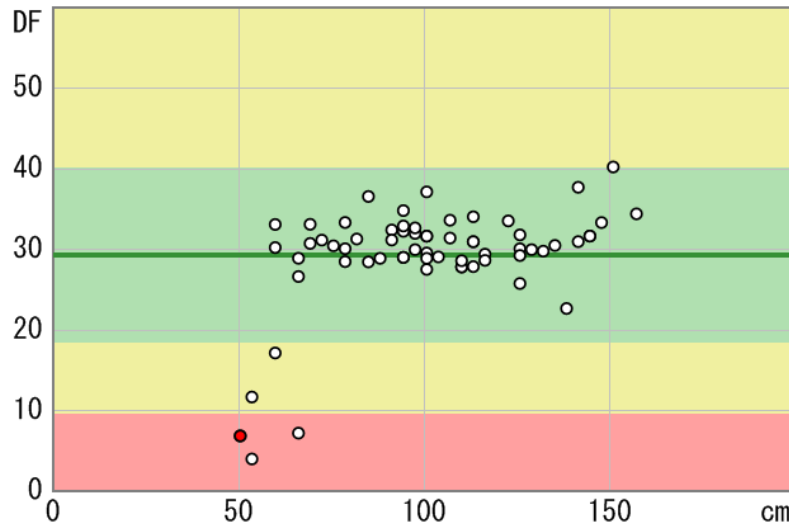


圖 40 65 株不同圓周之紅檜敲擊 DFr 值分布

調查未疏伐樣區(4 棵)及周邊腐朽木(1 棵)，其中 2 棵 DFr 值 9-18 之紅檜，1 株已枯死，1 株健康度較低(0.37)；另外 3 株(DFr: 0-9)判定異常狀態之紅檜，分別是 2 株枯死及 1 株健康度較低(0.33)之樣木，因此敲擊式立木檢測可用於疏伐選木之參考。

儀器內定的紅檜 DFr 為 35.0，而本研究於 6 個樣區的紅檜 DFr 都低於 35，測得的平均值為 29.5，因此小關山之紅檜之檢測值應改為 29.5。

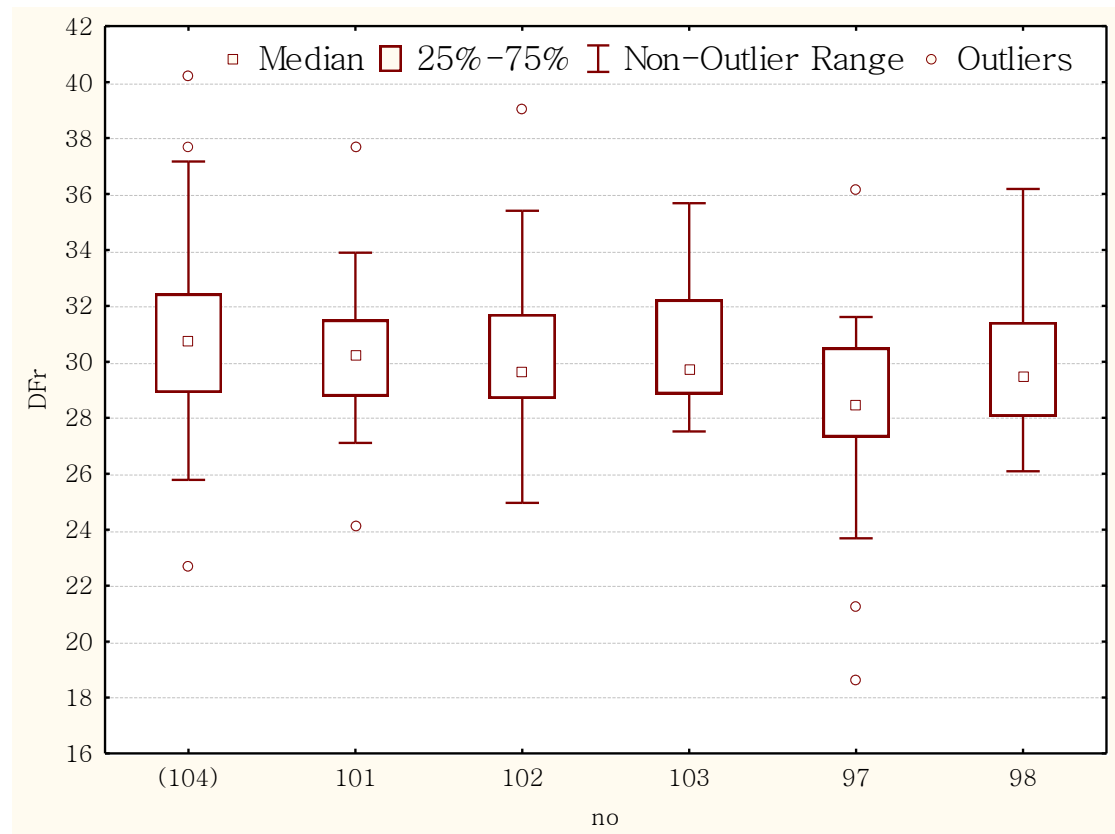


圖 41 紅檜敲擊 DFr 值分布

儀器沒有臺灣杉內定值，若使用儀器內建的一般針葉樹內定值為 30，與本研究所所測得的數據相距不遠，但仍建議改為臺灣杉 DFr 平均值 27.1。

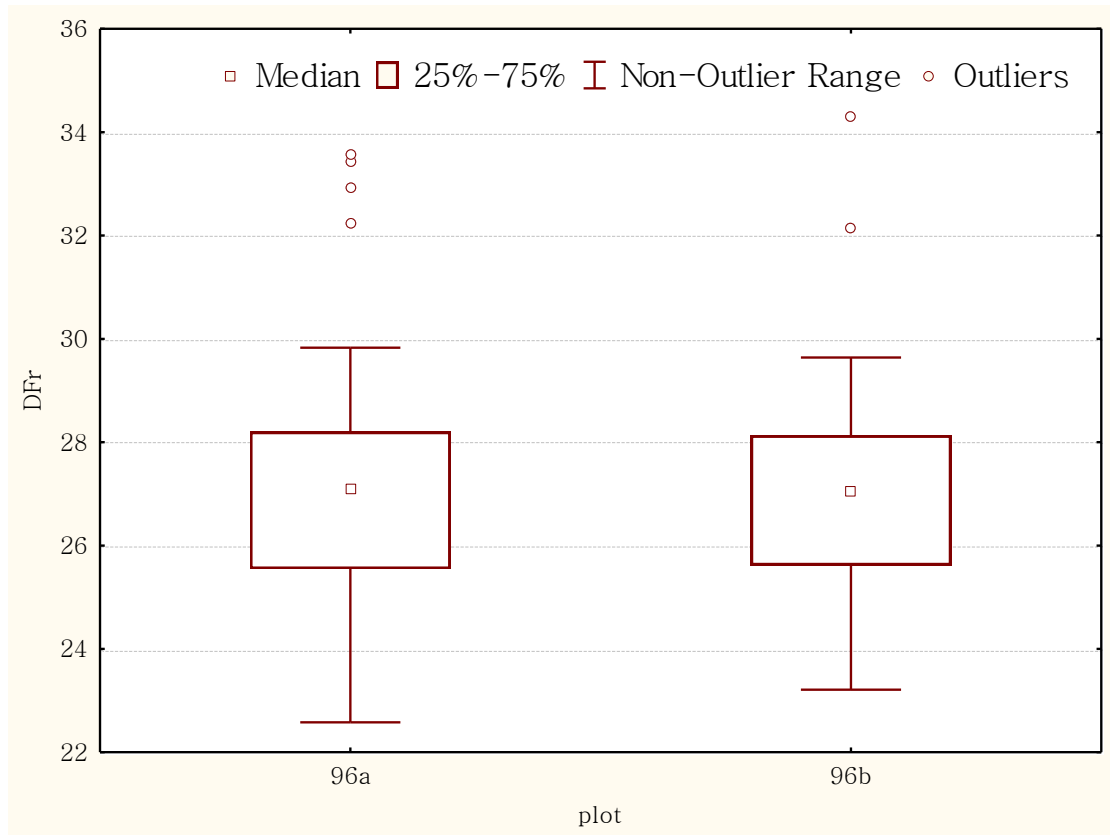


圖 42 臺灣杉敲擊 DFr 值分布

(二) 數位探針式木材強度檢測

生長錐鑽取年輪並檢測林木內部材質，再透過 X 光拍攝可對木材斷面密度之分佈狀況，進行準確的測定，但因鑽取樹芯對立木仍然屬於侵入性破壞，如傷口處理不當，有可能造成立木之侵入性病害，而 DmP 非破壞檢測系統，係採用探針進行檢測，其傷口相對小，造成立木之侵入性病害之機會較小，因此本研究以 DmP 非破壞檢測系統，進行木材密度檢測。

本研究鑽探所有樣木樹高 1.3 m 位置，其中 97 年疏伐樣區鑽探第 16 號樣木時圖 43，鑽探深度 8-10 cm 之阻抗驟降，因此判定為中空腐朽；而打擊 DFr 值 21.2，也較正常平均值 29.5 低許多。

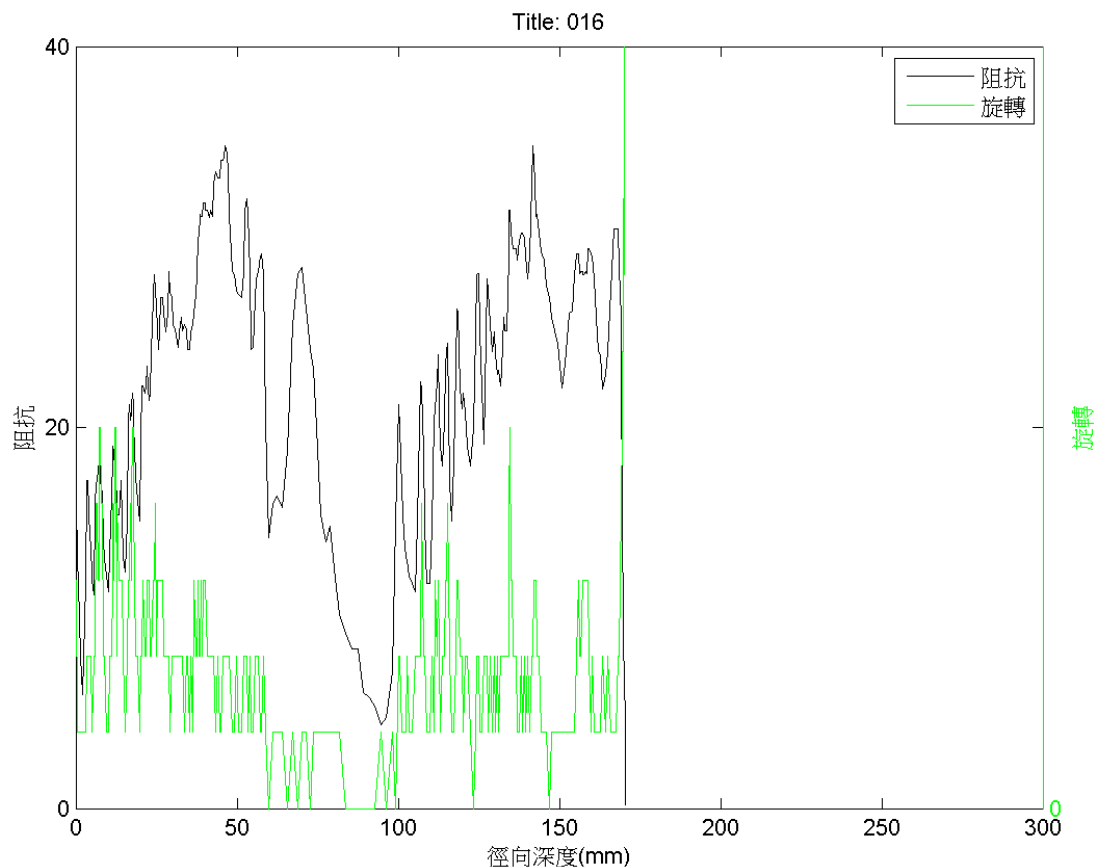


圖 43 97 疏伐區第 16 號阻抗分布

未疏伐樣區之第 38 號樣木為枯立木，其鑽探結果如圖 44，全程鑽探阻抗較低，表示該枯立木已逐漸腐朽，導致木材強度下降。而其它株枯立木材質強度目前正常(圖 45)，應盡速伐採利用。

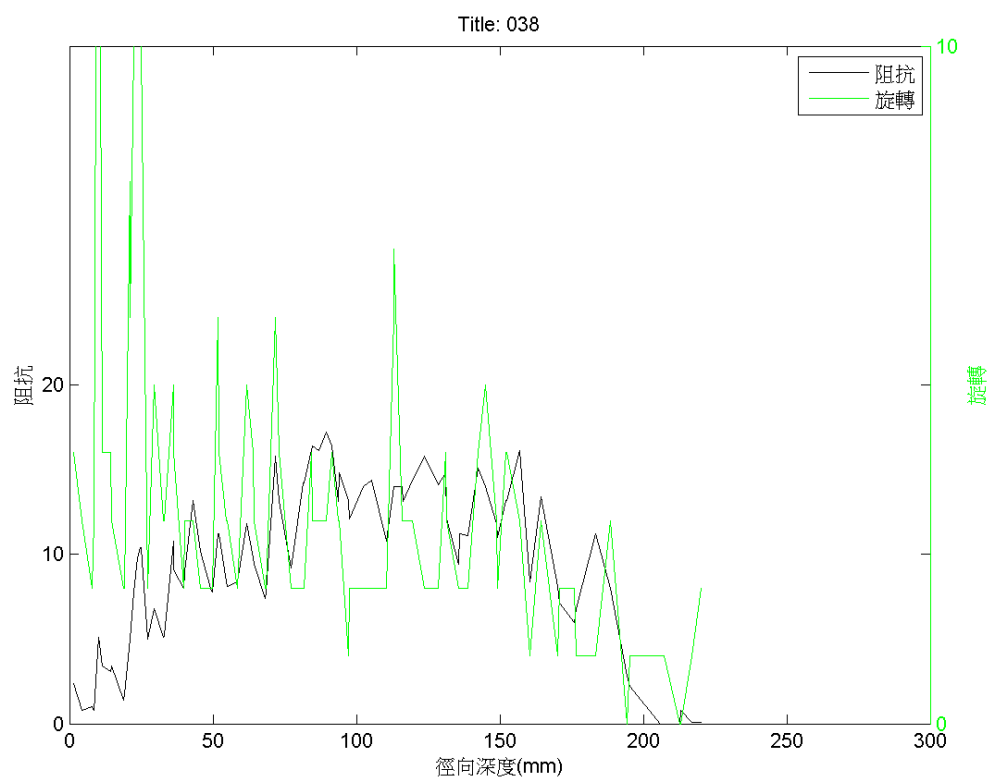


圖 44 未疏伐樣木 38 號阻抗分布

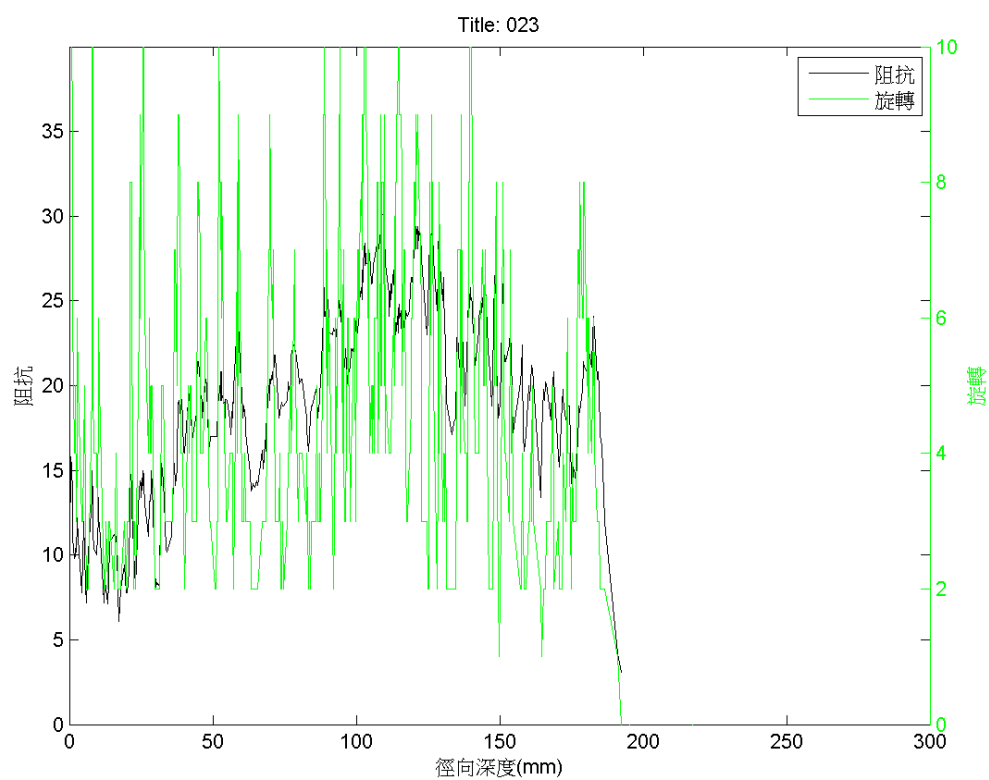


圖 45 未疏伐樣木 23 號阻抗分布

五、 地被多樣性及覆蓋度

未疏伐林地的地被長期未受干擾，因此有較多的苗木存活，地被平均高度較高；而疏伐一年後的地被植生恢復良好，覆蓋完整無明顯裸地，覆蓋度達 82.5%，疏伐 2 年後之地被覆蓋度皆在 85%以上(圖 46)，且隨時間增加，地被高度逐漸增加，而疏伐 4 年後之地被，已有部分木本苗木生長。

表 7 地被調查分析

主要樹種	紅檜	紅檜	紅檜	紅檜
疏伐年度	預定 104	97	98	101
地被物種數	10	18	15	10
地被總數量	100	87	143	115
地被 D_{Si}	0.68	0.89	0.70	0.77
地被覆蓋度(%)	95	95	85	95
主要樹種	紅檜	紅檜	臺灣杉 a	臺灣杉 b
疏伐年度	102	103	96	96
地被物種數	18	5	12	12
地被總數量	138	25	173	173
地被 D_{Si}	0.77	0.69	0.64	0.64
地被覆蓋度(%)	82	25	50	50

由辛普森指數表示地被多樣性，未疏伐林地及半年內疏伐之地被的多樣性指數 <0.7 ，未疏伐林分為競爭後的優勢種，而剛疏伐完的地被則是散播速度快的優勢種佔據，而疏伐 2 年後之多樣性指數 >0.7 ，其物種數也較多。多樣性指數及覆蓋度較低的臺灣杉林地是因為物種種類較集中，且地表充滿枯枝及落葉，也有助於保護土壤避免流失。

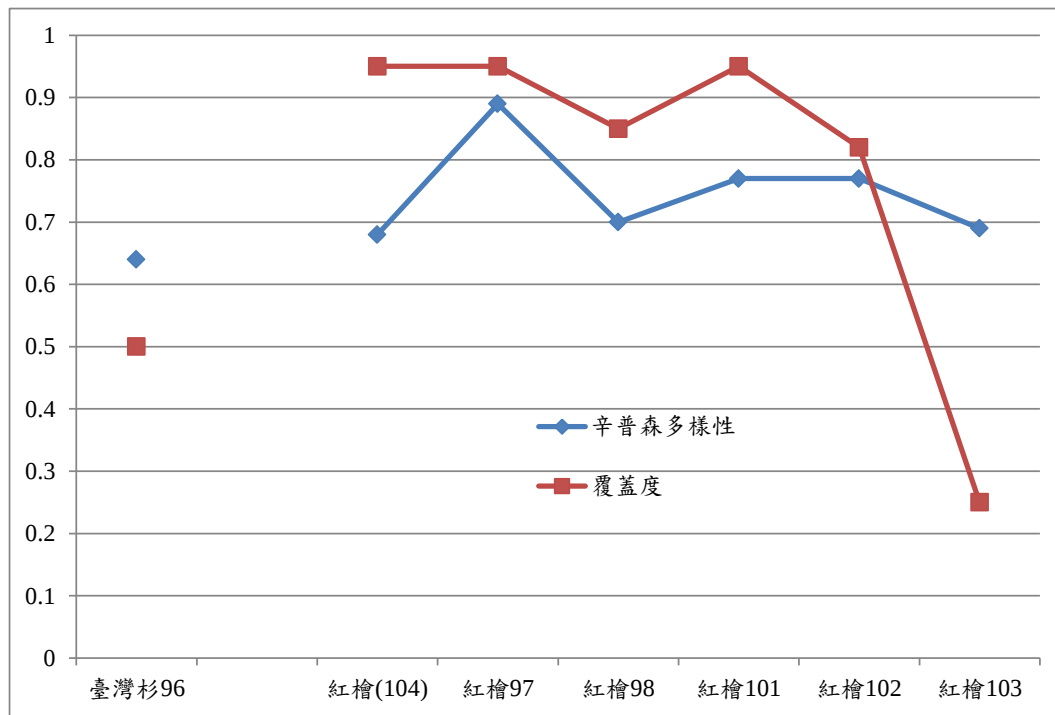


圖 46 不同樣區之地被覆蓋度

表 7 主要地被物種

主要地被	紅檜(104)	紅檜 97	紅檜 98	紅檜 101
1	玉山紫金牛	月桃	冷清草	月桃
2	月桃	大冷水麻	月桃	冷清草
3	蕨	柏拉木	咬人貓	大冷水麻
4	腎蕨	腎蕨	通脫木	刺蔥
5	竹葉草	冷清草	廣葉鋸齒雙蓋蕨	火炭母草
主要地被	紅檜 102	紅檜 103	臺灣杉 96a	臺灣杉 96b
1	月桃	月桃	月桃	月桃
2	冷清草	冷清草	腎蕨	腎蕨
3	大冷水麻	薄瓣懸鉤子	冷清草	冷清草
4	柏拉木	咬人貓	紅淡比	颱風草
5	火炭母草	阿里山薊	颱風草	細葉饅頭果

六、 林木競爭與林分密度管理

紅檜為長伐期之樹種，材質之需求甚為重要，但造林地林木幹形分岔嚴重，且枝條不容自然修枝，而本研究林齡已 40 年生以上，分岔木不可避免，因此建議配合疏伐進行修枝工作，減少節的數量。而臺灣杉幼期生長甚速，研究區內的單一主幹通直，但枯死枝條殘存，另有部分大枝條不易自然修枝。因此建議配合疏伐期間進行修枝工作，以利增加林木品質。

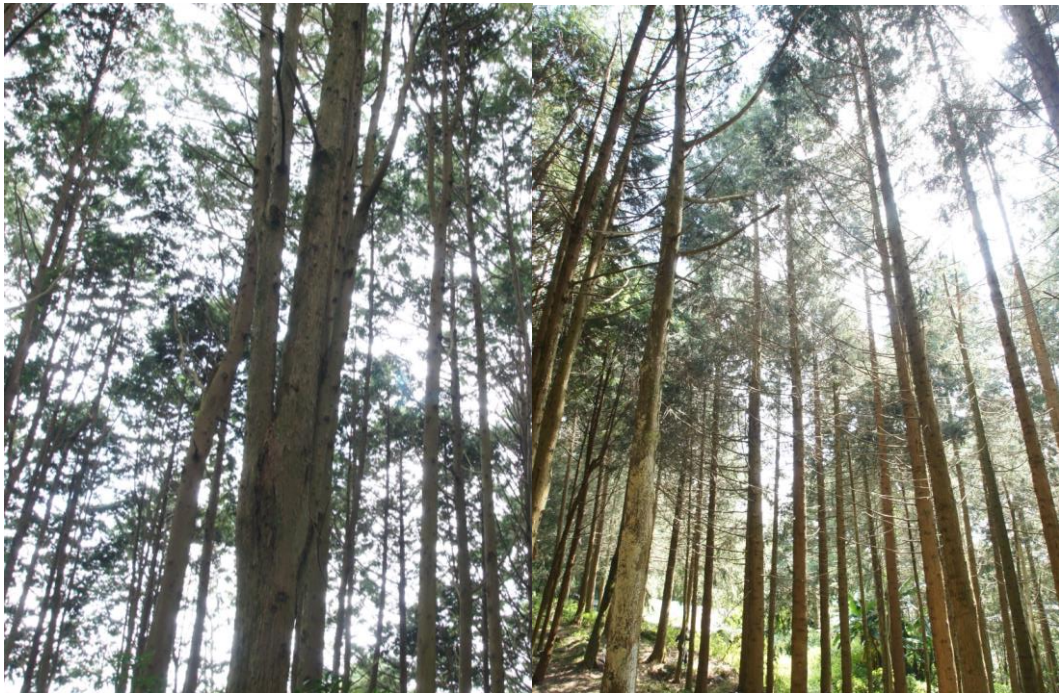


圖 47 紅檜未適時修枝所產生之分岔木(左)及臺灣杉枯枝(右)

林分的蓄積與生長是經營木材生產的核心，亦是森林經營計畫擬定的重要依據，針對 7 年生以上之造林地，由於枯枝及生長弱勢活枝對林木材質有不良影響並減低其利用價值，應進行中後期撫育，例如為改進木材品等，選擇有價值之經濟樹種，進行修枝工作；為促進林木肥大生長，在主伐之前需施行多次疏伐，將形質不良及遭病蟲為害之林木亦於同時除伐，在一定的立地條件下，林分密度是決定木材收穫的重要因子之一，而森林的撫育作業中之疏伐作業是控制林分密度的重要工作，林分密度管理圖(圖 48)是根據林木大小、林分密度與生長之關係所編繪的圖形，可供為疏伐計畫編訂時的依據。

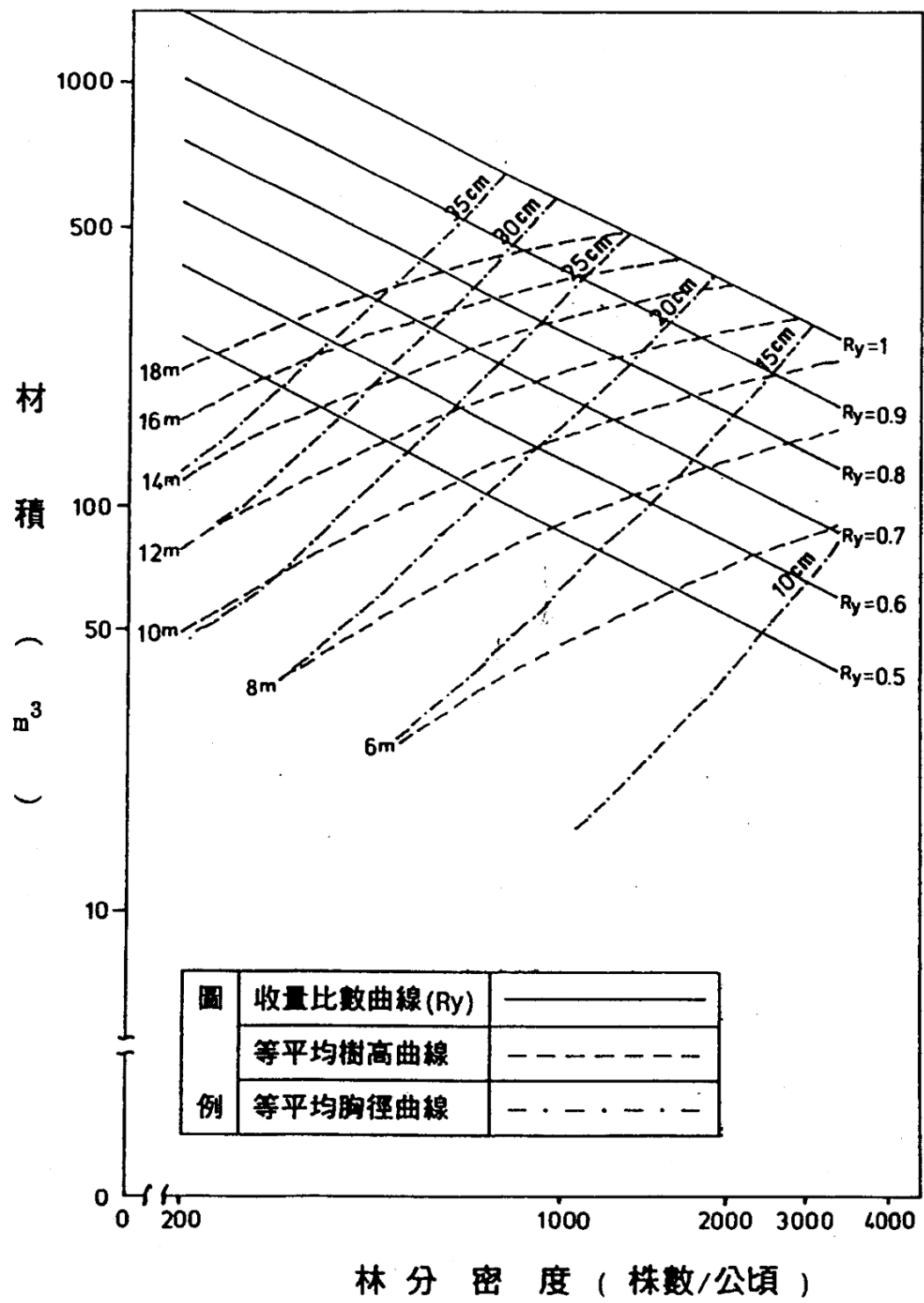


圖 48 紅檜人工林之林分密度管理圖(顏添明，2002)

林木競爭指數以林木位置及胸徑為依據，計算周圍對中心樹的競爭關係，周圍樹木越多以及周圍樹木的胸徑越大，會使中心樹受到的競爭較高，通常競爭指數較高的樹木極有可能是劣木或中木，因此林木競爭指數可作為疏伐選木參考依據之一，圖 49 是臺灣杉樣區的林木位置圖，圖示大小代表胸徑尺寸之大小。

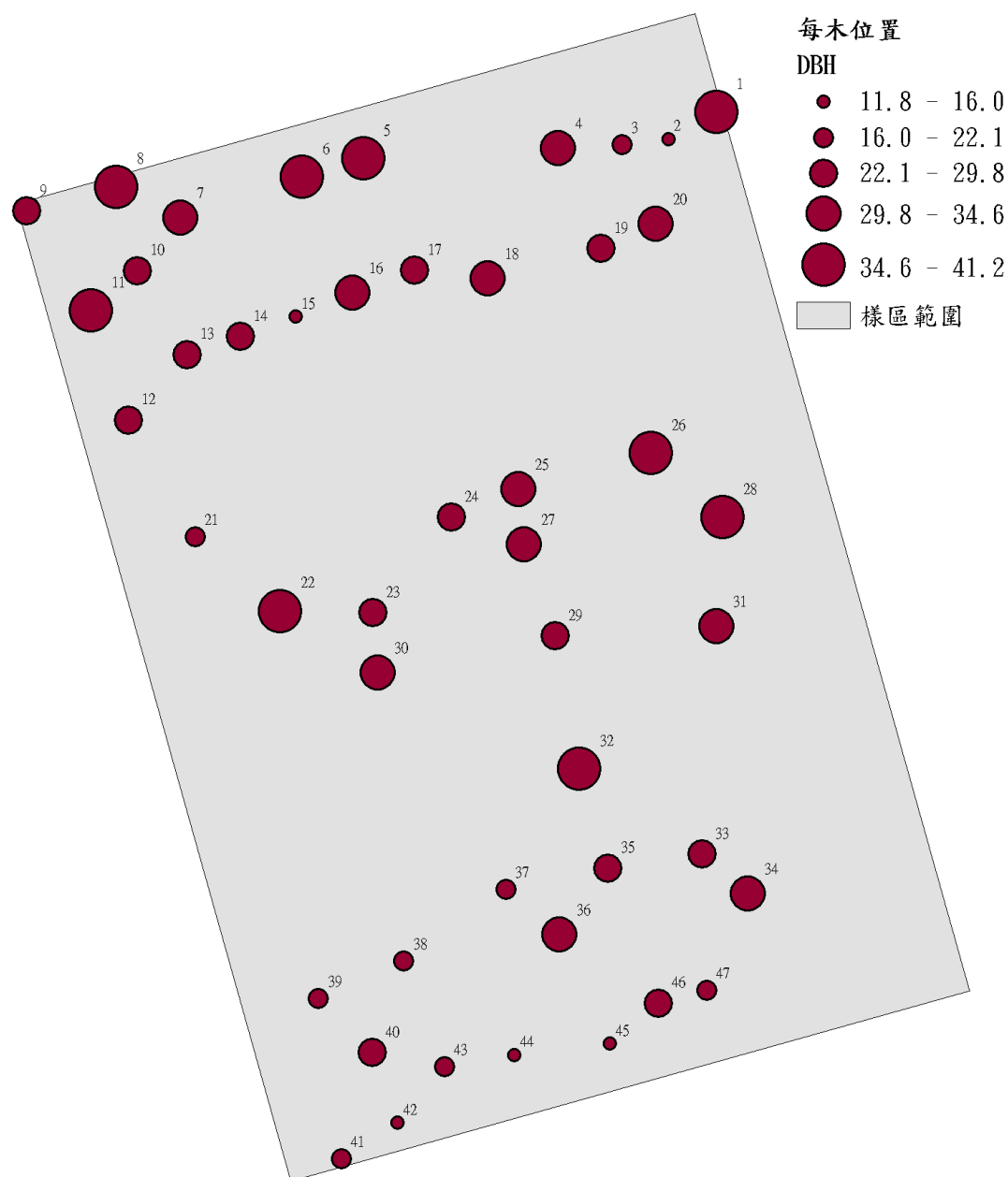


圖 49 臺灣杉徑級林木位置圖

為簡化繁瑣之計算，利用地理資訊系統的模組功能，將 Buffer、Clip、Spatial join、Summary、Calculate 等功能整合(圖 50)，最終僅輸入含胸徑的林木位置圖即可計算出每株樹的競爭指數。

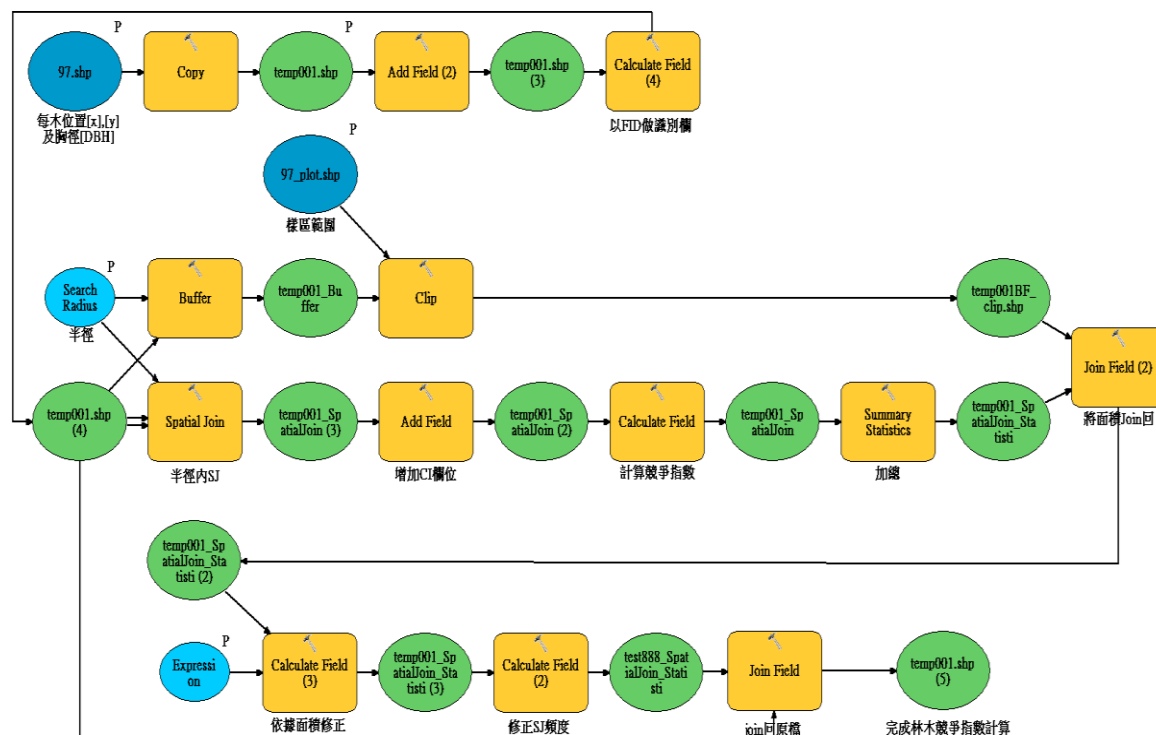


圖 50 利用地理資訊系統運算林木競爭指數

疏伐監測樣區之林木競爭指數之計算，其目的在於利用監測樣區之林木競爭動態變化，以瞭解疏伐後林木生長競爭的變化，並可提供何時應進行第二次疏伐之重要參考資訊。而對於應進行疏伐時則可提供疏伐木選擇之參考，雖然監測樣區僅提供小面積作業的疏伐模擬作業，但其可提供疏伐作業人員，在進行大面積疏伐前對疏伐作業訓練之參考。

例如先完成疏伐監測樣區之林木競爭指數分布位置圖如圖 51，圖示越大表示所受到的競爭越高，立木編號 2, 3, 8, 10, 13, 15, 17, 45, 47 之立木受到生長競爭較為激烈，而再配合胸高直徑大小，則可大略判定其可列為伐除對象。

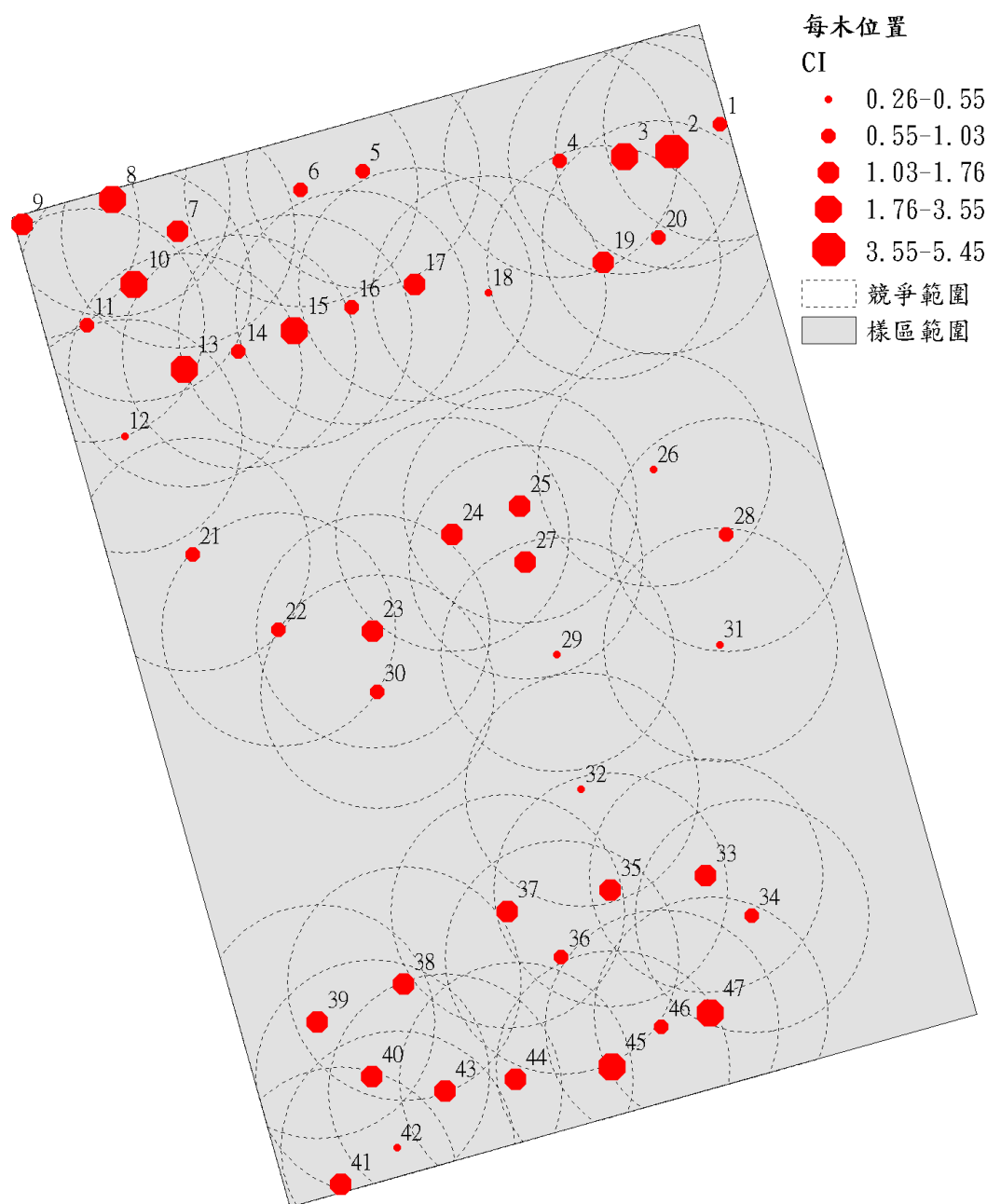


圖 51 臺灣杉人工林疏伐監測樣區林木競爭指數分布圖

林木競爭指數包含了空間分散程度及林木優勢程度，一個均值的林相，其密度應與競爭指數成正比，反之較低密度但不均值的林木競爭指數會高於較高密度但均值的林相，因此維持均勻的林相可減少非必要的過度競爭，漸少被壓木及枯立木的數量，因此相同密度的林分，其林木競爭指數越低越好，如 97, 101, 102, 103 林分密度相近，但反而是較高密度的樣區(500 株/ha, 600 株/ha)林木競爭指數較低(表 8)。

表 8 林木競爭指數

主要樹種	紅檜	紅檜	紅檜	紅檜
疏伐年度	預定 104	97	98	101
株數(N/ha)	1,008(496)	500	360	600
平均競爭指數	1.6	0.46	0.0	0.68
主要樹種	紅檜	紅檜	臺灣杉 a	臺灣杉 b
疏伐年度	102	103	96	96
株數(N/ha)	480	460	940	980
平均競爭指數	0.9	1.0	1.34	1.48

七、疏伐效益綜合評估

由已疏伐林分之各項指標與未疏伐林分比較，可顯示剛疏伐葉面積指數(LAI)下降至 0.84，雖然初期總出生產力會降低，但爾後會逐漸恢復至 1.11-1.74，而臺灣杉林分較密，葉面積指數 2.9 以上；健康度評估方面，密度較高的未疏伐紅檜林分及臺灣杉林分的健康度較低，分別是 0.65 及 0.61，顯示較密的林分，因林木過度競爭，過高的重疊度、活冠層比例降低已經讓林分內逐漸產生許多被壓木及枯立木；材質檢測方面除了枯立木外，大部分立木材質都屬於正常；林木競爭指數方面，未疏伐林分及臺灣杉林分的競爭指數較高，林木分布較為接近，產生生長競爭，如該林分不進行疏伐將造成生長的衰退及健康度的下降；而地被多樣性及覆蓋度方面，雖然一開始疏伐會驟降，但經過一年即可恢復至覆蓋度 82%，兩年後可恢復至 85-95%；整體而言，疏伐對林地的傷害屬短期可立即恢復，而對林木健康、生長空間是有幫助的。

表 9 紅檜及臺灣杉人工林疏伐監測樣區之各項指標

主要樹種	紅檜	紅檜	紅檜	紅檜
疏伐年度	預定 104	97	98	101
林齡	43	43	43	43
胸徑(cm)	32.4±8.4	34.9±8.4	36.3±8.2	30.2±6.6
株數(N/ha)	1,008	500	360	600
葉面積指數	2.02	1.11	1.74	1.19
健康度	0.65	0.80	0.77	0.78
材質檢測	正常	正常	正常	正常
競爭指數	1.6	0.46	0.0	0.68
地被 D _{Si}	0.68	0.89	0.70	0.77
地被覆蓋度(%)	95	95	85	95

續表 9 紅檜及臺灣杉人工林疏伐監測樣區之各項指標

主要樹種	紅檜	紅檜	臺灣杉 a	臺灣杉 b
疏伐年度	102	103	96	96
林齡	43	43	21	21
胸徑(cm)	28.0±6.9	28.6±6.9	28.1±7.5	27.8±10.1
株數(N/ha)	480	460	940	980
葉面積指數	1.22	0.84	2.93	4.22
健康度	0.73	0.80	0.64	0.61
材質檢測	正常	正常	正常	正常
競爭指數	0.9	1.0	1.34	1.48
地被 D _{Si}	0.77	0.69	0.64	0.64
地被覆蓋度(%)	82	25	50	50

八、疏伐監測樣區之調查方法及流程

(一) 調查項目

依據國有人工林作業疏伐規範，必須具備的樣區數量及調查項目如表 10，一般調查時首重樣區範圍的設置，尤其山地地形起伏大，水平距離須使用儀器輔助，才能確保取樣精度。

表 10 疏伐樣區應調查項目

項目	單位	備註
樣區面積	0.05 ha	水平距離 25 m x 20 m
樣區數量	各一個	林地不相連、林型不同
樣區數量	每 4 ha 設置一個	20 ha 以下
樣區數量	每 8 ha 設置一個	>20~40 ha
樣區數量	每 16 ha 設置一個	>40~100 ha
樣區數量	每 32 ha 設置一個	>100 ha
每木位置	0.1 m	平面投影
胸徑	0.1 cm	儀器、方法一致
樹高	0.1 m	儀器、方法一致
樹冠級	優、中、裂	三級
林木形質	分叉、彎曲、斷頂、病蟲害、樹幹受損、腐朽、枯死	
相對光度	(林內/林外相對光度)%	
其他		

(二) 光達樣區設置

光達點雲拍攝時，應選擇周圍遮蔽較少的地點，目標是以最少次數拍攝取得最完整的資料，而共軛標的功能是協助不同站拍攝的點雲資料，能夠經由這個共同接合點準確的连接在一起，兩個拍攝站之間至少須能夠通視相同的四點共軛標，架設完成後必須清除遮蔽物，拍攝精度設定越細緻，取得的資料越能有效還原現場，除了儀器能力外，也必須考慮時間及電腦軟硬體的處理能力，外業拍攝工作一般需要兩人一同作業，拍攝光達點雲資料後，大部分工作就轉往內業進行。

內業工作項目較多，首先把各站點的資料透過共軛點接合，匯出合適精度的點雲資料保存，取得點雲後會進行樣區範圍裁切，去除周圍的非目標物，接著針對每一棵樣木做裁切，以方便量測胸徑、樹高及樹冠級，同時裁切好的立木也可以做為疏伐密度模擬使用。

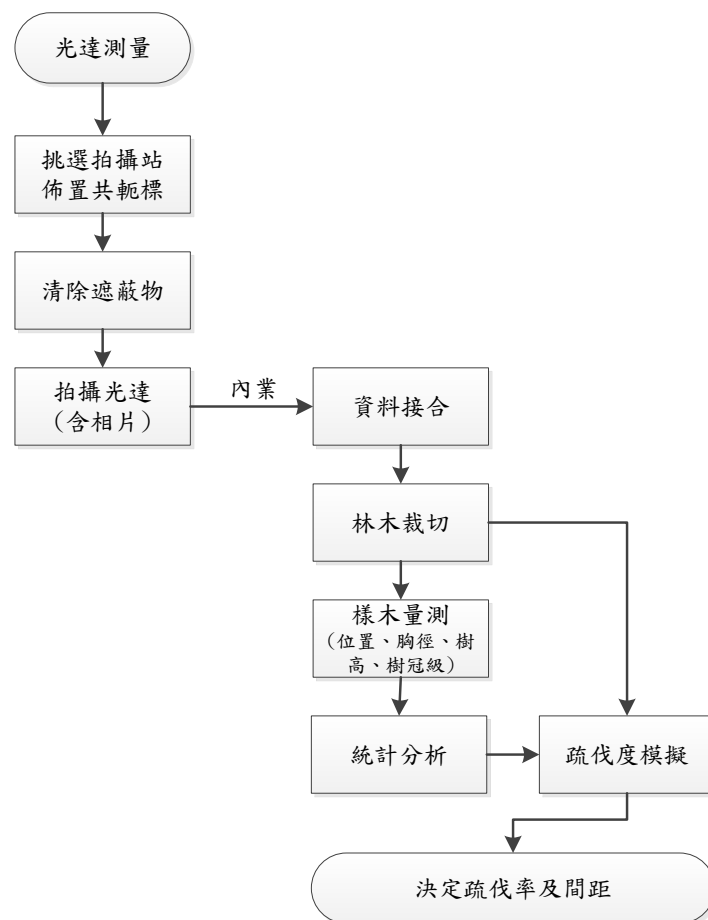


圖 56 光達設置樣區流程

(三) 一般樣區設置

樣區設置範圍極為重要，因此在有坡度的斜面上比須將斜距換算為水平距，例如使用羅盤儀測量仰俯角，以三角函數計算水平距離，而樣區範圍另一項重點為長方形的 90 度轉角，同樣可以利用羅盤儀及標竿來測量夾角。若樣區容易到達，就特別適用具備雷射測距的全站儀，使用時僅需定平及歸零即可，測量立木時會立即顯示水平面的座標，能夠馬上判定立木是否在界線內。

樹高是另一項重點，精確與否將影響材積推估值，較低的立木使用測高桿可獲得精確的數據，在較開闊的林地可使用角度型的測高儀，而使用具備陀螺儀的雷射測距儀則能快速又準確的測量樹高。

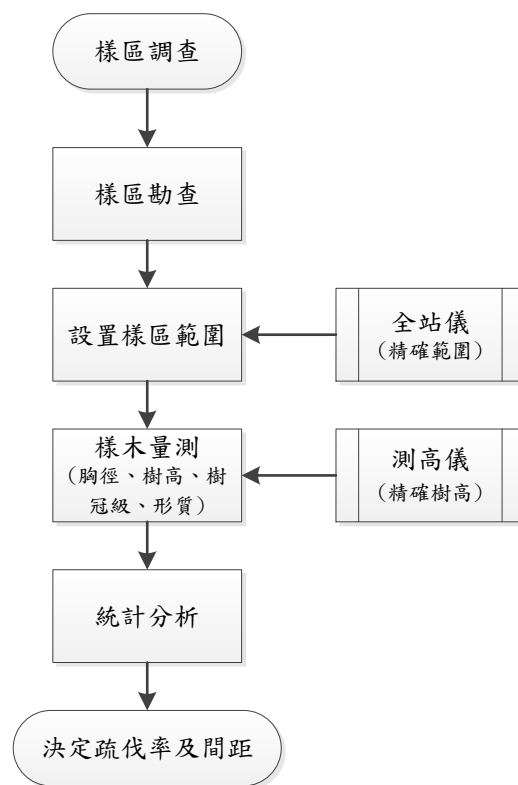


圖 52 一般疏伐樣區設置流程

表 11 疏伐樣區調查表格

林班____ 林相____ 編號____ 座標____,____ 日期____ 人員____

編號	樹種	胸徑	樹高	樹冠級	形質	備註
枯死×	-	XX.X	XX.X	1-3	岔 彎 斷 病 損 蟲 朽	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

註：樹冠級包含優中劣三級；形質包含分岔、彎曲、斷頂、病蟲害、樹幹受損、腐朽及枯死。

(四) 監測型樣區設置

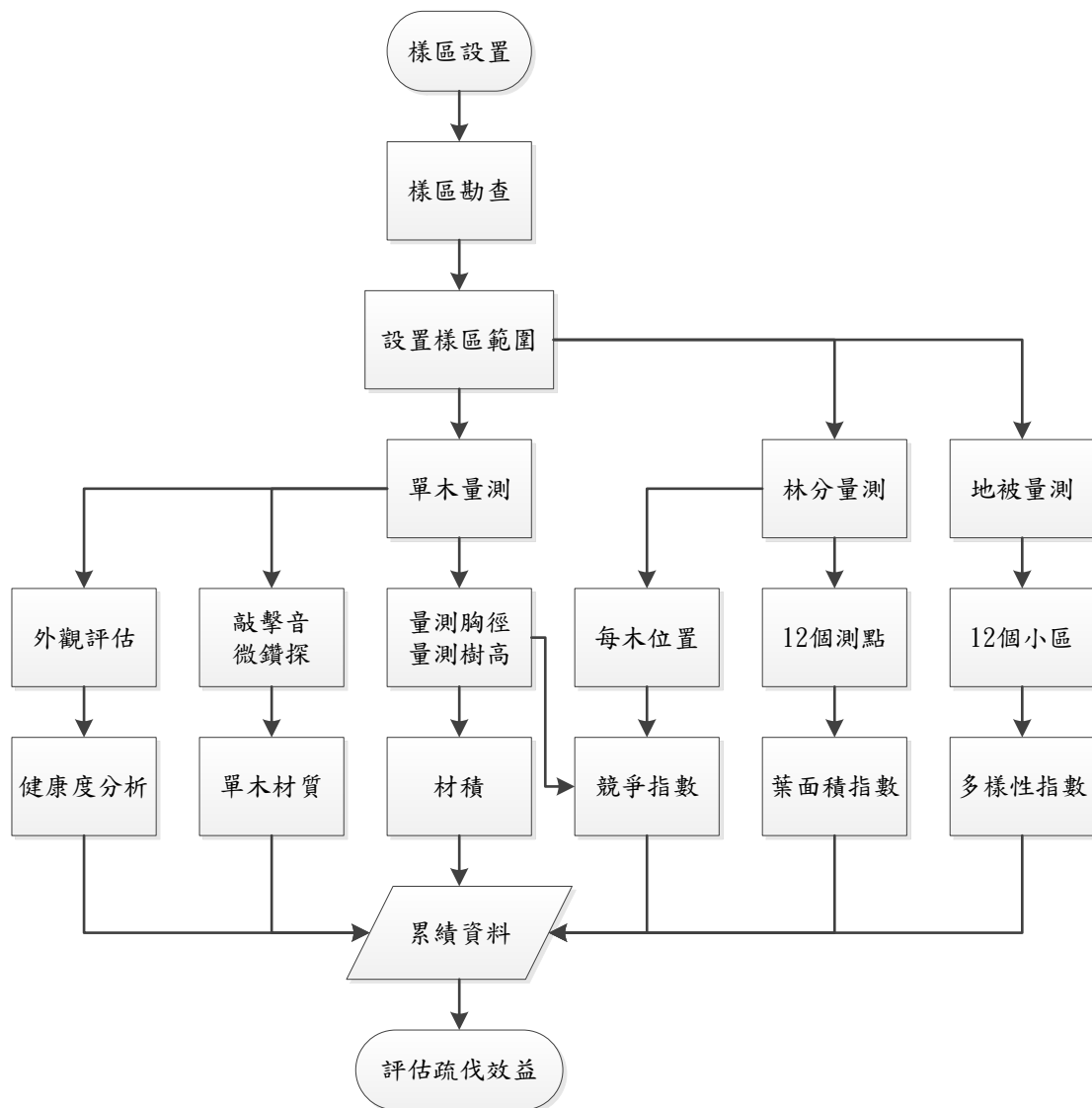


圖 53 監測型樣區設置流程

(1) 樣區範圍及每木位置

樣區面積：0.05 ha。

樣區範圍：25 × 20 m²。

每木位置：

使用全站儀測量每木位置，架設於長方形樣區之一角(如 0, 20)，再向其中一角定向，之後對樣木進行座標測量。

若參照森林永久樣區設置($28.4 \times 17.6 \text{ m}^2$)，樣區範圍的樣線沿坡向延伸，樣線= $28.4/\cos(\text{角度})$ ，而返回內業計算林木競爭時，之前使用皮尺測量的樣線部分再依坡度還原，樣線水平距離= $\text{斜距} \times \cos(\text{角度})$ 。

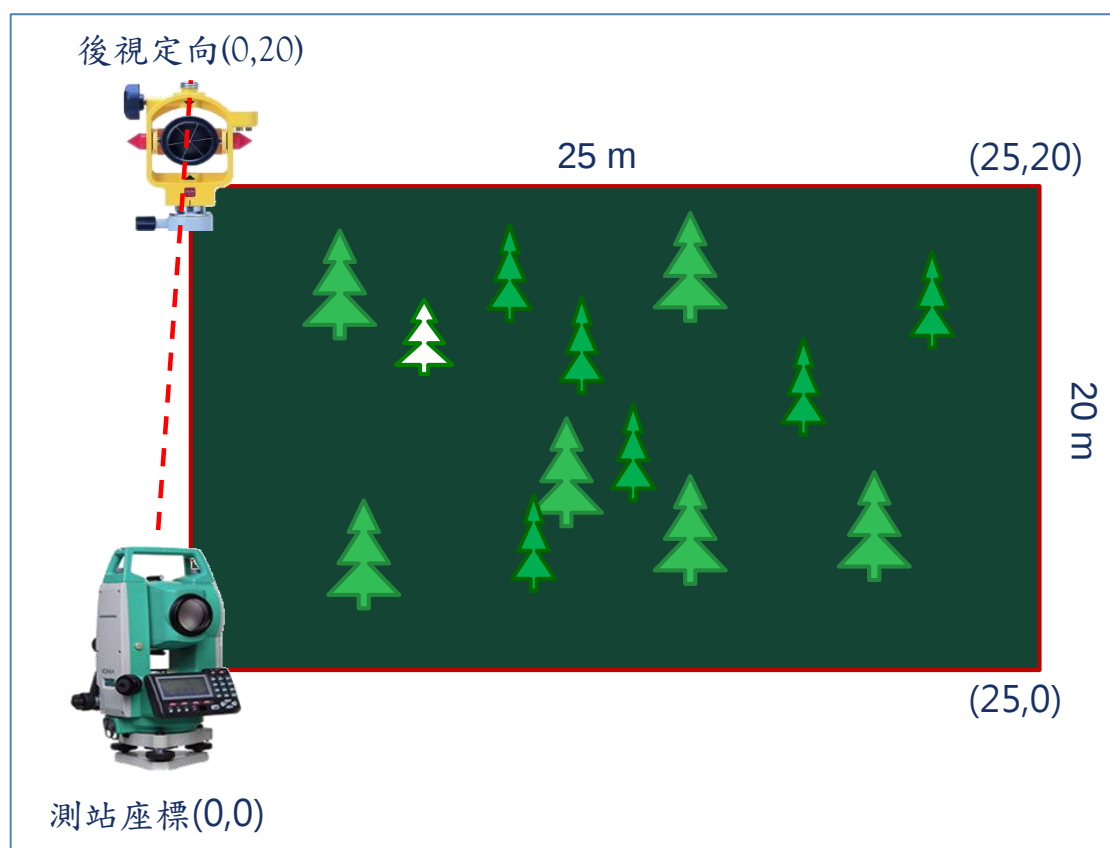


圖 54 每木位置測量

(2) 林木健康度評估

健康度以評估 8 項林木外觀作為指標依據，分別為根部損傷、冠層狀態、樹冠密度、樹冠枯梢、樹冠重疊、活冠層比、有無新葉及葉無退色(表 12)，加權計算方式為 $=(\text{根部損傷}/4 + \text{冠層狀態}/6 + \text{樹冠密度}/10 + \text{樹冠枯梢}/7 + \text{樹冠重疊}/5 + \text{活冠層比}/8 + 0.5 \times \text{有無新葉}/1 + 0.5 \times \text{葉無退色}/1)/7$ 。

表 12 森林健康評估等級

I	根部	II	冠層狀態	III	樹冠密度	IV	樹冠稍枯	V	樹冠重疊	VI	活冠層比例	VII	有無新葉	VIII	葉無退色		
3	正常	6	無落葉	10	95%	7	無	5	上層木	8	91-100%	1	有新葉	1	無退色		
2	裸露無傷	5	25%	9	85%	6	1-15%	4	與鄰木樹冠重疊少於 1/4	7	76-90%	0	無新葉	0	有退色		
1	裸露有傷	4	26-50%	8	75%	5	16-30%	3	與鄰木樹冠重疊少於 2/4	6	61-75%						
0	根部死亡	3	51-75%	7	65%	4	31-45%	2	與鄰木樹冠重疊少於 3/4	5	46-60%						
		2	76-90%	6	55%	3	46-60%	1	樹冠完全被覆蓋	4	31-45%						
		1	90%以上	5	45%	2	61-75%	0	枯死	3	16-30%						
		0	枯死	4	35%	1	76-90%			2	1-15%						
				3	25%	0	91-100%			1	完全落葉						
				2	15%					0	枯死						
				1	5%												
				0	枯死												

表 13 監測樣區外業調查表格

樣區編號:_____ 樣區座標:_____ 記錄日期:_____ 調查人員:_____

編號	樹種	DBH	樹高	根部損傷	冠層狀態	樹冠密度	樹冠枯梢	樹冠重疊	活冠層比	新葉	葉無退色	備註
枯死✕	-	xx.x	xx.x	0-3	0-6	0-10	0-7	0-6	0-8	0-1	0-1	
1												
2												
3												
4												
5												
6												

表 14 監測樣區內業整理表格

編號	樹種	DBH	樹高	材積	DFr	x	y	CI	根傷	狀態	密度	枯梢	重疊	活冠	新葉	退色	健康度	備註
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		

(3) 立木材質評估

單木材質檢測可由樹種儀器檢測，如數位探針式強度檢測或是敲擊式立木檢測，特性如下。

數位探針式強度檢測：

檢測範圍是線形路徑，若強度驟降則顯示內有腐朽。

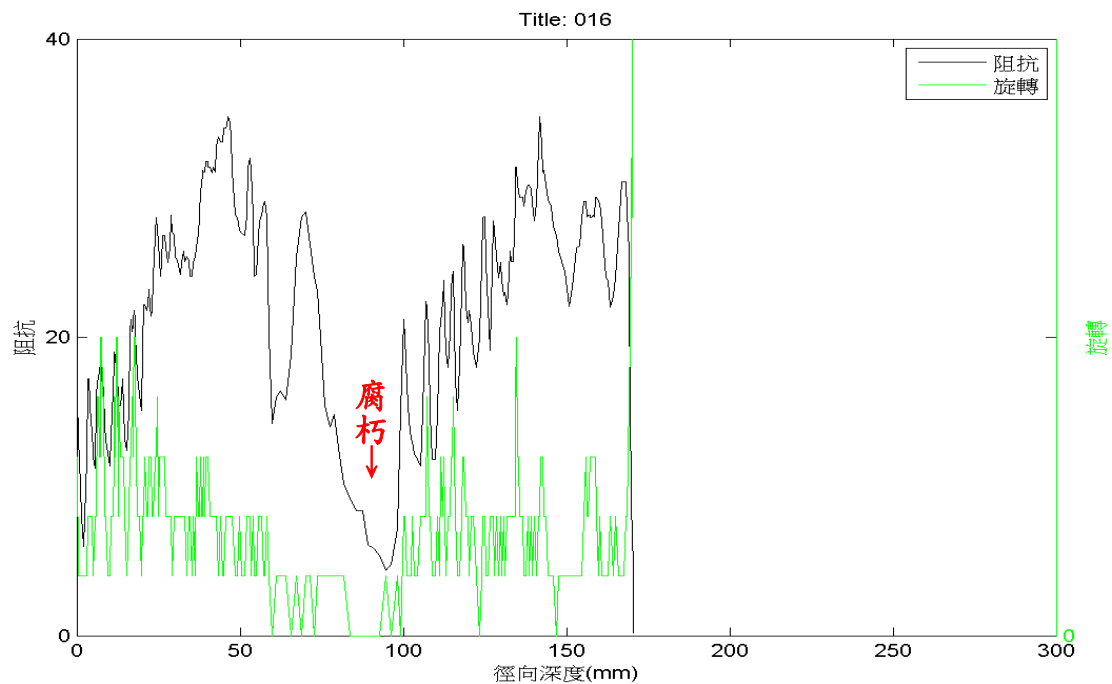


圖 60 鑽探腐朽

敲擊式立木檢測：

後者為樹幹區段檢測，紅檜 DFr 值平均 29.5；臺灣杉 DFr 值平均 27.1，若超過均值±10 材質可能開始有變化，若低於均值 20，則可能已腐朽。

(4) 材積估算

紅檜、臺灣杉採用胸徑及樹高為變數之材積式。

$$\text{材積式 } V = 0.0000944 \times D^{1.9947405} \times H^{0.659691}$$

(5) 林木競爭指數估算

使用 ArcGIS 的 toolbox 模組功能，取其中 Buffer、Clip、Spatial join、Summary、Calculate 等功能組合成一個新工具，同時邊緣木也會依據界內比例修正數值，使用者需準備包含[DBH]、[x]、[y]欄位的林木位置圖及無欄位的樣區範圍圖，即可運算出競爭指數。

- i. 操作時，先準備好兩樣圖資，一是樣區範圍；二是每木位置圖，屬性表包含含 x,y,DBH 的欄位。
- ii. 於 ArcMap-ArcToolbox 開啟 CI.tbx 檔案，內含設計好的 Model(CI 通用)。
- iii. 輸入對應的圖層及輸出的位置，輸出圖層的副檔名須鍵入.SHP。

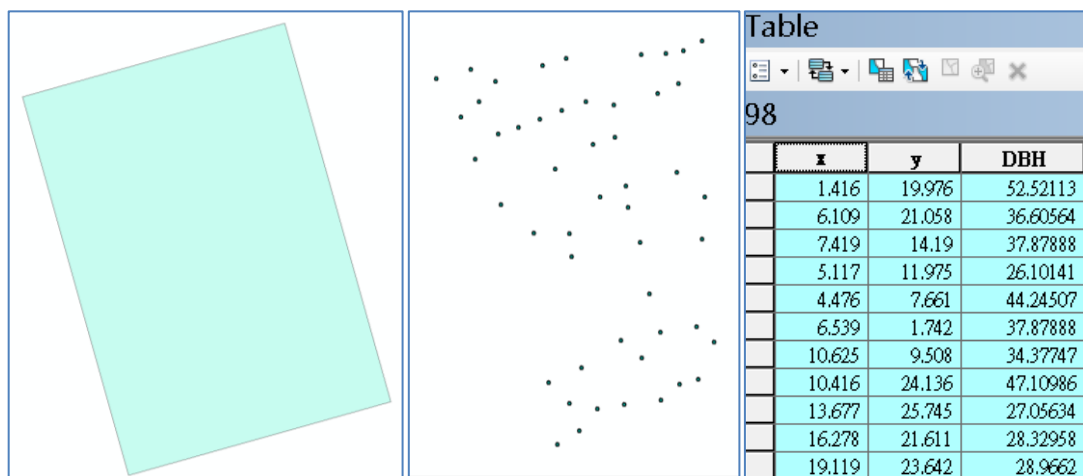


圖 60 計算林木競爭所需圖資及格式

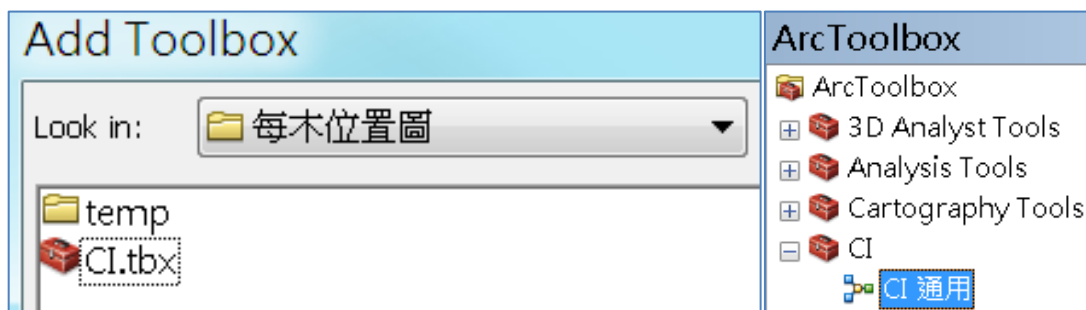


圖 60 計算林木競爭的工具模組

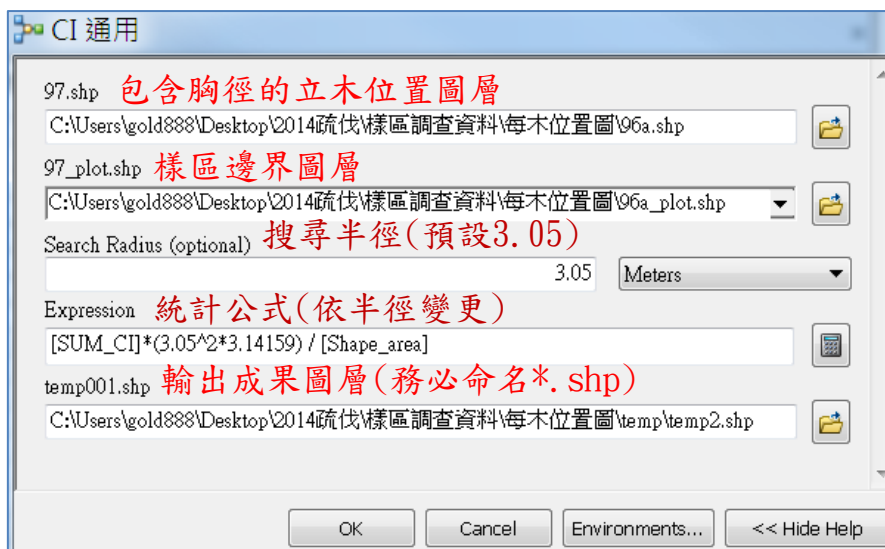


圖 55 林木競爭工具模組的操作方式

(6) 葉面積指數估算

葉面積指數以 LAI2200 或其他工具測量及推估，使用 LAI2200 時，於樣區中盡量等距分布取樣(圖 56)，但避免貼近樹幹量測，每筆數據會有 5 個值，分別是 5 個不同角度同心環的光度，光空域為 A；林下為 B，計算加總後即為該點的葉面積指數(圖 57)。

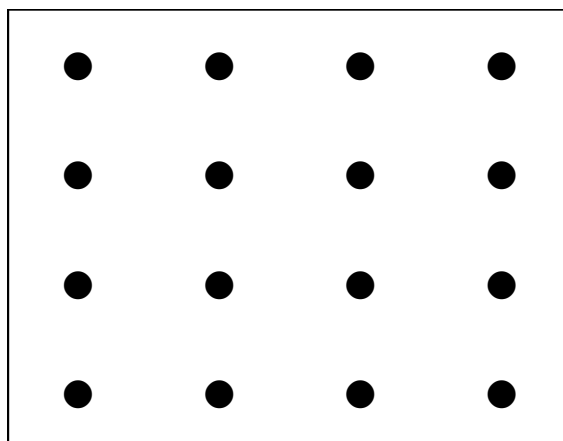


圖 56 等距分布樣點

$$LAI = 2 \sum_{i=1}^5 \ln\left(\frac{A}{B}\right) \cos(\theta) W_i$$


angleθ	Wi=sinθdθ	cos(θ)Wi
7	.034	0.033747
23	.104	0.095733
38	.160	0.126082
53	.218	0.131196
68	.494	0.185056

圖 57 葉面積指數計算方式

表 15 葉面積指數計算範例

項目\環	1(7°)	2(23°)	3(38°)	4(53°)	5(68°)
林下(B)數據	63	99	428	95	49
林外(A)數據	481	468	1360	498	451
小計	0.07	0.15	0.15	0.22	0.41

- i. 第一筆第一個環的 EXCEL 計算方式為=LN(481/63)*0.033747
- ii. 第一筆第二個環的 EXCEL 計算方式為=LN(468/99)*0.095733
- iii. ...
- iv. 加總五個環的數值=SUM(0.07, 0.15, 0.15, 0.22, 0.41)即為該樣點的 LAI。

(7) 地被多樣性指數估算

地被樣區取樣 12 個 $1 \times 1 \text{ m}^2$ ，拍照後將像片拼接成一幅影像，使用 ArcGIS 開啟數化種類及數量，辛普森多樣性指數 $= 1 - \sum (n/N)$ ， n 為某物種的數量； N 為所有物種的總體數量。



圖 58 覆蓋度及物種數量判釋

九、 教育訓練課程

教育訓練室內 3 小時包含疏伐理論及光達點雲處理，室外課 4 小時部分包含樣區設置、各項儀器原理及實際操作(表 16)，每位學員領有一本教育訓練講義，課程照片如下。

表 16 教育訓練時數

時間	課程項目
1 小時	疏伐觀念與實務
1 小時	疏伐方法與疏伐木選定
1 小時	樣區設置方法(室外)
1 小時	光達點雲處理
1 小時	數位探針式木材強度檢測(室外)
1 小時	敲擊式單木內部檢測(室外)
1 小時	葉面積指數及森林健康調查(室外)



圖 59 早上學員簽到及上課情形



圖 60 複習各式測高方式



圖 61 講解立木材質檢測及林木健康評估方式



圖 62 練習 DmP 立木檢測方式



圖 63 練習敲擊式立木檢測儀及課後全員合照

陸、結論與建議

一、結論

- (一)地面光達應用在森林上，可準確測量林木位置圖，採用直接測量法量測胸徑時，經度足以最為連年生長量測定，而樹高受到冠層鬱閉影響，在稠密冠層下僅能獲取林分平均高度，而光達點雲使用裁切立木的方式處理，點雲可模擬疏伐後的林分狀態。
- (二)為了有效掌握林分生長情形，不僅要瞭解林分平均胸高直徑的發展，而且需要知道各直徑級的林木分佈，藉由 Weibull 連續機率密度函數用來描述直徑分佈探討生長趨勢，而且函數中的母數可做為推測林分生長收穫的工具。
- (三)林木競爭指數以林木相對位置及胸徑為依據，計算周圍對中心樹的競爭關係，周圍樹木越多以及周圍樹木的胸徑越大，會使中心樹受到的競爭較高，通常競爭指數較高的樹木極有可能是劣木或中木，因此林木競爭指數可作為疏伐選木參考依據之一。
- (四)森林健康由 8 個外觀項目評估立木狀態，可量化每株立木的相對健康程度，有助於了解立木是否處於生長旺盛或是已有衰退現象，以做為調整林分的參考依據。相對於森林健康由外部瞭解立木，立木材質檢測則是由測量木材內部的方式來評估立木的狀態，敲擊式感測範圍較大，而鑽探式的 DmP 則以局部精密的方式檢測木材內部有無腐朽，兩種方式合併運用可以有效評估立木材質。
- (五)臺灣杉不易自然修枝，為提升木材品質，建議 99-100 林班之臺灣杉人工林編訂撫育修枝或是在未來疏伐期間一併編訂。紅檜因分岔較多，建議 98-99 紅檜人工林不一定要為了密度考量而保留已分岔之優勢木、次優勢木，可選擇保留較通直之中庸木。整體而言，已疏伐之林分不論在森林健康或

是木材品質皆優於未疏伐林分。

(六)本研究以多種科學量化方法，讓篩選疏伐木時有更多的參考依據，有助於擬定最適合的疏伐決策。

二、建議

- (一) 人工林經營之主要目標在於提供優質的木材，因此經理期間必須進行適當的疏伐撫育，才能培育健康生長的人工林，而疏伐撫育的效益評估，應建立有效的監測樣區，並定期實施調查，才能發揮監測樣區設置之目的。本計畫僅實施一年，目前已完成監測樣區之設置及監測調查模式之建立，為驗證監測調查模式對於疏伐效益評估之效度，必須進行樣區的連續性調查，因此建議樣區設置後每隔兩年應進行樣區的連續性調查，如此方可達成監測樣區設置之目的，亦可藉由林分蓄積之增加量評估疏伐對碳吸存之效益功能。
- (二) 本計畫所建置的林木健康度調查法，係利用目視觀測法，為達到調查的客觀性，進行林木健康調查前，調查人員必須經過訓練，且必須通過效度檢測通過，使評估標準一致，才可進行調查工作。
- (三) 疏伐作業效益的影響因素包括疏伐林齡、疏伐度及疏伐木的決定，而疏伐林齡及疏伐度的決定，取決於林分競爭狀態，而林分密度管理圖的建立為一重要參考依據，唯因臺灣目前在地區性的林區，對於紅檜、臺灣杉未具有完整林齡的造林面積，很難製作林分密度管理圖，建議地區性之樹種疏伐作業，應參照疏伐監測樣區之林分生長狀態，包括連續性調查所得資料，如胸徑生長、林木健康度、樹冠鬱閉狀態及林木材質監測等資料，綜合評估以決定疏伐林齡及疏伐度。而疏伐木選擇的適當與否亦影響疏伐效益，因此作業人員必須經過訓練，而監測樣區可以提供疏伐木

選擇教育訓練的場域，並利用監測資料提供教育訓練教材。

- (四) 疏伐作業雖然其目的在於伐除疏伐木，但對於留存木亦應一併加以撫育，例如留存之分枝應進行修枝作業，由於現行疏伐作業僅限於伐木、集材等事項，因此建議修枝作業列入留存木撫育之作業規範。
- (五) 疏伐基地之地形變化多樣，進行疏伐木集材時應避免於陡峭地形進行，減少林地破壞及水土的流失。建議於疏伐作業中加以明確規範。
- (六) 下層疏伐之疏伐木選擇，以直徑小的被害木、被壓木為主要對象，但對於明顯有外傷或分叉嚴重的直徑較大者，亦應加以伐除，以利中庸木生長，此為一般選木常忽略之現象，建議未來在進行工作人員訓練時應加以強調。

柒、參考文獻

- 王子定 (1964) 理論育林學上、下冊。國立編譯館，768 頁。
- 王成泰 (2007) 大雪山地區天然林林分結構及動態生長之研究。國立中興大學森林研究所論碩士論文。83 頁。
- 行政院農業委員會林務局屏東林區管理處 (1994) 荖濃溪事業區檢訂調查報告書。行政院農業委員會林務局屏東林區管理處，100 頁。
- 吳學平 (2001) 新竹林區柳杉人工林疏伐之工作研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。99 頁。
- 李隆恩、顏添明 (2010) 紅檜人工林疏伐後 4 年對林分及單木層級之影響。中華林學季刊 43(2): 249-260。
- 林子玉、賀主伯、林喻東 (1972) 杉木人工林疏伐試驗。中興大學實驗林研究報告 第四號：1-13。
- 邱志明 (2009) 疏伐對紅檜人工林碳吸存效益之評估。林業研究專訊 16(2): 31-36。
- 袁孝維、丁宗蘇、蔡若詩 (2004) 棲蘭山檜木林枯立倒木整理作業對鳥類群聚之影響。中華林學季刊 37(1): 29-36。
- 陳明杰 (2007) 疏伐作業對人工林林地水土保持影響。林業研究專訊 14(1): 10-13。
- 陳朝圳 (1985) 大雪山地區紅檜人工幼齡林生長模式之研究。國立中興大學森林研究所論碩士論文。125 頁。
- 陳麗琴、黃進睦、林俊秀、邱祈榮 (1997) 六龜試驗林臺灣杉人工林蓄積量及生長估測之研究。臺灣林業科學 12(3): 319-327。
- 游漢明、馬復京、張乃航、許原瑞 (2008) 人工造林加速森林復育。林業研究專訊 15(1): 10-13。

- 馮豐隆、李宣德 (2000) 林木位置圖之製作與應用。林業研究季刊 22(2): 61-72。
- 黃純夫 (1983) 非破壞檢測儀具設備概述，科儀產品新知 (1~3):48-52。
- 楊榮啟、陳昭明、林文亮 (1976) 柳杉人工林之經濟疏伐。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 118 號：39-94。
- 劉浚明 (1996) 臺灣杉人工林疏伐作業對林分結構與林分生長之效應。中華林學季刊 29(3): 111-122。
- 劉瑋育 (2008) 新化林場林型特性分析之研究。國立中興大學森林研究所論碩士論文。82 頁。
- 鍾旭和、邱志明、羅卓振南 (1992) 六龜地區臺灣杉人工林疏伐修枝效果之研究。臺灣林業科學 7(4): 291-304。
- 顏添明 (1993) 不同間伐強度對紅檜人工林生長之影響。國立中興大學森林學研究所碩士論文，77 頁。
- 顏添明 (2002) 紅檜人工林林分密度管理。中華林學季刊 35(1): 55-67。
- 魏浚紘 (2014) 應用光達技術於人工林之經營與監測。國立屏東科技大學生物資源研究所博士論文。
- 羅時凡、陳涓婷、沙學均、陳朝圳 (2008) 林木健康指標之建立與效度評估。林業研究季刊 30(3): 41-52。
- Al-kheder, S., Y. : Al-shawabkeh, and N. Haala (2009) Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry. Journal of Archaeological Science 36: 537-546.
- Amateis, R. L., P. J. Radtke, and H. E. Burkhart (1996) Growth and

- yield of thinned and unthinned plantation. *Journal of Forestry* 94(12): 19-23.
- Bailey, R. L., and T. R. Dell (1973) Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science* 19: 97-104.
- Damgaard, C. (1999) A test of asymmetric competition in plant monocultures using the maximum likelihood function of a simple growth model, Department of Terrestrial Ecology. National Environmental Research Institute.
- Donner, B. L., and S. W. Running (1986) Water stress response after thinning *pinus contorta* stands in Montana. *Forest Science* 32(3): 614-625.
- Hagar, J., S. Howlin, and L. Ganio (2004) Short-term response of songbirds to experimental thinning of young Douglas-fir forests in the Oregon Cascades. *Forest Ecology and Management* 199(2-3): 333-347.
- Kada, M., S. Roettger, K. Weiss, T. Ertl, and D. Fritsch (2003) Real-time visualisation of urban landscapes using open-source software. *Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing and International Symposium on Remote Sensing (ACRS 2003 ISRS)*, Busan, Korea.
- Moravie, M. A., M. Durand, and F. Houllier (1999) Ecological meaning and predictive ability of social status, vigor and competition indices in a tropical rain forest (India). *Forest Ecology and Management* 117: 221-240.
- Ohsawa, M. (2004) Species richness of Cerambycidae in larch plantations and natural broad-leaved forests of the central mountainous region of Japan. *Forest Ecology and Management*

189(1-3): 375-385.

Porte, A., and Bartelink, H. H. (2002) Modelling mixed forest growth: a 28 review of models for forest management. *Ecological Modelling* 150: 141-188.

Reitsma, R., J. D. Parrish, and W. McLarney (2001) The role of cacao plantations in maintaining forest avian diversity in southeastern Costa Rica. *Agroforestry Systems* 53: 185-193.

Remondino, F., and J. Niederoest (2004) Generation of high-resolution mosaic for photorealistic texture-mapping of cultural heritage 3D models, in: K. Cain, Y. Chrysanthou, F. Niccolucci, N. Silberman (Eds.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*. Brussels, Belgium, pp. 85-92.

Sullivan, T. P., D. S. Sullivan, P. M. F. Lindgren, and D. B. Ransome (2005) Long-term responses of ecosystem components to stand thinning in young lodgepole pine forest: II. Diversity and population dynamics of forest floor small mammals. *Forest Ecology and Management* 205(1-3): 1-14.

USDA Forest service (2007) *Forest inventory and analysis library. Phase3 field guide-crowns: measurements and sampling* 22pp.

Waltz, A. E. M., and W. W. Covington (2004) Ecological restoration treatments increase butterfly richness and abundance: mechanisms of response. *Restoration Ecology* 12(1): 85-96.

Weatherley, A. H. (1963) Notions of niche and competition among animals with special reference to freshwater fish. *Nature* 197: 14-17.

附錄一、疏伐監測樣區之立木健康度調查資料

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
未疏伐	1	紅檜	29.0	17.5	0.52	32.43	0.00	0.82
未疏伐	2	紅檜	43.7	18.3	1.20	22.69	0.00	0.82
未疏伐	3	紅檜	30.1	17.6	0.56	29.02	0.58	0.82
未疏伐	4	紅檜	29.7	17.7	0.54	32.26	0.88	0.82
未疏伐	5	紅檜	21.0	17.4	0.27	26.65	1.57	0.44
未疏伐	6	紅檜	29.5	17.6	0.54	32.92	0.68	0.70
未疏伐	7	紅檜	36.6	17.9	0.83	29.43	2.35	0.84
未疏伐	8	紅檜	36.0	18.3	0.82	30.98	2.34	0.72
未疏伐	9	紅檜	32.3	18.2	0.66	37.16	2.50	0.64
未疏伐	10	紅檜	39.5	17.9	0.97	31.82	3.26	0.75
未疏伐	11	紅檜	17.3	17.4	0.18	11.7	5.02	0.28
未疏伐	12	紅檜	20.7	17.7	0.26	28.92	4.26	0.24
未疏伐	13	紅檜	29.5	17.9	0.54	34.84	1.03	0.24
未疏伐	14	紅檜	44.5	18.2	1.24	37.73	0.00	0.72
未疏伐	15	紅檜	35.3	17.6	0.77	27.84	0.00	0.84
未疏伐	16	紅檜	40.0	17.9	0.99	25.78	0.32	0.86
未疏伐	17	紅檜	31.2	17.7	0.60	32	0.53	0.79
未疏伐	18	紅檜	48.0	18.4	1.46	40.25	0.31	0.72
未疏伐	19	紅檜	27.0	17.6	0.45	36.59	0.98	0.69
未疏伐	20	紅檜	30.5	17.7	0.57	32.68	1.80	0.80
未疏伐	21	紅檜	39.7	19.2	1.02	30.1	1.82	0.80
未疏伐	22	紅檜	18.7	18.0	0.22	30.25	2.29	0.74
未疏伐	23	紅檜	19.3	17.0	0.22	17.16	1.58	0.10
未疏伐	24	紅檜	31.9	17.9	0.63	31.66	2.17	0.77
未疏伐	25	紅檜	22.3	18.0	0.31	33.13	7.71	0.66
未疏伐	26	紅檜	32.0	17.8	0.63	29.58	2.60	0.64
未疏伐	27	紅檜	34.5	17.9	0.74	34.07	2.55	0.71
未疏伐	28	紅檜	36.0	17.8	0.80	30.98	0.60	0.69

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
未疏伐	29	紅檜	32.5	17.4	0.64	29.09	1.01	0.69
未疏伐	30	紅檜	24.0	17.5	0.35	30.46	0.51	0.55
未疏伐	31	紅檜	25.0	17.4	0.38	30.1	0.53	0.70
未疏伐	32	紅檜	31.0	17.4	0.59	29.99	1.08	0.69
未疏伐	33	紅檜	27.0	18.0	0.46	28.47	0.00	0.74
未疏伐	34	紅檜	42.3	18.2	1.12	29.8	0.37	0.73
未疏伐	35	紅檜	28.5	17.8	0.50	31.18	0.48	0.67
未疏伐	36	紅檜	40.0	18.4	1.01	29.26	0.49	0.82
未疏伐	37	紅檜	35.4	17.9	0.78	27.84	0.00	0.82
未疏伐	38	紅檜	21.0	14.7	0.24	7.22	0.90	0.14
未疏伐	39	紅檜	16.8	17.0	0.17	4.009	0.00	0.25
未疏伐	40	紅檜	25.3	18.4	0.41	28.51	0.00	0.51
未疏伐	41	紅檜	36.8	18.7	0.87	28.66	0.21	0.61
未疏伐	42	紅檜	36.0	17.8	0.80	27.88	0.54	0.68
未疏伐	43	紅檜	46.0	17.5	1.29	31.67	0.52	0.66
未疏伐	44	紅檜	31.8	17.8	0.63	31.66	0.70	0.67
未疏伐	45	紅檜	32.3	18.2	0.66	27.53	0.24	0.69
未疏伐	46	紅檜	18.8	15.7	0.20	33.11	4.83	0.40
未疏伐	47	紅檜	38.5	18.7	0.95	33.56	0.94	0.44
未疏伐	48	紅檜	22.0	17.4	0.30	30.76	1.20	0.70
未疏伐	49	紅檜	33.5	17.5	0.69	31.43	0.46	0.87
未疏伐	50	紅檜	45.2	17.8	1.26	30.98	1.12	0.77
未疏伐	51	紅檜	35.0	17.7	0.76	28.61	0.00	0.82
未疏伐	52	紅檜	29.5	17.7	0.54	29.02	1.26	0.69
未疏伐	53	紅檜	33.5	17.0	0.67	33.64	1.25	0.63
未疏伐	54	紅檜	44.2	17.5	1.19	30.51	0.73	0.69
未疏伐	55	紅檜	49.5	17.6	1.50	34.43	0.00	0.75
未疏伐	56	紅檜	46.4	18.6	1.37	31.67	0.97	0.75
未疏伐	57	紅檜	33.0	14.5	0.59	28.9	5.72	0.17

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
未疏伐	58	青楓	25.5	10.2	0.28	40.27	8.87	0.86
未疏伐	59	紅檜	41.2	18.3	1.07	29.99	1.20	0.86
未疏伐	60	紅檜	26.5	16.3	0.41	33.35	2.49	0.41
未疏伐	61	紅檜	32.0	17.8	0.63	28.91	4.11	0.38
未疏伐	62	紅檜	23.0	16.8	0.32	31.17	8.04	0.43
未疏伐	63	紅檜	46.7	18.0	1.36	33.35	0.41	0.86
97	1	紅檜	42.5	20.5	1.23	28.92	1.19	0.89
97	2	紅檜	33.6	20.7	0.77	28.51	1.21	0.84
97	3	紅檜	32.0	20.4	0.69	27.53	0.81	0.82
97	4	紅檜	33.0	20.4	0.74	30.50	0.54	0.86
97	5	紅檜	36.0	20.3	0.87	28.61	0.00	0.78
97	6	紅檜	27.2	21.5	0.52	27.31	0.00	0.74
97	7	紅檜	28.8	19.7	0.55	36.17	0.00	0.74
97	8	紅檜	36.5	19.8	0.88	41.38	0.75	0.74
97	9	紅檜	42.2	20.7	1.22	28.92	0.62	0.74
97	10	紅檜	42.1	20.4	1.20	31.60	0.87	0.74
97	11	紅檜	34.4	20.4	0.80	30.67	0.52	0.79
97	12	紅檜	32.5	20.5	0.72	28.39	0.00	0.72
97	13	紅檜	34.5	19.1	0.77	30.85	0.34	0.70
97	14	紅檜	25.5	20.2	0.44	27.41	0.00	0.72
97	15	臺灣赤楊	37.9	21.3	1.00	23.69	0.00	0.69
97	16	紅檜	38.0	19.5	0.95	21.23	0.00	0.80
97	17	紅檜	24.2	20.0	0.39	27.87	0.69	0.83
97	18	紅檜	20.3	20.6	0.28	25.80	1.23	0.79
97	19	紅檜	51.1	20.8	1.79	18.65	0.43	0.80
97	20	紅檜	43.0	20.2	1.24	30.85	0.54	0.86
97	21	紅檜	35.0	20.4	0.83	26.81	0.91	0.84
97	22	紅檜	36.0	20.9	0.89	28.64	0.19	0.82
97	23	紅檜	50.0	21.0	1.72	27.93	0.36	0.91

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
97	24	紅檜	48.5	20.6	1.60	28.45	0.40	0.87
97	25	紅檜	16.0	17.2	0.16	8.25	0.00	0.88
98	1	紅檜	52.5	16.6	1.63	36.18	0.00	0.85
98	2	紅檜	36.6	16.1	0.78	28.36	0.00	0.83
98	3	紅檜	37.9	14.3	0.77	26.09	0.00	0.89
98	4	紅檜	26.1	14.4	0.37	26.96	0.00	0.70
98	5	紅檜	44.2	16.8	1.16	31.41	0.00	0.78
98	6	紅檜	37.9	17.0	0.86	29.35	0.00	0.77
98	7	紅檜	34.4	16.6	0.70	29.59	0.00	0.80
98	8	紅檜	47.1	19.3	1.45	30.38	0.00	0.74
98	9	紅檜	27.1	24.2	0.56	26.19	0.00	0.77
98	10	紅檜	28.3	17.4	0.49	34.76	0.00	0.74
98	11	紅檜	29.0	20.9	0.58	31.16	0.00	0.77
98	12	紅檜	43.0	17.7	1.14	31.45	0.00	0.77
98	13	紅檜	32.1	18.0	0.64	31.82	0.00	0.80
98	14	紅檜	38.2	19.9	0.97	28.76	0.00	0.68
98	15	紅檜	33.4	16.6	0.66	27.33	0.00	0.77
98	16	紅檜	20.7	13.6	0.22	28.05	0.00	0.71
98	17	紅檜	44.2	19.4	1.28	31.41	0.00	0.72
98	18	紅檜	39.8	17.3	0.96	29.12	0.00	0.80
101	1	紅檜	26.7	26.7	0.58	31.06	0.00	0.83
101	2	紅檜	25.1	25.1	0.49	29.22	0.00	0.81
101	3	紅檜	31.5	31.5	0.90	30.5	0.00	0.73
101	4	紅檜	44.2	44.2	2.21	40.92	0.27	0.85
101	5	臺灣赤楊	23.9	23.9	0.43	24.15	1.32	0.20
101	7	紅檜	36.6	36.6	1.33	29.94	0.00	0.83
101	8	紅檜	31.8	31.8	0.92	28.07	0.00	0.83
101	9	紅檜	37.2	37.2	1.40	28.04	0.00	0.87
101	10	紅檜	31.5	31.5	0.90	28.48	0.00	0.89

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
101	11	紅檜	38.5	38.5	1.53	31.5	0.26	0.84
101	12	紅檜	28.3	28.3	0.68	29.26	0.47	0.84
101	13	紅檜	23.6	23.6	0.41	31.44	0.00	0.76
101	14	紅檜	24.5	24.5	0.46	31.64	0.00	0.79
101	15	紅檜	31.2	31.2	0.87	32.91	1.12	0.80
101	16	紅檜	22.9	22.9	0.38	32.06	5.66	0.83
101	17	紅檜	25.8	25.8	0.53	29.95	6.38	0.83
101	18	紅檜	31.8	31.8	0.92	28.77	3.61	0.83
101	20	紅檜	19.1	19.1	0.24	30	0.54	0.76
101	21	紅檜	27.4	27.4	0.62	31.23	0.26	0.82
101	22	臺灣赤楊	39.8	39.8	1.66	37.67	0.00	0.56
101	23	紅檜	30.9	30.9	0.85	33.9	0.00	0.75
101	24	紅檜	35.0	35.0	1.19	29.37	0.00	0.80
101	25	紅檜	35.3	35.3	1.21	30.42	0.00	0.84
101	26	紅檜	27.4	27.4	0.62	27.1	0.00	0.76
101	27	紅檜	41.7	41.7	1.89	28.73	0.00	0.80
101	28	紅檜	27.7	27.7	0.64	30.98	0.00	0.79
101	29	紅檜	37.2	37.2	1.40	29.64	0.00	0.76
101	30	紅檜	27.4	27.4	0.62	30.63	0.00	0.74
102	1	紅檜	31.0	16.5	0.57	32.00	0.64	0.95
102	2	紅檜	37.5	16.7	0.83	27.80	0.45	0.84
102	3	紅檜	39.0	16.6	0.90	31.02	0.00	0.89
102	4	紅檜	35.2	16.8	0.74	29.35	0.00	0.92
102	5	紅檜	36.1	16.7	0.77	30.98	0.00	0.85
102	6	紅檜	22.3	16.3	0.29	31.70	0.00	0.79
102	7	巒大花楸	27.0	16.7	0.43	24.96	0.55	0.81
102	8	紅檜	29.3	17.0	0.52	31.18	0.86	0.93
102	9	紅檜	26.5	16.8	0.42	26.84	0.60	0.91
102	10	紅檜	26.0	16.8	0.40	29.65	0.00	0.88

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
102	11	紅檜	31.0	16.9	0.58	33.33	0.00	0.80
102	12	紅檜	26.2	13.2	0.35	28.53	1.12	0.46
102	13	紅檜	20.2	16.3	0.24	28.82	1.50	0.83
102	14	紅檜	33.5	17.2	0.68	29.97	1.47	0.82
102	15	紅檜	27.0	18.7	0.47	31.95	2.33	0.82
102	16	紅檜	14.0	16.6	0.12	29.03	6.01	0.86
102	17	紅檜	29.8	16.9	0.53	28.69	1.81	0.79
102	18	紅檜	26.3	16.5	0.41	29.07	0.51	0.79
102	19	紅檜	35.1	16.5	0.73	35.4	0.29	0.87
102	20	紅檜	25.5	16.7	0.39	25.15	0.81	0.87
102	21	紅檜	37.2	16.7	0.82	39.01	0.00	0.75
103	1	紅檜	27.4	14.5	0.40	32.41	0.00	0.88
103	2	紅檜	29.9	16.7	0.53	29.62	0.00	0.82
103	3	紅檜	29.6	19.1	0.57	29.95	0.16	0.80
103	4	紅檜	41.7	19.0	1.12	33.19	0.00	0.88
103	5	紅檜	30.9	20.6	0.65	29.23	2.09	0.86
103	6	紅檜	27.1	14.7	0.40	29.7	2.72	0.80
103	7	紅檜	39.5	19.4	1.02	28.89	0.00	0.80
103	8	紅檜	24.8	13.5	0.32	32.05	0.00	0.86
103	9	紅檜	18.1	15.4	0.19	32.8	0.00	0.50
103	10	紅檜	28.3	17.3	0.49	31.1	0.32	0.78
103	11	紅檜	27.4	19.7	0.50	28.27	0.34	0.85
103	12	紅檜	31.2	19.7	0.64	27.51	2.08	0.78
103	13	紅檜	35.7	19.1	0.83	32.22	1.59	0.78
103	14	紅檜	29.6	16.8	0.52	34.39	0.00	0.78
103	15	紅檜	29.6	19.5	0.58	35.67	0.00	0.71
103	17	紅檜	26.1	16.7	0.40	30.32	0.46	0.76
103	18	紅檜	33.7	20.1	0.76	29.75	0.28	0.86
103	19	紅檜	24.2	22.0	0.42	31.23	0.00	0.78

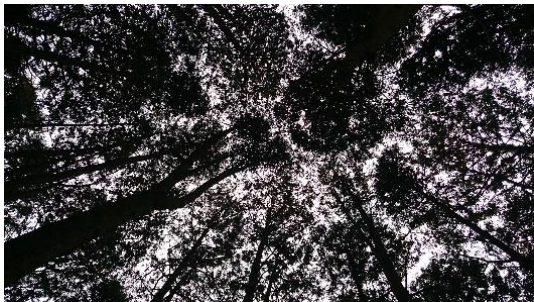
樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
103	21	紅檜	25.8	16.8	0.40	28.85	2.77	0.85
103	22	紅檜	30.9	19.2	0.62	28.56	0.00	0.82
103	23	紅檜	37.9	21.4	1.00	28.52	0.00	0.84
96a	1	臺灣杉	36.5	21.2	0.93	27.84	0.97	0.70
96a	2	臺灣杉	15.4	20.8	0.16	33.56	5.45	0.65
96a	3	臺灣杉	20.4	20.5	0.28	28.02	3.55	0.55
96a	4	臺灣杉	34.4	21.4	0.83	27.11	0.81	0.68
96a	5	臺灣杉	41.2	21.3	1.18	24.66	0.67	0.68
96a	6	臺灣杉	35.5	21.2	0.88	27.09	0.89	0.69
96a	7	臺灣杉	31.6	20.7	0.68	24.78	1.37	0.72
96a	8	臺灣杉	36.6	19.7	0.89	33.43	2.05	0.72
96a	9	臺灣杉	28.8	19.8	0.55	26.81	1.72	0.65
96a	10	臺灣杉	27.6	20.0	0.51	27.09	2.58	0.63
96a	11	臺灣杉	36.8	21.0	0.93	27.07	0.98	0.52
96a	12	臺灣杉	29.0	21.3	0.59	26.20	0.50	0.63
96a	13	臺灣杉	26.0	20.8	0.46	26.29	2.33	0.59
96a	14	臺灣杉	28.2	17.2	0.48	28.32	0.99	0.17
96a	15	臺灣杉	16.0	17.9	0.16	32.92	2.90	0.61
96a	16	臺灣杉	31.7	20.4	0.68	28.91	0.83	0.64
96a	17	臺灣杉	28.5	20.5	0.55	28.05	1.26	0.54
96a	18	臺灣杉	34.6	20.7	0.82	23.33	0.42	0.63
96a	19	臺灣杉	25.5	20.1	0.44	28.53	1.57	0.61
96a	20	臺灣杉	33.0	20.7	0.74	26.25	1.01	0.63
96a	21	臺灣杉	19.5	18.4	0.24	29.83	0.71	0.56
96a	22	臺灣杉	37.5	20.5	0.96	23.69	0.75	0.56
96a	23	臺灣杉	27.8	20.8	0.53	27.70	1.25	0.69
96a	24	臺灣杉	28.0	20.6	0.54	27.70	1.14	0.63
96a	25	臺灣杉	30.7	21.2	0.66	28.20	1.20	0.65
96a	26	臺灣杉	40.0	21.7	1.13	27.54	0.39	0.70

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
96a	27	臺灣杉	32.6	20.8	0.73	25.99	0.69	0.63
96a	28	臺灣杉	40.0	21.7	1.13	25.78	0.44	0.75
96a	29	臺灣杉	29.1	20.7	0.58	24.95	0.41	0.69
96a	30	臺灣杉	30.7	20.9	0.65	24.66	0.26	0.65
96a	31	臺灣杉	34.0	21.0	0.80	22.66	1.16	0.63
96a	32	臺灣二葉松	36.4	17.5	0.81	23.09	0.71	0.60
96a	33	臺灣杉	26.8	20.2	0.48	25.55	1.76	0.76
96a	34	臺灣杉	33.2	20.4	0.75	24.83	0.74	0.78
96a	35	臺灣杉	25.7	20.1	0.44	27.41	1.26	0.74
96a	36	臺灣杉	30.5	19.8	0.62	26.67	1.21	0.67
96a	37	臺灣杉	20.0	18.4	0.25	28.82	1.30	0.63
96a	38	臺灣杉	22.0	19.4	0.32	26.49	1.33	0.66
96a	39	臺灣杉	22.1	20.0	0.33	27.92	0.55	0.68
96a	40	臺灣杉	29.8	20.4	0.60	25.81	1.72	0.66
96a	41	臺灣杉	19.3	19.7	0.25	24.93	2.51	0.68
96a	42	臺灣杉	11.8	15.7	0.08	1.03	1.03	0.58
96a	43	臺灣杉	21.1	20.0	0.30	22.58	2.23	0.51
96a	44	臺灣杉	14.2	17.3	0.12	32.23	1.46	0.68
96a	45	臺灣杉	14.7	18.2	0.14	28.72	0.97	0.64
96a	46	臺灣杉	26.0	20.0	0.45	24.60	1.29	0.63
96a	47	臺灣杉	19.0	18.5	0.23	29.83	1.41	0.58
96b	1	臺灣杉	25.2	36.6	18.15	0.84	0.46	0.68
96b	2	臺灣杉	27.9	35.0	21.80	0.87	0.44	0.65
96b	3	臺灣杉	25.4	32.8	21.28	0.75	0.29	0.66
96b	4	臺灣杉	24.9	25.1	16.99	0.38	0.47	0.65
96b	5	臺灣杉	24.0	41.4	17.87	1.06	0.00	0.61
96b	6	臺灣杉	28.5	37.9	18.77	0.92	0.32	0.59
96b	7	臺灣杉	28.9	28.0	15.62	0.45	0.30	0.65
96b	8	臺灣杉	28.1	25.1	16.34	0.37	1.16	0.59

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
96b	9	臺灣杉	27.4	35.3	16.09	0.72	1.63	0.61
96b	10	臺灣杉	27.3	38.5	16.82	0.88	1.41	0.59
96b	11	臺灣杉	32.2	25.8	14.57	0.36	1.74	0.62
96b	12	臺灣杉	27.0	29.9	19.53	0.59	2.32	0.62
96b	13	臺灣杉	28.6	30.9	16.02	0.55	0.44	0.61
96b	14	臺灣杉	27.4	23.6	15.79	0.32	1.80	0.57
96b	15	臺灣杉	25.6	21.6	16.65	0.28	1.13	0.57
96b	16	臺灣杉	25.9	24.5	19.45	0.39	2.54	0.62
96b	17	臺灣二葉松	23.7	55.1	11.54	1.41	0.35	0.51
96b	18	臺灣杉	28.1	20.1	12.82	0.20	0.68	0.60
96b	19	臺灣杉	26.2	18.5	14.44	0.18	3.80	0.56
96b	20	臺灣杉	27.2	20.4	15.16	0.23	2.42	0.59
96b	21	臺灣杉	25.4	30.2	18.34	0.58	0.88	0.70
96b	22	臺灣杉	25.2	22.9	15.95	0.30	1.41	0.61
96b	23	臺灣二葉松	34.3	66.5	18.79	2.83	0.67	0.60
96b	24	臺灣杉	27.2	20.1	13.38	0.21	3.56	0.49
96b	25	臺灣杉	28.7	18.8	5.56	0.10	4.78	0.63
96b	26	臺灣杉	27.9	22.0	18.86	0.31	2.10	0.63
96b	27	臺灣杉	26.4	29.9	19.03	0.58	1.20	0.63
96b	28	臺灣杉	27.2	22.6	18.10	0.32	0.00	0.61
96b	29	臺灣杉	23.2	24.5	16.46	0.35	2.02	0.58
96b	30	臺灣杉	26.5	29.3	15.44	0.48	1.09	0.58
96b	31	臺灣杉	26.6	21.6	14.42	0.25	1.73	0.61
96b	32	臺灣杉	28.2	31.2	20.02	0.65	1.23	0.63
96b	33	臺灣杉	25.8	25.5	20.02	0.43	1.49	0.60
96b	34	臺灣杉	25.0	15.3	14.07	0.12	2.14	0.60
96b	35	臺灣杉	29.4	12.4	14.58	0.08	2.60	0.58
96b	36	臺灣杉	28.9	11.8	11.79	0.07	2.27	0.49
96b	37	臺灣杉	26.4	26.1	17.99	0.43	1.23	0.61

樣區	編號	樹種	DBH	H	材積	DFr	CI	健康度
96b	38	臺灣杉	26.0	25.1	16.79	0.38	1.35	0.59
96b	39	臺灣杉	25.3	26.7	18.18	0.45	1.09	0.65
96b	40	臺灣杉	25.9	22.3	16.99	0.30	1.11	0.57
96b	41	臺灣杉	26.6	21.3	16.92	0.27	1.83	0.62
96b	42	臺灣杉	25.1	22.0	17.02	0.29	0.96	0.64
96b	43	臺灣杉	27.9	13.4	16.12	0.10	2.21	0.58
96b	44	臺灣杉	28.4	23.6	16.77	0.33	2.09	0.61
96b	45	臺灣杉	29.6	37.2	19.48	0.91	1.39	0.63
96b	46	臺灣杉	25.6	28.3	18.77	0.52	2.36	0.57
96b	47	臺灣杉	26.8	35.7	21.39	0.89	1.46	0.65
96b	48	臺灣杉	27.3	26.4	21.33	0.49	2.14	0.65
96b	49	臺灣杉	28.6	45.8	22.04	1.50	0.48	0.61

附錄二、疏伐作業之現場照片

	
未疏伐林分樹冠鬱閉狀態	疏伐後產生林冠孔隙
	
留存木樹幹已受害應加以伐除	分岔之樹幹應進行修枝
	
疏伐前以一年生地被覆蓋為主	疏伐後 5 年林下已被灌木覆蓋

附錄三、計畫說明書評審會議委員意見與書面答覆

- 一、 就地面光達拍攝及碳針等非破壞性檢測，林務局是否有類似研究應用於疏伐調查？

答覆：地面光達為量測樹高、胸徑及立木位置圖，於電腦上呈現立體呈像可進行區分求積，不必將樹木伐倒即可估算立木材積。探針式及敲擊式儀器於胸徑 1.3 m 處鑽探，以瞭解林木材質。

- 二、 就疏伐地被植物的調查是否能加入？期以瞭解森林的健康度，並瞭解疏開後的林分其地被植物的演替。

答覆：依據委員意見，加入地被植物的調查。

- 三、 昔前曾以非破壞性檢測檢測樹齡，但其誤差率甚大，故本處未予採用，可否就其檢測精度說明。

答覆：以前早期之引進日本儀器測量確有誤差率偏高情形，因不同樹種形質不同，未建立校正係數所致誤差(臺灣引用日本的校正係數是不宜的)；而本校使用敲擊式立木檢測儀為去年引進，經本次調查後可以建立如紅檜及臺灣杉的校正係數，將誤差減至最低。

- 四、 本案規劃的調查期程為 6-10 月，因無疏伐作業進行，故是否調查期程分為疏伐前、疏伐中及疏伐後請說明。

答覆：依據委員建議，本研究會調查未疏伐之樣區，但因短期生長變化會被季節變化稀釋，因此不會於一年間連續調查。

- 五、 技術移轉部分請說明。

答覆：包含本計畫研究各項成果，如光達的操作模組；敲擊校正係數的移轉等。

- 六、 評估疏伐綜合效益，是否就其可量化之數據如成本效益、碳吸存等可對外宣導及說明。

答覆：因已疏伐期經過間甚短，本研究以森林健康及碳貯存量等量化數據呈現於成果報告。

七、 P26 永久樣區設置，如該區有設造林中心，應以該區優先設置樣區。

答覆：依據委員意見，配合貴處提供資料後設置。

八、 作業模式及林分密度模式之建立，其初步架構為何，請說明。

答覆：因本研究年分較短，僅 1 年無法建立完整之作業模式，建議以本研究計畫基礎，接續第 2、3 年續行調查後應可建瞭解不同疏伐強度作業之效益及建置林分密度管理圖。

九、 地面光達儀器的費用若干？其限制為何？

答覆：地面光達依掃描距離，價格自 70-200 萬不等。早期的體積大又笨重，未來將會發展成精巧方便攜帶。遮蔽是目前最大限制，透過共軌規標定位，盡量移站再掃描。

十、 本計畫之研究標的是以歷年疏伐案號，進行調查亦或重新設立樣不同採伐密度進行調查？

答覆：限於本研究計畫僅一年至 103 年 4 月止，限於調查時間有限，故以歷年疏伐案號，予以設置樣區進行調查。

十一、 計畫內容有錯誤部分請修正，如下：

1. P29 請參考最新的檢訂報告資料。
2. P30 引用資料有誤請修正。
3. P31 衛星定位儀測座標，可能太費時。
4. P48、49、51 之資料再檢核修正。
5. 預算細目之退休離職儲金及勞退金其名稱請再釐清後修正。
6. P48 期程有誤請修正。

答覆：依據委員意見修正衛星定位儀部分，僅使用相對座標系統。修正期程之年度、日期及金額。其餘錯誤將檢核後修正。

十二、 是否有額外承諾項目？

答覆：依據委員建議使用探針式木材強度檢測儀協助貴處測量樹齡，由貴處指定林後四林一株移植之臺灣櫟生立木。其原理為春秋材密度不同，依其感應阻抗波譜而得之數據進行推估樹齡，本案報告已行文完成。

附錄四、期中評審會議委員意見與書面答覆

- 一、 P34.35 空白欄位請補充；p62 數字 1-8 代表林木健康形態應以文字說明；p63-65 樣區大小應述明；p66 圖說請加列百分比；附錄二及附錄三之資料應可比對連結。

答覆：依據委員意見，補正表格中空白部分；補充森林健康型態之文字說明於工作項目(研究方法)中，並使項目之順序一致化；修正敲擊檢測之 DFr 分布圖中之 Y 軸為 DF 值，百分比為誤植；修正附錄資料之一致性。

- 二、 樣區位置圖應放於林班位置圖中標示。

答覆：依據委員意見，將樣區位置標註於疏伐位置圖。

- 三、 敲擊立木材質檢測標準值，除紅檜、臺灣杉外，可否增建臺灣生長之柳杉檢測標準值。

答覆：就研究計畫內之紅檜及臺灣杉兩種樹種建立檢測值。

- 四、 要增加的樣點，建議增設於 103 年疏伐區域，以利觀測砍伐前後地被植物的變化。

答覆：依據委員意見，前往 103 疏伐區域設置樣區調查地被植物。

- 五、 光達檢測調查從樣區中再選 5-6 株，是否有代表性及遍及各不同徑級；林木間之現存生長空間大小

答覆：光達掃描建立迴歸曲線之原則要包括各徑級之林木，且至少要有 30 個樣本數才能進行分析，故本研究會控制掃描樣本數量達足夠分析數量。

- 六、 圖 12 荖濃溪 98 及 99 林班圖面套疊(林班地及造林地)有誤，請確認後修正。

答覆：依據委員意見修正林班圖面套疊。

七、 P35 不同生長類型胸高直徑量測辦法說明欄未敘述，請補填。

答覆：依據委員意見補填不同生長類型之胸高直徑量測辦法說明。

八、 林木健康，係就樹根及樹冠進行調查，本研究對森林健康之調查方式為何？如何與監測儀器比對分析其關聯性？

答覆：林木健康為外觀型態觀測，而敲擊立木檢測則是補足林木內部評量。

九、 樣區設立於紅檜未疏伐區、96 年國 25 號(臺灣杉)、98 年國 25 號(紅檜)及 102 年國追 2 號(紅檜)等區域，宜列註各區域面積，且紅檜、臺灣杉各預計各設立單個 0.2 公頃樣區或 4 個 0.05 公頃樣區，其監測點數是否過少，監測結果是否具代表性，建議述明。

答覆：依據委員意見，紅檜於 97 國 28 號增設樣區；因試驗設計需要，臺灣杉樣區增設於 96 年國 25 號疏伐林地。

十、 P58 之林分結構因各區域不同年度執行且疏伐率亦不同，建議就其初期監測結果加以敘明，如 96 年臺灣杉疏伐後已逾 6 年，留存木現有徑級為何？生長量為何？

答覆：依據委員意見，待向貴處取得相關資料後修正。

十一、請就地面光達拍攝所費人力、時間與本處現有調查人力、時間進行分析比較，以供本處評估，利用光達輔佐拍攝來減低人立即調查時間之可行性。

答覆：光達拍攝兩人作業，外業前置作業需 30 分鐘，一個樣區需 7 站，每站拍攝 15 分鐘，而內業處理光達點雲部分，所花費的時間較外業更多，但所得資料具有重現性，能夠一再改進分析。

附錄五、期末評審會議委員意見與書面答覆

一、圖 27、29 光達測量樹高差異表 Y 軸單位有誤 cm 應改為 m。

答覆：依據委員意見，光達測量樹高差異表 Y 軸單位修正為公尺 (m)。

二、結論部分建議增加討論與建議，如討論目前的作業方式（在選木、樣區選定等提出改善與建議）並對監測技術移轉提出應注意事項及其它改進（善）情事。

答覆：依委員建議於結論增列建議事項，監測技術操作方法如結果與討論的第八節-(四)監測型樣區設置。

三、學校團隊如果在明年或後年有在該區進行調查、監測請通知我們工作站同意仁，一併做調查。

答覆：依據委員意見，明年或後年於樣區進行複查時應通知工作站取得同意，並一同進行調查。

四、P9 葉片”水”合作用？同頁(八)疏伐作業之監測及植物空間使用、多樣性、林地孔隙增加…。對於林木生長監測及效益評估之相關文獻能否多涉獵。

答覆：依據委員意見修正錯誤部分。

五、P27 表 3IV 樹冠稍枯與IV活冠層比例如何區分？及 P31 及圖 16 述敘不清楚？請再調整並補充說明方式。

答覆：依據委員意見補充樹冠消枯及活冠層比兩項評估項目之論述。

六、P28 表 3 顯示之健康調查指標與 P27 表 3 列有 6 項分級(根部、活冠層比及樹冠…)，P27 末段..表 3 所示，另新增有無新葉及葉片是否退色..調查項目，未見於表 3？又 P32 為 8 項。上開不一致部分，請檢核後，修正。另就 P27(一)林木健康調查內容是否依表 3 之項目進行有系統的論述？

答覆：依據委員意見修正林木健康評估項目論述。

七、 P32 林木健康調查之資料分析所採用之因素分析因子理由為何？請就因素分析之理論基礎說明。圖 17 決定共同因素—保留變異量大於 0.7 之理由？應詳細說明。

答覆：因素分析中選出的因素以最大變異數轉軸法進行轉軸，主要目的是讓變數個數簡化和更易於解釋，但前提為少數幾個主成份可解釋大部分的總變異，而不致損失原始資料的資訊。而轉軸的原則乃是使轉軸後的因素矩陣中之每一個變數都只歸屬於一個或少數幾個因素，影響主成分的主要因子為負荷值>Loading)，負荷愈大，表示該變數對主成份的影響愈大，負荷乃是新變數與舊變數的相關係數，負荷表示原始變數對新變數的影響力或重要性，一般取大於 0.7 為夠大的取捨標準。因 8 項因子在過去研究中都具代表性，因此本研究將改用經驗加權健康評分，簡化分析步驟。

八、 P45 地面光達系統之應用，於 P33-34，已經載述，本頁無須再提。另第 3 段試驗樣區選定 3 個樣區，P34(第 1 段)選定 2 個是否有誤？資料請再檢核。

答覆：依委員意見修正重複內容，地面光達樣區數修正為 3。

九、 P47 (第 1 段文字) 圖 17 應為圖 23，誤差大於 1m，應不止 4 株，請再檢核。

答覆：依據委員意見修正引用圖號及內文。

十、 P65 以 DmP 非破壞檢測系統…是否述寫完整？

答覆：依據委員意見修正 DmP 非破壞檢測系統章節。

十一、P79 疏伐監測樣區之調查方法及流程與前 p18 肆工作項目重疊性高？

答覆：結果與討論第八節-疏伐監測樣區之調查方法及流程係因為

計畫需求，設計不同形式的樣區調查方法供貴處參考。

十二、P97 本研究應評估疏伐撫育作業之綜合效益？以他人研究預測本研究積是否適當或正確？疏伐效益如地被植生長、冠層變化對地表逕流及沖蝕、生物多樣性、林分景緻之增進等未於研究結果論述及印證，或留下調查數據以供未來相關研究之應用或為未來修正方向，請一併檢核後更正。

答覆：依據委員意見，刪除結論推估之生長量及增加文獻內容。

十三、本研究的目的是為瞭解本處多次疏伐工作成效，由本研究可初步瞭解疏伐對林木生長是有利的，而就現場作業方法尚需改進之處，尚請老師提出建議。

答覆：依據委員意見，於結論中提出現場作業方法之建議。

十四、本案完成第 1 年的調查工作，希望於未來屏科大能持續性調查，以期建立林木生長量及碳吸存等資料；屆時本處將配合協助調查。

答覆：依據委員意見，未來進行複查時，將通知貴處。

十五、就表 11-14 之各項調查表格內各調查因子之級等應列說明（附註）於表後，以利調查。

答覆：依據委員意見修正表 11 疏伐樣區調查表格之樹冠級及形質附註於下方；表 13 監測樣區外業調查表格之說明見表 12 森林健康評估。

十六、關於林木競爭模組之操作請協助教育訓練。

答覆：依據委員意見加強說明林木競爭模組操作使用說明，檔案並附於光碟，操作如有疑義，可洽本研究室。

十七、林分地被物種未載述，可否明列？

答覆：依據委員意見，列出樣區中的主要地被物種。