

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 100-00-5-12

不同區位漂流木強度分等檢測評估及其流向探討(2/2)

Investigation on strength grading and utilization  
flowing of drift wood in different area of Taiwan



委託機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立中興大學

中華民國 100 年 12 月

## <研究團隊>

計畫主持人：國立中興大學森林學系 楊德新 助理教授

計畫工作人員：

<u>機 關 名 稱</u>	<u>單 位 名 稱</u>	<u>研 究 人 員</u>	<u>職 稱</u>
國立中興大學	森林學系	楊德新	助理教授
國立中興大學	森林學系	林志憲	博士班研究生
國立中興大學	森林學系	楊子賢	碩士班研究生
國立中興大學	森林學系	李志璇	碩士班研究生
國立中興大學	森林學系	陳建銘	碩士班研究生
國立中興大學	森林學系	林育群	碩士班研究生

## 一、中文摘要

本計畫利用應力波法進行漂流木之應力波量測，並透過顯像技術，評估木材內部健全狀態，最後以破壞試驗評估經分級之漂流木強度，建立非破壞與破壞試驗之相關性資料庫，以供為將來現場評估作業之依據。結果指出，漂流木原木之縱向應力波速為 1871-3727 m/s，平均為 2807 m/s，其值之變異相當大；而在橫向應力波速方面，透過人工模擬不同孔洞大小與應力波傳遞路徑的結果得知，四種傳遞路徑中，以 Path C 和 Path D 之應力波速度與孔洞面積比值有顯著的負相關性，而相對應力波速衰減與孔洞面積比值則有顯著的正相關性，其中，利用斷面影像技術評估木材內部缺陷時，當孔洞面積約為 1%時可偵測出其與周圍之差異，孔洞面積達約 3%時則可明顯偵測出與周圍的差別，因此，可利用應力波斷面影像技術評估木材內部缺陷大小和位置。此外，斷面應力波速與斷面硬度、縱向抗壓強度與抗彎強度等性質，經分析結果指出，均具有良好之正相關性，其相關係數 (r) 分別為 0.92、0.80 與 0.83，故利用應力波斷面檢測技術除可確定漂流木斷面影像性質外，亦可用於材質之強度評估，未來在原木的選擇上，可作為強度性質評估之依據。

### 關鍵字

漂流木、非破壞試驗、應力波斷面影像技術

## 二、英文摘要

The purpose of this study was to evaluate defects in drift wood using a stress-wave tomography technique. The selected properties of drift wood lumber after grading were also investigated by nondestructive testing (NDT). In addition, to simulate different degrees and kinds of defects, a hole was chiseled in the central areas of trunk cross-sections and then the stress-wave velocities were measured in multiple directions and analyzed using two-dimensional image tomography equipment. Results revealed that longitudinal stress-wave velocity of drift wood lumbers ranged from 1871-3727 m/s, and the average velocity for all lumbers was 2807 m/s. Additionally, the highest coefficient of correlation was found between the residual disc diameter ratio and the stress-wave velocity, the ratio of stress-wave velocity along path C and D decreased with increased in the ratio of the hole-to-disc area. Results also showed that differences in the mapped colors and stress-wave velocities between the hole area and its surrounding area were obvious, and when the ratio of the hole area to the cross sectional area exceeded 3%, the hole was detectable by stress-wave tomography. Therefore, the location and size of the hole in the tree trunk cross-section could be detected by this kind of tomography technique. Moreover, the hardness and compression values of specimens had positive relationship with scale velocity, the correlation coefficients ( $r$ ) was 0.92 for hardness and 0.80 for compression value, respectively. Based on the results of these experiment, we indicate that the stress-wave tomography technique provide incipient information of wood quality. Furthermore, it could be used for standing tree risk assessment or wood structure defect evaluation.

### Keywords

Driftwood, Nondestructive testing, stress-wave tomography technique

### 三、計畫目的

颱風是自然界最具破壞力的天氣系統，也是影響台灣最重要的災變天氣，水能載舟亦能覆舟，颱風所帶來的雨量可以是台灣地區最重要的水資源，亦可能是重創台灣的水患。2009年的一場莫拉克(MORAKOT)颱風，自2009年8月7日登陸、8月8日出海至8月10日解除警報，短短3日卻對台灣中南部與東部帶來了豐沛的雨量，引發嚴重之水患，並計有673人死亡、26人失蹤，農業損失逾195億元，其中根據林務局統計，因本次颱風所造成的漂流木達152萬噸，數量相當龐大，迄今仍有部分漂流木尚在處理中，將來這些漂流木如何分類與應用，將是一大課題。

在這些為數龐大之漂流木中，以被歸類為不具經濟價值之雜木類為大宗，其中，亦不乏許多徑級大、材質優良木材，因此若能於現場將此類漂流木進行分類與分級將可有效地節省後續之處理時間。此外，在應用上，材質健全、徑級達40 cm之漂流木將可製成板材，透過強度分級亦可作結構用材或是集成材之用，本計畫第一年研究成果，即以經分級之漂流木製成之直交式集成地板，結果指出透過強度分級，可將集成元分等成E50-E130等級，而透過直交式之設計其各方向之尺寸收縮率分別為寬度方向：0.14%，厚度方向：0.26%，長度方向0.05%，與市售之商用實木地板相較（弦向收縮率0.22%-0.39%），經直交設計結果，其尺寸安定性優良，而直交式集成板材之MOR為81.41 MPa，抗彎彈性模數為10.90 GPa，為E110級產品，做為地板產品使用，強度性質與尺寸安定性質均相當良好，甚至透過強度之分級，此類集成製品將來亦可作為平板式結構設計之用，如樓板、牆板等用途，目前在日本與歐洲系統國家亦開始有應用直交式設計開發集成板材之研究（川上敬介，2008；Gsell *et al.*, 2007；Steiger *et al.*, 2008）。

但欲有效利用漂流木，首要之處乃是確認漂流木之材質良窳，有賴於近年非破壞性檢測技術(nondestructive testing, NDT)的進步，經非破壞分等(Non-destructive grading method)後之漂流木，是可作為製材品與集成品使用於日常生活中。所謂非破壞性檢測乃是以不破壞受檢物之完整性與最終使用性之前提下，進而檢測受檢物之物理特性、機械特性以及品質狀況之方法。Ross and Pellerin (1991)指出所謂非破壞檢驗乃是以不損害材料既有用途之前提下，所進行評估材料本身性質或內部構造之方法，此方法可用以檢測材料內部瑕疵與外在缺點、量測厚度，決定材料之結構組成及其性質等。目前該技術已應用在立木材質與木質材料材質的評估及監測上。如超音波影像法(ultrasonic imaging)，音響斷層影像(acoustic tomography)，應力波斷層影像(stress-wave-based tomography)，電腦斷層攝影法(computed tomography)等。其中，應力波及超音波技術為基礎的影像技術(imaging techniques)，相較於其他技術設備，是較為簡單、低成本及有

效率的。因為應力波的傳播是基於機械性的現象，常應用於監測木材內部缺點，而木材應力波傳播時間或衰減(attenuation)亦已證實是一種有效的參數去檢測評估木材之劣化情形(Lin *et al.* 2000; Yamamoto *et al.* 1998)。而應力波及超音波技術由最初的兩個轉換器，漸漸結合較多的轉換器，並配合分析程式軟體，進而發展斷面影像系統，作為快速、可定位及定量材質評估方法之一，實務上可再結合其它定量性儀器評估其材質 (Mattheck and Breloer, 2003)。

應力波檢測評估材質的原理，依據 Wang *et al.* (2004) 指出，木材中的應力波傳播是一種動態過程方法，它直接密切關係到木材物理及機械性質，一般，在健全材質及高品質材中，應力波穿透時間比在有劣化狀況及低品質木材中為快，轉換成單位距離的傳播時間加以比較，樹木材質可以獲得某一水準的瞭解。應力波檢測樹木腐朽劣化的觀念，它是藉由打擊裝置在樹木上，裝有加速度計 (accelerometer) 之衝擊設備(如錘子)上，係產生應力波，第二個加速度計，感應所引導激起的傳播應力波並傳送到停止信號的計時器，這個測定時間，轉變成單位長度為基礎的傳播時間 (或以傳播速度[單位時間的速度]來表示)，這些可以泛指傳播 (propagation) 資訊。但傳播時間會因為樹種不同，有不同反應機制外，應力波特性和木理(纖維)方向的不同而變化，當木材存在劣化情形時，會影響傳播時間，愈嚴重時，其傳播時間有愈大的趨勢 (Sandoz,1994)。

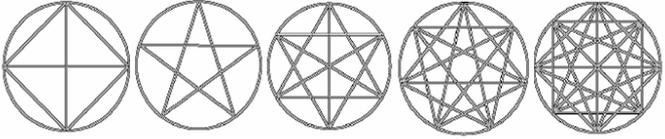
資料分析方面，一般，利用傳播時間的增加率和參考值比較，以作為評估材質的基準 (Wang *et al.*, 2004)。Divos and Szalai (2002) 指出評估的過程是基於測定一個方向時，比較測定傳播時間及參考值資料間的差異，其假定的學說是，在測定的傳播時間是高於 10%的參考值資料時，則定義為缺點線 (defect line)，兩個缺點線交叉可以標示出缺點位置，此區域判定樹幹內部缺點，再從測定影像結果中及實際的腐朽位置重疊現象來看，會有相當的預估水準，影像解析度可以藉由轉換器 (transducer, channel) 的增加來增高。若以應力波速度觀點來看，則是測定速度低於 90%的健全材質的樹木參考值時 (假設值)，或稱為相對速度差異 (relative velocity drop) 值為基準，可判定樹幹中存在有缺點，當差異愈大時，其缺點愈嚴重。接著，再由程式軟體導算各個傳播速度及其差異性，並利用顏色原理，繪製其斷面影像圖形，以提供評估材質的依據。

匈牙利 FAKOPP® 2D Tomography 儀器便是以此方法將原本兩個感應器的線狀應力波儀，利用多通道技術配合斷層攝影技術使其能以 2D 影像圖形顯示出樹幹斷面材質狀況，表 1 為當存在 5 公分的人造孔洞時，其應力波相對速度衰減 (Relative velocity drop, RVD) 可以看的出來只要線狀經過孔洞 RVD 就會增加，利用此原理配合斷層攝影 (Tomography) 技術則可以降低誤差，當感應器越多時其交叉感應線越多，當感應線越多其能偵測的孔洞面積就越小誤差也越小 (表 2)。

表 1、應力波偵測孔洞示意表 (摘自 www.fakopp.com)

Direction	Relative velocity change [%] ( $V - V_{ref}$ )/ $V_{ref}$ *100		
	Intact	hole diam. D=5cm	hole diam. D=9cm
<b>1 - 4</b>	1.6	<b>11.2</b>	<b>19.2</b>
1 - 3	2.4	4.8	5.0
1 - 5	0.9	1.2	2.7
<b>2 - 5</b>	2.1	<b>9.6</b>	<b>18.5</b>
2 - 6	1.4	2.4	3.0
2 - 4	0.5	4.7	4.6
3 - 5	0.2	2.2	2.2
<b>3 - 6</b>	0.4	<b>10.3</b>	<b>16.9</b>
4 - 6	1.7	3.1	4.8

表 2、多路徑應力波偵測示意表 (摘自 www.fakopp.com)

Setup					
Number of test points	4	5	6	7	8
Number of measurements	6	5	9	4	20
Number of reference velocities	2	1	2	2	3
Minimum detectable defect	8%	6%	3%	4%	1%

因此，如能利用此技術對於為數龐大之漂流木先進行材質上之分類與強度上之分級，對漂流木進行分類，將有助於漂流木後續之利用。故本計畫擬以應力波與應力波顯像技術等非破壞檢測技術對現場漂流木進行應力波之量測，以縱向應力波法進行縱向音速之測定，而以橫向應力波法量測漂流木之橫向音速，並透過顯像技術，評估木材內部健全狀態，最後以破壞試驗評估經分級之漂流木強度，建立非破壞與破壞試驗之相關性資料庫，以供為將來現場評估作業之依據。

#### 四、重要工作項目及實施方法

##### (一) 重要工作項目

本計畫「不同區位漂流木強度分等檢測評估及其流向探討」，主要利用非破壞檢測技術進行漂流木之材質評估，建立漂流木之強度分級與非破壞與破壞試驗之資料庫，同時透過調查分析現行漂流木之最終流向，以供未來漂流木多元利用之參考。

##### (二) 實施方法

###### 1. 預備試驗

以國產樟樹 (*Cinnamomum camphora*)、台灣櫟 (*Zelkova serrata*) 與紅檜 (*Chamaecyparis formosensis*) 等三種樹種 (散孔材、環孔材與針葉樹) 進行人工孔洞之挖鑿與應力波斷面顯像之關係試驗，評估橫向應力波斷面影像與實際孔洞之相關性，以做為未來評估漂流木之參考。

###### 2. 原木挑選

以目視法選取現地徑級較大且通直，外觀尚屬健全，將來可能具有利用價值之原木，進行次述非破壞檢測評估，以做為未來利用時之基礎。

###### 3. 非破壞試驗 (Nondestructive testing, NDT)

將選取之原木，進行縱向與橫向應力波法非破壞試驗，以求得其非破壞參數。

###### (1) 縱向應力波法

本試驗係利用應力波儀 (FAKOPP Enterprise, Fakopp 2D) 進行，其一端為脈波發振器 (Pulse generator) 另一端為波動接受器 (Receiver)，試驗時直接貼附於試片兩端，使應力波傳遞過試片，直接測定其所需時間，再依次式計算出其速度 (V)

$$V = L / t \quad (1)$$

V 為應力波速(m/s)，L 為試片長(m)，t 為時間(sec)

###### (2) 橫向應力波法

本試驗使用應力波儀 (FAKOPP Enterprise, Fakopp 3D) 進行漂流木原木之斷面影像分析，利用 8 組應力波探頭偵測器釘著於漂流木之橫斷面，藉由一端應力的傳遞，可於另 7 端進行接收，透過應力傳遞時間不同的演算，進行斷面影像之分析。

依據應力波檢測的方位，可以區分為四種類型的路徑 (圖 1)，根據這些模式之下分別進行以下的評估參數檢定，並進一步分析與校正。

###### A、應力波速

$$V_s = D / T \quad (2)$$

$V_s$ ：應力波速度(m/s)，D：兩探頭間的距離(m)，T：穿透時間(s)

B、相對應力波速衰減率

$$RVD(\%) = (V_{sf} - V_{sm}) / V_{sf} \times 100 \quad (3)$$

RVD：相對速度損失率， $V_{sf}$ ：健全原始速度(m/s)， $V_{sm}$ ：測量速度(m/s)

C、孔洞面積比值

$$HA(\%) = a / A \quad (4)$$

A：圓盤面積( $\text{cm}^2$ )，a：孔洞面積( $\text{cm}^2$ )

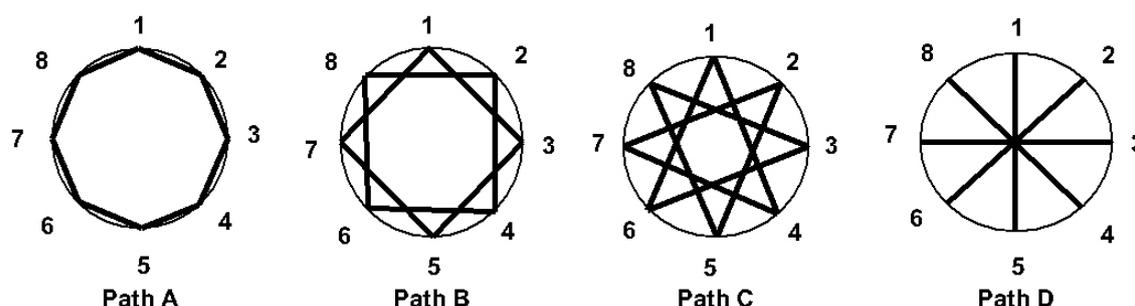


圖1、應力波檢測路徑類型

(3)強度試驗

將經非破壞試驗後之原木進行製材，經乾燥後以萬能強度試驗機（SHINADZU, UA-10）進行抗彎試驗，求其破壞強度（MOR）與比例限度內之抗彎彈性模數（MOE）

$$MOR = \frac{P_{\max} l}{bh^2} \quad (5)$$

$$MOE = \frac{\Delta P(1-s)[2l^2 + 2ls - s^2]}{8\Delta\delta bh^3} \quad (6)$$

$P_{\max}$  為最大載重 (kgf)， $\Delta P$  為比例限度領域上限載重與下限載重之差 (kgf)， $\Delta\delta$  為與  $\Delta P$  相對應跨距中央之撓度差 (cm)， $l$  為跨距 (cm)， $s$  為兩載重點距離 (cm)， $b$  為試片寬度 (cm)， $h$  為試片厚度 (cm)。

另將經非破壞試驗後，發現內部有缺陷之原木，進行圓盤之製作，評估斷面影像與實際圓盤斷面之差異，並將圓盤之應力波斷面影像透過 Matlab 程式語法，將 2D 斷面影像圖形匯入程式中擷取成為圓形之灰階點陣圖形，接著縱向及橫向分割 2D 影像成小方格，輸入相關樣本資料，計算小方格內灰階點陣圖的畫素，並轉換成相對應的小方格應力波速度值，最後將這些數值匯出成 Microsoft Excel 檔案，可建立圓盤內部各區塊之應力波速度與表面硬度、抗壓強度與抗彎強度之關係，以做為未來評估其安全性之依據。

## 五、結果與討論

### 1. 橫向應力波人工孔洞基礎預備試驗

本基礎試驗選用國內常見之台灣檫、樟樹與台灣紅檜三種圓盤進行試驗，試驗時，在圓盤的圓周上區分為 8 個等分(圖 2)，然後在 8 等分上釘入應力波探頭，接著測量目視健全圓盤的應力波穿透時間，因為有 8 個檢測點，以任一點為應力波發振端，因此合計可測得 56 筆應力波傳遞時間之檢測數據，待健全圓盤量測後，逐次於圓盤中心挖取不同大小直徑的孔洞，再測量應力波穿透時間，最後由所有穿透時間經過 Arbosonic 軟體轉換成 2D 斷層影像，並進行檢測數值的非破壞性參數的分析及評估。

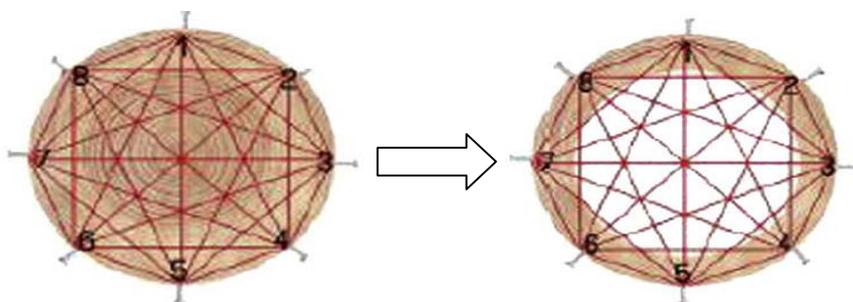


圖 2、實驗圓盤上 8 個應力波測量點、56 條傳遞路徑與自圓心挖洞示意圖

圖 3 為利用台灣檫圓盤進行不同探頭間檢測的應力波速與孔洞面積比之相關性分析，結果指出，在 Path A 中，應力波速與孔洞面積比之間沒有顯著相關存在，顯示 Path A 並不會因孔洞的大小而影響其應力波速的傳遞，僅在孔洞大於 70% 時有明顯的下降。在 Path B、Path C 和 Path D 中，其應力波速與孔洞面積比，均具有顯著負相關性 ( $R^2=0.84-0.99^{***}$ )。由此可知，Path B、Path C 和 Path D 即使在較小孔洞的狀況下，也會影響到應力波速的傳遞因而造成傳遞時間增加，使得應力波速有降低的可能，另外，由  $R^2$  值大小來看，有 Path D > Path C > Path B > Path A 的傾向。

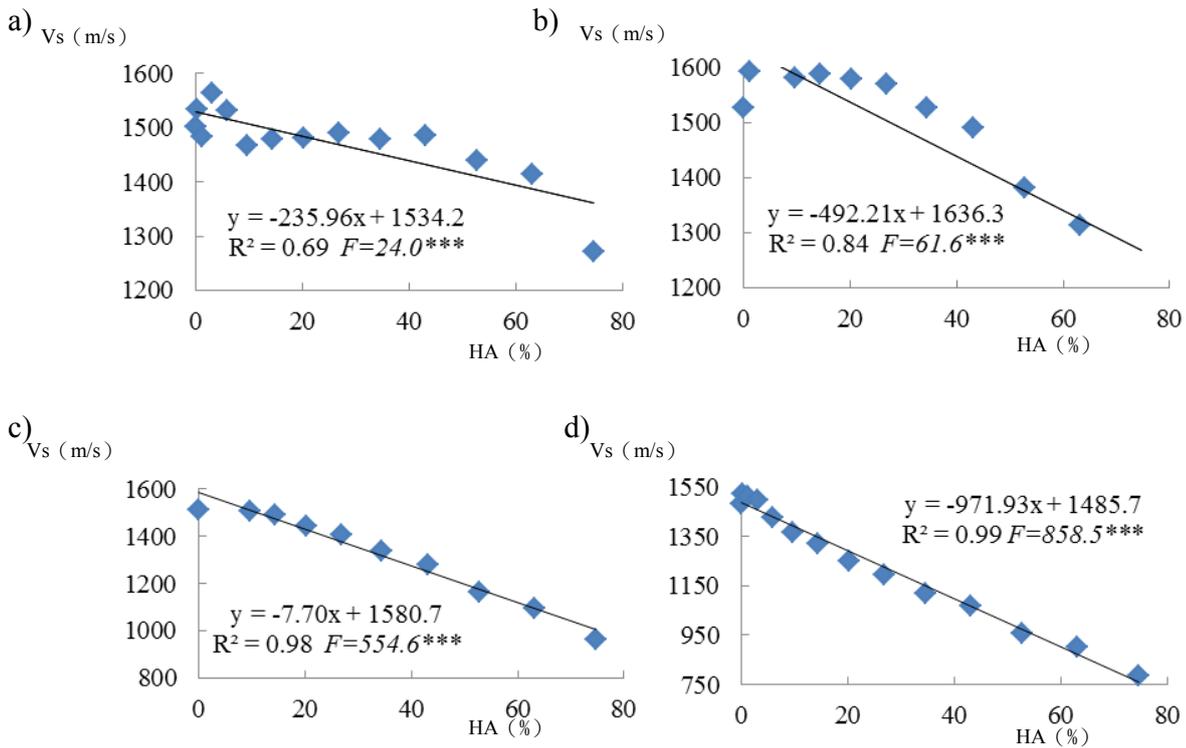


圖 3、台灣櫟不同路徑應力波速與孔洞面積比之相關性

a): Path A, b): Path B, c): Path C, d): Path D

圖 4 為利用樟樹圓盤進行不同探頭間檢測的應力波速與孔洞面積比之相關性分析，結果指出，Path A 和 Path B 並不會因為孔洞的大小變化而影響其應力波的速，僅在孔洞大於 30%-40% 時有明顯的下降。而在 Path C 和 Path D 中，其應力波速與孔洞面積比，均具有顯著負相關性 ( $R^2=0.95-0.99***$ )。由此可知，Path C 和 Path D 即使在較小孔洞的狀況下，也會影響到應力波速的傳遞因而造成傳遞時間增加，使得應力波速有降低的可能，另外，由  $R^2$  值大小來看，亦有 Path D > Path C > Path B > Path A 的傾向。

另在相對應力波速衰減與孔洞面積比之間的相關性分析方面，台灣櫟圓盤結果在 Path A 中，孔洞面積約在 50% 以上時，應力波速開始受到影響，但是並沒有顯著性存在，在 Path B 中，孔洞面積比約在 40% 以上時，應力波速開始受到影響，兩者間存在極顯著的正相關，而在 Path C 與 Path D 中，相對應力波速衰減與孔洞面積比之間，有極顯著的正相關 ( $R^2 = 0.97-0.99***$ ) (圖 5)。由此可知，以 Path C 與 Path D 應力波傳遞路徑在孔洞很小時，其應力波速度便會受到影響衰減，故應用 Path C 與 Path D 方位的檢測點，其相對應力波速度衰減對內部中央孔洞大小的評估有較高的預測水準。

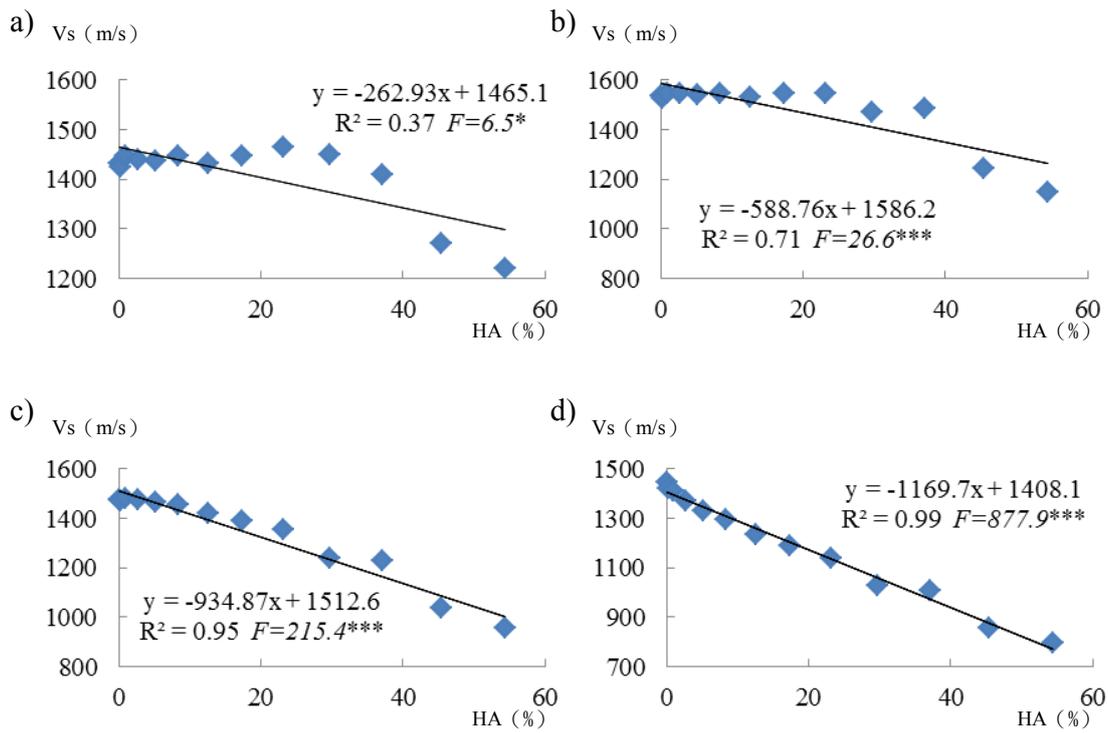


圖 4、樟樹不同路徑應力波速與孔洞面積比值之相關性

a): Path A, b): Path B, c): Path C, d): Path D

在樟樹圓盤方面亦有類似的結果(圖 6)，在 Path A 與 Path B 中，孔洞面積分別達約在 35% 與 30% 以上時，應力波速度開始受到影響，但在 Path C 與 Path D 中，則在小孔洞時，其應力波速度即會受到影響，相對應力波速度衰減與孔洞面積比值之間，有極顯著的正相關 ( $R^2 = 0.95-0.98^{***}$ )。

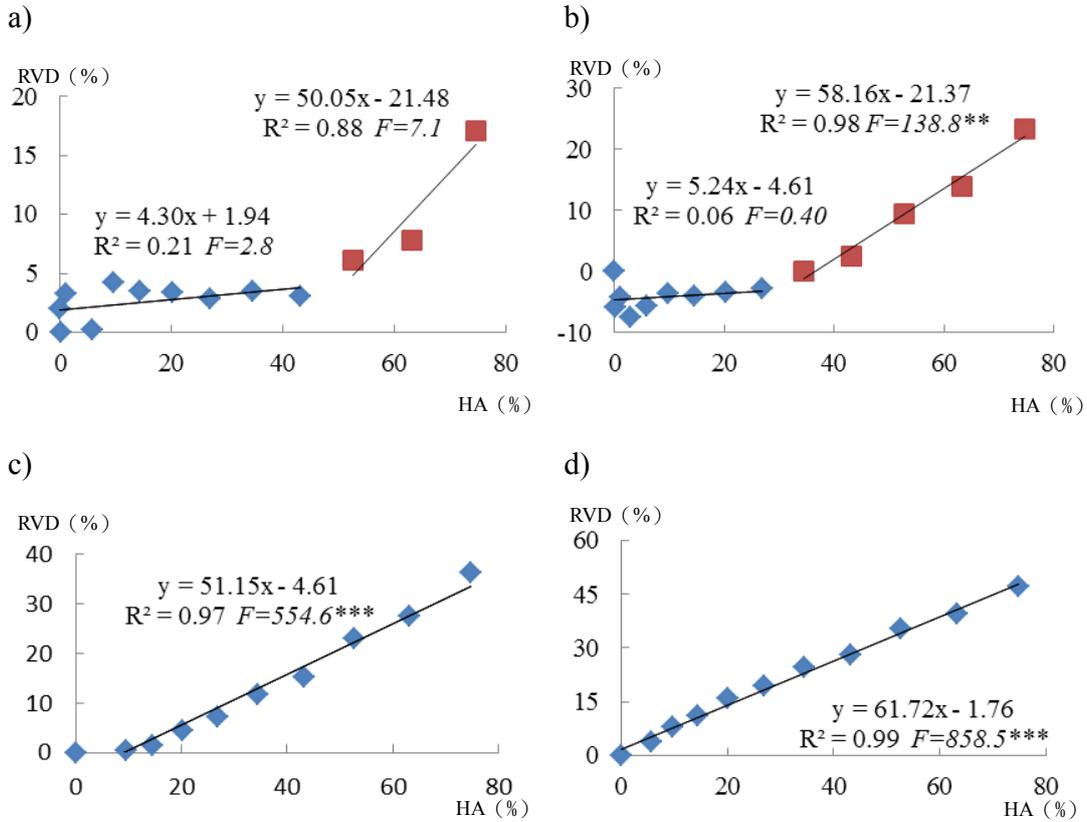


圖 5、台灣橢圓盤孔洞面積比值與相對應力波速衰減之相關性

a): Path A, b): Path B, c): Path C, d): Path D

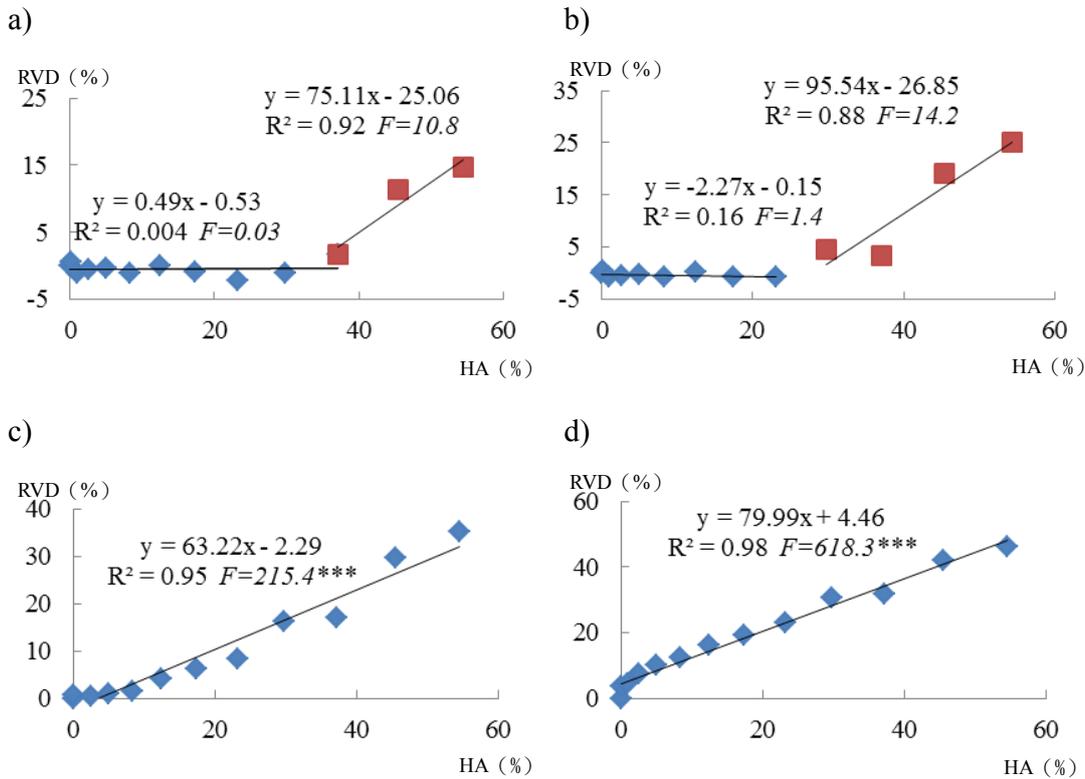


圖 6、樟樹圓盤孔洞面積比值與相對應力波速衰減之相關性

a): Path A, b): Path B, c): Path C, d): Path D

## 2. 應力波斷面影像與實際木材斷面比較

上述圓盤藉應力波檢測後，經由 Arbosonic 軟體轉置、輸出的結果，可以轉換成 2D 之斷面影像如圖 7、圖 8 所示。隨著孔洞逐漸增大，影像的顏色也由綠轉淺黃，而當孔洞持續擴大，音速值持續的降低，影像顏色也轉為紅至藍。當孔洞直徑達 30mm 時（孔洞面積比值約 1%），可以偵測到與周圍材質之些微差異變化；當孔洞達 50mm（孔洞面積比值約 3%）時，可明顯偵測出中央淺黃色的區域；當孔洞達到 110mm（孔洞面積比值約 10-15%）時，缺陷部區域影相顏色轉為藍色，代表其音速值明顯之下降；隨著綠色區域持續性的減少，當孔洞擴大至 150mm 時，中央缺陷部分顏色已幾乎轉為藍色。

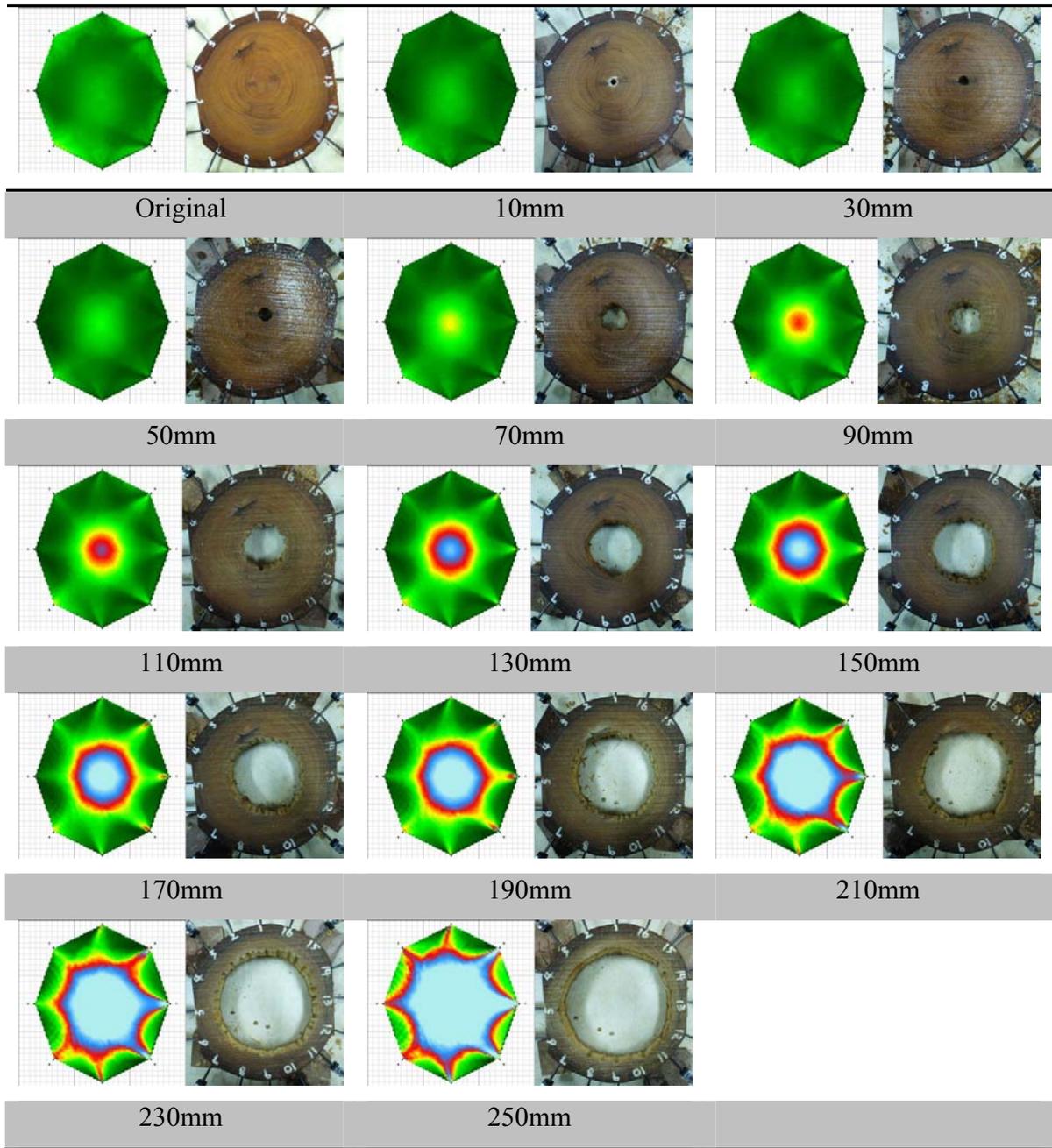


圖 7、台灣檫應力波斷面影像與木材斷面

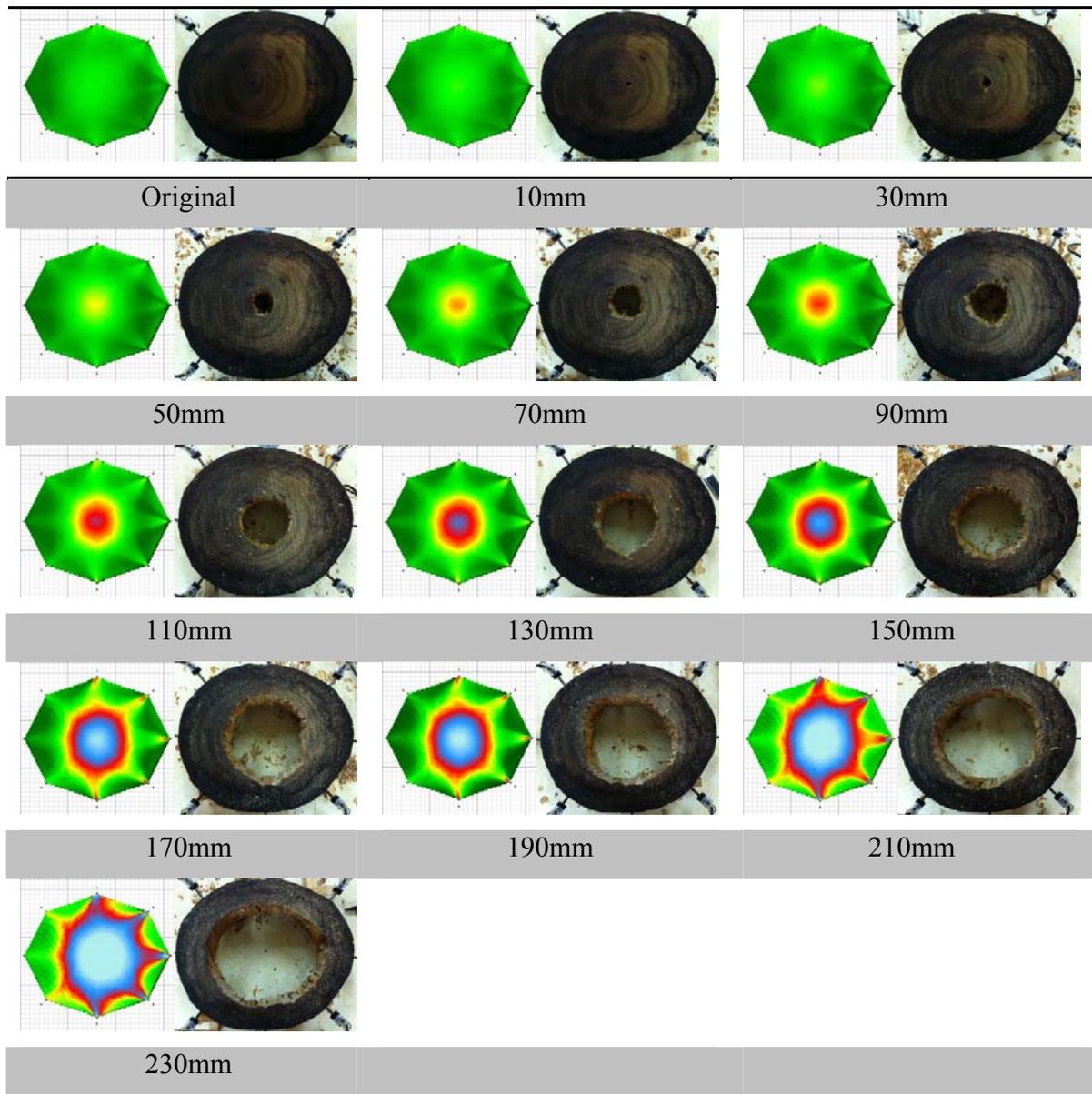


圖8、樟樹應力波斷面影像與木材斷面

在過去的研究中，Martints *et al.* (2004) 曾利用超音波儀結合斷層影像技術，以 16 個偵測點方式檢測有腐朽的櫟木斷面，得知其音速分佈在 460-2350 m/s 之間，其中當音速低於 1000 m/s 時，其內部材質有可能發生腐朽或破壞現象，其斷面可見圖 9 對照，在顏色越接近深棕色其速度越快，其相鄰櫟木斷面材質越好，可以發現在斷面 A (Section A) 中其右下方發生嚴重腐朽，因此在圖面上速度也降到低於 600 m/s 以下，由此可以發現以斷層影像是可以有效發現腐朽的，但相對的，在斷面影像中亦可以發現其斷面實際腐朽位置與成像影像不完全符合，有些高估有些低估，故應該進一步校正。

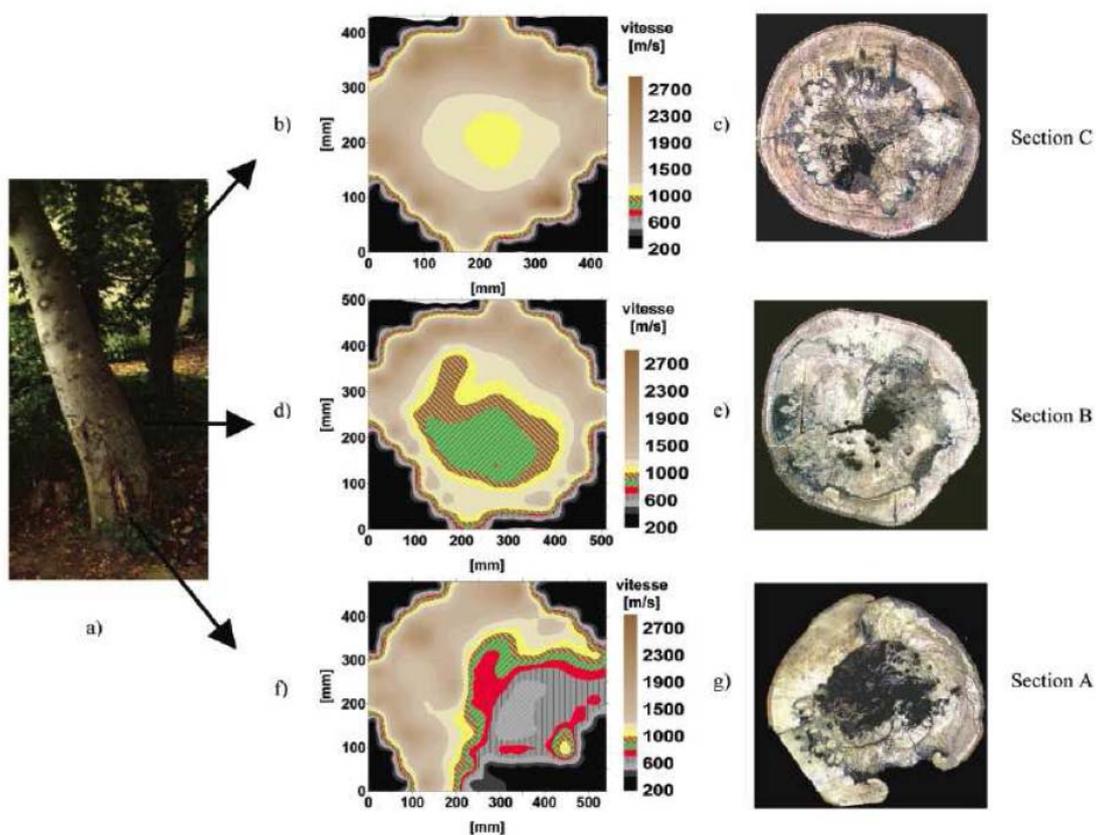


圖 9、斷層影像示意圖 (Martints *et al.*, 2004)

Socco *et al.* (2004) 研究中將斷面影像結果與利用鑽孔抵抗儀(驗證)所得的結果進行印證分析(圖 10)，發現有明顯的相關性，在影像中顯示音速較慢的區域，其鑽孔抵抗值亦偏低，在影像中顯示音速較高的地方，其鑽孔抵抗值亦有較高的傾向。

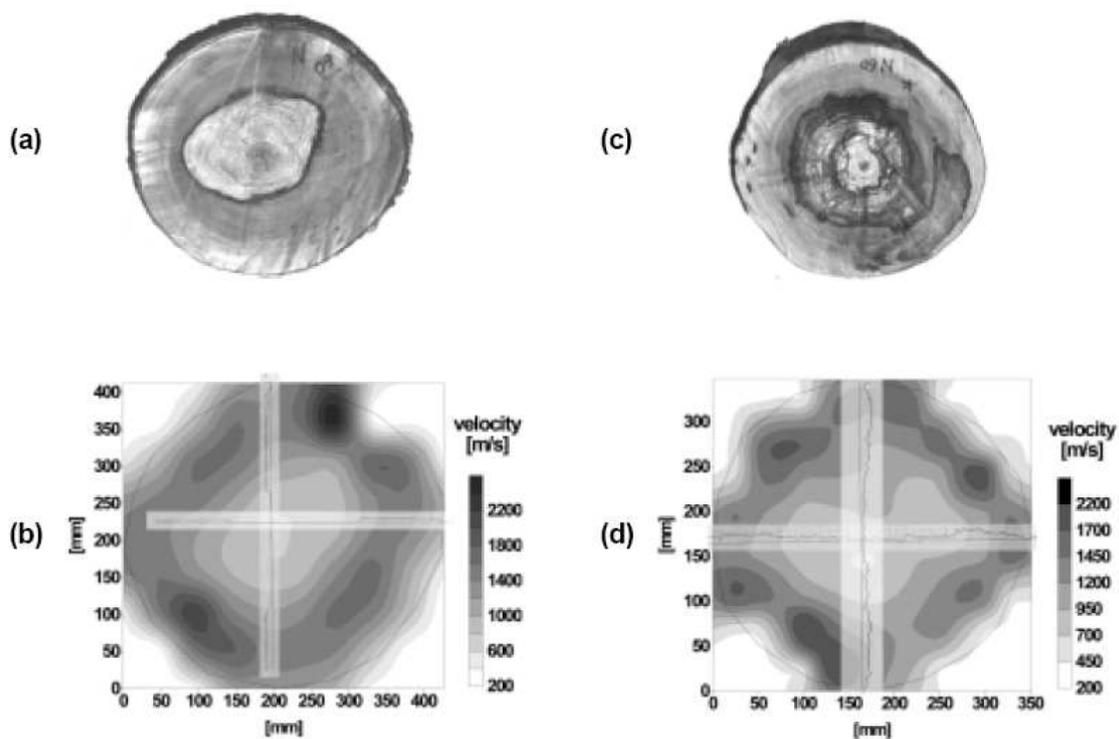


圖 10、斷面影像與鑽孔阻抗圖譜對照圖 (Socco *et al.*, 2004)

Wang *et al.* (2009) 亦成功地以應力波 2D 斷層技術檢測黑櫻桃樹(Black cherry tree, *Prunus serotina*)的內部腐朽及內裂等缺點(圖 11)

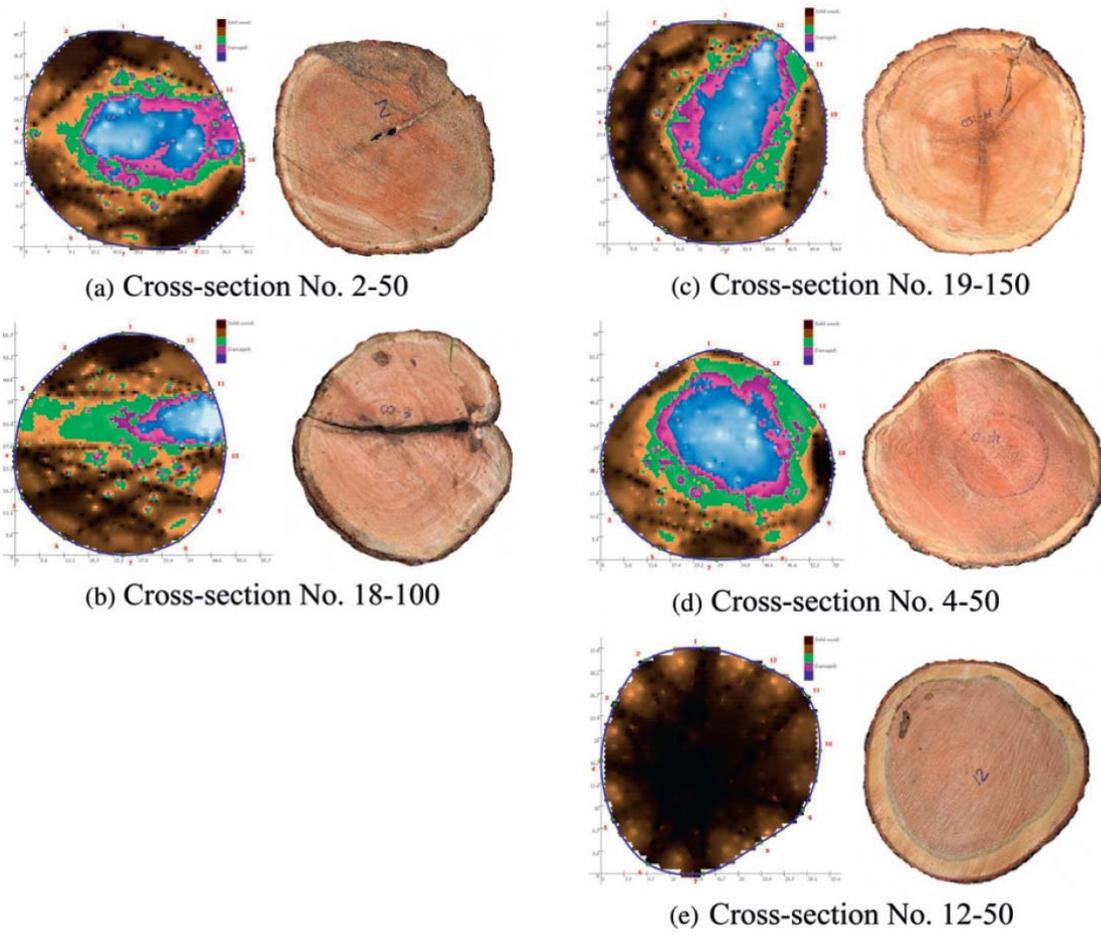


圖 11、應力波斷面影像與木材斷面對照圖 (Wang *et al.*, 2004)

### 3. 現場原木縱向超音波速評估

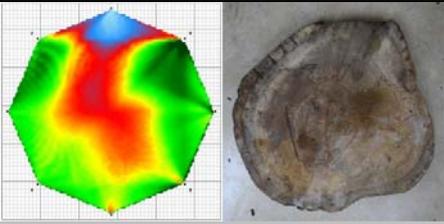
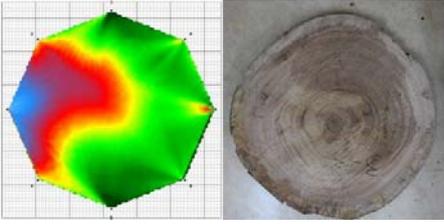
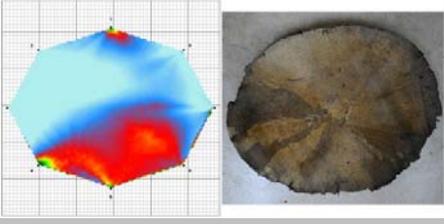
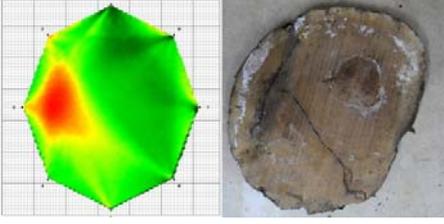
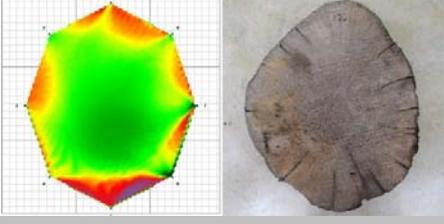
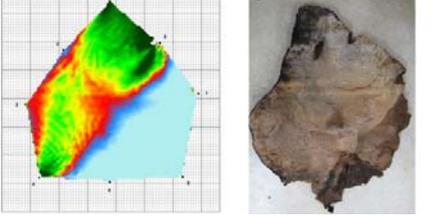
本次試驗材料取自台東縣知本地區之一批不具標售價值之漂流木堆置處（圖 12），以目視挑選徑級較大、木理較為通直，可以作為製材品或是一般樑柱用之木材，進行縱向應力波速之量測。結果指出原木之應力波速為 1871-3727 m/s，平均為 2807 m/s，應力波速之變異相當大，此係本次試驗材料為漂流木，其樹種混雜而非單一樹種，含水率亦不同所致。在相關國產樹種之研究報告中，王松永(1984)曾以超音波法評估國產針闊葉樹各 8 種，共 16 樹種，氣乾密度在 0.41-0.81 g/cm<sup>3</sup>，含水率在 12.4-14.4%，結果指出木材縱向音速在 3844.7-5613.5 m/s 之間，不僅樹種間之超音波速變動相當大，針闊葉樹間之超音波速亦無一定趨勢。在含水率方面，音波於水中之傳遞速度，約為 1435 m/s(9°C 時)，而一般木材在縱向之傳遞速度約為 3359 - 4572 m/s(Brown, 1952)，因此單就音波之傳遞於木材與水中之比較即可發現，音波在木材中傳遞較快，當木材含水率增加時，音波之傳遞速度會變得遲緩。Sandoz (1989) 以超音波評估雲杉之材質，亦指出雲杉木材含水率高時，其超音波之傳遞速度將減緩。Wang and Chuang (2000)、Wang *et al.* (2002) 分別就柳杉與台灣杉進行試驗亦發現，木材隨含水率之下降，超音波傳遞速度均有增加的趨勢。



圖 12、漂流木現場堆置處

#### 4. 漂流木應力波斷面影像評估

本次試驗選擇外觀具有缺陷以及外觀完整共 20 根漂流木，並於其中央處進行斷面影像評估，斷面影像將顏色分為三部分，綠色為實質部橫向音速達 1100m/s 以上，黃、紅色為低密度區橫向音速為 650-1000 m/s，藍色則為缺陷處橫向音速 650 m/s 以下，最後將此斷面圓盤取下與斷面影像進行對照。圖 13 為外觀具缺陷之漂流木 D1-D10，以斷面影像評估，漂流木外層有明顯低密度區和缺陷和內部孔隙情形皆與斷面圓盤相符，原因為漂流木受大量石礫撞擊，表層破壞易受各類蟲害和菌害侵襲形成低密度層或缺陷。圖 14 為外觀完整的漂流木 W1-W10，除 W5、W6 和 W7 外，其餘斷面影像皆顯示材質良好的狀況（橫向音速達 1100 m/s 以上）。圖 15 則為 W5、W6 和 W7 之斷面影像與縱向應力波速之比較，結果顯示此三段漂流木之平均縱向應力波速為評估為 W 系列中最低之三組（1927-2672 m/s），將各點之縱向應力波速與斷面影像對照，其於斷面影像外層缺陷部（藍、黃色）也有較低的縱向應力波速值，兩者相符合。故未來在挑選漂流木時可應用目視法配合縱向應力波法和斷面影像技術有效地進行分等評估。

Tree no.	Picture	Tomogram
D1		
D2		
D3		
D4		
D5		
D6		

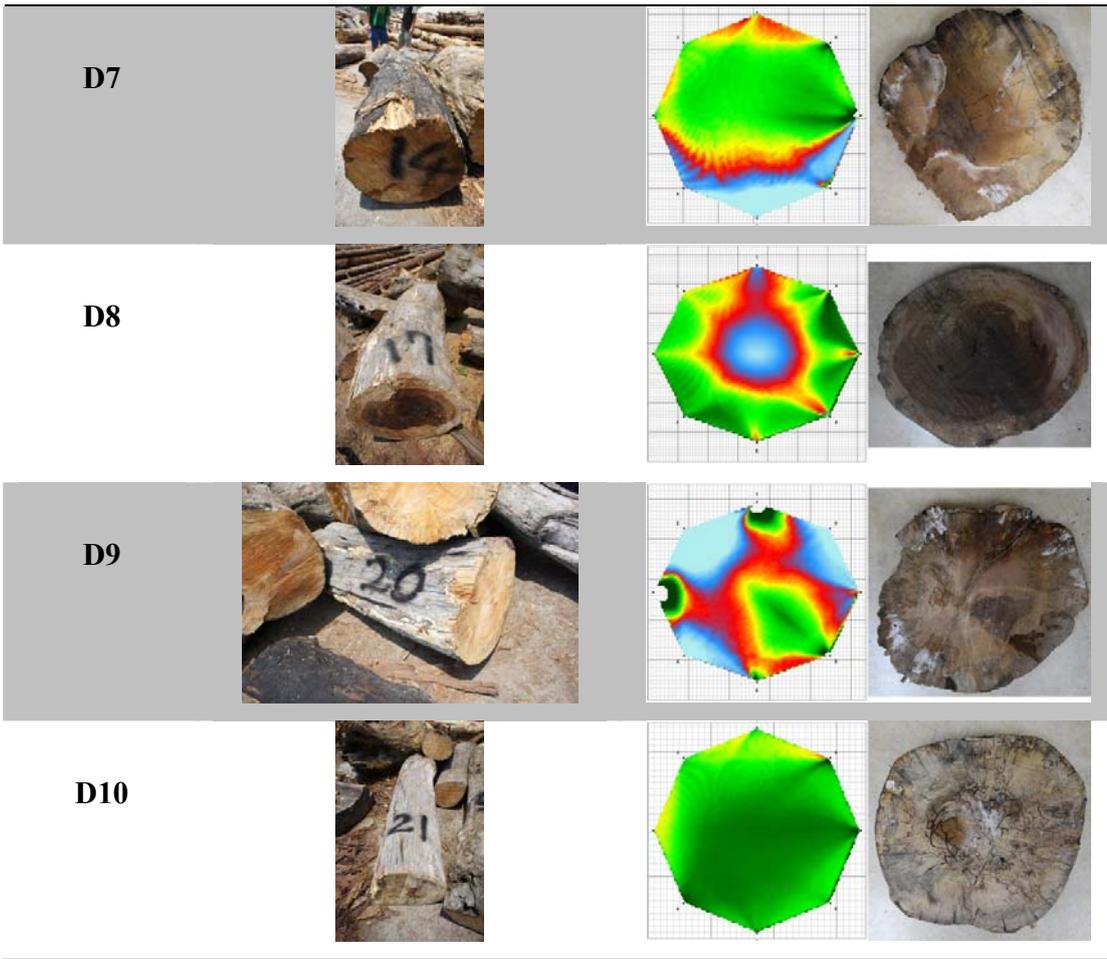
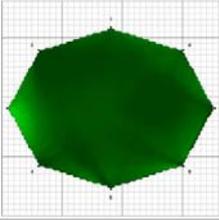
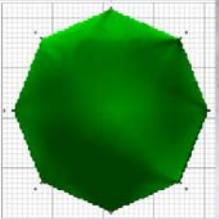
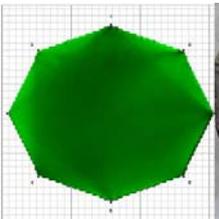
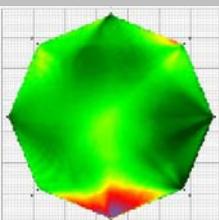
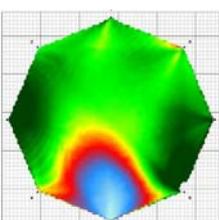
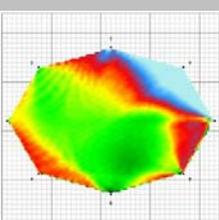


圖 13、外觀缺陷之漂流木應力波斷面影像

Tree no.	Picture	Tomogram	
W1			
W2			
W3			
W4			
W5			
W6			

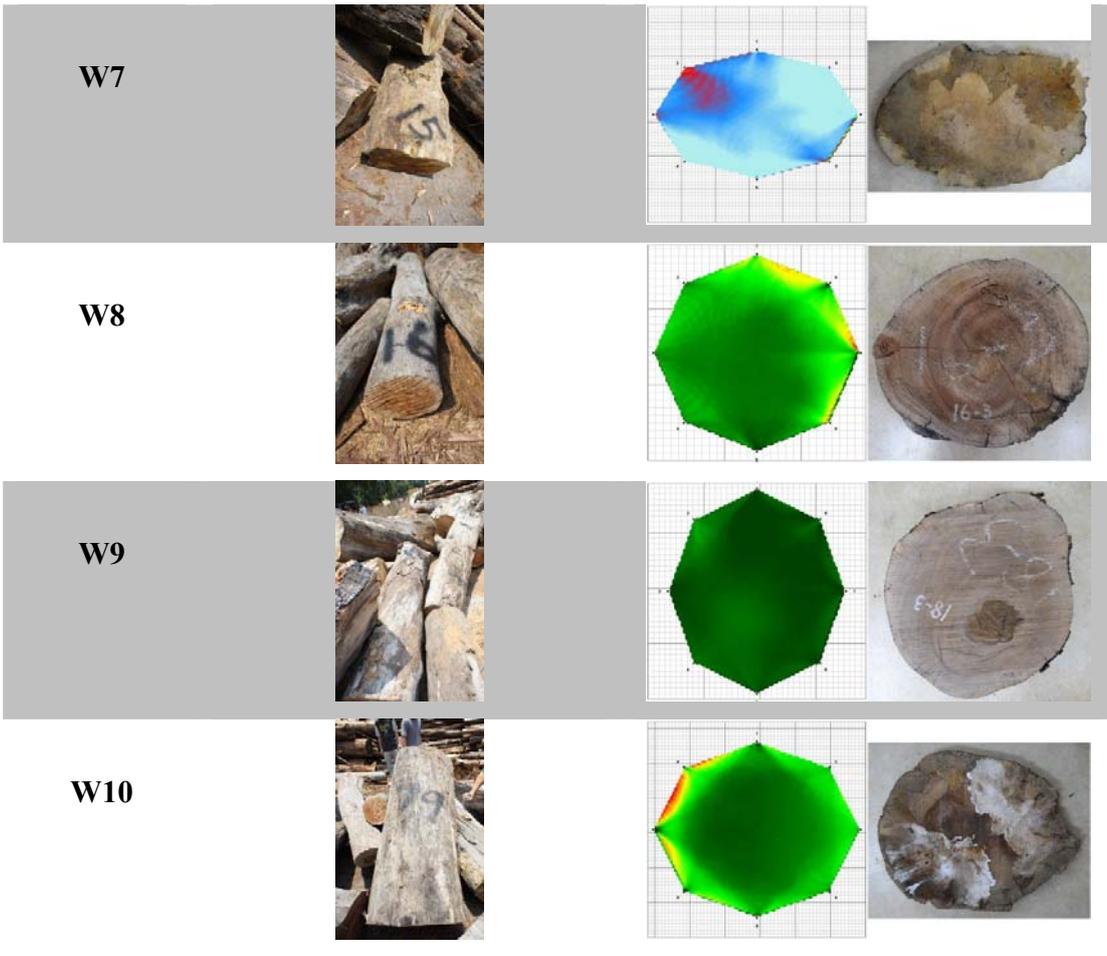


圖 14、外觀完整之漂流木應力波斷面影像

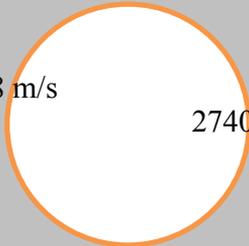
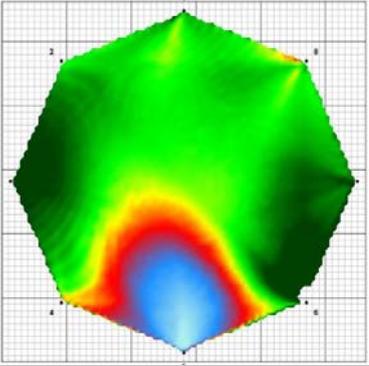
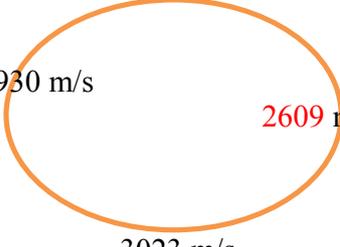
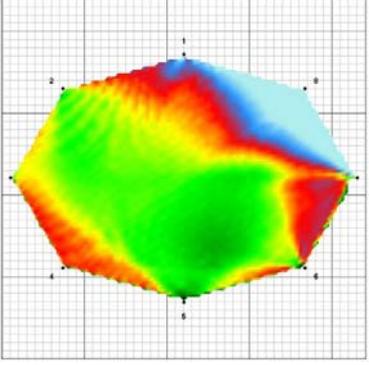
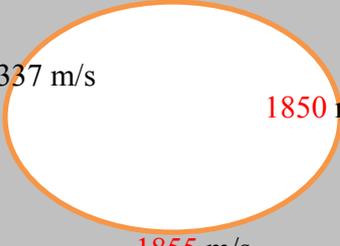
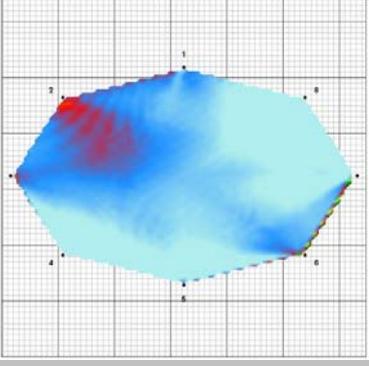
Tree no.	Longitudinal Velocity	Tomogram
W5	 <p>2779 m/s 2618 m/s 2740 m/s 2070 m/s</p>	
W6	 <p>2127 m/s 2930 m/s 2609 m/s 3023 m/s</p>	
W7	 <p>1667 m/s 2337 m/s 1850 m/s 1855 m/s</p>	

圖 15、應力波斷面影像與縱向應力波速分析

### 5. 應力波斷面影像數值與強度性質之相關性評估

圖 16 為斷面影像經轉換成 256 階灰階影像，依照  $2 \times 2$  cm 木塊位置和大小經 Adobe® Photoshop 影像處理軟體切片分區，進行灰階運算求取各區平均值，最後將其轉換成斷面影像音速值 (Apparent velocity,  $V_a$ ) 與各區性質進行統計，以利後續資料分析。相關性質和強度則依 (x,y) 位置分區，利用 Matlab 繪製等高線圖，與斷面影像進行比對。圖 17 則顯示壓縮強度和硬度與  $V_a$  呈現高度正相關 ( $r=0.80$ 、 $r=0.92$ )。另漂流木原木段經應力波斷面影像檢測後，於段木中央部進行十字取材，製成  $2 \times 2 \times 32$  cm 抗彎試材，將試材置於 65% 相對濕度、 $20^\circ\text{C}$  環境 14 天後，進行抗彎試驗。結果顯示， $V_a$  與 MOR 亦呈高度相關性  $r=0.83$  (圖 18)，因此，利用斷面影像音速值能有效評估漂流木之材質和強度。

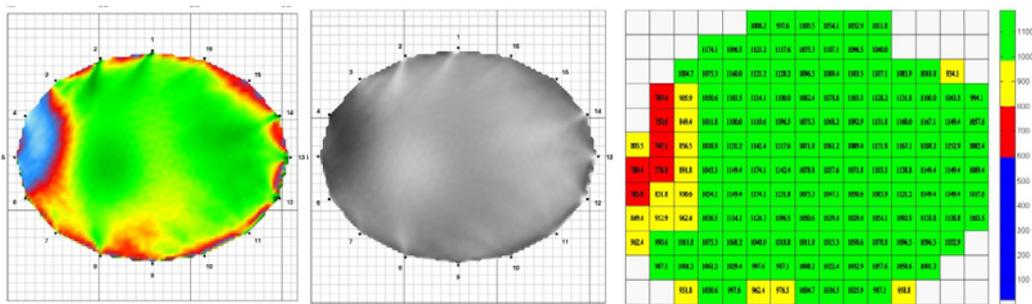


圖 16、斷面影像轉換過程。

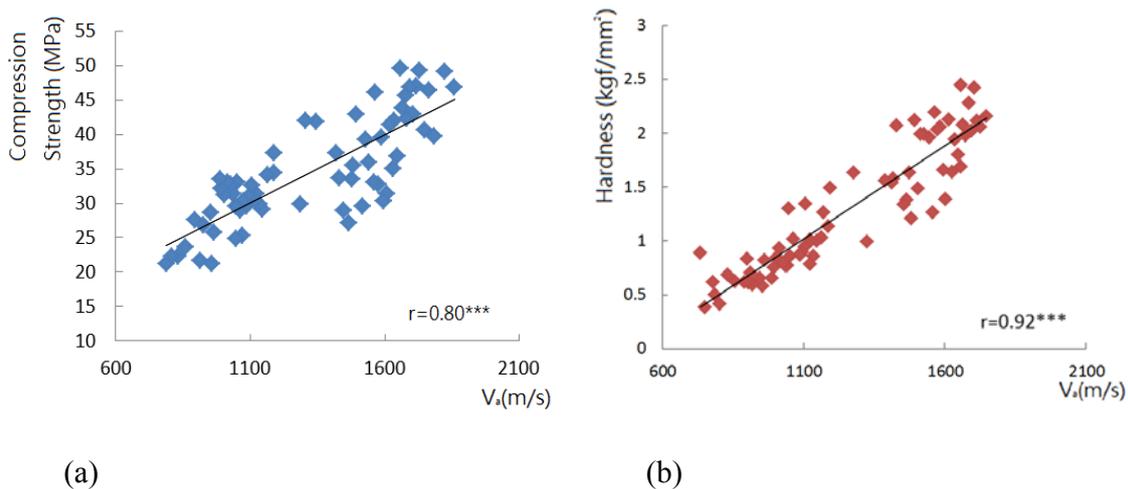


圖 17、斷面影像音速值與縱向抗壓強度(a)與表面硬度(b)之關係

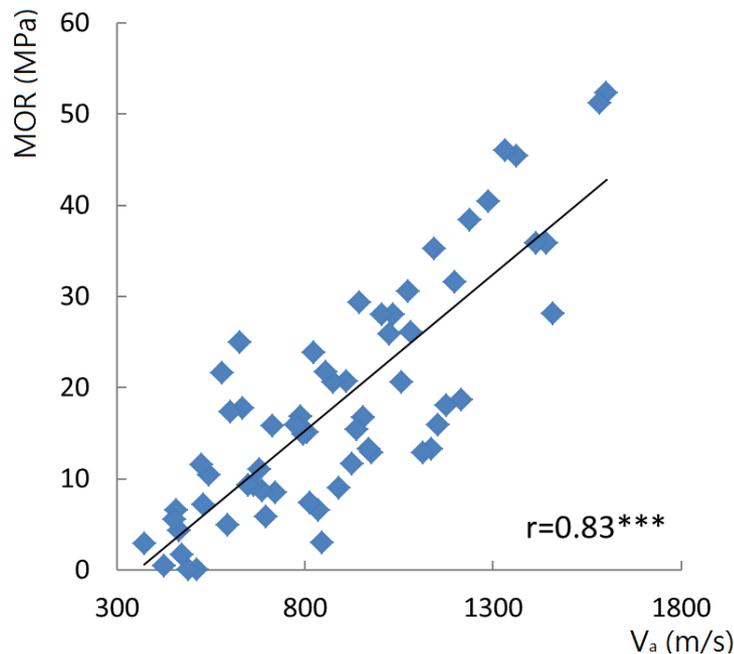


圖 18、斷面影像音速值與 MOR 之相關性分析

綜合斷面影像分析後之音速值與材質之關係，顯示利用此法除可確認內部材質之健全與否外，尚可利用此法評估材質之強度性質（表面硬度、抗壓強度與抗彎強度），雖對於經過石礫和泥沙侵襲之漂流木，因撞擊造成小裂隙，會有細沙填充，造成斷面影像技術評估上的困難，但總體而言，透過應力波斷面影像技術可有效的評估原木缺陷情形，如內部開裂、腐朽和空洞等，提供原木使用之初期資訊；且利用影像處理技術，轉換出斷面影像音速值亦可做為木材強度評估之依據，可提升木材使用率，並減少加工處理時間。

#### 6.健全漂流木之強度分析

漂流木經製材後，以強度試驗機進行抗彎試驗結果如表 3 所示。經彈性模數分等，可分為 E50-E150 等六個等級，隨等級提升，抗彎強度性質隨之增加，同時密度亦有增加之現象。整體而言，本次試驗之漂流木密度介於 643-792 kg/m<sup>3</sup>，抗彎強度則約 40.7-93.8 MPa 抗彎彈性模數則約為 5.4-15.0 GPa，另外比較動彈性模數與抗彎彈性模數方面，動彈性模數約較抗彎彈性模數高約 15.1-20.0%，相關係數 (r) 為 0.82，具有良好之相關性，而動彈性模數較抗彎彈性模數為高，主要是可能係因抗彎試驗時含有扭轉變形、剪力成分等致使撓曲增大，又撓度之測定包含受力點之局部壓潰凹陷變形，以及荷重時間較長，多少有潛變產生等因素造成，而動態法所測得之動彈

性模數因作用力週期短，試材本身僅受到短暫衝擊，幾乎沒有潛變作用現象發生(吳順昭等，1974, Halabe *et al.*, 1997)。蔡如藩(1985)亦指出造成動彈性模數較抗彎彈性模數大之原因可能係抗彎試驗時，木材承受荷重時間較長，而發生塑性流動、塑性變形、彈性遲滯、彈性餘效等因素影響所致。而抗彎彈性模數與抗彎強度之相關係數 ( $r$ ) 則為 0.87。

表 3、不同等級漂流木之強度分析

E-rated	Density (kg/m <sup>3</sup> )	DMOE (GPa)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
E50	643(4.6)	6.4(5.2)	5.4(6.3)	40.7(10.8)
E70	652(3.8)	8.9(4.3)	7.5(3.6)	59.9(9.8)
E90	690(4.1)	10.7(6.8)	9.1(5.6)	72.6(10.4)
E110	692(6.8)	12.6(8.9)	10.5(5.8)	82.8(10.2)
E130	722(8.1)	14.5(9.2)	12.6(4.9)	91.6(9.8)
E150	792(3.2)	17.4(6.4)	15.0(4.6)	93.8(8.6)

The value in parentheses represent coefficient of variation

#### 7. 台東與屏東地區漂流木用途流向分析

在漂流木之分析中，較大規模之漂流木大致為不具經濟價值之木材，而此類木材在最終標售後，其用途為何？目前可參考之相關資料較為不足，因此本研究以莫拉克颱風影響所及之台東與屏東地區漂流木為研究對象，並訪查相關漂流木標售業者，探討其所標得之漂流木流向，由於距離 2009 年之莫拉克颱風襲台已有近 2 年時間，部分資料較為不全，其所使用或販售之量亦無詳細記載，因此本篇僅就今年度所標得之業者進行訪查，並提出其所使用之方向。

以台東地區為例，整體而言，多數漂流木除徑級較大可作為奇木、藝術品或桌面板、椅面板或地板平台使用外，另有製成模板或棧板使用，由於加工程度並不高，因此多以「可使用」之狀態加工，待不堪使用後即廢棄，另有部分業者指出可作為種植香菇之木片使用以及少部分供應紙廠製漿用，唯此用途之用量較少。據台東縣政府統計因莫拉克颱風所處理之不具標售價值漂流木約計 14897m<sup>3</sup>，本研究團隊與業者訪談結果整理後，這些漂流木自行利用者（居家裝飾與庭園造景）約 5%，作為燃料用者約 60%，另外作為家具與棧板、模板使用者約 30%，其他則作為種植香菇與其他用途。

而屏東地區方面，利用之形式大致與台東相同，亦可說漂流木之使用狀態大致類似，唯本次之訪查中亦發現，在屏東地區有業者攜帶移動式搗切機（圖 19）至現場，於現場直接將評估為無法再利用，或是利用價值不高之木材進行破碎作業，破碎後可整齊、大量之運送方式直接載往工廠，此舉可節省相關運輸成本，而利用之方式則是以燃燒的方式提供熱能供工業區暖爐、機

械床式鍋爐、流體化床式鍋爐、發電鍋爐等使用，此法乃利用污染較嚴重的漂流木做為鍋爐燃料，生產蒸汽能源，減少石化能源的使用，達到另一種節能減碳之目的。表 4 為業者提供，以廢棄木材作為燃料提供兩家需求業者之資料，由表 4 可知，單就兩家公司所需之木材用量每月即需 5000 噸，而其木材與重油使用比約為 4:1，若是木材用量不足時，則需以重油補充之，而此舉相對於木材燃燒所致之環境衝擊為高，因此若能有效的利用相關無價值之漂流木作為燃料使用，對於環境保護是具有相當正面之效益，而根據該業者表示，以該公司處理之漂流木量約 8 萬噸，目前約 70% 作為燃料用，而另 30% 則作為種植香菇之木片用。同時亦有業者表示在處理屏東地區之漂流木時（約 10 萬噸），可將漂流木去除頭尾端，作為種植香菇用材，此約佔 40-50%，而頭尾端則用於作為木炭與燃料使用，約佔 20-30%；另有部分品相較佳之漂流木可做為家具用材或是庭園造景用材使用，約佔 20%；亦有少部分提供予永豐餘紙廠，故實際上，漂流木之用途仍相當多元。

表 4、做為燃料用木材之使用量資訊

使用產業	立安東化工股份有限公司	中聯油脂股份有限公司
木材使用量（噸/月）	1 5 0 0	3 5 0 0
產氣量（噸/月）	6 0 0 0	1 4 0 0 0
產值（NT/月）	約 4 5 0 萬	約 1 2 0 0 萬
木材與重油使用比	約 4 : 1	



圖 19、搗切機於現場破碎漂流木狀態

#### 四、結論

本計畫「不同區位漂流木強度分等檢測評估及其流向探討(2/2)」已完成人工孔洞之基礎試驗與實際取得漂流木原木之縱向應力波速評估。由模擬不同孔洞大小的結果得知，傳遞路徑(Path C 和 Path D) 應力波速度與孔洞面積比值有顯著的負相關性，而相對應力波速衰減與孔洞面積比值則有顯著的正相關性，其中，利用斷面影像技術評估木材內部缺陷時，當孔洞面積約為 1% 時可偵測出其與周圍之差異，孔洞面積達約 3% 時則可明顯偵測出與周圍的差別，因此，可利用應力波斷面影像技術評估木材內部缺陷大小和位置，另將圓盤之應力波斷面影像透過 Matlab 程式語法，可建立圓盤內部各區塊之應力波速度與硬度、抗壓強度與抗彎強度之關係，其相關係數分別為 0.92, 0.80 與 0.83，此可做為未來評估其安全性之依據。

最後在健全漂流木之強度分析方面，經分級之漂流木抗彎強度為 40.7-93.8 MPa，抗彎彈性模數為 5.4-15.0 GPa，另外以應力波動彈性模數與抗彎彈性模數之評估方面，動彈性模數約較抗彎彈性模數高約 15.1-20.0%，相關係數為 0.82，具有良好之相關性，因此，健全之漂流木經過分級後，可依其強度性質進行後續之應用，同時可利用應力波法作為材質檢測與強度評估之用。

#### 參考文獻

- 王松永 (1984) 木材動力學與音響學特性之研究(I)木材音速影響因子之研究，台大實驗林研究報告 150：1-23。
- 吳順昭、黃彥三、高健章 (1974) 強制振動法木材彈性模數之測定。中華林學季刊 7(2)：49-55。
- 蔡如藩 (1985) 木材力學性質。徐氏基金會，台北，台灣。pp.61-78。
- 川上敬介 (2008) スギ 3 層クパネルの住宅用部材としての性能と展開。木材工業 63(3)：108-113
- Brown HP, Panshin AJ, Forsaith CC (1952) Textbook of Wood Technology Vol II, pp. 127-154.
- Cown DJ, Walford B, Kimberley MO (1995) Cross-grain effect on tensile strength and bending stiffness of Pinus radiata structural lumber. N Z J Sci 25(2):256 – 262.
- Divos F, Szalai L (2002) Tree evaluation by acoustic tomography. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. August 19-21, 2002. University of California, Berkeley Campus California, USA. pp. 251-56.
- Dickson RL, Matheson AC, Joe B, Ilic J, Owen JV (2004) Acoustic segregation of Pinus radiata logs for sawmilling. N Z J Sci 34(2):175 – 189.
- Gsell D, Feltrin G, Schubert S, Steiger R, Motavalli M (2007) Cross laminated timber plates: Evaluation and verification of homogenized elastic properties. J. of Structural Engineering.

133(1): 132-138.

- Halabe, UB, Bidigalu GM, Gangarao HVS, Ross RJ (1997) Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Materials Eval.* 55(9):1013-1018.
- Jones TG, Emms GW (2010) Influence of acoustic velocity, density, and knots on the stiffness grade outturn of radiate pine logs. *Wood and Fiber Sci.* 42(1): 1-9.
- Lin CJ, Chiu CM, Wang SY (2000) Application of ultrasound in detecting wood decay in squirrel-damaged standing trees of Luanta China fir. *Taiwan Forest Science* 15(2):267-79.
- Mattheck CG, Breloer H (2003) *The body language of trees. A handbook for failure analysis.* London: Office of the Deputy Prime Minister, the Stationery Office. p 202-9.
- Martinis R, Socoo LV, Sambuelli L, Nicolotti G, Schmitt O, Bucur V (2004) Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied *Ann. For. Sci.* 61:157-162.
- Ross RJ, Pellerin RF (1991) Stress wave evaluation of green material: Preliminary results using dimension lumber. *For. Prod. J.* 41(6): 57-59.
- Sandoz JL (1989) Grading of Construction Timber by Ultrasound. *Wood Sci. Technol.* 23: 95-108.
- Sandoz JL (1994) Valorization of forest products as building materials using nondestructive testing. *Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* September 22-24, 1993. Inn on the park, Madison, Wisconsin, USA. pp. 103-9.
- Socco L V, Sambuelli L, Martinis R, Comino E, Nicolotti G (2004) Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees. *Research in Nondestructive Evaluation.* 15:31-54.
- Steiger R, Gulzow A, Dsell D (2008) Nondestructive evaluation of elastic material properties of cross laminated timber (CLT). *Conference COST E53, 29-30 October, The Netherlands.*
- Tsehaye A, Buchanan AH, Walker JCF (2000) Sorting of logs using acoustics. *Wood Sci. Technol.* 34: 337 – 344.
- Wang SY, Chiu CM, Lin CJ (2002) Variation in Ultrasonic Wave Velocity and Dynamic Young's Modulus with Moisture Content for Taiwan Plantation Lumber. *Wood and Fiber Science* 34(3): 370-381.
- Wang SY, Chuang ST (2000) Experimental Data Correction of the Dynamic Elastic Moduli, Velocity and Density of Solid Wood as a Function of Moisture Content above the Fiber Saturation Point. *Holzforschung* 54: 309-314.

- Wang X, Divos F, Pilon C, Brahaw BK, Ross RJ, Pellerin RF (2004) Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. General Technical Report FPL-GTR-147.
- Wang X, Wiedenbeck J, Liang S (2009) Acoustic tomography for decay detection in black cherry trees. *Wood and Fiber Science* 41(2):127-137.
- Yamamoto K, Sulaiman O, Hashim R (1998) Nondestructive detection of heart rot on *Acacia mangium* trees in Malaysia. *Forest Products Journal* 48(3):83-6.

附件一

一、期中簡報審查意見回覆表

審查意見	意見回覆
符合期中審查標準	謝謝委員審查
本計畫探討不同區位漂流木之特性，係分析各集水區或不同海拔情形？又目前研究集中在台東知本地區是否已具代表性，請一併補充說明。	謝謝委員的意見，本計畫所述之不同區位係指不同地區漂流木之最終用途流向分析，今年度以屏東地區與台東地區受莫拉克颱風影響最大之兩地區為主，以調查方式評估漂流木之用途；非破壞技術之研究部分則以台東地區為主。
漂流木經非破壞性評估，如以實木應用，其強度性質建議以損失率表示。	謝謝委員的意見，對於評估漂流木之強度確實曾考慮過以損失率或保留率之方式表示，唯因原有健全時之強度並不清楚，因此文中仍以實際測得之強度性質表示，以作為後續應用之基礎。
漂流木長度可達6-10公尺，以超音波量測之有效距離宜注意，同時斷面影像技術有限範圍侷限於該圓盤位置，使用時機情形請加以說明。	謝謝委員的意見，確實在以往的研究中超音波的量測受到試材長度的限制，本研究進行試驗之材長以3公尺以內之漂流木為主，因此並無材長限制之問題；對於斷面影像部分，試驗時先以目視與超音波或應力波進行量測，目視評估有問題或是發現其縱向音速偏低時，即進行斷面影像之量測，量測時依試材可取間隔20cm進行一斷面之評估，透過軟體之運算，可模擬出整體斷面之影像。
以超音波縱向評估漂流木時，密度低、音速會減緩，同時含水率提高也會減緩音速，如何剔除含水率之影響，請加以說明。	謝謝委員的意見，確實在試驗時音速會受到含水率之影響，而此部分目前亦無法排除，在實驗室之試驗中曾建立含水率與音

	<p>速之關係，但樹種不同，其結果無法一體適用，特別是對漂流木而言，樹種更加混雜，因此於此部分，僅以實測值為主。</p>
<p>漂流木保存性是否會影響強度性質，又採用目視法評估漂流木時，是否要採用CNS天然生針闊葉樹原木分等標準？請一併補充說明。</p>	<p>謝謝委員的意見，於現場以目視法評估漂流木時，無法有效的依標準中節與其他缺點進行分等，因含有許多砂石泥土附著於表面，因此，在本試驗中僅以目視挑選徑級較大，通直且外觀無明顯缺點，未來可加以利用者作為目標材。</p>
<p>本計畫為2年期第2年計畫，請於期末報告增列第1年果摘要，及提出漂流木流向及多目標利用之建議模式。</p>	<p>謝謝委員的意見，已增列於文中。</p>

二、期末簡報審查意見回覆表

審查意見	意見回覆
符合期末審查標準，達到預期效益。	謝謝委員之審查以及對本計畫成果之肯定
本計畫以縱向應力波法及橫向應力波法兩種非破壞試驗法進行漂流木強度評估分等檢測，甚具參考價值及實用性。另再以破壞試驗強度試驗評估分級，建立非破壞與破壞試驗之相關性質之資料庫，將為提供現場評估作業之依據。	謝謝委員之審查以及對本計畫成果之肯定
本研究計畫利用應力波儀器進行漂流木之內部診斷與材質評估，以確定將來可用之漂流木材料性質，此法能有效節省未來材料利用上之成本，同時亦可確認所取得之漂流木健全與否，對於林務單位提供漂流木作為建材使用而言，具有參考價值，亦符合期末審查標準。此技術應可加以推廣應用	謝謝委員之審查以及對本計畫成果之肯定
本計畫以非破壞方式檢測漂流木強度，具有應用價值，可快速區分出木材之優劣，為推廣現場人員能以攜帶式檢測儀器，實際操作應用，建議列入明(101)年度委辦計畫加強辦理。	謝謝委員意見以及對本計畫成果之肯定
有關漂流木流向分析，建議以表列方式，列出其用途及概估數量，作為漂流木多元利用之參考。	謝謝委員意見，漂流木最終用途流向分析部分（用途與概略百分比）已增列於文中。
p.6 中應力波儀之（FAKOPP Enterprise, Fakopp 3D）重複2次，第2次宜刪除。	謝謝委員指正，兩台應力波儀之型號不同，一為2D，一為3D，已補正於文中。

<p>p.7強度試驗所使用之儀器的廠牌、型號等相關資料宜補上。</p>	<p>謝謝委員意見，強度設備之廠牌型號已補正於文中。</p>
<p>圖10標題Socco et al. → Socco <i>et al.</i> (<i>et al.</i> 應為斜體字)</p>	<p>謝謝委員意見，文獻列法已更正。</p>
<p>p. 8提及使用臺灣檫、樟樹與臺灣紅檜，但這些材料在「實施材料」中未見提及，宜補上；且宜補上學名。</p>	<p>謝謝委員意見，相關材料與學名已增列於文中。</p>
<p>原計畫書中實施方法有縱向超音波法(p.4)」，但報告中似乎未使用此法？</p>	<p>謝謝委員意見，本研究原訂以縱向超音波法進行，唯在實地施行時，常有檢測困難與數據讀取不正常之狀態發生，其與設備之發射頻率有關，因此考量實用性與準確性下改以縱向應力波法進行。</p>
<p>橫斷面之應力波評估係於原木之某一段處橫斷面進行檢測，如何確定該斷面有問題？或是僅靠一個斷面影像，如何確保材料健全與否？</p>	<p>謝謝委員意見，本研究以縱向與橫向交互進行，於縱向應力波速發現有問題時，進行橫向之應力波檢測，已確認木材內部狀態，同時本設備可以不同斷面進行評估整體性質，因此可有效地確認其內部狀況。</p>
<p>以圖像顯示之方式對於現場人員操作較為簡易，亦較為容易評估，但圖像顏色之變化與內部實際空洞關係如何，是否曾進行比較討論？</p>	<p>謝謝委員意見，本研究在進行預備試驗時，曾以內部孔洞與顯像結果加以評估，其相關性相當良好。</p>
<p>在流向分析方面，請提出目前所調查之地區中，最終漂流木之處理方式為何？</p>	<p>謝謝委員意見，據本研究整理分析結果，台東與屏東兩地區之漂流木處理有以燃料、家具、造景、棧板、模板、香菇太空包以及少部分紙廠等應用，並已補充於文中。</p>