# 實木蒸汽彎曲之研究

黃 清 吟


## 摘 要

本研究旨在探求常用加工樹種之彎曲適性。以省產木荷及相思樹爲材料，於飽水狀態下蒸汽處理30分鐘，再以滾輪式彎曲成型機彎曲並置於烘箱中乾燥成型，拆卸模具之同時即逐一評估其缺點種類及彎曲品等，復存放於室溫之變化溫濕度條件下歷時八週，定期記錄觀察曲率半徑及含水率之經時變化情形，以此探討樹種曲率半徑、截角與否、厚度、成型溫度等因子之影響，試驗結果歸納如下：

①厚度及曲率半徑影響實木之彎曲成功率，厚度愈小曲率半徑愈大，彎曲成功率愈大，截角與否則不具效應。

②木荷之彎曲適性優於相思樹，允宜推廣。惟其乾燥缺點仍待克服。

③延長蒸汽處理時間可望充分軟化相思樹提昇其彎曲成功率。

④二樹種在乾燥成型後之存放初期，復元性並無顯著差異，八週後則出現明顯之歧異，木荷爲 spring in 相思樹爲 spring back 。曲率半徑僅影響初期復元性。

⑤含水率與存貯時間之對數成線性相關，復元率與含水率、存貯時間均呈二次曲線相關。


**關鍵詞：**實木彎曲、彎曲層積、曲木、復元性、瞬間回復、潛變回復。

**黃清吟，1988，**實木蒸汽彎曲之研究，林業試驗所研究報告季刊。3(2)：99-120.

## Studies on The Solid Wood Steam Bending

Chin-Yin Hwang


## [Summary]

The trend of Taiwan's furniture industry is moving toward high-quality items. Upgrading the processing technique is an urgent task. Bentwood furniture originated a century ago and is still popular in certain foreign markets. The major limitation of Taiwan's bentwood furniture makers is poor bending techniques which lead to few defect-free parts and raised the cost of production. The purposes of the studies were to evaluate the bendability of some local commercial woods and the feasibility of producing defect-free bentwood parts from them.

Chinese guger-tree (*Schima superba*) and Taiwan acacia (*Acacia confusa*) materials were sawn and planed into test specimens 5.5 by 2 or 3 cm in cross section. The lengths of the pieces depended on the bending curvatures. The specimens were kept in a water-saturated condition and plasticized with 100°C steam at 1.5 kg/cm$^2$ pressure for 30 min. After steaming, the materials were transferred quickly to a roller-type solid wood bending equipment, bent, then set and dried under restraint in an oven for 20 to 22 hrs. Right after the molds were removed, the bending


1988年1月送審
1988年5月通過
主審委員：翟思潢
黃彥三

ratings and the kinds of failures were recorded. During the storage duration under room conditions for eight weeks, the curvature deviations were checked periodically.

The results indicated that:

1) The bending ratings of Chinese guger-tree were influenced by the thickness of the specimens and its curvature. Percentage of acceptable bent stocks increased with decreasing thickness and increasing radius. The bending ratings of the specimens were similar, irrespective of bevelling.
2) Chinese guger-tree was easier to bend than Taiwan acacia. It could be used to make good quality bentwood furniture, provided its drying problems be solved.
3) Prolonged steaming may improve the bending ratings of Taiwan acacia.
4) At the start of storage, the percentages of curvature recovery (spring back) were roughly the same for the two species. After 8 weeks storage they tended to differ as Chinese guger-tree sprang in (decrease in radius), and Taiwan acacia sprang back (increase in radius). Statistical analysis also indicated that the final curvatures of the bent stocks correlated with the degrees of instantaneous recovery.
5) There were second order relationships between recovery and moisture content and storage days, respectively.

**Key Words:** Solidwood bending, laminated bending, bentwood, recovery, spring back, spring in, instantaneous recovery, creep recovery.

Hwang, C. Y. 1988. Studies on the Solid Wood Steam Bending. Bull. Taiwan For. Res. Inst. New Series. 3(2):99–120.

## 一、緒　言

台灣家具工業之發展走向已達高峯而轉趨停滯，復因工資之大幅上揚與鄰國之競爭，邇來已略呈萎縮。欲解開此一僵局，家具工業之發展導向宜由勞力密集轉入技術密集，提昇產品形象以期製造高附加價值之家具已爲日後必臨之趨勢。

曲木家具發源雖逾百年，因其品味高尚迄今仍雅受喜愛而符消費需求，允宜推廣。終其製程，彎曲加工爲一決定性產程，然有關此類之研究仍屬缺乏。國內目前僅少數工廠投資生產，惜因加工層次較高，現有技術未達特定程度，致產品製成率過低而提高成本斲傷市場競爭力。

彎曲加工方式有二，即層積彎曲（laminated bending）與實木彎曲（solidwood bending）；後者因所需動力較少，成品表面光滑強韌且能有效利用資源，宜於推展採行。其原理乃利用水分、溫度或化學藥劑可增大木材可塑性之現象，先行塑化木材再施以外力令其變形。化學藥劑法因工業污染以及降低木材強度、增高木材吸濕性，日後難望發展。傳統採用蒸汽處理法及蒸煮法，惟其對樹種具有選擇性，加工頗受限制；近年來微波照射加熱法亦被引入，其能量效率高，短時間即達軟化木材之效果。筆者亦曾對大葉桃花心木及台灣杉進行研究，結果顯示微波照射 3～4 分鐘之軟化效果與蒸汽處理一小時相近，而其後之彎曲品等則二法無顯著差異（黃清吟，1986），顯見微波照射加熱法在節約能源上甚具意義。然則因其效率高，產程之控制更形困難，加上各種實木彎曲適宜條件尚未充分明瞭，以及曲木家具無法達到大量生產程度以前，貿然投資引進，將無法充分利用此一昂貴設施，徒使生產成本增加；如何利用現有軟化設備，謀求加工技術之提昇，亦不失爲一解決之道。

本研究旨在探求適宜彎曲加工之樹種及其適宜之加工條件。試材選用木荷及業界習用之相思樹，經蒸汽軟化後分別探討該二樹種之彎曲適性及其在常態下之復元性，藉以究明影響實木彎曲之因子以及改善復元性之對策。

## 二、材料與方法

㈠試驗材料

採用省產木荷（*Schima superba*, 代號A）及相思樹（*Acacia confusa*,代號B）二樹種。該二樹種均採自南投縣，分別取自3支及10支原木段。試材先行鋸製成斷面5.5 (b) ×3 (h) cm（木荷，相思），及斷面5.5 (b) ×2 (h) cm（木荷）二種規格。擇無斜走木理不含節、腐朽、蟲蛀等之無缺點試材，依曲率半徑截取適宜之長度。有關試材特性詳見表1。

表 1. 試 材 特 性

Table 1. Characteristcs of material used in this experiment.

| 樹種 Species 普通名 Common name | 學名 Scientific name | 產地 Origin | 原木段平均直徑 Ave. Dia. (cm) | 品等 Grade | 平均生材(1)(2)含水率 Ave. Green M.C. (%) | 平均比重(1)(2) Ave. SP/GR (Wo/Vg) | 每3cm(2)年輪數 Rings per 3cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 木荷 | | 台灣南投 | 62.8 | 二等以上 | | | 9 |
| Chinese | Schima | Nan-Tou, | Max. 64.8 | No.2 & | 69.64 | 0.515 | Max. 14 |
| Guger-tree | superba | Taiwan | Min. 60.5 | better | (4.03) | (0.005) | Min. 7 |
| 相思樹 | | 台灣南投 | 31.2 | 二等以上 | | | 7 |
| Taiwan | Acacia | Nan-Tou, | Max. 42.1 | No.2 & | 55.73 | 0.798 | Max. 9 |
| Acacia | confusa | Taiwan | Min. 26.3 | better | (1.91) | (0.014) | Min. 6 |

(1)括號內數值係標準誤。 Value in parenthesis represents standard error.
(2)試體數20。 Number of specimen is 20.

㈡試驗方法

彎曲前，試材先置於水槽中浸漬1～2日使其飽水後，拭乾稱重並以100° C，1.5kg/cm²蒸汽處理半小時，軟化後於引張側護以不銹鋼護片（tension strap），隨即施以彎曲，至180° 圓弧為止（半圓）。試材彎曲後，置於烘箱中乾燥成型，連同模具加熱20～22小時，之後拆卸模具依據 Peter Kock (1972) 之方法評估彎曲品等，並依據梶田茂 (1961) 之分類法記錄缺點種類。此後逐週觀察曲木復元性 (Spring back, recovery，回彈)，及含水率變化情形。復元率之測定方法如下：

$$\text{Spring back } \% = \frac{R-R'}{R} \times 100\%$$

其中R為成型後之曲率半徑，R'復元後之半徑。有關彎曲加工之條件詳列表2，每一處理之重覆數為18—26，彎曲加工設備、評等依據及分類標準則分別示於圖1、2、3。

## 三、結果與討論

㈠彎曲品等及缺點種類　　。圖 4 爲試驗成品之一例。

二樹種之彎曲品等及缺點種類歸納如表 3 ～ 5

表 2. 彎 曲 成 型 條 件

Table 2. Experiment design for bending & forming.

| 樹　種 Species | 蒸汽處理條件 Steaming treatment | 試材厚度 Thickness of specimen | 曲率半徑 Radius of curvature | 成型溫度 Forming temp. |
|---|---|---|---|---|
| | | cm | | °C |
| 木　荷 Chinese Guger-tree (A) | 100°C,1.5kg/cm², 0.5hr. | 2 | 10, 15 | 60, 80 |
| | | 3 | 10, 15, 20, 25 | 60 |
| 相思樹 Taiwan Acacia (B) | 100°C,1.5kg/cm²,0.5hr. | 3 | 10, 15, 20, 25 | 60 |

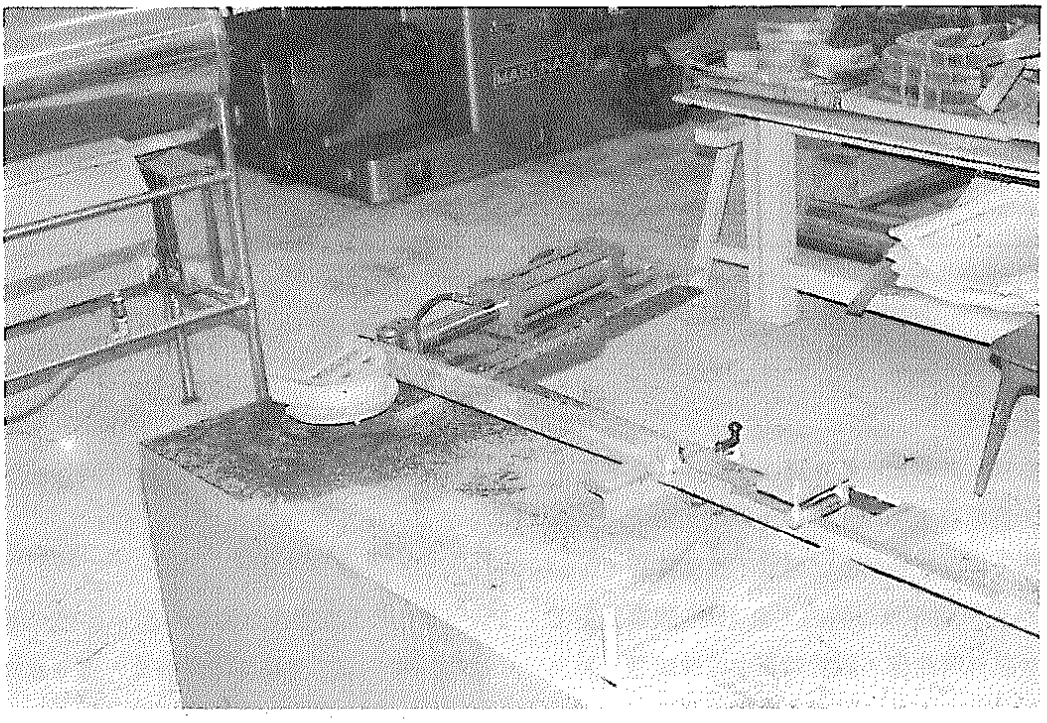


圖 1　實木彎曲設備

Fig 1. Equipment for solid wood bending.

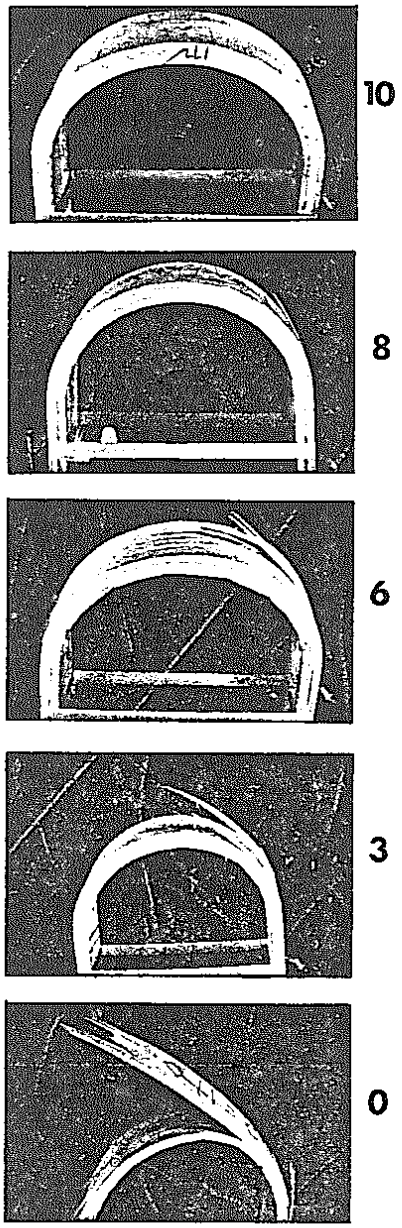
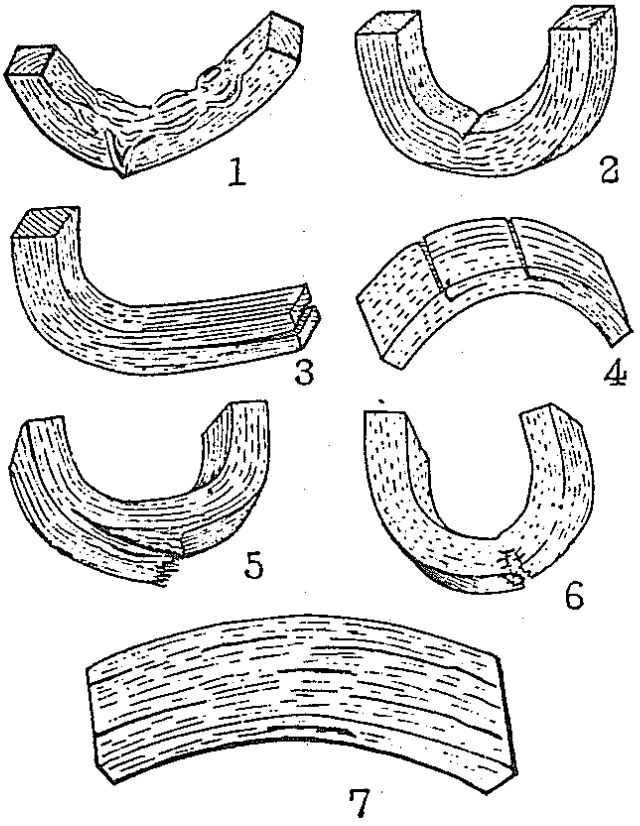



圖 2 彎曲品等

Fig 2. Rating system for bentwood.




1.壓縮側壓潰
2.壓縮側皺曲
3.剪斷破壞
4.引張側垂直纖維割裂
5.引張割裂
6.引張破壞
7.乾燥割裂

圖 3 缺點種類

Fig 3. Defects in solid wood bending.

表3. 3cm 厚木荷之彎曲品等及缺點類別

Table 3. Rating & bending failure of 3cm Chinese Guger-tree.

| 品等 Rating | 未截角 (Not bevelled) | | | | | | | | 截角 (Bevelled) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R=10cm | | R=15cm | | R=20cm | | R=25cm | | R=10cm | | R=15cm | | R=20cm | | R=25cm | |
| | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % |
| 10 | 2 | 11.11 | 8 | 44.44 | 5 | 27.78 | 6 | 33.33 | 0 | 0 | 1 | 5.56 | 2 | 11.11 | 4 | 22.22 |
| 9 | 6 | 33.33 | 6 | 33.33 | 7 | 38.89 | 7 | 38.89 | 3 | 16.67 | 7 | 38.89 | 12 | 66.67 | 7 | 38.89 |
| 8 | 3 | 16.67 | 3 | 16.67 | 3 | 16.67 | 3 | 16.67 | 3 | 16.67 | 5 | 27.78 | 1 | 5.56 | 5 | 27.78 |
| 7 | 2 | 11.11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 33.33 | 5 | 27.78 | 3 | 16.67 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 5.56 | 2 | 11.11 | 1 | 5.56 | 2 | 11.11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5.56 |
| 5 & below | 5 | 27.78 | 0 | 0 | 1 | 5.56 | 1 | 5.56 | 4 | 22.22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5.56 |
| 總計 Total | 18 | 100 | 18 | 100 | 18 | 100 | 18 | 100 | 18 | 100 | 18 | 100 | 18 | 100 | 18 | 100 |
| 主要缺點 Major Defects | 2, 5, 7 | | 5 | | 5 | | 5,7 | | 5 | | 5 | | 5,7 | | 5 | |
| 次要缺點 Minor Defects | 1 | | 2 | | 2 | | | | 1,2 | | 2 | | 2 | | 2,7 | |

1.缺點分類代號參見圖 2. The signs of bending failure quoted from Fig 2.

表4. 2cm 厚木荷之彎曲品等及缺點類別

Table 4. Rating & bending failure of 2cm Chinese Guger-tree.

| 品　等 Rating | 60 °C | | | | 80 °C | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R=10 cm | | R=15 cm | | R=10 cm | | R=15 cm | |
| | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % |
| 10 | 16 | 80 | 17 | 89.47 | 11 | 55 | 13 | 65 |
| 9 | 2 | 10 | 2 | 10.53 | 7 | 35 | 5 | 25 |
| 8 | 2 | 10 | 0 | 0 | 1 | 5 | 1 | 5 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 & below | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 |
| 總計 Total | 20 | 100 | 19 | 100 | 20 | 100 | 20 | 100 |
| 主要缺點 Major Defects | 5 | | 5 | | 2,5,7 | | 5 | |
| 次要缺點 Minor Defects | 2 | | | | | | 2 | |

1.缺點分類代號參見圖2. The signs of bending failure quoted from Fig. 2.

表5. 3cm 厚相思樹之彎曲品等及缺點類別

Table 5. Rating & bending failure of 3cm Taiwan Acacia.

| 品　等 Rating | 曲率半徑 (Radius of curvature) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R=10cm | | R=15cm | | R=20cm | | R=25cm | |
| | PCS | % | PCS | % | PCS | % | PCS | % |
| 10 | 0 | 0 | 3 | 13.64 | 9 | 34.62 | 12 | 46.15 |
| 9 | 3 | 12 | 7 | 31.82 | 9 | 34.62 | 9 | 34.62 |
| 8 | 2 | 8 | 2 | 9.09 | 4 | 15.38 | 3 | 11.54 |
| 7 | 7 | 28 | 3 | 13.64 | 3 | 11.54 | 0 | 0 |
| 6 | 3 | 12 | 3 | 13.64 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 & below | 10 | 40 | 4 | 18.19 | 1 | 3.85 | 2 | 7.7 |
| 總計 Total | 25 | 100 | 22 | 100 | 26 | 100 | 26 | 100 |
| 主要缺點 Major Defects | 1,2 | | 1,2 | | 1,2,5 | | 2,5 | |
| 次要缺點 Minor Defects | 5,7 | | 5,7 | | | | 7 | |

1.缺點分類代號參見圖2. The signs of bending failure quoted from Fig. 2.

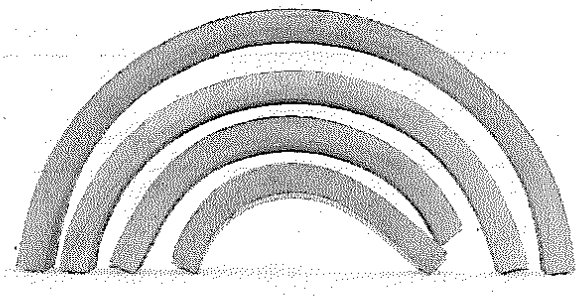


圖4 各曲率半徑之曲木
Fig 4. Bentwood of every radius of curvature in this experiment.

由上述三表得知，3cm厚木荷之彎曲缺點以引張割裂爲主，其端部未經截角（bevelled）者在曲率半徑較小時（R=10cm）則偶有壓縮側之皺曲；2cm厚之木荷亦以引張割裂爲主。相思樹木之彎曲缺點在曲率半徑較小時多屬壓縮側壓潰及皺曲而無引張側之缺點出現；曲率半徑較大時則壓縮側皺曲及引張割裂伴生。顯示此二樹種之性質影響彎曲缺點之形態。

彎曲加工時，木材之引張側（convex side）承受引張應力，使長度增長，而壓縮側面（concave side）則承受壓縮應力使長度縮小；在橫斷面上則引張側寬度變小而壓縮側反之，形成之梯形之斷面（黃清吟；今村祐嗣 et al., 1983），多數材料均可忍受壓縮變形而不易承受引張變形，木材亦如是。木材在靜曲試驗中，其中立軸隨著荷重之加大而向引張側位移，使壓縮側所分擔之壓力增大，而於靜曲初期先發生肉眼不易察覺之壓縮變形，繼隨著荷重之加大，最後於引張側發生引張破壞。此二樹種之彎曲破壞形態，在曲率半徑較大時，多屬引張破壞，隨著曲率半徑之減小，壓縮破壞亦伴之而生。中立軸之移動情形決定彎曲破壞，王松永氏（王松永、張錦，1978）曾指出木材之引張破壞應力與壓縮破壞應力之比值（$\sigma tb/\sigma cb$）決定中立軸下移之程度。是否$\sigma tb/\sigma cb$較大者，較易發生壓縮側之壓潰及皺曲，中立軸改變量對彎曲破壞形態之影響如何，似宜再進一步研究。

次就彎曲品等而言，各處理無缺點（10等）試片所佔之比率，粗略言之，木荷2cm與3cm之比較，以前者高於後者，截角與未截角之比較，反爲後者優於前者。樹種內之各曲率半徑之比較除R=15cm，3cm 厚未截角之木荷外，無缺點試片之百分率均隨曲率半率之增加而增加；而樹種間之比較，在曲率半徑較小時（R= 10, 15cm），以木荷優於相思，曲率半徑較大時（R=20, 25cm）則反之。

由實用觀點觀之，9等以上均屬可用，因此將9、10二等視爲成功，8等以下視爲失敗，再求得各處理之彎曲成功率，並計算角度轉換值（表6），據此進行各處理彎曲成功率之比較。首先探求截角之效應，以雙向分類變方分析法比較3cm木荷截角與未截角各曲率半徑之彎曲成功率得知，截角之效應在0.05水準不顯著，而曲率半徑之效應顯著，故將各處理內截角成功率合併（pooled）後所得鄧肯氏試驗結果如表中所示，成功率亦有隨曲率半徑而增加之趨勢。截角之目的，乃利用彎曲時引張側長度變長而壓縮側長度變小及木材易於壓縮不易拉長之原理，截去橫斷面上自中立軸至壓縮側之部位，使端部之力量集中於引張側（Peter kock, 1972）

，而減輕引張側之破壞（圖5）。截角效應不顯著　type）無法在彎曲加工時施加端壓（end pressure
，可能係因本試驗所用之彎曲設備爲滾輪式(roller　）所致。

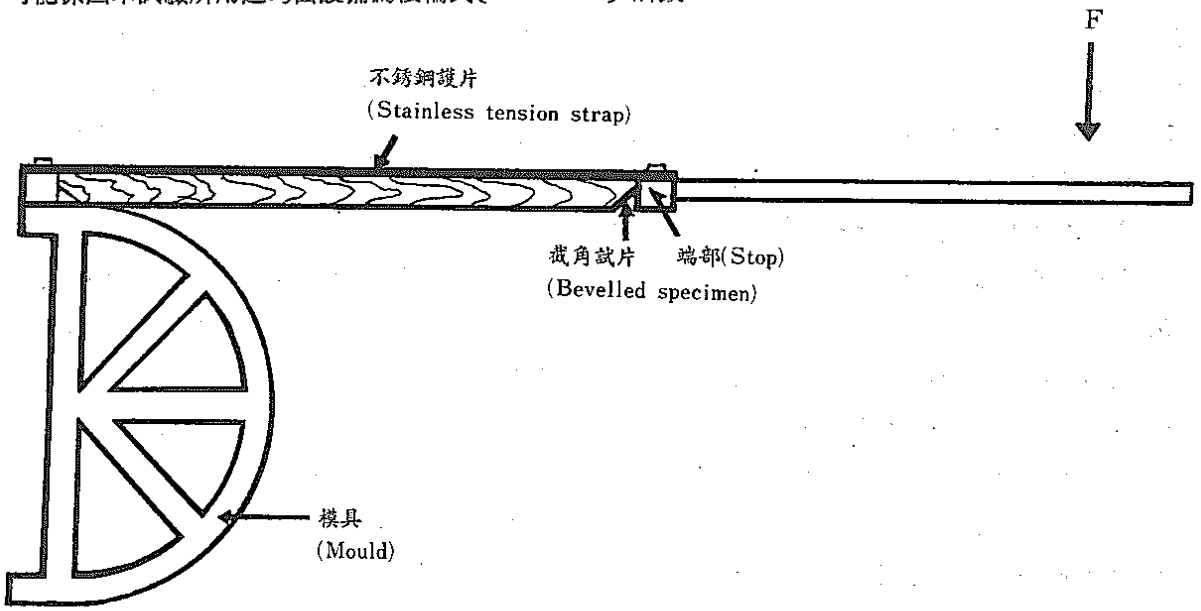



圖5 截 角 試 片 示 意 圖

Fig 5. Demonstration of bevelled specimen.

表6. 各處理彎曲成功率之角度轉換值

Table 6. Angular transformed value of percentage of ratings involving No.9 and above for every treatment.

| 曲率半徑 Radius of curvature (cm) | 木荷 (Chinese Guger-tree) (1)(2) | | | | 相思樹 (Taiwan Acacia)(1)(2) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 3cm (T)(3) | | 2cm (T)(3) | | 3cm(T)(3) |
| | 60°C | | 60°C | 80°C | 60 °C |
| | 未截角 (Not bevelled) | 截角 (Bevelled) | 未截角 (Not bevelled) | 未截角 (Not bevelled) | 未截角 (Not bevelled) |
| 10 | 41.25(4.42) | 18.75(11.24) | 80.19( 9.80) | 80.19( 9.80) | 14.10(8.31)B |
| pooled | 30.00(7.03) B | | 80.19(6.42) | | |
| 15 | 66.05(8.41) | 42.70(6.93) | 90.00( 0.00) | 76.72( 7.67) | 43.30(6.77)AB |
| pooled | 54.38(6.71)AB | | 83.36(4.35) | | |
| 20 | 57.69(12.46) | 65.47(19.26) | ——— | ——— | 65.35(14.63)A |
| pooled | 61.58(7.34)A | | | | |
| 25 | 62.89(9.29) | 57.12(12.00) | ——— | ——— | 67.56( 7.98)A |
| pooled | 60.00(7.11)A | | | | |

(1)括號內數值係標準誤。 Value in parenthesis represents standard error.
(2)試體數18-26. Number of specimen is 18-26.
(3)平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

其次探討試片厚度之效應。厚度2cm之木荷分爲成型溫度60°C及80°C二項，乃爲尋求成型溫度對復元性之影響。此二項理應具有相同之成功率，經由雙向分類變方分析法證實成型溫度不影響成功率，而曲率半徑對2cm木荷之效應亦不顯著。因此將3cm木荷截角未截角之合併成功率與2cm中60°C與80°C之合併成功率做一比較，變方分析結果差異在0.01水準極顯著，顯示厚度影響木荷之彎曲成功率至深，而與理論吻合。

最後比較樹種之效應。相思樹中，曲率半徑之效應在0.01水準顯著，其鄧肯試驗結果如表中所示，彎曲成功率亦隨曲率半徑而增加。綜合比較相思樹與木荷（未截角），雖僅曲率半徑效果顯著，而樹種之效應不彰；然於各曲率半徑中比較相思與木荷，則可發現 R＝10cm 時木荷之彎曲成功率遠大於相思樹，至於其他各曲率半徑，則二樹種差異不顯著。此足以認定，木荷之彎曲適性較相思樹爲佳，其中立軸向引張側位移之能力較強，而能承受較多之壓縮變形。

綜合考慮彎曲缺點及品等，則今村祐嗣（1982、1983）等人對曲木細胞壁之掃描式電子顯微鏡（SEM）觀察可做爲佐證。彼等指出，在曲率半徑較大之場合，不論針闊葉樹材，其縱切面上壓縮側細胞內壁表面最先出現螺旋狀小隆起，隨著曲率半徑之減小，隆起之寬度增大且數目增多，至曲率半徑更小時，細胞壁發生波狀皺曲。比較不同樹種相同曲率半徑下之組織構造，發現波狀皺曲集中發生而螺旋狀小隆起較少出現者爲不易彎曲之樹種；反之較易彎曲之樹種，則僅發生螺旋狀隆起，且均勻散生。此種微視上（microscopic）之觀察可解釋巨視上（macroscopic）之現象。在R＝10cm時，木荷彎曲品等較低者之壓縮側，皆出現多數均勻之小型皺曲，而相思樹則爲少數集中之大型壓潰（圖6）。故其彎曲成功率有顯著之差異，亦證實木荷之彎曲適性較傳統所用之相思樹爲佳。但在乾燥成型過程中，木荷因急速脫水而產生蜂巢裂，雖不致影響成品外觀但總有損於強度。因此理論上木荷爲一彎曲適性極佳之樹種，值得推廣，然其成型條件仍宜再詳盡規畫。而相思樹彎曲成功率雖遜於木荷，亦極可能歸因於：1.木荷之木質素含量爲28.46%，相思樹僅18.86%（中華林學會，1967）；前者在蒸汽處理30min後即達塑化效果而後者仍未完全塑化。2.木荷幹形通直圓滿年輪緻密，相思樹則多斜走木理且年輪寬度較大。因此延長蒸汽處理時間或可改善相思樹之彎曲成功率。

本實驗中曾詳細記錄各試片之木理角度，初期及蒸汽處理後之含水率等各變化因子，期能求得彎曲品等與各變因間之相關性。惜因變化因子太多而重複次數略少，以及木材本身之變異性太大而未能獲致一理想之線性迴歸方程式。

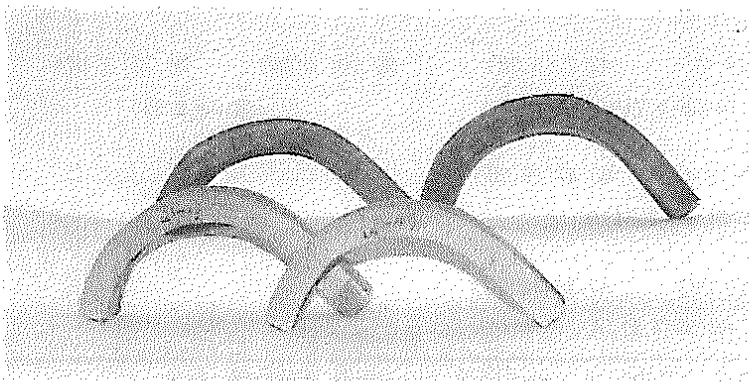


圖6　木荷及相思樹壓縮側缺點之差異（上爲相思，下爲木荷）

Fig 6. Differences of bending failure between Chinese Guger-tree (lower) and Taiwan Acacia (upper)。

㈡含水率變化及曲木復元性

1.含水率變化

試驗期間各處理之含水率變化情形，詳如表7～10。比較木荷各處理內不同曲率半徑下之原始含水率，差異均在0.05水準不顯著，而相思樹則差異顯著，顯示木荷之含水率分佈均勻性較相思樹爲佳，此有可能係因前者取材自3株不同原木段而後者10株，或因樹種之特性所致。至於同一試材蒸汽處理前後含水率之差異情形，經配對T試驗得知除2cm 厚木荷80°C，R＝10cm 外，餘皆在0.01水準顯著，但木荷與相思樹之趨勢並不一致，蒸汽處理後木荷之含水率顯著增加，而相思樹則趨減少，推測係因後者所富含抽出成份遭蒸汽萃出之故。

表 7. 3cm未截角木荷曲木之含水率經時變化

Table 7. Periodic change of M. C. for 3cm un-bevelled Chinese Guger-tree bentwood samples.

| 存貯時間 Duration of storage | 曲率半徑(2)(3) Radius of curvature | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm |
| 原始 (Original) (1)(4) | 72.64(3.45)A | 69.52(2.97)A | 72.26(2.72)A | 70.25(3.05)A |
| 蒸氣處理後 (After steaming) | 74.88(2.96) | 72.14(2.70) | 75.00(2.29) | 69.31(4.34) |
| 成型後 (After setting) (4) | 35.49(1.43)A | 34.92(1.65)A | 33.78(2.23)A | 31.08(1.61)A |
| 二日 2D | 34.37(1.32) | 33.96(1.47) | 32.32(2.31) | 33.00(1.50) |
| 一週 1W | 30.96(1.37) | 32.21(1.26) | 29.46(1.92) | 26.91(1.61) |
| 二週 2W | 25.31(0.88) | 26.94(0.97) | 26.34(1.30) | 24.42(1.05) |
| 三週 3W | 20.77(0.65) | 22.51(0.76) | 22.56(0.99) | 20.91(0.70) |
| 四週 4W(4) | 17.87(0.48)AB | 19.63(0.65)A | 19.48(0.81)A | 17.65(0.45)B |
| 五週 5W | 15.59(0.28) | 16.82(0.42) | 16.90(0.58) | 15.61(0.37) |
| 六週 6W | 15.54(0.23) | 16.19(0.30) | 16.29(0.41) | 15.52(0.27) |
| 七週 7W | 14.62(0.19) | 15.03(0.21) | 14.97(0.32) | 14.50(0.26) |
| 八週 8W(4) | 14.95(0.18)A | 15.21(0.19)A | 15.18(0.26)A | 14.86(0.21)A |

(1) 原始含水率係指蒸汽處理前試材含水率。Original M. C. indicating M. C. just before steaming.

(2) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.

(3) 試體數18。Number of specimen is 18。

(4) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

表 8. 3cm截角木荷曲木之含水率經時變化

Table 8. Periodic change of M. C. for 3cm bevelled Chinese Guger-tree bentwood samples.

| 存貯時間 Duration of storage | 曲率半徑(2)(3) Radius of curvature | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm |
| 原始 (Original) (1)(4) | 60.13(2.60)A | 63.15(2.58)A | 64.54(1.84)A | 65.03(2.55)A |
| 蒸汽處理後 (After steaming) | 63.32(2.29) | 66.05(2.29) | 67.24(0.53) | 67.85(2.26) |
| 成型後 (After setting) (4) | 28.16(1.39)A | 31.75(1.83)A | 30.06(1.34)A | 30.00(1.87)A |
| 二日 2D | 27.56(1.24) | 31.16(1.62) | 29.95(1.22) | 29.96(1.68) |
| 一週 1W | 24.94(1.02) | 28.97(1.38) | 27.88(1.06) | 26.65(1.20) |
| 二週 2W | 21.59(0.80) | 25.57(1.19) | 24.43(0.91) | 23.42(1.12) |
| 三週 3W | 17.96(0.65) | 21.93(1.05) | 21.11(0.67) | 19.30(0.81) |
| 四週 4W (4) | 15.45(0.36)C | 18.31(0.56)A | 18.06(0.39)A B | 16.64(0.66)B C |
| 五週 5W | 15.29(0.31) | 17.43(0.71) | 17.29(0.32) | 16.21(0.53) |
| 六週 6W | 14.41(0.28) | 16.09(0.29) | 15.79(0.23) | 14.89(0.44) |
| 七週 7W | 14.67(0.27) | 16.09(0.25) | 15.81(0.19) | 15.05(0.31) |
| 八週 8W (4) | 14.47(0.25)B | 15.80(0.21)A | 15.56(0.18)A | 14.81(0.30)B |

(1) 原始含水率係指蒸汽處理前試材含水率。Original M. C. indicating M. C. just before steaming.
(2) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.
(3) 試體數18。Number of specimen is 18.
(4) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

表 9. 2cm木荷曲木之含水率經時變化

Table 9. Periodic change of M. C. for 2cm Chinese Guger-tree bentwood samples.

| 存貯時間 Duration of storage | 成型溫度Temp. of forming(2)(3) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 60 °C | | 80 °C | |
| | 曲率半徑Radius of curvature | | 曲率半徑Radius of curvature | |
| | 10cm | 15cm | 10cm | 15cm |
| 原始 (Original) (1)(4) | 53.88(4.15)A | 55.53(4.80)A | 65.67(4.58)A | 62.95(4.67)A |
| 蒸汽處理後 (After steaming) | 56.32(3.78) | 58.07(4.30) | 67.18(3.96) | 71.04(4.64) |
| 成型後 (After setting) (4) | 32.48(2.50)A | 32.99(2.58)A | 26.20(2.34)A | 28.72(2.34)A |
| 二日 2D | 28.13(2.18) | 28.81(2.33) | 24.58(1.93) | 26.88(2.05) |
| 一週 1W | 19.57(1.06) | 20.05(1.11) | 19.12(1.40) | 21.13(1.61) |
| 二週 2W | 17.23(0.53) | 17.29(0.61) | 15.65(0.56) | 16.76(0.85) |
| 三週 3W | 15.09(0.20) | 15.36(0.24) | 15.03(0.44) | 15.58(0.59) |
| 四週 4W(4) | 15.36(0.23)A | 15.63(0.24)A | 14.55(0.27)B | 14.50(0.38)B |
| 五週 5W | 15.04(0.16) | 15.27(0.17) | 14.61(0.30) | 14.74(0.36) |
| 六週 6W | 14.48(0.24) | 14.84(0.25) | 14.72(0.27) | 14.58(0.30) |
| 七週 7W | 12.71(0.19) | 13.03(0.21) | 13.88(0.31) | 14.18(0.39) |
| 八週 8W(4) | 13.20(0.24)A | 13.50(0.25)A | 12.85(0.23)A | 12.77(0.33)A |

(1) 原始含水率係指蒸汽處理前試材含水率。Original M. C. indicating M. C. just before steaming.
(2) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.
(3) 試體數20。Number of specimen is 20.
(4) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

表10. 2cm相思樹曲木之含水率經時變化

Table 10. Periodic change of M. C. for 3cm Taiwan Acacia bentwood samples.

| 存貯時間 Duration of storage | 曲率半徑(2)(3) Radius of curvature | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm |
| 原始 (Original) (1)(4) | 51.46(1.79)B C | 57.34(2.09)A | 54.96(1.53)A B | 49.02(1.89)C |
| 蒸汽處理後 (After steaming) | 48.96(1.68) | 53.28(1.85) | 51.68(1.43) | 47.33(1.58) |
| 成型後 (After setting) (4) | 27.49(1.12)B C | 30.05(1.48)A | 29.64(1.07)A B | 25.90(1.20)C |
| 二日 2D | 26.38(0.97) | 28.65(1.22) | 28.06(0.99) | 25.42(1.08) |
| 一週 1W | 23.74(0.71) | 26.72(1.02) | 26.80(0.80) | 24.31(0.93) |
| 二週 2W | 20.21(0.52) | 23.89(0.80) | 24.30(0.78) | 22.04(0.80) |
| 三週 3W | 18.07(0.34) | 20.97(0.60) | 21.42(0.55) | 19.97(0.60) |
| 四週 4W(4) | 16.83(0.33)B | 19.69(0.50)A | 19.96(0.46)A | 18.89(0.49)A |
| 五週 5W | 15.98(0.23) | 18.22(0.42) | 18.39(0.36) | 17.69(0.39) |
| 六週 6W | 15.49(0.22) | 17.43(0.32) | 17.57(0.30) | 17.17(0.34) |
| 七週 7W | 15.19(0.16) | 16.67(0.23) | 16.76(0.22) | 16.59(0.27) |
| 八週 8W(4) | 14.39(0.20)B | 15.99(0.23)A | 15.93(0.26)A | 15.94(0.30)A |

(1) 原始含水率係指蒸汽處理前試材含水率。Original M. C. indicating M. C. just before steaming.

(2) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.

(3) 試體數25。Number of specimen is 25.

(4) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

前述含水率分佈之均勻性亦影響成型後之含水率均勻度，木荷各處理均在0.05水準差異不顯著，而相思樹則與原始含水率呈相同之排列趨勢。然成型後四週，木荷各處理內含水率之變化反呈複雜，相思樹則趨簡化，而八週後之含水率，則各處理咿呈一定，以曲率半徑較小者或因長度較短故而含水率稍偏低。但由此亦足推測，不同曲率半徑之試材成型後貯放八週以上方可獲致較爲均勻之成品含水率。因此欲縮短製作過程及倉儲時間並維成品於一定水準，高含水率下施行彎曲之試材，宜藉由一般窯乾基準控制成品之含水率，（此亦極可能爲微波加熱用在實木彎曲之一大限制）；或將試材先行窯乾至一定含水率範圍，在不影響成品成功率之最低含水率內施行彎曲加工，二者均待進一步研究。

各處理含水率經時變化情形，概具相仿之趨勢，以其均數做迴歸分析，求得如下之實驗式（表11）。

表 11. 曲木成型後含水率與時間之迴歸方程式

Table 11. Regression equations of M. C. vs duration for bentwood after setting in this experiment.

| 處理代號(1) Treatment | 迴歸方程式 Regression equation | F | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| A-3-60-NB-10 | Lny=3.8696−0.2915Lnx | 84.89** | 0.9238 |
| -15 | Lny=3.8789−0.2788Lnx | 56.75** | 0.8902 |
| -20 | Lny=3.7931−0.2560Lnx | 55.47** | 0.8879 |
| -25 | Lny=3.7690−0.2666Lnx | 108.65** | 0.9395 |
| A-3-60-B -10 | Lny=3.5573−0.2245Lnx | 88.76** | 0.9269 |
| -15 | Lny=3.7235−0.2343Lnx | 62.24** | 0.8989 |
| -20 | Lny=3.6691−0.2248Lnx | 68.74** | 0.9076 |
| -25 | Lny=3.6633−0.2406Lnx | 93.45** | 0.9303 |
| A-2-60-NB-10 | Lny=3.4476−0.2203Lnx | 203.93** | 0.9668 |
| -15 | Lny=3.4672−0.2204Lnx | 194.23** | 0.9652 |
| A-2-80-NB-10 | Lny=3.2924−0.1782Lnx | 146.41** | 0.9544 |
| -15 | Lny=3.4285−0.2124Lnx | 232.39** | 0.9708 |
| B-3-60-NB-10 | Lny=3.4673−0.1915Lnx | 193.29** | 0.9651 |
| -15 | Lny=3.5757−0.1860Lnx | 80.42** | 0.9199 |
| -20 | Lny=3.5634−0.1799Lnx | 56.03** | 0.8889 |
| -25 | Lny=3.4165−0.1490Lnx | 73.28** | 0.9128 |

(1) 處理代號表示"樹種—厚度—成型溫度—是否截角—曲率半徑"
Sign "A-30-60-NB-10" and so on represents "species-thickness-forming temp.-bevelled or not-radius of curvature."

由表可知，各處理均屬指數函數，且斜率與截距甚爲相近，故再行共變異分析得知，木荷中3 cm未截角（A-3-60-NB）、2 cm 60°C（A-2-60-NB）及2cm 80°C（A-2-80-NB)等三大處理羣內，不同曲率半徑之含水率變化曲線均可合併爲一條曲線，而相思樹則僅R＝15，20，25cm三者可共用一條曲線，此與前述含水率均勻性亦相呼應。至於A-2-60-NB及A-2-80-NB之比較，經混合三曲率半徑進行共變異分析，結果亦不顯著，顯示成型溫度對 2cm 木荷曲木之含水率變化並無影響。將A-3-60-NB及A-2-60-NB各曲率半徑之含水率經時變化混合做一迴歸分析，得如下之共用迴歸方程式（見圖7）：

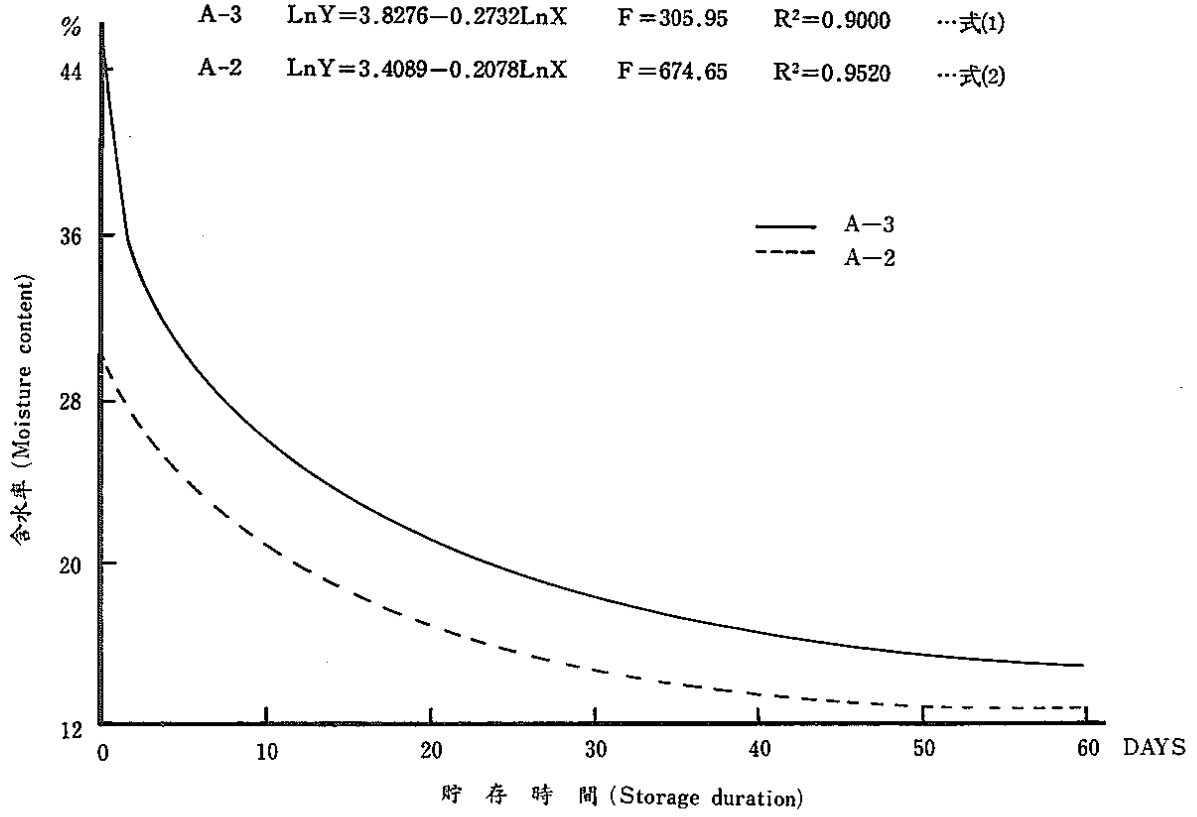



圖 7　含水率與貯存時間之關係

Fig 7. Relationship between M. C. and storage days.

2.曲木復元性

乾燥之木材爲一理想之彈性體，在彈性限度之內承受外力卽變形，外力一但解除旋卽回復原狀，因此欲施行塑性加工惟有藉水份及溫度之效應成能竟其功。木材細胞壁內含有許多親水性羥基，形成一發達之氫鍵網，加大分子間之凝集力。當木材吸濕時，水分進入細胞壁先破壞氫鍵，繼之使分子鏈之間距擴大而降低凝集力，木材粘彈性遂增大，而纖維素、木質素、半纖維素等木材成份之玻璃轉移點（glass transition point）降低。加熱木材約至100°C 時，纖維素維持於玻璃狀態，而其間充成份及外被成份已被軟化成橡膠狀態，實爲施行彎曲加工之最佳時機。彎曲加工後若卽拆卸模具則木材迅卽回復原狀，需再藉溫乾燥木材使水份脫離，則外被物質又與木材成份分子間形成氫健結合，復又返回玻璃狀態，微纖維仍維持玻璃狀態，木材因而產生 drying set 作用而定型（黃清吟，1986；王松永，1981），此乃實木彎曲加工之基本原理。

復元性又稱回彈（spring back）爲影響曲木成品組合之一重要因子，前節所述今村祐嗣等人 SEM 之觀察結果，亦可用以解釋此一現象。曲木在吸濕過程中，微視上乃波狀皺曲先行消失，繼之螺旋狀小隆起亦告消失，由此而推斷復元過程乃彎曲加工時全部形態變化之逆轉。青木務（1983）亦揭明彎曲加工材之曲率半徑因吸濕而增大，脫濕而減少，乃因含水率增加之際凸側引張側（convex side）之成型應變（fixed strain）減少（收縮）而凹側（壓縮側，concave side）之應變加大（膨脹）使曲率半徑加大，脫濕過程中凸側與凹側之變形量均減少，而以凹側之減少較大，以致曲率半徑減少。E. C. Peck （1968）亦指出木材厚度方向之各層，當含水率改變時所引起之縱向收縮膨脹並不一致，以壓縮側之脹縮大於引張側，此外厚度方向之脹縮亦導致曲率半徑之改變，收縮時曲率較大

膨脹時曲率變少。

本試驗期間各處理之復元率變化情形，見表12～15，由表中得知，3 Cm 木荷不論截角與否，在成型後三週之內均發生回彈（spring back）現象，而3～4週後轉爲spring in, 3cm相思樹則自始至終（8週後）均爲 spring back。粗略之觀察得知，木荷以曲率半徑較小者，較先由 spring back 轉爲 spring in 。在成型八週後，曲木含水率均介於14～16%間，然樹種之復元情形相去甚遠。

比較各處理成型二日後之復元性（SB1），結果歸納如次：以雙向分類變方分析法比較3cm截角及未截角木荷，得知截角之效應不顯著，而曲率半徑之效應在0.01水準顯著，其結果分列於表12及表13，二處理羣內均以R＝10cm 者復元性最小。復同前法採雙向分類比較2cm木荷之60°C及80°C 二處理羣，則知曲率半徑之效應不顯著而成型溫度之效應顯著；R＝10cm與R＝15cm 二者綜合之比較，以成型溫度 80°C 者復元率較低。探討厚度對復元性之影響，比較3 cm木荷未截角（A-3-60-NB）與2cm木荷60°C（A-2-60-NB），得厚度與曲率半徑之效應均在0.01水準顯著：厚度較大者SB1較小，而曲率半徑較大者 SB1亦大。相思樹各曲率半徑之比較詳見表15，亦以 R＝10cm 者復元性最小。至於木荷與相思之比較，則僅顯示曲率半徑之效應，而未能凸顯樹種之效應。

表 12. 3cm未截角木荷復元率之經時變化情形

Table 12. Periodic change of percentage of recovery for 3cm not-bevelled Chinese Guger-tree.

| 復元率 | 曲率半徑 Radius of curvature (1)(2) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm |
| 二日 2D (SB1)(3) | 1.24(0.31)B | 2.39(0.38)A | 2.71(0.25)A | 2.25(0.26)A |
| 一週 1W (SB2) | 1.35(0.40) | 2.77(0.34) | 3.61(0.26) | 2.80(0.35) |
| 二週 2W (SB3) | 0.11(0.50) | 1.67(0.46) | 2.69(0.39) | 1.34(0.47) |
| 三週 3W (SB4) | −1.37(0.78) | −0.28(0.63) | 1.09(0.41) | 0.10(0.58) |
| 四週 4W (SB5)(3) | −3.42(0.82)B | −1.28(0.75)A | 0.05(0.50)A | −1.34(0.71)A |
| 五週 5W (SB6) | −5.27(0.85) | −3.20(0.80) | −1.76(0.56) | −2.92(0.75) |
| 六週 6W (SB7) | −4.72(0.87) | −3.45(0.80) | −1.91(0.54) | −3.09(0.83) |
| 七週 7W (SB8) | −5.71(0.91) | −4.50(0.80) | −3.34(0.60) | −3.90(0.86) |
| 八週 8W (SB9)(3) | −5.04(0.92)A | −4.14(0.80)A | −3.05(0.64)A | −3.45(0.85)A |

(1) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.

(2) 試體數18。Number of specimen is 18.

(3) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

表 13. 3cm截角木荷復元率之經時變化情形

Table 13. Periodic change of percentage of recovery for 3cm bevelled Chinese Guger-tree.

| 復元率 | 曲率半徑 Radius of curvature (1)(2) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm |
| 二日 2D (SB1)(3) | 1.30(0.28)B | 1.77(0.31)B | 2.29(0.20)A | 2.60(0.28)A |
| 一週 1W (SB2) | 1.41(0.45) | 2.51(0.26) | 3.01(0.30) | 3.10(0.34) |
| 二週 2W (SB3) | 0.10(0.53) | 1.77(0.28) | 2.26(0.36) | 2.11(0.43) |
| 三週 3W (SB4) | −1.36(0.56) | 0.34(0.41) | 1.27(0.39) | 0.29(0.55) |
| 四週 4W (SB5)(3) | −2.75(0.74)B | −1.23(0.43)AB | −0.40(0.59)A | −1.04(0.57)A |
| 五週 5W (SB6) | −2.59(0.73) | −2.09(0.47) | −0.76(0.64) | −1.17(0.68) |
| 六週 6W (SB7) | −3.36(0.79) | −2.98(0.47) | −2.00(0.72) | −2.34(0.68) |
| 七週 7W (SB8) | −2.82(0.75) | −2.90(0.50) | −1.86(0.69) | −2.02(0.71) |
| 八週 8W (SB9)(3) | −3.17(0.80)A | −3.14(0.51)A | −2.11(0.74)A | −2.18(0.69)A |

(1) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.
(2) 試體數18。Number of specimen is 18.
(3) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

表 14. 2cm木荷復元率之經時變化情形

Table 14. Periodic change of percentage of recovery for 2cm Chinese Guger-tree.

| 復元率 | 60°C(1)(2) | | 80°C(1)(2) | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 10cm | 15cm |
| 二日 2D (SB1) | 2.43(0.25) | 3.22(0.28) | 1.95(0.24) | 1.99(0.10) |
| 一週 1W (SB2) | 1.23(0.42) | 1.88(0.55) | 0.22(0.33) | 0.95(0.19) |
| 二週 2W (SB3) | 1.15(0.51) | 1.75(0.67) | −0.60(0.57) | −0.63(0.44) |
| 三週 3W (SB4) | −0.04(0.78) | 0.44(0.92) | −0.57(0.58) | −0.63(0.50) |
| 四週 4W (SB5) | 0.87(0.67) | 1.27(0.86) | −0.87(0.72) | −1.48(0.71) |
| 五週 5W (SB6) | 0.50(0.86) | 1.17(0.96) | −0.57(0.62) | −0.84(0.66) |
| 六週 6W (SB7) | 0.26(0.61) | 0.90(0.81) | −0.35(0.64) | −0.93(0.73) |
| 七週 7W (SB8) | 1.42(0.68) | −0.57(0.87) | −1.24(0.65) | −1.28(0.59) |
| 八週 8W (SB9) | −0.38(0.62) | 0.29(0.88) | −2.37(0.80) | −2.73(0.71) |

(1) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standard error.
(2) 試體數20。Number of specimen is 20.

表 15. 3cm 相思樹復元率之經時變化情形

Table 15. Periodic change of percentage of recovery for 3cm Taiwan Acacia.

| 復元率 | 曲率半徑 Radius of curvature(1)(2) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10cm | 15cm | 20cm | 25cm |
| 二日 2D (SB1)(3) | 1.53(0.32)B | 1.82(0.17)AB | 2.41(0.19)A | 2.07(0.12)A |
| 一週 1W (SB2) | 3.04(0.32) | 3.14(0.32) | 3.82(0.22) | 3.51(0.19) |
| 二週 2W (SB3) | 2.98(0.30) | 3.77(0.30) | 4.72(0.23) | 4.21(0.16) |
| 三週 3W (SB4) | 3.20(0.40) | 3.61(0.35) | 4.73(0.26) | 3.75(0.20) |
| 四週 4W (SB5)(3) | 2.66(0.38)C | 3.85(0.35)AB | 4.67(0.26)A | 3.72(0.19)B |
| 五週 5W (SB6) | 2.51(0.42) | 3.38(0.38) | 4.29(0.26) | 3.17(0.22) |
| 六週 6W (SB7) | 2.37(0.40) | 3.41(0.38) | 4.20(0.27) | 3.26(0.20) |
| 七週 7W (SB8) | 2.12(0.45) | 3.01(0.43) | 3.87(0.29) | 2.91(0.22) |
| 八週 8W (SB9)(3) | 1.34(0.38)C | 2.55(0.38)AB | 3.34(0.27)A | 2.40(0.17)B |

(1) 括號內數值係標準誤。Value in parenthesis represents standar error.

(2) 試體數18。Number of specimen is 18.

(3) 平均值後註有相同字母者，表示經鄧肯氏新多變域檢定法測定結果差異在0.05水準不顯著。
Comparable means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level.

依上序比較各處理四週後之復元性（SB5）與SB1有相仿之趨勢，A-3-60-NB與A-3-60-B之比較，截角效應不顯著而曲率半徑效應顯著（表12，13），仍以曲率半徑R＝10cm之SB5最小。2cm木荷亦與SB1同，乃曲率半徑效應不顯著而成型溫度顯著，80°C爲spring in而60°C仍爲spring back。比較A-3-60-NB與A-2-60-NB，得曲率半徑效應不顯著而厚度之效應顯著，厚度爲3cm者已spring in而厚度爲2cm者仍爲spring back。相思樹各曲率半徑之SB5比較見表15，仍以R＝10cm復元性最小。但木荷與相思樹之比較則出現歧異，曲率半徑及樹種之作用均呈極顯著，木荷爲spring In而相思樹仍停留在spring back。

八週後各處理之復元性（SB9）發生變化，同上之分析出現迥然不同之結果；以雙向分類比較A-3-60-NB與A-3-60-B則曲率半徑效應不顯著截角效應顯著，而以未截角者spring in較爲嚴重。然而分別比較截角、未截角各曲率半徑之SB9却均不顯著。前SB1與SB5雙向分類變方分析結果與各曲率半徑內之分組比較，並無如SB9之矛盾現象，但由統計學觀點視之，截角與未截角之處理平方和及機差平方和在雙向分類分析中，各採數個曲率半徑之所有觀測值總和計之，而各別比較各曲率半徑者則僅由各該曲率半徑之觀測值計之，故而前法所採之觀測個數較後法爲多，更易消除由樣本變異性所引起之機差，而凸顯處理之效應。至於曲率半徑效應之消失，似可歸因於時間因素之影響。木荷2cm內，同前以曲率半徑之效應不顯著而成型溫度顯著，此時80°C與60°C均爲spring in而以80°C爲嚴重。至於厚度之影響，雙向分類比較A-3-60-NB及A-2-60-NB亦同於SB5，以曲率半徑效果不彰而厚度具顯著影響，仍以3cm者spring in較爲嚴重。相思樹各曲率半徑，SB9之變方分析結果顯著再經鄧肯氏試驗結果如表15所示，其趨勢仍以SB5相仿。木荷與相思SB9之比較結果與SB5相似，即曲率半徑及樹種均呈顯著之效應，木荷爲spring in而相思樹仍爲spring back。

綜合上述，就木荷而言：曲率半徑在成型後貯

存初期對於復元性有決定性之影響，至八週後其作用逐漸消失，初期多屬 spring back，曲率半徑較小者，其復元性較小；中期則屬 spring in，而曲率半徑較小者反spring in較嚴重；後期均已spring in，但各曲率半徑之復元性相仿。成型溫度之影響趨勢亦同，在初期爲spring back，以80°C之復元性較低；中期80°C爲spring in, 60°C 仍屬spring back；至後期，則60°C半爲spring in半爲spring back。而以 80°C之 spring in 較爲嚴重。厚度之效應，在初期爲厚度大者復元性較小，中期 3cm爲 spring in 而2cm仍爲spring back，後期則3cm者spring in較嚴重。由上觀之木荷初期復元性較小者，在室溫狀態之變化溫濕度下，隨著水分之散失使含水率降低曲率半徑減少終轉爲spring in且spring in 之程度較原先復元性較大者爲嚴重，由此得知，欲得一形體穩定性甚佳之曲木，仍需考慮成型乾燥之條件，維持產品之含水率與周遭環境之平衡含水量於接近之範圍。

相思樹曲木自始至終均呈 spring back，其走勢甚爲單純。因取材不易無法探討厚度及成型溫度對彼之影響，但在八週之內其曲率半徑對復元性之效應均顯著，且均以曲率半徑較小者復元性較低。至於木荷與相思之比較，在初期樹種不具效應，中後期則出現顯著之差異，此乃由於成型後 2 日之復元性仍屬瞬間回復 (instantaneous recovery) 與潛變回復 (creep recovery) 之共同影響，而五週後已趨潛變回復，樹種之效應因而彰顯。

復元性與含水率間經迴歸分析得知具有二次曲線相關，表16所示即其實驗式，圖 8 爲其一例。觀察各迴歸方程式之常數項，得知木荷之極大復元率 ( spring in ) 在一較小範圍內變化而相思樹變異極大。各處理羣共變異分析結果，除A-2-80—NB外均顯著而無法以一共同之方程式取代。至於復元性與時間之關係，迴歸分析結果有二次相關 (圖 9，表17) 。木荷與相思之模式不同，但由式中所示之訊息而知，不論樹種與厚度爲何，隨著曲率半徑增大瞬間回復亦趨大，二者呈正相關，與前述之結果相吻合。

表 16. 復元率與含水率之迴歸方程式

Table 16. Regression equations of percentage of recovery vs M. C.

| 處理代號(1) Treatment | 迴歸方程式 Regression equation | F | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| A-3-60-NB-10 | $Y=-21.8459+1.4353X-0.0222X^2$ | 494.90** | 0.9940 |
| -15 | $Y=-19.5988+1.2979X-0.0190X^2$ | 795.29** | 0.9962 |
| -20 | $Y=-21.6663+1.6372X-0.0270X^2$ | 270.27** | 0.9890 |
| -25 | $Y=-21.1046+1.5678X-0.0260X^2$ | 316.29** | 0.9906 |
| A-3-60-B -10 | $Y=-16.1095+1.1816X-0.0197X^2$ | 296.46** | 0.9900 |
| -15 | $Y=-23.2406+1.7412X-0.0299X^2$ | 414.58** | 0.9928 |
| -20 | $Y=-22.8990+1.8622X-0.0339X^2$ | 559.30** | 0.9947 |
| -25 | $Y=-19.5394+1.5754X-0.0277X^2$ | 443.58** | 0.9933 |
| A-2-60-NB-10 | $Y=-10.2088+0.9796X-0.0189X^2$ | 22.79** | 0.8837 |
| -15 | $Y=-8.4355+0.8374X-0.0151X^2$ | 27.78** | 0.9025 |
| A-2-80-NB-10 | $Y=-10.9891+0.9352X-0.0168X^2$ | 26.11** | 0.8969 |
| -15 | $Y=-12.5187+1.0476X-0.0190X^2$ | 57.39** | 0.9503 |
| B-3-60-NB-10 | $Y=-16.8468+1.9801X-0.0485X^2$ | 27.62** | 0.9020 |
| -15 | $Y=-14.6761+1.7187X-0.0397X^2$ | 39.74** | 0.9298 |
| -20 | $Y=-18.5607+2.1809X-0.0507X^2$ | 36.21** | 0.9235 |
| -25 | $Y=-28.1841+3.1130X-0.0751X^2$ | 18.20** | 0.8585 |

(1) 處理代號表示"樹種—厚度—成型溫度—是否截角—曲率半徑"Sign "A-30-60-NB-10" and so on represents "species-thickness-forming temp.-bevelled or not-radius of curvature."

表 17. 復元性與存貯時間之迴歸方程式

Table 17. Regression equations of percentage of recovery vs M. C.

| 處理代號(1) Treatment | 迴歸方程式 Regression equation | F | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| A-3-60-NB-10 | $Y=2.7121-0.2752X+0.0023X^2$ | 47.53** | 0.9406 |
| -15 | $Y=3.7081-0.2198X+0.0012X^2$ | 67.93** | 0.9577 |
| -20 | $Y=3.9865-0.1508X+0.0003X^2$ | 47.98** | 0.9411 |
| -25 | $Y=3.5778-0.2159X+0.0014X^2$ | 58.94** | 0.9516 |
| A-3-60-B -10 | $Y=2.3486-0.2281X+0.0024X^2$ | 57.96** | 0.9508 |
| -15 | $Y=3.0555-0.1651X+0.0008X^2$ | 40.00** | 0.9302 |
| -20 | $Y=3.3910-0.1337X+0.0005X^2$ | 38.29** | 0.9273 |
| -25 | $Y=3.8258-0.2021X+0.0016X^2$ | 46.18** | 0.9390 |
| A-2-60-NB-10 | $Y=2.1308-0.0755X+0.0005X^2$ | 7.90** | 0.7247 |
| -15 | $Y=2.9017-0.0927X+0.0008X^2$ | 8.26** | 0.7336 |
| A-2-80-NB-10 | $Y=1.2072-0.0810X+0.0005X^2$ | 6.72** | 0.6914 |
| -15 | $Y=1.6977-0.1232X+0.0010X^2$ | 12.19** | 0.8025 |
| B-3-60-NB-10 | $Y=1.9486+0.0838X-0.0017X^2$ | 7.45** | 0.7129 |
| -15 | $Y=2.0682+0.1183X-0.0020X^2$ | 11.16** | 0.7881 |
| -20 | $Y=2.6793+0.1391X-0.0023X^2$ | 10.97** | 0.7853 |

(1) 處理代號表示"樹種—厚度—成型溫度—是否截角—曲率半徑"

Sign "A-30-60-NB-10" and so on represents "species-thickness-forming temp.-bevelled or not-radius of curvature."

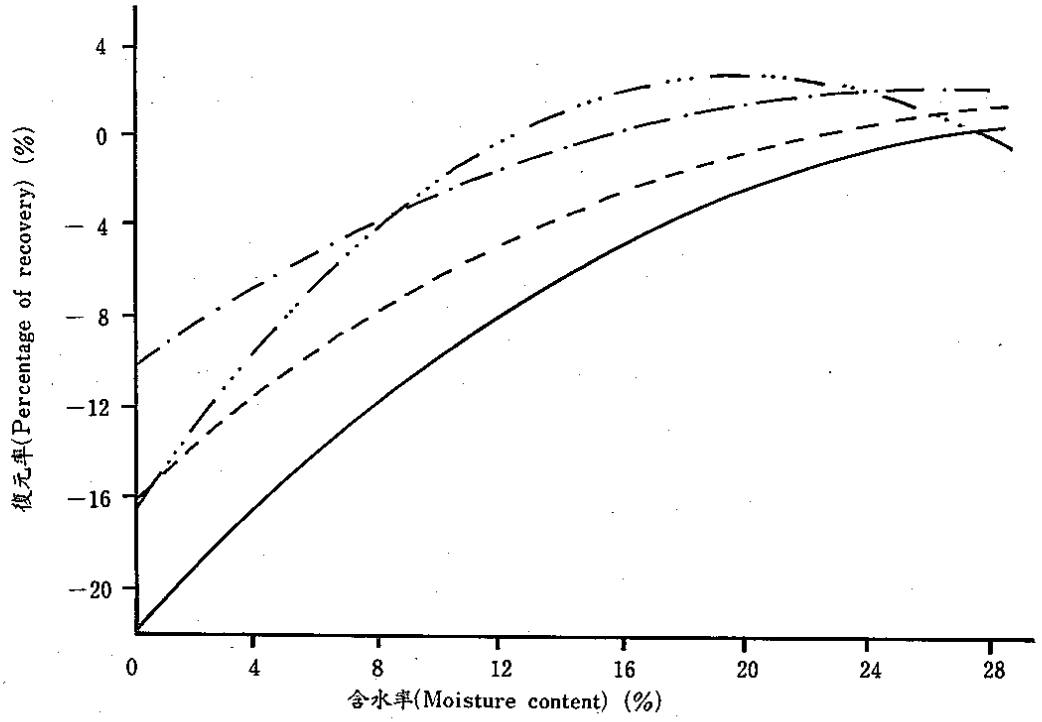



圖 8　復元性與含水率迴歸方程式之一例

Fig 8. Relationship between recovery & M. C.

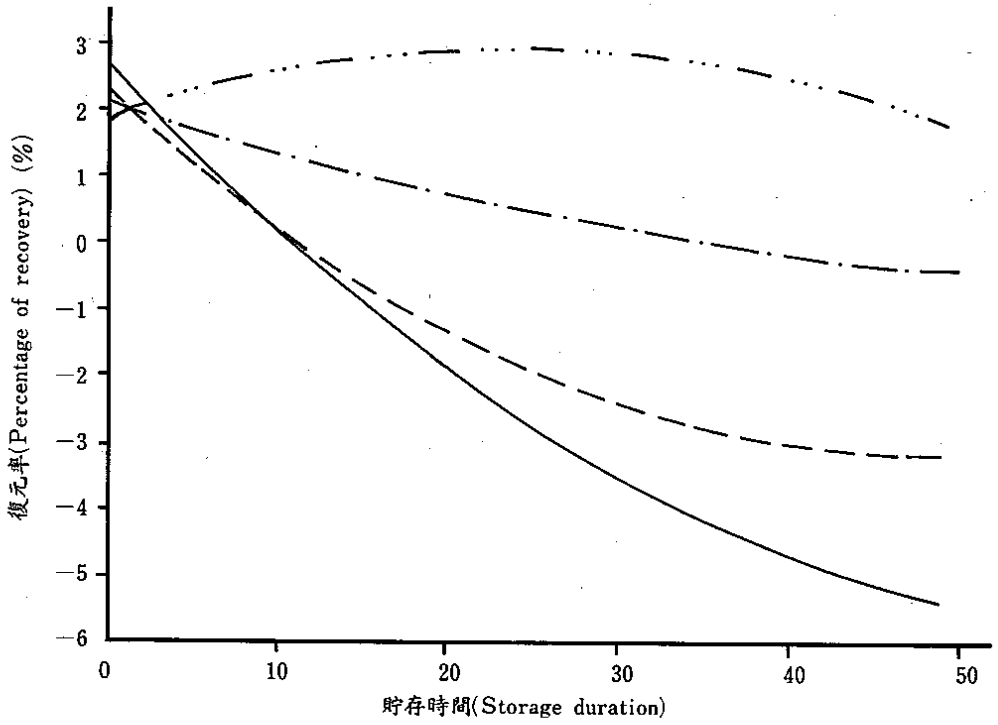



圖 9　復元性與存貯時間迴歸方程式之一例

Fig 9. Relationship between recovery & storage days.

## 四、結論及建議

1. 木荷於飽水狀態下蒸汽處理30分鐘所得之彎曲成功率，因厚度及曲率半徑之影響而變化，厚度愈大曲率半徑愈小，彎曲成功率愈低；而截角與否在本試驗所採之滾輪式彎曲成型機作業下，未能發揮顯著作用。
2. 在曲率半徑較大時相思樹與木荷之彎曲成功率相若，惟當曲率半徑降至 10cm 時，二樹種出現顯著之差異，而以木荷優於相思，顯示木荷之彎曲適性較習用之相思樹爲佳。比較彎曲缺點則前者多屬引張割裂而後者常見壓縮側皺曲。
3. 木荷彎曲適性甚佳，可考慮推廣採用，惟其乾燥成型後輒見蜂巢裂，宜再進一步探討最佳之成型條件。延長蒸汽處理時間應能改善相思樹之可塑性。
4. 飽水木荷及相思經蒸汽處理後，前者含水率增加而後者反降低，推測係因後者之抽出成份逸出之故，經由 60°C 成型20～22小時後，二樹種曲木含水率維持在25～30%間，經貯存八週後方達14～16%，如何控制成型後含水率亦爲實木彎曲加工之一重要課題。含水率與存貯時間之對數成線型相關（表11），木荷 3 cm 及 2 cm 各曲率半徑之迴歸式歸納成二式（式 1，式 2）。
5. 曲率半徑對瞬間復元性有決定性之影響，曲率半徑大者復元性較大，八週後其作用逐漸消失。就木荷而言，厚度大者初期復元性（spring back ）較小，但至八週後幾乎所有試體均轉爲spring in，則厚度大者spring in反較嚴重。成型溫度 80°C 者，其初期復元性較低，至後期反spring in 較嚴重，故以較高之成型溫度乾燥至環境 EMC 相仿之含水率，理論上可降低曲木之復元性。相思樹之復元性初期與木荷相仿，後期則二樹種出現極大差異，相思樹

在全部存貯期間內均爲sprin back。

6.復元性與含水率及時間均呈二次曲線相關，詳如表16、17。

## 引用文獻

王松永. 1981. 木材微波加熱之彎曲成型加工　木工家具12月號：8-14.

王松永、張銻. 1978. 異樹種集成樑彎曲性質之研究（第三報）—中性軸在彎曲時之動態　中華林學季刊11(3)：43-49

中華林學會. 1967. 台灣主要木材圖誌. 中華林學會.

今村祐嗣. 1982. マイクロ波加熱を利用した曲木の組織構造. 木材學會誌28(12)：743-749.

今村祐嗣. 1983. マイクロ波加熱による曲木の細胞壁の變形. 木材研究資料第17號：268—277.

北原覺一. 1967. 木材物理. 森北出版 P.96-113.

青木務、則元京. 1983. マイクロ波加熱による木材の曲げ加工纖維方向曲げ加工材の水分回復. 木材研究資料第19號，88-98

黃清吟. 1986. 木材彎曲加工之研究　台灣大學碩士論文.

梶田茂. 1961. 木材工學. 養賢堂出版 P.441-455

Kock. P. 1972. Bending utilization of southern Pine. Vol.2: pp.1038-1058.

Peck. E.C. 1968. Banding solid wood to form USDA, Agriculture Handbook, No.125.