

木理傾斜角與含水率對樂器用材 音響性質之影響

黃彥三^{1,2)} 陳欣欣¹⁾

摘 要

木材與其他材料相較具有優良的音響特性，自古以來即被用來製作種種樂器；小提琴或鋼琴等弦樂器，係將弦的微弱振動藉由所謂的響板共鳴現象，來達到增幅的擴大效果。由往昔的經驗得知，響板多選用良質雲杉來製作，過去雖有不少有關雲杉音響性質的研究，但大多就木理方向的性質作探討，木理傾斜方向的音響特性則鮮被觸及。本試驗以樂器工廠製作響板用進口北美雲杉為試材，以振動簧片法，測定動粘彈性，探討木理走向及含水率對雲杉各種音響評價指標之影響，其主要結果如次：

1. 動彈性係數(E')，損失正切($\tan \delta$)及音響性質評價指標 E'/γ ， $\sqrt{E'/\rho^3}$ ， $\sqrt{E'/\rho^3}/\tan \delta$ ， $\sqrt{E'/\rho}$ 及 $\tan \delta/E'$ 等之值均隨木理傾斜角 ϕ 之增大而明顯變劣。
2. 音響特性有隨含水率之增加而變劣之趨勢。

關鍵詞：動彈性係數、損失彈性係數、損失正切、音響性質、振動簧片法。

黃彥三、陳欣欣 1997 木理傾斜角與含水率對樂器用材音響性質之影響。台灣林業科學 12(3) : 355-361。

Effect of Grain Angle and Moisture Content on Acoustic Properties of Wood for Musical Instruments

Yan-san Huang^{1,2)} and Shin-shin Chen¹⁾

【 Summary 】

The vibrating reed method was used to measure dynamic viscoelastic properties of sitka spruce. Effects of grain angle and moisture content on the acoustic properties of this wood were examined. The test pieces were 120 mm in length, 10 mm in width and 5 mm in thickness. The grain angles ranged from 0° to 90° in intervals of 15°. Moisture contents were controlled at 6%, 12% and 20%. The following results were obtained.

1. Values of dynamic Young's modulus (E'), loss tangent ($\tan \delta$) and acoustic properties such as specific elasticity (E'/γ), $\sqrt{E'/\rho^3}$, $\sqrt{E'/\rho^3}/\tan \delta$, $\sqrt{E'/\rho}$, and $\tan \delta/E'$ became significantly inferior as grain angle increased.
2. Acoustic properties became inferior as moisture content of wood increased.

Key words: dynamic Young's modulus, dynamic loss modulus, loss tangent, acoustic properties, vibrating reed method.

Huang, Y. S., and S. S. Chen. 1997. Effect of grain angle and moisture content on acoustic properties of wood for musical instruments. Taiwan J. For. Sci. 12(3) : 355-361.

1) 台灣省林業試驗所森林利用系，台北市南海路 53 號 Division of Forest Utilization, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nan-Hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

2) 通訊作者 Corresponding author

1997 年 4 月送審 1997 年 5 月通過 Received April 1997, Accepted May 1997.

一、緒言

有關樂器之物理特性與所發生音之物理量間之關係，在古希臘時代即被探究，可說是音響學的源起(牧田，1986)。樂器之誕生與土地、文化背景或自然環境有深厚關係。木材自古以來便被用來製作種種樂器而與人類的文明生活息息相關。具有不同性質的各種木材被應用來製作種種不同的樂器，例如古箏以泡桐為表板，琵琶的表板使用泡桐，背板則使用紫檀，鋼琴的響板使用雲杉，小提琴的表板使用雲杉，背板使用槭木，木管多用黑檀，而笛簫多以竹頭製作。以木琴為首的打擊樂器，是以木材本身作為發音體。管樂器係以管內氣柱之縱振動作為音源，音由指孔或管端放射至外界。提琴或鋼琴等弦樂器則是將弦的微弱振動藉由所謂的響板之共鳴現象，來達到增幅的擴大效果。此時響板具有增幅器的功能，而其構成木材對其音色或音質具極重要的影響作用。

擦弦樂器之小提琴與彈弦樂器之鋼琴在諸多樂器中屬設計精巧、構造複雜，製造時須依賴高度技藝者。而優良木材的選用尤為樂器品質的先決條件，亦即木材的物理性質對樂器之音質具有決定性的影響作用。往昔的研究顯示，優良的響板木材，須有較大的纖維方向的比動彈性係數或音速，以及較小的對數衰減率(Kollmann, 1968；淺野，1982)，此一關係事實上已廣泛應用於弦樂器用材的選別上。

由於弦樂器之響板係以平板之方式產生共鳴，故有利用板振動試驗方法在特定支持條件測定不同振態(vibration mode)下之纖維方向與垂直纖維方向之動彈性係數及內部摩擦(中尾等，1985；外崎等，1985a)，顯示板整體之振動特性受纖維方向及纖維直角方向特性之影響。另一方面，小提琴之表板與背板，因具有複雜的造形，其振動特性可利用克雷得尼法(Chladni's method)，在板上撒以輕石或鋁粉等，用以檢出共振時之節線(外崎等，1985b；黃彥三，1988)。研究結果顯示，響板之共振與完成後之樂器之共鳴具重要關係者為由低頻率數起第2與第5個共振頻率(山田，1987)。木材的材質會影響到整個樂器的音色，研究結果顯示木材在低頻音有較佳反應，而金屬材料則在高頻音有較大反應(矢野等，1985)。木材之基本材質中，含水率、比重與纖維走向對音響性質(佐佐木等，1988；外崎等，1983)具有影響，惟纖維走向

對振動特性之研究頗為少見。故本計畫主要以響板用材雲杉為試材，就含水率，纖維傾斜角對音響性質之影響進行試驗，俾對樂器用材之動態特性有所瞭解。一般言之，音響性質之試驗多採用非破壞的振動試驗，而振動試驗有縱振動、橫振動之分，其驅動方式則有強制振動與自由振動之別，本試驗係採用強制振動簧片法(vibrating reed method)進行測試。

二、材料及方法

(一)試驗材料

以進口北美雲杉(*Picea sitchensis* Carr.)之氣乾材為試材，其平均氣乾比重為0.42，平均年輪寬為1.4 mm。試片尺寸為5 mm(厚)×10 mm(寬)×120 mm(長)，其製作方法如Fig. 1所示，在厚度5 mm的徑面板上鋸出長度方向與纖維方向(LR面上)成 0° ， 15° ， 30° ， 45° ， 60° ， 75° 與 90° 之試片，每一條件重複五次。試片先置於R.H.85%(KCl飽和溶液)之容器中調濕至含水率約20%，然後在氣溫約 20°C 之下進行振動試驗，接著將試片移至R.H.65%(NaNO₂飽和溶液)之容器中調濕至含水率約12%，進行試驗後，再將試片移至R.H.10%(ZnCl₂飽和溶液)中調濕至含水率約6%，然後再進行測試。

(二)試驗方法

試驗係採用振動簧片法，如Fig. 2所示，先將試片一端固定於鐵製夾具上，可振動部分之試片長度設定為10 cm，固定時係利用扭力扳手，將螺栓固定扭力設定於4 kgf-cm，使各試片均獲得同一固定力。由振盪器(oscillator)所產生的正弦波掃描信號，經直流及交流電力增幅器放大送入電磁驅動器(magnetic driver)，對試片的固定端產生周期性的吸引力，試片因而產生橫振動，由於加振力隨頻率的變化，多少會

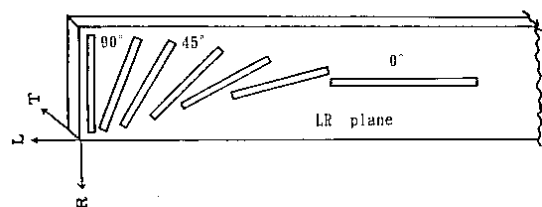


Fig. 1. Position and direction of specimens in a quarter-sawn board. L: Longitudinal, R: Radial, T: Tangential.

有變動，此一變動可能影響共振頻率及內部摩擦之計測精度，因此在試片固定端及末端側面分別裝置非接觸性變位計A與B，用以感測振幅的變化並轉換成電壓信號，此時係將A、B兩變位計測值之比值(A/B)信號輸入頻率響應分析儀(frequency response analyzer)，測出共振衰減曲線(Fig. 3)，並以列印機印出。共振曲線上振幅最大時之頻率為共振頻率(fr)，可用來計算動彈性係數，而共振點前後，振幅衰減為共振振幅之 $1/\sqrt{2}$ 時即-3 db)之頻率差 Δf 則用於計算內部摩擦(internal friction)(黃彥三，1986)。

(三)計算方法(小野木，1968；淺野，1982)

具粘彈性之木材在振動時，應力(stress)與應變(strain)間有相位角 δ 存在(應力在先，應變在後)，此時之彈性係數可以複數式來表示，即

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

$$Q^{-1} = \tan \delta = \frac{E''}{E'} \approx \frac{\Delta f}{f_r} \quad (2)$$

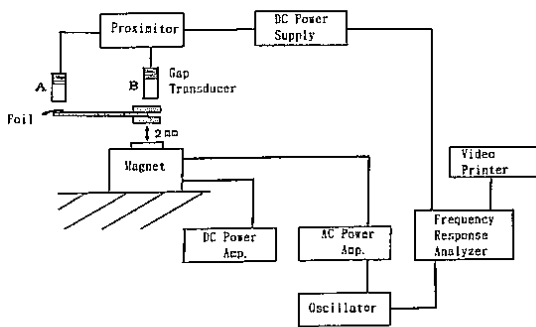


Fig. 2. Diagram of apparatus for the vibrating reed method.

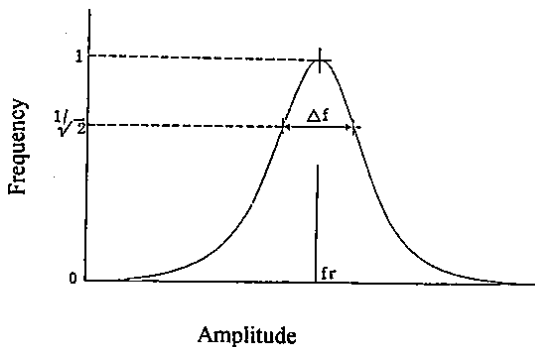


Fig. 3. Resonant-damping curve.

式中 E^* 為動複數彈性係數(dynamic complex modulus)， E' 為動彈性係數， E'' 為損失彈性係數(dynamic loss modulus)， $\tan \delta$ 為損失正切(loss tangent)或以 Q^{-1} 表示內部摩擦(internal friction)。

振動簧片法係利用弦樑之振動原理，其動彈性係數(E')與損失彈性係數可以下列數式計算求得。

$$E' = \frac{48\pi^2 l^4 \rho}{a_0^4 h^2} (f_r^2 + (\Delta f)^2/8) \quad (3)$$

$$E'' = \frac{48\pi^2 l^4 \rho}{a_0^4 h^2} (f_r \cdot \Delta f) \quad (4)$$

其中 l 為試片長度， ρ 為試材密度， h 為試材厚度， $a_0 = 1.875$ ，強制振動之損失正切與自由振動時之對數衰減率(λ)間具有下式之關係可互為換算。

$$\lambda \approx \pi \tan \delta \quad (5)$$

三、結果與討論

(一)木理傾斜角與含水率對雲杉動彈性係數之影響

雲杉之動彈性係數(E')隨木理傾斜角(φ)之增加在 $\varphi=0^\circ \sim 30^\circ$ 間呈直線急速減小， $\varphi=30^\circ \sim 90^\circ$ 間呈漸減而達漸近狀態(Fig. 4)，此一結果與外崎等(1983)之試驗結果相類似。就含水率對 E' 之效應而言，不論何種木理傾斜角， E' 之值均有6% > 12% > 20%之顯著關係存在，例如順木理方向($\varphi=0^\circ$)之 E' 值在M.C.6%時為 10.7×10^{10} dyne/cm²，12%時為 9.95×10^{10} dyne/cm²，20%時 9.51×10^{10} dyne/cm²，但在垂直木理方向($\varphi=90^\circ$)時， E' 之值則分別為(0.122，0.119及0.106) $\times 10^{10}$ dyne/cm²，此時為徑向動彈性係數(E'_R)，木材強度性質在纖維飽和點以下隨含水率之減少而增加，不過文獻記載顯示彈性係數受含水率之影響較不敏感，纖維飽和點以下，平均含水率每降低1%則彈性係數約增加1% (Kollmann,1968)，本試驗亦有近似之結果。

(二)木理傾斜角與含水率對雲杉損失彈性係數及損失正切之影響

木材為具有粘彈性特徵之材料，在振動狀態下，其應力與應變間存有相位角(δ)，應變之相位較應力為落後。此時動能之一部分被轉為熱能而消耗掉，成為不可逆的損失。以一定正弦波應力施於粘彈性物體時，若就 Voigt模型加以考慮，則一循環(cycle)

之能量損失係與 E'' 或 $\tan \delta$ 成比例(小野木, 1968)。雲杉之 E' 值如 Fig. 5 所示, 其圖形與 Fig. 4 之 E' 相似, 惟 $\varphi = 0^\circ \sim 15^\circ$ 間 E'' 值之下降較為緩和, 此一趨勢與外崎等(1983)之試驗結果頗相似。另一方面, 就含水率對 E'' 之影響而言, 則 E'' 值有 $M.C.20\% > 12\% > 6\%$ 之關係, 亦即一振動循環之能量損失隨含水率之增加而增加, 此為木材之粘性隨含水率之增加而增大之明証。 $\tan \delta$ 與 φ 之關係如 Fig. 6 所示, $\tan \delta$ 有隨 φ 角之增加而增大之傾向, 顯示木材的振動—音響變換效率隨 φ 角之增大而減弱。外崎等(1983)就雲杉所作縱振動與橫振動試驗, Ishihara 等(1978)以振動簧片法進行測試, 亦均獲相似之結果。同圖顯示 $\tan \delta$ 隨含水率之增加而增大, 亦即表示損失能量所佔比例隨含水率之增加而增加。文獻記載顯示 M.C.7% 時之內部摩擦最小(Kollmann, 1968)。 $\varphi = 90^\circ$ 與 $\varphi = 0^\circ$ 時之 $\tan \delta$ 之比值, M.C. 6% 時為 2.08, 12% 時為 2.61, 20% 時為 4.03, 比值有隨含水率之增加而增加之趨勢。

(三)木理傾斜角與含水率對雲杉比動彈性係數之影響

木材因比重輕, 與其他材料相較有較大的比強度, 可說是良好的結構用材(Panshin *et al.*, 1951)。木材作為弦樂器的響板時, 須有較高的比動彈性係數 E'/γ

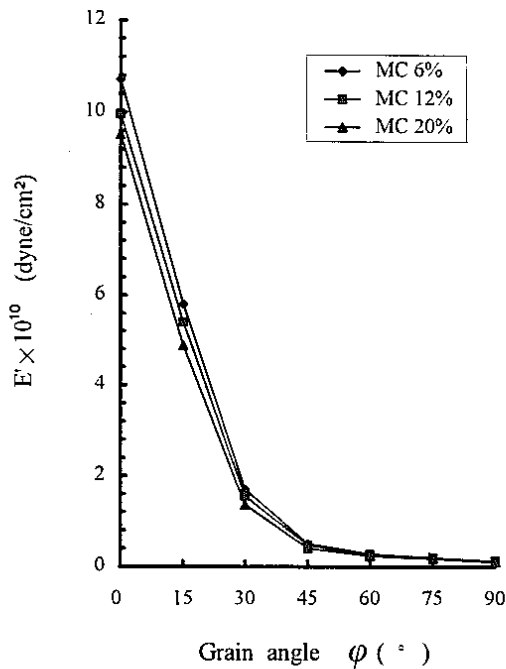


Fig. 4. Relationship between grain angle φ in an LR-plane and dynamic Young's modulus, E' .
Note: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.8065 \times 10^5 \text{ dyne/cm}^2$.

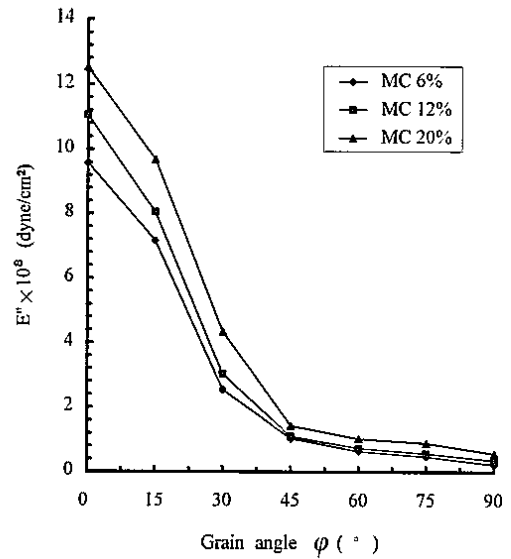


Fig. 5. Relationship between φ and loss modulus, E'' .

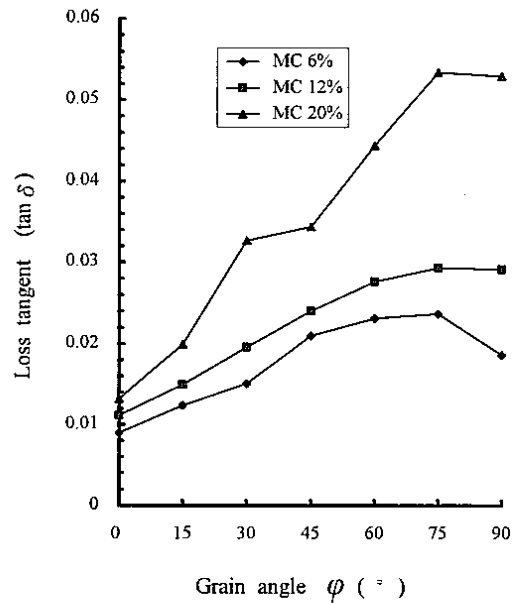


Fig. 6. Relationship between φ and loss tangent, $\tan \delta$.

γ , 及較小的 $\tan \delta$, 而 γ 為比重(山田, 1987)。因木材中之音速為 $\sqrt{E'/\rho}$, 而 ρ 為密度, ρ 與 γ 具相同數值, 故從物理學觀點, 響板用材須具有較大的音速。在實用上常以 E'/γ 的大小作為響板用材選料上的依據。Fig. 7 顯示木理傾斜角對比動彈性係數之影響, 此圖與 Fig. 4 有相同的趨勢, 亦即雲杉之比動彈性係

數與音速均隨 ϕ 角之增大而減小。雲杉之 E/γ 值之優越性在與其他比重不同材料作比較時便能顯現出來 (山田, 1987)。

(四)木理傾斜角與含水率對雲杉音響特性評價指標之影響

樂器用材音響特性之材質指標除上述之 E/γ , $\tan \delta$, 及 E 之外, 尚有 $\sqrt{E/\rho^3}$, $\sqrt{E/\rho^3 / \tan \delta}$, $\sqrt{E/\rho}$,

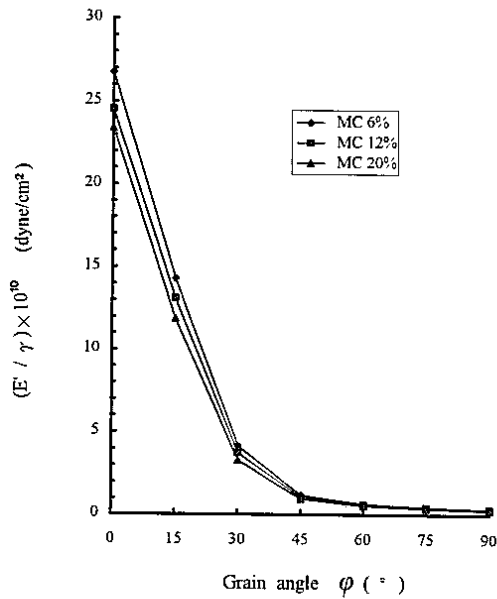


Fig. 7. Relationship between ϕ and specific dynamic Young's modulus, E/γ .

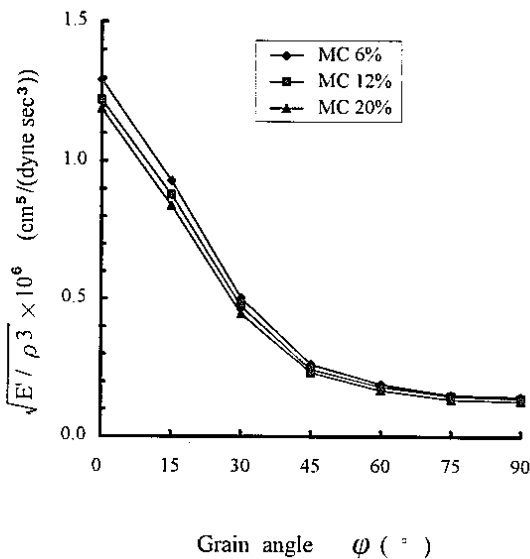


Fig. 8. Relationship between ϕ and the value of $\sqrt{E/\rho^3}$.

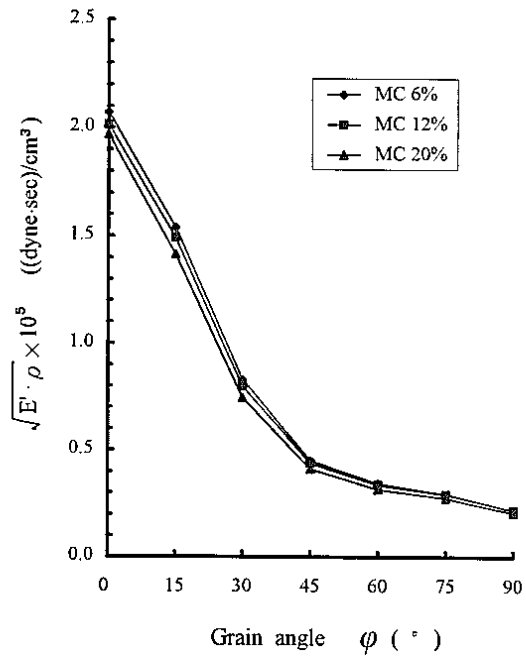


Fig. 9. Relationship between ϕ and the value of $\sqrt{E \cdot \rho}$.

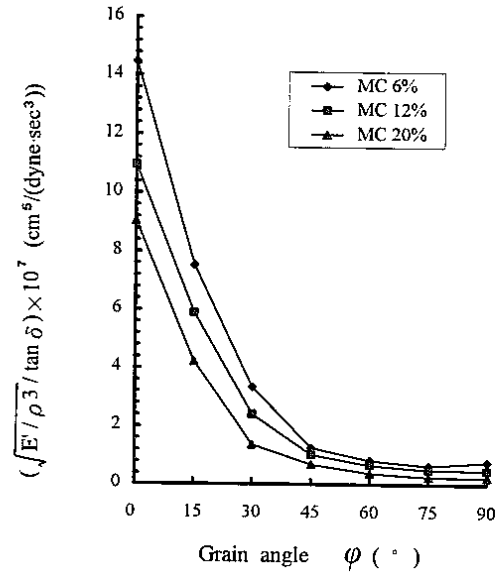


Fig. 10. Relationship between ϕ and the value of $\sqrt{E/\rho^3 / \tan \delta}$.

$\tan \delta/E$ 等被倡導(岡野, 1991) $\sqrt{E/\rho^3}$ 被用以表示材料之音響輻射衰減率($\zeta s = 5 \times 10^{-8} \sqrt{E/\rho^3}$), 而另一方面, $\sqrt{E/\rho^3}$ 則有比音速($\sqrt{E/\rho}$)之意味。如Fig. 8 所示, $\sqrt{E/\rho^3}$ 有隨 ϕ 角之增加而減小之趨勢, 同時

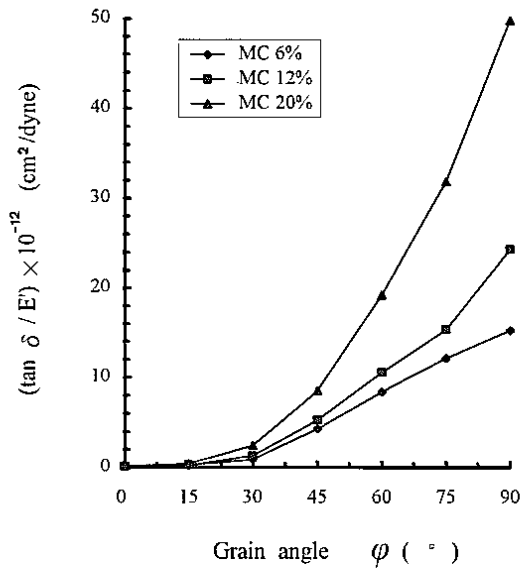


Fig. 11. Relationship between ϕ and the value of $\tan \delta / E'$.

亦隨含水率之增加而減小。自由振動之衰減部分係起因於內部摩擦所造成之衰減，另一部分則起因於音響輻射(sound radiation)。音響輻射所造成之衰減主要係決定於木材之音速與其密度之比例，亦即 $\sqrt{E/\rho^3}$ 。木材與金屬比較顯然有極高之 $\sqrt{E/\rho^3}$ 值。弦樂器之響板希望具有較低的內部摩擦與較高的音響輻射(Kollmann, 1968)。另一方面，音波抵抗(sound wave resistance)對兩種介質之介面之音波傳播與反射具有決定性的影響作用，其係以 $\sqrt{E'\rho}$ 來表示，木材之音波抵抗遠較其他金屬材料為小。Fig. 9顯示音波抵抗隨 ϕ 角之增大而減小，隨含水率之減少而增大之趨勢。還有，樂器研究者將 $\sqrt{E/\rho^3}$ 與 $\tan \delta$ 加以組合，提出以 $k = \sqrt{E/\rho^3} / \tan \delta$ 作為樂器材質之綜合評價指標，k值愈大則音響性質愈佳(淺野，1982)。如Fig. 10所示k值有隨 ϕ 角之增大而減小，並隨含水率之減少而增大之趨勢。另一方面， $\tan \delta / E'$ 係與一定振動應力之一循環中以熱的形式而消耗的能量成比例，此值愈小則振動—音響變換效率愈高，上級材之 $\tan \delta / E'$ 值甚小，則元之研究顯示 $\tan \delta / E'$ 與 E/γ 間具有極高的負相關性(1982)。本試驗之結果如Fig. 11所示， $\tan \delta / E'$ 值有隨 ϕ 角之增大而增大，同時隨含水率之增加而增大之傾向。

以上已討論木理傾斜角與含水率對雲杉各種音響特性之影響，其結果顯示不論何種指標，順木理方向之音響特性均較斜走木理或橫木理為佳。音響特性有

隨木理傾斜角之增大而明顯劣化之趨勢。矢野等(1989)之研究顯示雲杉之徑向音響特性較其他針葉樹材為劣，因此木理方向之音響特性可視為決定響板材質之最重要指標。指標 $\sqrt{E/\rho^3} / \tan \delta$ 係就 E' 、 ρ 與 $\tan \delta$ 三要因作綜合考量，尤其在與其他材料互作比較時，可視為較佳的評價指標。不過在實用上，比彈性係數 E/γ 則為最簡便、易測定的選料依據。另一方面，木材之音響特性有隨含水率之增加而變劣之趨勢，故適度控制含水率在樂器製造之品質管理上亦屬必要。

四、結論

本試驗以進口北美樂器用材雲杉為試材，進行簧片法強制振動試驗，探討木理傾斜角與含水率對動彈性係數，損失正切及其他音響特性評價指標之影響，所獲結論如次：

- (一)木材之動彈性係數(E')，損失正切($\tan \delta$)及其他音響特性評價指標如 E/γ 、 $\sqrt{E/\rho^3}$ 、 $\sqrt{E/\rho^3} / \tan \delta$ 、 $\sqrt{E'\rho}$ 、 $\tan \delta / E'$ 等均隨木理傾斜角 ϕ 之增大而明顯變劣，亦即振動—音響變換效率隨 ϕ 角之增大而變劣。
- (二) $\sqrt{E/\rho^3} / \tan \delta$ 為較佳的綜合音響評價指標，而 E/γ 為實用上簡便的選料依據。
- (三)音響特性有隨木材含水率之增加而變劣之趨勢。

引用文獻

- 黃彥三 1986 木材振動特性與動粘彈性之測定。林試所研究報告第468號。1-13頁。
- 黃彥三 1988 滾軋緊張處理對圓鋸片振動特性之效應。林產工業 7(2): 35-46。
- 小野木重治 1968 レオロジー要論。楳書店。81-198頁。
- 淺野豬久夫編 1982 木材の事典。朝倉書店。141-175頁。
- 則元京 1982 樂器用材の物性(第1報)。木材學會誌 28(7): 407-413。
- 外崎真理雄、岡野健、淺野豬久夫 1983 縱振動およびたわみ振動によるシトカスプールの振動特性。木材學會誌 29(9): 547-552。
- 中尾哲也、岡野健、淺野豬久夫 1985 木材板の振動的性質。木材學會誌 31(10): 793-800。
- 外崎真理雄、岡野健 1985a 板振動試験による木材の音響的性質の評価。木材學會誌 31(8): 627-632。

- 外崎真理雄、岡野健、淺野豬久夫 1985b 樂器用木材の試験法としての板振動の測定。木材學會誌 31(3): 152-156。
- 矢野浩之、山田正 1985 木の音色に関する研究 (第1報)。木材學會誌 31(9): 719-724。
- 牧田康雄編著 1986 現代音響學。オーム社。71頁。
- 山田正 1987 木質環境の科學。海青社。122-139頁。
- 佐佐木隆行、則元京、山田正、Roger M. Rowell 1988 木材の音響的性質におよぼす水分の影響。木材學會誌 34(10): 794-803。
- 矢野浩之、椋代純輔 1989 ピアノ響板用シトカスブルース材放射方向の音響特性 35(10): 882-885。
- 岡野健 1991 木材の音響性質。木材學會誌 37(11): 991-998。
- Ishihara, K., N. Sobue, and T. Takemura. 1978. Effect of grain angle on complex Young's modulus E of spruce and Hoo. Mokuzai Gakkaishi 24(6): 375-379。
- Kollmann, F., and W. A. Jr. Côté. 1968. Principles of wood science and technology. pp. 276-281.
- Panshin, A. J., Carl De Zeeuw, and H. P. Brown. 1951. Textbook of wood technology. Vol.1. 361 pp.