

農產品的光學和音波特性的

第二部份 音波的特性

日本九州大學農學部教授

中馬 豐 著

Yutaka Chuma

臺大農機系助教

蔡 慶 隆 譯

C. L. Tsai

一、使用音波手法之研究經過

Clark 與 Mikelson (1942) 從事過下述的研究。將供試果實置於兩電磁振動元件中間，並直接相接觸。從一方的元件所發出的振動音波透過果實由他方的元件來檢測。果實振動特性的變化隨着果實成熟過程中內部構造之變化而異。一般的情形，綠色果比成熟果更能傳達振動。且果實之固有振動數亦隨着成熟過程而變化。鳳梨的固有振動數綠色果為 200Hz，成熟果為 100Hz。音波共振法可以在非破壞的狀態下測定農產品的性質及特徵，最近引發研究者很大的興趣。

Abbott 等 (1968) 將蘋果垂吊着，並利用金屬桿激振器激發果實之振動，如圖 1。激振器振幅與周波數變換範圍在 20~400 Hz 之間。果實內的振動以壓電型拾音器來檢測、增幅，並以 X-Y 記錄器記錄其與周波數之關係。

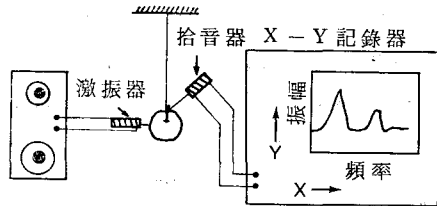


圖 1. 蘋果之共振測定
(J. A. Abbott 等, 1968)

Finney (1968) 以電磁型發振裝置和小加速計 ($\frac{1}{2} g$) 來測定蘋果的共振。加速計以兩面粘布貼於果實表面，如圖 2。Finney 與 Norris (1968) 為激起音波共振使用喇叭型揚聲器，如圖 3，依起振 (Excite) 方法之不同周波波形也各異。但是，蘋果的情形，某個共振周波數與激起共振的方法無關 (Abbott, Finney 與 Norris 等 1968)。Abbott 等將此周波數記為 $f_{n=2}$ 。此被引述為與

蘋果內部之撓曲振動相關連，為蘋果之大小、堅硬度所影響。果實愈大質地愈軟的蘋果共振周波數就愈低，如圖 4。

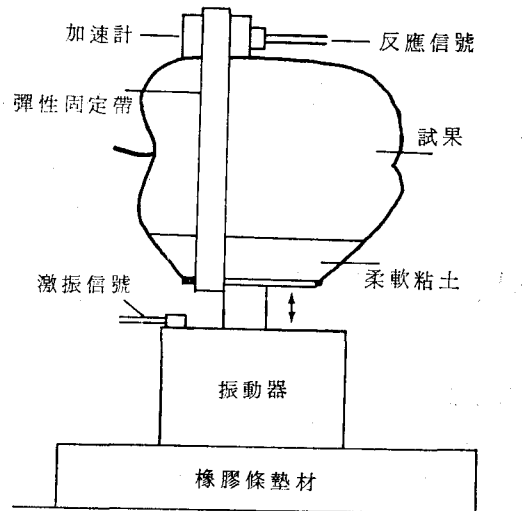


圖 2. 電磁振動器及測定蘋果共振之實驗裝置

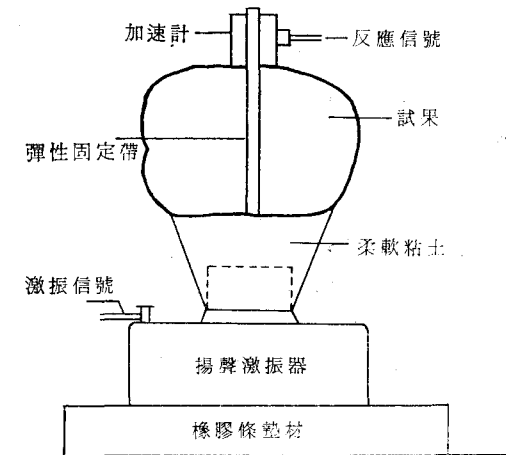


圖 3. 揚聲激振器及測定蘋果共振之實驗裝置

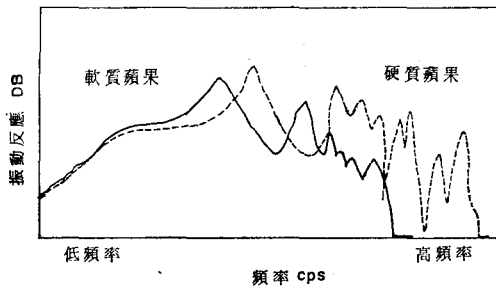


圖 4. 相同大小之軟質與硬質蘋果之頻率反應

Nybom (1962) 以不同之方法來評價木草莓、草莓、櫻桃等柔軟小果實之堅硬度。將果實置於兩電動型收聽器中間，並激起 50 Hz 固定周波數之振動。振動通過果實，往他方收聽器線圈傳達，於此測定其誘導電流，以當做判別堅硬度之指標。堅硬度與色素含量有很高的相關，但與可溶固體成份間之相關其顯著性則很低。

Virgin (1955) 利用共振原理，為測定植物組織膨脹之手法。Drake (1962) 將此方法加以修正，利用光學的手法來測定果肉試片之振幅。將振幅之連續實驗曲線當做振動周波數之函數，成功地自動記錄上。另外，對數種食品蘋果、梨子、馬鈴薯、乳酪等亦得有共其共振特性之資料。

其他研究者將 Virgin 的手法加以修正，並研究果實生育及成熟過程中，其彈性與非彈性性質之變化 (Finney 1967, Abbott 等 1968)。例如，檢討馬鈴薯之栽培過程對膨脹與損傷抵抗之影響 (Finney 與 Findlen 1967)。以及研究果實成熟度與貯藏之物理性變化。

田尻、法貴、堀部等 (1976) 研究西瓜之成熟度在搬運及貯藏之力學特性。主要論述給予打擊音後西瓜之固有振動數、糖度、果皮的楊氏係數、最大拉力強度及表面應力等，其實驗裝置如圖 17。

中馬、志賀、疋田等 (1977) 以非破壞之手法來判別果實的品質，探討西瓜之共振周波數與內部品質之關係。此種非破壞之判別法，將可以協助決定適期收穫及選果場之果實等級選別自動化。

志賀、疋田、中馬等 (1978) 導入將果實視為粘彈性體之觀念，取代以往將果實視為彈性體之觀念，並計算出動粘彈性係數。此乃由共振周波數及半值幅寬所導出之近似式。另外，檢討果實成熟過程中粘彈性係數之變化與判別品質之重要指標糖含量間之相關，故以粘彈特性作為品質判別基準之途徑已很顯著。

二、音波共振測定之一般手法

供試物體加以周期性之外力，則此供試物體即產生與外力相同周波數之振動。其振幅依周波數而異，於物體之固有振動數上加之予共振周波數時，其振幅最大。此共振周波數依物體之內部特性、大小及形狀而有各種變化。

即定形狀、大小之均質物體，共振舉動之解析較為簡單，而果實、蔬菜因複雜之內部構造與外形，解析較為困難。但此些資料仍可以做為幫助瞭解農產品之物理與品質特性之參考。

Abbott、Finney 與 Norris 等 (1968) 就果肉組織之圓筒試片論述共振舉動之測定方法。

物體音波共振特性之測定配置如圖 5 所示。測定儀器有聲頻信號發振器、功率增幅器、激振器、振動檢測器、伏特計及記錄器等。示波器用以測知檢測信號及監視發振信號之波形，並決定發振信號與檢測信號間之相位 (Phase) 關係。

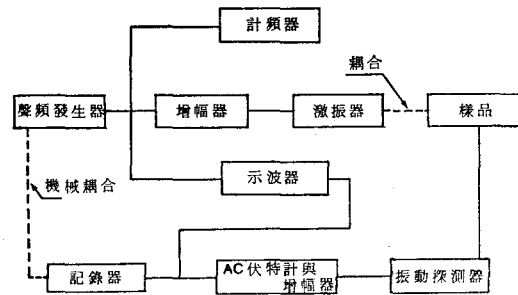


圖 5. 測定物質共振頻率之配置圖

三、物理性測定之圓筒切片共振法

圖 6、7 是以果肉的新圓筒切片法測定其物理性。將二支短鋼梢 (Steel pin) 插入切片中，一支靠近激振線圈但不接觸，另一支則與拾波線圈相近亦同樣不接觸。在激振線圈之已知周波數振動之電流，引發鋼梢振動，蘋果果肉圓筒因而隨之振動。此周波數與圓筒的固有振動數相等時，圓筒的移動量為最大，可使拾波線圈產生最大電流。將共振振幅記錄於 X-Y 記錄器。

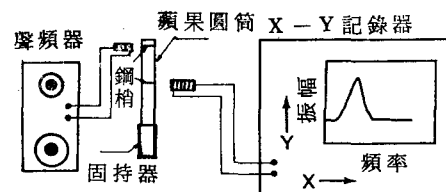
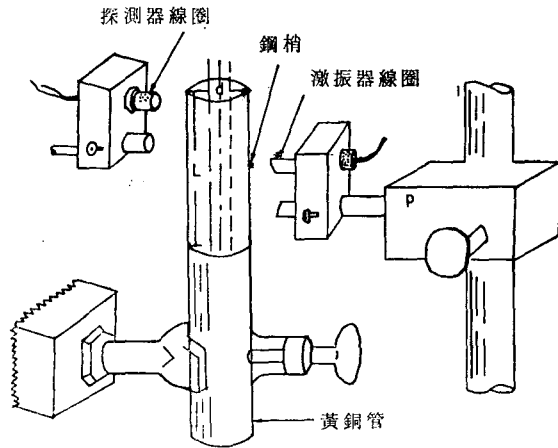


圖 6. 蘋果圓筒切片之測定



$$f_n = \frac{(kn)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^3}}$$

f : 撓曲振動 cps
 kn : 1.875 4.694 7.853
 E : 楊氏係數 dynes/cm²
 m : 蘋果質量 gr
 $m = \pi d^2 L / 4$
 ρ : 蘋果密度 gr/cm³
 d : 蘋果圓筒直徑 cm
 L : 蘋果圓筒長度 cm
 I : 慣性力矩, 面積
 $I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4}$
 $E = 50.9 f_1^2 \frac{L^4}{d^2} \rho, 130 f_2^2 \frac{L^4}{d^2} \rho,$
 $0.167 f_3^2 \frac{L^4}{d^2} \rho$

圖7. 青果物圓筒切片之彈性性質公式 (撓曲振動之楊氏係數)

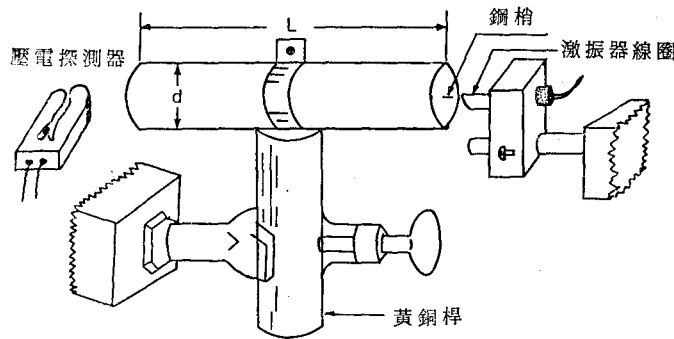
(J. A. Abbott 等, 1968)

圓筒切片法之彈性係數是以縱振動, 撓曲振動及扭轉振動之共振周波數為基礎, 依理論式可以正確地計算出。

縱振動:

以無限圓柱之縱振動方程式計算楊氏係數 E 如圖 8。

$$E = \frac{\rho}{Kn} \left(\frac{2L \cdot f_n}{n} \right)^2$$



$$E = \frac{\rho}{kn} \left(\frac{2L f_n}{n} \right)^2$$

E : 楊氏係數 dynes/cm²
 ρ : 蘋果密度 gr/cm³
 d : 蘋果圓筒直徑 cm
 L : 蘋果圓筒長度 cm
 k : 端點縱振動校正係數
 n : 基礎頻率 1
 d/λ : 直徑波長比
 f_n : 縱振動頻率 cps
 $n = 1, 2, \dots$ 等 $\lambda = \frac{2L}{n}$
 如果 $d/\lambda \ll 1$ 則 $kn = 1 - \frac{\pi^2 n^2 \nu^2 d^2}{8L^2}$
 ν : 蒲松氏比

圖 8. 青果物圓筒切片之彈性性質公式 (縱振動之楊氏係數)

(J. A. Abbott 等, 1968)

撓曲振動:

係數, 如圖 7。

Abbott 等 (1968) 以下式計算蘋果果肉圓筒之楊氏係數 E , 並乘上 Spinner (1961) 之修正

$$E = 50.9 f_1^2 \frac{L^4}{d^2} \rho$$

f_1 : 一次撓曲共振周波數 Hz

L : 圓筒試料長度 cm

d : 圓筒試料直徑 cm

ρ : 果肉密度 g/cm^3

圖 9 所示乃二個果肉圓筒之撓曲振動頂峰。同一試片遲緩一分鐘間隔，連續 2 次所繪出之圖，明顯地看出其共振周波數降低，此意味着試料之楊氏係數降低。同時，多半的情形損耗係數 (Loss Coefficient) 顯著地增大。此點由共振頂峰寬變大而得知。這些情形明顯地因置於半空中或振動下，而造成蘋果果肉品質迅速地降低。

同一蘋果圓筒切片之楊氏係數，依蘋果之部位而其值各異，故取其平均值來表示全蘋果之楊氏係數。距果蕊最遠位置所取之果肉切片，楊氏係數值最大。

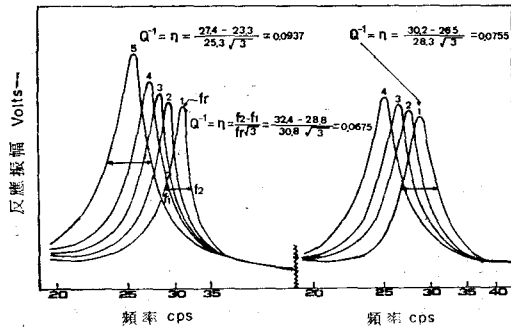


圖 9. 相異蘋果圓筒切片之撓曲共振頂點記錄 (Stayman 品種)

圖 10 顯示計算出之損耗係數 (內部摩擦) 與相同圓筒切片之楊氏係數計算值間，有着良好的相關。

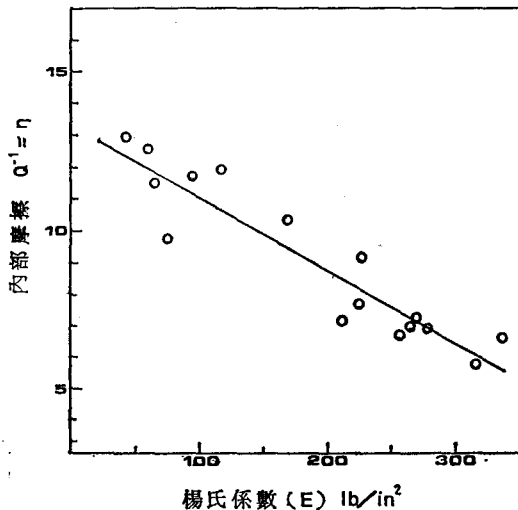


圖 10. 蘋果圓筒切片之楊氏係數與內部摩擦之關係

扭轉振動：

隨扭轉振動而共振之圓筒切片剪斷係數 (Shear Modulus) G 與基本共振周波數 f_1 之關係如下式所示。

$$G = 4\rho f_1^2 L^3$$

圓筒棒的扭轉共振理論簡單且正確，亦勿需修正直徑與波長比值。但是，激發圓筒切片之扭轉共振在實驗上之困難，Pickett 氏發現切片之半徑與長之比值，沒有大於 0.1 的情形。

楊氏係數 E 與剪斷係數 G 決定之後，蒲松氏比依彈性理論可得下式。

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1$$

溫度 $4.5^\circ C$ ，相對濕度 85 % 下之馬鈴薯 (Irish Cobber) 貯藏實驗，楊氏係數在 1965 年 12 月為 $1293 \times 10^5 \text{ dynes/cm}^2$ ，而次年 1966 年 5 月為 $1277 \times 10^5 \text{ dynes/cm}^2$ ，其間並無顯著變化。可是在相同之貯藏期間，內部摩擦則由 0.082 增至 0.094。也就是堅硬度雖不受貯藏期間之影響，但內部摩擦則因之而產生變化。

又，馬鈴薯與甘薯以楊氏係數來表示之堅硬度雖大致相同，但是，平均內部摩擦值則變化顯著。甘薯的 0.136 比馬鈴薯的 0.094 為高。此差被認為因構造特性所致。在品種，栽培過程、貯藏狀況等外在因素相同情形下，內部摩擦被認為因甘薯之纖維度 (Fibrousness) 或馬鈴薯之粉度 (Mealiness) 等質地特性所影響。

四、非破壞果實 (Whole apple) 之可聽音波波形

實驗裝置如圖 1，以線將蘋果垂吊之，並使振動桿與蘋果赤道附近接觸，由音頻激振器激振。蘋果之振動以壓電 (Piezo) 電流型拾音器檢測出。此拾音器接着於蘋果頂面。記錄拾音振動之振幅與加振於蘋果振動周波數之關係。求取 20~2400 Hz 之可聽音波波形。

如此，多半的情形有四個共振頂峰可觀察。最

初的最小周波數頂峰得自縱振動。其他之共振頂峰得自撓曲振動。由此些固有振動數可以表示出各各蘋果之特徵。鰐梨、桃子、梨子、葡萄柚等亦有其各自之共振特徵。

圖 11 是二個形狀、大小相同之蘋果 (Rome Beauty)，其中較熟一個之可聽音波波形。得知最低周波數頂峰常在 80 Hz 附近。大蘋果傾向於低周波數，此共振頂峰與縱振動相關。

第二個低周波數之共振頂峰 ($f_n=2$) 在撓曲振動下，蘋果之大小和堅硬度影響很大。愈小愈硬蘋果之共振頂峰周波數愈大。此種形式之最高頂峰周波數 40.6g 之硬蘋果 (Rome Beauty) 為 1488 Hz，最低頂峰周波數為 162.2g 之軟蘋果 (Stayman)。

$f_n=2$ 之共振頂峰周波數，不受激振器和拾音器之相關位置及果實方向所影響。在高周波數之共振頂峰與蘋果之固有撓曲振動相關。此亦受蘋果之大小和堅硬度影響很大。另一方面此共振周波數亦

為測定中激振器及拾音器之位置所影響。因此， $f_n=2$ 頂峰之再現並不容易。又，撓曲共振頂峰也受果實之大損傷、密病 (Water Core) 及日燒病 (Soft Scald) 等所影響。因此，也可以用可聽音波測定法來判別果實之各種缺陷。

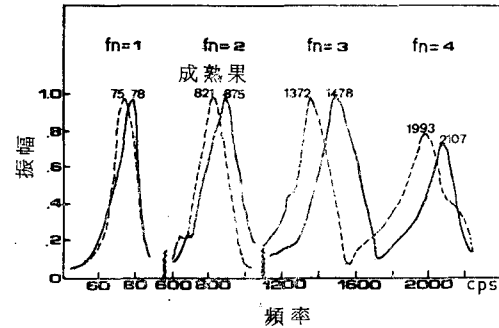


圖 11. 兩相稱蘋果之音波波形

圖 12 為各種果實、蔬菜之共振頂點。音波 (Sound Waves) 可以有效地產生撓曲振動，故可以以揚聲器 (Loud Speaker) 來替代激振桿振動。

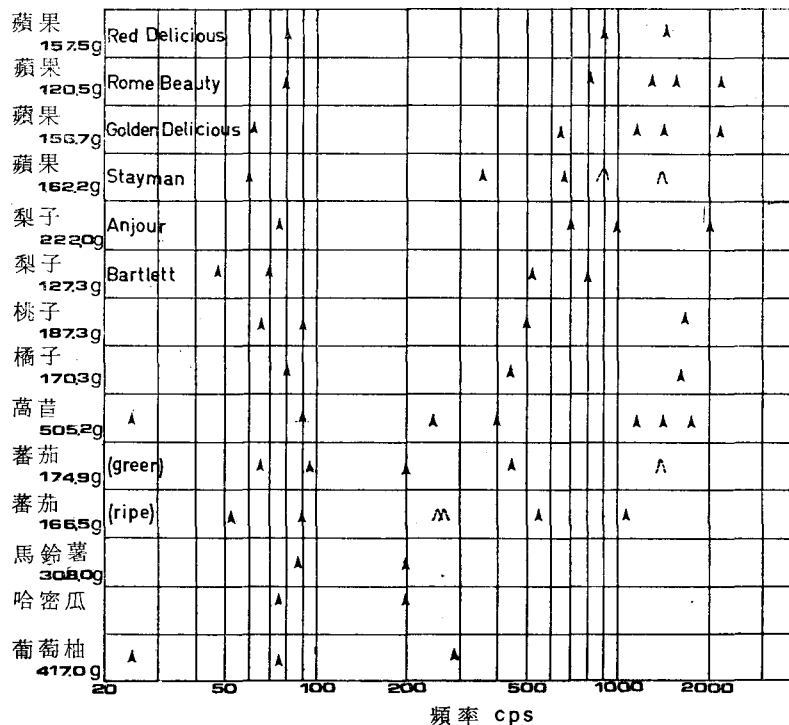


圖 12. 各種青果物之共振頂點位置 (I. A. Abbott 等, 1968)

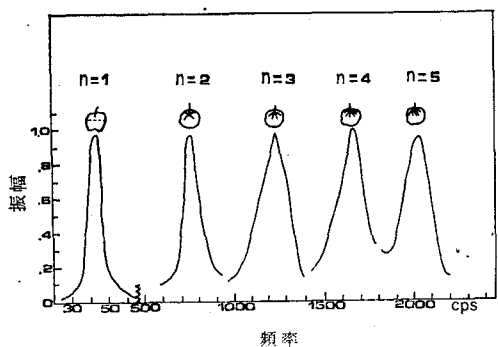


圖 13 蘋果節線數與共振頂點之關係

圖 13 之果柄下細紋為節線 (Node Line) 之發生程度。n 為節線條數。

前述圖 2、圖 3 之激振裝置，分別以同一個蘋果做實驗時，在 1000 Hz 點上可得到共同之共振反應曲線如圖 14，由測定結果得知，此周波數與果實之方向無關。但是，此信號強度比 200~500 Hz 範圍之共振信號顯著地為弱。是項原因有必要從機械上與農產品質上再予究明之。

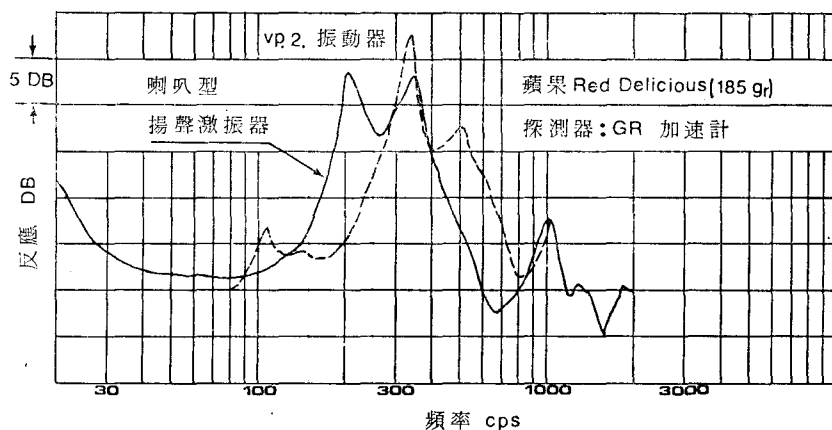


圖 14. 蘋果對電磁振動與揚聲激振之反應曲線

五、剛性係數 (Stiffness Coefficient)

蘋果質量倒數 $1/m$ 與共振周波數平方 f_n^2 之關係圖，各點皆在通過原點的直線上。此時 $f_n=2$ 為最低撓曲共振頂峰周波數。此線之斜率 $(f_n^2=2/\frac{1}{m})=f_n^2=2m$ 值是蘋果的剛性或堅硬度之概略指標稱之為剛性係數。

蘋果堅硬度隨着收穫後時間之增長 (果實之熟化) 而逐漸減低。所以，剛性係數之測定不僅表示在某個時刻，一個或一堆蘋果之堅硬度，亦可以當做是一種有關品質之非破壞之測定手法。

圖 15 是由低溫貯藏庫取出之蘋果 (Rome Beauty) 測定值，測定過後即保存於室溫中，得知 80g 以下之小蘋果斜率較平，比較特殊。實驗資料顯示除小蘋果外，皆在通過原點的直線上，只要計算各蘋果之 $f_n^2=2m$ 值，將其平均即可得此堆蘋果之剛性係數。

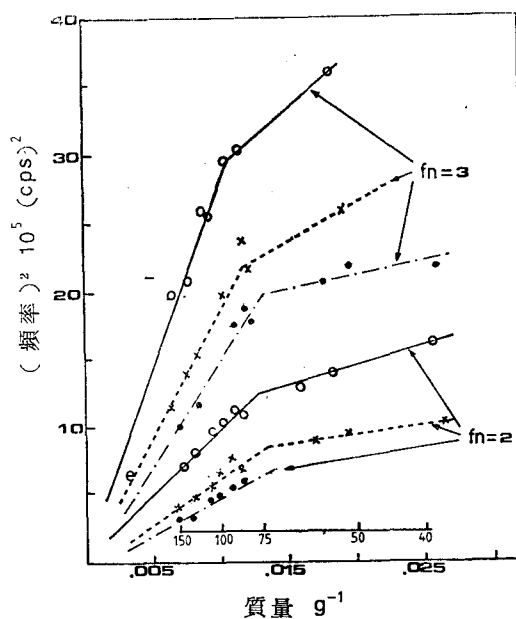


圖 15. 蘋果質量與 (頻率)² 之關係

圖 16 之結果顯示，雖然變更激振器及拾音器之位置，而共振周波數 $f_n=2$ 仍然不變。此種情形其他品種亦同。同時，相同之共振周波數 $f_n=2$ 亦很容易再現。此意味着測定時不考慮蘋果之綠色面或已着色面，亦無關係。又，加壓力於激振器與拾音器或溫差範圍在 $0\sim 40^\circ\text{C}$ 間，亦不會有任何影響。

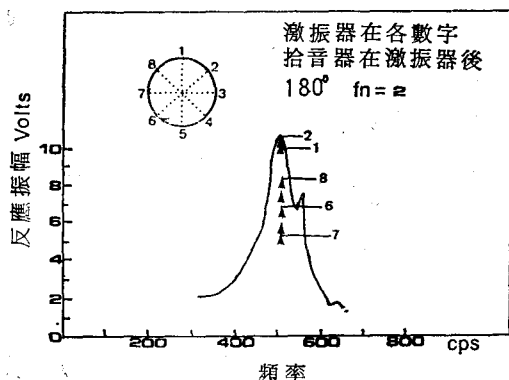


圖 16. 蘋果回轉對共振頂點之影響

六、客觀測定值與感覺特性之關係

Magness-Taylor 壓力試驗與感覺特性中之硬度極具相關。此相關是 10 月果實 ($r=0.92$)，經常比次年 3 月果實 ($r=0.71$) 值大。

非破壞之堅硬度指數 (Firmness Index) f^2m 與收穫後之官能評點 (Sensory Score) 具顯著的相關。但是在 0°C 下長期貯藏後其顯著性減低。例如，1968 年 10 月之果實 ($r=0.84$)，經 5 個月的貯藏其顯著性消失了。

在官能堅硬度評點上，Magness-Taylor 壓力試驗比音波共振為基礎之 f^2m ，有更高之相關。但是，壓力試驗與 f^2m ，在機械試驗的觀點上，是二種根本相異之試驗。壓力試驗以衝擊 (Punctureability) 之形式，包括大變形，破壞試物及細胞組織等，近乎嚼咀狀態之破壞試驗。而 f^2m 測定不損傷細胞，只有微小的動應變，即有關變形 (Deformability) 之試驗。Finney (1969) 提倡以這二種試驗，在質地相異的屬性上，測定其堅韌度 (Toughness) 和堅硬度 (Firmness)。

結語 非破壞之指標 f^2m ，與在樹上成熟中蘋果之堅硬度變化有關。在 0°C 下長期貯藏後之 f^2m ，當做官能堅硬度指標時，其信賴度降低。但是，就蘋果之綜合食用品質，其相關仍究深奧。而

隨着貯藏時間的加長，良質之果實其 f^2m 值仍高，柔軟低品質之 f^2m 仍低。音波共振法之特點乃是以非破壞性之測定來判別品質。

七、以音波振動判別西瓜、蕃茄、香瓜之熟度

1. 西瓜 探討西瓜之共振周波數與內部品質之關係，得到以非破壞手法判別品質之資料 (中馬、志賀、疋田 1977~)，以 A 方式 (圖 1) 和 B 方式 (圖 3)，共振周波數不變，健全果之共振點集中於 $150\sim 450\text{Hz}$ 間。加振方向對共振周波數變化並無影響。內部空洞之西瓜，共振出力與空洞量成比例地減少，共振點隨共振方向而變化。共振周波數隨着重量增加而減低。為去除果實之重量變化對共振周波數之影響，Cooke (1972) 氏以 $f^2m^{2/3}$ 為指標。 $f^2m^{2/3}$ 值顯示與果肉之壓縮強度相關 ($r=0.63$)，被認為有可能依此來判別品質。

西瓜 (天龍 2 號) 之果肉當做粘彈性體來處理，利用果肉圓筒切片之縱振動，得到之共振周波數與半值幅寬 (Halfvalue Width)，導出動彈性係數和動粘性係數之計算式。動彈性係數隨着果實之成長而增加，尤以中央部果肉之增加趨勢更為顯著。顯示與糖含量之相關 ($r=0.65$)，可成為判別熟度之指標。動粘性係數在果實成長中的某個階段會呈現減少，之後逐漸增加。低熟度果之判別，與糖之相關很難做為一項指標。

田尻、法貴、堀部等於 1976 年以打擊音波來檢討果實之品質。西瓜之打擊音波形分為 A 形 ($160\sim 190\text{Hz}$)、B 形 ($130\sim 160\text{Hz}$) C 形 ($110\sim 130\text{Hz}$) 等。由打擊音之振動數找出與糖度、果皮之楊氏係數及最大拉力強度間之關係頗為困難，但是，表面應力則有與音振動數之 $3\sim 4$ 乘方成比例之傾向。

2. 蕃茄 就蕃茄在成長、結實及成熟的三個階段中進行音波共振實驗 (以喇叭型揚聲器激振)。音波之共振反應強度，隨採收後時間之加長而變弱。共振周波數在綠熟至果頂部變紅階段中，未發現其有往低周波數移動之現象。依Cooke 和Rande 之公式求得蕃茄之楊氏係數如下，收穫適期果 (果頂部呈淡紅色) $12\sim 14 \times 10^6 \text{ dynes/cm}^2$ ，食用適期果 $7 \times 10^6 \text{ dynes/cm}^2$ ，過熟果則在 $5 \times 10^6 \text{ dynes/cm}^2$ 以下。

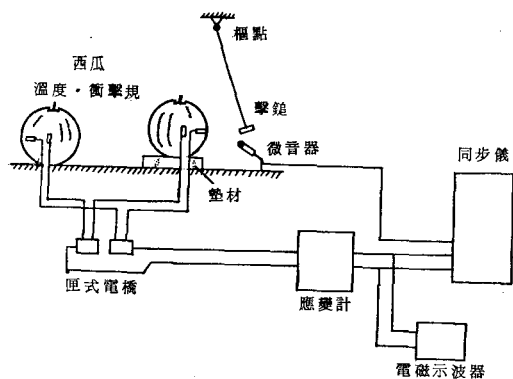


圖 17. 西瓜之物理性質測定系統

3. 香瓜 置香瓜於揚聲器上果實臺油墊上，並由底部激振（小嶋、田中 1976）。香瓜隨着成長過程中熟度之進行，對高周波數範圍之共振，逐漸

衰弱或消失。收穫後之香瓜共振曲線，其共振點移往低周波數範圍，且隨着果實熟度的進行，衰減情形增大而共振幅變小。

本實驗之果實共振當做縱振動，依下式計算楊氏係數時

$$E_D = \frac{r}{K_n} \left(\frac{2 \cdot L \cdot f_n}{n} \right)^2, \quad K_n = 1 - \frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot u^2 \cdot d^2}{8L^2}$$

共振次數 n 假定與最先出現之共振相對 $n = 2$ ，與最強出現之共振相對 $n = 4$ 或 5 。

以上之結果，認為以音波共振法來判別香瓜之熟度是可行的。

誌謝 本譯文承蒙臺大農機系主任張漢聖教授斧正，謹此誌謝。

承包土木·水利·建築等工程

乾隆營造有限公司

負責人：邱 耀 堂

地址：高雄市前金區文武二街 25 號