

探頭施力影響蘿蔔超音波特性之研究

黃威仁¹，盧福明²

1. 致遠管理學院資訊管理學系講師
國立台灣大學生物產業機電工程學系研究生
2. 國立台灣大學生物產業機電工程學系教授，本文通訊作者

摘 要

本研究目的為結合萬能試驗機與超音波儀器，應用超音波探頭在不同施力狀況下擷取超音波穿透蘿蔔所得到的波形來分析探頭接觸測試物的施力影響超音波性質的程度。超音波穿透蘿蔔之衰減係數與施力之關係呈現衰減現象，能量頻譜與施力之關係呈現遞增現象。探頭施力會影響衰減係數與蘿蔔物性的相關係數。衰減係數(y)與施力(x)的迴歸式 $y=a+b\ln x$ 之係數a和蘿蔔孔隙率之關係較為顯著，係數b則與蘿蔔體積有關。而能量頻譜(y)與施力(x)的迴歸式係數a與蘿蔔孔隙率之關係較為顯著。

關鍵詞：蘿蔔、探頭施力、超音波、衰減係數、能量頻譜

EFFECTS OF SENSOR CONTACT FORCE ON THE ULTRASONIC CHARACTERISTICS OF RADISH

Wei-Jen Huang¹, Fu-Ming Lu²

1. *Instructor, Department of Information Management, Diwan College of Management.*
Graduate Student, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University.
2. *Professor, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Corresponding Author.*

ABSTRACT

The objective of this study was to study the effect of contact force of ultrasonic probe on the ultrasonic attenuation and power spectrum of radish. The relationship between attenuation(y: neper/m) and contact force(x: kgw) can be expressed as $y=a+b\ln x$, and the regression coefficients a and b were influenced by porosity and volume respectively. The relationship between power spectrum and contact force also has the same regression form, the coefficient a was influenced by porosity. The attenuation and power spectrum respectively decreased and increased with the increase of contact force. The correlation coefficient between physical properties of radish and attenuation was influenced by contact force.

Keywords: Radish, Contact force, Ultrasonic, Attenuation, Power spectrum

一、前 言

超音波在農業方面的研究與發展在 19 世紀以後才漸漸增加，在蔬果方面尤其如此；在醫學和工業界使用的超音波儀器都是使用高頻率、低能量的形式，由於蔬果對於高頻超音波衰減率很大，所以這類在醫學界及工業界上使用的高頻率、低能量的超音波並不適用在蔬果的檢測上，因此必須用低頻率、高能量的超音波儀器來克服衰減的問題(Sarkar and Wolfe, 1983; Mizrach et al., 1989)。

一般對農產品的研究，主要是求得農產品的楊氏係數(Young's modulus)及堅實度係數(firmness)等物理性質，再與超音波的各種特性(如波速、衰減係數、波反射率等)作分析，找出其間的相關特性，以做為農產品內部品質或貯藏時間的指標(Pinder and Godfrey, 1993)。例如 Finney (1967) 利用非破壞性音波檢測方法找出蘋果、梨子、桃子的成熟度與楊氏係數間的顯著相關性。Finney et al. (1967) 利用音波找出香蕉在成熟過程中堅實度的變化，指出香蕉在成熟過程中，澱粉水解為糖使得果肉滲透壓(osmotic pressure)升高。滲透壓升高和成熟軟化過程中細胞間的充實壓力(turgor pressure)的變小導致楊氏彈性係數變小。Mizrach et al. (1989) 針對蔬果對超音波具有的高衰減性，使用低頻且高能量的超音波激發方式來求得蘋果、馬鈴薯、胡蘿蔔、酪梨組織的超音波基本特性，諸如超音波傳遞速度、超音波衰減係數和反射損失，並建議用頻率範圍在 50KHz 到 500KHz 間的超音波來量測蔬果的音波性質。

Upchurch et al. (1985) 利用超音波反射訊號的頻譜分析(spectral analysis) 分辨蘋果是否損傷。由於未受損傷的蘋果組織有相當高的音阻抗值，造成絕大部分的入射超音波能量在蘋果表面即被反射，此外除了初始反射外，尚有一些因粗糙表面所引起的低振幅散射。受損傷蘋果所反射的超音波訊號會有較低的振幅，其原因是因為組織受損時，細胞壁破裂所釋出細胞內的物質散佈到原來是空氣的細胞間隙，因而受損組織有較小的空

氣間隙，其音阻抗值比未受損的組織低，所以受損蘋果組織與水的音阻抗差異較小，使得大部分入射的波能量可以穿透組織。

在衰減係數的研究中，Mizrach et al. (1994) 指出和酪梨品質有關的相關因素為硬度、成熟度及乾物重等。利用和超音波衰減係數間的相關性，得到彈性係數及正切係數受衰減係數及取樣深度的影響。李(1997) 利用蘿蔔對超音波的強度衰減值將蘿蔔分為三個等級，第一級為強度衰減值低於 23dB，第二級為強度衰減值介於 23dB 及 40dB 之間，第三級為強度衰減值高於 40dB。第一級蘿蔔孔隙率都低於 2.5%，第二級蘿蔔為處於空心現象發生的階段，其孔隙率介於 2.5% 及 10% 之間，第三級蘿蔔的孔隙率都高於 10%。當蘿蔔強度衰減值升高時，代表蘿蔔的空心越嚴重，也就是蘿蔔的品質越差。Sarkar 與 Wolfe (1983) 利用超音波穿透法量測馬鈴薯、甜瓜、蘋果組織的衰減情形及分析其對高頻率超音波的反應，指出馬鈴薯的衰減係數比甜瓜低的原因在於甜瓜組織的多孔性(porosity)。

近年來超音波在各個領域中都有很多的應用，尤其在工業界跟醫學界已有成熟的技術。工業應用例如利用超音波檢測鑄造物體內部是否有裂痕或空洞和利用超音波振動來清洗機件。在醫學上，用到超音波的實例更是不勝枚舉，像是超音波斷層掃描，用超音波檢查人體器官或組織的是否正常等。不過應用在蔬果品質檢測工作仍待開發，其原因主要為工業上與醫學上所用的超音波為高頻，應用在農產品檢測時，衰減非常快，無法穿透農產品。且農產品的外表大多是呈現不規則狀，造成應用上的困難。超音波技術直接應用到農業的配合條件值得深入研究。舉例來說，在工業界中採用接觸式的超音波量測法，其探頭的施力大多採用 1kgw 為主(葉等人, 1988)。本研究目的為探討超音波應用於表面不平整的農產品上，其探頭施力與蔬果超音波性質之關連性。

二、材料與方法

(一) 理論基礎

1. 衰減係數

超音波能量隨著傳遞距離的增加，分散到更大的區域中，造成單位面積內超音波強度的減弱。超音波通過介質之強度減小或振幅變小的特性，稱為衰減，造成超音波衰減的主要原因有二：一是吸收作用，吸收作用會使音波能量轉換成熱能(Hykes et al., 1992)。吸收的機制包括(1)有黏性損失(viscous losses)：此一損失和頻率的平方成正比；(2)分子鬆弛(molecular relaxation)：此為最主要的機制，和頻率成正比；(3)相對運動損失(relative motion losses)：入射波造成組織中較小的結構單元發生相對運動。其二是散射，不均勻物體包含了許多不同密度或音束的物質所構成的界面，由於界面上音阻抗的突然改變以致影響超音波的傳遞(葉等人, 1988)。此外，當介質的基本粒子大於或等於超音波波長時，也會產生散射現象。超音波的振幅衰減係數 α 與振幅值之關係如公式(1)所示：

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中， A_x ：距離 x 處，超音波的振幅值

A_0 ：超音波原始振幅值

α ：振幅衰減係數

x ：超音波所傳遞的距離

而兩者物質厚度相同情況下，利用某一已知衰減係數 α_1 的物質，可以求取另外一個物質的衰減係數 α_2 。由(1)式可以得到(2)式及(3)式

$$\alpha_1 = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{A_0}{A_2} \right) \quad (3)$$

兩式相減可得到(4)式

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{1}{x} \left[\ln \left(\frac{A_0}{A_2} \right) - \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \right] \quad (4)$$

整理得到(5)式

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{1}{x} \left(\ln \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (5)$$

取 α_1 為水的衰減係數，可以得到(6)式

$$\alpha_2 = \alpha_{\text{water}} + \frac{1}{x} \left(\ln \frac{A_{\text{water}}}{A_2} \right) \quad (6)$$

而水在低頻時衰減係數很小，可以忽略不計，故樣本的衰減係數可利用(7)式得到。

$$\alpha_2 = \frac{1}{x} \left(\ln \frac{A_{\text{water}}}{A_2} \right) \quad (7)$$

式中， A_{water} ：超音波在水中距離 x 處的振幅值

A_2 ：超音波在距離 x 處的振幅值

α_2 ：振幅衰減係數

x ：超音波所傳遞的距離

2. 孔隙率測定

利用理想氣體方程式 $PV=nRT$ ，在樣本內部空氣質量不變下，可以得到式(8)

$$P_0 V_0 = P_1 V_1 \quad (8)$$

式中， P_0 ：大氣壓力

V_0 ：樣本內部空氣體積

P_1 ：加壓後的壓力

V_1 ：壓縮後的樣本內部空氣體積

定義體積變化量(ΔV)得到

$$\Delta V = V_0 - V_1 \quad (9)$$

$$V_1 = V_0 - \Delta V \quad (10)$$

將(10)式代入(8)式，整理可以得到(11)式

$$V_0 = \frac{\Delta V}{P_1 - P_0} P_1 \quad (11)$$

定義孔隙率為 ϕ ，可得到(12)式

$$\phi = \frac{V_0}{V_s} \times 100\% \quad (12)$$

式中， V_s ：樣本體積

將(11)式代入(12)式可得到(13)式

$$\phi = \frac{\Delta V}{V_s (P_1 - P_0)} P_1 \times 100\% = \frac{\Delta V}{V_s \left(1 - \frac{P_0}{P_1}\right)} \times 100\% \quad (13)$$

(二) 實驗設備與方法

試驗樣本採用市售新鮮蘿蔔，總數 43 顆，由傳統市場購入。購入之後將蘿蔔外表泥土利用

海綿洗淨，以不傷害蘿蔔外表為原則。洗淨之後，分別量測蘿蔔重量與體積，體積量測採用置水法(Mohsenin, 1970)，利用重量與體積求得蘿蔔密度。

為採用穿透模式進行對整顆平躺蘿蔔進行超音波試驗，需要將超音波換能器 (PANAMETRICS X1021 型，頻率 50KHz) 與萬能試驗機 (INSTRON 4465 型) 結合做施力控制與訊號量測。將換能器與萬能試驗機壓板利用工具連接，整個實驗系統如圖 1 所示，探頭固定在固定板上面的詳細圖如圖 2 所示。實驗時將整顆蘿蔔橫放在下方換能器探頭上，由脈波產生器(PANAMETRICS 5058PR) 產生超音波傳送到超音波換能器。兩換能器之間隔設定為 100mm，萬能試驗機以 2mm/min 速度向下壓。實驗過程中，換能器與蘿蔔之接觸地方利用水當耦合劑，使換能器與樣本接觸時能將超音波傳送到樣本內。超音波透過發射端換能器探頭傳入蘿蔔之後，由接受端換能器探頭接收訊號，所接收的訊號經由傳輸線傳送到數位示波器(LeCroy 9304A)顯示出來。施力由 0 增加至 20kgw，每隔 2kgw 將示波器上的訊號儲存下來，以利後續的分析。萬能試驗機利用專屬分析計算軟體(INSTRON

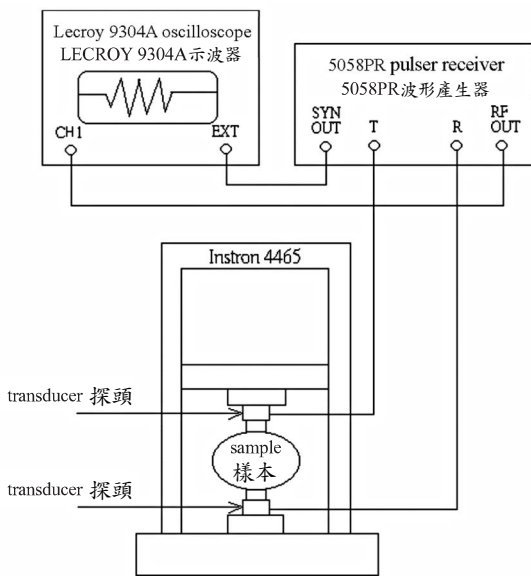


圖 1 實驗系統

Fig.1 The experimental system

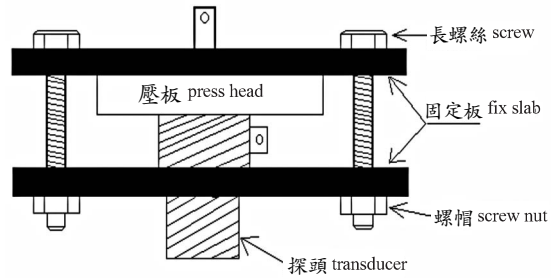


圖 2 探頭固定在固定板上詳細圖

Fig.2 The diagram illustrating the transducer connected with Instron press head

SERIES IX)進行控制，軟體在壓縮試驗過程中會自動記錄施力與位移的變化，當示波器每隔 2kgw 擷取訊號時，同時記錄下當時兩換能器之間的距離，由於兩換能器直接與蘿蔔接觸，所記錄下的距離即為超音波穿透蘿蔔的深度，即為衰減係數公式中的穿透深度。實驗後，將超音波換能器之間充滿水，量測在各種穿透厚度下超音波穿透水的振幅電壓值(peak to peak)。

衰減係數測定係在某一施力作用下所擷取下來的波形中，量測超音波穿透過樣本的時域波形上的振幅電壓值，同時找出在對應的施力下超音波穿透的厚度，連同超音波穿透相同厚度水的振幅電壓值帶入公式(7)計算，即可以求出該樣本在該力作用下的衰減係數。能量頻譜量測則利用示波器所擷取的超音波穿透波形，運用傅立葉轉換求出超音波穿透樣本之能量頻譜，並將不同施力下的能量頻譜的峰值記錄下來。

孔隙率量測採取將實驗樣本取直徑 12mm，高度 30mm 的圓柱形樣本置於充滿水的容器中，使容器密閉不含空氣，容器上方裝有一細管維持一定的水位高度，利用氮氣的壓力(206.81KPa)作用於水，使蘿蔔樣本內的空氣孔細體積因為壓力而縮減，造成細管的水位高度因而下降，由水位下降的體積變化以及加壓後之壓力代入式(13)計算孔隙率(李, 1997)。

楊氏係數測定利用 INSTRON 4465 型萬能試驗機來量測，測試樣本為直徑 12mm，高度為 20mm 的圓柱形樣本。壓桿向下的速度設定為 5mm/min，壓桿接觸樣本表面後的行程為 10mm，

利用 INSTRON SERIES IX 軟體紀錄下樣本受力破壞的應力－應變曲線圖，由軟體自動計算在彈性限度下的應力－應變曲線斜率，即得樣本之楊氏係數。

三、結果與討論

(一) 衰減係數與施力關係探討

實驗過程記錄下每個樣本在不同施力下的超音波衰減係數，不同孔隙率之蘿蔔衰減係數與施

力的關係如圖 3 所示。不同蘿蔔之間其施力和衰減係數的關係曲線有著近乎平移的關係。當施力小時，不同孔隙率所量得的衰減係數值間的差異範圍大，而在施力逐漸增加的情況下，此差異範圍逐漸縮小。各個孔隙率之衰減係數與施力之迴歸分析，採取原始數據之線性迴歸及將施力取自然對數作變數變換後再與衰減係數作線性迴歸兩種方式。兩種迴歸方式的統計資料如表 1 所示。表 1 顯示將施力取自然對數後與衰減係數作線性迴歸的判定係數介於 0.62 到 0.99 之間，變異係數為 0.121，但原始數據之線性迴歸判定係數則較

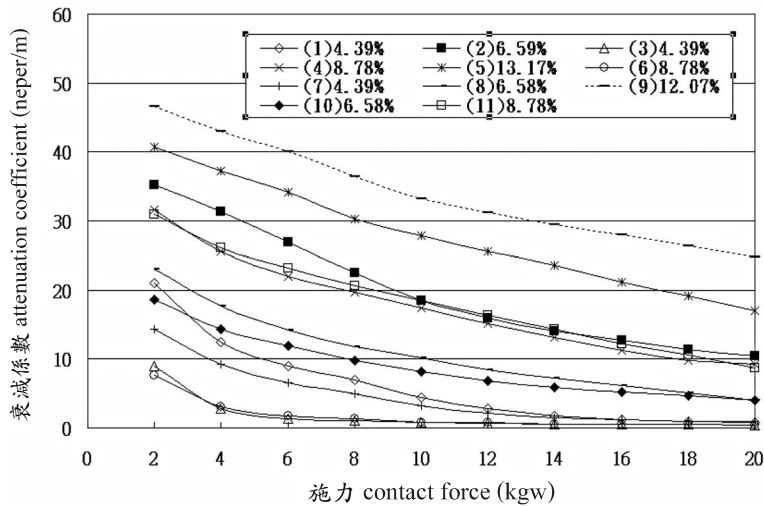


圖 3 不同孔隙率蘿蔔之衰減係數與施力關係圖

Fig.3 Attenuation coefficient vs contact force at different porosity of radish samples

表 1 衰減係數與施力迴歸式判定係數 R² 之比較

Table 1 Comparison of the coefficients of determination for regression equation of attenuation coefficient against contact force

	R ² y=a+bx	R ² y=a+bLn x
平均值(average)	0.791	0.903
標準差(Std. Dev.)	0.195	0.11
最大值(Maximum)	0.994	0.999
最小值(Minimum)	0.395	0.62
變異係數(CV)	0.246	0.121

* sample size : 43

** y: attenuation coefficient, x: contact force, a and b: regression coefficients

低，介於 0.395 到 0.994 之間，變異係數為 0.246。對施力取自然對數所得到的迴歸方程式，其斜率都達到極顯著水準($P < 0.001$)，而衰減係數(y)直接對施力(x)作迴歸所得到的迴歸方程式，在不同孔隙率之下其斜率有許多未達到顯著水準，故採用 $y = a + b \ln x$ 的模式來對衰減係數與施力作迴歸分析。

將施力由 2kgw 到 20kgw 區分為十個處理，進行施力影響衰減係數之單因子變異數分析，所得到的變方分析表如表 2 所示。由表 2 得知施力確實會影響衰減係數，達到顯著水準($P < 0.05$)。

由於每個蘿蔔物性不同，且所測得的衰減係數隨著施力而有所不同，亦即不同的蘿蔔會有不同的施力與衰減係數之關係式。將衰減係數(y)對施力(x)以 $y = a + b \ln x$ 模式做迴歸，可以得到每個迴歸式的係數 a 與係數 b。

將係數 a、b 與蘿蔔物性資料作強制迴歸，得到係數 a 的判定係數 R^2 為 0.3913，係數 b 的判定係數 R^2 為 0.1609。由強制性標準迴歸分析，所得標準迴歸係數值如表 3 所示。標準迴歸係數值的

大小顯示各項蘿蔔物理性質對係數 a、b 的影響能力。由表 3 可以得知孔隙率標準迴歸係數為 0.671 對係數 a 具有的影響力較其他的物理性質顯著。同理，體積與孔隙率對 b 具有較顯著的影響力。

將係數 a、b 分別與重量、體積、密度、厚度、孔隙率與楊氏係數進行逐次迴歸分析。逐次迴歸彰顯出孔隙率對係數 a 的影響。其係數 a 可以式(14)表達之($R^2 = 0.3698$)。其 R^2 值與強制迴歸所得結果($R^2 = 0.3913$)相差不多。而係數 a 的迴歸變方分析之 P 值小於 0.01，可以得知係數 a 和孔隙率的迴歸關係存在，且具有極顯著水準。

$$a = 8.7194 + 2.168 \times \text{孔隙率} \quad (14)$$

對係數 b 而言，逐次迴歸彰顯出體積對係數 b 較有影響，其迴歸式如(15)式所示($R^2 = 0.1126$)。其 R^2 值與強制迴歸所得結果($R^2 = 0.1609$)亦相差不多，且其迴歸變方分析之 P 值小於 0.01，可以得知兩者之間迴歸關係存在，且具有極顯著水準。

$$b = -9.9188 + 0.0075 \times \text{體積} \quad (15)$$

表 2 施力影響衰減係數之變異數分析

Table 2 The analysis of variance of the effect of contact force on attenuation coefficient

	SS	D.O.F.	MS	F	P-value
Contact force	7215.408	9	801.712	2.307	0.01542
Error	145961.7	420	347.528		
Total	153177.1	429			

表 3 衰減係數迴歸式係數 a、b 與蘿蔔物理性質之標準迴歸係數

Table 3 Coefficients a and b of the regression equation of attenuation against radish physical properties

	Coefficient a $R^2 = 0.3913$	Coefficient b $R^2 = 0.1609$
體積 volume(cm^3)	-0.033	0.311*
密度 density(g/cm^3)	-0.067	-0.276
厚度 thickness(mm)	0.017	-0.057
楊氏係數 Young's modulus(Mpa)	0.186	-0.117
孔隙率 porosity(%)	0.671*	-0.347*

*：對 a,b 的影響力大(more effect on a,b)

(二) 衰減係數與蘿蔔物理性質之關係分析

在實驗中量測蘿蔔的許多性質，包括密度，楊氏係數以及孔隙率等等。以下針對衰減係數與這些性質的相關性做探討。

圖 4, 5, 6 分別為在 2kgw 施力下的衰減係數與密度，孔隙率以及楊氏係數的迴歸關係圖，其判定係數 R^2 分別為 0.3047 ($P < 0.01$)，0.461 ($P < 0.01$) 與 0.084 ($P = 0.056$)，只有衰減係數與楊氏係數之迴歸關係為統計上不顯著。衰減係數分別與孔隙率和密度之迴歸關係為極顯著。施力增加時，衰減係數與密度之迴歸判定係數具有上升的趨勢，例如施力由 2 公斤增加到 4 公斤時，判定係數由 0.3047 增為 0.3164。換言之，衰減係數與密度之簡單相關係數(r)之絕對值隨著施力增加而增加，但為負相關性。在各個施力下，衰減係數與孔隙率之相關係數之變化如圖 7 所示。在不同的施力作用下，超音波穿透蘿蔔所計算得到的衰減係數與蘿蔔物理性質間的相關性會有所改變。在 2kgw 到 20kgw 施力下，超音波穿透蘿蔔的衰減係數和蘿蔔密度之相關係數，衰減係數和孔隙率相關係數及衰減係數和楊氏係數相關係數之變化如圖 7, 8, 9 所示。由圖上可以得知當施力逐漸增加時，衰減係數分別與密度，孔隙率與楊氏係數的相關係數之絕對值皆呈線性增加的趨勢。

圖 10 為不同施力下，衰減係數與蘿蔔物性的相關係數之變化圖。衰減係數與各物性間的相關性都呈現線性遞增的關係。由圖 10 可以得知，

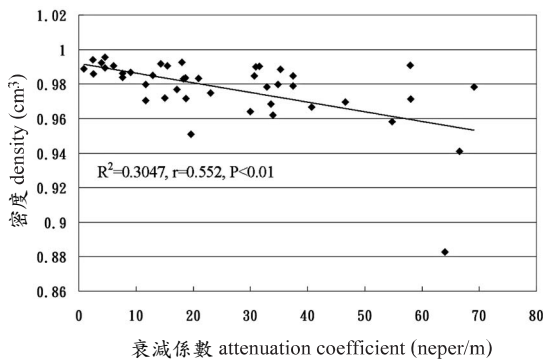


圖 4 2kgw 施力下衰減係數與蘿蔔密度之迴歸關係
Fig.4 Regression of radish density against attenuation at 2kgw contact force

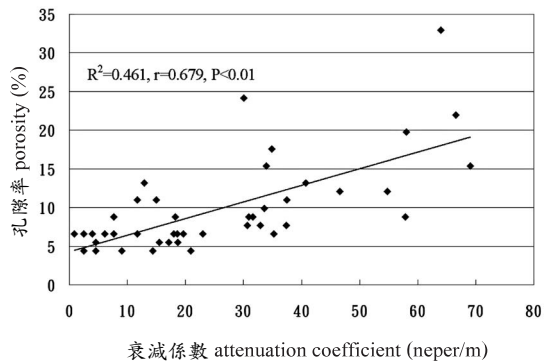


圖 5 2kgw 施力下衰減係數與蘿蔔孔隙率之迴歸關係
Fig.5 Regression of radish porosity against attenuation at 2kgw contact force

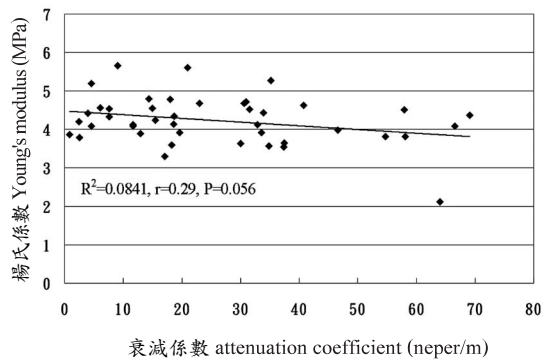


圖 6 2kgw 施力下衰減係數與蘿蔔楊氏係數之迴歸關係
Fig.6 Regression of radish Young's modulus against attenuation at 2kgw contact force

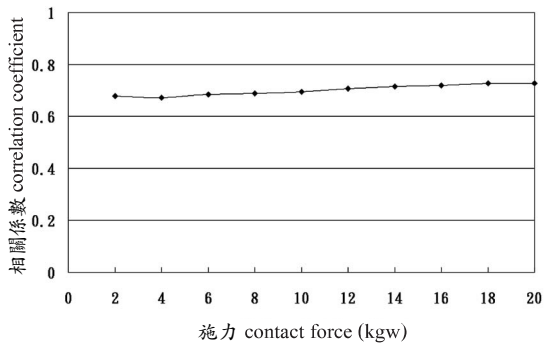


圖 7 衰減係數與蘿蔔孔隙率之相關係數在不同施力下之變化圖
Fig.7 Correlation coefficients between attenuation and radish porosity at different contact force

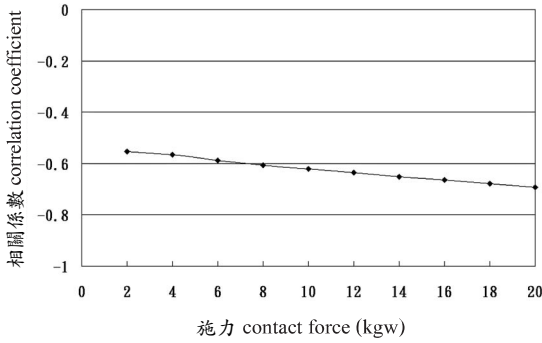


圖 8 衰減係數與蘿蔔密度之相關係數在不同施力下之變化圖

Fig.8 Correlation coefficients between attenuation and radish density at different contact force

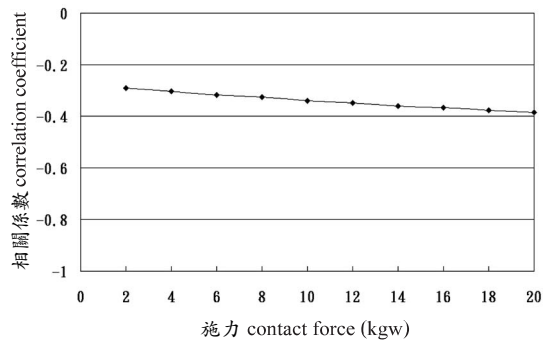


圖 9 衰減係數與蘿蔔楊氏係數之相關係數在不同施力下之變化圖

Fig.9 Correlation coefficients between attenuation and radish Young's modulus at different contact force

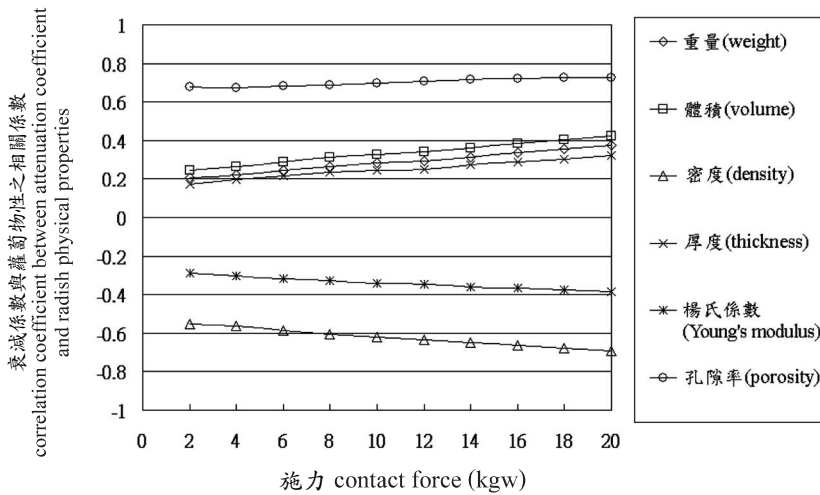


圖 10 衰減係數與蘿蔔物理性質之相關係數在不同施力下之變化圖

Fig.10 Correlation coefficients between attenuation and radish physical properties at different contact force

隨施力增加，蘿蔔的物理性質與衰減係數的相關係數隨著正向或負向增大，但相關係數之變化量不大，約±0.15，此顯示施力不會影響衰減係數與物性之相關係數。物理性質中，孔隙率和衰減係數的相關係數介於0.5與0.7之間，密度和衰減係數的相關係數介於-0.5與-0.7之間。孔隙率和衰減係數呈現正相關，其原因為孔隙率係指蘿蔔內部的空心程度，蘿蔔內部的空心會讓超音波在

穿透蘿蔔時產生衰減，孔隙率越大，代表蘿蔔的空心程度越大，超音波越不容易穿透蘿蔔，所以孔隙率和衰減係數呈現正相關是合理的。而空心會造成蘿蔔的密度變小，所以衰減係數和密度呈現負相關是合理的。此現象與 Cheng (1993)對馬鈴薯的研究中，空心馬鈴薯所得到的超音波振幅較正常馬鈴薯小，其衰減係數因為馬鈴薯空心而增加的結論相符合。

(三) 能量頻譜與施力迴歸式分析

探頭施力與能量頻譜之關係如圖 11 所示。圖上標示百分比為各顆蘿蔔孔隙率。由圖 11 得知超音波穿透蘿蔔的能量頻譜隨著施力的增加而逐漸變大。不同孔隙率蘿蔔之施力和能量頻譜的關係曲線也有著近乎平移的現象。為決定何種迴歸方式較佳，採用與衰減係數同樣的比較方式，分別對每個蘿蔔在 2kgw 到 20kgw 施力下所得到的能量頻譜(y)與施力(x)作線性迴歸，得到其判定

係數之平均值為 0.874，而將施力取自然對數轉換後所得到的迴歸式之判定係數平均值為 0.96，兩種迴歸方式的統計分析表如表 4 所示。由表 4 可得到利用 $y=a+b\ln x$ 所得到的迴歸判定係數較高，且都達極顯著水準 ($P<0.001$)，且其變異係數(CV)較直接用施力作線性迴歸小。因此採用將施力取自然對數之後的數值與能量頻譜作線性迴歸。由圖 11 上的曲線以及所列之孔隙率可以得知孔隙率大的蘿蔔，其能量頻譜值比孔隙率小的蘿蔔低。在施力小的狀況下，不同孔隙率蘿蔔之能量

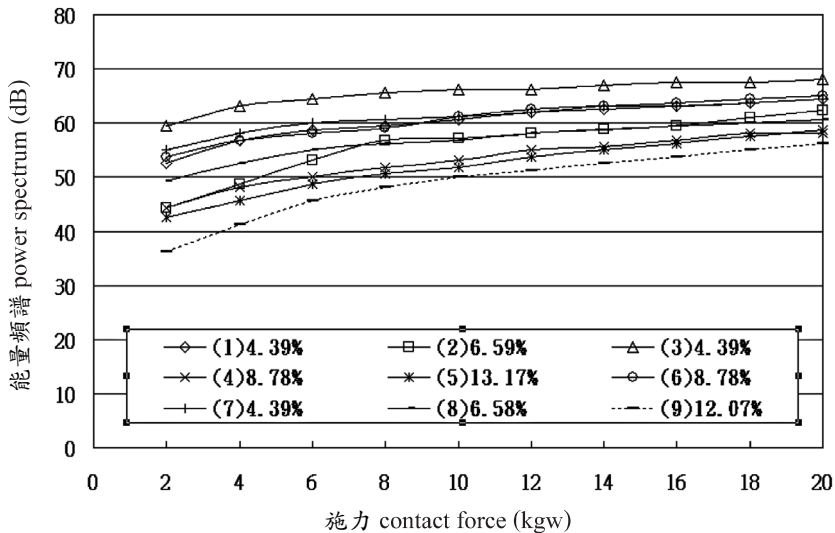


圖 11 不同孔隙下之施力與能量頻譜關係圖

Fig.11 Power spectrum vs contact force at different porosity of radish

表 4 能量頻譜與施力迴歸式判定係數 R² 之比較

Table 4 Comparison of the coefficients of determination for regression equation of power spectrum against contact force

	R ² y=a+bx	R ² y=a+bLnx
平均值(average)	0.874	0.96
標準差(Std. Dev.)	0.089	0.05
最大值(Maximum)	0.996	0.998
最小值(Minimum)	0.583	0.78
變異係數(CV)	0.101	0.052

* sample size : 43

** y: power spectrum, x: contact force, a and b: regression coefficients

頻譜值的差異範圍大，但在施力大的狀況下其差異範圍縮小。探討施力的因素是否影響能量頻譜，對十組不同施力下的能量頻譜做單因子變異數分析，所得到的變方分析表如表 5 所示。由表 5 得知施力確實會影響能量頻譜，且達到極顯著水準($P < 0.01$)。

四 能量頻譜與蘿蔔物理性質之關係分析

圖 12 為不同施力下超音波穿透蘿蔔之能量頻譜峰值分別與蘿蔔之孔隙率、楊氏係數、密度、重量、體積和厚度的相關係數值。能量頻譜與孔隙率的相關係數約維持為-0.7，不同施力下之變動不大。密度與能量頻譜的相關係數約為 0.5，變動亦不大。其他物性與能量頻譜的相關係

數大略維持在定值。厚度、重量和體積與能量頻譜的相關係數低於 0.2。在所有的物理性質中，孔隙率和密度與能量頻譜的相關係數值較大，分別為 0.5 與-0.7，其絕對值相當於孔隙率和密度與衰減係數的相關係數值。孔隙率和能量頻譜呈現負相關，其原因為孔隙率係指蘿蔔內部的空心程度，蘿蔔內部的空心會讓超音波在穿透蘿蔔時產生衰減，超音波穿透的能量就越低。孔隙率越大代表蘿蔔的空心程度越大，超音波穿透蘿蔔的能量就越少，所以孔隙率和能量頻譜呈現負相關是合理的。而空心會造成蘿蔔的密度變小，所以能量頻譜和密度呈現正相關是合理的。

超音波穿透蘿蔔的能量頻譜會隨著施力增加而增大。如同前面衰減係數所述，不同的蘿蔔會

表 5 施力影響能量頻譜變異數分析
Table 5 The analysis of variance of the effect of contact force on power spectrum

	SS	D.O.F.	MS	F	P-value
Contact force	3824.158	9	424.9064	6.359676	1.92E-08
Error	26725.04	400	66.81259		
Total	30549.19	409			

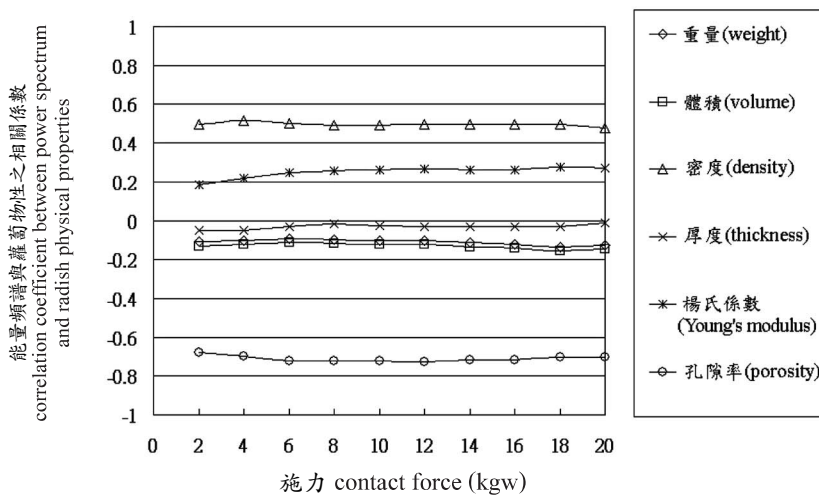


圖 12 能量頻譜與蘿蔔物理性質之相關係數在不同施力下之變化圖
Fig.12 Correlation coefficients between power spectrum and radish physical properties at different contact force

表 6 能量頻譜迴歸式係數 a、b 與蘿蔔物理性質之標準迴歸係數
Table 6 Coefficients a and b of the regression equation of power spectrum against radish physical properties

	Coefficient a R ² =0.5095	Coefficient b R ² =0.1311
體積 volume(cm ³)	-0.122	-0.214*
密度 density(g/cm ³)	0.221*	-0.206*
厚度 thickness(mm)	-0.019	0.271*
楊氏係數 Young's modulus(Mpa)	-0.171	0.274*
孔隙率 porosity(%)	-0.631*	0.204*

*：對 a,b 的影響力大(more effect on a,b)

有不同的施力(x)與能量頻譜(y)關係式。每一顆蘿蔔的施力與能量頻譜的數據，以 $y=a+bLnx$ 做迴歸，可得到每顆蘿蔔的迴歸式係數。

將係數 a、b 與蘿蔔物性資料作強制迴歸，得到係數 a 的判定係數 R² 為 0.5095，而係數 b 的判定係數 R² 為 0.1311，由強制性標準迴歸分析，所得標準迴歸係數值如表 6 所示。由表 6 可得知密度與孔隙率對係數 a 具有的影響力較其他的物理性質顯著，孔隙率的影響力約為密度的 3 倍。體積、密度、厚度、楊氏係數與孔隙率對 b 有相等的影響力。將係數 a、b 分別與重量、體積、密度、厚度、孔隙率與楊氏係數進行逐次迴歸，對係數 a 而言，逐次迴歸彰顯出孔隙率對係數 a 的影響。其係數 a 可以式(16)表達之(R²=0.432, P<0.01)。對係數 b 而言，逐次迴歸並不能找出顯著影響係數 b 的物理性質。

$$a = 60.1965 - 1.4714 \times \text{孔隙率} \quad (16)$$

四、結 論

本研究以超音波和萬能試驗機的結合來研究超音波換能器施力於蘿蔔之大小影響超音波穿透蘿蔔之衰減係數與能量頻譜的關係，施力範圍介於 2kgw 至 20kgw。超音波穿透蘿蔔之衰減係數與施力呈現自然對數遞減關係，而能量頻譜則是呈現自然對數遞增的關係。當施力逐漸增加時，衰減係數與蘿蔔物理性質之相關性會隨之增加。而

在能量頻譜上，在施力與蘿蔔物理性質之相關性大略維持定值。衰減係數與能量頻譜和施力迴歸方程式形態為 $y=a+bLnx$ 。在衰減係數分析中，迴歸式係數 a 和蘿蔔孔隙率有關，其關係為 $a=8.7194+2.168 \times \text{孔隙率}$ (R²=0.3698, P<0.01)，係數 b 和蘿蔔體積有關，其關係為 $b=-9.9188+0.0075 \times \text{體積}$ (R²=0.1126, P<0.01)。而能量頻譜與施力迴歸式係數 a 和蘿蔔孔隙率有關，其關係為 $a=60.1965-1.4714 \times \text{孔隙率}$ (R²=0.432, P<0.01)，係數 b 與蘿蔔的物理性質關係並不顯著。

五、參考文獻

1. 李嘉斌。1997。超音波檢測應用於蘿蔔分級。碩士論文。台北：國立台灣大學農業機械工程學研究所。
2. 葉競榮、黃啓貞、陳必貫、吳學文。1988。超音波檢測法。台北：中華民國非破壞檢測協會。
3. Cheng, Y. L. 1993. Noninvasive quality evaluation of fruits and vegetables using ultrasound. Ph. D dissertation. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University. Department of Agricultural Engineering.
4. Finney, E. E. 1967. Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development. Journal of Agric. Engineering Res. 14(4):249-255.
5. Finney, E. E., I. Bengera and D. R. Massie. 1967. An objective evaluation of changes in firmness of

- ripening bananas using a sonic technique. *Journal of Food Science* 32:642-646.
6. Hykes, D. L., W. R. Hedrick and D. E. Starchman. 1992. *Ultrasonic Physics and Instrumentation*. Missouri: Mosby-Year Books Inc.
 7. Mizrach, A., N. Galili and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Transactions of the ASAE* 32 (6):2053-2058.
 8. Mizrach, A., N. Galili, S. Ganmor, U. Flitsanov and I. Prigozin. 1994. Models for analyzing ultrasonic signal to assess avocado properties. ASAE Report No.94-G-032. St. Joseph, MI:ASAE.
 9. Mohsenin, N. N. 1970. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. New York. N. Y. : Gordon and Breach Science Publishers.
 10. Pinder, A. C. and G. Godfrey. 1993. *Food Process Monitoring Systems*. London: Blackie Academic & Professional.
 11. Sarkar, N. and R. R. Wolfe. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Transactions of the ASAE* 26(2) 624-629.
 12. Upchurch, B. L., E. S. Furgason and G. E. Miles. 1985. Spectral analysis of acoustical signals for damage detection. ASAE Paper No.85-6014. St. Joseph, MI:ASAE.

收稿日期：2005年6月23日

修改日期：2005年8月30日

接受日期：2006年2月7日