

# 可攜式牛肉熟成評估裝置之研製

杜翌群、\*石正邦、許幟帆

南臺科技大學電機工程系

ma320211@stust.edu.tw

## 摘要

受限於國內飼養條件，目前台灣牛肉的產量約為 6 至 7 千公噸，導致牛肉來源多以進口方式為主。由於進口牛肉需長時間的運輸，運輸過程的冷藏溫度與牛肉熟成的監控相當重要；除了確保品質外，良好的濕式熟成也能提升牛肉的嫩度與風味。近年許多文獻指出，牛肉的熟成可藉由組織纖維結構及生物阻抗特性的改變來監控，因此本研究將利用生物阻抗及彈性量測技術，建立一套可攜式牛肉熟成評估裝置。透過組織彈性量測機構，記錄按壓時的壓力與形變量，並進一步推算出楊氏模量。同時利用生物阻抗量測模組，評估阻抗模型的變化量。在進行連續 7 天的量測觀察中發現，隨著熟成的時間增加，裝置所量測的生物阻抗與組織彈性都有顯著的下降。在進一步的阻抗模型分析中，又以細胞外液的阻值具有決定性的阻抗量測影響；且分析模型對於額外的水分添加，也能有效區分出來。實驗證明本研究所開發的量測裝置具有評估牛肉熟成的潛力，未來希望能商轉為一低成本的牛肉熟成度評估裝置，讓消費者在購買牛肉時更加安心。

**關鍵詞：**可攜式裝置、生物阻抗量測、彈性量測機構

## Development of a Portable Device for Maturation Evaluation of Beef

Yi-Chun Du, Jheng-Bang Shih\*, Zhi-Fan Xu

Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

### Abstract

Due to limitations in Taiwan's beef raising conditions, the domestic beef production is only about 6,000 to 7,000 tons, leading to reliance on import for beef supply. Since importing beef involves long transportation, the monitoring of refrigeration temperatures and beef aging during transportation is very important in Taiwan. In addition to ensuring beef quality, proper wet aging could also improve beef tenderness and flavor. Many research reports in recent years indicate it is possible to monitor beef aging based on changes in the tissue fiber structure and bioimpedance caused by beef aging. Therefore, a portable device for beef aging assessment was developed in this study, built using bioimpedance and elasticity measurement technologies. With a mechanism for tissue elasticity measurement, pressure imposed while pressing the tissue and associated deformation were recorded for further estimation of Young's modulus. At the same time, variance in the impedance model was also assessed via a bioimpedance measurement module. During the measurement and observation for 7 consecutive days, it was found that both the bioimpedance and tissue elasticity measured by the device dropped significantly as the aging time increased. In a further impedance modeling analysis, impedance from extracellular fluids had a decisive effect on the level of impedance. The analysis model could also effectively discriminate extra added water. The experimental results prove that the measurement device developed in this study has the potential to assess beef aging. The device can be expected to be turned into a low cost device for beef aging detection in the future that

Received: Aug. 4, 2017; first revised: Sep. 28, 2017; accepted: Oct, 2017.

Corresponding author: J.-B. Shih, Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 71005, Taiwan.

can make consumers more reassured while purchasing beef.

**Keywords:** Portable Device, Bioimpedance Measurement, Elasticity Measurement Mechanism

## 壹、前言

在早期台灣務農年代，牛肉並不是台灣人主要的肉類消費市場。然而隨著科技進步，改變了對牛肉的營養價值和特殊風味認知，台灣牛肉市場需求已呈現增長的趨勢(行政院農委會，<http://www.coa.gov.tw>)。其中由於國內飼養條件受限，導致國產牛肉產量極少，平均每年僅有 6 至 7 千公噸。反觀進口牛肉在國外當地擁有絕佳的飼養條件，能提供數倍的產量，其進口牛肉量則每年可高達 8 至 9 萬公噸(中央研究院，<http://www.rchss.sinica.edu.tw>)；因此台灣牛肉市場多年來，進口牛肉占有 94% 高比例，而國產牛肉則僅有 6% 比例。目前臺灣所進口的牛肉，由於需較長的時間運輸來台，因此當地業者會透過熟成方式，來延長牛肉的冷藏保鮮壽命及確保品質。此外因為牛隻屠宰後，其肌肉纖維將會逐漸開始緊繃，直到屠宰後 6 至 12 小時後完全僵硬，而透過熟成的方式，同時也可提高牛肉的嫩度及風味。並根據研究指出熟成後的第 2 周至第 3 周，牛肉的嫩度可達最佳狀態，稱之為黃金周期；其中第 1 天至 7 天，更是熟成期間的關鍵期，如圖 1 所示[1]。熟成方式又可分為濕式熟成與乾式熟成兩種，分別代表不同的保存方式，但由於乾式熟成製程繁雜，成本過高，致使當今進口牛肉多以濕式熟成為主。其濕式熟成是指，將牛肉進行真空包裝，並放置在恆溫恆濕的環境中，利用牛肉本身的天然酵素行熟成作用。

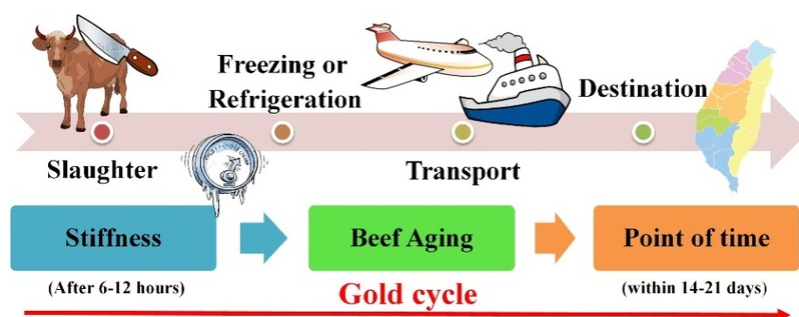


圖 1 牛肉熟成週期圖

而根據研究指出，隨著牛隻屠宰後的時間變化，其組織特徵也會跟著改變。其中肉的組織細胞中約有 70% 的流體，分佈在細胞內及細胞外，其兩者流體都是含有能夠傳輸自由離子電荷的電解質[2]。然而熟成期間的酵素作用，將因此改變離子濃度，同時反應出可觀察的阻抗變化，如圖 2(a)所示。此外當牛隻屠宰後，其呼吸與循環系統停止作用，導致肌肉轉變為缺氧狀態。而肌肉纖維中的細肌絲與粗肌絲所形成的肌節，則因缺乏氧氣供給而無法分離，進入緊繃的收縮狀態；同時熟成期間的酵素作用，也將崩解纖維結構，使得肌肉纖維逐漸軟化，如圖 2(b)所示[3]。

目前已有許多的量測技術導入生物組織研究中，在 2013 年 Mahdi Guerhazi 學者等人，透過阻抗頻譜分析儀及環型電極對牛肉組織進行連續 14 天的測量[4]，並同時探討當感測器由不同角度插入組織時的抗的變化趨勢，實驗結果顯示由 90° 插入電極量測是最具重現性的，並可達到較均勻的電場分佈及強度，其中電極與組織纖維的接觸增加，使得電流更容易通過纖維而有更精準的量測；該團隊另外在 2014，利用成年牛(beef)與食用小牛(veal)兩種不同的組織成分，分別進行 14 天的實驗量測，並將牛肉存放於 2°C 的冷藏室以確保相同的實驗條件，其實驗中透過感測器(探針)插於牛肉組織上，經由阻抗頻譜分析儀進行量測，其掃描頻率為 40Hz 至 110MHz，最後再將量測結果傳輸至電腦端進行牛肉熟成老化與阻抗變化之間的關係性[5]。

另外，近年來已有研究學者利用微控制器與阻抗量測晶片，開發可攜式的阻抗量測裝置，並應用於生物組織的研究上。2013 年 Zhao Heng 學者等人，透過微控制器系統及阻抗量測晶片，研發一套可攜

式的阻抗量測裝置所示。其目的是藉由阻抗的量測，進而探討相關參數的量測結果，同時證明可攜式裝置的可行性。實驗中微控制器系統經由 C51 語言編譯程式，與阻抗量測單晶片進行溝通，解調所傳輸的串列資訊，最後再藉由公式轉換計算出阻抗值[6]。綜觀上述，目前阻抗量測技術雖然已經發展成熟，且可攜式裝置與以往阻抗頻譜分析儀相比，不僅可降低成本，同時也解決了儀器笨重龐大問題，更可進而提高阻抗量測技術的實用性。因此，本研究目的為研發一套可攜式量測裝置，並提供可靠的熟成度檢驗，對於熟成牛肉品質將能大大提升。

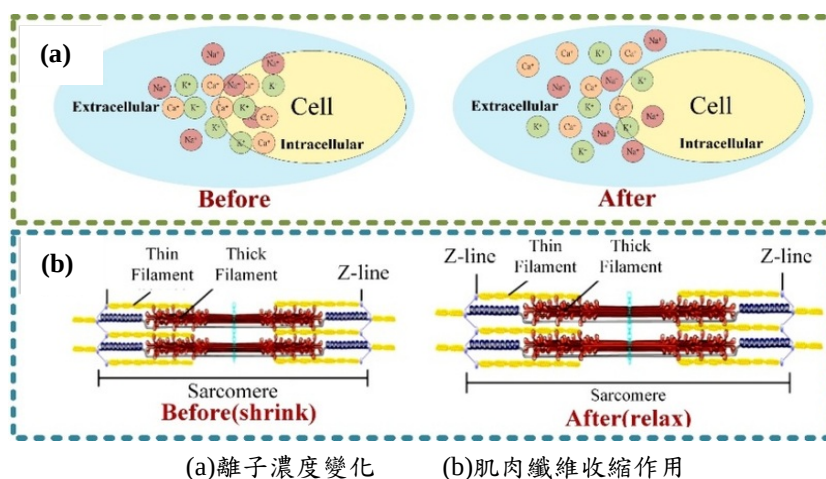


圖 2 牛肉在熟成期間之生物阻抗變化原理示意圖

## 貳、研究目的

臺灣的進口牛肉大多是透過空運或船運送達臺灣，並經過海關提領後送至各家業者販售，使得進口牛肉在長時間的運輸過程中，牛肉熟成品質的監控顯得格外重要。其中進口牛的船運長達 16 至 25 天，空運則仍有 5 至 15 天，而在運輸途中具有恆溫恆濕的冷藏設備及真空包裝儲存，但這只為能確保牛肉在運輸期間，不會因外在環境而影響品質。當今並無在牛肉運送期間的相關熟程度檢驗，可提供牛肉熟成狀態的資訊，導致如今並沒有一套可靠的熟程度檢驗方式，可替消費者把關。

有鑒於此，本研究將藉由在牛肉熟成期間，量測其阻抗及彈性的變化，以提供一套可靠的熟成度檢驗方式。本研究所研發出的牛肉熟成度阻抗與彈性的可攜式量測裝置，透過本團隊所設計出的量測組織彈性的機構設計，可在分析組織中生物阻抗的變化期間，同時評估在按壓組織與組織形變量之間的比值關係；並藉由阻抗與彈性這兩項重要參數，進而分析相關的組織特徵信息，如圖 3 所示。



圖 3 可攜式裝置架構





## 二、生物阻抗量測分析

本研究阻抗量測單晶片是選用 analog devices 所設計生產的 AD5933 單晶片，其優點為體積小、精準度高及省電之優勢，同時輸出頻率最高可達 100kHz，適用於本研究的頻率使用範圍。此外還可透過前置放大電路 AD8606，將阻抗量測範圍擴增於 100Ω 至 10MΩ 之間，而本研究生物阻抗的變化範圍約在 100Ω 至 1KΩ，因此將可藉由 AD5933 達到精準的量測。

而本研究阻抗計算可分為幅度(magnitude)、增益因子(gain factor)及阻抗(impedance)3 個部分。首先於量測待測物前，需經由校正電阻(feedback resistor)進行校準量測，進而取得增益因子，同時儲存於單晶片暫存器中，如公式 1 所示。其增益因子為整體阻抗量測準確度的關鍵參數，並可透過增益因子將量測誤差率降低至小於 5%；而當量測待測物時，將再藉由增益因子與幅度進行運算，計算出阻抗值，如公式 2 所示。其中幅度是由每次量測所得的實部及虛部數組計算而成，如公式 3 所示，因此如公式 1 與公式 2 的幅度皆代表著不同的數值。

$$Gain\ Factor = \frac{1}{\frac{Feedback\ resistor}{Magnitude_{(GF)}}} \quad (1)$$

$$Impedance = \frac{1}{Gain\ Factor \times Magnitude} \quad (2)$$

$$Magnitude = \sqrt{Real^2 + Imaginary^2} \quad (3)$$

此外為了更進一步討於熟成期間，其牛肉組織整體阻抗的變化因素。本研究將藉由 AD5933 單晶片所提供的實部、虛部數組及阻抗的計算結果，進一步推導 RC 生物細胞模型進行分析，如圖 6 所示[6]。其中實部、虛部的相位，可經由單晶片所計算之正負符號分為四個象限，如表 1 所示。在經由相位判別後，可藉由公式轉換求得相位角，如公式 4 所示。然而當取得相位角後，便可再透過電導、電容納公式，分別求出細胞液 Re 及細胞模 Cp，如公式 5、6 所示；其中 Y 為阻抗導數，Xc 為容抗。

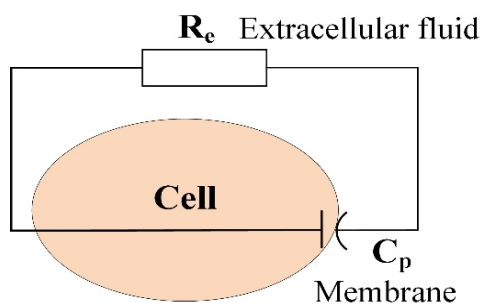


圖 6 生物細胞模型圖

$$\tan^{-1}(Imaginary / Real) \times \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4)$$

$$G = Y \times \cos \theta, G = \frac{1}{R} \quad (5)$$

$$Bc = Y \times \sin \theta, Bc = \frac{1}{Xc}, C = \frac{1}{\omega Xc} \quad (6)$$

表 1 相位角轉換表

| Real     | Imaginary | Quadrant | Phase Angle                                                                            |
|----------|-----------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Positive | Positive  | First    | $\tan^{-1}(\text{Imaginary} / \text{Real}) \times \frac{180^\circ}{\pi}$               |
| Negative | Negative  | Second   | $180^\circ + [\tan^{-1}(\text{Imaginary} / \text{Real}) \times \frac{180^\circ}{\pi}]$ |
| Negative | Positive  | Third    | $180^\circ + [\tan^{-1}(\text{Imaginary} / \text{Real}) \times \frac{180^\circ}{\pi}]$ |
| Positive | Negative  | Fourth   | $360^\circ + [\tan^{-1}(\text{Imaginary} / \text{Real}) \times \frac{180^\circ}{\pi}]$ |

### 三、組織彈性量測評估

本研究壓力感測器是選用 Uneo Inc 公司設計生產的 GD25 感測器。此顆感測器是採用印刷技術製作於軟性基板，可完全貼合於彎曲表面。此外壓力感測範圍可從 0N 至 100N，擁有絕佳的環境耐熱性與抗水性；在極端條件下仍可準確量測，呈現線性反應變化，因此非常適用於可攜式量測裝置的研發。其中壓力感測電路是採用阻抗匹配的設計方式，其壓力感測器本身代表著一可變電阻  $R_s$ ，透過選用適當倍率的電阻  $R_1$  作為阻抗匹配。當使用者施力於感測器時，將導致  $R_s$  電阻值的變化，進而改變  $R_1$  電阻所分壓的電壓大小，此時便可藉由 MCU 中的 A/D 轉換器讀取節點  $V_2$  的電壓值，並計算出施力值(force)的大小，如圖 7 所示。

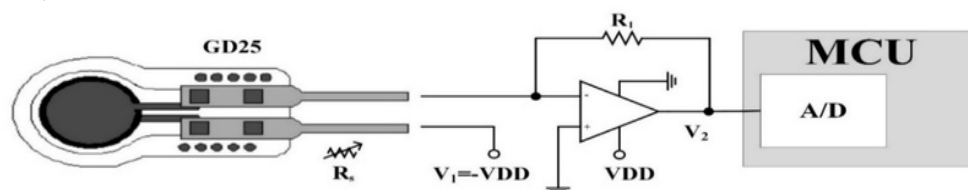
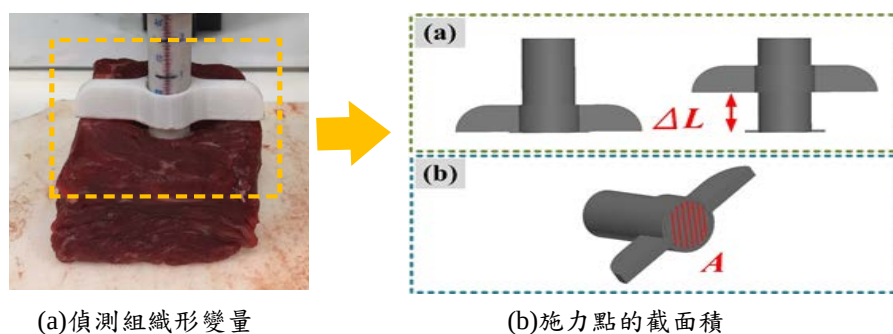


圖 7 壓力感測器之阻抗匹配電路設計

本研究裝置的機構設計，是透過 SolidWorks 繪圖軟體設計，並經由 3D 印表機列印而成。而本研究機構設計，除了包裝電路板外殼功能外，同時也是量測組織彈性的一項重要機構設計。其偵測組織形變量方法為，透過機構壓按組織時，兩旁的水平翅膀，將隨著組織表層的碰觸而上升，進而可觀察出組織的形變量  $\Delta L$ ，如圖 8(a)所示。而在得知組織的形變量後，便可藉由壓力感測器所讀取的施力大小  $F$ ，依據公式(7)計算出組織的彈性-楊氏模量( $E$ )，其中  $A$  為施力點的截面積，如圖 8 (b)所示。

$$\text{Young's modulus}(E) = \frac{F / A}{\Delta L} \quad (7)$$



(a)偵測組織形變量

(b)施力點的截面積

圖 8 本研究之彈性量測示意圖與楊氏模量原理

## 肆、實驗設計與結果

本研究為了探討牛肉在熟成過程中，其生物阻抗及組織纖維結構的變化，分別設計(A)阻抗量測及(B)彈性量測兩項實驗進行量測分析；同時也將藉由本實驗結果，來證明可攜式量測裝置的可行性及準確度。

本實驗所使用的牛肉，是選用年齡約為 18 個月至 24 個月的成年食用牛(黃牛)，並經由台南縣肉品市場屠宰取得。此品種深受當地民眾喜愛，除了價格經濟實惠外，肉質口感也是廣受大家讚許。因此本研究將透過此品種進行相關的實驗，以提高本研究對於臺灣牛肉市場的貢獻。其中牛肢部位是選擇里肌肉(rib)及後腿肉(round)兩種。里肌肉脂肪含量高、肉質鮮嫩，為常見的牛排製作部位；後腿肉則是纖維密度高、韌性強，烹飪方式通常為炒或滷製。然而本研究之所以選用兩種纖維差異性較大的部位，是希望藉由熟成期間的實驗量測，同時可進一步探討不同部位於熟成下的組織變化。其本實驗共量測了 20 組的牛肉實驗樣本，分別為 10 組里肌肉及 10 組後腿肉，如圖 9 所示。

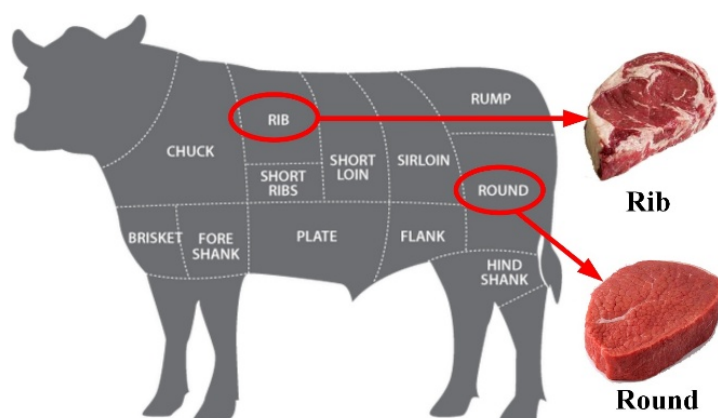


圖 9 牛肉部位的選用

其牛肉實驗樣本是經由屠宰場當天宰殺，並於 6 至 12 小時內取得新鮮牛肉，同時裁切相同的大小及厚度；進而透過真空機進行真空包裝，存放於恆溫 4°C 的冰箱內進行濕式熟成。而在每次實驗量測前，則需將牛肉放至室內回溫，以避免溫度影響而導致量測的誤差，如圖 10 所示。而本研究之所以選擇濕式熟成進行實驗，是因為當今進口牛肉中，濕式熟成牛肉佔據了多數的比例，因此未來將可藉由本研究對進口牛肉提供更可靠的熟程度資訊。

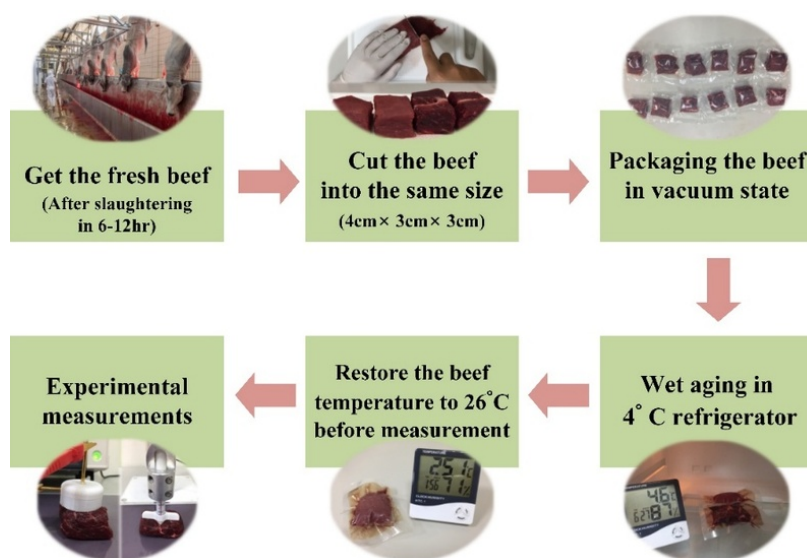


圖 10 本實驗所選用之牛肉部位的熟成流程

## 一、阻抗量測實驗與結果

本研究阻抗量測實驗，主要目的是為了分析牛肉在熟成過程中，其阻抗的變化趨勢，同時對熟成牛肉進行連續 7 天的實驗量測。實驗中將透過可攜式量測裝置之針型電極，插入牛肉組織中，對熟成牛肉導入 10KHz 的頻率進行量測，並觀察其阻抗細微的變化，如圖 11 所示。此外本研究利用生物細胞模型對整體阻抗變化的趨勢，做更進一步分析探討。其量測時間為 1 天 1 次，而量測樣本數量為里肌肉及後腿肉各 10 組。

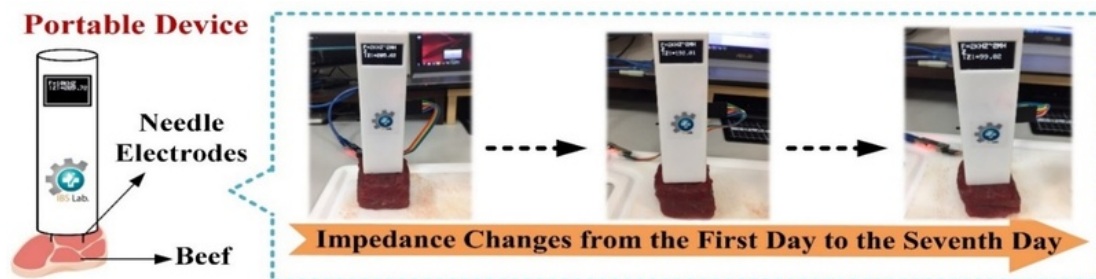


圖 11 阻抗量測實驗圖

### (一) 阻抗的變化趨勢

本實驗分別將 10 組里肌肉及 10 組後腿肉的量測結果，經由加總平均後求出下降趨勢，其根據實驗結果顯示，在不同的牛肉部位中，阻抗的變化趨勢也隨之不同，如圖 12 所示。首先探討整體阻抗值的大小，其中組織纖維粗厚的後腿肉阻抗值明顯較高，相對的里肌肉則較低。再來是阻抗變化與天數的關係，由結果可以觀察出隨著熟成時間的增長，兩種部位組織皆呈現下降的趨勢，成功證實了熟成作用確實造成了離子濃度的改變。其中又以第 2 天至第 4 天最為顯著，透過結果可以推估組織中微生物在此期間生長代謝最劇烈，因此產生帶電分子導致導電率上升，進而影響阻抗值的大幅下降；直到後期變化率呈現較穩定狀態時，則可能為細胞反應的結束，同時也可能代表著整體熟成周期進入穩定狀態。

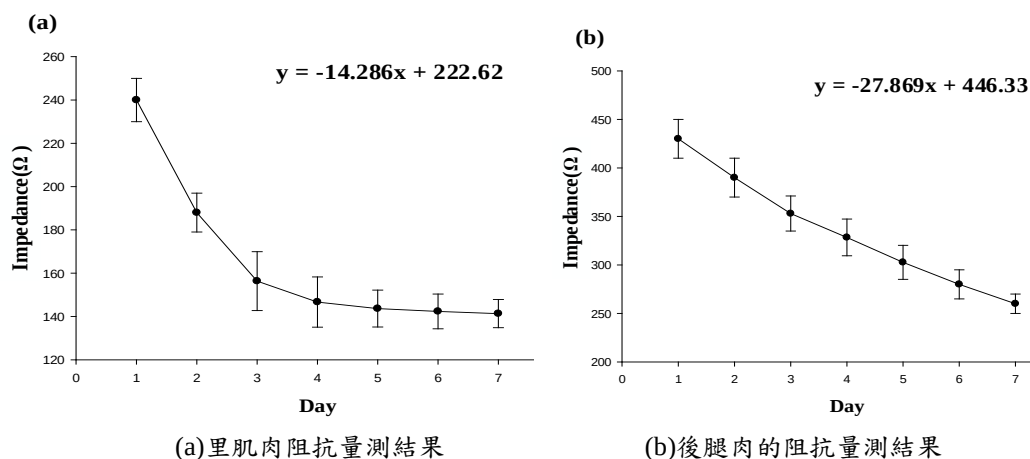


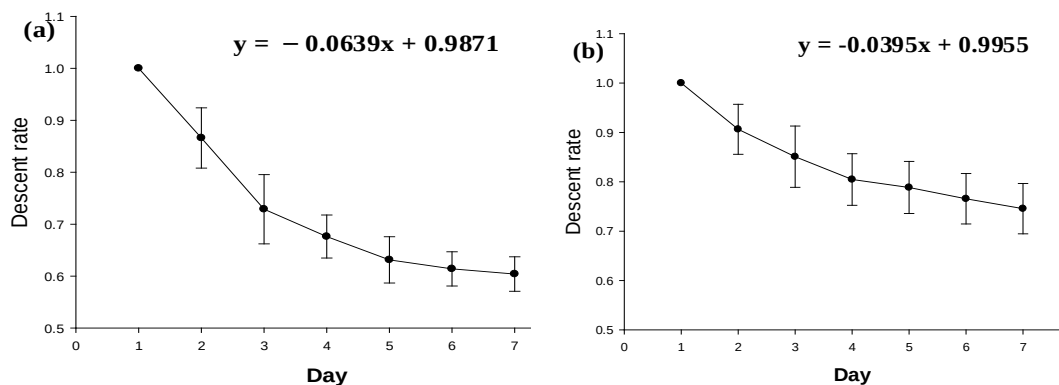
圖 12 本實驗所選用之兩種肉經 7 天的生物阻抗結果

### (二) 生物細胞模型的分析

然而為了探討熟成期間影響總阻抗值的因素，本研究進一步使用阻抗分析儀(LCR-IM3570, Hioki, Koizumi Ueda, Japan)分析了生物細胞模型中  $Re$  與  $Cp$  的變化。其中數據統計與阻抗分析相同，分別將 10 組里肌肉及 10 組後腿肉的量測結果，在經由加總平均後求出下降趨勢；並以第 1 天的量測結果為基準，透過每天的量測求出與第 1 天的比值關係，進而求得下降率，如圖 13-14 所示。從兩元件在熟成期間的變化中，可以看出兩種組織的  $Re$  都呈現較高變化速率，其變化原因將是熟成期間肌肉組織的嫩化作用所



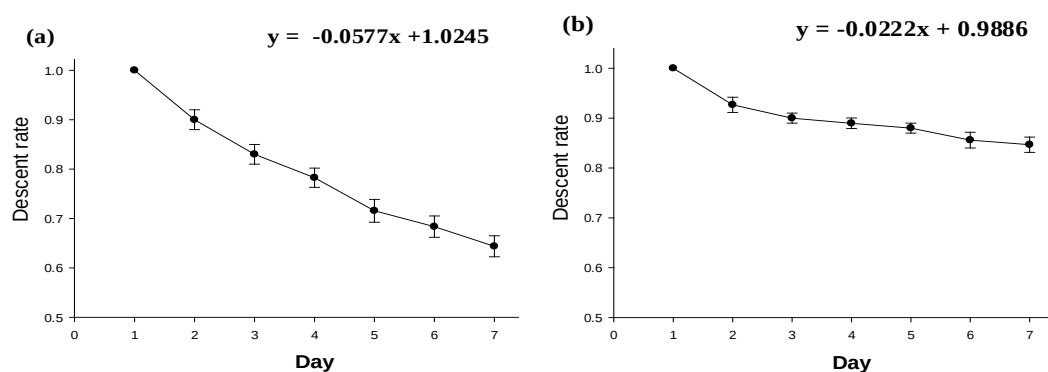
導致，造成組織中產生較多的自由離子，影響 Re 的變化。因此在生物細胞模型的探討結果，將熟成阻抗的變化歸咎於 Re 值的改變；反觀 Cp 則出現較低的變化速率，這是由於 Cp 值只有奈米等級的大小，相較於 Re 而言，其影響力較小。此外，透過結果也發現兩種部位組織相比，里肌肉變化速率顯著高於後腿肉，從中可觀察出熟成作用對於里肌肉是具有較高的嫩化作用。



(a)為里肌肉 Re 下降率

(b)為里肌肉 Cp 下降率

圖 13 里肌肉在熟成期間之 Re 與 Cp 影響結果



(a)為後腿肉 Re 下降率

(b)為後腿肉 Cp 下降率

圖 14 後腿肉在熟成期間之 Re 與 Cp 影響結果

## 二、彈性量測實驗與結果

另一方面是評估熟成期間，牛肉組織的彈性變化趨勢。實驗中透過可攜式量測裝置的夾具，施加固定的力量於牛肉表層組織上，同時藉由機構設計偵測出組織的形變量，最後再依據公式(7)計算出楊氏模量的變化，如圖 15 所示。其實驗條件與阻抗量測實驗一致，量測時間為 1 天 1 次，量測樣本數量為里肌肉、後腿肉各 10 組共 20 組。

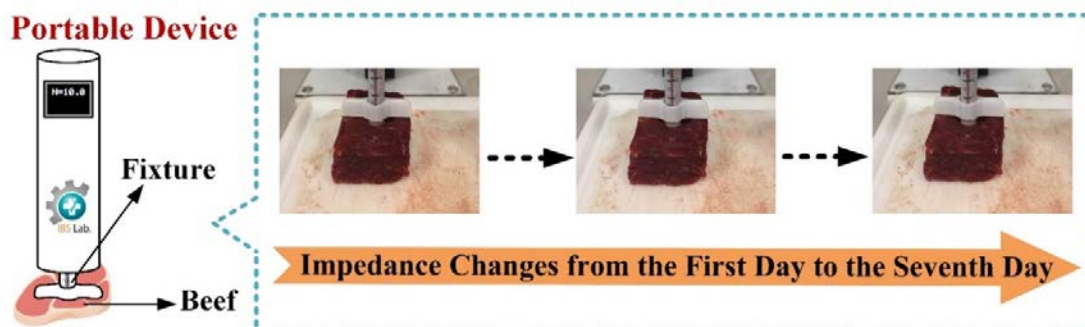
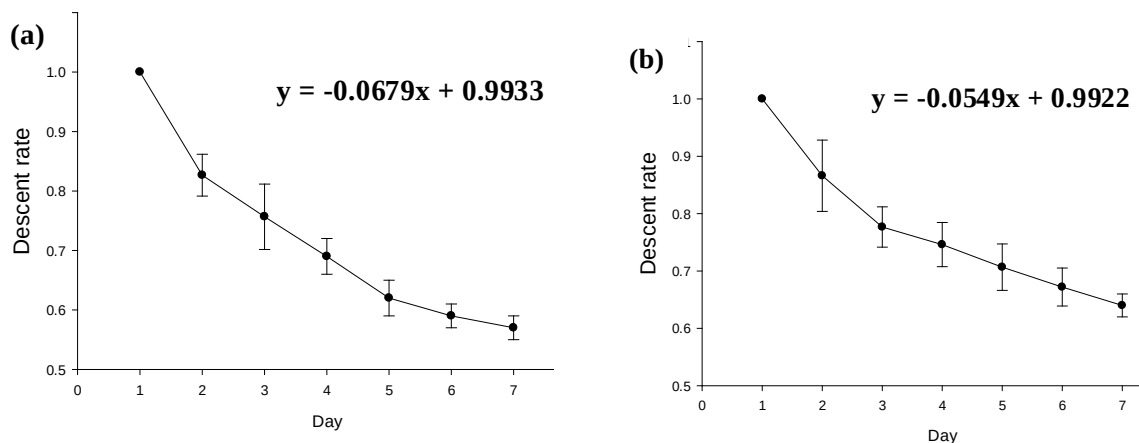


圖 15 彈性量測實驗架構圖

在彈性量測結果的部分，分別將 10 組里肌肉及 10 組後腿肉的量測結果各別求出平均下降趨勢後，並利用第 1 天的量測結果做為該組織的彈性基準，依序每天的量測結果分別求出每天的下降率，其彈性下降率結果如圖 16 所示。由結果可發現，兩種不同組織的量測結果，都是隨著熟成期間而有下降趨勢，其中兩種組織所換算出的楊氏模量如表 2 所示。以肉質較嫩的里肌肉的整體楊氏模量下降  $5.47(\text{N}/\text{cm}^3)$ ，而肉質較粗老的後腿肉則下降  $7.92(\text{N}/\text{cm}^3)$ 。且從彈性實驗結果可以觀察出，雖然不同的組織在熟成其間，是呈現較大的楊氏模量差異，但於熟成作用下卻是反應出相似下降速度與下降量。因此可得知隨著熟成時間變長，組織楊氏模量都會隨著下降。



(a)為里肌肉彈性量測結果

(b)為後腿肉的彈性量測結果

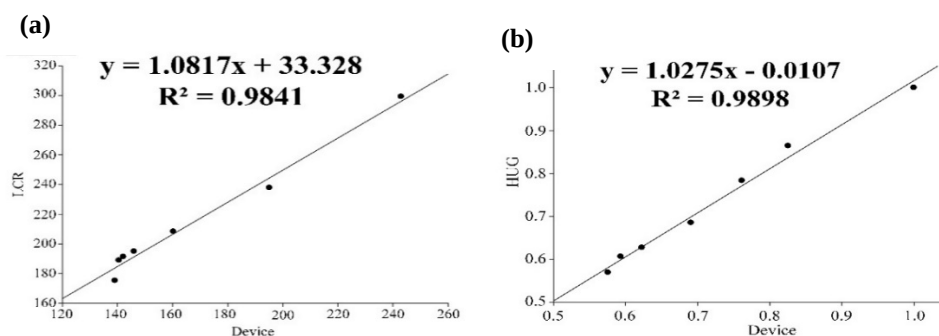
圖 16 本研究所選用兩種肉之彈性量測結果

表 2 里肌肉與後腿肉的下陷量與下降率比較表

| Young's Modulus ( $\text{N}/\text{cm}^3$ ) | Day1  | Day7  | Value of changes | Rate of Changes |
|--------------------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------|
| Rib                                        | 14.34 | 7.72  | 6.62             | 0.54            |
| Round                                      | 19.75 | 11.83 | 7.92             | 0.60            |

## 伍、結論與討論

為了驗證本研究可攜式量測裝置的可行性與準確度，並同時透過阻抗分析儀與推拉力計(HFG-HF, ALGOL, Taiyuan City, Taiwan)測試系統進行實驗量測，並選用熟成期間反應較為顯著的里肌肉來做比較。從與兩者的比較結果中可以觀察出，雖然可攜式量測裝置在準確度上相較專業的 LCR 有些微誤差，但整體的變化趨勢仍保有高度的相關性，如圖 17 所示。顯示本研究所開發的可攜式裝置，應用於牛肉的熟成的檢測上，有一定程度的可行性。



(a)為 LCR 與可攜式裝置相關性比

(b)為拉壓力計與可攜式裝置相關性比較

圖 17 本研究裝置與市售儀器之比較結果

此外，近年來有不肖業者為了提高牛肉販賣利潤，於牛隻活體時強行灌水以增加販賣重量，導致熟成牛肉潛在感染及腐敗的問題。而本研究已對灌水牛問題做了初步的實驗，在實驗中透過針筒施打食鹽水於熟成牛肉中進行量測，進而觀察其注射前與注射後的阻抗變化。而實驗從結果中發現，經灌水後的熟成牛肉，細胞外電阻  $R_e$  呈現顯著的下降趨勢，反觀細胞膜電容  $C_p$  則無顯著的變化趨勢。這項實驗顯示，透過生物細胞模型的外電阻及細胞膜電容的變化特性分析，可以獲得更多的組織特性，比單從生物組抗分析來的更加客觀；對牛肉組織的改變有更完整的評估，如圖 18 所示。雖然本研究目前所提出的手持式裝置，在掃頻分析細胞模型參數時，因環境與裝置微化所帶來的量測誤差，並無法如市售高價 LCR 一樣，推估出客觀的生物模型資訊。未來會繼續朝這方向努力，加入 EMI/EMC 保護電路與其他的系統整合單晶片，期待實現更完整的可攜式牛肉熟成評估裝置。

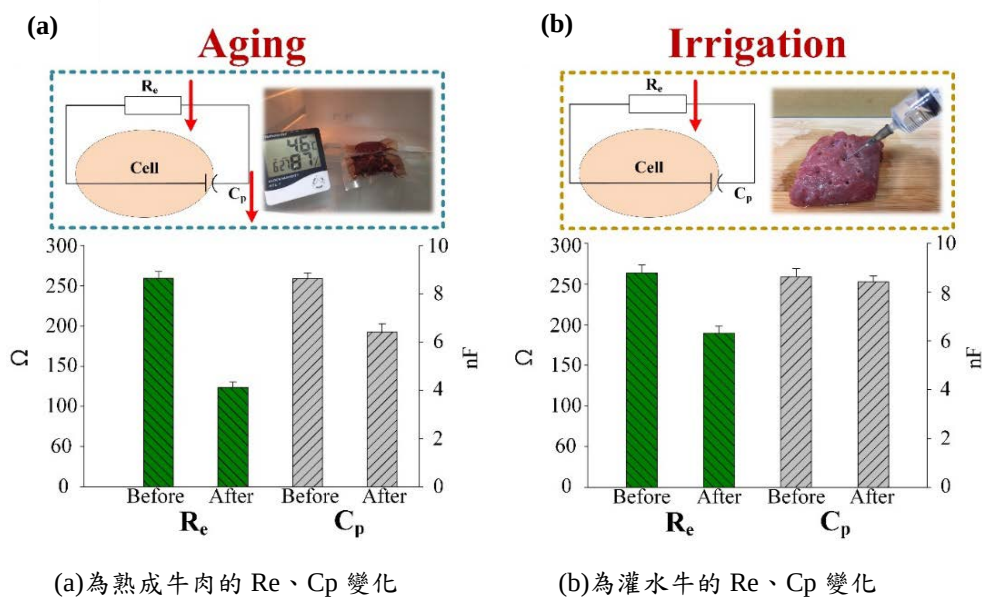


圖 18 正常熟成牛與灌水牛之  $R_e$ 、 $C_p$  變化趨勢

## 參考文獻

- [1] T. G. O'Quinn, D. R. Woerner, T. E. Engle, P. L. Chapman, J. F. Legako, J. C. Brooks, K. E. Belk, and J. D. Tatum. (2016). Identifying consumer preferences for specific beef flavor characteristics in relation to cattle production and postmortem processing parameters. *Meat science*, 112, 90-102.
- [2] O. G. Martinsen, and S. Grimnes. (2011). *Bioimpedance and bioelectricity basics*. Academic press.
- [3] B. Barua, A. Nagy, J. R. Sellers, and S. E. Hitchcock-DeGregori, S. E. (2014). Regulation of Nonmuscle Myosin II by Tropomyosin Isoforms. *Biophysical Journal*, 106(2), 568a.
- [4] M. Guermazi, O. Kanoun, and N. Derbel. (2013). Reduction of anisotropy influence and contacting effects in in-vitro bioimpedance measurements. In *Journal of Physics: Conference Series*, 434(1), 012058.
- [5] M. Guermazi, O. Kanoun, and N. Derbel. (2014). Investigation of long time beef and veal meat behavior by bioimpedance spectroscopy for meat monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 14(10), 3624-3630.
- [6] K. N. Wang, H. Zhao, and W. Wang. (2013). Design of a bioelectrical impedance spectrometer based on AD5933. In *Applied Mechanics and Materials*, 239, 392-396.