

臺北市112年度中等學校學生科學研究獎助
研究計畫作品說明書

組 別：高中組

科 別：物理科

編 號：P01

作品名稱：心「脆」的聲音—薯片脆度試驗

摘要

本研究旨在深入探討薯片的酥脆度與其斷裂時的聲壓、力量以及薯片的螢光光譜和拉曼光譜之間的關聯。透過將同款薯片放置於可調整濕度的恆溫恆濕試驗機中，我們分別設定了30%、40%、50%、60%和70%的五組不同濕度值，以模擬薯片在不同環境條件下的特性。在實驗過程中，我們使用了壓力感測器、麥克風感應器和拉力硬度試驗機的組合，對薯片進行斷裂實驗。在此過程中，我們同時記錄了斷裂時的聲壓頻譜和所需的壓斷力道，並根據這些數據建立了一個描述薯片酥脆度的圖表。此外，我們還使用3D 列印技術製作了模擬人類門齒和白齒的假牙，並進行了相同的斷裂實驗，以探討不同牙齒部位對薯片斷裂特性的影響。在光譜分析方面，我們已知溫度會對拉曼光譜和螢光光譜產生影響，因此我們特別關注濕度是否也會對這些光譜造成明顯的變化。經過一系列的量測，我們發現濕度變化的確對薯片的拉曼光譜和螢光光譜有所關聯。綜合上述，本研究不僅揭示了薯片的酥脆度與其斷裂時的物理特性之間的密切關聯，還為食品工業提供了有關薯片品質控制的寶貴資訊。透過這項專題研究計畫，我們學會了如何從日常生活中的有趣現象出發，運用科學的儀器、研究方法和參數來設計和執行實驗，驗證背後的科學原理，令我們更加深入地欣賞科學在日常生活中的應用和重要性。

壹、研究動機

隨著科技的迅速發展，網路購物已成為當代消費的主流。人們不僅可以輕易地在網路上尋找和購買自己喜愛的食物，還會在購買前參考其他消費者對於食物口感的評論，如“濃郁”、“厚實”或“酥脆”。然而，儘管市場上有眾多形容詞用以描述食物的脆度，我們卻缺乏一個精確的數值來量化這一特性。在進行初步的研究後，我們發現了“脆值”這一概念，它是用來描述產品脆度的一個量值，通常以重力加速度的倍數 G 來表示。但這種方法不僅計算複雜，成本也相對較高。因此，我們認為有必要設計一個更簡單、直觀且經濟的方法來量化食物的脆度。此外，我們還希望進一步探討薯片的濕度和成分組成比例是否會影響其脆度。同時，考慮到人體的生理結構，我們也想知道使用不同的牙齒部位壓碎薯片是否會改變人們對其脆度的感知。

貳、研究目的及研究問題

研究目的：本研究旨在量化人體對食物脆度的感知，並探討多種因素如何影響這一感知。特別是，我們關注濕度這一重要變因，並將其範圍定義為相對濕度30%至70%。我們希望通過分析薯片在不同濕度下的壓碎力道和聲音組成頻率的變化，來揭示其與脆度的關聯性。研究問題：1. 在斷裂瞬間的聲壓組成頻率是否會因溼度變化而不同？2. 在不同濕度下，薯片斷裂時所需的力道有何變化？3. 當薯片的濕度發生變化時，其成分和光學現象（如螢光和拉曼光譜）之間是否存在關聯性？4. 不同的牙齒部位（如門齒區和白齒區）壓碎薯片時，其聲壓和力量的變化又是如何的？

參、研究設計

為確保實驗的準確性和可靠性，我們採用了特定的研究設備，詳細列表如表一所示。在選擇薯片作為實驗樣本時，我們特別挑選了形狀和大小均一致的薯片，以消除其他可能的變數影響。為了確保薯片的脆度不受潮濕空氣的影響，我們將其儲存於防潮箱中。此外，每次進行實驗時，我們都會開啟一罐全新的薯片，以確保每次的實驗樣本都保持最佳的脆度狀態。

vernier LabQuest 3	麥克風感應器	硬度壓力試驗機	壓力感應器
			
品客薯片原味	恆溫恆濕試驗機	假牙模型	拉曼、螢光光譜量測系統
			

一、研究步驟

(一) 聲學研究：

本部分旨在探討薯片在不同濕度下的聲壓組成頻率變化。我們選擇了相對濕度範圍為30%到70%的薯片進行研究。將薯片放入恆溫恆濕箱中，調到欲測濕度，步驟如下：

1. 首先，將薯片放入恆溫恆濕試驗機中，設定所需的濕度。
2. 在硬度拉力試驗機上使用壓力感測器壓碎薯片，同時使用麥克風感測器記錄聲音

訊號。

3. 利用專業軟體對收集的數據進行分析，並生成相應的圖形。
4. 對聲壓數據進行傅立葉轉換以進一步分析。
5. 根據生成的圖形進行數據解讀和分析。

(二) 力學研究：

1. 本部分探討薯片在不同濕度和不同牙齒部位下的力學特性。步驟如下：
2. 將薯片放入恆溫恆濕箱中，調整到指定濕度。
3. 使用硬度拉力試驗機和壓力感測器壓碎薯片，同時記錄薯片斷裂前後的力量變化。
4. 利用專業軟體對收集的數據進行分析，並生成相應的圖形。

(三) 光譜研究：

1. 本部分旨在探討薯片在不同濕度下的光學特性。
2. 製備不同濕度的薯片樣品。
3. 使用405nm 螢光光譜儀量測薯片的螢光光譜。
4. 使用785nm 拉曼光譜儀量測薯片的拉曼光譜。
5. 對收集的光譜數據進行深入分析。

(四) 牙齒不同部位力學、聲學研究

以門齒區、臼齒區分別壓碎薯片，數據自壓力感測器一開始下降至壓碎薯片碎裂為止，比較使用門齒區和臼齒區壓碎薯片之力圖和聲壓圖差異。根據單顆牙齒測試時得出的5筆數據平均，門齒 (3.2 ± 0.5) 與臼齒 (2.6 ± 0.3) 力量實驗數值作為前測數據，帶入樣本數計算公式¹，計算出所需的樣本數量為各組至少11次，為確保實驗數據無誤差，取12個樣本數據，最後進行實際量測，步驟如下：

$$k = \frac{n_2}{n_1} = 1$$
$$n_1 = \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2/K)(z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2}{\Delta^2}$$
$$n_1 = \frac{(0.5^2 + 0.5^2/1)(1.96 + 0.84)^2}{0.6^2}$$
$$n_1 = 11$$
$$n_2 = K * n_1 = 11$$

$\Delta = |\mu_2 - \mu_1|$ = absolute difference between two means
 σ_1, σ_2 = variance of mean #1 and #2
 n_1 = sample size for group #1
 n_2 = sample size for group #2
 α = probability of type I error (usually 0.05)
 β = probability of type II error (usually 0.2)
 z = critical Z value for a given α or β
 k = ratio of sample size for group #2 to group #1

1. 將薯片放到硬度拉力試驗機上以裝上上排牙齒的壓力感測器向下壓向平台上固定住的下排牙齒，依序把薯片放置於門齒區和臼齒區處壓碎，過程中以麥克風感測器接收聲音訊號，同步量測薯片斷裂前後瞬間感測器所施予薯片的力量隨時間的變化。
2. 以軟體紀錄數據，並產生圖形，進行彙整與比較。

¹ [Sample Size Calculator \(clincalc.com\)](http://clincalc.com)

二、研究原理

(一) 傅立葉轉換 (Fourier Transform)：

傅立葉轉換是一種目前十分重要而且廣泛應用於各領域的數位訊號分析技術，當儀器測量所得的數位訊號為時間-振幅的數據時，可使用傅立葉轉換將此訊號轉換為頻率-振幅，從而進行此一訊號的頻率特性的分析，反之若有頻率-振幅的數據，可使用逆傅立葉轉換將其轉換為時間-振幅的數據。傅立葉轉換能把任意的時域 (time domain) 函數以數學方法轉換成頻域 (frequency domain) 函數，之複數形式傅立葉積分為：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

另外，傅立葉坐標 ω 為角頻率，有時可用 $2\pi f$ 來代替， f 為頻率。

(二) 拉曼散射：

當光線入射或穿透到介質時，絕大多數光子會遵守彈性碰撞的瑞利散射，反射出來的光子擁有和入射光完全相同的能量、頻率和波長。然而會有極小部分的光子在和介質碰撞之後，發生能量損失的非彈性碰撞後激發出和原入射光頻率或波長不同的散色光，此一效應即為拉曼散射 (Raman scattering)。入射光和散射光的頻率變化就取決於介質分子本身的特性，而頻率的差別則稱為拉曼位移 (Raman shift)，一般使用波數 (wave number)，即為波長倒數來表示，而訊號的強弱則稱為拉曼強度 (Raman Intensity)。所以不同介質材料會產生特定頻率散色光，依照此性質便可以鑑別出介質材料的組成分子。

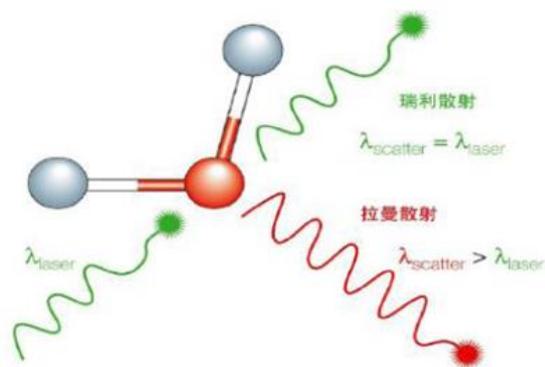


圖1、拉曼坐標軸²

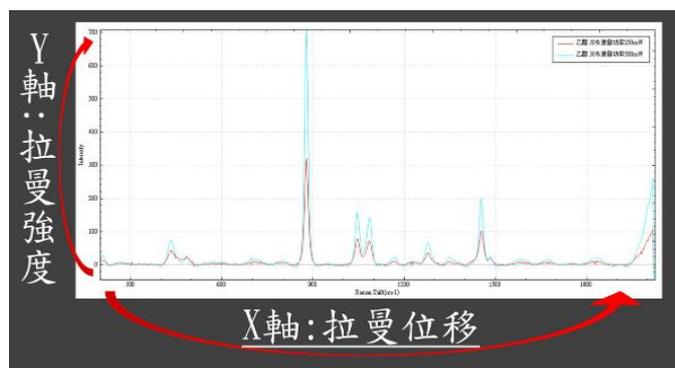


圖2、拉曼散射原理³

² 研之成理 (2017年8月22日)。Raman 知多少—Raman 基础知识介绍。2022年8月6日，取自 <https://zhuanlan.zhihu.com/p/28686981>

³ 喬哈斯科技。帶你認識拉曼光譜儀 (Raman) 的原理！2022年4月7日，取自 <https://www.johas.com.tw/laman/principle-of-raman/>

(三) 螢光光譜：

分子吸收適合能量的電磁輻射後，其價電子被激發而躍遷到較高的能階，一般有機化合物之電子都是配對的，形成單重態（single state）的基礎態或基態（ground state）；當電子躍遷到較高的能階時即激發態（excited state），躍遷電子的自旋態不改變時，激發態亦為單重態；躍遷電子的自旋態改變時，則形成三重態（triplet state）。

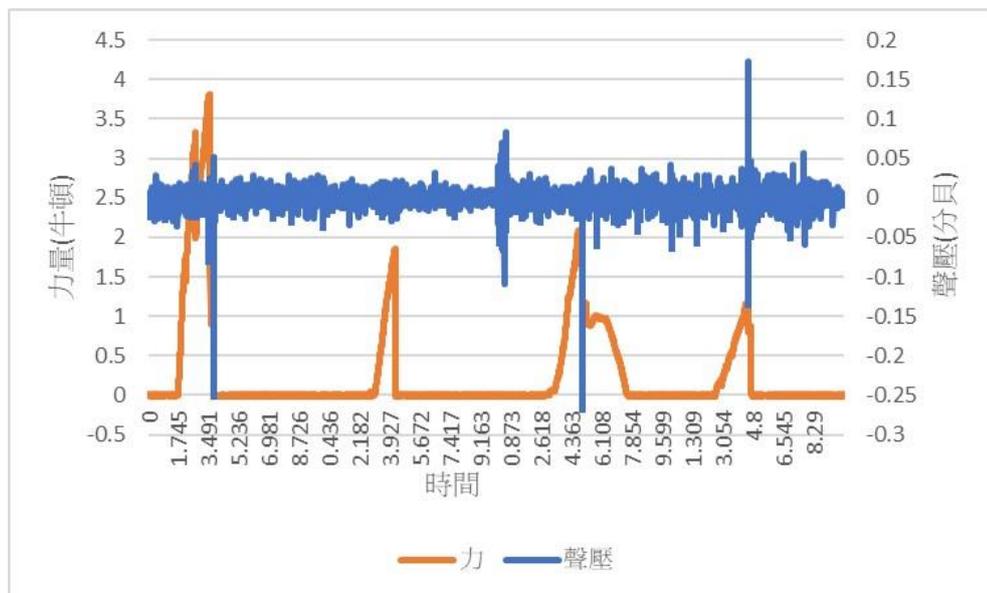
激發態高能階的電子有機會再發射出相同或較長波長的輻射，回到基礎態，吸收部份可見光的物質就會呈色。發射光與吸收光的波長相同者稱為共振螢光，而發射波長較長的輻射，則為一般的螢光（fluorescence）

肆、研究結果

一、不同濕度薯片壓碎聲壓的比較

(一) 以濕度30%與70%觀察濕度變化和組成頻率振幅的關係。

為了探討濕度對薯片斷裂時的聲壓組成頻率振幅的影響，我們選擇了兩個相對極端的濕度值：30%和70%，作為初步的比較基礎。在這兩個濕度下，我們各選取了4個薯片樣品進行實驗選取聲壓訊號最明顯處做傅立葉轉換，如下圖3。通過傅立葉轉換，我們分析了聲壓訊號的主要頻率成分，結果如圖4（1-4）、圖5（1-4）所示。從實驗數據中，我們觀察到濕度為30%的薯片在斷裂時主要呈現出低頻的聲壓組成，這意味著薯片在這一濕度下具有較高的脆度。相對地，當濕度提高到70%時，低頻的聲壓組成明顯減弱。這一現象可能與濕度的增加導致薯片的脆度降低有關，從而使得斷裂時產生的聲壓組成發生變化。



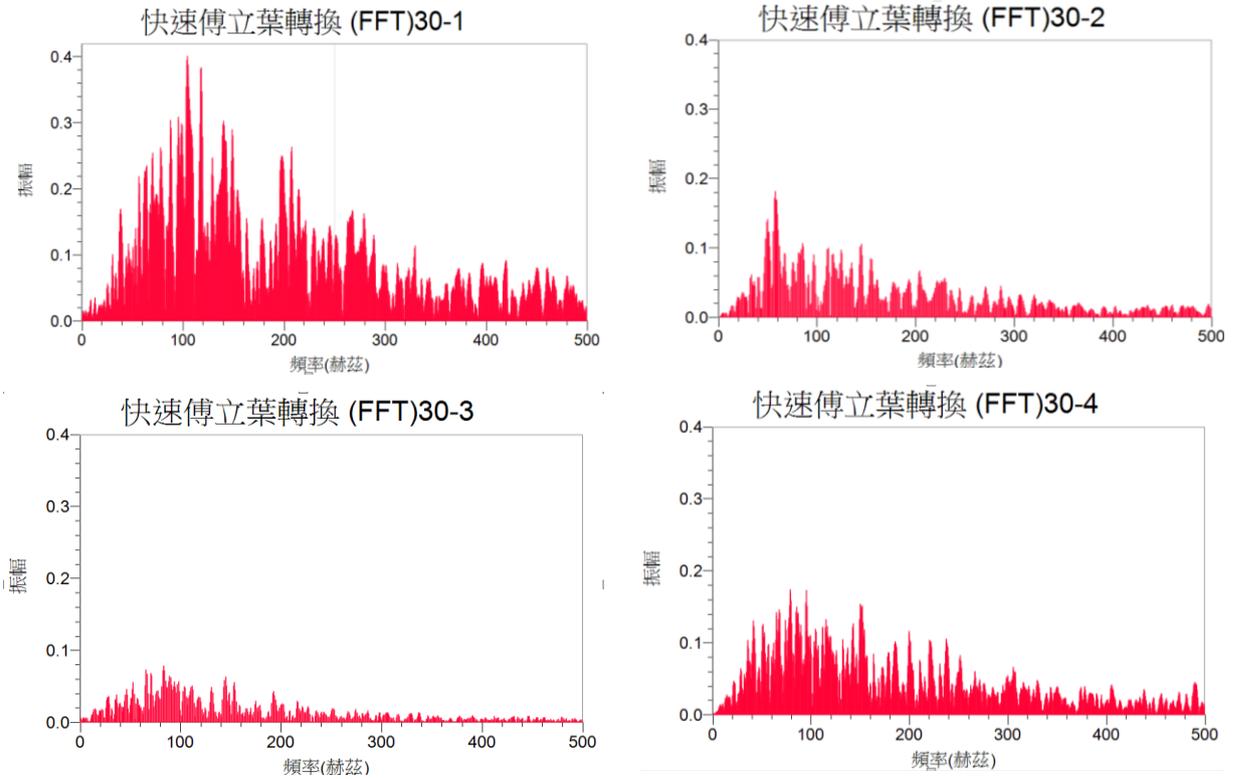


圖4 (1-4) 濕度30%薯片斷裂時的聲壓傅立葉轉換圖

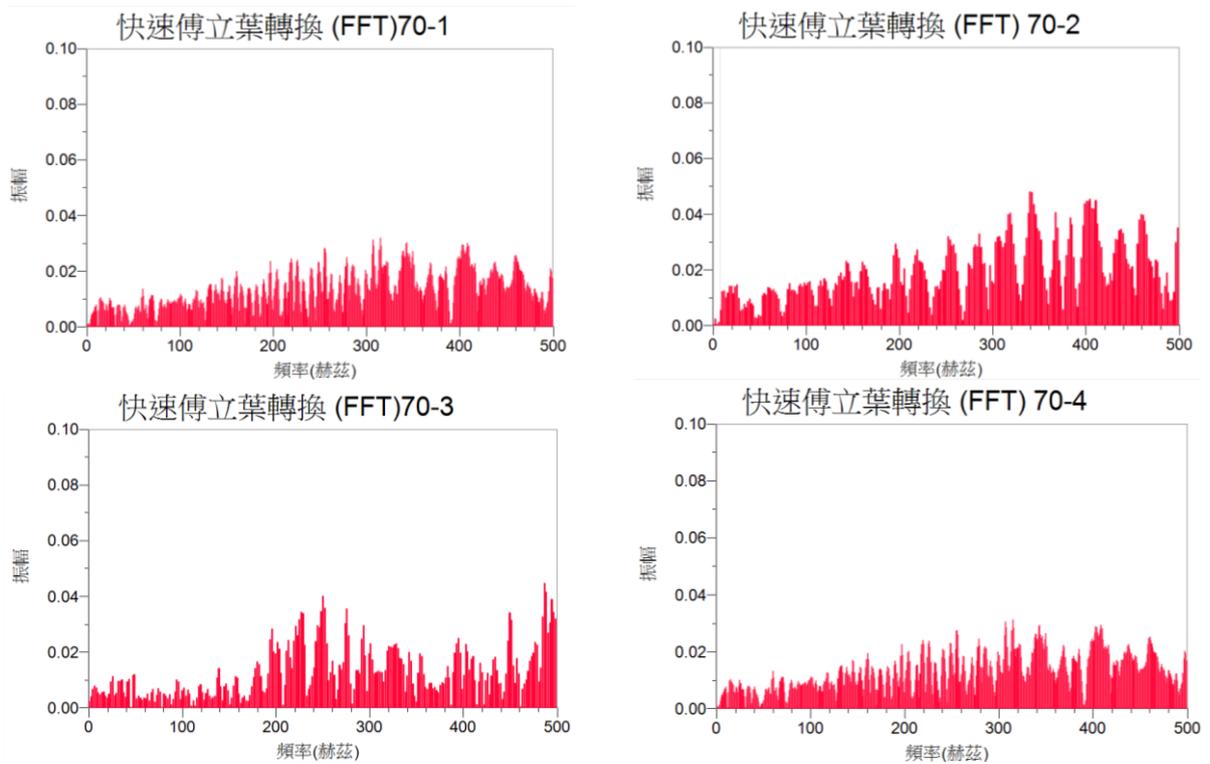


圖5 (1-4) 濕度70%薯片斷裂時的聲壓傅立葉轉換圖

(二) 濕度30%到70%的樣品：

在初步實驗中，我們已確認濕度對薯片斷裂時的聲壓組成有明顯的影響。基於此發現，我們進一步擴展了濕度範圍，從30%到70%進行了系統性的量測，結果分別展示在圖6至圖10中。從這系列的實驗中，我們觀察到一個明確的趨勢：隨著濕度的增加，薯片斷裂時的低頻聲壓組成逐漸減弱。這一現象可能與濕度對薯片物理性質的影響有關，例如其硬度和彈性。當濕度較低時，薯片的脆度較高，因此斷裂時的低頻聲壓組成也較為明顯。相反，當濕度增加，薯片變得較為柔軟，導致低頻聲壓組成的強度減弱。這一結果進一步確認了人體在咀嚼食物時，所感受到的脆度與食物斷裂時產生的低頻聲壓組成有著密切的關聯。

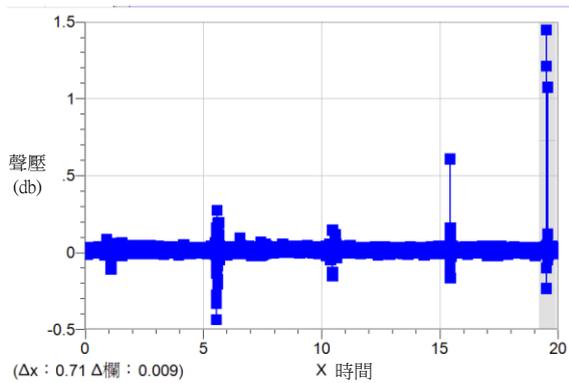


圖6-1 溼度30%的薯片壓斷聲壓波形

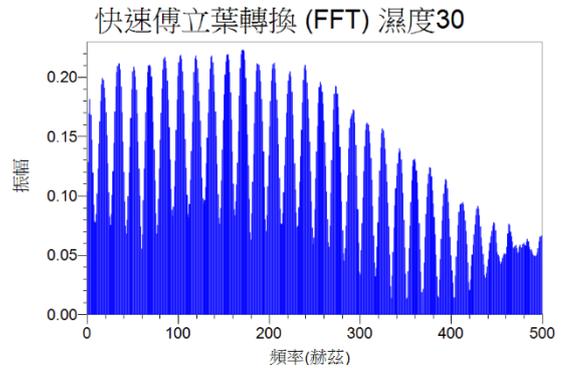


圖6-2 所選取波形之傅立葉轉換圖

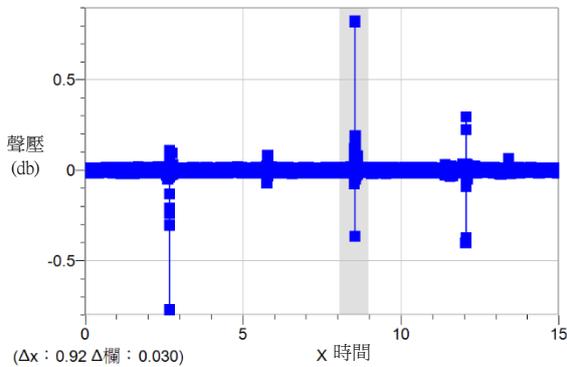


圖7-1 溼度30%的薯片壓斷聲壓波形

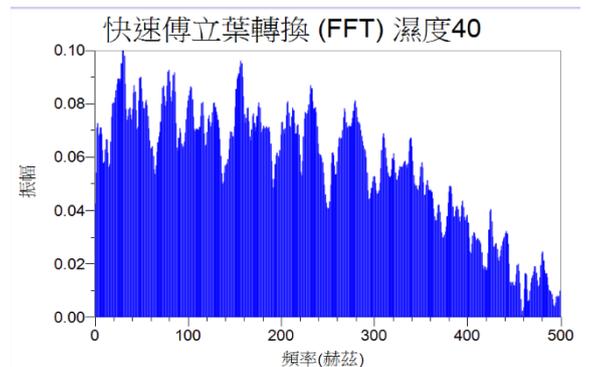


圖7-2 所選取波形傅立葉轉換圖

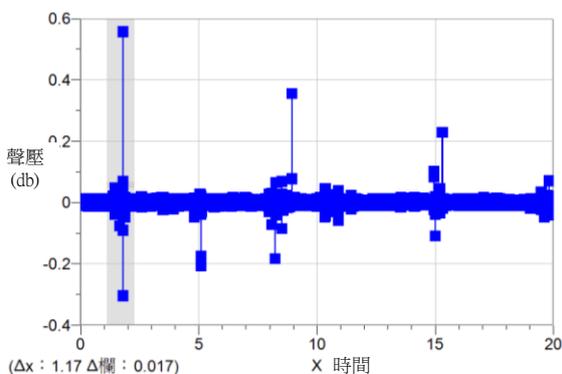


圖8-1 溼度50%的薯片壓斷聲壓波形

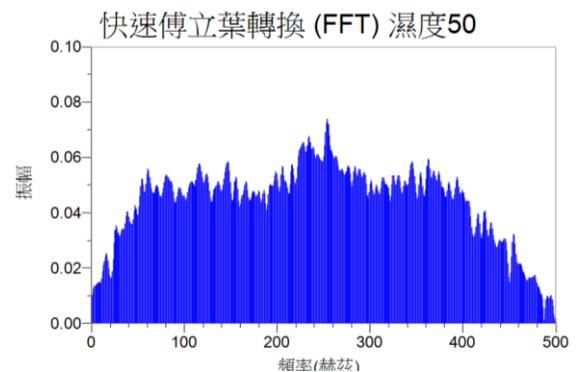


圖8-2 所選取波形傅立葉轉換圖

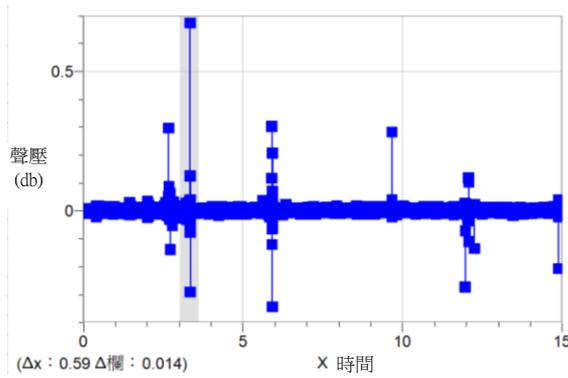


圖9-1 溼度60%的薯片壓斷聲壓波形

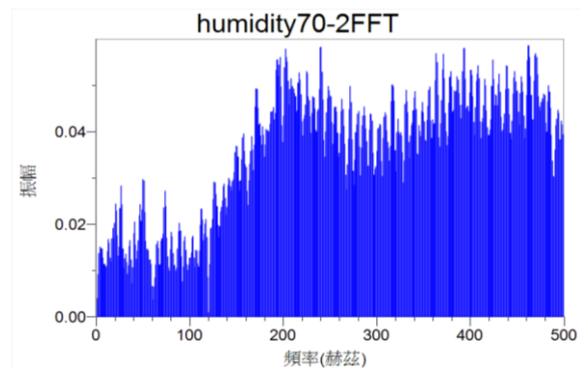


圖9-2 所選取波形傅立葉轉換

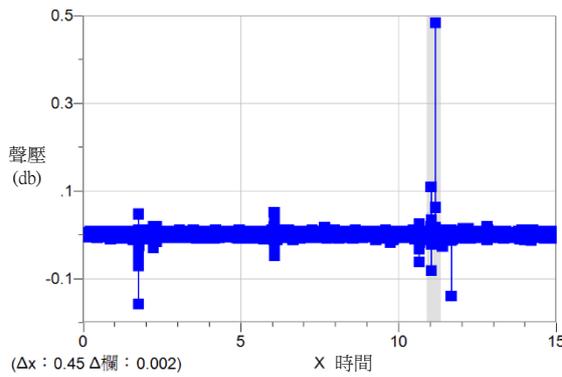


圖10-1、溼度70%的薯片壓斷聲壓波形

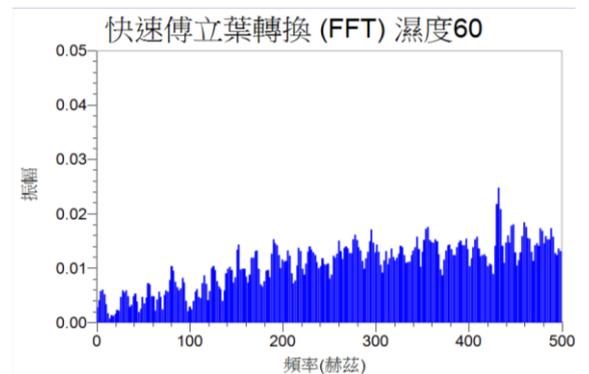


圖10-2 所選取波形傅立葉轉換圖

二、探討薯片脆度和壓碎時的力量大小的關係：

在進行濕度30%至70%的薯片斷裂聲壓量測的同時，我們也精確地記錄了斷裂過程中的力量變化。為了獲得更為精確的結果，我們針對每個濕度樣品，選取了5次斷裂時的最大力量值進行平均，並將這些數據整合到圖11中。從圖11的數據中，我們可以明確地看到一個趨勢：隨著濕度的增加，所需的壓碎薯片的力量逐漸減少。這一觀察結果與我們的預期相符，即當薯片的濕度增加時，其結構變得相對鬆軟，因此在壓碎時所需的力量也相對減少。這一發現不僅為我們提供了薯片脆度與濕度之間的直接關聯，也進一步證實了濕度是影響薯片脆度的一個重要因素。

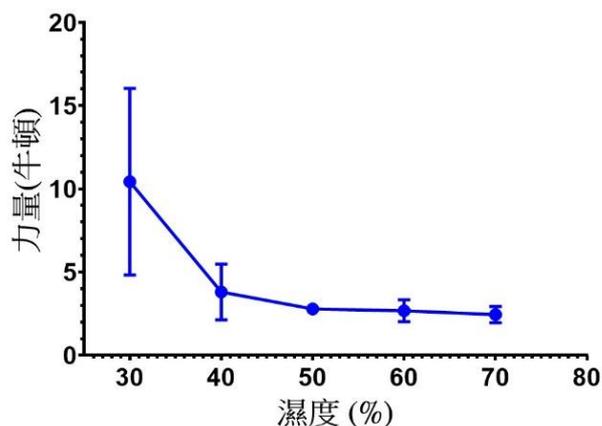


圖11、濕度與薯片斷裂力關係圖

三、探討薯片濕度、脆度和光譜圖型的關係：

(一) 拉曼光譜

我們選擇四種不同濕度(0%、40%、60%、100%)的薯片進行拉曼光譜量測，並觀察薯片在785nm 雷射光激發下的光譜變化，找出濕度與薯片拉曼光譜間的關聯性。取樣方式為確保量測重複性，我們在四種濕度的薯片，各別取三片薯片作為樣本，並以每片任意量測三個位置的光譜平均做為結果展示（圖12左）。

圖12右為文獻⁴中提及的薯片成份拉曼光譜圖，由此圖可以看出薯片的拉曼訊號，除了由本身主成分的馬鈴薯澱粉、纖維素貢獻外，加工過程添加的油脂也有貢獻訊號，而我們實驗量測得到的薯片拉曼光譜（圖12左）也能對應到這三種成分的主要特徵峰。另外，可先留意圖12右的文獻光譜資訊：1.油脂於 1650cm^{-1} 、 1750cm^{-1} 左右各有訊號峰（紫色圈選處）；2.馬鈴薯澱粉、纖維素拉曼於 480cm^{-1} 左右有群訊號峰（青色圈選處）。

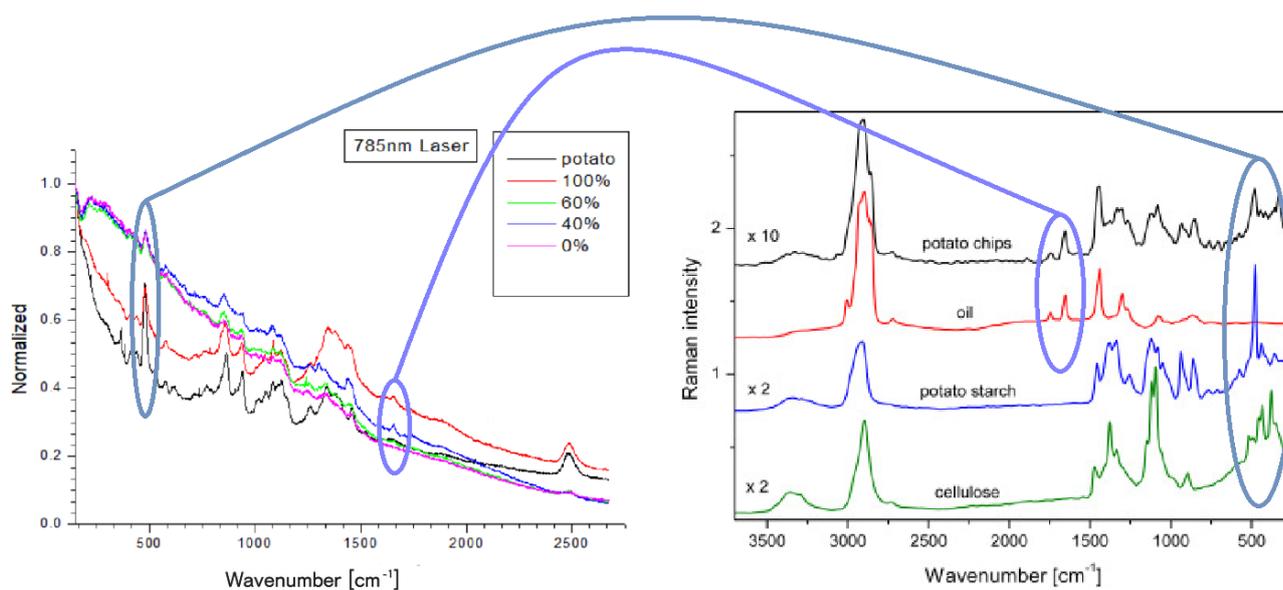


圖12、左為實驗量測得到的不同濕度薯片拉曼光譜(經歸一化處理)
右為文獻提及的薯片內成分拉曼光譜圖

為了更容易觀察光譜的細微變化，我們把光譜中的螢光背景移除，並呈現於圖13左，觀察後發現，不同濕度變化基本上對薯片的拉曼光譜特徵峰位置影響不大，但能觀察到隨著濕度增加，光譜特徵峰的強度會有相對的變化趨勢，特別是油在 1650cm^{-1} （圖13右 a）及 1750cm^{-1} （圖13右 b）的特徵峰強度隨濕度升高而減弱。

⁴ Application of infrared reflection and Raman spectroscopy for quantitative determination of fat in potato chips

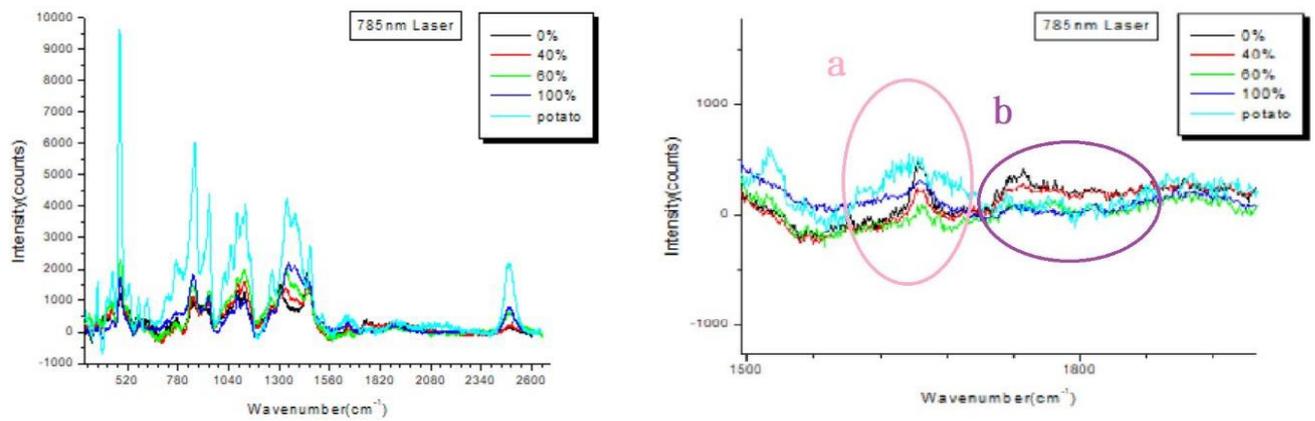


圖13、左為實驗量測得到的不同濕度薯片拉曼光譜（去除螢光背景訊號）
右為將圖13左放大區間1500~1920cm⁻¹之光譜圖

(二) 螢光光譜

除了拉曼光譜的量測，不同濕度的薯片也有以螢光光譜進行實驗。使用波長405nm 的雷射來激發薯片樣品，並與馬鈴薯做比較。如圖14、15所示，我們發現不同濕度的薯片其螢光皆有著約與馬鈴薯成份差不多的位置的特徵峰:525nm（馬鈴薯光譜中約680 nm 為葉綠素的特徵峰），但相較於馬鈴薯，薯片的特徵峰有藍移的現象。我們推測是薯片中的螢光光譜特徵峰包含了馬鈴薯與油脂的光譜，因含油脂成份的關係使光譜有藍移的現象。然而不同濕度間所造成的光譜峰值位置卻差異不大。

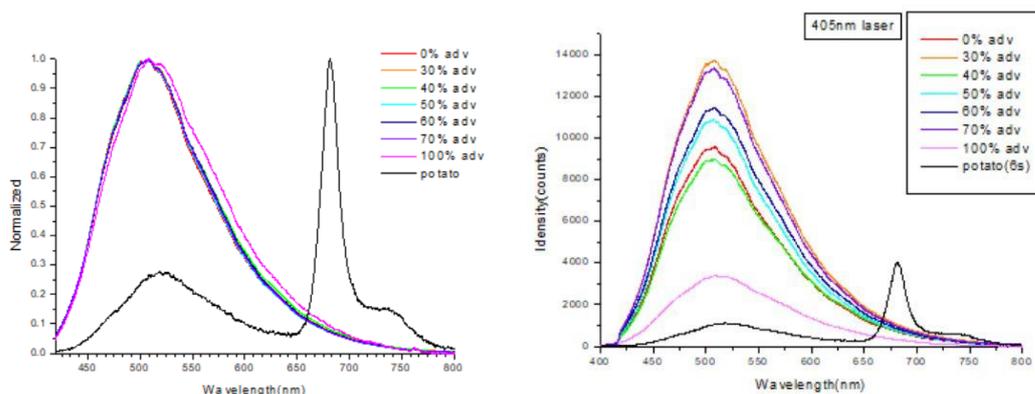


圖14、不同濕度的螢光光譜圖(經歸一化處理) 圖15、不同濕度的螢光光譜

前面聲學的分析結果顯示，水分含量增加會導致脆度下降，而我們在光學的分析結果可知，此因素卻增強拉曼特徵峰的強度；薯片油炸程度與脆度呈正相關，而水分和油含量則有著負相關，故脆度不同的薯片因水與油不同的比例會造成拉曼與螢光光譜呈現不同的表徵。在溼度高的薯片中，水分較多而油含量較低，導致油的拉曼光譜特徵峰強度減弱，間接使馬鈴薯澱粉的特徵峰變得明顯；與此同時，螢光光譜的藍移程度較低。反之，溼度低的薯片水分少而油含量高，油的拉曼光譜特徵峰增強，但螢光藍移程度卻大於濕度極高(100%濕度)者。

此外，作為薯片的主要成分，馬鈴薯的拉曼和螢光光譜(圖13、圖14黑色)都可觀察到顯著的特徵峰，而濕度最高(100%濕度)的薯片，其拉曼與螢光光譜的位置都與馬鈴薯非常相似(圖13、圖14粉色)。實驗結果顯示濕度的改變對拉曼光譜特徵峰位置影響不大，而是與拉曼光譜特徵峰強度有關聯；螢光光譜則產生藍移，濕度小的(0%)薯片藍移程度亦比濕度最高的

(100%濕度)的薯片大。

四、探討不同部位牙齒與壓碎薯片力量、聲壓關係：

用3D 列印模型專用網站⁵下載標準牙齒模型，印製出上排以及下排牙齒模型，下排牙齒以從後向上傾斜提高2.5公分，使咬合位置更接近人體實際牙齒咬合情況，設計圖如下：

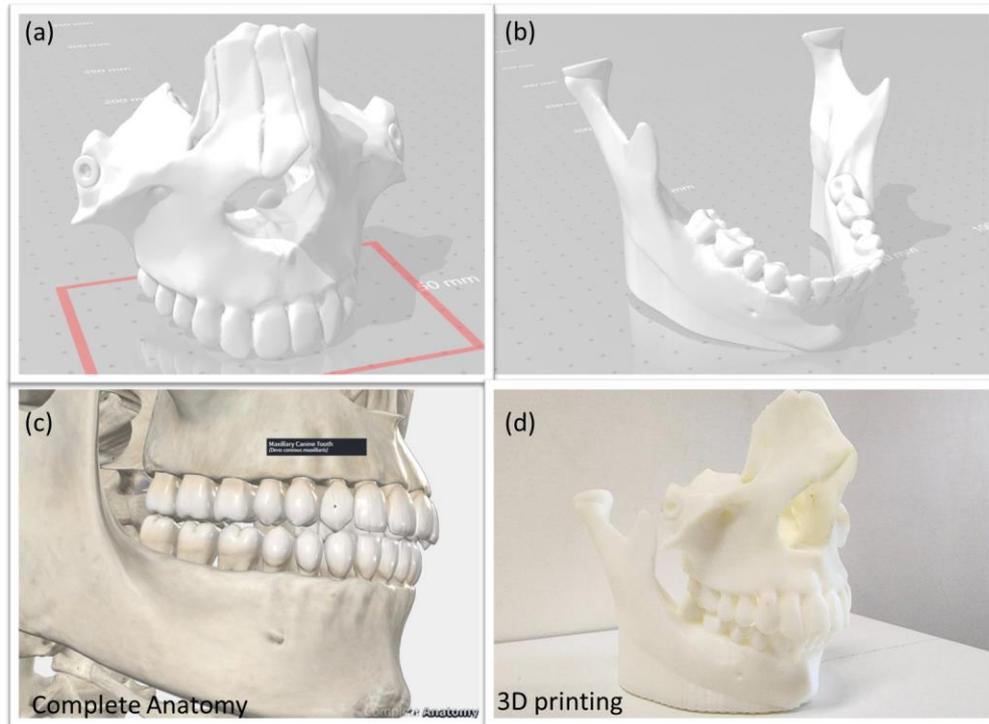


圖16、3D 列印設計圖、實際成品圖

如圖17所示，橘色箭頭包含所指的那顆牙齒往右數兩顆左右各三顆為門齒區（橘色圈選處），往左側數四顆為臼齒區（藍色圈選處），二區不論是外觀型態(影響與食物接觸面積)與咬合功能(切斷與磨碎)上都有顯著不同。

⁵ <https://sketchfab.com/>

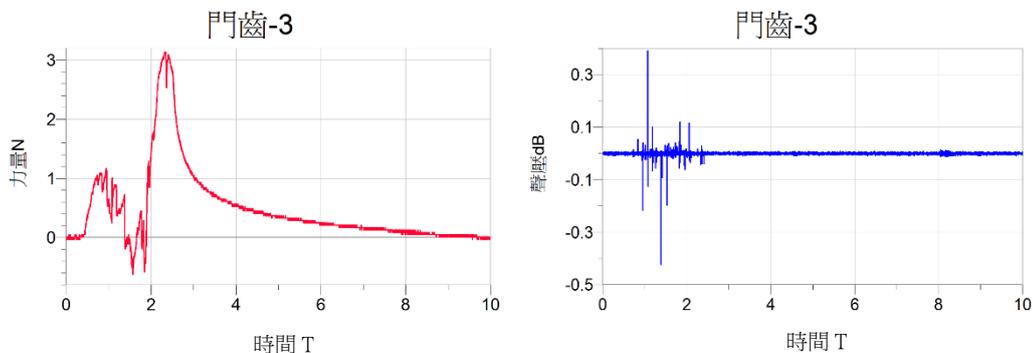


圖17、假牙門齒區白齒區示意圖

(一) 以門齒壓碎薯片量測之力量 and 聲壓

實驗結果如下圖18（由於圖片數量眾多，此處只展示四個樣品作為示例）。以門齒壓碎薯片之最大聲壓傅立葉轉換圖，如下圖20。

在圖18中能發現四個力量的圖上都出現兩個峰值，這是因為門齒接觸薯片的面積較小，且無法一次性壓碎薯片造成的，當門齒剛開始接觸到薯片，我們觀察到門齒先穿刺過薯片，並形成第一個峰值，後來門齒才把薯片完全壓碎、壓斷，才形成第二個較大的峰值。當開始對薯片施加壓力時，我們觀察到壓力逐步增加直至薯片被穿刺，也就形成了第一個峰值。這種逐步增加的壓力反映了門齒與臼齒的主要功能差異，即切割食物。門齒的形狀和結構使其特別適合進行這種活動。在薯片被穿刺的瞬間，所施加的力量迅速下降至最低點，同時，此時的聲壓達到了最大值。這可能是因為門齒在切割食物時，能夠迅速地完成其工作，使食物裂開，從而產生較大的聲壓。隨著斷裂過程的進行，壓力再次逐漸增大，直到薯片被完全壓碎並彈開。這再次證明了門齒在咀嚼過程中的主要角色，即迅速且有效地切割食物。圖19為門齒壓碎薯片之示意圖。



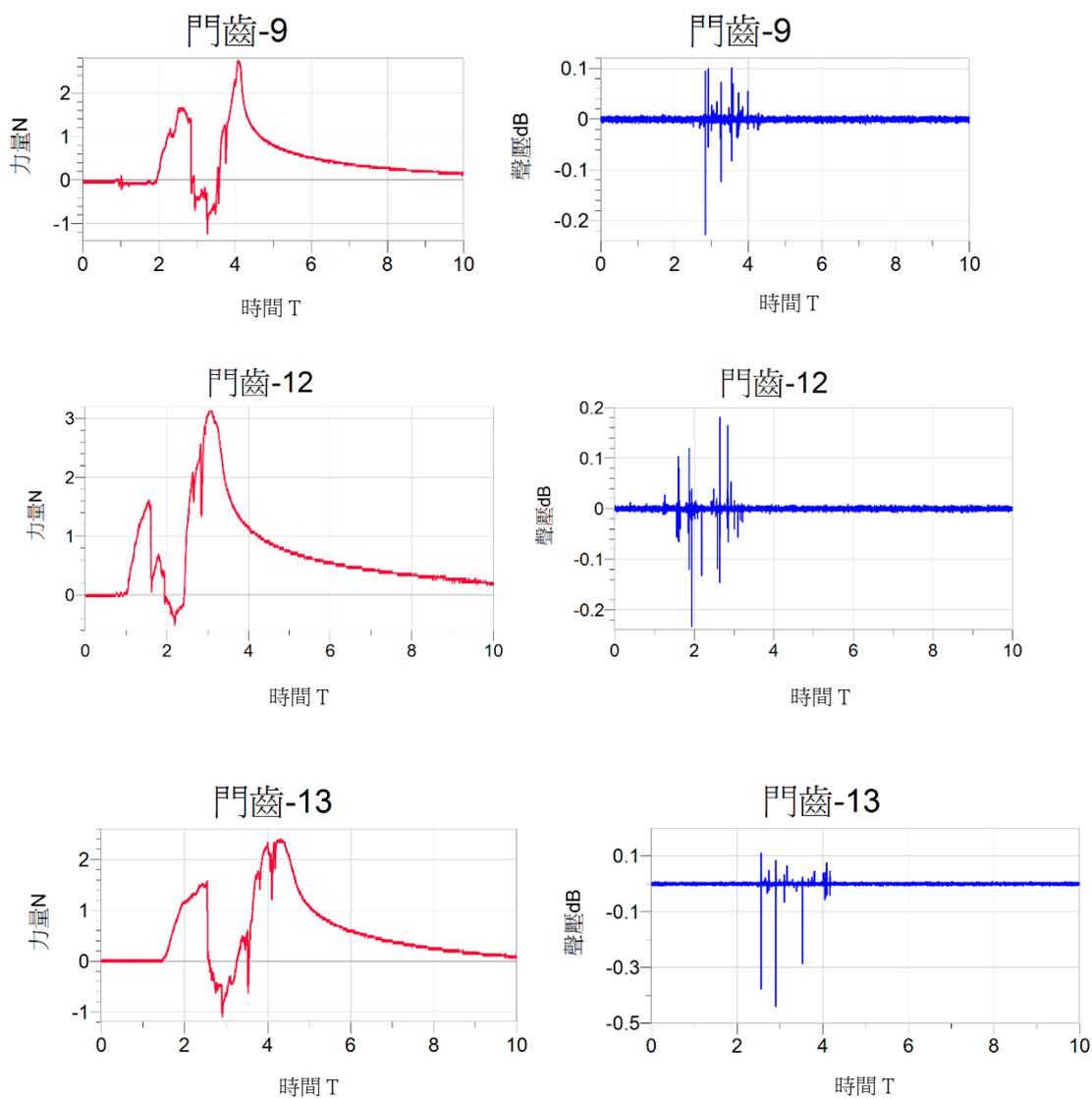


圖18、以門齒壓碎薯片量測之力量和聲壓示意圖



圖19、以門齒壓碎薯片之示意圖

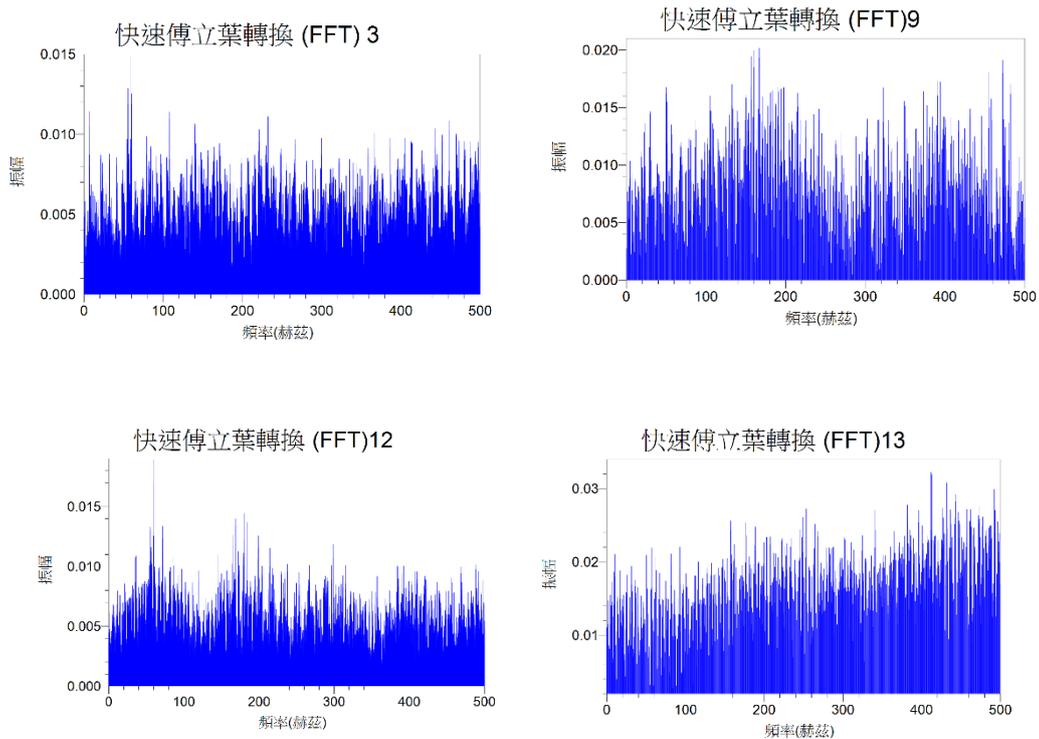
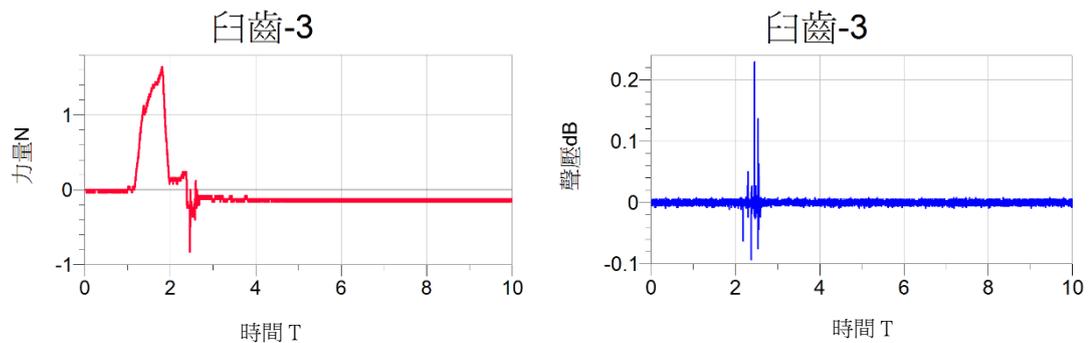


圖20、以門齒壓碎薯片量測之聲壓傅立葉轉換圖

(二) 以臼齒壓碎薯片量測之力量和聲壓

在下圖21中。我們觀察到四個力量的圖上都只出現一個峰值，這可能是因為臼齒與薯片的接觸面積較大，薯片能一次性地被臼齒壓碎，並形成一個峰值。在開始對薯片施加壓力時，我們觀察到壓力逐步增加，這反映了臼齒的主要功能，即研磨和粉碎食物。臼齒的寬大、扁平的咬合面使其特別適合進行這種活動。當薯片即將斷裂時，施加的力量急遽下降至最低點，而此時的聲壓達到了最大值。這可能是因為臼齒在研磨食物時，能夠有效地分散壓力，使食物在較大的面積上斷裂，從而產生較大的聲壓。但是，一旦薯片斷裂，由於其已被臼齒完全粉碎，所施加的力量迅速回歸到零。圖22為臼齒壓碎薯片之示意圖。



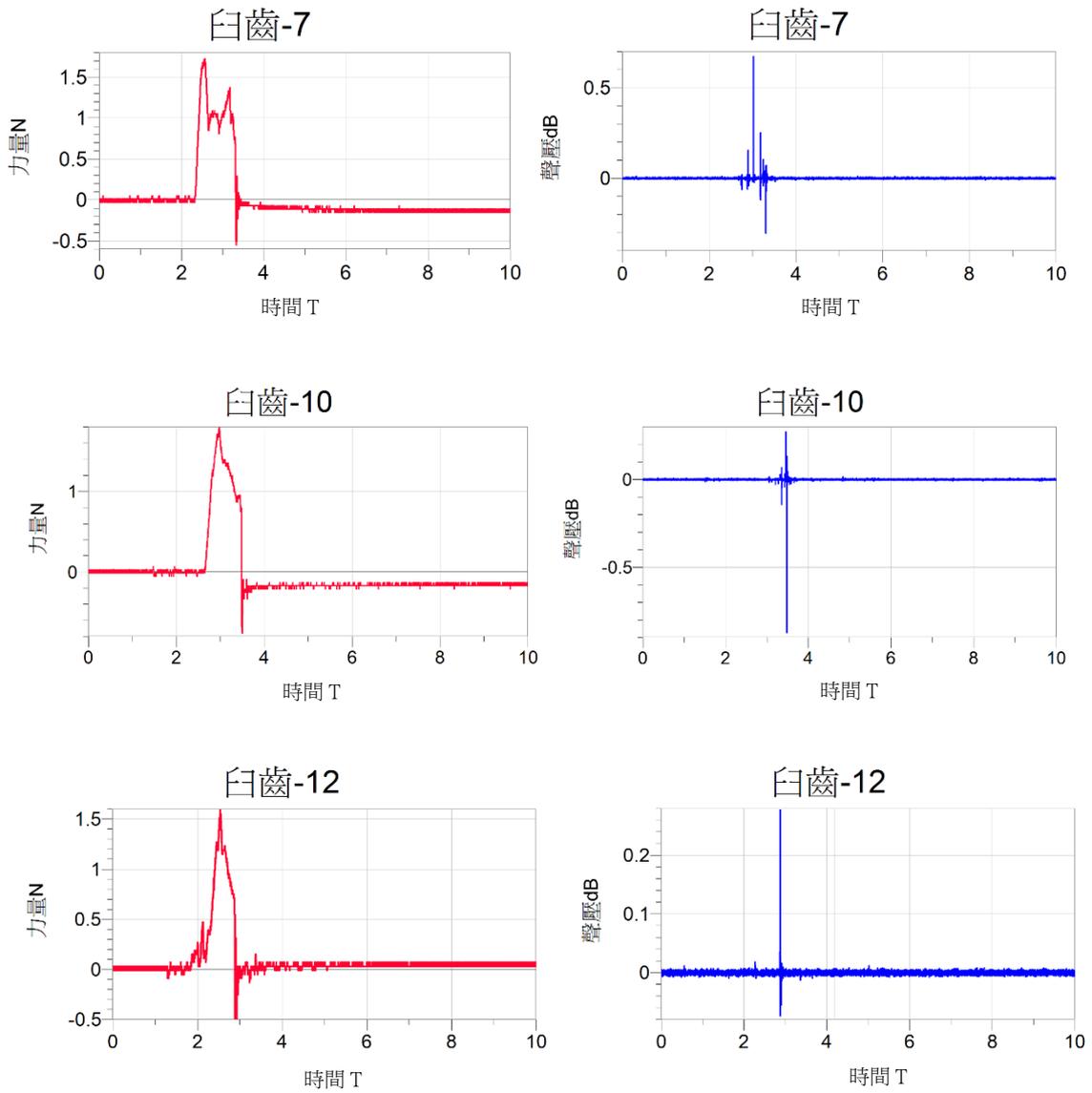


圖21、以白齒壓碎薯片量測之力量 and 聲壓圖



圖22、以白齒壓碎薯片之示意圖

根據我們的實驗數據，當使用門齒壓碎薯片時，其最大聲壓的傅立葉轉換結果如圖23所示。透過對圖23（臼齒的結果）與圖20（門齒的結果）的比較，我們發現在不同頻率上的振幅之間並無明顯的差異。這意味著，不同的咬合部位，如門齒或臼齒，對於聲壓頻譜的影響並不大。然而，濕度的變化（如圖6-10）確實會對聲壓頻譜產生顯著的影響。

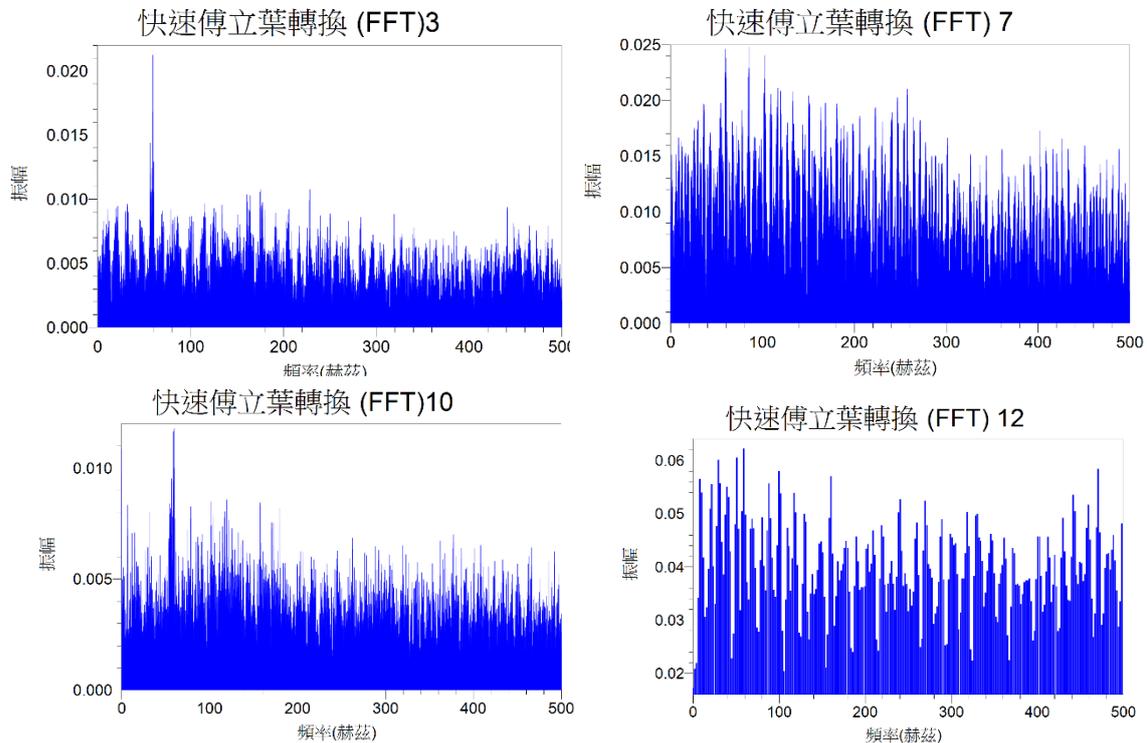


圖23、以臼齒壓碎薯片量測之聲壓傅立葉轉換圖

(三) 門齒區與臼齒區力量和聲壓的差異

如圖24左所示，門齒區與臼齒區的力量有顯著差異，顯著差異值為0.001，意味著此實驗看不出顯著差異的機率为0.1%，門齒區壓碎薯片所需施的力量高過臼齒區壓碎薯片所需施的力量。如圖24右所示，門齒區與臼齒區的聲壓有顯著差異，顯著差異 P 值為0.05，意味著此實驗看不出顯著差異的機率为5%，臼齒區壓碎薯片的聲壓幾乎高過門齒區壓碎薯片的聲壓。

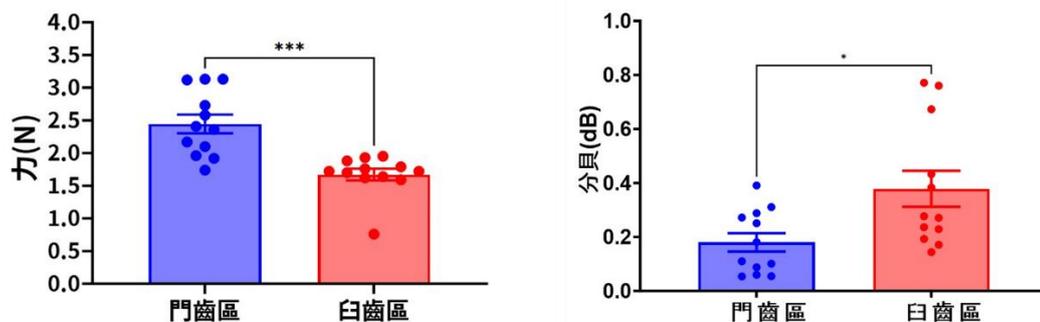


圖24、門齒區與臼齒區力量和聲壓的平均柱狀圖（Student t-test, * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$ ）

伍、討論

本研究深入探討了薯片的脆度與其濕度之間的關聯性。結果顯示，薯片的脆度與濕度有關，隨著濕度的增加，薯片的脆度減少，這可以從兩方面得到證實。聲壓：當濕度較低時，薯片斷裂時的低頻聲壓強度較高；而濕度較高時，低頻聲壓強度減弱。這可能是由於濕度增加使薯片變得較不脆，因此斷裂時產生的聲壓組成也有所不同，這意味著人體對食物是否有脆的感覺，咀嚼時所產生的低頻振幅強度是主要的影響因素。斷裂力量：隨著濕度得增加，所需的壓碎薯片的力量逐漸減小，這意味著當濕度增加時，薯片會變得更鬆軟，因此需要較小的力量來壓碎，口感也因此變差。因此，預先控制好水分含量避免受潮，這對薯片的食品工業上是很重要的觀念⁶。

其次，薯片的光譜主要以馬鈴薯光譜組成，油則形成了其異於馬鈴薯的拉曼特徵峰與螢光藍移現象。在我們的實驗中發現，雖然濕度不會對拉曼光譜產生非常明顯有規律變化，卻可影響薯片中油脂的特徵峰強度，濕度越高，其特徵峰強度越小。這可能是因為薯片中油與水的比例變化造成，所以這也就是為什麼薯片包裝中經常會使用乾燥劑（Silica Gel Packet）或充入惰性氣體-氮氣，用於保持薯片的口感和新鮮度⁷。

對於薯片的拉曼光譜或螢光光譜，油脂都佔有一定的影響力。從文獻中⁸，我們得知食物脆度與油、水含量有深切影響，而這兩者又互相影響。水分越少時油通常越多，反之亦然。而水與油又都會對光譜造成影響。就結論而言，水分和油量對食物的脆度影響甚大，在實驗中，我們發現薯片濕度對壓碎時的力道大小、聲音頻率皆有明顯影響，同時，也能間接藉光譜量測判斷薯片濕度。

最後，不同的牙齒部位對薯片的壓碎有不同的效果。聲壓：臼齒區壓碎薯片時的聲壓明顯高於門齒區，且這一差異在統計上是顯著的。這代表臼齒區的咬合能力較強，只需比較小的力量就能壓碎薯片，也代表著人們使不同的牙齒部位對薯片的壓碎有不同的效果。施加的力量：在壓碎薯片時，門齒區所需的力顯著高於臼齒區（ $P < 0.001$ ）。不同的咬合部位，如門齒或臼齒，對於聲壓頻譜的影響並不大。但濕度的變化對聲壓頻譜有顯著的影響。綜上所述，薯片的脆度不僅與其濕度有關，還與壓碎它的牙齒部位有關。這些發現對於食品工業的產品開發和品質控制都具有重要的意義⁹。

本篇研究的主要研究限制為，牙齒咬合測試以升降台來模擬門齒區及臼齒區咬合薯片的結果，與實際人類咬合情況可能有所不同（咀嚼肌用力，並且帶動顛顎關節移動下巴咬合），然而我們已經盡可能模擬咬合時所產生的現象，未來可以考慮使用更接近人類頭部解剖構造3D 列印結構來模擬咬合情形。此外，我們的研究主要集中在薯片上，而不是其他類型的食物，如薯條或其他油炸食品。因此，我們的結果可能不適用於這些食物。

⁶ Zhang, T., Li, J., Ding, Z., & Fan, L. (2015). Effects of initial moisture content on the oil absorption behavior of potato chips during frying process. *Food and Bioprocess Technology*, 9 (2), 331-340. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1625-6>

⁷ A Full Guide to Potato Chips Packaging. <https://www.levapack.com/potato-chips-packaging/>

⁸ Tunick, M. H., Onwulata, C. I., Thomas, A. E., Phillips, J. G., Mukhopadhyay, S., Sheen, S., ... & Cooke, P. H. (2013). Critical evaluation of crispy and crunchy textures: A review. *International Journal of Food Properties*, 16 (5), 949-963.

⁹ Chambers, L., McCrickerd, K., & Yeomans, M. R. (2015). Optimising foods for satiety. *Trends in Food Science & Technology*, 41 (2), 149-160.

陸、結論

本研究探討了薯片的脆度、光譜特性以及不同牙齒部位對其壓碎的影響。綜合實驗數據，我們得出以下主要結論：

一、薯片的脆度與濕度的關聯性：

薯片的脆度與其濕度有密切的關聯。隨著濕度的增加，薯片的脆度有所降低。這一現象可能與薯片中油和水的比例變化有關。當油的比例較高時，薯片的脆度增加，反之則減少。

二、不同牙齒部位對薯片壓碎的影響：

雖然薯片的物理特性如濕度對其脆度有明顯的影響，但人體在食用時，使用不同的牙齒部位（如門齒和臼齒）咀嚼同一濕度的薯片，會有不同的感覺。這可能與牙齒的結構和功能有關，使得咀嚼時的感覺有所不同。

三、光譜特性與濕度的關聯性：

濕度會影響薯片中油脂的拉曼特徵峰強度，濕度越高，油脂特徵峰強度越小（澱粉、纖維素訊號變明顯）。這可能與薯片中的油和水的比例隨著濕度產生變化有關。

四、未來研究方向：

本研究為食品科學領域提供了有趣的方向，尤其是對於食品的脆度與其物理和化學特性的關聯。未來的研究可以進一步探討其他食物的脆度與其相關特性的關聯，以及如何優化油水比例並減少濕度的影響，以增加食品的口感，創造大眾福祉。

柒、參考資料及其他

- 一、Sample size calculator。2023年8月20日，取自 [Sample Size Calculator \(clincalc.com\)](https://www.clinicalcalculators.com/)
- 二、研之成理（2017年8月22日）。Raman 知多少——Raman 基础知识介绍。2022年8月6日，取自 <https://zhuanlan.zhihu.com/p/28686981>
- 三、喬哈斯科技。帶你認識 拉曼光譜儀（Raman）的原理! 2022年4月7日，取自 <https://www.johas.com.tw/laman/principle-of-raman/>
- 四、李家同（2015年11月26日）。傅葉爾轉換（Fourier Transform）。2021年12月15日，取自 <https://www.freesandal.org/?m=20151126>
- 五、陳等（2012）。認識拉曼光譜。2022年1月2日，取自 https://www.oceanhoodtw.com/article_detail/28.htm
- 六、濕度對拉曼光譜影響。 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18260393/>
- 七、3D 列印牙齒模型。2023年8月21日，取自 <https://sketchfab.com/>
- 八、3D 列印模型專用網站 <https://sketchfab.com/>
- 九、Zhang, T., Li, J., Ding, Z., & Fan, L. (2015). Effects of initial moisture content on the oil absorption behavior of potato chips during frying process. Food and Bioprocess Technology, 9 (2), 331-340. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1625-6>
- 十、A Full Guide to Potato Chips Packaging. <https://www.levapack.com/potato-chips-packaging/>
- 十一、Tunick, M. H., Onwulata, C. I., Thomas, A. E., Phillips, J. G., Mukhopadhyay, S., Sheen, S., ... & Cooke, P. H. (2013). Critical evaluation of crispy and crunchy textures: A review. International

Journal of Food Properties, 16 (5) , 949-963.

十二、 Chambers, L., McCrickerd, K., & Yeomans, M. R. (2015) . Optimising foods for satiety. Trends in Food Science & Technology, 41 (2) , 149-160.

十三、 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0731708518315292>

十四、 <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2011.573116>