

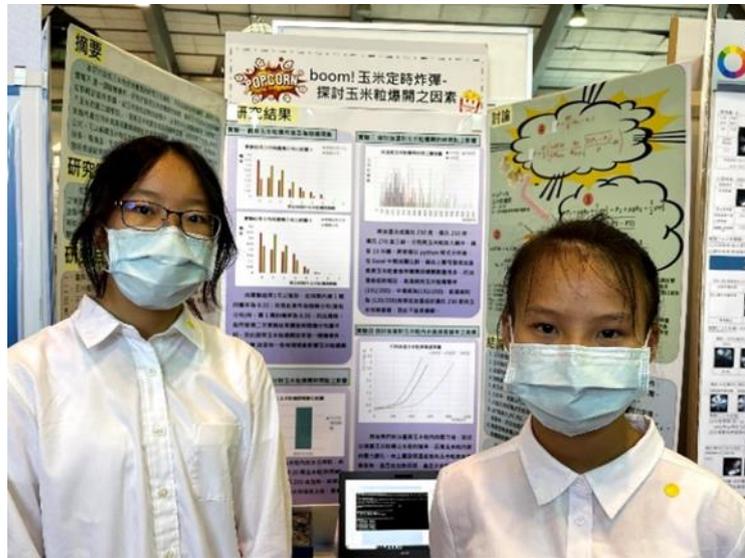
2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160026
參展科別 物理與天文學
作品名稱 boom!玉米定時炸彈-探討玉米粒爆開之因素
得獎獎項

就讀學校 新竹市立光華國民中學
指導教師 王建豪
作者姓名 呂佳穎、林穎孜

關鍵詞 玉米粒、普松分布、理想氣體方程式

作者簡介



我們是呂佳穎(左)和林穎孜(右),從小就對自然有極大的興趣且喜愛探索思考,嚮往自己能在自然領域研究探索,在學校的建議下進入科展的領域。從摸索到針對一個主題研究,這過程中收穫了許多。感謝老師的指導,讓我們能從生活中小小的爆米花中延伸出許多學問。這過程令我們驚艷,也讓我發現不能小覷周遭的事物,也激發出我們的好奇心。

摘要

本研究發現玉米粒受熱爆開的時間分布圖形，不符合普松分布圖形，證明玉米粒爆開不是一個隨機事件。研究亦發現玉米粒爆開的時間，會受玉米粒內水分的多寡與加熱時油溫的影響。從玉米粒在加熱的過程中，尖端的小孔會冒出氣泡，我們建立了「玉米粒壓力鍋模型」、發現玉米粒冒出氣泡的速率改變，符合白努力定律。再將玉米粒內產生的水氣莫耳數減掉溢出的水氣莫耳數，配合理想氣體方程式，我們得到一公式，可以解釋玉米粒在加熱過程中的壓力變化。並從此公式可解釋為何玉米粒在水分多、高油溫、孔徑小的情形下容易爆開。最後我們將推論的物理模型做數值模擬，發現模擬結果與實驗所觀察的現象相符。

Abstract

This study found that the time distribution graph of corn kernels popped after heating is not consistent with the Poisson distribution graph, therefore it means that the corn kernels burst is not a random event. We also found that the popping time of corn kernels is affected by the amount of moisture in the corn kernels and the oil temperature during heating. Since the bubbles emerge from the small pores at the corn kernel's tip during heating, we established a "corn kernel pressure cooker model" and found that the rate of corn kernels bubbles generation is consistent with Bernoulli's principle. We subtracted the number of moles of water vapor leaking from the number of moles of water vapor generated in the corn kernels, and the values were brought into the ideal gas equation, then we get a formula that can explain the pressure changes in the corn kernels during the heating process. According to this formula, we can explain why corn kernels are easy to burst under conditions of high moisture, high oil temperature, and small pore size. Finally, we used numerical simulation following our model, and found that the simulation results are consistent with the results observed in the experiments.

壹、研究動機

在家中爆米花時看到，玉米粒不斷爆開，突然好奇著為什麼玉米粒不是同時爆開。之後在《科學人》無意間看到一些和爆米花相關的資料後，開始想用爆米花當題材，並思考為何玉米粒會在不同時間點爆開。到底是玉米粒其中的成份所導致，還是另外有其他的因素呢？突然間覺得小小的玉米粒卻藏著許多我們不知道的秘密，所以決定開始動手揭開玉米粒背後的奧秘。

貳、研究目的

- 一、觀察玉米粒爆開是否為隨機現象
- 二、玉米粒內部水分對於玉米粒爆開之影響
- 三、不同油溫對玉米粒爆開的時間點之影響
- 四、不同油溫對玉米粒產氣速率之影響
- 五、玉米粒爆開之數值模擬結果

參、研究設備與器材

玉米粒	油	鍋子
		
電磁爐	玻璃皿	加熱器
		
電子秤	量筒	培養皿
		

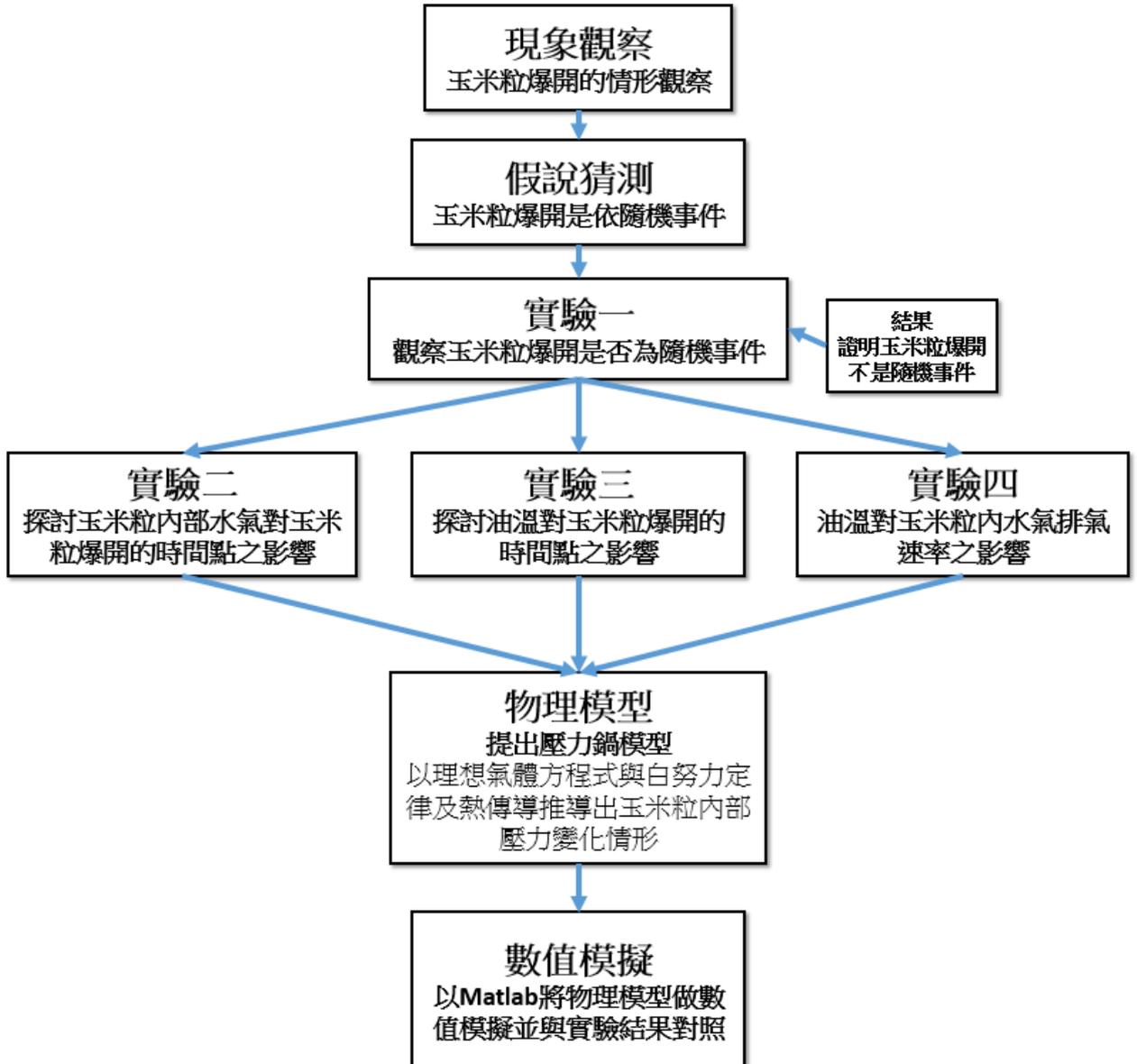
鐵環	燒杯	漏斗
		
矽膠	針筒	餐巾紙
		

(表一) 實驗器材

其餘器材: 鑷子、抹布、立可白、吸管、手機、錄音程式、電腦、Python、LoggerPro。

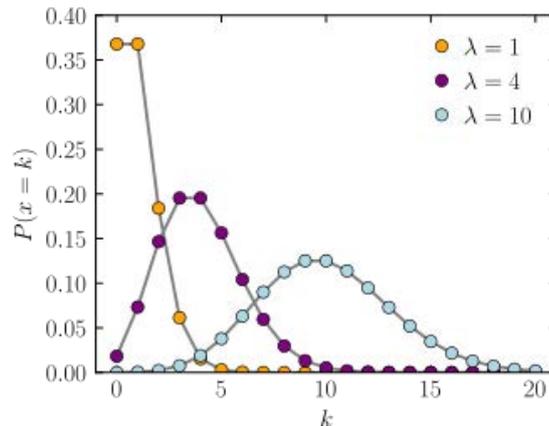
肆、研究過程與方法

一、實驗架構



二、研究過程

在實驗之初，我們認為玉米粒爆開現象沒有特殊規律，於是我們聯想到自然界中也有許多類似的現象，例如放射性原子核核衰變的機率、DNA 序列突變現象、或是丟擲骰子等等都是隨機現象的事件，因此我們假設爆米花爆開的時間是隨機分布。因此因為我們假設「玉米粒爆開的時間點為隨機分布」，所以玉米粒爆開的時間應符合所謂的普松分布(Poisson Distribution)，也就是隨機分布。



(圖一) 普松分布介紹圖

普松分布為隨機現象統計結果的表現其中 λ 為單位時間內隨機事件的平均發生率，而理想的普松分布

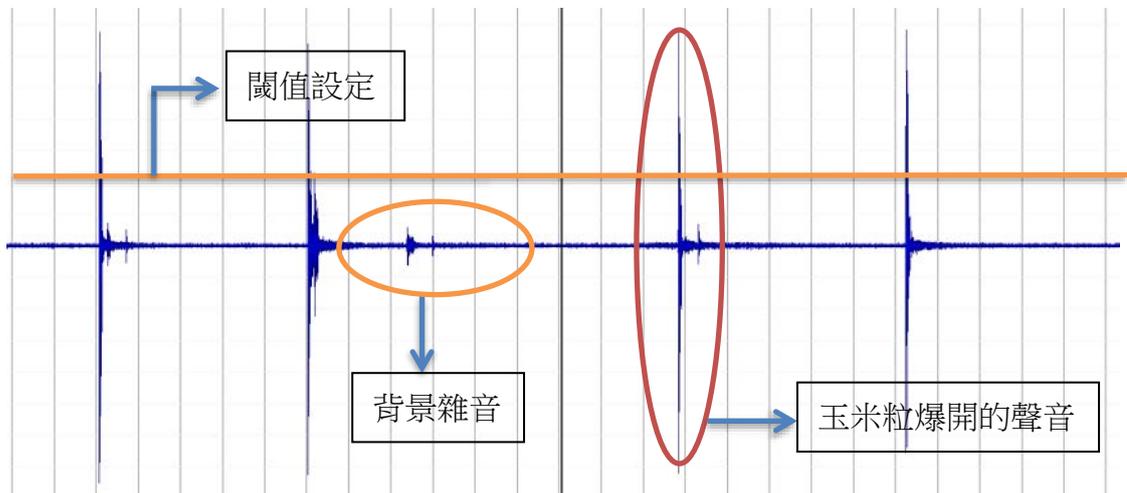
$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

此式可以由二項式定理在時間區間極限下近似而成的一般式

因此只要檢驗爆米花單位時間內爆炸次數對頻率的作圖，與理論的普松分布作對照，即可以驗證爆米花的爆炸現象是否為隨機現象。

一開始在爆玉米粒時是使用人工計算，每聽到一聲玉米粒爆開的聲音就按一下碼表，但人工紀錄玉米粒爆開的時間可能會因為人的反應速度或分心漏聽而造成實驗誤差，於是我們決定改用先錄音後分析的方式來解決此問題。將用手機錄的錄音檔用 Python 分析以下簡介我們使用的 Python 程式原理。

(圖二)為錄音檔音譜圖，y 軸為振幅，x 軸為時間。從(圖二)可以看到雖然我們已經在安靜的環境下，就算沒有玉米粒爆開也會錄到一些背景雜音，但振幅不大。而玉米粒爆開時則會有一個較大振幅出現，因此每出現一個大振幅聲音就視為一顆玉米粒爆開。



(圖二) 錄音檔音譜圖

所以我們可以調整 python 程式的閾值，讓程式自動找到設定閾值之上的聲音並記錄下來其時間點，這樣就可以快速的分析完長達 20 分鐘將近百顆玉米粒爆開的時間。

(一) 實驗一、觀察玉米粒爆開是否為隨機現象---

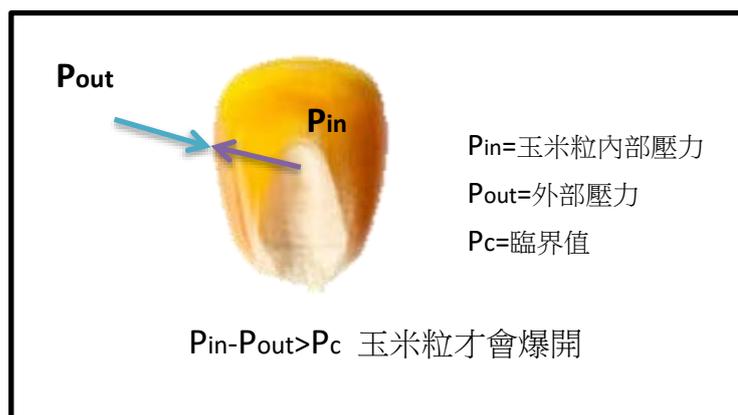
以電磁爐加熱，測試 100 顆玉米粒爆開的時間是否為隨機現象

1. 實驗步驟

- (1) 將 30 c.c.的沙拉油倒入鍋子中
- (2) 把玉米粒鋪平在鍋底，開始錄音
- (3) 蓋上鍋蓋
- (4) 待玉米粒全部爆完停止錄音
- (5) 用 Python 程式分析音檔，記錄每顆玉米粒爆開的時間
- (6) 再用 Excel 分析實驗結果，分析玉米粒爆開是否為隨機分布

(二) 實驗二、探討玉米粒內部水氣對玉米粒爆開的時間點之影響---

在進行實驗一時，我們觀察到，玉米粒在爆開之前，會從玉米粒的尖端冒出氣泡，因此我們推測玉米粒被放進熱油後，胚乳內部的水開始蒸發，變成氣體。若不斷加熱，則越來越多的水分子以蒸氣的形式存在玉米粒內，玉米粒內的壓力隨之升高，內外壓力差超過臨界值時玉米粒外皮將會爆裂。所以我們設計實驗，將玉米粒內的水全部榨乾，並與對照組相比較，觀察兩者爆開的玉米粒數目是否有差異。



先以 200°C 加熱玉米粒，使玉米粒內的水分從液體氣化成水蒸氣並逸出玉米粒，將此批玉米粒與另一批新的玉米粒同時放入鍋內以 250°C 加熱，記錄這兩批玉米粒爆開之數量。

1. 實驗步驟

- (1) 將定溫加熱器設定置 200°C
- (2) 倒入 30 c.c. 的沙拉油至鍋子中
- (3) 把 20 顆玉米粒放入鍋中加熱開始計時 40 分鐘
- (4) 待計時結束將玉米粒全數取出
- (5) 將定溫加熱器重新設定至 250°C
- (6) 倒入 30 c.c. 的沙拉油至鍋子中
- (7) 將步驟四取出之 20 顆玉米粒及 20 顆新的玉米粒放入鍋中加熱計時 15 分鐘
- (8) 待計時結束將鍋子取下，紀錄第一批玉米粒及第二批玉米粒分別爆開的顆數



(圖三) 實驗三的結果

(三) 實驗三、探討油溫對玉米粒爆開的時間點之影響---

實驗二證明了玉米粒內的水蒸發成水氣並產生壓力，是玉米粒爆開的主要原因，我們進一步推測，油溫的高低與水蒸發成水氣的速率有關。所以我們設計實驗，觀察不同油溫下，玉米粒爆開的時間快慢是會有差異。

將定溫加熱器分別定溫在 230、250、270°C，放入 200 顆玉米粒並記錄玉米粒爆開的數量，測試不同油溫對玉米粒之影響。

1. 實驗步驟

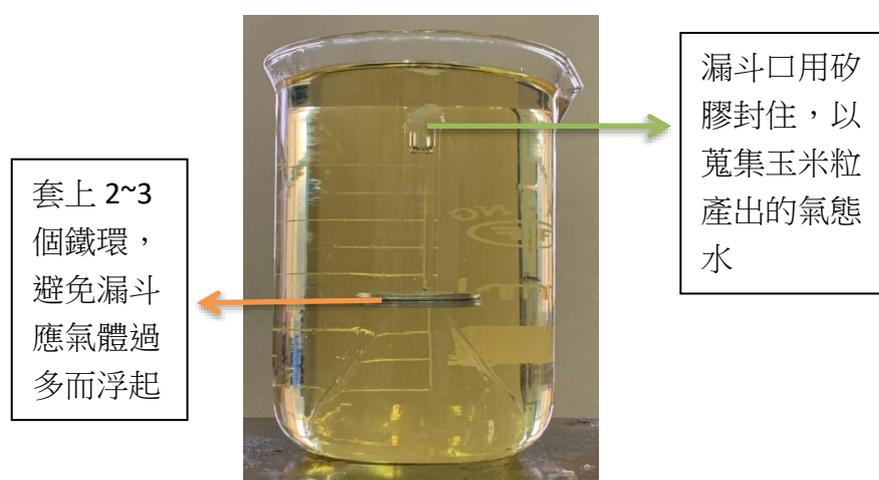
- (1) 將 30 c.c.的沙拉油倒入鍋子中
- (2) 以定溫加熱器加熱到設定的油溫
- (3) 再將 200 顆玉米粒均勻撒在鍋內，並開始錄音
- (4) 蓋上玻璃板
- (5) 待 15 分鐘後停止錄音
- (6) 取下鍋子，記錄玉米粒爆開的顆數
- (7) 用 Python 程式分析音檔，記錄玉米粒爆開之時間
- (8) 最後用 Excel 將三種溫度之數據整合並作圖

(四) 實驗四、探討油溫對玉米粒內水氣排氣速率之差異---

經由實驗三，我們確定了高油溫會讓玉米粒更快爆開，意味著高油溫會更快使水蒸發成水蒸氣。因玉米粒的氣泡，是從玉米粒尖端的小孔溢出的。若根據白努力定律，玉米粒被加熱之初，玉米粒內的氣體壓力較小，從小孔溢出的氣體速率應較慢，隨著加熱時間變長，玉米粒內的氣體壓力變大，從小孔溢出的的氣體速率應該會加快，為了證明此推測，我們自製了「排油集水氣裝置」，並進行以下實驗。

以自製的裝置，利用排油集水氣法，探討不同油溫對玉米粒的排氣速率之影響

1. 自行設計的實驗裝置



(圖四) 自製實驗裝置

2. 實驗步驟

- (1) 將漏斗口用矽膠封住，靜置一天
- (2) 將玉米粒放到燒杯中再將漏斗倒扣放進燒杯中
- (3) 將油倒入燒杯中直到剩一小段漏斗頸
- (4) 以針筒插入矽膠把空氣抽出(圖五)，留約 0.5 公分以便程式分析



(圖五) 將漏斗頸中空氣抽出

- (5) 再將油倒入燒杯中直到淹沒整個漏斗
- (6) 將定溫加熱器加熱至設定溫度
- (7) 把整個排油集氣的裝置放到加熱器上，以攝影機拍攝玉米粒內水蒸氣溢出所導致漏斗頸中油面下降的之過程(圖六)

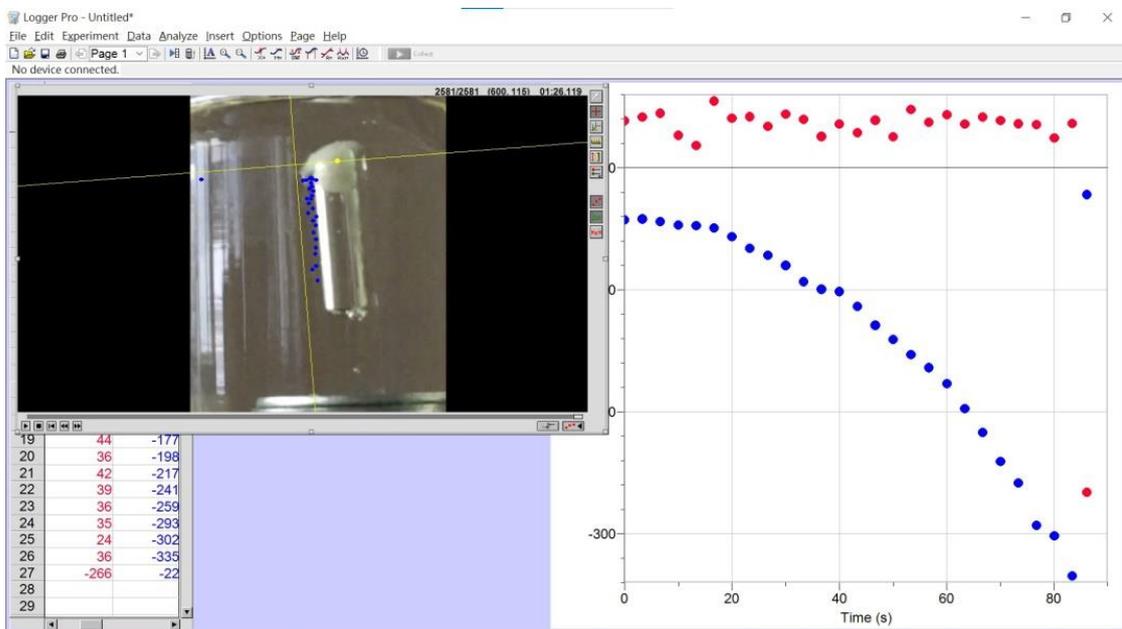


(圖六) 排油集氣裝置圖

- (8) 拍攝時間為 10 分鐘
- (9) 將錄製之影片以軟體 LoggerPro 分析玉米粒產氣之速率(圖七)
- (10) 最後到 Excel 將三種溫度之數據整合並作圖

在此簡介實驗四中的步驟九中使用的 LoggerPro 程式：

先將我們所錄製的排油集氣影片導入 LoggerPro 程式，因為此程式要追蹤我們自製的裝置漏斗頸中的油面下降點，因此要設定每次追蹤點擊時更改的網格數，而一開始玉米粒產氣的速度沒有很快，所以更改的網格數可以設定大一點，過一小段時間後玉米粒產氣的速度變快，就可以將更改的網格數改成小一點。還要設定 x、y 軸定點，因為影片或漏斗可能會歪掉，所以要將 y 軸與漏斗頸平行，才可以準確追蹤油面變化，如(圖七)中藍點即為液面下降的情形，接著就不斷跟隨油面最低處點擊，直到整段影片結束。

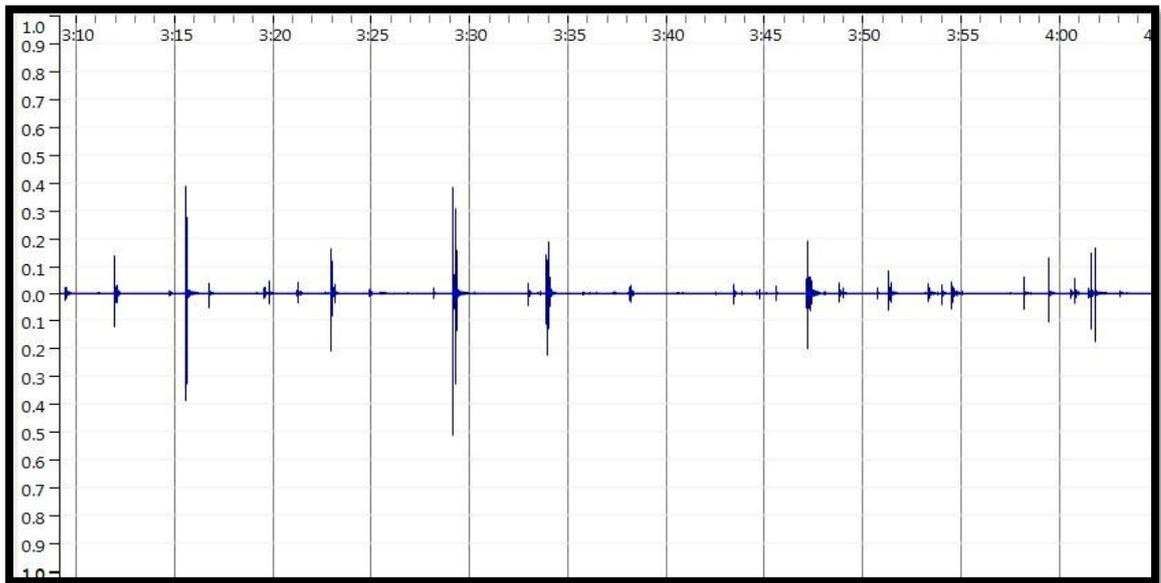


(圖七) LoggerPro 程式畫面截圖

伍、研究結果

一、實驗一、觀察玉米粒爆炸是否為隨機現象---

利用電磁爐加熱 100 顆玉米粒，錄下每顆玉米爆開的時間，以 python 程式(圖八)分析並記錄玉米粒爆開的時間，以 excel 分析單位時間內玉米粒爆開的顆數與其發生的機率(表二中第三排)，並製作成圖(圖九)，再以 excel 內的普松函數相比較(表二中第四排)，並製作成圖(圖十)，判別玉米粒爆開的時間是否為隨機現象。

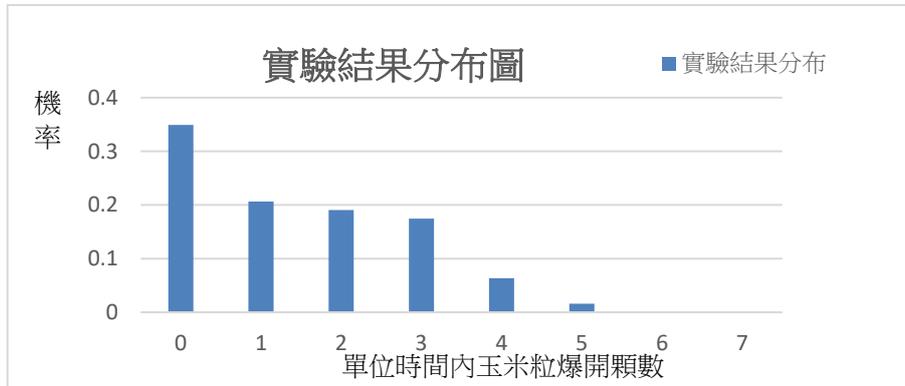


(圖八) 音軌圖

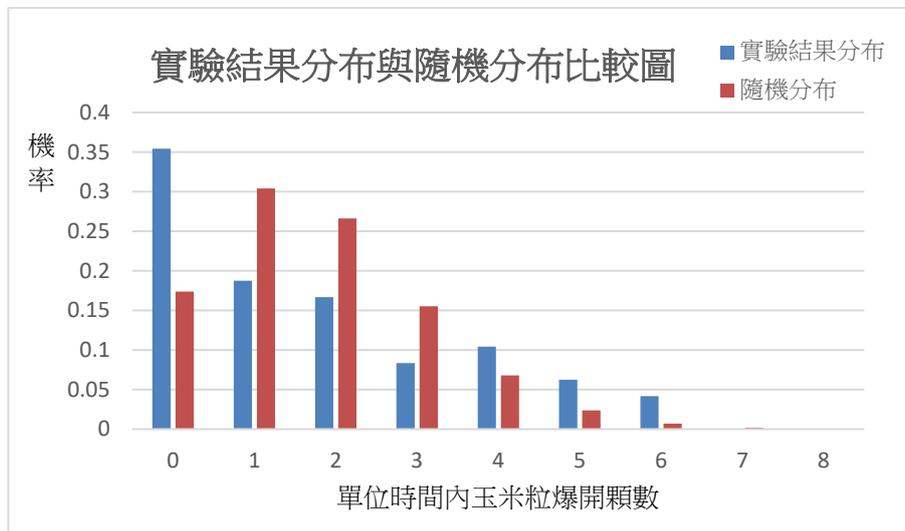
單位時間顆數	累積事件次數	實驗結果分布	隨機分布
0	17	0.3542	0.1738
1	9	0.1875	0.3041
2	8	0.1667	0.2661
3	4	0.0833	0.1552
4	5	0.1042	0.0679
5	3	0.0625	0.0238
6	2	0.0417	0.0069
7	0	0.0000	0.0017
8	0	0.0000	0.0004

9	0	0.0000	0.0001
10	0	0.0000	0.0000
11	0	0.0000	0.0000

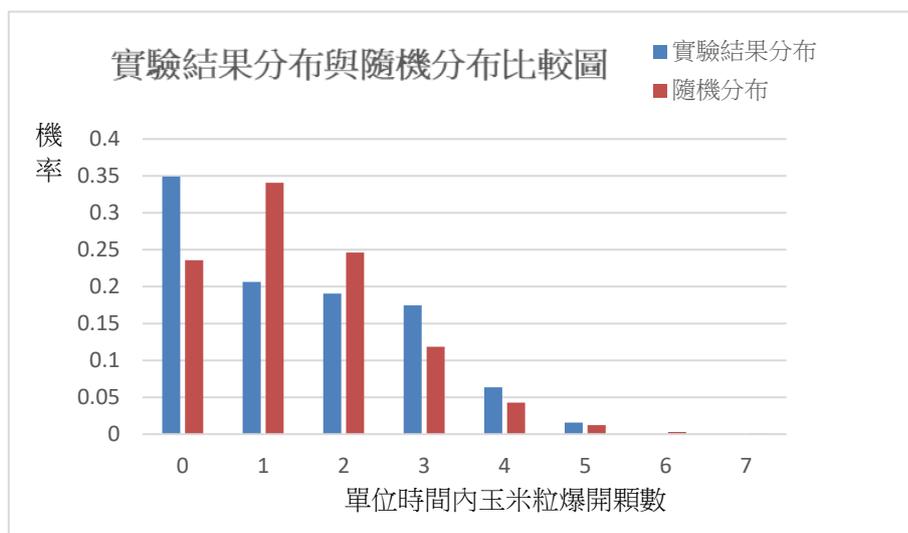
(表二) 實驗一數據



(圖九) 實驗結果分布圖



(圖十) 實驗一實驗結果分布與隨機分布比較圖 1



(圖十一) 實驗一實驗結果分布與隨機分布比較圖 2

(圖八)為錄音檔的音軌圖，經由 python 分析，第一次的實驗結果，程式計算得到共有 86 顆玉米粒爆開，而透過計算鍋子內殘存沒有爆開的玉米粒和一開始丟的玉米粒數量比較，得到的數量也是有 86 顆玉米粒爆開。由此可證明，此 python 程式是可信任的。經過 Python 程式分析後得出的數據，以 excel 分析並製作(表二)及製圖成(圖九)，圖九為實驗結果分布圖，(圖十)為第一次的實驗結果，(圖十一)為實驗結果分布與隨機分布比較圖，以(圖十)舉例，本次實驗結果，在時間內爆 0 顆的機率則約為 0.35；爆 1 顆的機率為 0.20，以此類推。若是此事件為隨機分布(普松分布)時，單位時間內玉米粒爆 0 顆的機率約為 0.17；爆 1 顆的機率為 0.30，如此類推。我們發現二次實驗結果圖(圖十、圖十一)皆與隨機分布圖不同，因此證明玉米粒爆開並非是一隨機事件，故推測應該是有一些物理現象影響玉米粒爆開的時間。

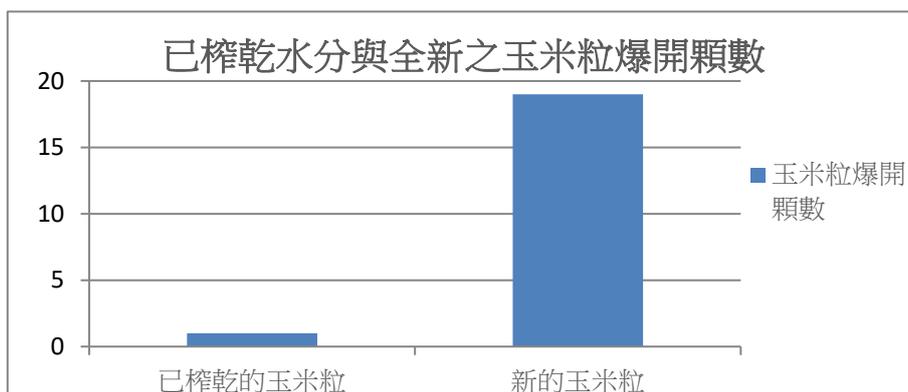
二、實驗二、探討玉米粒內部水分對玉米粒爆開的時間點之影響---

我們推測玉米粒被放進熱油後，內部的水開始蒸發，玉米粒內的壓力隨之升高，內外壓力差超過臨界值時玉米粒外皮將會爆裂。所以先以 200°C 加熱玉米粒，使玉米粒內部水分從液體汽化成水蒸氣逸出玉米粒，接著將此批玉米粒(20 顆)與另外一批 20 顆新的

玉米粒(對 鍋內以 兩者爆開		已榨乾水分的 玉米粒(實驗組)	新的玉米粒 (對照組)	照組)同時放入 250°C 加熱, 觀察 的玉米粒數目
	玉米粒爆開顆數	1	19	

是否有差異。所得結果如(表三)及(圖十二)

(表三) 以榨乾水分之玉米粒與新的玉米粒分別爆開的玉米粒數量



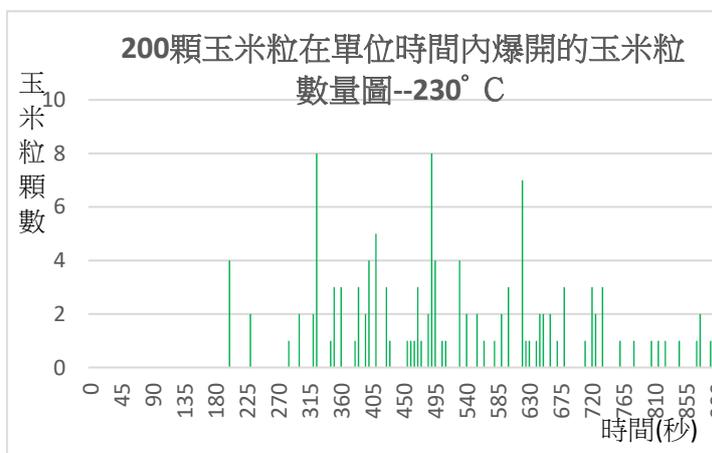
(圖十二) 已榨乾水分與全新之玉米粒爆開顆數比較圖

因在進行實驗一時，即觀察到加熱玉米粒，玉米粒的尖端會有氣泡產生，因此我們推測玉米粒內的水分多少會與玉米粒爆開時間有關。於是我們先以低油溫(攝氏 200 度)將玉米粒內

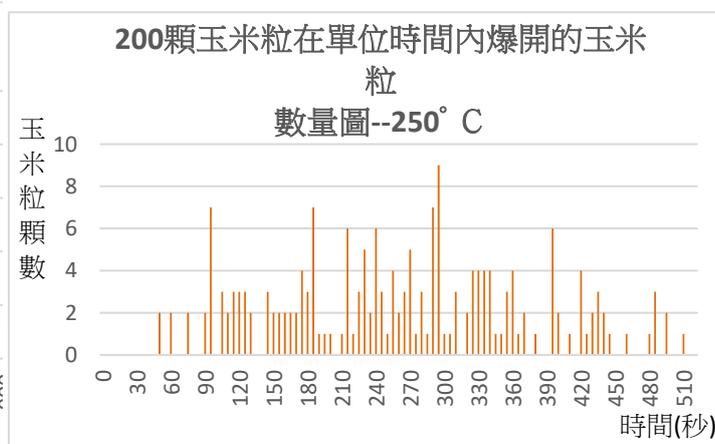
的水分從液態水轉成氣態水並全數溢出，接著再將這 20 顆玉米粒與新的 20 顆玉米粒(對照組)放到同一個鍋子中已高油溫(攝氏 250 度)加熱。結果顯示已榨乾水分之玉米粒(實驗組)只有 1 顆有爆開，而全新的玉米粒(對照組)則有 19 顆有爆開，證明玉米粒內部水分從液態水蒸發成水氣，是影響玉米粒是否爆開之關鍵，所以接下來我們要研究玉米粒產氣的速率與玉米粒爆開時間之關係。

三、實驗三、探討油溫對玉米粒爆開的時間點之影響---

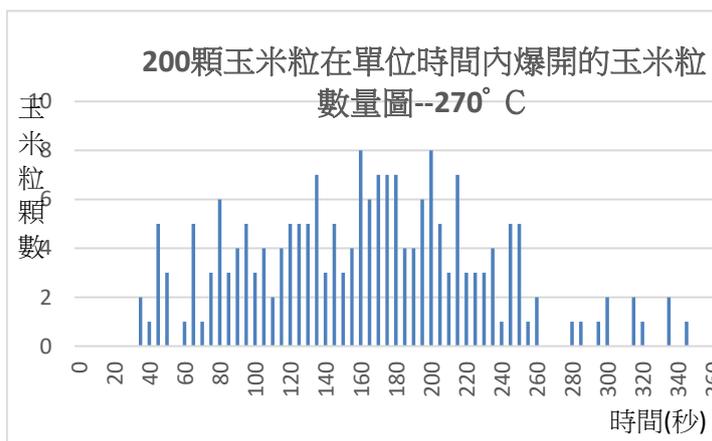
將定溫加熱器分別定溫在 230、250、270°C，放入 200 顆玉米粒並記錄玉米粒爆開的時間，測試不同油溫對玉米粒之影響。



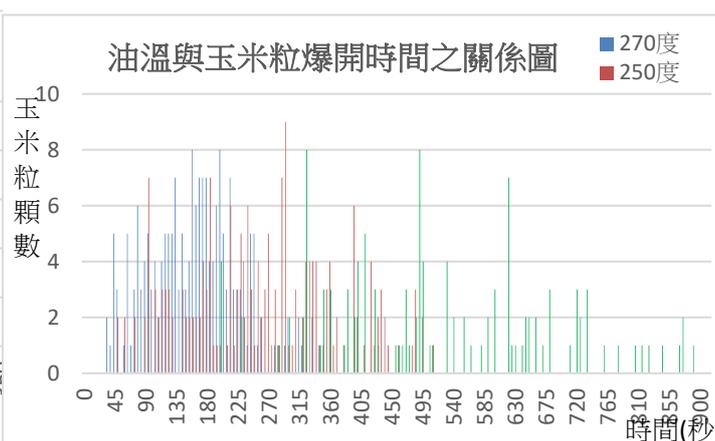
(圖十三) 玉米粒在單位時間內爆開的玉米粒數量圖



(圖十四) 玉米粒在單位時間內爆開的玉米粒數量圖



(圖十五) 玉米粒在單位時間內爆開的玉米粒數量圖



(圖十六) 油溫與玉米粒爆開時間之關係圖

(圖十三)到(圖十五)為 200 顆玉米粒在單位時間內爆開的玉米粒數量圖，油溫分別為

230、250 和 270°C，時間單位皆為每 5 秒一格。(圖十六)為油溫與玉米粒爆開時間之關係圖，是(圖十二)、(圖十三)、(圖十四)的疊合圖。經由「實驗一：利用電磁爐加熱 100 顆玉米粒，觀察玉米粒爆炸是否為隨機現象」的結果顯示玉米粒爆開現象並非隨機現象，經由「實驗二：探討玉米粒內部水分對玉米粒爆開的時間點的影響」的結果，證明玉米粒內水蒸氣多寡，會影響玉米粒是否會爆開，而玉米粒內的水蒸氣的量亦與油溫有關，所以我們從油溫開始著手。

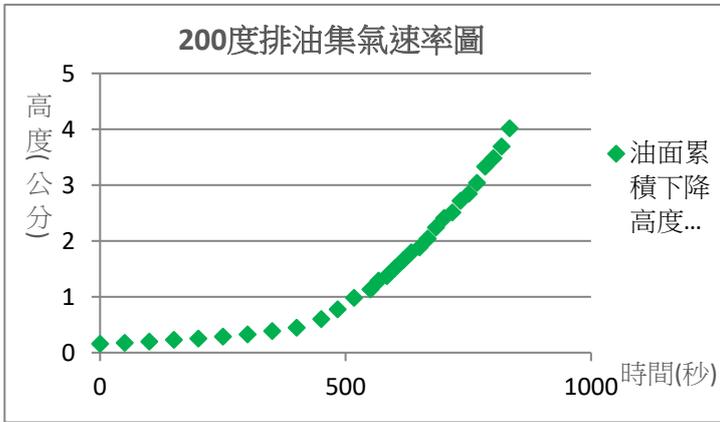
實驗二將油溫分低(攝氏 230 度)、中(攝氏 250 度)、高(攝氏 270 度)三組。分別將玉米粒放入鍋子中，並蓋上玻璃板，錄音 15 分鐘。將音檔以 python 程式分析後，在 Excel 中製成圖比對。藉由(圖十六)能發現油溫愈高玉米粒會愈早爆開且爆開數量很多，而油溫愈低則相反，高溫組的玉米粒爆開率為(192/200)，中溫組為(192/200)，低溫組則為(120/200)推測若油溫低於攝氏 230 度時玉米很難蓄壓，所以不容易爆開。

實驗中也有觀察到油溫愈高，從玉米粒尖端流出來的水蒸氣速率就會愈快。而根據白努力定律，在加熱之初，玉米粒內產生的壓力較小，玉米粒產生水蒸氣的速率應較慢，而隨著加熱時間變長，玉米粒內的壓力變力變大，其產生水蒸氣的速率應會變快。

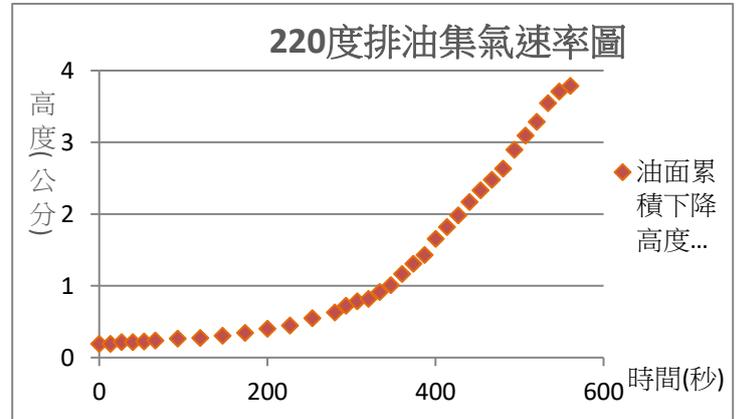
但我們無法量測玉米粒內的壓力值，故改以測量玉米粒噴出水氣的速率，反推玉米粒內部的壓力變化。依據白努力定律，腔體內的壓力會與腔體上孔洞所噴出的液體速率成正相關。因此我們決定要研究從玉米粒尖端溢出的水蒸氣速率是否會符合白努力定律。

四、實驗四、探討油溫對玉米粒內水氣排氣速率之差異---

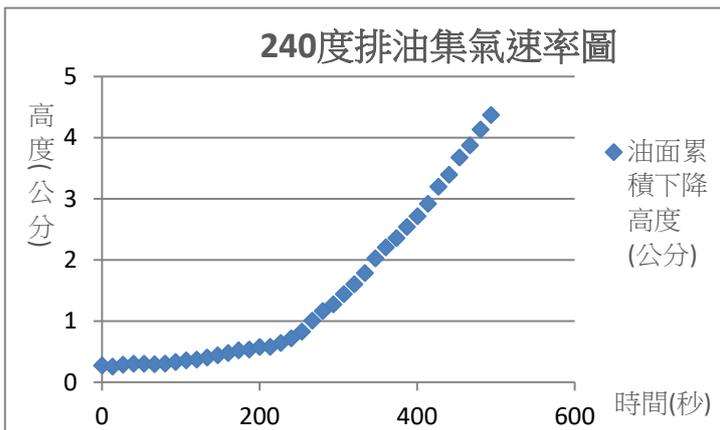
以自製的裝置，進行排油集水氣實驗，探討不同油溫(200、220 和 240°C)對玉米粒的排氣速率之影響。



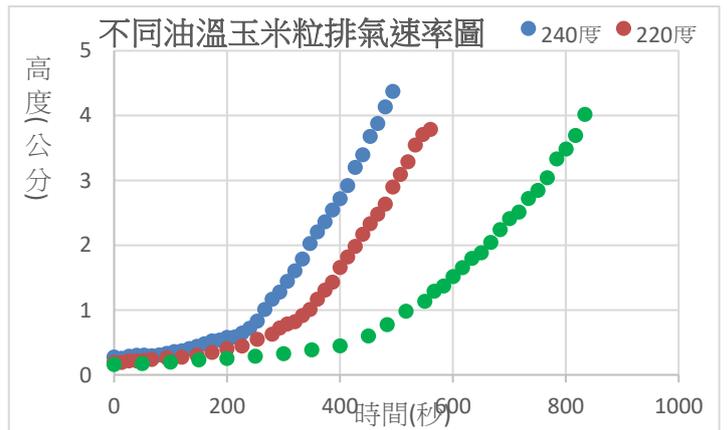
(圖十七) 200 度排油集氣速率圖



(圖十八) 220 度排油集氣速率圖



(圖十九) 240 度排油集氣速率圖



(圖二十) 不同油溫下玉米粒排氣速率圖

(圖十七)到(圖十九)，分別為油溫 200、220 和 240°C時的排油集氣速率圖。(圖二十)則為(圖十七)、(圖十八)、(圖十九)的疊合圖。在實驗二有發現油溫愈高玉米粒產氣速度愈快，而實驗二發現玉米粒內部水分從液態水轉成氣態水溢出速度是使玉米粒爆開的主因，推測是因為玉米粒內部的水分從液態水轉成氣態水的過程體積劇烈膨脹，導致壓力上升超果使玉米粒爆開的臨界值以至於玉米粒爆開。

因此我們設計實驗四，並使用自製的排油集氣裝置和以軟體 Logger Pro 去分析不同

油溫下的玉米粒產氣速率。在實驗初期，本研究以燒杯作為收集玉米粒產出之氣態水的工具，但因燒杯底面積太大而從玉米粒內冒出的水氣沒有很多，於是我們使用漏斗來代替燒杯，使水氣能集中在細而長的漏斗頸處以提升準確性。

結果發現溫度愈高自製裝置中漏斗頸處的油面就下降愈快，也就是說玉米粒產氣速率愈快，接著我們架設錄影機錄下漏斗頸處油面下降的過程，並以軟體 Logger Pro 分析，再將數據以 Excel 繪製成圖。從(圖二十)可以發現，溫度愈高，玉米粒的產氣速率就愈快，並且在加熱初期，產生水氣的速率皆較慢，而隨著加熱時間變長，產生水氣的速率則會變快，由這些結果可知，玉米粒受熱產生壓力的過程是符合白努力定律的，這是此實驗的重大發現。

陸、討論

綜合本研究實驗一至實驗四的結果，我們可以得到以下結論

在「實驗一:以電磁爐加熱 100 顆玉米粒」中我們發現玉米粒爆開現象並非隨機現象，推測是因為玉米粒爆開現象背後有一些物理因素所導致，因此我們將玉米粒爆開現象當作極小規模的爆炸。根據玉米粒爆開的現象，我們判斷其為爆炸中物理性爆炸中的「液體膨脹蒸氣爆炸」。「液體膨脹蒸氣爆炸」是指液體因溫度過高或壓力過低而無法保持液態而沸騰，產生的蒸汽使得壓力迅速增加，直到玉米粒表皮無法承受內外的壓力差進而造成的爆炸。根據實驗結果，玉米粒受熱爆開，就是因為玉米粒內發生「液體膨脹蒸氣爆炸」。

根據「實驗二: 將榨乾水之玉米粒移至高溫加熱」所得到的觀察結果，我們推斷玉米粒內殘存的水份為玉米粒爆開之必要條件之一。此外，在實驗(實驗一)觀察中我們發現玉米粒受熱後產生的氣體會從玉米粒前端空隙逸出。根據實驗(實驗四)分析，發現其逸出速率不只隨溫度增加而加快，亦會隨著加熱時間增長，導致內部壓力的增加，同時導致氣泡從孔隙逸出的速率加快。我們根據此分析提出「玉米粒壓力鍋模型」。

我們假設每顆在油中加熱的玉米粒皆為一個壓力鍋，而玉米粒爆開現象就如同生活中以壓力鍋煮水的情況。鍋內是尚未沸騰的水，底下的瓦斯爐提供熱能，而頂部的蓋子有小孔洩壓。起初，壓力鍋內外的壓力皆為 1 大氣壓。隨著水受熱以後經由相轉變從液態水變成水蒸氣後，壓力鍋內的壓力逐漸上升。同時，壓力鍋內所產生之氣體會因壓力鍋內的壓力大於外界壓力而由小孔逸出，導致洩壓情形。若壓力鍋內產生水蒸氣的速率大於由小孔逸出水蒸氣的速率，壓力鍋內的壓力就會上升。隨著壓力上升的同時，若是壓力鍋內和外界的壓力差大於臨界值時，壓力鍋就會無法承受因壓力差所造成的力量而爆開，而此現象就相當於玉米粒爆開的現象。

為了證明本研究的「玉米粒壓力鍋模型」理論是否正確，本研究進行以下定義。 P_{in} 為玉米粒內部的壓力； P_{out} 為玉米粒外部壓力； P_c 為玉米粒種皮所能承受的壓力臨界值。當 $\Delta P = P_{in} - P_{out} > P_c$ 時玉米即會爆開。依據理想氣體方程式($PV = nRT$)， P_{in} 的壓力應來自於水蒸氣的淨流量。其中， P 為理想氣體的壓力， V 為理想氣體的體積， n_+ 為玉米粒內產生水蒸氣的量 (莫耳數)， n_- 為從玉米粒溢出水蒸氣的量，產生水蒸氣的量減去溢出水蒸氣的量，則稱為水蒸氣的淨流量 n_{net} ，意即 $(n_+) - (n_-)$ 。 R 為理想氣體常數， T 為理想氣體的溫度。在本實驗中，因油溫為定值，所以可假設油溫每秒會給一個固定熱量 Q ， Q 會等於潛熱

c 乘上相轉換的液態水質量 m_{H_2O} ，經由換算， $n_+ = \frac{Q}{c \times m_{H_2O}}$ 。 c 為潛熱，意即 1 克的液態水轉換成氣態所需的能量，另外逸出的氣體和白努力定律有關，依據白努力定律

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

P_1 為玉米粒內部壓力； v_1 為玉米粒內部氣體流速； P_2 為玉米粒外部的大氣壓力； v_2 為玉米粒噴出的氣體速率， ρ 為水蒸氣的密度。因玉米粒內沒有位能，所以 ρgh_1 與 ρgh_2 皆為 0，且依據白努力定律，腔體截面積與液體流出速率關係為 $A_1 v_1 = A_2 v_2$ ，因一顆玉米粒的截面積遠大於其溢出氣體的孔徑 ($A_1 \gg A_2$)，所以 v_1 的速率應遠小於 v_2 ($v_1 \ll v_2$)，所以 v_1 數值應可忽略，故設為 0，經由換算，得到 $v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$ 。綜合上述，我們可得到

$$P = \frac{RT}{V} \Delta n = \frac{RT}{V} (n_+ - n_-)$$

在 Δt 時間內 n_- 產生的量，為

$$n_- = A \times \rho \times v_2 \times \Delta t \times \frac{1}{M_{H_2O}} = \frac{A\rho}{M_{H_2O}} \sqrt{\frac{2(P_1(t) - P_2)}{\rho}} \Delta t$$

假設油溫每秒提供的熱量為 Q ，

$$Q = n_+ CM_{H_2O}$$

油溫經過單位時間所能提供的熱量為，

$$Q = J \times \Delta t$$

J 為單位時間內吸收的熱量，

$$J = \kappa \Delta T$$

$$\text{Kappa}(\kappa) = k(\text{導熱係數}) \times A(\text{面積}) / d(\text{厚度})$$

經由換算油溫在單位時間內所提供的熱量為

$$Q = J \times \Delta t = \kappa \Delta T \Delta t = n_+ CM_{H_2O}$$

經由換算，可知玉米粒內產生水氣的莫耳數為

$$n_+ = \frac{\kappa \Delta T \Delta t}{CM_{H_2O}}$$

將水氣淨流量的莫耳數 $(n_+ - n_-)$ ，代入理想氣體方程式中，得到

$$P = \frac{RT}{V} (n_+ - n_-)$$

$$P = \frac{RT}{V} \left(\frac{\kappa \Delta T \Delta t}{CM_{H_2O}} - \frac{A\rho}{M_{H_2O}} \sqrt{\frac{2(P_1(t) - P_2)}{\rho}} \Delta t \right)$$

再將 Δt 移出，方程式簡化為

$$P = \frac{RT}{V} \left(\frac{\kappa \Delta T}{CM_{H_2O}} - \frac{A\rho}{M_{H_2O}} \sqrt{\frac{2(P_1(t) - P_2)}{\rho}} \right) \Delta t$$

P 可定義為單位時間前、後壓力之變化，將 P 改寫為 $P_1(t + \Delta t) - P_1(t)$ ，則公式改為

$$P_1(t + \Delta t) - P_1(t) = \frac{RT}{V} \left(\frac{\kappa \Delta T}{CM_{H_2O}} - \frac{A\rho}{M_{H_2O}} \sqrt{\frac{2(P_1(t) - P_2)}{\rho}} \right) \Delta t$$

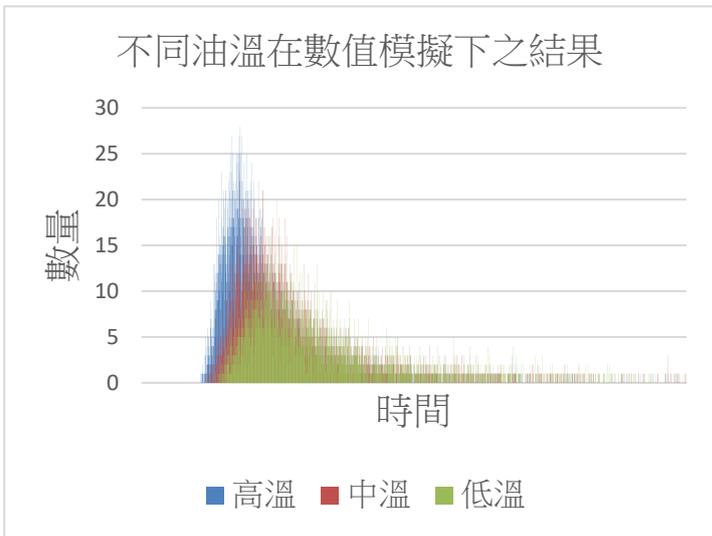
在公式中，會影響 P 值大小的因素，主要為油溫所給的熱量 Q ，與玉米粒排氣孔的面積大小 A 以及玉米粒內外的壓力差 ΔP 。我們發現實驗中所觀察到的現象皆符合此公式。例如實驗二玉米粒內的水分多少會影響玉米粒是否會爆開，水氣的多少關係著公式中的 $\frac{\kappa \Delta T}{CM_{H_2O}}$ 的數值大小，若數值越大則 ΔP 值也越大，玉米粒越容易爆開。相同的，實驗三證明油溫越高，則玉米粒越早爆開，則是因為 T 值與 ΔT 值變大，也會讓 ΔP 值變大，讓玉米粒提早爆開。

另外因每個玉米粒尖端的小孔截面積 A 值的大小，應為一常態分布事件，所以造成在相同環境條件下(油溫相同或玉米粒內水分相同)，每顆玉米粒的爆開時間還是有所差異的原因。另在實驗過程中，發現有些玉米粒不會爆開，推測這些爆不開的玉米粒可能是尖端小孔太大，雖然高油溫提供了很多的熱量，產生了很多蒸氣形成很大的壓力，但也因排出水氣速率太快，造成經由小孔洩出的壓力也變大，可能造成壓力差趨近為零，使得玉米粒無法蓄壓爆開。

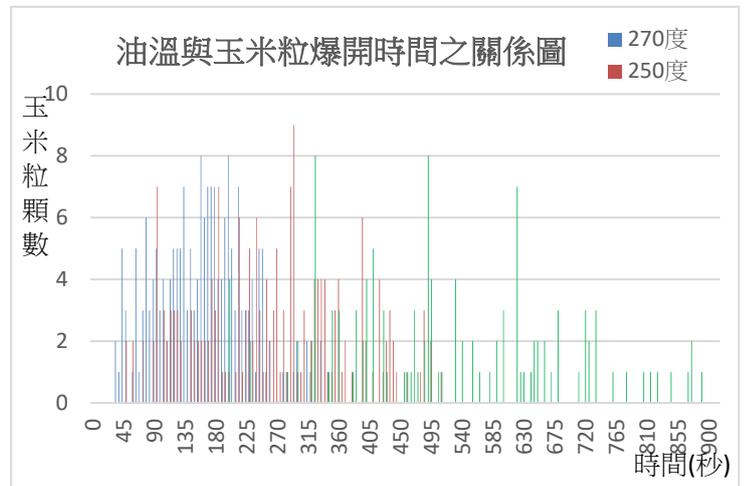
這公式也可解釋台灣的一種零食—米香，或是商業用的爆米花機作用的機制，先是提高外界的壓力 P_2 ，讓玉米粒暫時無法爆開，然後再瞬間減壓，讓壓力差 ΔP 瞬間上升，提高爆米花爆開的機率。原來一顆小小的爆米花，藏著這麼有趣的物理知識。

為了進一步確定，我們推導出的公式，是否真的符合真實環境下玉米粒爆開的機制，我們將所得公式(eq(a))，以軟體 Matlab 進行數值模擬，來觀察推導的公式與實驗結果是否相符。

模擬的方法是先給定 Eq.a 當中各個物理量的相對數值，再利用時間遞迴的方式，重複計算每一刻在產生的水蒸氣及逸出的水蒸氣所產生多的壓力以後，重複遞迴就可以得到下一刻新的壓力了。只要內外壓力差超過臨界值，玉米粒就會爆出，並記錄下該時間點。最後可以得到以下圖(圖二十一)，與圖(十六)不同油溫的曲線相符，因此本模型可以做為玉米粒爆炸的模型



圖二十一 玉米粒在不同油溫數值模擬之結果



圖十六 玉米粒在不同油溫下之爆開時間圖

柒、結論

1. 玉米粒爆開時間分布圖與普松分布圖相比，發現玉米粒受熱爆開不是隨機事件。
2. 玉米粒內水分的多寡，會影響玉米粒是否爆開，水分越多，爆開的機率可能越高。
3. 油溫的高低會影響玉米粒爆開的時間，油溫越高，爆開的時間可能越早。
4. 加熱過程中，玉米粒尖端的小孔會產生氣泡，產生氣泡的速率符合白努力定律。
5. 可將玉米粒視為一小型壓力鍋，建構出「玉米粒壓力鍋模型」。
6. 將模型所推導出的公式進行數值模擬，發現與實驗結果相符，證明本模型可做為玉米粒爆炸的模型。

捌、參考資料及其他

一、爆米花是怎麼「爆出來」的？ - BBC

取自 <https://www.bbc.com/ukchina/trad/vert-fut-39217770>

二、科學 Online 高瞻自然科學平台 理想氣體方程式

取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=38844>

三、在 LSHTM 的統計學筆記---第 6 章 卜瓦松分佈 Poisson Distribution

取自 <https://wangcc.me/LSHTMlearningnote/poisson.html>

四、科學 Online 高瞻自然科學平台 熱傳導 (Conduction)

取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=2747>

五、科學 Online 高瞻自然科學平台 白努利原理

取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1524>

【評語】 160026

玉米顆粒吸收微波爆裂，值得探討。在各選定參數下，紀錄各玉米顆粒爆開及蒸汽溢出顆粒所需時間，統計其分布。控因及變因清楚合宜。能有系統地收集數據，建立適當理論模型配合實驗結果。已有玉米粒含水量及加熱油溫為參數，可自成完整探討。以隨機分布及白努力定律模擬分布，但未將模擬運用在各分布數據，建議可就實驗數據與模擬做擬合比對，判斷其適切性，討論合宜性。