

2014 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160027

參展科別 物理與天文學

作品名稱 乒乓球彈跳運動研究

得獎獎項 大會獎：一等獎

美國 ISEF 正選代表：美國第 65 屆國際科
技展覽會

青少年科學獎

就讀學校 高雄市立前金國民中學

指導教師 殷宏良

作者姓名 曾少茵

關鍵字 彈跳次數、彈跳高度、接觸時間

作者簡介



我是曾少茵，就讀於高雄市前金國中三年級，很榮幸能參加這次的盛會。我探討的主題是有關於乒乓球彈跳性質的研究。我覺得一件作品的完成，是集結眾人的心力共同堆砌而來的。感謝所有曾經指導與幫助過我的師長和同學，有您們的支持，讓我充分領受科學領域的奧妙、精采。有了這些養分，相信在往後的學習路程，我會走得更穩健、更踏實。

摘要

為了測量乒乓球彈跳，設計了測量的方法，基本構想是將乒乓球在木板上的彈跳（接觸與離開）視為開關的 ON 與 OFF，將訊號產生器所產生的電訊號接到乒乓球上，木板接到電腦錄音輸入端，當乒乓球與木板接觸時，形成通路訊號進入電腦，由錄音程式加以記錄，反之為斷路，記錄停止。

但如何將乒乓球、木板由不能導電的絕緣體轉換成可以導電的導體，而又不能影響乒乓球原本彈跳性質？想出了用 2B 鉛筆（含石墨）將乒乓球、木板塗黑轉變為導體的方法，解決這個問題後，成功測量出以下乒乓球彈跳時各項的記錄：

1.彈跳次數 2.碰撞作用力 3.接觸時間 4.飛行時間。

最後以力感測器直接測量碰撞作用力，來驗正此實驗正確性。

Abstract

An electric point contact is used to identify the physical deformation of an object initiated by a nondestructive impact. The detection of electric signal allows a spatial sensitivity that is two order-of-magnitudes higher than those through video or audio detection, with a temporal response that is an order-of-magnitude faster than those from piezoelectric response. The electric contact on insulating object is made possible by the deposition of a very thin layer of graphite powder from a 2B pencil on the surface. Surprisingly, 37 consecutive rebounds in 2.06 sec of a free-fall ping-pong ball from an initial height of as low as 4 cm, with a final rebound reducing to as short as 10.3 μm , can be clearly resolved. An ultra-small deformation for 7.36 μm can also be detected more efficiently. The non-linear behavior of the bouncing probe, resulted from the surface adhesive and body softness of a soft object, was used to study the viscoelasticity and surface adhesion of soft materials. A piece of thin silicone wafer was utilized in order to distinguish the external surface adhesive and internal body viscoelastic of dough without affecting to the premise of natural properties. A critical exponent that indicates the fermentation of dough was extracted from the non-linear bouncing motion. The non-linear damping oscillation of dough was also able to observe through a reflection amplification, and found that the damping constant of dough is indeed not a constant.

壹、 研究動機與目的

打乒乓球時，看到乒乓球在球桌上快速叩叩地彈跳著，引起我的興趣，想知道乒乓球從彈跳開始到結束，在這短暫時間會彈跳幾次？彈跳時乒乓球與桌面碰撞時作用力大小？乒乓球與桌面接觸時間的長短？是否可以建立有規律的數學模式？為了解決一連串的疑問，我運用了基本電路、導體、運動學及牛頓力學等相關知識，開啟了這次追根究底的行動。

貳、 研究方法與過程

一、設計出一種能準確測量以下各項變因的實驗裝置：

(一)、乒乓球彈跳次數

(二)、彈跳時在空中飛行的時間

(三)、乒乓球與木板碰撞時接觸的時間








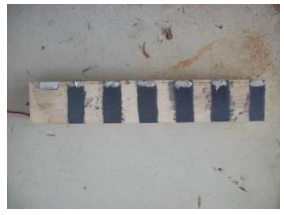




(四)、乒乓球與木板碰撞時作用力的大小

二、建立乒乓球彈跳數學模式、能模擬乒乓球彈跳、模擬計算乒乓球從任一高度下落時的彈跳次數、作用力大小、接觸時間。

三、乒乓球與不同物質（木板、鐵板、橡皮）碰撞時，對彈跳次數、飛行時間、碰撞接觸時間及碰撞作用力的影響。

四、探討乒乓球碰撞乒乓球拍「甜蜜區」與「非甜蜜區」，結果的差異及「甜蜜區」位置相關性質研究。

參、 研究設備及器材

			
電腦	訊號產生器	乒乓球	木板
			
鐵板	橡皮擦	球拍	長形木板
			
電子天平	鐵架	導電膠	漆包線

肆、 研究過程與結果

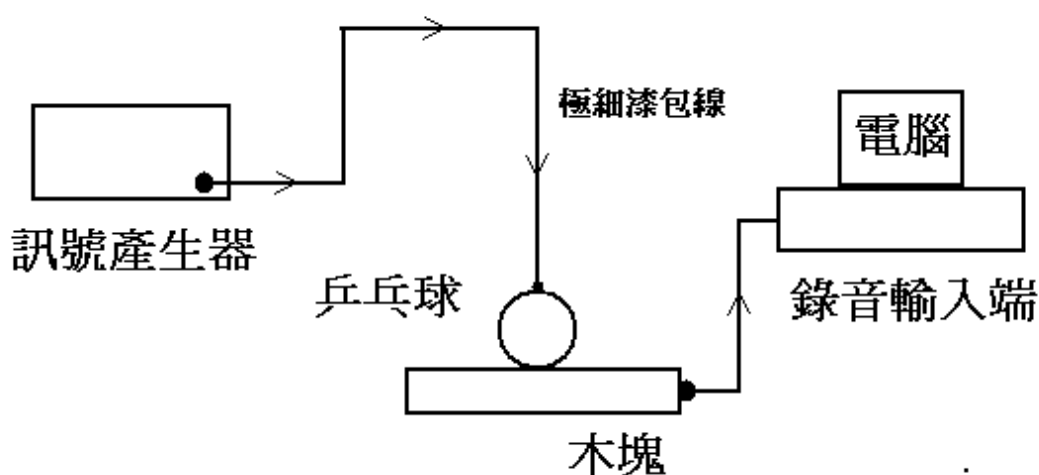
*設計過程演進說明：

以快速錄影機錄影和錄下乒乓球彈跳聲音，這兩種方法來研究乒乓球的彈跳，不過都無法成功（見附錄 1）。

研究一：設計出一種實驗裝置，能準備測量乒乓球彈跳：

想法：乒乓球與木板的接觸與離開，形成一「開關」，當乒乓球與木板接觸時形成通路時，訊號產生器產生訊號經由乒乓球及木板進入電腦錄音輸入端，再以 Audacity 錄音程式將訊號記錄下來。當乒乓球與木板未接觸時形成斷路時，記錄則停止。

（一）實驗裝置設計：如圖（1）



圖（1a）On 通路狀態：乒乓球與木塊接觸，訊號經由乒乓球→木塊→電腦錄音程式記錄

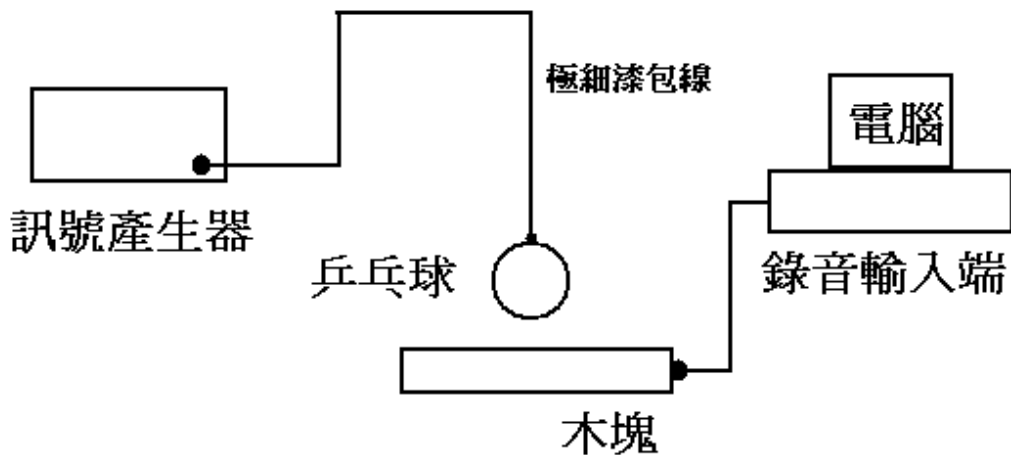


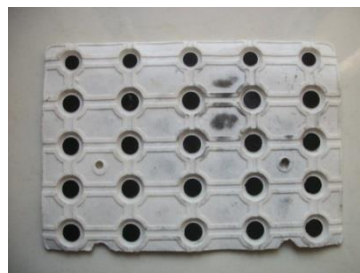
圖 (1b) Off 斷路狀態：乒乓球與木塊未接觸，乒乓球與木板之間斷路，記錄停止

(二) 實驗裝置問題的產生與解決：

乒乓球與木板都不是導體，必須將乒乓球與木板從絕緣體變成可以導電的導體，而又不影響乒乓球與木板原本的彈跳性質。

* 問題解決過程：

1. 將廚房用的鋁箔紙貼在乒乓球上：乒乓球根本彈不起來，結果→失敗。
2. 在乒乓球與木板塗上一層鹽水幫助導電：乒乓球無法彈起，結果→失敗。
3. 轉機：從壞掉的計算機拆解後發現，按鍵下的零件是一塊塊黑色的塑膠如(圖2)，塑膠怎麼會導電？跟老師討論後，這黑黑的一層應該是可以導電的石墨。石墨可以導電，因此，只要用鉛筆(石墨芯)將乒乓球與木板塗黑，乒乓球與木板不就可以導電了嗎？



拆下來計算機鍵盤背面
圖(2)

4.問題的解決：使用 2B 鉛筆將乒乓球與木板塗黑，使乒乓球與木板變成導體：

(1) 將木板從絕緣體變成導體的過程，如圖 (3)：

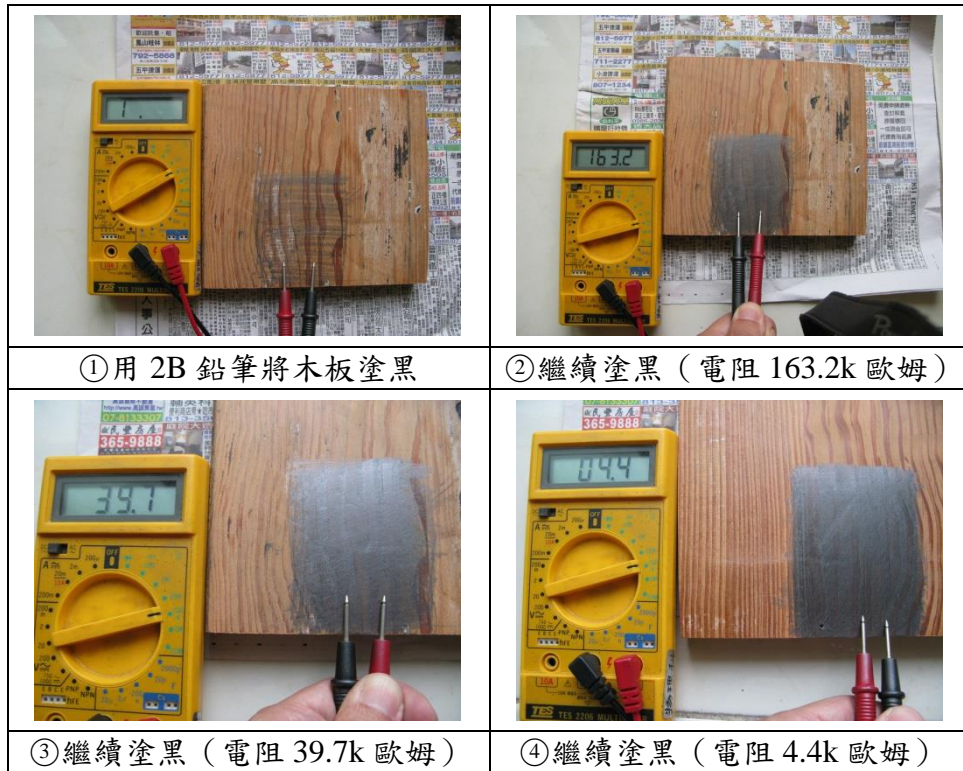


圖 (3)

結果：當用 2B 鉛筆將木板塗得更黑時，木板的電阻變得更小，漸漸就可以導電了。

(2) 將乒乓球轉變成導體：用 2B 鉛筆將乒乓球塗黑、最後成品 (如圖 4a)

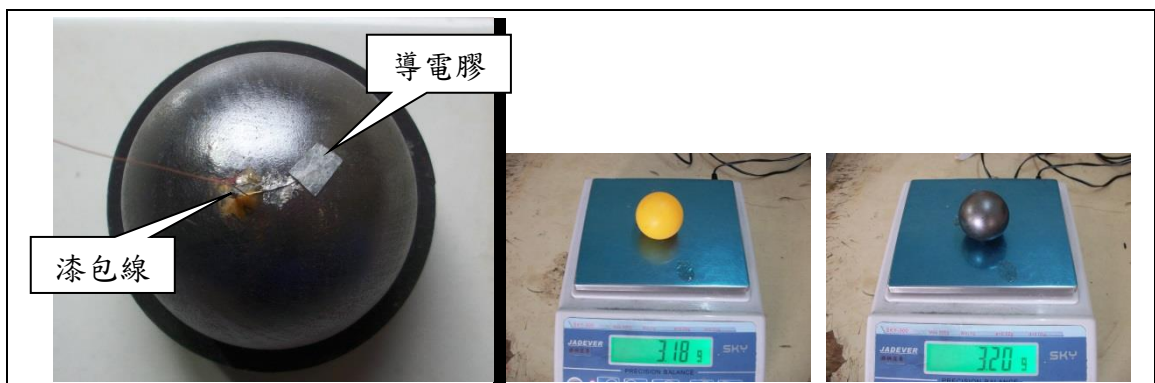


圖 (4a)

(3) 乒乓球塗 2B 鉛筆前後質量測量：使用電子天平，塗 2B 鉛筆前 3.18 g，塗後 3.20 g。

結果：

一顆用 2B 鉛筆塗黑的乒乓球，其直徑兩端的電阻約 2K 歐姆，可以傳導訊號而且乒乓球的彈跳不受影響。

發現：

用 2B 鉛筆將乒乓球、木板塗黑，將乒乓球、木板變成導體的方法確實可行。而且塗上的這一層石墨很薄，對乒乓球在木板上彈跳及乒乓球質量，不至產生影響。

(三) 實驗過程：

- 1 將極細的漆包線用導電膠黏在乒乓球上，訊號產生器產生頻率 60KHz 的方波，連接到乒乓球上，木板接到電腦錄音輸入端。
- 2.將漆包線固定在鐵架上（如圖 4b），手持乒乓球在適當高度將乒乓球垂直下落，碰到木板後，乒乓球上上下下垂直彈跳。
- 3.當乒乓球接觸木板時，訊號產生器產生的訊號，經由乒乓球與木板，進入電腦，訊號由 Audacity 加以記錄，測量出乒乓球在木板上彈跳過程的 3 個物理量，並且可推算出乒乓球與木板碰撞時作用力的大小：
 - (1) 乒乓球彈跳次數。
 - (2) 乒乓球在空中飛行的時間。
 - (3) 乒乓球與木板碰撞時接觸的時間。
 - (4) 乒乓球與木板碰撞時作用力的大小（利用測量出的飛行時間、接觸時間，以

牛頓第二定律 $F=ma$ ，可以計算出作用力的大小)



圖 (4b)

(四) 實驗結果：由 Audacity 錄到的訊號，如圖 (5)。

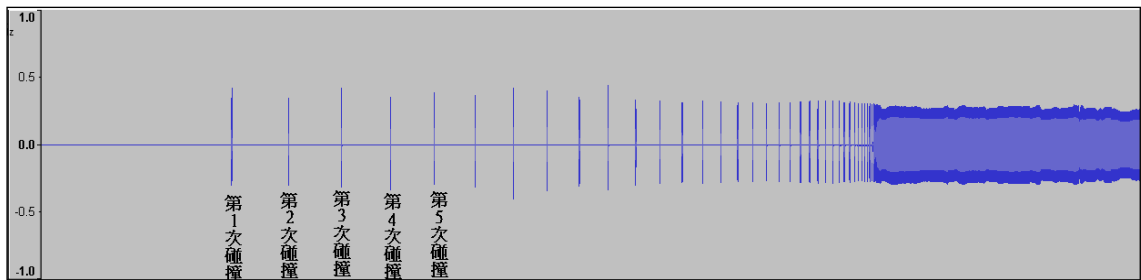


圖 (5)

將時間軸拉大，如圖 (5-1)

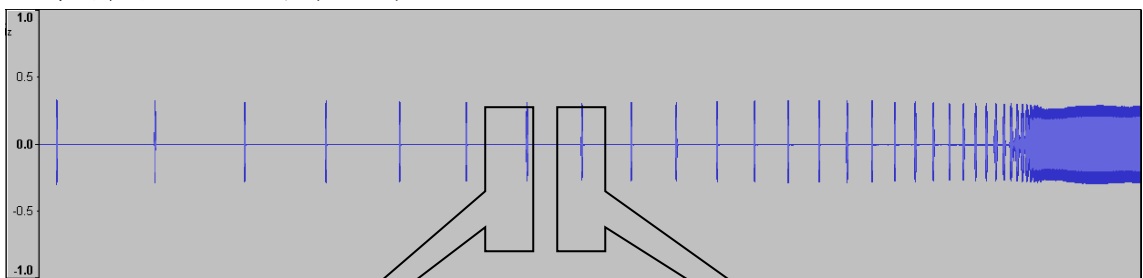


圖 (5-1)

將時間軸拉更大，以便獲知相關訊息，如圖 (5-2)



圖 (5-2)

(五) 實驗結果與分析：

1. 如何得知「乒乓球彈跳次數」？

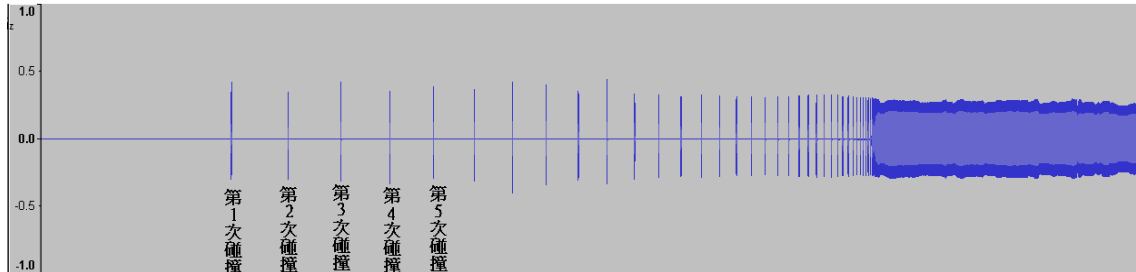


圖 (6)

由圖 (6) 可看出，每一個條狀代表乒乓球與木板接觸時，Audacity 錄音程式錄到的訊號，由條狀的數目即可知乒乓球彈跳次數。

2. 如何得知「乒乓球反彈後在空中飛行的時間」？

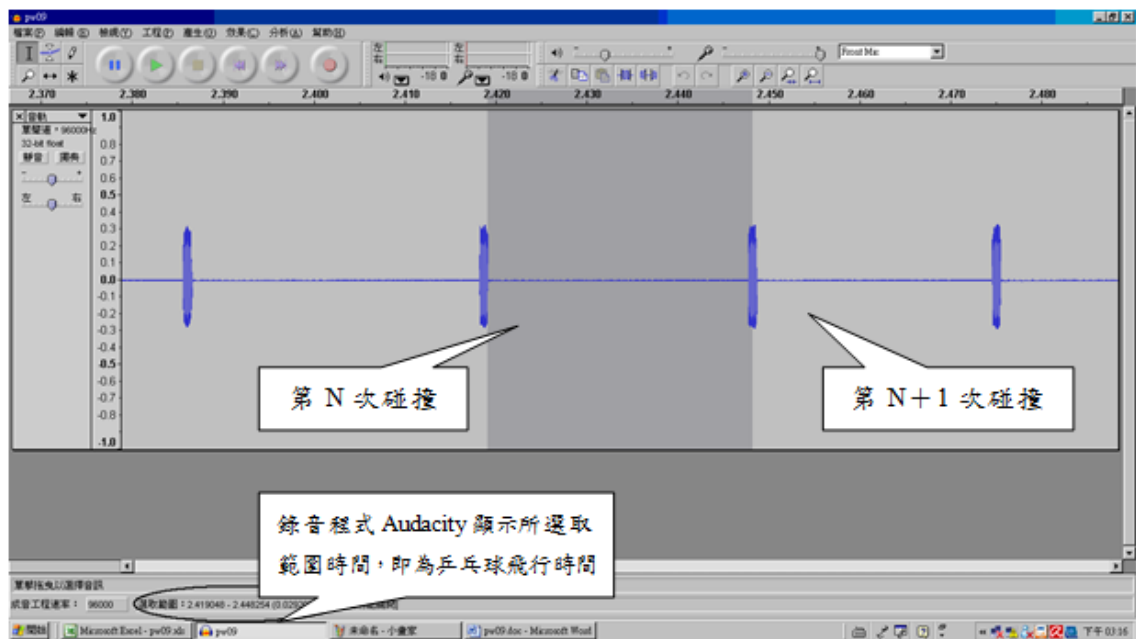


圖 (7)

由兩相鄰條狀與條狀間隔，選取第 N 次碰撞至第 $N+1$ 次碰撞，而錄音程式 Audacity 顯示所選取範圍時間，即為乒乓球飛行時間，因此可以測出乒乓球反彈後飛行時間，：如圖 (7)。

3.如何得知「乒乓球與木板碰撞時接觸的時間」？

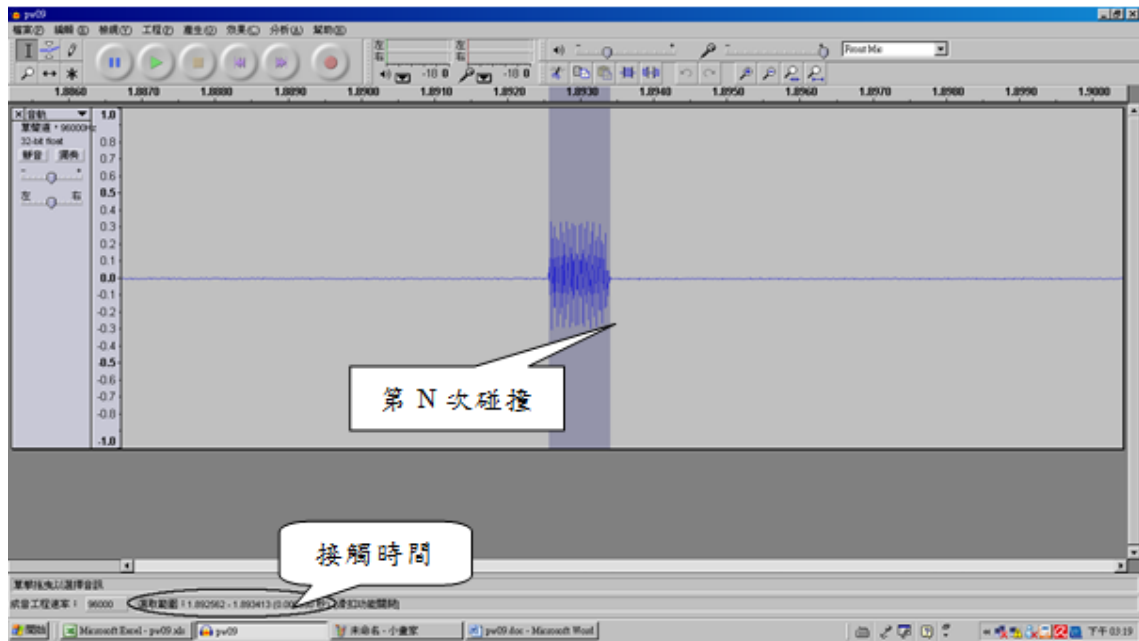


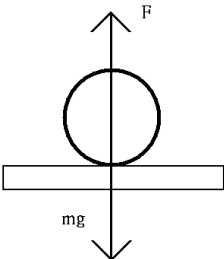
圖 (8)

將條狀時間軸拉得更大，如圖 (8)，選取第 N 次碰撞範圍，由錄音程式 Audacity 顯示所選取範圍時間，即為第 N 次碰撞乒乓球與木板接觸時間。

4.如何得知「乒乓球與桌面碰撞時作用力大小」？

由圖 (7) 乒乓球在空中飛行時間 與圖 (8) 乒乓球與木板碰撞時接觸時間透過下列推導及運算，即可以計算出乒乓球撞擊木板時的平均作用力 F。

乒乓球撞擊木板時的平均作用力 F 的計算公式推導：

 <p>F : 乒乓球撞擊木板的平均作用力 V 入 : 乒乓球撞擊木板時入射速度 V 反 : 乒乓球撞擊木板時反彈速度 t : 乒乓球撞擊木板時接觸時間 m : 乒乓球質量</p>	$V_{反} = -V_{入} + axt$ $a = (V_{反} + V_{入}) / t$ <p>由 $F - mg = ma$</p> $F = mg + m \times (V_{反} + V_{入}) / t$
---	--

乒乓球速度的計算公式推導：

乒乓球在垂直線上反彈飛行過程前半段可視為鉛直上拋，後半段可視為自由落體

上升時間 = 下降時間 = $\frac{1}{2} \times (\text{飛行時間})$

$V = g \times \frac{1}{2} \times (\text{飛行時間})$

將 V 代入 $F = mg + m \times (V_{\text{反}} + V_{\text{入}}) / t$

即可求得乒乓球撞擊木板的平均作用力

5. 測量數據經過以 Excel 整理計算所得結果如表 (1)：乒乓球質量 3.2 克

第 N 次 碰撞	飛行時間 (s)	接觸時間 (s)	彈跳速度 (cm/s)	碰撞力 (dyne)	反彈高度 (cm)	e 值
1	0.1673	0.000835	81.98	605361	3.4287	0.9169
2	0.1534	0.000822	75.17	564907	2.8826	0.9198
3	0.1411	0.000816	69.14	523689	2.4389	0.9199
4	0.1298	0.000855	63.60	458681	2.0639	0.9137
5	0.1186	0.000812	58.11	444377	1.7231	0.9266
6	0.1099	0.000848	53.85	393472	1.4796	0.9208
7	0.1012	0.000823	49.59	371797	1.2546	0.9121
8	0.0923	0.000811	45.23	345931	1.0436	0.9209
9	0.0850	0.000823	41.65	313688	0.8851	0.9176
10	0.0780	0.000850	38.22	278182	0.7453	0.9115
11	0.0711	0.000837	34.84	256601	0.6193	0.9030
12	0.0642	0.000894	31.46	217114	0.5049	0.9003
13	0.0578	0.000884	28.32	198426	0.4093	0.9048
14	0.0523	0.000904	25.63	176240	0.3351	0.9082
15	0.0475	0.000954	23.28	151554	0.2764	0.9011
16	0.0428	0.000969	20.97	134369	0.2244	0.8949
17	0.0383	0.001000	18.77	117540	0.1797	0.9050
18	0.0347	0.001000	16.98	106430	0.1472	0.9006

19	0.0312	0.001020	15.30	94414	0.1194	0.9022
20	0.0282	0.001008	13.80	86923	0.0972	0.9126
21	0.0257	0.001024	12.59	77909	0.0809	0.9000
22	0.0231	0.001040	11.33	69647	0.0655	0.9072
23	0.0210	0.001080	10.28	60665	0.0539	0.8884
24	0.0186	0.001094	9.13	53774	0.0426	0.8953
25	0.0167	0.001107	8.18	47788	0.0341	0.8889
26	0.0148	0.001120	7.27	42555	0.0270	0.8980
27	0.0133	0.001120	6.53	38367	0.0217	0.8890
28	0.0118	0.001162	5.80	33292	0.0172	0.8870
29	0.0105	0.001196	5.15	29220	0.0135	0.8940
30	0.0094	0.001214	4.60	26134	0.0108	0.8960
31	0.0084	0.001217	4.12	23540	0.0087	0.8820
32	0.0074	0.001240	3.64		0.0067	

表 (1)

(六) 實驗結果：

1. 乒乓球彈跳次數：

- (1) 乒乓球由高約 3.5 cm 落下後，在時間 1.8225 秒內總共彈跳 32 次。
- (2) 隨著乒乓球的彈跳，彈跳時間間隔越來越來短，在後半段（第 17 次到第 32 次彈跳）短暫時間 0.3132 秒內，就彈跳了 16 次之多。

反彈高度與第N次彈跳

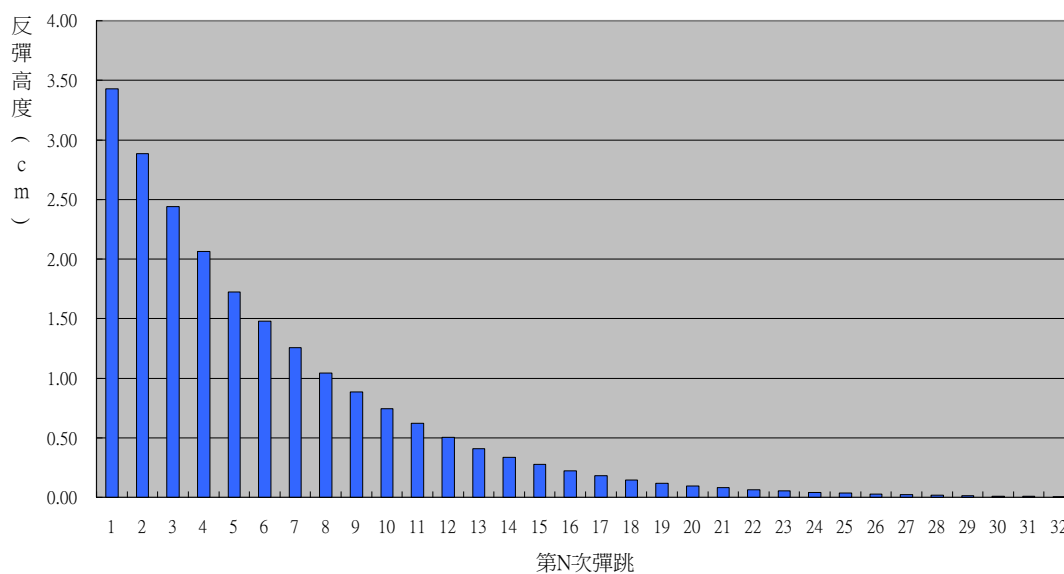


圖 (9a)

飛行時間與第N次彈跳

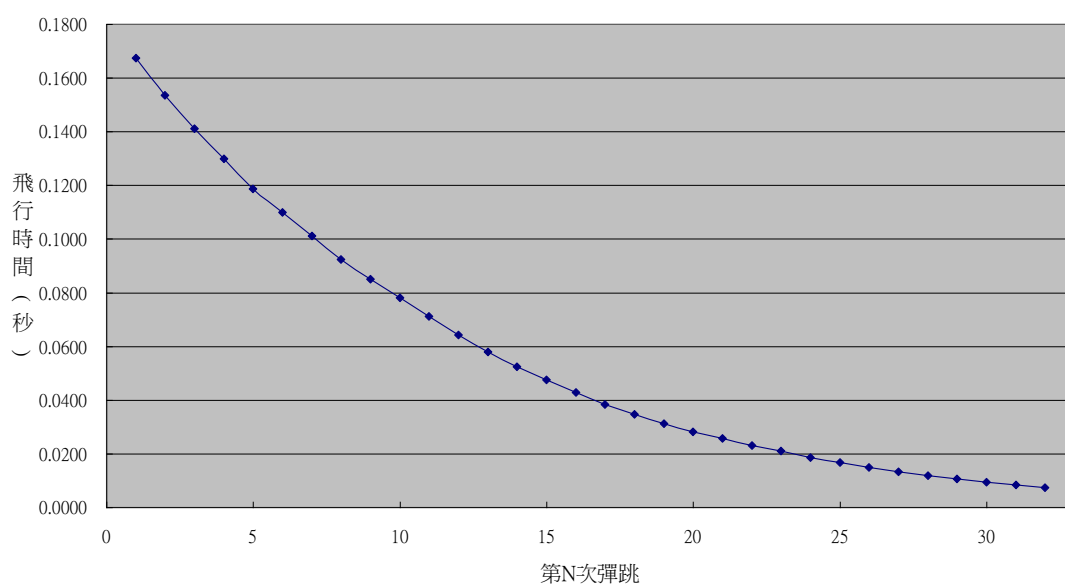


圖 (9b)

(3) 乒乓球在每次彈跳時，因為能量的損失，所以每次彈跳的高度會越來越小，彈跳飛行時間也會越來越短（如圖 9a、9b）。

(4) 最後幾次彈跳飛行時間大約在 10^{-2} 秒的範圍，換成彈跳高度約為 10^{-2} cm， 10^{-2} cm 為 100 微米，一般頭髮直徑約為 80 微米。

(5) 所以利用自行設計以錄音程式測量乒乓球彈跳的方法，讓我們能測量大約只有一根頭髮直徑的彈跳高度，方法雖然簡易，卻有很好的效果。

(6) 將乒乓球約從 3.5 cm 高度下落後，隨著彈跳過程，彈跳高度最後大約只有 0.01 cm，彈跳時間間隔約為 0.01 秒而已，所以要能測量出如此小的彈跳高度，沒有適當的測量方法，確實不容易。

2.碰撞時碰撞力大小與速度的關係：

撞擊力與入射速度

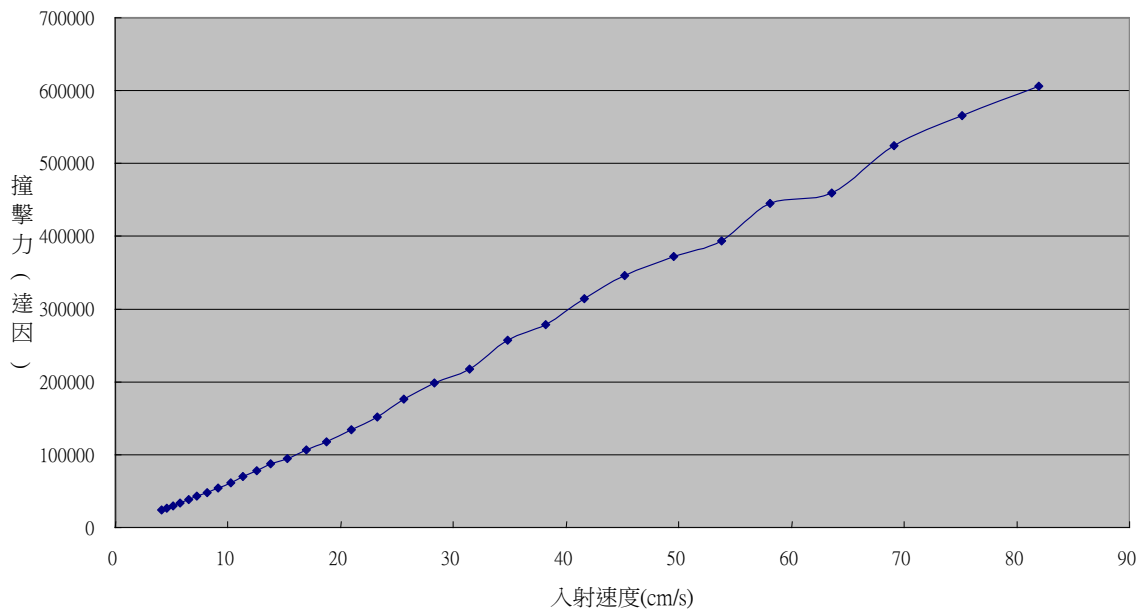


圖 (10)

- (1) 由圖 (10) 乒乓球碰撞力與撞擊速度的關係圖可知，乒乓球撞擊木板的碰撞力與撞擊速度為直線正比關係。
- (2) 所用乒乓球質量為 3.2g，從高 3.4 cm 自由下落 在撞擊速度為 81.98 cm/s 撞擊木板時，碰撞力高達 618gw，原因為乒乓球是「硬球」，碰撞時接觸時間短 (8.35×10^{-4} s)，造成碰撞力偏大。

3.碰撞時接觸時間與速度的關係：

接觸時間與入射速度

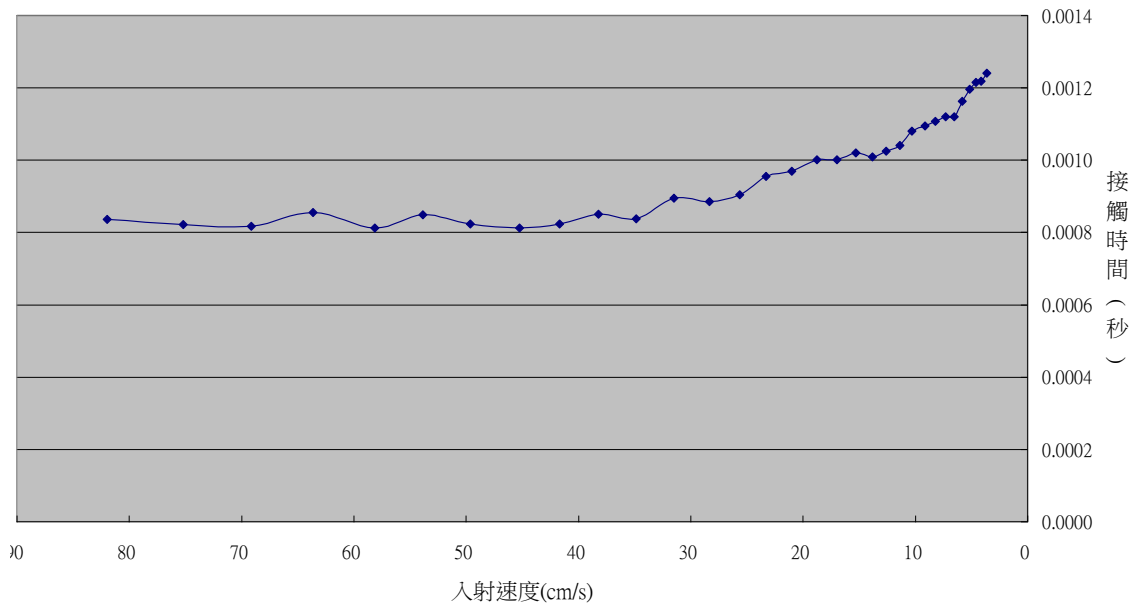


圖 (11)

(1) 由測量結果，乒乓球在碰撞時與木板接觸時間很短暫，接觸時間約在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之間。

(2) 由圖 (11) 可知，在撞擊速度 40 cm/s~90 cm/s 之間，接觸時間約為定值，在撞擊速度 < 40 cm/s，接觸時間有隨撞擊速度變小而變大的趨勢。

4.碰撞時恢復係數 e 與速度的關係：

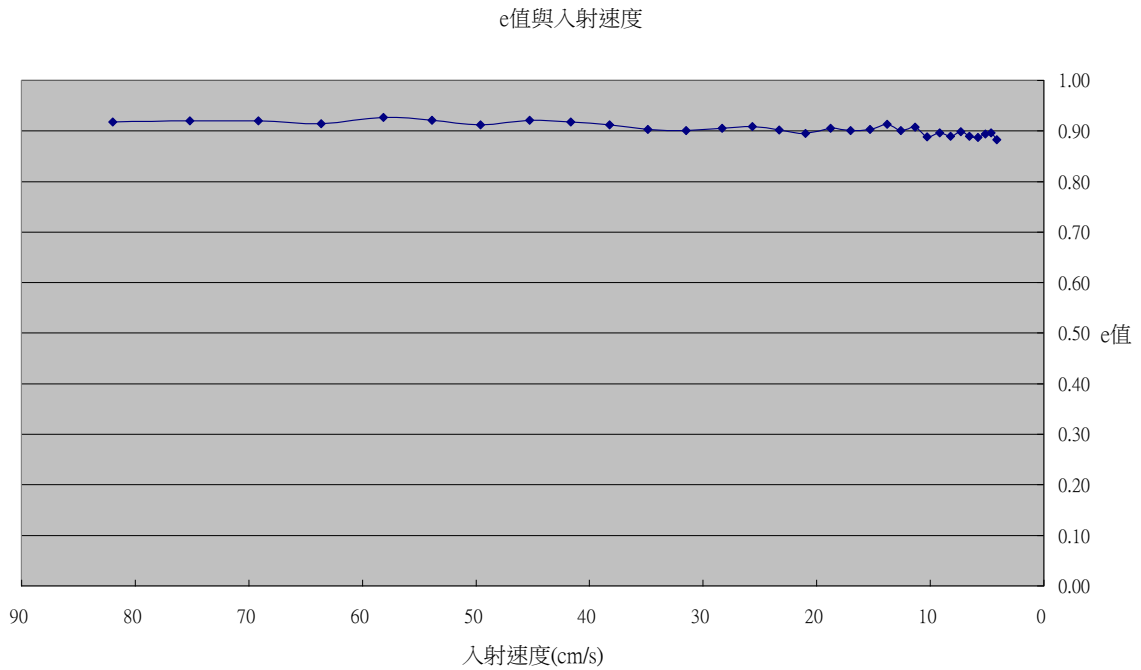


圖 (12)

(1) 恢復係數 e 值的定義： $e = \frac{\text{反彈速度}}{\text{入射速度}}$

(2) 從圖 (12) 可看出乒乓球撞擊木板 e 值約為定值變化不大，不過隨著入射速度變小，e 值會稍微變小，從 0.91 至 0.88 之間。

(3) **原因**：速度小，入射能量小，撞擊時只要有些微能量損失，e 值就會變得較小（這個現象在實驗三，乒乓球撞擊橡皮時，現象更明顯）。

研究二：建立乒乓球彈跳數學模式、能模擬乒乓球彈跳、模擬計算乒乓球從任一高度下落時的彈跳次數、作用力大小、接觸時間

由於我們已經可以測得乒乓球在木板上整個彈跳過程、碰撞接觸的時間、碰撞時作用力的大小，我們可以試著去模擬乒乓球的彈跳，計算乒乓球的彈跳次數。

(一) 推算方法：

1. 利用 excel 求得趨勢線的數學式，分別求出乒乓球碰撞木板時，三個物理量：e 值、碰撞接觸的時間、碰撞作用力的大小與入射速度關係式。
2. 已知乒乓球由某一高度自由落下，利用第二定律 $F = m \times a$ 及 $v = v_0 + at$ (作用力 F、接觸力 F 由趨勢線方程式求得)，可以計算出碰撞後乒乓球反彈的速度。
3. 將反彈的速度當作下一次碰撞入射速度，以 excel 循序去計算第 1 次、第 2 次、第 3 次、第 4 次…… 第 N 次碰撞後反彈的速度
4. 如果計算出碰撞後反彈的速度為負值 (向上方向取 +，向下方向取 -) 代表乒乓球碰撞後無法回彈，此時彈跳過程停止，如此就可以計算出乒乓球彈跳次數。
5. 如果從彈跳開始到結束，整個碰撞過程的碰撞接觸時間、碰撞作用力與入射速度關係式同時由一個數學式表示，誤差將會比較大。所以本研究設定以 $v=10 \text{ cm/s}$ 為界：

入射速度大於 10 cm/s ，反彈速度以 e 值計算 (因入射速度大於 10 cm/s 時，e 值幾乎為定值)

入射速度小於 10 cm/s ，反彈速度以 $F = m \times a$ 及 $v = v_0 + at$ 計算

(二) 以 Excel 分別求出趨勢方程式：

1. 入射速度大於 10 cm/s 時，恢復係數 e 與入射速度關係式如圖 (13)：

$$e = 0.0003469833 v + 0.8961987626$$

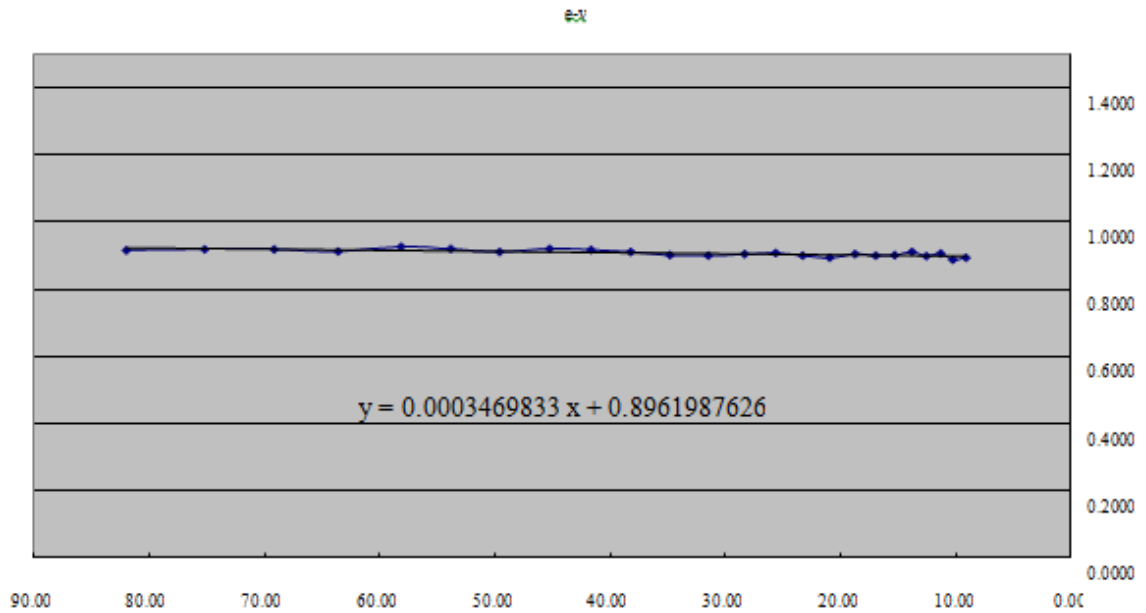


圖 (13) 恢復係數 e 與入射速度 v 趨勢方程式(x : v y : e)

2. 入射速度小於 10 cm/s 時

碰撞力 F 與入射速度關係式： $F = 6264.2123747262 v - 2854.6109356255$

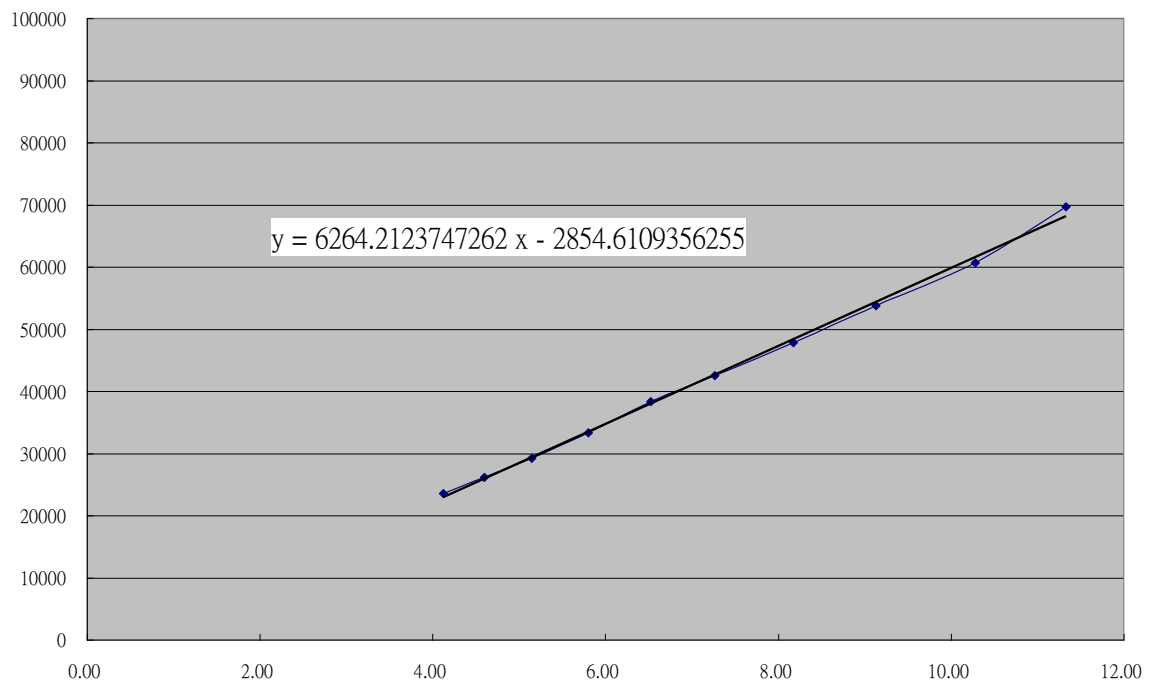


圖 (14) 碰撞力 F 與入射速度 v 趨勢方程式(x : v y : F)

3. 接觸時間與入射速度關係式如圖 (15)：

$t = -0.0000004510 v^3 + 0.0000119502 v^2 - 0.0001224711 v + 0.0015560542$

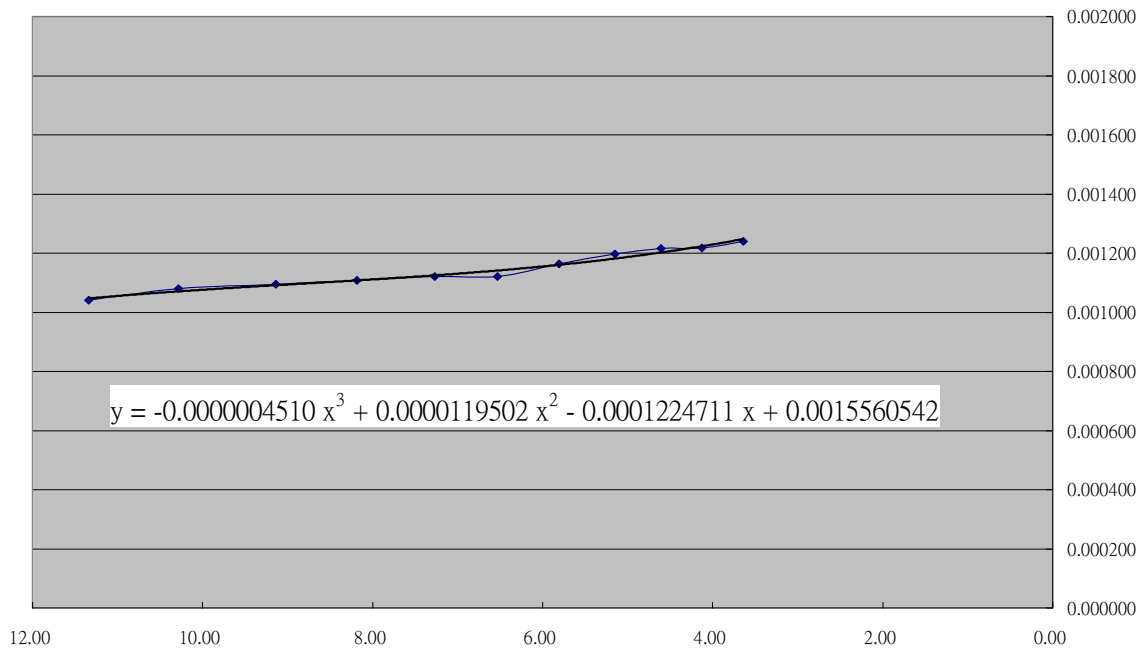


圖 (15) 接觸時間 t 與入射速度 v 趨勢方程式($x : v \quad y : t$)

(三) 實際計算：

將乒乓球由高約 1cm 落下，以第 1 次和第 11 次彈跳為例

第 1 次彈跳：入射速度 $v=32.62$ 代入 $e = 0.0003469833 v + 0.8961987626$ 得 $e=0.9075$ 所以乒乓球第 1 次撞擊木板後 反彈速度 $32.65 \times 0.9075 = 29.61 \text{ cm/s}$

第 11 次彈跳：乒乓球以入射速度 $v=10.06$ 撞擊木板代入計算出 碰撞力 $=60169.35 \text{ dyne}$ 接觸時間 $t=0.001074 \text{ s}$ 算出乒乓球第 11 次撞擊木板後反彈速度 $v=9.08 \text{ cm/s}$

依以此方法依序計算每一次乒乓球撞擊木板後的反彈速度。

(四) 計算結果：

1. 如表 (2)、圖 (16)
2. 將乒乓球由高約 1cm 落下，實際測量得彈跳 21 次，而由數學式計算得彈跳 23 次 (如表)，計算結果與實際情形相當接近
3. 本研究成功建立了乒乓球彈跳的數學模式，所以只要有起始的入射速度 (或落下高度)，就可以計算出乒乓球彈跳整個過程的彈跳次數、碰撞力、反彈速度、接觸時間。

彈跳次數	反彈速度(測量值)cm/s	反彈速度(模擬值)cm/s
1	32.62	32.62
2	29.64	29.61
3	26.84	26.87
4	23.87	24.31
5	21.51	21.59
6	19.24	19.44
7	16.96	17.38
8	14.58	15.30
9	13.16	13.14
10	11.18	11.85
11	9.67	10.06
12	8.91	9.08
13	7.41	8.28
14	6.80	7.57
15	7.05	6.91
16	6.07	6.27
17	5.06	5.66
18	4.88	5.06
19	4.02	4.45
20	3.73	3.81
21	2.31	3.11
22		2.27
23		1.16
24		(彈跳結束) -0.59
25		-4.34

表 (2)

乒乓球彈跳速度測量值與模擬值比較

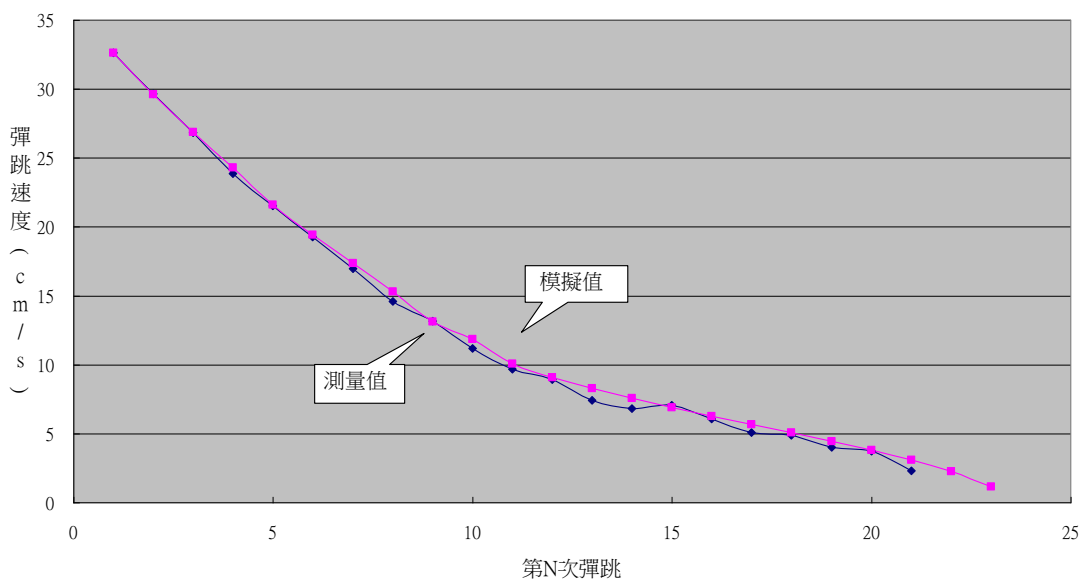


圖 (16)

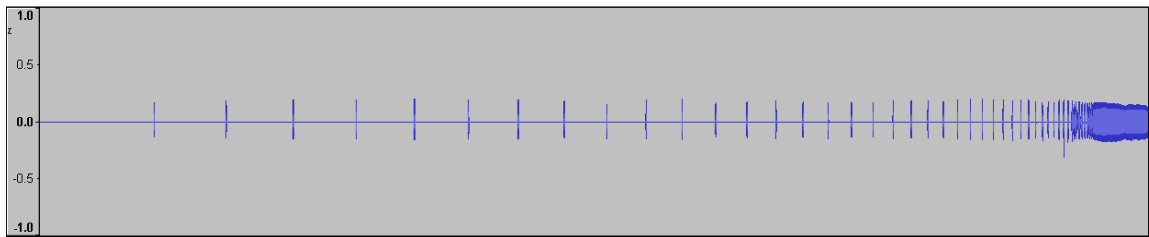
研究三：探討乒乓球與不同物質（木板、鐵板、橡皮）碰撞時，對彈跳次數、飛行時間、碰撞接觸時間、碰撞作用力的影響

（一）乒乓球與鐵板碰撞時，對彈跳次數、飛行時間、碰撞接觸時間、碰撞作用力的影響

1.作法

<p>取一鐵板，按照研究一裝置及步驟，測量乒乓球在鐵板上的彈跳</p>	 <p style="text-align: center;">鐵板</p>
-------------------------------------	--

2.實驗結果：如圖（17），由 Audacity 錄到的訊號錄音



圖（17）

3.乒乓球在鐵板上彈跳結果：測量數據經過以 Excel 整理計算所得結果如表，：乒乓球質量 3.2 克（落下高度約 2cm）



彈跳次數	飛行時間	接觸時間	速度(cm/s)	高度(cm)	e 值	碰撞力(dyne)
1	0.113300	0.000671	55.52	1.573	0.93	514430
2	0.105500	0.000669	51.70	1.363	0.93	481271
3	0.098500	0.000692	48.27	1.189	0.94	435016
4	0.092100	0.000680	45.13	1.039	0.92	410355
5	0.084500	0.000692	41.41	0.875	0.92	371344
6	0.078000	0.000703	38.22	0.745	0.93	338148
7	0.072200	0.000680	35.38	0.639	0.92	322501
8	0.066300	0.000680	32.49	0.538	0.93	298520

9	0.061800	0.000658	30.28	0.468	0.92	285519
10	0.056700	0.000658	27.78	0.394	0.92	262642
11	0.052200	0.000658	25.58	0.334	0.93	243340
12	0.048600	0.000669	23.81	0.289	0.93	222750
13	0.045100	0.000658	22.10	0.249	0.93	210455
14	0.041900	0.000669	20.53	0.215	0.94	193218
15	0.039200	0.000703	19.21	0.188	0.93	171534
16	0.036300	0.000692	17.79	0.161	0.92	161069
17	0.033400	0.000714	16.37	0.137	0.92	144124
18	0.030800	0.000726	15.09	0.116	0.91	129915
19	0.027900	0.000726	13.67	0.095	0.92	118684
20	0.025600	0.000726	12.54	0.080	0.92	109181
21	0.023500	0.000741	11.52	0.068	0.92	98782
22	0.021700	0.000757	10.63	0.058	0.91	88762
23	0.019639	0.000744	9.62	0.047	0.92	82726
24	0.018126	0.000771	8.88	0.040	0.91	73657
25	0.016549	0.000771	8.11	0.034	0.92	67589
26	0.015143	0.000770	7.42	0.028	0.91	62125
27	0.013825	0.000794	6.77	0.023	0.91	55283
28	0.012581	0.000819	6.16	0.019	0.90	48949
29	0.011348	0.000800	5.56	0.016	0.89	45263
30	0.010145	0.000797	4.97	0.013	0.90	41099
31	0.009151	0.000816	4.48	0.010	0.89	36440
32	0.008181	0.000812	4.01	0.008	0.89	33057
33	0.007314	0.000849	3.58	0.007	0.89	28652
34	0.006502	0.000829	3.19	0.005	0.90	26502
35	0.005852	0.000851	2.87	0.004	0.89	23460
36	0.005179	0.000864	2.54	0.003	0.88	20805
37	0.004557	0.000884	2.23	0.003		

表(3)

(二) 乒乓球與橡皮擦碰撞時，對彈跳次數、飛行時間、碰撞接觸時間、碰撞作用力的影響

1. 作法

<p>(1) 取一橡皮擦，按照研究一裝置及步驟，測量乒乓球在橡皮擦上的彈跳</p> 	<p>(2) 如同前面所提，橡皮擦為非導體，所以將橡皮擦以 2B 鉛筆芯石墨粉塗黑變成導體</p> 
---	--

2. 實驗結果：如圖 (18)，由 Audacity 錄到的訊號錄音

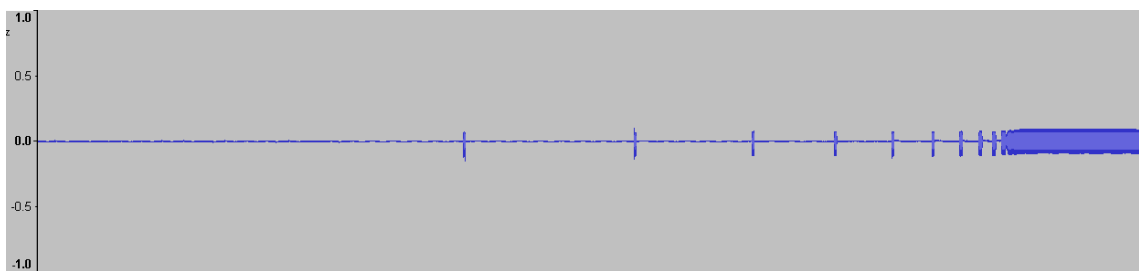


圖 (18)

3. 乒乓球在橡皮擦上彈跳結果：測量數據經過以 Excel 整理計算所得結果如表(4)：

乒乓球質量 3.2 克 (落下高度約 2cm)

第 N 次彈跳	飛行時間	接觸時間	速度 (cm/s)	高度 (cm)	e 值	碰撞力 (dyne)
1	0.134603	0.001315	65.96	2.219	0.69	274602
2	0.093061	0.001474	45.60	1.061	0.69	170445
3	0.064218	0.001644	31.47	0.505	0.69	106647
4	0.044310	0.001814	21.71	0.241	0.69	67789
5	0.030486	0.001975	14.94	0.114	0.68	43694
6	0.020599	0.002245	10.09	0.052	0.66	26961
7	0.013513	0.002528	6.62	0.022	0.64	16865
8	0.008621	0.002664	4.22	0.009		

表 (4)

(三) 將乒乓球在木板、鐵板、橡皮上彈跳，實驗結果的比較：

1.e 值：

(1) 木板與鐵板 e 值相近約在 0.9 附近，橡皮擦 e 值明顯較小約為 0.7，乒乓球與橡皮碰撞時，有較多的動能被橡皮所吸收，所損失能量較多。

(2) 由圖 (19) 可知，三者相同處：

① 入射速度大於某數值 (木板與鐵板約為 10cm/s，橡皮約為 20cm/s)

以上時大約為定值，不隨入射速度改變。

② 速度越來越小時，木板、鐵板 e 值會變小，但變化不大，不過橡皮很明顯變小。

③ 入射速度小，入射能量小，能量稍有損失，相對之下 e 值會變小，

尤其橡皮會吸收乒乓球較多能量，所以 e 值變小趨勢較為明顯。

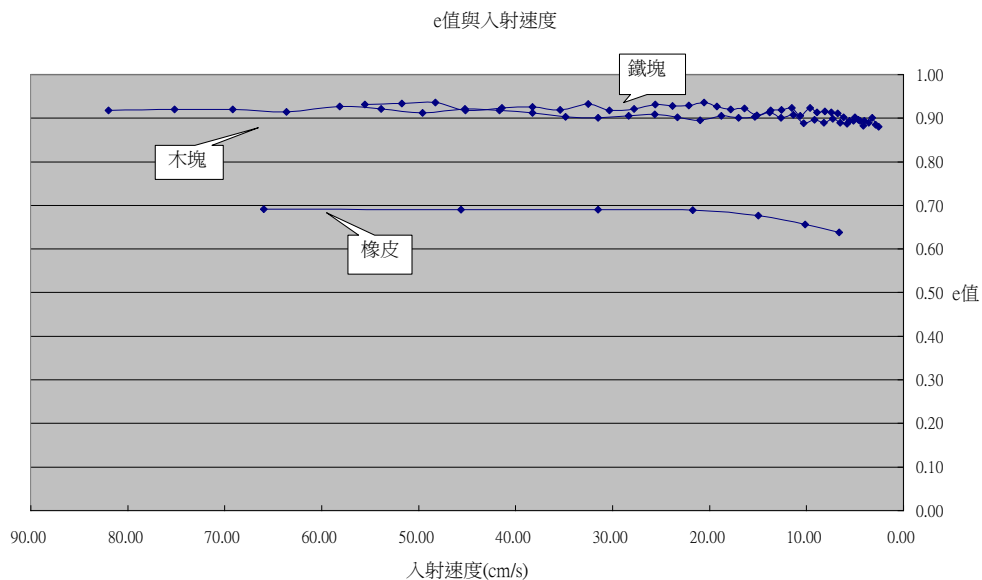


圖 (19)

2. 碰撞力

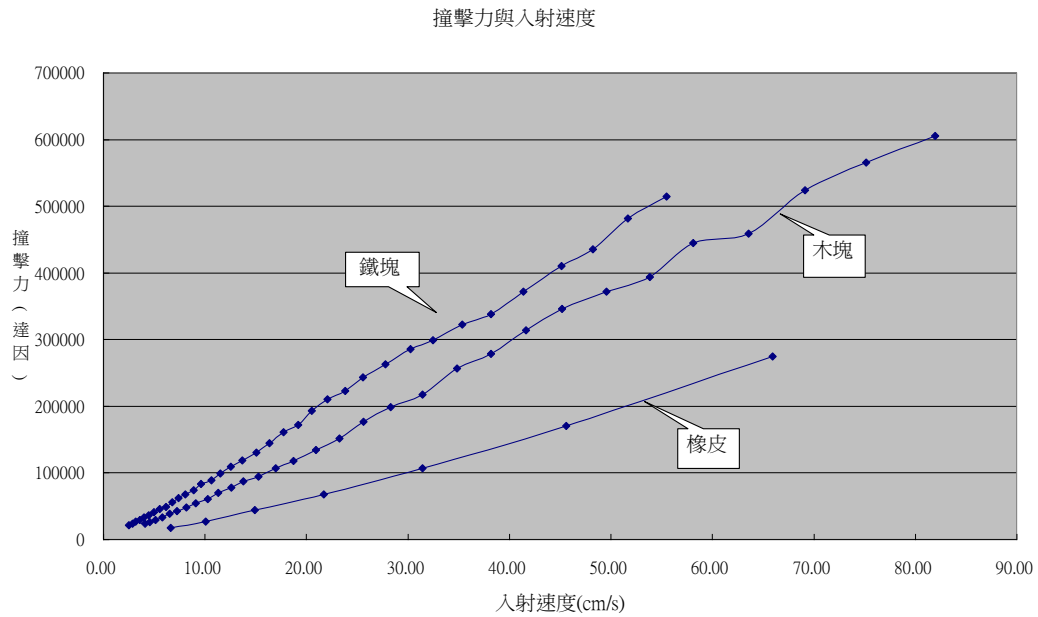


圖 (20)

- (1) 結果如預期，如圖 (20)，在相同入射速度下，乒乓球碰撞力：鐵板 > 木板 > 橡皮。例如在入射速度 $v = 30 \text{ cm/s}$ 時

乒乓球與鐵板碰撞力約為 $3 \times 10^5 \text{ dyne}$

乒乓球與木板碰撞力約為 $2 \times 10^5 \text{ dyne}$

乒乓球與橡皮碰撞力約為 $1 \times 10^5 \text{ dyne}$

- (2) 相同處：碰撞力與入射速度成一次方正比線性關係。

3.接觸時間：

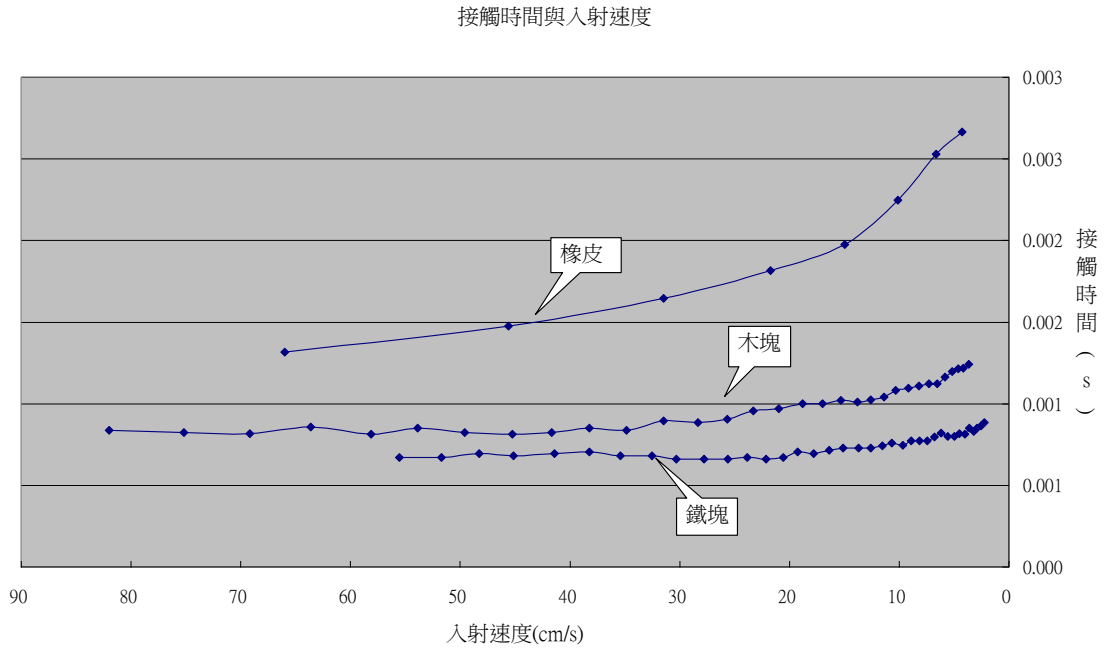


圖 (21)

- (1) 如圖 (21)，接觸時間：鐵板 < 木板 < 橡皮。
- (2) 木板與鐵板入射速度大於某數值以上時(木板約為 30cm/s，鐵板約為 20cm/s)，接觸時間大約為定值，不隨入射速度改變。
- (3) 隨入射速度變小，接觸時間會變大，三種材料都有相同性質，橡皮變化尤其明顯。

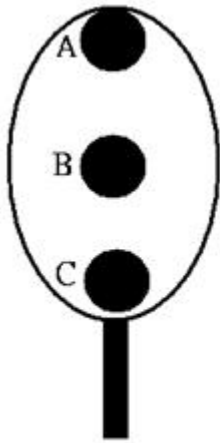
研究四：探討乒乓球碰撞桌球拍「甜蜜區」與「非甜蜜區」時，結果有何差異及「甜蜜區」位置相關性質研究。

(一) 說明：

打乒乓球時若有打到球拍中心（甜蜜區），會感覺到順手，回球速度較快；若打到偏離球拍中心位置（非甜蜜區），除了手會感覺回彈的力外，回球的速度也會變小，即為球拍「甜蜜區」與「非甜蜜區」的差異。

(二) 實驗方法：

- 1.將 2B 鉛筆磨下來的石墨粉，在乒乓球拍三個不同區域，塗黑變成導體。如圖（22）
- 2.將乒乓球拍握把處上下墊上軟性物質過濾棉，以 C 型夾夾在桌子邊緣，模擬手持球拍情形，如圖（23）
- 3.將乒乓球以相同高度落在乒乓球拍不同位置，按照研究一的實驗步驟去測量乒乓球在球拍不同位置彈跳時的 e 值。



圖（22）



圖（23）

(三) 實驗結果：

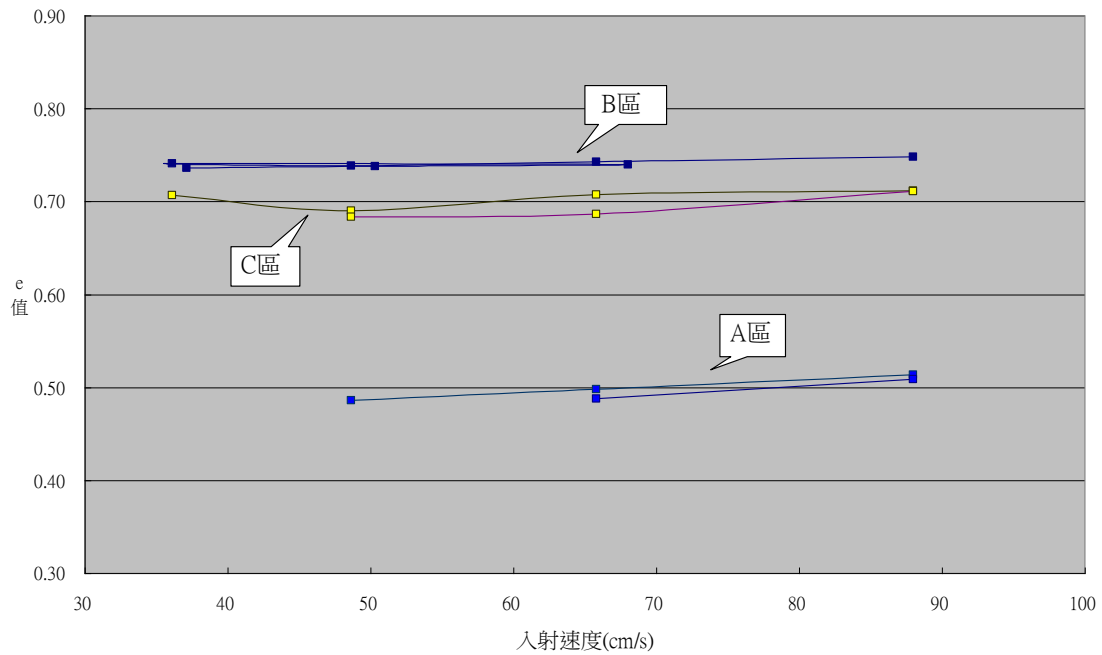


圖 (24)

1. 由實驗結果可知如圖 (24)，乒乓球在乒乓球拍甜區彈跳時，e 值最大，亦即損失能量最小，反彈速度最大。在非甜區彈跳時，e 值小，彈跳時損失能量較多，反彈速度小。
2. 在甜區附近【B 區】e 平均值為 0.75，離開甜區靠近握把處【C 區】e 平均值為 0.7，離開甜區靠近球拍邊緣【A 區】，e 平均值為 0.5

(四)「甜蜜區」位置研究：

1. 乒乓球拍甜區大致在球拍中心位置，但乒乓球拍的質心沒有在球拍幾何中心處，而是由把手位置再往下偏。
2. 這個結果引起研究者另一個想法：球與物體碰撞時，甜蜜區究竟是在物體幾何中心處(如乒乓球拍)，或者是受球拍質心的位置影響，所以我們設計了下一個實驗如下：

- (1) 實驗方法：將一長 20cm 均勻木板，以同樣的方法，每間隔 3cm 以 2B 石墨粉在不同位置塗黑變成導體，將木板一端上下墊過濾棉夾在桌

面上，如圖 (25)。

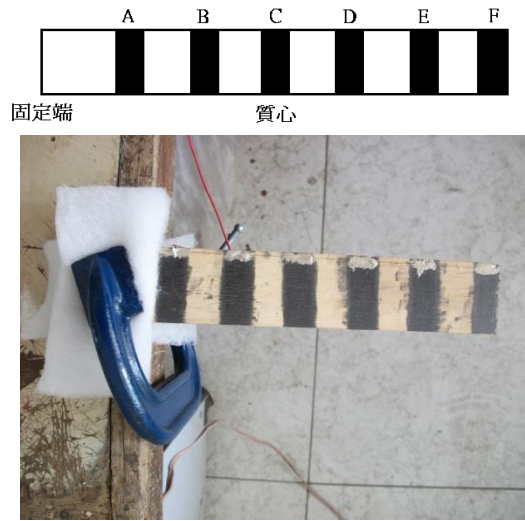


圖 (25)

再將乒乓球以相同高度落在木板不同位置，測量乒乓球在木板不同位置彈跳時的 e 值，結果如圖 (26)：

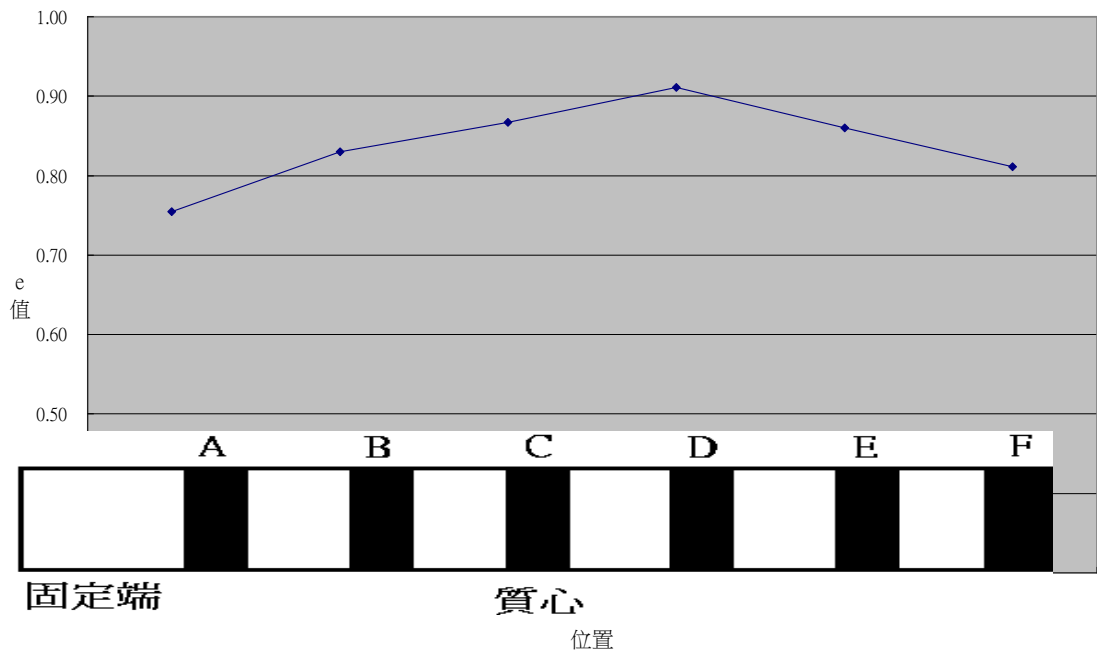


圖 (26)

(2) 實驗結果：均勻木板的甜蜜區（較大 e 值處）不在幾何中心上，也不在質心上，而是偏離質心的另一端位置上。

(3) 實驗討論：

- ① 純移動：當球撞擊物體時，若撞擊位置恰好位於物體質心時，物體的運動為行平移動，沒有轉動，如圖（27a）。
- ② 移動加繞質心轉動：當球撞擊物體時，若撞擊位置偏離物體質心時，物體的運動為移動與繞質心轉動，兩種運動的合成，如圖（27b）
- ③ 甜蜜區的意義：當球撞擊位置偏離物體質心時，移動效應造成手把處 A 向右的速度，轉動效應造成手把處 A 向左的速度，因此當球撞擊位置如果恰好能讓這兩種速度合起來為零，則球撞擊物體時，手把處 A 點瞬間靜止，因此手不會感受到衝擊。反過來對乒乓球而言，乒乓球撞擊甜蜜區位置時，乒乓球能量不會消耗在手把處 A，所以乒乓球反彈速度較大 e 值較大。
- ④ 由以上討論，甜蜜區位置不會剛好在質心位置，而是會偏離質心，而且是往手把處另一個方向偏離，這與實驗測量結果吻合。

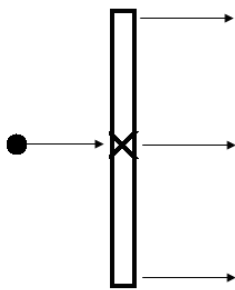


圖27a

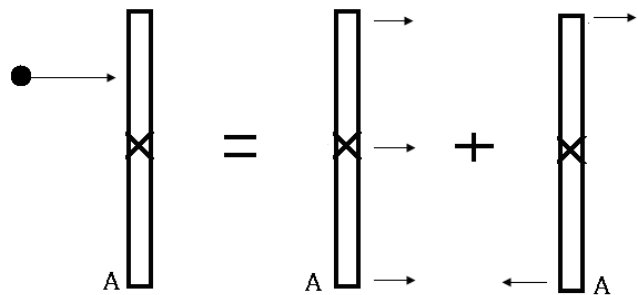


圖27b

伍、 結論與應用

一、以 2B 鉛筆石墨芯塗在乒乓球、木板上將絕緣體轉變成導體，以乒乓球在木板上彈跳，如同開關的 ON 與 OFF，然後以錄音程式來測量乒乓球彈跳次數，接觸時間與飛行時間，是我們獨創的測量方法(以網路搜尋並沒有找到類似的作法)。

二、用 2B 鉛筆將乒乓球、木板塗黑，將乒乓球、木板變成導體的方法確實可行。而且塗上的這一層石墨很薄，對乒乓球在木板上彈跳，不至產生影響。

三、實驗可以直接測量 (1) 乒乓球彈跳次數、(2) 乒乓球在空中飛行的時間、(3) 乒乓球與木板碰撞時接觸的時間，利用以上數據可以計算出 (4) 乒乓球與木板碰撞時作用力的大小

測量結果

(1) 乒乓球由高約 3.5cm 落下後，在總彈跳時間 1.8225 秒內，彈跳次數共 32 次。

(2) 隨著乒乓球的彈跳，彈跳時間間隔越來越來短，在後半段 (第 17 至第 32 次彈跳) 短暫時間 0.3132 秒內，就彈跳了 16 次之多。

(4) 最後幾次彈跳飛行時間大約在 10^{-2} 秒的範圍，換成彈跳高度約為 10^{-2} cm， 10^{-2} cm 為 100 微米，一般頭髮直徑約為 80 微米。所以利用自行設計以錄音程式測量乒乓球彈跳的方法，讓我們能測量大約只有 一根頭髮直徑的彈跳高度，方法雖然簡易，卻有很好的效果。

(5) 乒乓球撞擊木板的碰撞力與撞擊速度約為直線正比關係。在入射速度 $v = 40 \text{ cm/s}$ 時，乒乓球與木板碰撞力約為 $2 \times 10^5 \text{ dyne}$

(6) 乒乓球在碰撞時與木板接觸時間很短暫，接觸時間約在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之間。

在撞擊速度 40cm/s~90cm/s 之間，接觸時間為定值與撞擊速度無關，在撞擊速度 < 40cm/s，接觸時間有隨撞擊速度變小而變大的趨勢。

- (7) 乒乓球撞擊木板在撞擊速度 > 10cm/s e 值約為定值，不過隨著入射速度變小撞擊速度 < 10cm/s，e 值會稍微變小。原因：速度小，入射能量小，撞擊時只要有些微能量損失，e 值就會變得較小（這個現象在乒乓球撞擊橡皮時，現象更明顯）。

四、建立乒乓球彈跳數學模式

- (1) 經由實驗發現，乒乓球的彈跳運動，相當有規律而單純，因此以 excel 求得恢復係數 e 與入射速度，碰撞力與入射速度，接觸時間與入射速度趨勢方程式，與實際情形相當吻合，為以數學計算模擬乒乓球彈跳準確性提供有利基礎。
- (2) 將乒乓球由高約 1cm 落下，實際測量得彈跳 21 次，而由數學計算得彈跳 23 次，計算結果與實際情形相當接近，本研究成功建立了乒乓球彈跳的數學模式，所以只要有起始的入射速度（或落下高度），就可以計算出乒乓球彈跳整個過程的彈跳次數、碰撞力、反彈速度、接觸時間。
- (3) 透過此實驗記錄到乒乓球彈跳過程完整數據，在設計乒乓球彈跳動畫時應很有幫助

五、乒乓球與不同物質（木板、鐵板、橡皮）碰撞時，對恢復係數 e、碰撞接觸時間、碰撞力的影響

- (1) 入射速度大於某數值（木板與鐵板約為 10cm/s，橡皮約為 20cm/s）以上時 e 值大約為定值。速度越來越小時，木板、鐵板 e 值有變小的趨勢，但變化不大，不過橡皮明顯變小。入射速度小，入射能量小，能量稍有損失，相對之下 e 值會變小，尤其橡皮會吸收乒乓球較多能量，所以 e

值變小趨勢較為明顯。

(2) 在相同入射速度下，乒乓球碰撞力：鐵板 > 木板 > 橡皮。相同處：碰撞力與入射速度均成一次方正比線性關係

(3) 接觸時間：鐵板 < 木板 < 橡皮。木板與鐵板入射速度大於某數值（木板約為 30cm/s，鐵板約為 20cm/ss）以上時接觸時間大約為定值，不隨入射速度改變。隨入射速度變小，接觸時間會變大，三種材料都有相同性質，橡皮變化尤其明顯。

六、由實驗結果可知，乒乓球在乒乓球拍甜區彈跳時，e 值最大，亦即損失能量最小，反彈速度最大。在非甜區彈跳時，e 值小，彈跳時損失能量較多，反彈速度小。在甜區附近【B 區】e 平均值為 0.75，離開甜區靠近握把處【C 區】e 平均值為 0.7，離開甜區靠近球拍邊緣【A 區】，e 平均值為 0.5

七、均勻木板的甜蜜區（較大 e 值處）不在幾何中心上，也不在質心上，而是會偏離質心，而且是往手把處另一個方向偏離，這與實驗測量結果吻合。

八、乒乓球由於質量輕加上最後彈跳間隔時間非常短暫，使得乒乓球彈跳很難測量，因此一直沒有找到有關測量乒乓球彈跳的實驗，經過這次實驗利用我們設計的實驗方法，將乒乓球彈跳作一次完整澈底的了解，終於揭開乒乓球彈跳神秘的面紗。

陸、 參考文獻

1. 國中自然與生活科技 第五冊第一章 直線運動
2. 國中自然與生活科技 第五冊第二章 力與運動
3. 休依特 著 陳可崗 譯(2008) 觀念物理(I) 牛頓運動定律 天下文化出版

附錄：

為驗證實驗測量方法的正確性，以一顆排球在鋁板上彈跳（因乒乓球質量太輕、碰撞接觸時間太短無法直接測量），用兩種方法測量排球的彈跳：

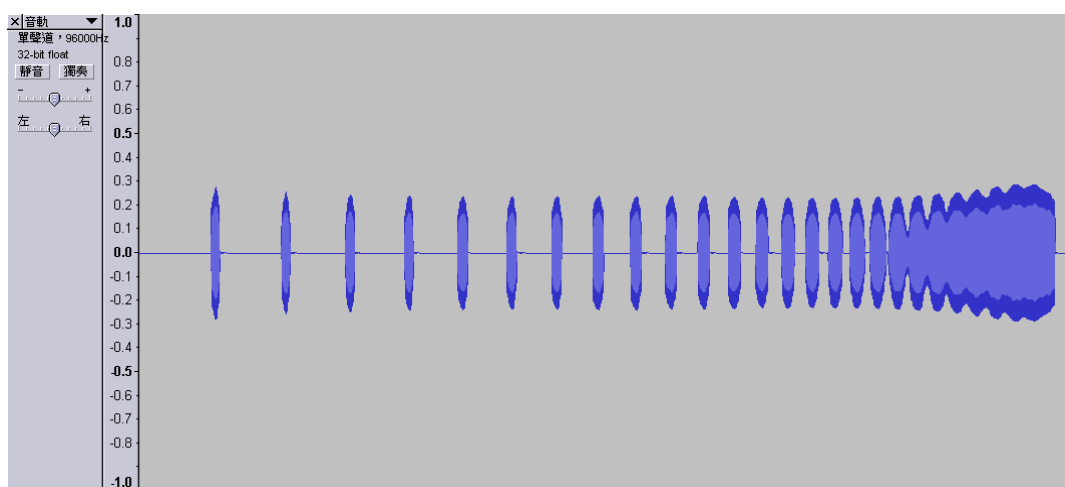
第一種測量方法：將排球以鉛筆芯粉塗黑，讓接觸面變成導體圖（28），以此實驗方法測量排球在鋁板上彈跳圖（29），實驗結果如圖（30）：



圖（28）

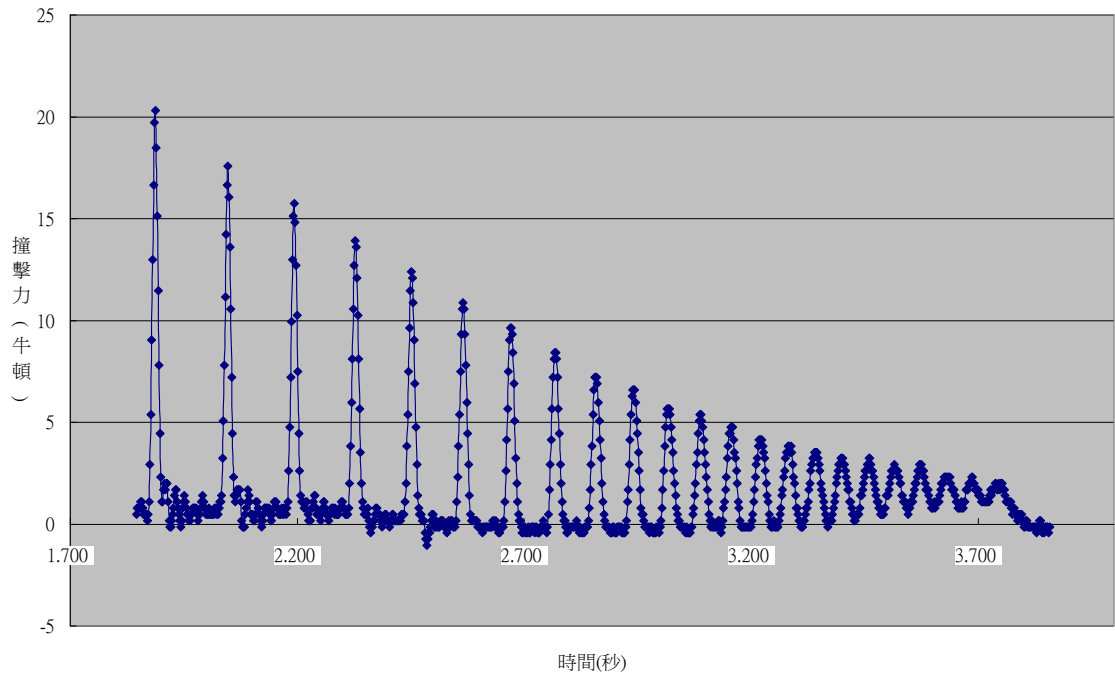


圖（29）

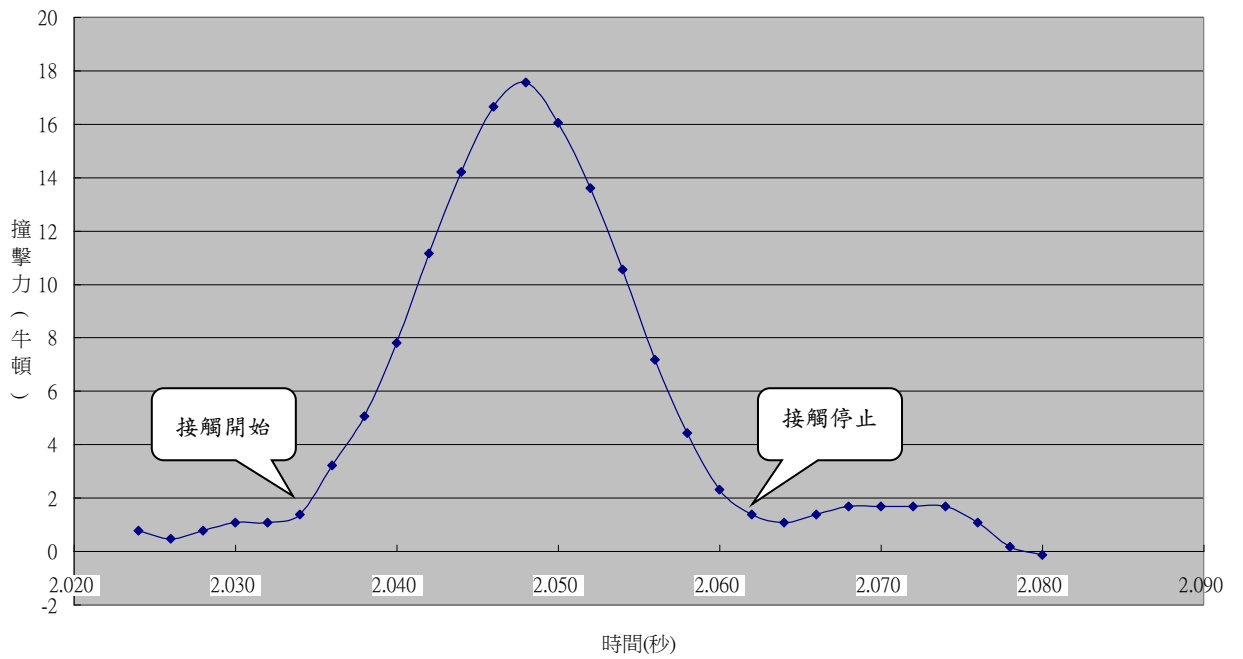


圖（30）

第二種測量方法：以 vernier 力感測器直接測量排球碰撞鋁板時撞擊力大小，每 0.002 秒測量一次數據，實驗結果如圖（31）



時間(秒)
圖 (31)
第二次撞擊



時間(秒)
圖 (32)

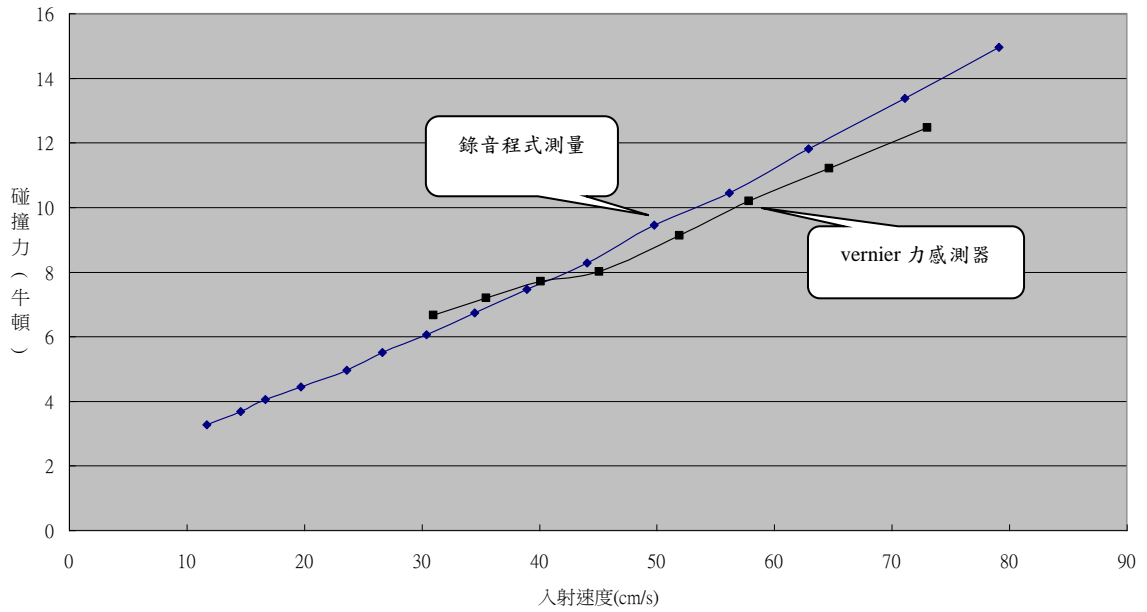
數據處理：以第 2 次撞擊為例

$$\text{力對時間平均值：} \bar{F} = \frac{f_1 \times \Delta t + f_2 \times \Delta t + \dots}{\Delta t + \Delta t + \dots} = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_N}{N} = 11.2 \text{ 牛頓}$$

$$\text{接觸時間：} 2.064 \text{ (接觸停止)} - 2.034 \text{ (接觸開始)} = 0.026 \text{ 秒}$$

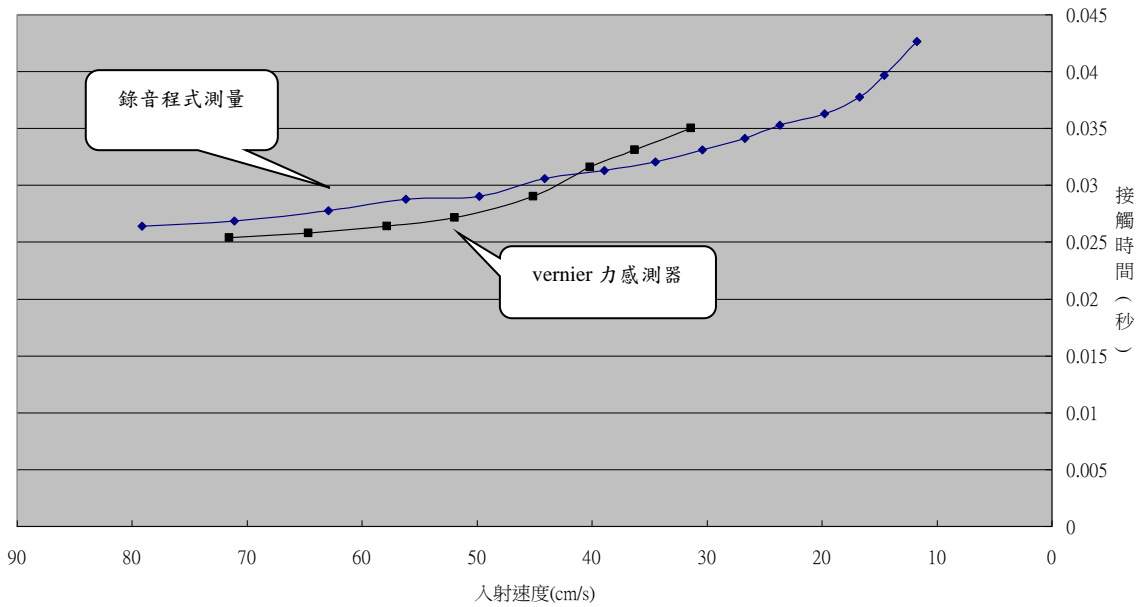
二種測量方法結果比較：如圖（33）圖（34）

兩種測量方法



圖（33）碰撞力與入射速度關係

兩種測量方法



圖（34）接觸時間與入射速度關係

與 vernier 力感測器測量結果比較，可驗證本實驗測量方法應是合理正確的。

Introduction

The project identifies an ultra-small deformation of the object by using an electric point contact through a unique device, which is simple but accurate. This advantage is used to study the energy exchange upon impact, initiated by surface potential barrier, elastic deformation and absorption. By looking into the bouncing motion, the properties of the material are fully observed. Furthermore, the experimental method is able to detect surface adhesive and body viscoelastic responses caused by the subtle changes in biological structure or chemical reaction, which can be revealed by its physical characteristics.

Motivation

When playing table tennis, I was fascinated by the rapid bouncing of Ping-Pong ball and the tapping sounds it made when hitting the table, I was inspired to ascertain answers to the following: how many times does a ping-pong ball bounce in a short period of time, from the beginning to the end? And what is the feasibility for its future application? To solve these problems, I conducted the following experiments.

Research Goals

The project aims to develop a new experimental method, that is easier and more accurate than those from piezoelectric response to understand the non-linear bouncing motion of the probe, which is the ping pong ball in the study. And apply this method not only on hard materials, but also on soft material such as fermented dough, to investigate its property changes during fermentation.

Design of experimental device

Initially, a high-speed camera was used to record the tapping sound and the bouncing motion of the ball. However, due to its light mass and high frequency of bounce, it was unsuccessful.

Then, an electric switch type is created by the ball's contact with or detachment from the object. When they are in physical contact, the switch is on. On the other hand, when it leaves, the switch is off.

Therefore, a function generator is connected to the ball with an ultra-thin magnet wire, and the wooden board is connected to the computer. Theoretically, this set-up would send the signal to the computer; however, both of the ball and the wooden board are insulating objects. This problem is circumvented by applying a very thin layer of graphite with the thickness of 500(nm) from a 2B pencil on their surfaces without affecting to their original physical properties.(Fig.1) After solving this problem, the set-up has been successfully established.(Fig.2)

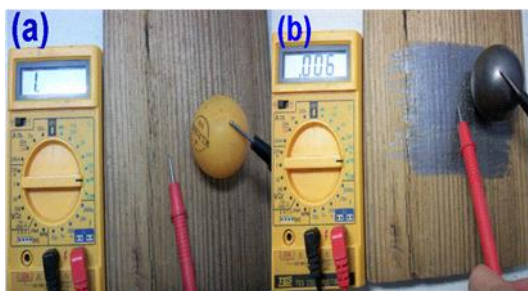


Fig. 1: Resistance between a piece of wood and a ping-pong ball in contact (a) without and (b) with graphite powder on their surfaces

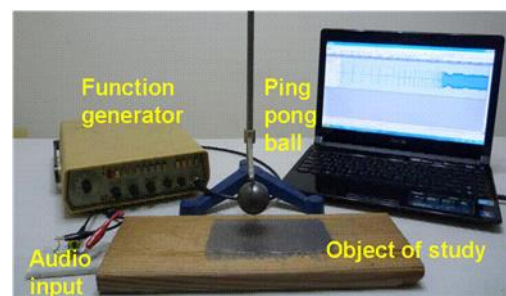


Fig. 2: Photo image of the experimental setup

Audacity software

Audacity, an audio recording software, has great capability to select microscopic time intervals up to six decimal points of the data. Therefore, it is used to record the high frequency of the bouncing probe in the study.

The result recorded by the software can be characterized in the following :

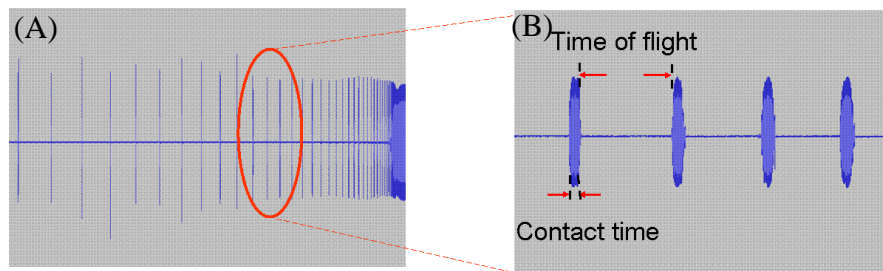


Fig.3: Electric signals detected in a free-fall ping-pong ball bouncing back-and-forth on a wooden board

(A) Number of bounce: From Fig.3(A), each strip of blue line represents each number of bounce.

(B) Contact time: Fig.3(B) indicates the magnification from Fig.3(A), in which the signals can be clearly observed, and the width of the signal represents the duration of the probe that is in contact with the testing material. For example, during the Nth bounce, its contact time is 0.000851(sec).(fig.4)

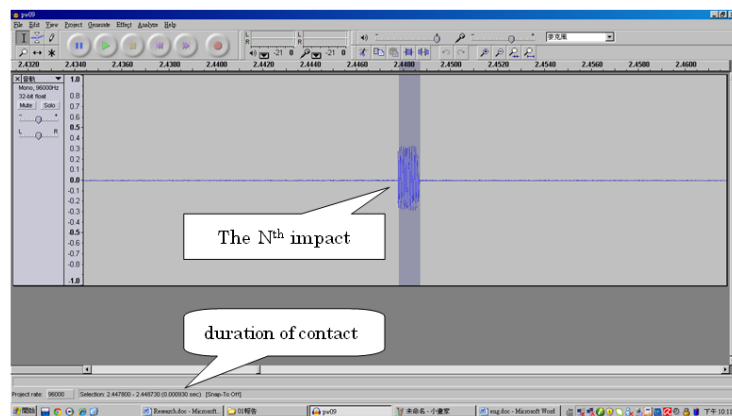


Fig.4.: selected section from the contact time

(C) Time of flight: the interval between two consecutive signals is the duration of the instant when the probe leaves until it contacts with the object again. For example, during the Nth to the N+1th bounce, its time of flight is 0.026213(sec). (Fig5)

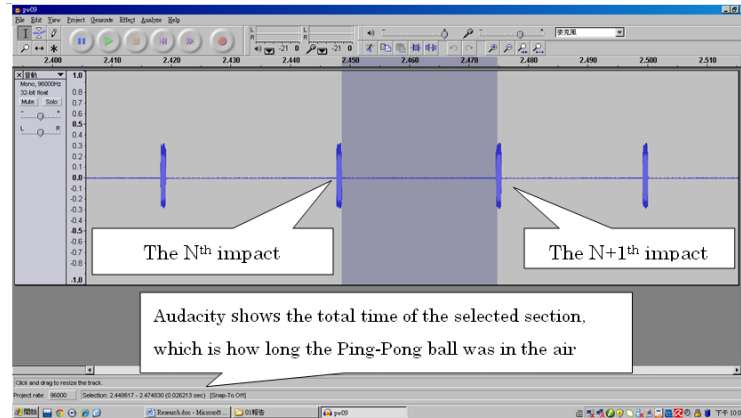


Fig.5.:selected interval from the time of flight

Physical quantities:

The values of contact time and the time of flight are the keys to calculate a plethora of values in physics such as velocity, rebound height, contact force, deformation, energy loss, the spring constant, and the coefficient of restitution.

The deformation and effective spring constant can be calculated shown in the following (Fig. 6.):

- (1) Point A: point of first contact, at speed V_A can be calculated from the probe's free fall.
- (2) Point B: point produces least resistance, at which the speed reduces to zero, $V_B = 0$.
- (3) Maximum deformation $\Delta d = (V_A^2 / 2a) = (V_A \Delta t / 2)$: the distance traveled from point A to point B.
- (4) The energy absorbed by the object on impact can be characterized by an effective spring constant k , which can be obtained by:
average acceleration during contact: $a = (V_A / \Delta t)$,
effective spring constant $k = (ma / \Delta d) = [2m / (\Delta t)^2]$.

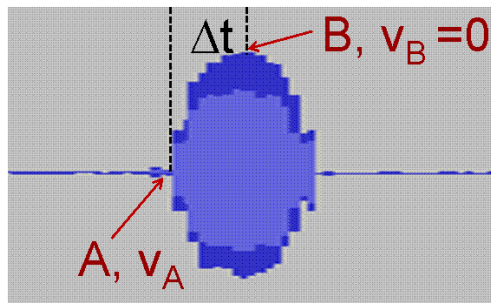


Fig.6: Electric signals detected in one contact.

Results and discussion

1. The motion

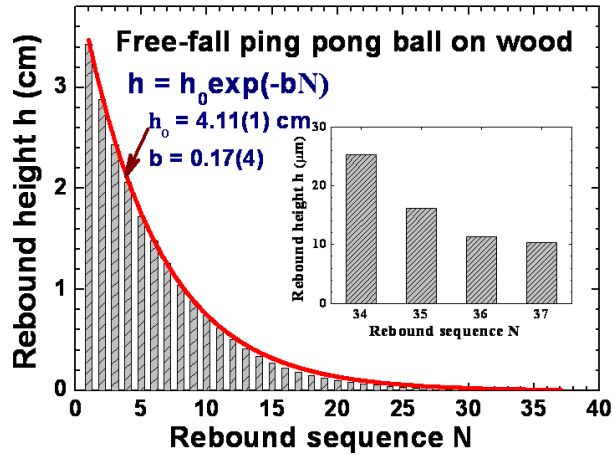


Fig. 7: Variations of rebound height at each rebound.

The bouncing motion of the Ping-Pong ball in relation to the rebound height at each rebound can be described by the following equation :

$$f(N) = h_0 \exp(-bN)$$

The physical parameter h_0 represents the initial falling height, and b represents the level of energy absorption of the material under study.

Surprisingly, 37 consecutive rebounds can be identified within 2.06 sec of a free-fall ping pong ball onto a wooden board with an absorption coefficient of 0.17 and initial falling height of as low as 4.0 cm.

Fig.7. indicates the last few rebound height(from the 34th to 37th bounce), all of which do not exceed 25 μm . Especially the final rebound height ,which is reducing to as short as 10.3 μm , can still be clearly identified.

The result shows that this method has great capability in physical measurement, as well as high sensitivity to signal detection.

2. Surface barrier:

This set-up also allows to detect the properties of materials by looking into the exponent γ , α , which can be extracted by the characteristics of their potential surface barriers.

Surface barrier is defined as factors that hinder a ball's rebound. Factors that contribute to the hindrance are levels of elastic and adhesive of materials. This potential barrier will be triggered only when the probe is in contact with the testing material.

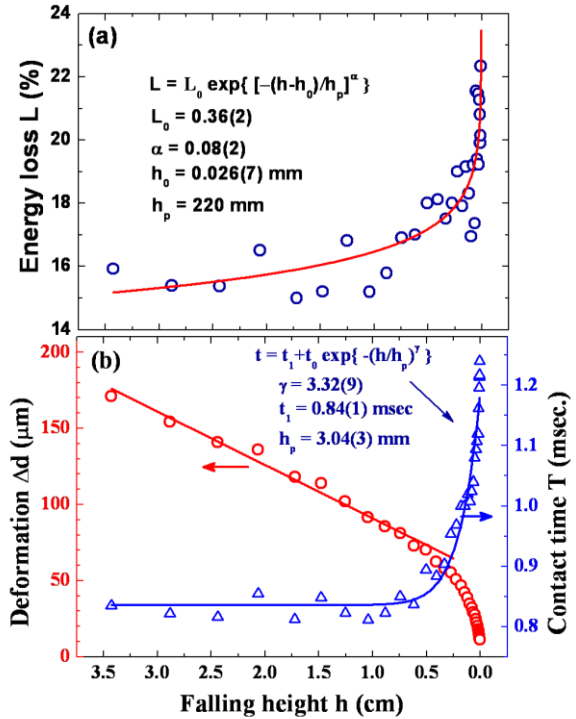


Fig. 8. Variations of (a) energy loss and (b) contact time with falling height

The percentage of energy loss and contact time increase rapidly in the low falling height regime. This phenomena occurs when the energy needed to trigger deformation is becoming comparable to impact energy (Fig. 8a).

Both the $L(h)$ and $T(h)$ curves can be described by an exponentially decaying law, but need an temporal exponents γ , α for 0.22 and 0.08 respectively into the expression. However, both of γ and α aren't 1, which shows that (cm) is not the proper unit for linear descriptions.

Deformation value of the probe can be identified of as small as $7\mu\text{m}$. The deformation curve departs from the linear behavior for h lower than ~ 0.5 cm, below which all L , T , and Δd display dramatic changes when h is further reduced.

Non-linear behavior of $L(h)$, $T(h)$ and $\Delta d(h)$: an energy is needed to initiate deformation on impact. This energy is better revealed at low impact energy.

Application

This experimental method proposed in this project has a wide range of application. It enables me to further examine the fermentation mechanism of dough. Fermentation process is an extremely complex redox reaction, which involves a lot of internal biological and chemical property changes in dough. In this research, I explore the characteristics of fermentation from the perspective of physics which were only visible under an extensograph will be represent by the α , b and k values revealed by the surface adhesion, viscoelasticity, and structures of the tangled gluten chains.

1. Experimental procedures:

- (1) The dough: evenly mixed flour, sugar, water, and yeast of mass ratio 100:6:50:1.25 at a room temperature of 23 °C. A free-fall ping-pong ball is dropped from 5 cm directly above the dough, results are recorded every 15 min.
- (2) The changes in viscoelasticity and adhesion of a dough through fermentation are investigated.
- (3) Instead of observing the volume changes of the dough during fermentation, the exponents and k are used to characterize the dough at various fermentation stages.

2. Results

Energy loss reaches as high as 93% before fermentation, and has increased to 96% after fermentation. (Fig.9) . However, fermentation only generates 3% changes in energy loss, which is unnoticeable. Therefore, it is required to investigate the internal and external factors separately.

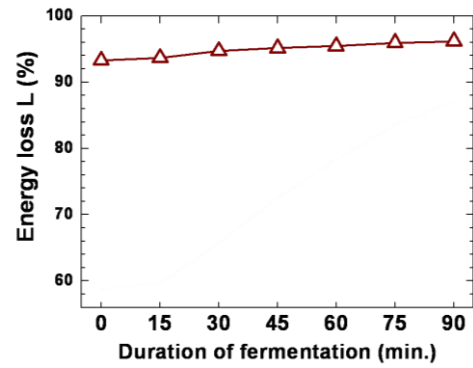


Fig 9. Variations of energy loss on each fermentation stages

3. Screening the surface adhesion

Later on, a small piece of thin silicone wafer with the thickness of 0.5(mm) is placed horizontally on top of the dough utilizing it as a buffer to screen the surface adhesion from the free-fall ping-pong ball. This setup allows to detect the effects other than surface adhesion.(fig. 10.)

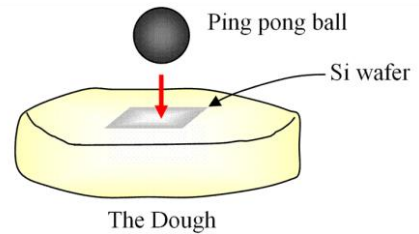


Fig. 10. Schematic drawing of the setup to screen surface

4. Weakening of surface adhesion and Enhanced of viscoelasticity

The combination of energy loss measured with and without a silicon wafer is shown in Fig.11. The blue curve indicates the impact of internal viscoelasticity, and the red curve indicates the total effect. The difference between the blue and red curve reveals the impact of energy that is needed to

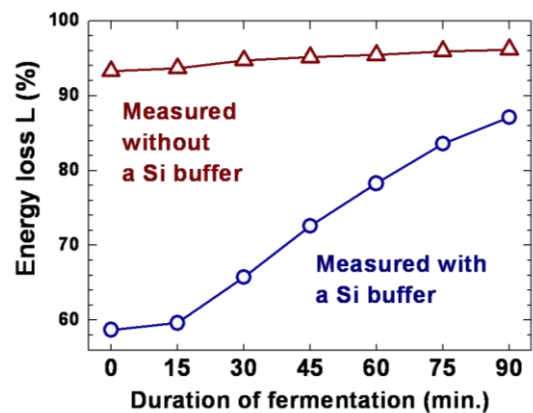


Fig. 11. Energy loss measured with and without a Si screener of the dough at various stages of fermentation

break the surface adhesion.

Base on the result, energy needed to break the surface adhesion before fermentation is 35%, but was reduce to only 9% after fermentation. This phenomenon is caused by the evaporation of the moisture settling on top of the surface.

As for the viscoelasticity , 59% of energy is found to transferred into the dough even before fermentation. This energy would trigger a slow oscillation in the dough, which links to the viscoelasticity of the protein chains, known as gluten, of the dough (Fig. 11).

A 30% change in energy loss through fermentation is found when surface adhesion is screened, showing that the viscoelasticity of the dough has been largely enhanced (Fig. 11).

5. Non-linearty

The three parameters that indicate the details of fermentation are used to characterize different stages of fermentation process. (Fig.12a,12b)

The absorption coefficient b mentioned in fig.8. represents the level of energy absorption of dough.

Parameter α is the rate of decay from energy loss. This constant mainly contribute to understand the variation of

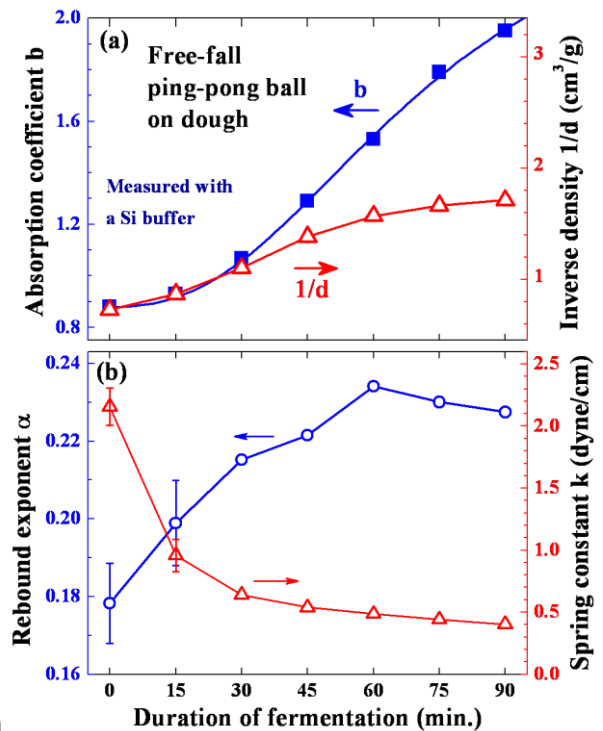


Fig. 12. (a) Absorption coefficient, inverse density and (b) exponent α and k at various stages of fermentation.

viscoelasticity in dough.

Spring constant k : The numerical of the spring constant reveals levels of elasticity in dough caused by the surface adhesion and viscoelasticity changes through fermentation.

Results

Interestingly, even though the density of dough is stabilizing in the last few fermentation stages, when the carbon dioxide produced by yeast starts evaporate and approach saturation of expansion, the absorption coefficient continues to largely increase. This occurs because the entanglement of the gluten chains in the dough is still settling after expansion, which echoes that wakening of the dough is needed before baking. [Fig.12(a)]

Fermentation drives the effective spring constant k and rebound exponent α , b to increase progressively, but each with a noticeably higher increase rate in the earlier stages, known as the yeast breeding period, at which the number has an exponential growth rate after its glucose absorption [Fig. 12(b)].

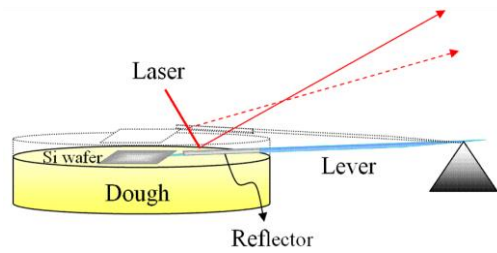
Surprisingly, k is reduced by as large as 80% through the fermentation. The less tangling of gluten, caused by fermentation expansion, largely enlarge the viscoelastic responses of the dough to external impact. Base on the result of the experiment, the values of the three exponents can accurately control the quality of fermentation.

6. Damped oscillation

According to the aforementioned experiment, factors that cause energy loss is an important point to discuss. It's known that energy is consumed to trigger deformation, break the surface adhesion and body viscoelasticity. In addition, the dough is rich in elasticity especially a fermented dough. Therefore, it doesn't revert back to the same

shape after deformation immediately, but it oscillates back and forth. In the research, a reflection amplification is designed in order to observe its small up-and- down motion after a ball's collision.

The set-up:



1. A light reflector placed on the side of the dough and a laser beam continues to hit the reflector.
2. One end of the light optical lever is fixed on a fulcrum and the other end is fixed on top of the dough. Results are observed from a screen far away. This device is used to magnify the small angular displacement of the dough. An amplification factor of 80 was obtained directly without using the trigonometry theory.

Fig. 13. Schematic drawing of the setup for the detection of slow oscillation.

Non-linear damping

A damped oscillation of the top portion of the dough triggered by the impact is expected.

Four cycles of oscillation with an exponentially decaying amplitude and a progressively shortened frequency are observed (Fig. 14).

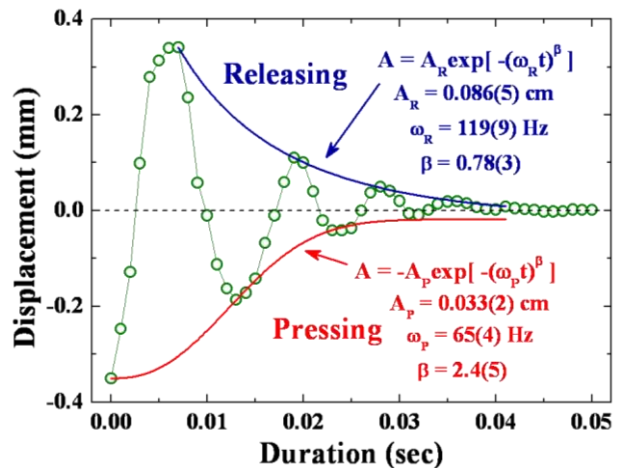


Fig.14. Amplified displacements of the dough in damped oscillation

The decay rate of the amplitude in the pressing branch is 83% higher than that in the releasing branch.

All these behaviors show that the damping constant of the dough links indeed to the amount of dough that is in oscillation.

Conclusions

1. The vertical impact-and-rebound motion of a ping-pong ball falling onto the object under study is turned into electrical-switch type of signals by applying a thin layer of graphite, from a 2B pencil, on their surfaces.
2. A rebound as low as 10.3 μm , a deformation as small as 7.36 μm , and a contact time as short as 1.77 msec. are identified through the simple device.
3. Fermentation expansion of a dough largely enhances the effective spring constant for body oscillation and greatly reduces the surface adhesion.
4. Damped oscillation in the fully fermented dough is observed through reflection amplification to reveal that damping constant of the dough is indeed not a constant.

References

- [1] Phil and L. P. John, Phys. Rev. A 46, 7059 (1992).
- [2] Phil, J. Phys. Chem. B 104, 10635 (2000).
- [3] Mary et al, J. Phys. D: Appl. Phys. 39, 3665 (2006).

評語

本件作品利用 2B 鉛筆以石墨芯塗在乒乓球及木板上，將絕緣體轉變成導體，再利用接點接觸導電之原理，成功的研討乒乓球彈跳，接觸時間與飛行時間等力學性質，實驗技術上極具創新性，此項技術也可以運用到其它應用，是一件極具應用價值的傑作。