

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 物理科

040112

滴聲下器——滴落聲與液滴性質的關聯

學校名稱：臺北市立建國高級中學

作者： 高二 胡智堯 高二 張宇文	指導老師： 劉怡君
-------------------------	--------------

關鍵詞：液滴、滴落聲、液體性質

摘要

我們的研究發現，水滴聲這種特別的聲音，形成在於從撞擊水面起至水面平復的一連串的現象所造成的空氣壓力改變，以上一連串現象又與水滴的許多性質，如：動能、表面張力、黏滯係數……等有關。我們找出了水滴聲響度與滴落高度、表面張力、黏滯係數的關聯，也找出了滴落聲主要頻率與滴落所造成之凹陷寬度的關聯。我們還發現，水滴的滴落聲會受到承接容器形狀以及滴落時間間隔的影響。未來我們希望能建立更明確的數學關係，並發掘更多有趣的現象。

壹、研究動機

高二物理下冊第十一章流體的性質中有張圖片是牛奶滴落在盤上時的瞬間飛濺情形，讓我們想起生活中，有一種聲音我們常常聽到，卻又在不經意中忽略了它；或早晨滴落池塘的露水，或順著屋簷滴下的雨水——那是一種複雜又精巧且極具特色的一聲「drip」。回頭想想，生活中似乎找不出與它類似的聲響，這說明了水滴聲在某種角度來看是很特別的。我們想：或許我們能藉由研究水滴聲與液滴性質的關係來獲得一些有趣的結果，這個想法激發了一系列實驗。

貳、研究目的

- (一) 由於水滴滴落的確會發出一種獨特的聲音。我們要藉由大量實驗數據找出水滴聲的固定模式及水滴聲的成因。
- (二) 我們認為，液滴本身性質將對於滴聲造成影響。因此我們要找出其間關係。
 - 1. 探討水滴滴落高度與所發出水滴聲之關係。
 - 2. 探討水滴本身溫度與所發出水滴聲之關係。
 - 3. 探討液滴黏滯係數及表面張力與其滴落聲之關係。
- (四) 由於液滴大小難控制，用接近球形的固體落水模擬類似的聲音。
 - 1. 探討球形物體落水聲的主要頻率與球體入水截面積（即該球大圓^註）的關係。

註：大圓在數學定義為通過球心的截圓

叁、研究設備及器材

一、實驗器材

1. 滴定管
2. 燒杯(500mL)、塑膠杯
3. 刻度尼龍線（如圖 3-1）
4. DV 攝影機
5. 電腦麥克風、筆記型電腦
6. Superlux PRA-118S 指向型麥克風（規格如圖 3-2 或參考 http://www.giga-pa.com/shop/product_info.php?products_id=410）
7. 鋼珠一顆（截面積 0.52 cm^2 ）
8. 光電計時器一台
9. 光電閘兩個
10. 溫度計兩隻（附懸吊尼龍線）
11. 漏斗一個
12. 盛冰塊保麗龍盒一個
13. 電子秤一台、系列黏土球

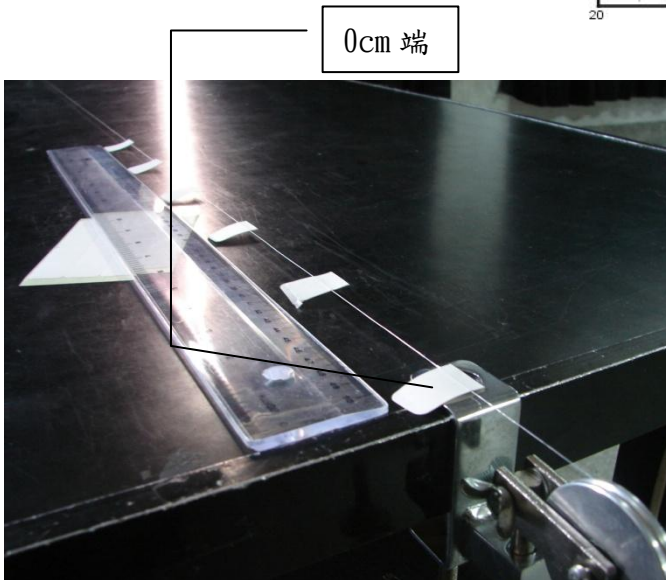


圖 3-1 刻度尼龍線
其上刻度為自黏標籤，0cm 端綁了重錘一個。我們為了方便多次實驗而使用這條作為長度標準。

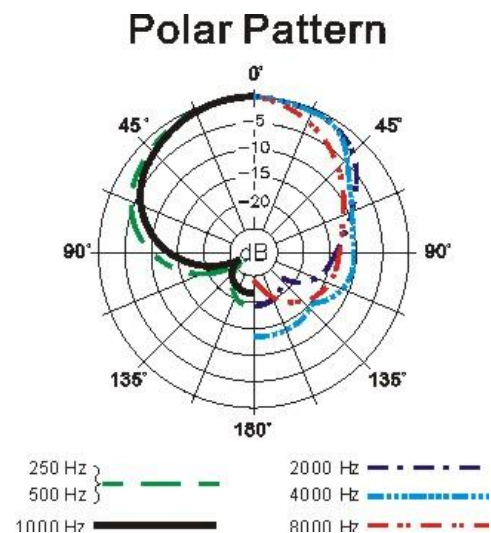
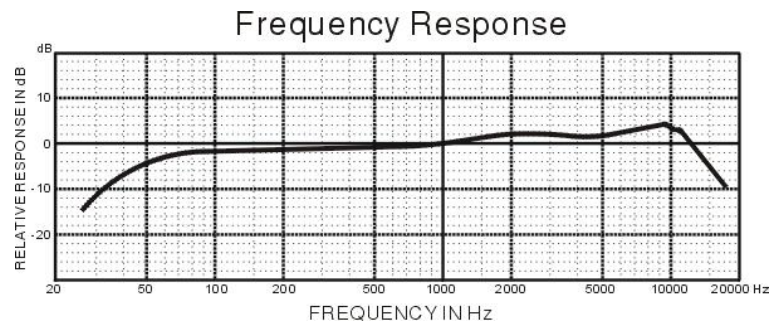


圖 3-2 麥克風響應頻率與指向特性
下圖如心狀者表示聲源於不同角位置時麥克風收音之相對響度(可看出其強指向性)；上曲線圖表示不同頻率被麥克風收音的相對響度。

二、主要器材裝置



肆、研究過程或方法

一、以錄影觀察水滴

同時使用麥克風與攝影機記錄滴落高度 150cm 水滴落入水中（裝水燒杯）的過程。用滴定管裝滿水，將管頭和水面垂直距離調整到 150cm；麥克風放在燒杯旁，背面用有色板協助觀察。我們在開始錄製時會以一拍掌聲（在水面附近，以求最少誤差），標示影片與錄音的時間，以確保影像與聲音能夠在時間上同步。將影片中的拍手與錄音錄到的拍手聲對齊，觀察逐格影像與其對應聲音波形圖之關係，直接觀察水表面的變化和聲音的關係。

二、測量水滴大小

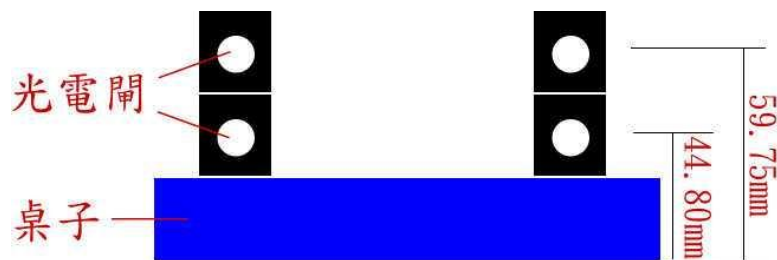
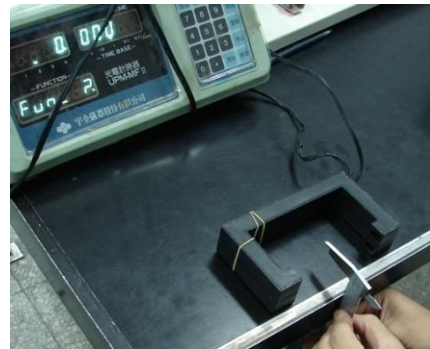
我們實驗一路使用同一滴定管，於是我們先測量那滴定管所滴出水滴的大小。從裝滿的滴定管滴下 100 滴水，觀察管內水位變化。

我們還設計一「改造滴定管頭」裝於滴定管出口，意圖調整液滴大小。將「改造滴定管頭」裝在滴定管頭，滴下 100 滴水，觀察水位變化。

三、測量滴落末速

開始

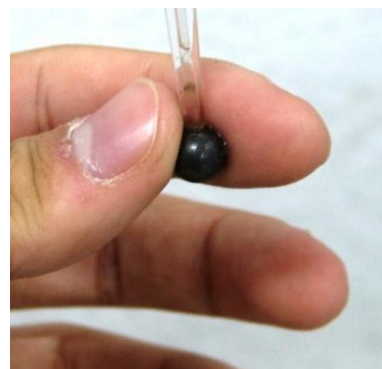
1. 測量兩光電閘 sensor 之間的距離：
將兩光電閘綁在一起，以游標尺一端抵住桌底，另一端緩緩下降，直到光電計時器上顯示 sensor 被擋住時，記錄游標尺刻度。便能測出兩 sensor 之間切確的距離。



2. 將滴入物從滴落高度釋放：
調整滴定管，使滴入液能緩慢地一滴一滴分開的脫離滴定管，調整位置使滴入液能通過光電閘，記錄通過時間，並搭配上步驟所得之距離即可推得液滴通過的速度。



測定鋼珠掉落速度步驟相似，惟釋放方式如右下圖所示（意在減低初速），以兩指夾住鋼珠緩慢上升，直到滴定管尖頭將其擠落為止。



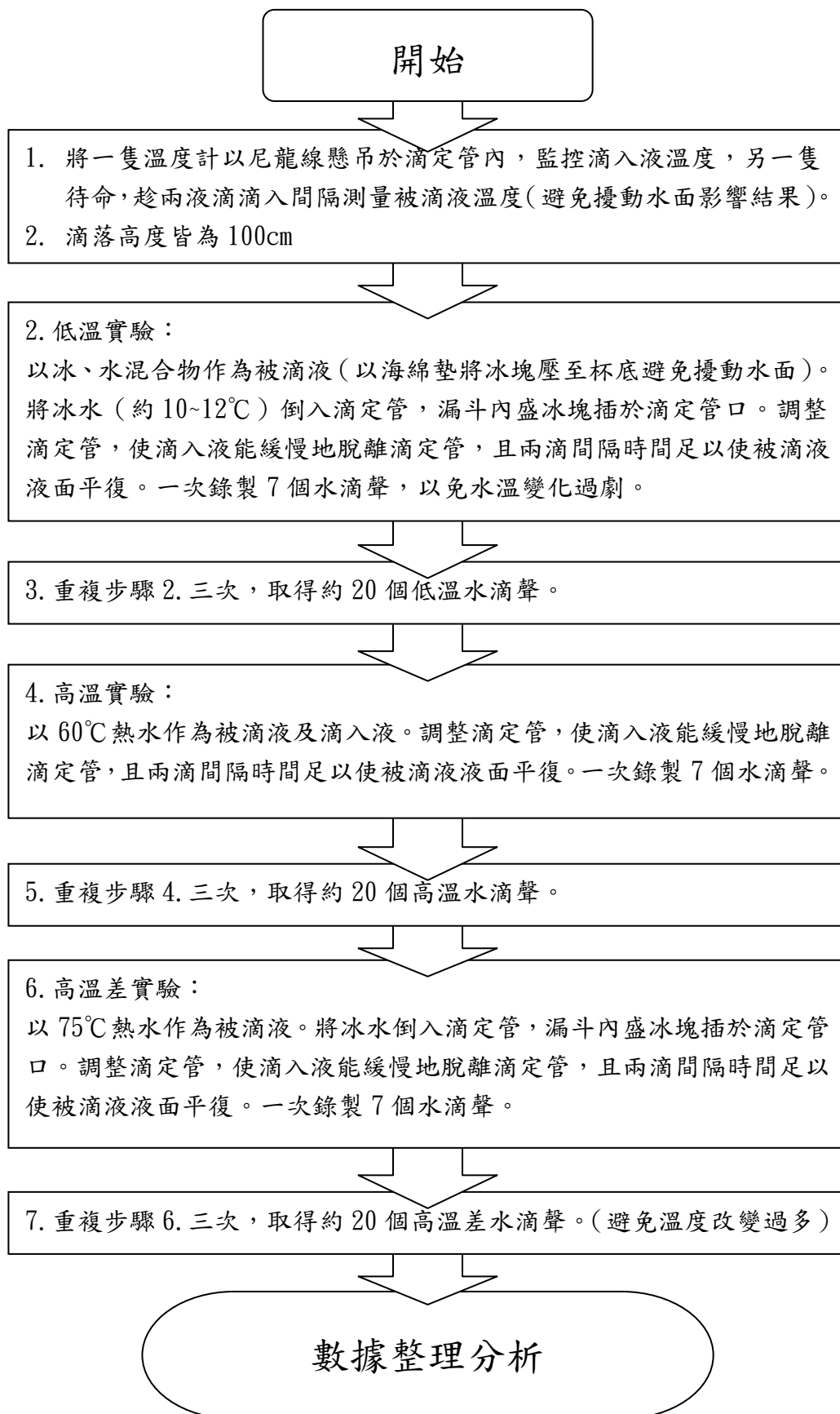
記錄各種滴落高度的滴落末速。

數據整理分析

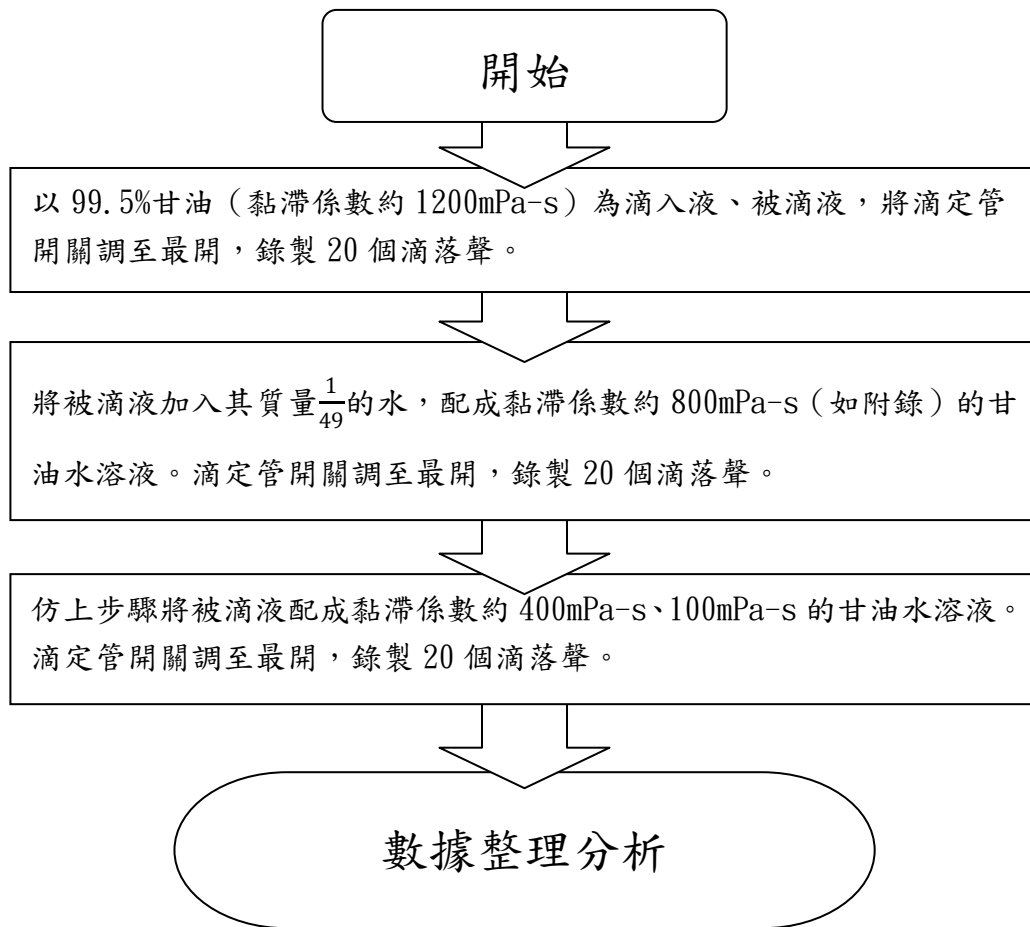
四、滴落高度實驗與鋼珠實驗



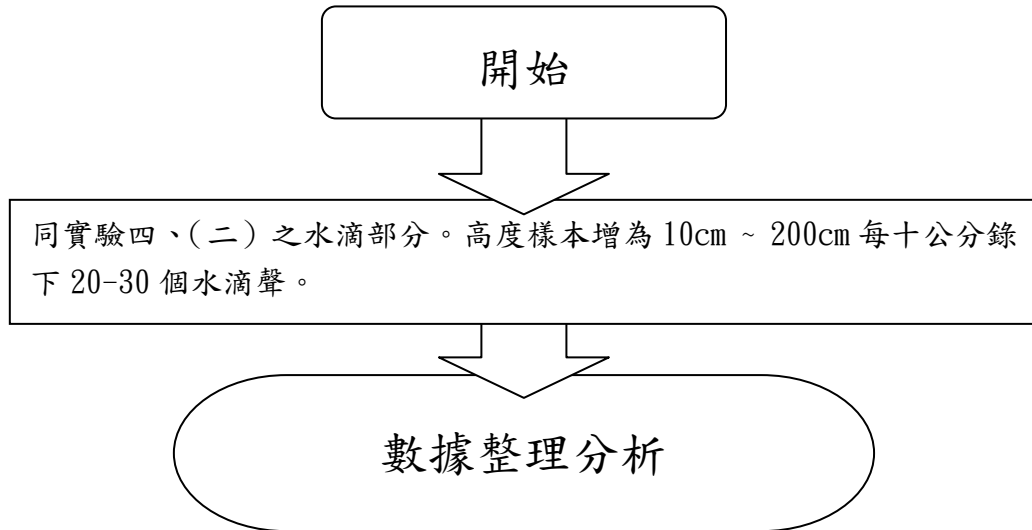
五、溫度實驗



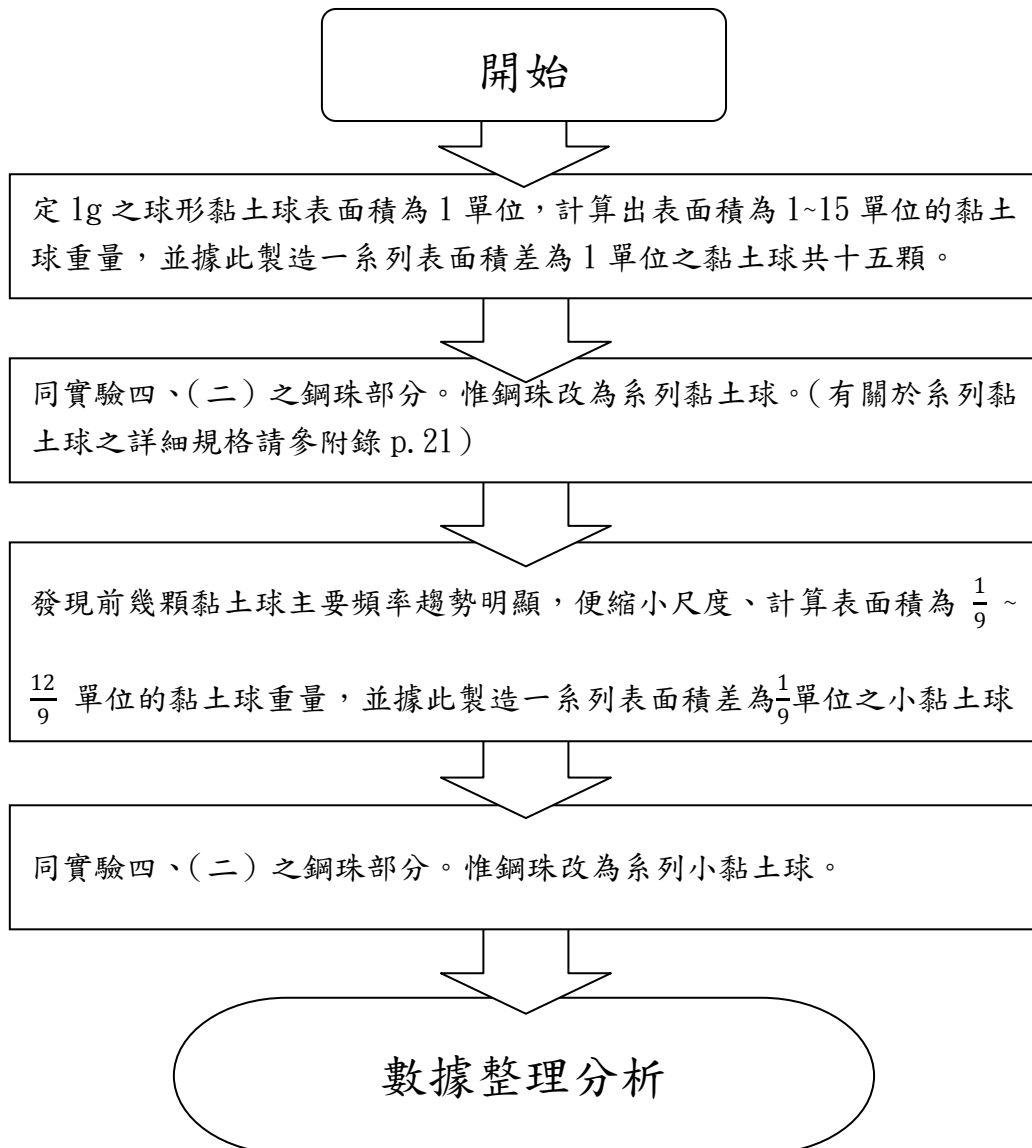
六、黏滯係數實驗（滴落高度 100cm，室溫 20.5°C）



七、滴落高度實驗擴充



八、系列截面積成等差黏土球滴落實驗



伍、研究結果與討論

聲波振幅取樣說明：

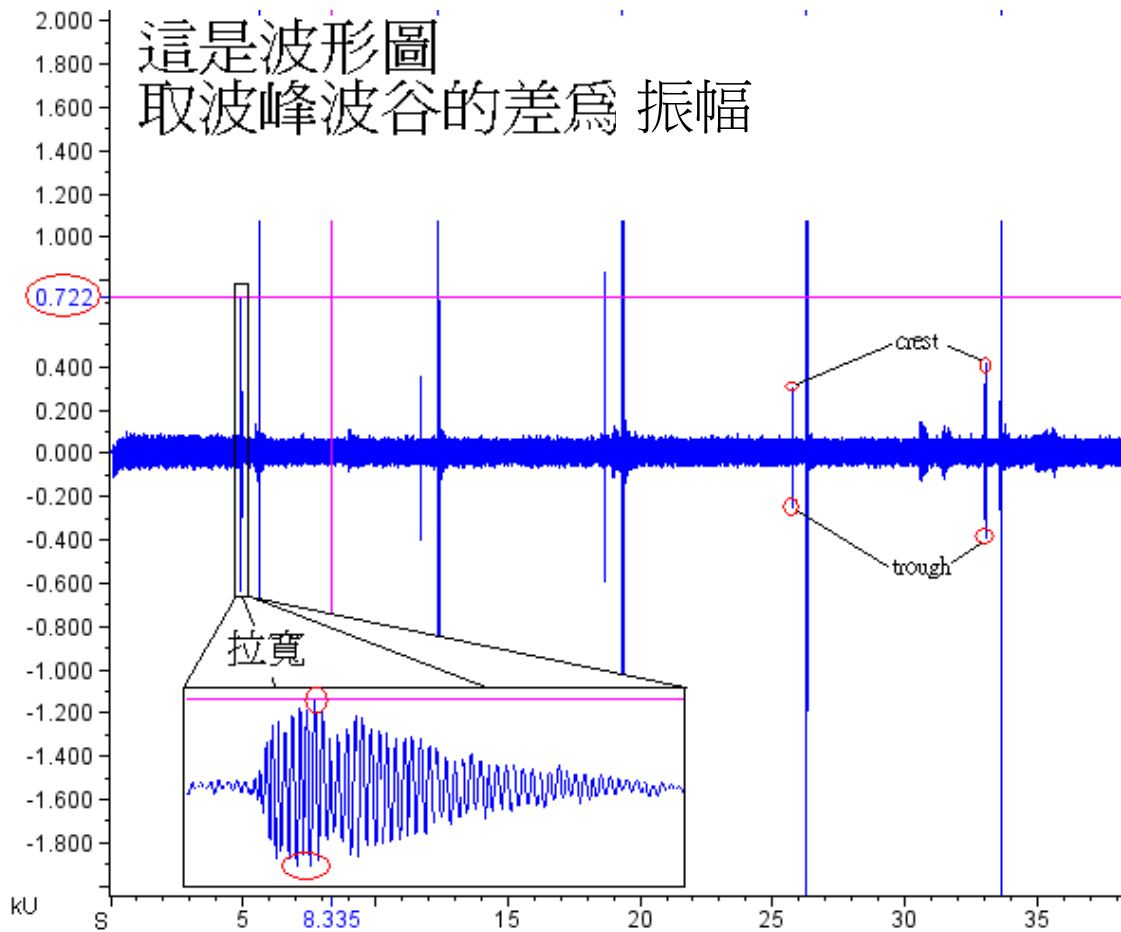


圖 5-1Raven 介面圖和註解

我們定振幅為聲音強度，其平方與聲波帶有的能量成正比。而響度與能量有以下關係：

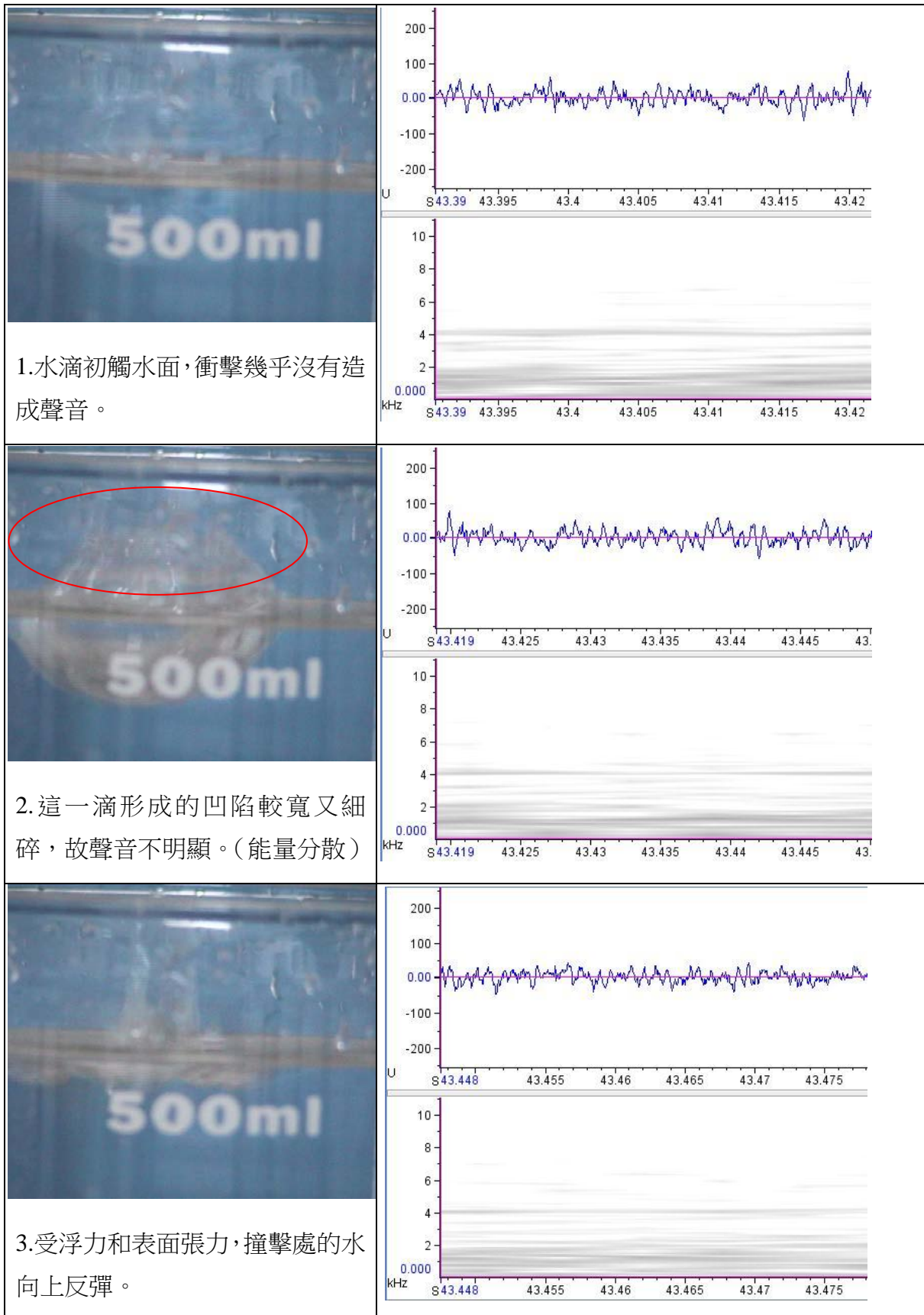
$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

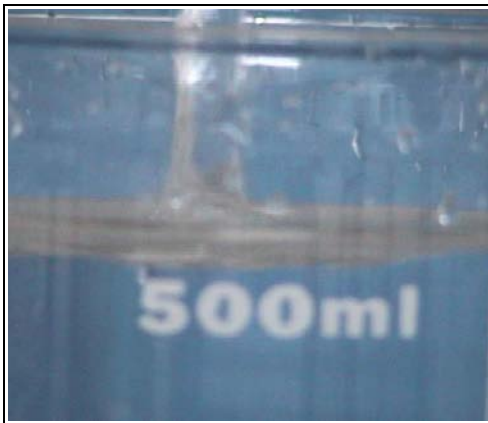
L 是分貝數值；I 為能量度的「密度」， I_0 為人耳的起始可聽能量「密度」，為 $10^{-12} \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

注：測量的水滴大小為 0.0476ml／滴

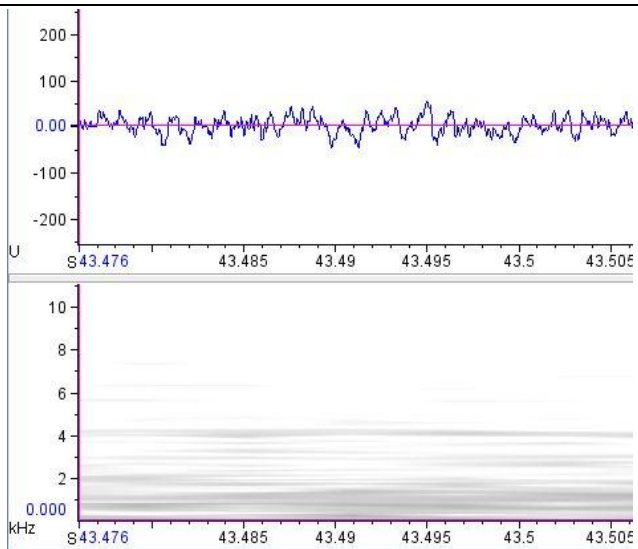
一、滴落時被滴液液面變化與其瞬時聲音剖面圖對照

左方為滴落高度 150cm 水滴聲攝影瞬時影像，右方上圖為聲波圖（偏移量對時間），下圖為傅立葉轉換結果（橫軸時間、縱軸頻率、顏色越深表振幅越大）。

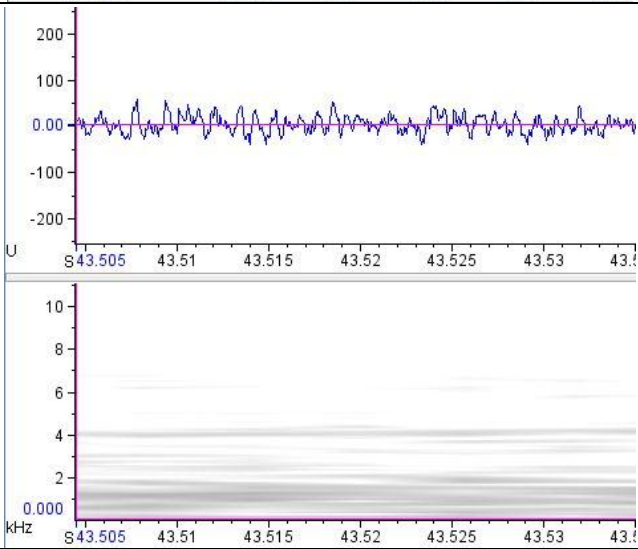




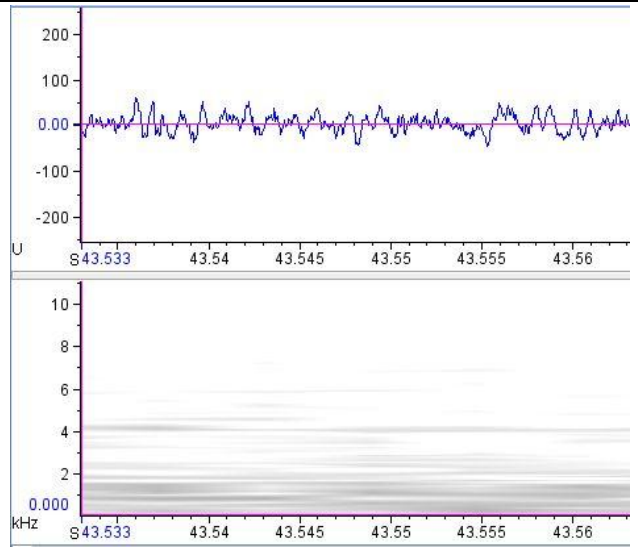
4.反彈水柱超出水面。

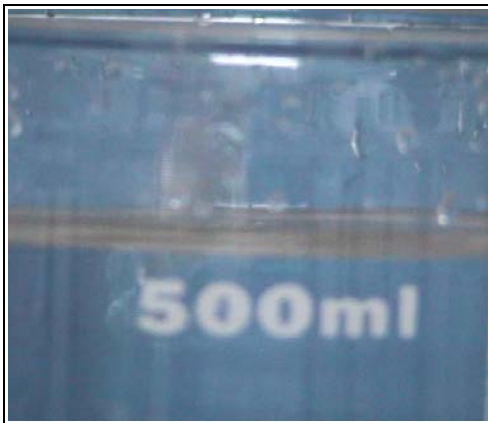


5.即將至反彈最高點。

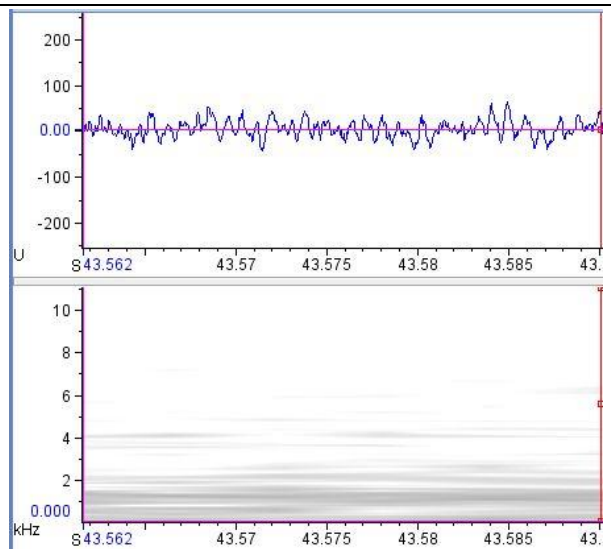


6.水柱開始落回(底部和水面有稍微分開的現象)。

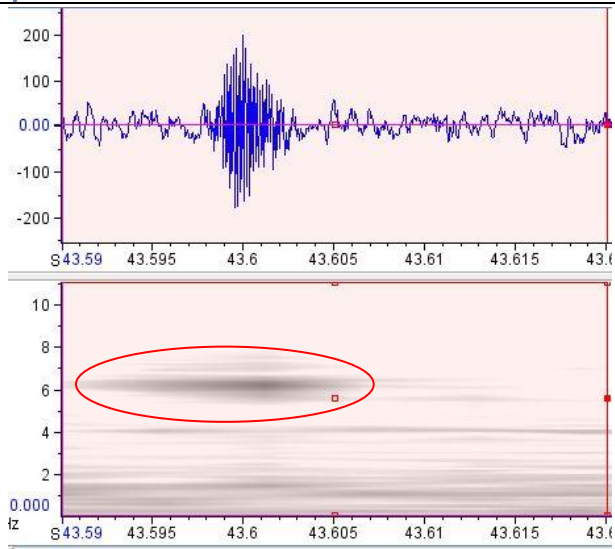




7.二次撞擊水面。



8.就在第二次水面凹陷時，一明顯水滴聲形成。



9.水面趨於恢復平靜(之後的震盪未能脫離水面，故無聲)



我們發現：

1. 普通水滴九個瞬時影像中，真正發出聲音的是後面幾張圖，尤其第八張圖最為明顯，水滴聲的產生幾乎在此。
2. 水滴聲的產生在於水面急劇的改變，其擾動周圍空氣所產生的波動即為我們所聽到的聲音；相對之下，光是撞擊水面（第一張圖）並不能產生明顯的聲音。
3. 水面急劇改變的圖計有第二與第八張，但第二張卻未能發明顯聲音，推測為剛撞擊水面時撞擊處四周反彈區域太廣，致使能量太過分散，而無法產生明顯的聲波。
(不是每個樣本都有類似狀況，有類似狀況的樣本幾乎發生在高速水滴時。)

二、水滴響度的影響因素：

我們假設滴落聲音量會與液滴落入的衝擊能量成正向關係，進行實驗，錄下自不同高度落下的滴落聲。

Distance(cm) (+ conditions)	Crest and trough displacement values measured in unknown unit (Recorded sounds have no way of truly knowing the exact loudness of the source)												Average displacement
	50 (water)	63.703	39.962	70.821	61.973	43.300	67.725	83.906	66.471	98.872	40.880	39.131	
	-48.334	-36.279	-46.275	-65.632	-41.853	-62.327	-76.091	-69.031	-109.886	-45.847	-35.539	-91.064	
100 (water)	61.184	61.184	50.137	32.004	55.024	92.149	78.659	58.645	54.148	82.095	108.857	85.189	129.859
	-60.770	-66.683	-53.893	-36.538	-55.016	-77.906	-85.489	-35.066	-64.805	-70.917	-88.613	-43.335	
200 (water)	45.018	60.113	39.170	36.271	54.274	61.278	38.795	37.488	38.833	41.615	49.827	61.249	97.607
	-49.957	-57.204	-34.782	-37.324	-67.205	-95.812	-36.722	-37.091	-41.661	-46.749	-35.234	-67.617	

結果自 200cm 高度落下的水滴聲竟然比 50cm 和 100cm 小聲，而三者又以 100cm 最大聲。我們進一步用固體，體積和質量皆大於水，撞擊時能量更大。

Distance(cm) (+ conditions)	Crest and trough displacement values measured in unknown unit (Recorded sounds have no way of truly knowing the exact loudness of the source)												Average displacement
	50 (water)	63.703	39.962	70.821	61.973	43.300	67.725	83.906	66.471	98.872	40.880	39.131	
	-48.334	-36.279	-46.275	-65.632	-41.853	-62.327	-76.091	-69.031	-109.886	-45.847	-35.539	-91.064	
100 (water)	61.184	61.184	50.137	32.004	55.024	92.149	78.659	58.645	54.148	82.095	108.857	85.189	129.859
	-60.770	-66.683	-53.893	-36.538	-55.016	-77.906	-85.489	-35.066	-64.805	-70.917	-88.613	-43.335	
200 (water)	45.018	60.113	39.170	36.271	54.274	61.278	38.795	37.488	38.833	41.615	49.827	61.249	97.607
	-49.957	-57.204	-34.782	-37.324	-67.205	-95.812	-36.722	-37.091	-41.661	-46.749	-35.234	-67.617	
100 cm (metal ball)	75.429	102.031	94.226	515.000	748.000	509.000	96.469	73.755	83.970	158.300	93.959	84.597	392.087
	-69.537	-78.428	-74.915	-415.829	-650.232	-407.007	-79.069	-69.004	-66.183	-159.968	-79.415	-65.681	

發現鋼球滴落聲音量最大。於是修正我們的假設為：滴落聲音量和未突破表面張力前所能給的能量正相關。

因為鋼珠無法溶於水，截面積又較大故較難突破表面張力，可解釋何以滴落聲 100cm > 50cm > 200cm (200cm 的水滴會很快衝破液面，融入水中；而 50cm 動能不夠)

再用不同溫度，同樣高度水滴聲作比較。根據背景資料，水溫越高，水的表面張力越小。
如果假設正確，滴落聲音量將 低溫 > 室溫 > 高溫。

Distance(cm) (+ conditions)	Crest and trough displacement values measured in unknown unit (Recorded sounds have no way of truly knowing the exact loudness of the source)												Average displacement
	100 (15°C)	65.269	79.312	75.117	74.278	48.605	50.913	51.333	95.865	93.661	59.055	57.652	
	-55.944	-69.642	-81.963	-82.765	-61.577	-61.457	-48.807	-96.958	-95.885	-45.111	-55.693	-79.815	
100 (22°C)	61.184	61.184	50.137	32.004	55.024	92.149	78.659	58.645	54.148	82.095	108.857	85.189	129.859
	-60.770	-66.683	-53.893	-36.538	-55.016	-77.906	-85.489	-35.066	-64.805	-70.917	-88.613	-43.335	
100 (75°C)	44.937	43.057	73.548	41.209	44.645	49.527	47.966	42.154	47.699	74.249	48.627	37.716	93.732
	-36.869	-46.620	-71.106	-46.722	-41.249	-47.0571	-47.082	-42.729	-49.390	-90.906	-45.399	-46.132	

實驗證實假設正確。

進一步使用黏滯係數很高的甘油作實驗(黏滯係數高，凹陷的量就將變的很小)做確認。
結果幾乎完全沒有聲音，可以支持當初水滴聲來源的猜測。

Full chart:

Distance(cm) (+ conditions)	Crest and trough displacement values measured in unknown unit (Recorded sounds have no way of truly knowing the exact loudness of the source)												Average displacement
	50 (water)	63.703	39.962	70.821	61.973	43.300	67.725	83.906	66.471	98.872	40.880	39.131	
	-48.334	-36.279	-46.275	-65.632	-41.853	-62.327	-76.091	-69.031	-109.886	-45.847	-35.539	-91.064	
100 (water)	61.184	61.184	50.137	32.004	55.024	92.149	78.659	58.645	54.148	82.095	108.857	85.189	129.859
	-60.770	-66.683	-53.893	-36.538	-55.016	-77.906	-85.489	-35.066	-64.805	-70.917	-88.613	-43.335	
200 (water)	45.018	60.113	39.170	36.271	54.274	61.278	38.795	37.488	38.833	41.615	49.827	61.249	97.607
	-49.957	-57.204	-34.782	-37.324	-67.205	-95.812	-36.722	-37.091	-41.661	-46.749	-35.234	-67.617	
100 (75°C)	44.937	43.057	73.548	41.209	44.645	49.527	47.966	42.154	47.699	74.249	48.627	37.716	93.732
	-36.869	-46.620	-71.106	-46.722	-41.249	-47.0571	-47.082	-42.729	-49.390	-90.906	-45.399	-46.132	
100 (15°C)	65.269	79.312	75.117	74.278	48.605	50.913	51.333	95.865	93.661	59.055	57.652	95.585	130.086
	-55.944	-69.642	-81.963	-82.765	-61.577	-61.457	-48.807	-96.958	-95.885	-45.111	-55.693	-79.815	
100 (metal ball)	75.429	102.031	94.226	515.000	748.000	509.000	96.469	73.755	83.970	158.300	93.959	84.597	392.087
	-69.537	-78.428	-74.915	-415.829	-650.232	-407.007	-79.069	-69.004	-66.183	-159.968	-79.415	-65.681	
100 (99.5% glycerin)	It's displacement is less than the displacement of static, making any readings of displacement wildly inaccurate. Static's displacement is between ± 35 (70) .												<70
100 (98% glycerin)	It's displacement is less than the displacement of static, making any readings of displacement wildly inaccurate. Static's displacement is between ± 35 (70) .												<70
100 (94% glycerin)	It's displacement is less than the displacement of static, making any readings of displacement wildly inaccurate. Static's displacement is between ± 35 (70) .												<70
100 (85% glycerin)	It's displacement is less than the displacement of static, making any readings of displacement wildly inaccurate. Static's displacement is between ± 35 (70) .												<70

三、鋼珠滴落聲和水滴聲的比較

對水滴和大鋼珠滴落聲分別做傅立葉分析。

由我們實驗前做的測量（見附錄），知大鋼珠的滴落末速大約等於水滴的滴落末速。

縱軸表音頻，橫軸表時間，顏色深度表示響度。（底部淡淡的一大塊為背景雜訊）

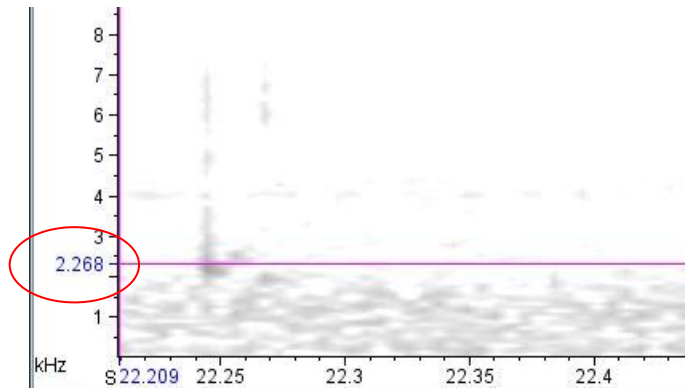


圖 5-2 滴落高度 100cm 水滴聲

除了可明顯看出鋼珠滴落聲比較大聲，還可看出，鋼珠主要的聲音頻率較低（肉耳聽起來也比較低）。

仔細觀察鋼珠撞擊後的水面，凹陷的區塊比較寬也比較大。可能是因為鋼珠截面積較大，又不溶於水。

這個實驗結果映證了較大空間的空氣振動產生的頻率較低，也符合我們「水滴聲的產生來自於液面凹陷回復」的猜測。

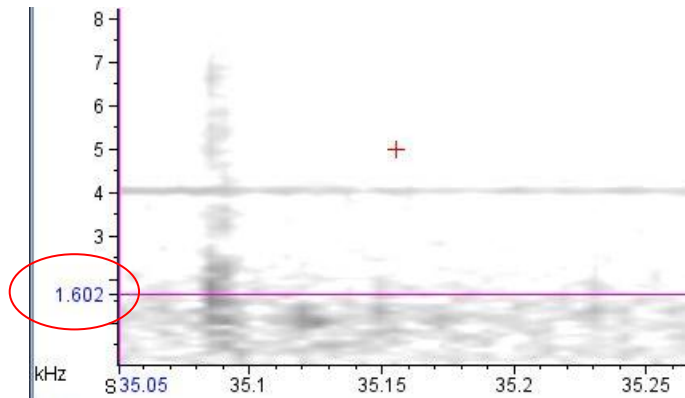


圖 5-3 滴落高度 100cm 大鋼珠。

四、滴落高度與滴落聲響度之詳細關係

水滴從較高處落入水中，由於提供能量較多，可能出現的聲音振幅也變大（如箭頭）。但我們發現，高度高過一定值時，有一定比例的水滴聲響度將很小，甚至小於雜訊。我們猜測，這可能是因為速度快的水滴能直接突破水面，造成的水面凹陷小。雖然水滴本身幾乎沒有聲音，但由於能量充足，其反彈時濺起的水滴反而有較明顯的聲音（如圓圈）。

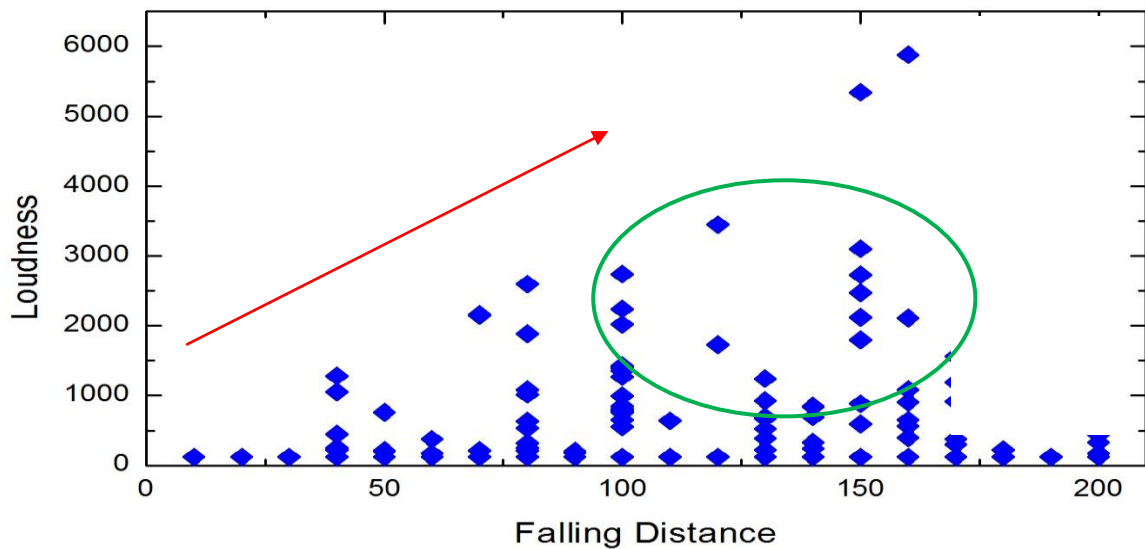


圖 5-4 滴落高度—滴落聲振幅分布圖

滴落聲平均振幅受「其可能發出的最大響度」、以及「其能發出聲響的機率」所影響（如上段所提，有一定比例的水滴響度小於雜訊），其又由許多因素共同影響；因此，平均值變得如圖 5-5 所見，其規律不如圖 5-4 明顯，意義也不如圖 5-4 深刻。

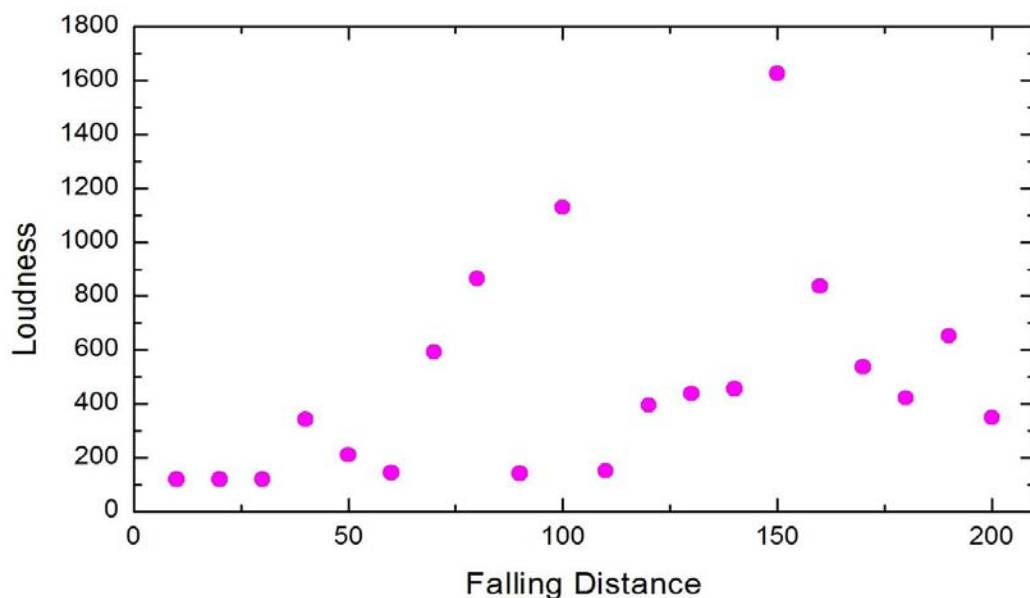


圖 5-5 滴落高度—滴落聲平均振幅關係圖

五、黏土球落水截面積與其滴落聲主要頻率關係(黏土球詳細規格請參附錄 p.21)

用截面積成等差的黏土球落水聲作傅立葉轉換，如圖 5-6，黑色部分代表響度超過一臨界值（也就是最大聲的地方），也是實際聽到聲音高低所在。

當球截面積超過一定時，發現其聲音沒有所謂音高，而成為一普通的撞擊聲（普通撞擊聲轉換結果會跨越所有頻率，意即對照下面的圖，黑色區塊越長者越接近普通撞擊聲）。

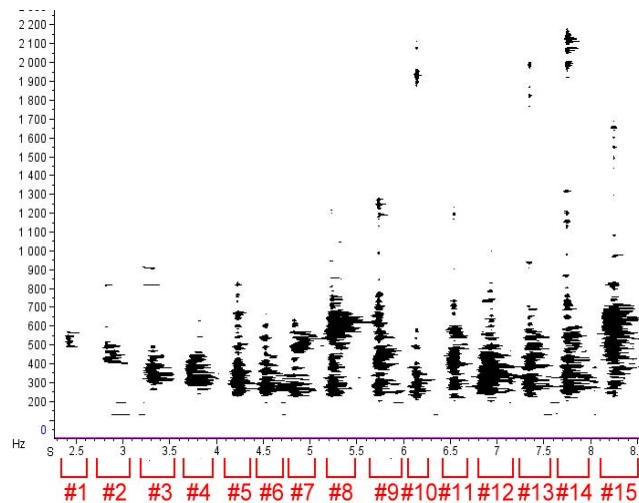


圖 5-6

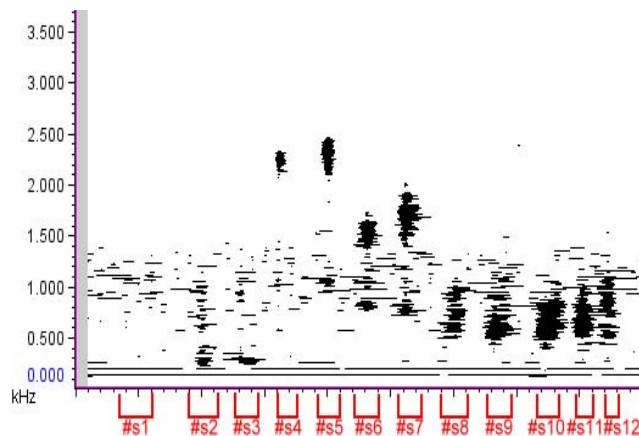


圖 5-7

隨後我們縮小尺度，錄了一系列小黏土球的滴落聲，如圖 5-7，發現其趨勢明顯（其中#s1 ~ #s3 響度過小，未顯示），越小的黏土球其滴落聲主要頻率越高。我們推論，影響其主要頻率的因素應為其滴落時造成的水面凹陷寬度（如圖 5-8）。就像樂器中，越粗的管樂器所發出的聲響越低沉；同理，越寬的凹陷，所產生的空氣振動頻率越低。

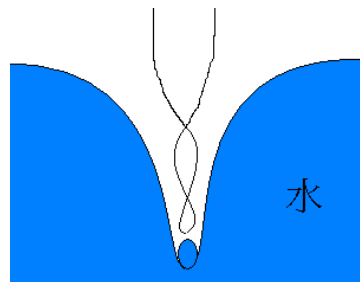


圖 5-8

陸、結論

1. 我們的實驗結果支持我們的猜測：水滴聲是由水面受撞擊造成凹陷、恢復時所產生的空氣擾動所造成。
2. 水滴聲的響度和水面凹陷程度有正向關係。
 - 在水滴未能直接突破液面前，滴落高度與水滴聲音量呈現正相關；滴落高度增高，使水滴足以突破液面時，聲音變得不明顯。
 - 表面張力較大（較低溫）的水滴較不易突破液面，造成較大的凹陷，所造成的水滴聲響度也就較大。
 - 黏滯係數大的液滴不容易產生大凹陷，因而所造成的滴落聲響度較小。
3. 滴落聲的主要頻率，和水面凹陷寬度有關。滴落物的截面積越大，所產生的滴落聲越低沉。當滴落物超過一定大小時，其滴落聲將轉變為普通撞擊聲而無主要頻率可言。

柒、參考資料及其他

- I. 林明瑞。高中物理（下）。2nd。台灣。南一書局。p188~197。民 97。
- II. David R. Lide。CRC Handbook of Chemistry and Physics。79th。USA。CRC-Press。p6-170。1998。
- III. 甘油各種性質：<http://www.dow.com/glycerine/index.htm>
- IV. Spectra Plus：<http://www.spectraplus.com/>
- V. Raven：birds.cornell.edu/brp/raven/Raven.html

關於未來展望：

1.

由於 Spectra Plus^{IV}輸出的圖片頻率坐標為指數坐標，而指數坐標將使圖片在高頻區變形。我們想看看不用指數將長得什麼樣子。因此我們開發了一個程式（可參附錄原始碼）可以將傅立葉轉換結果繪製成圖。其縱坐標為頻率，橫坐標為時間，而裡面的顏色越亮代表該頻率於該時間振幅越大，顏色越暗則相反。

當我們用自製程式將傅立葉轉換結果繪製成圖時，我們意外地發現水滴聲的「形狀」就像蚯蚓一樣一環一環的，而環於環之間「距離」幾乎固定，大約都是 35Hz。意思就是說，同一時間水滴聲的聲波每 35Hz 振幅就會強化一次，這個發現讓我們興奮了一陣子。我們不清楚其中原因，但我們相信這個特別之處讓水滴聲聽起來特殊。我們接下來的實驗將朝研究這種圖片來發展，希望可以發現液滴更多有趣的性質。

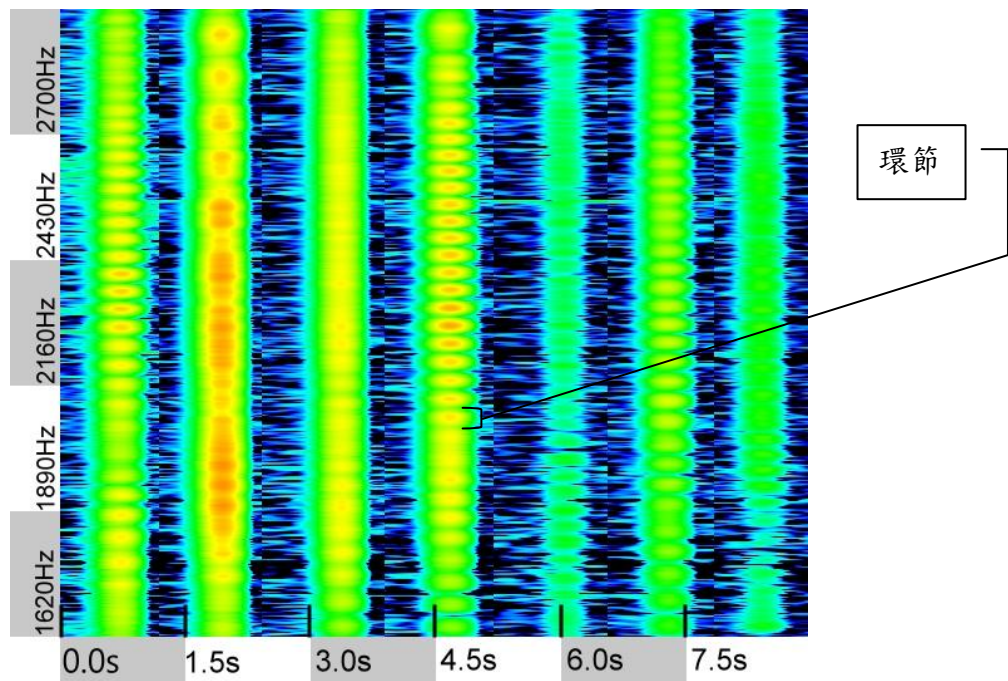


圖 4-1 合併七個水滴聲樣本部分頻率圖

2.

有時滴定管流量調整不良、水滴滴出太快時，我們發現，前後水滴將有互相干擾的現象，使得水滴聲響度有時大有時小，而其大小變化似乎又存在某個固定週期。我們未來想要朝向研究液滴滴落間隔與其響度變化的週期關係發展。

3.

當我們取用形狀特別的被滴物容器時，滴落聲也會有些差別。未來我們要好好研究容器形狀、大小與其滴落聲之關係。

附錄

名詞定義

1. 被滴液與滴入物

被滴液指的是置於滴定管下方燒杯內所盛之液體；滴入物則為滴定管中向下朝被滴液滴出的液體，或自滴定管尖頭向著被滴液靜止出發的鋼珠或黏土球。「滴入液」特別指液態勻相的滴入物。

2. 滴落聲

指的是滴入物自滴定管尖脫落後，自擊中被滴液開始至被滴液液面平復為止其間所發出的所有聲音。「水滴聲」特別用來指水滴滴進水面的滴落聲。

3. 滴落高度

指從滴定管尖頭到被滴液面的高度，也就是滴入物要進入被滴液液面所經過的距離。

4. 滴落末速

指的是滴入物進入被滴液液面時的瞬時速度。

Glycerine percent weight	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 ^(a)	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	-	-	-
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	-	-	-
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	-	-
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

^(a)Viscosity of water taken from "Properties of Ordinary Water-Substance." N.E. Dorsey, p. 184. New York (1940)

表 1 甘油水溶液濃度與黏滯係數對照^[III]

表 2 系列黏土球之詳細規格

	截面積比值	重量(gw)	體積(cm ³)	截面積(cm ²)
#s1	0.11	0.04	0.02	0.09
#s2	0.22	0.10	0.06	0.18
#s3	0.33	0.19	0.11	0.27
#s4	0.44	0.30	0.16	0.36
#s5	0.56	0.41	0.23	0.45
#s6	0.67	0.54	0.30	0.54
#s7	0.78	0.69	0.38	0.64
#s8	0.89	0.84	0.47	0.73
#1(#s9)	1.00	1.00	0.56	0.82
#s10	1.11	1.17	0.65	0.91
#s11	1.22	1.35	0.75	1.00
#s12	1.33	1.54	0.86	1.09
#2	2.00	2.83	1.57	1.63
#3	3.00	5.20	2.89	2.45
#4	4.00	8.00	4.44	3.27
#5	5.00	11.18	6.21	4.09
#6	6.00	14.70	8.17	4.90
#7	7.00	18.52	10.29	5.72
#8	8.00	22.63	12.57	6.54
#9	9.00	27.00	15.00	7.35
#10	10.00	31.62	17.57	8.17
#11	11.00	36.48	20.27	8.99
#12	12.00	41.57	23.09	9.80
#13	13.00	46.87	26.04	10.62
#14	14.00	52.38	29.10	11.44
#15	15.00	58.09	32.27	12.26

我們藉由多次測量來得出滴落末速之平均值，而不於每單次實驗時為之，原因如下：由於我們所要測得是瞬時速度，故無法使兩光電閘距離太遠，又在如此近的距離，水滴通過時間極快，光電計時器的單次誤差將造成大影響；況且，在相似狀態下，滴落末速應保持於一定範圍內，因此，我們使用實驗平均值代表其滴落末速。

以下滴落末速皆快於單受重力作用之 $\sqrt{2gh}$ ，顯示滴入物並非靜止下落，但初速仍控制在很低的範圍內。兩光電閘距離為 14.95mm。

表 3 鋼珠與水滴滴落末速實驗數據（下頁）

t(s)	v(cm · s ⁻¹)	平均速度 (cm · s ⁻¹)	$\sqrt{2gh}$ (cm · s ⁻¹)	t(s)	v(cm · s ⁻¹)	平均速度 (cm · s ⁻¹)	$\sqrt{2gh}$ (cm · s ⁻¹)
50cm 鋼珠		331.3161 ±15.9021	313.0495	50cm 水滴		322.7977 ±7.8086	313.0495
0.00421	355.1069			0.00470	318.0851		
0.00454	329.2952			0.00471	317.4098		
0.00450	332.2222			0.00458	326.4192		
0.00480	311.4583			0.00461	324.2950		
0.00464	322.1983			0.00444	336.7117		
0.00452	330.7522			0.00461	324.2950		
0.00473	316.0677			0.00482	310.1660		
0.00423	353.4279			0.00460	325.0000		
100cm 鋼珠				485.9773 ±14.5772	442.7189		
0.00304	491.7763	0.00343	435.8601				
0.00317	471.6088	0.00334	447.6048				
0.00305	490.1639	0.00348	429.5977				
0.00295	506.7797	0.00326	458.5890				
0.00306	488.5621	0.00330	453.0303				
0.00304	491.7763	0.00325	460.0000				
0.00326	458.5890	0.00314	476.1146				
0.00306	488.5621	0.00324	461.4198				
200cm 鋼珠		666.6845 ±38.7143	626.0990			150cm 水滴	
0.00204	732.8431			0.00272	549.6324		
0.00228	655.7018			0.00277	539.7112		
0.00230	650.0000			0.00277	539.7112		
0.00239	625.5230			0.00274	545.6204		
0.00230	650.0000			0.00277	539.7112		
0.00231	647.1861			0.00273	547.6190		
0.00230	650.0000			0.00278	537.7698		
0.00207	722.2222			0.00277	539.7112		
						200cm 水滴	
		0.00231	647.1861				
		0.00234	638.8889				
		0.00230	650.0000				
		0.00232	644.3966				
		0.00237	630.8017				
		0.00237	630.8017				
		0.00231	647.1861				
		0.00228	655.7018				

【評語】 040112

- 1、 以簡易實驗觀測出，水滴撞擊水面發出聲音的物理主軸機制，值得鼓勵。
- 2、 實驗較注重於現象分析，對定量分析方面較少著墨。
- 3、 對實際量測時，各整理參數之調控，應可更深入了解其設置之精確度。