

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

最佳(鄉土)教材獎

040109

克里克的奧秘—海豚回聲定位系統

學校名稱： 國立花蓮女子高級中學

作者： 高一 謝濟安 高二 游惠鈞	指導老師： 程膺
-------------------------	-------------

關鍵詞：水下聲學、海豚、回聲定位

壹、摘要

臺灣東部海域常有海豚造訪，賞鯨豚已成為熱門的海上知性活動；海豚擱淺時有所聞，對海豚造成生命危險。由於 clicks 是海豚用來判斷目標遠近，辨別目標大小、形狀的聲波，因此，本篇研究報告以海豚 clicks 為研究主題，探討海豚回聲定位之水下聲學。本研究首先於海洋動物園以水下收音設備記錄海豚聲音，以波形與頻譜分析其聲音特徵。研究中亦以虛像法聲波傳遞模型探討影響海豚回聲定位之因素，發現海豚與目標物之距離、以及海水深度對海豚回聲之返回時間與波形都有顯著影響。從聲波之反射與干涉之分析，我們進一步得知不同材質的物體由於其反射係數不同，因此聲波的疊加可導致回聲強度的差異，海豚藉此可以分辨兩物體材質是否相同；當海豚偵測的目標形狀不同時，物體的頂點就是聲波的散射中心，因為它們產生的回聲疊加以後的干涉圖像不同，海豚藉此可以分辨不同形狀與大小的目標物。由此研究結果可推測海豚之回聲系統不僅為一維之訊號傳遞，更有產生二維或立體圖像之能力。

關鍵字: 水下聲學、海豚、回聲定位

貳、研究動機與文獻回顧

臺灣東部海域常有海豚造訪，賞鯨豚已成為熱門海上知性活動，花蓮縣鹽寮鄉亦有海洋公園與海洋動物園之設立，讓我們對海豚有更多的互動與研究機會。海豚擱淺時有所聞，對海豚造成生命危險，由於 clicks 是海豚用來判斷目標遠近，辨別目標大小形狀的聲波，而我們的高中基礎物理課程學到波的反射、干涉等現象，因此，這篇研究報告以海豚 clicks 為研究主題，探討海豚回聲定位之水下聲學。

海豚生活在水中，而光波（電磁波）的能量容易被水吸收與散射，即使是雷射光在水中的穿透距離也不過百公尺；可見光在水中傳播十公尺，能量剩下原先的 15%。相對的，聲波在水中的穿透能力遠超過電磁波，在適當的環境中聲波可傳播近半個地球圓周的距離^(18, 20)。因此，海豚藉由發出聲響，用聽覺器官接收回聲來探測周遭環境，尋找食物，聯絡同伴。海豚發出的聲音頻率可以高到 200 kHz，超出人耳能夠聽到的範圍。較常收錄到海豚的聲音有 clicks 和 whistle 二種。Clicks 是一串短促、寬頻聲波脈衝，whistle 則常在一群海豚嬉戲時聽到；其他的還有 chirps、tones、moans 等等^(4, 5, 25)。科學家認為海豚發出的聲音和牠們的行為有關，clicks 是海豚用來判斷目標遠近，辨別大小與形狀的聲波。

一、海豚的發聲與聽覺器官

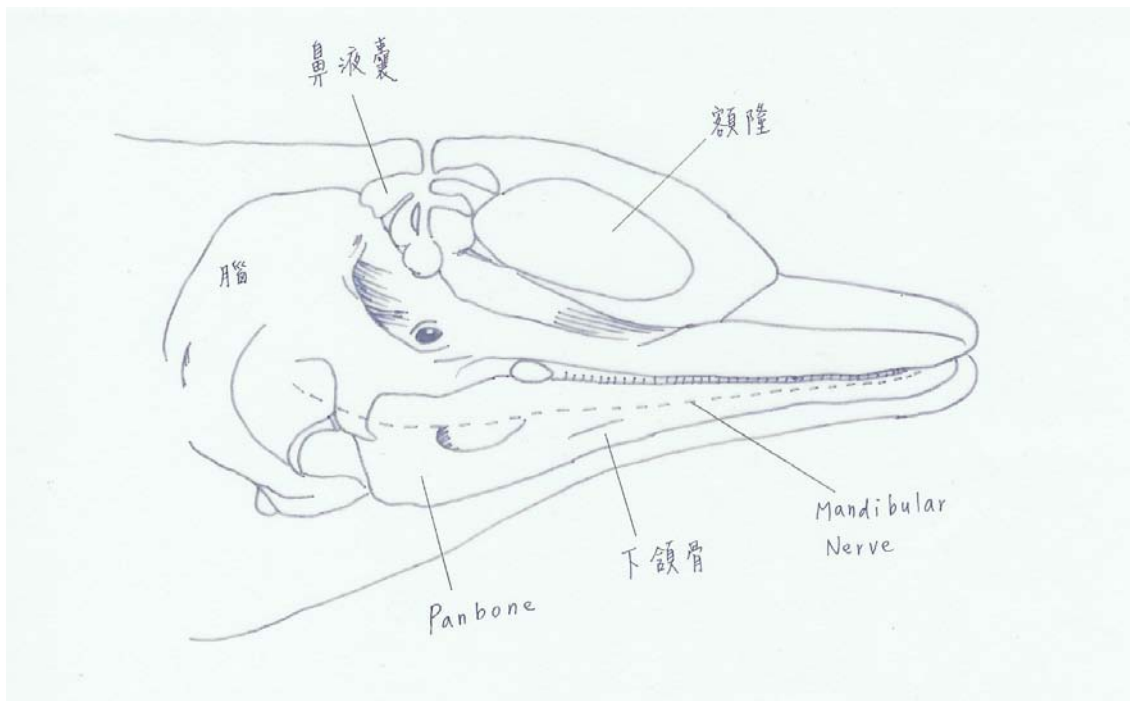


圖 1-2 海豚的發聲與聽覺器官

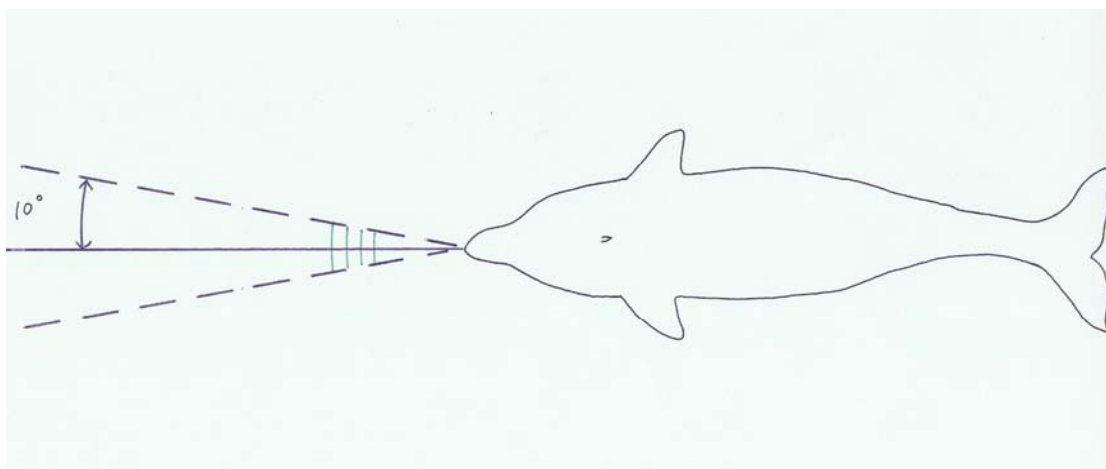
海豚的發聲與聽覺器官包括額隆 (melon)、鼻液囊 (nasal sacs)、下頷骨內部的脂肪組織 (fatty issue)，以及特殊構造的顱骨 (skull)^(4, 25)。海豚藉著壓縮位於額隆後方的鼻液囊，發出聲

波；額隆的作用是將聲音集中成一束，對外放射，就像是將光線聚焦的透鏡。

海豚下顎後端的 panbone、下顎骨內部的脂肪組織是回聲的接收器，然後再由聽骨、耳蝸管將聲音訊息傳到腦部。科學家甚至認為海豚的牙齒，以及整個喙形下顎的神經 (mandibular nerve) 都具有傳遞聲音訊息到腦部的功能。

從海豚的額隆發出的聲波具有方向性^(10,11)，在水平面和垂直面上的分佈各是 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。水平面上的分佈是以海豚身體為中線，左右對稱。垂直面上的分佈卻不是上下對稱的；若以海豚嘴喙、牙齒的平面為基準，垂直分佈的中線在這個平面的上方，和平面的夾角大約 5° 。

(A)



(B)

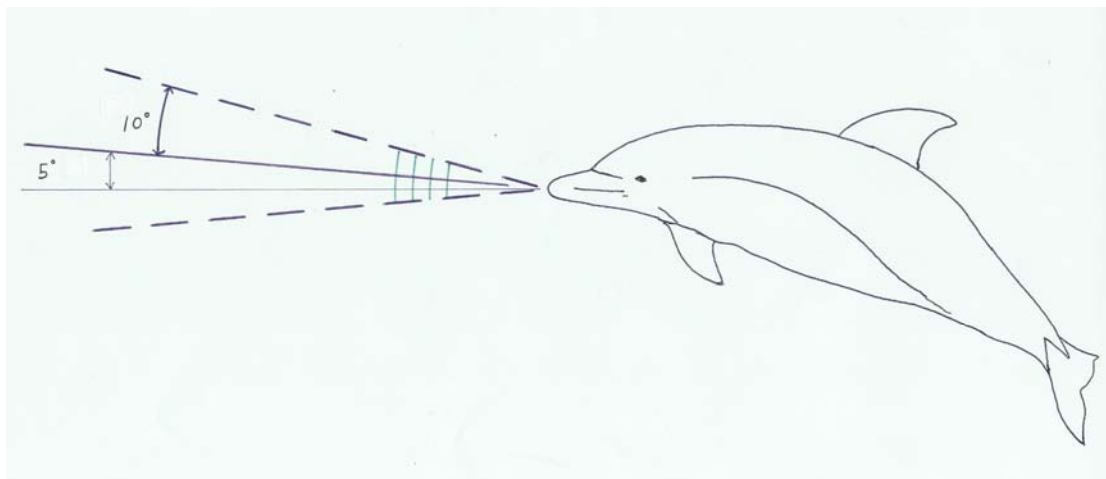


圖 1-3 從海豚發出的聲波在(A)水平面和(B)垂直面的分佈。

海豚接收回聲的範圍比較廣。水平面上接收回聲的範圍是以海豚身體為中線，左右對稱。垂直面上接收回聲最靈敏的方向是在海豚嘴喙上方 5° 到 10° 的區間；往上、往下偏離這個方向越遠，靈敏度越差；而往上偏離靈敏度降低比較快。

二、 Clicks

Clicks 是一串短促的聲波脈衝 (pulse)^(12, 22)；一串之中約含有二十多個脈衝，一個脈衝大約 50 ~ 100 μ s，最簡單的脈衝波形類似振幅經過調整的正弦波 (exponentially damped sine wave)。一個 click 涵蓋的頻率範圍大約是 20 ~ 170 kHz。不同的海豚習慣發出的 click 類型不同，同一隻海豚進行不同的工作，或是在同一件工作的不同階段也會發出不同類型的 click。科學家認為海豚會調整 click 的頻率、強度，以及二個 clicks 之間的時間間隔等等，讓牠能夠從回聲得到更多的訊息^(6, 9)。因此本研究中計畫以水下收音設備，實際記錄圈養於海洋動物園海豚之聲音特徵，並且以聲波傳遞的物理模型探討海豚與目標物之距離，以及海水深度等環境因素對海豚回聲定位之影響。

依據文獻記載，海豚可以利用 clicks 偵測與辨識目標，可完成的工作舉例說明如下：

1. 偵測目標^(7, 13)

- (1) 距離 5 m，在二圈各由 300 個大小不一 (直徑 0.5 ~ 3 cm) 的石塊組成直徑 40 cm 的圓圈中心，偵測一個鉛球；如果鉛球的直徑是 5 cm，即使鉛球隱藏在石塊之中，海豚偵測到的機率是 75%；如果鉛球的直徑是 3.3 cm，鉛球的位置必須比最大的石塊高 1.7 cm，海豚才有 75% 的偵測機率。
- (2) 在其他回音 (reverberation) 的干擾下，偵測一個直徑 6.35 cm 位於海底的實心鐵球。海豚被限制在水面下 1 m 的深度，如果海底與水面的距離是 1.2 m，海豚可以在 74 m 的距離偵測到鐵球；如果海底與水面的距離是 6.3 m，海豚在 70 m 的距離偵測到鐵球。
- (3) 距離 6 m，在一片由 48 個直徑 5.1 cm 的軟木球串聯，6 × 8 排列的屏幕前方，偵測一個中空、外徑 5.1 cm，長度分別是 10、14、17.8 cm 的鋁管。(組成屏幕的軟木球，球心與球心的距離是 15.2 cm。) 對於長 10 cm 的鋁管，如果鋁管在屏幕前方 10 cm，海豚偵測到的機率是 91%；如果鋁管與屏幕並列，海豚偵測到的機率只有 55%。

2. 辨識目標^(8, 19)

- (1) 距離 6 m，一左一右相距 1.1 ~ 1.6 m，同時放置二個實心鋁球，或是放一個實心鋁球與一個軟木球，即使兩球直徑相同，海豚可以靠回聲分辨這兩球的材質是否相同。
- (2) 可分辨一個內部充滿水的不鏽鋼圓球和一個實心、鋁製的圓錐體。可分辨二個長度相同，直徑不同的塑膠管子。
- (3) 距離 8 m，可分辨二個厚度不同的中空管子；管子的外徑都是 37.85 mm，長度都是 12.7 cm，管壁的標準厚度是 6.35 mm。當二個管子厚度差異是 0.8 mm 時，準確度 96 %；厚度差異是 0.2 mm 時，準確度 53 %。

科學家發現海豚在接收回聲時有一個時間限制 --- 265 μ s^(15, 16, 21, 23, 24)，在這段時間內收到的聲響被海豚視為一個整體；像人一樣，海豚不僅能辨識這段時間裡的各個聲波，還能從整體的變化模式 (例如，強度的增加、減弱，音調的升高、降低) 來分辨產生回聲物體的形狀、結構等性質，因此本研究亦擬以聲波之反射與干涉模型來分析海豚利用回聲辨識不同物體之機制。

參、研究目的

爲了解海豚回聲定位系統，本研究目的包括：

- 一、以水下收音設備記錄海豚聲音，並以波形與頻譜分析其聲音特徵。
- 二、以虛像法(image method)聲波傳遞模型探討影響海豚回聲定位之因素。
- 三、以聲波反射與干涉之物理分析，了解海豚利用回聲辨識不同物體之機制。

肆、研究方法

一、海豚聲音記錄之實驗方法與器材設備

- (一)地點: 海豚飼養池 (10 × 25 × 7 m), 位於花蓮縣鹽寮村「私立財團法人海洋動物園」。
- (二)海豚: 瓶鼻海豚三隻、瑞氏海豚二隻。
- (三)水下聲音擷取與分析: 水下聲音擷取系統配置包含 (1)水下麥克風 (Type 8105, Brüel & Kjær, 丹麥), (2)放大器 (Type 2635, Brüel & Kjær, 丹麥), (3)個人電腦 (Travel Mate 2000, Acer)。個人電腦內建音效卡, 使用 Windows 2000 微軟平台, Matlab 6.5 (MathWorks, Inc.) 與 CoolEdit Pro 2.0 應用軟體, 以取樣頻率 44.1 kHz, 16 位元, 單聲道記錄水下之聲音檔。錄音檔剪輯與分析以 Adobe Audition 1.5 (Adobe Systems, Inc.) 軟體進行。

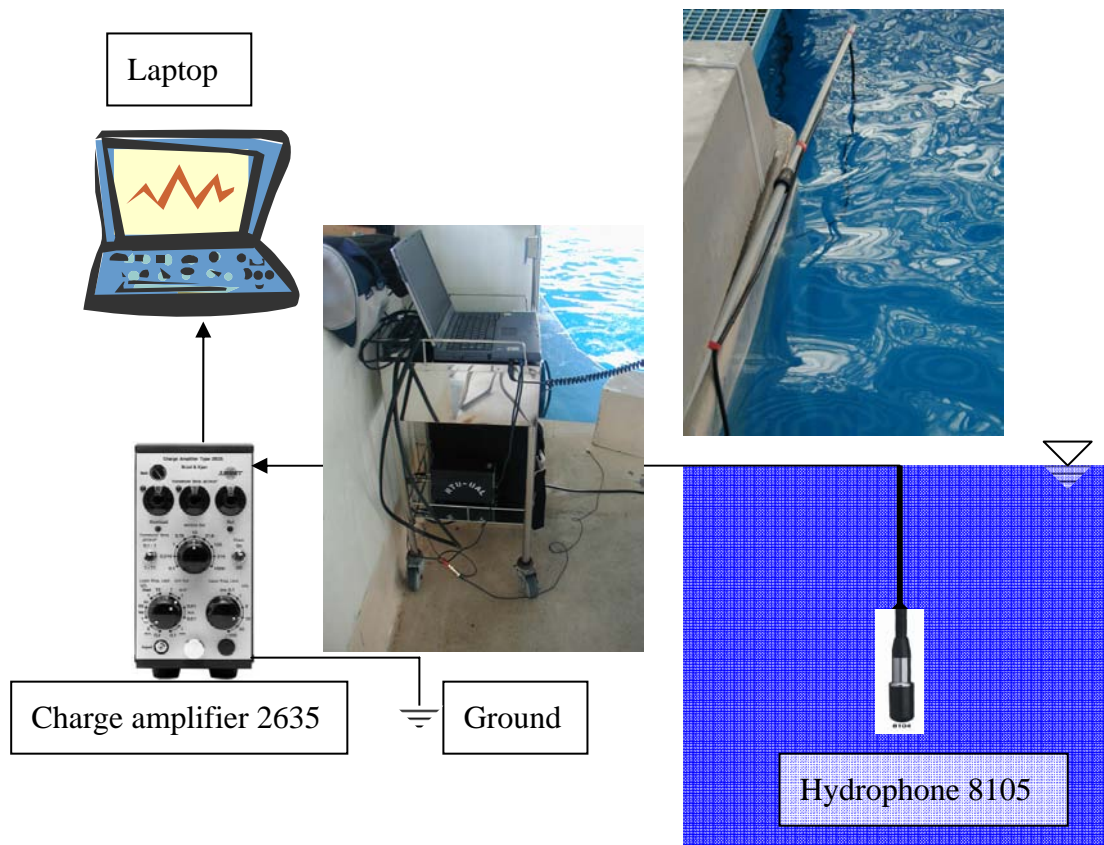
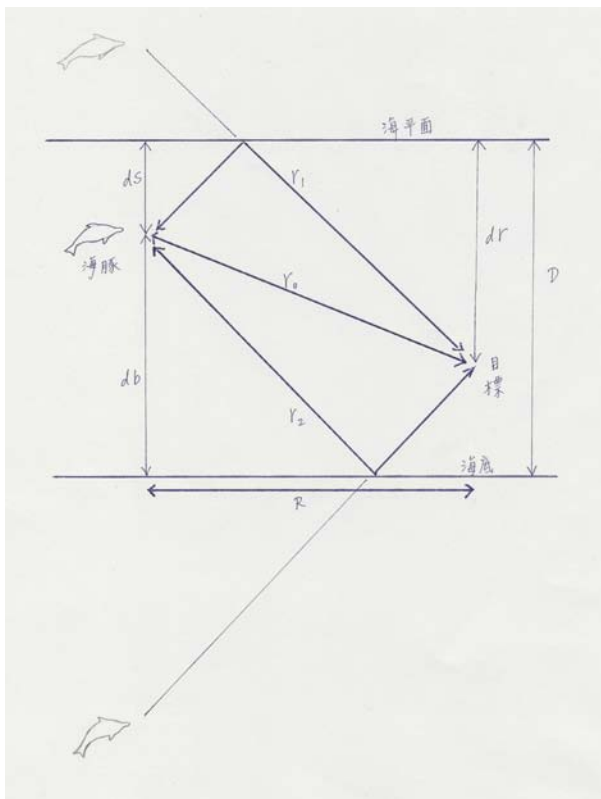


圖 3-1 水下聲音擷取系統

二、以虛像法聲波傳遞模型探討影響海豚回聲定位之因素

依據文獻記載^(7,13)，水面、海底對聲波的反射，以及與目標同時存在的各種雜物（例如，石塊，軟木球）都會干擾海豚的偵測；為了解環境因素對海豚回聲定位之影響，本研究以虛像法聲波傳遞理論模型為基礎，假設聲場為均質流體層，上下層介面為使聲音部分反射的邊界，聲源發出的聲波可以直接傳播到目標，或是先傳播到介面，經反射間接傳播到目標。聲音經過不同路徑到達目標時，由於路徑長短不同，到達目標所需時間亦不同，如此在目標處所接收到的聲波便具有時間差。由介面反射的聲波以虛聲源表示，從各聲源傳播到目標之能量總和也就是目標經直接、間接受到的總能量^(1,17)。



R: 海豚對目標物之水平距離 (m)

D: 海水深度 (m)

ds: 海豚距海平面之深度 (m)

dr: 目標物距海平面之深度(m)

$$r_0 = \sqrt{(dr - ds)^2 + R^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(dr + ds)^2 + R^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(D - dr + ds)^2 + R^2}$$

...

圖 3-2 虛像法聲波傳遞理論模型。

本研究以 Matlab 撰寫程式，輸入深度、距離、海豚位置等變因，求出聲波經長程傳播反射回到聲源的波形；暫時不考慮與目標同時存在水中的雜物。模型中使用的參數包括： r_s ，海平面反射係數， -0.9 ； r_b ，海底部反射係數， 0.7 ；而模擬海豚克里克脈衝聲源波形如圖 3-3 所示。

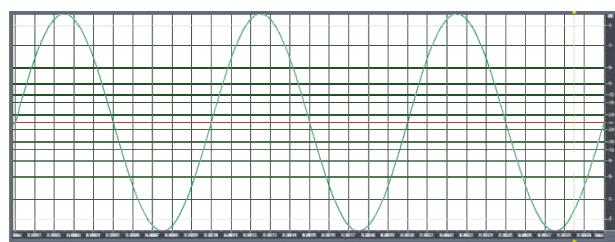


圖 3-3 模擬海豚克里克脈衝聲源波形圖

至於聲速方面，聲波在海水中的傳播受到溫度 (T，以 °C 為單位)，深度 (z，以 m 為單位)，以及海水中鹽類的濃度 (S，以 ppt 為單位) 影響；當 $0^{\circ}\text{C} < T < 35^{\circ}\text{C}$ ， $0 < S < 45 \text{ ppt}$ ， $0 < z < 1000 \text{ m}$ 時，海水中的聲速 C (m/s) 可以寫成^(2,3)

$$C = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 \\ + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z$$

不同的科學家在不同的海域，依據各自蒐集的數據可能推導出不太一樣的公式。不過，海水中的聲速大多在 1450 ~ 1540 m/s 這個範圍，所以接下來的分析將採用 1500 m/s 作為聲波在海水中傳播的速率，暫時忽略溫度、鹽度、深度的影響。

三、海豚利用回聲辨識不同物體之機制

介紹聲學的書告訴我們^(2,3)，(1)聲波在介質中之傳播速度不同，(2)聲波從第一種介質進入第二種介質時，會在介面 (interface) 上同時發生反射與透射的現象，以及(3)當造成回聲的物體具有特殊形狀、大小時，聲波的反射 (或稱散射，scattering) 主要發生在這個物體外緣不平滑、不連續的地方，而海豚接收到的回聲是這許多聲波的疊加結果。本部分利用軟體 Excel 的數值運算與 CorelDraw 的作圖分析聲波之疊加 (superposition) 所產生之干涉圖像 (pattern)，來了解海豚如何分辨不同距離、不同材質、不同形狀之目標。

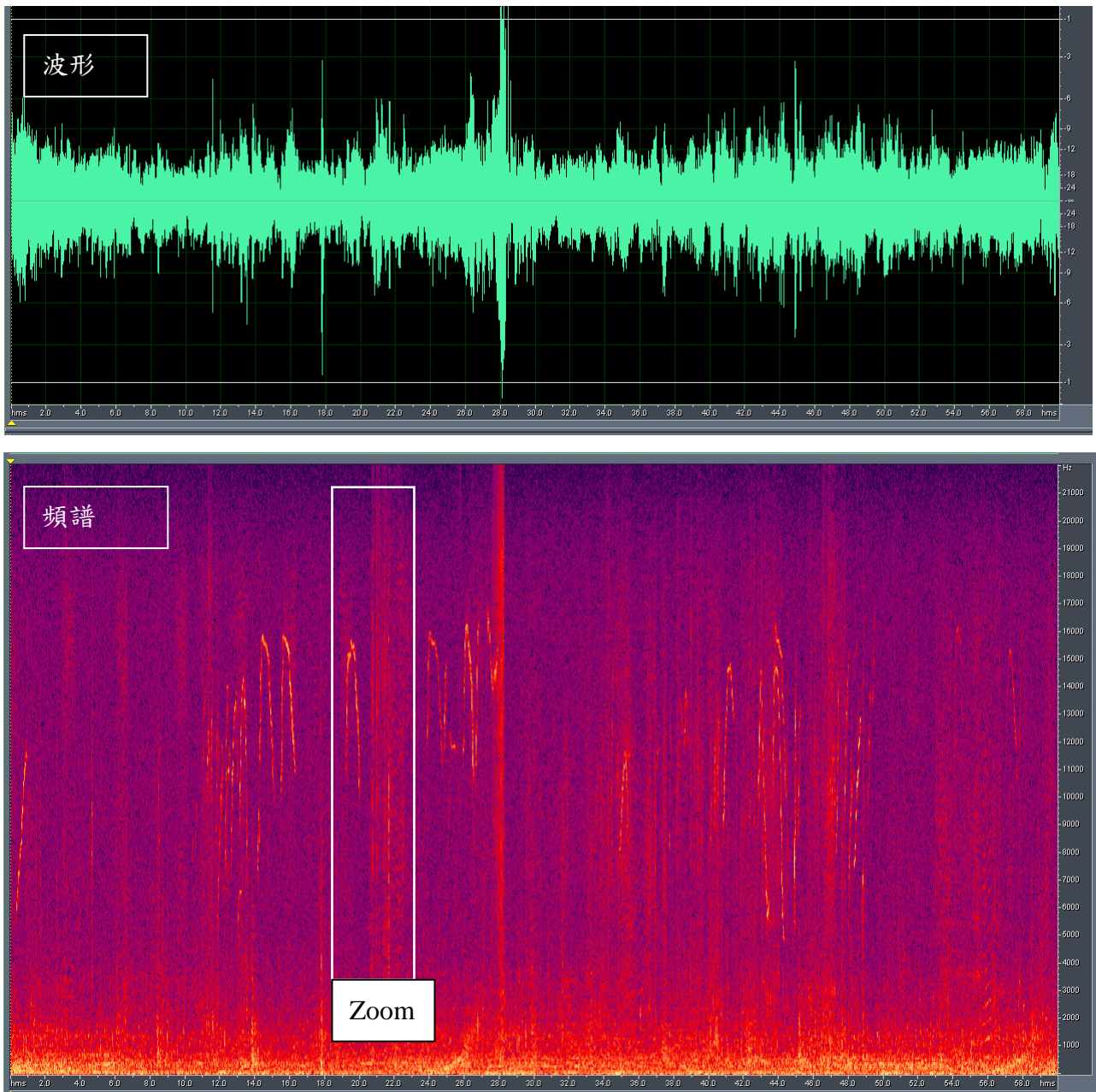
伍、結果與討論

一、海豚聲音記錄與其聲音特徵分析

我們以水下收音設備成功地錄到 25 個聲音檔，長度自 28 秒至 13 分 20 秒不等 (詳見附錄)；錄音檔以 Adobe Audition 1.5 (Adobe Systems, Inc.) 軟體進行波形圖與頻譜圖的分析。

一分鐘長視窗之波長與頻譜分析

以檔案 am1103 中剪輯出之一分鐘記錄為例 (圖 4-1)，由波形圖與頻譜圖可清楚看出連串波形與頻譜不同之 whistles、clicks 和 tones。進一步，將 4 秒視窗 (0:19 - 0:23, 3kHz - 20kHz) 之頻譜圖繪於圖 4-2。



註: Zoom in 四秒視窗 (0:19 - 0:23, 3kHz - 20kHz)

圖 4-1 一分鐘長視窗之波形與頻譜分析 (am1103)

四秒視窗波長與頻譜分析

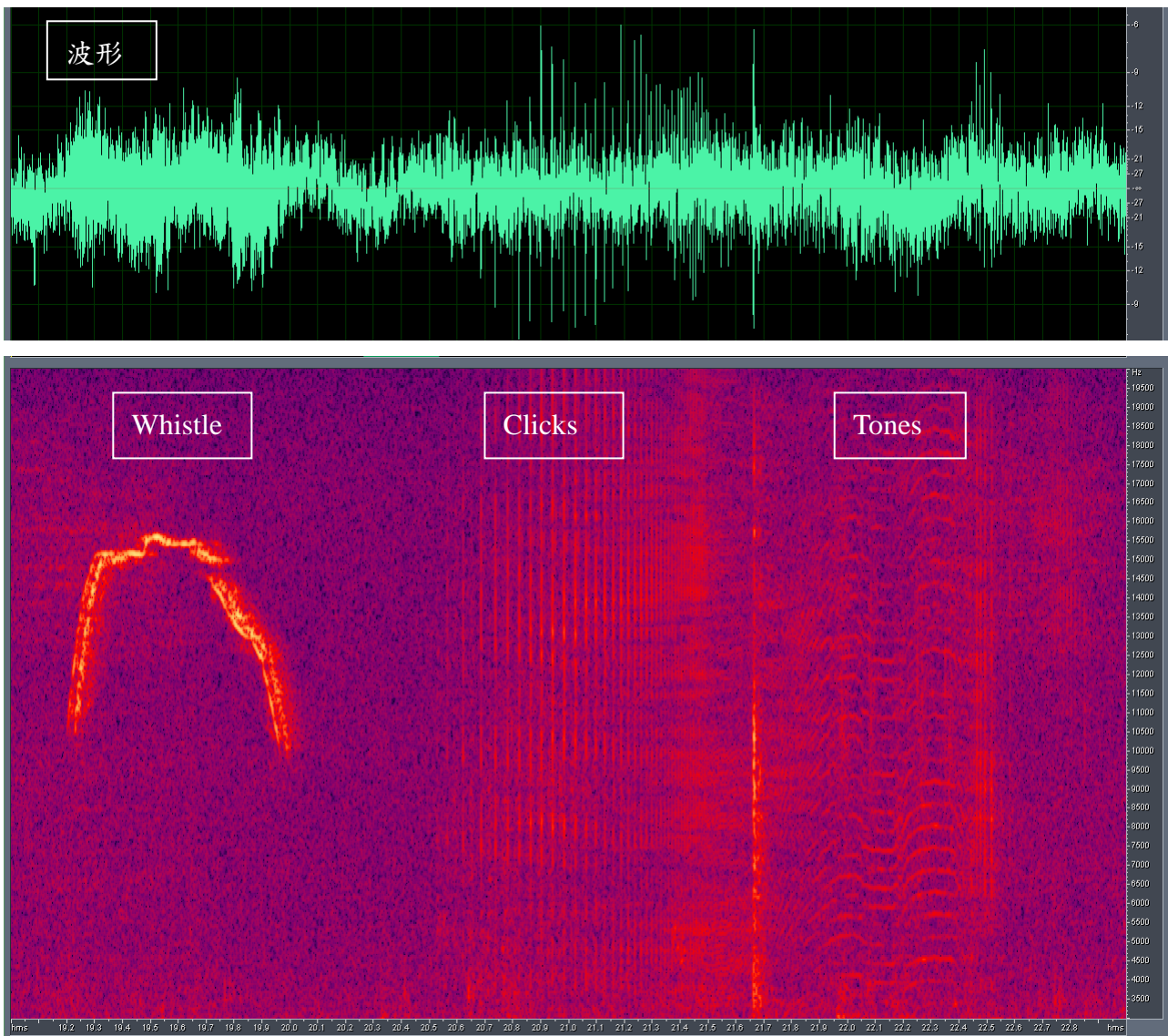


圖 4-2 四秒視窗之波形與頻譜分析 (0:19 - 0:23, 3kHz - 20kHz)

由 4 秒視窗 (0:19 - 0:23, 3kHz - 20kHz) 之波形與頻譜分析圖 (圖 4-2), 可更清楚地看出典型的 whistle、clicks 和 tones。

研究海豚行為之文獻指出^(4, 5, 25), clicks 是海豚用來判斷目標遠近, 辨別目標大小、形狀的主要聲波, 因此, 接下來之研究以海豚 clicks 為重點, 探討 clicks 在海豚回聲定位中所扮演之角色。

二、海豚 clicks 特徵分析

我們以電腦軟體 Adobe Audition 1.5 分析錄得之聲音檔中 clicks 之波形與頻譜，典型的 clicks 頻譜圖表示於圖 4-3 ~ 圖 4-6。圖 4-7 為 click144-C9 之聲波強度分析；圖 4-8 為圖 4-3 ~ 圖 4-6 之脈衝間距分布分析。

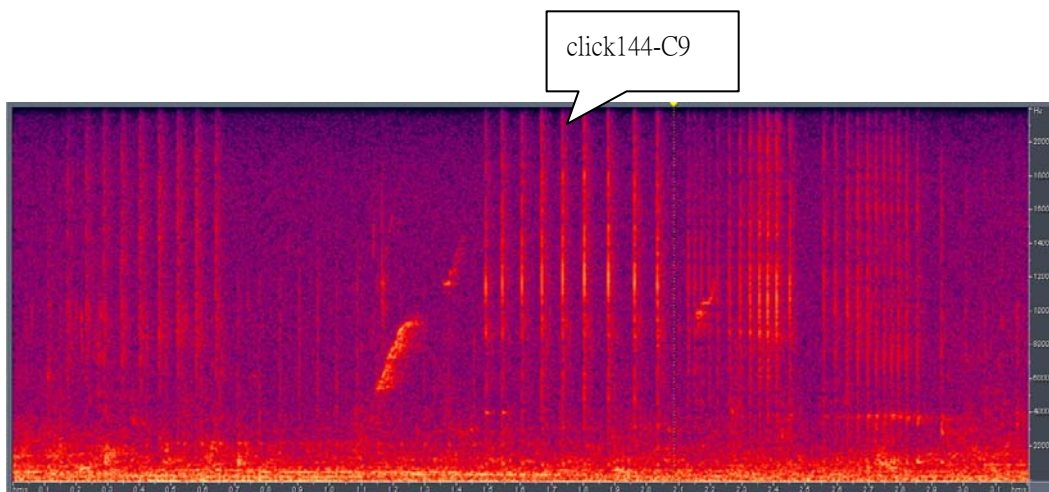


圖 4-3 Click144 之頻譜圖 (3.2 sec)

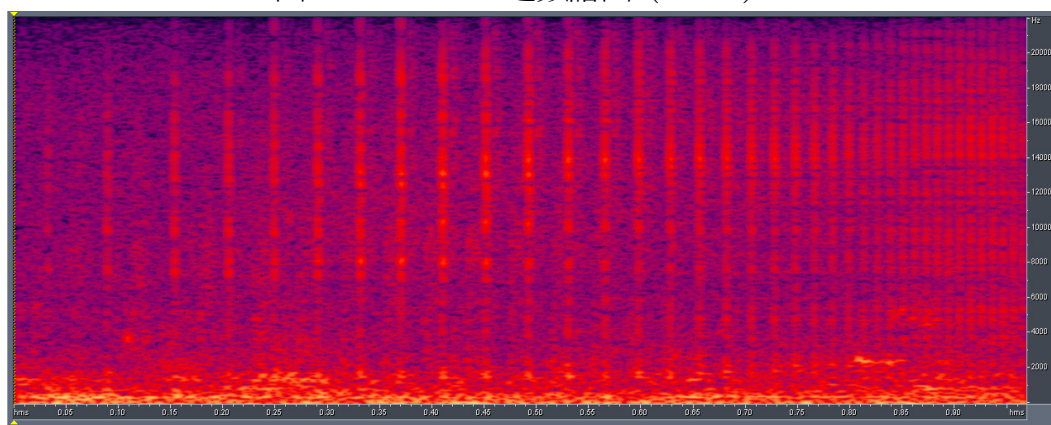


圖 4-4 Click1103 之頻譜圖 (0.97 sec)

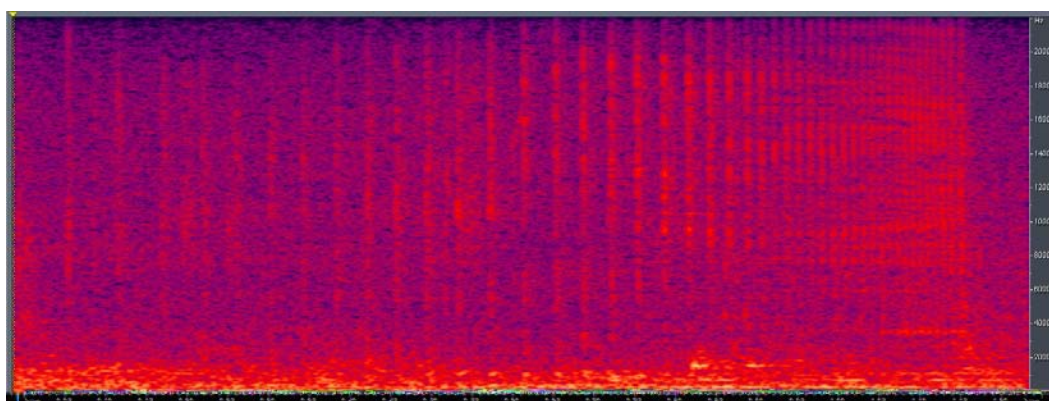


圖 4-5 Click138 之頻譜圖 (1.25 sec)

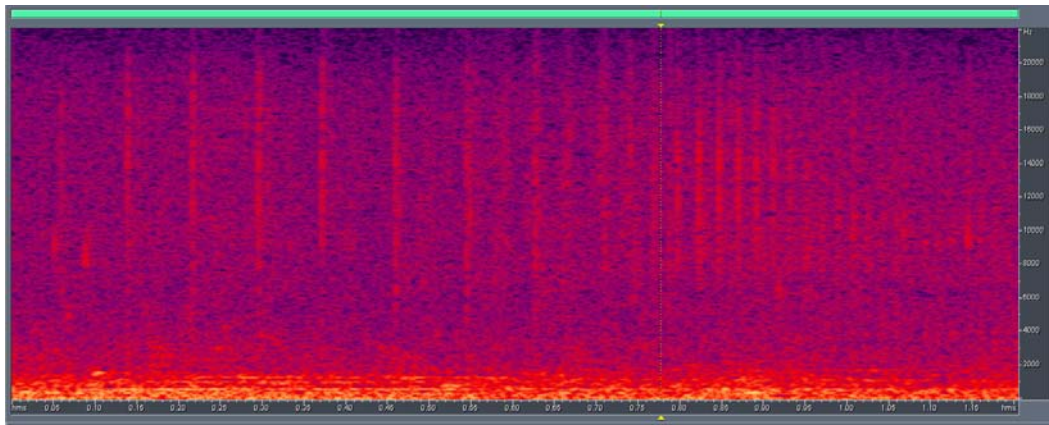


圖 4-6 Click140 之頻譜圖



圖 4-7 Click144-C9 之聲波強度

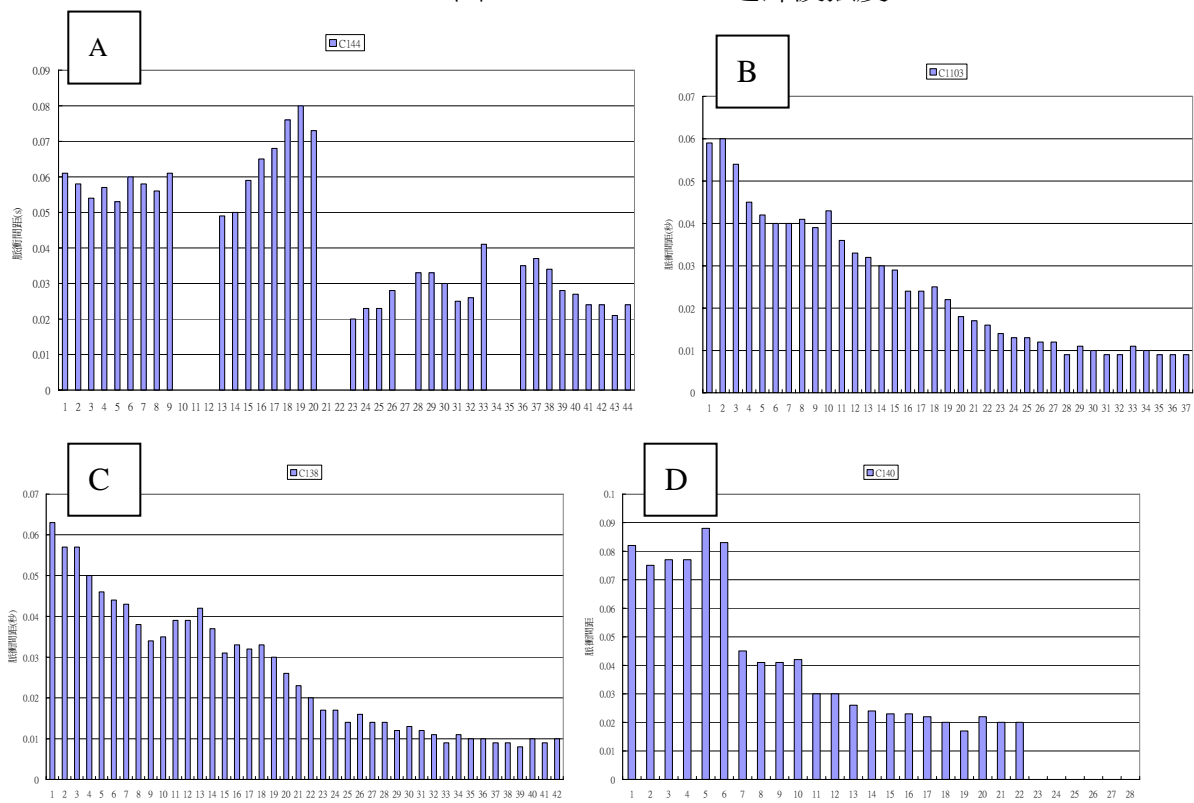


圖 4-8 脈衝間距分布 (A:C144, B:C1103, C:C138, D:C140)

根據文獻記載，不同的海豚習慣發出的 clicks 類型不同，同一隻海豚進行不同的工作，或是在同一件工作的不同階段也會發出不同類型的 clicks。科學家認為海豚會調整 clicks 的頻率、強度，以及二個 clicks 之間的時間間隔等等，讓牠能夠從回聲得到更多的訊息^(6, 9, 12, 22)。

分析實際測得的海豚 clicks，可以得知：

1. 測得之 clicks 的頻率範圍大約是 2 ~ 20 kHz，屬於低頻(圖 4-3 ~ 4-6)；
2. 測得之聲波強度約是 -9 ~ -3 dB (圖 4-7)；
3. 可將 clicks 依組成 clicks 之聲波脈衝數目分為兩類，第一類之 clicks 較短，約由 5 到 12 個脈衝組成，如圖 4-3 所示；第二類 clicks 較長，組成之脈衝數目介於 20 至 50 之間，如圖 4-4 ~ 4-6 所示。
4. 分析脈衝間距，可發現在第一類較短之 clicks 中，其脈衝間距分佈在 0.02 到 0.08 秒之間，如圖 4-8A 所示；脈衝間距有固定不變的，亦有逐漸增長或縮短的，改變幅度在 0.01 到 0.04 秒之間。而第二類較長之 clicks，如圖 4-8B~C 所示，脈衝間距越來越短，可在 20 至 50 個脈衝內間距長度自 0.08 秒降至 0.01 秒。

根據文獻報告^(9, 24)，二個 clicks 之間的時間間隔長短和海豚偵測目標的距離有關。海豚可以從發出 clicks 到收到回聲的時間判斷目標的遠近；越靠近目標，越快收到回聲，因此為了從回聲得到更多的訊息，海豚會縮短二個 clicks 的間隔。扣除聲波在海豚與目標之間來回的時間，海豚通常在收到第一個 click 的回聲之後 0.015 ~ 0.02 秒才會發出第二個 click。換言之，海豚收到回聲以後，分析、研判、再次測試的時間不過 0.015 秒。這個數值與我們的實測值非常接近。

在圖 4-3 ~ 4-6 之放大圖與圖 4-7，可清楚看見回聲因聲波反射造成之影子。根據文獻⁽²¹⁾，每一個 click 脈衝只有 50 ~ 100 μ s，然而，海豚探測的目標可能有許多反射面，也可能外層、內層的界面先後產生回聲，而內部材質不均勻會使得聲波在不同部份傳播的速度不同，因此海豚收到的回聲遠長於 100 μ s，而且波形、頻譜也比原先的 click 脈衝複雜。透過與虛像法聲波傳遞模型模擬結果之分析，可以知道回聲之波形與到達時間和目標物與海豚在水池中之相對位置非常有關，並且受到邊界(包括水面與水底)而來的反射訊號影響。因此，我們在下一單元嘗試以聲波傳遞物理模型模擬分析影響海豚回聲定位之因素。

三、以虛像法聲波傳遞模型探討影響海豚回聲定位之因素

如前所述，此部分以虛像法聲波傳遞模型^(1, 17)進行模擬，計算與繪圖以 MatLab 軟體進行。我們測試了海豚與目標物之距離(R)、海水深度(D)、以及海豚或目標物之深度對海豚回聲定位之影響，結果說明於下。

1. 海豚與目標物之距離對海豚回聲定位之影響

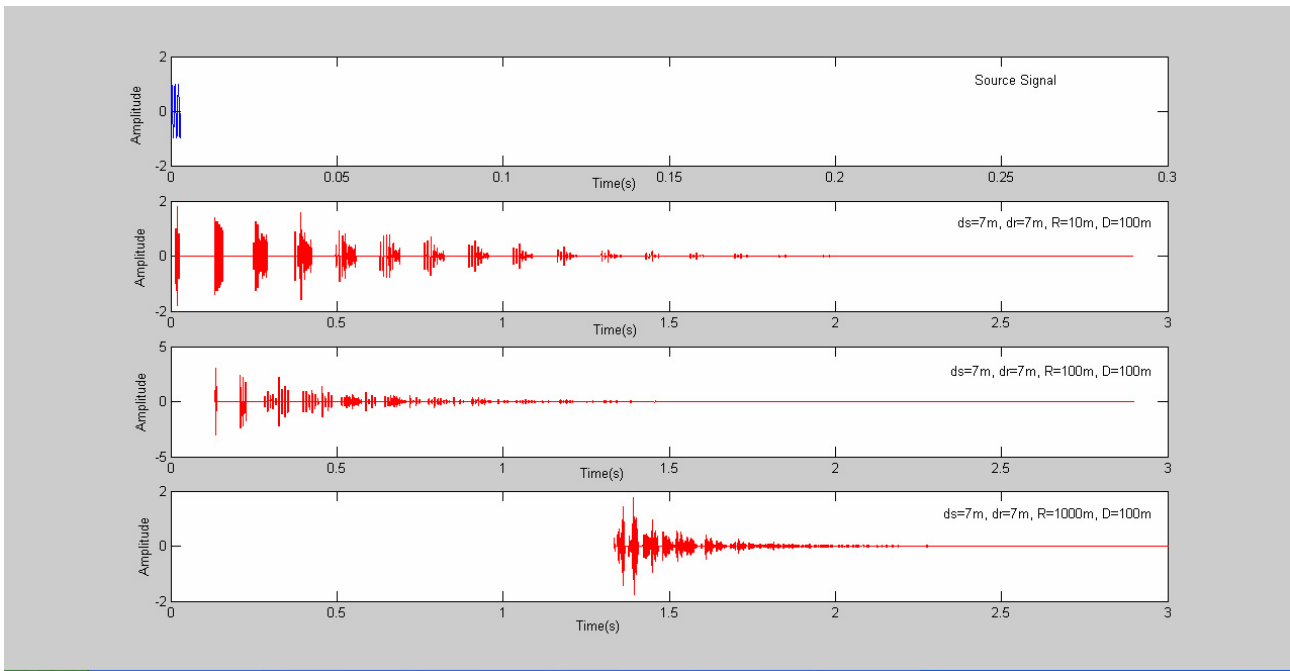


圖 4-9 海豚與目標物之距離(R)對海豚回聲定位之影響

如圖 4-9 所示，海水深度 100 m，海豚與目標物均在水面下 7 m 時，隨著海豚與目標物之距離(R)增加，收到第一個回聲的時間增長，時間的差異可清楚地顯示出目標的遠近。

當海豚與目標物相距 10 m 時，直接傳播與經由海底反射（應該說，每經由海底反射一次）的回聲，行經的路程差距大，在接收時間上出現明顯地區隔；當海豚與目標物相距 1000 m 時，直接傳播與經由海底反射的回聲，行經的路程差距小，接收時回聲重疊在一起。不論海豚與目標物之距離遠近，水面、海底的反射使得回聲訊號與聲源的波形有顯著的差異。

2. 海水深度對海豚回聲定位之影響

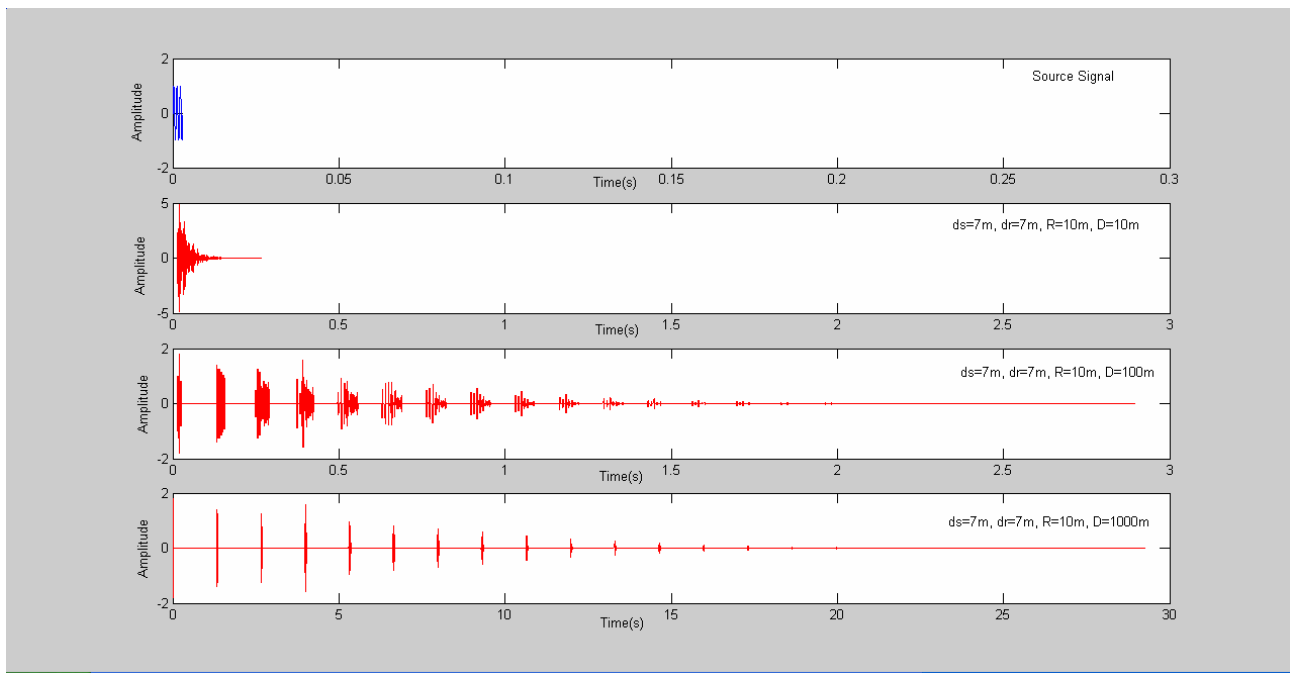


圖 4-10 海水深度對海豚回聲定位之影響

如圖 4-10 所示，海豚與目標物均在水面下 7 m，兩者的距離固定在 10 m；因為距離相同，收到第一個回聲的時間相同。隨著海水深度(D)增加，每由海底反射一次，聲波行經的路程增長很多，直接路徑的波以及各個反射波在接收時間上差距很大，彼此的干擾較小。

3. 海豚或目標物之深度對海豚回聲定位之影響

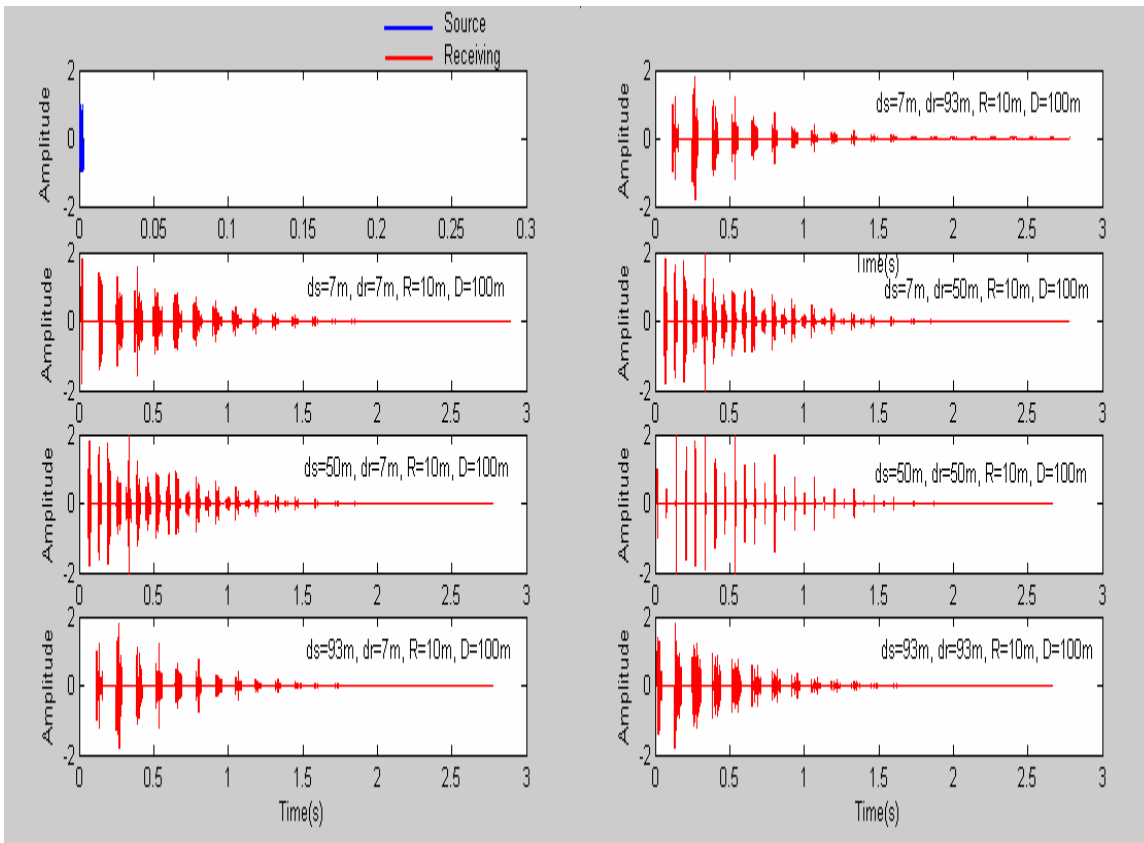


圖 4-11 海豚或目標物之深度對海豚回聲定位之影響

海豚與目標物的水平距離固定在 10 m，兩者的實際距離與各自的深度有關，因此收到第一個回聲的時間不一樣。由模擬結果(圖 4-11)可看出，海豚回聲定位受到海豚或目標物之深度之影響。

模型中水面、海底都是反射聲波的平面，因此當海豚與目標的深度都是 50 m 時，經水面反射的路程和經海底的相同，原本會先後到達的反射波同時到達，使得波形圖反而比較清晰。而聲源和目標的深度互換時，模擬結果相同，這是因為聲音傳播具有「互換」(Reciprocity)之特性所致。事實上，當海面風浪不大時，海底的起伏影響聲波的傳播遠大於海面⁽³⁾。

當海豚在水面下 7 m，目標深度從 7 m (左 2) 增加到 50 m (右 2)，海底反射造成的干擾加大；當目標固定在水面下 7 m，海豚深度從 7 m (左 2) 增加到 50 m (左 3)，海底反射造成的干擾加大；這些都和前人實驗觀察的結果一致^(7,13)。

四、以聲波之反射與干涉探討海豚利用回聲辨識不同物體之機制

1. 不同材質的目標辨識

如前所述，我們知道海豚可以靠回聲分辨不同材質的物體。依據前人的實驗⁽⁸⁾，在相同的距離（6 m）一左一右相距 1.1 ~ 1.6 m（兩者展開的角度小於海豚發出聲波的範圍），同時放置二個實心鋁球，或是放一個實心鋁球與一個軟木球，即使兩球直徑相同，海豚可以靠回聲分辨這二種情況。以此為例，本研究利用聲波在不同介質的反射特性，解釋海豚靠回聲分辨不同材質物體的機制，結果說明如下。

不同介質的密度（ ρ ）不同，聲波在不同介質的傳播速率（ C ）不同，而且聲波從第一種介質進入第二種介質時，會在介面上同時發生反射與透射^(2, 3)。假設入射角是 90° ，從兩種介質的密度比與聲速比可以計算反射係數（ μ_R ）：

$$\mu_R = \frac{m - n}{m + n}$$

其中 $m = \rho_2 / \rho_1$ ， $n = C_1 / C_2$ 。

將不同介質的密度與聲速（表一）代入上式，我們可以計算出聲波在不同介面上的反射係數，結果詳列於表二。

表一、不同介質的密度與聲速^(18, 20)

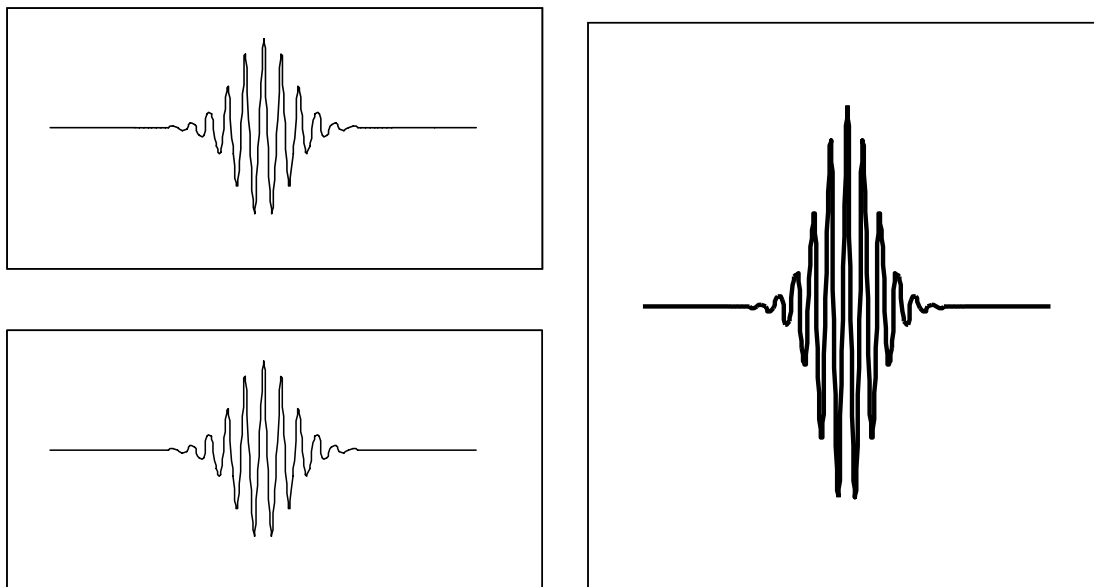
介質	密度 (g/cm ³)	聲速 (m/s)
海水	1.025	1500
鋁	2.7	5104
軟木	0.3	500
鉛	11.3	1227
銅	8.9	3500

表二、聲波在介面（介質 1 / 介質 2）的反射係數

介質 1 / 介質 2	m	n	μ_R
海水 / 鋁	2.63	0.29	0.80
海水 / 軟木	0.24	3.00	-0.85
鋁 / 海水	0.38	3.40	-0.80
海水 / 銅	8.68	0.43	0.91
銅 / 海水	0.12	2.33	-0.91
海水 / 鉛	11.02	1.22	0.80
鉛 / 海水	0.09	0.82	-0.80

當聲波在海水中傳播，碰到鋁球產生回聲時，反射波與入射波相位相同；當聲波在海水中傳播，碰到軟木球時，反射波與入射波相位相反。因此左右都是鋁球時，海豚收到的回聲是兩個相同相位反射波的疊加結果（superposition），如圖 4-12A 所示；左邊鋁球，右邊軟木球時，回聲是兩個相反相位反射波的疊加結果，如圖 4-12B 所示。

(A)



(B)

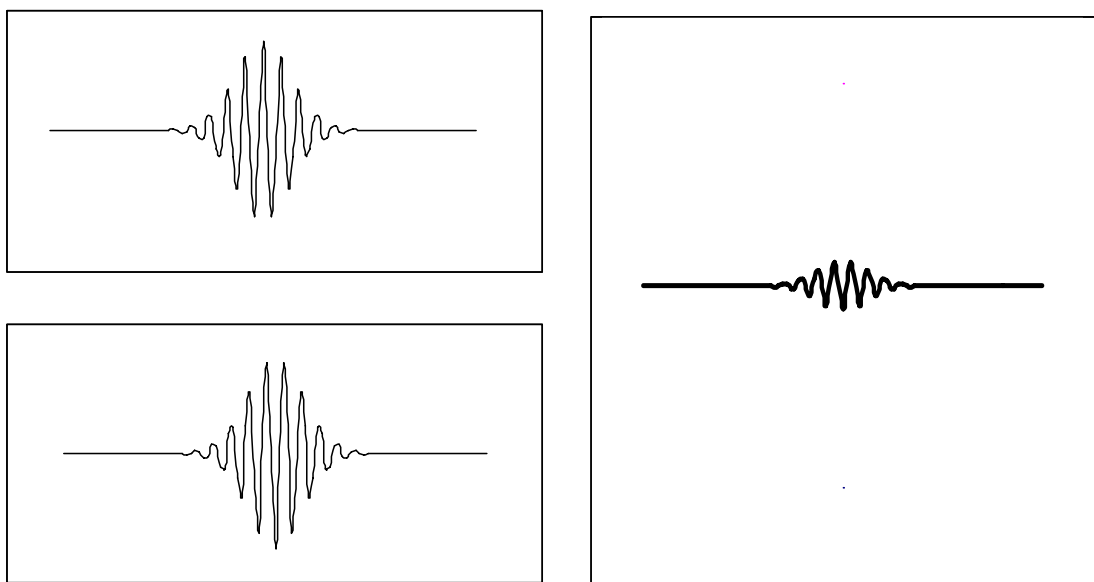


圖 4-12 (A)兩個相同相位聲波的疊加結果；(B)兩個相反相位聲波的疊加結果。反射波的能量和介面的反射係數成正比，反射波的振幅是能量的平方根；B 圖左下是由軟木球產生的回聲，振幅較大。

由於不同材質的反射係數不同，因此聲波的疊加造成回聲強度的差異，海豚由此可以分辨左右兩個球的材質是否相同。

2. 不同形狀與大小的目標辨識

科學家發現海豚利用回聲可以分辨不同形狀與不同大小的目標^(8,19)，本研究以聲波之干涉現象解釋海豚回聲辨識目標物體不同形狀與大小之機制。

當造成回聲的物體不是一個無限大的平面，而是具有特殊形狀、大小的實際物體時，如果這個物體展開的平面角在海豚發出聲波的範圍內，這個物體外緣，例如角、邊等不平滑、不連續的地方就可能發生聲波的反射（或稱散射），而成爲這個物體的散射中心^(2,3)。這些散射中心可同時對一個 click 產生回聲；而海豚接收到的回聲是這許多聲波疊加的結果。

倘若聲波的偵測器是一個麥克風，那麼二個聲波的疊加會因爲相位差不一樣而出現強度加強，或是強度抵消的結果（請參見前一節）。倘若聲波的偵測器是一整面由許多大小比聲波波長小的麥克風組成的陣列，那麼許多聲波的疊加在這面麥克風陣列上會顯現特殊的干涉圖像（interference pattern），像是光波的雙狹縫干涉^(18,20)，X-ray 的晶體繞射⁽¹⁴⁾。

譬如說，有二個相距 a 的聲源 (S_1 和 S_2)，聲源的正前方是一面麥克風陣列，位於陣列上位置 P 的麥克風偵測到聲波疊加的強度，與聲波行經的路程差有關。

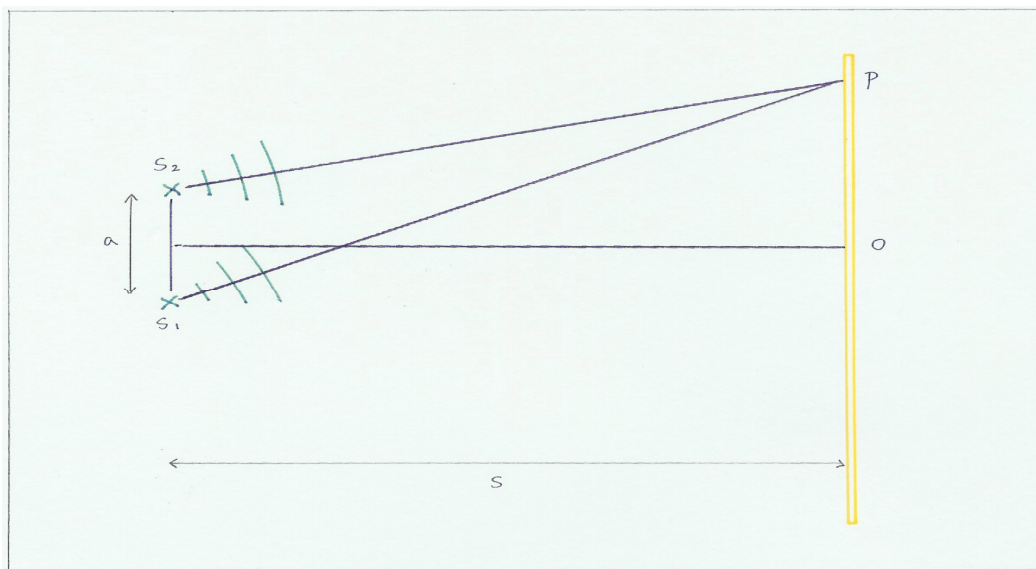


圖 4-13 聲波的干涉；圖中麥克風陣列(黃色)與紙面垂直。

如果

$$S_1P - S_2P = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots; \lambda \text{ 是聲波波長}),$$

那麼到達 P 點的二個聲波同相，產生建設性的干涉；如果

$$S_1P - S_2P = (2n+1)\lambda/2 \quad (n = 0, 1, 2, \dots),$$

那麼到達 P 點的二個聲波相位差是 180° ，產生破壞性的干涉。因此，麥克風陣列接收到的聲波強度是以 O 點爲中心，往上、往下出現強、弱、強、弱、……的干涉圖像。當聲源與

麥克風陣列的距離 (S) 遠大於聲源之間的距離 (a)，干涉圖像是平行的直線，兩條建設性干涉直線間的距離是 $\frac{S}{a} \cdot \lambda$ ；當聲源與麥克風陣列的距離 (S) 並非遠遠大於聲源之間的距離 (a)，干涉圖像如圖 4-14 右邊所示⁽¹⁴⁾。

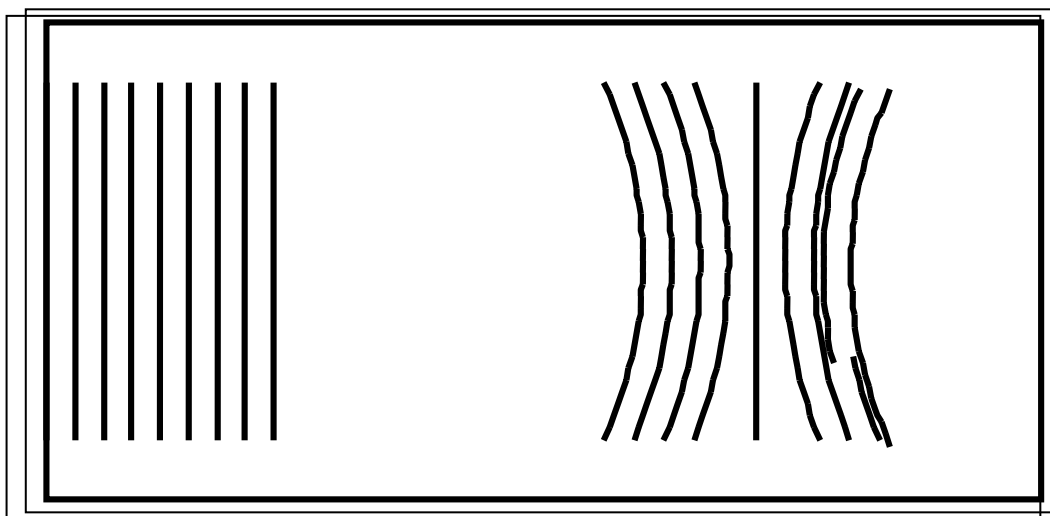


圖 4-14 由聲源往麥克風陣列方向所看到的干涉圖像，左圖對應到聲源與麥克風陣列的距離 S 遠大於聲源之間的距離 a，右圖對應到 S 並未遠大於 a。

如果將圖 4-13 中的二個聲源換成三個，排列成邊長 a 的正三角形，那麼麥克風陣列上的干涉圖像就如圖 4-15 所示，各個建設性干涉點(以紅點表示)的強度相同，二點間的距離是 $\frac{S}{a} \cdot \lambda$ 。

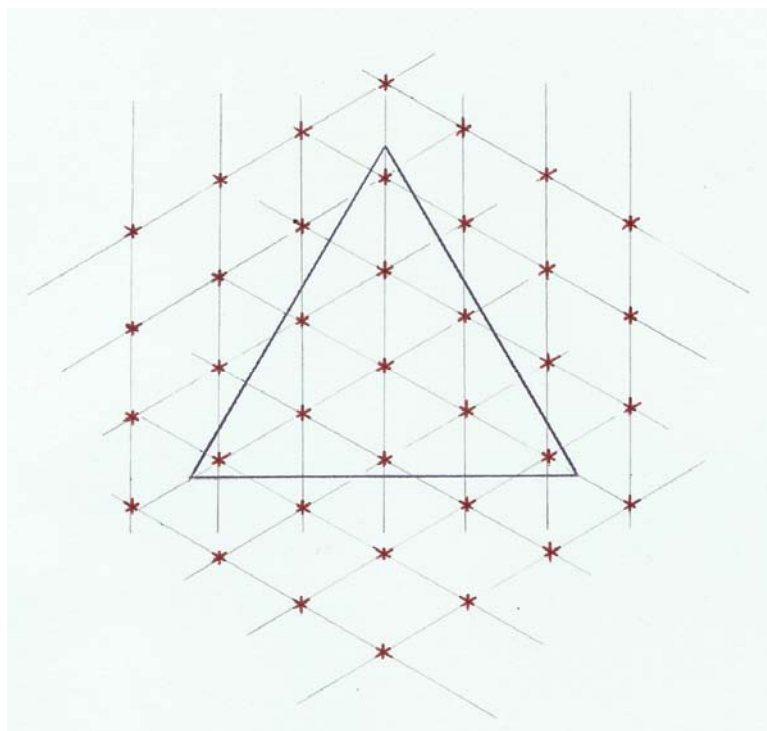


圖 4-15 三個排列成正三角形的聲源產生的干涉圖像；假設聲源與麥克風陣列的距離遠大於三角形的邊長，而且將干涉圖像與聲源重疊以顯示二者方位的差異。

如果將圖 4-13 中的二個聲源換成四個，排列成邊長 a 的正方形，那麼麥克風陣列上的干涉圖像是如圖 4-16 所示；圖中有二組建設性干涉點，黃色的強度較小，是由正方形對角線上的二組聲源產生的建設性干涉；紅色的強度較大，是由正方形邊上的四組聲源以及對角線上的二組聲源共同產生的建設性干涉；二個紅點間的距離是 $\frac{S}{a} \cdot \lambda$ ，紅點與黃點間的距離是

$$\frac{S}{\sqrt{2} a} \cdot \lambda。$$

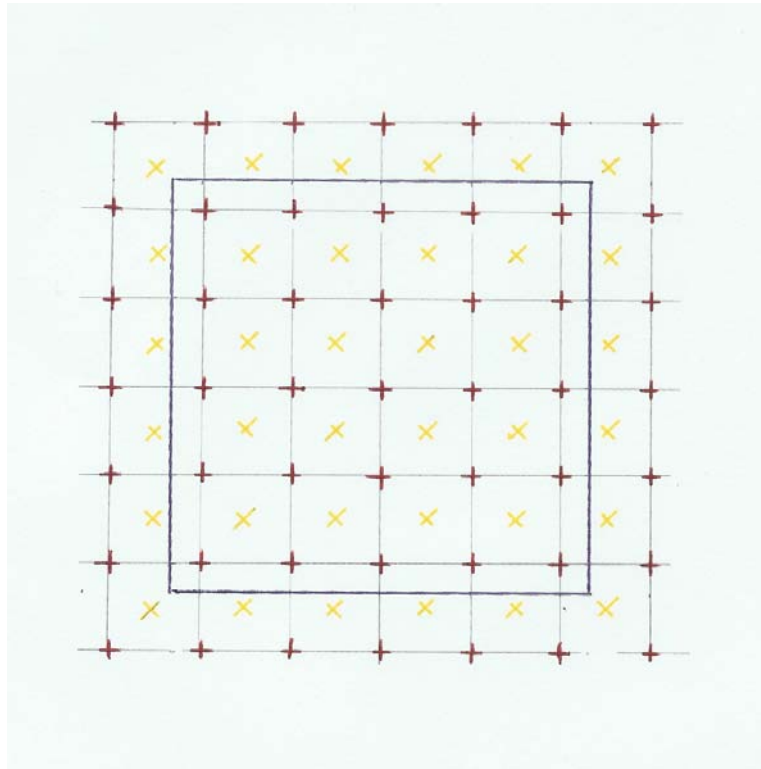


圖 4-16 四個排列成正方形的聲源產生的干涉圖像；假設聲源與麥克風陣列的距離遠大於正方形的邊長，而且將干涉圖像與聲源重疊以顯示二者的關聯。

當海豚的目標是一根管子、一個三角板、或一個立方體時，管子的兩端、三角板的三個角、或立方體某個面的四個頂點就是聲波的散射中心，由它們產生的回聲疊加以後的干涉圖像不同，因此可以分辨不同形狀的目標。

對於形狀相同，大小不同的目標，目標越大，它的散射中心之間的距離 (a) 越大；如果目標與海豚的距離 (S) 相同，大目標產生的干涉圖像，其中建設性干涉點之間的距離較小。海豚可以從干涉圖像中“亮點”（聲波聚焦點，acoustic hot spots) 的疏密判斷目標的大小。

圖 4-15、圖 4-16 均假設聲源與麥克風陣列的距離很遠；聲源發出的球形波經過長距離的傳播，圓弧形波前 (wave front) 的半徑越來越大，到達麥克風陣列時已近似平面波。而且記錄聲波干涉圖像的只是一面位置固定的麥克風陣列，因此得到干涉圖像十分簡單，圖像中“亮點”的分佈非常規則。

海豚發出的 clicks，每一個脈衝約 $50 \sim 100 \mu\text{s}$ ，涵蓋的頻率範圍大約是 $20 \sim 170 \text{ kHz}$ ^(12, 22)，也就是說一個脈衝可能有十幾個波前。如果產生回聲的目標與海豚的距離不很遠，回聲的波前到達海豚時仍會是圓弧形。當目標有二個以上的散射中心，每個散射中心產生的回聲包括十幾個波前，這些圓弧形、一個接著一個往外傳播的波前會產生一個立體的干涉“結構”。

假設聲波在海水中的傳播速度是 1500 m/s ，海豚發出的 clicks 頻率是 150 kHz （選擇 clicks 頻譜中的高頻率是為了強調一個 $100 \mu\text{s}$ 的脈衝就有 15 個波前），那麼聲波的波長是 1 cm 。如果目標的各個散射中心間距是 1 m ，當目標與海豚相距 50 m 時，海豚發出一個 click 會讓這些散射中心同時產生回聲。我們利用 CorelDraw 模擬各個散射中心產生的球形波前互相干涉的結果（圖 4-17、圖 4-18）；源自相同散射中心的波前因時間上的先後順序，不會互相干涉；不同散射中心產生的每一個波前都是一個弧面，二個波前疊加造成的建設性干涉是一條“亮線”，三個波前疊加造成的建設性干涉是一個“亮點”，這些“亮點”、“亮線”組成的干涉圖像是一個立體的網絡。

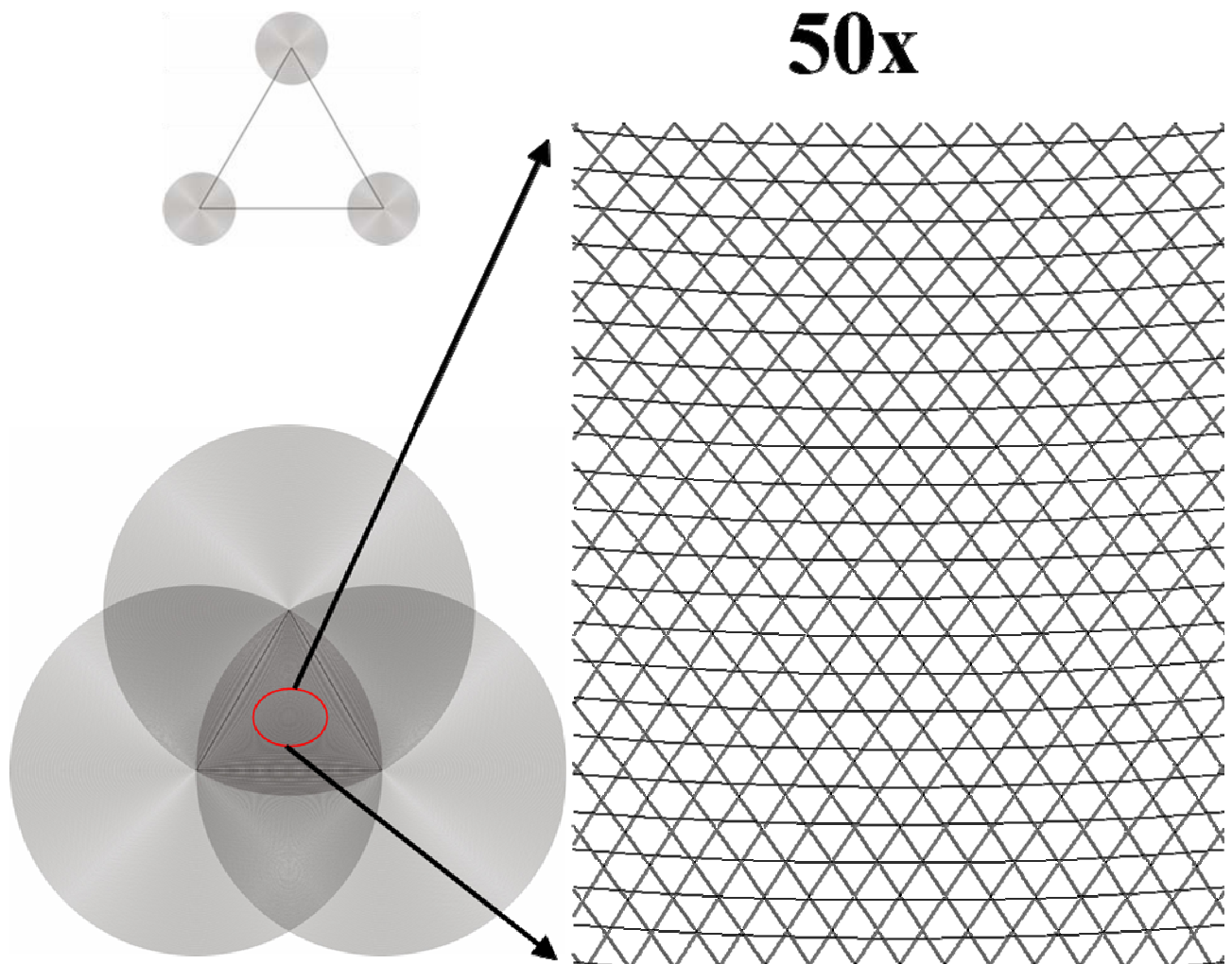


圖 4-17 三個排列成正三角形的聲源產生的干涉圖像

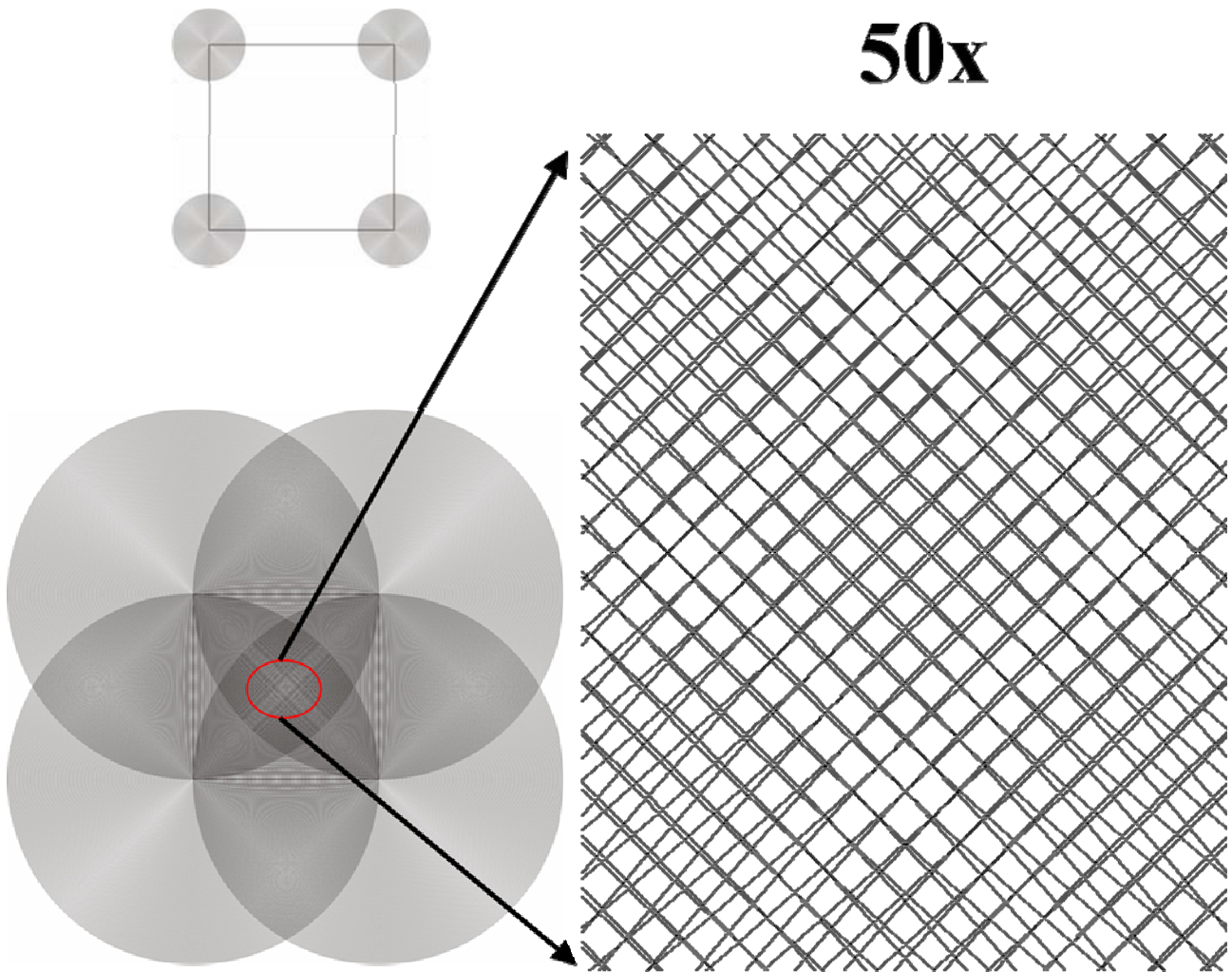


圖 4-18 四個排列成邊長 a 的正方形的聲源產生的干涉圖像

圖 4-17、圖 4-18 顯示從海豚的位置往目標方向的投影圖；由於波前是圓弧形，前、後（靠近海豚與遠離海豚）“亮點”不會重疊在一起，因此干涉圖像不如圖 4-15、4-16 那麼整齊，可是仍然可以看出三個散射中心產生三角形格子的結構，四個散射中心產生方形格子的結構。科學家認為海豚下顎後端的 panbone、下頷骨內部的脂肪組織是回聲的接收器，海豚的牙齒，以及整個喙形下顎的神經 (mandibular nerve) 都具有傳遞聲音訊息到腦部的功能^(4, 25)；我們推測這整個聽覺系統應該不僅能接受與傳遞一維之訊號，更有辨識二維或立體圖像之能力，藉由干涉圖像中“亮點”分佈的形式可區別目標之形狀，藉由“亮點”分佈之疏密可分辨目標之大小。至於其賴以偵測、分析、判定之生物聲納系統則仍待進一步研究。

陸、結論

本研究報告以海豚 clicks 為研究主題，探討海豚回聲定位之水下聲學，研究結論如下：

1. 我們以水下收音設備成功錄得 25 個聲音檔，由波長與頻譜分析圖，可清楚看出典型的 whistle, clicks 和 tones，並可依波形與脈衝間距等特徵將 clicks 分類。
2. 為了解環境因素對海豚回聲定位之影響，以虛像法物理模型進行模擬，結果發現海豚與目標物之距離、海水深度、以及海豚或目標物之深度對海豚回聲之返回時間與波形都有顯著影響。
3. 由聲波之反射與干涉之分析，我們進一步得知不同材質物體由於其反射係數不同，因此聲波的疊加導致回聲強度的差異，海豚藉此可以分辨兩物體材質是否相同。
4. 當海豚的目標是一根管子、一個三角板、或一個立方體時，管子的兩端、三角板的三個角、立方體某個面的四個頂點就是聲波的散射中心，由它們產生的回聲疊加以後的干涉圖像不同，海豚藉此可以分辨目標之形狀與大小 --- 藉由干涉圖像中“亮點”分佈的形式可區別目標之形狀，藉由“亮點”分佈之疏密可分辨目標之大小。
5. 海豚之回聲系統應不僅為一維之訊號傳遞，亦有產生二維或立體圖像之能力；其賴以偵測、分析、判定之生物聲納系統則有待後續研究。

未來展望

1. 本研究成功地收錄到海豚所發出不同種類的聲波，例如，clicks、whistles 和 tones，並且在錄音時察覺到不同類別的聲波，以及同一種聲波在頻率、時間上的變化與海豚的行為有密切關係；未來擬以水下攝影和水中錄音同步進行，深入探討海豚發出的聲波在海豚生活中扮演的角色。
2. 本研究建立的聲波模型配合電腦軟體的即時分析，可以呈現聲波在頻率和時間上的詳細構造，以及聲波在水中傳播時能量、相位等等的變化；未來可以加入原先忽略的因素，例如，海水的溫度、鹽度、深度對聲波傳播的影響，讓模型與實際情形更接近，進一步了解海豚在寬闊自由海域如何利用回聲探測周圍環境。
3. 本研究以聲波的干涉圖像模型來了解海豚辨識目標的能力，未來擬以聲源、反射物，以及水中麥克風陣列在水池裡驗證我們的想法，並希望能因此提升人造聲納系統的探勘、辨識能力。
4. 海豚利用聲波完成的任務，不論是種類的多樣化還是工作的細緻，都令人嘆為觀止。若能結合物理、化學的知識，人工智慧的模型，以及海豚的生理構造，深入探討海豚接收、分析聲音訊息，進而反應、行為的機制，就能充分發揮聲波在聲納探勘、醫學檢驗、物質結構分析等各個領域的應用。

柒、參考資料

1. 林明宏 (民 95)。時間反轉陣列之聚焦解析度分析。臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所碩士論文，臺北市。
2. 馬大猷、楊訓仁 (民 88)。聲學漫談。臺北市：牛頓出版社。
3. 劉金源 (民 90)。水中聲學—水聲系統之基本操作原理。臺北市：國立編譯館。
4. 蔡宜娟、張聰明、王力行。擱淺鯨豚之解剖學特徵及主要病理學之探討。第八屆鯨類生態與保育研討會，環境資訊中心。民 95 年 1 月 23 日，取自：<http://e-info.org.tw>。
5. 謝明峰 (民 94)。鯨豚追蹤定位之模擬研究。大專學生參與專題研究計畫成果報告 (NSC93-2815-C-002-088-E)。
6. Altes, R. A., Dankiewicz, L. A., Moore, P. W., and Helweg, D. A. (2003). Multiecho processing by an echolocating dolphin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 114, 1155-1166.
7. Au, W. W. L. (1992). Application of the reverberation-limited form of the sonar equation to dolphin echolocation, *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, 1822-1826.
8. Au, W. W. L., Andersen, L. N., Rasmussen, A. R., Roitblat, H. L., and Nachtigall, P. E. (1995). Neural network modeling of a dolphin's sonar discrimination capabilities, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 43-50.
9. Au, W. W. L., and Benoit-Bird, K. J. (2003). Automatic gain control in the echolocation system of dolphins, *Nature*, 423, 861-863.
10. Au, W. W. L., and Moore, P. W. B. (1984). Receiving beam patterns and directivity indices of the Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 75, 255-262.
11. Au, W. W. L., Moore, P. W. B., and Pawloski, D. (1986). Echolocation transmitting beam of the Atlantic bottlenose dolphin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 80, 688-691.
12. Au, W. W. L., Moore, P. W. B., and Pawloski, D. (1988). Detection of complex echoes in noise by an echolocating dolphin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 83, 662-668.
13. Au, W. W. L., and Turl, C. W. (1983). Target detection in reverberation by an echolocating Atlantic bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*), *J. Acoust. Soc. Am.*, 73, 1676-1681.
14. Carpenter, G. B. (1969). *Principles of Crystal Structure Determination*. Boston : Benjamin.
15. Dankiewicz, L. A., Helweg, D. A., Moore, P. W., and Zafran, J. M. (2002). Discrimination of amplitude-modulated synthetic echo trains by an echolocating bottlenose dolphin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 112, 1702-1708.
16. DeLong, C. M., Au, W. W. L., and Roitblat, H. L. (2004). Human listening studies reveal insights into object features extracted by echolocating dolphins, *J. Acoust. Soc. Am.*, 115, 2406.
17. Frisk, G. V. (1994). *Ocean and Seabed Acoustics*, p.80. New Jersey : Prentice-Hall.
18. Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J. (民 94)。物理(上) (第七版)。臺北市：全華科技股份有限公司。
19. Harley, H. E., Putman, E. A., and Roitblat, H. L. (2003). Bottlenose dolphins perceive object features through echolocation, *Nature*, 424, 667-669.
20. Hecht, E. (2000). *PHYSICS: Calculus, 2e*. Australia : Brooks/Cole Thomson Learning.

21. Helweg, D. A., Moore, P. W., Dankiewicz, L. A., Zafran, J. M., and Brill, R. L. (2003). Discrimination of complex synthetic echoes by an echolocating bottlenose dolphin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 113, 1138-1144.
22. Houser, D. S., Helweg, D. A., and Moore, P. W. (1999). Classification of dolphin echolocation clicks by energy and frequency distributions, *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, 1579-1585.
23. Moore, P. W. B., Hall, R. W., Friedl, W. A., and Nachtigall, P. E. (1984). The critical interval in dolphin echolocation: What is it?, *J. Acoust. Soc. Am.*, 76, 314-317.
24. Moore, P. W. B., Roitblat, H. L., Penner, R. H., and Nachtigall, P. E. (1991). Recognizing successive dolphin echoes with an integrator gateway network, *Neural Networks*, 4, 701-709.
25. *The Greenpeace Book of Dolphins*, Greenpeace Communications Ltd. Retrieved January 23, 2006 from <http://www.inkokomo.com/dolphin/echolocation.html>.

捌、附錄

錄音檔案說明

檔名	儲存時間	錄音長度	擷取方式	說明
Am1057	10:57	1:00.000	Matlab	
Am1059	10:59	1:00.000	Matlab	
Am1103	11:03	1:00.000	Matlab	
Am1105	11:05	2:00.000	Matlab	
Am1110	11:10	3:00.000	Matlab	
Am1114	11:14	4:00.000	Matlab	
Am1121	11:21	5:00.000	Matlab	
Am1130	11:30	5:00.000	Matlab	
Am1138	11:38	5:00.000	Matlab	
Am1145	11:45	5:00.000	Matlab	
Am1157	11:57	1:55.308	CoolEdit	
Am1203Charge*	12:03	0:12.989	CoolEdit	比較有無接地之訊號， 顯示電子雜訊之干擾
Am1218	12:18	11:07.573	CoolEdit	
Pm0125	13:25	12:52.208	CoolEdit	
Pm0141	13:41	13:51.274	CoolEdit	
Pm0301	15:01	2:40.943	CoolEdit	
Pm0310	15:10	8:03.845	CoolEdit	
Pm0322	15:22	10:25.342	CoolEdit	
Pm0335	15:35	11:13.668	CoolEdit	
Pm0349	15:49	12:14.476	CoolEdit	
Pm0401	16:01	10:51.609	CoolEdit	
Pm0411	16:11	8:26.049	CoolEdit	
Pm0422	16:22	10:22.294	CoolEdit	
Pm0435	16:35	11:56.045	CoolEdit	
Pm0449	16:49	9:36.725	CoolEdit	

* 此為文字檔(.txt)，其他皆為聲音檔(.wav)。

評 語

040109 克里克的奧秘-海豚回聲定位系統

充份應用地利之便，研究海豚利用聲音定位，達到學以致用，若能百尺竿頭更進一步，探討在不同狀況下反射音波的干涉現象，則必有更好的成績。