

# 1 波 動

|     |           |    |
|-----|-----------|----|
| 1-1 | 波動的性質     | 4  |
| 1-2 | 週期波       | 13 |
| 1-3 | 波的反射與透射   | 16 |
| 1-4 | 波的疊加原理與駐波 | 20 |
| 1-5 | 惠更斯原理     | 26 |
| 1-6 | 水波        | 28 |



小智週末跟著家人到臺中洲際棒球場觀看棒球比賽，棒球賽中場休息時，情緒高昂的觀眾玩起「波浪舞」。小智看著此起彼落的人潮，想起最近學到的波動現象。小智下課後問菲菲老師：「棒球場觀眾依序站起坐下的波浪舞看起來好像海浪喔！波浪舞到底算不

算是波動呢？」菲菲老師帶著慧黠的眼神回問：「那你覺得是不是呢？」小智回答：「可以看到明顯的波形往前傳遞，但是波動不是會傳遞能量嗎？波浪舞又不會啊！」看來我們要認真研究一下波動，才能回答小智的困惑。





棒球場觀眾依序  
站起坐下的波浪  
舞，到底算不算  
是波動呢？

那你覺得是  
不是呢？

## 一 波形與波速

波動的現象在自然界極為常見：手甩動繩子產生繩波、石頭丟入靜止水面產生水波、唱歌所傳出的聲波、地殼板塊擠壓產生地震波等等，都是不同種類的波動。在本章中，我們試著用系統化的方式來描述波動，運用簡單科學的觀念，解釋各種不同的波動現象。

舉例來說，用手握著彈性繩的一端，從原始位置快速上揚，再向下揮動到原來的位置，如圖 1-1(1) 所示，即可在繩上產生向前傳遞的擾動，此一凸起的擾動稱為**脈衝波**（pulse wave）。若是忽略繩子在運動過程中產生的摩擦力，會發現繩上的波形維持不變，以一定的速率向前傳遞，此一速率稱為**波速**（wave speed）。介質（在此為繃緊的彈性繩）受到擾動後，可以將擾動的形狀傳播出去的現象，即稱為**波動**（wave motion）。

波傳遞的形狀，當然不侷限於脈衝波。若是手握住彈性繩時，持續上下規律擺動，如圖 1-1(2)，則繩上會出現連續而有週期性的擾動，稱為**週期波**（periodic wave）。在相同的彈性繩上，週期波向前傳遞的速度與脈衝波相同，並不會因為波形不同，而有快慢的差異。

波速與介質受到擾動後的運動速度不可混為一談，如圖 1-1(3) 所示，畫出兩時刻相近的繩波進行比較，即可發現波形向右傳遞，但是繩上各個質點卻是作上下的運動。由此可見，波速（波形傳播的速率）與繩上質點的運動速率是完全不同的物理量。圖 1-1(4) 為生活中常見的繩波。



### KEY

繩波的傳遞速率（波速）與繩上質點的振動速率，兩者不同。  
當繩波向前傳遞時，繩上質點則在原地作上下振動。

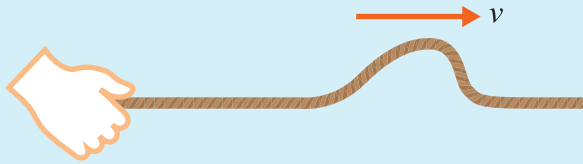


圖 1-1

## 彈性繩的波形

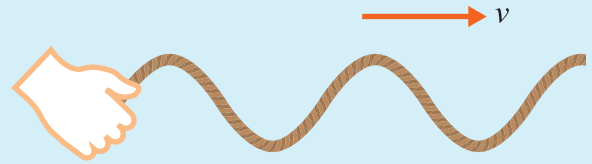
## 1 脈衝波

手執彈性繩快速上揚，再向下揮動到原來的位置，可產生一向右傳遞的脈衝波。



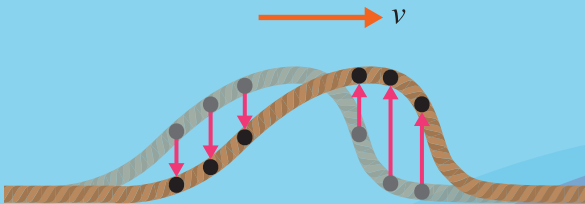
## 2 週期波

手執彈性繩規律上下甩動繩子，即可產生一向右傳遞的週期波。



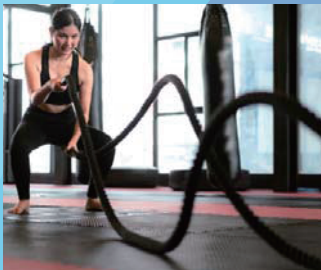
## 3 波形的傳播

繩波以波速  $v$  向右傳遞，但繩上質點作上下振盪。

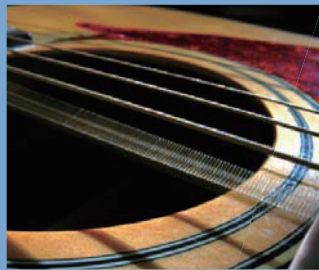


## 4 生活中常見的繩波

戰繩減脂運動



振動的琴弦



韻律彩帶體操





波動在介質傳播的速率僅與介質的特性有關，舉繩波為例，其波速  $v$  跟彈性繩的線密度（單位長度的質量） $\mu$  與張力  $F$  有關（圖 1-2），可表示為

$$1.1 \quad v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

式中張力以  $F$  表示，是為避免與後面提到的週期  $T$  混淆。而由上式可知，當彈性繩張力相同時，比較相同材質作成的細繩（線密度小）與粗繩（線密度大），會發現波動在細繩傳遞較快，而在粗繩傳遞較慢。我們亦可以利用彈性繩張力調整波速，繩上張力大時，波速較快；當繩上張力減小時（但依然大於零），波速也會跟著變小。

如圖 1-3，一維的繩波容易描述也容易理解，但是波動當然不限於一維，將石頭丟入平靜的水面，即可在二維的水面上產生波動。如同繩波一樣，水波傳遞的波速與波形無關，只與介質的特性有關，如水深、壓力、介質密度等。人們在日常生活中藉由對話（聲音）來溝通，所謂發聲，就是產生聲波在三維的空間傳遞。在第二章會進一步詳細介紹由空氣分子運動來傳遞的聲波，由於我們看不見空氣分子，加上聲波是三維波動，描述聲波的特性相對來說較為複雜。

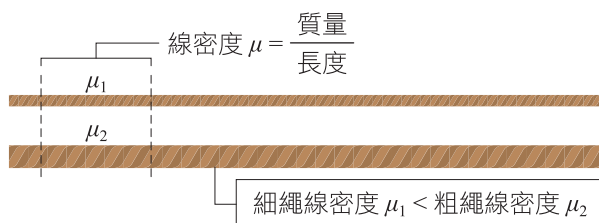
圖 1-2

## 彈性繩的波速

### 1

#### 線密度

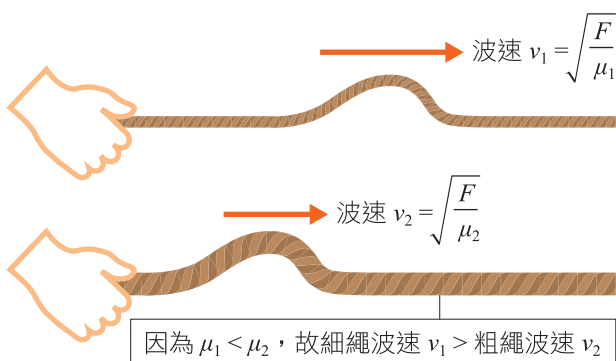
線密度為彈性繩每單位長度的質量，相同材質的彈性繩，細繩線密度小、粗繩線密度大。



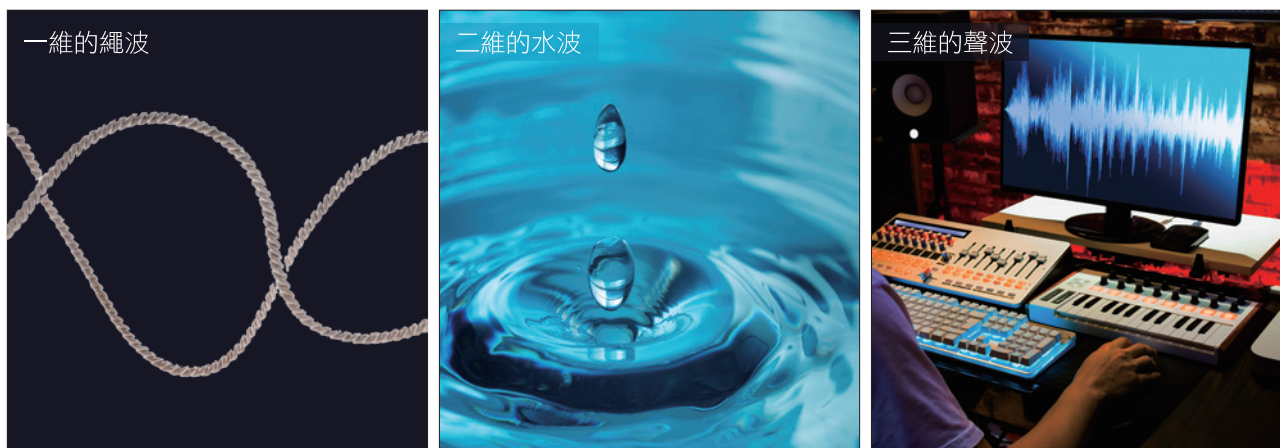
### 2

#### 波速

在材質與張力相同的粗、細兩繩上，於同一時刻分別發出一脈衝波，波動在細繩傳遞較快，而在粗繩傳遞較慢。



▼ 圖 1-3 空間中的波動



### KEY

波動在介質中傳遞的速率與介質的特性有關，例如繩波的波速由繩張力  $F$  和線密度  $\mu$  決定；空氣中的聲速則由空氣的溫度、密度、溼度等因素決定。

### 範例 1-1

### 繩波波速

將某彈性繩一端繫牆壁，另一端施以  $10 \text{ kgw}$  的力量拉緊，並在施力處產生一個脈衝波。已知繩長為  $2 \text{ m}$ ，繩質量為  $500 \text{ g}$ ，重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，則：

- (1) 彈性繩的線密度為多少  $\text{kg/m}$ ？
- (2) 脈衝波將在出發後幾  $\text{s}$  抵達牆壁？
- (3) 將彈性繩拉力增為原來的 4 倍，則脈衝波的波速變為原來的幾倍？

#### 分析

$$\text{繩波波速 } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{m/L}}。$$

#### 解答

$$(1) \text{ 線密度 } \mu = \frac{m}{L} = \frac{0.5}{2} = 0.25 \text{ kg/m}。$$

$$(2) \text{ 脈衝波的波速 } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{10 \times 10}{0.25}} = 20 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \text{抵達牆壁時間 } \Delta t = \frac{L}{v} = \frac{2}{20} = 0.1 \text{ s}。$$

$$(3) \text{ 由 } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \propto \sqrt{F} \text{ 可知，當 } F \text{ 增大為 4 倍時，} v \text{ 變為原來的 2 倍。}$$



## KEY

力學波：需要介質傳遞的波，遵循牛頓運動定律。

電磁波：不需介質傳遞的波，滿足馬克士威方程式。

物質波：與物質在空間出現的機率分布有關，須以量子力學解釋。

## 二 力學波與電磁波

常見的波分為兩類：力學波與電磁波，如圖 1-4。**力學波**（mechanical wave）是因為物質的振動而產生，必須靠介質才能傳遞，例如繩波以彈性繩為介質傳遞、聲波則可藉由空氣為介質傳播。而**電磁波**（electromagnetic wave）不需要介質亦可傳遞，例如陽光是太陽發出的電磁波，可以穿越真空傳播到地球。「光並非力學波」在科學發展的過程爭議良久，是近代科學的重大成果之一。簡單來說，力學波傳遞時，其介質遵循牛頓運動定律；而光是電磁波，滿足馬克士威方程式，因此兩者才會有截然不同的特性。而更為有趣的**物質波**（matter wave）為物質量子現象的一種表徵，自然不會遵循牛頓運動定律，因此物質波也不是力學波。

分析力學波的傳遞會發現，波動傳遞的是能量，而非介質中的物質。如圖 1-5 所示，手握著繃緊的彈性繩一端，先上揚再下揮到原先的位置，即會

圖 1-4

## 力學波與電磁波

## 1 力學波需要介質傳播

## 聲波

聲波可以透過空氣分子作為介質，在空間傳遞能量。

## 繩波

繩波透過繩子作為介質，繩子各質點來回振盪以傳遞能量。

## 水波

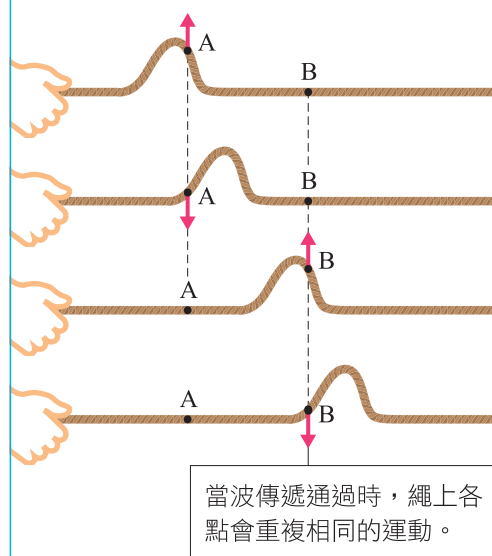
水波在水與空氣交界處傳遞，藉由水分子與空氣分子的集體運動傳遞能量。



產生一個脈衝波。當脈衝波通過繩上 A 點時，繩上的質點會重複當初手甩繩的運動，先向上再向下，待脈衝波通過後，即恢復原先靜止的平衡位置。當脈衝波通過繩上 B 點時，該處的質點也會重複相同的上下運動。

在繩波凸起處通過時，繩上質點因上下運動而帶有動能，由於繩子長度被拉長，繩上各個質點間也具有彈性能。將動能與位能加總，即可得到繩上質點的能量。因此隨著脈衝波向前傳遞時，能量也從波源處（手持繩處）傳遞到繩子的另一端。總結來說，藉由介質中質點的集體運動，波動可以將能量由介質中某處，以波速傳遞到另一處。

圖 1-5 波動僅傳遞能量



## 2 電磁波不需介質傳播

### 無線電波

無線電波可將訊號從地面傳至太空中的衛星，應用於廣播與通訊。

### 可見光

太陽產生的可見光、紅外線等各種電磁波，不須透過介質，也可傳遞至地球。

一般討論波的傳遞時，多強調能量會隨著波動傳遞。但自然界也有其他類似波動的現象，如章首所提的波浪舞，雖然不會傳遞能量，與繩波、聲波等力學波有本質上的不同，但卻可以利用波動的方式傳遞資訊。在章首小智提到的「波浪舞」，就是傳遞資訊的波動，如圖 1-6。首先，棒球場中波浪舞的傳遞需要介質嗎？需要，介質就是場內滿滿的熱情觀眾，故波浪舞也可視為廣義的力學波。當波浪舞通過小智時，會有能量傳到他身上嗎？並不會，而是波浪舞的訊息傳來，讓參與者觀察鄰近觀眾準備坐下時，快速站起後再坐下。如此一來，資訊即可隨著波浪舞，在棒球場的觀眾間傳遞。

在 2015 年 5 月，超過一萬多名球迷擠進臺中洲際棒球場，在中場休息玩起波浪舞，持續了 9 分 41 秒，打破之前荷蘭足球賽所保持的世界紀錄，是不是相當有趣呢？在觀眾玩波浪舞的過程中，並沒有能量隨之傳遞，只有誰該適時站立的「資訊」隨著「波浪舞」傳遞。又如兩個人利用手機視訊時，藉由發送與接收電磁波，會有些許能量的傳遞。但主要的重點不是能量的傳遞，而是交換大量的資訊（影像或聲音），可見我們可以利用波動來傳遞資訊。雖然「資訊」沒有質量又抽象，但是此類的資訊傳遞是現代科技不可或缺的一環。

▼ 圖 1-6 波浪舞過程未傳遞能量，只有資訊隨之傳遞。

### 三 橫波與縱波

力學波根據介質振動與波行進的方向，可以分成**橫波**（transverse wave）與**縱波**（longitudinal wave）。若介質振動方向與波傳遞方向垂直，此類波動稱為橫波；若介質振動方向與波動傳遞方向平行，則稱為縱波。

以圖 1-7 中的彈簧波為例，當手上下擺動後，可以產生一小段起伏向前傳遞，由於彈簧的質點作上下運動，與波動前進的方向垂直，故為橫波。但若是用手前後推拉彈簧，如圖 1-8，則可產生一小段疏密不均勻處向前傳遞，此時彈簧的質點作前後運動，與波動前進的方向平行，故為縱波。





依照相同的方式分析，之前提及的繩波為橫波，而在空氣中傳播的聲波則為縱波。如圖 1-9，雖然無法直接觀察到空氣分子的振動，但當聲波向前傳遞時，空氣分子亦隨之前後振動，產生疏密相間的區間，與彈簧上的縱波類似。最有趣的是水波，當波動在水面傳遞時，水面上的分子作圓周運動，如圖 1-10，因此水波既非橫波，也不是縱波。



## KEY

力學波分為兩類：

橫波（高低波）：介質振動方向與波傳遞方向垂直者，例如繩波。

縱波（疏密波）：介質振動方向與波傳遞方向平行者，例如在空氣中傳遞的聲波。

圖 1-7 橫波

用手上下晃動彈簧，可產生向右傳遞的橫波。

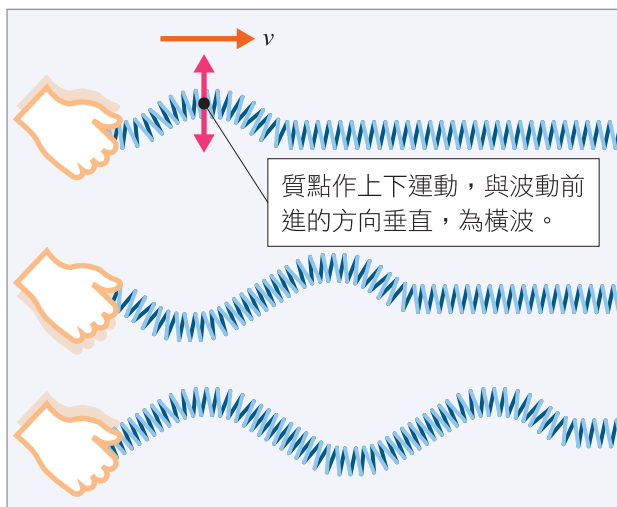


圖 1-8 縱波

用手前後推動彈簧，可產生向右傳遞的縱波。

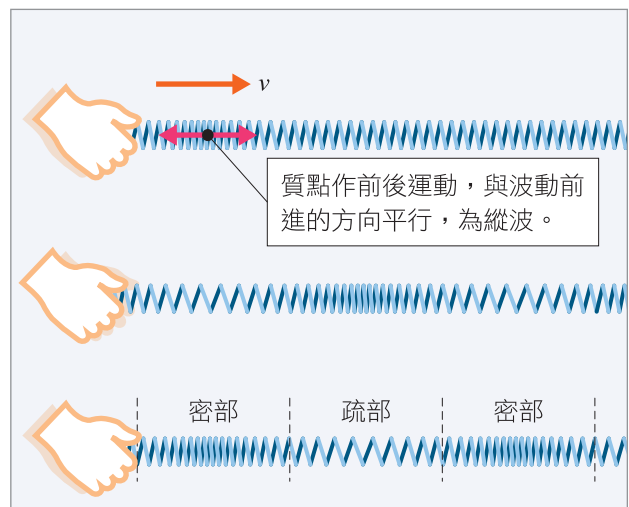


圖 1-9 空氣中的聲波為縱波

聲波傳遞時，會使空氣分子呈現疏、密分布，類似彈簧上傳遞的縱波。

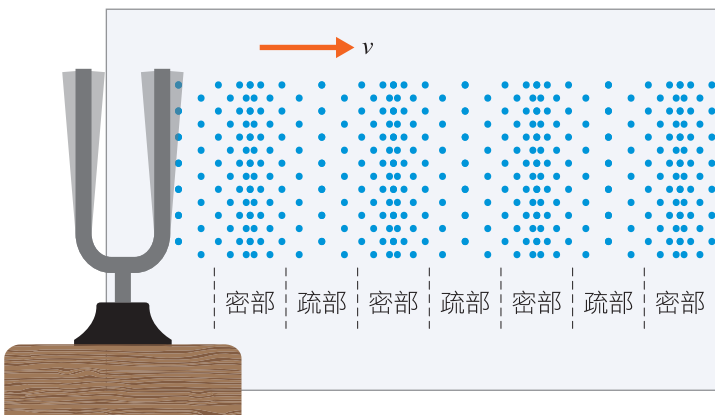
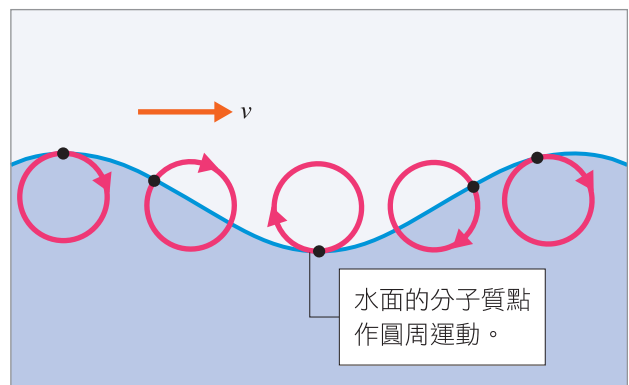


圖 1-10 水波的介質作圓周運動

水波傳遞時，水面的分子質點作圓周運動，故非橫波也不是縱波。



## 範例 1-2

## 波的傳遞

地震時會同時產生 P 波與 S 波，P 波是縱波、S 波是橫波，若某處的 P 波波速為 6.5 km/s，S 波的波速為 4.0 km/s。一觀測站在某次大地震中測得 P 波抵達後的 10 s，S 波也抵達，若這兩種波沿著同一直線路徑，由震源傳到觀測站，則震源與觀測站的距離為多少 km？

## 分析

利用時間 =  $\frac{\text{距離}}{\text{速率}}$ ，再列出兩波傳至觀測站的時間差。

## 解答

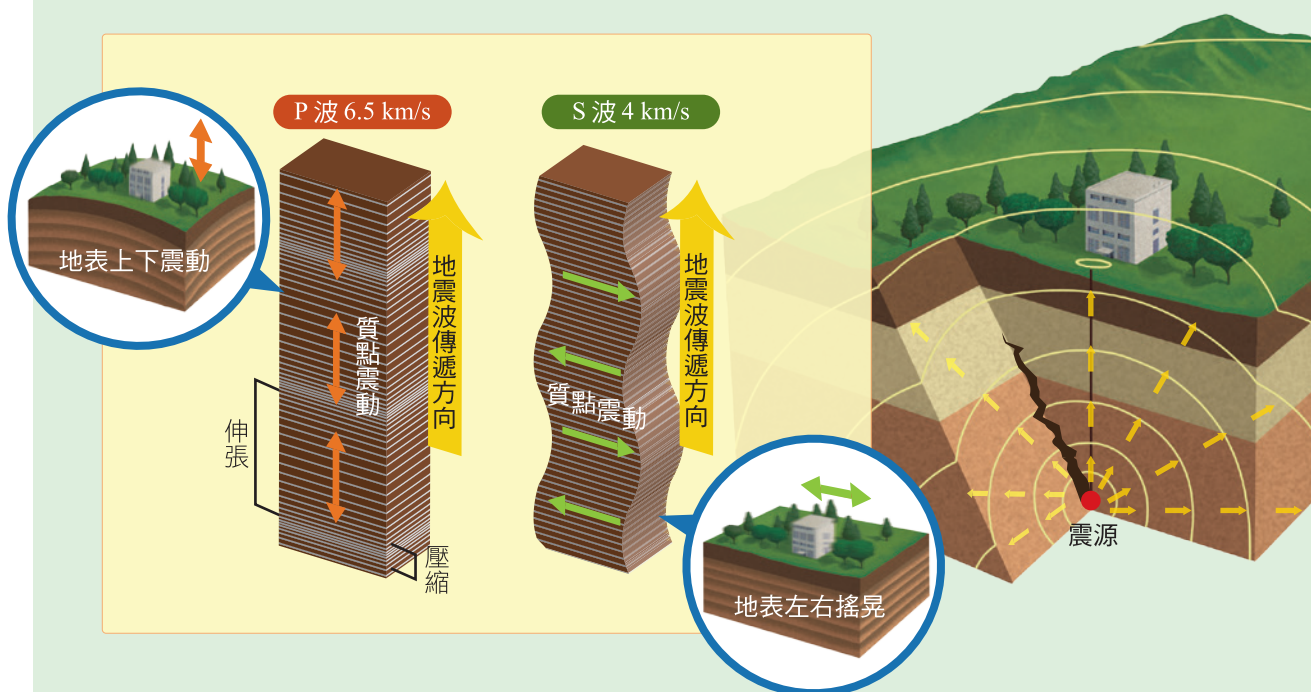
設震源與觀測站的距離為  $d$  km，根據題意，S 波傳遞的時間比 P 波傳遞時間多 10 s

$$\Rightarrow \frac{d}{4} - \frac{d}{6.5} = 10 \text{ s} \Rightarrow d = 104 \text{ km}。$$



## 知識延長線

當地震發生時，位於地底的震源會產生 P 波（Primary wave）與 S 波（Secondary wave）。如圖所示，由震源附近地殼岩層形變的方向，可看出 P 波為縱波，會造成地面上下震動，而 S 波則為橫波，會讓地面產生橫向的運動，破壞力比 P 波強。與破壞力較大的 S 波相比，P 波的傳播速度較快，一旦偵測到較強的 P 波時，我們可以善用此一時間差，發出地震警告呢！



## 1-2 週期波

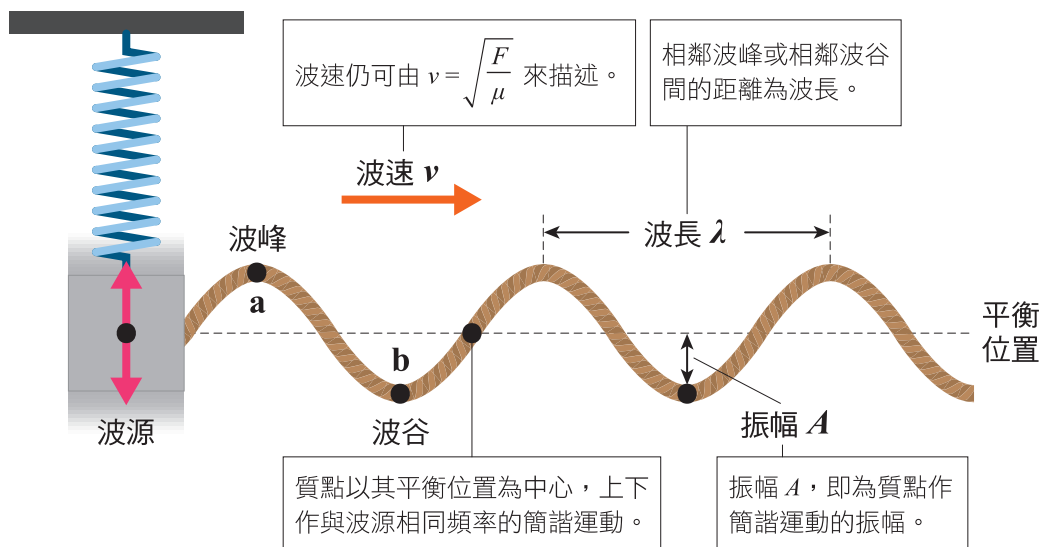
若週期性上下甩動繩子產生波動，由於波源處作週期運動，繩上各處的質點也會重複同樣的週期運動，這類波動稱為**週期波**（periodic wave）。如圖 1-11 所示，若以簡諧運動甩動一無限長的繩子一端，此時產生的週期波恰好是**正弦波**（sinusoidal wave），也就是說，在任一瞬間拍照，繩上的波形呈現正弦（或餘弦）的形狀。觀察某一時刻所拍下的波形，繩上 a 點向上位移最大，稱為波峰，而繩上 b 點向下位移最大，稱為波谷；相鄰波峰（或相鄰波谷）間的距離，則稱為**波長**（wavelength） $\lambda$ 。

波形不會影響波動傳遞的速度，因此週期波的波速仍可由 (1.1) 式描述。從微觀尺度分析正弦波，繩上每個質點以其平衡位置為中心，上下作相同頻率的簡諧運動。正弦波的**週期**（period） $T$ ，即為質點作簡諧運動的週期，而正弦波的**振幅**（amplitude） $A$ ，即為波源作簡諧運動的振幅。單位時間內的振動次數稱為**頻率**（frequency） $f$ ，恰為週期的倒數，表示為

$$1.2 \quad f = \frac{1}{T}$$

其單位為 1/s，或稱為赫茲（Hz）。

▼ 圖 1-11 週期波 利用簡諧運動甩動繩子，即可產生正弦波。





分析繩上質點的運動，即可以發現正弦波的波長，也恰好是波形經過一個週期後所前進的距離。如圖 1-12 所示，P 點原先處於平衡位置，在經過一個週期的振動後，P 點又回到原先的平衡位置。但經過一個週期  $T$  之後，正弦波的波形恰好向前移動了一個波長  $\lambda$  的距離。

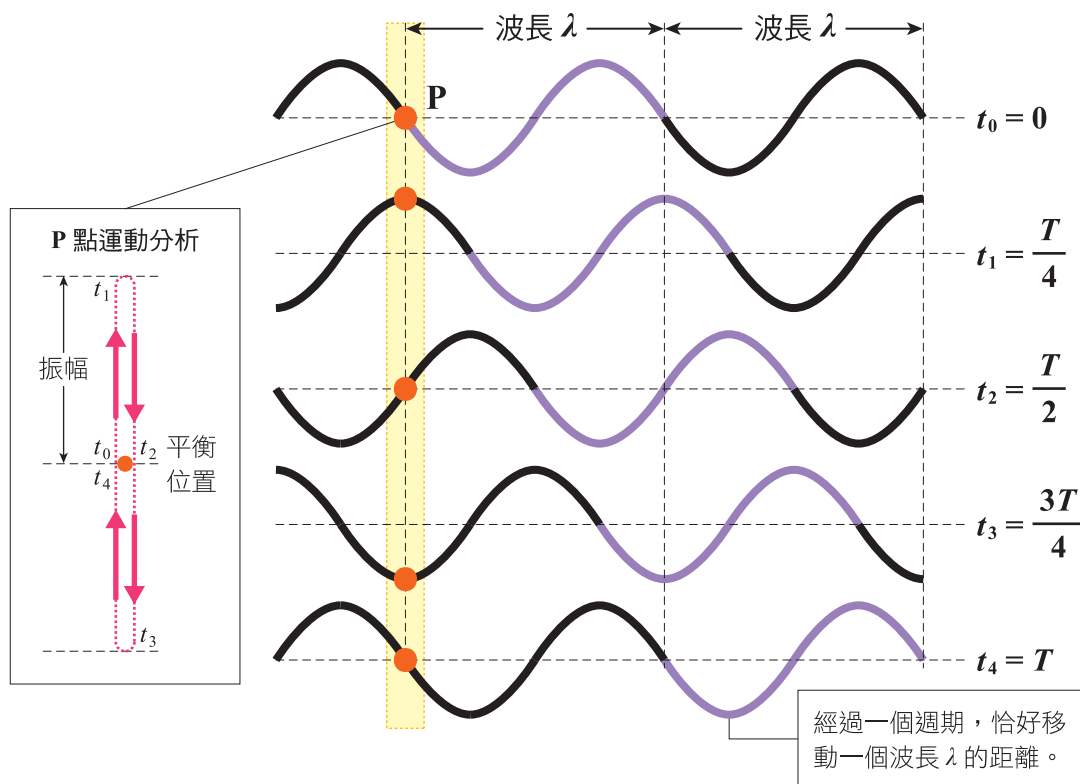
藉由這樣的運動分析（kinematic analysis），可以發現波速、波長與頻率（週期）間的關係式為

$$1.3 \quad v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

上式雖然是由正弦波推導而來，但適用於所有的週期波。而並非所有波動皆為週期波，對於單一脈衝波來說，無法定義週期（頻率），故 (1.3) 式自然不會成立。簡單來說，(1.3) 式僅適用於週期波，描述波速、波長與頻率間的關係；但 (1.1) 式則適用所有的繩波，此式點出介質的物理特性與波速的關係，兩者不可混淆。

圖 1-12 週期波之週期與波長的關係

向右行進的正弦波，經過一個週期後，恰好移動了一個波長的距離。



週期波的波速  $v$ 、波長  $\lambda$  與頻率  $f$ 、週期  $T$  間的關係式為

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda。$$



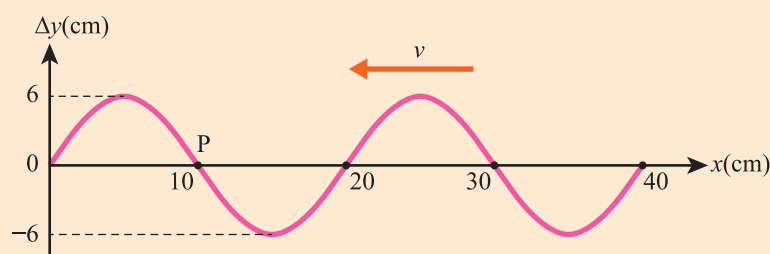
### 想一想

在彈性繩上有一頻率  $f$ 、波長  $\lambda$  的週期波，在繩張力  $F$  和線密度  $\mu$  都不改變的情況下，將週期波的頻率改為  $2f$ ，則波長將變為原來的幾倍？

### 範例 1-3

### 週期波

如圖所示為某一週期波向左傳播時，其質點振動位移  $\Delta y$  與位置  $x$  的關係圖，已知 P 點的振動頻率為  $1.25 \text{ Hz}$ ，則：



- (1) 此週期波的速度量值為多少  $\text{m/s}$ ？
- (2) 圖中波形再經過  $1 \text{ s}$  後，P 點的位移為多少  $\text{cm}$ ？

#### 分析

利用週期波的波速、波長與頻率間的關係式： $v = f\lambda$ 。

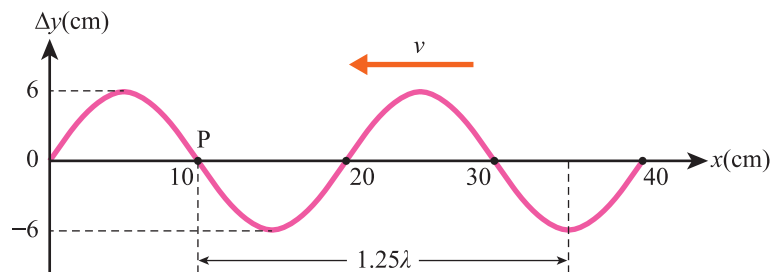
#### 解答

- (1) 由題圖可知，波長  $\lambda = 20 \text{ cm} = 0.2 \text{ m} \Rightarrow v = f\lambda = 1.25 \times 0.2 = 0.25 \text{ m/s}$ 。
- (2) 由  $f = 1.25 \text{ Hz} = 1.25 \text{ s}^{-1}$  知，經歷  $1 \text{ s}$  波形向左前進  $1.25$  個波長，如圖所示，此時 P 點位置為波谷處，故其位移為  $-6 \text{ cm}$ 。

【另解】

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1.25} = \frac{4}{5} \text{ s} \Rightarrow \frac{1}{\frac{4}{5}} = \frac{5}{4}, \text{ 即 } 1 \text{ s 內經歷了 } \frac{5}{4} \text{ 個週期}$$

$\Rightarrow$  質點 P 先下後上移動  $5$  個振幅的長度至波谷，故位移為  $-6 \text{ cm}$ 。



波動在介質傳遞時，會保持原來的波形，但若是波動行經不同介質時，會發生什麼有趣的現象呢？為分析方便起見，讓我們以繩波為例，先討論繩波傳遞到端點時，會發生什麼現象，再進一步分析將輕繩（線密度較小）與重繩（線密度較大）連結後，會如何影響波動的傳遞。

### 一 固定端與自由端

當繩波傳遞到端點時，會產生一反向行進的波，這現象即是繩波的**反射**（reflection）。反射所產生的波形，會因為繩子端點是否被固定而有所不同。

如圖 1-13 所示，當繩子末端固定在很重的物體上（如牆壁），此時端點的位置固定不動，稱為**固定端**（fixed end）。向右前進的繩波碰到固定端後，會產生波形上下顛倒、左右相反，且傳遞方向相反的反射波。這是因為繩波反射時，根據牛頓第三運動定律，牆壁會對繩子施加相反的力，因此反射波的波形上下顛倒。而由於反射波與入射波的前進方向相反，因此波形會左右相反。

若繩子的端點以質量非常輕的小環套在光滑的直桿上，如圖 1-14 所示，則所受合力的鉛直分量幾乎為零，稱為**自由端**（free end）。向右前進的繩波抵達自由端後，會產生波形左右相反、上下不顛倒，但傳遞方向相反的反射波。這是因為小環的質量極輕，其運動與原先波源產生此脈衝波的運動相同，故產生反射波時，其波形並不會上下顛倒。同樣地，由於反射波與入射波的前進方向相反，因此波形還是會左右相反。總結實驗上的觀察結果，固定端與自由端的差別，就在於反射波的波形是否上下顛倒。

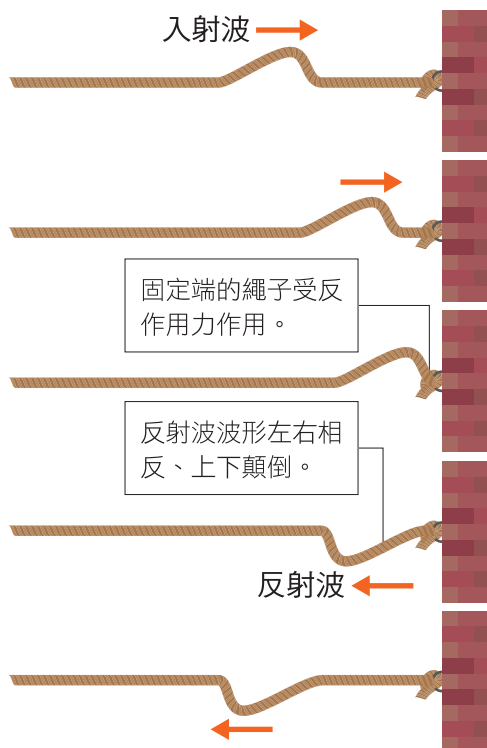


#### KEY

繩波經固定端反射  $\Rightarrow$  波形上下顛倒；繩波經自由端反射  $\Rightarrow$  波形上下不顛倒。

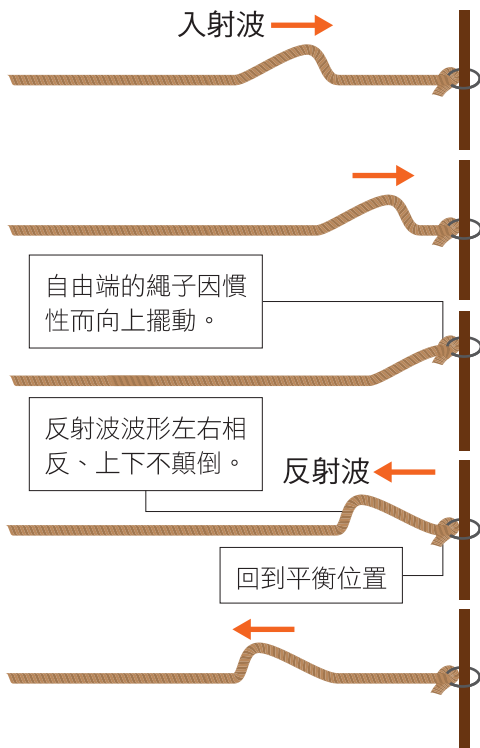
▼ 圖 1-13 固定端的反射

繩波經固定端反射後，反射波的波形上下顛倒。



▼ 圖 1-14 自由端的反射

繩波經自由端反射後，反射波的波形左右相反、上下不顛倒。

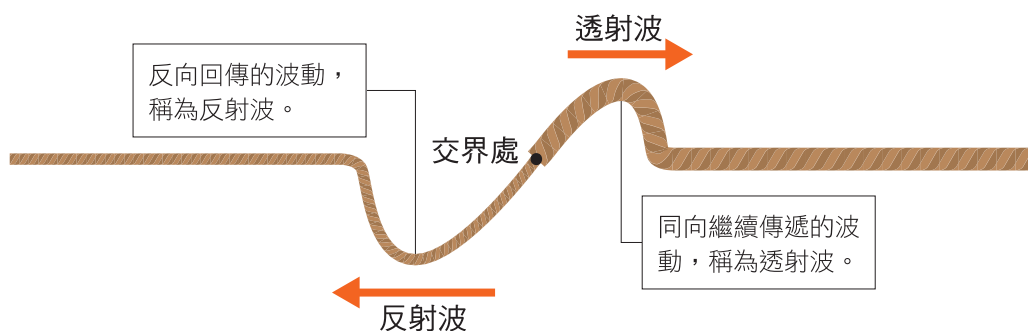


## 二 交界處的反射與透射

將粗細不同的繩子連接，當繩波通過交界處時，會產生反射與透射的現象。如圖 1-15 所示，當向右前進的脈衝波由輕繩傳遞到重繩，在交界處產生向左端輕繩反傳的波動，此現象稱為**反射**；而在右端的重繩，則可觀察到透過交界處繼續向右傳遞的波動，此現象稱為**透射**（transmission）。由此可知，波動行經不同介質交界處，會同時產生反射與透射的現象。

▼ 圖 1-15 交界處的反射與透射

當向右前進的脈衝波由輕繩傳遞到重繩，通過交界處時，會產生反射與透射的現象。





觀察圖 1-16，向右前進的繩波自輕繩（線密度較小）傳遞到重繩（線密度較大）時，在交界處產生波形上下顛倒、向左傳遞的反射波。除此之外，也會產生波形類似但振幅較小的透射波，繼續向右在重繩中傳遞。反射波上下顛倒並不難理解，因為對輕繩而言，重繩的角色好比固定端，故反射後的波形會上下顛倒。

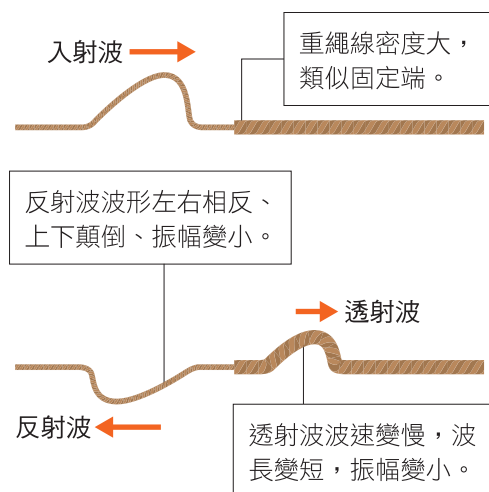
而透射波的波形，則與入射波類似。這是因為波傳遞至交界處時，輕繩會以相同的方式帶動重繩，產生波形類似的透射波。此外，當波由輕繩傳遞到重繩時，重繩會提供相當大的阻力。由於輕繩的甩動不容易影響重繩，故透射波的振幅較小。由於一部分能量穿透到重繩，在輕繩上的反射波能量會比入射波小，故反射波振幅會比入射波小。

而向右前進的繩波由重繩傳遞到輕繩時，在交界處也會發生類似的現象。如圖 1-17 所示，所產生的反射波與透射波，其波形皆與入射波類似，這是因為對重繩而言，輕繩猶如自由端，故反射後的波形並不會上下顛倒。同樣地，由於重繩以相同的方式帶動輕繩，故產生類似波形的透射波。

那振幅會如何變化呢？由於入射波由重繩抵達交界處時，輕繩提供的阻力很小，故重繩的甩動會對輕繩產生較大的影響，因此所產生的透射波振幅較大。由於一部分的能量穿透到輕繩，在重繩上的反射波振幅，仍然比入射波小。反射波與透射波的特性，如表 1-1 所列。

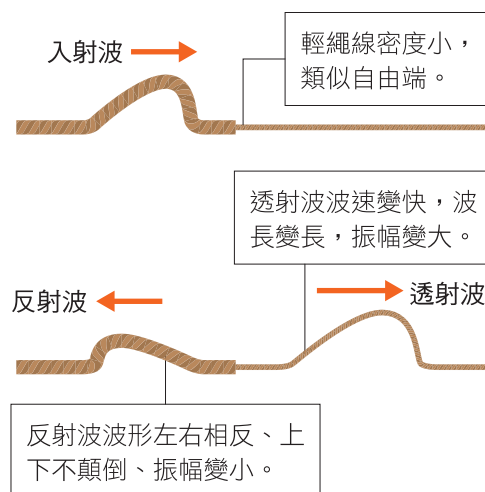
● 圖 1-16 波由輕繩傳遞到重繩

波由輕繩傳遞到重繩時，反射波上下顛倒，但透射波並不會顛倒。



● 圖 1-17 波由重繩傳遞到輕繩

波由重繩傳遞到輕繩時，反射波與透射波的波形皆不會上下顛倒。



▼ 表 1-1 反射波與透射波的特性。

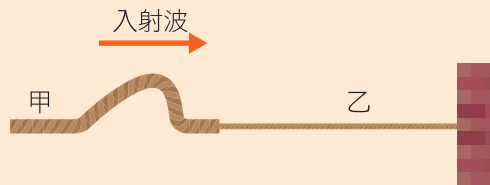
| 條件    | 反射波   |    | 透射波   |    |
|-------|-------|----|-------|----|
|       | 波形    | 振幅 | 波形    | 振幅 |
| 輕繩到重繩 | 上下顛倒  | 變小 | 上下不顛倒 | 變小 |
| 重繩到輕繩 | 上下不顛倒 | 變小 | 上下不顛倒 | 變大 |

### 範例 1-4

### 繩波的反射與透射

某脈衝波自甲繩左端向右行進，若甲繩右端連接一條線密度較小的乙繩，乙繩右端再連接牆壁，如圖所示。

- (1) 請繪出此脈衝波在甲繩和乙繩上傳遞時，各別第一次反射波的情況。
- (2) 脈衝波在左、右兩段繩子上傳遞的速率之大小關係為何？



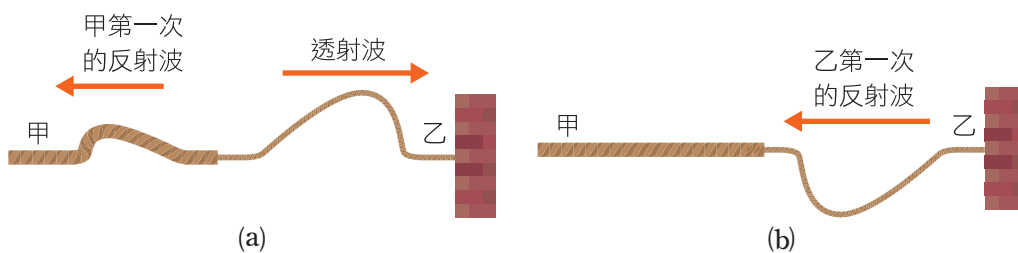
#### 分析

繩波由重繩傳至輕繩視為自由端反射，繩波由輕繩傳至牆壁為固定端反射。

#### 解答

- (1) ① 波由甲繩傳至線密度較小的乙繩，故甲繩上第一次反射波與入射波「上下不顛倒」、乙繩上透射波與入射波「上下不顛倒」。
  - ② 乙繩上透射波傳至牆壁為固定端反射，故乙繩上第一次的反射波與入射波「上下顛倒」。
- 綜合上述，甲繩和乙繩上傳遞時，各別第一次反射波的情況，分別如圖 (a)(b) 所示。

- (2) 兩繩串聯張力  $F$  必相等，由  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \propto \sqrt{\frac{1}{\mu}}$  可知，甲繩的波速小於乙繩的波速。



# 1-4

## 波的疊加原理與駐波

### 一 疊加原理

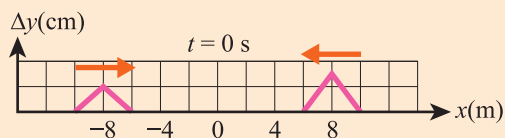
兩波相遇時，會因為波形重疊而產生干涉現象。若波的振動幅度不大時，在波形重疊的區域內，各個質點偏離平衡點的位移，可由兩波各自造成的位移相加而得，此即為波的**疊加原理**（superposition principle）。但當波的振動幅度太大時，兩波相遇的情形十分複雜，疊加原理並不適用。

如圖 1-18(1) 所示，在兩波波形重疊的區域，運用疊加原理將個別的位移相加，即可得到重疊時的位移。若兩波波形皆向上，疊加後的位移比個別波的位移大，稱為**建設性干涉**（constructive interference）。若兩波波形一上一下，疊加後的位移比個別波的位移小，稱為**破壞性干涉**（destructive interference），如圖 1-18(2) 所示。根據疊加原理，我們知道如何求得重疊區域的波形。除此之外，也了解兩獨立前進的波，在短暫地交會重疊後，會互相穿越，維持原先的波形與運動方向，宛如兩波從未相遇過，此為**波的獨立性**。

### 範例 1-5

### 兩波疊加

時間  $t = 0$  s 時，在一條拉緊的長繩上，有二個不等高的脈衝波分別向左及向右行進，如圖所示。已知繩波的波速為  $5$  m/s，請畫出在  $t = 1.4$  s 時，兩脈衝波在繩上的合成波之位置與波形。



#### 分析

先繪出  $t = 1.4$  s 時個別波的圖形，再根據疊加原理繪出合成波的圖形。

#### 解答

- (1)  $\Delta x = vt = 5 \times 1.4 = 7$  m  $\Rightarrow$  繪出兩個別波在  $t = 1.4$  s 的位置與波形，如圖 (a) 所示。
- (2) 依據波的疊加原理，繪出合成波的波形，如圖 (b) 所示。

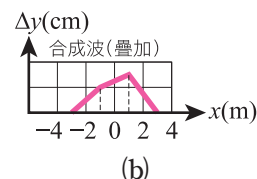
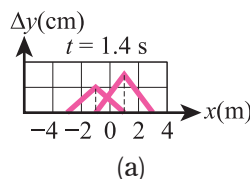
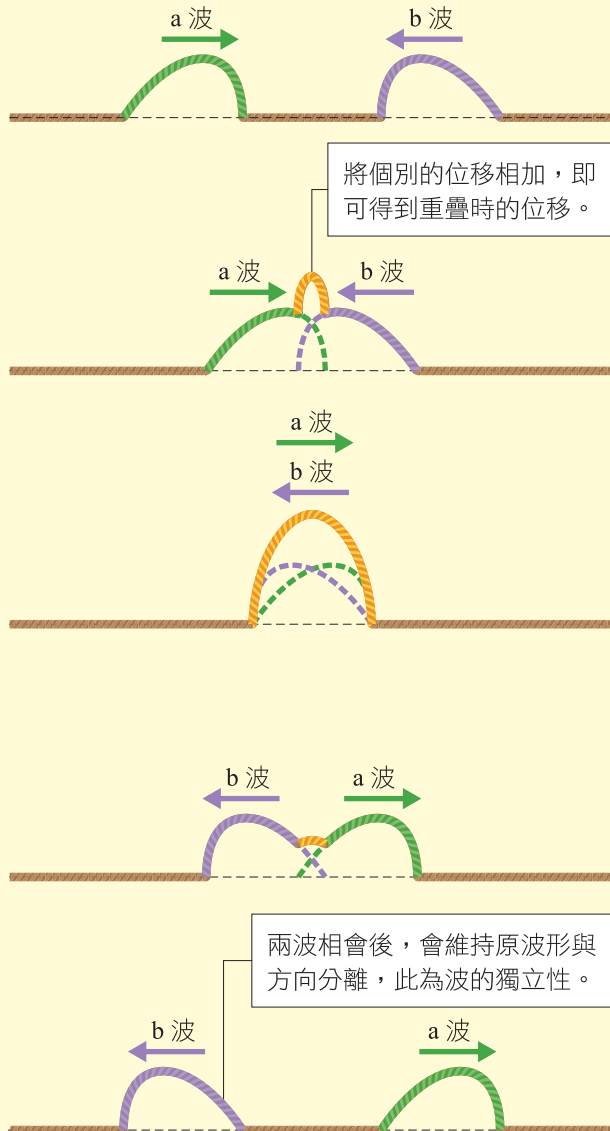


圖 1-18

## 波的疊加原理

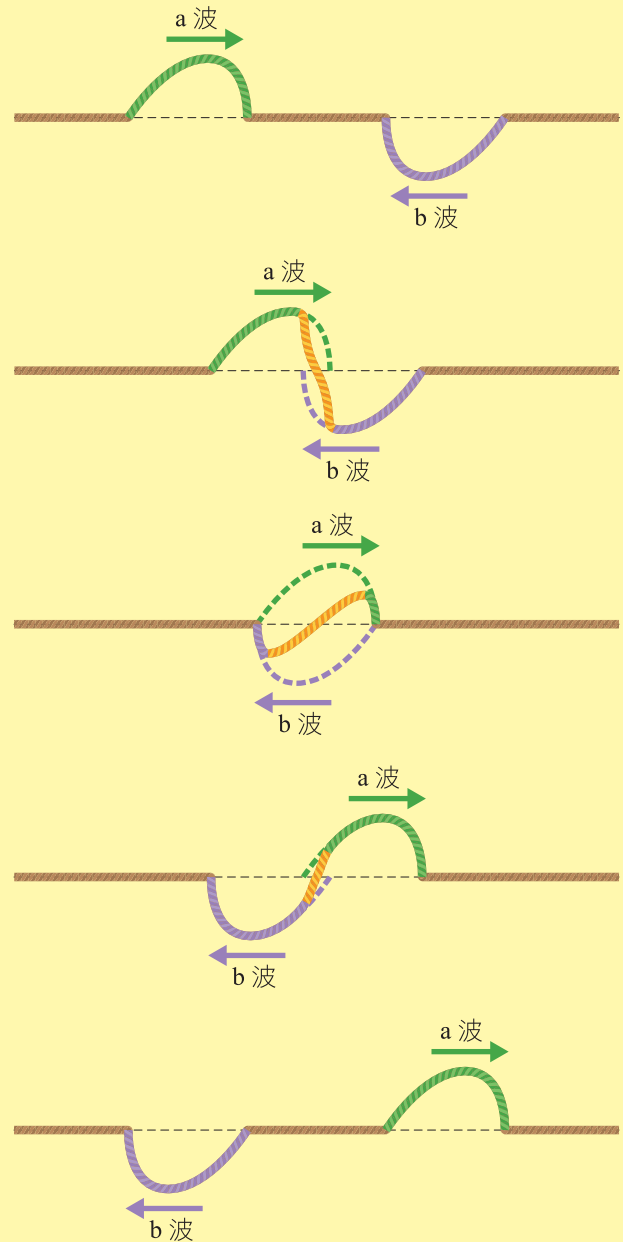
## 1 建設性干涉

波形都在平衡點上方，兩波相遇時會產生建設性干涉。



## 2 破壞性干涉

波形一上一下，兩波相遇時會產生破壞性干涉。



## KEY

疊加原理：兩波相遇重疊時，合成波質點的振動位移，等於各子波質點位移的「向量和」。重疊後的位移變大者，稱為建設性干涉；位移變小者，稱為破壞性干涉。



## 二 駐波的產生

將疊加原理運用到兩正弦波的重疊上，會得到相當有趣的現象。如圖 1-19(1) 所示，設想有兩個週期與振幅相同的正弦波，在  $t = 0$  時兩波完全重合，但分別向右與向左前進。為了方便分析起見，圖中將時間以  $\frac{T}{8}$  為單位，依時序畫出兩正弦波疊加的情形。舉例來說，在  $t = 0$  時兩波完全重合，疊加後的高度變成兩倍。而  $t = \frac{T}{4}$  時，兩波朝相反方向各自移動了  $\frac{\lambda}{4}$  的距離，此時兩波恰好上下相反，故疊加後的位移為零。乍看之下這結果並不合理，因為弦的位移為零，那能量豈不是憑空消失了？其實不然，此時波所帶有的能量，完全以動能的形式展現。等到  $t = \frac{T}{2}$  時，兩波又恰好完全重疊，但疊加後的波形與  $t = 0$  時上下顛倒。接著到

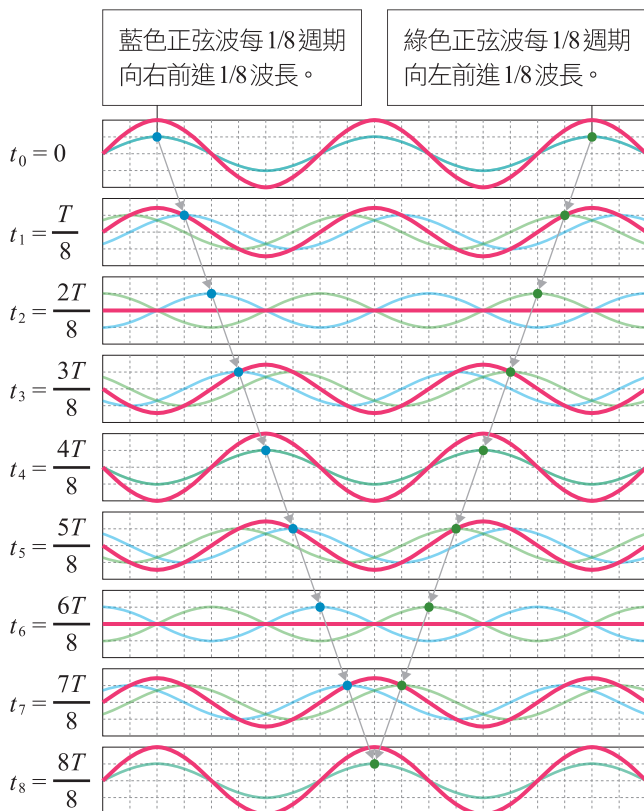
圖 1-19

### 駐波

#### 1

#### 駐波的原理

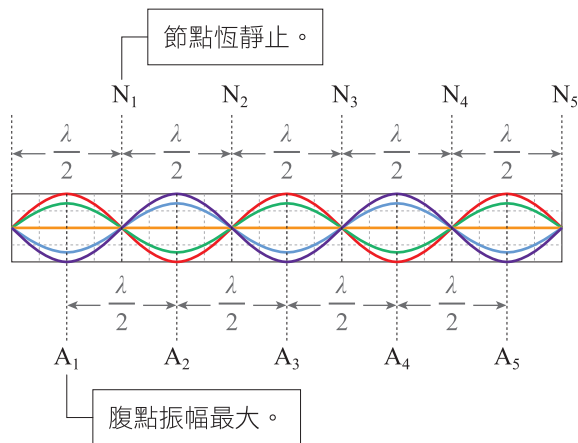
兩行進方向相反的藍、綠正弦波，若週期與振幅相同，重疊後的紅色合成波，即為駐波。



#### 2

#### 駐波的節點與腹點

圖為不同時刻的合成波波形，每隔半波長出現的  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  等位置，弦上質點的位移與速度在每一瞬間皆為零，稱為節點；在  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  等位置，質點振動的幅度最大，稱為腹點。



— 為  $t = 0, T$  的波形

— 為  $t = \frac{T}{8}, \frac{7T}{8}$  的波形； — 為  $t = \frac{2T}{8}, \frac{6T}{8}$  的波形

— 為  $t = \frac{3T}{8}, \frac{5T}{8}$  的波形； — 為  $t = \frac{4T}{8}$  的波形

了  $t = \frac{6T}{8}$  時，兩波又呈現上下相反，疊加後的位移為零。最後等到  $t = T$  時，兩波疊加後的結果與  $t = 0$  相同，如此週而復始。其他時刻的波形，皆可利用相同的分析，運用疊加原理求得。

由以上分析可知，每隔半波長出現的  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  等位置，弦上質點的位移與速度在每一瞬間皆為零，稱為**波節**（node）或節點。而在  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  等位置，質點振動的幅度最大，稱為**波腹**（antinode）或腹點。相鄰節點的距離皆為半個波長，而相鄰腹點的距離也是半個波長。將各個時刻的波形畫在一起，則可得到圖 1-19(2) 的結果，兩波重疊後的波形並不會行進，只在原地振動，故稱為**駐波**（standing wave）。駐波上的腹點振幅最大，而節點則保持靜止不動，其能量儲存於節點間的週期振動，並不會傳遞。

### 三 駐波的波長與頻率

接著對駐波作進一步的定量分析。先分析兩端固定、長度為  $L$  之彈性繩所產生的駐波，如圖 1-20 所示，當繩長是半波長的整數倍時，彈性繩的固定端恰好是節點所在，因此可產生穩定的駐波。故彈性繩長與波長的關係式為

$$1.4 \quad L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

藉由 (1.4) 式可解出形成駐波的波長為

$$1.5 \quad \lambda = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

利用週期波的關係式  $v = f\lambda$ ，以及波速的公式  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ ，可以求出駐波的頻率為

$$1.6 \quad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

當  $n = 1$  時，駐波的頻率最低，稱為**基頻**（fundamental frequency），亦稱為第一諧音；當  $n = 2$  時，駐波頻率為基頻的兩倍，稱為第二諧音，其餘以此類推。由上式可知，駐波的基頻為  $f = \frac{v}{2L}$ ，所對應的波長則為  $\lambda = 2L$ ，而所有諧音皆為基頻的整數倍。

#### KEY

兩個週期、波長與振幅相同的正弦波，分別以相反方向前進相遇，疊加後會形成「駐波」。駐波可將力學能儲存於介質上，不會對外傳遞。



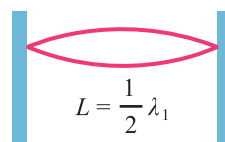
#### 想一想

駐波中，兩相鄰節點之間的距離，是否等於原入射正弦波的個別波長  $\lambda$ ？

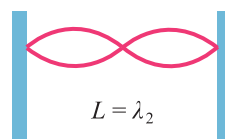
圖 1-20

兩固定端的駐波  
彈性繩在兩固定端間振盪，可形成不同頻率的駐波。

$n = 1$ ：基頻



$n = 2$ ：第二諧音



$n = 3$ ：第三諧音

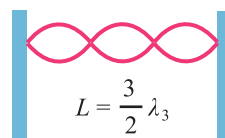
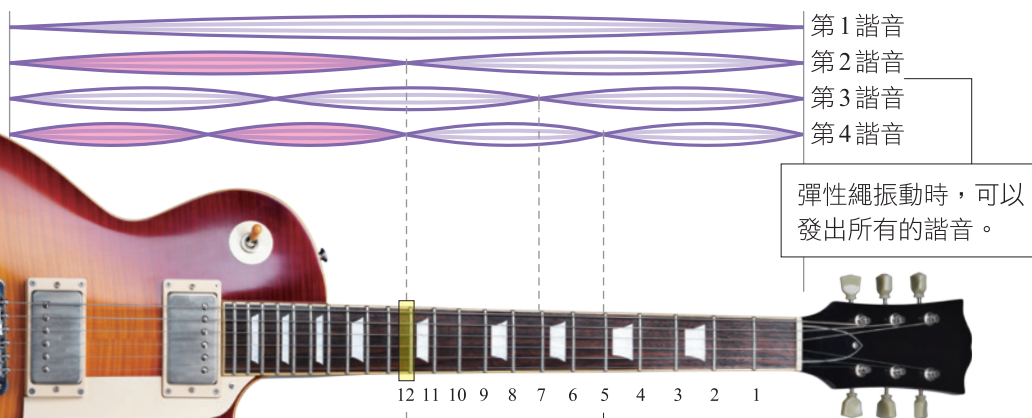


圖 1-21

吉他琴衍與諧音  
按壓不同位置的琴衍，可以改變琴弦振動長度，發出不同頻率的樂音。

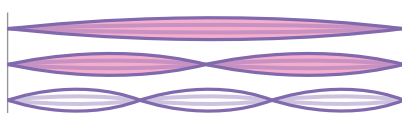
一般來說，當彈性繩受到擾動時，不單單是基頻，所有的諧音都會被激發。按壓吉他不同位置的琴衍，可以改變琴弦振動長度，發出不同頻率的樂音，如圖 1-21 所示。

### 1 空弦的諧音



第 12、7、5 琴衍的位置，恰好是空弦第 2、3、4 諧音的節點，但並非所有琴衍位置都有此特性。

### 2 第 12 琴衍的諧音



按壓第 12 琴衍時，吉他振動的弦長變短，此時所產生的諧音，與空弦振動的諧音有部分雷同，故聽起來有和諧感。

若彈性繩的一端改為自由端，如圖 1-22 所示，則彈性繩長為四分之一波長的奇數倍時，才會產生穩定的駐波。此時彈性繩長與波長的關係為

$$1.7 \quad L = m \frac{\lambda}{4} \quad (m = 1, 3, 5, \dots)$$

藉此可解出形成駐波的波長為

$$1.8 \quad \lambda = \frac{4L}{m} \quad (m = 1, 3, 5, \dots)$$

利用週期波的關係式  $v = f\lambda$ ，以及波速的公式  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ ，可以求出駐波的頻率為

$$1.9 \quad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{mv}{4L} = \frac{m}{4L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (m = 1, 3, 5, \dots)$$

當  $m = 1$  時，駐波的頻率  $f = \frac{v}{4L}$  為基頻，又稱為第一諧音，所對應的波長則為  $\lambda = 4L$ ；當  $m = 3$  時，駐波頻率為基頻的三倍，稱為第三諧音，其餘以此類推。此時須特別注意，駐波的頻率皆為基頻的奇數倍，因此僅有奇數倍的諧音，並沒有偶數倍的諧音。在第二章分析樂器發聲的原理時，會有更詳盡的介紹。



## KEY

在彈性繩上，特定頻率的波才能形成駐波，計算頻率時：

1. 將固定端視為節點、自由端視為腹點。
2. 寫出兩端之間距離  $L$  與波長  $\lambda$  的倍數關係。
3. 將  $\lambda$  代入  $f = \frac{v}{\lambda}$ ，整理得到駐波頻率  $f$  的通式。

## 範例 1-6

## 弦上駐波

有一條兩端固定的弦，弦上張力為  $F$ ，其振動第 4 諧音之頻率為 600 Hz，試問：

- (1) 此弦的第 5 諧音頻率為多少 Hz？
- (2) 若此弦的張力增為  $4F$  時，則第 5 諧音的頻率變為多少 Hz？
- (3) 若此弦的張力保持為  $F$ ，但一端改為自由端，則第 5 諧音頻率為多少 Hz？

## 分析

兩端固定的弦上產生駐波時， $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )。

## 解答

$$(1) \frac{f_{5\text{諧}}}{f_{4\text{諧}}} = \frac{\frac{5v}{2L}}{\frac{4v}{2L}} = \frac{5}{4} \Rightarrow f_{5\text{諧}} = \frac{5}{4} \times f_{4\text{諧}} = \frac{5}{4} \times 600 = 750 \text{ Hz}。$$

$$(2) f = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \propto \sqrt{F} \Rightarrow \sqrt{4} = 2 \text{ 倍} \Rightarrow f_{5\text{諧}}' = 2f_{5\text{諧}} = 2 \times 750 = 1500 \text{ Hz}。$$

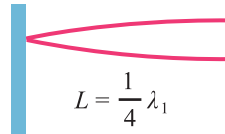
$$(3) \frac{f_{5\text{諧}}(\text{一端自由})}{f_{5\text{諧}}(\text{兩端固定})} = \frac{\frac{5v}{4L}}{\frac{5v}{2L}} = \frac{1}{2} \Rightarrow f_{5\text{諧}}(\text{一端自由}) = \frac{1}{2} \times 750 = 375 \text{ Hz}。$$

圖 1-22

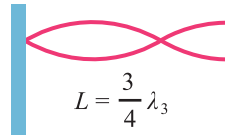
固定端與自由端間的駐波

彈性繩在固定端與自由端間振盪，所形成不同頻率的駐波，與兩固定端的情形不同。

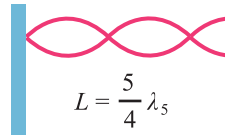
$m = 1$ ：基頻



$m = 3$ ：第三諧音



$m = 5$ ：第五諧音



## 想一想

兩端固定的彈性繩（弦）上產生駐波時，第三諧音的頻率是基頻的幾倍？

# 1-5 惠更斯原理

## KEY

惠更斯原理是波動學中重要的基本理論，可解釋各種波動的直進、反射、折射、干涉、繞射等現象。



## 想一想

如何以惠更斯原理來解釋成語中「隔牆有耳」的聲音繞射現象？

描述一維的繩波時，可將整個波形畫出，清楚地了解波的傳遞。但對於二維或三維空間中的波，若將每一點的運動狀態畫出，反因過於繁雜而不容易理解。因此我們往往只畫出**波前**（wave front），藉此了解波如何傳遞。什麼是波前呢？介質中各點若振動情形相同稱為同相，將相鄰同相各點相連，即為波前。如二維的直線波，其波前為同相運動各點的連線，也就是一系列的平行直線（圖 1-23(1)）；而二維的圓形波，其波前則為一系列的同心圓（圖 1-23(2)）；在三維的波動中，波前則為同相運動各點所組成的面。

惠更斯（Christiaan Huygens，1629-1695，荷蘭人）提出波前如何移動的原理：

1. 當波前進時，可將波前上的每一點視為新的點波源，各自發出圓形或球形的**子波**（wavelet）。
2. 與這些子波相切的曲線或曲面，稱為**包絡線**或**包絡面**（envelope），即為新的波前。

重複上述步驟，即可得知波前如何隨著時間傳遞，稱為**惠更斯原理**（Huygens' Principle）。

此處借助簡單的幾何方法，由某一時刻的波前，即可求出下一瞬間波前的形狀與位置，以二維直線波為例，如圖 1-23(3) 所示，將原先波前上的每一點，視為新的點波源，畫出所發出的子波，並求其包絡線，即可得到下一瞬間的波前。新波前是與原波前平行的直線，以波速沿傳遞方向前進。同理，根據惠更斯原理，圓形波的傳遞，亦可用一系列的同心圓來描述。運用惠更斯原理解釋三維的波動時，只要把圓形子波改為球形子波，而波前則為子波的包絡面，其餘步驟相同。

惠更斯原理除了可以解釋波的傳遞外，也可以解釋波動在界面的反射與折射。在第四章的物理光學中，我們更可以利用惠更斯原理，來解釋光通過雙狹縫與單狹縫時，所產生的干涉與繞射現象。

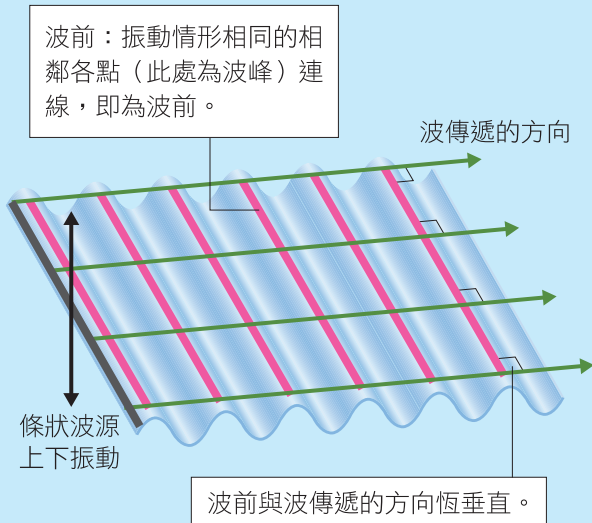


圖 1-23

## 水波的波前

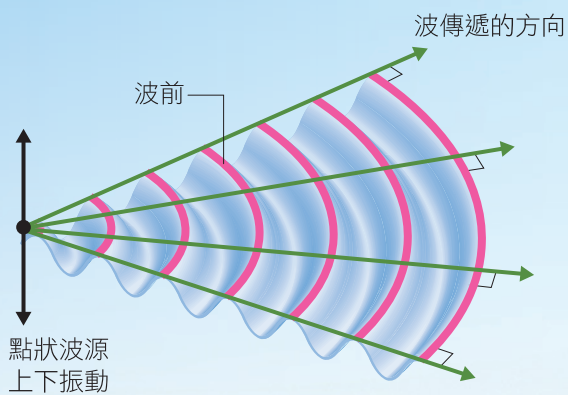
## 1 直線波的波前

二維的直線波，其波前為一系列的平行直線。



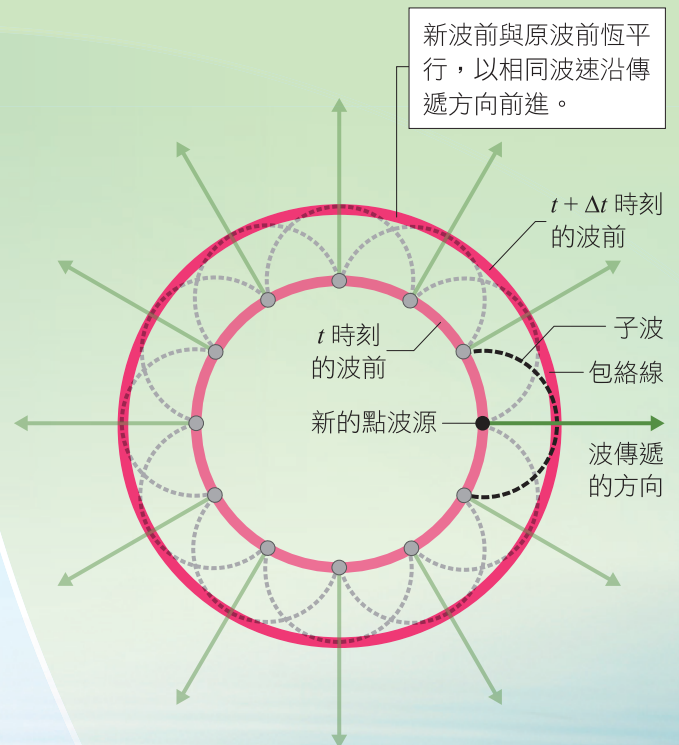
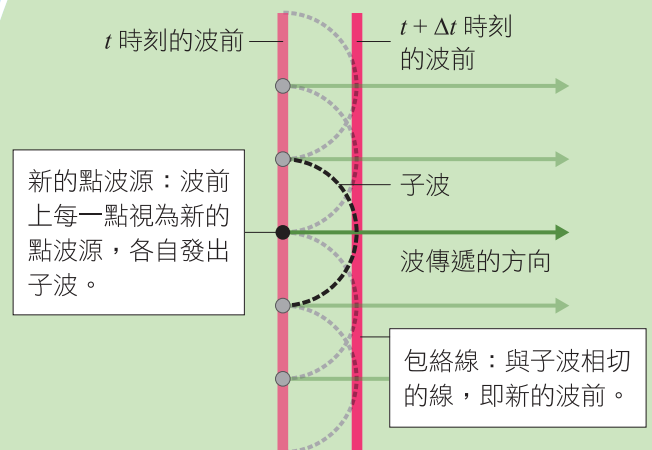
## 2 圓形波的波前

二維的圓形波，其波前為一系列的同心圓。



## 3 以惠更斯原理解釋波前

利用惠更斯原理，可以推得直線波與圓形波如何傳遞前進。



# 1-6 水波

## 一 水波槽簡介

繩波通過粗、細繩相接的交界處時，會產生部分反射、部分透射的情形，水波也有類似的現象，當水波遇到障礙物，或是進行到不同深度的界面時，也會發生反射與透射。由於水波穿越界面時，透射波的行進方向改變，故一般稱為折射波，以下描述時皆採用折射一詞。利用圖 1-24 中**水波槽**（ripple tank）的實驗裝置，可以將水波傳遞的情形視覺化，便於理解與分析。

水波槽上方的燈光，經水面投射而抵達槽下的白紙或屏幕，當水面靜止時，白紙上的亮度均勻，沒有明暗條紋。當以馬達驅動的長條形木桿輕觸水面，可產生直線週期波；若改裝上小球當成波源，則可產生圓形週期波。

水面產生波動時，凸起的波峰會聚光線，在紙上形成亮紋；而波谷的部分讓光線發散，呈現暗紋。在水波槽實驗中，亮紋的中心線就是波峰的連線，而暗紋的中心線，則是波谷的連線。由於亮、暗紋便於觀測，故波峰波前或波谷波前是我們最常使用的波前。

### KEY

水波槽藉由光線的投射，將水波的波峰、波谷分別以亮、暗條紋呈現在紙屏上，有助於水波現象的觀察。

### 小百科

若水波槽上方並非平行光源，而是點光源時，槽下仍會形成亮暗相間的紋路。但此時亮紋間的距離，如圖所示，並非真正水波的波長，而稱為視波長。須要經過換算後，方能從視波長回推實際的波長。

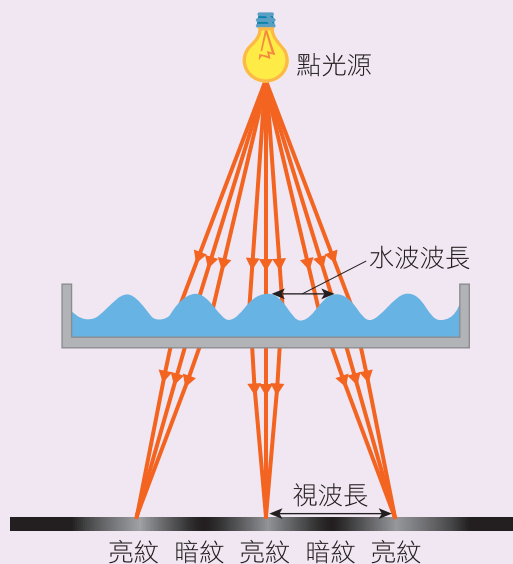
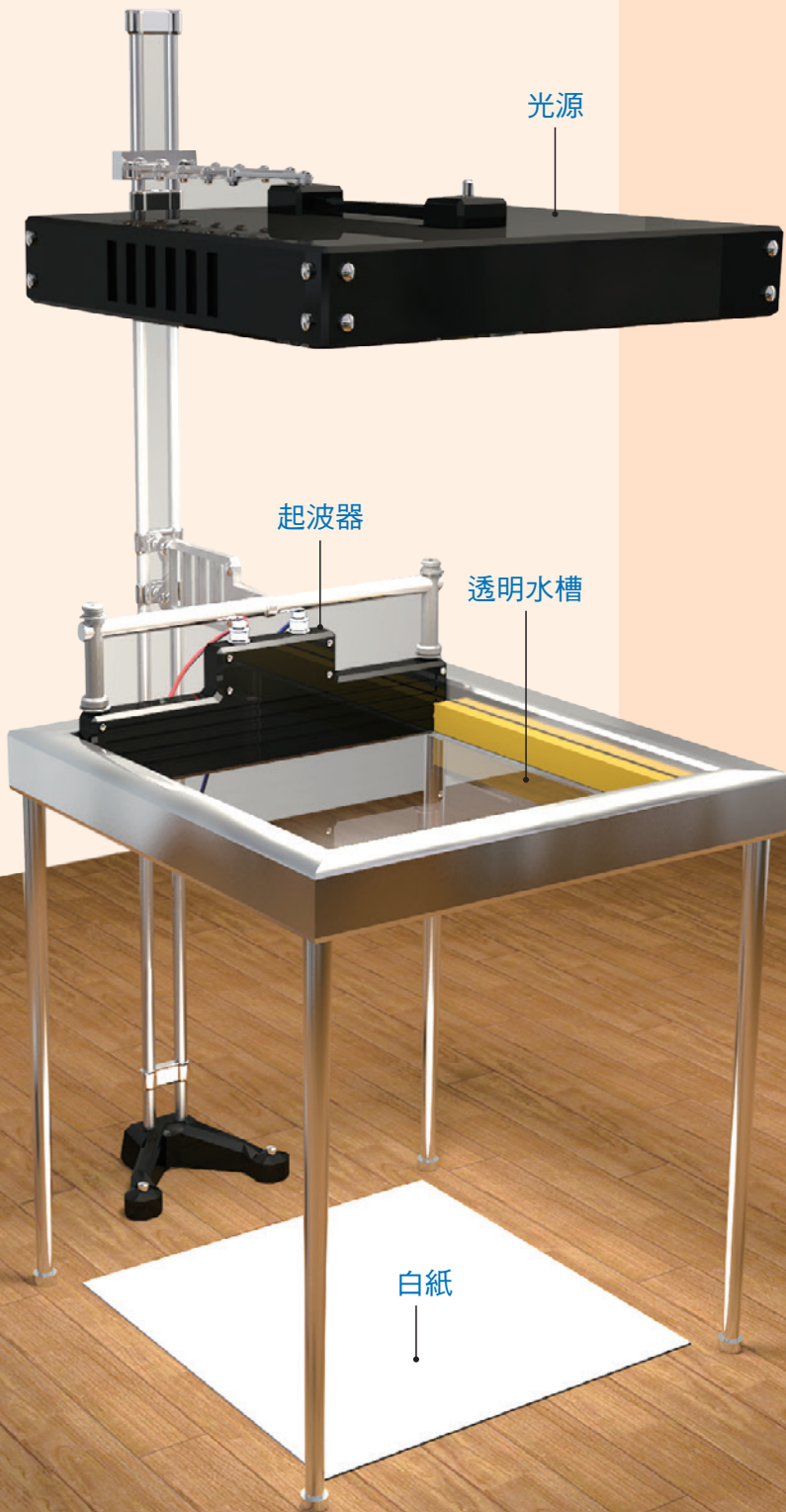


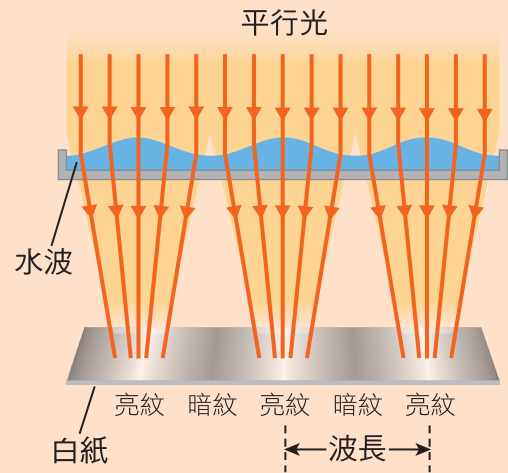
圖 1-24

## 水波槽實驗

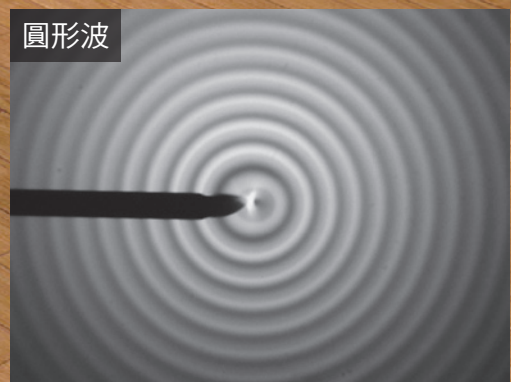
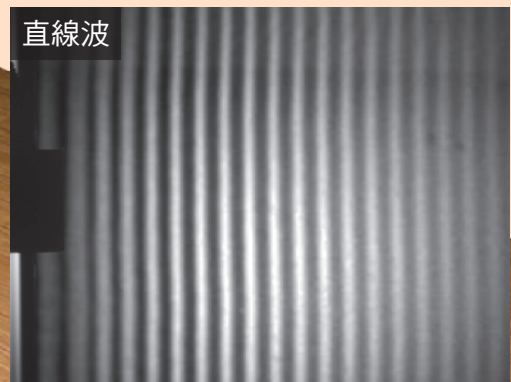


## 1 亮、暗紋的成因

水面產生波動時，凸起的波峰會聚光線，在紙上形成亮紋；而波谷的部分讓光線發散，呈現暗紋。



## 2 白紙上的成像







### 想一想

當一列直線水波波前與反射面的夾角為  $30^\circ$  時，此水波的入射角為多少度？

水波波前

$30^\circ$

反射面

## 二 水波的反射

在水波槽中置一直線形障礙物，如圖 1-25(1) 所示，入射的水波產生反射波，而改變行進方向，垂直障礙物界面的直線，稱為**法線** (normal)。入射波行進方向可由**入射線** (incident ray) 描述，與法線的夾角為**入射角** (incident angle)  $\theta_i$ ；而反射波行進方向由**反射線** (reflected ray) 描述，與法線的夾角為**反射角** (reflected angle)  $\theta_r$ 。由實驗得知水波在界面發生反射時，遵循以下的**反射定律** (law of reflection)：

1. 入射線、反射線與法線共平面，且入射線與反射線分別位於法線兩側。
2. 入射角等於反射角， $\theta_i = \theta_r$ 。

## 三 水波的折射

如圖 1-25(2) 所示，若在水波槽內放置一厚玻璃片，由於其上方的水深較淺，可以形成淺水區與深水區的界面。水波在淺水區的波速較小，而在深水區波速較大。由於頻率不因水深而有所改變，利用  $v = f\lambda$  的關係式，可推知淺水區的波長較短，而深水區的波長較長，與實驗觀察結果吻合。

由於不同介質的波速不同，入射波穿越界面後，會改變運動方向，稱為**折射** (refraction)。如圖 1-25(2) 所示，依據波的行進方向，可定義入射線與折射線，其與法線的夾角分別為**入射角**  $\theta_1$  與**折射角** (refracted angle)  $\theta_2$ 。由實驗得知水波在穿越界面發生折射時，遵循折射定律：

1. 入射線、折射線與法線共平面，且入射線與折射線分別位於法線兩側。
2. 入射角與折射角滿足關係式：

$$1.10 \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{定值}$$

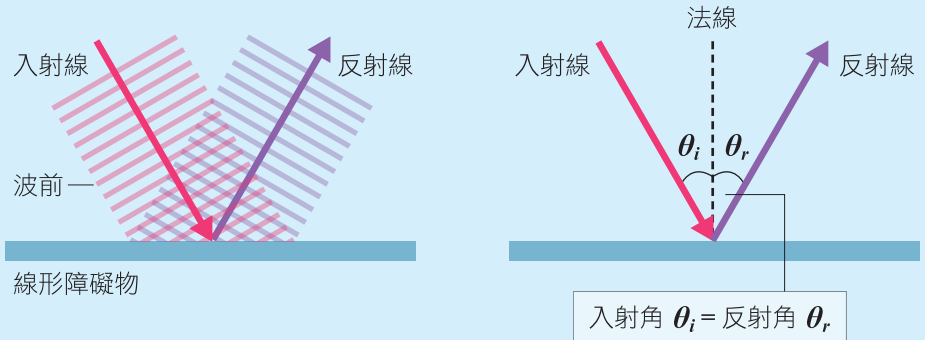
上式亦稱為**司乃耳定律** (Snell's law)。當水波由深水區斜向入射進入淺水區時，波速變慢。根據司乃耳定律，可求得折射角比入射角小，故折射線會偏向法線；反之，由淺水區進入深水區時，折射角比入射角大，折射線會偏離法線。

圖 1-25

## 水波的反射與折射

## 1 水波的反射

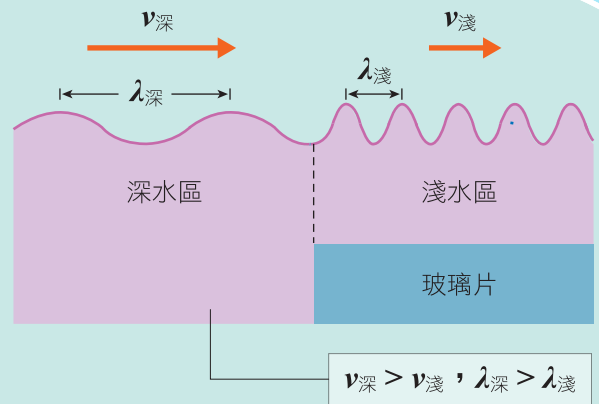
水波的反射遵守反射定律，入射角等於反射角。



## 2 水波的折射

## 水深與波長的关系

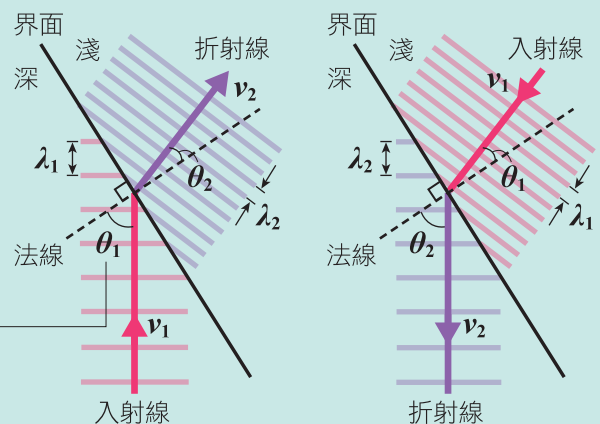
淺水區的水波波速小於深水區的波速，由於頻率不因水深而改變，依  $v = f\lambda$  可知淺水區的波長較短。



## 司乃耳定律

水波發生折射時，折射線偏向或偏離法線的情形遵守司乃耳定律。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{定值}$$







## 想一想

人站在海邊的沙灘，正面朝向大海時，看到的海浪通常都是迎面而來，請問為何海浪的波前總是平行海岸線呢？

我們可以利用惠更斯原理，分析水波折射的現象，如圖 1-26(1)，並推導出入射角與折射角滿足的關係式。如圖 1-26(2) 所示，當水波由深水區（介質 1）進入淺水區（介質 2）時，其頻率不變，因此波長會隨著波速變慢而變短。波前  $\overline{AB}$  的 A 點所發出的子波，以波速  $v_2$  在時距  $\Delta t$  後傳播至 D 點。而波前  $\overline{AB}$  的 B 點所發出的子波，以波速  $v_1$  在時距  $\Delta t$  後傳播至 C 點。故波前  $\overline{AB}$  在時距  $\Delta t$  後，傳播到波前  $\overline{DC}$ 。利用三角函數關係，可推得

$$1.11 \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\frac{\overline{BC}}{\overline{AC}}}{\frac{\overline{AD}}{\overline{AC}}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AD}} = \frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{f \lambda_1}{f \lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

由此可知，藉由子波在不同介質的傳播速度不同，可以推導出司乃耳定律。

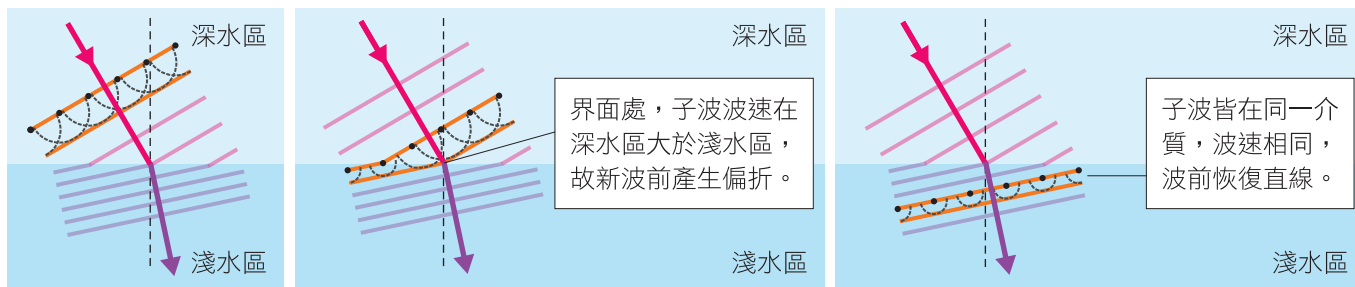
圖 1-26

## 惠更斯原理與司乃耳定律

## 1

## 定性分析

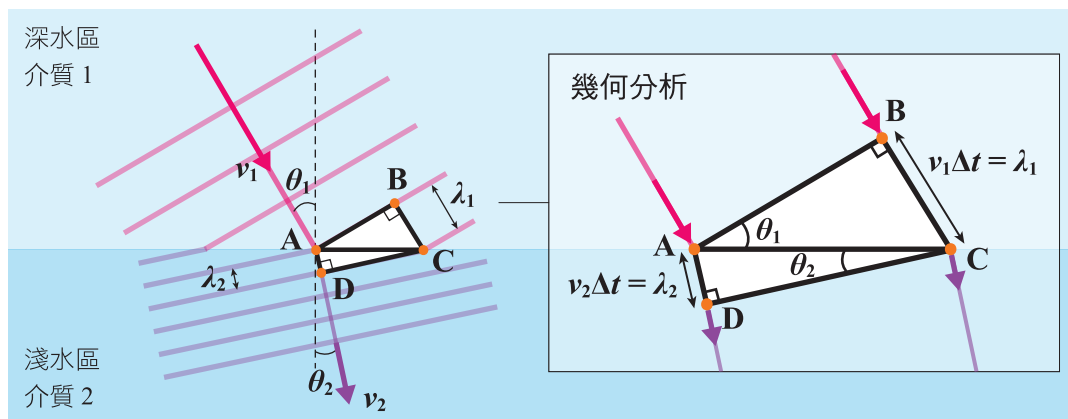
根據惠更斯原理，波前通過界面時，波前上各點發出的子波，因在兩介質中波速不同，故所產生的新波前發生偏折；完全通過界面後，子波皆在同一介質中，波速相同，波前恢復為直線。



## 2

## 定量分析

根據惠更斯原理，藉由子波在不同介質的傳播速度不同，可以推導出司乃耳定律。





## KEY

折射定律中的司乃耳定律，其關係式為

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

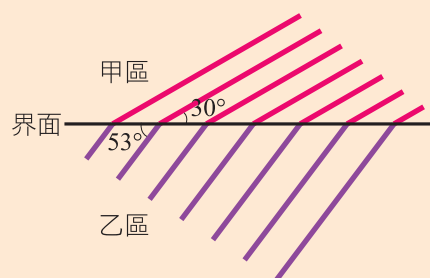
由上式可得知，當入射波由波速快的介質斜向傳入波速慢的介質時，入射角  $\theta_1 >$  折射角  $\theta_2$ ，其行進方向會偏向法線。

## 範例 1-7

## 水波折射

如圖所示，水波波前自甲區傳至乙區，發生折射現象。若乙區中水波波長為 48 cm，頻率為 20 Hz，試回答下列問題：

- (1) 甲區中水波頻率為幾 Hz？波長為幾 cm？
- (2) 甲區水波波速是乙區水波波速的幾倍？
- (3) 甲區和乙區比較，何者為深水區？



## 分析

- (1) 水波折射時，入射波和折射波的頻率相等。
- (2) 利用司乃耳定律，求出入射波和折射波的波長及波速之比。

## 解答

繪出水波的入射線、法線和折射線，如圖所示。由圖中的幾何關係可知，入射角  $\theta_{\text{入}} = 30^\circ$ 、折射角  $\theta_{\text{折}} = 53^\circ$ ，則

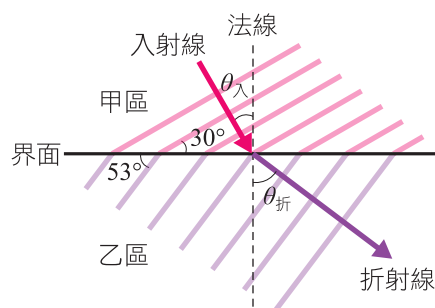
- (1) 水波折射時，頻率不變  $\Rightarrow f_{\text{甲}} = f_{\text{乙}} = 20 \text{ Hz}$

由司乃耳定律

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{\sin \theta_{\text{入}}}{\sin \theta_{\text{折}}} &= \frac{\lambda_{\text{甲}}}{\lambda_{\text{乙}}} \\ \Rightarrow \frac{\sin 30^\circ}{\sin 53^\circ} &= \frac{1}{2} = \frac{5}{8} = \frac{\lambda_{\text{甲}}}{48} \Rightarrow \lambda_{\text{甲}} = 30 \text{ cm} \end{aligned}$$

- (2) 由  $\frac{v_{\text{甲}}}{v_{\text{乙}}} = \frac{\lambda_{\text{甲}}}{\lambda_{\text{乙}}} = \frac{5}{8} \Rightarrow v_{\text{甲}} = \frac{5}{8} v_{\text{乙}}$ 。

- (3) 因  $v_{\text{甲}} < v_{\text{乙}}$ ，故相對而言，乙區為深水區。



## 四 水波的干涉

若在水波槽放置兩個點波源，則可觀察到水波的**干涉**（interference）現象。兩個頻率相同的點波源，若同時產生波峰或波谷，稱為**同相波源**（圖 1-27(1)）；若兩頻率相同的點波源，一個產生波峰時，另一個產生波谷，則稱為**反相波源**（圖 1-27(2)）。實際進行水波干涉實驗時，可發現兩個頻率相同的點波源，只要產生波峰或波谷的時間差為定值，即可在水波槽產生穩定的干涉圖案，我們稱這兩個點波源為**同調波源**（coherent wave sources），如圖 1-27(3) 所示。

嚴格來說，同調波源並不需要振幅相同，但為了簡化分析起見，在此僅討論振幅相同的同相波源。如圖 1-27(4) 所示，考慮兩個振幅相同的同相波源  $S_1$ 、 $S_2$ ，在某一瞬間的波峰與波谷的示意圖。對於水面上任一點  $P$ ，可以定義**路程差**（path difference） $D$  為

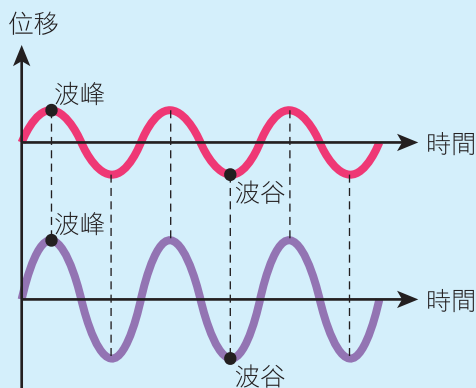
$$1.12 \quad D = |\overline{PS}_1 - \overline{PS}_2|$$

上式中的  $\overline{PS}_1$  與  $\overline{PS}_2$  分別為  $P$  點到兩波源的距離，故又稱為波程差。

圖 1-27 兩個波源的分析

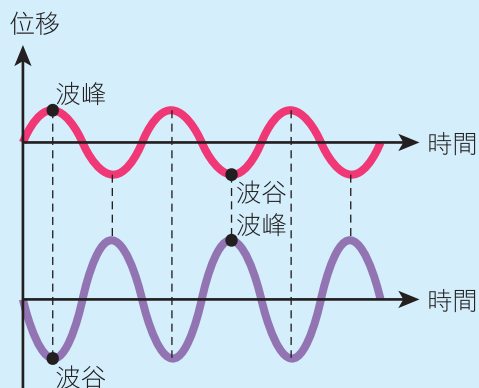
### 1 同相波源

兩個同時產生波峰或波谷，且頻率相同的波源。



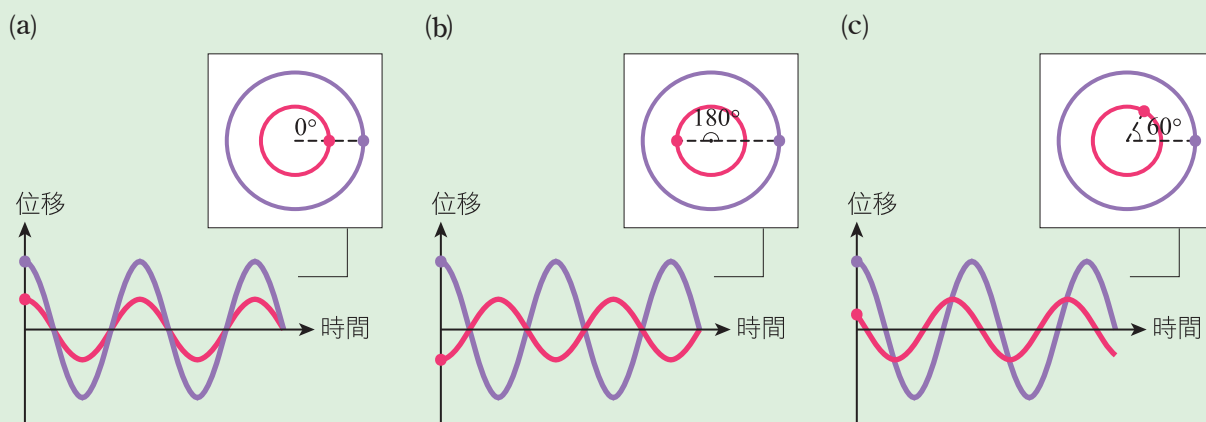
### 2 反相波源

同時刻，兩個頻率相同的波源，一個產生波峰、一個產生波谷。



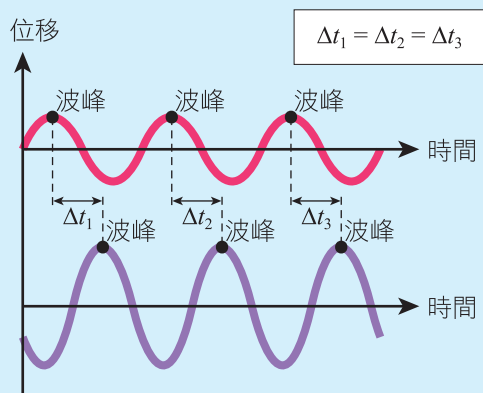
## 知識延長線

同調性 (coherence) 是描述干涉現象時，非常重要的物理概念。如圖所示，考慮兩點波源作頻率相同的簡諧運動，為圖示方便，在此刻意以振幅不同的兩波源呈現。利用參考圓來描述波源的簡諧運動，兩個波源在參考圓上的角度差，稱為相角差，也就是相位差。若是同相波源 (圖 (a))，則兩波源產生波峰或波谷的時間差為零、兩個波源的相角差 (相位差) 為零。若為反相波源 (圖 (b))，則產生波峰或波谷的時間差為半個週期，以參考圓的運動來看，兩波源間的相角差則為  $180^\circ$ 。但只要兩波源產生波峰或波谷的時間差為定值，就是同調波源。如圖 (c) 中兩波源的時間差為  $1/6$  週期，以參考圓的運動來看，兩波源間的相角差為  $60^\circ$ ，既非同相亦非反相，但仍然可以產生穩定的干涉圖案。



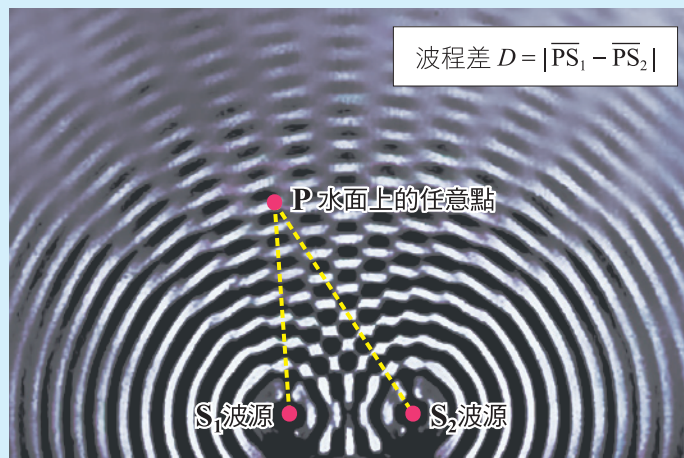
### 3 同調波源

兩個頻率相同的波源，其產生波峰或波谷的時間差為定值。



### 4 波程差

兩個點波源分別至水面上某一點 P 的路程差，亦稱為波程差。





以振幅相同的兩同相波源來說，若水面上某點**波程差恰為波長的整數倍**，則波源  $S_1$ 、 $S_2$  在該點會同時產生波峰或波谷，即兩個波源在該點形成完全建設性干涉，則該點稱為**腹點**，而波程差相同的相鄰腹點連線即為**腹線** (antinode line)。利用疊加原理可知，完全建設性干涉其波程差應滿足

$$1.13 \quad D = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

圖 1-28(1) 為兩波源作完全建設性干涉所形成的腹線，而波程差為  $n\lambda$  的腹線稱為第  $n$  腹線。由於腹點的振幅較大，因此在水波槽的實驗中，腹線處亮、暗紋交錯，產生向外移動的視覺效果。由於雙曲線上的任一點，到兩個焦點的距離差為一定值，所以腹線就是以  $S_1$ 、 $S_2$  為焦點的雙曲線。除了  $n=0$  的中央腹線對應到直線外，取不同整數值  $n$ ，即可得到不同的雙曲線。

圖 1-28

## 同相波源的干涉

1

### 腹點與腹線

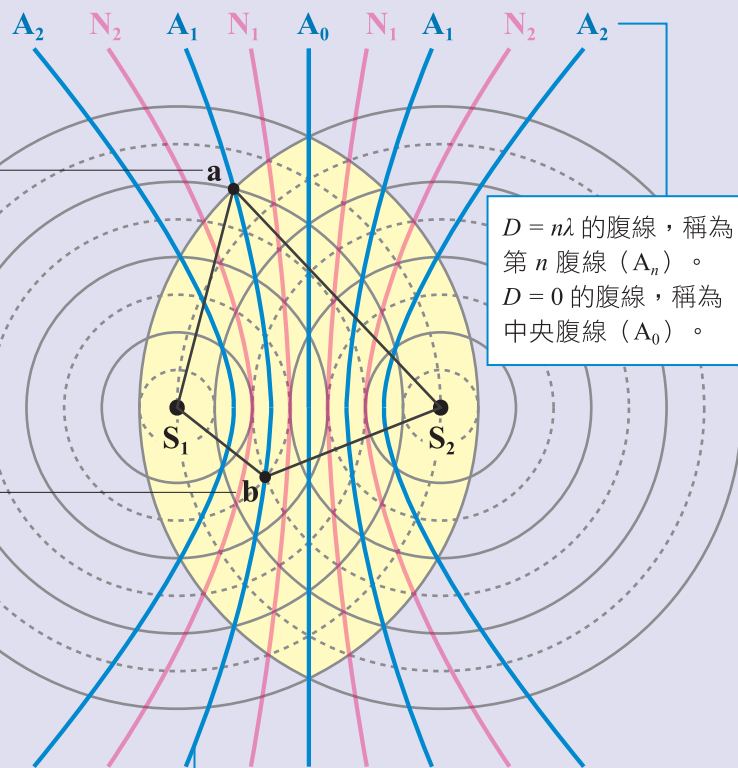
兩波源作完全建設性干涉的點為腹點，其波程差為波長的整數倍；相鄰腹點的連線為腹線。

—— 實線為波峰  
----- 虛線為波谷

a 點距離  $S_1$  波源為  $3\lambda$ ，  
距離  $S_2$  波源為  $4\lambda$ ，  
波程差  $D$  為  $\lambda$ 。  
兩波波峰於 a 點交會。

b 點距離  $S_1$  波源為  $1.5\lambda$ ，  
距離  $S_2$  波源為  $2.5\lambda$ ，  
波程差  $D$  為  $\lambda$ 。  
兩波波谷於 b 點交會。

a、b 點皆作完全建設性干涉，稱為腹點；波程差皆為  $\lambda$ ，波程差相同的相鄰腹點連線稱為腹線。



若水面上某點之波程差恰為半波長的奇數倍，當波源  $S_1$  在該點產生波峰（波谷）時，波源  $S_2$  則在該點產生波谷（波峰）。也就是說，兩個波源在該點造成的振動反相，作完全破壞性干涉，則該點稱為**節點**，而波程差相同的相鄰節點連線即為**節線**（nodal line）。由於位移相反，在重疊後互相抵消，該點維持靜止不動，故波程差應滿足

$$1.14 \quad D = (2m - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

圖 1-28(2) 為兩波源作完全破壞性干涉所形成的節線，而波程差為  $(2m - 1) \frac{\lambda}{2}$  的節線稱為第  $m$  節線。由於節線是靜止的，所以在水波槽的實驗中，看來是沒有明、暗變化的灰色曲線。同樣地，取不同  $m$  值所得的節線，也是以  $S_1$ 、 $S_2$  為焦點的雙曲線。可搭配書末波紋模擬膠片使用，進行觀察。



### 想一想

兩同相且振幅相同的點波源  $S_1$  和  $S_2$ ，在水波槽中產生干涉時，第 3 節線上的 P 點到兩波源的波程差  $|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}|$  為波長  $\lambda$  的幾倍？

## 2 節點與節線

兩波源作完全破壞性干涉的點為節點，其波程差為半波長的奇數倍；相鄰節點的連線為節線。

—— 實線為波峰  
----- 虛線為波谷

a 點距離  $S_1$  波源為  $3.5\lambda$ ，  
距離  $S_2$  波源為  $4\lambda$ ，  
波程差  $D$  為  $0.5\lambda$ 。  
波峰、波谷於 a 點交會。

b 點距離  $S_1$  波源為  $2\lambda$ ，  
距離  $S_2$  波源為  $2.5\lambda$ ，  
波程差  $D$  為  $0.5\lambda$ 。  
波峰、波谷於 b 點交會。

a、b 點皆作完全破壞性干涉，稱為節點；波程差皆為  $0.5\lambda$ ，波程差相同的相鄰節點連線稱為節線。

$D = (2m - 1) \frac{\lambda}{2}$  的節線，  
稱為第  $m$  節線 ( $N_m$ )。



### 想一想

在水波槽中進行水波干涉實驗時，比較容易觀察的是節線？還是腹線？



### KEY

兩同相點波源  $S_1$ 、 $S_2$  產生干涉時，任意位置  $P$  點究竟是完全建設性干涉的腹點、亦或是完全破壞性干涉的節點，取決於波程差  $|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}|$  與波長  $\lambda$  的關係。

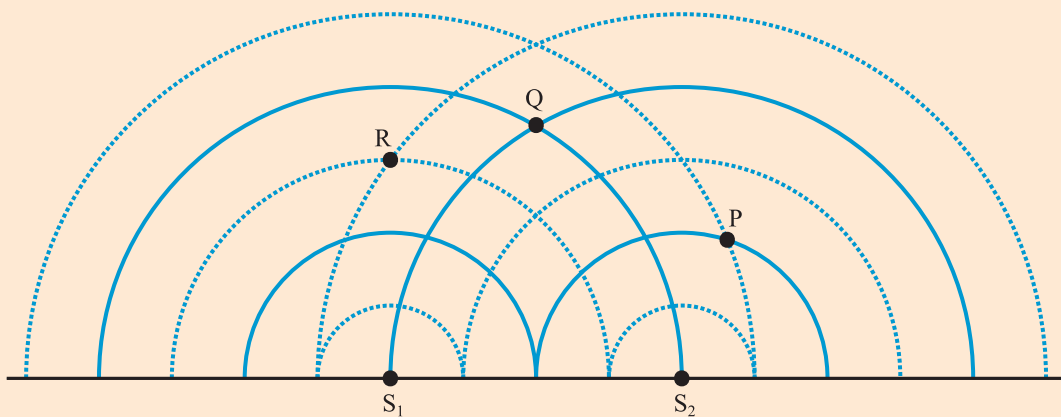
$$\begin{cases} \text{當 } |\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = 0, \lambda, 2\lambda \cdots \Rightarrow P \text{ 為腹點。} \\ \text{當 } |\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda \cdots \Rightarrow P \text{ 為節點。} \end{cases}$$

### 範例 1-8

### 水波干涉

如圖，水波槽中，兩個同相點波源  $S_1$  和  $S_2$  發出振幅相同、波長皆為  $\lambda$  的週期波形成干涉，圖中實線部分代表波峰的波前、虛線部分則代表波谷的波前。試問：

- (1) 圖中的  $P$  點、 $Q$  點分別為節點或腹點？
- (2) 圖中的  $R$  點到兩波源的波程差為多少倍  $\lambda$ ？ $R$  點為第幾節線或第幾腹線上的點？



#### 分析

利用各點到兩波源的波程差，判斷各點是節點還是腹點。

#### 解答

- (1)  $P$  點為  $S_1$  的波谷疊  $S_2$  的波峰，故  $P$  點為節點； $Q$  點為  $S_1$  的波峰疊  $S_2$  的波峰，故  $Q$  點為腹點。
- (2)  $R$  點到兩波源的波程差為  $|\overline{RS_1} - \overline{RS_2}| = |1.5\lambda - 2.5\lambda| = \lambda$ ，故  $R$  點為第 1 腹線上的點。



## 小百科

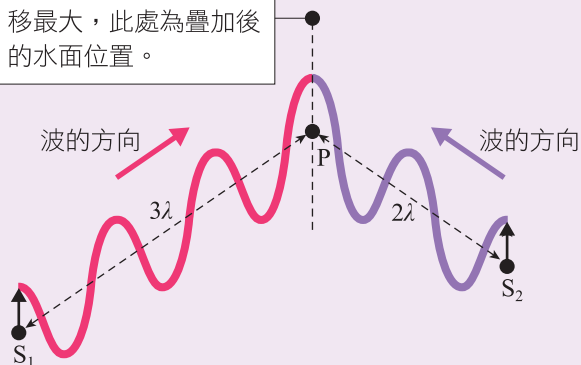
圖 (a)(b) 中 P、P' 處的波程差皆為波長整數倍，故為腹點。當同相波源  $S_1$ 、 $S_2$  產生波峰時，P 處恰好是波峰疊加，水面最高，故位移量值最大；同時 P' 處恰好是波谷疊加，水面最低，其位移量值也最大。圖 (c)(d) 中 Q、Q' 處的波程差皆為半波長的奇數倍，故為節點。當同相波源  $S_1$ 、 $S_2$  產生波峰時，Q 處恰好是波峰（來自波源  $S_1$ ）與波谷（來自波源  $S_2$ ）疊加，水面保持不動，故位移為零。同時 Q' 處恰好是波谷（來自波源  $S_1$ ）與波峰（來自波源  $S_2$ ）疊加，其位移亦為零。

## 1

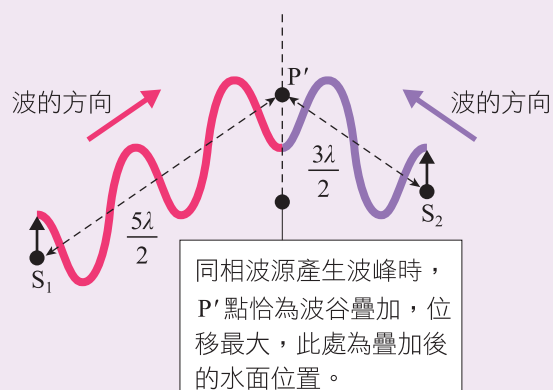
## 波程差為整數倍，為完全建設性干涉

(a) 波程差  $D = 3\lambda - 2\lambda = \lambda$ 。

同相波源產生波峰時，P 點恰為波峰疊加，位移最大，此處為疊加後的水面位置。



(b) 波程差  $D = \frac{5\lambda}{2} - \frac{3\lambda}{2} = \lambda$ 。

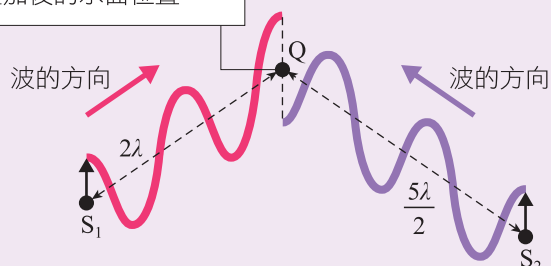


## 2

## 波程差為半波長的奇數倍，為完全破壞性干涉

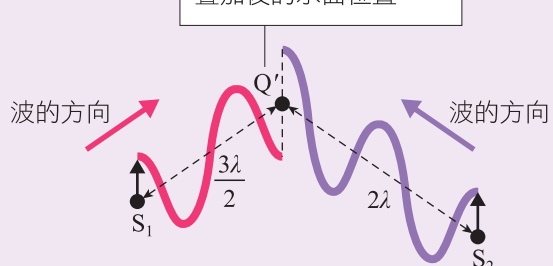
(c) 波程差  $D = \frac{5\lambda}{2} - 2\lambda = \frac{\lambda}{2}$ 。

同相波源產生波峰時，Q 點恰為波峰、波谷疊加，位移為零，此處為疊加後的水面位置。



(d) 波程差  $D = 2\lambda - \frac{3\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}$ 。

同相波源產生波峰時，Q' 點恰為波峰、波谷疊加，位移為零，此處為疊加後的水面位置。







## KEY

波遇到障礙物或狹縫時，產生行進方向轉彎的現象，稱為波的繞射。當障礙物或狹縫的尺度愈小、或波的波長愈大時，繞射效果愈顯著。

## 五 水波的繞射

波在通過障礙物邊緣或是狹縫時，其波前形狀發生變化，導致行進方向改變的現象，稱為**繞射**（diffraction）。如圖 1-29(1) 所示，當直線波經過障礙物時，原先呈直線的波前，在障礙物邊緣附近改變了形狀。由於波前進的方向與波前垂直，當波前形狀改變時，波的前進方向也隨之改變。

直線波通過狹縫時，若狹縫寬度遠大於波長，則保持直線前進；但當狹縫寬度與波長相當時，原先直線的波形會產生彎曲，繞射現象開始變得明顯。雖然繞射與折射都會改變波行進的方向，但兩者有根本性的差異，發生

圖 1-29

### 水波的繞射

1

#### 水波繞射示意圖

##### 水波通過狹縫產生繞射

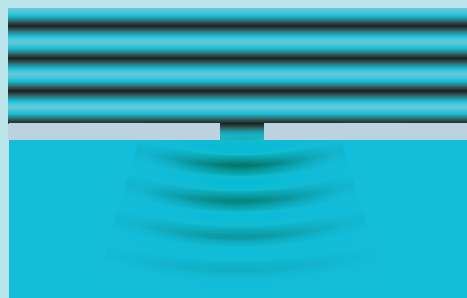
###### 狹縫寬度遠大於波長

繞射現象不明顯，波近乎直線穿越。



###### 狹縫寬度與波長相當

繞射現象開始變得明顯，可在狹縫側邊觀察到波前的彎曲。



##### 水波遇障礙物產生繞射

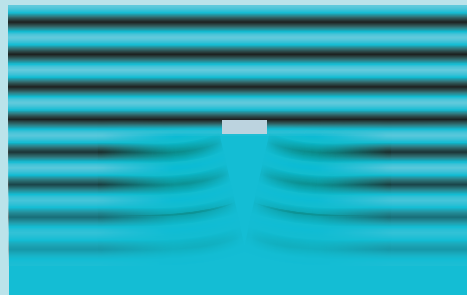
###### 障礙物寬度遠大於波長

波近乎直線傳播，障礙物後方受屏蔽而平靜無波。



###### 障礙物寬與波長相當

繞射現象開始變得明顯，波繞過障礙物邊緣，原本平靜的區域也可觀察到波動。



繞射時，波的頻率、波長與波速都沒有改變，這點和折射截然不同。

繞射現象亦可以利用惠更斯原理來解釋。如圖 1-29(2) 中直線波通過狹縫時，僅剩下一小段的波前，可發出繼續前進的子波。於是這些子波的包絡線，在狹縫邊緣處出現明顯的彎曲，導致波前形狀的改變，這即是繞射發生的原因。

當狹縫寬度遠小於波長時，根據惠更斯原理，直線波經繞射後，可視為由狹縫處點波源所產生的圓形波。所以若是讓直線波通過雙狹縫，利用狹縫作為點波源，可以得到相同的干涉圖案。



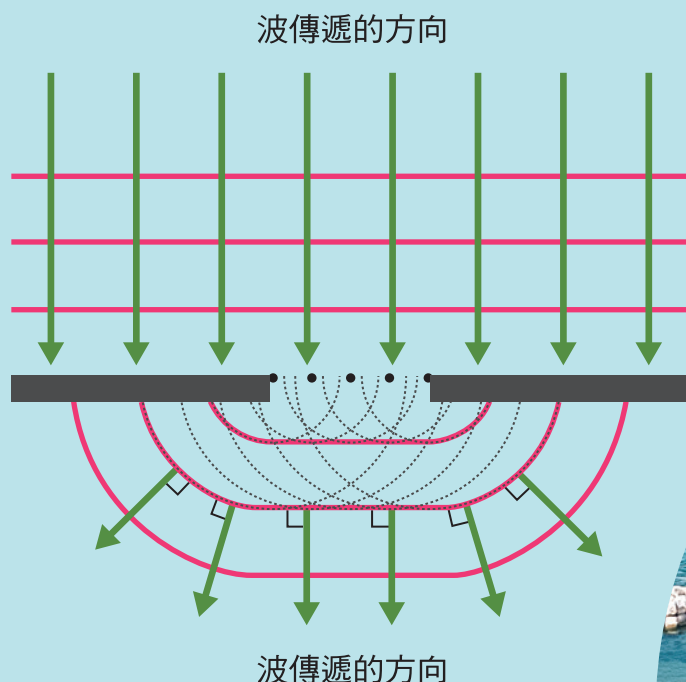
### 想一想

窗戶打開時，將物理老師講話的聲音和超聲波作比較，哪一種聲波的繞射效果較佳，容易傳至隔壁班？

## 2

### 利用惠更斯原理解釋繞射現象

通過狹縫時，僅剩下一小段的波前，可發出繼續前進的子波。



日常生活中也可以觀察到水波通過狹縫時，邊緣處出現明顯的彎曲，導致波前形狀的改變。



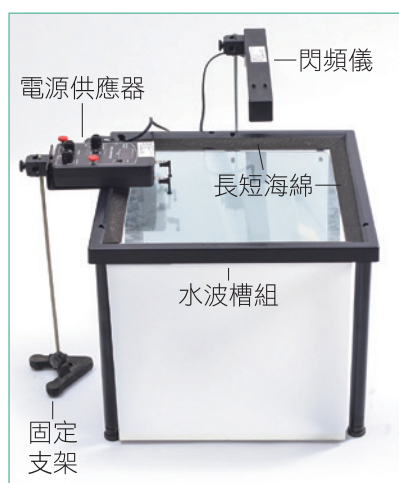
# 水波槽實驗

## 一、實驗目的

1. 觀察水波波前遇到不同障礙物的反射現象。
2. 觀察水波波前通過不同深淺處的折射現象。
3. 觀察水波波前通過狹縫或遇障礙物的繞射現象。
4. 觀察兩個同相點波源造成的水波波前干涉現象。

## 二、實驗器材

| 器材       | 數量    | 器材           | 數量  |
|----------|-------|--------------|-----|
| 水波槽組     | 1 組   | 壓克力塊（薄、厚）    | 數塊  |
| 長短海綿     | 4~8 條 | 直線起波器        | 1 具 |
| 電源供應器    | 1 個   | 圓形起波器        | 2 具 |
| 固定支架     | 1 組   | 障礙物（圓弧形、長條形） | 數個  |
| 閃頻儀（含光源） | 1 臺   | 水平儀          | 1 個 |

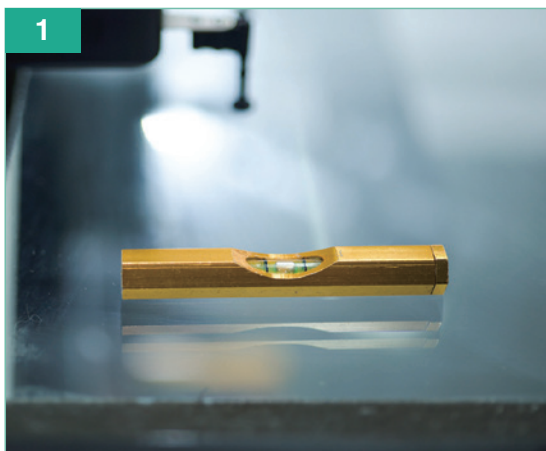




### 三、實驗方法

#### 1 水波槽的架設

1. 在水倒入水波槽之前，使用水平儀將水波槽底部調整至水平，即倒入水後各處水深須相同，如圖 1。
2. 將水槽內部周圍放置海綿，倒入適量清水。
3. 將直線起波器與閃頻儀架設至適當位置，如圖 2。（若無閃頻儀設備，請以一般光源取代）



#### 2 波前的反射

1. 在水波槽中央附近放置一厚壓克力塊，使壓克力塊長邊與直線波前不平行，如圖 3，並留意水波的波峰不高過壓克力塊。
2. 調整直線起波器與閃頻儀讓其頻率相同，待觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察入射及反射波前，並記錄觀察屏上的入射角與反射角。（若無閃頻儀設備，請直接開啟起波器進行觀察，後續相關步驟皆依此因應。）
3. 改變壓克力塊的角度，並記錄觀察屏上的入射角與反射角，重覆數次。
4. 將壓克力塊換為圓弧形障礙物，如圖 4。
5. 確認觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察入射及反射波前，並記錄。



### 3 波前的折射

1. 在水波槽底部放置薄壓克力塊，留意水深須高過壓克力塊，使水深有所差異，並調整壓克力塊長邊與直線起波器平行，如圖 5。
2. 調整起波器與閃頻儀讓其頻率相同，待觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察波前通過壓克力塊前、後的差異，並記錄觀察屏上的入射波波長與折射波波長。
3. 調整壓克力塊長邊與直線起波器不平行，如圖 6。
4. 確認觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察波前通過壓克力塊前、後的差異，並記錄觀察屏上的入射波波長與折射波波長。



### 4 波前經過障礙物的繞射

1. 在水波槽中央附近放置一長條形障礙物，如圖 7，並留意水深不高過障礙物。
2. 調整起波器與閃頻儀讓其頻率相同，待觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察障礙物後方的現象，並記錄。
3. 更換不同長度的長條形障礙物，如圖 8。
4. 確認觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察障礙物後方的現象，並記錄。





## 5 波前經過狹縫的繞射

1. 在水波槽中央附近放置兩個長條形障礙物，形成一狹縫，如圖 9，並留意水深不高過障礙物。
2. 調整直線起波器與閃頻儀讓其頻率相同，待觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察波前在經過狹縫後的現象，並記錄。
3. 移動兩個長條形障礙物，以調整狹縫之寬度，如圖 10。
4. 確認觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察波前在經過狹縫後的現象，並記錄。



## 6 雙點波源之波前的干涉

1. 將直線起波器更換為雙圓形起波器，如圖 11。
2. 調整起波器與閃頻儀讓其頻率相同，待觀察屏的亮、暗紋呈現靜止狀態後，觀察兩同相點波源之波前干涉的現象，並記錄波長與各節線、腹線的波程差。
3. 改變起波器的頻率，重覆步驟 2。
4. 改變兩波源之間距，重覆步驟 2。



## 四、實驗探究

1. 在波前反射實驗中，請觀察並說明直線波前遇到壓克力塊長邊和圓弧形障礙物時，其反射波前會如何改變？
2. 觀察波前的繞射實驗結果，繞射現象在什麼樣的條件下較明顯？依據上述結果，考慮通訊用電磁波不能被建築物阻隔，則要選用波長大約為多少的電磁波來當訊號呢？（請以數量級表示）
3. 在雙點波源的波前干涉實驗中，改變不同的頻率是否有可能令腹線完全消失？為什麼？

## 重點概念圖

### 波動

#### 波的分類

##### 依介質有無

- 需介質 — 力學波
- 不需介質 — 電磁波

##### 依介質振動方向

- 介質振動方向與波傳遞方向垂直 — 橫波
- 介質振動方向與波傳遞方向平行 — 縱波

##### 依波動前進與否

- 行進波
- 駐波
  - 形成條件 — 兩同週期、同振幅、行進方向相反的正弦波重疊
  - 實例
    - 繩或弦上駐波
    - 空氣柱的駐波

##### 依持續規律與否

- 脈衝波
- 週期波
  - $v = f\lambda = \frac{\lambda}{T}$ 
    - 波速  $v$
    - 波長  $\lambda$
    - 週期  $T$
    - 頻率  $f$

#### 基本原理

##### 惠更斯原理

##### 疊加原理

##### 波的獨立性

#### 波的現象

##### 反射

遵守反射定律

##### 折射（透射）

遵守折射定律（司乃耳定律）

##### 干涉

- 兩波以上相互疊加
  - 建設性干涉
  - 破壞性干涉

##### 繞射

波遇狹縫或障礙物產生行進方向改變的現象

#### 常見波動

##### 繩波

- 波速  $v$  與彈性繩的線密度  $\mu$  與張力  $T$  有關
- 反射
  - 固定端反射
  - 自由端反射
- 透射
  - 重繩透射到輕繩
  - 輕繩透射到重繩

##### 水波

- 利用水波槽進行觀察
- 深水區波速較淺水區快
- 水波干涉時觀察節線和腹線
- 可利用惠更斯原理解釋水波的反射、折射、干涉、繞射現象

##### 聲波

詳見本書第二章

##### 光波

- 幾何光學 — 詳見本書第三章
- 物理光學 — 詳見本書第四章

## 1-1 波動的性質

- 1 波傳遞的速度和介質質點的振動速度，兩者不同。
- 2 力學波的波速與介質的特性有關。以繩波為例：  
波速： $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ 。
- 3 介質質點振動方向與波傳遞方向垂直者稱為橫波；介質質點振動方向與波傳遞方向平行者稱為縱波。
- 4 需要介質傳遞的波稱為力學波；電磁波則不需介質亦可傳遞。

## 1-2 週期波

- 1 當波源作週期性振動時，產生的波稱為週期波。
- 2 振幅  $A$ ：介質質點作簡諧運動的振幅。
- 3 頻率  $f$ ：單位時間振動的次數；週期  $T$ ：1 次振動所需的時間。
- 4 波長  $\lambda$ ：相鄰波峰（或相鄰波谷）間的距離。
- 5 波速： $v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$ 。

## 1-3 波的反射與透射

- 1 繩波經固定端反射，波形上下顛倒。
- 2 繩波經自由端反射，波形上下不會顛倒。
- 3 繩波由介質 1 進入介質 2 時，會在界面處產生反射與透射。
- 4 繩波由輕繩傳至重繩，反射波波形上下顛倒、透射波波形上下不顛倒。
- 5 繩波由重繩傳至輕繩，反射波和透射波波形上下皆不顛倒。

## 1-4 波的疊加原理與駐波

- 1 疊加原理：兩波相遇時，在波形重疊區域，各質點偏離平衡點的位移，等於兩波各自位移的向量和。

- 2 兩波重疊後，位移變大者稱為建設性干涉，位移變小者稱為破壞性干涉。
- 3 駐波形成的條件：兩個週期、波長與振幅相同的正弦波相向前進，且相遇疊加。
- 4 駐波可將力學能儲存於介質上，不會對外傳遞。
- 5 兩端固定的弦上，其駐波頻率：  
第  $n$  諧音： $f = \frac{nv}{2L}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )
- 6 一端固定、一端自由的弦，其駐波頻率：  
第  $m$  諧音： $f = \frac{mv}{4L}$  ( $m = 1, 3, 5, \dots$ )

## 1-5 惠更斯原理

- 1 惠更斯原理：波前上的每一點可視為新的點波源，各自發出圓形或球形的子波；與子波相切的包絡線或包絡面，即為新的波前。
- 2 惠更斯原理是波動學的基本理論，可解釋各種波動的直進、反射、折射、干涉、繞射等現象。

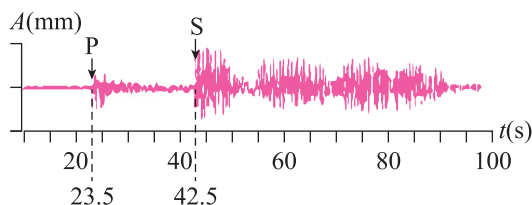
## 1-6 水波

- 1 水波槽實驗裝置，可藉由投影在紙上的亮紋（波峰）、暗紋（波谷），對水波進行觀察。
- 2 水波反射時遵守反射定律，入射波的波前與障礙面的夾角等於入射角。
- 3 水波折射時，其角度和波長、波速的關係會遵守司乃耳定律：  
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{定值}。$$
- 4 深水區的波速較快，淺水區的波速較慢。
- 5 兩水波干涉時，會形成節線與腹線。
- 6 兩同相點波源  $S_1$ 、 $S_2$  產生干涉時，任意位置  $P$  點到兩波源的波程差：  
(1)  $|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = n\lambda$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )  
 $\Rightarrow P$  為第  $n$  腹線的點， $n = 0$  為中央腹線。  
(2)  $|\overline{PS_1} - \overline{PS_2}| = (2m - 1)\frac{\lambda}{2}$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )  
 $\Rightarrow P$  為第  $m$  節線的點。

## 基礎題

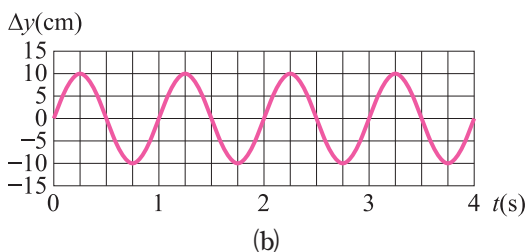
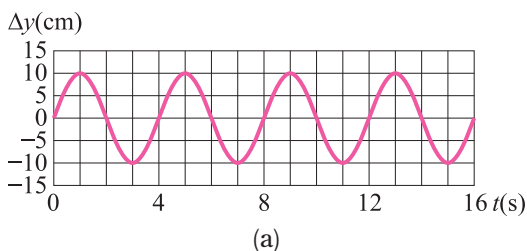
### 1-1 波動的性質

- 有關波動的敘述，下列何者正確？  
(A) 介質質點的速度等於行進波的波速  
(B) 可以傳遞介質的波稱為力學波  
(C) 所有波的傳遞一定都需要介質  
(D) 聲波屬於力學波的一種  
(E) 波可同時傳遞能量和介質。
- 根據波的傳遞方向和介質質點的振動情形，請簡述橫波與縱波的區別，並列舉生活中的波動現象，屬於橫波與縱波各一項。
- 「戰鬥繩」可用來訓練肌肉和核心肌群的爆發力和耐力，它被廣泛應用於各類運動的健身項目中。健身房的館長將一條 16m、25kg 的均勻戰鬥繩一端繫於牆壁，另一端施以 10 kgw 的力量拉緊，並在施力處產生一個脈衝波。已知重力加速度量值為  $10 \text{ m/s}^2$ ，則：  
(1) 戰鬥繩的線密度為多少 kg/m？  
(2) 戰鬥繩上脈衝波的波速為多少 m/s？  
(3) 脈衝波將在幾 s 後抵達牆壁？
- 地震時會同時產生 P 波與 S 波，P 波是縱波、S 波是橫波，若某處的 P 波波速約為  $6.5 \text{ km/s}$ ，S 波的波速約為  $4.0 \text{ km/s}$ 。一觀測站在某次大地震中測得 P 波與 S 波抵達時間如圖，若這兩種波沿著同一直線路徑由震源傳到觀測站，試估計震源與觀測站的距離約為多少 km？  
(A) 8 (B) 53 (C) 99 (D) 151 (E) 198。

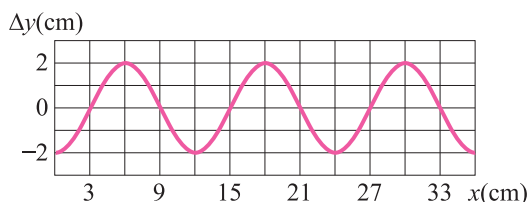


## 1-2 週期波

- 在一條張力固定的彈性繩上，有一列週期波正在向右傳遞。當週期波通過繩上某質點時，此質點的振動位移  $\Delta y$  與時間關係如圖 (a) 所示。試問：  
(1) 此週期波的頻率為幾 Hz？  
(2) 在彈性繩張力固定的條件下，調整繩上週期波的頻率後，質點位置變化如圖 (b) 所示，則此週期波的波速變為原來的幾倍？理由為何？  
(3) 波長變為原來的幾倍？理由為何？



- 在細繩上有一連續的週期波向  $+x$  方向傳播，其質點振動位移  $\Delta y$  與位置  $x$  關係如圖所示。若細繩上的各質點在原位置每分鐘振盪 24 次，試將此週期波的各物理量，填入表格欄中。

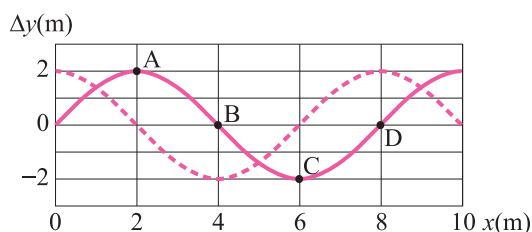


| 波長    | 振幅    | 頻率    | 週期    | 波速    |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| _____ | _____ | _____ | _____ | _____ |
| cm    | cm    | Hz    | s     | cm/s  |



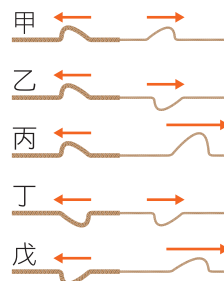
- \* 7. 如圖所示的實線為某向右行進的橫波在  $t = 0$  s 時的波形，而虛線則為  $t = 3$  s 時的波形，且波前進的距離尚未超過一個波長，有關此波的敘述，下列哪些正確？

- (A) 波長為 4 m  
(B) 頻率為 4 Hz  
(C) 波速為 2 m/s  
(D) 3 s 內質點 A 移動的路徑長為 6 m  
(E) 此週期波由位置 0 m 處傳播到位置 10 m 處，需時 2 s。

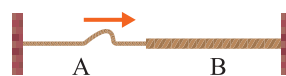


9. 承上題，反射波和透射波的情況，可能為圖中的哪一種狀況？

- (A) 甲 (B) 乙 (C) 丙 (D) 丁 (E) 戊。



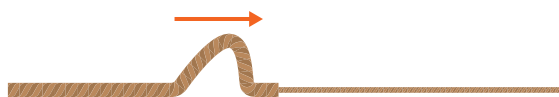
10. 如圖所示，在左右牆壁之間，長度相等的 A、B 兩弦串連成一線，兩弦的線密度之比為 1 : 4。A 弦上有一向右的脈波，試問此脈波通過 A、B 兩弦交界處時，產生的反射波和透射波，何者先碰觸牆壁？



### 1-3 波的反射與透射

8. 一個脈衝波自繩子左端向右行進，若繩子右端連接一條線密度較小的繩子，如圖所示（圖中的箭頭代表波傳播的方向），則當此脈衝波傳到兩繩交界處後，下列關於反射波與透射波的敘述，何者正確？

- (A) 反射波與入射波比較，是波形上下顛倒、振幅變小  
(B) 反射波與入射波比較，是波形上下不顛倒、振幅變大  
(C) 透射波與入射波比較，是波形上下顛倒  
(D) 透射波與入射波比較，是波形上下不顛倒  
(E) 透射波的波速小於入射波的波速。



### 1-4 波的疊加原理與駐波

11. 彈性繩上有兩個波，欲在彈性繩上形成駐波，這兩個波的條件應為何？

- \* 12. 在一彈性繩上，兩正弦波交會形成駐波，下列敘述哪些正確？

- (A) 此兩正弦波的波長相等，但頻率不一定相等  
(B) 相鄰兩節點間的距離等於正弦波的半波長  
(C) 除節點外，各質點振動的振幅相等  
(D) 當波形為一直線時，各質點的振動速度均為零  
(E) 行進波能傳遞能量，但駐波不能傳遞能量。

13. 將一均勻的細繩拉緊，兩端固定於相距為  $L$  的兩點。當細繩上形成的駐波有三個腹點時，駐波的波長為何？ 【105 指考】

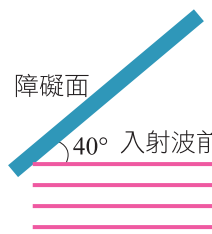
- (A)  $\frac{1}{3}L$  (B)  $\frac{2}{3}L$  (C)  $L$  (D)  $\frac{3}{2}L$  (E)  $3L$ 。

14. 某條弦的一端為固定端、一端為自由端。已知此弦的長度為 20 cm，其線密度為 0.005 kg/m，當弦的振動頻率為 100 Hz 時，弦上出現一個腹點，則：
- 弦上波速為多少 m/s？
  - 弦上的駐波可視為由兩個正弦子波疊加而成，則每個子波的波長為多少 cm？
  - 此弦的張力量值為多少 N？
  - 若欲使弦上出現三個腹點，則此時弦的振動頻率應調整為多少 Hz？

## 1-5 惠更斯原理

15. 下列何者為惠更斯原理的主要內容？
- 兩波相遇時，其位移可以互相疊加
  - 所有的波最終都是圓形波
  - 波前上的每一點可視為新的點波源，並由此產生新的子波
  - 波可以傳遞能量
  - 波行進時，介質不隨波前進。
- \* 16. 下列哪些波的現象，可以用惠更斯原理來解釋？
- 反射
  - 折射
  - 干涉
  - 繞射
  - 直進。

## 1-6 水波

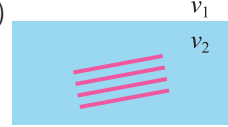
17. 如圖所示，當直線水波遇到障礙面時，發生反射現象。關於此現象的描述，下列何者正確？
- 
- 反射波的波長變長
  - 反射波的波速變慢
  - 入射角為 50°
  - 反射波前和障礙面的夾角為 50°
  - 反射角為 40°。

18. 在水波槽中作「水波折射」的實驗時，水波自甲區傳至乙區，測得其入射角為 37°、折射角為 53°，且在甲區測得水波的波長為 12 cm，則：

- 甲、乙兩區域，何者的深度較深？
- 乙區中的水波波長為多少 cm？

19. 一水波由介質 1 傳播至深度不同的介質 2 中，入射水波的波前如圖所示，已知水波在兩介質中的傳播速率分別為  $v_1$  與  $v_2$ ，且  $v_1 < v_2$ ，則下列何者可能為該水波在介質 2 中的波前？



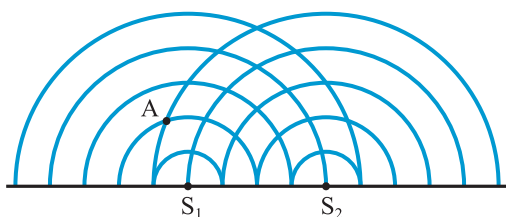
- 
- 
- 
- 
- 

20. 承上題，下列敘述何者正確？

- 介質 1 為淺水區
- 介質 1 中水波頻率較大
- 入射角大於折射角
- 入射角和折射角的比值為  $\frac{v_1}{v_2}$
- 由於  $v_1 < v_2$ ，故此水波在介質 2 中的力學能大於在介質 1 中的力學能。

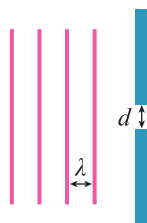
21. 如圖，水波槽中兩個同相點波源  $S_1$  和  $S_2$  發出振幅相同、波長皆為  $\lambda$  的週期波形成干涉，圖中實線部分皆代表「波峰」的波前，試問：

- (1) 圖中的 A 點到兩波源的波程差為多少？  
 (2) 圖中的 A 點位在第幾條節線或第幾條腹線上？



22. 在「水波繞射」實驗中，讓波長  $\lambda$  的直線水波通過一個寬度為  $d$  的孔隙，下列哪個選項的條件，繞射現象最不明顯？

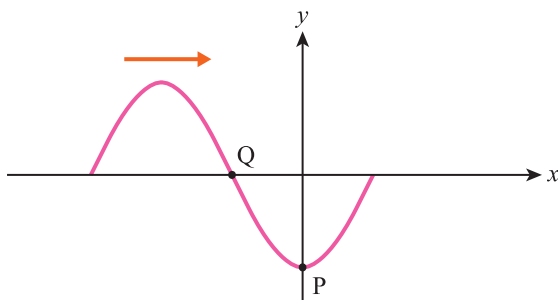
- (A)  $\frac{\lambda}{d} = 0.0001$  (B)  $\frac{\lambda}{d} = 0.001$   
 (C)  $\frac{\lambda}{d} = 0.01$  (D)  $\frac{\lambda}{d} = 0.1$  (E)  $\frac{\lambda}{d} = 1$ 。



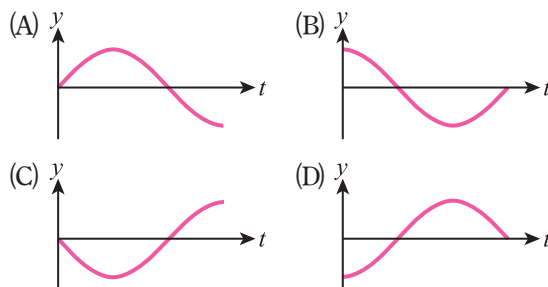
## 進階題

### 1-1 波動的性質

1. 平面上有一個向右傳遞的波，其在  $t = 0$  s 的波形，如圖所示，試問在此瞬間，P 點和 Q 點的振動速度方向分別為何？



2. 承上題，圖形中 P 點的位置  $y$  與時間  $t$  的函數關係為下列何者？



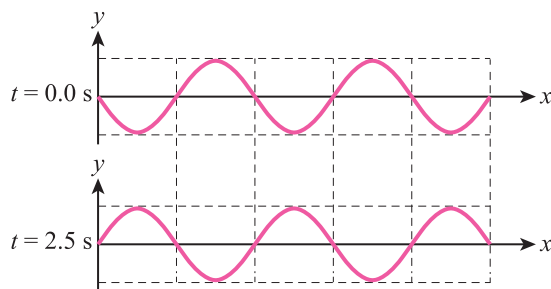
(E) 以上皆非。

3. 有一條原長為 10 cm 的彈性繩遵守虎克定律，且在彈性限度範圍內使用。將彈性繩拉長為 12 cm 時，彈性繩上的張力為  $T$ ，繩上產生的波速為  $v$ ；今若將彈性繩拉長為 16 cm，則彈性繩上的波速變為多少？

- (A)  $v$  (B)  $2v$  (C)  $3v$  (D)  $4v$  (E)  $5v$ 。

### 1-2 週期波

4. 彈性繩上有一向右行進的正弦週期波，其在  $t = 0$  s 和  $t = 2.5$  s 瞬間的波形，如圖所示。試問在 2.5 s 內，此正弦週期波可能前進了幾個波長的距離？請簡述其理由。

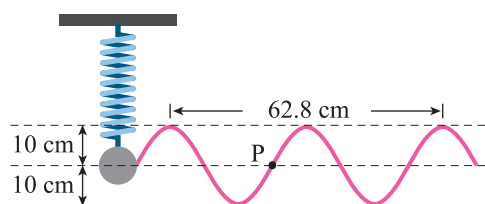


5. 承上題，已知此波的週期  $T$  介於 0.9 s 至 1.2 s 之間，波長為 3 m，則此週期波的波速量值為多少 m/s？

- (A) 1 (B) 2 (C) 3 (D) 4 (E) 5。

6. 如圖所示，輕彈簧的彈性常數為  $20 \text{ N/m}$ 、下端掛質量  $5 \text{ kg}$  的球，球的右端連結一條輕繩。今使球作振幅  $10 \text{ cm}$  的鉛直簡諧運動，帶動輕繩形成週期波，試回答下列問題：

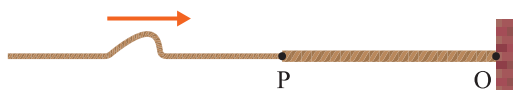
- (1) 此週期波為橫波或者縱波？理由為何？
- (2) 此週期波前進速度的量值  $v$  為幾  $\text{cm/s}$ ？
- (3) 在圖中瞬間，週期波上 P 點的振動速度量值  $v_p$  為幾  $\text{cm/s}$ ？



## 1-3 波的反射與透射

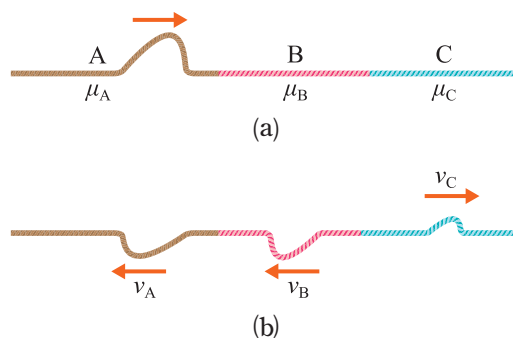
- \* 7. 一線密度較小的輕繩上，有一向右傳遞，向上振動之入射脈衝波（如圖所示）。在輕繩與線密度較大之重繩的交接處（P 點），脈衝波產生第一次反射與透射。第一次透射波傳遞至牆壁上 O 點反射而回，至 P 點時再產生第二次之反射與透射。則下列有關脈衝波在 P 點之透射波與反射波之敘述，哪些正確？

- (A) 第一次透射波為向上振動的脈波
- (B) 第二次透射波為向上振動的脈波
- (C) 第一次反射波與第二次反射波均為向下振動的脈波
- (D) 第二次透射波的振幅較入射波為大
- (E) 第一次透射波與第二次透射波的波速相同。

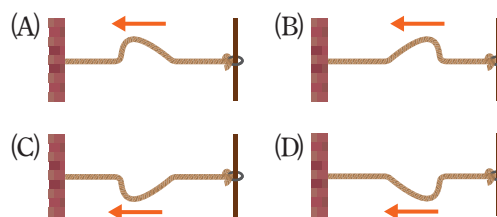


8. 將線密度分別為  $\mu_A$ 、 $\mu_B$ 、 $\mu_C$  的 A、B、C 三段繩子連接，一脈衝波由 A 繩向右行進，如圖 (a) 所示，已知 A 繩和 B 繩第一次反射的波形如圖 (b) 所示，則：

- (1) 三段繩子的線密度  $\mu_A$ 、 $\mu_B$ 、 $\mu_C$  之大小關係依序為何？
- (2) 脈衝波在 A、B、C 三段繩子上傳遞的速率  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$  之大小關係依序為何？



9. 如圖所示，將某繩的左端緊緊繫於牆面，右端端繫於一個可自由移動的小套環。今繩上有一個向左行進的脈衝波，試問此脈衝波經過二次反射之後，波形應為下列何者？

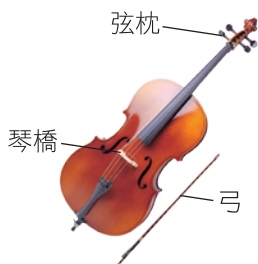


- (E) 以上皆非。

## 1-4 波的疊加原理與駐波

10. 奇美博物館以提琴蒐藏聞名全世界，2017 年一場國際大型提琴交流活動在奇美博物館登場，吸引世界頂尖專業製琴師、製弓師慕名朝聖。提琴樂器構造示意圖如圖所示，演奏時，弦枕與琴橋的距離  $L$  視為琴弦的原長，若以手指按弦，則琴弦實際振動的長度為手指按弦位置與琴橋的距離。試問下列何種演奏方式，可使提琴樂器發出聲音的頻率變高？

- (A) 拉弓時使用比較小的力  
(B) 拉弓的速率變慢  
(C) 演奏線密度較大的弦  
(D) 調整使弦的張力變得比較小  
(E) 將手指按在比較接近下方琴橋的位置。

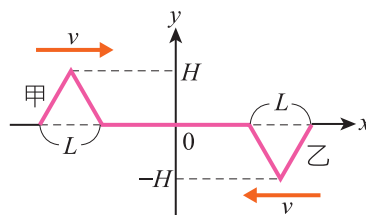


11. 承上題，假設在某提琴上有張力相同、原長相同但線密度不同的 A、B 兩根弦，提琴手用弓直接拉 A 弦而不用手指按壓時，A 弦振動的基頻為  $f_A$ ；拉 B 弦時，如果同時用手指用力按住 B 弦距離弦枕  $\frac{L}{4}$  長度處，發現 B 弦振動的基頻  $f_B = f_A$ 。則 A 弦線密度是 B 弦線密度的多少倍？

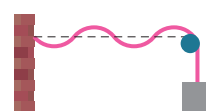
- (A)  $\frac{4}{9}$  (B)  $\frac{9}{4}$  (C)  $\frac{9}{16}$  (D)  $\frac{16}{9}$  (E) 1。

12. 在一條沿  $x$  軸拉緊的均勻細繩上，有甲與乙兩個脈衝波，以波速  $v$  分別向右與向左行進，當時間  $t = 0$  s 時，兩波的波形如圖所示。圖中的兩個三角形均為等腰，且高度  $H$  遠小於底邊的長度  $L$ （未依比例繪製）。若重力的影響可忽略不計，則下列有關這兩個脈衝波的敘述，何者正確？

- (A) 位於甲、乙兩脈衝波上的小段細繩均沿  $x$  軸方向運動  
(B) 位於甲、乙兩脈衝波上的小段細繩，其動能均為零  
(C) 當兩脈衝波完全重疊的瞬間，細繩成一直線  
(D) 當兩脈衝波完全重疊的瞬間，繩波動能為零  
(E) 當兩脈衝波完全重疊後，繩波就永遠消失。



13. 如圖所示，將線密度為  $10^{-4}$  kg/m 的弦線一端固定，保持水平 0.5 m 後跨過滑輪，在另一端懸吊質量 25 g 的砝碼。彈動此弦，使其產生 4 個波腹的駐波，假設滑輪處為節點，則此時弦線的振動頻率為多少 Hz？（重力加速度  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）  
(A) 100 (B) 200 (C) 300 (D) 400 (E) 500。



## 1-5 惠更斯原理

14. 如圖為一系列向右傳遞的水波波峰波前，相鄰波前間的距離為波長  $\lambda$ ，圖中箭頭代表水波的移動方向。試以惠更斯原理，說明此列水波如何向右前進？





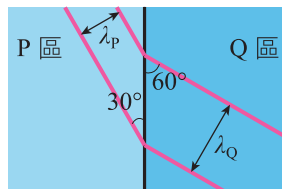
## 1-6 水波

15. 下列有關水波通過深水、淺水不同介質之間的界面，發生折射現象的敘述，何者正確？
- (A) 入射角恆小於折射角
  - (B) 入射角恆大於折射角
  - (C) 入射角與折射角無特定的數學關係式
  - (D) 入射角大於折射角時，入射波速也大於折射波速
  - (E) 入射角與折射角的比值等於入射波速與折射波速的比值。

16. 在一項水波槽實驗中，當水波由深 1 cm 的淺水區入射至深 2 cm 的深水區時，在淺水區與深水區的交界處發生折射現象。假設水深與水波的振幅都比波長小得多，以致水波的波速平方與水深成正比，則下列何者正確？ 【106 指考】

- (A) 若入射角為  $30^\circ$ ，則折射角為  $45^\circ$
- (B) 若入射角為  $30^\circ$ ，則折射角為  $53^\circ$
- (C) 若入射角為  $45^\circ$ ，則折射角為  $60^\circ$
- (D) 若入射角為  $53^\circ$ ，則折射角為  $30^\circ$
- (E) 若入射角為  $60^\circ$ ，則折射角為  $45^\circ$ 。

- \* 17. 水波槽中有一頻率固定的直線波，通過深淺不等的 P、Q 兩區，其部分波前如圖所示。若圖中兩波前間的距離，即為波長，且水波由 P 區傳向 Q 區。下列有關此水波的敘述，哪些正確？

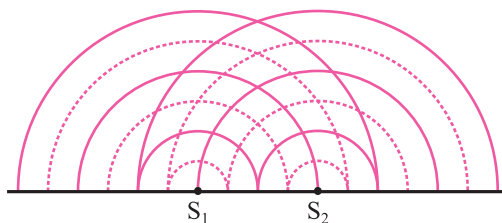


- (A) P 區的水深較 Q 區大
- (B) 入射波的入射角為  $60^\circ$
- (C) 入射波與折射波的波長之比為  $1 : \sqrt{3}$
- (D) 兩波的波速之比為  $\sqrt{3} : 1$
- (E) 水波的折射現象可以用惠更斯原理來解釋。

- \* 18. 兩同相點波源  $S_1$  和  $S_2$  相距 24 cm，一起發出頻率 25 Hz、波速 2 m/s 的水波，則兩波干涉後，下列敘述哪些正確？

- (A) 第 2 節線上的點到兩波源的波程差為 12 cm
- (B) 波源  $S_1$  處為腹點、 $S_2$  處為節點
- (C) 在  $\overline{S_1 S_2}$  連線上，相鄰節點間的距離為 2 cm
- (D) 在  $\overline{S_1 S_2}$  連線上，離波源  $S_1$  最近的節點，與  $S_1$  相距 1 cm
- (E) 在  $\overline{S_1 S_2}$  連線之間，總共可觀察到 6 條節線。

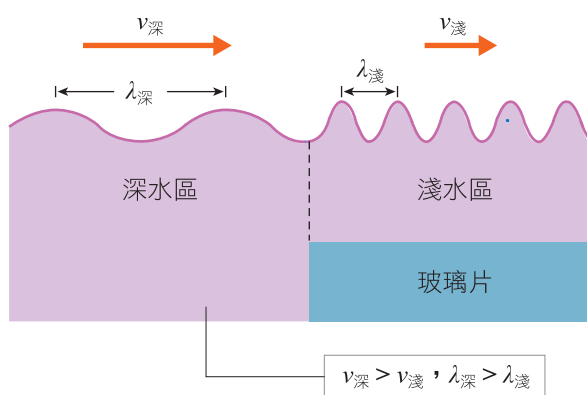
19. 如圖，在水波槽中，兩個同相點波源  $S_1$  和  $S_2$  發出振幅相同、波長皆為  $\lambda$  的週期波形成干涉，圖中實線部分代表「波峰」的波前、虛線部分則代表「波谷」的波前。試根據水波的干涉理論，繪出節線並標示各節線的名稱。



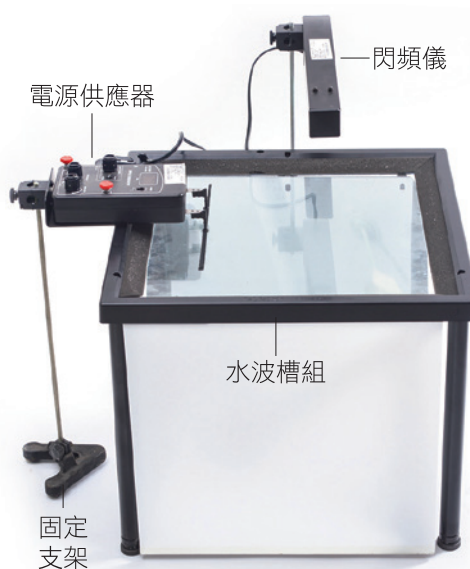
## 探究實作題

1. 小騰從水波折射的單元學習到，若在水波槽內放置一厚玻璃片，如圖 (a) 所示，由於其上方的水深較淺，可以形成淺水區與深水區的界面。水波在淺水區的波速較小，而在深水區波速較大。由於頻率不因水深而有所改變，利用  $v = f\lambda$  的關係式，可推知淺水區的波長較短，而深水區的波長較長。

小騰想進一步了解波速  $v$  與水深  $D$  間的關係，他想起曾經作過一道物理題目，提到波速  $v$ 、水深  $D$  的關係為  $v \propto \sqrt{D}$ 。因此決定以此主題進行探究實作，探討水波槽中水波波速  $v$  與水深  $D$  的關係。他架設水波槽實驗裝置，以固定頻率的直線起波器作為波源，如圖 (b) 所示。小組成員利用拍照及攝影方式，來測量相同頻率不同水深  $D$  時，水波的波長  $\lambda$  及水波的波速  $v$ 。最初水波槽內水深  $D$  為 2.5 cm，測得  $\lambda$  和  $v$  後，在水波槽內陸續疊放每塊厚度為 0.5 cm 的壓克力片，依序測量不同深度時，水波的波長  $\lambda$  和波速  $v$ ，得到數據如表所示。試回答下列問題。



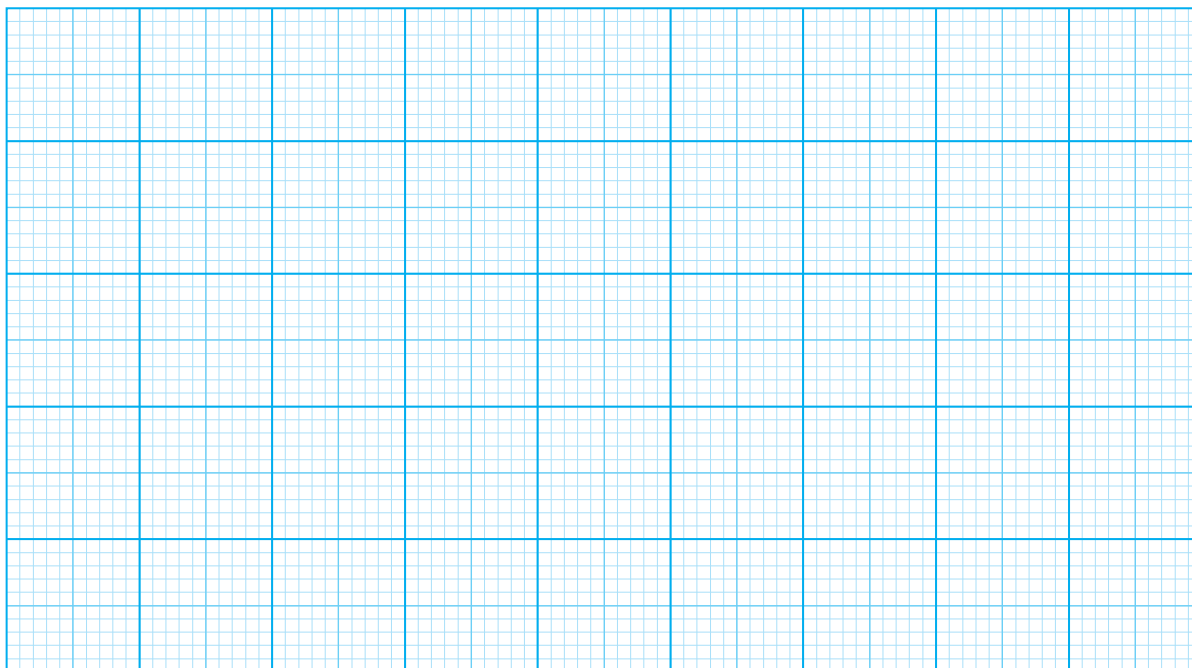
▲ 圖 (a)



▲ 圖 (b)

| 壓克力片  | 水深 $D$ (cm) | $\sqrt{D}$ (cm <sup>1/2</sup> ) | 水波波長 $\lambda$ (cm) | 水波波速 $v$ (cm/s) |
|-------|-------------|---------------------------------|---------------------|-----------------|
| 無疊放   | 2.5         | 1.58                            | 6.0                 | 30.1            |
| 疊 1 片 | 2.0         | 1.41                            | 5.5                 | 29.2            |
| 疊 2 片 | 1.5         | 1.22                            | 5.2                 | 27.8            |
| 疊 3 片 | 1.0         | 1.00                            | 4.4                 | 24.8            |
| 疊 4 片 | 0.5         | 0.71                            | 3.6                 | 19.9            |

- (1) 在本實驗中，水波頻率  $f$ 、水波波長  $\lambda$ 、水波波速  $v$ 、水的深度  $D$ ，何者是控制變因、何者是操縱變因、何者是應變變因？
- (2) 請將水深  $D$  和水波波速  $v$  的數值，標示於坐標圖中。（請正確標示橫軸與縱軸的名稱與單位，並留意坐標軸間距選取須標示得宜。）

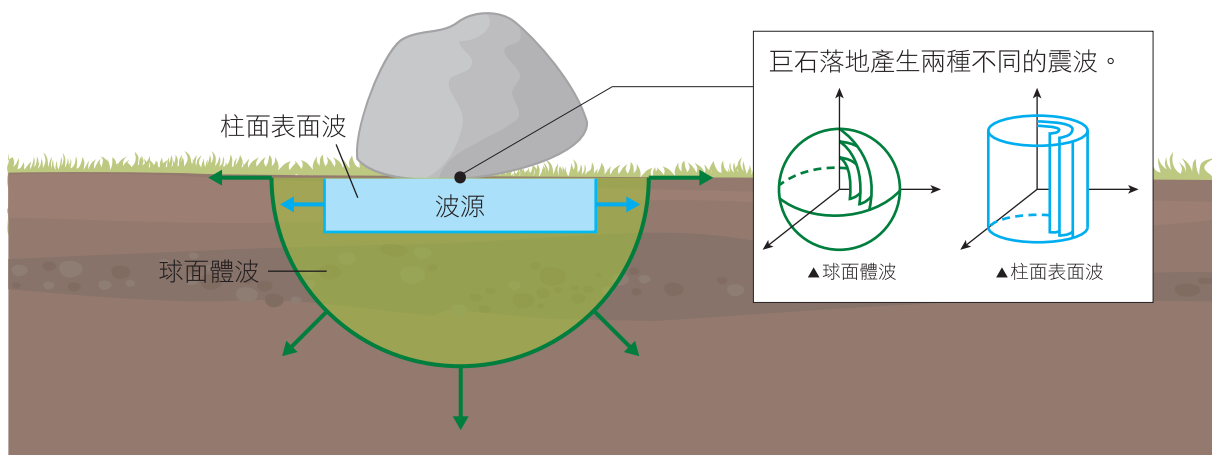


- (3) 根據本實驗所測得的數據結果，請判斷下列哪兩項是小騰可以作出的結論？
  - (A) 不論水深多寡，若水深愈深，則水波波速愈快
  - (B) 不論水深多寡，若水深愈深，則水波波長愈長
  - (C) 不論水波頻率多寡，若水深愈深，則水波波長也愈長
  - (D) 當水深範圍在 0.5 cm~2.5 cm 時，若水波頻率固定，則水深愈深時，水波波長愈長
  - (E) 當水深範圍在 0.5 cm~2.5 cm 時，若水波頻率固定，則水深愈深時，水波波速愈快。
- (4) 請根據此實驗所測得的數據結果，研判波速  $v$  與水深  $D$  兩者之間，是否滿足  $v \propto \sqrt{D}$  的關係呢？請說明你是如何研判的呢？

| 是否滿足 $v \propto \sqrt{D}$ 的關係                               | 如何研判 |
|-------------------------------------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> 滿足<br><input type="checkbox"/> 不滿足 |      |

## 巨石敲響的大地脈動

在 1996 年夏天，美國優勝美地國家公園有巨石墜地，質量超過 8 萬噸，從 500 公尺高處落下，震波連遠在 200 公里外都可以記錄到。如圖所示，分析巨石落地產生的震波，可以粗略分成兩類：一類是以球形波往地底傳播的體波（body wave）；另一類則是地表受到擾動所產生的表面波，以淺層的柱面波沿著地表外傳。雖然都在相同的介質傳遞，但由於不同震波傳遞機制不同，球面體波的傳遞速率較快，而柱面表面波則傳遞得比較慢。



另外，假設震波能量在傳播時守恆，由於波前面積逐漸擴張，其強度會隨之減小。球面體波向外傳遞時，其波前面積與傳播距離平方成正比，因此在遠方偵測到的強度與距撞擊點距離平方成反比。而柱面表面波向外傳遞時，其波前面積與傳播距離成正比，故遠方偵測到的強度與距撞擊點距離成反比。藉由分析不同震波傳遞速度與強度的差異，即可從儀器偵測到的數據，精準地逆推巨石落地的地點與時刻呢！【混合題】

1. 巨石撞擊地面後，轉換成兩種震波的能量大約相等，那遠方觀測站所測得的震波，何者強度較大？
  - (A) 球面體波，因為其傳遞速度較快，可以精準到達測量儀器
  - (B) 球面體波，因為其波前面積大，影響區域廣泛
  - (C) 柱面表面波，因為其傳遞速度較慢，故產生的影響不容易逸散
  - (D) 柱面表面波，因為其波前面積小，能量較為集中
  - (E) 兩者強度相同。
2. 若球面體波的傳遞速度為  $3.5 \text{ km/s}$ ，柱面表面波傳播速度為  $3.0 \text{ km/s}$ ，在某觀測站測得兩震波到達時間的差距為  $5.0 \text{ s}$ 。試著依此數據，推估觀測站與巨石撞擊點的距離為何？