

# 長空間內聲場特性及噪音控制之研究

## Study on Field Properties and Noise Control in Long Enclosures

台灣永續工程顧問有限公司 總經理  
淡江大學水資源及環境工程學系兼任助理教授  
劉嘉俊 博士

中華民國101年9月27日

# 第一部份

## CONTENT

1.前言

2.壹、基本原理

3.貳、國內外交通噪音改善及防制











R105

R105

CR

CR  
1000  
1000





出口 EXIT  
師大路  
ShiDa Rd  
高速公路  
FREEWAY  
下次出口 NEXT EXIT  
永和(永和橋)  
YongHe(Hong's Bridge)

3



HSBC



CASINO

McDonald's



WEATH  
TITANS  
戰天神  
8/30 (週五)  
MAX 3D

誠品 eslite

AIA Y

SAMSUNG  
三星旗艦大開幕

BALENO  
髮型新限量!

SHEEN

HI YOU  
海友鐘錶

海友鐘錶概念

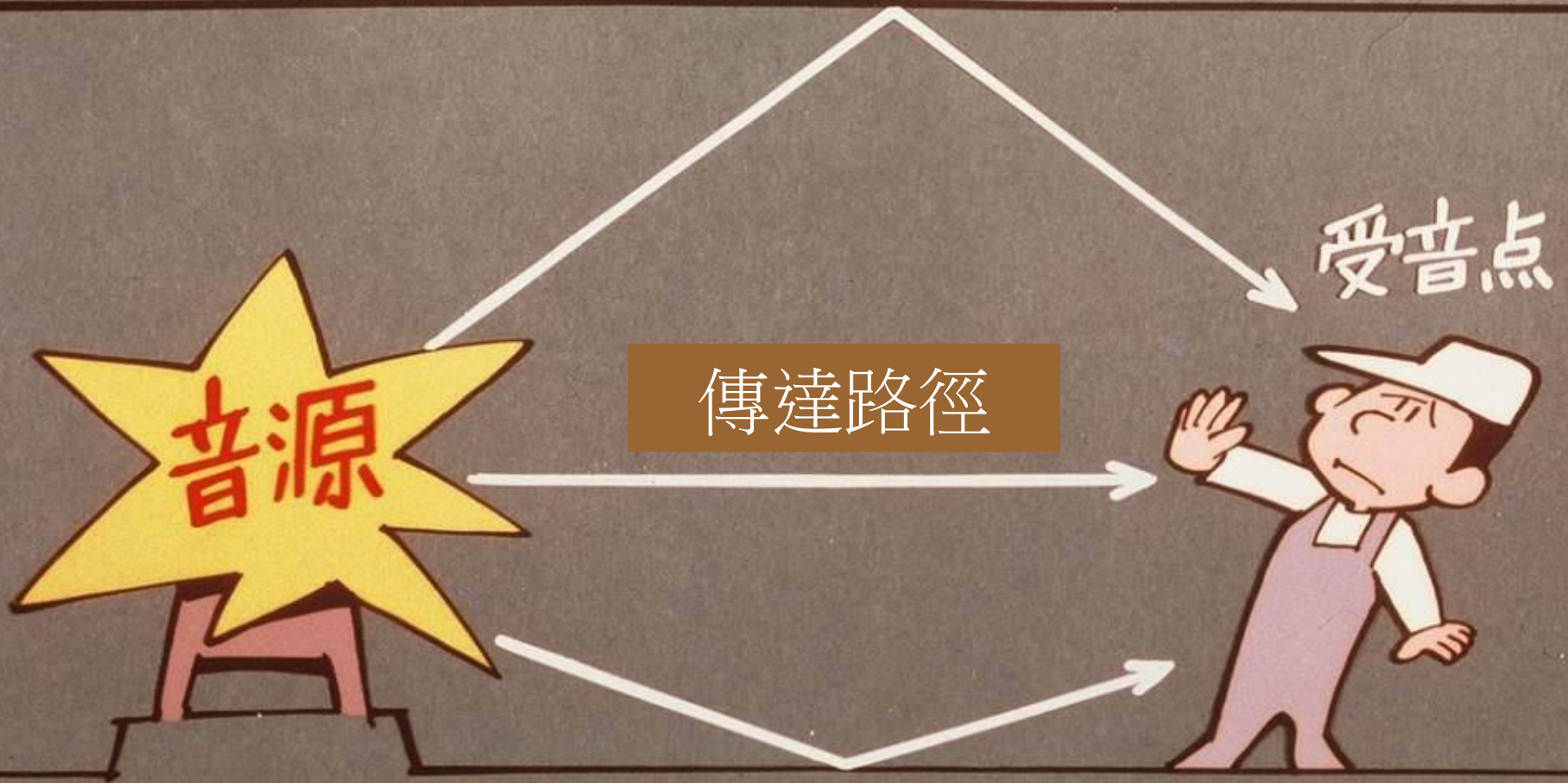
24H 沐博 聊天 網咖  
淑女熱線: 2388-1515  
男士熱線: 2370-1818  
店址: 西門町廣場街76號5F



# 壹、基本原理

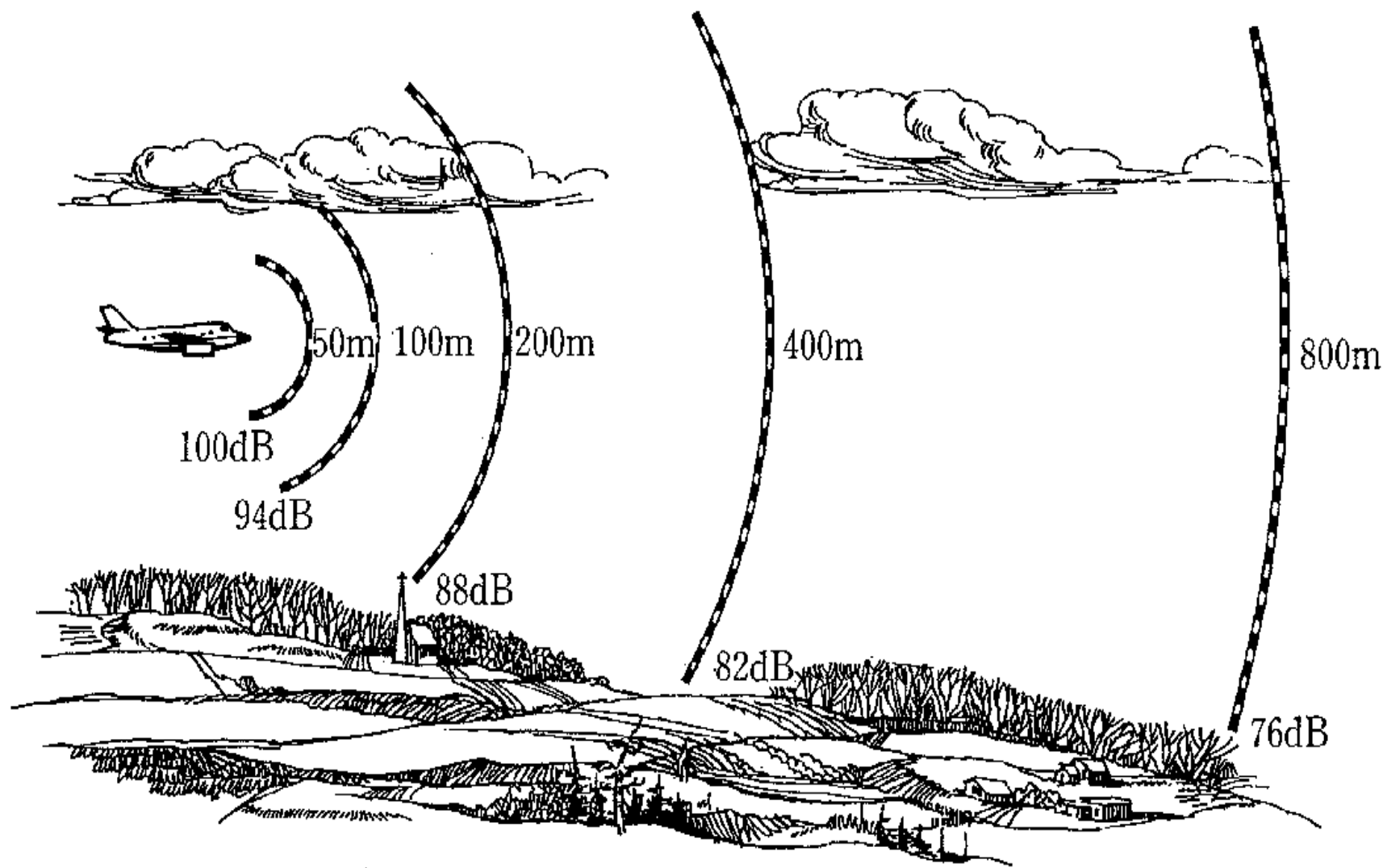
## 噪音的傳播特性

有反射面時，就有直接音與反射音



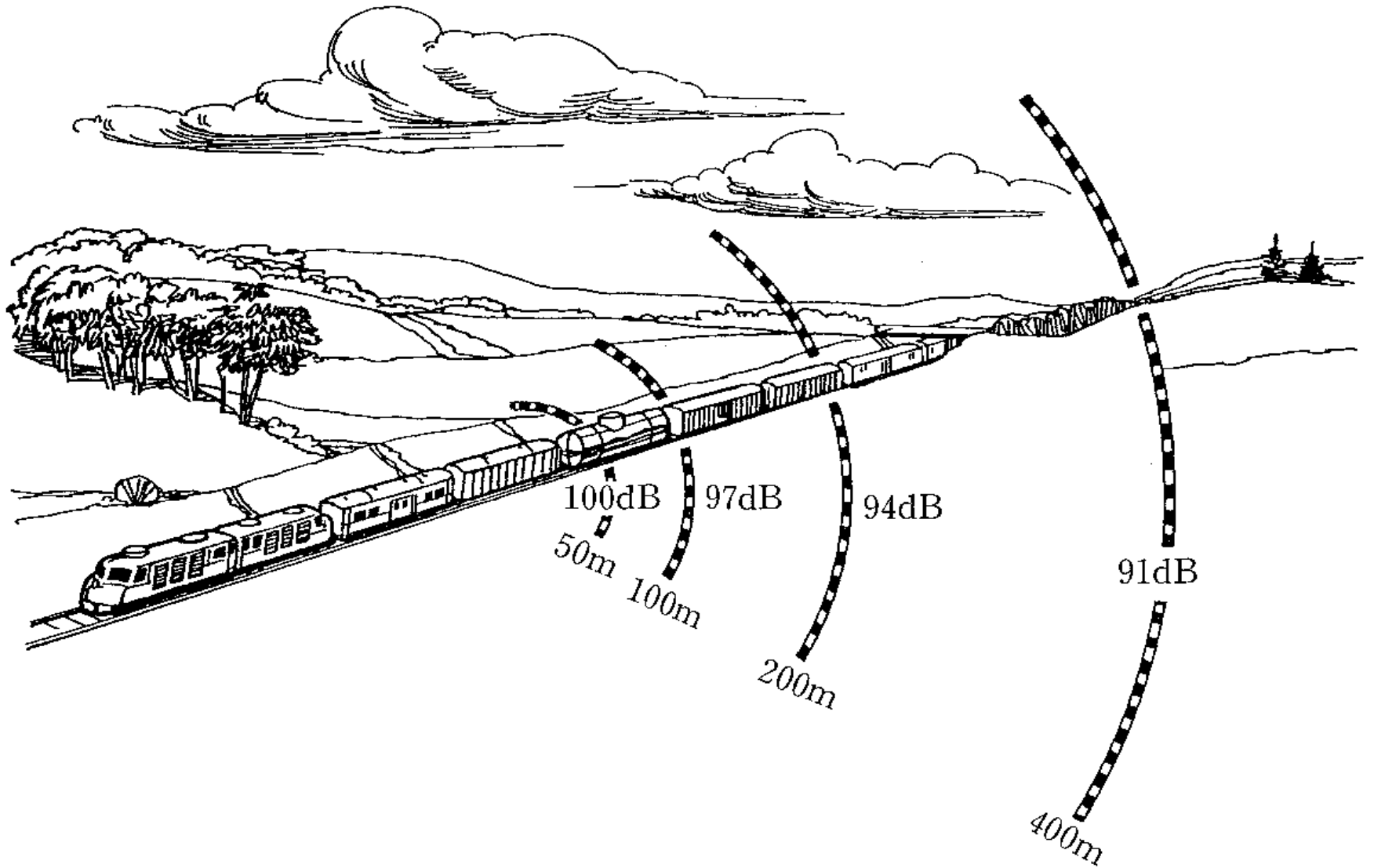
# 壹、基本原理

## 噪音在傳播中的衰減



# 壹、基本原理

## 噪音在傳播中的衰減



**古**：在兩千多年前的中國古代《說文》和《玉篇》中就有關於噪音的解釋：“擾也”，“群呼煩擾也”。也就是說，那時只有人聲喧嘩成為煩擾人的噪音。

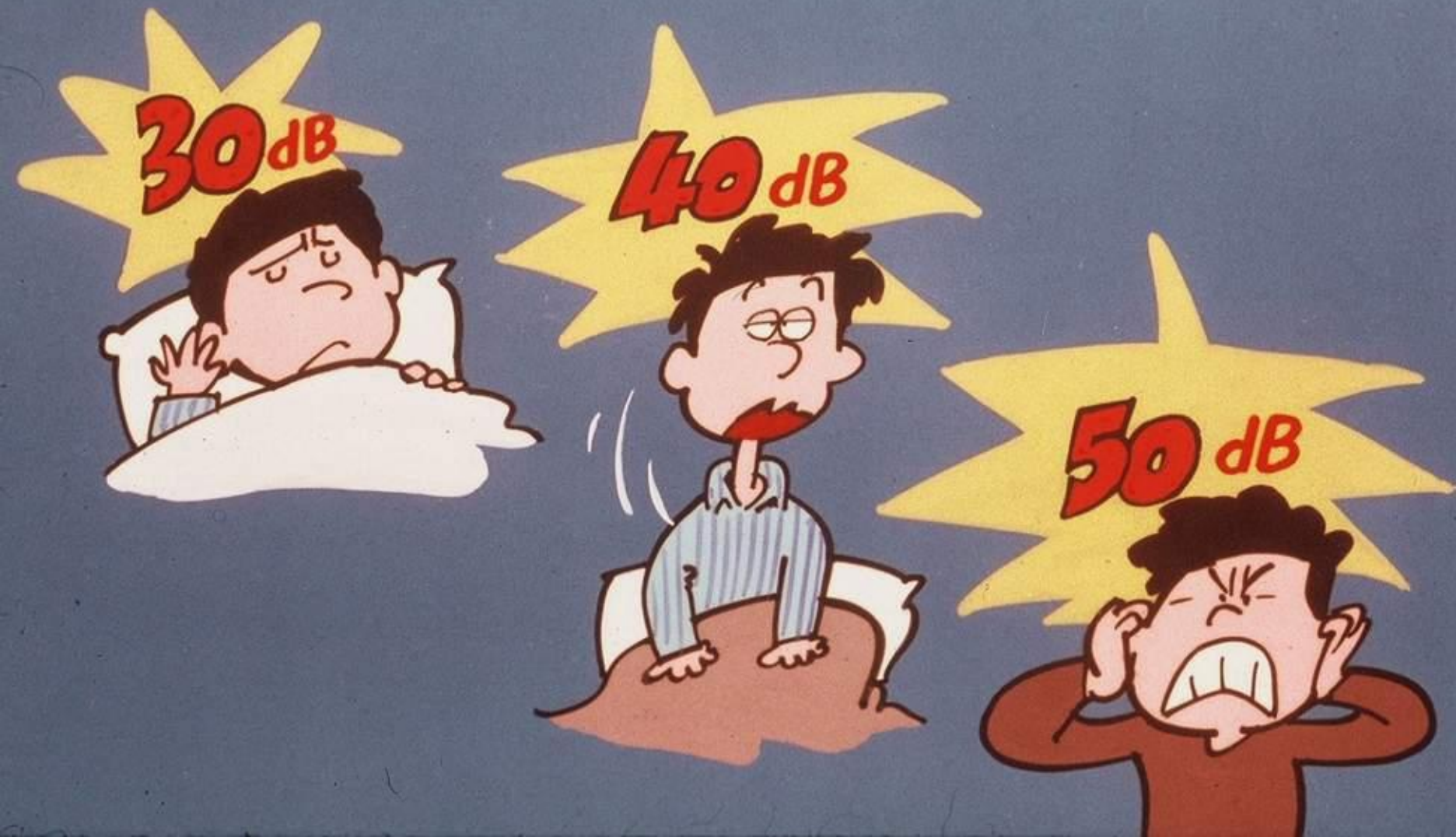
**今**：可稱之一般正常耳朵覺得聽不慣的強大音響、令人覺得不愉快的聲音、妨害彼此交談的聲音、妨害思考能力的聲音、妨害休息或睡眠的聲音、會引起生理上各種障礙的聲音。

**中**：噪音管制法中第三條中亦有明確之定義：“本法所稱噪音，指超過管制標準之聲音”。

**外**：美國勞工部職業安全衛生署(OSHA)將噪音定義為“會傷害聽力的聲音”。

# 壹、基本原理

噪音的定義

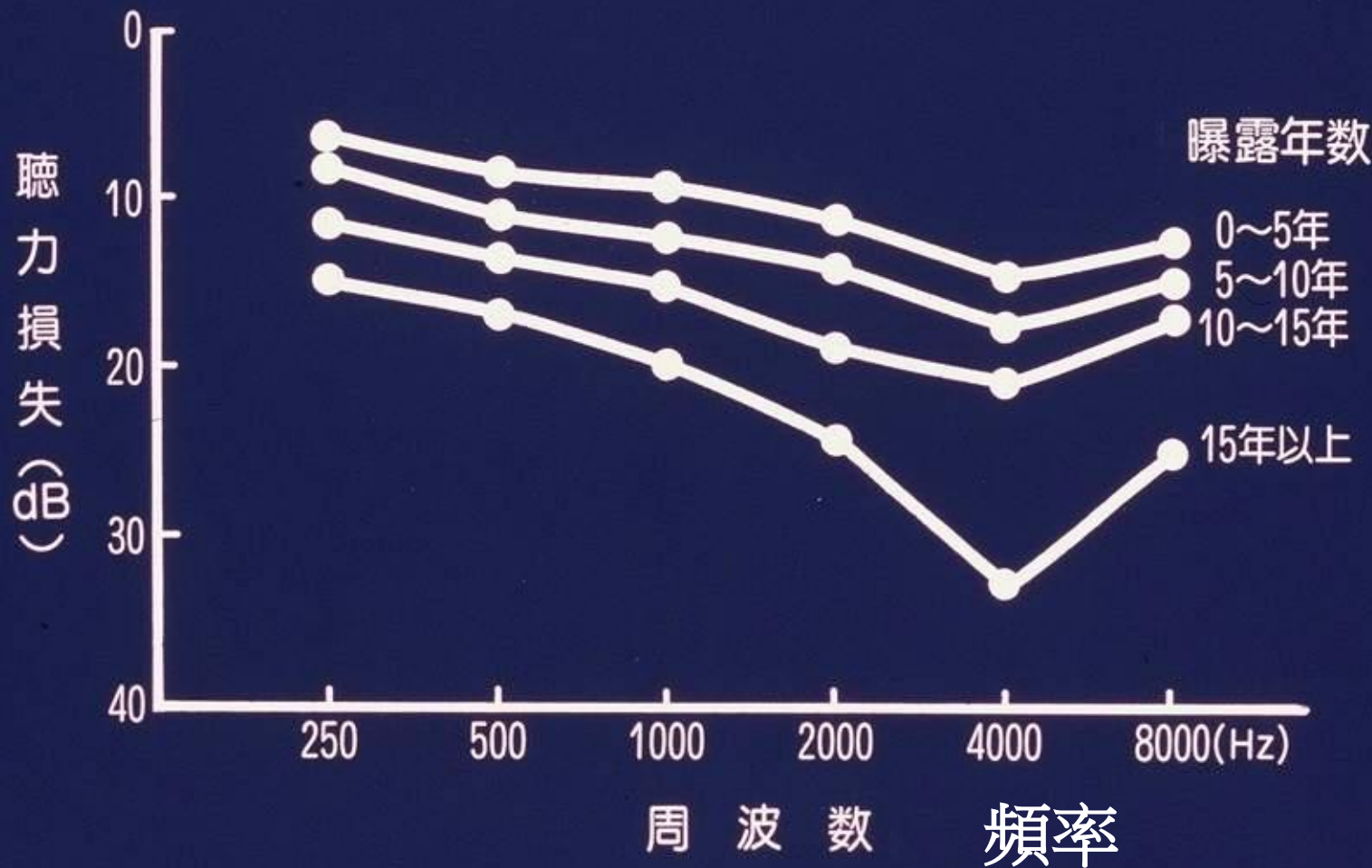


# 壹、基本原理

## 噪音的定義



# 騒音性難聴のオーディオグラム



高噪音環境與噪音性重聽之進行

# 人體對於噪音的生理反應

【分貝】



飛機起飛聲



爆竹

防盜器

聚眾高歌



夜間洗衣機噪音

時鐘滴答聲

120

110

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

聽力損失

工作效率降低

干擾談話

影響學習

睡眠

耳痛



干擾談話

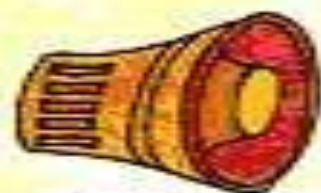


低聲交談

干擾睡眠



安眠



噪音



耳朵



聽力受損



腦部



失眠  
神經衰弱



身體



消化系統失調



心血管系統疾病



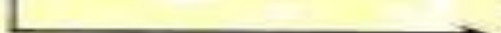
性功能失調



腎功能障礙



甲狀腺功能失調



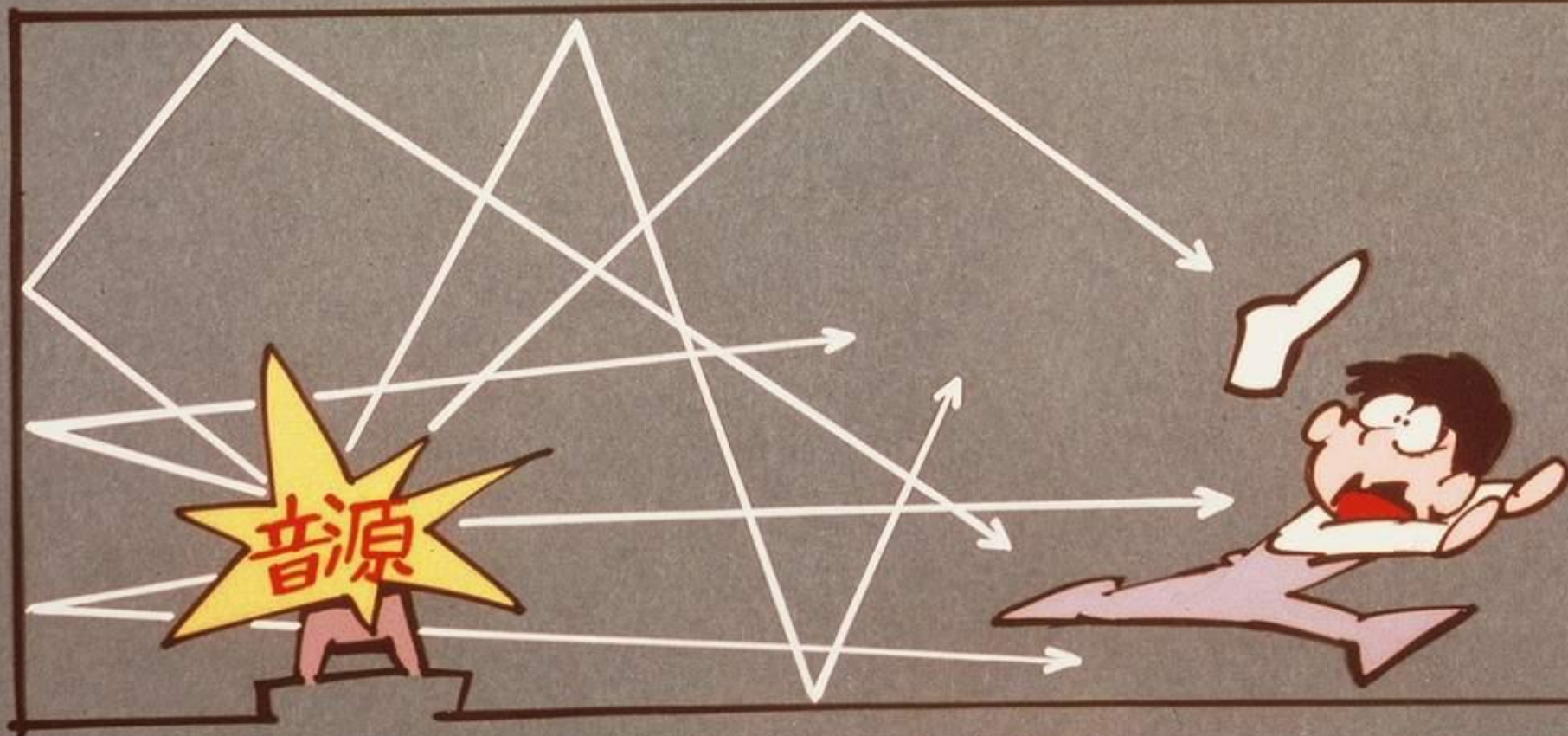
分泌等功能失調

### □ 分貝計算：

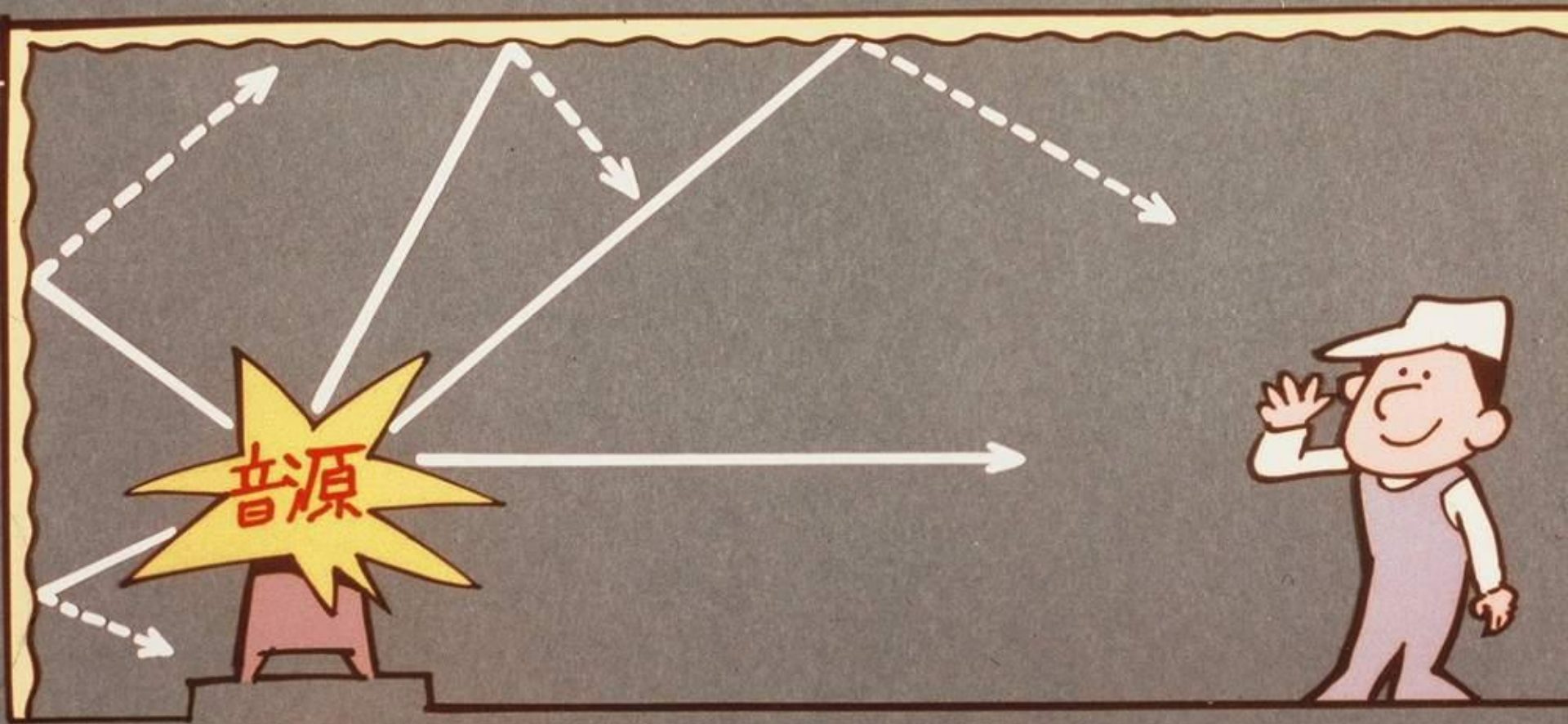
$$L_{p\text{total}} = 10 \log \left( 10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}} \right)$$



噪音之傳播路徑很多，而噪音不會減少



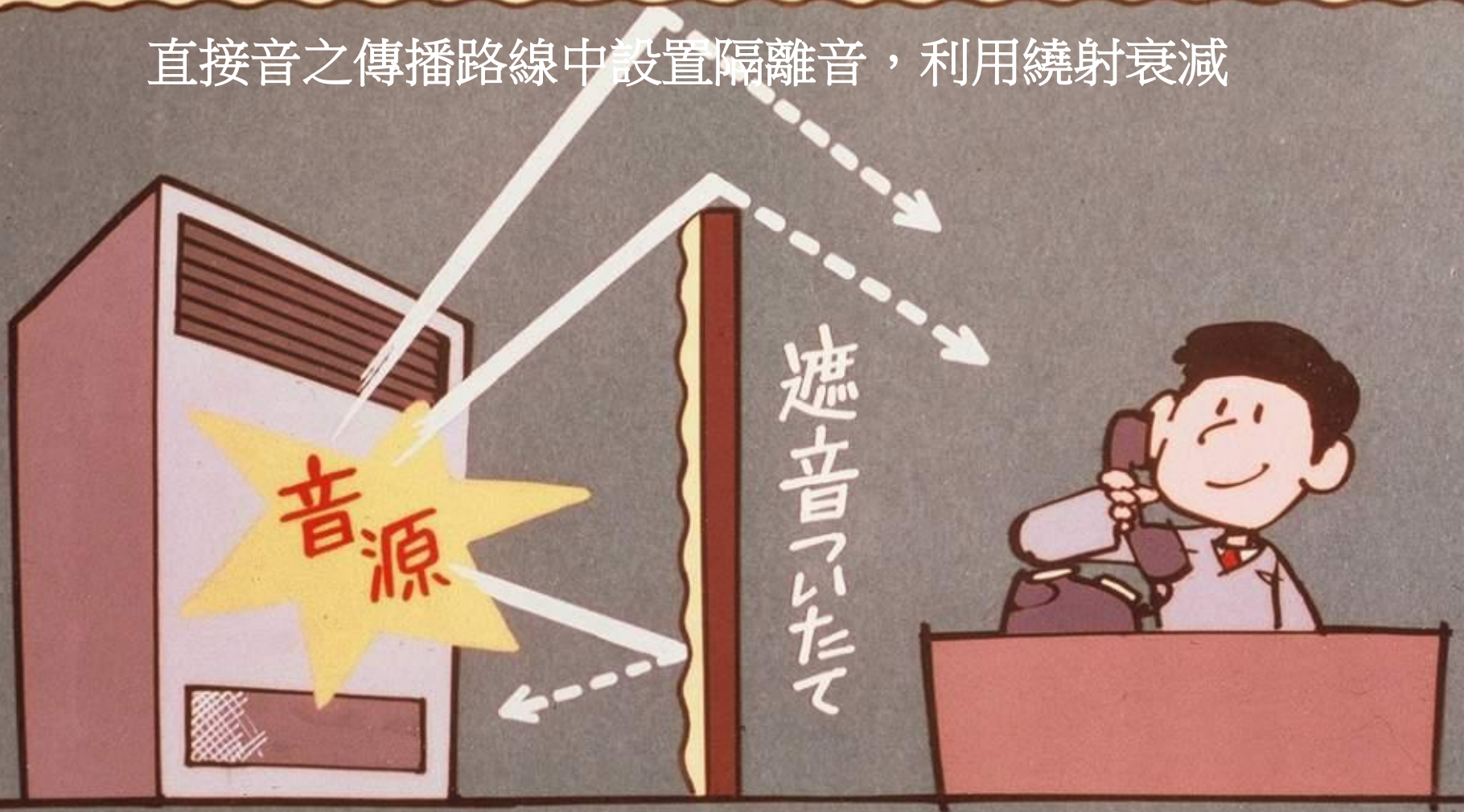
反射面儘量吸音使反射音能量減少



# 壹、基本原理

## 噪音傳播

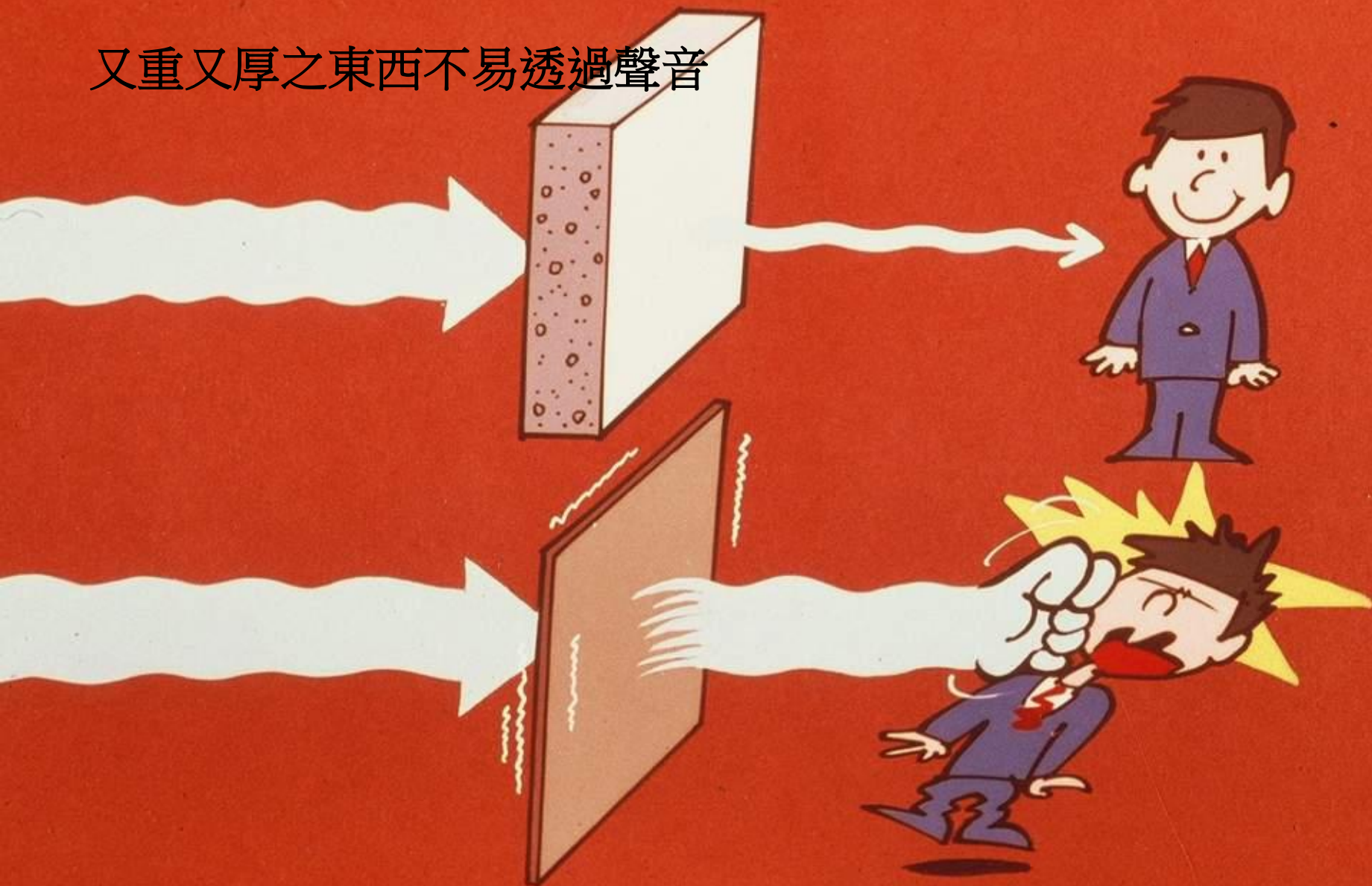
直接音之傳播路線中設置隔離音，利用繞射衰減



# 壹、基本原理

## 噪音傳播

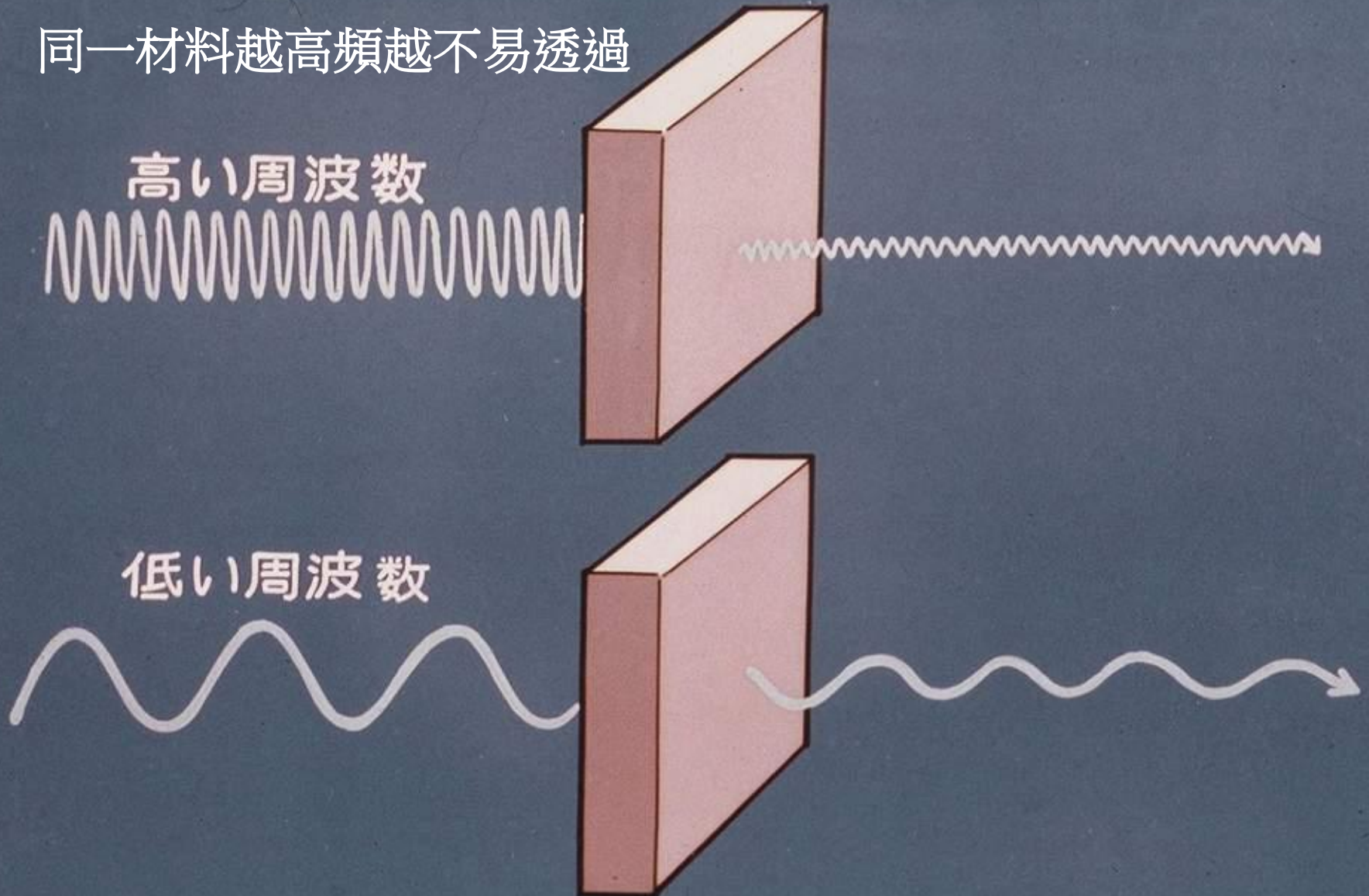
又重又厚之東西不易透過聲音



# 壹、基本原理

## 噪音傳播

同一材料越高頻越不易透過



# 壹、基本原理

噪音傳播



# 壹、基本原理

## 噪音傳播

反射性大的材料包圍時內部噪音會增加

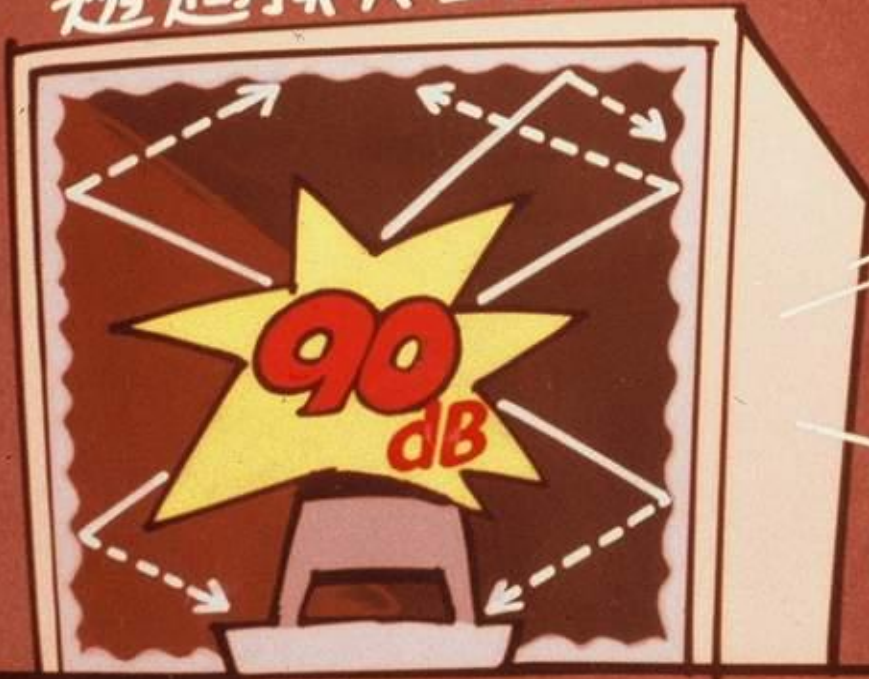


# 壹、基本原理

## 噪音傳播

內部加吸音可以解決此問題

透過損失 20dB



70 dB



蒐集

### 國內外之資料

- 隔音牆
- 高架道路裏吸音設施
- 隔音窗
- 隔音罩
- 鋪低噪音路面



Kazo Expressway, Tokyo, 大塊混凝土牆



Yokohama, Japan, 透明板



Australia, Stacked Panels, 混凝土式



Pittsburgh, USA, 大塊磚牆式



上海延安路，透明板式



青島，透明+金屬混合式板



上海延安路，PVC 板式



上海延安路，PVC 板式



中山高 103K+300，透明板式



竹南頭份，透明板式



Bern, Switzerland，太陽能板



コンクリート製防音壁設置直後  
(1984. 九州)



臨海工業道路防音壁  
(1984. 大分)



統一型防音壁  
(1984. 九州)

コンクリート製矢はず模様防音壁  
（1985. 関越）





表面にツタをからませる(関東)



統一型パネル上に透光パネルを施工(阪神)



ポリカーボネートと透光パネル、角度によって乱反射し視界低下(中央)



統一型パネル内側に  
植栽(東関)



掘り割構造上で設置(常磐)



(名神)



(外環)





(首都)



車専用道と分離緩衝  
帯(豊島区)



間闕木材を使用した防音壁(大分)

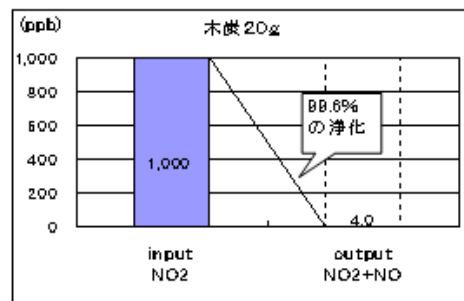
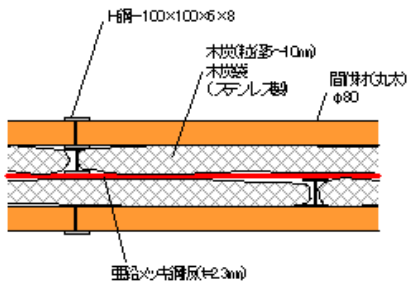
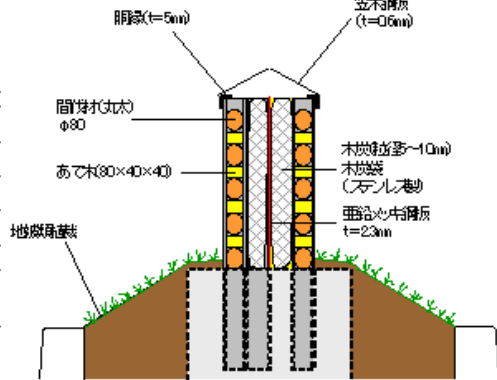
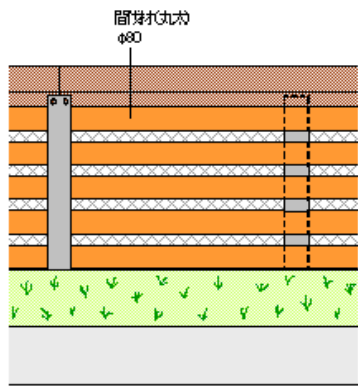






木炭

## 植生基盤工事



# 國內外交通噪音改善及防制資料

## (一) 超高隔音牆

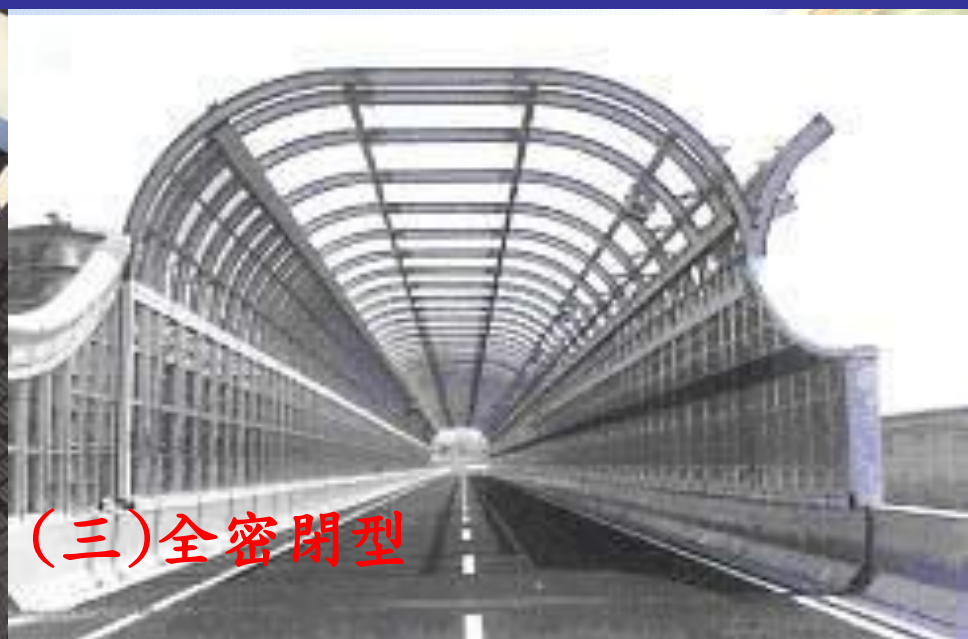


# 國內外交通噪音改善及防制資料



道路用防音壁 Road  
Soundproofing Wall

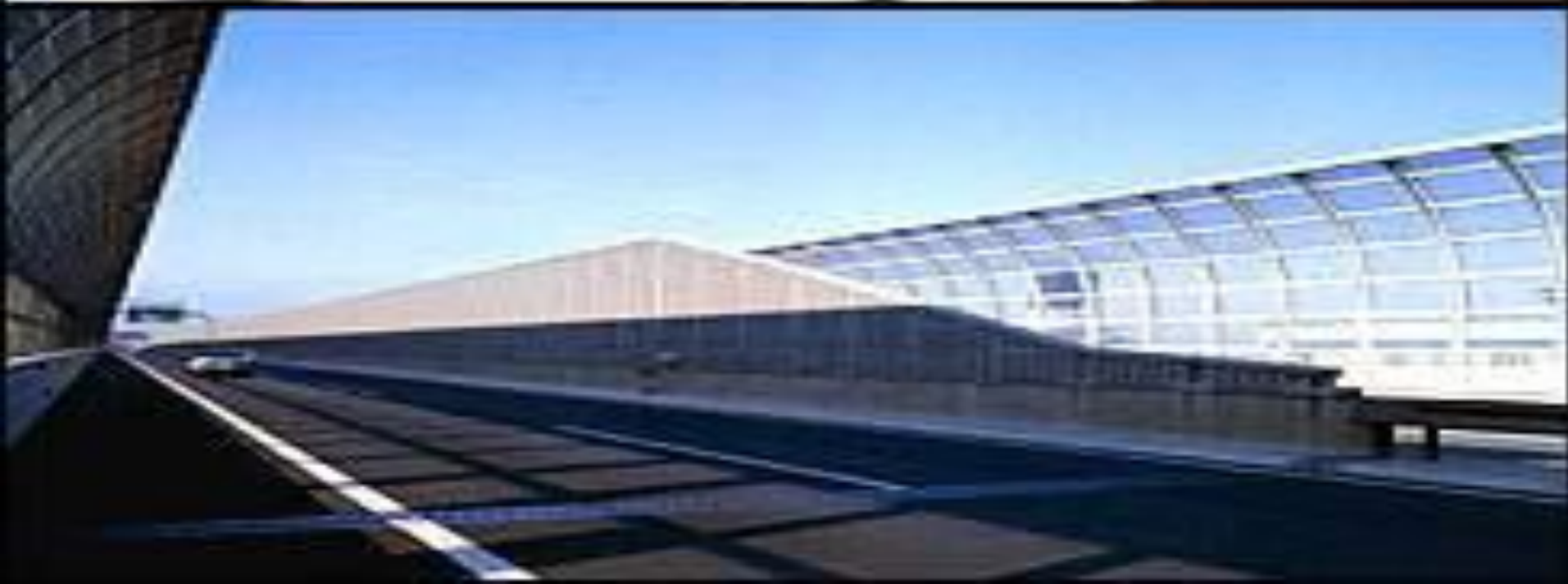
(二) 半密閉型



(三) 全密閉型



(四) 倒L型



# 國內外交通噪音改善及防制資料



吸音筒應用實例



# 道路遮音壁頂部消音裝置



PHF



PHG



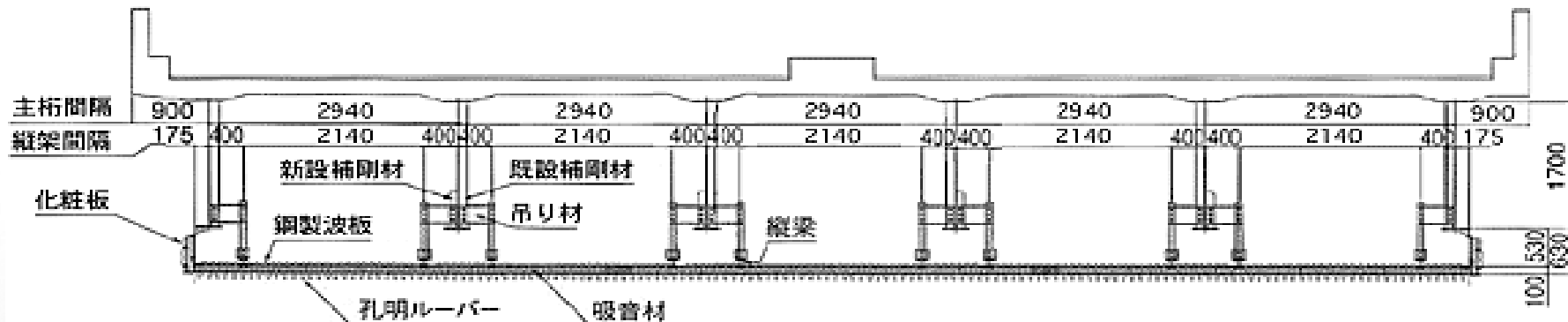
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG\\_NO=C B-050026&TabType=&nt=nt](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=C B-050026&TabType=&nt=nt)

施工例 (PHG)

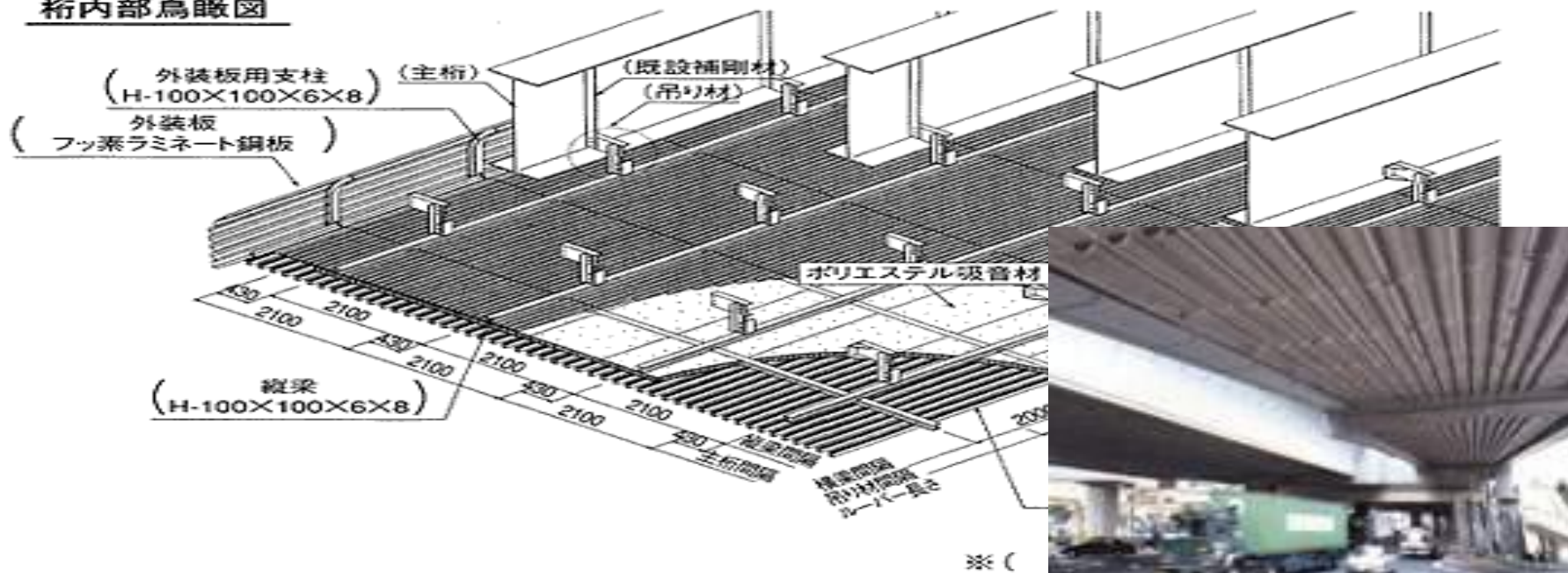
# 吸音筒應用實例

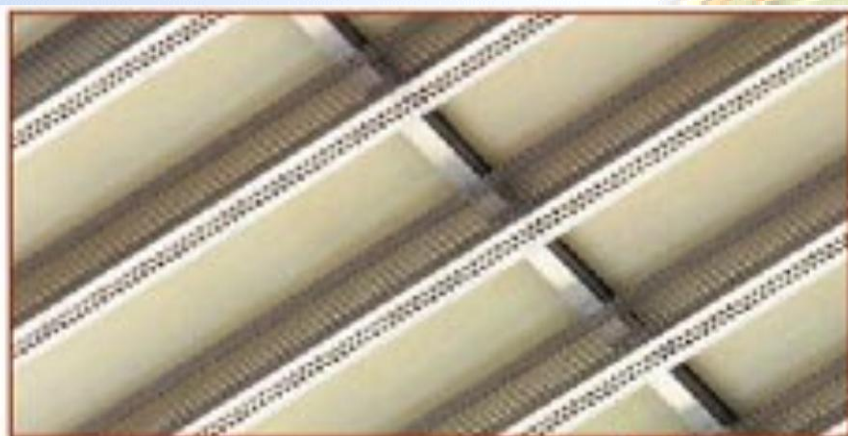
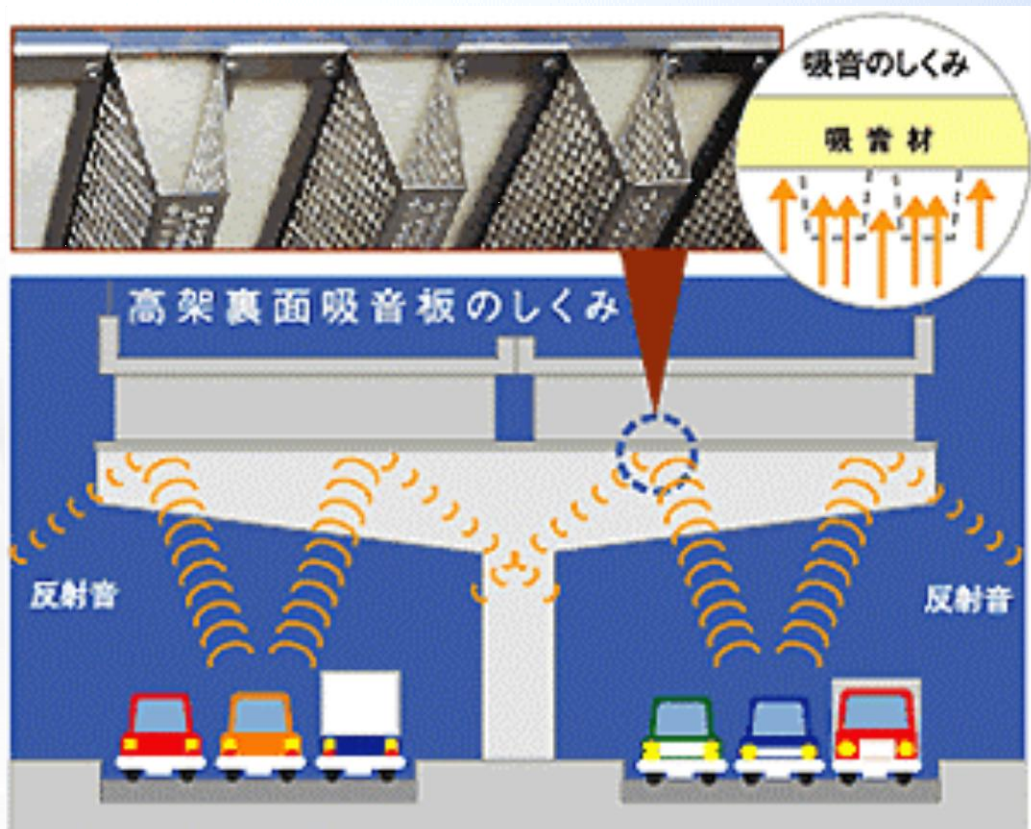


標準横断面図

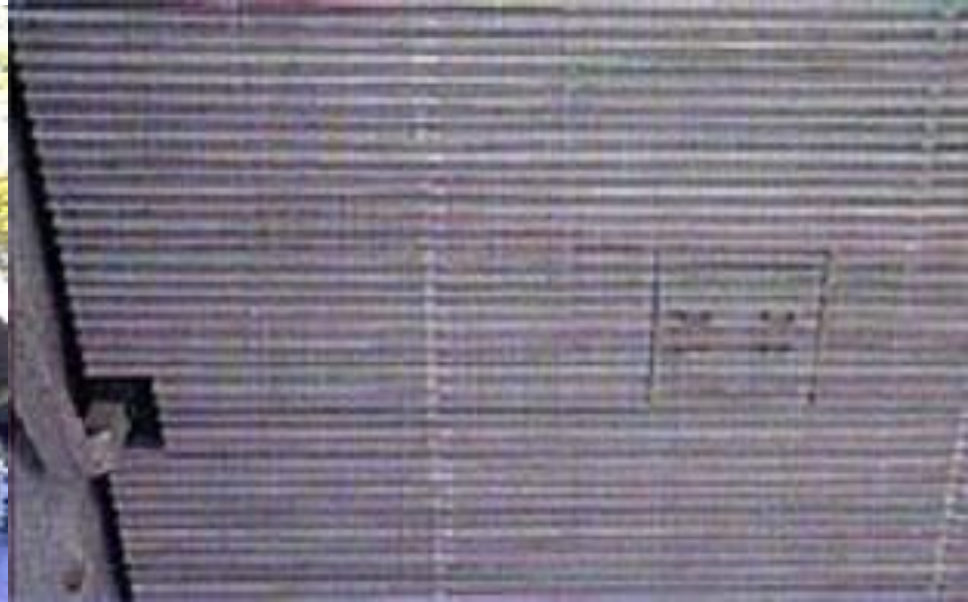


桁内部鳥瞰図





高架裏吸音板







在住宅施工之雙重玻璃窗

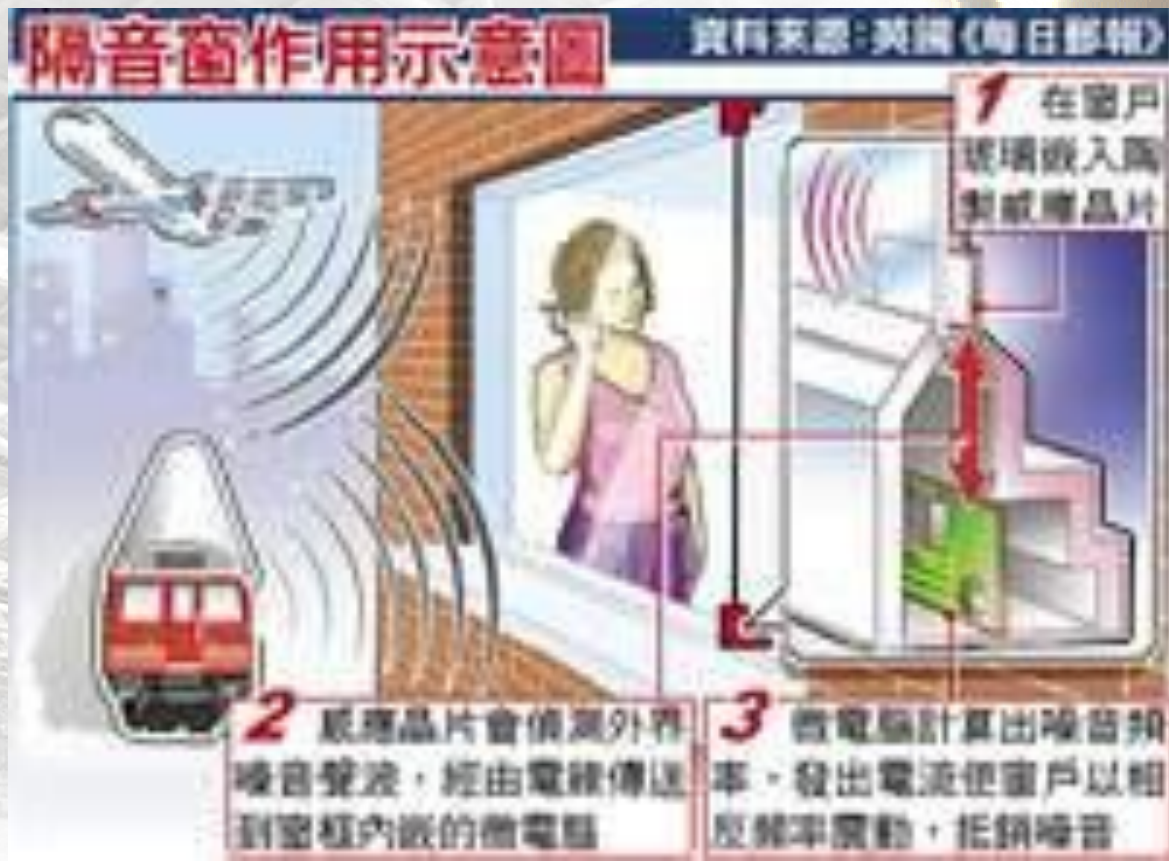


飯店之雙重玻璃窗



醫院之雙層玻璃窗

由德國佛勞霍夫研究所（Fraunhofer Institute）與達姆城科技大學（Darmstadt University of Technology）研發的隔音窗，秘密在於只有郵票大小的陶製感應晶片和窗框內部鑲嵌的微電腦。專家指出，窗戶是外界聲音進入屋子的主要途徑，音波震動窗戶，會讓屋裡的人感受到外界的嘈雜，因此他們在窗戶加感應晶片來偵測噪音頻率，把資訊傳到微電腦，經計算後便能通電發出相反頻率震動窗戶，讓兩種音波相互抵銷。

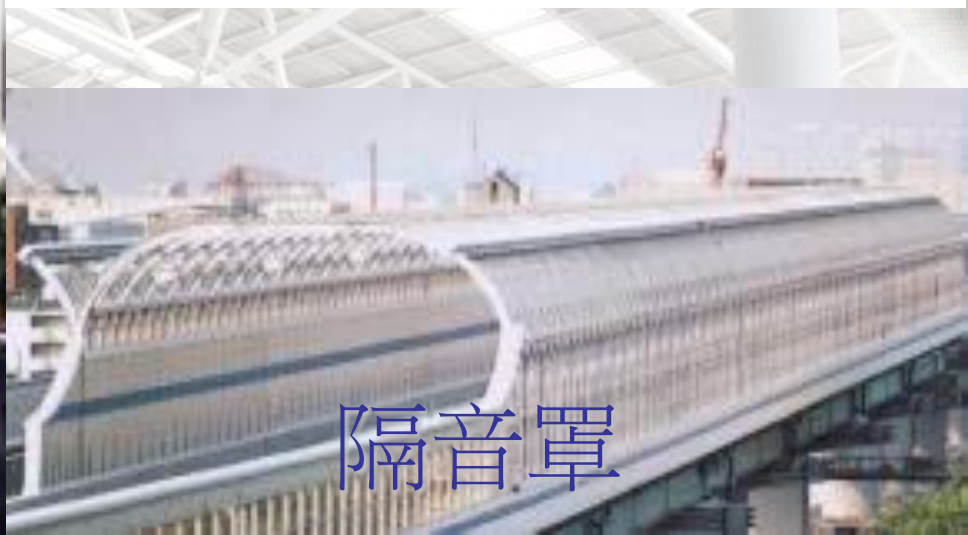
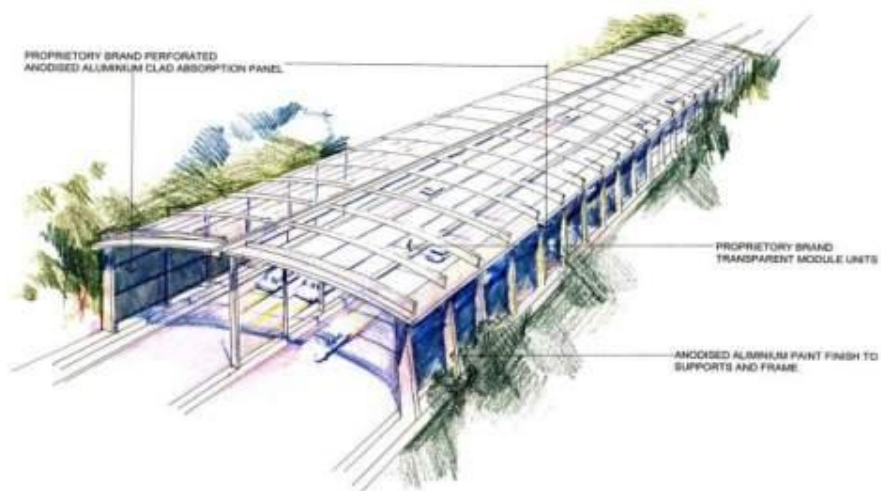


# 國內外交通噪音改善及防制資料

## 隔音罩



### 隔音罩



### 隔音罩

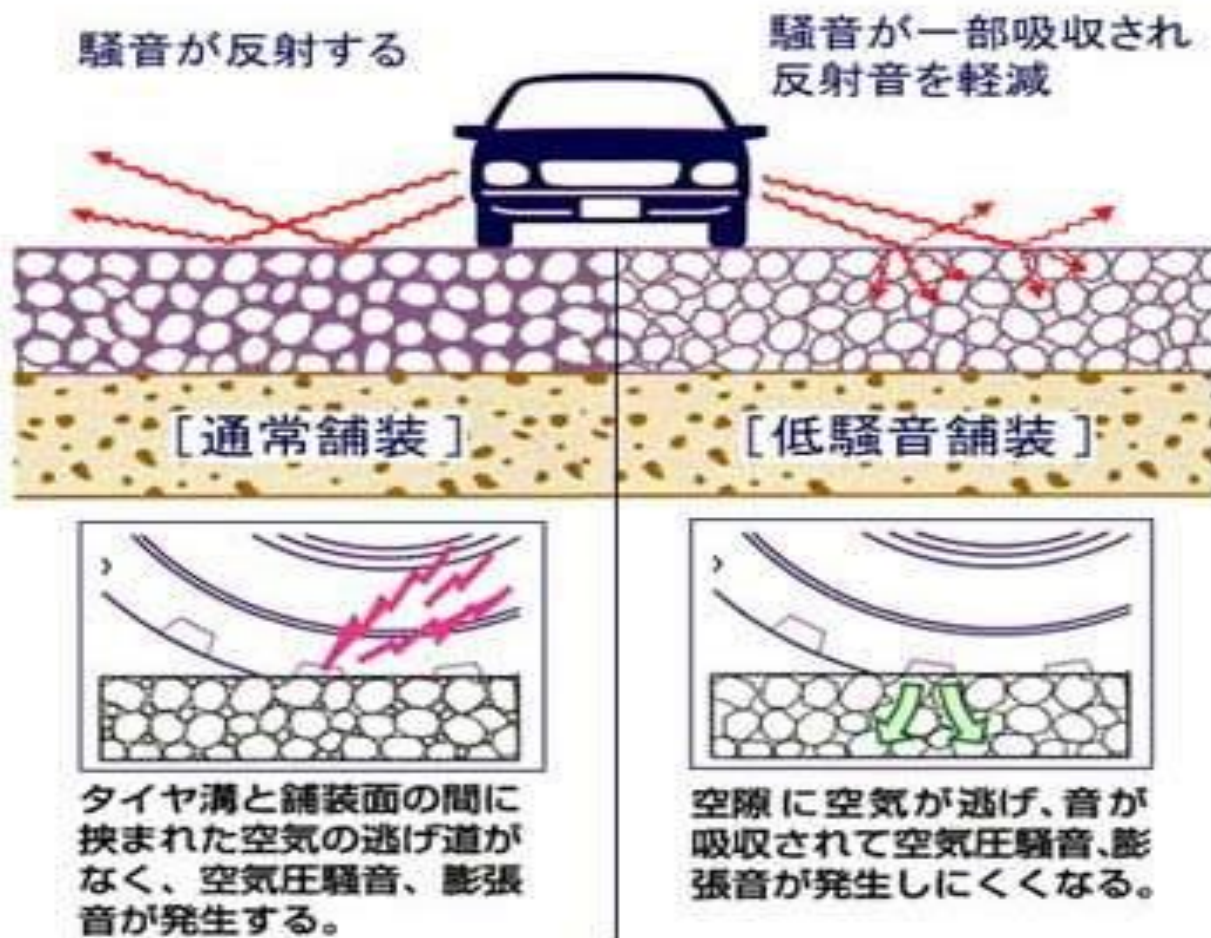


11月20日，北京動物園上空的隔音空中  
隧道正式建成通車。高架路長約1800m

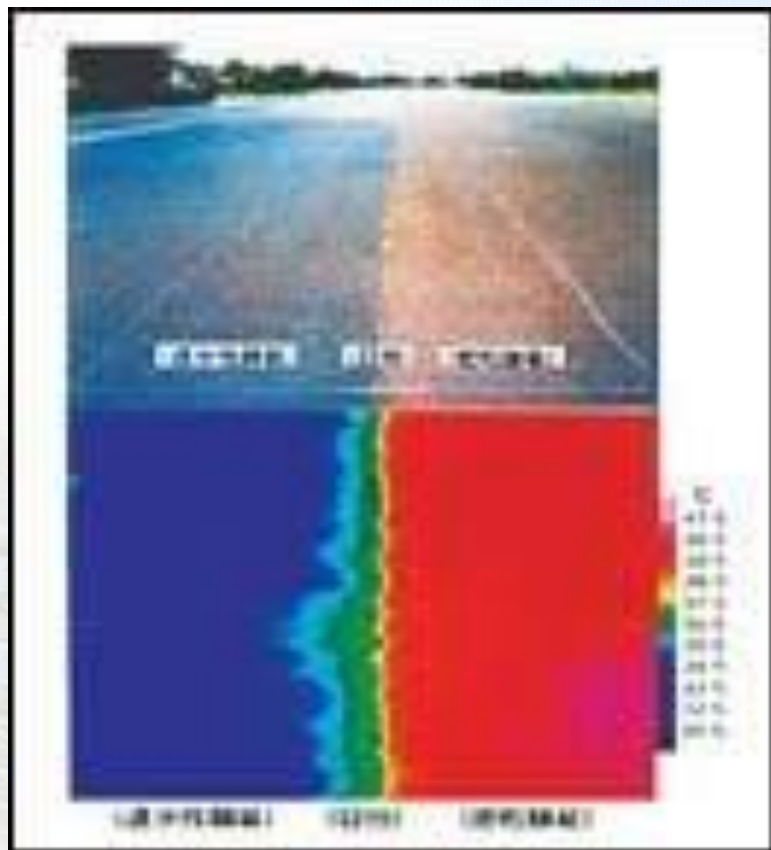
2006年12月25日，  
全長10.3公里，  
大連石門山



鋪低噪音路面示意圖

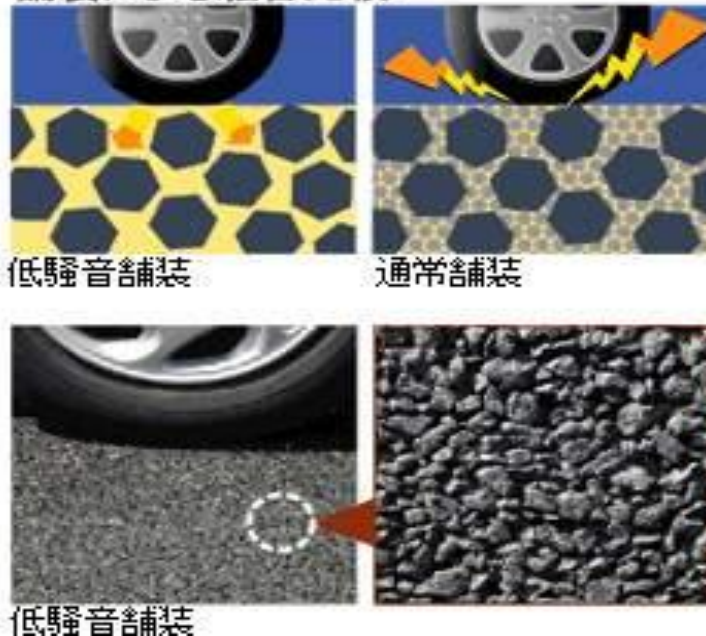


車廂  
7-12  
→



開級配多孔隙瀝青路面試驗路段測得的結果，較傳統的密級配路面降低噪音3~6dB(A)，雨天可降低約8dB(A)。試驗路面層的孔隙率大多為20%左右。

鋪裝による騒音比較



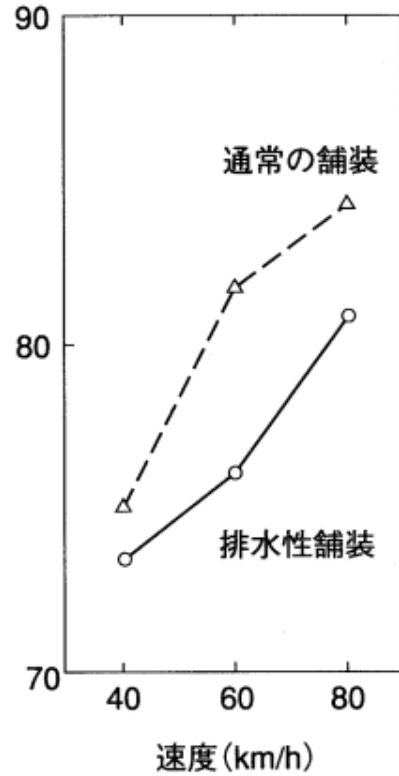
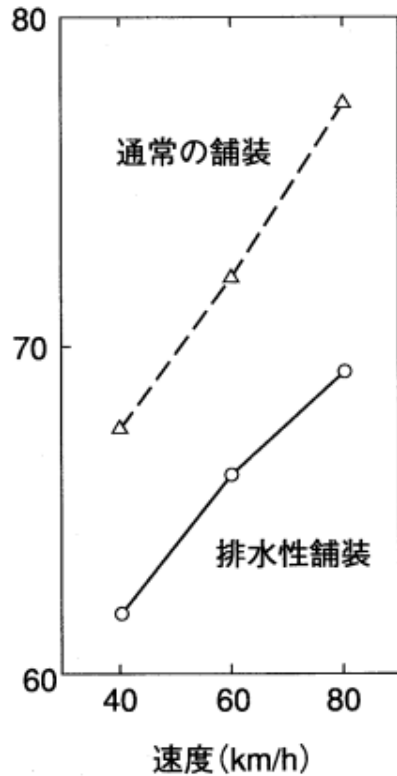


ポーラスアスファルト舗装と密粒  
アスファルト舗装の断面比較

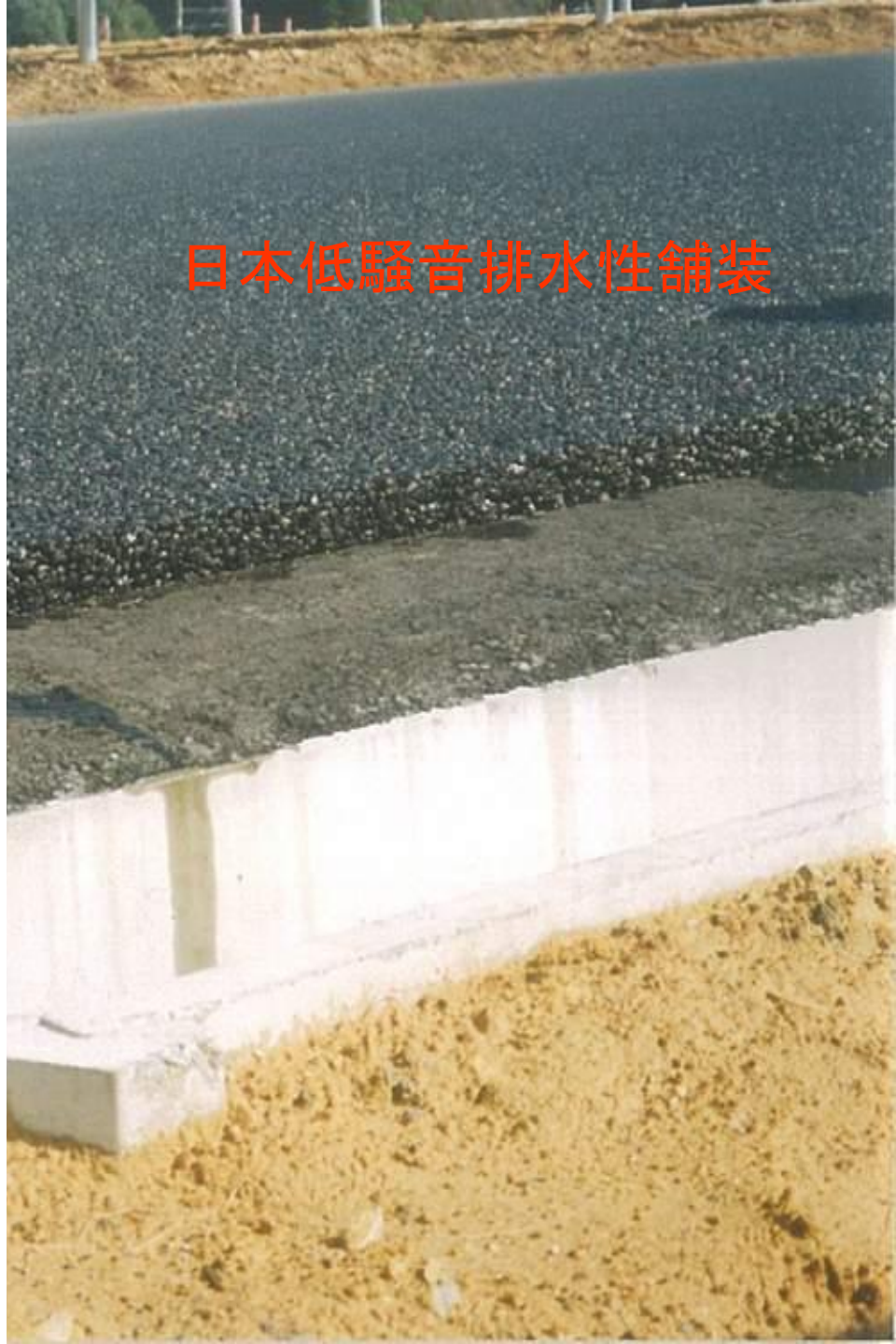
## 日本低騒音排水性舗装

小型車定常走行

大型車定常走行



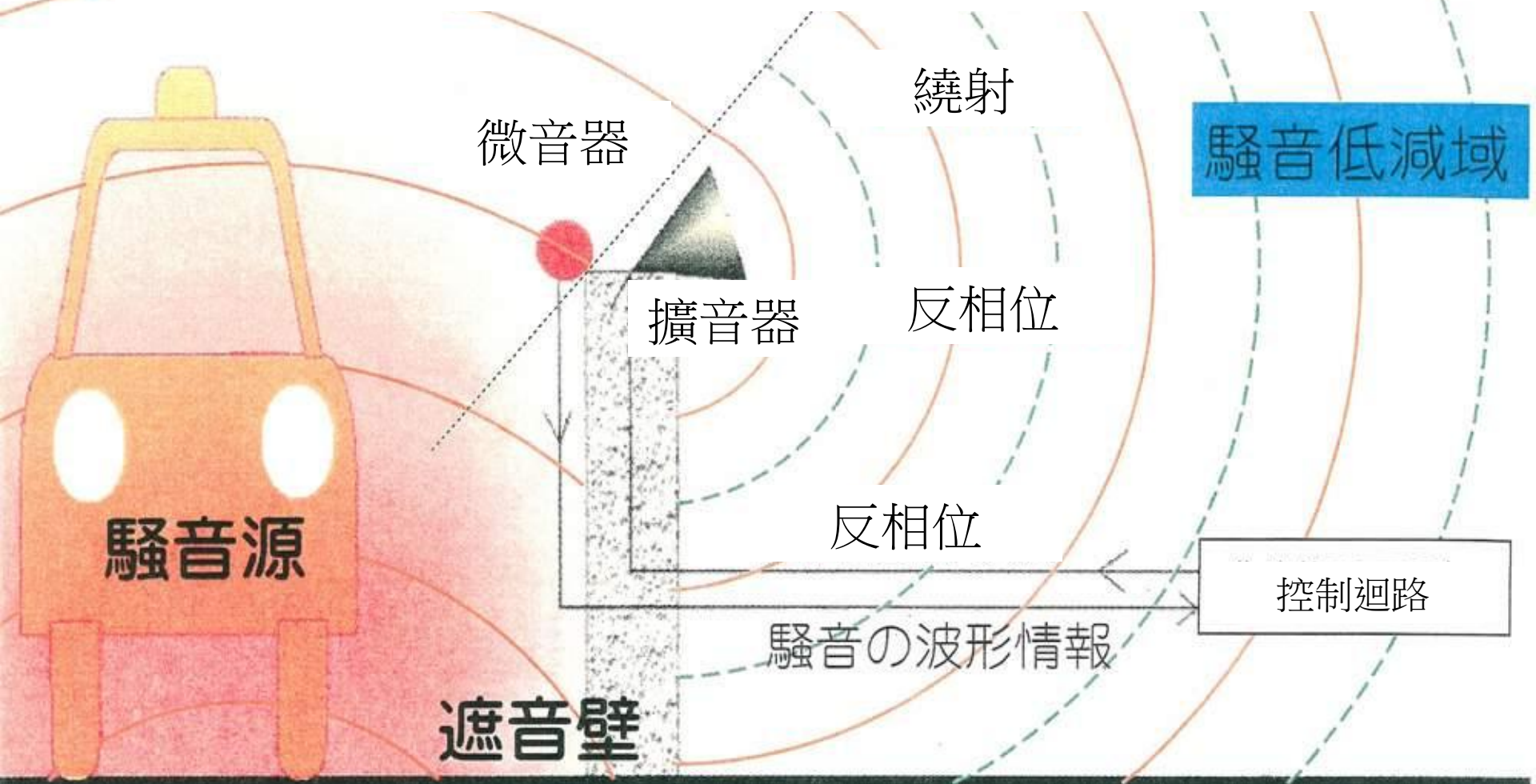
定常走行時のポーラスアスファルト舗装の  
騒音低減効果



利用於隔音牆之例（概念圖）

直接波

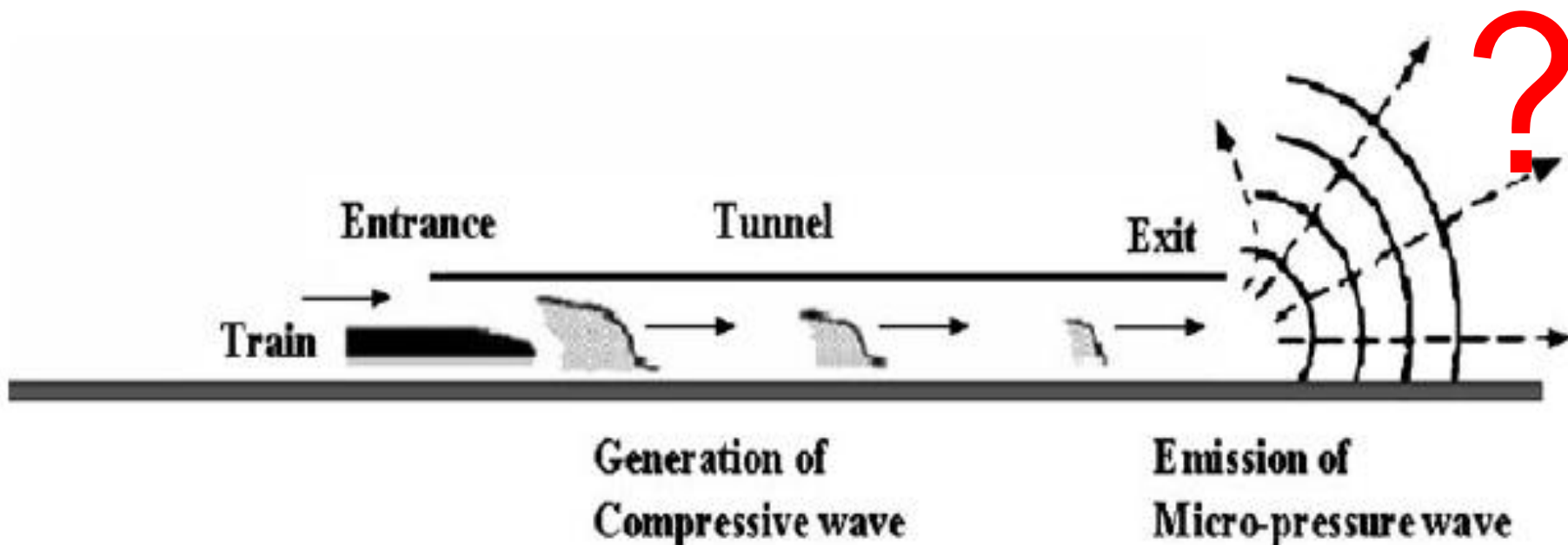
# Active Noise Control之應用



# Why? How?

## 長空間內聲場特性及噪音控制之研究

Study on Field Properties and Noise Control in Long Enclosures



壓縮波的演化和微氣壓波的產生



TAMKANG  
UNIVERSITY



淡江大學



淡水 台北 蘭陽 網路

## 第二部份 CONTENT

1.前言

2.文獻回顧

3.理論部分

4.數值模擬

5.實驗結果

6.比較分析

7.結論

# 1.前言

## 一、為什麼要研究長空間聲場？

在預測隧道、工廠排氣管道等聲音傳播時，通常以長空間作為聲學傳播模型進行研究。



但是用傳統的房間聲學理論計算得到的結果與長空間聲場不符合。長空間中隨著與音源距離的增加噪音量穩定衰減，而普通房間中在離音源距離較近時，按點音源的規律衰減，離開一定距離之后迴響聲起主要作用，沒有明顯的衰減。

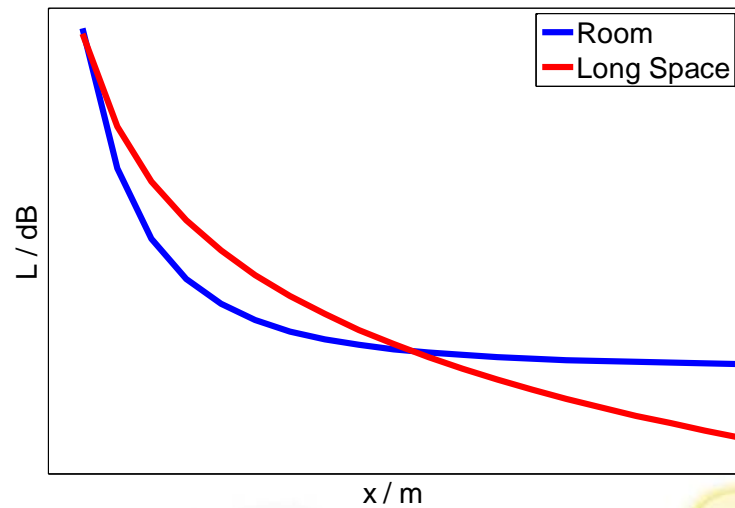
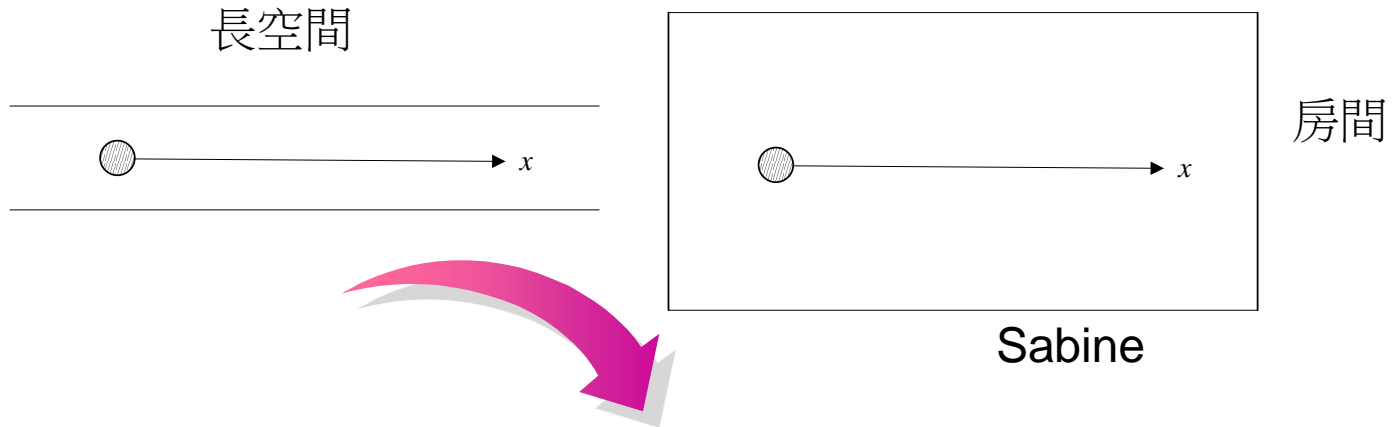
WHY?  
房間聲學?  
長空間?

因此研究長空間音場對隧道工程和工業生產中的噪音**預測和控制**有重要意義與目的。

因此用房間聲學的理论推導長空間的聲場**不**能得到準確的預測結果，要採用**不**同的方法計算。

# 1.前言

## 一、為什麼要研究長空間聲場？



長空間和房間的衰減趨勢比較



探討不同頻率，在長空間中傳播，並不是以往預測中的呈線性衰減，而是受到頻率的影響，呈現非線性的衰減。



在波動方程式的理論上，分別從理論模型和實驗進行一長空間具有旁支及不同位置貼吸音材料情況進行研究分析。



使用聲波理論導出長空間和垂直旁支管音場的理論解，並利用虛源法的相干模型，對長空間音場及噪音衰減進行預測。

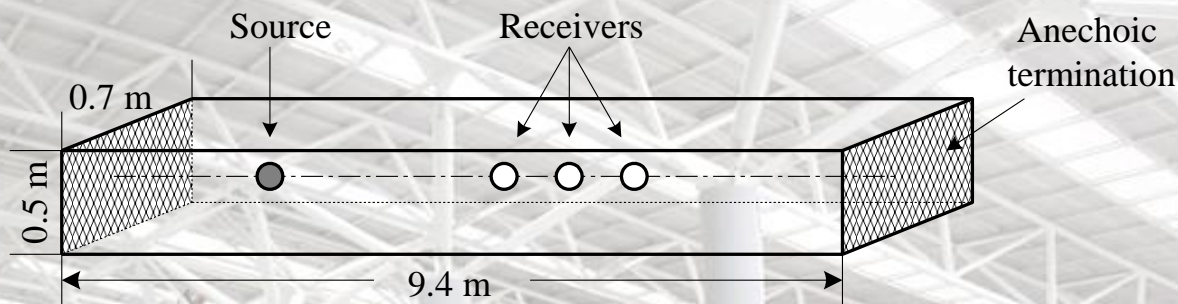
#### 差異：

由於傳統長空間聲學理論所假設的音場為擴散型的(Diffuse field)，但在此假設下，與實際的長空間不完全適用(Kang, 1996d)，因為在特定頻率不同模態(Mode)的共振形態是各不相同，衰減曲線具有非線性的趨勢，這與傳統的長空間的理論是不一樣的。

類別	音場	距離衰減曲線	聲能密度
傳統的房間聲學理論	擴散	線性衰減	處處相同
實際的長空間的規律	非擴散	非線性衰減	處處不相同

#### 定義：

聲學上一般將三維長度中，有一維的長度大於其他二維的長度的3倍，這樣的空間稱為長空間。



# 2. 文獻回顧

## 三、長空間音場研究的歷史

學者	音場	聲能密度	衰減曲線	混響時間	理論和實際
日本 Yamamoto	半擴散	處處相同	線性衰減	不變	與實際並不吻合。
美國 Davies	沒有定義，但不是擴散音場	處處不同	非線性	—	理論預測和實際結果吻合。
英國 Redmore		處處不同	非線性	—	相對音壓的實際測量結果與虛源法的預測結果符合。但當隧道中採用了吸音性能很高的材料時，隨著隧道與音源相距長度的增加，隧道末端得到的衰減比實際的衰減要高，且是呈非線性的衰減。
Sergeev		處處不同	非線性	長空間與普通空間的混響時間有著不同特性	沒有給出任何測量的結果來論證他所提出的理論模型。
英國劍橋大學馬丁研究中心		處處不同	非線性	隨隧道長度的增加而增大	通過理論和實驗的觀察，從實用角度提出了“長形封閉空間”的特徵。
日本 Imaizumi		處處不同	非線性	—	採用了錐形光束法計算得出，隧道不同部分處的聲衰減模態與測試結果符合良好，但是仍有一定數值的誤差。
英國 Yang		處處不同	非線性	—	理論預測和實際結果吻合。
香港 Li		處處不同	非線性	—	其數值模擬經比例建模檢驗更加準確。

# 2. 文獻回顧

## 四、現有建立模型方法比較分析

建立模型方法	原理	限制性	預測結果	頻帶考慮	邊界條件	備註
幾何聲學法	虛源法 把介面反射等效為相對應強度的虛擬音源後進行疊加。計算量大。	考慮直線傳播、反射、擴散	較可靠	中高頻	接近剛性	不考慮聲音的波動特性，但考慮能量的疊加
	聲線追蹤法 通過聲源發出的聲線經過邊界多次反射後到達接收點模擬聲傳播過程，並求得各時刻接收點的能量。計算量大。		不可靠	高頻		
	聲束追蹤法 原理同“聲線追蹤法”，但是以錐形聲束代替聲線，避免聲線過少導致不能達到接收點。計算量大。		很可靠			
輻射成像法	把邊界分塊後計算各塊之間的能量交換，當能量交換平衡後求得接收點的音量。計算量大。		不可靠		漫射邊界	
有限元法和邊界元法	對空間劃分網格後，用線性方程逼近聲波方程和邊界條件而求得各點 SPL。計算量大。	考慮直線傳播、反射、繞射、擴散、散射	很可靠	低頻	給定邊界條件	考慮聲音的波動特性，但不考慮能量的疊加
統計能量分析法	通過注入能量，耗散能量，儲存能量和輻射聲功率之間的關係從而求得 PWL。計算量大。	考慮直線傳播、反射、擴散	可靠	中高頻	沒有特定要求	不考慮聲音的波動特性，但考慮能量的疊加

# 本文研究&工作架構Scope

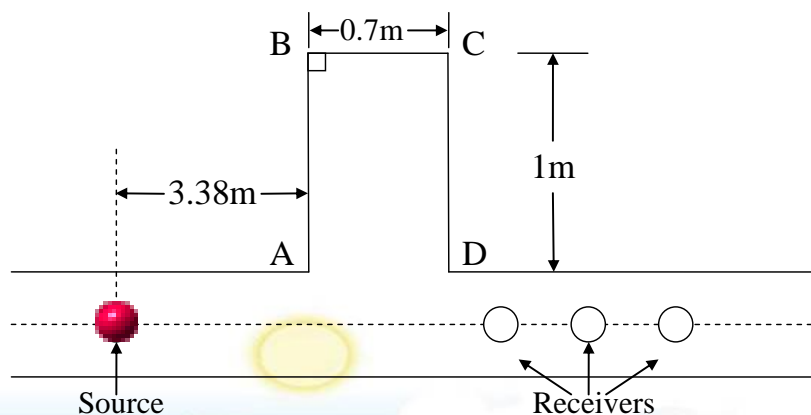
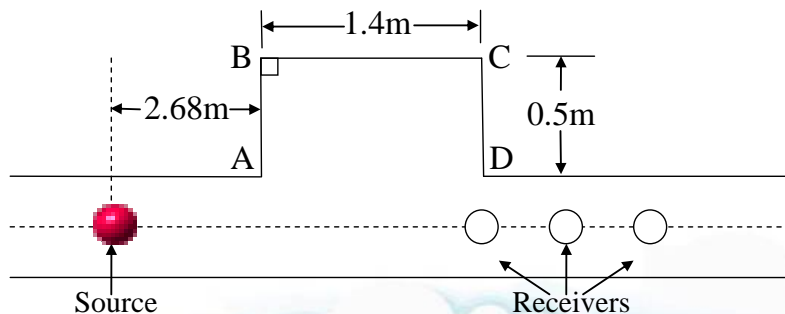
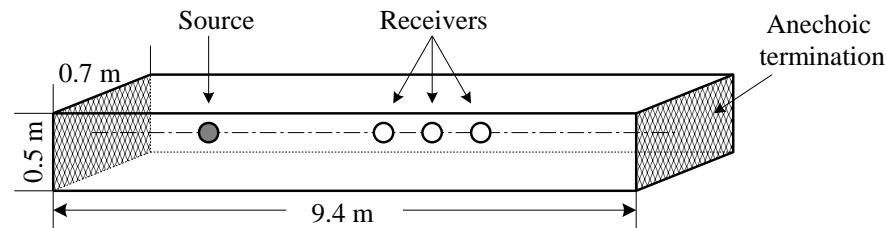
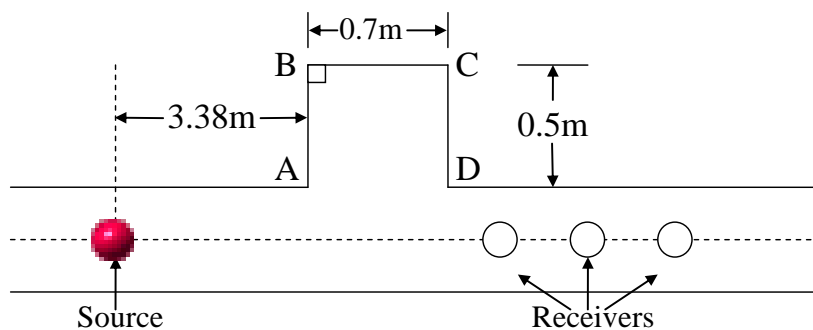
前人工作與  
本文工作不  
同之處？

1. 本文探討不同吸音材料鋪設方式在長空間的噪音傳播特性。
2. 本文研究不同旁支管道的噪音傳播特性。



前人工作與  
本文工作不  
同之處？

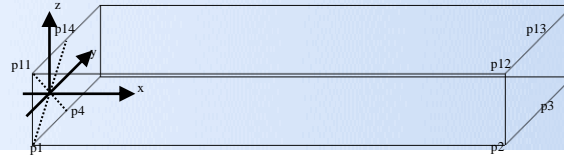
兩端鋪玻璃棉，吸音係數大於0.9，間隔0.5 m，  
中軸線處測量15個點的相對音壓值。無限長旁支  
模型僅在BC段鋪上吸音材料。



# 本文研究&工作架構Scope

1

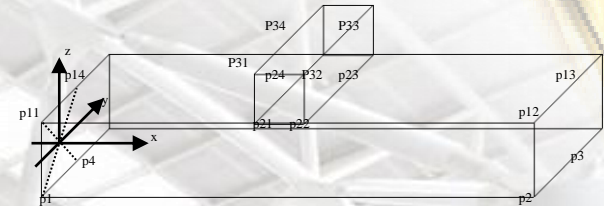
原模型



The straight long enclosure

2

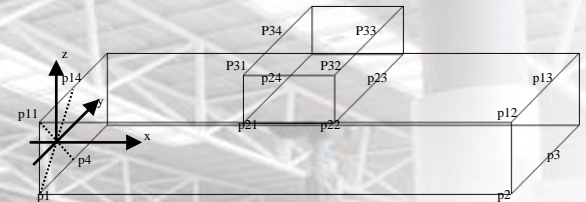
有限長旁支模型



The long enclosure with a vertical branch

3

有限長旁支加寬模型

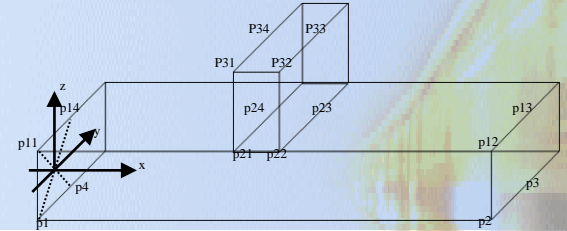


The long enclosure with a widened vertical branch

# 本文研究&工作架構Scope

4

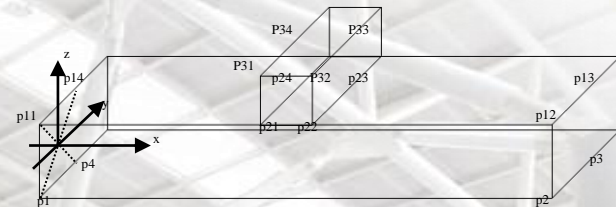
## 有限長旁支加長模型



The long enclosure with an extended vertical branch

5

## 無限長旁支模型

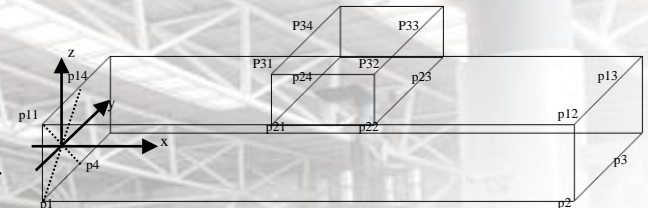


BC段鋪上吸音材料

The schematic diagrams of the scale models for long enclosures with infinite branches

6

## 無限長旁支加寬模型



BC段鋪上吸音材料

# 本文研究&工作架構Scope

1

不同旁支

理論計算  
數值模擬  
實驗結果

原模型  
有限長旁支模型  
有限長旁支加寬模型  
有限長旁支加長模型  
無限長旁支模型  
無限長旁支加寬模型

2

鋪設吸音  
材料方式

理論計算  
數值模擬  
實驗結果

音源在正中央

底面、側面、兩個側面  
一個側面和一個底面  
兩個側面和底面

音源靠近側面

靠近音源的側面  
遠離音源的側面  
頂面

音源靠近角落

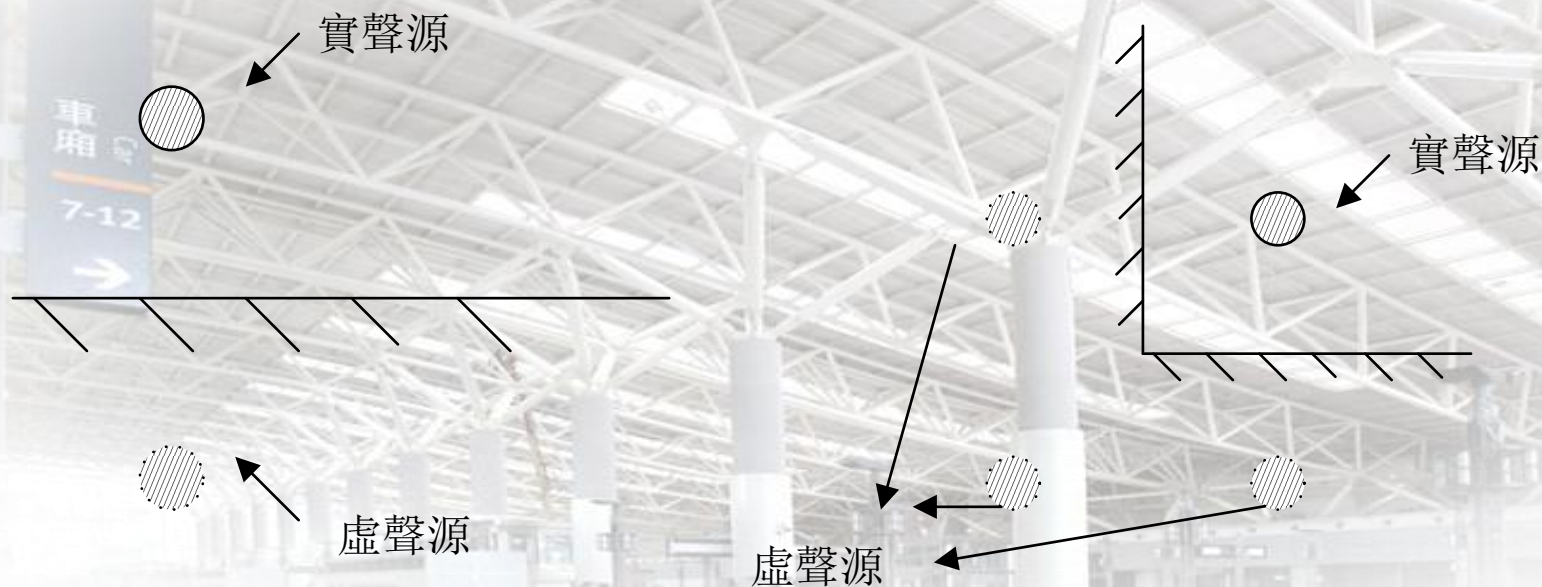
遠離音源的側面和底面  
兩個側面  
靠近音源的側面和底面



# 3.理論部分

## A 虛源法 (Image Source Method, 簡稱MISM)

虛源法採用了類似幾何光學的等效方法，其基本的原則是：一面反射牆的作用相當於在對稱的位置有一個相同強度的聲源在共同作用。如下面的示意圖所示。由於各個音源在自由空間中的疊加是線性的（可以直接相加），這樣有反射牆的音場問題就轉化為一個簡單的疊加問題。



一面牆與兩面牆的等效虛聲源

# 3.理論部分

## A 虛源法 (Image Source Method, 簡稱MISM)

虛源法用在長空間聲場的計算時，由於兩面牆是相對的，有一面牆產生的虛源會在另一面牆繼續產生新的虛源，由此可以得到無窮多個虛源。（想像置身於兩面鏡子之間，可以看到很多個身影）。

無窮多個音源的共同作用產生的音壓是有限的，因為虛源越來越遠，其作用越來越小（相當於等比數列求和）。

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots = 1$$

虛源法計算長空間聲場

# 3.理論部分

## A 虛源法

所有音源共同作用時，由疊加的方法不同可以分為“干涉模型”和“非干涉模型”兩種。

**干涉模型**：所有音源在接收點產生的”音壓直接相加”得到接收點的音壓：

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

**非干涉模型**：所有音源在接收點產生的”音能量直接相加”得到接收點的音能量。由於聲能量與音壓的平方成正比，所以非干涉模型在接收點的音壓滿足這樣的關係：

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}$$



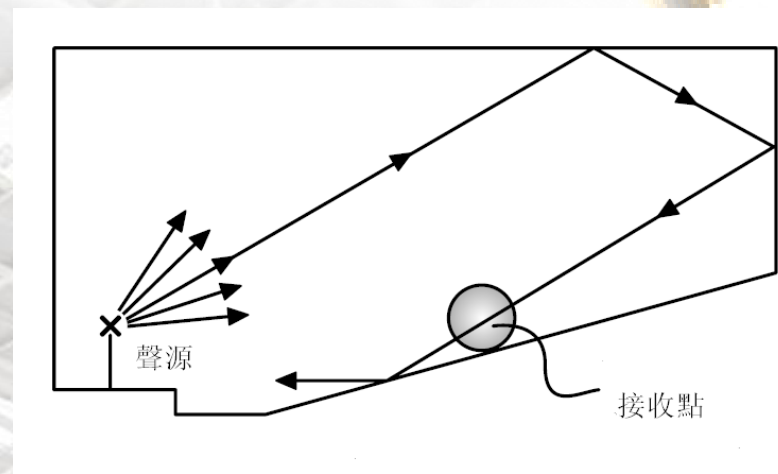
本論文理論計算採用的是干涉模型。

# 3.理論部分

## B 聲線追蹤法 (Ray Tracing Method)

聲線追蹤法是一種直接模擬聲線傳播的方法。這種方法把聲音的傳播類比成光線的傳播，每次遇到反射面就進行一次能量衰減和鏡面反射后繼續傳播，從而求出接收點的音壓。

圖是聲線追蹤法的示意圖。本文中的數值模擬結果就是由 ODEON 軟體進行聲線追蹤完成的。



聲線追蹤法示意圖

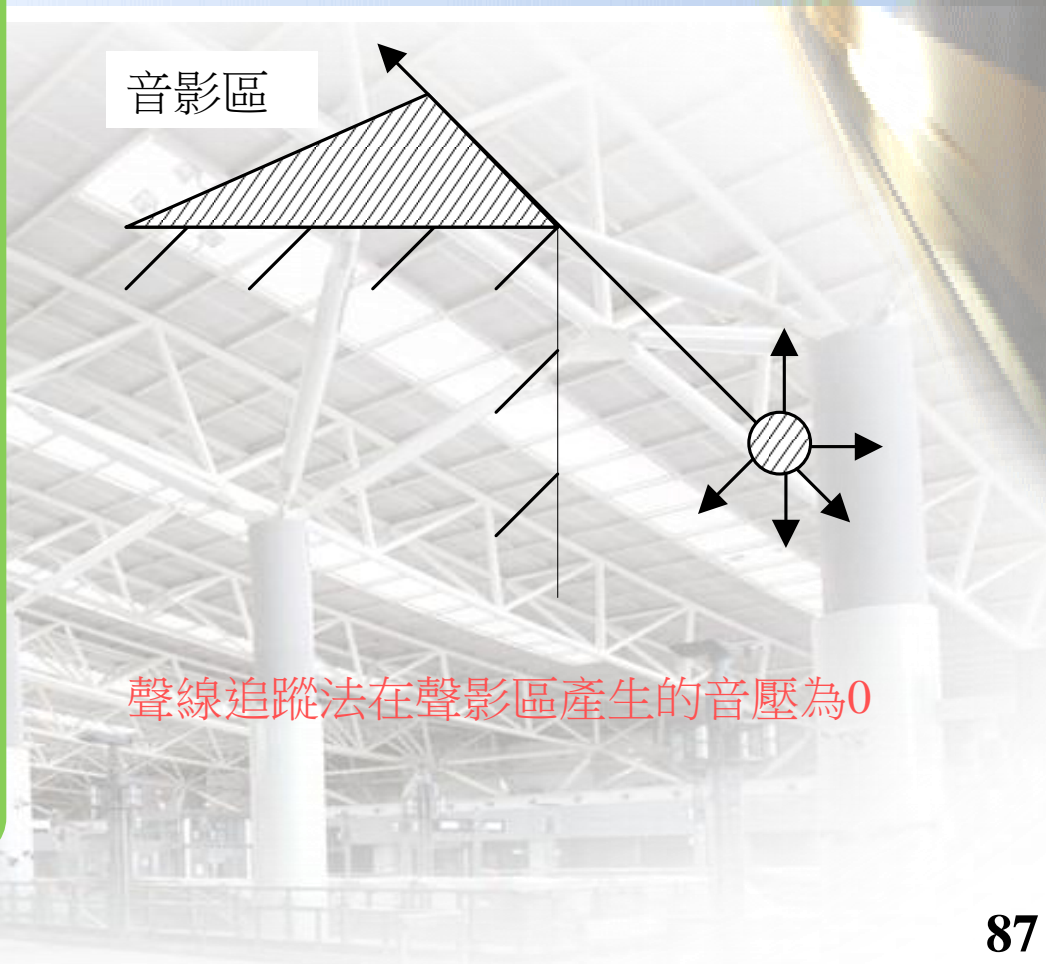
# 3.理論部分

## B 聲線追蹤法 (Ray Tracing Method)

聲線追蹤法的優點是直觀，而且有現成的商業軟件可以使用，只要對長空間進行建模即可計算得到結果。

其缺點是聲線的直線傳播不能達到“聲影區”，所以在這個區域中音壓始終為0。

圖說明了這種情況。產生這種現象的原因是這種幾何聲學的方法沒有考慮到聲音的波動性。



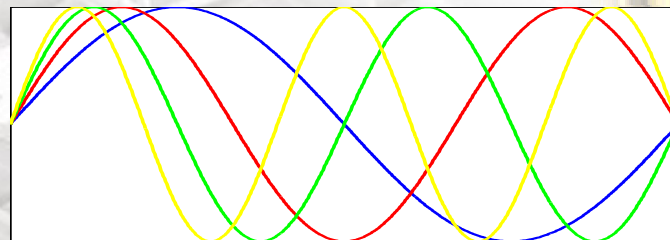
# 3.理論部分

## C 模態疊加法

聲波方程是所有聲傳播中必須滿足的規律。

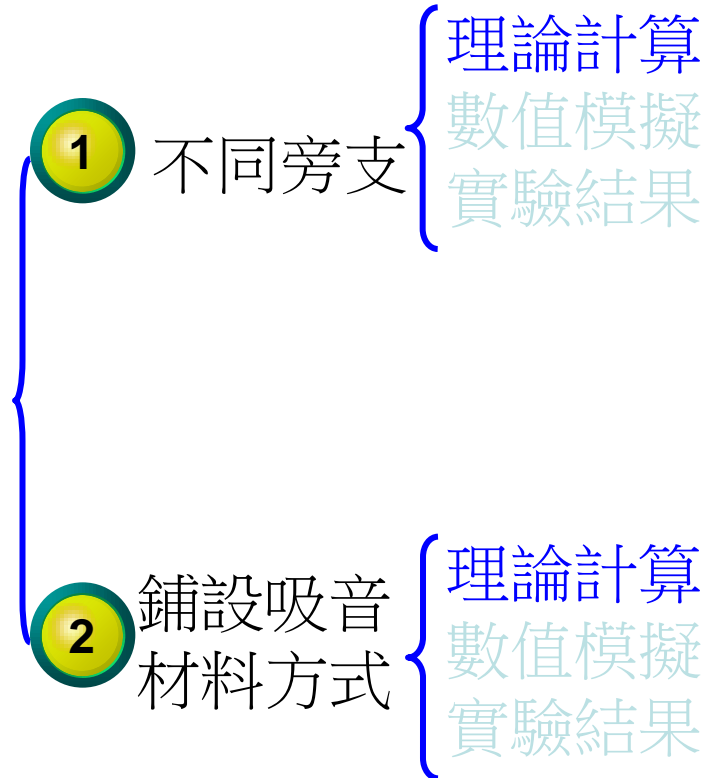
把波動方程應用在長空間環境中的時候，發現聲場可以分解為各種有規律的模態的疊加，所以聲場的求解就轉化為求解各個模態的大小，這是模態疊加法。

求解：結合音源條件和分界面上的連續條件。



兩端固定的繩，其振動形態可以表示成正弦波的疊加

## Theoretical analysis



# 3. 理論部分(波動理論)

有限長旁支長空間模型如圖所示。

long enclosure with finite branch

坐標原點建立在旁支管與主長空間的交界處。

主長空間  $x$  方向和  $y$  方向的寬度分別為  $a$  和  $b$ ；

旁支管的  $x$  方向寬度與主長空間相同， $y$  方向寬度為  $c$ ， $z$  方向寬度為  $d$ 。

點音源在主長空間界面的軸線上，坐標為  $(a/2, b/2, s_0)$  ( $s_0$  為負數)。

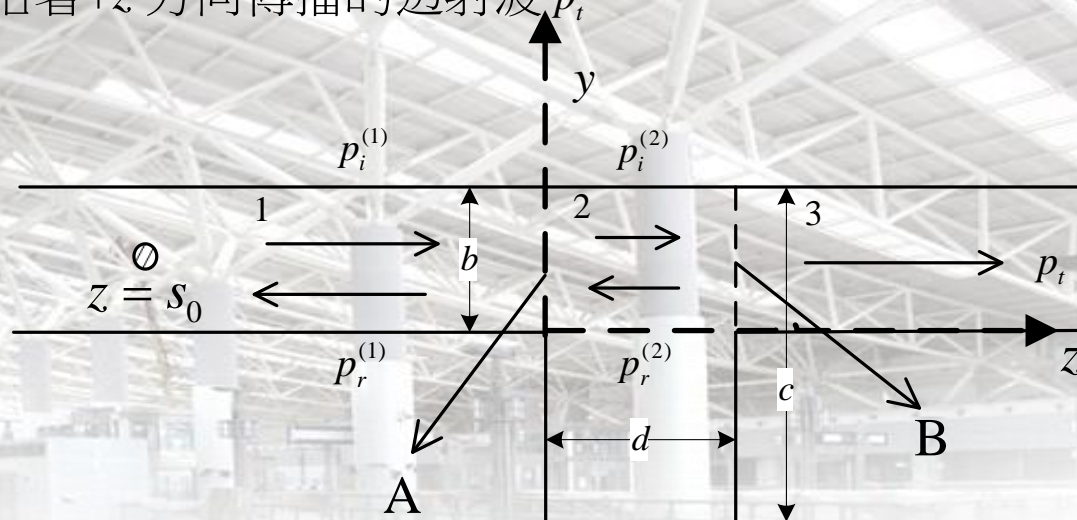
長空間可以分為 3 個部分，由 A 和 B 兩個分界面隔開。

第一部分同時存在入射波和反射波， $p_i^{(1)}$  和  $p_r^{(1)}$ ，傳播方向分別為  $+z$  和  $-z$ ；

第二部分也同時存在入射波和反射波， $p_i^{(2)}$  和  $p_r^{(2)}$ ，傳播方向分別為  $+z$  和  $-z$ ；

第三部分只存在沿著  $+z$  方向傳播的透射波  $p_t$ 。

點音源入設  
(非平面波)



# 3. 理論部分(波動理論)

long enclosure with finite branch

旁支管可以分為三段，前兩段同時存在入射波和反射波，第三段只有透射波，點音源的位置在  $(a / 2b) / \lambda$ 。由邊界條件可知第一和第三段管的模式為

$$\Psi_{mn,1} = \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right), \text{ 第二段管的模式為 } \Psi_{mn,2} = \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left[\frac{n\pi(y-b+c)}{c}\right].$$

各個波的音壓  $p$  和  $z$  方向質點振動速度  $v$  可以寫成各種模式的疊加：

$$p_i^{(1)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{i(1)} \Psi_{mn,1} \exp(-jk_{mn1}z)$$

$$v_{zi}^{(1)} = \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn1} P_{mn}^{i(1)} \Psi_{mn,1} \exp(-jk_{mn1}z)$$

$$p_r^{(1)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{r(1)} \Psi_{mn,1} \exp(jk_{mn1}z)$$

$$v_{zr}^{(1)} = -\frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn1} P_{mn}^{r(1)} \Psi_{mn,1} \exp(jk_{mn1}z)$$

$$p_i^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{i(2)} \Psi_{mn,2} \exp(-jk_{mn2}z)$$

$$v_{zi}^{(2)} = \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn2} P_{mn}^{i(2)} \Psi_{mn,2} \exp(-jk_{mn2}z)$$

$$p_r^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{r(2)} \Psi_{mn,2} \exp(jk_{mn2}z)$$

$$v_{zr}^{(2)} = -\frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn2} P_{mn}^{r(2)} \Psi_{mn,2} \exp(jk_{mn2}z)$$

$$p_t = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^t \Psi_{mn,1} \exp[-jk_{mn1}(z-d)]$$

$$v_{zt} = \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn1} P_{mn}^t \Psi_{mn,1} \exp[-jk_{mn1}(z-d)]$$

# 3. 理論部分(波動理論)

## 一、有限長旁支

long enclosure with finite branch

由兩個截面處的音壓連續和z方向質點振動速度連續條件可以得出：

$$\begin{aligned}
 p_i^{(1)} \Big|_{z=0} + p_r^{(1)} \Big|_{z=0} &= p_i^{(2)} \Big|_{z=0} + p_r^{(2)} \Big|_{z=0} \quad (1) & p_i^{(2)} \Big|_{z=d} + p_r^{(2)} \Big|_{z=d} &= p_t \Big|_{z=d} \quad (3) & 0 \leq y \leq b \\
 v_{zi}^{(2)} \Big|_{z=0} + v_{zr}^{(2)} \Big|_{z=0} &= \begin{cases} v_{zi}^{(2)} \Big|_{z=0} + v_{zr}^{(2)} \Big|_{z=0} \\ 0 \end{cases} \quad (2) & v_{zi}^{(2)} \Big|_{z=d} + v_{zr}^{(2)} \Big|_{z=d} &= \begin{cases} v_{zt}^{(2)} \Big|_{z=d} \\ 0 \end{cases} \quad (4) & \begin{matrix} 0 \leq y \leq b \\ b-c \leq y \leq 0 \end{matrix} \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

結合點音源條件：

$$\begin{aligned}
 k_{\alpha\beta 1} [P_{\alpha\beta}^{i(1)} \exp(-jk_{\alpha\beta 1} s_0) - P_{\alpha\beta}^{r(1)} \exp(jk_{\alpha\beta 1} s_0)] \\
 = \frac{[\text{sign}(\alpha) + 1][\text{sign}(\beta) + 1]}{ab} \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)
 \end{aligned}$$

➔ 可以求得： $P_{mn}^{i(1)}, P_{mn}^{r(1)}, P_{mn}^{i(2)}, P_{mn}^{r(2)}, P_{mn}^t$

再通過各段管的音壓表達式求出各點音壓：

$$p^{(1)} = p_i^{(1)} + p_r^{(1)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{i(1)} \Psi_{mn,1} \exp(-jk_{mn1} z) + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{r(1)} \Psi_{mn,1} \exp(jk_{mn1} z)$$

$$p^{(2)} = p_i^{(2)} + p_r^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{i(2)} \Psi_{mn,2} \exp(-jk_{mn2} z) + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{r(2)} \Psi_{mn,2} \exp(jk_{mn2} z)$$

$$p^{(2)} = p_t = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^t \Psi_{mn,1} \exp[-jk_{mn1} (z - d)]$$

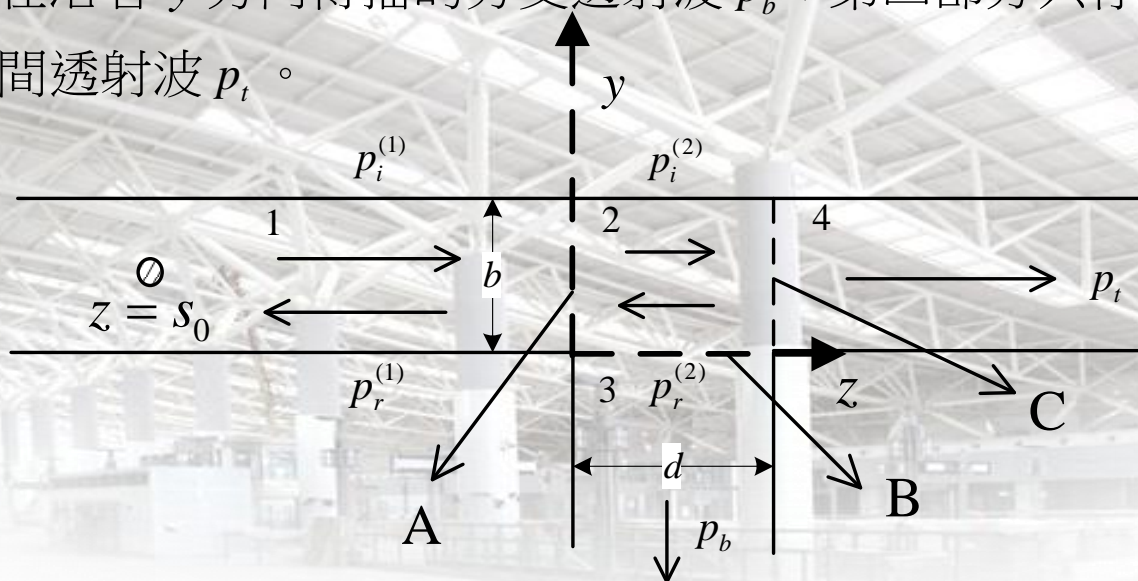
# 3. 理論部分(波動理論)

## 二、無限長旁支

long enclosure with infinite branch

無限長旁支長空間模型如圖所示。坐標原點建立在旁支管與主長空間的交界處。主長空間  $x$  方向和  $y$  方向的寬度分別為  $a$  和  $b$ ；旁支管的  $x$  方向寬度與主長空間相同， $z$  方向寬度為  $d$ 。點音源在主長空間界面的軸線上，坐標為  $(a/2, b/2, s_0)$  ( $s_0$  為負數)。長空間可以分為 4 個部分，由 A, B 和 C 三個分界面隔開。第一部分同時存在入射波和反射波， $p_i^{(1)}$  和  $p_r^{(1)}$ ，傳播方向分別為  $+z$  和  $-z$ ；第二部分也同時存在入射波和反射波， $p_i^{(2)}$  和  $p_r^{(2)}$ ，傳播方向分別為  $+z$  和  $-z$ ；第三部分只存在沿著  $-y$  方向傳播的旁支透射波  $p_b$ ；第四部分只存在沿著  $+z$  方向傳播的主長空間透射波  $p_t$ 。

點音源入設  
(非平面波)



# 3. 理論部分(波動理論)

## 二、無限長旁支

long enclosure with infinite branch

各個波的聲壓和質點振動速度可以寫成相應模式的疊加：

$$\begin{aligned}
 v_{zi}^{(1)} &= \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn1} P_{mn}^{i(1)} \Psi_{mn}^1 \exp(-jk_{mn1}z) \\
 p_i^{(1)} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{i(1)} \Psi_{mn}^1 \exp(-jk_{mn1}z) & v_{zr}^{(1)} &= -\frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn1} P_{mn}^{r(1)} \Psi_{mn}^1 \exp(jk_{mn1}z) \\
 p_r^{(1)} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{r(1)} \Psi_{mn}^1 \exp(jk_{mn1}z) & v_{zi}^{(2)} &= \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} k_{m2} P_m^{i(2)} \Psi_m^2 \exp(-jk_{m2}z) \\
 p_i^{(2)} &= \sum_{m=0}^{\infty} P_m^{i(2)} \Psi_m^2 \exp(-jk_{m2}z) & v_{zr}^{(2)} &= -\frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} k_{m2} P_m^{r(2)} \Psi_m^2 \exp(jk_{m2}z) \\
 p_r^{(2)} &= \sum_{m=0}^{\infty} P_m^{r(2)} \Psi_m^2 \exp(jk_{m2}z) & v_{yi}^{(2)} &= \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} k_u P_m^{i(2)} \Psi_m^2 \exp(-jk_{m2}z) \\
 p_b &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^b \Psi_{mn}^3 \exp(jk_{mn3}y) & v_{yr}^{(2)} &= \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} k_u P_m^{r(2)} \Psi_m^2 \exp(jk_{m2}z) \\
 p_t &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^t \Psi_{mn}^1 \exp[-jk_{mn1}(z-d)] & v_{zb} &= \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n\pi}{d} P_{mn}^b \exp(jk_{mn3}y) \\
 & & v_{yb} &= -\frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn3} P_{mn}^b \Psi_{mn}^3 \exp(jk_{mn3}y) \\
 & & v_{zt} &= \frac{1}{\rho_0 \omega} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} k_{mn1} P_{mn}^t \Psi_{mn}^1 \exp[-jk_{mn1}(z-d)]
 \end{aligned}$$

# 3. 理論部分(波動理論)

long enclosure with infinite branch

通過在A，B和C三個截面上的音壓連續和y，z方向質點振動速度連續條件可以得出連續性方程：

$$\begin{aligned}
 A: & \begin{cases} p_i^{(1)}|_{z=0} + p_r^{(1)}|_{z=0} = p_i^{(2)}|_{z=0} + p_r^{(2)}|_{z=0} & 0 \leq y \leq b \\ v_{zi}^{(1)}|_{z=0} + v_{zr}^{(1)}|_{z=0} = v_{zi}^{(2)}|_{z=0} + v_{zr}^{(2)}|_{z=0} & 0 \leq y \leq b \end{cases} \\
 B: & \begin{cases} p_i^{(2)}|_{y=0} + p_r^{(2)}|_{y=0} = p_b|_{y=0} & 0 \leq z \leq d \\ v_{yi}^{(2)}|_{y=0} + v_{yr}^{(2)}|_{y=0} = v_{yb}|_{y=0} & 0 \leq z \leq d \\ v_{zi}^{(2)}|_{y=0} + v_{zr}^{(2)}|_{y=0} = v_{zb}|_{y=0} & 0 \leq z \leq d \end{cases} \\
 C: & \begin{cases} p_i^{(2)}|_{z=d} + p_r^{(2)}|_{z=d} = p_t|_{z=d} & 0 \leq y \leq b \\ v_{zi}^{(2)}|_{z=d} + v_{zr}^{(2)}|_{z=d} = v_{zt}|_{z=d} & 0 \leq y \leq b \end{cases}
 \end{aligned}$$

結合點音源條件：

$$\begin{aligned}
 & k_{\alpha\beta 1} [P_{\alpha\beta}^{i(1)} \exp(-jk_{\alpha\beta 1} s_0) - P_{\alpha\beta}^{r(1)} \exp(jk_{\alpha\beta 1} s_0)] \\
 & = \frac{[\text{sign}(\alpha) + 1][\text{sign}(\beta) + 1]}{ab} \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)
 \end{aligned}$$

可以求得： $P_{mn}^{i(1)}, P_{mn}^{r(1)}, P_m^{i(2)}, P_m^{r(2)}, P_{mn}^b, P_{mn}^t$

再通過各段管的音壓運算式求出各點音壓：

$$p^{(1)} = p_i^{(1)} + p_r^{(1)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{i(1)} \Psi_{mn}^1 \exp(-jk_{mn1} z) + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^{r(1)} \Psi_{mn}^1 \exp(jk_{mn1} z)$$

$$p^{(2)} = p_i^{(2)} + p_r^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} P_m^{i(2)} \Psi_m^2 \exp(-jk_{m2} z) + \sum_{m=0}^{\infty} P_m^{r(2)} \Psi_m^2 \exp(jk_{m2} z)$$

$$p^{(2)} = p_t = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mn}^t \Psi_{mn}^1 \exp[-jk_{mn1} (z-d)]$$

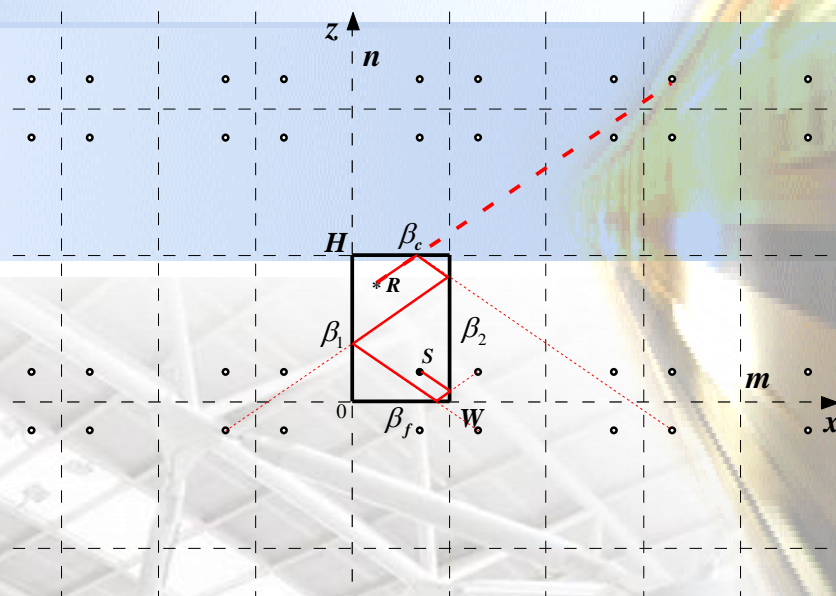
# 3.理論部分(虛源法)

## 三、鋪設吸音材料

不同吸音材料鋪設方式

### 干涉模型用於求解不同阻抗邊界的長空間音場

$$P = \frac{1}{4\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q_{s-mn} \frac{e^{ikd_{mn}}}{d_{mn}}$$



$$Q_{s-mn} = \Pi Q_1(m) \Pi Q_2(n)$$

式中：

$\Pi$  表示連乘。

$Q_1(m)$  表示  $m$  這個面的反射係數。

$Q_2(n)$  表示  $n$  這個面的反射係數。

虛源到接收處的距離是： $d_{mn} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$

再進行數值模擬

# 本文研究&工作架構Scope

## Numerical Simulation

1

不同旁支

理論計算  
數值模擬  
實驗結果

2

鋪設吸音  
材料方式

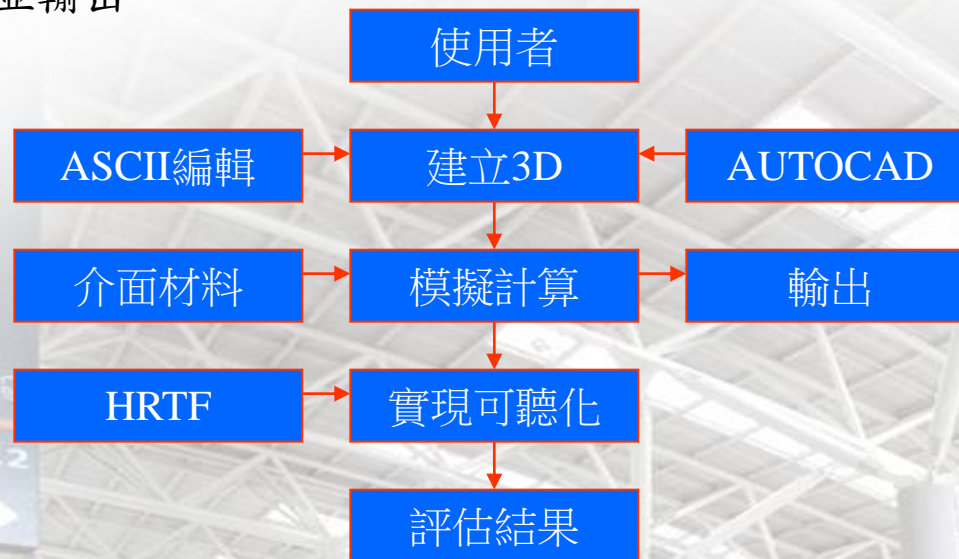
理論計算  
數值模擬  
實驗結果



# 4. 數值模擬

## 一、不同旁支

ODEON 是丹麥技術大學研究開發的室內音場模擬軟體。其主要功能可預測室內某位置的噪音值  $L_p$ 、早期衰變時間(Early Decay Time, EDT)、聲線 3D 傳播路線、混響時間  $T_{30}$ 、清晰度  $D$ 、快速語言傳輸指數(Speed Transmission Index, STI)和實現可聽化等，並可用彩色圖形顯示並輸出。



ODEON採用虛音源法和聲線跟蹤法相結合的方法計算室內音場的影響

6種ODEON模型如附錄三程式。

ODEON僅能計算倍頻程的音壓值

(63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1,000 Hz, 2,000 Hz, 4,000 Hz和8,000 Hz) 音壓值。



```
###
const W 0.7
const L 9.4
const H 0.5
const H_branch 0.5
const W_branch 0.7
const Dis_sou_branch 3.38
const X_source 0.95
```

```
Pt 1 0 -W/2 -H/2
Pt 2 L -W/2 -H/2
Pt 3 L W/2 -H/2
Pt 4 0 W/2 -H/2
```

```
Pt 11 0 -W/2 H/2
Pt 12 L -W/2 H/2
Pt 13 L W/2 H/2
Pt 14 0 W/2 H/2
```

```
Pt 21 X_source+Dis_sou_branch -W/2 H/2
Pt 22 X_source+Dis_sou_branch+W_branch -W/2 H/2
Pt 23 X_source+Dis_sou_branch+W_branch W/2 H/2
Pt 24 X_source+Dis_sou_branch W/2 H/2
```

```
Pt 31 X_source+Dis_sou_branch -W/2 H/2+H_branch
Pt 32 X_source+Dis_sou_branch+W_branch -W/2 H/2+H_branch
Pt 33 X_source+Dis_sou_branch+W_branch W/2 H/2+H_branch
Pt 34 X_source+Dis_sou_branch W/2 H/2+H_branch
```

```
Surf 1 floor
1>4
```

```
Surf 2 start wall
1 4 14 11
```

```
Surf 3 end wall
2 3 13 12
```

```
Surf 4 front side wall
1 2 12 11
```

```
Surf 5 back side wall
```

Pt <Point Number><XMathExpression><YMathExpression><ZMathExpression>

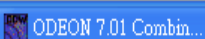
15:28

Total: 58

Top: 1

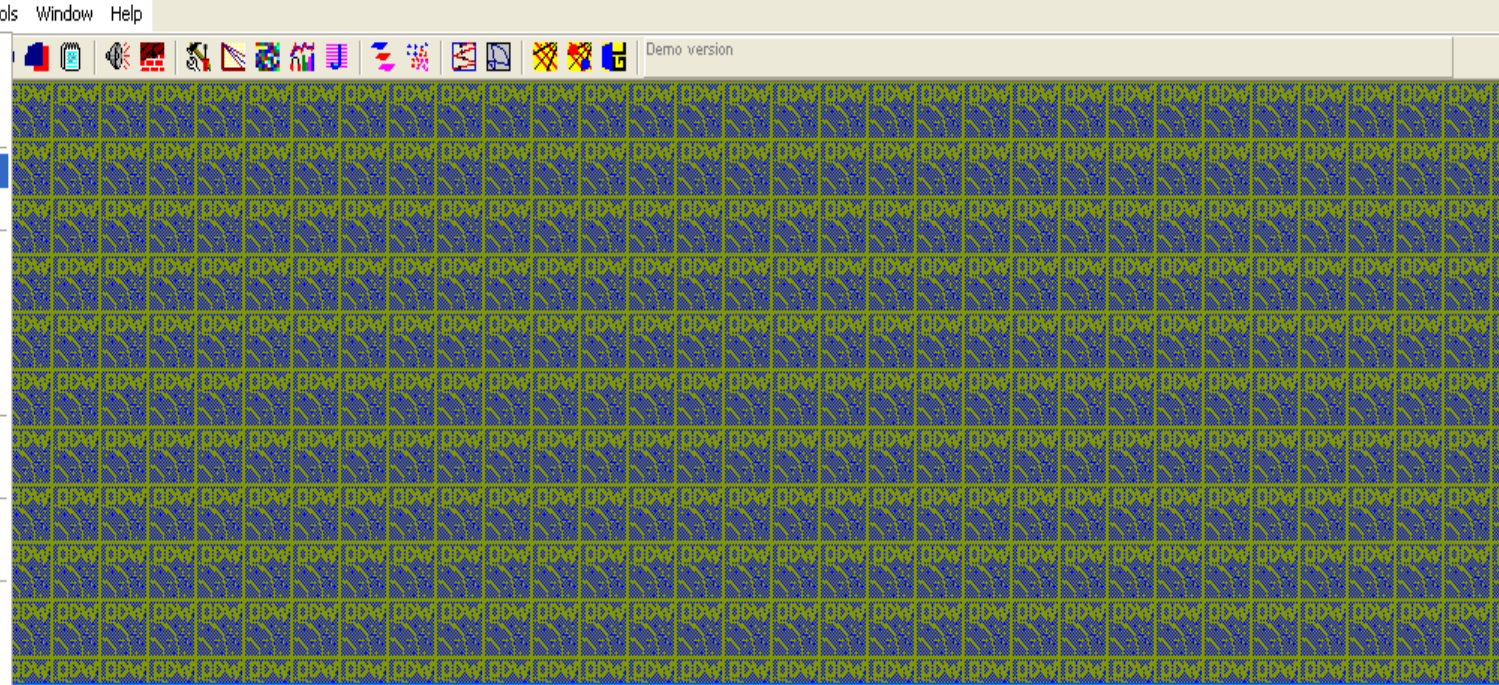
Bytes: 1475

Insert



# ODEON Editor

- Room Information Shift+Ctrl+R
- 3D Geometry debugger Shift+Ctrl+W
- Notes on the room Shift+Ctrl+N
- Source Receiver List Shift+Ctrl+S**
- Material List Shift+Ctrl+M
- Calculation Parameters Shift+Ctrl+P
- Global estimate Shift+Ctrl+E
- Define grid Shift+Ctrl+G
- Auralisation setup Shift+Ctrl+A
- Job list Shift+Ctrl+J
- Define reflector surfaces Shift+Ctrl+F
- 3D Reflector coverage Shift+Ctrl+C
- 3D Investigate Rays Shift+Ctrl+I
- 3D\_billard Shift+Ctrl+B
- 3D View Shift+Ctrl+3
- 3D Source Receiver View Shift+Ctrl+V
- 3D OpenGL Shift+Ctrl+O



Source-Receiver List - job 1

No	Source description	Gain	Delay	On	Eq	Type	Type specific information
1	S	90.00	0	ON	OFF	Point	Directivity file = Omni.S08   (x,y,z) = (0.95, 0.00, 0.00) Azimuth = 0.00

No	Receiver description	Position
1	R1	(x,y,z) = (1.40, 0.00, 0.00)
2	R2	(x,y,z) = (1.90, 0.00, 0.00)
3	R3	(x,y,z) = (2.40, 0.00, 0.00)
4	R4	(x,y,z) = (2.90, 0.00, 0.00)
5	R5	(x,y,z) = (3.40, 0.00, 0.00)
6	R6	(x,y,z) = (3.90, 0.00, 0.00)
7	R7	(x,y,z) = (4.40, 0.00, 0.00)
8	R8	(x,y,z) = (4.90, 0.00, 0.00)
9	R9	(x,y,z) = (5.40, 0.00, 0.00)

Power /Band

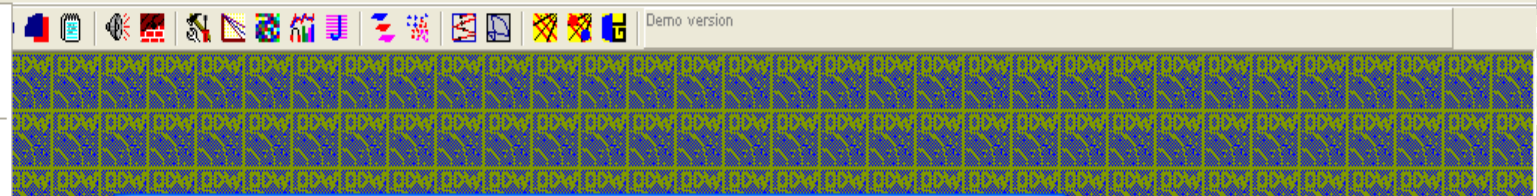
Freq	dB
63	0.0
125	0.0
250	0.0
500	0.0
1000	0.0
2000	0.0
4000	0.0
8000	0.0

Total power

9.0 dB

7.0 dB(A)

- Room Information Shift+Ctrl+R
- 3D Geometry debugger Shift+Ctrl+W
- Notes on the room Shift+Ctrl+N
- Source Receiver List Shift+Ctrl+S
- Material List Shift+Ctrl+M
- Calculation Parameters Shift+Ctrl+P**
- Global estimate Shift+Ctrl+E
- Define grid Shift+Ctrl+G
- Auralisation setup Shift+Ctrl+A
- Job list Shift+Ctrl+J
- Define reflector surfaces Shift+Ctrl+F
- 3D Reflector coverage Shift+Ctrl+C
- 3D Investigate Rays Shift+Ctrl+I
- 3D\_Billard Shift+Ctrl+B
- 3D View Shift+Ctrl+3
- 3D Source Receiver View Shift+Ctrl+V
- 3D OpenGL Shift+Ctrl+O



**Room setup** [Demo version]

Calculation parameters: Air conditions / Bk. noise / model check

**Suggest point response parameters**

Survey      Engineering      Precision

**General parameters**

**General settings**

Scattering method  
 None     Lambert     Full scatter

Decimate late rays

Number of rays (Recom. 1000)    1000

Max. reflection order    2000

Impulse Response Length    1000 ms

Impulse response resolution    10.0 ms

Angular absorption    Soft materials only

Despiking decays

**Early reflections**

Transition Order    4

Number of early scatter rays    100

Interior margin    0.50 m

Smooth early late ratios

**Point and Multipoint responses**

Late reflection density    100 / ms

# 測量結果

Receiver Number: 1 R1 (x,y,z) = (1.40, 0.00, 0.00)

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	0.19	0.19	0.22	0.12	0.17	0.27	0.17	0.26
T30 (s)	0.08	0.08	0.10	0.16	0.24	0.25	0.21	0.21
SPL (dB)	93.9	93.9	93.8	94.1	95.3	95.8	95.3	95.0
C80 (dB)	34.1	34.2	33.4	30.9	22.6	19.8	22.9	24.7
D50	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.95	0.97	0.98
Ts (ms)	7	7	7	8	12	14	12	11
LF80	0.167	0.167	0.167	0.175	0.206	0.217	0.206	0.200

SPL(A) = 102.2(dB)  
 LG80\* = 68.0(dB)  
 STI = 0.90 (Theoretical based on T30, STI = 0.90)

Receiver Number: 2 R2 (x,y,z) = (1.90, 0.00, 0.00)

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	0.12	0.12	0.16	0.20	0.28	0.23	0.27	0.21
T30 (s)	0.18	0.17	0.23	0.21	0.17	0.29	0.14	0.23
SPL (dB)	92.1	92.1	92.2	92.6	94.1	94.8	94.1	93.7
C80 (dB)	33.6	33.6	32.5	29.9	21.7	18.9	22.0	23.9
D50	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	0.94	0.96	0.97
Ts (ms)	9	9	9	10	14	17	14	13
LF80	0.178	0.178	0.177	0.184	0.210	0.220	0.212	0.206

SPL(A) = 101.0(dB)  
 LG80\* = 67.0(dB)  
 STI = 0.89 (Theoretical based on T30, STI = 0.88)

Receiver Number: 3 R3 (x,y,z) = (2.40, 0.00, 0.00)

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT (s)	0.17	0.17	0.24	0.15	0.20	0.30	0.19	0.30
T30 (s)	0.11	0.11	0.09	0.18	0.33	0.22	0.28	0.23
SPL (dB)	90.7	90.7	90.9	91.4	93.1	93.8	93.0	92.5
C80 (dB)	31.0	31.0	32.1	29.5	21.1	18.4	21.5	23.3
D50	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	0.93	0.96	0.97
Ts (ms)	10	10	10	11	16	18	16	14
LF80	0.203	0.203	0.202	0.209	0.233	0.240	0.233	0.228

# 4. 數值模擬

## 二、鋪設吸音材料

不同吸音材料鋪設方式

為了容易描述數值模擬的結果，採用了過度**衰減係數**(excess attenuation coefficient, EA)。過度衰減係數 EA 被定義為在不同接收位置處的  $P$  與音源處聲壓  $P_s$  的比率，因此，EA 表示為：

$$EA = 20\log(P / P_s) \quad (4.1)$$

音源在  
正中時

吸音材料鋪設方式

- 底面
- 側面
- 兩個側面
- 一個側面和一個底面
- 兩個側面和底面

音源靠近  
側面邊界時

吸音材料鋪設方式

- 靠近音源的側面
- 遠離音源的側面
- 頂面

音源靠近  
角落時

吸音材料鋪設方式

- 遠離音源的側面和底面
- 兩個側面
- 靠近音源的側面和底面

# 4. 數值模擬

## 二、鋪設吸音材料

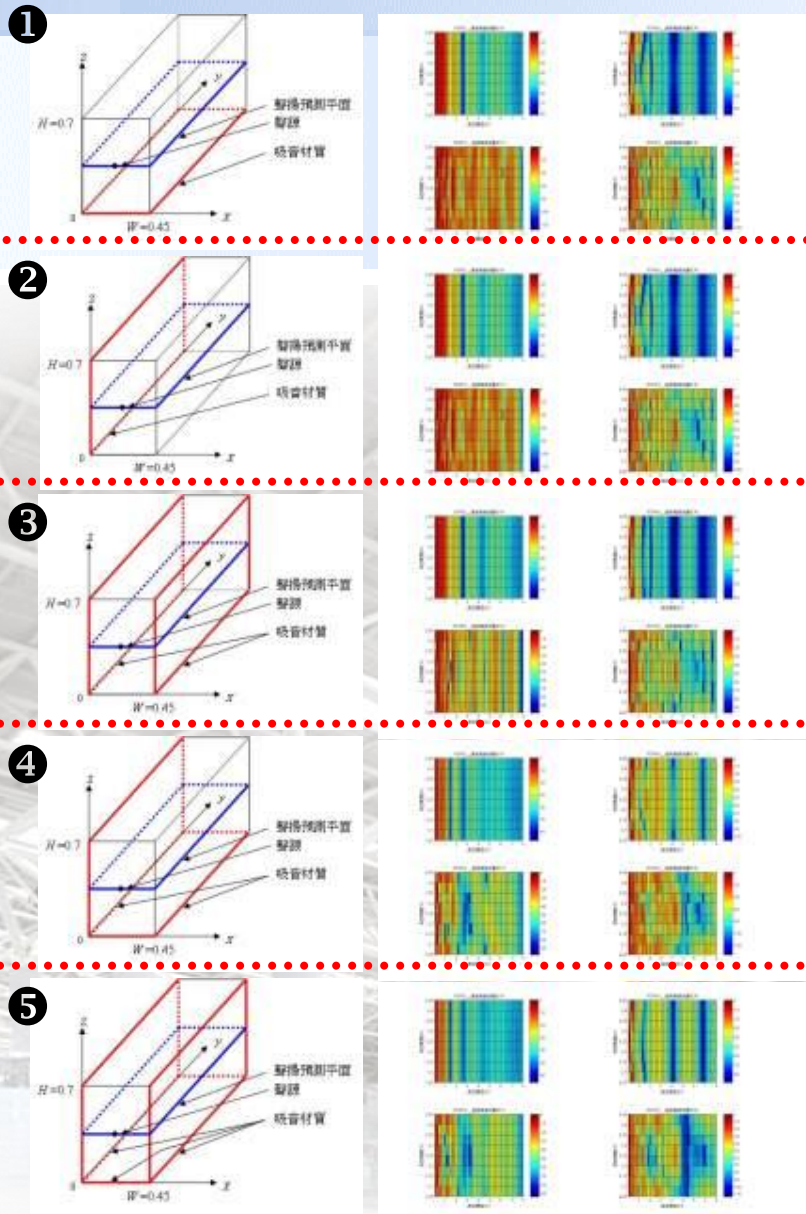
不同吸音材料鋪設方式



吸音材料鋪設方式

- 底面
- 側面
- 兩個側面
- 一個側面和一個底面
- 兩個側面和底面

$f=500\text{Hz}$ 、 $f=1,000\text{Hz}$ 、  
 $f=2,000\text{Hz}$ 、 $f=4,000\text{Hz}$



所有頻率的音場隨距離的變化過程並不是一直減小，而是呈抖動趨勢衰減。

底面為阻抗邊界情況下比側面有著更好的衰減性能。

① > ②

兩個側面為阻抗邊界情況下與單個側面衰減性能差不多。

② ≈ ③

側面和底面都為阻抗邊界情況下比單個側面衰減性能好很多10dB。④ > ③

⑤ 與 ④ 差不多

⑤ > ③

# 4. 數值模擬

## 二、鋪設吸音材料

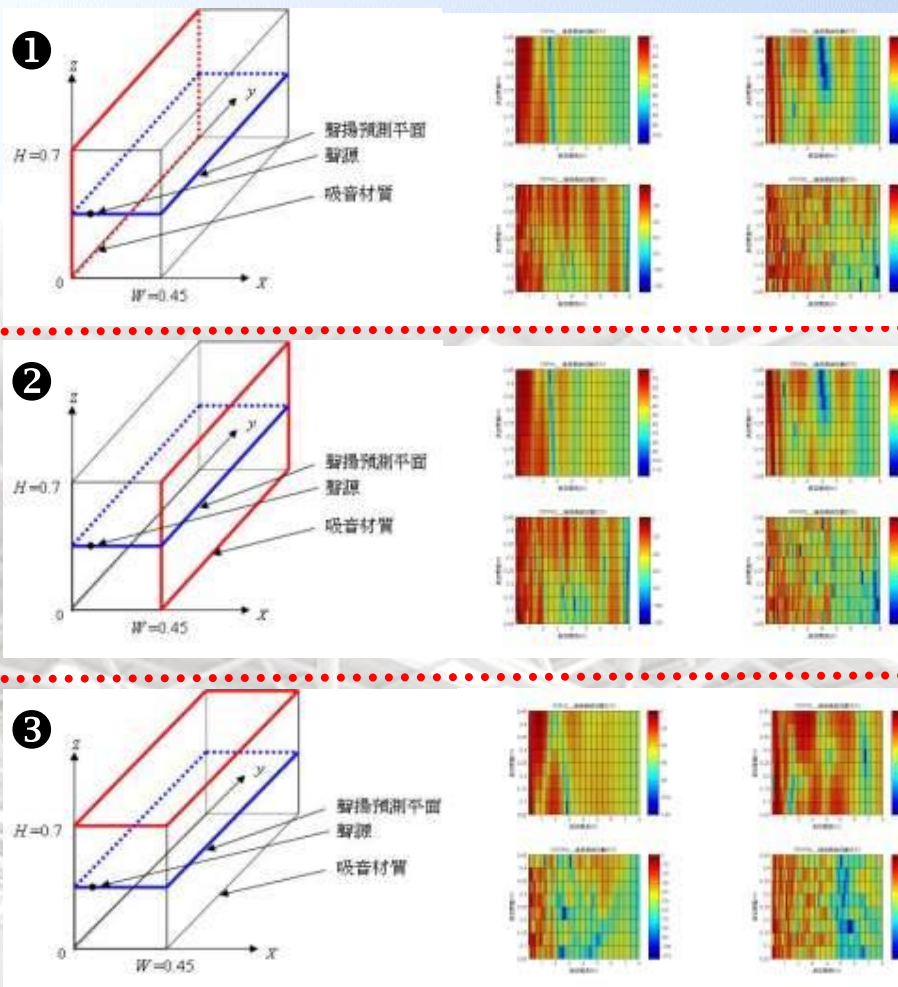
不同吸音材料鋪設方式

### 音源靠近 側面邊界時

吸音材料鋪設方式

- 靠近音源的側面
- 遠離音源的側面
- 頂面

$f=500\text{Hz}$ 、 $f=1,000\text{Hz}$ 、  
 $f=2,000\text{Hz}$ 、 $f=4,000\text{Hz}$



所有頻率的音場隨距離的變化過程並不是一直減小，而是呈抖動趨勢衰減。

在音源位置不變的情況下，長空間的阻抗邊界與音源距離的遠近對音場的影響不是很大。② ≈ ①

底(頂)面為阻抗邊界情況下比側面有更好的衰減性能。③ > ① ≈ ②

無論音源在正中或靠近側面，底(頂)面為鋪設吸音材料情況下比側面有更好的衰減性能。

# 4. 數值模擬

## 二、鋪設吸音材料

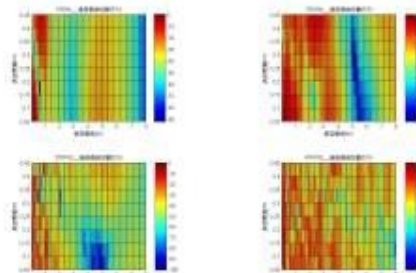
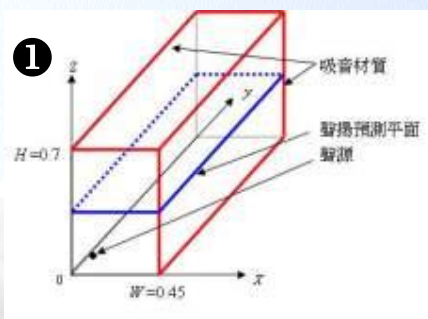
不同吸音材料鋪設方式

### 音源靠近角落時

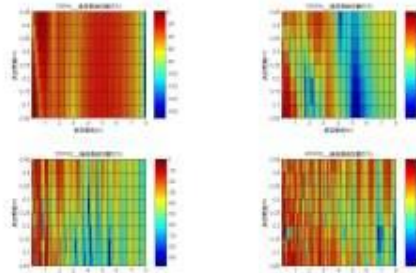
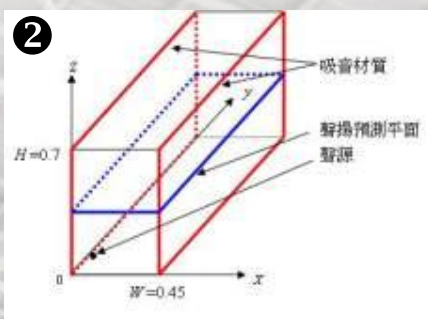
#### 吸音材料鋪設方式

- 遠離音源的側面和底面
- 兩個側面
- 靠近音源的側面和底面

$f=500\text{Hz}$ 、 $f=1,000\text{Hz}$ 、  
 $f=2,000\text{Hz}$ 、 $f=4,000\text{Hz}$

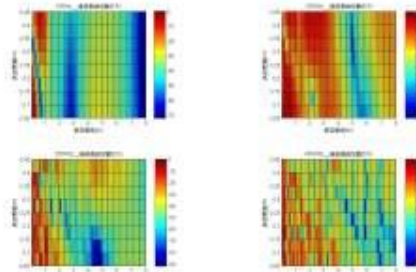
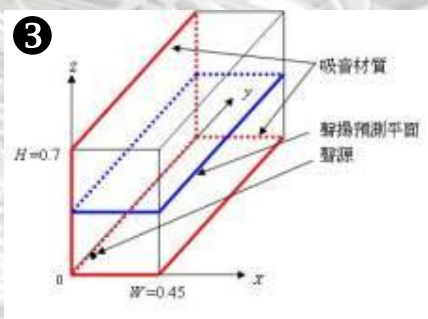


所有頻率的音場隨距離的變化過程並不是一直減小，而是呈抖動趨勢衰減。



遠離音源側面和底面都為阻抗邊界情況下比兩側面衰減性能好很多。

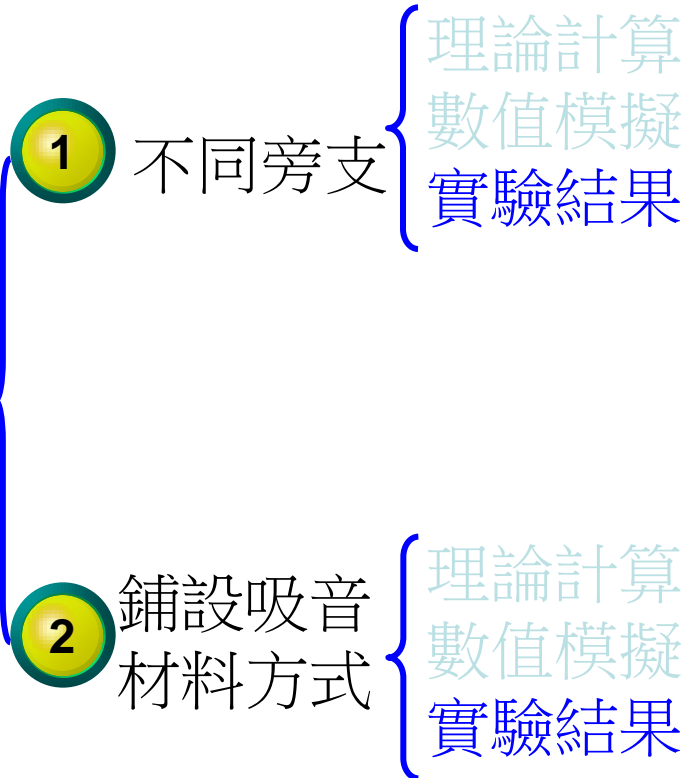
① > ②



長空間的阻抗邊界條件不變的時候，音源的位置對音場區域影響不大。

③ ≈ ①

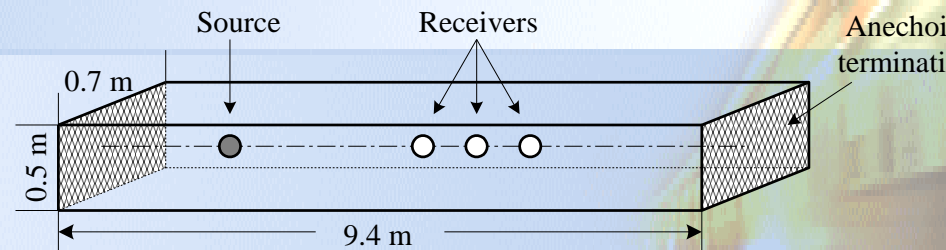
## Experiments



# 5. 實驗結果

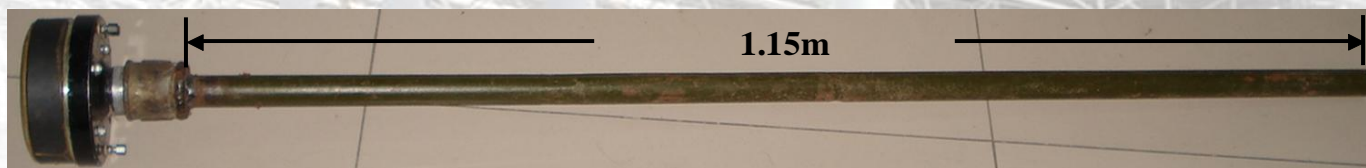
## 聲學系統(Experiments)

長空間縮尺模型示意圖



- 長空間縮尺模型總長10m，實際測量空間長度9.4m，高0.5m，寬0.7m。
- 縮尺模型兩端鋪玻璃棉，厚度約0.2m，吸音係數大於0.9，剛性木板邊界。
- 距其中一端0.95米中軸線處放置音源，在距音源0.45m到7.45m距離，間隔0.5m，中軸線處測量15個點的相對SPL。

音源：喇叭+1.15m長鐵管而成。鐵管內徑2cm，以保證在500Hz至10KHz頻率範圍內指向性均勻。



點音源照片

# 5. 實驗結果

## 聲學系統(Experiments)

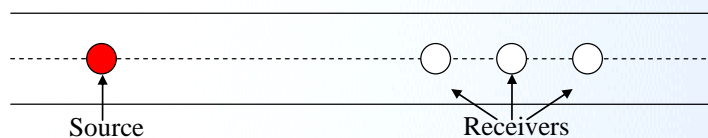
實際測量時，用一個麥克風放在固定高度的架子上在空間底部的軌道上滑動，依次測量15個點的SPL，並在靠近音源處放置第二個麥克風實時測量音源SPL的大小，再將兩個測量結果**相減**得到對應測點的**相對SPL**。



# 5. 實驗結果

## 原模型

The straight long enclosure



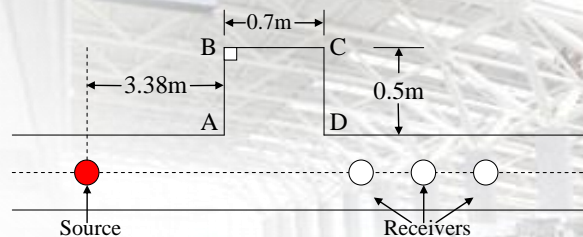
距離(m) 頻率(Hz)	0.45	0.95	1.45	1.95	2.45	2.95	3.45	3.95	4.45	4.95	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45
800	-0.3	-1.4	-1.0	-2.2	-2.5	-3.6	-4.1	-4.6	-5.7	-4.0	-6.8	-6.7	-7.0	-6.9	-6.5
1000	-0.4	-0.4	-1.4	-1.2	-1.9	-2.5	-3.8	-4.4	-4.5	-3.8	-5.8	-5.3	-6.3	-5.2	-5.5
1250	-4.4	-3.8	-1.8	-3.9	-2.4	-2.5	-3.8	-3.2	-5.8	-4.3	-4.9	-3.0	-4.1	-6.2	-5.8
1600	-0.1	1.1	0.2	-2.4	-0.1	-1.0	-0.1	-2.7	-1.8	-2.0	-3.4	-3.4	-2.1	-1.6	-4.0
2000	-2.1	-1.9	-3.4	-5.6	-5.0	-2.9	-4.2	-2.0	-4.0	-4.4	-7.0	-7.2	-5.1	-4.8	-7.6
2500	0.2	-1.7	-1.7	-1.3	-2.0	-3.2	-5.3	-5.1	-6.5	-7.5	-5.0	-6.1	-4.9	-4.8	-6.6
3150	-2.7	-2.1	-4.8	-4.6	-3.8	-5.1	-7.5	-6.1	-6.3	-8.8	-9.2	-9.7	-9.1	-8.5	-7.6
4000	-7.8	-6.6	-6.3	-7.3	-9.8	-9.7	-9.0	-11.7	-12.3	-10.8	-10.2	-12.3	-11.7	-11.5	-12.3
5000	-2.5	-4.2	-4.3	-6.1	-6.2	-9.0	-8.4	-8.9	-9.4	-10.3	-10.9	-11.7	-10.1	-9.8	-10.5
6300	-3.8	-4.7	-5.7	-3.8	-5.8	-6.6	-8.7	-8.3	-8.7	-7.7	-6.8	-8.7	-9.5	-9.3	-11.8
8000	-1.7	-4.9	-4.7	-6.9	-5.7	-7.2	-7.6	-8.0	-8.0	-9.4	-8.0	-8.2	-9.3	-8.9	-11.0
10000	-4.4	-4.6	-5.9	-8.4	-6.9	-7.9	-8.0	-8.9	-11.1	-9.8	-9.6	-11.1	-10.4	-11.3	-11.7



無旁支長空間相對SPL測量結果

## 有限長旁支模型

The long enclosure with a vertical branch



距離(m) 頻率(Hz)	0.45	0.95	1.45	1.95	2.45	2.95	3.45	3.95	4.45	4.95	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45
800	-4.8	-4.0	-4.5	-4.0	-5.2	-5.7	-8.6	-9.7	-11.8	-11.8	-12.1	-12.0	-12.9	-10.7	-10.1
1000	-5.0	-3.9	-4.7	-4.0	-4.8	-5.1	-7.2	-9.8	-11.1	-11.2	-9.5	-12.2	-12.4	-10.5	-8.3
1250	-4.2	-6.2	-7.1	-7.1	-4.0	-4.3	-6.0	-8.7	-11.9	-10.9	-10.5	-8.9	-10.1	-7.1	-8.5
1600	-4.8	-5.7	-7.1	-4.8	-5.9	-5.6	-4.7	-7.6	-10.1	-12.6	-11.4	-10.0	-11.5	-8.3	-8.1
2000	-5.8	-7.1	-6.8	-7.0	-7.6	-7.3	-9.8	-10.5	-11.5	-10.9	-9.3	-11.6	-12.1	-10.3	-9.4
2500	-6.6	-7.6	-8.7	-8.0	-8.5	-10.2	-9.9	-10.5	-13.1	-14.2	-12.5	-12.2	-12.6	-11.1	-9.7
3150	-7.9	-9.0	-8.8	-9.7	-9.3	-10.3	-10.2	-10.5	-13.4	-13.3	-12.8	-13.1	-12.6	-12.4	-11.5
4000	-5.4	-8.0	-6.8	-9.0	-7.5	-9.0	-8.6	-10.1	-10.9	-12.0	-12.6	-12.3	-12.2	-9.4	-9.2
5000	-6.1	-8.6	-6.8	-7.8	-6.7	-7.8	-9.2	-10.2	-8.8	-11.1	-11.0	-12.2	-11.5	-9.6	-9.8
6300	-2.5	-7.7	-4.7	-4.4	-3.5	-6.6	-7.4	-7.2	-6.6	-10.3	-9.3	-9.1	-9.8	-7.2	-8.2
8000	-3.0	-7.5	-4.0	-4.0	-3.3	-5.3	-7.2	-6.9	-7.3	-8.0	-10.1	-9.8	-8.6	-6.1	-7.1
10000	2.9	1.5	-3.8	-3.4	-5.1	-3.3	-4.0	-3.9	-6.5	-5.4	-5.6	-7.1	-6.1	-4.7	-5.5

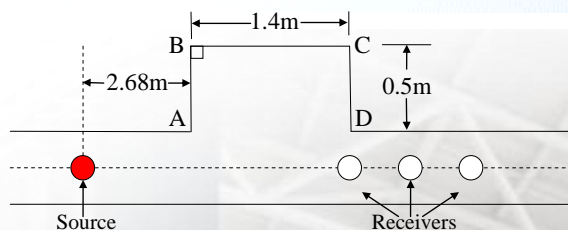


短旁支長空間相對SPL測量結果 110

# 5. 實驗結果

## 有限長旁支加寬模型

The long enclosure with a widened vertical branch



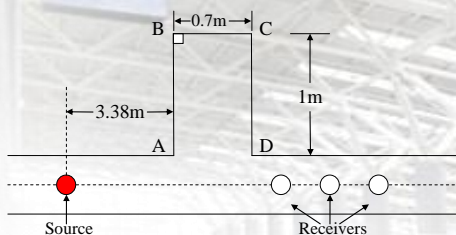
距離(m) 頻率(Hz)	0.45	0.95	1.45	1.95	2.45	2.95	3.45	3.95	4.45	4.95	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45
800	-3.8	-2.4	-3.5	-3.2	-4.5	-9.0	-9.3	-10.9	-11.9	-11.7	-12.5	-12.4	-13.3	-12.7	-13.9
1000	-4.4	-2.9	-3.9	-3.2	-3.3	-7.6	-10.3	-12.9	-11.8	-11.4	-12.7	-13.3	-12.0	-12.8	-14.1
1250	-2.9	-4.5	-6.5	-6.1	-3.0	-4.5	-7.1	-6.4	-10.9	-11.1	-9.6	-9.3	-9.4	-9.0	-10.2
1600	-4.1	-4.3	-7.3	-4.4	-4.3	-5.5	-5.6	-7.8	-10.2	-10.7	-11.2	-9.6	-11.4	-9.5	-9.9
2000	-5.3	-5.7	-5.9	-7.3	-7.5	-6.0	-8.8	-7.6	-9.1	-9.6	-9.3	-11.0	-12.1	-12.3	-11.7
2500	-6.2	-6.0	-7.1	-7.0	-6.9	-8.1	-8.6	-10.4	-14.0	-12.2	-11.7	-12.2	-12.2	-12.5	-12.7
3150	-6.3	-6.5	-7.1	-8.2	-7.3	-8.3	-9.5	-11.4	-12.4	-12.5	-12.6	-13.4	-12.5	-13.5	-13.2
4000	-4.4	-6.2	-5.4	-7.8	-6.4	-8.3	-9.6	-9.3	-11.2	-11.6	-12.4	-13.5	-11.8	-10.9	-11.0
5000	-4.3	-5.7	-6.5	-7.1	-5.9	-8.0	-12.1	-10.9	-9.6	-11.1	-11.2	-12.7	-11.4	-11.2	-11.4
6300	-0.3	-3.0	-3.4	-2.8	-2.7	-6.0	-7.5	-6.5	-7.8	-8.9	-8.6	-8.0	-8.9	-9.3	-9.9
8000	-1.1	-4.5	-3.1	-2.8	-1.8	-3.8	-6.9	-5.7	-6.4	-7.5	-8.1	-9.0	-7.7	-6.9	-9.8
10000	3.8	2.8	-1.2	0.8	-2.3	0.4	-2.5	-1.7	-4.9	-4.3	-3.7	-5.1	-5.6	-3.7	-4.9



寬旁支長空間相對SPL測量結果

## 有限長旁支加長模型

The long enclosure with an extended vertical branch



距離(m) 頻率(Hz)	0.45	0.95	1.45	1.95	2.45	2.95	3.45	3.95	4.45	4.95	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45
800	-4.7	-3.1	-4.4	-4.2	-6.2	-5.8	-7.9	-8.8	-10.8	-11.4	-10.6	-11.2	-11.7	-11.3	-12.5
1000	-5.3	-3.6	-5.0	-4.0	-5.2	-4.4	-6.1	-9.3	-10.8	-10.6	-8.7	-12.0	-11.4	-11.9	-10.2
1250	-3.1	-4.3	-6.5	-6.8	-4.5	-4.0	-5.1	-7.2	-12.7	-10.1	-12.0	-10.9	-9.3	-8.7	-10.8
1600	-4.5	-4.3	-7.4	-4.1	-5.7	-6.1	-4.8	-7.1	-10.1	-10.6	-11.2	-9.5	-10.1	-10.7	-9.7
2000	-4.7	-5.9	-6.3	-6.6	-6.9	-6.9	-8.6	-10.0	-9.1	-10.0	-8.4	-9.4	-11.5	-11.5	-9.9
2500	-5.0	-5.8	-8.9	-7.0	-7.2	-8.6	-9.1	-10.0	-11.1	-12.5	-10.6	-10.1	-11.5	-12.3	-9.8
3150	-7.5	-7.0	-8.2	-8.4	-8.1	-9.3	-9.2	-9.4	-11.8	-11.2	-11.0	-11.6	-11.5	-13.7	-12.0
4000	-4.5	-8.1	-3.9	-7.9	-9.2	-9.5	-7.6	-8.0	-10.4	-12.0	-10.9	-11.4	-11.4	-10.1	-10.2
5000	-3.9	-6.9	-5.4	-7.1	-8.1	-8.4	-9.0	-9.8	-9.8	-10.8	-10.4	-12.7	-13.0	-11.8	-10.7
6300	-0.8	-6.1	-3.3	-3.3	-5.0	-7.4	-6.9	-6.3	-8.7	-9.9	-8.3	-8.8	-10.1	-8.4	-9.0
8000	-0.7	-3.5	-2.3	-3.3	-3.1	-4.4	-6.6	-7.0	-6.9	-9.1	-9.3	-9.5	-8.2	-7.4	-8.3
10000	3.9	2.4	0.6	0.9	-2.8	-0.4	-1.1	-1.9	-3.8	-4.2	-3.8	-4.6	-4.8	-3.6	-4.3

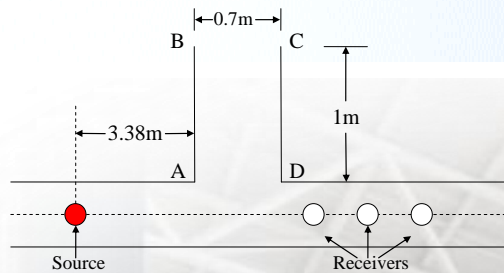


長旁支長空間相對SPL測量結果

# 5. 實驗結果

The schematic diagrams of the scale models for long enclosures with infinite branches

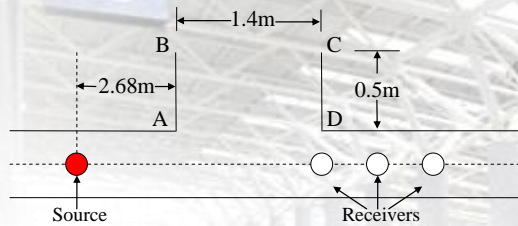
## 無限長旁支模型



距離(m) 頻率(Hz)	0.45	0.95	1.45	1.95	2.45	2.95	3.45	3.95	4.45	4.95	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45
800	-0.6	-1.1	-0.7	-1.4	-2.2	-1.3	-7.3	-7.4	-8.7	-9.0	-8.4	-7.9	-9.4	-9.4	-10.6
1000	-1.3	-0.3	-1.2	-0.6	-1.7	-1.7	-5.5	-9.0	-12.7	-9.6	-10.1	-12.4	-11.0	-12.3	-11.6
1250	-3.7	-3.5	-1.4	-3.9	-1.8	-2.1	-2.0	-6.7	-8.6	-10.1	-9.1	-9.0	-6.9	-7.1	-11.7
1600	0.3	0.8	-0.5	-1.5	0.3	-1.7	0.2	-2.8	-7.5	-6.4	-7.7	-6.6	-7.0	-4.5	-5.1
2000	-2.0	-2.2	-3.9	-5.7	-4.7	-3.3	-3.1	-7.3	-7.4	-9.9	-7.2	-10.5	-10.0	-8.9	-10.7
2500	1.3	-2.3	-1.6	-1.5	-1.8	-3.2	-3.5	-6.9	-9.0	-10.8	-10.5	-6.4	-8.0	-7.8	-6.6
3150	-1.9	-2.1	-6.9	-6.0	-3.5	-5.8	-5.0	-8.3	-10.4	-10.0	-11.7	-12.1	-12.9	-12.3	-11.1
4000	-7.9	-7.4	-6.0	-8.7	-10.4	-10.3	-8.8	-10.0	-13.6	-16.0	-15.2	-12.5	-13.8	-12.6	-12.9
5000	-2.5	-4.5	-4.0	-5.9	-6.7	-7.8	-8.2	-9.8	-9.7	-10.6	-12.0	-11.9	-12.2	-10.4	-10.3
6300	-3.6	-3.8	-6.1	-4.1	-5.4	-6.7	-5.9	-10.3	-8.7	-9.7	-9.4	-8.8	-10.3	-10.1	-10.1
8000	-3.1	-6.1	-4.9	-7.0	-5.2	-7.9	-7.4	-9.9	-9.8	-9.4	-10.8	-9.8	-11.0	-11.2	-10.4
10000	-3.5	-6.4	-7.2	-7.0	-6.8	-8.2	-8.3	-9.2	-12.6	-11.9	-12.6	-12.1	-12.3	-12.3	-12.8



## 無限長旁支加寬模型



距離(m) 頻率(Hz)	0.45	0.95	1.45	1.95	2.45	2.95	3.45	3.95	4.45	4.95	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45
800	-0.3	-1.0	-0.9	-1.8	-2.1	-5.5	-9.8	-8.8	-10.0	-10.2	-8.8	-9.5	-10.1	-9.3	-9.4
1000	-0.6	-0.5	-1.1	-0.6	-1.7	-5.1	-12.8	-13.5	-14.2	-13.5	-13.0	-15.5	-14.0	-15.4	-13.7
1250	-4.1	-3.4	-1.5	-3.7	-2.4	-3.2	-6.0	-9.9	-12.3	-11.0	-10.1	-11.4	-9.4	-8.7	-12.6
1600	-0.3	0.5	0.4	-1.3	0.1	-3.1	-3.9	-6.3	-8.2	-8.3	-9.3	-9.3	-9.7	-6.8	-7.2
2000	-1.7	-2.4	-3.6	-5.8	-3.6	-4.5	-7.9	-11.4	-10.8	-10.0	-11.8	-12.4	-11.1	-12.3	-12.4
2500	0.7	-2.5	-2.0	-1.3	-2.0	-4.4	-8.8	-9.8	-12.8	-14.3	-12.5	-9.3	-11.0	-9.5	-9.7
3150	-2.1	-1.9	-6.6	-6.3	-4.0	-6.7	-9.5	-13.6	-14.4	-13.0	-14.3	-14.8	-14.5	-15.5	-13.3
4000	-7.8	-7.1	-6.0	-9.0	-10.6	-12.0	-9.6	-14.7	-18.8	-18.7	-14.1	-12.7	-15.6	-14.0	-15.2
5000	-2.0	-4.4	-3.8	-5.8	-7.0	-8.2	-11.0	-12.8	-12.9	-13.1	-13.4	-13.1	-13.0	-11.7	-12.0
6300	-3.5	-3.9	-5.7	-4.0	-5.3	-6.8	-8.3	-12.2	-11.4	-11.7	-9.9	-10.5	-11.5	-11.8	-13.4
8000	-3.7	-6.3	-4.4	-6.2	-5.7	-8.5	-8.8	-12.3	-12.9	-10.1	-10.2	-11.2	-11.3	-12.4	-12.4
10000	-4.2	-6.2	-6.9	-6.6	-6.6	-8.7	-8.9	-9.8	-13.9	-13.2	-13.1	-13.0	-12.9	-13.4	-13.9



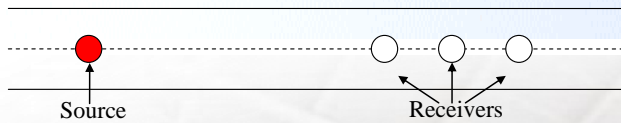
無限長旁支長空間相對SPL測量結果

無限長旁支加寬長空間相對SPL測量結果

# 6.比較分析 數值模擬、理論與實驗結果比較

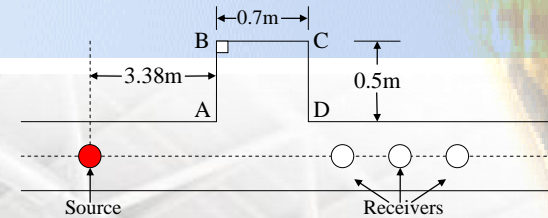
## 原模型

The straight long enclosure

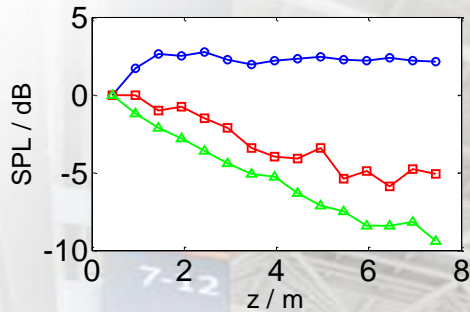


## 有限長旁支模型

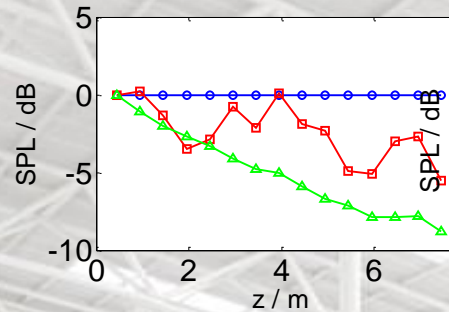
The long enclosure with a vertical branch



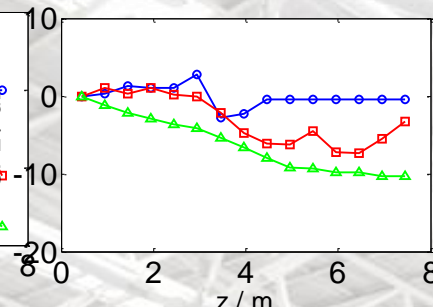
1000Hz 1/3 OCT



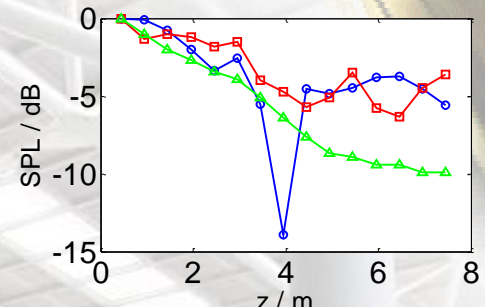
2000Hz 1/3 OCT



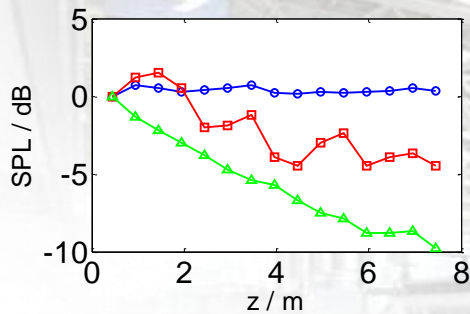
1000Hz 1/3 OCT



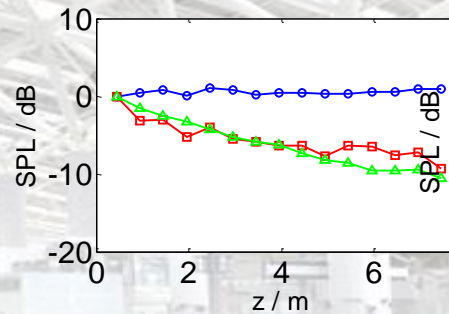
2000Hz 1/3 OCT



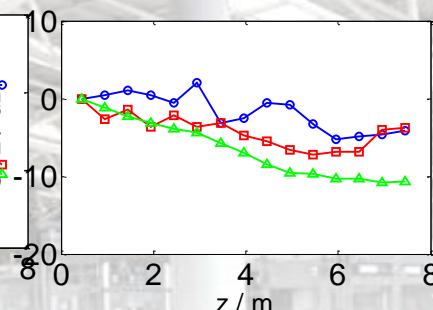
4000Hz 1/3 OCT



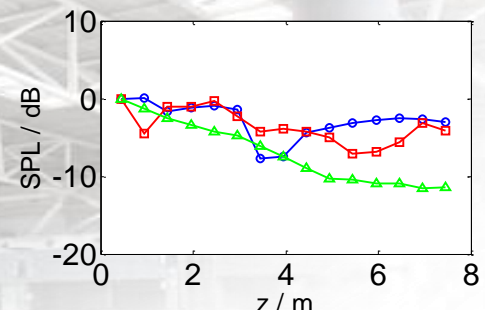
8000Hz 1/3 OCT



4000Hz 1/3 OCT



8000Hz 1/3 OCT

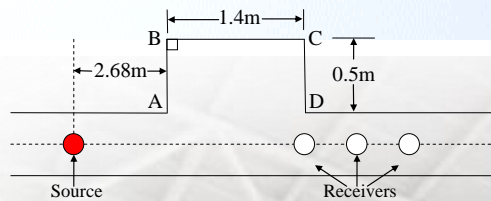


—□— : 實驗測量值    —○— : 理論解    —△— : 數值模擬解

# 6.比較分析 數值模擬、理論與實驗結果比較

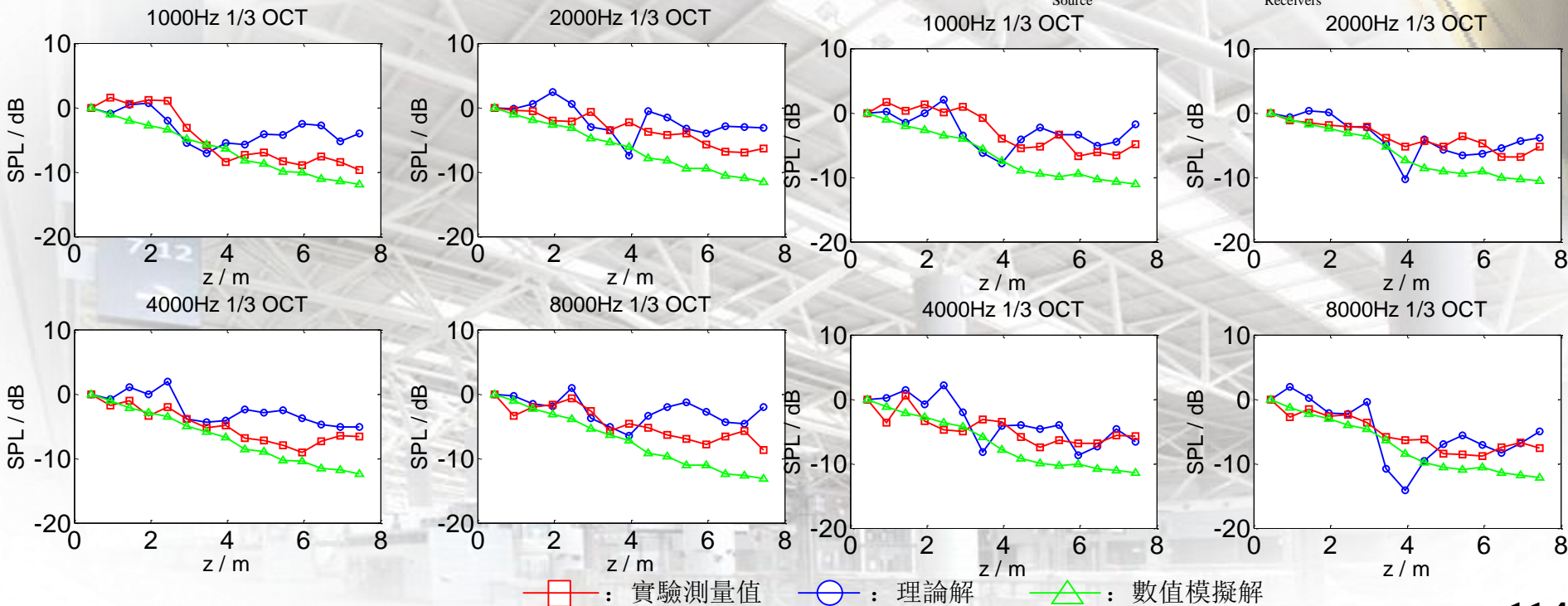
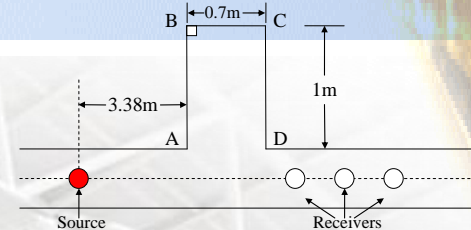
## 有限長旁支加寬模型

The long enclosure with a widened vertical branch



## 有限長旁支加長模型

The long enclosure with an extended vertical branch

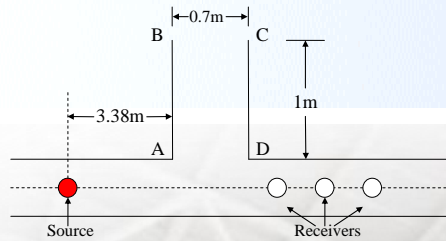


—□— : 實驗測量值      —○— : 理論解      —△— : 數值模擬解

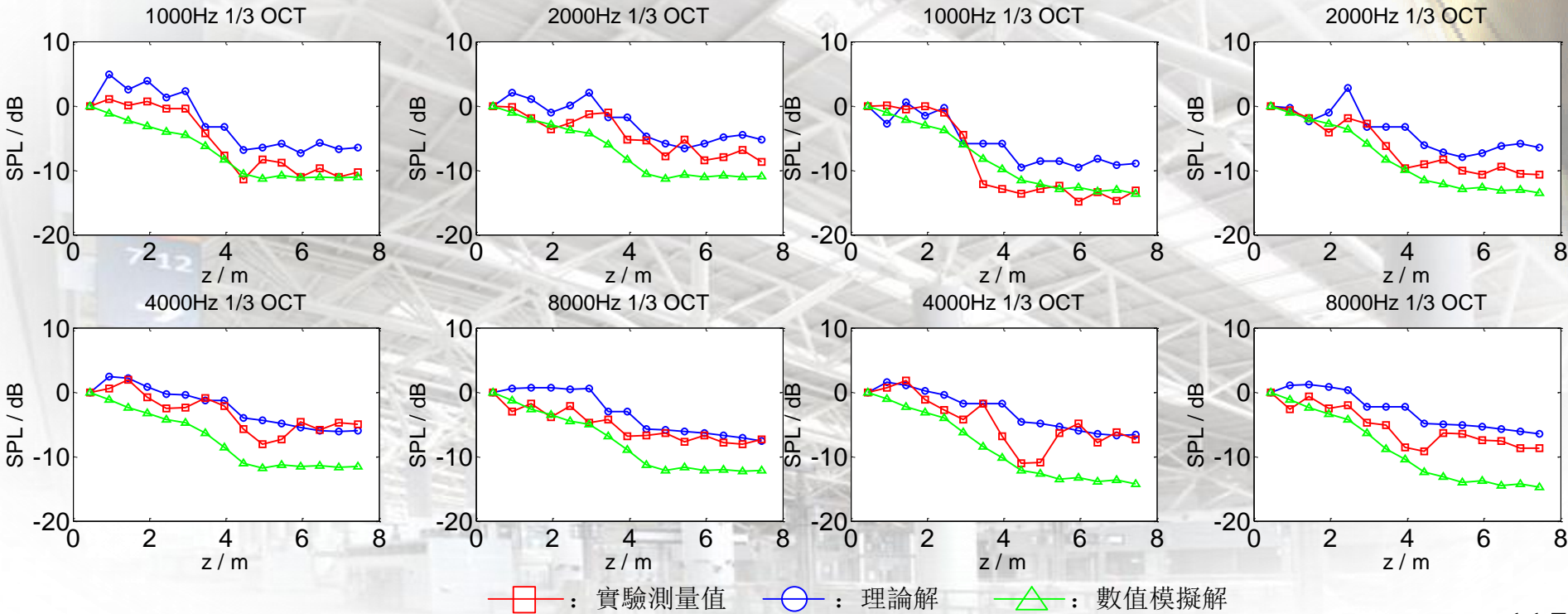
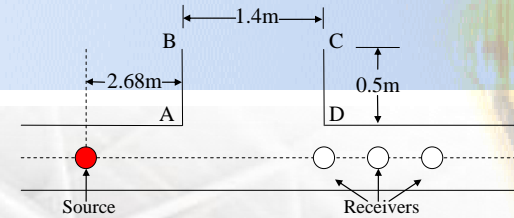
# 6.比較分析 數值模擬、理論與實驗結果比較

The schematic diagrams of the scale models for long enclosures with infinite branches

## 無限長旁支模型



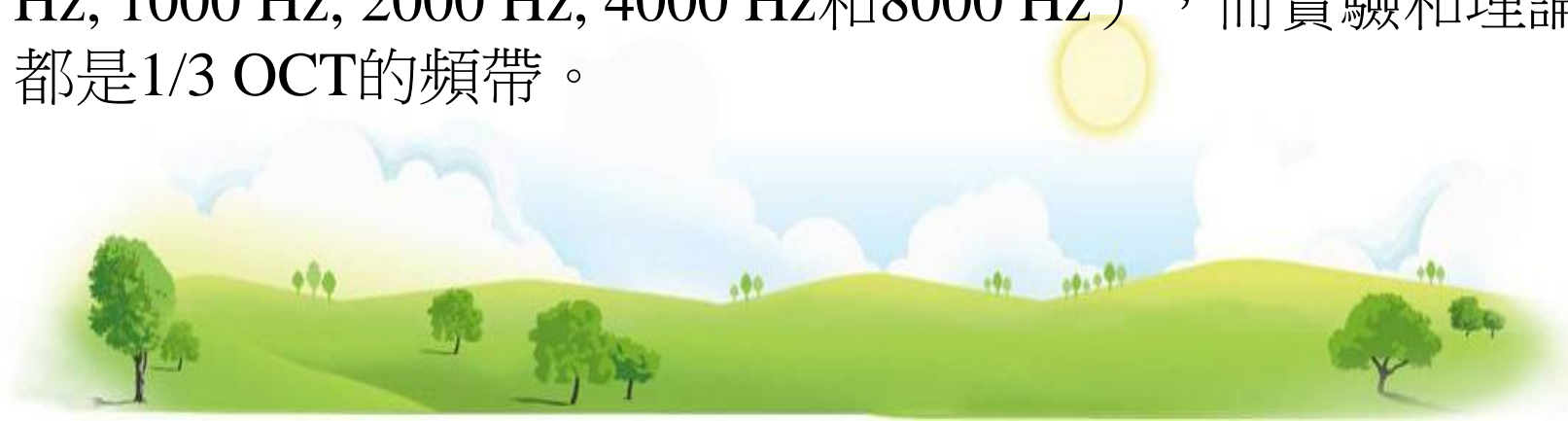
## 無限長旁支加寬模型



# 6.比較分析

## 一、數值模擬解的特點

- 1 在各種情況下得到的數值模擬解都隨距離增大而均勻穩定的衰減。
- 2 衰減曲線非常平滑，但是不能反映管道中多種模式相互干涉引起的聲壓起伏，這在實驗值和理論值都有明顯的表現。
- 3 衰減量通常比實測更大，這種方法與實驗值區別的可能原因是模擬過程中聲線數不夠多，或者是因為模擬中採用的是1/1 OCT的頻帶，乃ODEON軟體局限，因為ODEON數值模擬僅能計算長空間內倍頻程的音壓值，63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz和8000 Hz），而實驗和理論解都是1/3 OCT的頻帶。



# 6.比較分析

## 二、理論解的特點

1 對於長直管道，理論方法得到的解沒有明顯隨距離增大而衰減，然而數值模擬解能很好的預測和實驗值的衰減規律。由於理論解中沒有考慮到空氣吸收，所以無衰減。在有旁支的情況下，理論預測的衰減量也明顯的比實驗值和數值模擬值要小，也是由於這個原因。

2 對於有旁支的管道，理論預測值在旁支管所處的位置上會出現較為劇烈的變化。這是因為理論解是用有限的模態逼近無窮多模態，所以分界面上的連續性條件只能部分得到滿足，從而在分界面上有較大的起伏。

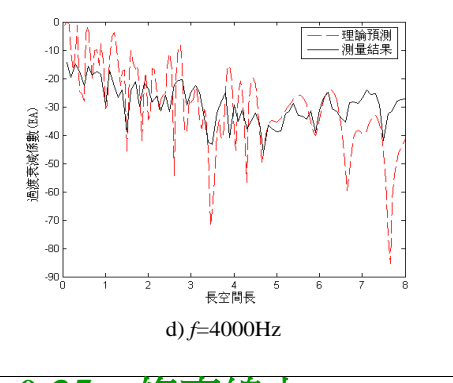
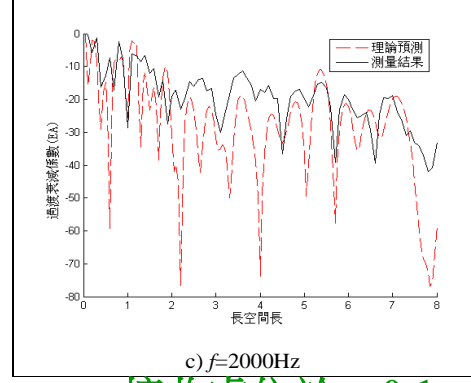
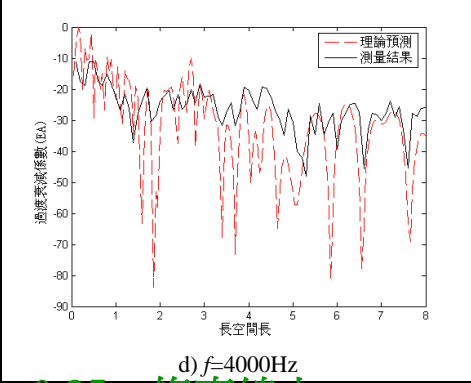
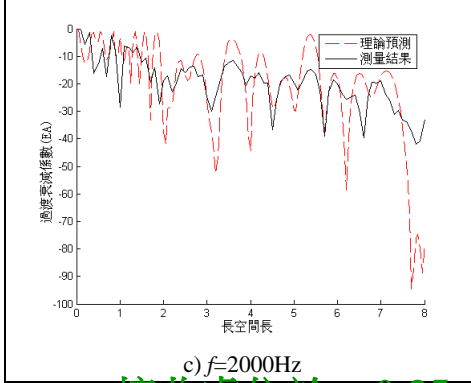
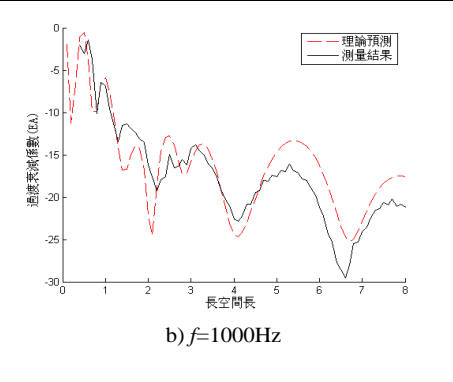
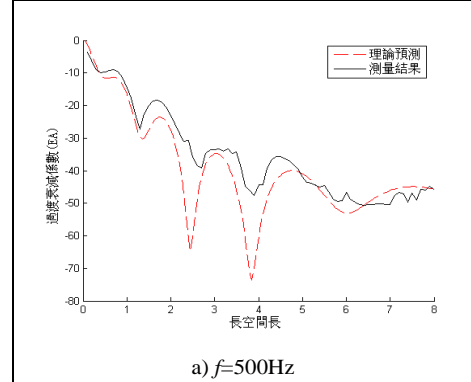
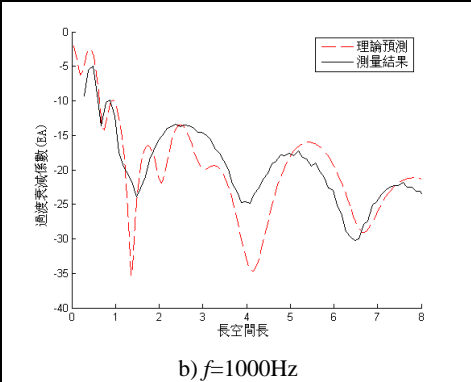
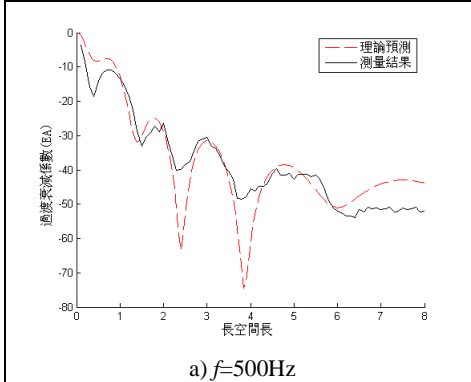
3 由這些規律可以看出：數值模擬解隨距離的衰減過於平滑，預測衰減量比實驗值大；而理論解隨距離的衰減波動較大，預測衰減量比實驗值小。



# 6. 比較分析

## 三、鋪設吸音材料

音源位於(0.2, 0, 0.35)，所得到的在不同的頻率處的隨距離衰減的預測結果和試驗結果



接收處位於 $x=0.35, z=0.35$ 一條直線上

接收處位於 $x=0.1, z=0.35$ 一條直線上

由圖知，理論預測結果和量測結果都具有週期性，因聲波的干涉會在某些特定位置出現極值。

# 6.比較分析

## 三、鋪設吸音材料

- 上二圖是音源位置相同，Receiver接受位置不同，說明同音源、同邊界條件，到不同接收處的波動衰減趨勢有差異的。
- 可以看出，該種方法可以很好的模擬出長空間音場的衰減趨勢，雖有出現一定的偏差，乃是由於實驗精度的影響。主要是因為在實際中存在著大約60dB環境噪音，實驗中的音源的聲壓大約為110dB，這樣實際測得的過度衰減係數小於50dB，使得實驗的精度無法達到理論預測。
- 在基於波動理論的虛源模型的基礎上，將複雜虛源法(Complex Image-source Method)用於研究不同阻抗邊界的長空間音場，充分考慮聲波的頻率因素和波動性能，得到的預測結果與實際吻合好。



### 聲線 追蹤法

(Ray Tracing Method)

在各種情況下ODEON得到的數值模擬都隨距離增大而均勻穩定的衰減。在長直管道情況下，距離增大一倍會引起4~5dB的衰減，此衰減規律接近點音源在自由邊界中的擴散衰減。

### 波動性

衰減曲線非常平滑，不能反映管道中多種模式相互干涉引起的音壓起伏，實驗值和理論值都有明顯的表現。這些現象都是由於聲線追蹤法沒有考慮聲波的波動性。

### 限制

衰減量通常比實測更大，可能是模擬過程中聲線數不夠多，或者是因為模擬中採用的是1/1 OCT的頻帶，63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz和8000 Hz），而實驗和理論解都是1/3 OCT的頻帶。

### 空氣吸收

理論方法得到的解沒有明顯隨距離增大而衰減，在有旁支的情況下，理論預測的衰減量也明顯的比實驗值和數值模擬值要小，也是由於這個原因（沒有考慮空氣的吸收）。

### 空間模態

於有旁支的管道，理論預測值在旁支管處出現劇烈的變化，理論解隨距離的衰減波動較大，預測衰減量比實驗值小，主要原因是由於模態耦合(Modal Coupling)，如旁支為分介面，兩邊的空間模態是不一樣的，條件複雜，引起數值計算的精度不夠。

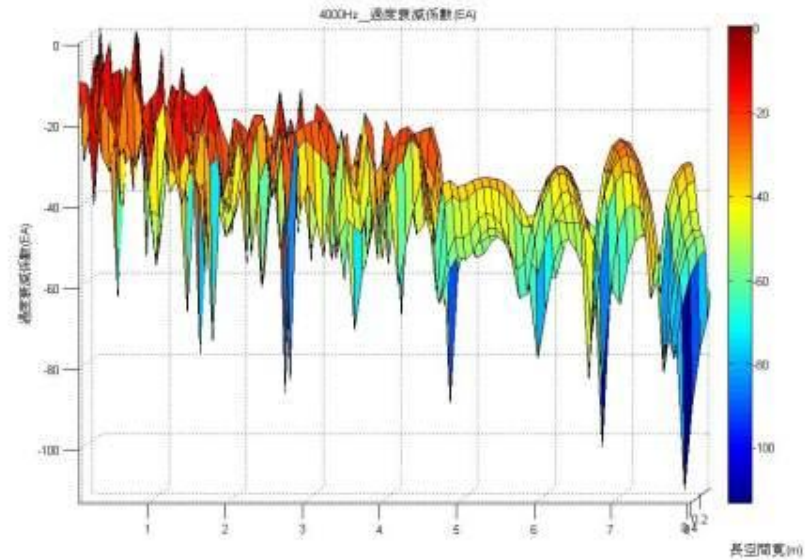
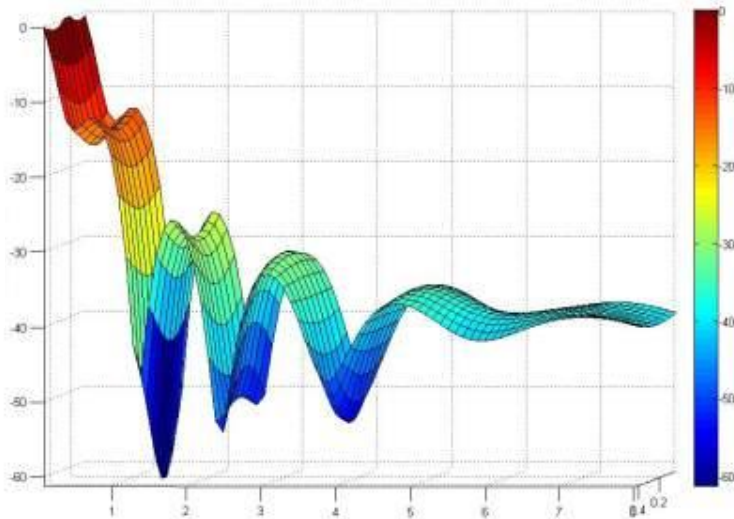
### 干涉

優點：能夠反映傳播過程中各個模式的干涉，是理論解的優點之一。

缺點：是音壓的峰值和谷值位置與實測相差較遠，有些甚至會出現預測得到峰值然而實際測量為谷值的情況。

# 7. 結論

## 二、鋪設吸音材料



- 1** 由於長空間的特殊尺寸，具有特殊的聲學特性：不同頻率的聲波在吸音材料的長空間中隨距離的衰減差異很大，這主要是由於聲波的波動性所決定的，即不同波長（不同頻率）的聲波在長空間邊界產生散射後對音場的影響各不相同。
- 2** 在特定頻率，不同模式的共振形態是各不相同，衰減曲線具有非線性的趨勢，事實上、實驗上亦是如此，聲音不一定愈遠愈小，即事實上長空間的衰減曲線是非線性的，有波動性，整體趨勢是越遠越小，或者說呈抖動狀衰減。
- 3** 同時，頻率越低，隨距離的衰減變化越為平滑，反之，頻率越高，隨距離的衰減變化越為劇烈。

### 音源位置不變

當音源在長空間的位置不變的條件下，如果長空間相互平行的邊界阻抗相同，那麼其與音源距離的遠近對音場的影響不大。

### 阻抗邊界條件不變

在長空間的阻抗邊界條件不變的時候，音源位置的改變對離音源較遠的音場區域影響不大。

### 鋪設吸音材

長空間裡如要鋪設吸音材，建議鋪設長空間（隧道）中行駛車輛之兩側。



敬請指教  
敬請指教  
**敬請指教**  
敬請指教 敬請指教

