

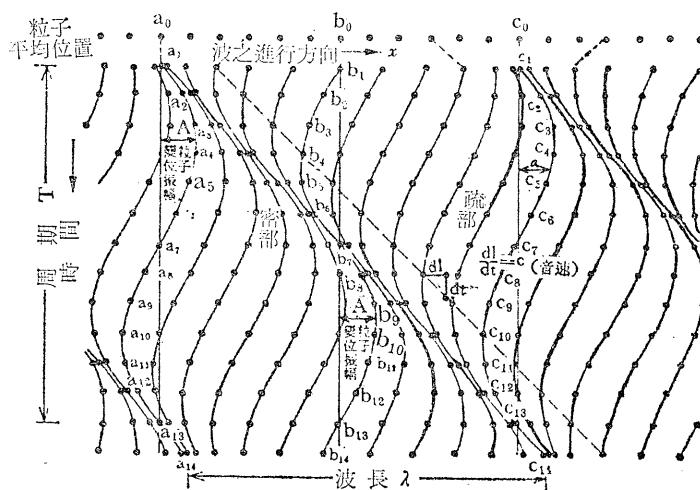
噪音及噪音防治(二)

詹正行*

貳、噪音之物理

一、音 波

音波是介質（可為氣體、液體或固體）的密度變化之波動，也就是疏密波，即介質粒子在其平均位置附近與音波進行方向成同一方向，作前後的運動。圖一表示音波的行進情形，由左而右依箭頭方向前進的正弦波之介質粒子運動狀態。像圖中最上端所示具有平均間隔位置的粒子，究竟會隨著時間的經過而作怎樣的移動，則可由此圖表示出來。例如 a_0 的粒子作 a_1, a_2, a_3, \dots 的運動， b_0 的粒子作 b_1, b_2, b_3, \dots 的運動。 a_i 與 c_i 之形狀相同，亦即在進行相同位相之運動，兩者間距離即為波長。波長通常用希臘字母 λ 來表示。



圖一 音波介質的粒子運動情形
介質粒子以其平均位置為中心在波的進行方向作前後運動。

粒子 a_i 與 b_i 係在相差半波長的位置，作相反位相之運動。粒子 a 歷經從 a_1 移動到 a_{13} 或粒子 b 歷經從 b_1 移動到 b_{13} 的時間後，又回到完全相同的運動，是為一週期。例如 1,000 Hz 音波之週期為 1,000 分之 1 秒。周期以 T 表示。

又如連結 b_4, c_{10} 等點所成的點斜線，係將各時間相同位相之點連結者，即為圖中所示的 dl/dt ，此線的斜率就是波的傳播速度，即所謂的音速 (sound velocity)，通常以 c 表示。

假設在任一時間各粒子離開其平均位置的變位為 a 時，則其最大值 A 就是粒子運動變位的振

* 經濟部國營事業委員會工程師

上式爲重要的關係式，因爲噪音上頻率所形成的種種的問題多半係由於波長所引起的。在常溫下音速 $c = 340 \text{ m/s}$ 可視爲定值，波長大致也可視爲定值，故頻率爲 34 Hz, 100 Hz, 340 Hz, 1000 Hz, 3400 Hz 與 10 KHz 之波長分別爲 10m, 3.4m, 1m, 34cm, 10cm 與 3.4cm。如上述，可聽頻率範圍內之音波波長，與吾人身邊物品的大小相近，而其尺寸的範圍則從數 m 到數 cm，因範圍非常廣致使種種問題不易解決。例如以屏障的高度來說，就要考慮到在多少 Hz 以上始有效。

二、聲音之強度

聲音強度 (sound intensity) 為與聲音進行方向成直角之單位面積 (1 m^2) 上每秒鐘所通過能量的瓦特數，如以 J 表示聲音強度，則有

$$J = \rho c v^2 = \frac{p^2}{\rho c} = vp \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$

的關係成立。 v 與 p 分別表示粒子速度與音壓，均以有效數值表示（以下均同）。

將(5)及(6)式與電氣的電壓 = 電阻 × 電流，電力 = 電阻 × 電流² = 電壓² / 電阻 = 電流 × 電壓的關係式作一比較，將粒子速度比作電流，音壓比作電壓， ρc 比作電阻來考慮就方便了。 ρc 之被稱爲比音阻，則由因於此。而所謂比者乃特指單位面積之數值。

上面所討論的平面進行波，如果不考慮其在空氣中的減衰，則聲音強度就不會隨距離而變。以點音源爲例，聲音強度就會隨着距離增加而變小。設聲音從音源中心點離開達到距離爲 r 處時，其球表面積就擴大爲 $4\pi r^2$ ，故設音源之強度爲 $P(\text{W})$ ，則 r 處之聲音強度就成爲，

$$J = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

如果是在半空間的情況時，將上式分母改爲 $2\pi r^2$ 則可。

三、分貝與音壓水準

先就分貝 (dB) 下一定義。設某一功率 P ，另一功率 P_0 比其大時，則謂 P 比 P_0 大 ΔL ，

$$\Delta L = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

dB : deci-Bel 之縮寫

Bel 為二量之比的單位，deci 為 $1/10$ 的意思。例如輸入功率 1 mW ，輸出功率爲 1 W 的放大器，其放大效益爲 $10 \log 1/0.001 = 10 \log 10^3 = 30$ ，稱爲 30, dB。對聲音來說，強度爲 J_0 與 J 的二聲音之間，其強度水準之差的算法就將上式之 P ，用 J 取代就可以了〔以 dB 為尺度的計量，在音響上稱爲水準 (level)〕。

上述的 dB 值通常是相對數值，係用來表示任一聲音與另一聲音水準之差，在音響方面，係將上述 P_0 或 J_0 取成一固定值，並以此爲標準值作出數項的 dB 數之定義。音壓水準與音強水準則爲其代表項目。

音強水準 (sound intensity level) 與音壓水準 (sound pressure level) 兩者其實相同，近來因多使用音壓水準爲主，故予一起下定義，在記號上則取音壓水準的 SPL 來表示。聲音之標準值則採用聲音強度 $J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。此值係大致認爲耳朶聽力在頻率 1000 Hz 附近能够聽到的

最小可聽值。聲音強度為 10^{-12} W/m^2 之音壓則可由(6)式算出為

$$p_0 = \sqrt{\rho c J_0} = \sqrt{400 \times 10^{-12}} = 2 \times 10^{-5} (\text{N/m}^2)$$

並以此值為音壓之標準。又將 $J \propto p^2$ 代入 dB 的計算式，就得出 $20 \log p/p_0$ 的關係，故音壓水準（即音強水準）為，

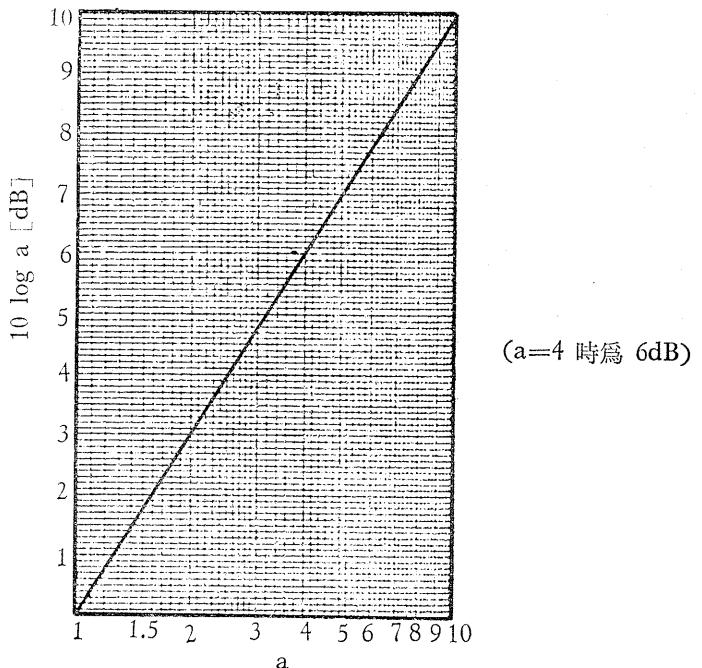
$$\text{SPL} = 20 \log \frac{p}{2 \times 10^{-5}} = 10 \log \frac{J}{10^{-12}} (\text{dB}) \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

式中， p 與 J 則為欲求得之音壓與音強，表二表示兩者間之關係。

為方便對(8)式之對數計算不熟練者之應用，介紹一種使用半對數方格紙以求 dB 值的方法。圖二為市面上出售的半對數用紙的一片斷。(8)式的 p/p_0 係以 a 表示，如 $p/p_0=2$ 時，則為 3 dB， $p/p_0=5$ 時則為 7 dB。此外，如將此圖反過來用，就可以從 dB 求出 p/p_0 比。9 dB 即為 8 倍 ($a=8$) 之意思。比值在 1~10 以外時，可參照下述例子求出。例如 a 為 6,000 與 0.5 時試求其 dB 值。求法為 $10 \log 6000 = 10 \log (6 \times 1000) = 10 \log 6 + 10 \log 10^3 = 7.8 + 30 = 37.8$ dB，又如 $10 \log 0.05 = 10 \log 5/100 = 10 \log 5 - 10 \log 10^2 = 7 - 20 = -13$ dB。

表二 音壓水準

20—120—1	
10—114	
110— 10^{-1}	
2—100— 10^{-2}	
1—94	
90— 10^{-3}	
0.4—86	
0.2—80— 10^{-4}	
0.1—74	
70— 10^{-5}	
0.04—66	
0.02—60— 10^{-6}	
0.01—54	
50— 10^{-7}	
0.002—40— 10^{-8}	
0.001—34	
30— 10^{-9}	
0.0002—20— 10^{-10}	
0.0001—14	
10— 10^{-11}	
0.00002—0— 10^{-12}	
音	音
壓	壓
水	水
準	準
[$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$]	[dB]
[$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]	



圖二 dB 的求法

四、音源之功率水準

在研究噪音問題時，需處理音源功率水準之情況頗多，且再由功率水準導出之公式亦多。

所謂功率水準 (power level) 者，乃為音源之輸出功率以 dB 尺度來計量的方法，其標準值採用 $10^{-12}W$ 。功率水準以 PWL 表示，其計算式為

$$PWL = 10 \log \frac{P}{10^{-12}} \text{ (dB)} \quad (10)$$

式中， P 為音源的聲音輸出功率的瓦特數，例如瓦特數為 1 mW (10^{-3} W) 時其功率水準就成為 90 dB ，如果是 100 W 時則為 140 dB 。

由於(9)式的最後項與(10)式相同，因而容易引起混淆，不過(9)式中 J 係距音源某一距離處的聲音強度，其單位為 W/m^2 ，而(10)式中 P 為音源強度，其單位為 W 。PWL 對於一個音源只有一個數值，如以地震的情形做個比喻，則 PWL 相當於震級，SPL 相當於震度。

PWL 與 SPL 間之關係，可以次求出。假設要求出自輸出功率為 $P(W)$ 的小音源離開 $r(\text{m})$ 處之聲音強度 $J(\text{W/m}^2)$ 時，在自由空間情況下 $J = P/4\pi r^2$ 。將式子改寫成 $P = 4\pi r^2 J$ ，兩邊同除以 10^{-12} 則成

$$\frac{P}{10^{-12}} = \frac{J}{10^{-12}} 4\pi r^2 \quad (11)$$

將上式算成 dB 時，由(9)式及(10)式得出

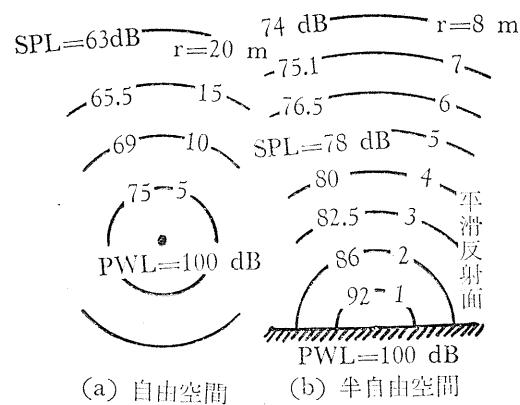
$$PWL = SPL + 20 \log r + 11 \quad (12)$$

式中， r 之單位為公尺。例如功率水準為 100 dB 之音源，在離開 10 m 處之音壓水準為約 69 dB 。

如果音源在光滑的平面上時，音波就作半空間的傳播，可由相同能量得出 2 倍聲音強度 ($J = \frac{P}{2\pi r^2}$)，可以下式表示。

$$PWL = SPL + 20 \log r + 8 \quad (13)$$

圖三表示 10 mW 即 $PWL=100\text{ dB}$ 的點音源，在自由空間的一點及在半自由空間的反射面上時，其音場之分布情形。



(半自由空間比自由空間之 SPL 大 3 dB.)

圖三 輸出功率 10 mW ($PWL=100\text{ dB}$) 點音源的音場

表三為數種音源的功率水準。噴射飛機發出的聲音雖達 10 kW，而吾人的聲音則只有 μW (micro watt) 的程度。

表三 數種音源之聲音輸出功率與音壓水準

音 源	聲 音 輸 出 功 率 (W)	功 率 水 準 PWL (dB)	音 壓 水 準 (距離) SPL (dB)
噴 射 飛 機	10^4	160	109 (100 m)
氣 力 鏈 琴	1	120	109 (1 m)
鋼 琴	2×10^{-2}	103	92 (1 m)
通 常 的 談 話	2×10^{-5}	73	62 (1 m)
耳 語	10^{-9}	30	19 (1 m)

五、音波的發生共鳴與放射能力

噪音的防範措施中，最基本也是最好的辦法為使音源本身停止。為此就需要對聲音是如何地發生作一番研究。

首先要瞭解者，即多數的音源都具有機械振動。當然許多種樂器、機械或機械零件在其音源部份具有機械振動。這些振動有弦的振動、棒的振動、膜的振動、板的振動等等。而引發這些振動的原因則有撞擊、摩擦、旋轉或為其他音波等。

在此必須瞭解者為共鳴或共振的現象。例如有大鼓小鼓各一個，木棒及鐵板各一件。用木棒以完全相同的打擊敲打時，除大鼓與小鼓發出不同聲音外，木棒與鐵板也發不同之音。其主要原因在於各自具有之共振頻率互異，各自以其固有之共鳴頻率發聲所致。而且共鳴頻率不但會依其形狀、材質，且亦會因其放置情況或張力等而變異。引起刺激如果像打擊的撞擊性，而刺激本身具有廣泛頻率範圍者最難予處理，原因為會引起任何的共鳴，而刺激如果是來自另外振動或旋轉等周期性的力量時，則該刺激的頻率與物體具有的共振頻率如果一致，聲音就會增強。這種情形在防音措施上，當首應避免者。又為避免引起激烈的共振，宜對共振體採用適當處置以壓制共振。例如在薄金屬片漆上很厚的塗料或在其背面貼襯等，就能使共鳴難於產生。

有一種音源却不使物體引起振動。如風吹到物體尖刃的部份而發出聲音，此時刃部並沒有振動，而是空氣在此處生成渦流以音波傳播。發動機排氣管的聲音、螺旋槳的回轉音等，都沒有物體振動的發生，而是直接發生空氣的疏密波，以聲音傳播的。這種情況下，問題非常複雜，難於阻止聲音之發生。或可降低其風速，或製造成不易產生渦流的形狀等來改善，然因無法使其完全不發生聲音，所以就需另裝消聲器。這種情況下，更應避免在其附近放置共鳴體或共鳴空氣柱等。笛子乃特別賦予共鳴的實例，而在防範噪音的措施上，則要避免造成笛子。

茲列出數種楊氏係數振動體的共振（共鳴），振動頻率如表四以供參考。表中 ℓ 表示長度、 ρ 表示密度、E 為楊氏係數 (Young's modulus)。絃及膜自身不具有形體者，則其振動就與張力 S 或 T 有關係。c 為空氣中音速。

以最簡單的鐵棒縱振動為例作說明，鐵的 $\sqrt{E/\rho}$ (此為棒材中縱振動速度，即為音速) 約為 5,000 m/s，故 1 m 長鐵棒的基音約為 2,500 Hz，其上音依倍音關係而在 5 KHz、7.5 KHz 與 10 KHz 等頻率都會引起共振。在空氣柱方面，如果尺寸相同並將兩端封閉，音速在 340 m/s 時

，就會在約 170 Hz、340 Hz、510 Hz 等頻率引起共振。如果圓管半徑為 r 之空氣柱，其兩端係開啓時，就需對於兩端加上開口端修正值 0.6 r ，使柱管加長 1.2 r 以求出共鳴頻率。

表四 數種振動體的振動頻率

振動體	基音振動數	基音之上音關係	備註
紺之橫振動	$\frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{S}{\sigma}}$	倍音	$S=$ 張力， $\sigma=$ 線密度
棒之橫振動	$\frac{K_1}{\ell^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	不在倍音	$K_1=$ 依橫截面形狀及兩端等條件而定的常數
棒之縱振動	$\frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	倍音	
圓形膜之振動	$0.7 \sqrt{\frac{T}{\sigma}}$	不在倍音	$T=$ 張力， $a=$ 半徑， $\sigma=$ 面密度
兩端開啓或封閉的空氣柱	$\frac{C}{2\ell}$	倍音	要準確時需作開口端修正
周邊固定的圓板	$\frac{K_2 h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}}$	不在倍音	$K_2=$ 常數， $h=$ 厚度， $a=$ 半徑比 $\sigma=$ Poisson

對於音源需加研究之另一項目為其聲音的放射性能。我們在常識上已知，低頻率聲音係由大形音源所發生，音源如非大形，低頻率聲音就難於發出來。連低音也能發出的擴音器，一定是做成大型者。至少如非大形，就不能發出強的低音。這些現象事實上係由於聲音放射性能所引起。假設試將擴音器外殼拆開後予以發音。則在高音部份因其具有指向性而能無妨礙地發出聲音，但在低音部份則因不具有指向性且波長又長，從正面出來的音壓就直接轉到背面，以消滅背面發生的相反位相聲音，而自背面發出之聲音就行消滅正面之音壓，使得振動板僅作前後的振動，聲音則發不出來。惟如果給予裝上大型的擋板 (baffle) 就能發出強的聲音。將小馬達拿在手上雖發不出聲音，但如果放在桌上就會發出頗強聲音的現象，乃說明係因將振動傳給放射能力好的桌板，所以容易發出聲音。

上述事實在採取噪音防範措施上，甚為重要，有時可以設法將會發出聲音的振動板予以絕緣，有些情形可藉使振動體不具有面積，就能達到防音的目的。

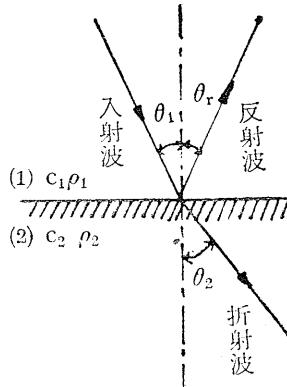
六、音波的反射

音波在不同介質的界面上，或雖在相同介質然因其密度變化或因其管子斷面積變化的界面上，均會有反射現象發生。圖四中設介質(1)與介質(2)之密度各為 ρ_1 與 ρ_2 ，音速各為 c_1 與 c_2 ，比音阻各為 $\rho_1 c_1 = R_1$ 與 $\rho_2 c_2 = R_2$ 。首先是 $\theta_1 = \theta_r$ ，反射率 (入射能與反射能之比) r 就成為

$$r = \left(\frac{R_1 \cos \theta_2 - R_2 \cos \theta_1}{R_1 \cos \theta_2 + R_2 \cos \theta_1} \right)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

當 $\theta_1 = 0$ 即為直角入射時，其反射率就成為

$$r_0 = \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$



圖四 反射及折射

如果聲音從空氣或水入射到固體的情況來研究時，由表一就可知道空氣的 \$R_1\$ 約在 400(MKS)的程度，而水的 \$R_2=1.5\times 10^6\$、鐵的 \$R_2=5\times 10^7\$，而在位數上大有差別，故有 99.9% 以上的能量會反射。

如果反射有凹凸時，其凹凸之尺寸比波長小則可將反射面當作光滑面考慮。從具有少許凹凸的建築或山坡面，仍會有回音之產生乃因聲音的波長頗長所致。如果要利用天花板或四周牆壁做為室內音響的反射面時，則需依據波長來考慮反射面的凹凸容許限度。

其次要討論到有關在反射時引起駐波(Standing wave)的情形。假設以壓力振幅 \$A\$ 之音波，垂直投射於反射面而經由透過、吸收等喪失一部份能量後，以壓力振幅 \$B\$ 的音波反射回來。並設當入射波與反射波重疊生成音波處離開反射面之距離為 \$x\$ 時就有下述關係

$$p=(A+B)\cos \omega t \cos kx + (A-B) \sin \omega t \sin kx \quad (16)$$

式中，\$k\$ 稱為波長常數，\$k=\omega/c=2\pi f/c=2\pi/\lambda\$。

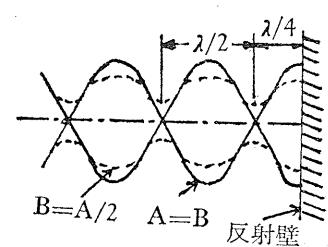
由(16)式可知，當 \$x=0, \lambda/2, \lambda, \dots\$ 即從界面離開每 \$\lambda/4\$ 的奇數倍時，\$p=(A-B) \sin \omega t\$ 就成為極小值。在 \$A=B\$ 即完全反射的情況時，其極大值為振幅 \$2A\$ 成為入射波的 2 倍音壓，其極小值時振幅成為 0。通常 \$A+B=a, A-B=b\$ 為可以測定的量，在界面之吸音率 \$\alpha_0\$ 可由下式求出。

$$\alpha_0 = 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2 = \frac{4ab}{(a+b)^2} \quad (17)$$

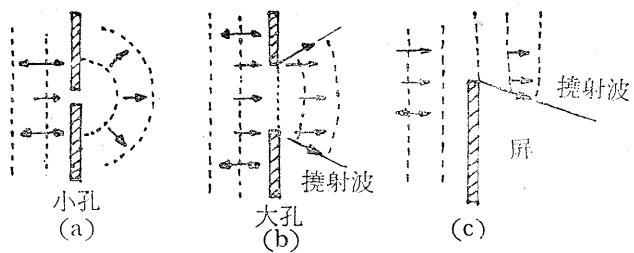
圖五為有關駐波的音壓分佈實例，表示 \$A=B\$ (為實線) 及 \$B=A/2\$ (為點線) 時的情形。如果以粒子速度分佈來看時，位置則僅有 \$\lambda/4\$ 的相差，在反射面產生極小，而在僅離開反射面 \$\lambda/4\$ 處就成為極大。

從金屬管的一端送入音波，使在另一端裝有反射面之前方引起上述的駐波，由測定管中的音壓分佈，藉以測出裝在管端橫截面之材料的反射率或吸音率的方法，頗受廣用。依此方法得出的吸音率叫做垂直入射吸音率，通常以 \$\alpha_0\$ 表示。

在有聲音的屋內牆壁之近處，多多少少都有駐波的生成。因而壁面上的音壓最高可上升到 2 倍 (6 dB)，所以將壁面作成具有吸音性能時，此種現象就可減弱。



圖五 駐波的音壓分析



圖七 聲音的撓射

在這種情況下要研討小孔與屏遮體的大小等問題時，則應以波長的尺寸作為計量尺度。對於波長 3.4 m 的 100 Hz 聲音，直徑 1 m 大的屏遮體仍是不足以屏擋的尺寸，而對於波長 3.4 cm 的 10,000 Hz 聲音，則直徑僅 5 cm 的孔亦屬大孔。

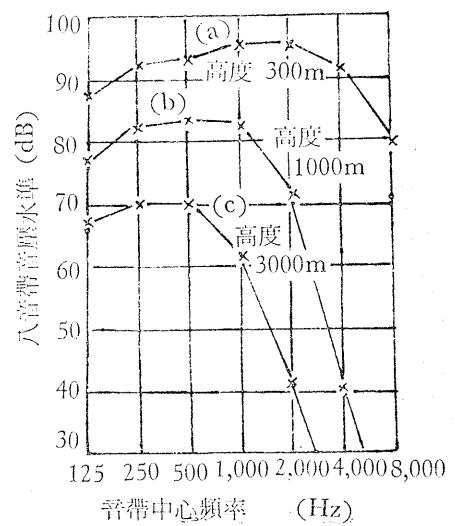
空氣中音波撓射造成最大的問題，為遮擋牆的效果不佳。當然屏遮牆愈高愈好，不過問題的造成是由波長而起，且因可聽頻率範圍廣達 1,000 倍，使得問題之解決更為困難。

九、空氣的吸音減衰

音波在空氣中傳播時產生之減衰，係由於波面之擴大所引起者為主，亦即所謂的距離減衰。不過傳播的距離如果稍遠時，就須要考慮到吸音減衰，亦即應將波面擴大的減衰再加上吸音減衰。

表五 空氣之吸音減衰 (dB/100 m)

頻率 (Hz)	溫度 (°C)	相對濕度 (%)			
		30	50	70	90
500	-10	0.56	0.32	0.22	0.18
	0	0.28	0.19	0.17	0.16
	10	0.22	0.18	0.16	0.15
	20	0.21	0.18	0.16	0.14
1000	-10	1.53	1.07	0.75	0.57
	0	0.96	0.55	0.42	0.38
	10	0.59	0.45	0.40	0.36
	20	0.51	0.42	0.38	0.34
2000	-10	2.61	3.07	2.55	1.95
	0	3.23	1.89	1.32	1.03
	10	1.96	1.17	0.97	0.89
	20	1.29	1.04	0.92	0.84
4000	-10	3.36	5.53	6.28	6.05
	0	7.70	6.34	4.45	3.43
	10	6.58	3.85	2.76	2.28
	20	4.12	2.65	2.31	2.14
5940	-10	4.11	6.60	8.82	9.48
	0	10.54	11.34	8.90	6.84
	10	12.71	7.73	5.47	4.30
	20	8.27	4.67	3.97	3.63

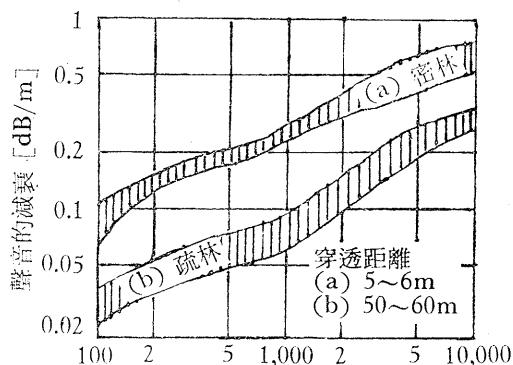


圖八 飛機聲音之減衰

表五表示空氣中吸收聲音與溫度、濕度等參數之關係情形。由表可知，頻率未達 1,000 Hz 的聲音對 100 m 距離之減衰幾乎經常達不到 1 dB，故多可予忽略。不過隨着頻率之增高，吸收就急速增加，尤其空氣在乾燥狀態下吸收就急速增大。溫度對於吸收的影響則呈現比較複雜的性質。

圖八表示將此項吸音列入考慮的飛機聲音計算例。(a) 為在高度 300 m 時的實測值，而(b) 為高度 1,000 m，(c) 為高度 3,000 m 時的推算值，係將自由音場的距離減衰加上表五的吸音減衰算出。惟在計算上，將各上空的溫度均當作 0°C，相對濕度則作爲 50% 計。由圖可知低頻率部份之距離減衰在 300 m 與 3,000 m 高度時，有 20 dB 的相差，但在高頻率則受到吸音減衰的很大影響，聲音之音色亦起了全盤的變化。遠方的雷鳴與汽笛聲之所以常常聽成爲低調的聲音，則基於此理。

不過上述的情形，其原因並非全部限於空氣的吸收。在障礙物的撓射上則低音部份較多，在吸收面的吸收上，低音的吸收則較少。例如透過叢林的聲音，也是低音部份的減衰較小。圖九爲叢林內的吸音實例，100 Hz 的聲音透過 100 m 密林之減衰也不過數 dB，至於 10,000 Hz 則就會減衰數拾 dB。此例亦同時表示藉種植樹木等來防音是極無效的。100 m 的叢林才有上述的程度的吸音能力，乃是說明爲數寥寥的街道樹是不能期望有防音效果的。



圖九 叢林內聲音傳播之減衰

最後談到聲音沿着吸音面傳播的問題。例如在雪地的早晨會感到特別安靜，又在草皮的早晨也有類似的情形。在理論上，地面爲完全反射面或爲完全吸收面之差異，就相當於將同一音源放置於半自由空間或自由空間之差異，故地面如爲吸收面時其聲壓水準就應該小於 3 dB。沿着地面高度在波長程度範圍內，聲音會特別變小。在前院種植草皮，就會使一樓門窗附近變成相當安靜。相反地，如果不將禮堂後排座位提高，就受到前排座位聽衆的吸收而不易聽到聲音，雪地早晨之安靜，並非只因吸收較多，且從地面發出的車輛等噪音也較少所致。

十、指向性與指向性音源的音壓水準

音源如果是一點，音波就成爲球面波而不具有指向性。相反的如果是無限寬的板狀音源時，就會發出平面波，而具有完整的單一指向性。此二者乃爲兩個極端的情形。當然，任何情況下都應考慮到音源與波長間相對大小，例如 50 cm 的方形平板音源，對波長 6.8 m 的 50 Hz 音波來

說幾乎是個點音源，但對於波長 3.4 cm 的 10 KHz 音波而言，則將其當作無限平面音源也無太大的誤差。

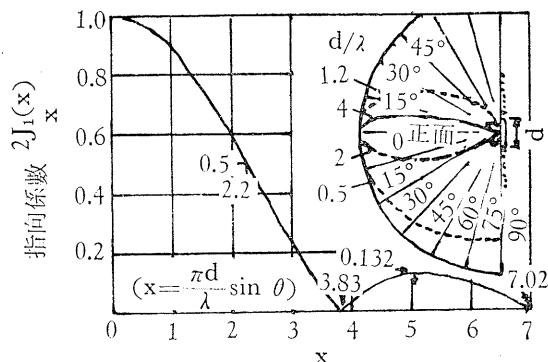
實際音源之大小對波長而言，當然是有限的。例如直徑為 d 之圓板，其波長為 λ 時，板之指向特性為

$$R = \left| \frac{2J_1(x)}{x} \right| \quad x = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin \theta \dots \dots \dots \dots \dots \dots (19)$$

式中， $J_1(x)$ 為第一種 Bessel 參數， θ 為對圓板割垂直線所成的角度。如果長方形板各邊的長分別為 a 及 b ，則欲求得相同的式子時，就可得出下述關係。

$$R = \left| \frac{\sin x}{x} \cdot \frac{\sin y}{y} \right| \quad x = \frac{\alpha a}{\lambda} \cos \alpha \quad y = \frac{\beta b}{\lambda} \cos \beta \dots \dots \dots \dots \dots \dots (20)$$

式中， α 與 β 係連結中點與探討之點的連線所成之角度。



圖十 活塞圓板 (直徑 d) 之指向性

圖十係表示(19)式之形狀，橫軸以 x 表示，當音源板之大小與波長一經決定，指向性的形狀就固定。當 $x=0$ 時即為正面的方向。欲求得振幅為 $1/2$ 時的方向及最初的波谷，應先分別設定 $2J_1(x)/x=0.5$ 及 $J_1(x)=0$ ，然後分別由 $x=2.2$ 及 $x=3.83$ 求出 d/λ 與 θ 的關係。以 $d/\lambda=1$ 及 $d/\lambda=10$ 為例作個研討。振幅為 $1/2$ 時之方向，在前者成為約 44.5° 的方向後者則成為 4° ，又最初的波谷，前者在上面 90° 之範圍內不會出現，而後者則在約 7° 處出現。這種情形表示 100 Hz 聲音對直徑 3.4 m 圓板也無明顯的指向性，但 10,000 Hz 聲音對直徑 34 cm 的圓板却具有極顯著的指向性。大致來說，振動板比波長大時，其指向性就不能忽略。在圖十之右上方係 d/λ 為 0.5、1.2、2 與 4 時之指向性以 $1/4$ 象限來表示者。

對於成為機械等設備音源部分的振動板或排氣孔等，應從其大小與其發出聲音波長方面來研討其指向性。例如聲音如果從大的孔出來時，就會由於指向性使得其正面處的聲音變成特別大。

圖十一係表示圓形振動板於半減角 ($R=0.5$) 及最初的小值 ($R=0$) 時的方向。

茲作指向性係數 (Directivity factor) Q 及指向性利益 (Directional gain) G 的意義如下。設從音源特定方向離開某一距離處之音壓為 P_d ，其音壓水準為 SPL_d ，而在此距離四週各向的平均音壓 P_{av} ，平均音壓水準 SPL_{av} 時， Q 及 G 可分別自下式求出。

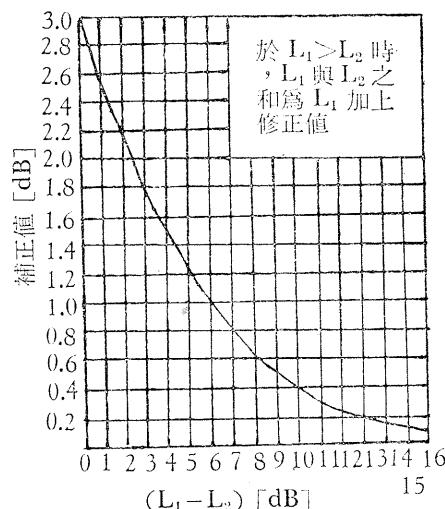
表六 $10^{0.x}$ 的 值

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$10^{0.x}$	1	1.26	1.53	2.00	2.51	3.16	3.98	5.01	6.31	7.94

計算例：試求 83 dB, 85 dB, 82 dB 與 78 dB 之和。

將上列各數值代入(24)式，作如下之計算。

$$\begin{aligned}
 L &= 10 \log (10^{8.3} + 10^{8.5} + 10^{8.2} + 10^{7.8}) \\
 &= 10 \log \{10^8(10^{0.3} + 10^{0.4} + 10^{0.2}) + 10^7 \times 10^{0.8}\} \\
 &= 10 \log \{10^8(2.00 + 3.16 + 1.58) + 10^7 \times 6.31\} \\
 &= 10 \log \{10^8 \times 7.37\} \\
 &= 10 \log 10^8 + 10 \log 7.37 \\
 &= 80 + 10 \times 0.87 = 88.7 = 89 \text{ dB}
 \end{aligned}$$



圖十二 dB 和的計算修正值

(二) dB 和的概略算法

藉圖十二或表七依次求出二值之和，加算下去就可。兩個數值相同就加 3 dB，如果數值僅差 1 dB 時，就在較大之數值加 2.5 dB。

表七 dB 和計算之修正值

$L_1 - L_2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19以上
修正值	3.0	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2			0.1		0		

計算例：設某一聲音的八音程分析之結果如次表所示。試求其總合的音壓水準 (all pass or overall sound pressure level)。

中心頻率, Hz	63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
八音帶音壓水準, dB	75	77	77	71	68	68	60	45

1. 從數值大的加算

$$\begin{array}{r} 77 \\ + 3.0 \\ \hline 80.0 \\ + 1.2 \\ \hline 81.2 \\ + 0.4 \\ \hline 81.6 \\ + 0.2 \\ \hline 81.8 \\ + 0.2 \\ \hline 82.0 \end{array}$$

2. 從數值小的加算

$$\begin{array}{r} 45 \\ + 0.1 \\ \hline 60.1 \\ + 0.6 \\ \hline 68.6 \\ + 2.7 \\ \hline 71.3 \\ + 2.8 \\ \hline 74.1 \\ + 2.5 \\ \hline 77.5 \\ + 2.7 \\ \hline 80.2 \\ + 1.8 \\ \hline 82.0 \end{array}$$

如上述計算不論從數值大的或小的加算，所得結果相同，不過從大的加算時最後約有3次的計算可以免去，故數據多時就應從大的開始加算。此外在上例中，68與68之和為71，此71與原有之71之和為74。又77與77之和為80。因此其計算就成為求80、75與74之和。

(三) 平均值 (功率平均)

要算出 dB 的平均時，通常是就原來的功率或音壓數值求出其平均值後，再計算其 dB 值。設強度為 J_1, J_2, J_3, \dots 的 dB 值分別為 L_1, L_2, L_3, \dots 時，其平均值 \bar{L} 之求法為

$$\begin{aligned} \bar{L} &= 10 \log \frac{1}{n} \{ (J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n) / J_0 \} \\ &= 10 \log \{ (J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n) / J_0 \} - 10 \log n \\ &= L - \log n \end{aligned} \quad (25)$$

式中， L 為 n 個之和，亦即從和減去 $10 \log n$ 即可。

在前述(一)的例子中，83, 85, 82, 78 dB 之平均，就可以從其和的 88.7 dB 減去 $10 \log 4 = 6.0$ 成為 82.7 dB，再予四捨五入成為 83 dB。上列 4 個數值之算術平均為 $(83+85+82+78)/4 = 82$ dB。所以算平均值比算術平均值大。不過所有的數值之差如果在 5 dB 以內時，則不論取算平均值或算術平均值，均無大異，故都求算術平均值。

(四) dB 差及背景噪音之修正

求出兩個 dB 值之差，為修正背景噪音 (Background noise) 上必要的計算。要修正背景噪音之理由為，可藉僅測定對象聲音與背景噪音之和以及背景噪音兩者的水準，再從兩者之差求得對象聲音的水準。設 L_1 (dB) 與 L_2 (dB) 之和為 L_3 (dB) 時，則只要測得 L_3 及 L_2 就能够求出 L_1 。亦即由 L_3 減去表八的修正值即可。

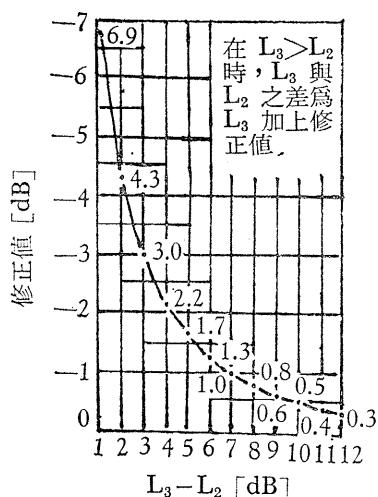
要經常在相同條件下使用同一噪音計來比較極穩定的聲音時，雖然得以圖十三所載數值或表八所列數值來作修正，但在通常的噪音測定精度上，是不會超過表列略值之精度。

表八 dB 差計算之修正值

$L_3 - L_2^*$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
補正值	真 值	6.85	4.33	3.00	2.21	1.65	1.26	0.97	0.75	0.59	0.46	0.35	0.30
	略 值	—	—	3	2			1			0		

計算例：設有三個音源，僅有第一個音源出聲時為 75 dB，僅有第二個音源時為 78 dB，而三個音源同時出聲時則為 83 dB 時，試求第三個音源之水準。

先從 83 dB 減去 78 dB。由表八得 $83 - 1.65 = 81.35$ ，再由此減去 75 dB。由於修正值為約 1.15，故 $81.35 - 1.15 = 80.2$ ，即 80 dB 為所求數值。如以略值來計算，則先由 $83 - 2 = 81$ ，再由 81 dB 與 75 dB 之差 $81 - 1 = 80$ ，得出相同的結果。



圖十三 背景噪音之修正