

室内音響設計のための明瞭性評価指標SNR_{stat}とその応用に関する研究

増田, 潔

<https://doi.org/10.11501/3168355>

出版情報：九州芸術工科大学, 1999, 博士（芸術工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

第2章 明瞭性評価指標 SNR_{stat}

室内音響設計のための明瞭性評価指標 SNR_{stat} が開発された技術的背景、基本概念についてまとめ、理論的な導出過程を示す。また、室内音響設計技術としての実用性を考慮して単一評価量 \overline{SNR}_{stat} を提案するとともに、その予測計算に使用するデータについて計測方法を明確にする。

2.1 開発の背景

音声の明瞭性が重要になる建築空間を設計する場合、使用目的に応じた最適残響時間や平均吸音率を設計指標として使用することが多い。しかし、これらの指標に基づく音響設計は、音源と受聴点との位置関係、音源の指向性や数が明確に考慮されていない。したがって、例えば電気音響設備により複数のスピーカで拡声する場合、室内音響設計と電気音響設計が別々に計画されることとなり、最善の設計がなされない。また、残響以外に明瞭性を阻害する背景騒音のレベルが無視できない場合には対処できない。

一方、あくまでも明瞭性を確保できる空間を設計するという考え方から、既存の明瞭度指標を設計に使用する方法もある。このような指標を設計に用いるには、予めインパルスレスポンスを予測しておかなければならぬ場合が多い。既存の明瞭度指標で最も使用頻度が高い STI¹⁾ も同様である。STI は Fig.2.1 に示すように、複数の変調周波数 F (0.4Hz から 20Hz まで 1/3 オクターブバンドピッチで 18 個) で 100% 振幅変調されたノイズを明瞭度を測定したい空間および系に入力し、その信号の受聴点での変

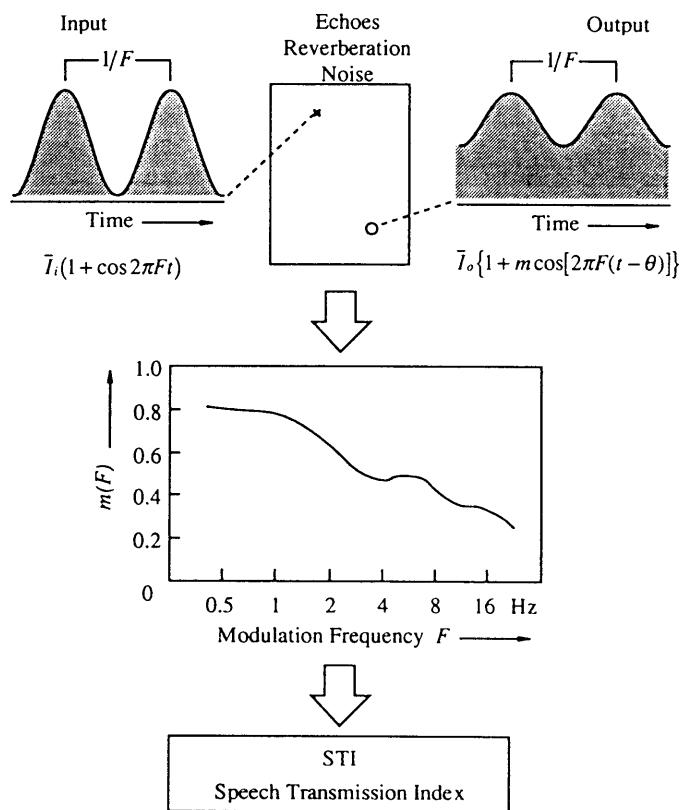


Fig.2.1 MTFとSTIの算出法(文献1)より引用)

調度を表す MTF (Modulation Transfer Function; $m(F)$) を計測した結果から算出される。ここで入力信号と観測される出力信号は

$$\begin{aligned} I_i(t) &= \bar{I}_i(1 + \cos 2\pi F t) \\ I_o(t) &= \bar{I}_o \{1 + m \cos[2\pi F(t - \theta)]\} \end{aligned} \quad (2.1)$$

で表される。インパルスレスポンス予測技術により求められた入力点と受聴点間のインパルスレスポンス（音圧の2乗値）を $r(t)$ とすると、出力信号は次式で表される。

$$I_o(t) = \int_0^\infty I_i(t-t')r(t')dt' \quad (2.2)$$

これを変形していくと、最終的に $m(F)$ は

$$m(F) = \frac{\left| \int_0^\infty e^{2\pi F t} r(t) dt \right|}{\int_0^\infty r(t) dt} \left(1 + 10^{(-S/N)/10} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

で計算できる。ここで S/N は音声の信号と背景騒音との S/N 比 (dB) である。したがって、インパルスレスポンスを予測することができれば、(2.3)式から得られる $m(F)$ もとに

$$\left. \begin{aligned} STI &= \left[\overline{(S/N)}_{app} + 15 \right] / 30 \\ \overline{(S/N)}_{app} &= \frac{1}{18} \sum_{F=0.4}^{20} (S/N)_{app,F} \\ (S/N)_{app,F} &= 10 \log \frac{m(F)}{1 - m(F)} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

で STI を予測することも可能である。しかし、第1章で述べたように、インパルスレスポンス予測技術を設計に適用することが困難である現状を考えると、この方法も現実的とはいえない。（ここで、 $(S/N)_{app,F}$ は変調度から得られる残響による影響も含んだ実質的な S/N 比 (dB) である。また、 $\overline{(S/N)}_{app}$ は 18 個の変調周波数に対して得られる $(S/N)_{app,F}$ の平均値である。）

音響設計で現実的な手法といえば、遮音設計や残響時間計算に使用される統計室内音響理論 (Statistical Room Acoustics : 主に直接音場と拡散音場を仮定したエネルギー音響理論)

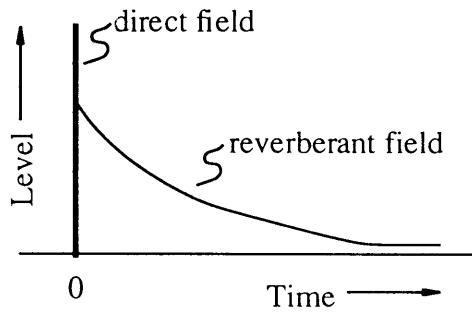


Fig.2.2 仮想的なインパルスレスポンス

に基づくものであろう。この考え方に基づいて STI を予測する方法²⁾も提案されている。

Fig.2.2 に示すような仮想的な 2 乗音圧インパルスレスポンス

$$r(t) = r_d(t) + r_r(t) \quad (2.5)$$

を仮定する。ここで、 $r_d(t)$ は直接音、 $r_r(t)$ は反射音を表し、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} r_d(t) &= \frac{q_t q_l}{r^2} \delta(t) \\ r_r(t) &= \frac{1}{r_c^2} \frac{13.8}{T} \exp(-13.8t/T) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

で表現される。ここで、 q_t は音源の指向性、 q_l は両耳聴の効果、 T は残響時間、 r は音源から受聴点までの距離である。 r_c は室の容積Vと残響時間から $r_c^2 = 0.0032 V/T$ で与えられる。(2.6)式を(2.3)式に代入して変形すると、

$$\left. \begin{aligned} m(F) &= (A^2 + B^2)^{1/2} / C \\ A &= \frac{q_t q_l}{r^2} + \frac{1}{r_c^2} \left[1 + (2\pi\rho F)^2 \right]^{-1} \\ B &= \frac{2\pi\rho F}{r_c^2} \left[1 + (2\pi\rho F)^2 \right]^{-1} \\ C &= \frac{q_t q_l}{r^2} + \frac{1}{r_c^2} + q_t i_n \\ r_c &= \sqrt{0.0032 V/T} \\ \rho &= T/13.8 \\ i_n &= 10^{(L_n - L_{sp1m})/10} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

となる。ここで、 L_n は背景騒音のA特性音圧レベル、 L_{sp1m} は自由音場で1m点における音声のA特性音圧レベルである。よって、(2.4)式に(2.7)式の結果を代入すれば STI を予測することができる。この方法は、計算に使用されるパラメータのほとんどが設計数値で与えられているため設計への適用が可能であるように見える。さらに、この方法を拡張して低次の反射音や複数の音源の影響を考慮して RASTI を予測する手法³⁾も提案されており、様々な状況に対応できそうである。しかし、実際にはこの方法も以下の理由により設計での使用が難しい。

まず、この方法では反射音のうち明瞭性に貢献する初期反射音とそれ以外の反射音の区別が明確にならないという問題がある。完成した建築空間における明瞭性を測定により評価する、もしくは、設計時に単に評価するだけで対策まで詳細に検討しないのであ

れば、初期反射音とそれ以外の反射音（後部残響音）を分ける必要はない。しかし、効率的な音響設計を行うためには、明瞭性に貢献する初期反射音がどれだけあるか、直接知ることが重要となる。初期反射音は第一波面（大概は直接音）が受聴点に到達してから、ある一定の範囲の時間差で到達する反射音である。この時間差は音速を介して設計数値である距離に直接対応づけられ、設計者はこの数値をもとに具体的な設計をすすめることができる。どの位置に反射面を設置すれば良いか等の音響設計が、有効な初期反射音を供給するという思想に基づいて実際に行われているのが、初期反射音に関する情報の必要性を示す良い例である。

第2の理由は明瞭性を疎外するどの要因がどれだけ影響しているのか見えづらいため、明瞭性が確保できないと評価された場合に、効率的な対策の立案が難しいことである。さらに、一般の建築音響技術者には、その難解さ故に(2.7)式を様々な状況に対処できるよう拡張しながら運用することはまず不可能であろう。

統計室内音響理論に基づいて、初期反射音と後部残響音を分けて算出する方法がBarron⁴⁾により提案されている。この方法を用いると、インパルスレスポンスから計算されるC80 (Clarity)⁵⁾

$$C80 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (2.8)$$

が

$$C80 = 10 \log [(d + e_r)/l] \quad (2.9)$$

で計算できる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} d &= 100/r^2 \\ e_r &= (31200T/V)e^{-0.04r/T} \left(1 - e^{-1.11/T}\right) \\ l &= (31200T/V)e^{-0.04r/T} e^{-1.11/T} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

であり、 d が直接音、 e_r が初期残響音、 l が後部残響音を表している。この方法を使用すれば残響計算と同程度の計算でC80を予測することが可能で、非常に実用性が高い。このような考え方は、インパルスレスポンスを基本とした他の指標にも応用できるはずである。

インパルスレスポンスを用いる既存の明瞭性評価指標の中で、初期反射音と後部残響

音および背景騒音を評価するものに Lochner と Bruger が提案した Signal-to-Noise Ratio (*SNR*)⁶⁾がある。この評価法では、第1波面が到達してから 95ms までに到達する初期反射音を「明瞭性に貢献する Signal」に、それ以降に到達する残響音は背景騒音とともに「明瞭性を阻害する noise」と定義しており、次式で計算できる。

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\Delta t} \alpha(p,t) p^2(t) dt}{\int_{\Delta t}^{\infty} p^2(t) dt + p_N^2 \tau} \quad (2.11)$$

ここで、 $p(t)$ は瞬時音圧、 p_N は定常的な背景騒音、 $\alpha(p,t)$ は音圧と到達時間によって変化する係数(Fig.2.5参照)、 τ は継続時間である。 Δt は有効な初期反射音の直接音到達時刻からの最大遅れ時間であり、95ms である。

SNR の算出はインパルスレスポンスを基本としているため、音響設計に用いることは難しいが、初期反射音と後部残響音を区別し、さらに背景騒音の影響まで考慮する考え方は重要である。

そこで、この *SNR* の基本概念をもとに、統計室内音響理論のみで算出でき、室内音響設計に使用しやすい明瞭性評価指標として *SNR_{stat}* を導出する。尚、*SNR_{stat}* の小文字の *stat* は Statistical Room Acoustics に基づいて計算されていることを示している。

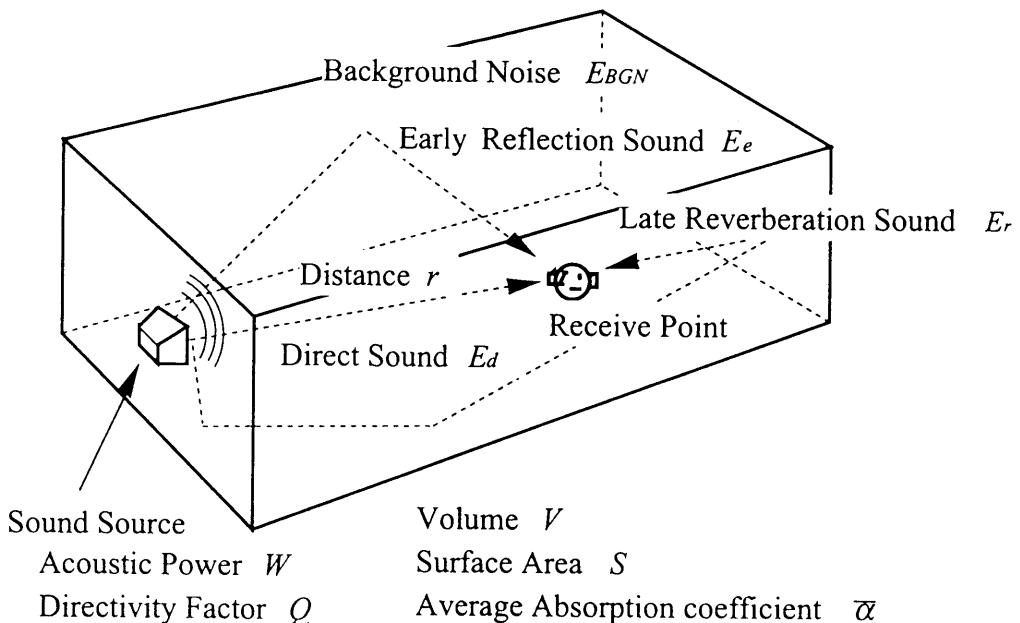


Fig.2.3 *SNR_{stat}* の算出時のパラメータ

2.2 SNR_{stat} の導出

(2.11)式をもとに、統計室内音響理論に基づく方法で計算が可能な評価量を以下のように定義する。

$$SNR_{stat} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_d + E_e}{E_r + E_{BGN}} \right) \quad (2.12)$$

(2.12)式において、 E_d は直接音のエネルギー密度、 E_e は初期反射音のエネルギー密度であり、これらの和は(2.11)式の分子の積分に対応している。 E_r 、 E_{BGN} はそれぞれ後部残響音と背景騒音のエネルギー密度であり、(2.11)式の分母に対応している。(Fig.2.3)

それぞれのエネルギー密度は下式で計算される。

$$E_d = \frac{W}{c} \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (2.13)$$

$$E_e = \frac{W}{c} \frac{4}{R} \left\{ 1 - (1 - \bar{\alpha})^n \right\} \quad (2.14)$$

$$E_r = \frac{W}{c} \frac{4}{R} (1 - \bar{\alpha})^n \quad (2.15)$$

$$E_{BGN} = \frac{1}{c} 10^{\frac{L_{BGN}-120}{10}} \quad (2.16)$$

ここで、 W は音源の音響パワーで、パワーレベルを PWL とおくと、

$$W = 10^{\frac{PWL-120}{10}} \quad (2.17)$$

で与えられる。 c は音速、 Q は音源の指向係数、 r は音源から受聴位置までの距離、 R は室定数 ($= S\bar{\alpha}/(1 - \bar{\alpha})$)、 $\bar{\alpha}$ は平均吸音率である。 Q は音源そのものの指向特性 $D(\theta, \varphi)$ と、音源が設置されている場所により決定される放射立体角 Ω により、

$$Q = 10^{D(\theta, \varphi)/10} \times \frac{4\pi}{\Omega} \quad (2.18)$$

で与えられる。ここで、 θ および φ は音源の正面の方向を示すベクトルと音源から受聴位置に向かうベクトルとのなす水平角および仰角である。指向特性 $D(\theta, \varphi)$ については2.5.2項で詳しく説明する。 n は明瞭性に貢献する反射音の最大反射次数で、平均自由行路 $p = 4V/S$ (V :容積、 S :表面積) により、

$$n = \frac{r + c\Delta t}{p} \quad (2.19)$$

と表される。 L_{BGN} は背景騒音の音圧レベルである。

(2.14)式は直接音が到達してから Δt までに到達する反射音の和を示す式

$$E_e = \frac{pW}{cV} \sum_{i=1}^n (1 - \bar{\alpha})^i \quad (2.20)$$

を変形することにより導出されており、(2.15)式は(2.14)式の n を無限大にして得られる全反射音エネルギーから初期反射音エネルギーを差し引いた

$$E_r = \lim_{m \rightarrow \infty} \left[\frac{4W}{cR} \{1 - (1 - \bar{\alpha})^m\} \right] - \frac{4W}{cR} \{1 - (1 - \bar{\alpha})^n\} \quad (2.21)$$

から得られている。この考え方を図示すると Fig.2.3 中の(a)のようになる。図示されている各反射音のエネルギー密度は音場内のどの場所においても同じであると仮定しており、直接音が到達して Δt までの全ての反射音を初期反射音として、残りは残響音として取り扱う。Fig.2.4 の(b)は p よりも r が大きい場合で、音源から直接音が到達する前に初期反射音の一部が到達しているような表現となっている。直接音よりも先に反射音が到達することは実際にはあり得ないが、この反射音はあくまでも直接音到達の直後きわめて早い時間に到達すると仮定して初期反射音エネルギーに含めることとする。これは、音源から距離が離れるほどその直後に到来する初期反射音が増加することに経験的に一致し、これまでの受音点の場所によらない Fig.2.4(c) のような解釈や、音源からの距離を考慮した Barron の方法 (Fig.2.4(d)) とは異なる。Barron が提案した C80 を統計室内音響理論により求める方法⁴⁾では、Fig.2.2 の(d)に示すようにこの反射音は反射音全体から除かれる。こ

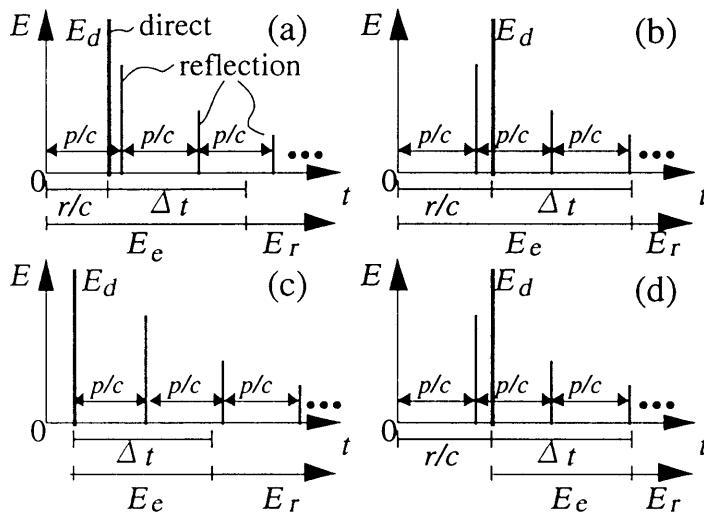


Fig.2.4 初期反射音の算出方法の違い

(a)および(b): SNR_{stat} の算出方法、(c): 一般的な算出方法、(d): Barron の算出方法

のため、音源からの距離が大きくなると初期反射音と後部残響音を合わせた全反射エネルギーが減少することになり、全反射音エネルギーが場所よらず一定とする拡散音場の仮定からはずれてくる。確かに後壁を吸音性にしたコンサートホールのように、音源から距離が離れるにしたがい常に音圧が低下する傾向をもつ空間では、結果的に実測値との一致を見る場合もある。しかし、このような現象は単に音源からの距離ではなく、音源、受音位置、吸音面や反射面の分布の仕方に依存するものであるから、ここではBarronの方法は採用しない。この現象については第6章にて述べる。

(2.13)～(2.16)式は、遮音計算や音圧分布計算に使用する統計室内音響理論による計算式の延長線上にあり、実際の音響設計にそのような計算式を使用している設計者、音響技術者には理解しやすいものと考えられる。さらに、直接音、初期反射音、後部残響音、背景騒音のエネルギー密度を別々に取り扱うことができるため、明瞭性を阻害する要因や、明瞭性を確保するための対策を見つけやすい。設計者、音響技術者に理解しやすい例として(2.12)に(2.13)～(2.17)式を代入して得られる次式を示す。

$$SNR_{stat} = PWL + 10 \log_{10} \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \left\{ 1 - (1 - \bar{\alpha})^n \right\} \right] - 10 \log_{10} \left\{ \frac{4}{R} (1 - \bar{\alpha})^n 10^{\frac{PWL}{10}} + 10^{\frac{L_{BGN}}{10}} \right\} \quad (2.12-a)$$

さらに、背景騒音が十分低く無視できる場合には、

$$SNR_{stat} = 10 \log_{10} \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \left\{ 1 - (1 - \bar{\alpha})^n \right\} \right] - 10 \log_{10} \left\{ \frac{4}{R} (1 - \bar{\alpha})^n \right\} \quad (2.12-b)$$

となる。この式は音響設計で音圧分布の計算に使用する簡易計算式、

$$SPL = PWL + 10 \log_{10} \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right]$$

に良く似ており、特に拡散音成分を示す $4/R$ が(2.12-b)においては、平均吸音率 $\bar{\alpha}$ と最大有効反射次数 n によってきまる係数 $(1 - \bar{\alpha})^n$ によって初期反射音と後部残響音に分配されていることが良く分かる。

(2.11)式において Δt は 95ms と定義されているが、これまでの幾つかの研究結果は、明

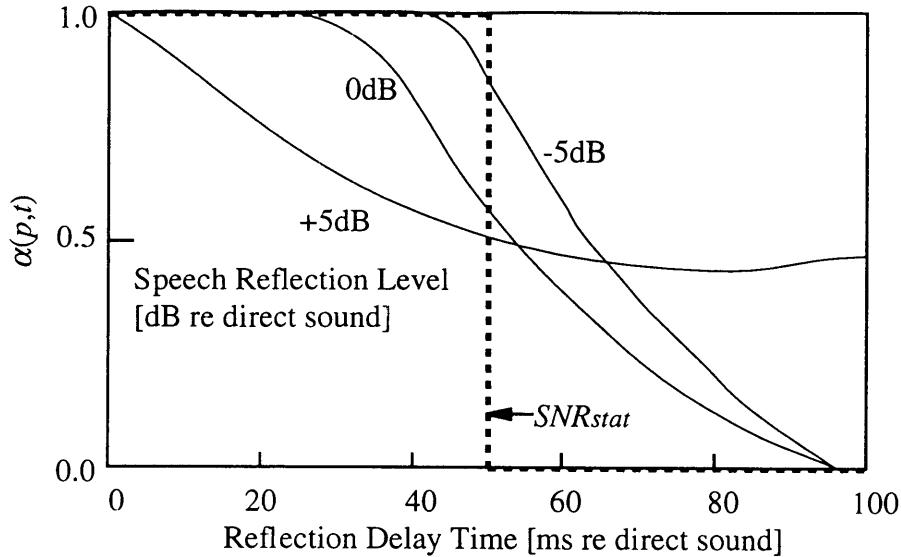


Fig.2.5 SNR の計算に使用する係数 $\alpha(p,t)$ (実線: 文献 8)) と SNR_{stat} における $\alpha(p,t)$ の考え方 (破線)

瞭性に有効とされる初期反射音の最大遅れ時間の範囲が50msから100msの間にあることを示している⁷⁾。 Δt が短くなるということは、有効な反射音がその分減少することを意味し、設計者は明瞭性を確保するためにより多くの建築的な対策を施さなければならなくなる。つまり、 Δt を短くすることは安全側の設計を要求することになるのである。したがって、ここでは安全側に設計されるべきであるという実務上の考え方から、 Δt の値として最短の50msを採用することとした。また、(2.11)式にある初期反射音に掛かる係数 $\alpha(p,t)$ は (2.13)、(2.14) 式では、Fig.2.5 中に破線で示したように Δt 内で常に 1.0 としている。確かに、この係数を Fig.2.5 に示した実線のような関数とすれば、直接音が到達してから Δt 秒後を境にして反射音の評価が貢献する側から阻害する側に急に変化することを防ぐことができると考えられる。しかし、あくまでも設計に使用しやすいこと、設計思想が明確になることを優先して、 Δt 秒内で常に 1.0 とすることにした。

2.3 空気吸音を考慮した計算式

残響時間を求める場合と同様に、対象とする建築空間が大きくなれば空気吸音の影響が無視できなくなる。そこで、空気吸音を考慮する場合には、(2.13)、(2.14)、(2.15)式の代わりに 1mあたりの減衰率 m で補正した次式を用いる。

$$E_d = \frac{W}{c} \frac{Q}{4\pi r^2} e^{-mr} \quad (2.22)$$

$$E_e = \frac{W}{c} \frac{4}{R'} \left\{ 1 - \left\{ (1 - \bar{\alpha}) e^{-mp} \right\}^n \right\} \quad (2.23)$$

$$E_r = \frac{W}{c} \frac{4}{R'} \left\{ (1 - \bar{\alpha}) e^{-mp} \right\}^n \quad (2.24)$$

ここで、室定数 R' は次式で定義される。

$$R' = \frac{S \left\{ 1 - (1 - \bar{\alpha}) e^{-mp} \right\}}{(1 - \bar{\alpha}) e^{-mp}} \quad (2.25)$$

尚、減衰率 m は文献9)にある方法で、温度・湿度からかなり正確に求めることができる。

2.4 単一評価量 \overline{SNR}_{stat}

以上に述べた計算式は一般式であり、実際の評価ではどの周波数帯域について計算するか、また、最終的な明瞭性の評価をどのようにするかを、明確にしておかなくては室内音響設計に使用することはできない。そこで、明瞭性評価のための単一評価量 \overline{SNR}_{stat} を次式で定義する。

$$\overline{SNR}_{stat} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2} \left(10^{SNR_{stat,500Hz}/10} + 10^{SNR_{stat,2kHz}/10} \right) \right\} \quad (2.26)$$

ここで、 $SNR_{stat,500Hz}$ 、 $SNR_{stat,2kHz}$ はそれぞれ中心周波数500Hzおよび2kHzのオクターブバンドについて求めた SNR_{stat} の値である。

オクターブバンド毎に計算する理由として、通常、室内音響設計、もしくは遮音計算をする場合、各種内装材のオクターブバンドの吸音率データは 1/3 オクターブバンドのデータよりも比較的入手しやすいことが挙げられる。また、計算対象帯域を 500 Hz および 2kHz 帯域に限定するにあたっては、RASTI が同様の帯域の測定のみで明瞭度の判定を行っていることを参考にした。また、付録 A-1 に示す心理実験において、500Hz と 2kHz 帯域が聞き取りの判断に重要であるという結論に至ったことも考慮した。

2.5 計算に必要なデータの計測方法

SNR_{stat} を室内音響設計時の明瞭性評価指標として実用化するためには、計算に必要となるデータが普遍的である必要がある。普遍的とは、そのデータを入手しやすいこと、また入手できない場合には誰が測定しても一定の値が得られるような計測方法が与えられ

Table 2.1 SNR_{stat} の計算に必要なデータの測定法に関する国内の規格

測定項目	規格
内装材の吸音率	JIS A 1419 垂直入射吸音率 JIS A 1419 残響室法吸音率
音源のパワーレベル	JIS Z 8734 残響室における音響パワーレベル測定方法 JIS Z 8732 無響室又は半無響室における音響パワーレベル測定方法
音源の指向性	JIS Z 8732 無響室又は半無響室における音響パワーレベル測定方法

ていることを意味する。当然のことながら前者の入手しやすいデータも後者の測定法による測定結果でなくてはならない。

SNR_{stat} の計算に必要な測定データをまとめると Table 2.1 のようになる。また、その計測方法がすでに規格化されている場合にはその規格を合わせて示す。ここに示した方法は日本の規格のみであるが、当然 ISO 規格や他国の規格でも適用可能である。

2.5.1 吸音率について

吸音率はランダム入射でオクターブのバンドノイズに対するものが最適と考えられるので、基本的には残響室法吸音率にて測定されることが望ましい。しかし、場合によっては垂直入射吸音率の結果から、統計入射吸音率を求め使用することもやむを得ない。

その他、残響室法による測定が難しく、垂直入射吸音率の測定も不可能な複合構造の吸音材または吸音構造（スリットや凹凸のついた壁面）については、付録A-2に示すような予測計算にてデータを作成することになる。

2.5.2 音源について

SNR_{stat} の予測において、音源のパワーレベルと指向特性は、その相互関係を把握しつつ測定される必要がある。その測定法は一般に規定されているものの、現在の動向として指向特性がパワーレベルとの関係を曖昧にしたまま提示されることが多い。そこで、以下に本論文で使用したパワーレベルと指向特性の測定法を示す。

まず、音源のパワーレベル PWL を残響室において JIS Z 8734 「残響室における音響パワーレベル測定方法」に準じて測定する。次に、音源を無響室に移動し、パワーレベル

を測定したときと同じ音響出力となるようにして、音源から一定の距離 r で指向特性の情報が必要な方向（水平角 θ 、仰角 φ ）の音圧レベル $Lp_{rad}(\theta, \varphi)$ を測定する。これらの測定結果をもとに、次式により音源の指向特性 $D(\theta, \varphi)$ を決定する。

$$D(\theta, \varphi) = Lp_{rad}(\theta, \varphi) + 10 \log_{10}(4\pi r^2) - PWL \quad (2.27)$$

この式は指向特性がパワーレベルによって基準化されなければならないことを示している。

パワーレベルの測定については、他に無響室で行う方法（JIS Z 8732「無響室又は半無響室における音響パワーレベル測定方法」）もある。この方法によれば同時に指向特性の測定も可能なので効率的とも考えられるが、パワーレベルを正確に測定するには相当数の離散的な測定点が必要となり、音源との位置関係も正確でなければならぬため、測定に多くの労力がかかる。残響室で行う方法は、無響室で行う方法と比較して少ない測定点ですみ、それらの位置の設定も容易であるため、この方法を採用した。

具体的な測定方法として、実際に本論文の中の実験で使用したスピーカの水平面内の指向特性の測定例を紹介する。

残響室(W5,800 × D7,900 × H4,800)内にFig.2.6に示すようにスピーカ位置と測定点6点(R1～R6)を設定した。スピーカの高さは1.5m、測定点の高さは1.5mまたは2mとした。

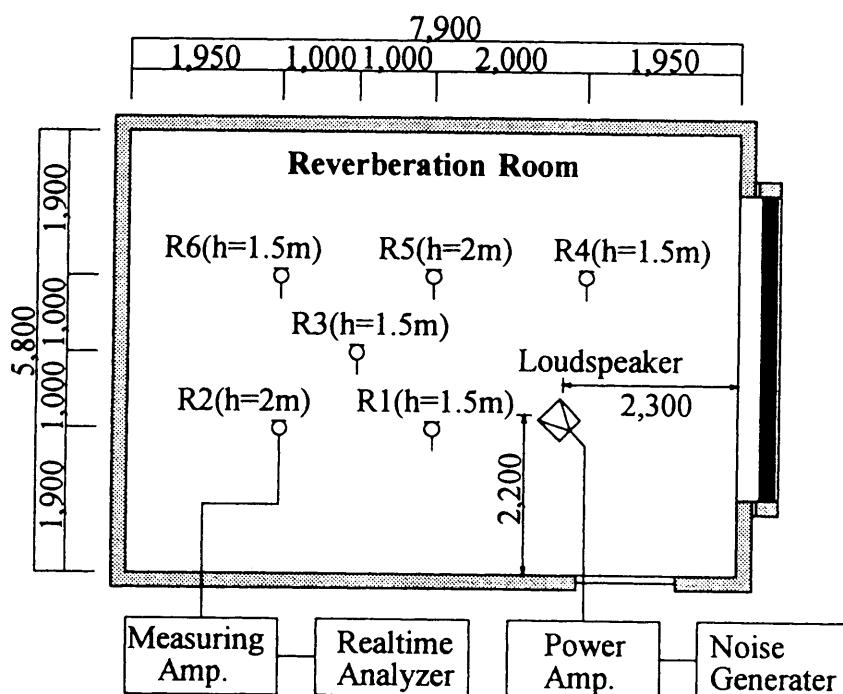


Fig.2.6 パワーレベルの測定例

入力信号にはピンクノイズを用い、スピーカから放射したときのオクターブバンド音圧レベルを各測定点において測定した。その結果から、下式によりオクターブバンドパワーレベル PWL を算出した。

$$\begin{aligned} PWL = & \overline{Lp} - 10 \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{V}{V_0} \right) \\ & + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{P_{atm}}{10^5} \right) - 14 \end{aligned} \quad (2.28)$$

ここで、 \overline{Lp} は室内平均音圧レベル、 T は残響時間、 V は室容積、 S は室内表面積、 λ は測定周波数帯域の中心周波数の波長、 P_{atm} は大気圧である。 T_0 は基準残響時間(1s)、 V_0 は基準室容積($1m^3$)である。

次に水平面内での指向特性のデータをターンテーブルを用いて測定を行った。無響室($W3,950 \times D5,450 \times H3,000$)において、ターンテーブル上に設置したスピーカより $1m$ 離れた点を測定点とした(Fig.2.7)。パワーレベルを測定した時と同じ音響出力のピンクノイズを放射した状態でターンテーブルを連続的に回転させ、オクターブバンド音圧レベル $L_{p,rad}(\theta, 0)$ を測定した。

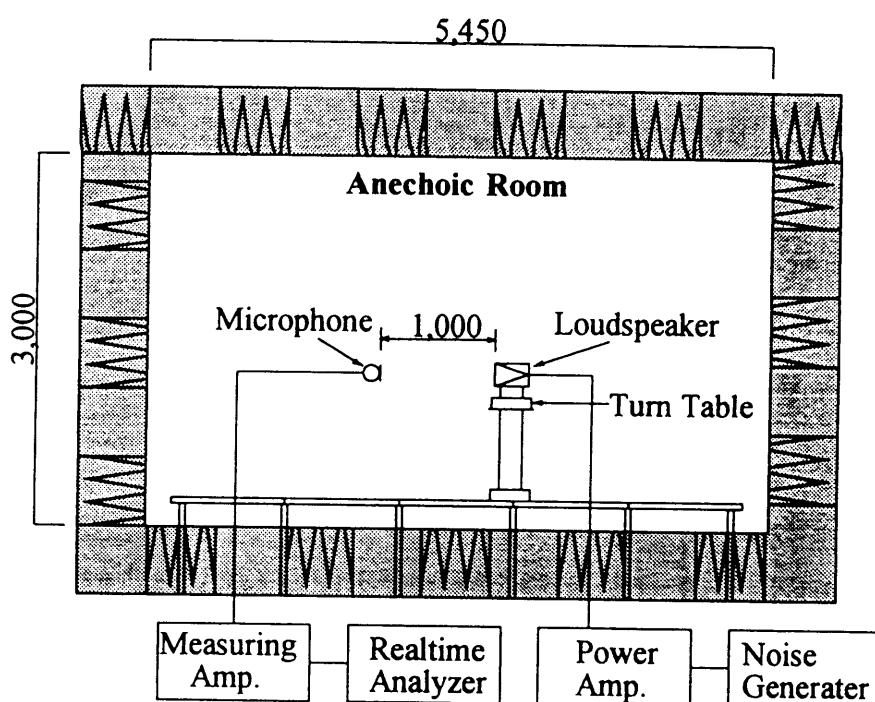


Fig.2.7 無響室における指向特性の測定例

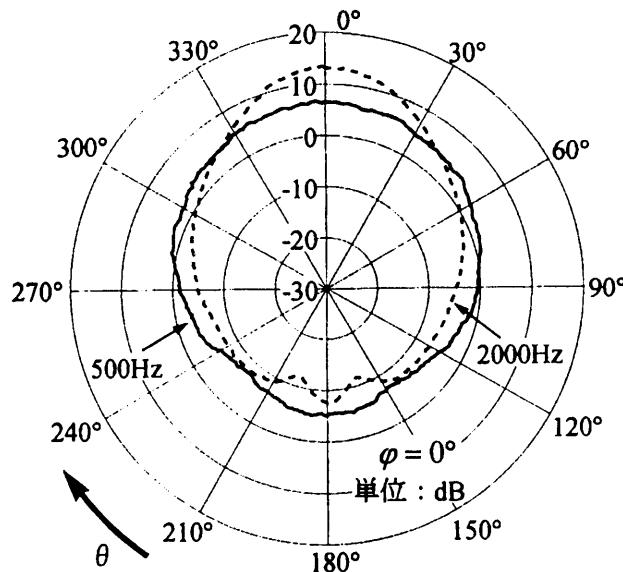


Fig.2.8 指向特性の測定例

以上の測定結果からオクターブバンドで500Hz帯域と2kHz帯域の指向特性 $D(\theta, 0)$ を算出した。Fig.2.8 に指向特性の測定結果を示す。もし、測定されたスピーカが水平面内で無指向性だとすれば、測定結果はどの方向についても 0dB となる。

2.6 SNR_{stat} の測定方法

そもそも、完成後の建物の明瞭性は測定しなくとも、実際に聞けば分かるものであり、明瞭性の評価量の測定を詳細に行うことよりも、問題がある場合に建築的な問題点や改修方法が明確になるような物理的測定を行うべきである。しかし、場合によっては客観的な評価を求められる場合もあり、明瞭性の測定法は用意されている必要がある。

SNR_{stat} はあくまでも設計時の評価指標として導出されているので、完成後の建物における測定は、原形である SNR の算出法 ((2.11)式) に基づいたものになる。ただし、その方法は現在のところ、RASTI のように専用装置によって背景騒音が存在している状態でも 1回の測定で可能というわけではなく、背景騒音の測定とインパルスレスポンスの計測を別々に行うことになる。

そこで、測定は RASTI により行い、それを SNR_{stat} に変換する方法を考える。当然のことながら RASTI と SNR_{stat} はその考え方には若干の違いがあるため、最も良い方法とは言えない。しかし、完成後の建物の明瞭性について測定により客観的に評価することが SNR_{stat} を使用する真の目的ではないことを考えると、両者に一定の相関があれば問題ないと考えられる。この点については第4章で述べることとする。

2.7 SNR_{stat} の拡張性について

以上、一つの音源の場合について述べたが、 SNR_{stat} の計算式は(2.12)～(2.16)式のように単純で、しかも、計算式の意味が分かりやすいために、複数の音源がある場合や反射板等による顕著な初期反射音がある場合にも容易に拡張することができる。ここでいう計算式の意味とは、第一波面が到達してから50msまでに到達する音のエネルギーが明瞭性に貢献し、それよりも遅く到達する音と背景騒音を合わせたエネルギーが明瞭性を阻害するということである。したがって、複数音源がある場合や反射板等による顕著な初期反射音がある場合でも、音源が一つの場合と同じ考え方で、それぞれの音源のエネルギー密度や顕著な初期反射音のエネルギー密度を、第1波面からの到達時間差に基づいて(2.12)式の定義式の貢献する側と阻害する側に振り分けて計算すれば良いのである。

また、 SNR_{stat} の計算式は、統計室内音響理論に基づいた遮音計算や音圧分布の計算式の延長線上にあるため、遮音によって、逆に明瞭性を下げたい場合¹⁰⁾などの効果の予測にも容易に拡張できる。例えば、ホテルなどの居室間で、人の話声が隣室で聞き取られるかどうかということを検討する場合、通常の遮音計算で得られる透過音のオクターブバンドレベルと居室の平均吸音率等の設計数値および想定される背景騒音レベルから、近似的に SNR_{stat} を予測することができる。

以上のような SNR_{stat} の拡張法の一つとして、第5章に複数音源で拡声する場合の予測法を示す。

参考文献

- 1) T. Houtgast and H. J. M. Steeneken, A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria, *J. Acoust. Soc. Am.* 77, 1069-1077 (1985).
- 2) T. Houtgast, H. J. M. Steeneken and R. Plomp, Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics, *Acustica*, 46, 60-72 (1980).
- 3) 持丸聰, 木村翔, 関口克明, 杉山知之, 橋本修, 中井秀, RASTI の簡易的な予測手法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 62 年 10 月, 211-222 (1987).
- 4) M. Barron and L-J. Lee, Energy relations in concert auditoriums. I, *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 618-628 (1988).

- 5) W. Reichardt and U. Lehman, Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulsshalltests, *Acoustica* 48, 174-185 (1981).
- 6) J. P. A. Lochner and J. F. Burger, The intelligibility of speech under reverberant conditions, *Acoustica*, 11, 195-200 (1960).
- 7) H. Kuttruff: *Room Acoustics* (Elsevier Science Publishing, New York, 1991), p189.
- 8) J. P. A. Lochner and J. F. Burger, The influence of reflections on auditorium acoustics , *J. Acoust. Soc. Am.* 34, 576-581 (1962).
- 9) ISO 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part1 : Calculation of the absorption of sound by the atmosphere (1993)
- 10) 宮尾健一, 大川平一郎, 会話の了解度と室間平均音圧レベル差の関係, 日本建築学会講演論文集, 937-938 (1994)