

## M系列変調相関法による遮音測定

Measurement of Sound Insulation by Correlation Technique using M-sequence Modulation Method

橘 秀 樹\*

Hideki TACHIBANA

## 1. ま え が き

建物の界壁をはさんだ二室間の遮音を測定する場合、通常は一方の室においた音源スピーカーからバンドノイズを出し、その室内と他方の室内のそれぞれの平均音圧レベル ( $L_1$ ,  $L_2$ ) を測定し、その差から室間平均音圧レベル差 ( $L_1 - L_2$ ) を求める。さらに、界壁の音響透過損失 (Transmission Loss, T.L.) を求める場合には、次式に示されるように、受音室内の吸音力に関して補正する必要がある、受音室の残響時間を測定する。

$$TL = L_1 - L_2 - 10 \log_{10} (A_2/S) \quad (1)$$

$$A_2 = 0.16 V/T$$

ただし、TL: 界壁の音響透過損失

$L_1$ : 音源室の平均音圧レベル

$L_2$ : 受音室の平均音圧レベル

$A_2$ : 受音室の全吸音力

T: 受音室の残響時間

V: 受音室の容積

S: 界壁の面積

多くの場合には上述の通常の音響測定法で十分であるが、場合によっては外部からの雑音が大きいため、あるいは連続運転をしなければならない機械類があるため、測定が不可能となることがある。

一般にSN比が十分でない場合に、雑音除去の利点を生かして相関法がよく用いられるが、ここでは相関法による音響測定法の検討の一つとして、M系列変調相関法を遮音測定に応用した結果を報告する。

## 2. 測定原理

ここで述べるM系列変調相関による遮音測定の方法は、原理的に以下に述べるSchroederの残響測定法、およびM系変調相関法によるパルス・レスポンスの測定法に基いている。

2.1 Schroederの残響測定法<sup>1),2)</sup>

通常の残響時間の測定では、音源として定常ノイズ連続音を用い、多数の測定結果から統計的に残響時間

を求めるが、これに代る方法としてM. R. Schroederは下式の関係を導き、パルス音源を用いる新しい測定法を示した。

$$\langle S_d^2(t) \rangle = K \cdot \int_t^\infty h^2(x) dx \quad (2)$$

ただし、 $S_d(t)$ : 定常バンドノイズ停止後の音圧変動

$\langle \rangle$ : 集合平均

K: 定数

$h(t)$ : 音源—受音点間のインパルス・レスポンス

上式は通常の方法における定常ノイズ音源停止後の音圧減衰  $S_d(t)$  の二乗の集合平均が、ただ一回の室のパルス・レスポンス  $h(t)$  の二乗積分演算から求められることを意味している。

ここで上式で  $t=0$  とした場合、すなわち、インパルス・レスポンスの二乗を時間  $0 \sim \infty$  (実際には残響時間程度で十分) にわたって積分した値は、定常ノイズ停止時 (定常状態) の音圧の二乗平均に相当することになる。(後で述べる音圧レベル分布、あるいは音圧レベル差の測定はこの点に基いている。)

2.2 M系列変調相関法による音響測定<sup>3),4)</sup>

## (1) パルス・レスポンスの測定

M系列変調相関法は青島らの考案によるものであり、種々の音響測定に利用されているが、Fig 1はこの方法を建築音響における室のパルス・レスポンスの測定に利用した場合のブロック図である。

この方法では、スピーカー入力信号 (音源) としてM系列信号  $m(t)$  ( $\pm 1$  の2値をとる擬似ランダム信号) で変調 (+1でon, -1でoff)されたバンドノイズを用い、マイクロホン出力の二乗  $y^2(t)$  ともとのM系列信号  $m(t)$  との相互相関関数  $\phi_{m,y^2}(\tau)$  を求める。

ここで室内 (あるいは壁を隔てた二室) の音源位置と受音位置の二点間の音響伝搬系をモデル化した場合、Fig. 2のように表わせるとすると、 $\phi_{m,y^2}(\tau)$  は次式で表わされる。

$$\phi_{m,y^2}(\tau) = \frac{1}{2} \phi_{nn}(0) \sum k_n^2 \cdot \phi_{nn}(\tau - t_n) \quad (3)$$

ただし、 $\phi_{nn}(0)$ : バンドノイズのパワー

\*東京大学生産技術研究所 第5部

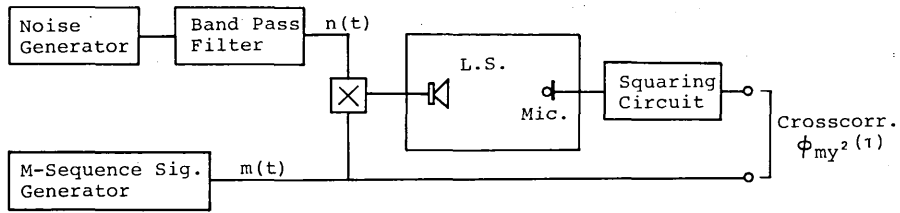


Fig. 1 M系列変調相関法による室のパルス・レスポンスの測定

$k_n$  :  $n$ 番目の伝搬路の強さ (音圧に比例)  
 $t_n$  :  $n$ 番目の伝搬路の遅れ時間.

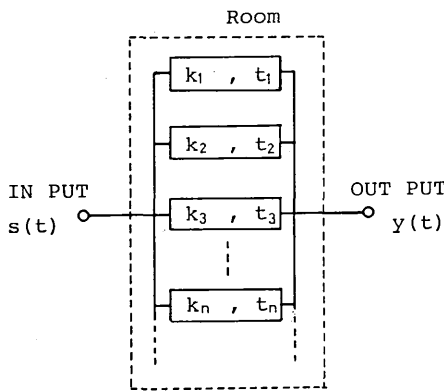


Fig. 2 室内音場における音の伝搬系のモデル

ここで  $\phi_{mm}(\tau)$  は Fig. 3 に示すように、底辺  $2h$  ( $h$  : M系列信号のクロック周期) の二等辺三角形で、 $|\tau| > h$  ではほぼ 0 とみなせる。

そこで (2) 式をみると、右辺は Fig. 2 に示した各伝搬路の強さ  $k$  (音圧に比例) の二乗を係数とし、遅れ時間  $t_n$  をもった三角形パルス群の和となっている。これは等価的に、音源として三角形エネルギー・パルスを出したときの各伝搬路からの到達パルスの和であり、いわばその系のパワー・パルス・レスポンスとも言うべきものである。またこれは (2) 式の右辺の  $h^2(t)$  とみなすことができる。

このように、M系列変調相関法によって系のパルス・レスポンス (いわゆるエコー・タイムパターン) の二乗) を求めることができ、この際、交通騒音、工事騒音など、音源信号と統計的に独立な外来ノイズがあっても測定が行なえる。これは相関法の最大の特徴である。

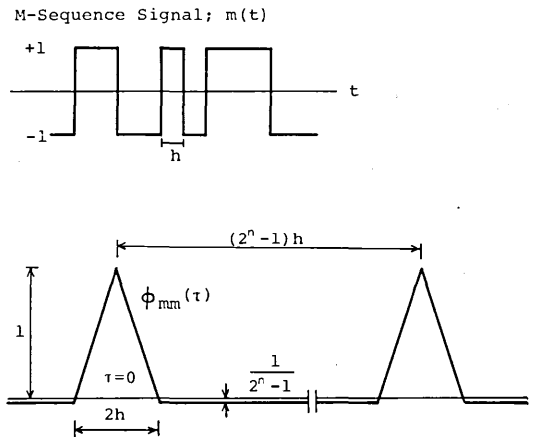


Fig. 3 M系列信号  $m(t)$  とその自己相関関数  $\phi_{mm}(\tau)$

相関法によるパルス・レスポンスの測定としては、これとは別に、音源としてバンド・ノイズをそのまま用い、それとマイクロホン出力との相互相関関数を求める方法 (直接相関法) があるが、デジタル相関器で演算を行なうときのサンプリング周波数は音源周波数の数倍にする必要があり、膨大な演算ポイント数を必要とする。

一方、M系列変調相関法では、音響現象としては被変調信号であるバンド・ノイズの伝搬性状をとらえているにもかかわらず、相関の演算はバンド・ノイズに比べ十分低い周波数のM系列信号について行なえばよいので、直接相関法に比べて遅いサンプリングでよく、したがって演算ポイント数もはるかに少なくてすむ。これは周波数が高い割には現象時間が長い室のパルス・レスポンスの測定には大変都合がよい。

(2) 残響の測定

前項に述べた方法によれば、(2) 式の  $h^2(t)$  に相当した室内のパワー・パルス・レスポンスが求められる。し

研究速報  
 たがってその結果から次式に示すように(2)式右辺に相当した積分を行なえば、実際にパルス音源を用いる Schroeder の残響測定法によるのと等価な結果が得られる。

$$R(t) = \int_t^{\infty} \phi_{my^2}(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

ここで問題となるのは積分が  $t \rightarrow \infty$  となっている点で、これを実行するには次の方法がある。

まず第一の方法としては、一旦、 $\phi_{my^2}(\tau)$  を求めた後、時間軸を反転して  $\infty \rightarrow t$  と積分し、その結果を再び時間軸を反転してみればよい。

第二の方法としては、 $\int_t^{\infty} = \int_0^{\infty} - \int_0^t$  の関係に着目し、一旦  $0 \rightarrow \infty$  で積分した値から  $0 \rightarrow t$  の積分値を引き算してゆけばよい。

上の二つの方法は Schroeder の残響測定法というテープ反転法、およびダブル・パルス法に相当している。なおこれらの方法とは別に(2)式の相互相関関数を計算する前に  $m(t)$  を積分しておく方法が嵯峨山ら<sup>5)6)</sup>によって考案されているが、原理的には上に述べた方法と同じである。

(3) 音圧分布、音圧レベル差の測定

2.1でもふれたが、(2)式でインパルス・レスポンスの  $0 \sim \infty$  の積分  $\int_0^{\infty} h^2(x) dx$  は、室内のある一点から定常ノイズ音源を出したときの他の受音点における音圧の二乗平均に相当したものになる。M系列変調相関法による場合には  $R(0) = \int_0^{\infty} \phi_{my^2}(\tau) \cdot d\tau$  がこれに相当している。

そこで音源の出力を一定にして、室内の多数の点で、 $R(0)$  を求めればそれらの相対値から音圧分布が求められる。また二点間の音圧レベル差  $\Delta L$  は

$$\Delta L = 10 \log \frac{R_2(0)}{R_1(0)} \quad (dB) \quad (5)$$

から求められる。

なお、二室間の平均音圧レベル差は、音源室内、受音室内それぞれで  $R(0)$  の平均を求め、その比 (dB) をとればよい。

3. 実験的検討

以上に述べた測定法の実際応用として簡易間仕切壁 (ハニカム・サンドイッチ板: 面積  $15m^2$ ) で仕切られた二室 (音源室 Room 1 :  $127.5m^3$ , 受音室 Room 2 :  $54.1m^3$ ) の間の室間平均音圧レベル差および間仕切壁の音響透過損失を測定した。

測定法の概略を Fig. 4 に示す。音源にはクロック周波数 30Hz の 10 次 M 系列信号で変調した中心周波数 125 ~ 4kHz の 1 オクターブ・バンド・ノイズを用いた。

まず Room.1 においたスピーカーから音源信号を出し、Room 1 内 4 点、および Room 2 内 3 点におけるパワー・パルス・レスポンス  $\phi_{my^2}(\tau)$  を前述の方法で求めた。その結果の例として、Room 1, Room 2 それぞれ一点における 1 kHz (1 octave band) のパターンを Fig. 5, 6 に示す。

このようにして得られたパワー・パルス・レスポンスのパターンの面積 (レスポンスと横軸とで囲まれた部分) を求め、Room 1, Room 2 それぞれについて平均し、それらの比 (dB) と測定レンジの差とから二室間の平均音圧レベル差 ( $L_1 - L_2$ ) を求めた。

つぎに、間仕切壁の音響透過損失 (T. L.) を知るのに必要な受音室 Room 2 の残響時間を求めるために、音源スピーカーを Room 2 に移して Room 2 の測定点でのパワー・パルス・レスポンス  $\phi_{my^2}(\tau)$  を測定した。その結果が Fig. 7 であるが、これから(2)式に基づいて積分を行ない、残響減衰を求めた結果が Fig. 8 であり、その傾斜から残響時間を求め、(1)式によって T. L. を計算した。

以上の M 系列変調相関法を利用した場合の測定とは

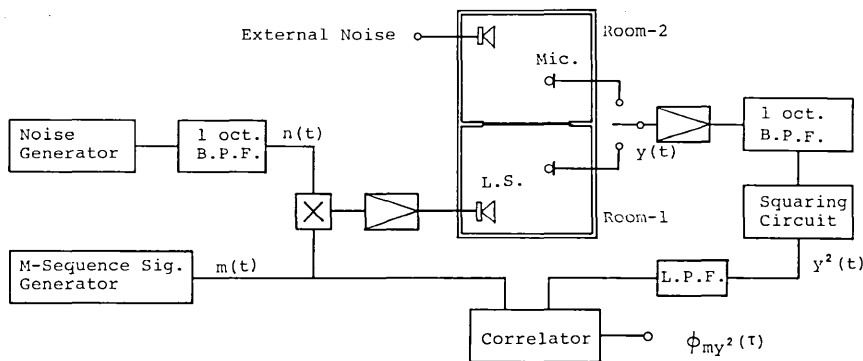


Fig. 4 M系列変調相関法による遮音測定

研究速報

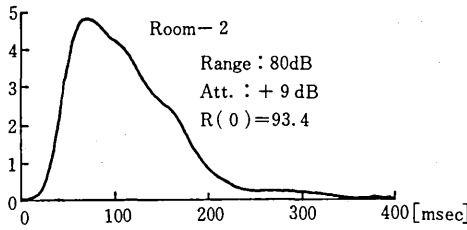
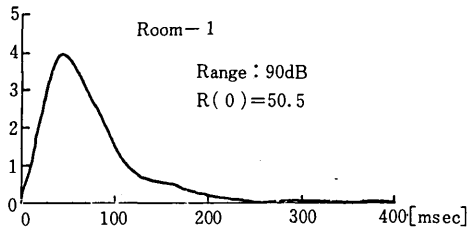


Fig. 5, 6 Room-1, Room-2における1kHz (1 octave band) のパワー・パルス・レスポンス

Fig. 7

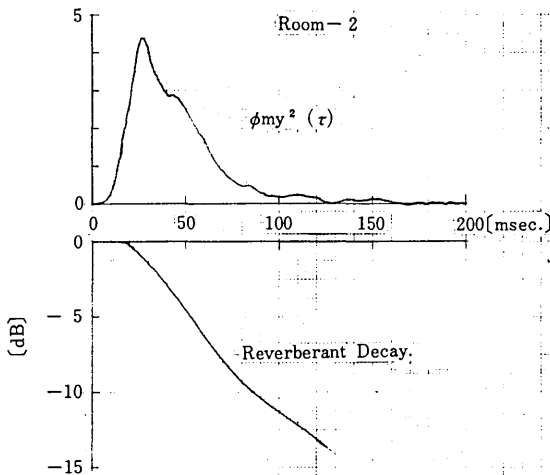


Fig. 8

M系列変調相関法による残響の測定

別に比較のために通常の方法による場合の測定も行なった。両者の測定結果を比較してTable, およびFig. 9に示すが二つの方法による測定結果は室間平均音圧レベル差で最大0.6dB, 透過損失で最大1.1dBの差であり, よく一致している。

つぎに, 外来ノイズが二室間の音圧レベル差の測定

Frequency [Hz]	$L_1 - L_2$ [dB]		R. T. [sec.]		T. L. [dB]	
	M-Corr.	Ordinary	M-Corr.	Ordinary	M-Corr.	Ordinary
125	11.5	11.5	0.49	0.50	10.8	10.9
250	12.4	12.5	0.46	0.35	11.4	10.3
500	15.7	16.3	0.33	0.32	13.3	13.7
1K	15.7	15.8	0.28	0.33	12.6	13.4
2K	15.4	15.5	0.36	0.32	13.6	12.9
4K	20.3	20.2	0.26	0.32	16.8	17.7

Table. 室間平均音圧レベル差 ( $L_1 - L_2$ ), Room 2の残響時間 (R. T.) およびそれから求められた音響透過損失 (T. L.) の測定結果 (M系列変調相関法と通常の方法との比較)

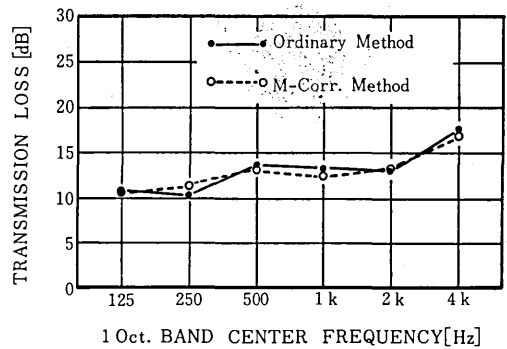


Fig. 9 簡易間仕切壁の音響透過損失の測定結果 (通常の方法による場合との比較)

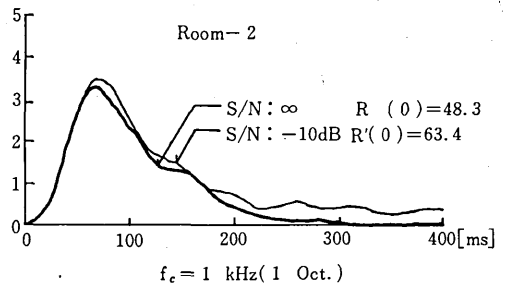


Fig. 10 M系列変調相関法によるパワー・パルス・レスポンスの測定に対する外来ノイズの影響

に及ぼす影響を実験的に検討するために, Room1で音源信号を出すと同時にRoom 2内に音源信号と同じ周波数帯域で無相関な定常ノイズを出して, Room2内の測定点における $\phi_{m,2}(\tau)$ を測定した。その一例として, 測定点においてRoom 1から壁を透過してくる音 (測定信号) より外来ノイズが10dB大きい ( $S/N$ :

研究速報  
 -10dB) 場合の測定結果を外来ノイズがない (S/N: ∞) 場合の結果と比較して Fig. 10に示すが、両者の差は音圧レベルに換算して1.2dBである。

#### 4. む す び

これまでに建築音響測定における相関法の利用として、M系列変調相関法による室のパルス・レスポンス、残響時間などの測定法を検討してきたが、ここでは、それらの方法を遮音測定に応用した結果を述べた。

この方法によれば、測定対象信号よりかなり大きな外来ノイズが混入して通常の方法では測定が不可能な場合でも十分な精度で遮音測定が行なえる。これは、暗騒音が大きい現場での測定などに非常に有利な点であると考えられる。(1975年8月25日 受理)

#### 参 考 文 献

- 1) M. R. Schroeder, *New Method of Measuring*

*Reverberation Time, J. A. S. A. 37*  
(1965)

- 2) 橘秀樹, 石井聖光; 「インパルス積分法による室内音響測定」  
日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭47. 10)
- 3) 青島伸治, 五十嵐寿一; 「M系列の相関を用いた音響測定」  
日本音響学会誌 24巻4号
- 4) 橘秀樹, 石井聖光; 「相関法による室内パルス・レスポンスの測定」  
日本音響学会講演論文集 (昭49・10)
- 5) 嵯峨山茂樹, 五十嵐寿一, 石井泰; 「M系列変調相関法による残響時間の測定—理論的検討—」  
日本音響学会講演論文集 (昭49・10)
- 6) 橘秀樹, 石井聖光; 「M系列変調相関法による残響時間の測定—実験的検討—」  
日本音響学会講演論文集 (昭49・10)

## 東京大学生産技術研究報告 刊行予告

第25巻1号 (英文)

阿高 松男・鈴木 弘著

### STUDY ON ROLLING MILL MODULI

(圧延機剛性に関する研究)

著者の中、鈴木弘は約15年前に圧延機剛性最適値理論を提唱した。すなわち、圧延機剛性に最適値をあたえることによって、圧延素材の寸法誤差・圧延機の機械的精度・圧延作業条件の変動等が圧延製品の寸法精度に及ぼす総合的影響を最小としうることをはじめて明かにした。

本報告はその延長上にあるその後の研究成果を集約したものであって、第1部、圧延機の寸法・圧延材料の機械的性質及び圧延作業条件が圧延機剛性に及ぼす影響、第2部タンデムストリップミルの圧延機剛性の最適配列、で構成されている。

第1部では、圧延機の力学モデルを厳密に解析して、圧延板材の肉厚の長手方向分布に影響する縦剛性係数と、巾方向分布に影響する横剛性係数との両者をはじめて定義し、圧延機の寸法のみでなく、圧延材料の力学的性質と圧延作業条件との3者が剛性係数に及ぼす影響を明かにした。

第2部では、タンデムストリップミルにおける長手方向及び巾方向の圧延板厚精度を高める目的に対して、各スタンドの圧延機剛性をいかに配列すべきかを論じたものである。すなわち、ロール間隙・ロール速度・形状制御力・ロール表面摩擦条件・材料の変形抵抗・素材の寸法等に突然変化が起った際に、圧延板厚・形状等の圧延結果に悪影響が現れるが、各スタンドの圧延機剛性の配列を選ぶことにより、この悪影響を軽減する方法を提案しましたその理論を示した。この理論は実際のタンデムミルに採用され、タンデムミルの進歩に貢献したものである。(1975年10月下旬発行予定)