

衝撃パルス (ピストル) によつて発生する音響

五十嵐 寿一

(1957年10月10日受理)

Sound Produced by Pistol Shot

Juichi Igarashi

(Received October 10, 1957)

ABSTRACT: Acoustic measurement by pulse sound such as pistol shot or electric discharge has been reported by W. Schindelin, G. V. Békésy and V. W. Weber. Recently, as reverberation and transmission measurements it has become common method. Merits of the pistol shot are considered to be, the first, it produces great sound pressure and large signal to noise ratio can be obtained, the second, it is very simple and any complicated system such as, amplifier and oscillator are not necessary and with the aid of a frequency analyser, the measurement covers over audible frequency range, the third, it is possible to detect the individual pulse caused by reflection and it is suitable for the measurement of percent disturbance in room acoustics. Author obtained fairly reliable results about the reverberation time of several theatres by pistol as the sound source. Pistol shot is the phenomenon of short period and the produced sound is a transient one. Some results of peak pressure level, time duration and the spectrum of the pulse have been reported by several authors but farther study is necessary.

Shock wave produced by a pistol shot was observed by Schlieren method. It has complicated structure but the wave front reveals spherical propagation. Results of photometry show that the duration of the first wave front is the order of 10μ sec. When we observe pistol shot, the quality of pulse will be deformed owing to the frequency characteristics of our ear or microphone system. Particularly, the frequency response of microphone affects the wave shape considerably. By several types of microphones, the different shapes of the direct waves were observed, but a microphone that had sufficient sensitivity for high frequencies such as 10 kc or more, followed to the wave form fairly well, and asymmetry of the positive and negative waves similar to the results of photometry were observed.

Reverberation of the pulse produced by pistol is the series of pulses and reverberation curve is their envelope. If the duration of pulse by pistol is only 10μ sec, the sequence of reflected pulses must be separated ones. Flutter echo in closed long tube was photographed by brown tube oscillograph and the frequency spectrum was measured by electric filter. The spectrum of the series of pulses

depends not only to the pulse width but the time intervals of the successive pulses. Theoretical calculation explains the experimental results fairly well. Reverberation of pulsed sound in three dimensional room is very complicated phenomenon, especially in irregular shaped room, the frequency spectrum by series of pulses can not be analysed theoretically, then the distribution of reflected pulses and the spectrum were measured experimentally in reverberation chamber.

As the source of sound for reverberation measurement, pistol shot is very simple and convenient method and the measured results of reverberation time were compared with those observed by another source such as thyratron noise. We can not find any difference between them, but pistol is rather advantageous than any other sources because of large s/n ratio during measurement.

Eyring's reverberation formula can be introduced from the results of pulse statistics analysis and the attenuation of divergent spherical waves. For appendix the error produced by writing speed of the recording system to the results of reverberation time was estimated, and the tentative recommendation for the determination and expression of the reverberation characteristics were also described.

目 次

はしがき

1 ピistol音の解析

- 1-1 ピistol音の音圧レベル
- 1-2 シュリーレン法による観察
- 1-3 マイクロホンによる波形の観察
- 1-4 距離による減衰
- 1-5 ピistol音の残響(一次元)とそのスペクトル
- 1-6 室内における残響(三次元)とそのスペクトル

2 ピistol音による音響測定

- 2-1 パルス音を音源にした場合の残響式
- 2-2 測定音源としてのピistol音
- 2-3 ピistol音によるエコーの検出
- 2-4 ピistol音の録音
- 2-5 ピistolによる残響時間測定の方法

3 Appendix

- 3-1 記録速度と過渡現象
- 3-2 残響時間測定の誤差と観測の基準

むすび

文 献

はしがき

ピistol音やコンデンサーの放電による衝撃波を利用して音響の測定を行うことは古くは W. Schindelin¹⁾ によつて試みられ G. V. Békésy²⁾ V. W. Weber³⁾ もこの問題をとりあげている。最近では Royal Festival Hall の残響測定⁴⁾や

ジェットエンジンの test chamber の測定⁵⁾にも用いられている。

衝撃波を測定に使うことの利点は第一に音圧が非常に大きいことであつて騒音の大きな場所においても充分の S/N を得ることができるために残響測定や透過損失 (Transmission Loss) 50~70 db の壁の遮音も容易に行える点である。第二にはスピーカなどの音源にくらべて非常に簡便であり分析器を併用することによつて可聴周波数全域にわたつて測定可能である。第三にはパルス巾が狭いので反射によるパルスが独立して観測され、室内音響において壁の反射によるエコー (echo) の検出に便利であつて Haas⁶⁾ によつて提唱された percent disturbance の測定にも利用されている⁷⁾。

我国においては戦後ピistolによる空砲の発射が禁ぜられているのでピistol音による測定は行われていなかったが著者は競技用のピistol (砲身の無いもの)*を音源として測定を行うことを試み多くの劇場講堂の残響時間などの音響測定に用いて好結果を得た^{8),9),10)}。

とくにピistol音の残響を録音して後でオクターブフィルター、記録器 (High Speed Level Recorder) によつて残響周波数特性を求めることにすれば現場における測定時間は非常に短縮さ

れ観客の入つた劇場の残響測定も可能になる。ピストル音を録音することが簡便であつて残響測定に利用できることは昨年春 Farrel¹¹⁾ がアメリカの音響学会で報告している。

しかしピストルのような衝撃波による音響測定は過度現象の測定であつて衝撃波の構造、パルスとしての継続時間、スペクトル、音圧レベル(ピーク)等に関し二三の報告^{2),3),5),12)}はあるが著者が使用してきたピストルについてもつと詳しい吟味が必要である。とくにピストル音は火薬量や発射機構によつて音圧やスペクトルが異なることが予想される¹³⁾。

著者は衝撃波の研究に古くから用いられているシュリーレン写真によつてピストル音の観測を行い音源近傍の衝撃波の様子をとらえることができた。これらの写真から Photometry によつて波形の大体の構造を測定すると共にマイクロホンによつて観測された波形と比較検討を行つた。更にピストル音の残響は非常に短いパルスの配列になるので一次元の管の中の多重反射や三次元の残響室の場合についてブラウン管オシログラフによつて観測を行いそのスペクトル分布についての考察を行つた。またパルスを残響測定に用いたときの残響時間をあらはす式は Bolt¹⁴⁾ のパルスの数に関する統計と球面波としての減衰を考慮することによつてよく知られた定常音からの Eyring の残響式¹⁵⁾と一致する関係が得られる。

§2 においてはピストル音によつて残響測定を行つた際の問題としてサイラトロンノイズを用い

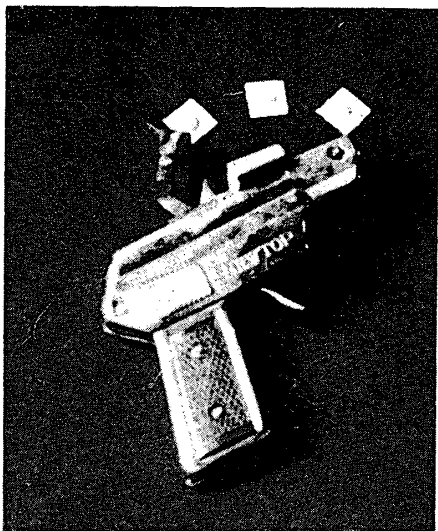


Fig. 1 A pistol used in the experiment

たときの結果との比較、エコー測定の方法および実際の測定に用いた測定系(マイクロホン録音器、分析器、記録器)について述べる。

* 競技用ピストルは Fig. 1 に示すようなもので約 0.1 gr の火薬を紙包みにしたものを衝撃力によつて爆発させる。火薬は塩素酸カリウム($KClO_3$)と鶏冠石(As_2S_3)を 2:1 の比に混合したものである。

1 ピストル音の解析

1-1 ピストル音の音圧レベル

室内でピストルを発射して計器(例えば騒音計)でピストル音のレベルを計つてみると大体 90~100 db である。しかしこれは騒音計が約 200 ms ミリセカンド)の時定数をもつているために 200 ms の間のパルス列の積分として指示するものである。ピストル音の衝撃波としての性質をしらべるためにはまず直接音(反射波を含まない)のピークレベルを測定する必要がある。とくに次節で述べるシュリーレン写真で波形を撮影するために充分の圧力変化を生ずるかどうかを吟味する目的でマイクロホンを通してブラウン管によつて、そのピークレベルの見当をつけてみることにした。(マイクロホンによつては必ずしも衝撃波の圧力変化を正確には再生しない)。Fig. 2 はその測定の概略図である。ブラウン管の時間軸掃引をマイク

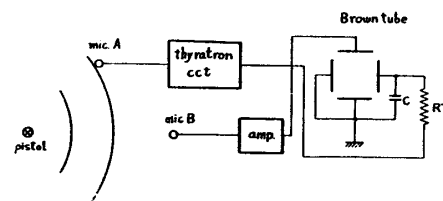


Fig. 2 Schematic diagram for measurement of peak level produced by a pistol.

ロホン A に到達した直接波パルスによつて行い、ムービングコイルマイクロホン B の出力をブラウン管の縦軸に入れればピストル音の直接波による波形を得ることができる。測定は屋外で行いマイクロホンの高さ約 2 m, AB の距離 50 cm, B より 1 m および 2 m の距離よりピストルを発射した。次にマイクロホン B に対し既知の音圧の正弦波を与えそのときのブラウン管の振巾を測定して

間接的にピストル音のピークレベルを求めた。それぞれの測定値は Table 1 であつて 1 m で 140 db (0 db = 0.0002 μ B) 以上を示し数ミリパーに達している。(この値はコンデンサーマイクロホンによる測定値¹³⁾とよく一致している)

Table 1 Peak level of pistol shot.

Distance from the source	Deflection of oscillograph	peak level (db)	Anechoic room S.L. Meter
Pistol	1 m	96 \pm 3 mm	142.5
	2	46 \pm 2 mm	135.5
puretone (stationary, 1000c/s)	10 mm	123	104 db
			98

次にピストル音を無響室内で 1 m および 2 m の距離において騒音計で測定してみるとそのレベルは 104 db, 98 db となつてブラウン管による測定値より約 40 db 小さくなる。簡単のために計器はパルスのエネルギーを積分したものを表示するものと仮定し騒音計の時数を 200 ms とすればパルスの中は約 2×10^{-5} sec となる。一発毎の発射音の音圧レベルの偏差については Galloway 他⁵⁾がヨットレースに使われる大型ピストルを使った場合, Free Field でオクターブバンドに分けた結果について ± 1 db, 残響測定の場合 ± 3 db と報告しているが, われわれの場合, 同一場所で 20 発について残響測定を行い over all について記録速度を変えて測定した偏差が Fig. 3, 同じ録音を

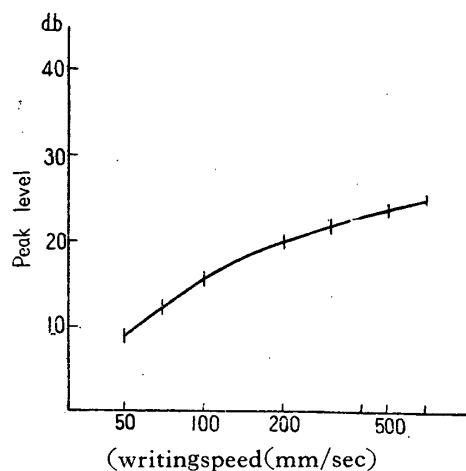


Fig. 3 Peak level observed by various writing speed.

オクターブ分析した結果の偏差が Table 2 であつて一発毎の偏差は非常に小さい。(peak power が Galloway の場合は 10,000 watt となつてい

るが, われわれの場合, 無指向性として計算すると 1200 watt となる)

Table 2. Deviation of peak levels of pistol shot (Octave band).

Octave band	Deviation
75~150 c/s	± 1.5 db
150~300	± 1.0
300~600	± 1.5
600~1.2 kc/s	± 1.5
1.2~2.4	± 1.0
2.4~4.8	± 0.5
4.8~9.6	± 1.0

1-2 シュリーレン法によるピストル音の観察
ピストル音は火薬の爆発によつて生ずる衝撃波でその音圧は数 mB 以上に達するとすればその波面はシュリーレン法によつて撮影する可能性がある。シュリーレンによる測定は1908年 Toepler¹⁷⁾によつて行われているが後コンデンサーの放電による衝撃波については Okubo, Matsuyama¹⁸⁾がマイケルソンインターフェロメーターによつて調べている。

著者は $9 \times 11 \times 6$ m³ の無響室内でシュリーレン法によつてピストル発射による衝撃波を観察した。無響室は反射の影響を除くためと暗室にできる大きな室という意味で都合がよい。装置の概要は Fig. 4 でその実際の配置を Fig. 5 (a) (b)

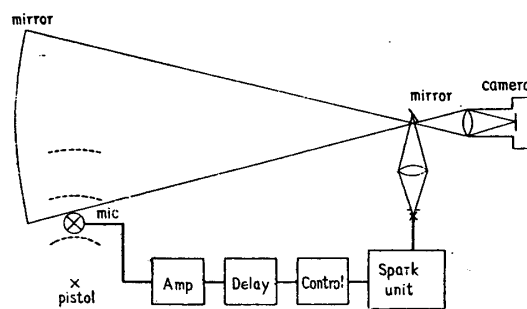


Fig. 4 Schematic diagram of Schlieren method

の写真に示す。凹面鏡は曲率半径 4 m, 光源としては火花放電を用いた。ピストルは三脚にとりつけ離れた位置から針金を引いて発射する。ピストルの近傍 10~50 cm に小型マイクロホンを設置し衝撃波面によるマイクロホンの出力によつてサイトロンを作動させ充電されたコンデンサーを放電する。マイクロホンと音源 (ピストル) の距

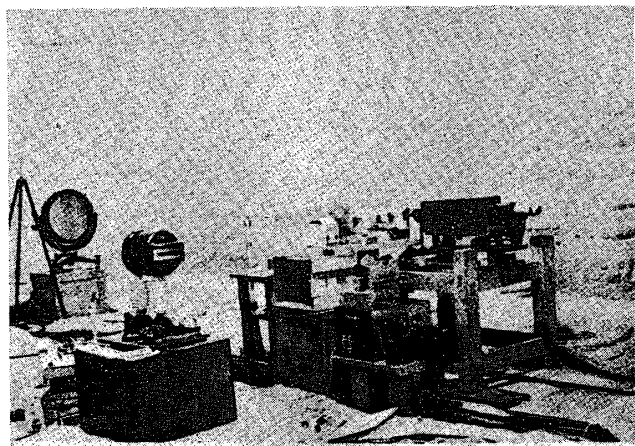


Fig. 5 (a) Apparatus of Schlieren method.



Fig. 5 (b) Arrangement of pistol, microphone and concave mirror.

離および遅延回路を調節することによつて発射後任意の時間の波形を撮影することができる。

実際にはピストルの位置を凹面鏡の光軸と直角の方向に移動させて発射直後 1 ms, 10 ms 後の波面を撮影した。Fig. 6 (a) は発射直後の衝撃波で外側は球面波になっているが内部に複雑な波が認められその進行方向は必ずしも一定していない。これらの細かい波は一発毎に大分違つていてこれは火薬の爆発が引金の撃力で行われるための不均一によるものと考えられる。(b) は発射後約 1 ms で同心球波面が 3~4 個認められる。これらの間隔も一発毎に異つて著しく不等間隔の場合もある。またそれぞれの球面波の間には細かい方向の一定しない波面が左右する。10 ms 後の波面は Fig. 6 (c) で音源から約 4 m 離れた場合である。やはり微細構造が認められその間隔も一発毎に少し異つていますが二番目以下の波面は極めて不鮮明で中間の細かい波は殆んど認められない。

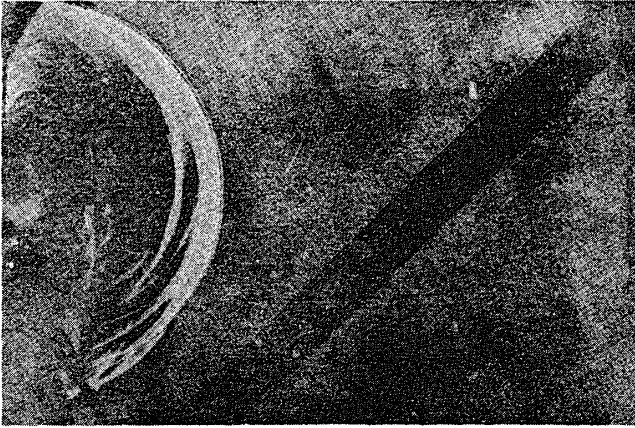
Fig. 7 (a) (b) は発射後約 0.6 ms (音源から外

側球面波まで約 20 cm 水平の黑影は 17 cm の物指しである) と 1 ms でそれぞれ進行方向に対して 45° においた厚さ約 1 吋の板による反射の様態を示したものである。(b) においては大体正反射しているが (a) は入射角と反射角が異つてることがわかる。これは (a) の場合音速を超えていることを示す¹⁹⁾ もので大体 1 ms で音速になつている。ピストルの爆発による衝撃波は発射直後には音速以上であつて火薬の配置衝撃のあたえ方によつて複雑な方向性をもつた数多の波面が発生するが先に発生したものから次第に音速に近づいて球面波を形成するものと考えられる。このような現象は爆発が有限時間に行われるため波面の間隔が不定なこともその不均一性のためと考えてよい。火薬を 2 倍にして発射すると騒音計ではほぼ 3 db 音量が大きく観測されるが、シュリーレン写真で観察すると細かい波が不規則にあらわれることと、球面波が 3~4 個できることなど一発のときと特別の違いは認められない。(1-3 参照)

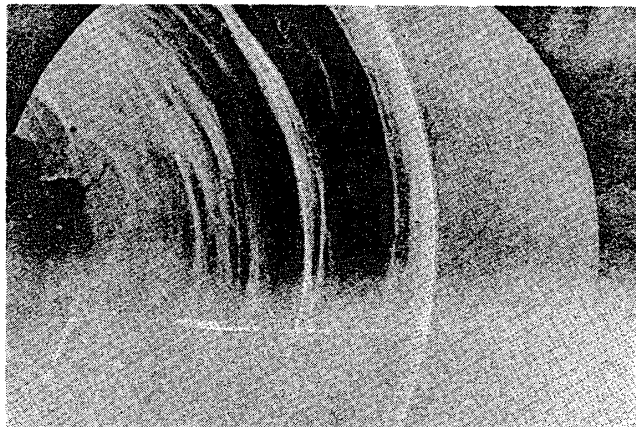
次に観測されたシュリーレン写真について映像の濃度を測定してその波形を求めたものが、Fig. 8 (a) (b) である。(photometry の横軸は約 3.5 倍である) (a) は音源に近い場合、(b) は約 1.5 ms (50 cm) 離れた波面で進向するに従つて変化する様子即ち微細構造が示されている。(b) の最初のパルス巾は 0.5×10^{-4} sec (音速として) であるが二番目からは振巾も小さくなりその巾も 10^{-5} sec 程度になつている。また著しい特徴は波形が単一パルスに近い形をしていることと、負圧の部分は振巾が小さく継続時間がずっと長くなつていて F. Ritter もこのことを指摘している²⁰⁾、以上のことからピストルの発射音は最初複雑な構造をもつているが次第に数個の球面波となり、最初の波面が最も振巾も大きくその正圧の部分は空間約 1 cm 前後であることがわかつた。しかしシュリーレン写真では球面波を進行方向に直角に見た映像であることおよび放電時間が数 μ sec であることから考えて実際の正圧部分の中はもつと小さいものと考えられる。また二番目以下の球面波のパルス巾は更に小さくそれぞれの間隔 d' も大体空間 3~7 cm, d'/c (c: 音速) にして $1/5000 \sim 1/10000$ sec 位になる。な

お Fig. 6, Fig. 7 で最初の波面の端が二重になっているのは放電が二度行われたためである¹⁹⁾.

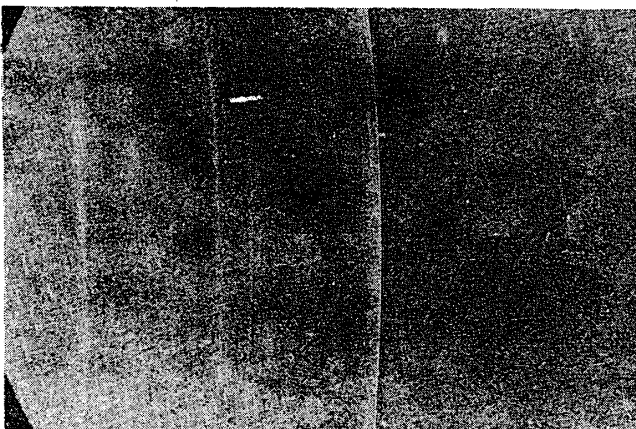
1-3 マイクロホンによるピストル音の観測
 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ sec の継続時間のピストル音を観測



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Shock wave by pistol shot.

- (a) Immediately after explosion.
- (b) after one millisecond.
- (c) after 10 milliseconds.

する場合耳なりマイクロホンを通すとすればそれらの性質によつて違つたものとして観察されることが予想される. Mond 外²¹⁾が弾丸の衝撃波の測定に使つたような 100 kc までフラットレスポンスをもつマイクロホンをうければよいが通常音響測定などに使われるマイクロホンでは 8~10 kc 以上で感度が低下するので衝撃波の最初の立上りに追従しない.

Fig. 9 は種々の異つたタイプのマイクロホンについて 1-1 で述べたのと同じ方法を用いて直接波の波形を撮影した (距離 1 m).

- (a) コンデンサーマイクロホン (MR-102)
- (b) ベロシティーマイクロホン
- (c) ムービングコイルマイクロホン A
- (d) " " B
- (e) クリスタルマイクロホン

時間軸は (f) に示すように全体で約 4 ms である. 同じマイクロホンで受けた波形はシュリーレンの場合のように微細構造は一発毎に多少異なるがマイクロホンの種類による程の差はない. それぞれの図の下にマイクロホンの概略の周波数レスポンスを示しておく. ピストル音の最初の衝撃波による立上りはマイクロホンによつて異り上下のバランスがとくに著しく変化する. 衝撃波の最初の正圧部分の継続時間が数 μsec とすれば (b) (c) のように 10 kc 以上で感度の低下するマイクロホンでは追従しないが負圧に対しては追従するために大体上下の振巾が同程度になる. しかしいづれの場合も正圧にくらべ負圧部分の継続時間の長いことは明かである. これは F. Ritter²⁰⁾ も認めている. 第二番目以下の球面波も (a) (d) (e) ではやや認められるが振巾は非常に小さく実際の音響測定などでは問題にならない.

次に火薬量が 2 倍~3 倍になつたときの波形を検討するためにマイクロホンによる観測を行つた. この場合音圧振巾の二乗が火薬量にほぼ比例する結果が得られた. しかし 1-2 で述べたようにピストルの衝撃波の中が 10^{-5} sec 程度であるのに Fig. 9 の写真でわかるようにマイクロホンで観測される波形からはその中が 10^{-4} sec 程度になつており, 火薬量によつて音圧振巾が変化しても, 単に衝撃波のピークレベ



Fig. 7 Reflection by a plate.

(a) 0.6 millisecond after explosion.

(b) 1 millisecond after explosion.

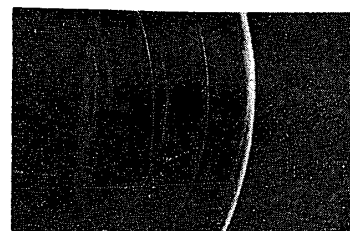
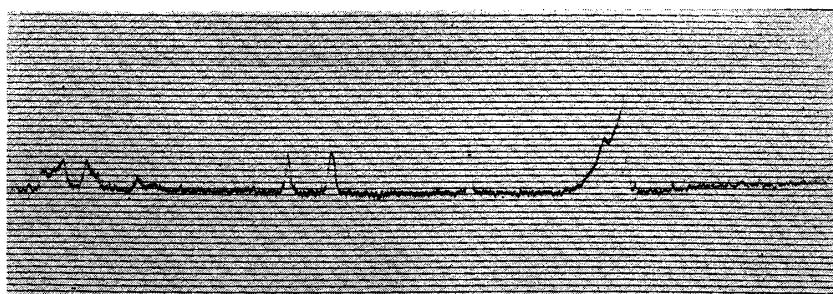
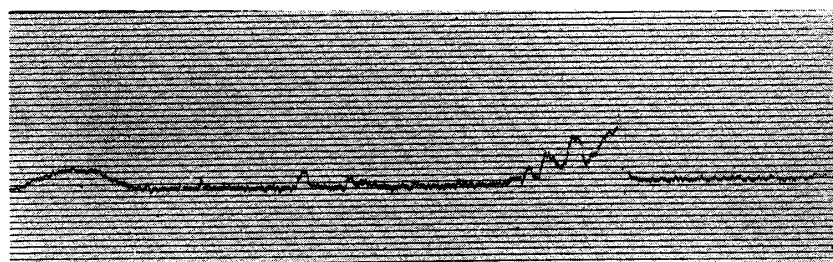


Fig. 8 Wave form observed by photometry (arrow means the direction of measurement).

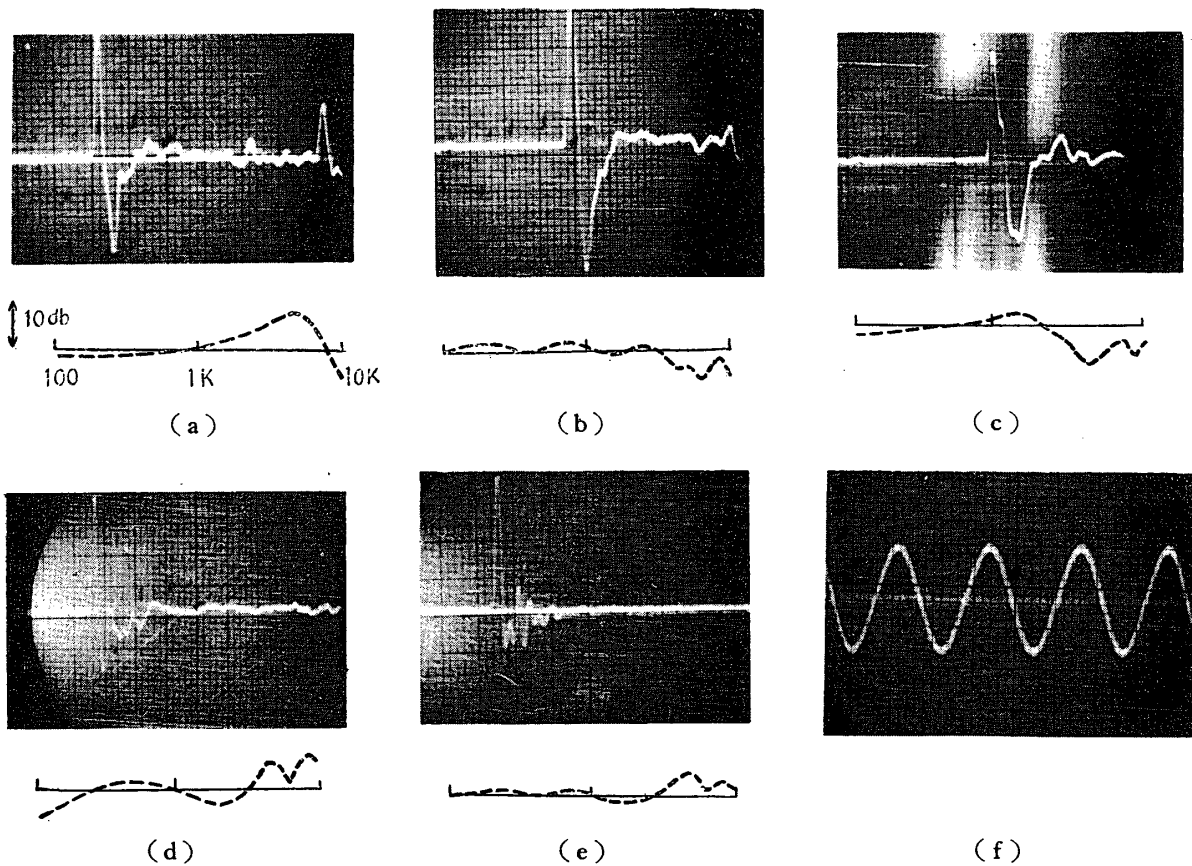


Fig. 9 Wave forms observed by various types of microphones and their frequency responses.
 (a) Condenser mic (b) velocity mic (c), (d) dynamic mic
 (e) crystal mic (f) 1000 c/s

ルが増加したのか、またはパルス巾が広がったものかは判然としない。ただ火薬量に比例した音響エネルギーが放射されることは確かである。

1-4 ピistol音の距離による減衰³¹⁾

ピistol音はシュリーレン写真によつて球面波として伝播することがわかつたがその減衰の様子を1-1の方法で屋外で測定した。マイクロホンは前節の(d)を用い直接波のみを捕捉するようにしたが距離が遠くなると地面の反射(地面は雑草が生えている)も直接波に少しおくれて観測される。ブラウン管で観測した波形が Fig. 11 で距離に対してそのピークレベルを図示したものが Fig. 10 でほぼ球面波として伝播していることを示している。写真 8 m, 16 m, 32 m, においても振巾の上下非対称があらわれている。

1-5 ピistol音による残響(一次元の場合とそのスペクトル)¹⁶⁾

ピistol発射による衝撃波が非常に短い継続時間をもつたパルスとすれば時定数の小さい記録器で観測した残響はそれぞれ分離したパルスの配列

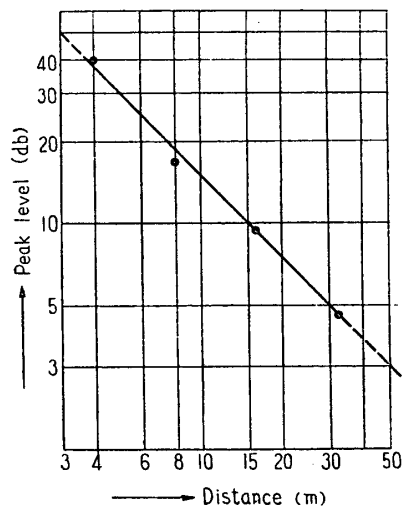


Fig. 10 Peak level of pistol sound observed at various distances from a source.

となる。いま Fig. 12 のように閉じた細長い管の一端にパルス発生源があつて同じく管の端で観測するものとすればパルスは $2l/c$ (l : 管長, c : 音速) の時間間隔に並んだものになる、音源としてはピistol音を無響室で録音したものを用い、音響インピーダンス測定装置²²⁾によつて実験を行

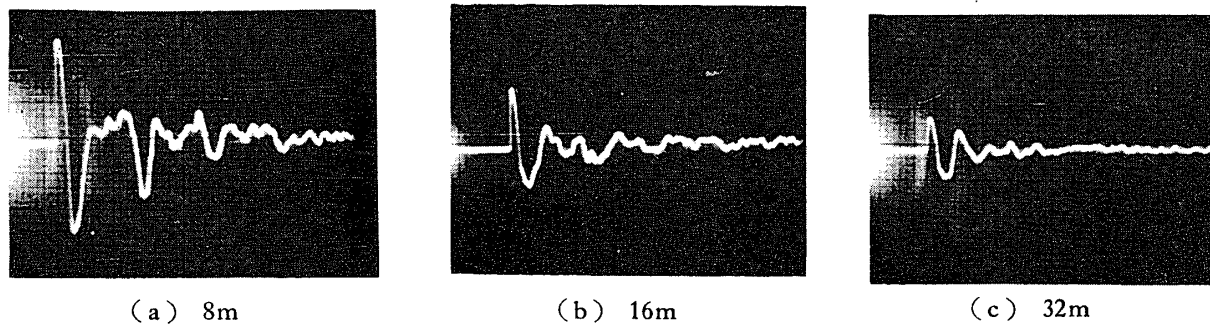


Fig. 11 Wave forms at various distances in the open field.

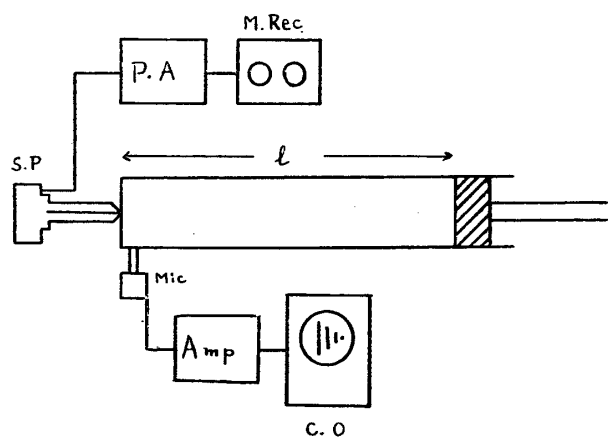


Fig. 12 Schematic diagram for the measurement of one dimensional pulse series.

つた。Fig. 13 はこのようにして撮影したパルス列で $l=125\text{ cm}$ の場合である。管の長さを変えるとパルスの間隔は変るが増巾器の出力を受話器で聞いてみると丁度異つた長さの弦をはじいた時の音色に酷似していて管の長さによつてピッチが変化する。 l を変えた場合の出力をオクターブフィルターを通し時定数の比較的長い計器(騒音計)で測定した分析の結果が Fig. 14 で基音の変化がよくあらわれている。また狭帯域フィルター(RC フィルター)による分析結果は Fig. 15 で

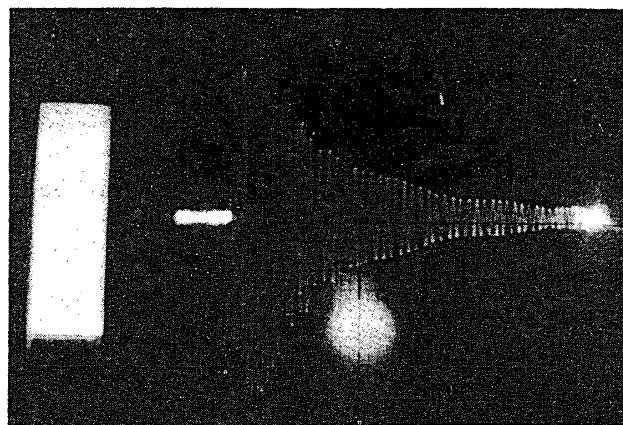


Fig. 13 Flutter echo.

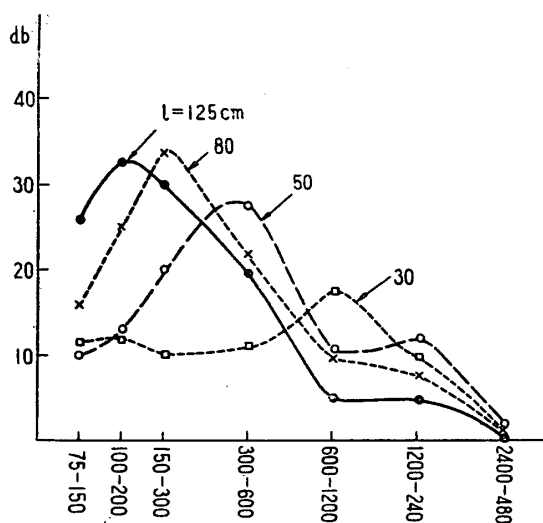


Fig. 14 Octave band analysis of flutter echo.

基音の外に第二第三高調波が認められ弦の振動による音のスペクトルに類似している。次にマイクロホンの位置を中央にして同様の測定を行うとパルス間隔は l/c となりピッチはオクターブ上る。これは弦でいえば中央の点をおさえてはじいたときに相当するもので偶数次の高調波だけになる。パルスの配列と固有振動の関係について一次元の場合については解析的に Maa²³⁾ が取扱つている。

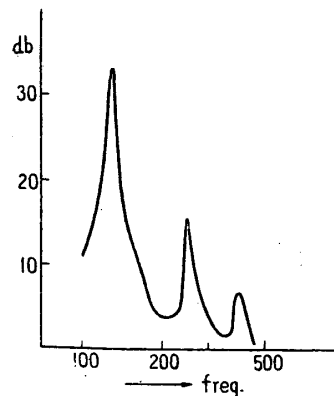


Fig. 15 Narrow band analysis of flutter echo. ($l=125\text{ cm}$)

Maa はパルスを正弦波の wave train として多重反射の音圧を導いた。ピストルの場合は一つのパルスが wave train ではないのでシュリーレン写真の結果から一応 Fig. 16 のように有限巾をもつたパルスの配列として取扱つてみる。いま τ の巾をもつたパルスが T の間隔で $(2n+1)$ 個あるものとする。(測定器でパルスを観測するときその時定数が比較的長い場合は有限時間の積分として考える必要がある。

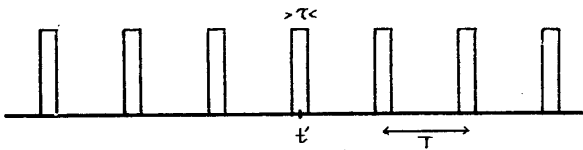


Fig. 16 Idealized model of the distribution of pulses.

$$P(t) = P_{-n}(t) + \dots + P_{-1}(t) + P_0(t) + P_1(t) + \dots + P_n(t)$$

とすれば

$$P_{-n}(t) = p_0 \quad t' - nT - \frac{\tau}{2} \leq t \leq t' - nT + \frac{\tau}{2}$$

$$= 0 \quad |t' - nT - t| > \frac{\tau}{2}$$

.....

$$P_0(t) = p_0 \quad t' - \frac{\tau}{2} \leq t \leq t' + \frac{\tau}{2}$$

$$= 0 \quad |t' - t| > \frac{\tau}{2}$$

.....

$$P_n(t) = p_0 \quad t' + nT - \frac{\tau}{2} \leq t \leq t' + nT + \frac{\tau}{2}$$

$$= 0 \quad |t' + nT - t| > \frac{\tau}{2}$$

つぎに $P_0(t)$ のスペクトルは Fourier 積分によつて²⁴⁾

$$a_0(\nu) = \int_{t' - \frac{\tau}{2}}^{t' + \frac{\tau}{2}} P_0(t) e^{2\pi i \nu t} dt$$

$$= \frac{1}{2\pi} p_0 \frac{\sin \pi \nu \tau}{\pi \nu} e^{2\pi i \nu t'}$$

$$a_n(\nu) = \frac{1}{2\pi} \frac{p_0 \sin \pi \nu \tau}{\pi \nu} e^{2\pi i \nu t'} e^{2\pi i \nu n T} \dots (1)$$

ここで

$$a(\nu) = a_{-n}(\nu) + \dots + a_0(\nu) + \dots + a_n(\nu)$$

とすれば

$$a(\nu) = \left(\frac{p_0}{2\pi} \right) \frac{\sin \pi \nu \tau}{\pi \nu} e^{2\pi i \nu t'} \{ e^{-2\pi i \nu n T} + \dots + e^{-2\pi i \nu T} + 1 + e^{2\pi i \nu T} + \dots + e^{2\pi i \nu n T} \}$$

$$= \frac{P_0}{\pi} \frac{\sin \pi \nu \tau}{\pi \nu} e^{2\pi i \nu t'} \left\{ \frac{1}{2} + \cos 2\pi \nu T + \cos 2(2\pi \nu T) + \dots + \cos n(2\pi \nu T) \right\} \dots (2)$$

$e^{2\pi i \nu t'}$ は考える時刻 t' の位相をあらわす項で一応除外して考えることができる。

また $\left(\frac{p_0 \sin \pi \nu \tau}{2\pi \pi \nu} \right)$ はパルスが一個のときのスペクトルをあらわしている。(2)式で $n=2, 4$ つまりパルスの数が5および9のときの $\left\{ \frac{1}{2} + \cos 2\pi \nu T + \dots \right\}$ の値を図示すれば Fig. 17 となり $1/T$ の周期関数となり n が大きくなれば $\frac{1}{T}$ の間隔の line spectra となり $a(\nu)$ は Fig. 18 のようになる。ピストル発射音では最初

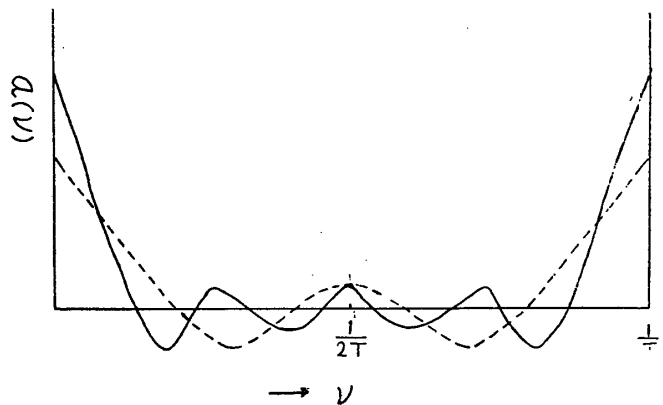


Fig. 17 $\left\{ \frac{1}{2} + \cos 2\pi \nu T + \dots + \cos n(2\pi \nu T) \right\}$

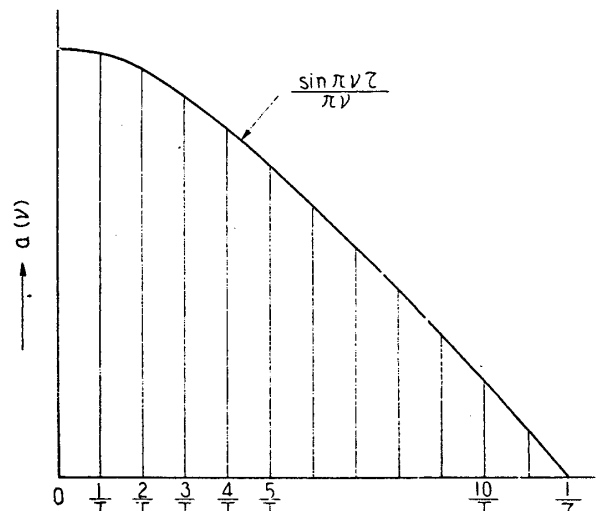


Fig. 18 $a(\nu)$ as a function of frequency.

の衝撃波だけ問題になるとすれば $\tau \ll T$ は充分満足される場合が多い。以上は管の中の多重反射を分析した結果 (Fig. 15) をよく説明することができる。

1-6 室内 (三次元) における残響とそのスペクトル

三次元の実際の室内におけるピストルの残響波形についてはブラウン管で観測した結果^{14), 4)}が報告されているがそのパルスの配列は非常に複雑である。統計的なパルスの数についても直方体の室の場合には鏡像の方法によつて解析的に求められ **normal modes** との関係も論ぜられているが¹⁴⁾ オーディトリウムのように複雑な形で且つ吸収のある場合には理論的に取扱うことは殆んど不可能に近い。従つて残響のスペクトルにしてもパルス

中は勿論その配列の様子反射の際の吸収にも関係する。

著者は反射の際の吸収を除外する目的で残響室を使つてピストル音の残響について調べてみた³²⁾ 残響室²⁶⁾は (A) 513 m³, (B) 120 m³ の二つで (A) は不整形で 500~ における残響時間 23 秒, (B) は直方体で 500~ における残響時間 14 秒, 低音における減衰は 0.2 db/100 ms, 以下高音においても 1 db/100 ms 以下である。(A) におけるピストル音の残響の, 発射直後から 4 ms の間のパルスの配列が Fig. 19 で発射位置とマイクロホンの位置によつて非常に異つているがこれは幾何学的な反射と考えて時間的に一致している。同じく Fig. 20 は (B) におけるそれぞれ 4 ms と 20 ms のパルスの様子である。次に残響室のピス

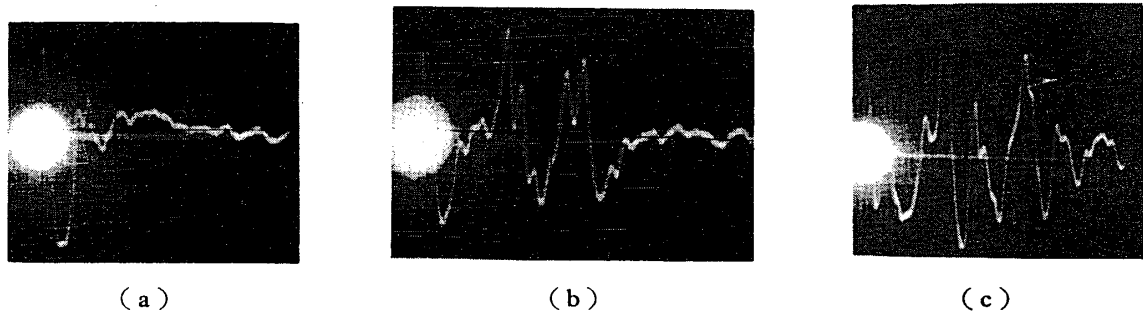


Fig. 19 Distribution of pulses in the reverberation chamber A (full scale 4 milliseconds)

(a) source : center mic : center
 (b) source : corner mic : corner
 (c) source : center mic : corner

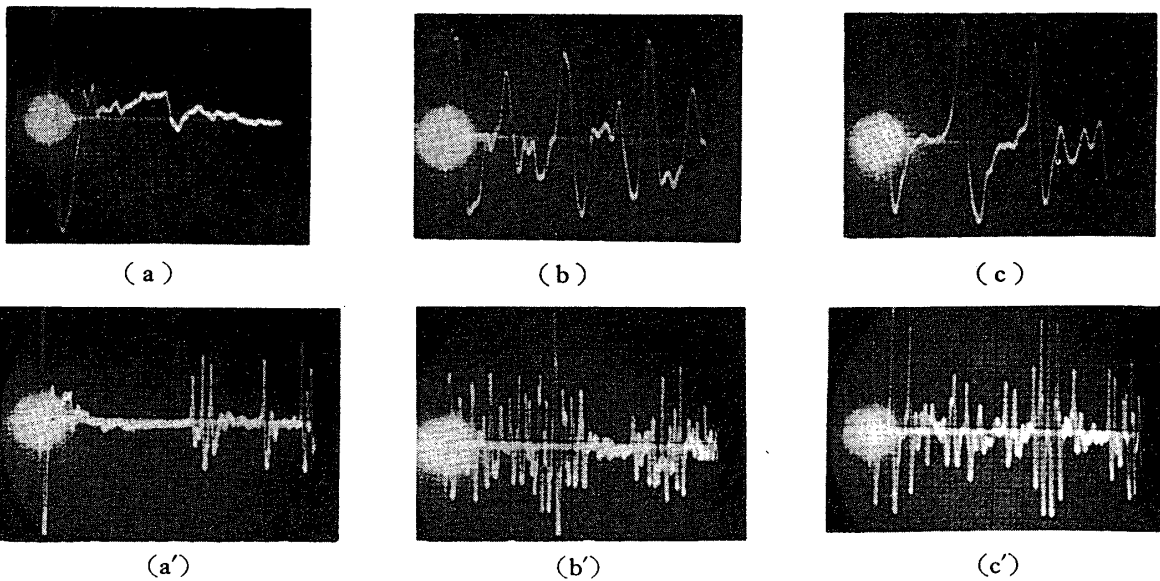


Fig. 20 Distribution of pulses in the reverberation chamber B (full scale 4 and 20 milliseconds)

(a) source : center, mic : center
 (b) source : corner, mic : corner.
 (c) source : corner mic : center.

トル音の録音からオクターブバンドの残響曲線を記録し、その発射直後の尖頭値からスペクトラムレベル (1 サイクル当りのエネルギー) を求めてみた。

Fig. 21 (a) (b) はそれぞれ残響室 A, B に対応するものである。記録速度は 100 db/sec であるから約 70 ms の間に含まれるパルスの積分から求めたものでこの間に含まれるパルスの数にも関係する。なお (c) は屋外におけるピストル直接音の録音を再生しオクターブフィルターを通して分析した結果からスペクトラムレベルを求めた

ものである。ピストル音の残響のスペクトルが Fig. 21 のようになることは Fig. 18 における単一パルスのスペクトルの包絡線の中にパルスの配列によつてきまるスペクトルが存在することを示すもので、実際のオーディトリウムでの測定結果 (オクターブバンドの最初のピークレベル) を求めてみても大体同様の結果が得られる。Fig. 22 は 10000 m³ の劇場の残響から求めたものであり、Fig. 23 も大体同容積の日比谷公会堂の残響の録音からソナグラフによつて得られたものである。(小林理研. 小橋博士の御好意によつて測定した

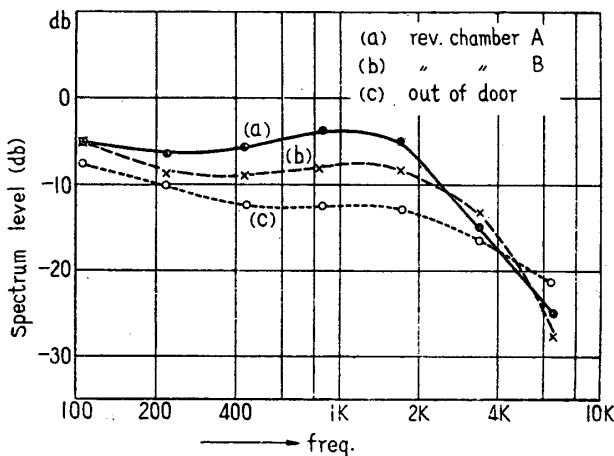


Fig. 21 Spectrum level of pistol sound in the reverberation chamber.

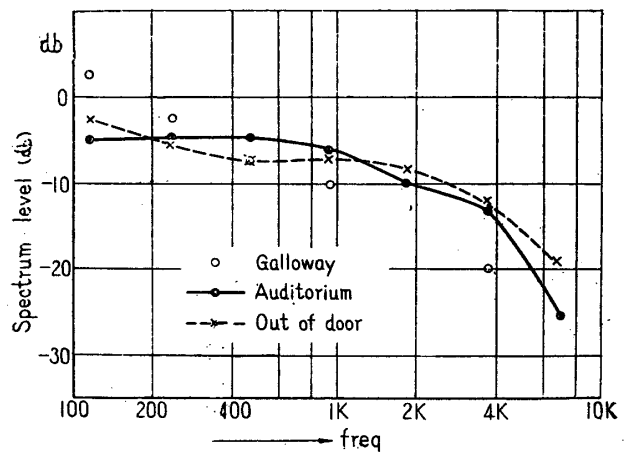


Fig. 22 Spectrum level of pistol sound in the auditorium.

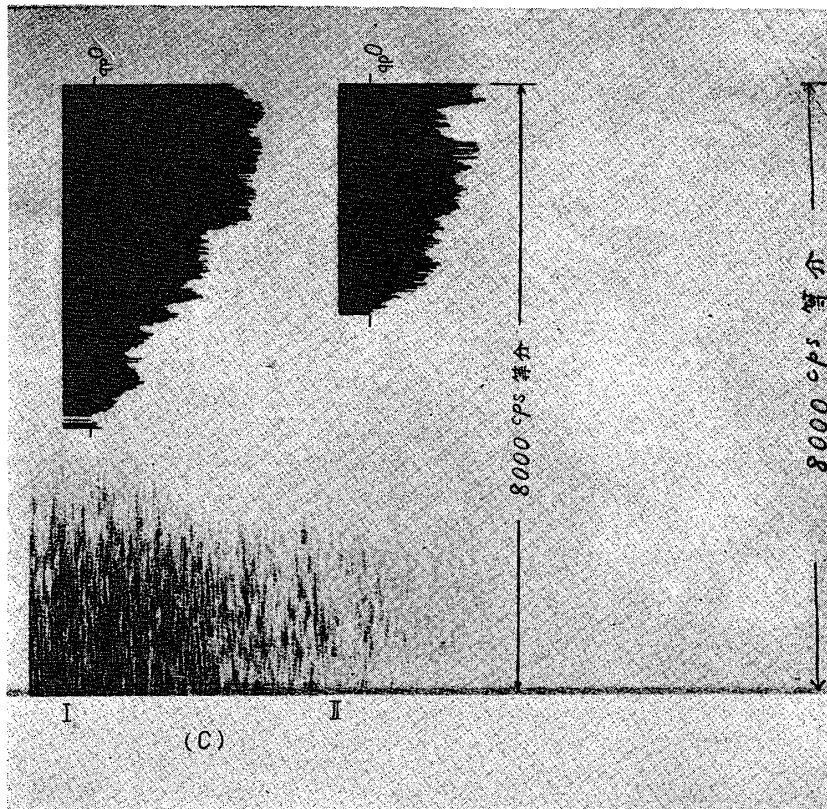


Fig. 23 Sonograph of the reverberant sound (Pistol shot in the auditorium)

ものである)

ピストル音の残響によるスペクトルが 10 kc においてその成分が減少していることは Fig. 16 の単一パルスの巾 τ が約 10^{-4} sec になることを示すもので、実際の中が 10^{-5} sec であつても、可聴周波マイクロホンの周波数レスポンスが 10 kc 前後において感度が低下するためにマイクロホンで観測される巾が 10^{-4} sec、従つて $1/\tau$ が 10000 c/s 附近になるものと考えてよい。マイクロホンが 10 kc 以下に共振点をもつか、10 kc で感度が非常に低下するときはパルスの形は上下点対称の正弦波の一波になる。(Fig. 9 (b) 参照) この場合スペクトルは理論的に $1/\tau$ に max. をもつようなものになる²⁷⁾。(但し τ は正弦波の周期)

ピストル音のスペクトルに関しては Weber²⁹⁾, Galloway³⁰⁾ の研究がある。Weber は Flobert-Pistole によつて無響室および普通の室で発射したときのスペクトルを測定しているが、これは 1000 c/s に max をもっている。Galloway は 10 gauge shotgun (ヨットレース用) の比較的大形のピストルを用い、自由空間におけるスペクトルとして周波数の増加とともに約 3~4 db/octave の傾斜で減少するスペクトルを得ている。(Fig. 22) 著者の結果は Galloway の実験と定性的に一致している。

Weber の結果は約 1000 c/s の正弦波パルスを考えれば説明できそうである。Weber も理論的には pulsating sphere (呼吸球) として解析を行い、実験結果との比較を行つている。

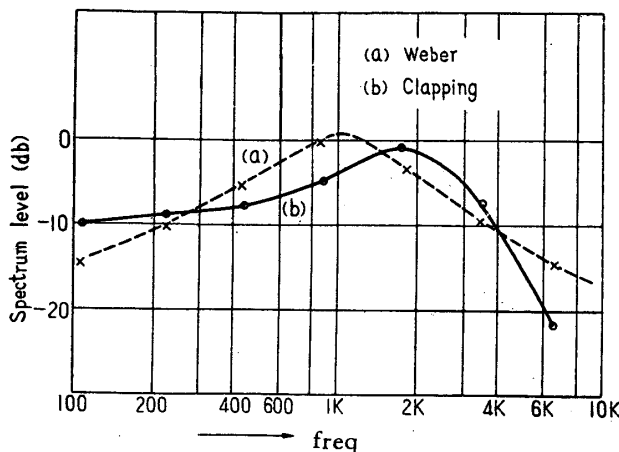


Fig. 24 Spectrum level of reverberant sound of clapping (in rev. chamber) and Weber's result.

試みに残響室の中で手拍子による残響からそのスペクトルを求めてみると Fig. 24 (b) のように 2000 c/s に max をもつようなものが得られる。

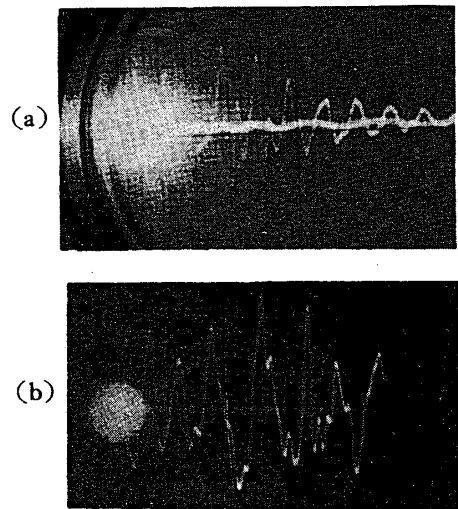


Fig. 25 Wave fom of clapping.
(a) open field.
(b) reverberation chamber A.

なおこの手拍子の直接波を屋外でマイクロホンによつて観測したものが Fig. 25 (a) で約 2000 c/s の wave train になつていことがわかる。

同図 (b) は手拍子の残響波形(残響室)である。

2 ピストル音による音響測定

2-1 パルスを音源とした場合の残響式³¹⁾

ピストル音のように継続時間の短いパルスを音源として残響の測定を行うと壁面で反射されたパルスは直接波につづいて分離したパルス列として観測される。最初の数個のパルスは観測する位置によつて異つた分布になるが次第に数をまして t 秒後には統計的に

$$\Delta N = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \dots\dots\dots (4)$$

V : 室容積 c : 音速

となる¹⁴⁾。いま測定系の時定数を τ とすれば $N \cdot \tau$ の数のパルスの積分として観測される。パルスを発射してから観測点に達するまでの時間を t とすれば観測される一個のパルスのエネルギーは

$$E = \frac{E_0}{4\pi(ct)^2} \dots\dots\dots (4)$$

E_0 : 音源から発射されるエネルギー
壁の反射による波面を鏡像の位置にある音源から

の球面波と考えれば数回反射されて t 秒後に観測される一個のパルスのエネルギーも (4) 式になる (但し反射率を 1 とする) 次に壁の反射率を R とすれば t 秒間に n 回反射された一個のパルスのエネルギーは

$$E' = \frac{E_0 R^{2n}}{4\pi(ct)^2} \dots\dots\dots (5)$$

t において観測される (時定数 τ の測定器によつて) パルス数は (3) によつて $\Delta N \cdot \tau$ だからそのすべてのエネルギーは

$$E = E' \cdot \Delta N \cdot \tau = \frac{E_0 c \tau}{V} R^{2n} \dots\dots (6)$$

t_1, t_2 において観測されるエネルギーをそれぞれ E_1, E_2 とすれば

$$10 \log_{10} \frac{E_1}{E_2} = 10 \log_{10} R^{2(n_1-n_2)} \dots\dots (7)$$

n_1, n_2 : t_1, t_2 までの反射回数

室の中の音の mean free path を λ とすれば統計的に $\lambda = 4V/S$ (S : 室の壁面積)

従つて
$$n\lambda = \frac{4V}{S} \cdot n = ct$$

$$n = Sct/4V$$

(7) 式は

$$10 \log_{10} \frac{E_1}{E_2} = 10 \log_{10} R^{\frac{Sc}{2V}(t_1-t_2)}$$

残響時間を $T, R^2 = (1-\alpha)$ α : 吸音率.

とすれば $t_2 - t_1 = T$ として残響時間の定義から,

$$10 \log_{10} R^{-\frac{Sc}{2V}T} = 10 \log_{10} (1-\alpha)^{-\frac{Sc}{4V}T} = 60$$

$$\therefore T = -KV/S \ln(1-\alpha) \dots\dots (8)$$

$$K = 0.162 \text{ (米 単位)}$$

となり定常音からの残響式 (Eyring)¹⁵⁾ と同一の結果を得る. Bolt¹⁴⁾ は一個のパルスが壁で n 回反射されると考えて残響式を導き (8) と同じ結果を得ているがパルスの距離による減衰と τ の間に配列するパルス数の効果が相殺することを考慮する必要がある.

2-2 測定音源としてのピストル音

残響測定に用いられる音源としては正弦波, warble tone, ホワイトノイズ等がありそれらを用いた場合の結果について詳しい検討は余りされていない. Parkin 外は Royal Festival Hall の測定においてピストルと warble tone の結果を

較べその違いの原因が周波数の分布に関係すると述べている⁴⁾. また Farrel¹¹⁾ は cannon, pistol, clapping, puretone, warble tone について発表しているがその詳細はまだ詳でない. 正弦波は室の固有振動の影響で非常に複雑な減衰をするので^{10,28} パルスグライド (pulsed glide) 等の方法によつて特殊な測定²⁹⁾ に用いられるだけで主に warble tone とホワイトノイズが用いられてきたが著者はホワイトノイズとピストル音を音源として同一劇場内約 20 点について同一測定系 (マイクロホン, 増巾器, 記録器) によつて測定を行つて比較検討した. 残響時間の比較を行うにあつて不規則性 (fluctuation) のある曲線からどのようにして残響時間を決めるかということが問題である. この点も従来余り注意が払われていないことであるが測定結果を比較するためには曲線からどのようにして残響時間を決めるかの基準をはつきりしておく必要があるので Appendix 3-2 のような基準によつて結果を整理した. ホワイトノイズによる残響時間 $T(N)$ ピストル音によるもの $T(P)$ とし $T(N) - T(P)$ の各オクターブバンド毎の平均値および標準偏差を計算すると Table 3 のようになる. Fig. 26 はこの中の一例で残響時間は約 1.4 秒である. Table 3 によれば over all と低音を除いて大体標準偏差 0.05 秒でプロトラクター*の読取の精度が 0.05 秒であるから $T(N)$ と $T(P)$ の差は誤差の範囲であることがわかる. 低音と over all の偏差が大きいことは騒音 (低音成分が多い) のために over all では 20 db, 低音のバンドでは 10~15 db の範囲から残響時間をきめた不確さによるもので Appendix 3-2 で 30 db の範囲からきめることを提唱したのもこのためである. とくに低音では曲線の fluctuation が甚しく基準をきめておかないと個人差が $\pm 20\%$ 以上にも達する. なお Table 3 で $T(N) > T(P)$ の傾向が認められるがこれは音源の性質というよりもホワイトノイズの方が音圧レベルが小さいので騒音の影響で S/N が小さく残響時間をきめる曲線のレベル範囲が狭くなるためである.

[附] Table 4 は参考のために理工研講堂で測定したホワイトノイズと warble tone による残響時間である¹⁰⁾.

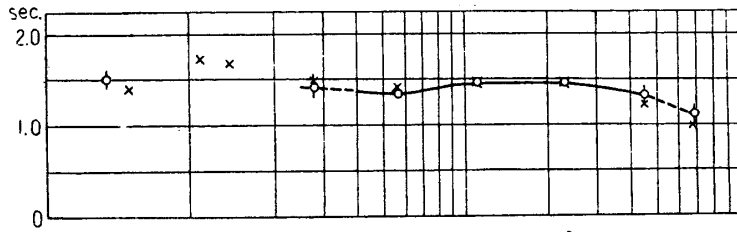


Fig. 26 Reverberation time measured from tape recording.

× direct measurement
○ recording

Table 3. Comparison of the reverberation time measured by white noise and pistol shot as the sources.

Octave band	number of measurement n	observed range of level db.	$T(N) - T(P)$		number of sign $T(N) - T(P)$		
			sec	Standard deviation σ sec	+	0	-
all pass	20	20~25	0.055	0.083	11	7	2
75~150	15	15~20	0.007	0.13	5	6	4
150~300	20	15~25	0.08	0.12	14	1	5
300~600	20	30	0.04	0.068	12	4	4
600~1.2	20	30	0.015	0.055	7	11	2
1.2~2.4	20	30	-0.005	0.059	7	7	6
2.4~4.8	20	25~30	0.022	0.078	9	8	3
4.8~9.6	20	20~25	0.012	0.056	7	10	3

$T(P)$: Rev. time by a pistol.
 $T(N)$: Rev. time by white noise.

Table 4. Comparison of reverberation time measured by white noise and warble tone.

White noise (octave band)	T (sec)	warble tone (c/s)	T (sec)
150~300	0.8	200	0.7 ⁵
300~600	0.7 ⁵	400	0.7
600~1200	0.6 ²	800	0.6 ⁶
		1000	0.6 ⁸
1200~2400	0.7 ²	1500	0.7
		2000	0.6 ⁵
2400~4800	0.6 ²	2500	0.6 ⁸
		3000	0.6 ⁵
		4000	0.6 ⁸
4800~9600	0.7	5000	0.7

* プロトラクター: 残響曲線の傾斜から残響時間を直読するスケール.

2-3 ピストル音によるエコー (echo) の検出³¹⁾

ピストル音による残響は極めて短いパルスの配

列でその包絡線から残響時間を求めることができるが建造物の特殊な面からエコーがある場合顕著に観測することができる (Fig. 28 (a)). 室内音響の問題で音響状態の評価として残響時間の外に好ましくない現象としてエコーがありエコーを生ずる反射面を適当に処理する必要がある. そのためにはエコーが生ずる時間(発射の瞬間からの経過時間)を正確に測定することが問題になる. 測定はブラウン管オシログラフで行われるが画面の大きさに制限があるので残響曲線 (例えば Fig. 28 (a)) ではエコーのあることはわかるがその時間を正確に (少なくとも 1/100 秒の単位で) 決定することはできない. 残響曲線の任意の部分拡大して (時間軸) しかも時間を正確にきめるために Fig. 27 のようなゲート回路を製作した³¹⁾. Fig. 27 に示すように最初のパルスから 50 ms 毎に 50 ms の長さのゲートを設け 50

ms づつの現象を画面一ぱいに sweep させればパルスの微細構造を詳しく観測することができエコーの時間も容易に決定することができる. ゲート回路の transient を少なくすることが肝要で定常正弦波による波形は Fig. 28 (g), Fig. 28 (a)

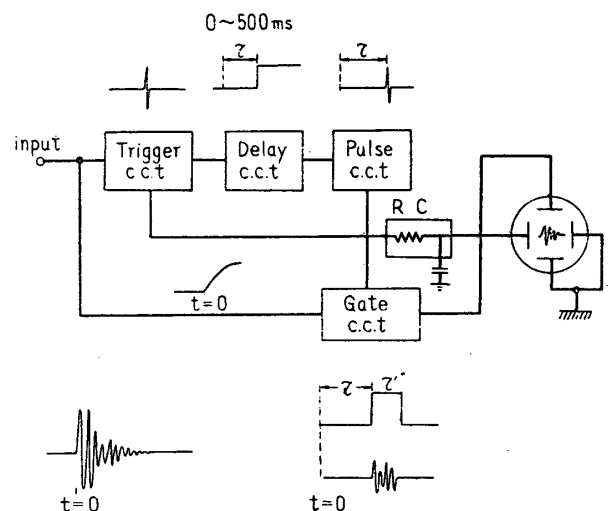


Fig. 27 Gate circuit for the measurement of echo.

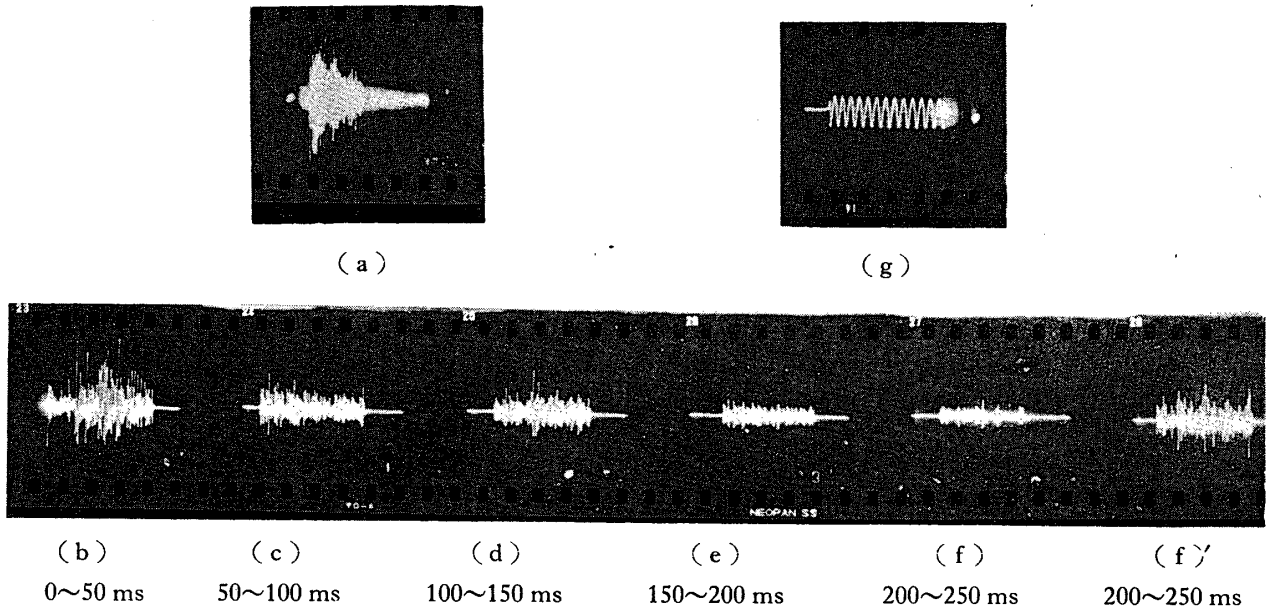


Fig. 28 Fine structure of reverberent pulses.

を 50 ms 毎に撮影した結果が同図 (b)~(f) で (f') は (f) の振巾を拡大したものである。

2-4 ピistol音の録音¹⁰⁾

ピistol音を残響測定に使つた場合磁気録音によることができれば分析の操作は同一の録音によつて行うことができるので測定条件も一定になり任意の周波数バンドで何度でも分析して検討できる利点がある。その外実用的な問題として現場の測定時間を短縮できることが最も重要な点であろう。著者は録音による測定と直接測定の結果後に述べる点に注意すれば充分満足すべき測定ができることを確認したので^{8),10)}多くの残響測定にこの方法を行つてきた。最近 Farel¹¹⁾もピistol音を高性能のテープレコーダーで録音することによつて残響測定を行うことが有利な点を指摘している。Fig. 26 は著者が日比谷公会堂で行つた同一場所についての測定結果の比較である。

ピistol音を録音する場合の問題点は

1. 録音器の周波数レスポンスが良好で S/N 比の大きいものであること。(少くとも 50db が必要である)
2. 録音レベルに注意しないとパルス波形を歪なしに録音できない。録音レベルを UV 計などで指示する場合には残響時間や室の大小にもよるが (-15 db)~(-10 db) の指示で録音する必要がある。とくに発射直後数 10 ms のエコー等を問題にする場合特にこの点に注意する必要がある。

3. ピistol音のピークレベルを忠実に録音しようとする録音できる最低レベルが大きくなるので(録音器のダイミツクレンジのため)直接測定にくらべて音圧レベルの範囲が一般に狭くなる。とくに低音のバンドにおいて測定が不正確になることが多い。

2-5 ピistolによる残響測定の方法

ピistol音を音源として多くの劇場において残響測定を行つたが短時間で非常に能率のよい測定ができる。通常劇場などでは外部騒音や換気騒音のため 40~50 db の暗騒音のあることが普通であるがピistol音は騒音計で計つて over all で 90~100 db の音圧になるので 3~2 で述べるように 30 db 以上の残響曲線を得るのに好都合である。(スピーカを用いるときは 80~90 db の音圧レベルを得られるに過ぎないのでピistolでは S/N で約 10 db 大きくなる。)マイクロホンは 1-3 で述べたように衝撃波のピークレベルを忠実に再生するためには 10 kc 以上までフラットレスポンスのものが望ましいが単に残響時間を測定したりエコーを検出する目的には 1-3 の (a)~(e) までのどのようなマイクロホンを用いても差支えない。著者は主に (c), (d) を用いたが問題になる周波数の範囲で感度なるべく一樣なものであればパルスの微細構造は異つても残響時間としては同一の結果を得ることができる。ただペロシティマイクロホンのように特殊の指向性をもつているものでは同一場所でもその向きによつてエ

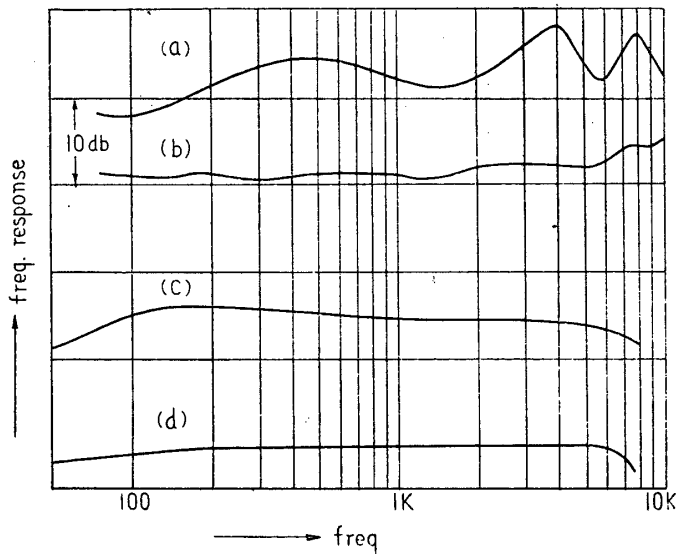


Fig. 29 Frequency responses of microphones and the tape recorders used in the reverberation measurement.

- (a) Dynamic mic c (b) Dynamic mic c'
- (c) Tape recorder M-4 (d) Tape recorder KP-2

コーなどの様子が異つて観測されることがある。(マイクロホンの指向性を利用してエコーの測定をすることは室内の音響設計に利用されることがある) 残響録音用のテープレコーダーも周波数レスポンスについてはマイクロホンと同様な考慮を払えばよい。著者は K P-2 (東京通信工業) を使用したが最近では携帯用 M-4 (同社製) で録音して KP-2 再生を行つている。マイクロホンを含めた周波数レスポンスは Fig. 29 である。録音レベルは通常の残響時間の測定で VU 計で (-5) ~ (-10) db にとれば充分であるが無響室において単独のパルスを録音するときは (-20) db 以下にしないと正確な録音はできない。この場合マイクロホンは勿論テープレコーダーの 10 kc 以上の周波数レスポンスも問題になるのでテープ速度

15"/sec 以上を必要とすることは勿論である。(KP-2 は 7.5"/sec) 残響時間周波数特性の記録は録音の再生によつて行うのであるが通常は $\frac{1}{3}$ オクターブ又はオクターブフィルターを通して High Speed Level Recorder によつて行う (Bruel 社) 記録ペン速度は 3-1 に述べる誤差を考慮に入れればよいが 1 秒前後の残響時間に対して大体 300db/sec を用いれば充分である。ただしエコーを問題にするときは 500 db/sec, 700db/sec を用いるかブラウン管による観測が必要である。

3 APPENDIX

3-1 記録速度と過渡現象^{10), 32)}

残響曲線を記録する場合パルスの配列や音圧の微小変化を問題にするときはブラウン管などの時定数の小さい記録が望ましいが単に残響時間を対象にする場合はピストル音の残響でも時定数を比較的大きくしてその包絡線を求めた方が測定に便利ことが多い。とくにペン書きの記録器では時定数を小さくすることは技術的にも困難がある。Fig. 30 は継続時間 100 ms のパルス (ホワイトノイズ) を用いた同一場所の残響を異つた記録速度で記録したもので速度を遅くすると曲線の変動が減少すると共にピークレベルも小さくなり 100 db/sec の記録速度では減衰率も変化していることがわかる。われわれが残響時間を測定するとき時定数による誤差を避けるために必要以上に速い記録速度を用いて fluctuation のために残響時間の決定に困難を感じるがあるので

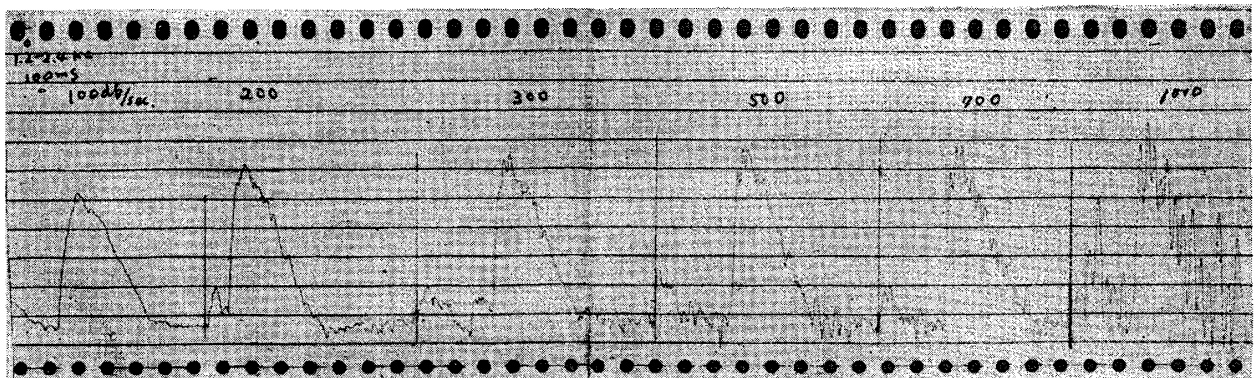


Fig. 30 Reverberation curve by various pen speed (experiment).

時定数と残響時間の関係を検討してみた。いま記録係(回路を含む)の減衰定数 α , 現象の減衰定数 β , 最大振幅 x_0 とすれば減衰をはじめてから t 秒後の振幅 x は

$$\frac{dx}{dt} + \alpha(x - x_0 e^{-\beta t}) = 0 \dots\dots(9)$$

の関係になる (Fig. 31)

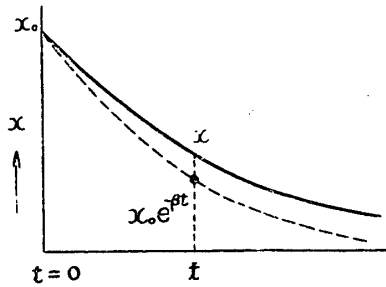


Fig. 31 Decay curve recorded by finite pen speed.

$t=0, x=x_0$ としてこれを解けば

$$\begin{aligned} \frac{x}{x_0} &= \frac{\alpha}{\alpha - \beta} e^{-\beta t} - \frac{\beta}{\alpha - \beta} e^{-\alpha t} \\ &= \frac{1}{\alpha - \beta} (\alpha e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t}) \dots\dots(10) \end{aligned}$$

$\alpha = \beta$ ならば

$$\frac{x}{x_0} = e^{-\alpha t} (\alpha t + 1) \dots\dots(11)$$

次に記録速度 300 db/sec ($\alpha=35$)

140 db/sec ($\alpha=23$) 70 db/sec ($\alpha=8.1$)

残響時間 0.5 秒 ($\beta=13.8$) 0.7 秒 ($\beta=10$)

1.0 秒 ($\beta=6.9$) 1.5 秒 ($\beta=4.5$)

として上式によつて減衰曲線を計算すると Fig. 32 が得られる。これによればまず残響時間を決定するのに $t=0$ から音圧が (-60 db) になるまでの時間を測定して残響時間を求めるより曲線の傾斜から求めた方が誤差が小さいことが分り残響時間の決定に用いられるスケール(プロトラクター)が合理的であることを示している。次に(10)式から直接記録速度による誤差を求めてみる。記録は db スケールであるとして

$$-X = 20 \log_{10} (x/x_0)$$

とおけば

$$\begin{aligned} -X &= 20 \log_{10} \{1/(\alpha - \beta)\} \\ &\quad + 20 \log_{10} (\alpha e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t}) \end{aligned}$$

$$\frac{dX}{dt} = 8.7\alpha\beta(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) / (\alpha e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t}) \dots\dots(12)$$

記録器の減衰定数が現象の減衰定数の n 倍であるとすれば

$$\alpha = n\beta$$

$$\frac{dX}{dt} = 8.7n\beta(e^{-\beta t} - e^{-n\beta t}) / (ne^{-\beta t} - e^{-n\beta t}) \dots\dots(12)'$$

$$= 8.7\beta(1 - e^{-(n-1)\beta t}) / \left(1 - \frac{1}{n} e^{-(n-1)\beta t}\right) \dots\dots(13)$$

実際の残響時間を T とすれば

$$T = 60/8.7\beta = 6.9/\beta \dots\dots(14)$$

記録された曲線の傾斜から残響時間を求めたとしてその測定値を T' とすれば

$$(12)' \text{ から } T' = 60 \frac{dX}{dt}$$

$$T' = \frac{6.9}{\beta} \left(1 - \frac{1}{n} e^{-(n-1)\beta t}\right) / (1 - e^{-(n-1)\beta t})$$

(14) により

$$\begin{aligned} (T'/T) &= 1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) e^{-(n-1)\beta t} \\ &\quad + \left(1 - \frac{1}{n}\right) e^{-2(n-1)\beta t} + \dots \end{aligned}$$

$$\left(\frac{T'}{T} - 1\right) = \left(1 - \frac{1}{n}\right) e^{-(n-1)\beta t} / (1 - e^{-(n-1)\beta t}) \dots\dots(15)$$

これが記録曲線の傾斜から残響時間 T' を決定したときの誤差を示すものである。

$n=1$ 従つて $\alpha = \beta$ のときは (11) から

$$\left(\frac{T'}{T} - 1\right) = 1/\beta t = 1/\alpha t \dots\dots(16)$$

βt の値に対して誤差 $\left(\frac{T'}{T} - 1\right) \times 100\%$ を計算したものが Fig. 33 でパラメーターが n である。誤差は n が大きい程小さいのは当然であるがほかに βt に関係する。残響曲線において $t=0$ を 0 db とすれば -10 db, -20 db... はそれぞれ $\beta t=1.15, 2.3, \dots$ に対応するので $n \gg 1$ のときは横軸 βt のかわりに減衰の度合 (db) であらわすこともできる。Fig. 33 (a) で -20 db の部分から残響時間を求めると $n=2$ ならば約 6%, $n=3$ ならば 0.5% の誤差になる。実際の測定では 20~30 db の範囲の曲線の平均から残響時間を求める場合が多いので誤差もその間の平均として考えればよい。Table 5¹⁰⁾ は残響時間約 0.7 sec の残響の録音を異つた記録速度で記録した場合の測定結果である。この関係は残響時間測定の誤差

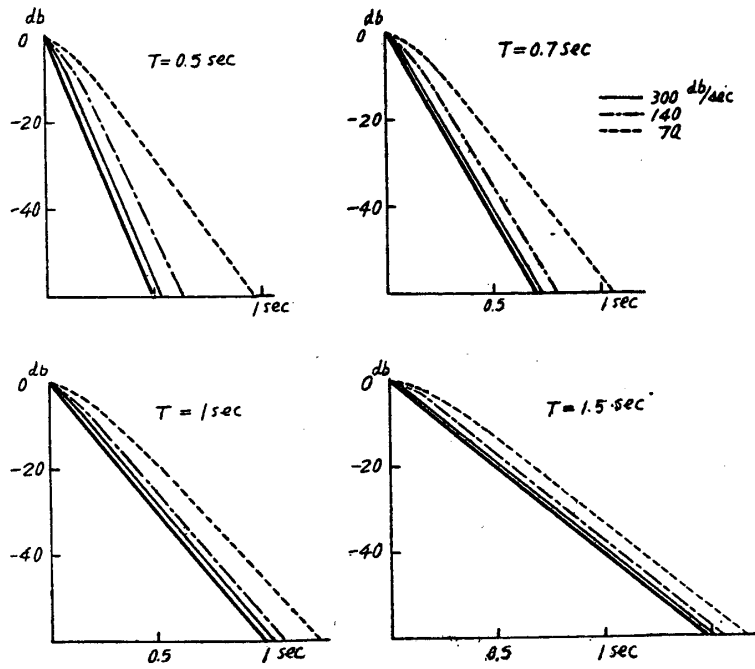


Fig. 32 Relation between penspeed and decay curve.

にだけでなく独立した二つの系がそれぞれ異つた時定数をもっている場合にも適用することができる。例えば残響時間 T の室で録音した音を残響時間 nT の室で再生したときの原音は見かけ上

$n \leq 1$ の場合の誤差曲線を示したものである。ただしこの議論は定常状態からの減衰であるからピストル音のように継続時間の短い音の残響の場合には減衰をはじめる部分の残響曲線については厳密

Table 5. Reverberation time observed by various writing speed.

writing speed db/sec	Rev. time (sec)
100	0.9
200	0.7 ⁵
300	0.7
500	0.6 ⁵
700	0.6 ⁷
1000	0.7

T' の残響時間の室で再生したことになる。過度現象を測定する場合記録系の減衰定数 α が現象の β より小さいような記録器の場合は誤差を評価して大凡の β を推定したいことがある。Fig. 33 (b) は

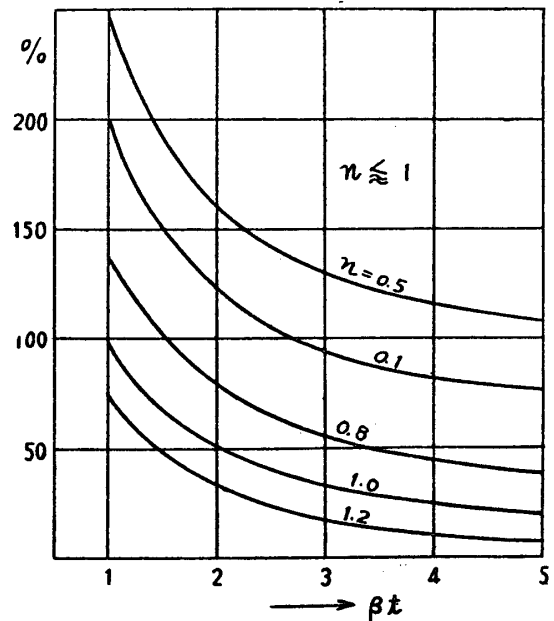
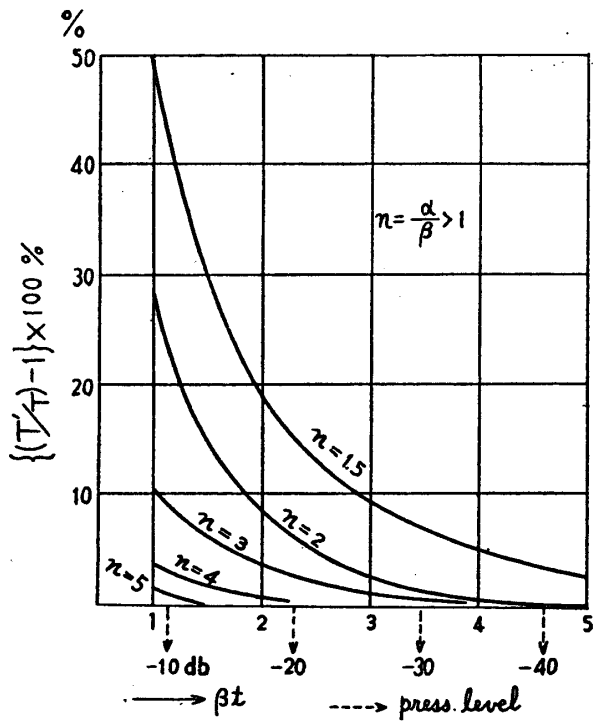


Fig. 33 Observed error of reverberation time by finite writing speed.

α : decay constant of writing apparatus.

β : decay constant of reverberant sound.

(a) $n = \alpha/\beta > 1$

(b) $n \leq 1$

は成立たないがパルスが増加するにつれてその envelope として観測されるものについては定常状態からの減衰と同じような取扱いができる。ただピストル音によるエコーなどの現象は記録速度の速いブラウン管などによらねばならない。

3-2 残響時間測定誤差と読取りの基準¹⁰⁾

残響曲線の記録から残響時間を決定する際に個人によりまた同一人でも必ずしも同一の結果にならない場合がある。とくに残響曲線に不規則性があり(例えば echo や指向性¹⁰⁾など)対数減衰していない場合はその結果に甚しい違いを生ずる。誤差の原因である記録速度(Appendix 1)については既に述べたが音源にピストルを用いたときの測定値と他の音源の場合を比較するためには残響時間を決定する方法を統一する必要があり一般に室内音響で残響時間を問題にするときも重要な問題と考えられるのでその決定の基準として以下のことを提案する。測定は High Speed Level Recorder の記録から求めるものとする。

1. 残響時間の決定は残響曲線の 30 db 以上の範囲から決定することを原則とする。S/N が小さく 30 db に達しないとき(低音に多い)は測定値にそのレベル範囲を記入しておく。
2. 曲線に fluctuation があるときはその平均の部分にプロトラクターを合わせる。10 db 以上の山谷は除外する。
3. 減衰の最初の部分は変動も多く記録速度による誤差も多いので(3-1 参照) 5~10 db を除外する。ピストル音の場合はパルスの配列が不規則のため拡声器を使用したときは指向性のために最初の部分に異状がおこることが多い。
4. プロトラクターは 150 db, 30 mm/sec (記録紙の速度)の場合残響時間 2 秒までは 0.05 秒, 2 秒以上は 0.1 秒まで読む。

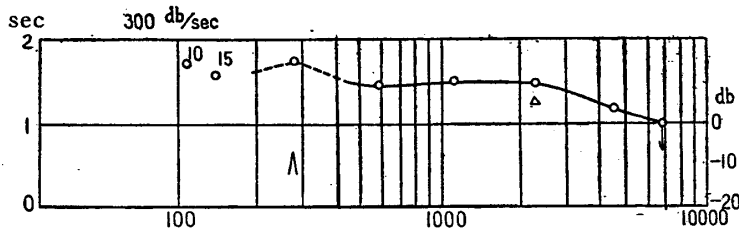


Fig. 34 Example of frequency characteristics of reverberation time.

このようにして測定した結果 Fig. 34 のように表示する。実線は 30 db のレベル範囲から決定したことをあらわし実線は 30 db~20 db から決定したことを示す。低音は 20 db もとることができない場合があるが参考値として必要なのでそのレベル範囲を記入する。280 c/s の \wedge は同図右のスケールで 10 db に約 5 db のピークを生じていること高音部の \downarrow は約 5 db の指向性による急激な減衰をあらわしている。中音の \circ \triangle は曲線が上方に凹んでいるため部分的に傾斜の異なることを示す¹⁰⁾。このような表示によつて残響曲線の性質を可成りよく表現することが可能である。さて上の基準によつて残響時間を決めた場合個人によつてどの位差異を生ずるかを吟味する目的で熟練した測定者二人が約 200 の残響曲線から残響時間を読みとつた結果を各バンドに分けて較べてみると Table 6 のようになる。二人の偏差の平均は極めて小さいが個々についていえば 300 c/s 以上では違いが約 0.1 秒 150~300 c/s では 15~20 db から定めるため最大 0.25 秒の違いを生じている。

Table 6 Personal deviation of the reverberation time measured from the same curves.

Octave band	number of measurement	deviation (mean)	range of deviation
c/s		sec	sec
150~300	30	0.003	-0.2~0.25
300~600	34	0.025	-0.1~0.1
600~1.2k	34	0.02	-0.1~0.05
1.2~2.4	34	0.01	-0.1~0.1
2.4~4.8	34	0.003	-0.1~0.1
4.8~9.6	17	0.01	-0.1~0.1

むすび

ピストル音のような衝撃パルスを音響測定に用いることは古くから行われているがパルスの物理的性質、残響として観測する場合のスペクトル等について余り調べられてないので最近我国で用いられているピストルの発射音とその残響について実験的に研究を行つた。

結果を要約すれば

1. ピストル音のピークレベルは

- 1 m で約 142 db (マイクロホンによる比較測定であるが衝撃波の継続時間は約 10^{-5} sec であることがシュリーレンの結果わかつたのでそのピークレベルは更に大きいものと考えられる。
2. 衝撃波は微細構造を有しているが最初の波面が主なもので単一パルスに近いものである。
 3. 発射後約 30 cm 位で音速となり球面波として伝播しその音圧は距離に逆比例する。また発生する音響エネルギーは火薬量に比例する。
 4. ピストル音の残響は互に incoherent な無数の組のパルスの配列になるので単一パルスのスペクトルを包絡線とする連続スペクトルを形成する。
 5. ピストル音の単一の波形はマイクロホンのレスポンスによつて変形される。
 6. ピストル音による残響時間の測定値はサイラトロンノイズによる測定値と殆んど一致する。
 7. パルスの残響式はその配列の数と距離による減衰を考慮に入れて Eyring の定常音からの残響を取扱つた理論式と一致する。
 8. ピストル音は非常に簡便で音圧の大きな音源なので高性能のテープレコーダーとオクターブフィルターを併用することによつて残響時間やエコーの検出に利用することができる。
- 終りに当り、シュリーレン写真については河村龍馬教授、フォトメトリーの測定については靱津武氏の御援助をいただいたことを付記して謝意を表する次第である。
- 文 献
- 1) W. Schindelin: Ann d. phys. 5, 129 (1929).
 - 2) G. V. Békésy: Akus. Z. 3, 217 (1937).
 - 3) W. Weber: Akus. Z. 4, 373 (1939).
 - 4) Parkin, Allen, Parkis and Scholes: Acustica 3, 1 (1953).
 - 5) W. J. Galloway: J. A. S. A. 27, 220 (1955).
 - 6) H. Haas: Acustica, 1, 1 (1951).
 - 7) 松本, 菅谷: 日本音響学会講演集, 昭. 30. 11
 - 8) 五十嵐, 子安: 日本音響学会誌, 10, (1954).
 - 9) 平山: 日本音響学会誌, 10, 282 (1954).
 - 10) 五十嵐: 日本音響学会誌, 10, 230 (1954).
 - 11) W. R. Farrel: J. A. S. A. 28, 774 (1956).
 - 12) 抜山, 二村, 城戸, 小沢: 音響. 予稿. 昭 30. 5.
 - 13) W. Furrer: Schweiz. Arch. f. Wissensch. u. Tech. 12, 213 (1946).
 - 14) R. H. Bolt: J. A. S. A. 22, 328 (1950).
 - 15) C. F. Eyring: J. A. S. A. 1, 217 (1930).
 - 16) 五十嵐: 音響学会誌, 12. 55 (1956).
 - 17) Toepler: Ann. d. Phys. 27, 1051 (1908).
 - 18) Okubo, Matsuyama: Phys. Rev. 34, 1474 (1929).
 - 19) 河村, 斉藤: 理工研報告, 9, 73 (1955).
 - 20) F. Ritter: Beitrage z. Phys. d. freien Atmos 12, 1 (1925).
 - 21) J. W. M. DuBond, E. R. Cohen, W. K. H. Panofsys and E. Deeds: J. A. S. A. 18, 97 (1946).
 - 22) 五十嵐, 子安: 理工研報告, 213 (1953).
 - 23) D. Y. Maa: J. A. S. A. 13, 170 (1941).
 - 24) 今堀: 音響分析, 16 (1949).
 - 25) E. Meyer: J. A. S. A. 26, 630 (1954).
 - 26) 佐藤, 子安: 音響講演集. 昭 31. 11.
 - 27) P. M. Morse: Vibration and Sound. 285 (1936).
 - 28) V. O. Knudsen: J. A. S. A. 4, 20 (1932).
 - 29) J. Sommerville and C. L. S. Gilford: B. B. C. Quarterly. 7, 1 (1952).
 - 30) G. W. Kamperman: J. A. S. A. 28, 759 (1956).
 - 31) 五十嵐: 音響, 講演集. 昭 31. 11.
 - 32) 五十嵐: 音響, 講演集. 昭 32. 5.
音響学会誌. 13, 154 (1957).