

新残響室の製作とその基本的性質*

残響室法による吸音率測定に関する実験的研究II

佐藤 孝二 ・ 子安 勝 (小林理学研究所)

(昭和32年3月14日受理)

On the New Reverberation Chamber with Non-parallel walls

Kozi SATO and Masaru KOYASU

(Kobayashi Institute of Physical Research)

(Received March 14, 1957)

In this paper, the details of the new reverberation chamber with non-parallel walls are mentioned. To determine the shape and volume of this reverberation chamber, the results of model room experiments (previously reported) were used.

Details of the new reverberation chamber are as follows:

	Chamber No.1	Chamber No.2
Volume	513 m ³	120 m ³
Surface area	382 m ²	148 m ²
Shape	Irregular pentagon	Rectangle
Wall thickness	40 cm	26 cm

The inner surface of the wall and floor was finished by polished concrete.

The warble tone was used as the sound source. The reverberation time-frequency characteristics of empty chamber are shown in Fig.6. At 500c/s, the reverberation time of chamber No.1 is 22 sec., and that of chamber No.2 is 14 sec.

まえがき

第1報¹⁾でのべた基礎研究の結果から、残響室として必要な均一音場をうるための1つの方法として、室の形を不整形にすることが有効な手段であることがわかった。また、室の大きさと音場の関連についてもしらべることができた。そこでこの結果を基礎として残響室の設計を行った。そして容積約 500 m³ の不整形残響室を中心とした吸音率測定装置を製作した。

この残響室について、まず吸音率測定の基礎になる空室の場合の諸性質をしらべた。またこれに

対する震音の性質やスピーカーの影響などについて検討した。空室の残響時間は500サイクルで20秒以上になり、また繰り返し同一条件で測定したときの偏差は十分小さい。またこれは室内の場所によらないことがわかった。このため比較的少量の試料で制度のよい測定ができる見通しがえられた。

§ 1 . 残響室法による吸音率測定装置の製作

1 . 1 . 残響室の設計から完成まで

3次元模型実験に使った不整形室が直方体よりも残響室として適当なもの1つと考えられるので、設計にあたってはこれを基準にとった。つき

* 詳細は小林理学研究所報告7巻1号(1957)に発表。

に残響室の大きさは低音で何サイクルまでの測定を目標にするかということから考慮しなければならない。ここでは一応測定の限界として 60 サイクル附近を考えた。そのため 3 次元不整形模型室についての実験結果を検討して、その 2000 サイクル附近を実際の 100 サイクルに対応させることにした。そのためには模型室の各辺を 20 倍すればよく、残響室の大きさとしては約 500 m³ が必要になる。一方室の容積を V 表面積を S としたとき、 v から $v + \Delta v$ の振動数範囲にある固有振動の数 ΔN は

$$\Delta N = \left(\frac{4\pi V}{c^3} v^2 + \frac{\pi S}{2c^2} v \right) \Delta v$$

となる²⁾。いま簡単のために、直方体室(辺の長さの比を 1.00 : 0.80 : 0.64 とする)について $V = 500 \text{ m}^3$ とし 60 サイクルと 100 サイクルを中心に 1/3 オクターブの範囲に含まれる固有振動の数はそれぞれ 9.5 と 38.4 となり、固有振動の数だけからいってもこの程度の大きさは必要であると考えられる。

つぎに残響室の内面の仕上げは測定精度から非常に重要な問題である。従来の残響室の壁面としてはコンクリート、プラスター仕上げ、ペンキ仕上げ、あるいはモザイクタイル張りなどがある。

われわれはこれらについて種々検討し、吸収の少いこととともに経年変化の少いことなど保守の点も考慮して、人造石研出し面にすることにした。またさきののべた音場の問題に対して室形と容積だけによることにして、ポリシリンダー壁面や回転翼などを採用しなかったのも、吸収面を少くすすための考慮によるものである。

一方、吸音率測定にあたっては、室内の空気の種類や湿度が問題になることが考えられる。これは主として 1000 サイクル以上の振動数の多い音の場合である。これに対しては比較的小型の残響室で十分なので、別に $6 \times 4 \times 5 \text{ m}^3$ の第 2 残響室をつくり、これに温度湿度調節装置をつけることにした。

第 1 表 残響室の諸元

	第 1 残響室	第 2 残響室
容 積	513 m ³	120 m ³
表 面 積	382 m ²	148 m ²
室 形	不整形	直方体
壁の厚さ	40 cm	26 cm
壁面構造	鉄筋コンクリート造 内表面人造石研出	同 左

以上の各項を中心にして製作した両残響室の諸元を第 1 表に示した。不整形第 1 残響室の実測した内面仕上げ寸法は Fig. 1 の通りである。またその内部の写真を Fig. 2 に示した。

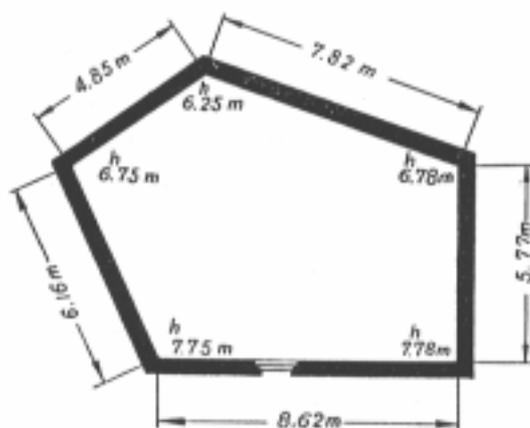


Fig. 1. Plan of reverberation chamber No. 1.
 h shows the height of each corner.

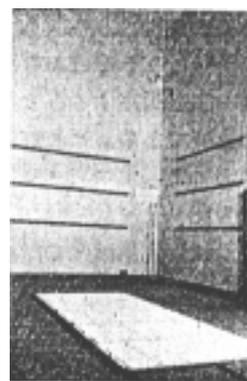


Fig. 2. Interior of reverberation chamber No. 1.

1.2. 残響時間測定装置

残響時間測定装置のうちで、もっとも重要なのは、音の減衰過程を記録または観測する部分である。これは現在までに種々の方法が行われてきたが、われわれは現在もっとも信頼できると考えられる高速度レベル記録器によることにした。また発振器の開閉は残響時間の長いところを対象にしているので、記録器との連動の簡単な機械的な接点の開閉を使った。

これら測定系の系統図が Fig. 3 である。

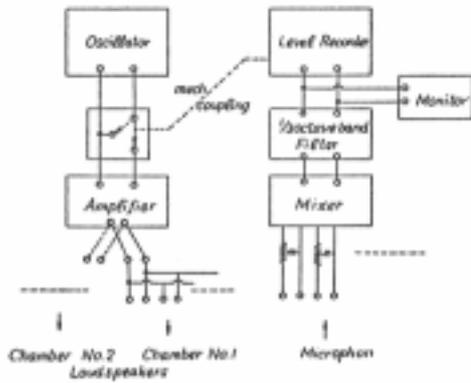


fig. 3. Block diagram of the apparatus for the measurements of reverberation time.

§ 2. 残響室の基本的性質

2.1. 測定系の検討

残響室法で吸音率を測定するとき基準になるのは空室の場合の性質である。ここではそれに先きだてて第1残響室によってスピーカーを含めた測定系の検討を行った。

残響測定の音源は測定周波数の附近で十分多くの固有振動を励振するために、普通震音やバンド・ノイズが使われる。最近では一部で短音が使われることもある。これら音源の種類を検討はあとにして、ここではもっとも一般的な震音による結果をのべる。また以下の実験では受音にはすべてほぼ無指向性のムービングコイル・マイクロホ

ンを使った。

減衰曲線を記録するときにはまず記録器の応動速度が問題になる。残響時間だけを考えるとときには、おもな減衰のまわりのこまかい変動が少い方が傾斜の測定が容易になって、測定精度もよくなる。ここでは残響時間に影響しない程度で応動速度を遅くした³⁾。

(i) 震音の性質

中心周波数 ν_0 , 変動巾 $\pm\Delta\nu$, 変動回数 α で与えられる震音は、その定常状態ではほぼ $\nu_0 \pm \Delta\nu$ の間に α の間隔にならんだ $2\Delta\nu/\alpha$ 個の成分をもったスペクトルであらわされる⁴⁾。そこで部屋の大きさと中心周波数が与えられたとき、 $\pm\Delta\nu$ のなかに音場を均一にするために必要な固有振動が含まれるように $\Delta\nu$ の下限がきまる。第1残響室で $\nu_0=100$ サイクルとし固有振動の数を30にとると $\Delta\nu > 9$ となる。一方 $\Delta\nu$ を大きくとると、その範囲内の吸収のちがいが問題になる場合があることがわかった。ここでは $\Delta\nu$ を低音で ν_0 の10%, 高音で50サイクル程度にえらぶことにした。

つぎにこの巾のなかの固有振動がすべて励振されるためには、スペクトルの間隔すなわち α が問題になる。固有振動の共鳴の鋭い(残響の長い)室では間隔を密にしなければすべての固有振動が励振されない。また α が小さくて振動数を一回掃引するのに時間を要すると、他端の振動数附近の固有振動がかなり減衰して震音を使った意味がなくなる。このようにして α は室の残響時間と関連してきめることが必要になる。従来 $8/T > \alpha > 4/T$ とすればよいなどといわれている⁵⁾。ところがあとでのべるように、この残響室は従来一般の測定の対象となるものより、はるかに残響時間が長いので、まずこれを実験的にたしかめることが必要であると考えた。

各振動数で α による減衰曲線の変化をしらべた1例として $\nu_0=500$ サイクル, $\Delta\nu=30$ サイク

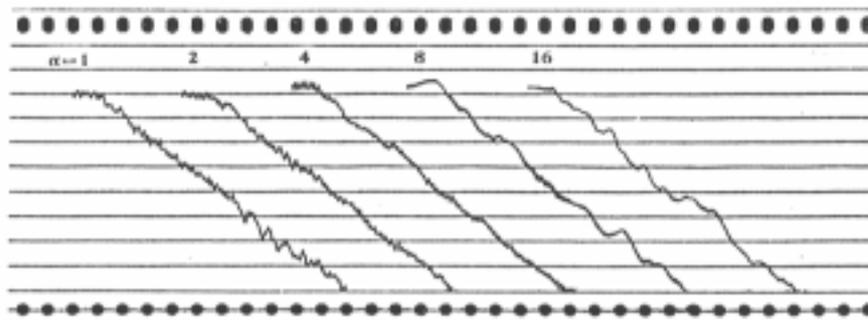


Fig. 4. Variation of decay curve with modulation frequency of warble tone.
 $v_0 = 500 \text{ c/s}$, $\Delta v = 30 \text{ c/s}$.

ルで α を 1 から 16 まで変えたときを Fig. 4 に示した。残響時間 T は 22 秒である。 α が 8 以上になると定常状態の音圧変動は少くまた減衰途中のこまかい変動もないが、減衰曲線に全体として大きなうねりがみられる。また α が小さいと定常状態の変動が大きくなるが、減衰はほぼ完全な対数減衰をしている。これたの結果から変動回数 α は $10/T \sim 20/T$ 附近が適当であるとして以下の実験ではすべてこの値をとることにした。

(ii) スピーカーの選択

スピーカーは雑音レベルまで少くとも 40 デシベルの減衰曲線がとれる大きさの音を出すことができ、さらにこれによる残響室の吸収の増加を少くすることを目標に検討した。

まず 10 吋コーン型スピーカーを内容積 0.18 m^3 の密閉箱に入れて使用した (この状態でのスピーカーの最低共振周波数は約 50 サイクルになる)。このときには 100 サイクル附近に密閉箱の板振動によると考えられる吸収があって、そのためこの附近で減衰曲線にわずかな折れ曲りができることがあり、また同じ状態で測定した減衰曲線から求めた残響時間にばらつきがある。つぎにホーン・スピーカーのユニットを使用したところ音の大きさはやや不十分であるが、だいたい 100 サイクル以上の測定には支障がない。また残響時間のばらつきもほとんどなく、非常に長くなることがわかった。そこで、この状態をスピーカーが音場に影響をしなくなる事実上の極限として、これ

とさきの密閉箱スピーカーの中間と考えられる状態で、125 サイクルの残響をしらべた結果が第 2 表である。表には、それぞれの場合について 10 回の測定から求めた残響時間の平均値と標準偏差を示した。

第 2 表 残響時間に対するスピーカーの影響
 第 1 残響室 $v_0 = 125$ サイクル, $\Delta v = 15$ サイクル
 $\alpha = 1$.

スピーカーの種類	10回の測定の平均	標準偏差値
ホーン・スピーカー・ユニット	46.0秒	0.35秒
10"スピーカー (裸)	46.0	0.90
10"スピーカー (50cm×50cmパツフル板付)	39.0	1.2
8"スピーカー (30cm立方密閉箱)	35.5	1.5
10"スピーカー (0.18m ³ 密閉箱)	25.7	1.2

この実験から残響室のスピーカーとしては一応ホーン・スピーカー・ユニットを使うことにした。ただその他のスピーカーでも残響時間はまだ 20 秒以上で精度からいっても十分であり、さらに音の大きさの利点があるので実際の測定では場合に応じて使用することにした。

2. 2. 空室の場合の残響室の特性

(i) 残響時間

まず前節のホーン・スピーカー・ユニットを音源として第 1 残響室で空室の残響時間を測定した。500, 125 サイクルに対する減衰曲線の 1 例を

新残響室の製作とその基本的性質

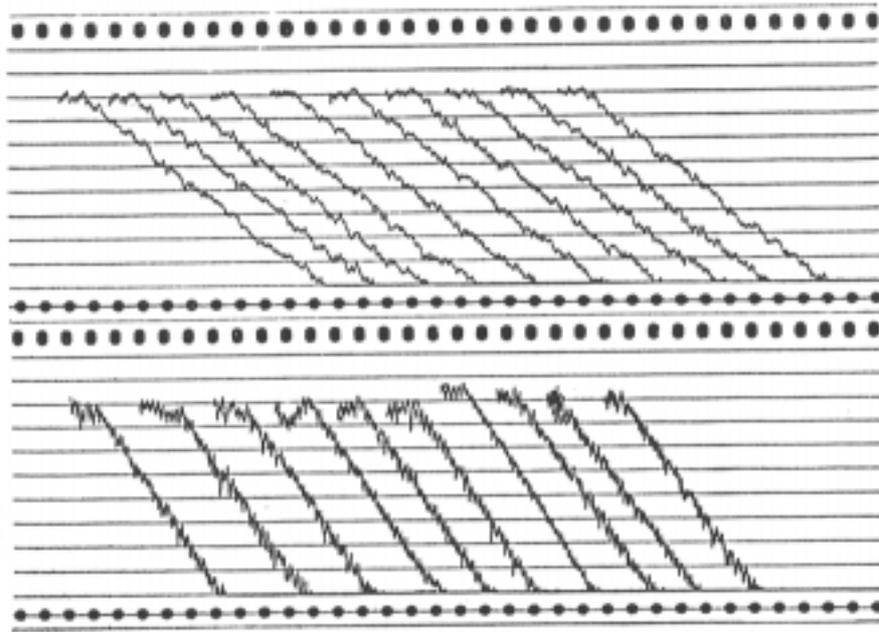


Fig. 5. Decay curve of empty chamber No.1.
 loudspeaker : horn type speaker driver unit
 upper : $v_0=500\text{ c/s}$, $\Delta v=30\text{ c/s}$, $\alpha=1$, $P=3\text{ mm/sec}$.
 lower : $v_0=125\text{ c/s}$, $\Delta v=15\text{ c/s}$, $\alpha=1$, $P=1\text{ mm/sec}$.

Fig. 5 に示した。いずれもほぼ完全な対数減衰をしていることがわかる。マイクロホンは、スピーカーのある位置を含んだ5つの隅と室中央に移して残響時間を求めたが、125サイクルから6000サイクルの範囲で、その位置による差はまったくみとめられなかった。また室の高さの方向での差もないことがたしかめられた。その残響時間の測定結果が第3表と Fig. 6 である。500サイクルの残響時間は22秒で振動数が少くなるとともに長くなり、125サイクルでは46秒に達している。一方、振動数が多くなると残響時間はかなり急激に減少している*。

第3表には、各振動数について5回の測定の平均と偏差を示したが、そのばらつきは小さく、空室の場合には3回から5回の測定の平均をとればよいことがわかった(残響時間の測定精度につい

ては第3報でのべる)。

第3表 空室残響時間(1956-6-21測定)

振動数	第1残響室		第2残響室	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
125サイクル	46.0秒	0.5秒	24.8秒	1.0秒
250	37.0	0.5	24.0	0.5
500	22.5	0.2 ₅	14.0	0.2
1000	14.0	0.1	10.0	0.1
2000	10.0	0.1	7.2	0.1
4000	5.3 ₈	0.0 ₇	4.3	0.0 ₅

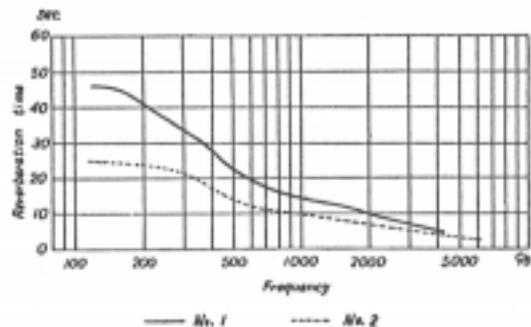


Fig. 6. Reverberation time of empty chamber No.1. and No.2.

* 高音の残響時間は、測定時の気象条件によって相当変化する。また500サイクルの残響時間も、最近(1956年11月以降)の測定では、26秒程度に長くなっている。これらについては長期にわたる継続的な測定が必要なので、ここでは、一応この表の数値をあげておく。

つぎに、第2残響室で同様にホーン・スピーカー・ユニットを使って測定した残響時間を同じ図と表に示した。

(ii) 壁面の平均吸音率

空室の残響時間から、壁面の平均吸音率を求めた。ここで注意しなければならないのは空気中の音波の吸収である。これを考慮したときの Sabine の残響式は次のようになる。

$$T = \frac{KV}{\bar{\alpha}S + 4mV}$$

ここで m は空気の温度や湿度に関係する量で Knudsen によって実験的に求められている⁶⁾。

大きさのちがった2つの室で $\bar{\alpha}$ と m が同じときには Knudsen が行ったようにその2つの残響時間から $\bar{\alpha}$ と m をそれぞれ求めることができる。この両残響室の平均吸音率はほぼ等しいとみなされるので、同一の気象条件で求めた残響時間から m を消去して、壁面の平均吸音率を求めたのが Fig. 7 である。

このとき m を求めてみると Knudsen の値よ

りもやや小さい値がえられた。これは最近、他の報告でものべられているが⁷⁾、なお詳細な実験中なので別に報告する予定である。

(iii) 音圧分布

第1残響室について、さきに残響時間を求めた6点の定常状態での音圧レベルのばらつきを第4表に示した。表で、マイクロホンの位置を示す符号は Fig. 8 の通りである。これからマイクロホンの位置をあらわすには、すべてこれを使うことにする。

場所による音圧のちがいは十分小さく、125 サイクルでもスピーカーのある位置をのぞいて2デシベル程度である。

む す び

新しく製作した残響室の概要と空室のときの諸性質について、しらべた結果をのべた。残響室の設計にあたっては、測定法の根本仮定である均一音場をうるために、第1報でのべた模型室による

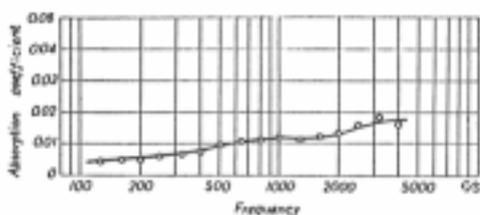


Fig. 7. Absorption coefficient of chamber wall.

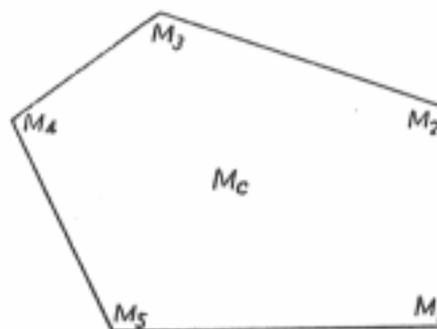


fig. 8. Position of microphone for reverberation measurements.

第4表 残響室内音圧分布
スピーカー；ホーン・スピーカー・ユニット，位置 M_1

マイク位置 振動数	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_c
125 サイクル	+5 db	+2 db	0 db	+2 db	+1 db	0 db
250	+1	+1	+1	0	+2	0
500	+1	-1	-1	-1	0	0
1000	+1	-2	-2	-1	0	0
2000	0	-1	-1	-1	0	0
4000	0	-2	-2	-2	0	0

新残響室の製作とその基本的性質

基礎実験から、その形状を決定した。また 60 サイクル附近までの測定を行うことを目標にして、約 500 m^3 の容積にした。

空室の状態での測定系の検討を行った結果、低音ではスピーカーの吸収が残響時間に影響すること、震音の繰返し回数が減衰曲線に相当影響を与えることを明らかにした。

残響時間は 500 サイクルで 22 秒となった。また 125 サイクルから 6000 サイクルの範囲で残響時間は室内の場所に関係なく、繰返し測定したときの偏差も非常に少い。これらの結果から少なくとも空室の場合については、基礎実験で予期したような性能をもつことがたしかめられた。

この残響室の完成は、清水建設株式会社の犠牲的な協力によるところが大きい。残響時間測定装置の製作は織田厚、細谷進、両氏に担当していただいた。また、完成後の基礎実験には坂上丈寿氏

の協力をえた。その他この装置の製作には、研究所内外の各方面の協力をえた。これら多くの方々に厚く御礼を申しあげる。

なお、この研究は文部省科学機関研究費の補助をうけた。

文 献

- 1) 佐藤孝二, 子安勝: 日本音響学会誌 13 (1957) 231
- 2) D.Y.Maa: J.Acoust.Soc.Amer. 10 (1939) 235
- 3) 五十嵐寿一: 日本音響学会誌 10 (1954) 230
- 4) W.L.Barrow: Ann.d.Phys. 11 (1931) 174
- 5) P.v.Brueel: "Sound Insulation and Room Acoustics" (1951) 127
- 6) V.O.Knudsen: J.Acoust.Soc.Amer. 5 (1933) 127
- 7) E.J.Evans and E.N.Bazley: Acoustica 6 (1956) 238