ペンローズタイル型音響パネルの音響拡散性能

DETERIORATION PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE SUB-ASSEMBLAGES SUBJECTED TO HIGH CYCLIC DEFORMATIONS

Part 1 Experimental studies of unreinforced, reinforcement of the beam-ends, and repair

土 屋 裕 造[*1]
Yuzo TSUCHIYA

The diffuse sound field is desirable for music halls, etc., where acoustics are important. Regarding the scattering coefficient that represents the acoustic scattering capability of architectural surfaces, a reverberation room method for measuring random-incidence values has been standardized in ISO 17497-1. In addition, an alternative method for measuring normal-incidence values between parallel walls was proposed.

Against this background, the author investigated acoustic diffusers with excellent diffusivity using the concept of scattering coefficient, and have developed an acoustic panel with aperiodic but regular structure, which imitates Penrose tiles and has high diffusivity and uniformity in the direction of reflection with respect to sound. In this paper, we first present the results of scattering coefficient experiments using a scale model of the Penrose tile-type acoustic panel, and show that it has high acoustic diffusion performance. Next, we show the room acoustic characteristics of the diffuser, which is shaped for practical use and has a sound absorption mechanism of perforated panels, installed in an actual small meeting room.

Keywords : *Room acoustics, Sound diffusion, Scattering coefficient, Penrose Tile*
室内音響，音響拡散，散乱係数，ペンローズタイル

1. はじめに

建築の多くの室はその壁面が反射性の平板であり，音は平板に入射して鏡面的に反射する．その場合，室形状によっては音が反射を繰り返す過程で十分拡散しないため，吸音部位に入射しにくくなること，また，平行壁間でフラッターエコー（音の往復反射）が発生するなどの音響障害といった不具合が起こる．音響を重視する音楽ホール等は，拡散音場であることが望まれる．拡散音場とは，室内の音圧分布，及び音の方向が均一であって，上記のような不具合がない音場のことであり，壁に角度をつけるなど室形状により音が拡散するような工夫を施したり，壁面に拡散体を設置したりすることで拡散音場に近づけることができる．このように壁面の音響拡散は室形状や吸音面配置とともに室内音響特性に大きな影響を及ぼすが，過去には拡散形状による音響的な性能について整備されていなかった．

近年，その物理指標である散乱係数（Scattering Coefficient）[1]が定義され，拡散壁の性能比較に加えて，幾何音響シミュレーション[2),3)]の予測精度向上を目的に利用されてきている．ランダム入射散乱係数の測定法に関しては，2004年に残響室法がISO 17497-1[4]で規定され，近年の研究[5)~8)]により様々な拡散体の測定値が提供されてきた．一方，拡散壁によるエコー低減検討や矩形室の理論的残響予測[9]では垂直入射散乱係数が必要となり，矩形室の平行壁面間に1次元音場が卓越する条件を設定し，試料設置による残響時間の変化から垂直入射散乱係数を測定する新たな方法が提案され，その測定法も整備された[10),11)]．

そのような背景の中，散乱係数の考え方を用いて優れた拡散性を有する音響拡散体を検討し，この度，ペンローズタイルを模して非周期構造ながら規則性があり意匠性にも優れた音響パネルを開発した．ペンローズタイルは，2種類の平行四辺形，あるいは二等辺三角形のタイルで平面を充填できる唯一のものであり，物理学者ロジャー・ペンローズにより考案された．本報では，はじめに，ペンローズタイル型音響パネルの散乱係数測定結果を提示し，高い音響拡散性能を有することを示す．次に，その音響パネルの実用化に向けて考案した連続性のあるデザイン形状を示し，この形状で有孔板の吸音機構を付加した本パネルを実際の小会議室に設置した室内音響特性を提示し，残響時間が極端に短くならずにフラッターエコーが抑制されていることを示す．

2. 本音響パネルの散乱係数

2.1 導出方法，測定概要

ランダム入射散乱係数は，壁面の音響拡散性指標として，散乱係数が提案され，ISO[4]にて測定法が規格化されている．散乱係数 S_r は全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外の反射エネルギーの割合であり，(1) 式で表される．

$$s_r = 1 - \frac{1-\alpha_{spec}}{1-\alpha} = \frac{\alpha_{spec}-\alpha}{1-\alpha} \quad (1)$$

＊1　戸田建設(株)技術研究所　　Technology Research Institute,TODA CORPORATION, M.Eng.

α：試料の吸音率

α_{spec}：試料の鏡面反射成分のみを反射エネルギーとみなした場合の吸音率

上記2種類の吸音率はランダム入射によるものであり，残響室法吸音率測定の原理に従って（2），(3) 式により求められる．

$$\alpha = 55.3\frac{V}{S}\left(\frac{1}{c\,T}-\frac{1}{c\,T}\right)-\frac{4V}{S}(m_2-m_1) \tag{2}$$

$$\alpha_{spec} = 55.3\frac{V}{S}\left(\frac{1}{c_4T_4}-\frac{1}{c_3T_3}\right)-\frac{4V}{S}(m_4-m_3) \tag{3}$$

ここで，V：室容積，S：室表面積，c：音速，m：空気吸収係数 T_1～T_4：残響時間（表1参照）を表す．

ただし，鏡面反射成分は円形の拡散体試料を回転させながらインパルス応答を同期加算して抽出するため，表1に示す4条件における残響時間測定が必要となる．

垂直入射散乱係数は，1つの平行壁のみを反射で残し，他の面を全面吸音した矩形の残響室内にて行う．反射の平行壁面の一方に試料を固定し，そのなしとありによる残響時間を測定する．反射性の平行壁面と吸音性の側壁で囲まれた室内の残響過程では，平行壁面間の1次元音場が残存し，この基準条件および平行壁面片側に試料を設置した条件の残響時間は，平行壁面の交互反射ならびに側壁と空気の吸音を考慮すると，各々（4），(5) 式で表される[10]．

$$T_5 = \frac{6\ln(10)L_z/c_5}{-\ln(1-\alpha_{0,n})+(m_w+m_5)L_z} \tag{4}$$

$$T_6 = \frac{6\ln(10)L_z/c_6}{-\ln\sqrt{(1-\alpha_{0,n})(1-\alpha_n)(1-s_n)}+(m_w+m_6)L_z} \tag{5}$$

ここで，T_i：残響時間，c_i：音速，m_i：空気吸収係数（添字 i：5 試料なし，6 試料あり），L_z：平行壁面間の距離，α_n：試料の垂直入射吸音率，$\alpha_{0,n}$：平行壁面の垂直入射吸音率，s_n：試料の垂直入射乱反射率，m_w：側壁吸音による吸収係数を表す．

従って，両条件の残響時間を計測すれば，式 (4)，(5) より試料の垂直入射散乱係数は式 (6) で求められる．

$$s_n = 1-\frac{1-\alpha_{0,n}}{1-\alpha_n}\exp\left[12\ln(10)L_z\left(\frac{1}{c_5T_5}-\frac{1}{c_6T_6}\right)-2L_z(m_5-m_6)\right] \tag{6}$$

なお，本報では室内の温湿度変化が無視でき，平行壁面と試料の吸音率が共に十分小さいため，(7) の近似式を用いるものとする．

$$s_n \approx 1-\exp\left[12\ln(10)\frac{L_z}{c}\left(\frac{1}{T_5}-\frac{1}{T_6}\right)\right] \tag{7}$$

表1　残響時間測定条件：ランダム入射散乱係数の場合

残響時間（sec.）	試験体	ターンテーブル
T_1	なし	静止
T_2	あり	静止
T_3	なし	回転
T_4	あり	回転

測定対象の試験体の配置条件を図1，タイル詳細寸法を図2に示す．実験で使用したタイルはアクリル製で，寸法は実物大で表示しているが，測定では1/4縮尺模型を使用している．大タイルは小タイルの構成を基調に小タイルを1＋黄金比（約2.62倍）に拡大したものである．フラクタルは大タイル配置に小タイル積載の構成で，フラクタル2はフラクタル1の大タイルの配置を中心軸で反転しており，フラクタル2の方が大タイルの上に乗る小タイルが多く，基準の底面からの起伏が大きい．b）は中心を円周上に移動した回転非対称配置，またc）として大・小タイルのランダム配置も行った．実験は1/4縮尺で行っているが，本報の実測における周波数は実物換算1/3oct. で示す．

2.2 散乱係数測定結果

図3に，ペンローズタイル型配置とランダム配置のランダム入射散乱係数を比較して示す．大タイル配置は小タイル配置の相似形であり，周波数特性はその寸法に反比例した割合による平行移動と考えられる．大・小タイ

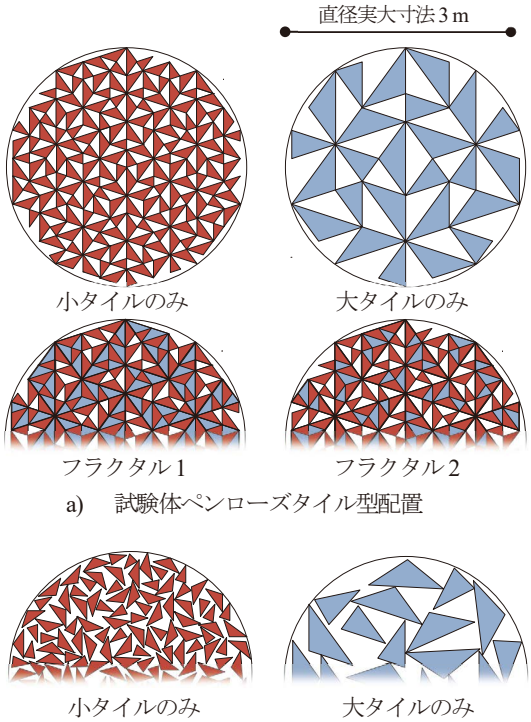


図1　試験体配置条件（実物寸法表示）

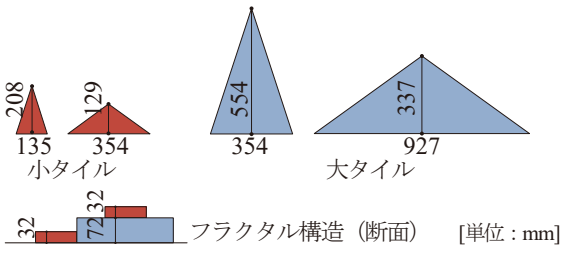


図2　タイル詳細寸法（実物寸法表示）

ルいずれにおいても，ペンローズタイル型配置はランダム配置と近似し，大きな散乱係数を有する．

図 4 にペンローズタイル型配置の配置条件によるランダム入射散乱係数を比較して示す．フラクタルとすることにより，大小タイルの特性を重ね合わせた1kHz 以上の広帯域で大きな散乱係数となる．フラクタル 2 は大小タイルの重ね合わせ通りの特性であり，フラクタル 1 より散乱係数の値が大きい周波数帯域が多い．これは，フラクタル 2 のほうが高低差の大きくなる部分が多いためと考えられる．

図 5， 6 に図 2， 3 と対応した垂直入射散乱係数を示す．低音域からピークにかけて急激に値が上昇するが，傾向はランダム入射散乱係数と同様で，小タイルは 2 ～ 2.5kHz に 1 に近いピーク，大タイルはそのオクターブ下にピークを持ち，フラクタル形状は，小タイルと大タイルの両方の特性を持つ．

図 8 に，ペンローズタイル型拡散体のランダム入射散乱係数について，図 7 に示す形状の測定値と比較して示す．本パネルが大きな散乱係数となっている．比較的多くみられるリブ配置形状は，底面からの高さとその間隔により，特定の周波数で落ち込みが発生している．音を拡散するには波長に応じた辺長と空間が必要と考えられるが，立方体ブロックを市松模様に配置した形状は，ブロックの辺長が100mm であるため，1.6kHz 以下の波長の音を十分拡散できていない．また，この測定結果からは不明であるが，リブ配置，ブロック格子配置はいずれも特定の方向に散乱反射すると考えられ，非周期構造である本音響パネルは，散乱方向の均一性においても優位な特徴を有する．

3. 実用化に向けた形状の検討

このペンローズタイル型拡散体を建築部材として実用化するため，パネルとしての形状を検討した．タイルによりペンローズタイル型に構成することも可能であるが，厚みのあるパネルからの削り出しを想定したため，幅1m を 1 つのユニットとして，音響的な効果が表れる寸法の中で，星形の幾何学模様があり，ユニットを並べた場合に連続性が現れるように工夫した．形状を図 9 に

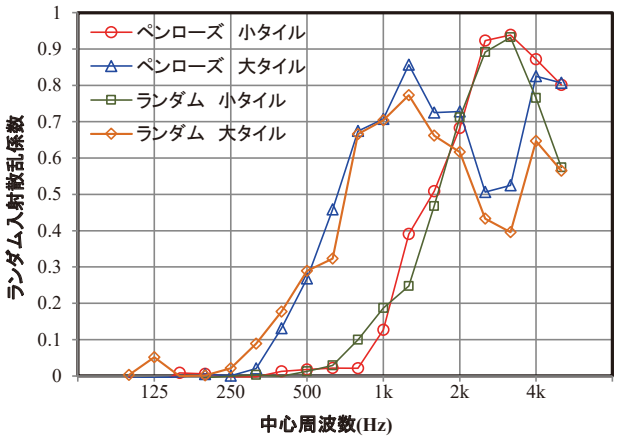


図 3　ランダム入射散乱係数
ペンローズタイル型配置とランダム配置

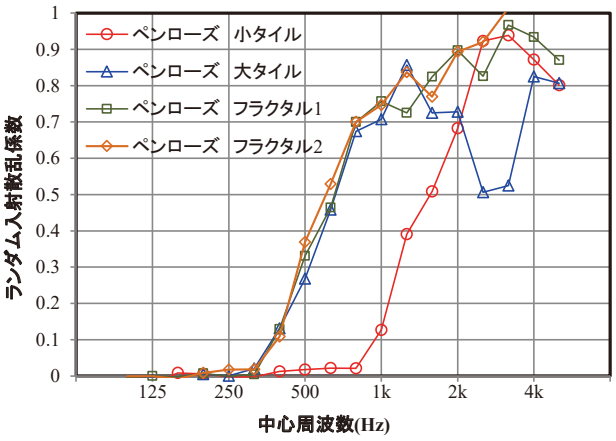


図 4　ランダム入射散乱係数
ペンローズタイル型　配置条件の違い

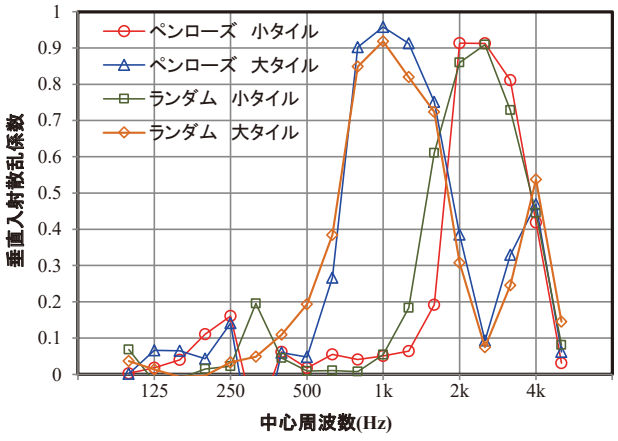


図 5　垂直入射散乱係数
ペンローズタイル型配置とランダム配置

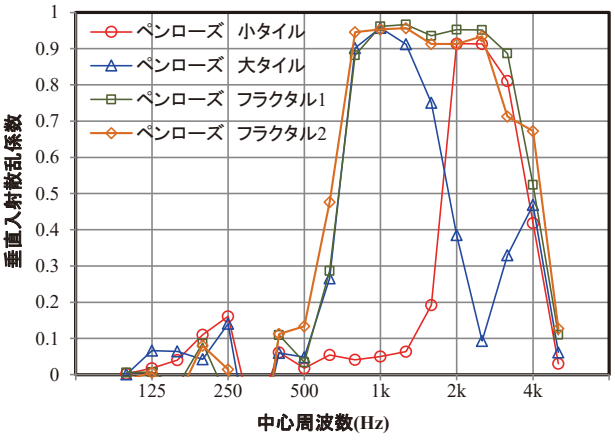
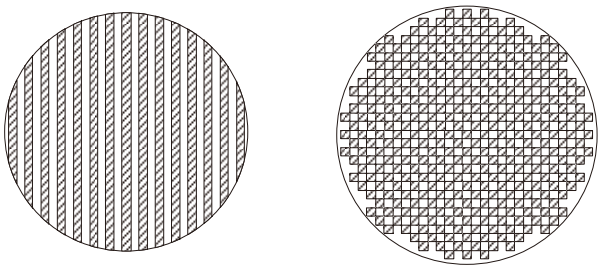


図 6　垂直入射散乱係数
ペンローズタイル型　配置条件の比較

示す．なお，２項のペンローズタイル型配置とランダム配置の散乱係数に殆ど差がないことから，ここで示す形状と２項の形状の違いによる散乱係数の相違はないものと考えている．



a)　リブ配置形状　　b)　立方体ブロック市松模様配置形状

図７　比較用試験体

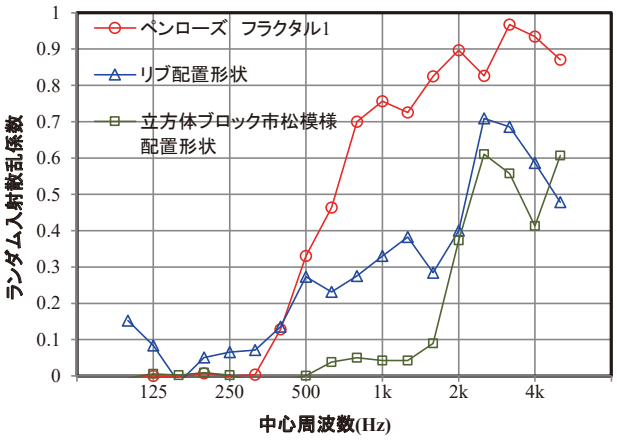


図８　ランダム入射散乱係数
ペンローズタイル型と他形状の比較

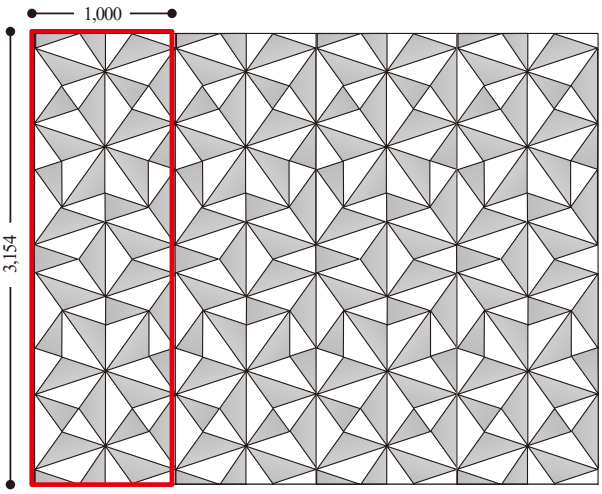


図９　実用化を考慮した音響パネル形状（赤枠内１ユニット）
［単位：mm］

4. 本音響パネルを実際の室に設置した場合の音響性能

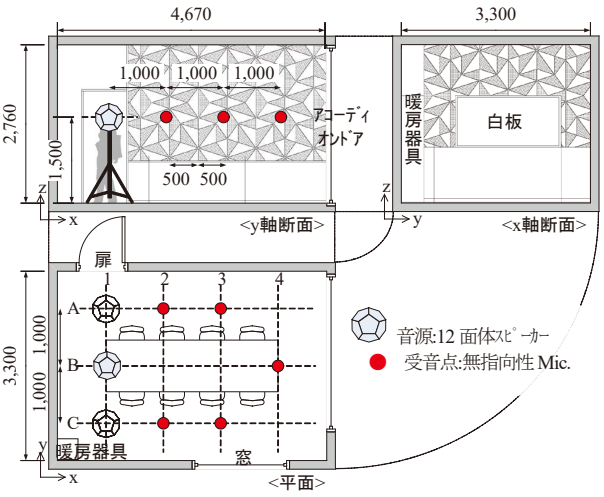
4.1 測定概要

本音響パネルを設置した室で音響性能を測定する機会があり，その結果を報告する．測定場所は，８人が収容できる小会議室である（写真１）．会議室の概略図と音源，受音点位置を図10に示す．残響時間は，インパルス応答を15経路測定して T_{30}（残響減衰曲線－５～－35dB区間）を平均して求めた．減衰率比[5]は，B1位置の音源とA3位置の受音点のインパルス応答から残響減衰曲線の平均減衰率 $\bar{D}$ に対する瞬時減衰率 $D(t)$ の比 $d(t)=D(t)/\bar{D}$ を－５～－60dB区間の時間範囲で算出した．

図11に測定室条件を示す．吸音材Aは内装の上から仮設的に貼っている．拡散の効果をより明確に確認するため，床にAを敷いた条件を行った．音響パネルDは今回使用したペンローズタイル型音響パネルで，断面概略



写真１　測定した小会議室　音響パネル設置



内装	
天井	ランダム有孔板（せっこうボード裏紙付）
壁	せっこうボード，白板，窓サッシ，木扉， アコーディオンドア（プラスチック枠アクリル製）
床	タイルカーペット

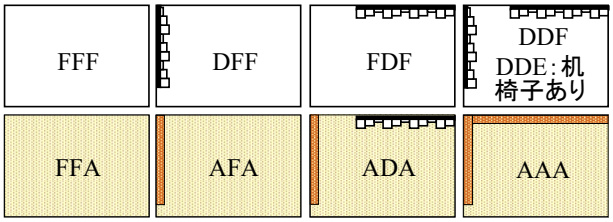
図 10　小会議室　概略図及び音源・受音点位置
：図は図 11 DDE の状態　［単位：mm］

を図12に示す．厚さ42mm の中で高さを 3 層化して低い 2 層を有孔とし，背面の空間に吸音材 A を入れて一体化している．各種材料の吸音率を図13に示す．散乱係数は 2 項による．

4.2 測定結果および考察

FFF に音響パネル D を壁面に取り付けた DFF，FDF，DDF，机椅子を入れた DDE の残響時間を図14に示す．音響パネル D が増えるに従い400Hz 以上の残響時間が短くなり，周波数特性は平坦に近づく．500Hz 付近は音響パネル D 自身の吸音，それ以上の周波数は音響パネル D により音が天井，床面の吸音面に拡散して吸音されたためと考えられる．机椅子が入った DDE は DDF と大きな違いがない．隣り合う 2 壁面の拡散体により十分吸音，拡散されたためと考えられる．FFA，AFA，ADA，AAA の残響時間を図15に示す．y 方向の平行壁のある AFA の残響時間から，ADA は音響パネル D の吸音と拡散の影響により500Hz 以上で短くなる．ADA は1.25kHz 以上の残響時間周波数特性が平坦であるのに対し，AAA は右下がりの傾向が顕著になっている．

1/3オクターブバンド2kHz の減衰率比を残響減衰曲線と合わせて図16に示す．DDF における減衰率比のピークの発生は，音響パネルを貼れない部分および天井と床の反射の影響と考えられる．AFA の場合に聴感で確認できたフラッターエコーが，減衰率比では y 方向壁間往復約19.4ms（ミリ秒）周期のピークとして現れている．ADA では周期的なピークが目立たなくなっており，音響パネによるフラッターエコーの抑制効果が現れている．



F	室の内装，平面
A	内装の上に，吸音材 13 mm ポリプロピレン繊維不織布
D	ペンローズタイル型音響パネル
E	机，椅子設置（反射性）

図 11　測定室条件

例　AFA：x 方向壁（図中左）A, y 方向壁（図中上）F, z 方向床 A　他面は室の内装

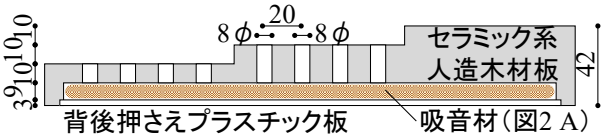


図 12 ペンローズタイル型拡散体

（図 2 D）　断面概略図　［単位：mm］

5. まとめ

開発したペンローズタイル型音響パネルの音響性能について，以下のことが言える．

1）本音響パネルは，拡散の効果がある周波数で散乱係数が 1 に近く，大きな音響拡散性能を有する．フラ

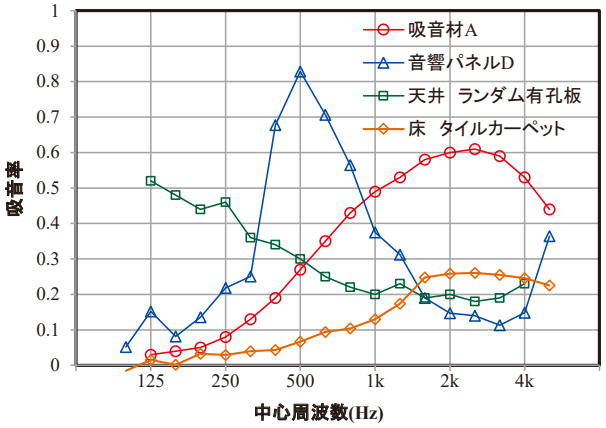


図 13 各種材料の吸音率

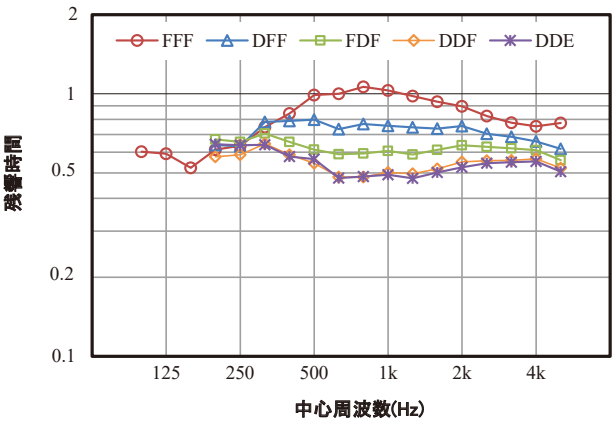


図 14　室条件による残響時間

音響パネル D 設置面の比較

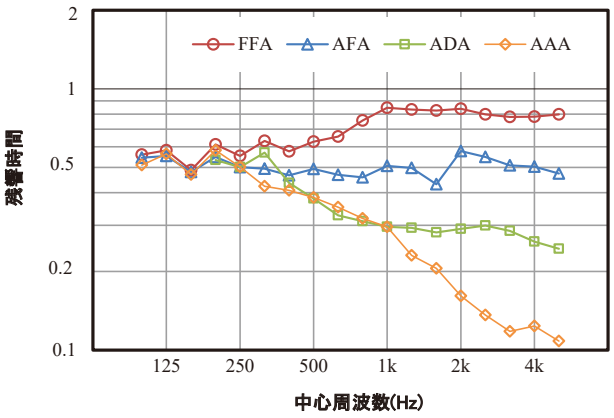


図 15　室条件による残響時間

床吸音材 A 敷きの比較

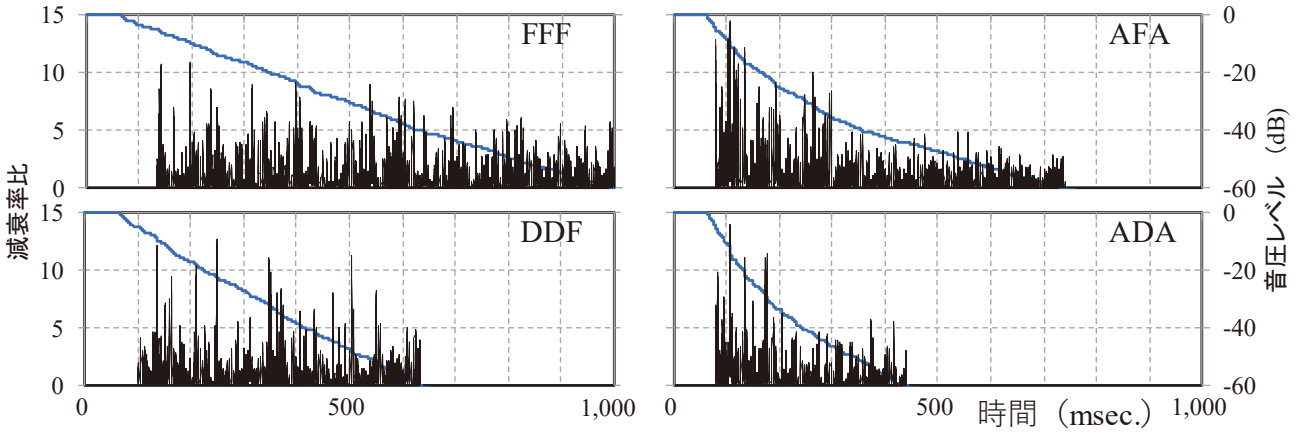


図 16　減衰率比および残響減衰曲線　2 kHz　FFF，DDF，AFA，ADA



写真 2　ホール 1 内観



写真 3　音響パネル設置状況

クタル構造とすることにより，大きな音響拡散性能を広帯域化することができる．

2）本音響パネルが室に取りついた場合，その拡散性能の特性により吸音面に到来する音が多くなるため室の残響時間が短くなり，平行壁間のフラッターエコーが抑制される．

以上により，本パネルの設置は，矩形の室でありながら音声や音楽聴取が重要な，会議室，音楽ホールに有効である．本パネルは，TODA BUILDING の 4 階にある 2 つのホールに設置された（写真 2，3）．ホールは矩形であるが，本パネルを3m の高さまで四周全面に設置することにより，適度な響きがあり音響障害のない良好な音場となる効果を期待している．

謝辞

日の出工芸（株）には，本パネルの製作の他に，会議室使用，そこでのパネル設置，各種条件測定のために多大なご協力をいただいた．この場を借りて謝辞を表する．

参考文献

1）M. Vorländer, E. Mommertz, Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients, Appl. Acoust. 60, 187–199, 2000.

2）C. L. Christensen, Odeon Room Acoustics Program Ver. 11. User Manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions, (Odeon A/S, Lyngby, 2011).

3）B.-I. Dalenbäck, CATT-Acoustic Ver. 9. User's Manual, (CATT, Gothenburg, 2011).

4）ISO 17497−1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.

5）M. Vorländer, J.-J. Embrechts, L. De Geetere, G. Vermeir, M. H. Gomes, Case studies in measurements of random incidence scattering coefficient, Acta Acoust. united Ac. 90, 858−867 (2004).

6）Y.-J. Choi, D.-U. Jeong, Some issues in measurement of the random-incidence scattering coefficients in a reverberation room, Acta Acoust. united Ac. 94, 769−773 (2008).

7）T. Sakuma and H. Lee, Validation of the sample rotation scheme in the measurement of random -incidence scattering coefficients, Acta Acoust. united Ac. 99, 737−750 (2013).

8）土屋，李，佐久間，縮尺模型によるリブ・ブロック構造壁面の乱反射率測定，日本建築学会技術報告集19（41），175−178（2013）

9）T. Sakuma, Approximate theory of reverberation in rectangular rooms with specular and diffuse reflections, J. Acoust. Soc. Am. 132, 2325−2536 (2012).

10）T. Sakuma, H. Lee, N. Inoue, A laboratory method for measuring normal-incidence scattering coefficients of architectural surfaces, Acoust. Sci. Tech. 37, 277−285 (2016).

11）土屋，佐久間，縮縮尺模型を用いた音響乱反射率測定システムの開発－ランダム入射から垂直入射への測定システム転換－，日本建築学会技術報告集25（60），715−718（2019）