

平行壁間のフラッターエコー低減に関する基礎的研究

(その 2) 壁面の矩形リブ配列と乱反射率の関係

A BASIC STUDY ON FLUTTER ECHO REDUCTION BETWEEN PARALLEL WALLS

Part2 Effect of arrangement of rectangular ribs on scattering coefficient

土屋 裕 造^{*1}, 小 泉 穂 高^{*2}, 佐 久 間 哲 哉^{*3}

Yuzo TSUCHIYA, Hodaka KOIZUM and Tetsuya SAKUMA

We are considering the effective shape in flutter echo reduction between parallel walls. However the occurrence of flutter echo can be observed by echo time pattern and slope ratio, it isn't possible to grasp the degree of sound-scattering properties of surfaces. So we pay attention to scattering coefficient of physical index of sound-scattering properties about the value of the flutter echo reduction.

First we introduce the definition and the measurement method of scattering coefficient, and show that the experiment is enabling normal-incidence scattering coefficient calculation. Next we show the effect of arrangement of rectangular ribs on scattering coefficient compared with normal-incidence scattering coefficient and random-incidence scattering coefficient, and consider flutter echo reduction in the ribs of the measurement using them.

Keywords : Parallel walls, Flutter echo, Rectangular ribs, Normal incidence coefficient, Normal incidence coefficient, Random incidence coefficient

平行壁, フラッターエコー, 矩形リブ, 垂直入射乱反射率, 垂直入射吸音率, ランダム入射乱反射率

1. はじめに

筆者らは平行壁間のフラッターエコー低減に有効な拡散形状について検討している。その 1¹⁾では矩形リブ配列と平行壁間フラッターエコーの関係について、減衰率比²⁾による検討の有効性を示した。減衰率比はフラッターエコーの発生状況や形状による違いをエコータイムパターンよりも明瞭に観察できるが、ここでは更なるフラッターエコー評価の手段として音響拡散の一物理指標である乱反射率に着目する。まず乱反射率の定義、測定法を紹介して、乱反射率をエコータイムパターンと比較することによりフラッターエコー評価に関する有用性を検討する。次に今回測定したリブ配列のランダム入射乱反射率と垂直入射乱反射率を比較して、ランダム入射乱反射率のフラッターエコー検証利用の可否について検討する。最後にリブ配列と乱反射率との関係を、今回測定した形状におけるフラッターエコー低減について乱反射率の観点から考察する。

2. 乱反射率について

2.1 乱反射率の定義

壁面に入射する音の全エネルギーは反射の際、吸音成分、鏡面反射成分、乱反射成分に分類される。全入射エネルギーに対する吸音成分のエネルギーの割合である吸音率は、残響室法によるランダム入射吸音率の測定方法が ISO 354, JIS A 1419 で規格化さ

れ、データも豊富であり、残響時間、室内騒音減衰の計算で広く利用される。一方、壁面の音響拡散を表す一物理指標として乱反射率が提案され、ランダム入射乱反射率及びその残響室測定法が ISO 17497-1:2004 で定義、規格化された。乱反射率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、図 - 1 でイメージされる。ランダム入射乱反射率は幾何音響シミュレーションに対する導入が目的であるが、近年矩形室残響理論でも利用されている³⁾。

平行壁間フラッターエコーの低減効果を検討する際は、壁面に対して垂直に入射する音の吸収、拡散の物理データが必要になる。垂直入射吸音率は音響管による測定方法が ISO 10534, JIS A 1405 で規格化

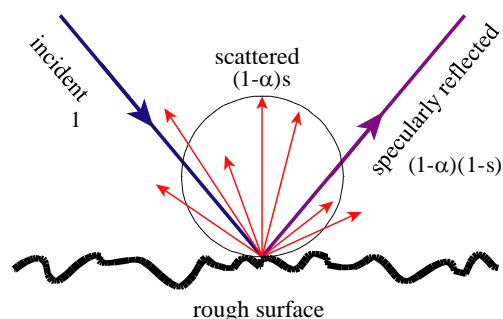


図 - 1 乱反射率のイメージ

*1 戸田建設技術開発センター

*2 戸田建設技術開発センター 修士 (工学)

*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授 博士(工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Socio-cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of

Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

されているが、公開されているデータが少ない。垂直入射乱反射率については近年測定方法が率らにより提案された⁴⁾。

2.2 ランダム入射乱反射率の測定原理

ランダム入射乱反射率 s_r は次式で表される。

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

ここで、

α_r : 試料のランダム入射吸音率

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 種類のランダム入射吸音率は残響室法吸音率測定の方法に従って次式により求められる。

$$\alpha_r = 55.3 \frac{V}{cS} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{spec}} = 55.3 \frac{V}{cS} \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3} \right) \quad (3)$$

V : 室容積, S : 室表面積, c : 音速

温湿度条件は、各測定で変化がないものとする。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 条件の残響時間測定が必要となる。

表 - 1 残響時間測定のための 4 条件

残響時間	試料	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

2.3 垂直入射乱反射率の測定原理

垂直入射乱反射率 s_n は、矩形室残響理論に示される 1 次元の音場により次式が導かれる。

$$-\ln \sqrt{1 - s_n} = 13.8 \frac{L}{c} \left(\frac{1}{T_{n2}} - \frac{1}{T_{n1}} \right) - \left(-\ln \sqrt{(1 - \alpha_{n0})(1 - \alpha_n)} - (-\ln(1 - \alpha_{n0})) \right) \quad (4)$$

これにより、試料の垂直入射乱反射率は次式で表される。

$$s_n = 1 - \frac{1 - \alpha_{n0}}{1 - \alpha_n} \exp \left(\frac{27.6L}{c} \left(\frac{1}{T_{n2}} - \frac{1}{T_{n1}} \right) \right) \quad (5)$$

ここで

α_{n0} : 試料なし（平板）の垂直入射吸音率

α_n : 試料の垂直入射吸音率

s_n : 試料の垂直入射乱反射率

T_{n1} : 試料なし（平板）の平行壁間残響時間

T_{n2} : 壁面片面に試料がある場合の平行壁間残響時間

L : 平行壁間距離, c : 音速

ただし試料なし、試料ありの吸音率は共に剛な材料で構成する場合 $\alpha_{n0} \approx \alpha_n \approx 0$ と考え、 s_n は

$$s_n \approx 1 - \exp \left(\frac{27.6L}{c} \left(\frac{1}{T_{n2}} - \frac{1}{T_{n1}} \right) \right) \quad (6)$$

と計算できる。なお試料が吸音材で平板の場合、 $\alpha_{n0} \approx 0$, $s_n \approx 0$ とすると、垂直入射吸音率 α_n は(4)式により(6)式と同じ式で算出される。

3. 実験概要及び設定条件

今回ランダム入射、垂直入射乱反射率を求めた矩形リブ配列、及び垂直入射吸音率を求めたグラスウール（以下 GW）の概要を表 - 2 に示す。

ランダム入射乱反射率 s_r の測定は 1/4 縮尺模型を用いて行った。試験体は表 - 2 の矩形リブ配列を 1/4 寸法、アクリル材で製作した。測定で使用する模型残響室概要を図 - 2、測定システムを図 - 3 に示す。模型残響室は曲面状のプラスチック製拡散板吊り下げにより室内の拡散性を高めた。アクリル製円盤 750 φ 20 mm 厚をターンテーブルに取り付けて基準平板とし、高さ 50 mm 厚 0.5 mm のプラスチック枠を設けて試料

表 - 2 矩形リブ配列及びグラスウール概要 単位:mm

記号	幅・高さ・周期	断面概略図
R1	90W15H-180p	
R2	90W30H-180p	
R3	90W45H-180p	
R4	90W15H-360p	
R5	45W30H/45W15H-180p	
R6	90W30H-180p -90W15H-180p	
R7	45W15H-90p	
R8	45W30H-90p	
R9	45W45H-90p	
R10	45W45H-90p -45W15H90p	
R11	45W45H/45W30H/45W15H-180p	
GW32k50t		

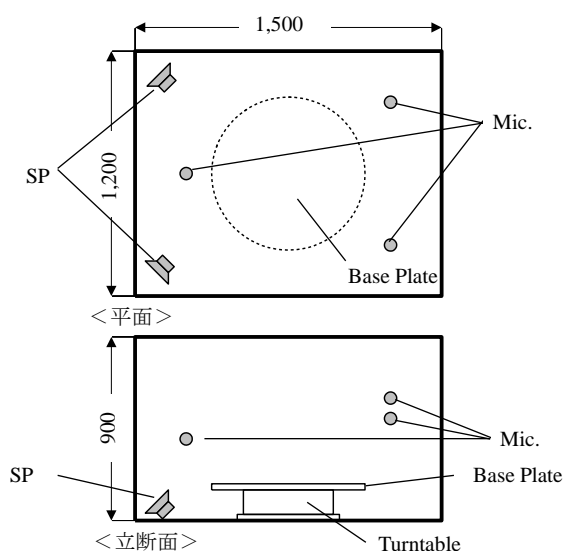


図 - 2 模型残響室

側面に対する入射音による音響拡散を抑制した。測定経路は図 - 2 に示す sp2, mic.3 の 6 経路とし、インパルス応答測定を通して残響時間を同定した。ここでターンテーブル 1 回転 75 秒、インパルス応答長 0.681 秒により 1 回転分 110 回のインパルス応答同期加算を行った。縮尺模型では高音域における空気吸収の影響が大きい、今回の実験の範囲では影響が小さいことを確認している。残響時間同定区間は T_{15} (-5~-20 dB)、周波数は 1/3 oct. band 400~20k Hz とし、結果の周波数は実物換算 100~5k Hz で示す。以上の設定値は ISO 17497-1:2004 に準拠している。

垂直入射乱反射率 s_n の測定は前報¹⁾に示す方法で行った。すなわち、幅 3.6 m、高さ 3 m の壁面が長さ $L=10$ m の距離で向かい合う周囲が開放された平行壁を無響室に製作し、片方の壁面に試料を設置して壁面中央軸上に設置したスピーカとマイク間におけるインパルス応答を測定した。壁面端部の回折の影響を減少するためエッジ部分を GW50t で覆った。以上により壁に入射した音エネルギーのうち、垂直入射の鏡面反射成分は平行壁間に残留し、拡散反射成分は平行壁四周の開放面に散逸される状況を作っており、李らの模型矩形室の四周を高度に吸音した測定⁴⁾に対応している。分析は、 s_n の同定は残響時間を残響減衰曲線の折れ曲がり以後で SN 比を確保できる T_{30} (-20~-50 dB)、周波数は 1/3 oct. band 100~5k Hz とした。なお矩形リブ配列の垂直入射吸音率 α_n は 0 とした。GW はこの測定・分析により α_n が算出される。

4. 乱反射率測定結果及び考察

4.1 エコータイムパターンとの比較

平行壁間のインパルス応答から分析した 1/1 オクターブバンド周波数におけるエコータイムパターンを、平行壁両面共に剛な平板の場合と片面矩形リブ配列 R5 の場合を並列して図 - 4 に示す。平板の 500 Hz 以上の周波数をみると、周期的にピークが発生して時間経過とともに減少していく様子がみられ、フ

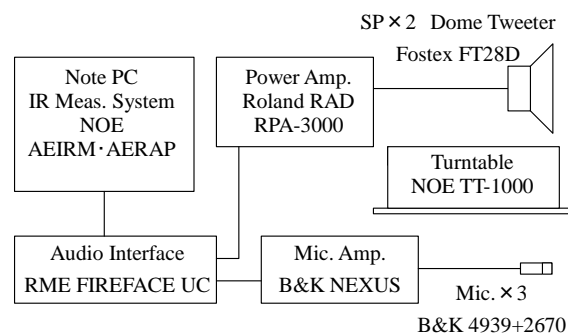


図 - 3 測定ブロックダイアグラム

ラッターエコーの発生を視覚的に確認できる。平板と R5 を比較すると、125~1k Hz は殆ど違いがみられない一方で、2k, 4k Hz は R5 の周期的ピークが大きく減少している。これは平板の場合平行壁間における音の往復反射により音が残るのに対し、R5 の場合 2k, 4k Hz においてその形状により音が拡散し、拡散した音のエネルギーが壁面周囲の開放面に散逸されて平板よりも平行壁間のエネルギーが減衰するためと考えられる。一方で図 - 5 の中から R5 の s_n をみると、100~1k Hz が殆ど 0 であり、2k Hz で値が急激に上昇し、4k Hz にかけて約 0.8 と大きな値を示しており、平板と R5 のエコータイムパターンの一致と乖離をエネルギーの割合として表している。以上より乱反射率は、時間的情報が失われるものの、エコータイムパターンや減衰率比では困難な形状や周波数による音響拡散を定量的に表すことが可能で、フラッターエコー発生の有無を判断する上で有効と考えられる。

4.2 垂直入射乱反射率とランダム入射乱反射率の比較

ランダム入射乱反射率は ISO で定義、測定方法が規格されているため、ランダム入射乱反射率によるフラッターエコー評価の可能性を検討する。図 - 5 より同一配列の s_n, s_r を比較すると、 s_r のほうが隣り合う周波数帯域の変化がなだらかであるが、周波数における値のピークや落ち込みは概ね対応している。リブ高さ 15 mm の R1, R4, R7 は、今回の幅、周期の範囲では散乱性状の入射角依存性が小さく s_n, s_r 両者が近似する。また同一配列内で高さを変化させた R5, R6, R10, R11 も s_n, s_r が比較的近似する傾向にある。一方で、高さが一定で周期に対して高いリブ配列の R3, R8, R9 は s_n, s_r の値が乖離し、垂直入射による拡散が小さくなっている。形状によっては s_r によるフラッターエコーの評価は難しいと考えられる。

4.3 リブ形状と乱反射率の関係

図 - 5 の中から同一周期内でリブの幅と高さが一定の R1~R3, R7~R9 をみると、 s_n, s_r いずれも高さが高くなるにつれてより低音域の値が大きくなる、また、高さが 1/2 波長となる周波数でリブ表面と底面の反射が同位相になることによる乱反射率の落ち込みが発生するといった傾向がみられる。R7 の s_n は 4k

Hz 付近で最大となり、周期が波長と同等かつ高さが周期の 15% で s_n が最大となる既往文献⁹⁾の知見と一致する。同一配列内で高さを変化させた R5, R6, R10, R11 における s_n の周波数特性をみると、R5, R6 共 1k Hz 以下は 0 に近似する、また R10 は R7 とほぼ同等の 4k Hz 付近のみ値が大きいのに対し、R11 は他より

も広帯域で値が大きい。 s_n の値を広帯域で大きくするためには高さの異なるリップの組合せが有効と考えられるが、今回のリップ配列ではいずれも s_n が 500 Hz で 0 近辺、1k Hz で 0.3 以下であり、更なる広帯域化は今回より高い形状が必要と考えられる。なお、比較参考として図 - 6 に GW の a_n を示す。500 Hz で

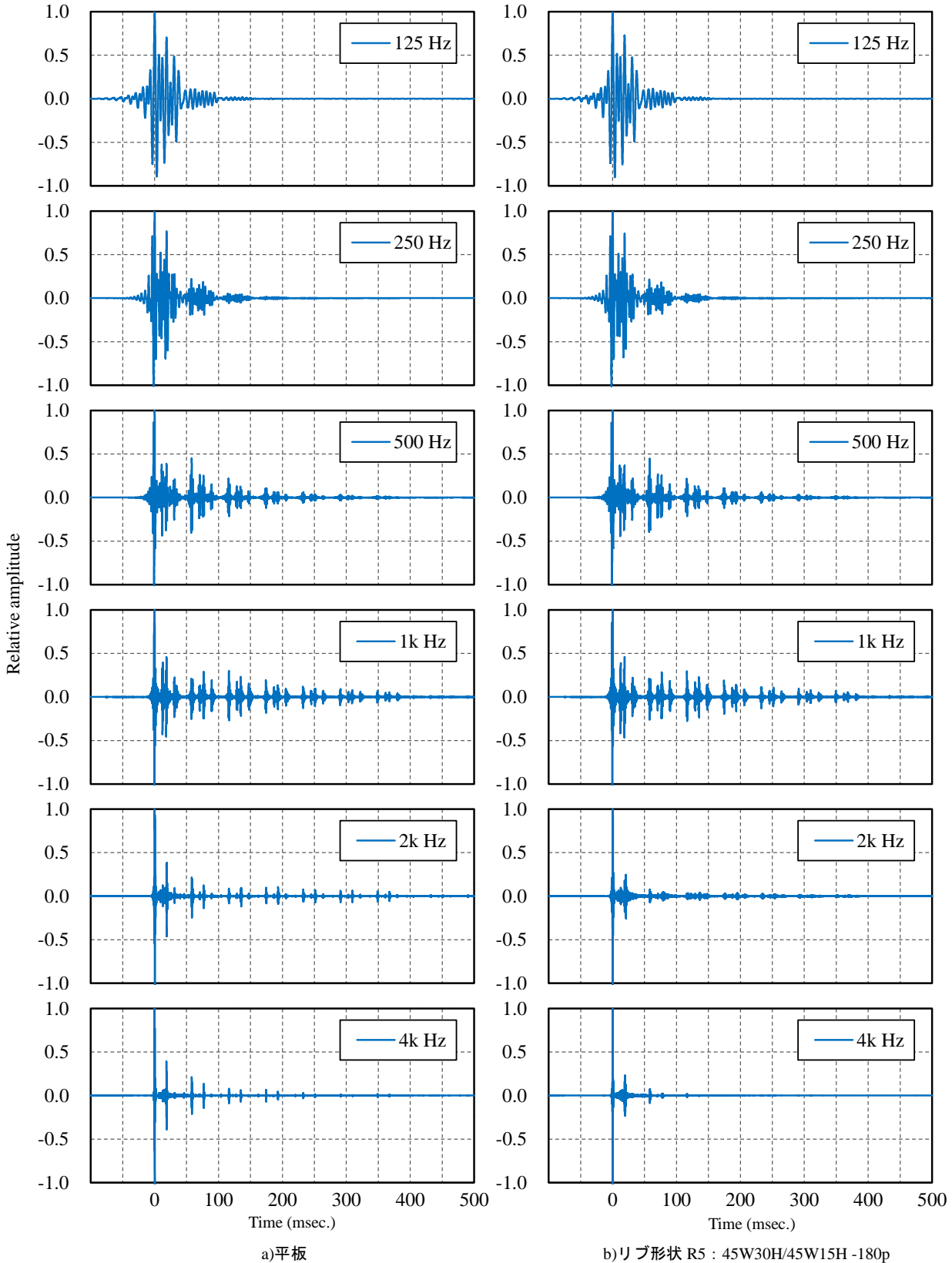


図 - 4 平行壁間のエコータイムパターン

0.6 と、今回測定したリブ形状にはない大きな値を示した。筆者らの聴感上の評価であるが、今回測定のリブ形状はいずれもフラッターエコーが検知され GW は検知されないことから、500 Hz 付近の周波数以上の s_n がある程度の値であれば平行壁間でフラッターエコーが検知されないと予想されるが、詳細には聴感実験が必要と考えられる。

5. まとめ

今回の実験により、次の知見を得た。

- 1) 今回の実験で垂直入射乱反射率を算出し、リブ形状の拡散の程度を定量的に確認できた。
- 2) 垂直入射乱反射率とランダム入射乱反射率は、その大きさ、周波数におけるピークや落ち込みが概ね対応するが、値が乖離する形状もあり、

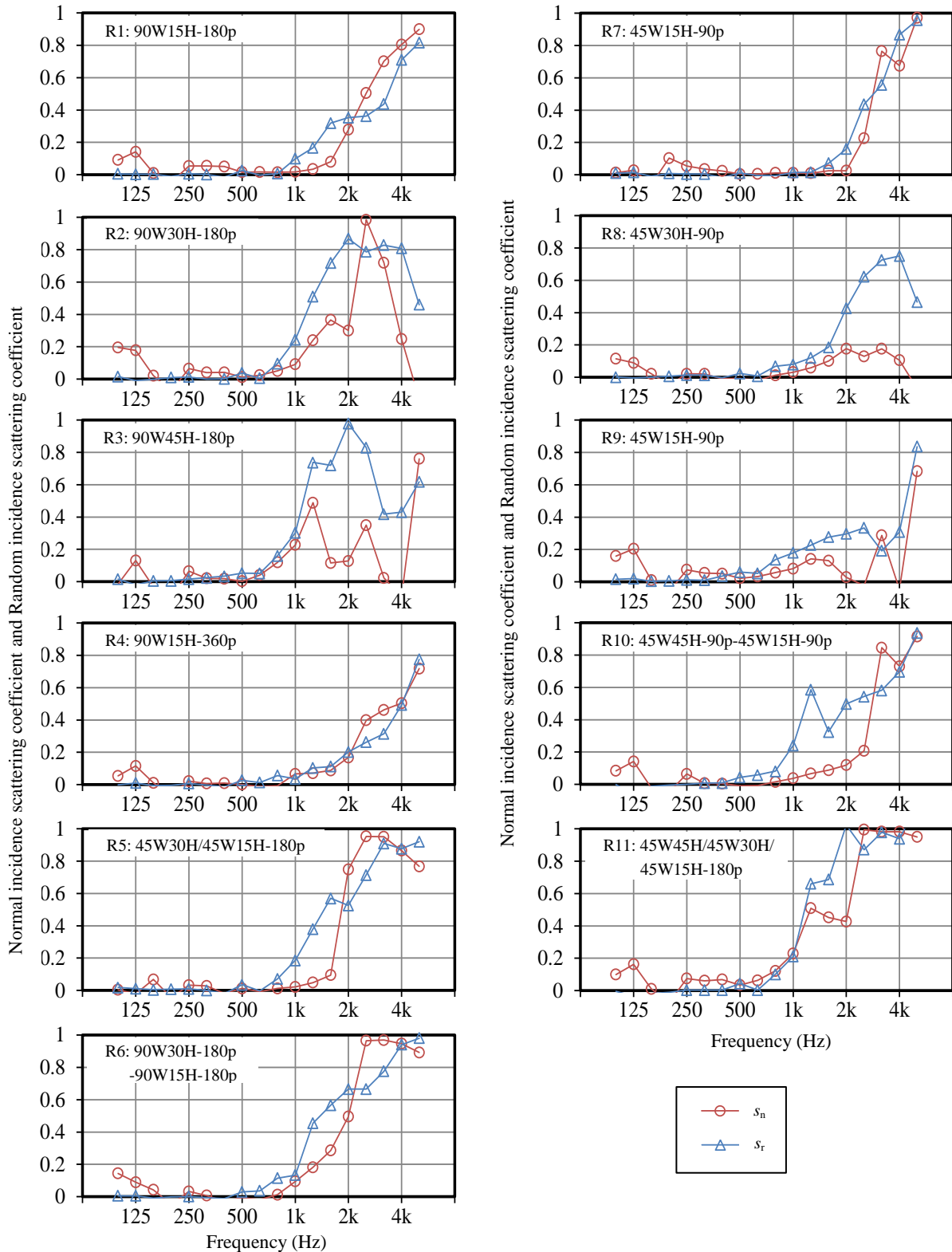


図 - 5 各矩形リブ配列における垂直入射乱反射率とランダム入射乱反射率

ランダム入射乱反射率におけるフラッターエコー評価は難しい。

- 3) リブ配列における乱反射率を広帯域で大きくするためには、高さの異なるリブの組合せが有効である。

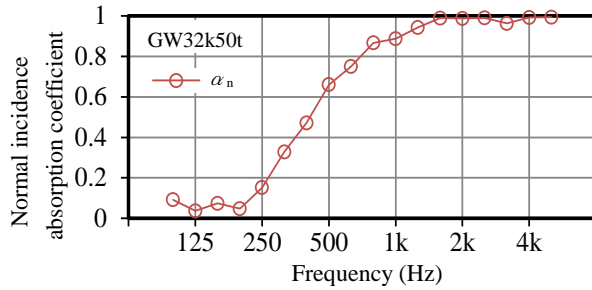


図 - 6 GWの垂直入射吸音率

参考文献

- 1) 小泉他, 平行壁間のフラッターエコー低減に関する基礎的研究その1, 戸田建設技術研究報告第41号, 2015.10.
- 2) 江田他, 室内インパルス応答の反射音構造分析による音場の拡散性評価, ASJ-AA2015-08 資料
- 3) T.Sakuma, Approximate theory of reverberation in rectangular rooms with specular and diffuse reflections, J. Acoust. Soc. Am. 132(4), Oct. 2012
- 4) 李他, 垂直入射乱反射率の実験室測定法に関する基礎的検討, ASJ 日本音響学会春季研究発表会, 2011.3.
- 5) H. Lee, et al, Numerical characterization of acoustic scattering coefficients of one-dimensional periodic surfaces, Appl. Acoust. 88, 129-136, 2014.8.