

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 壁面の矩形リブ配列と減衰率比の関係

A BASIC STUDY ON FLUTTER ECHO REDUCTION BETWEEN PARALLEL WALLS

Part 1 Effect of arrangement of rectangular ribs on slope ratio

小泉穂高*¹, 土屋裕造*², 佐久間哲哉*³

Hodaka KOIZUMI, Yuzo TSUCHIYA and Tetsuya SAKUMA

Flutter echo arises because of round trip of sound between parallel walls. Flutter echo is known as sound troubles because it disturbs listening to speech or brings peculiar tone in sound. Absorption materials are often placed as measures, but it losses reverberation or seems to unfavorable design, so alternative measures are necessary. Therefore, this paper discusses scattering effect of ribs to reduce flutter echo. Setting rectangular ribs on parallel walls and measuring impulse response, effect of arrangement of rectangular ribs was investigated. In recent years, slope ratio which shows reflectogram of impulse response without decay has been proposed as method of analysis of sound field. This paper tries to study structure of reflections in detail by using slope ratio.

Keywords : Flutter echo, Slope ratio, Rectangular rib, Echo time pattern
フラッターエコー, 減衰率比, 矩形リブ, エコータイムパターン

1. はじめに

平行な壁面の間では、音の往復反射によってフラッターエコーが発生することがある。フラッターエコーは音声聴取の妨げとなり、響きの中に異質な音色を生じさせるため音響障害として知られている。フラッターエコーを防ぐためには、平行壁のような往復反射経路を作らないことが理想であるが、そのような大掛かりな方法は、建築の設計段階からの検討が必要である。より一般的な対策方法としては、往復反射経路上への吸音材設置がしばしば検討される。しかし、吸音部位が増加すると室内の響きも失われるため、音楽を用途に含む室等では安易に選択することはできない。また代表的な吸音対策であるグラスウールや有孔ボードの設置は、意匠的観点から嫌われることもあり、他の選択肢が必要となる。

吸音材を用いないフラッターエコー対策としては、壁面に凹凸を設け反射音を拡散させる方法がある。凹凸の拡散性に関する研究は、数値解析手法を中心に盛んに行われているが¹⁾、それらを実際にフラッターエコー対策として適用し、系統立てて実測検証した例は見られない。そこで本報では、実際の平行壁に基本的な凹凸形状である矩形リブを施工し、フラッターエコーとの関係を検討する。また近年、インパルス応答の減衰を除去して反射音構造を表した減衰率比²⁾による音場分析方法が提案されている。本報では減衰率比を用いることで、より詳細な反射音構造の分析を試みる。

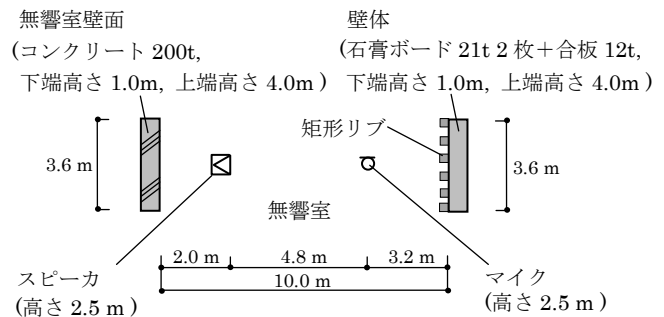


図 - 1 実験施設の概要 (平面図)

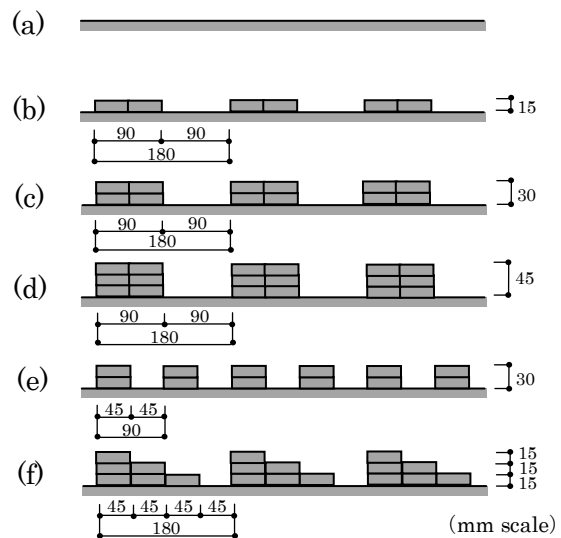


図 - 2 矩形リブの配列

*1 戸田建設(株)技術開発センター 修士(工学)

*2 戸田建設(株)技術開発センター

*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授 博士(工学)

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

Research and Development Center, TODA CORPORATION

Assoc. Prof., Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

2. 実験1 矩形リブの配列による影響

矩形リブの拡散性能はその配列により異なることが種々の研究から明らかにされている³⁾。実験1では、壁面に施工した矩形リブの配列と、測定されるフラッターエコーの関係について検討する。

2.1 実験方法

実験施設の概要を図-1に示す。実験は無響室内で行った。無響室壁面の一部を平滑なコンクリート打ち出し仕上げ面とし、対向する位置に石膏ボード及び合板からなる壁体を施工することで、平行壁を構成した。壁体の表面形状は図-2に示す6通りであり、(b)～(f)では木製の矩形リブを壁体全面に設置した。なお壁体の四周端部には、回折波の影響を低減するためグラスウールを設置した。スピーカ及びマイクを図-1に示す位置に設置し、平行壁間のインパルス応答を測定した。

2.2 実験結果

(1) エコータイムパターンによる検討

測定したインパルス応答から算出した 2k, 4k Hz (1/10oct.) におけるエコータイムパターンを図-3に示す。図中破線は、平行壁間の往復経路長から算出した、反射音が到来する遅れ時間を示している。なお、遅れ時間 0 ms における直接音の音圧を 1.0 としてエコータイムパターンを算出した上で、縦軸スケールを拡大して表示している。

壁面を平滑とした(a)を見ると、2k, 4k Hz ともに、破線位置の遅れ時間において顕著な反射音が到来しており、フラッターエコーの発生が確認できる。壁面に矩形リブを設置した(b)～(f)と(a)の結果を比較すると、2k, 4k Hz ともに、いずれも反射音の減衰が早くなっており、フラッターエコーが低減されていると言える。2k Hz においては(c)や(f)、4k Hz においては(b)や(f)のリブ配列で特に減衰が早くなり、周波数

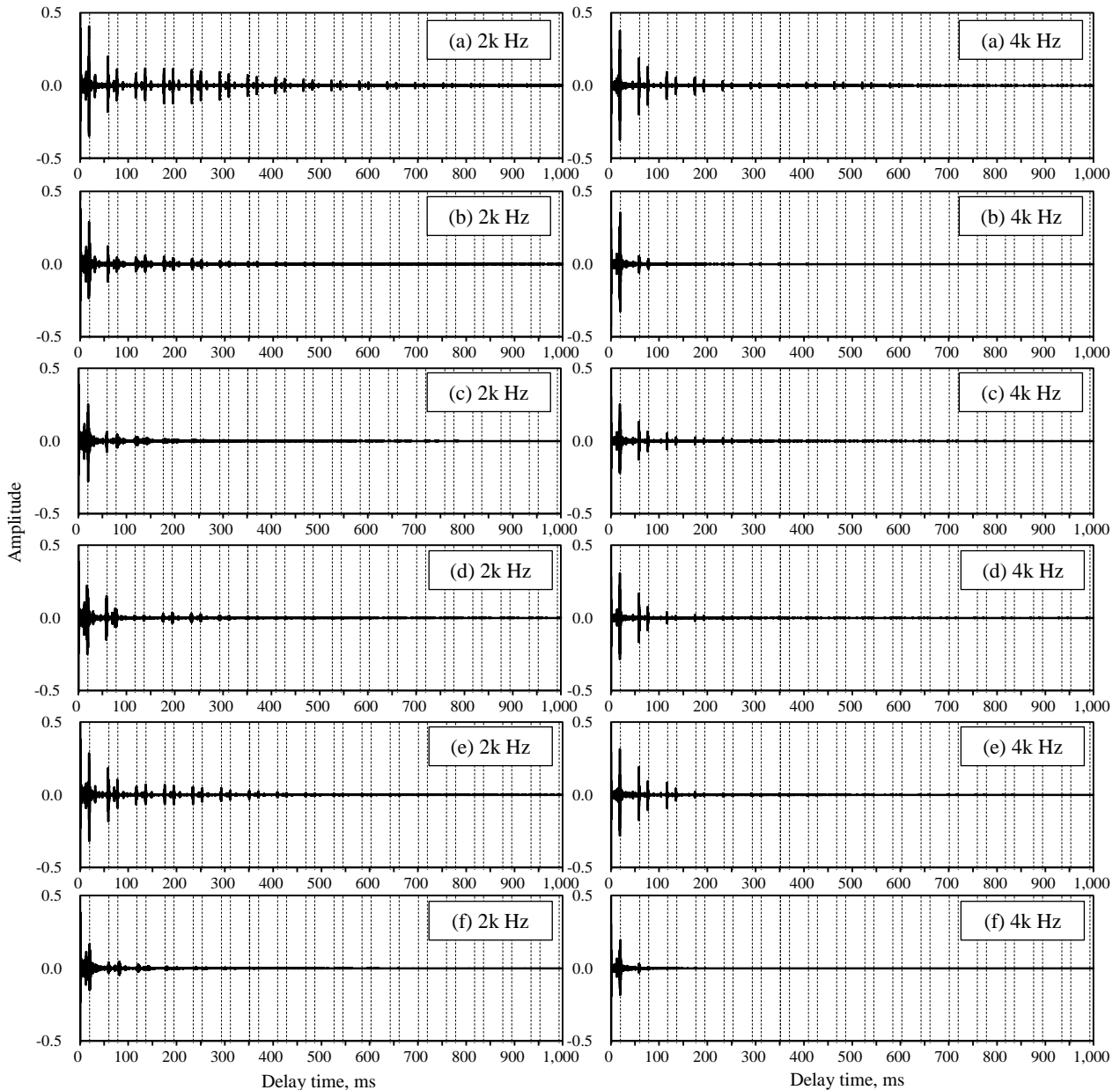


図-3 矩形リブの配列とエコータイムパターンの関係

によってリブの散乱効果が異なることが確認された。なお 1k Hz 以下の周波数帯域においては、本実験条件の範囲では結果にほとんど差が見られなかった。

エコータイムパターンは、到来する反射音を測定されたそのままの音圧で時系列に沿って表しているため、直感的に理解しやすい分析方法であると言える。しかし一般には、本実験結果のように反射音の音圧は指数関数的に減衰していくため⁴⁾、ごく初期の反射音以外、音圧の大小や到来時間のずれといった要素を観察しにくく、その評価が見る者の主観によるという問題がある。例えば、間隔が同じで高さが異なる(b)~(d)の配列の結果を比較すると、どの配列がより反射音を散乱しフラッターエコー対策として有効であるのか、一見したところでは判別困難である。このような問題を解決する方法として、各音場のエコータイムパターンから、各々の減衰を除去した上で相互比較が出来れば良いと考えられる。これにより音場ごとの後期反射音の特徴がより明確となる。近年では、インパルス応答の減衰を除去して反

射音構造を表した減衰率比²⁾による音場評価方法が提案されている。次に、減衰率比を用いて本実験結果を分析した場合について述べる。

(2) 減衰率比による検討

Jeong et al.²⁾ は、残響減衰曲線の平均減衰率 \bar{D} に対する瞬時減衰率 $D(t)$ の比を減衰率比 $d(t)$ と定義した。

$$d(t) = D(t) / \bar{D} \tag{1}$$

ここで瞬時減衰率 $D(t)$ は、エネルギーインパルス応答を $E(t)$ 、 $E_S(t) = \int_0^t E(\tau) d\tau$ としたとき、次の式(2)より算出することができ、減衰率比は Hanyu⁵⁾ の提案する二乗減衰除去インパルス応答と数学的に等価である⁶⁾。すなわち、減衰率比は減衰を除去したインパルス応答として見ることができる。

$$D(t) = - \frac{10}{\ln 10} \frac{E(t)}{E_S(t)} \tag{2}$$

また式(3)より、 \bar{D} は残響時間に対応する 60 dB 減衰時間 T として表すことができる。

$$T = - 60 / \bar{D} \tag{3}$$

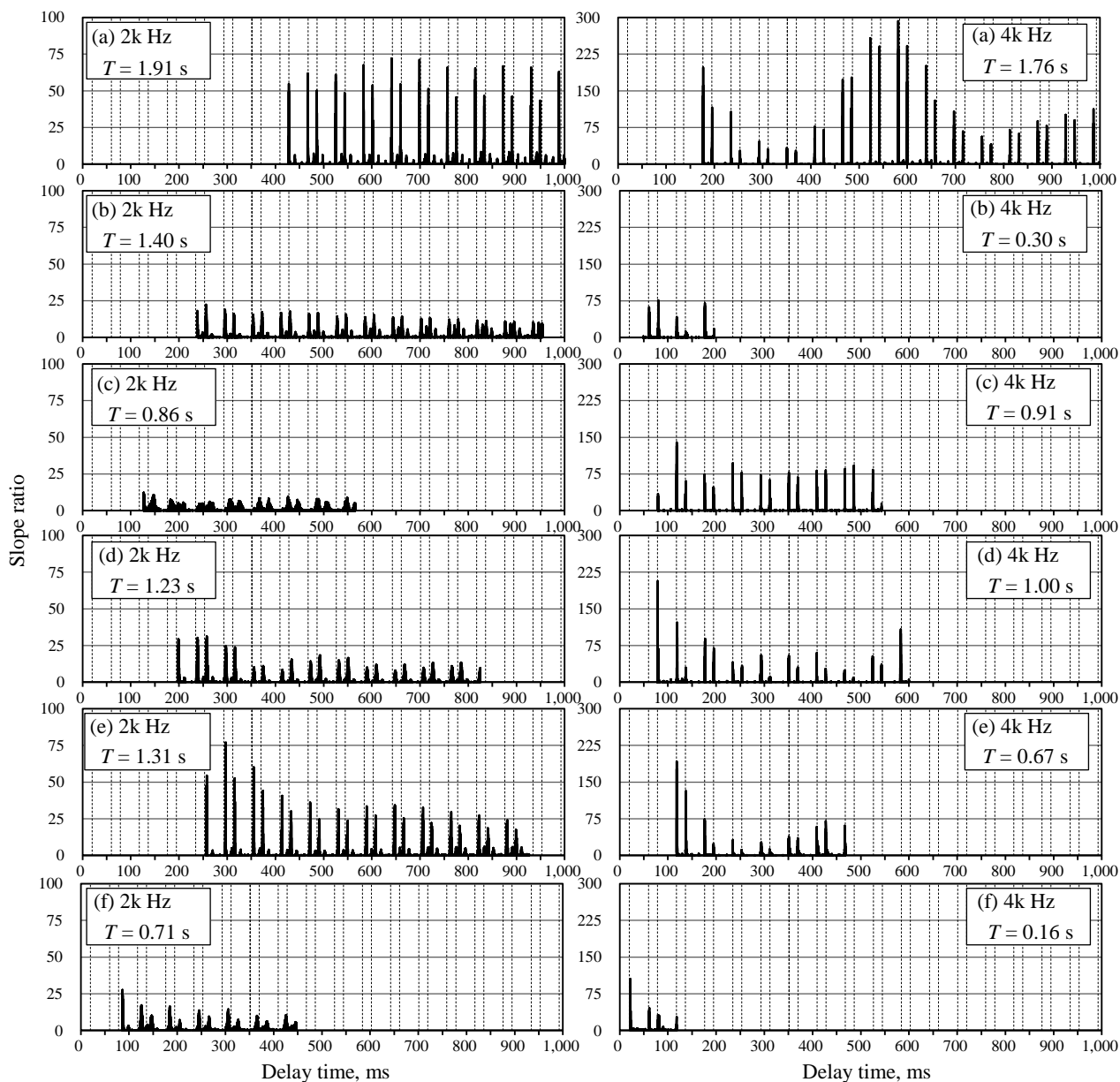


図 - 4 矩形リブの配列と減衰率比の関係

測定したインパルス応答のエコータイムパターンから、式(1)~(3)に従って算出した 2k, 4k Hz (1/10oct.) の減衰率比および 60 dB 減衰時間 T を図 - 4 に示す。なお $E_S(t)$ は積分区間終端の打ち切りの影響により終端付近で急激に減衰し $d(t)$ が発散する。また始端付近では直接音の影響を受け勾配が安定しない。これらの影響を避けるため、残響減衰曲線の -20 から -50 dB に相当する時間範囲を評価区間として \bar{D} を算出し、図 - 4 ではこの時間範囲分のみ減衰率比を抽出して示している。すなわち T が短く、減衰率比を表示している時間長が短いものほど、反射音が早く減衰することを意味する。

(a)を見ると、2k, 4k Hz とともにエコータイムパターンで見た場合と同様に、往復経路長から算出される破線位置の遅れ時間において、顕著な反射音が到来しておりフラッターエコーの発生が確認できる。リブを設置した場合について着目すると、2k Hz では(c)や(f)、4k Hz では(b)や(f)の配列で T が短く、反射音がより散乱されて減衰が早くなっていることが分かる。減衰率比のピークも小さくなっており、フラッターエコーの低減が確認できる。この結果はエコータイムパターンで見た場合と同様である。また、エコータイムパターンでは比較困難であった(b)~(d)の結果を見ると、2k Hz では(c)、4k Hz では(b)の配列で減衰が早く、周波数に応じて散乱に適したリブの高さがあることが分かる。2k Hz における(c)と(e)を比較すると(c)の減衰が早く、リブの高さだけでなく間隔も影響することが分かる。これらの傾向は従来の知見³⁾とも一致する。(f)は2k, 4k Hz とともに最も減衰が早く、本実験条件の範囲では、フラッターエコー対策に最も有効な形状であると言える。

減衰の早さによる観点の他に、その応答形状に着目することで、減衰率比ではさらに多くのことが明らかとなる。反射音が平行壁間を往復する際、距離減衰や反射による一定量のエネルギー損失が規則的に繰り返され減衰が生じていると仮定した場合、その減衰を除去した減衰率比は一定のピークを示すと考えられる。(a) 4k Hz などは遅れ時間によって減衰率比のピークのばらつきが大きいため、散乱されながら往復する反射音成分の受音点への到達頻度、時間によって大きく異なると推測される。

また2k Hzにおける各配列の結果を比較すると、(a)や(e)では鋭い形状のピークを有しているが、他の配列ではなだらかな山型形状へと変化しており、ピークの位置が破線の遅れ時間からずれた位置に生じる傾向も見られる。このことから、リブの拡散性能が向上するにつれ、散乱された反射音成分は、各々が僅かな時間ずれを生じながら到来するようになると言える。一方4k Hzではこの傾向は見られず、リブで散乱された反射音は、受音点に到達しない位置へ広く拡散されていると推測される。

以上のように、減衰率比を用いることで、エコータイムパターンでは観測しにくい多くの現象をより客観的に評価することが可能である。

3. 実験2 矩形リブの設置範囲による影響

実験1では、壁体の全面に矩形リブを設置したが、実際には受音点に到達する往復反射経路上に設置することが重要であると予測され、それ以上の広い範囲への設置は必要ない可能性がある。ただし音波の伝搬は波動的な現象であり、音線経路上だけへの設置では不十分であることも考えられる。そこで実験2では、実験1で用いた矩形リブの設置範囲を変化させ、フラッターエコー対策として必要な矩形リブの設置範囲について検討する。

3.1 実験方法

実験施設は実験1と同様であるが、壁体表面の形状は図-5に示す通りである。実験1で2k, 4k Hz とともに拡散性の高かった図-2(f)の配列を用いて、壁体中心位置を基準とした設置範囲を6段階に設定した。

3.2 実験結果

実験1で配列(a), (f)として示したリブ未設置および全面設置時の場合と併せて、リブ設置範囲ごとの減衰時間 T を図-6に、得られた減衰率比を図-7に示す。1 unit では音源、受音点を結ぶ往復反射経路上にリブを設置しているが、図-6を見ると2k, 4k Hz とともに0~1 unit 間での T の減少は僅かであり、図-7

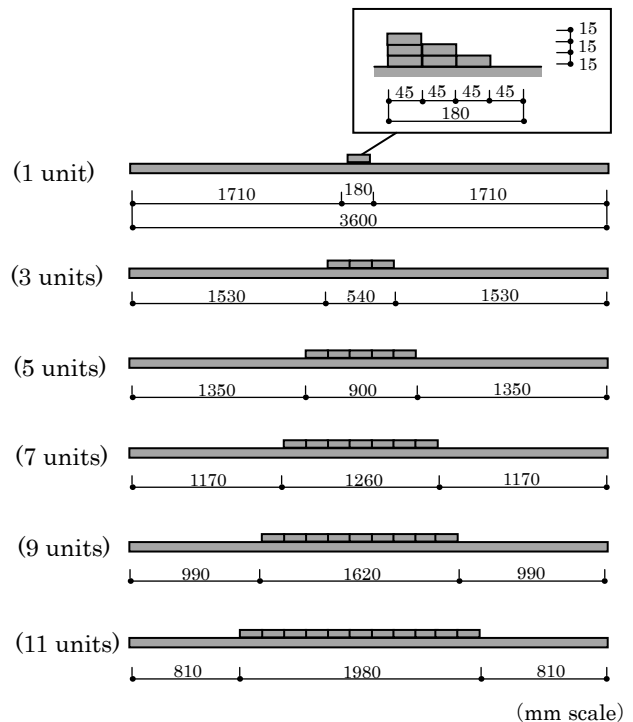


図 - 5 矩形リブの設置範囲

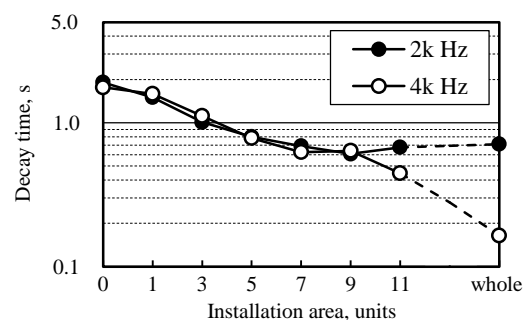


図 - 6 矩形リブの設置範囲と減衰時間の関係

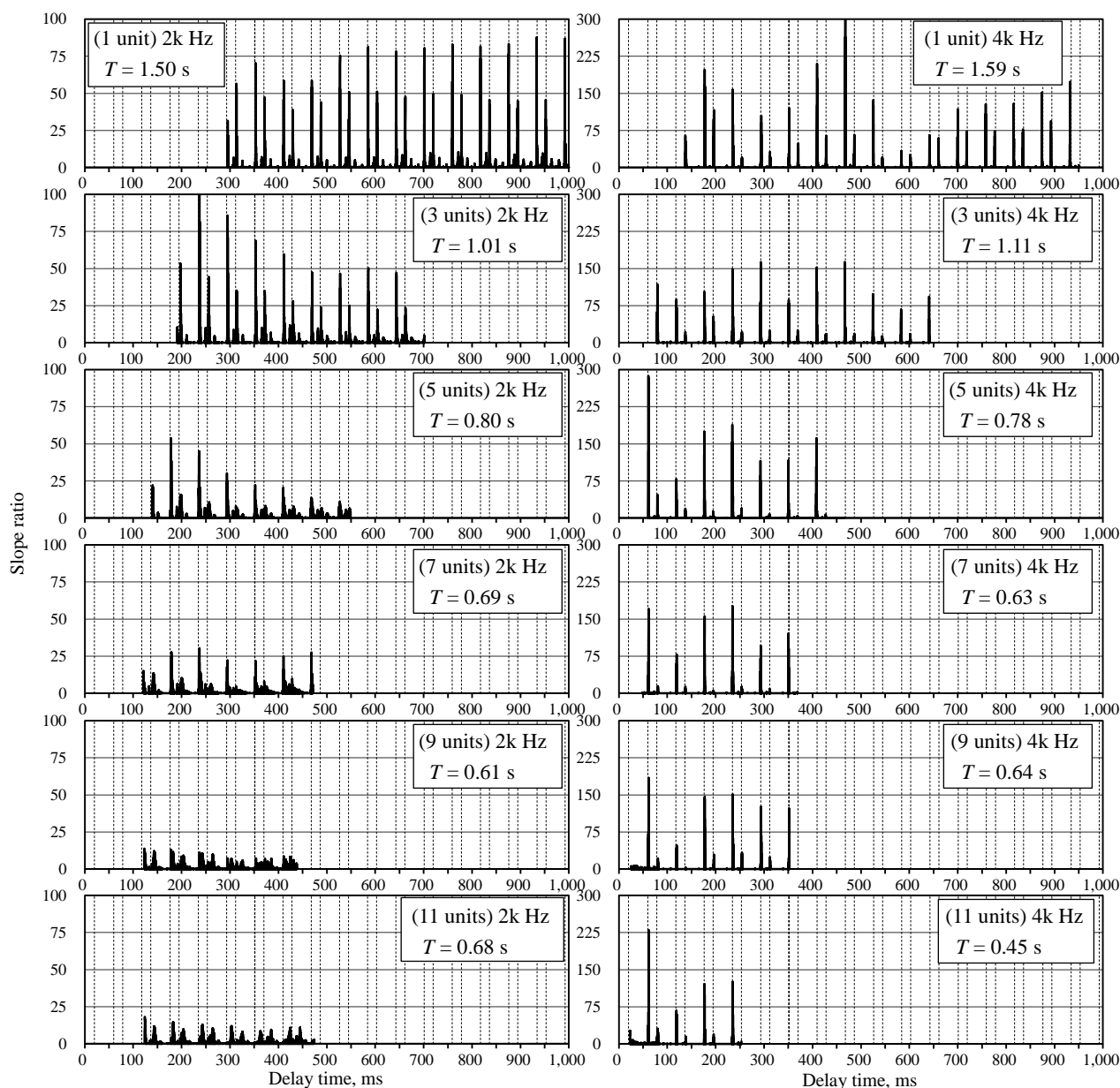


図 - 7 矩形リブの設置範囲と減衰率比の関係

の減衰率比の形状からもフラッターエコーが低減されている様子はほとんど見られない。3, 5, 7 units と順にリブ設置範囲を広げていくことで徐々に減衰が早くなり、フラッターエコーが低減される傾向にある。図 - 6 を見ると、2k Hz における T は 5~7 units 程度で全面設置の場合と同程度となるため、これに相当する 1000 mm 程度の範囲にリブが設置されていれば良いと言える。4k Hz では 11 units 以降も T が減少するが、図 - 7 を見ると 1~5 units の間で減衰率比が大きく低減されており、それに比べると 5~11 units 間では類似した応答形状となっている。従って 4k Hz においても、およそ 5 units に相当する 1000 mm 程度の範囲へのリブ設置が重要であると考えられる。

4. まとめ

平行壁間で生じるフラッターエコーと壁面の矩形リブ配列の関係について、インパルス応答の減衰を除去した反射音構造を表す減衰率比を用いて検討し、以下のことを明らかにした。

- 1) 減衰率比を用いることで、エコータイムパターンでは観察しにくい初期以外の反射音の音圧、時間構造のずれを詳細に見ることができ、より客観的の評価が可能となる。
- 2) 散乱に適した矩形リブの高さや間隔が周波数に応じて存在するが、リブを階段状に配列することで、複数の周波数帯域で拡散性を高めることが可能である。
- 3) 2k, 4k Hz においては、往復反射経路上の 1000 mm 程度の壁面範囲へのリブ設置が重要である。

参考文献

- 1) 尾本, 日本音響学会誌 65, 563-568, 2009
- 2) Jeong, et al., J.A.S.A., 132, 1427-1435, 2012
- 3) 土屋他, 日本建築学会技術報告集 19, 41, 175-178, 2013
- 4) 前川他, “建築・環境音響学,” 共立出版, 2000
- 5) Hanyu, Build Acoust., 21, 125-134, 2014
- 6) 江田他, 建築音響研究会資料 AA2015-08, 2015