

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06331

研究課題名(和文) コンサートホール音場における後期反射音の時間・空間分布密度と響きの質感

研究課題名(英文) The relation between the perception of Texture of Reverberation and the temporal/spatial distribution of late arriving sound in concert auditoria

研究代表者

古屋 浩 (Furuya, Hiroshi)

芝浦工業大学・建築学部・教授

研究者番号：00238700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：コンサートホールの残響音がもたらす心理効果として、‘響きの長さ感’(時間的側面)および‘音に包まれた感じ’(空間的側面)の存在が知られており音響設計の評価指標として用いられているが、音場の拡散条件にかかわる響きの質的側面からの心理評価については未解明である。本研究では、響きの質的側面として新たに“響きの質感”(Texture of reverberation, TRV)を定義し一連の音響心理実験によりこれを立証した。そして後期反射音群の時系列上の一様性並びに時間密度という2つの観点から、TRVがホール音場を設計評価するための一要素感覚として有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Regarding the auditory sensations caused by late arriving sound in concert halls, two major factors, namely Subjective Reverberation Length for a temporal attribute and Listener Envelopment for a spatial one, are already confirmed and used as the subjective indicators for evaluating sound field in acoustic design. However, the method of subjective evaluation from a viewpoint of qualitative attribute of reverberance, which relates to the sound diffuseness, remains to be clarified for many years. In this study, a new sensation for qualitative attributes, Texture of Reverberation TRV, was demonstrated in a series of subjective experiments using a multi-dimensional analysis. The results show that the degree of uniformity and density in the temporal distribution of late reflections significantly affects the perception of TRV, and that TRV is useful for subjective evaluation of reverberance in concert halls.

研究分野：建築音響

キーワード：コンサートホール 音響設計 響きの質 要素感覚 後期反射音密度 音響心理評価

1. 研究開始当初の背景

これまで、コンサートホール音場の評価に関わる研究では、音量感や残響感、広がり感といった心理量およびそれらに対応する物理指標等について、ある程度明らかになってきている。このうち、ホール音場の残響音(後期に到来してくる反射音群)がもたらす聴覚的效果には、時間的性質を表す‘残響感’(響きの長さ感:Reverberance, REV)と空間的性質を表す‘音に包まれた感じ’(Listener envelopment, LEV)の存在が明らかになっており、それらは実際の音響設計にも使用されている。

しかしながら、長年ホールの音の良否を決定する最大の要因の一つであるといわれ続けている音場の拡散問題に関しては、いまだなお課題として残されたままである。すなわち、実際の演奏空間における聴感印象として、たとえば‘このホールは拡散がよい’とか‘悪い’とかといった評価やコメントを聞くことが多いが、その聴覚的な定義や根拠について確定的なものは何ら明らかにされていない。

このように、響きの心理評価にかかわる要素感覚のうち、その時間的側面と空間的側面からの研究は近年進展を見せてきているものの、第3番目の質的側面からの議論や研究は皆無といってよい。音響設計の目標に掲げられているいわゆる‘樅の木状’のインパルス応答波形が何故美しいのか、その聴覚的な根拠と必要性並びにそれを規定する客観的物理指標に関する系統的な心理研究が急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、‘響きの長さ感’REVと‘音に包まれた感じ’LEVという要素感覚に加えて、後期反射音による聴覚的效果を特徴づけるもう一つの切り口として、“響きの質感”(Texture of Reverberation, TRV)を定義し、これがホール音場で知覚される音像の質的側面を表す要素感覚として有効であるかどうかについて明らかにすることである。

3. 研究の方法

研究の第1段階として、後期反射音特性の変化がもたらす響きの質的差異と定義された響きの質感TRVが、響きにかかわる既知の心理量であるREVおよびLEVと区別して知覚されるかを音響心理実験(実験室内の合成模擬音場を用いた被験者実験:以下同様)により検討した(心理実験I, II)。

次に研究の第2段階として、心理量TRVに対応する音響物理量、すなわちホール空間の音場設計に用いるために必要となる、TRVを客観的に制御可能な物理指標について、音響心理実験により検討した(心理実験III, IV, V)。

(1) 音響心理実験の概要

音場を提示するスピーカーシステムは、簡易無響室内において被験者から1.5mの等距

離上に、直接音用および初期反射音用スピーカー、可変残響音用スピーカー、固定残響音用スピーカーにより構成した(実験I, II: Fig. 1, 実験III, IV, V: Fig. 2)。被験者は、正常な聴力を有する20才代の男女であり、人数は実験ごとに異なる(5名~17名, 実施回数4~8回/人)。音源信号は、“フィガロの結婚”(Mozart作曲)より抜粋した約10秒間のドライソースである。刺激の受聴レベルは、 $68.0 \pm 0.5 \text{ dB A}$ ~ $71.0 \pm 0.5 \text{ dB A}$ である。

① 非類似度実験

非類似度実験では、N個の刺激音場のすべての組み合わせ対(${}_N C_2$ 個)に、回答の信頼性を検討するために同一刺激の対N個を加えた計(${}_N C_2 + N$)個の刺激音場対を用意した。被験者には、各刺激対に対して、響きの印象の差異を、‘1. 全く差がない’、‘2. わずかに差がある’、‘3. 差がある’、‘4. かなり差がある’、‘5. 非常に差がある’の5段階で回答してもらった。回答の再現性を調べるために、被験者1人につき再生順序を変えて2回の実験を行った。

② 一対比較実験

一対比較実験は、N個の刺激音場のすべての組み合わせ計 ${}_N C_2$ 個の刺激対をランダムに被験者に提示し、刺激対ごとに、最初の音場に比べて2番目の音場の方が、“響きの質感”が‘なめらか’か‘粗い’か、“音に包まれた感じ”が‘小さい’か‘大きい’か、そして“響きの長さ感”が‘短い’か‘長い’かなどを回答させるものである。得られた回答からThurstone Case Vに基づき、各々の評価量(TRV, LEV, REV)の心理的距離尺度値を算出した。被験者間の判断の一致性に関する検定結果は、有意水準1%で一致していた(全実験共通)。

(2) TRVの知覚に関する検証実験(心理実験I, II)

TRVがどのように知覚され、LEV, REVとどのような関係にあるのかを検証するために、実験はTRVとLEVの関係を調べる心理実験(実験I)とTRVとREVの関係を調べる心理実験(実験II)の2種類により構成した。さらに、これらは各々非類似度実験(実験a)と、‘響きの質感’、‘音に包まれた感じ’、‘響きの長さ感’といった表現語を用いた一対比較実験(実験b, c)から成る。実験aでは、響きの印象に関する各刺激音場の非類似度を求め、Kruskalの多次元尺度構成法により各刺激音場が心理的にどのように布置されるかを調べた。さらに実験b, cにより、実験aで得られた結果を解釈するために刺激音場の心理的距離尺度を構成した。

実験Iでは時間分布指数 TDI_{te} と、LEVと対応する物理量である両耳間相関度 ICQ_L を、実験IIでは TDI_{te} と、REVと対応する物理量である残響時間 T_{30} を各々3水準変化させた9個の刺激音場を用いて行った(実験I: Table 1, 実験II: Table 2)。インパルス応答(Fig. 3)は、直接音、4本の初期反射音($t=22, 42, 51, 67\text{ms}$)

および N 本の可変残響音 ($t \geq 80$ ms) と固定残響音から成る。 TDI_{te} は可変残響音の本数 N を、また ICQ_L は到来方向 θ を、 T_{30} は残響音の残響時間を変化させそれぞれ設定した。

これらの実験から、“響き”の印象に関わる心理量 (TRV, LEV, REV) の評価構造、すなわち、響きの質感 TRV と響きの長さ感 REV 並びに音に包まれた感じ LEV の評価軸の関係性を検討した。

(3) TRV と後期反射音の時間分布一様性の関係に関する一対比較実験 (心理実験 III)

TRV の知覚に影響を与える後期反射音特性を明らかにするために、本節 (3) ~ (5) に示す 3 つのシリーズの音響心理実験を、一対比較法を用いて実施した。

①音場を規定する物理量

後期反射音の時間特性にかかわる物理量として、後期反射音エネルギーの時系列上の一様性の度合いを表す時間分布指数 TDI_L (Temporal Distribution Index) を式 (1) により定義した。これは、減衰を除去したインパルス応答を用い自己相関係数の平均値を算出したものであり、0.0 から 1.0 の値をとる。値が大きいほど反射音エネルギーの時系列上のばらつきが小さく、反射音の時間的一様性が高いことを意味する。

$$TDI_L = \frac{(\sum_{i=1}^n E_i)^2 - \sum_{i=1}^n E_i^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (1)$$

②使用した刺激音場

刺激音場は、直接音と 4 本の初期反射音 ($t=22, 42, 51, 67$ [ms] : 実験 III ~ V 共通) 並びに N 本の可変残響音 ($t \geq 80$ [ms]) および固定残響音 ($t \geq 120$ [ms]) から成り (Fig. 4)、 TDI_L と残響時間 T_{30} を各々 3 水準変化させた計 9 個の音場である。刺激音場の物理特性を Table 3 に示す。ここで TDI_L は高域の残響音の本数 ($N_H=2, 8, 64$) を変化させることにより制御し、2k-8kHz 帯域の平均値として $TDI_{L,H3}$ を算出した。その他の物理量はほぼ一定である。

(4) TRV と後期反射音の空間分布一様性の関係に関する一対比較実験 (心理実験 IV)

①音場を規定する物理量

後期反射音の空間特性にかかわる物理量として、反射音エネルギーの到来方向の一様性の度合いを表す空間分布指数 SDI_L (Spatial Distribution Index) を、式 (1) における n を反射音群の到来方向数、 E_i をスピーカーごとの時間応答波形から求めた方向別エネルギーとすることで定義した。この値は、反射音の到来方向の分布が一様になるにつれて、すなわち反射音群が様々な方向から到来するほど 1.0 に近づき、逆に、限られた方向からのみ到来する場合 0.0 に近づく。

②使用した刺激音場

刺激音場は、直接音と 4 本の初期反射音、並びに 12 本の可変残響音から成り (Fig. 5)、 SDI_L を変化させた 5 個の音場である。 SDI_L は、12 本の可変残響音の到来方向を変化させることで制御した。また、刺激音場の時間情報

をいずれの音場においても同一とするために、可変残響音の到来時刻 ($t=80, 83, 88, 92, 95, 100, 104, 107, 112, 116, 119, 124$ [ms])、レベル (対直接音相対レベル = -3.5 [dB] : 6 本, -6.5 [dB] : 6 本) を固定とした。刺激音場の物理特性を Table 4 に示す。その他の物理量はほぼ一定である

(5) TRV と後期反射音の時間分布密度の関係に関する一対比較実験 (心理実験 V)

①音場を規定する物理量

後期反射音の時間分布特性にかかわる物理量として、さらに後期反射音の平均時間密度 d_L (Average temporal density) を単位時間当たりの反射音数として定義した。さらに減衰除去インパルス応答を用い反射音分布の尖度 K_L (Kurtosis) を式 (2) により算出した。

$$K_L = \frac{n \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^4}{(\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2)^2} - 3 \quad (2)$$

②使用した刺激音場

刺激音場は直接音と 4 本の初期反射音、並びに可変後期反射音群 ($t=80 \sim 580$ [ms]) および固定残響音 ($t \geq 580$ [ms]) から成り (Fig. 6)、 d_L を変化させた 5 個の音場である (Table 5)。 d_L は後期反射音の本数 N (シグナルプロセッサによるディレイ設定数 : 152 ~ 1,444) を変化させることで制御した。反射音の到来時刻は、反射音の平均時間密度 ($\Delta N / \Delta t = (4 \pi c^3 / V) t^2$) を用いて、また各々の反射音レベルは、残響エネルギーが指数減衰 (残響時間 2.1s) するように決定した。

4. 研究成果

(1) 後期反射音の時間分布指数 TDI の値が高くなるほど TRV は大きくなり、TDI の変化幅 0.5 に対する TRV の心理的距離尺度値の変化幅はいずれも丁度可知差異 (0.68) 以上となった。これらの結果から、後期反射音エネルギーの時間分布特性が“響きの質感”の知覚において弁別可能な影響を与えることを示した (Fig. 7, Fig. 8)。

(2) 室の響きの印象評価において、“響きの質感”は、“音に包まれた感じ”、“残響感”のいずれとも異なる評価軸となることを明らかにした (Fig. 9, Fig. 10)。

(3) TRV の心理的距離尺度値と $TDI_{L,H3}$ (2k-8kHz 帯域平均値) 間の相関は高く (相関係数 $r=0.89, p < 0.01$)、また残響時間の変化は TRV の知覚には影響しない。すなわち、後期反射音の時間分布一様性の変化が“響きの質感”の知覚において弁別可能な影響を与えることを示した (Fig. 11)。

(4) 空間分布指数 SDI_L の変化に対する TRV の心理的距離尺度値の変化は、いずれも 0.68 を下回る結果となった。この結果より、後期反射音の空間分布一様性の変化は“響きの質感”の知覚において弁別可能な影響を与えないということを示した (Fig. 12)。

(5) TRV の心理的距離尺度値と後期反射音の

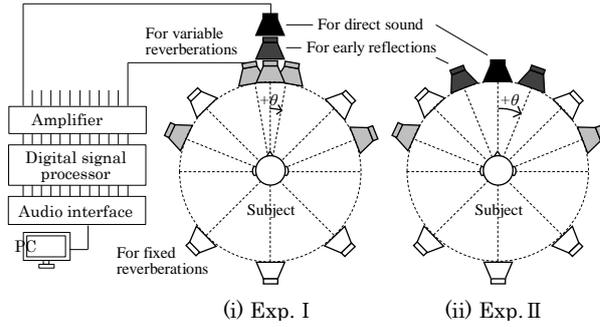


Fig.1 Arrangement of loudspeakers in (i) Exp. I and (ii) Exp. II .

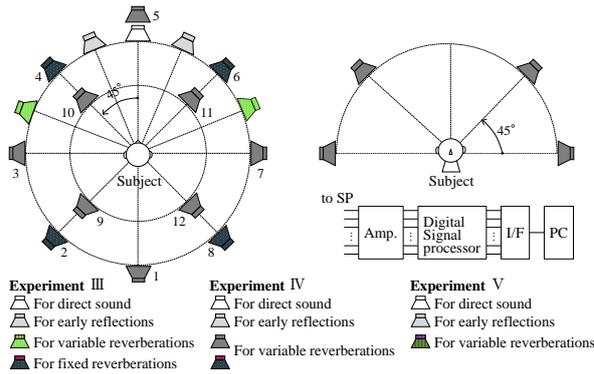


Fig.2 Arrangement of loudspeakers.(Exp.III,IV, V)

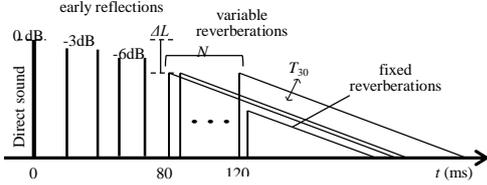


Fig.3 Structure of the sound fields in Exp. I , II .

Table 1 Outline of nine stimuli in Exp. I .

Sound field	Variable reverberations			C_{80} [dB]	TDI_{e}^*	ICC_L	T_{30} [s]
	θ [°]	N	ΔL [dB]				
1	0	2	+3		0.18	0.93	
2	± 10	2	+3	-2	0.20	0.53	2.0
3	± 67.5	2	+3		0.18	0.34	
4	0	8	-3		0.39	0.93	
5	± 10	8	-3	-2	0.43	0.55	2.0
6	± 67.5	8	-3		0.41	0.34	
7	0	64	-12		0.68	0.93	
8	± 10	64	-12	-2	0.66	0.62	2.0
9	± 67.5	64	-12		0.64	0.35	

* : $t_e=180$ [ms]

Table 2 Outline of nine stimuli in Exp. II .

Sound field	Variable reverberations			C_{80} [dB]	TDI_{e}^*	ICC_L	T_{30} [s]
	θ [°]	N	ΔL [dB]				
1	0	2	+3		0.17	0.20	1.0
2	± 67.5	2	+3	-2	0.19	0.20	1.5
3	0	2	+3		0.20	0.21	2.4
4	0	8	-3		0.32	0.24	1.0
5	± 67.5	8	-3	-2	0.35	0.24	1.4
6	0	8	-3		0.37	0.23	2.2
7	0	64	-12		0.58	0.24	1.0
8	± 67.5	64	-12	-2	0.59	0.24	1.4
9	0	64	-12		0.61	0.24	2.2

* : $t_e=180$ [ms]

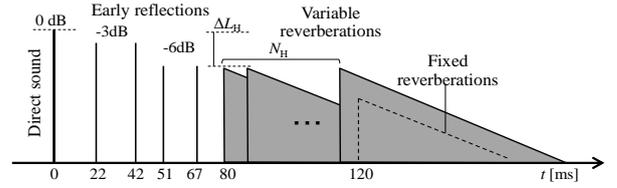


Fig.4 Structure of the sound fields in Exp. III.

Table 3 Outline of nine stimuli in Exp. III.

Sound field	Variable reverberations		$TDI_{L,H3}$	C_{80} [dB]	T_{30} [s]	ICC_L
	N_H	ΔL_H [dB]				
1			0.30		1.0	0.27
2	2	0	0.40	-2.0	1.5	0.27
3			0.47		2.3	0.26
4			0.53		1.0	0.28
5	8	-6	0.60	-2.0	1.5	0.28
6			0.65		2.3	0.27
7			0.66		1.0	0.31
8	64	-15	0.68	-2.0	1.5	0.30
9			0.69		2.3	0.30

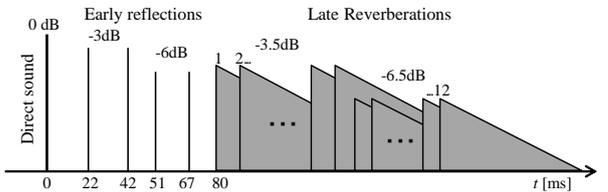


Fig.5 Structure of the sound fields in Exp. IV .

Table 4 Outline of five stimuli in Exp. IV.

Sound field	SDI_L	$TDI_{L,H3}$	C_{80} [dB]	T_{30} [s]	ICC_L	LF_L
1	0.15	0.66	-2.0	1.9	0.24	0.29
2	0.26	0.63	-2.0	1.8	0.24	0.35
3	0.44	0.64	-2.0	1.9	0.21	0.38
4	0.57	0.66	-2.0	1.9	0.17	0.43
5	0.66	0.65	-2.0	1.8	0.16	0.42

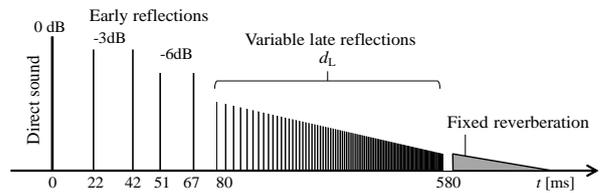


Fig.6 Structure of the sound fields in Exp. V .

Table 5 Outline of five stimuli in Exp. V .

Sound field	d_L [s ⁻¹]*	K_{80-580}	T [s]	C_{80} [dB]	ICC_L
1	304	67.4	2.1	-2	0.26
2	456	59.4	2.1	-2	0.26
3	760	47.8	2.2	-2	0.27
4	1,520	35.2	2.1	-2	0.26
5	2,888	24.5	2.1	-2	0.26

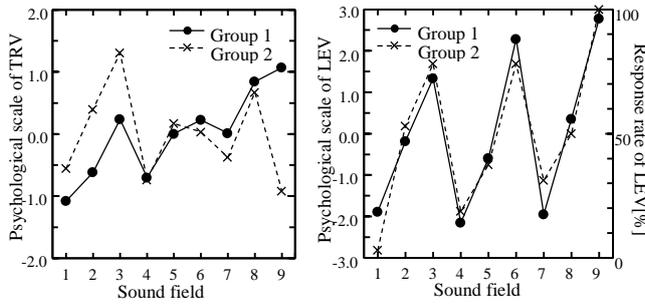


Fig.7 Psychological scale of TRV in Exp. I.(left) Psychological scale and Response rate of LEV in Exp. I.(right)

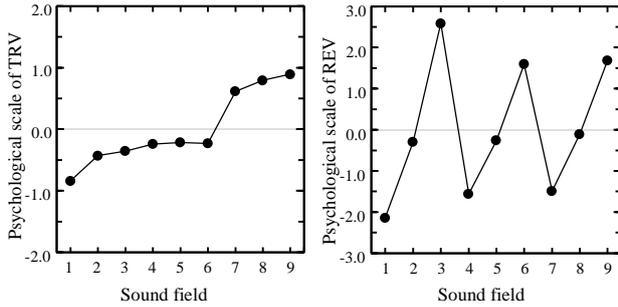


Fig.8 Psychological scale of TRV in Exp. II.(left) Psychological scale of REV in Exp. II.(right)

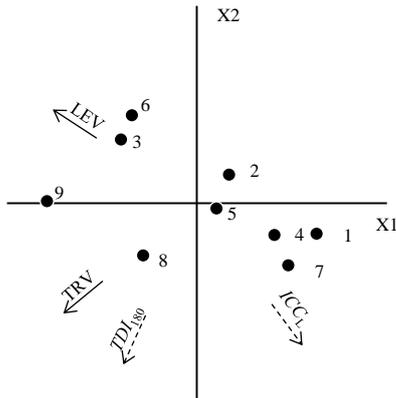


Fig.9 Two-dimensional psychological configurations of nine stimuli and axes of TRV, LEV and physical parameters in Exp. I. Numeral indicates the number of stimuli.

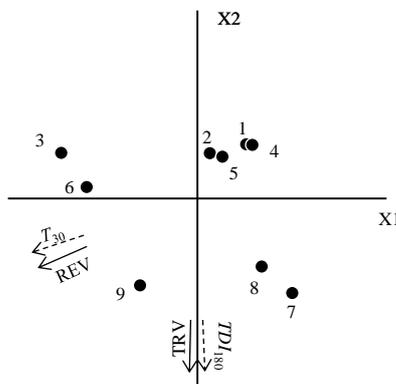


Fig.10 Two-dimensional psychological configurations of nine stimuli and axes of TRV, REV and physical parameters in Exp. II. Numeral indicates the number of stimuli.

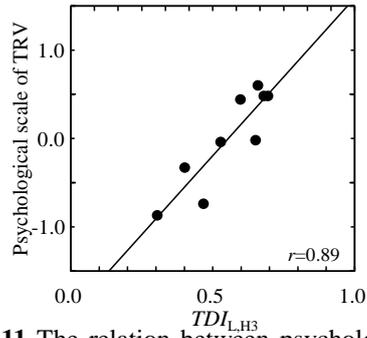


Fig.11 The relation between psychological scale of TRV and TDI_{LH3} in Exp.III (r : correlation coefficient, significant at $p<0.01$).

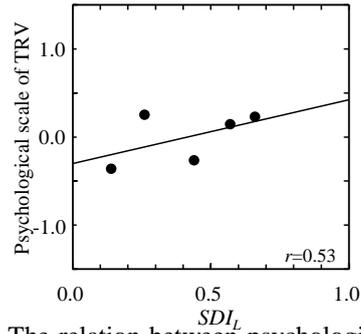


Fig.12 The relation between psychological scale of TRV and SDI_L in Exp.IV (r : correlation coefficient).

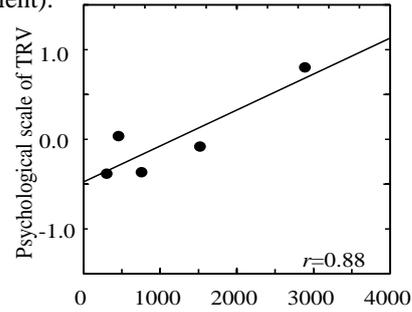


Fig.13 The relation between psychological scale of TRV and d_L in Exp.V (r : correlation coefficient, significant at $p<0.05$).

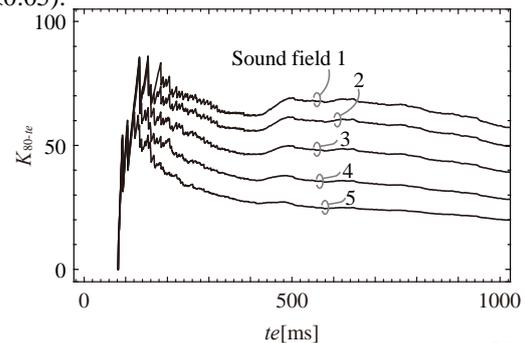


Fig.14 K_{80-te} of five test sound fields in Exp. V.

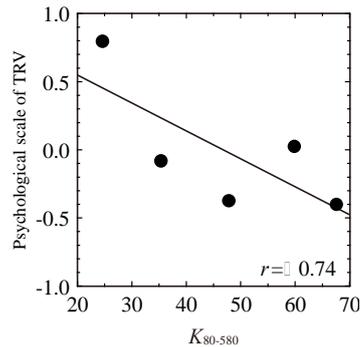


Fig.15 The relation between psychological scale of TRV and K_{80-580} in Exp. V.

平均時間密度 d_t 間の相関が高いことから(相関係数 $r=0.88, p<0.05$)、後期反射音の時間分布密度の変化が“響きの質感”の知覚において弁別可能な影響を与えることを示した(Fig. 13)。

(6)減衰除去インパルス応答を用いて算出した後期反射音尖度 K_L の分析(Fig. 14)並びにTRVの心理的距離尺度値との関係から、TRVに対応する音響物理指標として後期反射音尖度 K_L が有効であることを示した(Fig. 15)。

以上の結果は、“響きの質感”(TRV)がコンサートホール音場で知覚される音像の質的側面を表す要素感覚として有効であることを示すものである。これまで、鏡面反射と散乱反射のエネルギーバランスをいかに取るか或いはその最適値等については明らかになっておらず、音響設計者の経験と勘に頼っているのが現状である。棚上げされていた響きの質の評価研究の今後の進展が期待できる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- ① 藤田鋭志, 原彩乃, 古屋浩, コンサートホールの‘響きの質感’に対応する物理量の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018. 9.
- ② 安孫子晃, 藤田鋭志, 古屋浩, 後期反射音の時間分布密度と‘響きの質感’の関係、日本音響学会講演論文集, 2017. 9.
- ③ 安孫子晃, 藤田鋭志, 古屋浩, 残響音の到来方向分布が響きの質感に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017. 8.
- ④ 安孫子晃, 田嶋一士, 古屋浩, ホール残響音の時間分布特性が‘響きの質感’に与える影響、日本音響学会講演論文集, 2016. 9.
- ⑤ 残響音の時間分布密度が響きの質感に与える影響、田嶋一士, 安孫子晃, 古屋浩, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016. 8.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古屋 浩 (FURUYA HIROSHI)
芝浦工業大学・建築学部・教授
研究者番号：00238700

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

安孫子 晃 (ABIKO HIKARU)
芝浦工業大学大学院(2017年度修了)
藤田 鋭志 (FUJITA ETSUSHI)
芝浦工業大学大学院(修士2年)
原 彩乃 (HARA AYANO)
芝浦工業大学大学院(修士1年)