

3D合成音場で測定したコンサートホールの最適残響時間

Favorable Reverberation Time of Concert Halls Measured in a 3D Synthesized Sound Field

日高 孝之 Takayuki Hidaka*¹ 西原 法子 Noriko Nishihara*²
鈴木 和憲 Kazunori Suzuki*³ 中川 武彦 Takehiko Nakagawa*⁴

梗概

コンサートホールにおけるオーケストラ音楽に好ましい残響時間を検討した。無響室で楽器ごとに録音した音楽ソースを、ホールのステージに設置した45台のスピーカから再生し、客席で32ch球形マイクロフォンを用いて収録した。曲目は、4つのオーケストラ音楽の抜粋である。この収録信号を実験室内で4次アンビソニックス再生し、音楽専門家21名が、提示した試験音の残響感を判定した。残響時間 RT_M と初期残響時間 EDT_M はともに残響感と高く相関し、それらの最適値はテンポに依存した。テンポの範囲が*Presto*から*Allegro*までの最適な RT_M 範囲は1.7–2.2s、*Andante*まで外挿できると仮定すると2.0–2.2sとなった。

キーワード：残響時間、音響設計、主観評価実験、アンビソニックス

Summary

This paper examined the favorable reverberation time in concert halls for orchestral music. Anechoic music sources were reproduced by 45 loudspeakers on stages and recorded with a 32-channel spherical microphone at audience seats. Four orchestral music excerpts were chosen. By fourth-order Ambisonics playback in the laboratory, psychological experiments were conducted with 21 music experts judging reverberance. Mid-frequency reverberation time (RT_M) and early decay time (EDT_M) are both highly correlated with reverberance. Their favorable values are determined by tempo: for *Presto* to *Allegro*, favorable RT_M ranges from 1.7 to 2.2 s; if extrapolated to *Andante*, RT_M ranges from 2.0 to 2.2 s.

Keywords: reverberation time, acoustic design, subjective experiment, ambisonics

1 はじめに

実際の音響設計において、最初の検討事項の1つはいかなる残響時間（RT）に設定するかということである。これに関して、研究者や設計者によってこれまで様々な値が提唱されているが、その大半は彼らの個人的判断・嗜好に基づくもので、科学的根拠は十分に示されていない。

残響時間に関するこれまでの心理的研究には概ね2つの視点が存在する。1つは、残響の知覚に対応する独立物理指標を求めることである^{1)–3)}。もう1つは、ホールの規模や演目に対してそれらにふさわしいRTを明らかにすることであり^{4), 5)}、本研究の立場は後者である。これに関して、Beranek⁵⁾は評価の高いコンサートホールの調査結果に基づいて、RTの適正範囲を示している。これは実用上、合理的な設計指針であり、世界的に広く利用されている。彼の推奨範囲は適正RTが満たすべき必要条件を与えている。

Kuhl⁴⁾は3種類のオーケストラ音楽に対する、主観的に好ましいRTを報告している。彼は古典派、ロマン派、現代について、適正値はそれぞれ1.5, 2.1, 1.5sとなったことを報告しており、この知見は、今日もしばしば引用されている。しかし、彼の研究目的は、家庭でのラジオ放送のモノラル聴取を対象とした録音会場としての最適値を求めることであった。重要なことは、彼は、最適RTは音楽のスタイルあるいは歴史的区分に依存することを示したことである。

著者の知る限り、最適RTに関する同様な体系的な実験は、Kuhl以降、半世紀以上報告されていない。この後、

*1 元（株）竹中工務店技術研究所 博士（工学） Formerly, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

*2 技術研究所 主席研究員 博士（工学） Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*3 技術研究所 主席研究員 Senior Chief Researcher, Research & Development Institute

*4 技術研究所 建設・環境基盤研究部 建築環境グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

録音・再生技術が飛躍的に進歩し、オーケストラの残響感を実験・評価することが可能になりつつある。こうした背景から、このトピックを再検討することは意味があると考えられる。

本報告でもこれと類似した手順に沿って実験を行うが、実際のホールにおいて、無響室録音したオーケストラ音楽4曲からの抜粋を多チャンネルスピーカシステムで再生して疑似演奏会音場を作成する。後日、収録した信号を最新の立体音場再生技術である4次アンビソニックス音場で被験者に提示して、被験者は残響感を判定する。この結果から、ホールでのオーケストラ音楽の聴取を対象とした最適RTを検討する。

2 実験装置

2.1 オーケストラの無響室録音

まず試験信号を作成するため、東京フィルハーモニー交響楽団のメンバーによる管弦楽の各楽器の演奏を竹中技術研究所の無響室（8.4mL×7.8mW×9.8mH）で、一人ずつ個別に録音した。その収録方法は、文献⁶⁾と基本的に同様に、演奏の同期をとるために、総譜のピアノ演奏のオーディオ信号と指揮者が指揮をするビデオ映像を事前に製作した。演奏者は無響室内で、ビデオモニターに映った指揮者に従うと同時に、ピアノ伴奏をヘッドフォンで聞きながら演奏した。演奏者数は32名で、第1ヴァイオリンについては3名のコンサートマスターと1名のフォアシュベラー、それ以外の楽器では首席奏者が演奏した（Table 1）。

演奏者の数は、事前検討を行って決定した。検討は、オーケストラのパートごとの演奏音を実際にステージ上の複数のスピーカから再生し、聴感試験によってその音質を評価した。なかでも、第1ヴァイオリンは、選択した抜粋において、重要な役割を持っているので、大型オーケストラのサウンドに再生音の音質をできるだけ近づけるために、演奏の正確さとともに、このパートのコーラス効果⁷⁾をできる限り再現することが望まれた。当然ながら、1名だけのヴァイオリン演奏を複数のスピーカから発生すれば、楕円形フィルター効果によってカラレーションが生じる^{8),9)}。ここでは、4名の奏者を組み合わせれば（上下*divisi*で8音源）、第1ヴァイオリンの適正な音質が得られることを確認した。木管楽器と金管楽器については、第1奏者の音に第2、第3奏者が相応しい音程とアーティキュレーションを演奏することによってハーモニーを作る必要があるため、各パートを専門とする奏者が演奏した。

録音は15本の1/2inchマイクロフォンB&K 4189（Nærum, Denmark）を演奏者周囲の上半球面（半径3m）に配置して、多チャンネルで行ったが、本研究ではスピーカ再生する際の入力信号として、楽器正面に置かれたマイクロフォンの出力信号を用いた。ただし、ホルンはベル開口の正面方向のマイクロフォンの出力信号、つまり、奏者後方の信号を用いた。録音・再生・デジタル編集には、Nuendo（Steinberg Co., Hamburg, Germany）を利用してコントロールした。

2.2 音楽ソース

古典派、ロマン派、現代音楽のジャンルから、ダイナミクスと音域とテンポの多様性、劇的表現、知名度を考慮して、次の4曲を選んだ。

- ・モーツァルト・交響曲第41番ハ長調K. 551、第4楽章 *Allegro molto*、小節272－423、継続時間：2分18秒
- ・ロッシーニ・ウィリアムテル序曲より「スイス兵の行進」 *Allegro vivace*、小節226－387、継続時間：2分10秒
- ・ブルックナー・交響曲第9番ニ短調、第1楽章 *Moderato*、小節518－567、継続時間：1分42秒
- ・ストラヴィンスキー・バレエ組曲（1945）「火の鳥」より「魔王カステイの凶悪な踊り」 *Vivo*、小節1－98、継続時間：1分47秒

これら4曲は東京フィルハーモニー交響楽団が1年以内にコンサートで演奏した曲目である。無響室での演奏に当たっては、過剰な力みを避けるために、その際の経験を思い出して、演奏音の大きさを設定するように依頼した。

2.3 ホール内再生

2.3.1 スピーカ配置

東京フィルハーモニーが演奏会で採用する楽器のレイアウトを基準にして、ステージ上のスピーカ台数と位置を定め、各スピーカへ無響室録音信号を分配した。この配置はドイツ式⁷⁾であり、第1と第2ヴァイオリンがステージ

Table 1 オーケストラ演奏者数（作曲者は2.2節参照）
Number of orchestra players (see sect.2.2 for composers)

	Mozart	Rossini	Bruckner	Stravinsky
1st Violin	4	4	4	4
2nd Violin	3	3	3	3
Viola	1	1	1	1
Cello	1	1	1	1
Double bass	1	1	1	1
Flute	1	1	2	1
Piccolo		1		1
Oboe	1	1	1	1
Clarinet		2	2	2
Bassoon	2	2	2	2
French horn	2	3	3	2
Trumpet	2	2	3	2
Trombone		3	3	3
Tuba			1	1
Timpani	1	1	1	1
Harp				1
Percussion		2		2
Piano				1

前方の両翼に配置されている。弦楽器の規模は16型である。このとき、弦楽器セクションについては、受音点から見た隣接するスピーカの間隔が最小可聴角¹⁰⁾以下となるように配置した。管楽器については、1台の楽器に1台のスピーカを対応させた。

最終的に決定したスピーカのレイアウトでは、弦楽器セクションを実際の奏者の数より少ないスピーカで模擬している。このため、第1ヴァイオリン、第2ヴァイオリン、ヴィオラ、チェロ、コントラバスの奏者がそれぞれ16, 14, 12, 10, 8人と等しくなるように、スピーカ再生音レベルを校正した。使用したラウドスピーカはBowers & Wilkins 685S2 (Worthing, England) が43台、Electro-Voice ZX5-90s (Burnsville, the U.S.) が2台で、後者は打楽器の再生に使用した。これらスピーカからの再生音レベルは、スピーカのダイアフラムの軸上3m点での音圧レベルが、無響室録音時における各奏者から同じ3m点での発生音と等しくなるよう校正した。

スピーカの中心軸の方向は、基本的に各楽器にとっての主要放射方向⁷⁾とし、弦楽器用の方向はメインフロアの中央客席方向に、ホルンを除く管楽器と打楽器のスピーカは正面方向に、ホルンのスピーカはステージの後壁方向に向けた。弦楽器のスピーカ中心の高さは駒の高さ付近、すなわち、ヴァイオリンとヴィオラは1,240mm、チェロは560mm、コントラバスは740mmとした。管楽器セクションのスピーカ中心の高さは、ひな壇+口の高さに対応させ、第1列から第3列まで順に1,240, 1,440, 1,640mmとした。打楽器に対応するスピーカ中心の高さは650mmである (Fig. 1)。

2.3.2 吸音の補正

オーケストラの演奏では、奏者は吸音体として作用する。このとき、ステージ床に向かう楽器からの放射音の大部分は吸収される。ステージ床が裸面の場合、ラウドスピーカオーケストラの再生音は若干硬質となって、音質に違和感を生じることを予備実験において確認したことから、演奏者の吸音を模擬するためにウレタンフォーム (倉敷紡績(株), model 360N, 厚さ50mm, 2.05×0.265m) 74枚、計40m²をステージ上の演奏者が占めるエリアにほぼ等間隔に敷き並べた (Fig. 1)。Fig. 2はステージ床に敷いたウレタンフォームの吸音性能である。ウレタンフォームの面積が40m²のときに、500–1,000Hzで80名のオーケストラの等価吸音面積⁵⁾をほぼ近似し、聴感上の違和感も大幅に改善した。

2.4 ホール内収録

ラウドスピーカオーケストラの再生実験は、オーケストラ音楽を主目的とする5つのコンサートホールで行った。Table 2はその諸元と物理量の概要である。ホールAについては可動式のオーケストラ反射板有・無の2条件を対象とし、またホールDでは空席に加えて、客席に着席するヒトを模擬するクロス¹¹⁾を椅子エリア全面に敷いた条件も対象とした (ホールE)。録音に使用したホールの残響時間 (RT_M) 範囲は1.1–2.5sであり、これらのホール音場は既存のコンサートホールのRT範囲をほぼ網羅している⁵⁾。ラウドスピーカオーケストラの演奏は、客席において球形32chマイクロフォンem32 Eigenmike (mh acoustics LLC, San Francisco, the U.S.), 中心高さは1.1mとして、4つの音楽抜粋を収録した。受音点はメインフロアの中央から1m下手側席 (p101) とバルコニー第1列の中央から1m下手側席 (p21) とした (Fig. 3)。

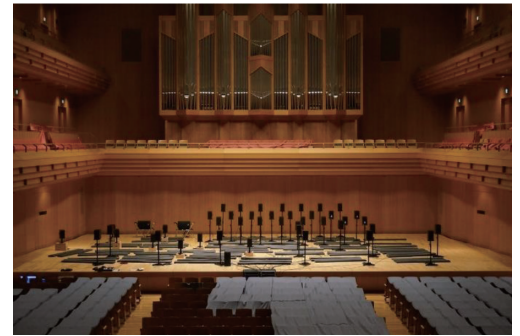


Fig. 1 ホールEにおけるラウドスピーカオーケストラと吸音補正のためのステージ上のウレタンフォームと客席の布
The loudspeaker orchestra in Hall E seen from a recording position. Cloth covering over the seating area and urethane foam on the stage simulate absorption by an audience and that by orchestral players, respectively.

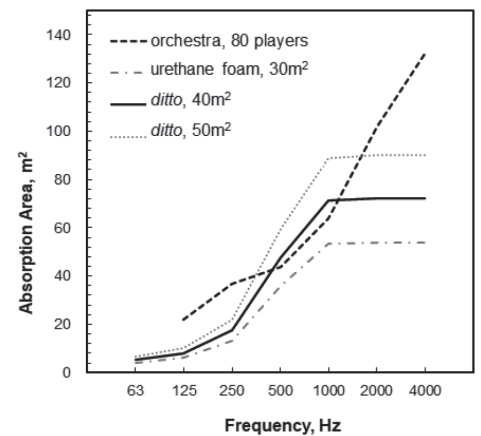


Fig. 2 残響室測定によるウレタンフォーム ($t=50$) と80名のオーケストラの等価吸音面積
Sound absorption area of urethane foams measured in a reverberation chamber

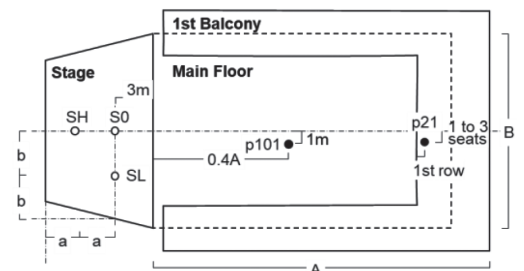


Fig. 3 ホール形状による音源、受音点の定義
The letters A and B relate to the hall's dimensions and determine the receivers' locations. Positions p101 and p21 are referred to as "Main floor" and "Balcony," respectively

Table 2 録音に使用したコンサートホールの諸元と室内音響物理量
Objective measurements of concert halls¹²⁾. The subscripts “L,” “M,” and “3” represent the octave band average for 125 and 250, 500 and 1,000, and 500, 1,000 and 2,000 Hz, respectively. Receivers p101 and p21 are main floor and balcony seats, respectively

Hall	Receiver	Plan shape	N	V (m ³)	RT _L	RT _M	BR	EDT _L	EDT _M	C _{80,3}	G _L	G _M	IACC _{E3}
A	p101	Fan+rectangle	1,932	9,200	1.26	1.22	1.03	1.29	1.25	3.3	5.1	5.3	0.63
	p101				1.25	1.05	1.20	1.60	1.14	5.9	1.5	3.1	0.69
B	p101	Fan+rectangle	1,945	16,290	1.78	1.55	1.15	2.09	1.79	3.3	3.5	5.4	0.61
	p21				1.71	1.56	1.10	1.92	1.67	0.0	2.3	3.3	0.52
C	p101	Surround	2,008	28,000	2.17	2.12	1.02	1.75	1.66	0.9	7.2	7.3	0.57
	p21				2.29	2.19	1.05	2.08	1.54	0.2	2.8	4.2	0.64
D	p101	Shoebox	1,636	15,300	2.09	2.41	0.87	1.80	2.13	0.7	9.2	9.3	0.33
	p21				2.18	2.51	0.87	1.70	2.27	-1.2	6.6	6.6	0.30
E	p101	Shoebox	1,636	15,300	2.15	2.05	1.05	1.70	1.68	1.3	5.4	6.3	0.27
	p21				1.96	2.07	0.95	1.84	1.90	-0.7	3.8	3.6	0.30

2.5 半無響室での音響試験

2.5.1 試験音場

試験音は4次アンビソニックスで被験者に提示した¹³⁾。半無響室内（7.5mL×5.5mW×5.7mH）において31個のスピーカ（B&W-685S2）を被験者の頭部を中心とする半径=2.5mの上半球面に均等配置した。提示音の音圧レベルは、ホール内で収録したときの値と同一となるように校正し、Mozart, Rossini, Bruckner, Stravinskyについてそれぞれ、 L_{Aeq} = 66.4 – 72.4dB, 70.9 – 77.5dB, 75.5 – 81.5dB, 70.0 – 75.6dB, L_5 = 70.3 – 76.3dB, 75.7 – 81.5dB, 80.3 – 86.4dB, 76.0 – 81.7dBとした¹⁴⁾。アンビソニックス音場は頭部の移動・回転により音のイメージが変化するため、実験開始時に、極力、頭部を固定するように被験者に指示した。この部屋の壁と天井は層状の吸音材（垂直入射吸音率 α_0 = 0.99）仕上がりであり、この部位の遮断周波数は200Hzである。

2.5.2 被験者と試験用紙

本研究で求める好ましいRTは一般聴衆ではなく、ホールでの音楽聴取に対する十分な経験を有する人々を対象としている。参加者は音楽専門家21名、内訳は高名なソリスト6名、東京フィルハーモニー交響楽団各パート首席奏者9名、音楽マネジメント関係者2名、レコーディングエンジニア4名で、全員がホール音響に関心を持っている。

実験に先立ち、著者の一人が被験者に対し、実験の目的と室内音響における主観的属性に関する基本的な考え方を説明した。主観試験の冒頭では、RTが最も長い音と最も短い音を、音場名を伏せて参考音として再生し、また、被験者には「聴衆」として判断することを求めた。

アンケート用紙の質問はKuhl⁴⁾ とほぼ同じであり、残響感について「短過ぎる、または不足」、「やや不足」、「適正」、「やや過剰」、「長過ぎる、または過剰」の5段階評価とした。記入に際して、「連続する音のつながりが濁っているか、分離しすぎているかに関する印象、さらに、ストップコードに関する印象」を判断するように説明した。

3 結果

3.1 残響時間（RT）

アンケートの判定基準が等間隔尺度であると仮定して、全被験者による判定の平均値を求めた^{4), 15)}。残響感では5段階を、「短過ぎる」から「長過ぎる」へと順に数値0, 1, 2, 3, 4を対応させて、残響感とRT_Mおよび初期残響時間EDT_Mの関係をFig. 4, 5にプロットした。4抜粋に対するRT_Mの相関係数は $r = 0.83 - 0.95$, EDT_Mの相関係数は $r = 0.89 - 0.94$ である（Table 3）。両パラメータの相関の程度はほぼ同一であり、どちらのパラメータとも、曲目に関わらず残響感と良好に対応する。図の縦軸の値が 2 ± 0.5 を「適正」と仮定して、回帰曲線との交点から求めた各曲に対する好ましいRT_MとEDT_Mの範囲をTable 4に示す。この結果から、4抜粋を同時に満たすRT_MとEDT_Mの範囲は1.7 – 2.2sと1.5 – 2.0sとなる。この結果、相関係数でみる限りはRT_MとEDT_Mは同じ程度に良好なパラメータである。

Table 3 残響感と RT_M, EDT_M, C_{80,3}との相関係数
Correlations with reverberance in RT_M, EDT_M, and C_{80,3}

	Dgree of freedom	Correlation coefficient	p-value	Standard error
RT _M	Mozart	0.87	< 0.01	0.075
	Rossini	0.83	< 0.01	0.100
	Bruckner	0.91	< 0.01	0.055
	Stravinsky	0.95	< 0.01	0.031
EDT _M	Mozart	0.94	< 0.01	0.049
	Rossini	0.93	< 0.01	0.060
	Bruckner	0.89	< 0.01	0.080
	Stravinsky	0.92	< 0.01	0.072
C _{80,3}	Mozart	-0.84	< 0.01	0.096
	Rossini	-0.68	0.03	0.170
	Bruckner	-0.82	< 0.01	0.103
	Stravinsky	-0.73	0.01	0.148

Fig. 4を詳しく見ると、Rossiniの判定についてホールCのp21 (C-21)のデータが回帰直線から逸脱している。このRTは2.2sと十分長い、被験者21名のうち15名がこの残響感を「やや不足(評価値1)」以下と判定しており、その評価のバラつきは小さい。もし、この点を回帰から除外するとRT_Mに対する4抜粋の決定係数は $R^2 = 0.8323 - 0.9713$ ($r = 0.91 - 0.99$) となって、RT_Mだけでほぼ完全に残響感を説明できる。他の音場に比べると、C-21のEDT_M (1.5s) はRT_M (2.2s) よりも非常に小さい (Table 2)。すなわち、C-21の初期反射音構造は特異なケースであることを意味している。なお、C-21を除外しても回帰直線から得られる推奨値はほとんど変化しない。

一方、Fig. 5では、C-21の判定結果は回帰線から逸脱してない。これは、残響曲線が折れ曲がっても初期残響は残響感を上手く説明する²⁾という既存の結果を裏付けている。つまり、初期の音響設計段階でRTが適正と計算されても、初期反射音の不足によって、残響曲線が指数減衰しないときには、曲目によっては好ましい残響感は得られないことを示唆している。

Table 4 Fig. 4とFig. 5の回帰直線RT_MとEDT_Mの好ましい範囲

	RT _M (s)	EDT _M (s)
Mozart	1.5 - 2.2	1.4 - 2.0
Rossini	1.6 - 2.3	1.5 - 2.0
Bruckner	1.6 - 2.5	1.5 - 2.2
Stravinsky	1.7 - 2.2	1.5 - 2.0

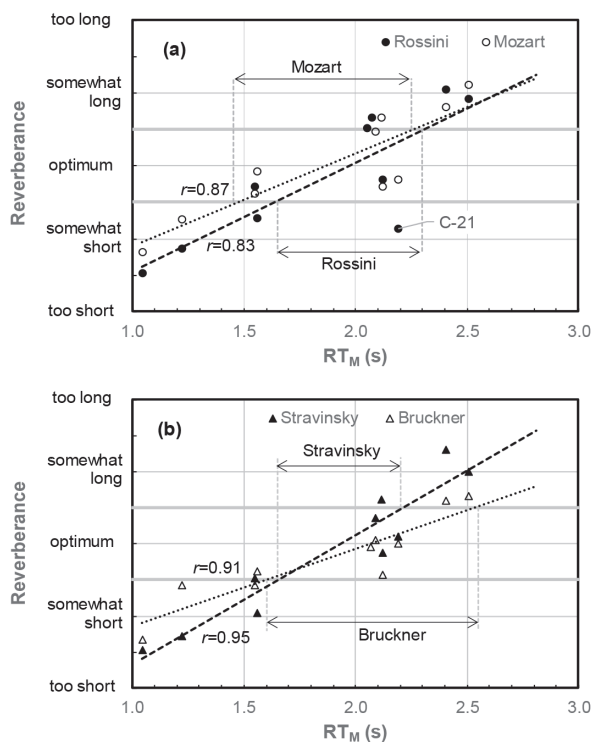


Fig. 4 4抜粋に対する残響感とRT_Mの関係。矢印は推奨範囲を示す Judgments of reverberance plotted against RT_M for four music excerpts. Horizontal arrows show the favorable ranges

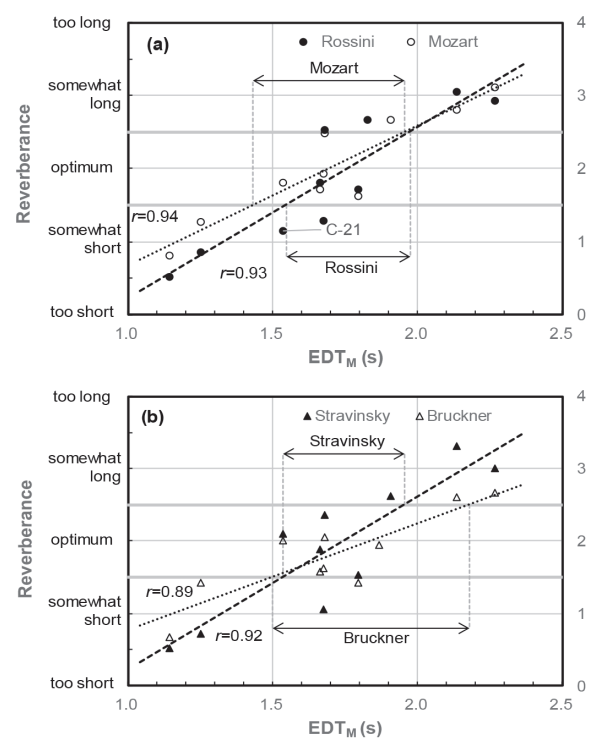


Fig. 5 横軸がEDT_M以外はFig. 4と同じ The same as in Fig. 4 except for the horizontal axis EDT_M

3.2 低音と高音の寄与

次に、残響感に及ぼす低音と高音の寄与を調べた。この結果、3オクターブバンド (500, 1,000, 2,000Hzの平均値) のRT₃とEDT₃、RT_H (2,000, 4,000Hzの平均値) は4抜粋に対してRT_MとEDT_Mと同じ水準で残響感に対応するが、EDT_Hと残響感との相関係数は若干低い ($r = 0.74 - 0.81$)。この理由は、一部のホールでは高音域で初期反射音密度が十分でない¹⁶⁾、あるいは、拡散が十分であっても、残響曲線が下向きに湾曲するためである¹⁷⁾。低音については、RT_LとEDT_Lとの残響感への相関はさらに小さい ($r = 0.69 - 0.83$, $0.14 - 0.37$)。

なお、RT_Hが残響感と高い相関を持つことには別の理由がある。通常のホールでは高音域に向かってRTの周波数特性はなだらかに低下するため、その結果、2,000と4,000HzのRTはRT_Mと非常に高く相関する ($r = 0.98 - 0.99$)。つまり、両者間の高い多重共線性によって得られる結果と解釈できるので、RT_Hを考慮しないことが好ましいと言える。

3.3 初期残響時間 (EDT)

個々の音符の残響減衰の初期部分の勾配が適正であれば、連続音間のギャップは、残響によってブリッジされて音楽に音の豊かさが付加される⁵⁾。4.1節で述べるように、Allegroより速い4分音符の継続時間は0.18 - 0.4sである。ホール内

において、完全拡散音場かつ $RT=2s$ を仮定すると、この継続時間は初期の6–12dBの減衰に対応する。これは、EDTはRunning残響感と関係する指標¹⁶⁾であることを裏付けている。さらに、Atal¹⁾は指数関数的に減衰しない残響過程では、初期の160msの勾配から求めた RT が主観的な残響時間 (Subjective reverberation time) と上手く相関すると報告している。この160msという時間間隔は、4分音符の持続時間の最小値にほぼ等しい。大半の音楽では純粋なストップコードはフィナーレを除けば多くない。すなわち、残響感の判断の多くは、高速パッセージまでを含めたRunning残響感に依存していると考えられるので、本報告においてもEDTが有用な指標である結果になったと言える。

3.4 クラリティ (C_{80})

ソロの音楽では、 $C_{80,3}$ (500, 1,000, 2,000Hzの平均値) は残響感と有意な相関 ($r=-0.87-0.88$) を示した¹⁶⁾。オーケストラ音楽についてはTable 3, Fig. 6が示すように、両者の相関 ($r=-0.68-0.84$) は僅かに劣るが、依然として高い。これは調査した音場の RT_M と $C_{80,3}$ が高い相関関係 ($r=0.83$) にあるためである。Table 5を参照すると、 RT_M と残響感との偏相関係数はいずれの楽曲についても、 $C_{80,3}$ と残響感との偏相関係数に比べて十分に大きい。すなわち、本実験結果においては、オーケストラ音楽の残響感について、 $C_{80,3}$ は適切なパラメータではなく、EDT_Mと $C_{80,3}$ についても同じことが言える。なお、周波数帯域の組み合わせを変えた C_{80} について検討したが、 $C_{80,3}$ が残響感と最も高く相関した。

3.5 ラウドネス

本報では、提示した音楽全体のラウドネスについて検討する。前述したように時間変動音のラウドネスには、等価騒音レベル (L_{Aeq}) がよく対応する。そこですべての提示信号 (10音場×4抜粋) の L_{Aeq} と RT_M (あるいはEDT_M) を変数として、残響感との多重回帰分析を行った (Table 6)。併せて、 L_{Aeq} に代えてストレングス (G_M) を用いても分析した。

これより次のことが言える：(1) 多重相関係数と調整済み決定係数の値から判断すると、上述と同様、残響感は RT_M あるいはEDT_Mの一変数で説明できる。(2) L_{Aeq} の残響感への寄与は95%以下の確率で意味がない (t 値は2以下で)。(3) この表の分析結果は $F=0.1\%$ 以下の有意水準で統計的に有意である。

4 考察

4.1 残響感とテンポ

Fig. 4において回帰直線の勾配に着目すると、Bruckner, Mozart, Rossini, Stravinskyの順に勾配がきつくなっており、それらは次第に速いテンポ—速度記号が*Moderato*, *Allegro*, *Allegro vivace*, *Vivo*—になっている。この傾向から、テンポと好ましい残響感の間には何らかの関係があると考えてよいであろう。

Fig. 7は、4抜粋の4分音符の平均所要時間 (テンポと呼ぶ) に対する好ましい RT_M とEDT_Mの中央値 (Table 4) のプロットである。この結果は、これら中央値はともにテンポと強く結びつくことを意味している。このとき、テンポとの相関は、 RT_M は $r=0.94$ ($p=0.06$)、EDT_Mは $r=0.95$ ($p=0.05$) であり、この実験の範囲では、これらの最適値の中央値はテンポによって大半が決まっている。残響感、連続する音符が残響音によってブリッジされてsingingすることにより達成される感覚であることから、これは妥当な関係である。この結果は、好ましい RT は音

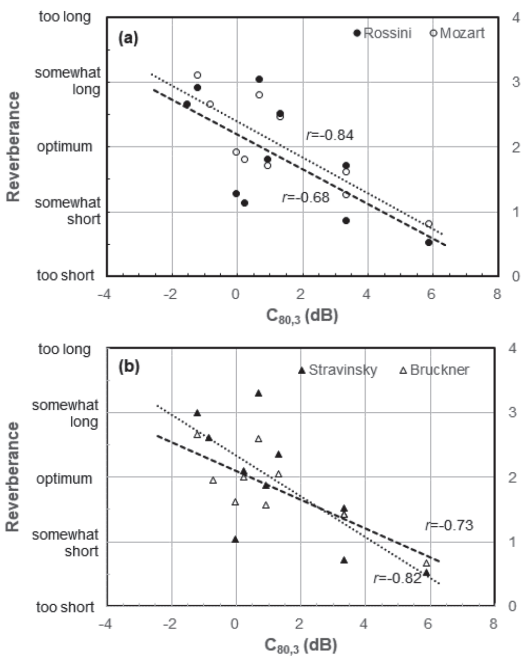


Fig. 6 横軸が $C_{80,3}$ 以外はFig. 4に同じ。ただし推奨範囲は示していない
The same as in Fig. 4 except the horizontal axis $C_{80,3}$.
The favorable range of $C_{80,3}$ is not shown.

Table 5 残響感、 RT_M 、 $C_{80,3}$ の偏相関係数
Partial correlation coefficients among
reverberance judgment, RT_M , and $C_{80,3}$

	RT_M (s)	$C_{80,3}$ (dB)
Mozart	0.54	-0.37
Rossini	0.62	-0.01
Bruckner	0.68	-0.28
Stravinsky	0.89	0.34

Table 6 ラウドネスと RT に対する残響感の多重回帰分析
Analysis of multiple regression of reverberance on loudness and
reverberation time

Variables	RT_M , L_{Aeq}	EDT _M , L_{Aeq}	RT_M	EDT _M
Multiple correlation coeff.	0.87	0.90	0.88	0.90
Adjusted coeff. of determination	0.75	0.81	0.76	0.81
F value	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
t value of RT_M / EDT _M	10.64	12.54	11.04	12.82
t value of L_{Aeq} / G_M	0.248	-0.909	-	-

楽の時代区分に応じて決まるとする既存報告^{4), 18)}とは異なっている。

Ando¹⁸⁾によると、最適RTは音楽の長時間自己相関関数の有効継続時間に比例する。また、文献¹⁹⁾によれば、有効継続時間は四分音符の平均所要時間とともにほぼ線形に増加するので、この関係からも最適RTはテンポに比例することが言える。

Fig. 8は横軸にテンポをとり、最適RT_Mの範囲を示している。図では、Table 4に示された好ましいRT_Mの上限、平均、下限値に対応する回帰直線の外挿をプロットし、メトロノーム・テンポ (BPM) と速度記号²⁰⁾を横軸に示した。ここで、テンポの最速限界は0.18 - 0.20sである²¹⁾。本実験のテンポはPresto-Allegroであるので、図中に点線で示したエリアから、好ましいRT_Mは1.7 - 2.2sとなる。

本実験と同等な実験は存在しないが、参考のため、テンポと好ましいRTの関係を読み取れる2つのデータをFig. 8にプロットした。これらはKuhl⁴⁾によるBrahms・第4交響曲 (テンポ=0.58s) とAndo¹⁸⁾によるRoyal Pavane (テンポ=1.1s) である。図の外挿直線 (太線) はこれらのデータと乖離しておらず、この外挿を許容すれば、さらに緩やかなテンポについても議論できる。

Fig. 8では、例えばRT_Mが2s (破線の矢印) のときにはテンポ≈0.9sまで、すなわちPrestoからAndanteで好ましい残響感をほぼ満足する。一方、RT_M=1.7s (図中点線の矢印) を下回ると、Allegroより緩やかな楽章では残響感が不足となる。一方、RT_M=2.25sを超えると、Prestoで残響感が過剰となる。こうした理由から、PrestoからAndanteまでをカバーする好ましいRTとしてRT_M=2.0 - 2.2sが得られる。

4.2 残響感の判定と被験者数

Fig. 9に、残響感判定平均値の95%信頼区間幅 ($= 2t_{N-1, 0.025} \sigma / N^{1/2}$) を、被験者数Nを変数としてプロットした。ここでσは標準偏差、t値はスチューデントt分布に従う。図中の曲線は4抜粋それぞれの中で、収束が最も遅かった試験音場のデータである。この図では、信頼区間の幅 (有意水準5%) はN=10 - 15付近で収束するか、その値が1以下となって判定平均値は安定していることがわかる。Mozart, Rossini, Bruckner, Stravinskyの全実験データについて、信頼区間の幅が1未満となるNの中央値は8.5, 7, 7, 10である。この種の心理実験においては多数の被験者に参加を求めることは容易でない。平均値の収束に注目したこの議論からは、信頼できる判定を得るためには、音楽経験の豊富な被験者であれば、被験者数は10 - 15名が許容限界値と考えられる。なお、図のプロットの初期の勾配が急であることは、Nが小さいときに信頼区間が広がるという一般的性質によるものであって、外れ値によるものではない。すなわち、データ (判断) の並びを変えても、結果は大きく変化しないといえる。

曲ごとの残響感判定のバラつきは、Stravinskyが最大、Brucknerが最小であった。前者では判定値の標準偏差は0.22 - 0.95、後者では0.38 - 0.68であり、試験音場によって判定の幅は2から4倍程度の違いが生じている。判定のバラつき指標としてその四分位数範囲 (IQR) をとると、これが1.0以下となったのは、全40試験音

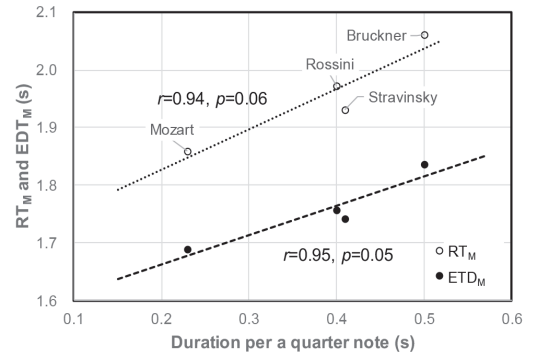


Fig. 7 4分音符の平均所要時間と好ましいRT_MとEDT_Mの中央値
Plot of the average duration of a quarter note vs. median value of favorable RT_M and EDT_M given in Table 4

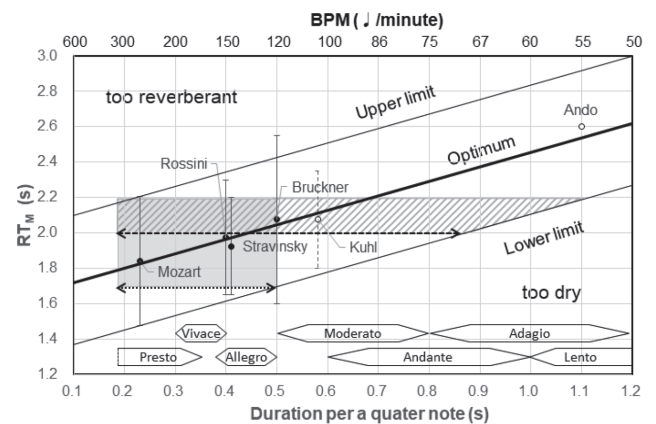


Fig. 8 RT_Mの好ましい範囲とテンポの関係。RT_Mの下限と上限は、Table 4の好ましい範囲を外挿した値、太実線はFig. 7の回帰直線。Region of favorable RT_M vs. tempo. The lower and upper limits of RT_M are the extrapolation of the tolerable range in Table 4. The thick solid line is the regression line in Fig. 7.

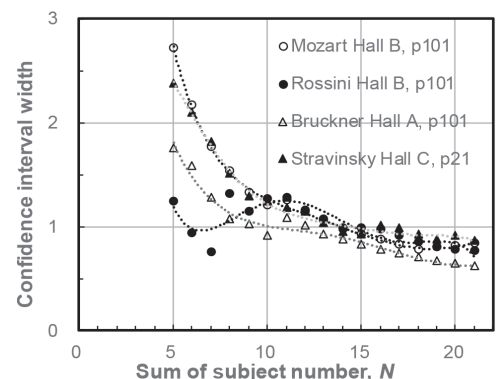


Fig. 9 4音場の被験者数に対する平均残響感の95%信頼区間幅の変化
Change of the 95% confidence interval width of mean reverberance judgment against the number of subjects of the four test sound fields

場中の39の試験音場である。このとき、被験者の50%以上は、残響感の判定平均値に隣り合う判定水準のいずれかを選定したことがいえる。

Fig. 10は4抜粋それぞれに対して、最大のバラつき（IQR）を持つ試験音場の箱ひげ図である。これからわかるように、全被験者を含めれば、被験者による判断のバラつきは音楽専門家についても大きくなりうる事がわかる。この実験では、Stravinskyの判断（IQR）の標準偏差が最も大きくなった一方、他の3曲のバラつきは同等である。この現代音楽（Stravinsky）は、変拍子、不協和音、複数の打楽器などの特徴を有しており、リスナによって期待する残響感が分かれている可能性がある。これに対し、古典派からロマン派の3曲は、50%のリスナの判断が平均値 ± 0.5 であることから、リスナの嗜好の幅は狭く、曲による違いが判断のバラつき幅に与える影響は小さいことがわかる。

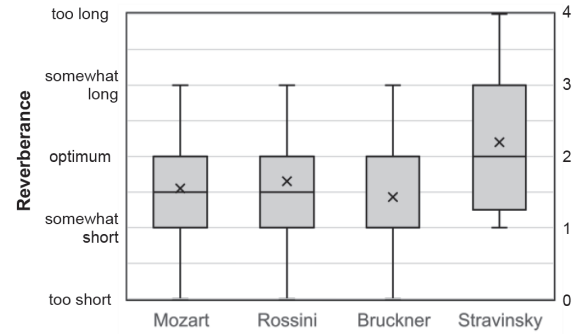


Fig. 10 4抜粋の残響判定分布を示す箱ひげ図
The distribution of reverberance judgment for the four excerpts. The test sound fields are p101 in Hall-B, p101 in Hall-B, p21 in Hall-A, and p21 in Hall-C for Mozart, Rossini, Bruckner, and Stravinsky, respectively. Stravinsky's spread is the largest, indicating that judgments largely vary in some halls, while those in the other three are the same.

5 結論

オーケストラ作品に対するコンサートホールの好ましいRTは、音楽のテンポによって決まる。この研究結果から、*Presto*から*Allegro*までの音楽に対して、最適残響感 $RT_M = 1.7 - 2.2s$ のときに得られる。他文献を参考にして、この議論を外挿すると*Presto*から*Andante*まででは、最適残響感 $RT_M = 2.0 - 2.2s$ のときに得られる。 RT_M と EDT_M は同等に残響感を良好に説明する物理量であるが、現時点では設計段階でEDTを精度よく計算することは容易でない²²⁾。言葉を変えれば、Sabine以降、依然として音響設計においてはRTが唯一の信頼できる指標といえる。

参考文献

- 1) B. B. Atal, M. R. Schroeder, and G. M. Sessler, *Proceedings of the 5th International Congress on Acoustics*, Liège, pp.1b, G32 (1965).
- 2) M. Barron, *Acta Acust. united Ac.*, 66 (1), 1-14 (1988).
- 3) G. A. Soulodre and J. S. Bradley, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 294-301 (1995).
- 4) W. Kuhl, *Acta Acust. united Ac.*, 4 (Suppl. 2), 618-634 (1954).
- 5) L. L. Beranek, *Concert halls and opera houses* (Springer-Verlag, N.Y., 2004), Chap. 4.
- 6) J. Pätynen, V. Pulkki, and T. Lokki, *Acta Acust. united Ac.*, 94, 856-865 (2008).
- 7) J. Meyer, *Akustik und musikalische Aufführungspraxis* (PPVMEDIAN GmbH, Bergkirchen, 2015), Chap. 8.1.2.
- 8) H. Kuttruff, *Room Acoustics* (Spon Press, London, 2000), Chap. 7.3.
- 9) T. Lokki (2007), *Proc. Of the International Symposium on Room Acoustics*, Seville, 1-6.
- 10) A. W. Mills, *J. Acoust. Soc. Am.*, 30, 237-346 (1958).
- 11) T. Hidaka, L. L. Beranek, S. Masuda, N. Nishihara, and T. Okano, *J. Acoust. Soc. Am.*, 107, 340-354 (2000).
- 12) ISO 3382-1:2009, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- 13) F. Zotter and M. Frank, *Ambisonics* (Springer Nature Switzerland AG, Cham, 2019).
- 14) S. Kuwano and S. Namba, *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 21, 6, 319-322 (2000).
- 15) T. Hidaka and N. Nishihara, *J. Acoust. Soc. Am.*, 151, 2192-2206 (2022).
- 16) M. Barron, *Acta Acustica united Ac.*, 81, 320-331 (1995).
- 17) M. R. Schroeder, *Proc. of the 5th International Congress of Acoustics*, Liège, G31 (1965).
- 18) Y. Ando, *Concert Hall Acoustics* (Berlin, Springer-Verlag, 1985), Chap. 4.3.
- 19) T. Hidaka, K. Kageyama, and S. Masuda, *Acustica*, 67, 68-70 (1988).
- 20) https://en.wikipedia.org/wiki/Tempo#Basic_tempo_markings (2025-6-2).
- 21) T. Hidaka, N. Nishihara, K. Suzuki, and T. Nakagawa, *Acoust. Sci. & Tech.*, 45, 204-215 (2024).
- 22) C. Wang and J. Kang, *Building Simulation*, 15, 1729-1745 (2022).