

コンサートホールの最適残響時間ーピアノとヴァイオリンソロー

Favorable Reverberation Time in Concert Halls Revisited for Piano and Violin Solos

日高 孝之 Takayuki Hidaka*1 西原 法子 Noriko Nishihara*2

梗概

コンサートホールの好ましい残響時間は室内音響設計における基本的課題である。本報告では、定期的にオーケストラ演奏会を催しているコンサートホールにおいて測定した両耳室内インパルス応答を用いて、ピアノとヴァイオリンソローの試験音を作成した。これを判断材料として、16名の音楽専門家が残響感と透明感を判定し、最適残響時間を求めた。

キーワード：残響時間, 室内音響設計, 主観評価実験, コン서트ホール

Summary

The preferable reverberation time of a concert hall is a fundamental issue in room acoustic design. Binaural room impulse responses (RIRs) measured with a dodecahedral loudspeaker in concert halls, where orchestra concerts are regularly held, are used. Then, anechoic recordings of music by piano and violin, excerpts from cadenzas, are convoluted with the equalized RIR. Next, subjective experiments are conducted to seek favorable reverberation times. Reverberance and clarity were judged by 16 music experts.

Keywords: reverberation time, acoustic design, subjective experiment, concert hall

1 はじめに

1.1 既往研究

コンサートホールや劇場の音響設計において、残響時間は最も基本的な物理指標であり、基本的な図面情報から机上検討で予測計算できるという特長を持っている。ただし、目標値をいくつに設定するかによって、計画するホールのレイアウト、規模、構造、ひいては建設費に重大な影響を及ぼしうるパラメータでもある。

オーケストラの演奏会においては、交響曲とともに、協奏曲は重要なレパートリーであり、中でもカデンツァはその1つのクライマックスを形作っている。また、シンフォニーホールではソロリサイタルがしばしば行われるが、こうしたソロ演奏に対する好ましい残響時間についての報告は、これまでほとんど存在しない。本報告の目的は、最も演奏機会の多いピアノとヴァイオリンのソローに対する好ましい残響時間を明らかにすることである。以下では、残響音 (reverberation) を物理的用語、残響感 (reverberance) を主観的用語として使用する。

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。もう1つは、ホールの規模や演目に対してそれらに相応しい残響時間を解明することであり、本研究の視点は後者である。

音楽に対する最適残響時間を最初に検討したのはBekesy¹⁾と思われる。彼は2,000m³のオーケストラ録音用スタジオについて、2つの音楽 (Wagnerのタンホイザー行進曲とMozartのフィガロの結婚序曲) を対象として残響時間の好ましさを検討した。両者ともに残響時間は0.8秒が最適であり、周波数に依存しない方が良いと結論づけている。また、彼は演奏者数と最適残響時間の関係についても言及している。

Bolt/Doak²⁾は残響の初期部分が残響感と関係することに初めて言及した。同じく、Atal³⁾らは湾曲して減衰する残響過程では、初期部分の勾配が主観的な残響感と相関することを報告している。これらの結果から、初期残響時間 (EDT) がホールの残響感の評価指標として有用という見解が今日まで存在している⁴⁾。

Barron⁵⁾は英国の11ホールを対象に、実際の音楽会で音響主観評価に関するアンケート調査を行った。被験者は27名の音響コンサルタントである。これより、残響感との相関係数は、空席測定値から計算した満席残響時間RT_{occ} (500~

*1 技術研究所 博士(工学) Research & Development Institute, 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.

2,000Hz帯域の平均)について $r=0.39$, EDT_{occ} (125~2,000Hz帯域の平均)について $r=0.53$ を得た。この報告では、この回帰分析に適合しないことからロイヤルアルバートホールを除外しているが、これには何らかの他の要因が残響感に影響している可能性があるとのみ記している。なお、透明感 RT_M と最も相関($r=-0.51$)が高いが、音のバランスと相関する物理量は見出せなかった。

Soulodre/Bradley⁶⁾は北米のホールで測定したバイノーラルRIR (音源は12面体スピーカ)に楽音の無響室録音を畳み込み、疑似バイノーラル再生して心理実験を行った。音楽はフィガロの結婚序曲からの15秒である。これに基づき、残響感と各種物理量との相関を調べた結果、 RT_M について $r=0.8$, EDT (125~4,000Hzの平均値)について $r=0.97$ を得たと報告している。これはBarron⁵⁾の結果とほぼ同一である (BarronはOA平均のEDTが最も相関は高いとした)と述べている。このとき、残響感を「時間的に知覚する残響音の度合い。連続する音に対する一音の融合(ブレンド)」と定義し、被験者に説明している。

Lee/Cabrera⁷⁾は、残響感には残響時間とラウドネス (dBA) が関係すると報告している。このとき、彼らはSoulodreら⁶⁾と同じ残響感の定義を引用している。これは興味深い知見であるが、コンサートホール音響学の観点からは、実際のホールにおいて、残響感が変化するほどのラウドネスの違いが存在するかについては検討の余地がある。また、残響時間とラウドネス (ストレングス, G値) は互いに完全に独立なパラメータではないことにも注意を要する。ホールでの音楽演奏の音圧レベルは楽曲やオーケストレーションで概ね決まり、この2つが同じであれば、演奏会ごとに著しい差を生じることはない。したがって、残響時間の適正值を実験によって求めるときは、音圧レベルを通常値を越えて変化させないことが理にかなっている。一方、MozartとBrucknerの交響曲では約10dBの音圧レベルの違い⁸⁾が存在する。これは両曲の残響感の知覚に一定の影響を及ぼしている可能性がある。

Beranek⁹⁾は22名の著名指揮者と23名の専門的な評論家の協力を得て、ホールにおける音楽と音響品質に関わる心理属性の語彙を調べ、残響に関連する2つの用語として、残響感と残響音のラウドネスを提案している。また、Weinzierlら¹⁰⁾は残響音に関わる主観的属性として残響感、残響音の強さ、残響音の持続時間 (Nachhalldauer⁸⁾)、音に包まれた感覚を導いている。このとき、残響音の強さと持続時間は、音源の出力と暗騒音に影響されることに注意が必要である。

1.2 推奨残響時間

実際の音響設計において、最初の検討事項の1つは残響時間をいくつ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¹¹⁾、その大半は彼らの個人的判断・嗜好に基づくもので、科学的根拠はほとんど示されていない。

これに対して、Beranek⁴⁾は評価の高いコンサートホールを調査して、その結果に基づいて残響時間の適正範囲を示している。これは客観性かつ合理的な設計指針であり、彼の推奨範囲は適正な残響時間が満たすべき必要条件を与えているため、世界的に広く利用されている。

Kuhl¹²⁾は3種類のオーケストラ音楽に対する、主観的に好ましい残響時間を体系的に研究した。20のコンサートホールで録音した音楽を、延べ100~150人の被験者に提示して、最も好ましいと判断される残響時間を得た。彼は古典派 (Mozart, 交響曲第41番, 第1楽章からの抜粋, Fig. 1), ロマン派 (Brahms, 交響曲第4番, 第4楽章最終部), 現代 (Stravinsky, 「春の祭典」より生贄の踊り抜粋) について、それぞれ適正值は1.5, 2.1, 1.5秒となったと報告している。この結果は、今日もしばしば引用されているが、彼の研究対象はラジオ放送のモノラル聴取を前提に、録音会場としての最適値を求めることである。彼の研究における重要な知見は、最適残響時間は室容積に依存しない、音楽のスタイルに関係する、演奏のテンポの違いは最適残響時間には影響しない、ということにある。さらに彼は、演奏会場としての残響時間の適正值は、この結果よりも長くなること、同じカテゴリーのオーケストラ音楽では、曲目が違っても異なった結果が導かれる可能性は低いだらうと論じている。加えて、残響時間が0.05秒異なれば、その差は知覚される可能性があること、0.1秒の差はすべての被験者が知覚することを報告している。なお、この研究では演奏の録音は1本の無指向性マイクロフォンで行い、試験音はデッドなりスニングルームでモノラル再生されたことに注意を要する。その後、Somerville¹³⁾はKuhlの結果に

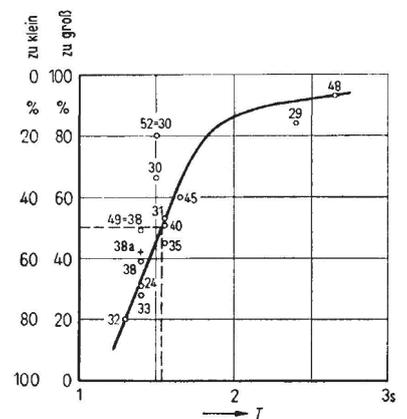


Fig. 1 Mozart交響曲第41番第1楽章に対し、残響時間を長過ぎると判断した平均判定値。破線が最適残響時間を示す¹²⁾。
 The average percentile judged for the 1st mov. of Mozart Sym. 41, by subjects stated that the reverberation was too long. The dashed line indicates the optimum RT¹²⁾.

対して、現代音楽については残響時間が2秒以下であれば放送、録音用途に非常に満足できると反論している。

同じ時期にReichardtら¹⁴⁾も、録音会場の残響時間適正値を求めるといった類似した検討を報告している。彼らは、数値的な適正値は示していないが、その結果も概ねKuhlと同等である。

著者の知る限り、Kuhlらと同じ手続きを踏んだ研究は、それ以後の約60年間報告されていない。21世紀になり、我々をとりまく要因は大きく変化しており、演奏形式、技術、なかでも金管楽器の機構、様々なホールでの聴取体験の比較が可能になったこと、録音再生装置の進歩、情報量の多様化による聴取者の感性の変化、などが挙げられよう。こうした状況は、今日の演奏会や聴衆を取り巻く環境に何らかの影響を与えた可能性がある。従って、主観的に好ましい残響時間を改めて検討する意義があると考えられる。

2 主観評価実験

2.1 室内インパルス応答 (RIR)

本報告はオーケストラ音楽を主目的とするコンサートホールを対象とする。無響室で録音した楽音を空席条件で測定した18会場のバイノーラルRIRに畳み込んで試験音を作成した¹⁵⁾(Table 1)。RIR測定では、12面体スピーカ(高さ1.5m)を舞台先端から3m後方の中心線上に置いた。受信点はメインフロアのほぼ中央とバルコニー第1列の中央付近を選んだ(Fig. 2)。評価対象には、1つの室内楽ホールをリストに加え¹⁶⁾。これらを合計したRIRの数は34であり、その中音域の残響時間の範囲は1.1~3.1秒である。Table 1に録音会場の諸元と物理指標の概要を示す。試験音の合成に際しては、63, 8,000, 16,000Hzの1/1オクターブバンド帯域のRIRが十分なSN比を確保するために、後部残響過程を外挿してダイナミックレンジを拡張した¹⁷⁾。この方法は、残響過程の位相情報は聴感に影響しないことを根拠としている^{18), 19)}。さらに、12面体スピーカは可聴帯域で不規則な振幅応答を持っているため、この特性を補正した²⁰⁾。

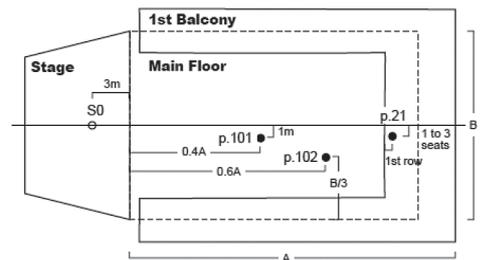


Fig. 2 音源 (○, 高さ1.5m)・受信点 (●) 位置
 The measuring positions: sound source (○, height 1.5 m) and receiver (●)

Table 1 対象とした18会場の諸元と受信点ごとの室内音響物理指標

The dimensions and objective parameters of the 18 concert halls

(添字は括弧内周波数の平均値: L (125, 250Hz), M (500, 1,000Hz), H (2,000, 4,000Hz), 3 (500, 1,000, 2,000Hz))

Hall	Receiver	Plan shape	N	V (m ³)	RT _L	RT _M	BR	EDT _L	EDT _M	C _{80,3}	C _{80,1-4k}	G _L	G _M	G _H	IACC _{E3}	Hall name
A	101	Fan + rectangle	2,074	11,800	1.44	1.14	1.26	1.63	1.40	1.9	2.8	7.4	4.1	4.3	0.81	
B	101	Fan + rectangle	1,932	9,200	1.26	1.22	1.03	1.29	1.35	2.6	3.5	5.1	5.3	6.8	0.63	
C	101	Fan + rectangle	1,331	6,550	1.30	1.45	0.89	1.24	1.37	1.5	2.2	7.2	8.5	10.8	0.55	
D	101	Fan + rectangle	1,945	16,290	1.91	1.61	1.19	1.97	1.90	2.3	4.0	3.8	6.2	7.0	0.54	
	21				1.71	1.59	1.08	1.83	1.78	-0.4	0.7	2.2	4.3	4.4	0.65	
E	101	Shoebbox + oval (rear)	2,100	10,352	1.70	1.65	1.03	1.86	1.68	0.1	-0.1	8.6	8.9	7.6	0.37	Palau de la Música Catalana, Barcelona Spain
	21				1.79	1.69	1.06	1.58	1.74	0.6	2.0	7.8	7.8	7.4	0.47	
F	101	Semi-circular	1,000	10,300	1.74	1.66	1.05	1.90	1.70	0.4	2.1	7.6	9.5	8.5	0.72	
	102 ^a				1.90	1.68	1.13	1.50	1.80	1.0	2.1	6.4	8.0	5.5	0.46	
G	101	Fan + rectangle	1,318	12,500	1.98	1.82	1.09	1.87	1.63	2.2	3.0	5.9	9.5	9.3	0.46	
	21				1.90	1.82	1.04	1.69	1.62	-1.0	-1.4	5.5	7.0	4.2	0.34	
H	101	Shoebbox	1,980	11,600	2.21	1.95	1.13	2.60	2.08	-1.2	0.9	4.9	6.5	6.2	0.42	Musikhalle, Hamburg Germany
	21				2.15	1.96	1.10	2.50	1.95	-1.6	-0.8	5.9	5.7	4.6	0.39	
I	101	Shoebbox	1,230	11,100	2.31	1.97	1.18	2.38	2.07	0.3	0.6	6.7	7.9	7.0	0.71	
	21				2.47	2.01	1.23	2.49	1.92	-1.1	0.0	4.3	6.2	5.6	0.63	
J	101	Surround	2,008	28,000	2.17	2.12	1.02	1.75	1.76	0.2	0.5	7.2	7.3	7.4	0.57	
	21				2.29	2.19	1.05	2.08	1.64	-0.5	-0.1	2.8	4.2	4.0	0.64	
K	101	Surround	2,218	21,000	1.84	2.24	0.82	2.08	2.21	0.4	0.5	6.3	6.1	5.0	0.71	Philharmonie, Berlin Germany ^b
	21				1.97	2.25	0.88	2.10	2.25	-2.3	-1.9	2.5	3.9	3.1	0.46	
L	101	Fan + rectangle	2,017	25,000	2.80	2.44	1.15	2.67	2.60	1.7	3.2	6.5	5.4	7.3	0.53	
	21				2.78	2.45	1.13	2.37	2.21	-1.6	-1.2	4.7	3.7	4.6	0.27	
M	101	Shoebbox	1,575	15,000	2.80	2.44	1.15	2.64	2.56	0.8	2.4	8.1	8.4	9.1	0.60	Konzerthaus Grosser Saal, Berlin Germany ^b
	21				2.89	2.49	1.16	2.52	2.42	-3.7	-2.4	7.8	6.2	4.3	0.33	
N	101	Surround	2,006	21,000	2.21	2.47	0.89	2.43	2.35	0.4	1.9	4.4	6.3	8.5	0.66	
	21				2.20	2.52	0.87	2.22	2.47	-1.4	-1.8	3.3	4.3	4.2	0.28	
O	101	Shoebbox	1,636	15,300	2.15	2.61	0.82	2.20	2.22	-0.6	0.9	9.7	10.2	11.7	0.33	
	102 ^a				2.05	2.57	0.80	2.05	2.47	-2.4	-1.8	8.2	9.6	9.1	0.25	
	21				2.09	2.60	0.81	2.03	2.54	-2.8	-2.3	5.8	6.6	6.0	0.30	
P	101	Shoebbox	1,680	15,000	2.82	2.94	0.96	3.11	2.88	-1.8	0.3	9.3	8.9	8.2	0.42	Grosser Musikvereinsall, Vienna Austria ^b
	21				3.01	3.06	0.98	3.42	3.13	-4.3	-4.0	7.2	7.6	5.6	0.32	
Q	101	Shoebbox	1,148	10,000	2.21	2.95	0.75	2.37	2.78	-1.6	-0.7	5.4	8.1	8.5	0.67	Dvořák Hall, Prague Czech
	21				2.30	3.00	0.77	1.85	2.69	-4.3	-3.3	6.7	6.7	6.7	0.45	
R	101	Shoebbox	440	2,150	1.56	1.29	1.21	1.91	1.41	1.8	2.5	11.8	11.5	11.0	0.36	Konzerthaus Kleiner Saal, Berlin Germany
	21 (Chamber hall)				1.56	1.28	1.22	1.59	1.24	2.6	3.2	10.4	9.2	8.9	0.38	

a: センターラインから離れた受信点については4.3節で議論する。 b: 詳細は文献⁴⁾ 参照

2.2 試験提示音

ソロ演奏機会が最も多いピアノとヴァイオリンの楽曲を無響室で録音した。その際、演奏の音楽的水準を確保するために、国際的な日本人ソリストに演奏を依頼した。使用した楽器は、ピアノはスタインウェイのコンサートグランド、ヴァイオリンはストラディバリウスである。マイクロフォンの位置は録音技師が通常選択する位置付近であり、ピアノは平面上、鍵盤から約1m前方でキャビネットの端部付近、断面的にはキャビネットの約60cm上方、ヴァイオリンは立位で弾く奏者の正面約1mでヴァイオリンと同じ高さである。ピアノはステレオ録音した後にモノラル信号にミックスダウンし、ヴァイオリンはモノラル録音とした。

両楽器について、古典から現代までの10曲の無響室録音を作成するとともに、スコアから、演奏技法、ニュアンス、ダイナミックレンジを検討した結果、音域などの多様性がこの実験に適した時間内に集約されていることから、次の曲を選んだ。

- ・ Grieg, ピアノ協奏曲ハ短調, Op. 16, カデンツァ1-31小節 継続時間: 103.7秒 (Fig. 3 (a))
- ・ Mozart, ヴァイオリン協奏曲第4番ニ長調, K. 218カデンツァ2-29小節 (ヨアヒム版) 継続時間: 58.2 秒 (Fig. 3 (b))

試験音はヘッドフォン (Sennheiser HD660S) で提示したが、被験者の聴取し易さに配慮して、CDプレーヤ (Sony DVP-FX730) からのアナログ再生と、USB端子を介してPCに接続したヘッドフォンアンプ (Fostex FS-3DA) から再生する2つの方法を用意した。

提示音の再生レベルは、ピンクノイズを各RIRに畳み込んで、その再生レベルが同一となるようにRIRの振幅を調整した後、類似した演目の演奏会での録音データを参考にして決めた。なぜなら、曲のスタイルが類似していれば、それらのL5値に大きな違いはないことから、これが畳み込んだ楽音の再生レベルの指標になると考えた。当然ながら、RIRのスペクトル構造の違いにより、提示音のレベルは同一にはならず、予備検討においても、ラウドネスの違いは僅かであるにも関わらず、音質の違いが予想以上に大きいことがわかった。こうした聴感上の音質変化はこの種の研究において避けることのできない今後の課題であろう。ここでは、畳み込んだ信号の音圧レベル(左右チャンネルの平均値)は、ピアノでは82~86dBA (L5), 77~82dBA (Leq), ヴァイオリンでは78~79dBA (L5), 73~75dBA (Leq) である。

最後に評価用サンプル音源CDの作成経験が豊富な録音技師に提示音のチェックをお願いした結果、当該試験音が心理実験ソースとして好ましい音質であるとの判断をもらった。

なお、本研究で求める好ましい残響時間評価の対象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スペシャリストである。参加した被験者16名の内訳は、音楽家が6名、音楽マネジメント関係者が2名、録音技師4名、音響コンサルタント4名であり、なかでも、我国の最高水準の音楽家の協力を仰ぐことができたことを付記しておく。

2.3 アンケート用紙と試験方法

アンケート用紙は残響感と透明感についての質問からなっている。これらはKuhl¹²⁾の検討した属性と同じであるが、ここでは少し異なった判定基準を採用した。残響感について、彼は「不足」、「丁度良い」、「過剰」の3段階に分類したが、ここでは「不足」、「やや不足」、「適正」、「やや過剰」、「過剰」の5段階とした。記入に際して、「連続する音のつながりが濁っているか、分離し過ぎているか」を感じて判断しても良いと説明した。透明感には音楽のディテールが「聞こえない」、「ほぼ聞こえる」、「はっきり聞こえる」の3段階で判定した。

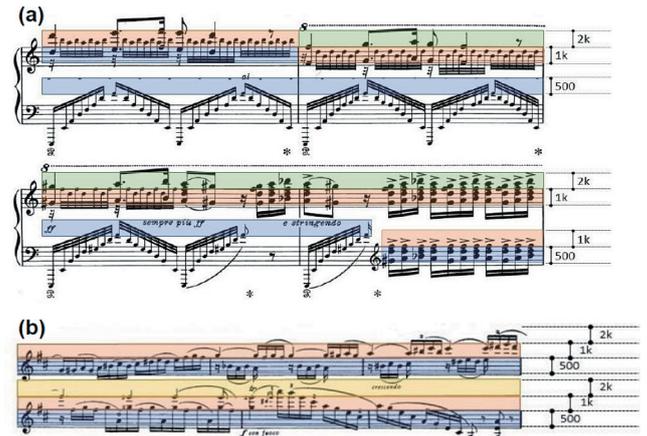


Fig. 3 試験提示音の抜粋。右側の縦線は、500, 1,000, 2,000Hz周波数帯域
Excerpt from the music scores chosen for this listening test. The vertical lines on the right indicate the 500, 1,000, and 2,000 Hz frequency bands.

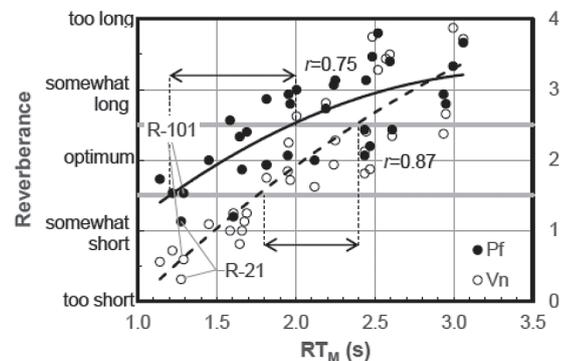


Fig. 4 残響感とRT_Mとの関係。実線はピアノ、破線はヴァイオリンに対する回帰曲線
The judgments of the reverberance plotted against RT_M for piano and violin. The regression curves are plotted as a solid line for piano and broken line for violin.

ここで評価している残響感とは、停止音における余韻に加えて、残響音が音楽に付加する音の豊かさであり、さらにMeyer²¹⁾は、「残響は、個々の声部が全体的な音に融合することを促し、音楽の時間的進行の中で個々の音符の間の短い隙間を埋めることで、メロディラインに一体感を与える」と述べている。被験者への事前説明では、これらの視点をもって残響感の評価を依頼した。

ピアノとヴァイオリンでの試験音の数は32と34である。後者は前述のRIRに加えて、メインフロア上の中心軸から離れた席の2つのRIRを追加した (P102, Fig. 2)。これは左耳と右耳のバランスが異なる場合に、何らかの主観的作用が生じるかどうかを調べるためである。また、ヴァイオリンについては34個の提示音の後に2つの提示音をさらに追加したが、これは繰り返し試験を意図している。

3 集計結果

3.1 残響感

3.1.1 RT_M

本報では判断の基準が等間隔尺度であると仮定して、Kuhl¹²⁾と同じく、残響感では5つの尺度を、「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、全被験者による判断の平均値を求めた。残響感と残響時間RT_Mとの関係をFig. 4に示すが、ピアノとヴァイオリンに対する相関係数は $r=0.75$ と $r=0.87$ である。ここで、回帰式には相関係数が若干高い値を示すことから、線形ではなく2次式を使用した。図において、縦軸の値が 2 ± 0.5 を「適正」と仮定すると、両楽器に対する好ましい残響時間RT_Mの値はそれぞれ1.2~2.0と1.8~2.4秒となる。一方、残響感とEDTMはRT_Mより少し低い相関を示し、それぞれ $r=0.70$ と $r=0.79$ であった。

ピアノについては、RT_Mがこの推奨値の範囲内であっても、判断はかなりバラつきを示し、この範囲内において適正と判断された件数は、15件中8件 (54%) に過ぎない。一方、残響時間が長くても (2.0~2.6秒)、10件中4件は適正と判断され、この4件はすべてメインフロア席である。ピアノの残響感について、RT_Mの許容範囲は比較的広いが、判断が分かれる傾向にあり、残響時間はピアノ演奏に対する十分な単一指標にはならないと考えられる。なお、一般的な推奨値 (例えば1.6秒) 以下の残響時間が好まれた要因の1つとして、試験音が技巧的な高速パッセージを多く含むカデンツァ抜粋であったためと考えられる。

ヴァイオリンでは、RT_Mは残響感とより良く対応する。適正範囲内において好ましいと判断された件数は13件中11件であり、RT_Mが2秒以下では、回帰曲線からのバラつきも小さい。一方、上限の2.4秒を越えても10件中3件は適正と判断された。この領域では、ホールの評価は残響が「過剰」と「適正~やや過剰」に判断が分かれる傾向がある。

3.1.2 C_{80,3}

周波数帯域の組み合わせを変えたいくつかの物理パラメータについて検討した結果、ピアノの残響感と最も高く相関したのはC_{80,3}である ($r=-0.88$, Fig. 5)。回帰曲線と適正範囲との交点で与えられる推奨範囲は0~+2.4dBであり、この範囲における適正と評価された音場は11/14 (79%) であった。また、若干の例外を除けば、C_{80,3}の回帰曲線からの偏りはRT_Mよりも小さい。ここで、C_{80,3}の影響を除外したときのRT_Mと残響感との偏相関係数は0.26、RT_Mの影響を除外したC_{80,3}と残響感との偏相関係数は0.71である。これより、ピアノに対してC_{80,3}は、残響感を良好に説明するパラメータであると言える。

C_{80,3}はヴァイオリンに対しても同様に相関が高く ($r=-0.87$)、この値はRT_Mと同等の値である (Fig. 5)。図より、適正範囲は-1.6~0.7dBとなり、これは80ms以降の後部残響エネルギーが豊富な音場が好まれることを示している。ピアノの適正範囲 (0~2.4dB) は、ヴァイオリンにとっての「やや不足」評価を含んでおり、これはピアノに適正なホールはヴァイオリンには若干、響きが足りないという見解に一致している^{22), 23)}。後述するようにC_{80,3}とRT_Mは互いに相関が高いことから、多重共線性効果を避けるためにもいずれか一方を残響感の予測パラメータとすることが好ましい。C_{80,3}とRT_Mの推奨範囲内では、それぞれ11/13 (85%) と10/16 (63%) が最適残響感になると判断されており、ヴァイオリンにとってもC_{80,3}が重要であることを意味している。

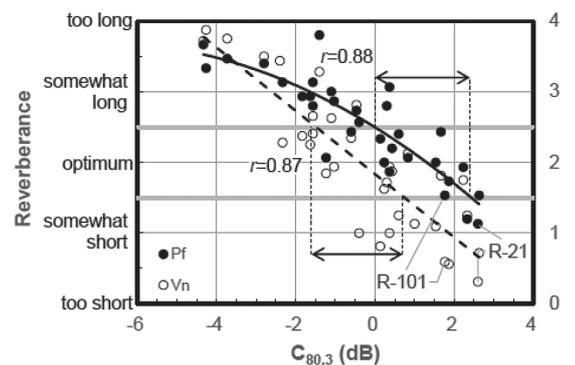


Fig. 5 残響感とC_{80,3}との関係。
 The judgments of the reverberance plotted against C_{80,3} for piano and violin.

3.2 透明感

透明感と最も高く相関したパラメータは $C_{80, 1-4k}$ (1,000, 2,000, 4,000Hzの平均値)であり、ピアノとヴァイオリンに対してそれぞれ $r=0.90$ と $r=0.87$ である (Fig. 6)。この2つの楽器に対して、1,000から4,000Hz帯域の寄与は重要である一方、500Hzの寄与は相対的に低い。つまり、透明感はそのそれぞれの楽器の最高音域を含む帯域 (Fig. 3) の影響がより大きいことを意味している。Fig. 6の回帰直線から、ディテールの聴取を阻害する境界を「ほぼ聞こえる」未満と仮定すると、ピアノとヴァイオリンに対してそれぞれ $C_{80, 1-4k}$ は1.0dB, 0.0dB以上となるべきである。 $C_{80, 3}$ も、ほぼ同程度の高い相関を有しており ($r=0.84$, $r=0.87$)、それぞれの境界値は0.1dB, -0.8dBである。この結果に関連して、Reichardtら²⁴⁾は、インパルス信号に対する全帯域の C_{80} を使用して、 C_{80} はオーケストラ音楽の時間的透明感と空間的透明感を説明する物理量であることを体系的な実験を通じて明らかにしている。彼らの結果と同じく、本研究でも C_{80} はソロ楽器の透明感を説明する信頼できる物理指標であることを示している。

4 考察

4.1 残響感と透明感

残響感と透明感は互いに高く相関するとともに ($r=0.91$ と $r=0.92$)、ピアノとヴァイオリンに対する回帰曲線はほぼ一致している (Fig. 7)、これは妥当な結果であると言える。なぜなら、残響感とは連続する2音間のギャップが残響音によって埋まって、音楽に豊かさと滑らかな繋がりを与えるか否かを評価している^{4), 25)}のに対し、本報で評価している透明感とは、主に連続音の時間的な識別性に関するためである。つまり、ソロ演奏の場合にはこの2つの心理属性 (残響感と透明感) は互いに独立ではない可能性がある。なお、ここでは透明感の空間的な視点は評価対象となっていないことに注意されたい。これに関連して、異なる声部が同時に演奏する音 (セクション間の音の分離) に関する物理指標と透明感の知覚との関係についての体系的な実験は、これまでほとんど報告されていない。

Fig. 8はTable 1に示した RT_M と $C_{80, 3}$ の関係のプロットである。この2つの物理量間の相関関係 ($r=0.75$) は、Fig. 7の主観パラメータ間の相関関係よりも劣っている。この主な理由は、透明感に対する両物理量の感度の違いである。Fig. 8では RT_M が同じ値でも $C_{80, 3}$ の値はバラついており、メインフロアとバルコニーに対するそれぞれの回帰曲線は RT_M が長くなると次第に離れていく。図には、音場のエネルギーが指数関数則^(*)に従って減衰するときの理論値が併せてプロットされており、メインフロアの多くがこの曲線から乖離しているのに対し ($r=0.71$)、バルコニーの大半は指数関数則に従っている。後者では、両物理量が強い依存関係 ($r=0.91$) にあると言える。

Fig. 9は典型的な初期反射音構造の比較である。このとき、 RT_M はほぼ同じ値であるが、 $C_{80, 3}$ は約5dB ($=5 \times JND$ ²⁶⁾) 異なっている。通常、直接音到来以後の100~200msで音場は物理的拡散に近づ

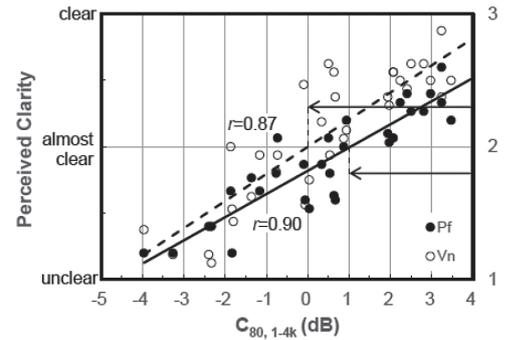


Fig. 6 透明感と $C_{80, 1-4k}$ との関係。
 The judgments of subjective clarity plotted against $C_{80, 1-4k}$.

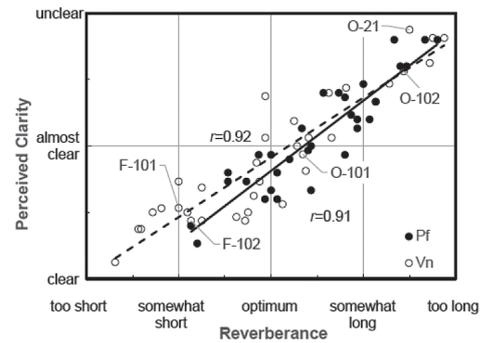


Fig. 7 残響感と透明感の関係
 The plot of reverberance vs clarity.

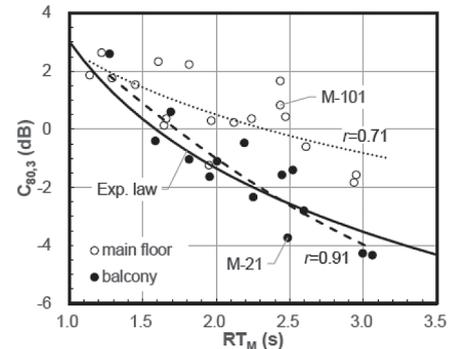


Fig. 8 RT_M vs. $C_{80, 3}$ をメインフロアとバルコニーで区別した散布図
 The plot of RT_M vs $C_{80, 3}$ compared to the main floor and balcony seats.

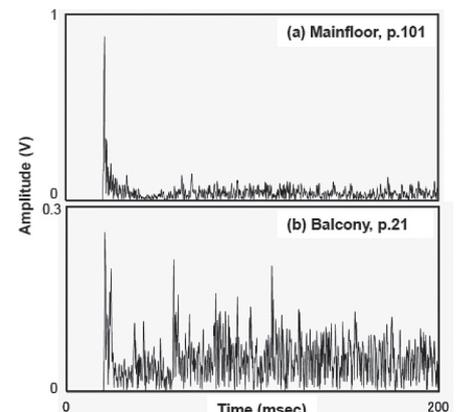


Fig. 9 Hall M-101とM-21 (Fig. 8参照)のモノラル測定によるRIRのヒルベルト変換から求めた振幅の2乗包絡線
 The squared envelop functions are calculated by the Hilbert transform. RIRs are measured with a monoaural microphone at M-101 and M-21 (see Fig. 8).

くので²⁷⁾、2つの位置での後部残響過程に有意な差はなく、両者のRT_Mはほぼ同一の値である。Fig. 9 (a)はメインフロアであるが、初期エネルギーはほぼ直接音だけで決まっており、これがFig. 8において指数関数近似による理論曲線から、C₈₀値が乖離している理由である。一方で、バルコニーでは直接音のすぐ後に多数の反射音と散乱音が引き続いて生

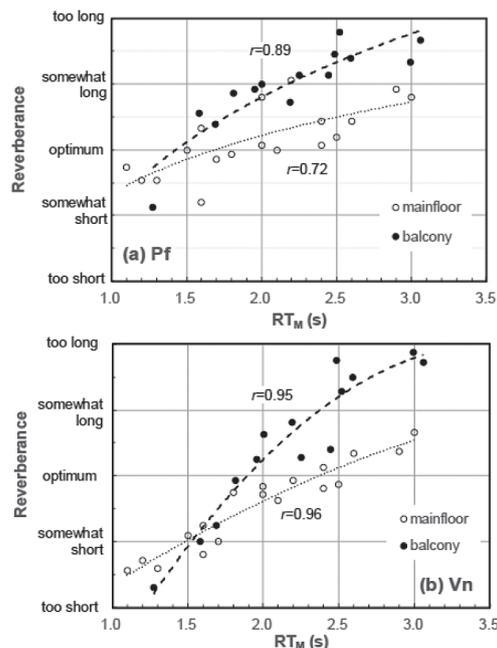


Fig. 10 メインフロアとバルコニーで分離したときの残響感とRT_Mの関係
The plot of reverberance vs RT_M comparing the main floor and balcony seats.

じている (Fig. 9 (b))。心理的に言えば、連続する音符は直接音によって識別されるが²⁸⁾、このとき、初期反射音が強過ぎてはならず、かつ直接音を聞き分けるヒトの聴覚をマスクするほどの短い遅れ時間で到来すべきでない²⁹⁾。Fig. 9の2つの反射音パターンは、こうした観点を明確に示している。

(*) : 時刻における音響エネルギー密度を $I(t) = I(0) \exp(-13.8t/RT)$ と仮定すると、 $C_{80} = -10 \log [\exp(13.8 \times 0.08/RT) - 1]$ を得る。

4.2 メインフロア vs. バルコニー

メインフロアとバルコニー席を分けてプロットすると、残響感に対するRT_Mへの依存性に明白な違いが生じる (Fig. 10)。一方、C_{80,3}について、これら2つの座席カテゴリーに対する回帰曲線はほぼ一致しており、両楽器のC_{80,3}への依存性には顕著な差は見られない (Fig. 11)。メインフロアでは全ての座席でC_{80,3}が約-2dB以上であり、全ての判定は「やや過剰」以下に収まっている。これに対して、バルコニーではほぼ全ての席が、同一ホールのメインフロアよりも大きな残響感であると判定されている。この結果は、我々が日常的に感じている両座席カテゴリー間の音質の違いと良く対応している。ここで重要なのは、C_{80,3}が同じであれば、それに対応する残響感はほぼ同じになることである。

この実験ではピアノに関して、メインフロアでは、RT_Mが約3秒に及んでも、その評価は「やや過剰」以下にとどまっている (Fig. 10 (a))。その回帰曲線の勾配が緩いことは、残響感の判断において、残響時間への依存性が弱いことを意味している。この結果を補うような、メインフロアとバルコニー席の音質を区別・分離する第3の物理パラメータの解明が望まれる。一方、ヴァイオリンについては残響時間に、より強い依存性を持っていることは明らかである。

Fig. 11 (a)において、N-21は回帰直線から偏りが大きいことから、特異値と考えられる。ただし、被験者によるその判定は安定しており、C_{80,3}が推奨範囲にあるにもかかわらず、13/15人は残響感「過剰」(13/15人)、透明感「詳細が聞こえない」(14/15人)と判定した。

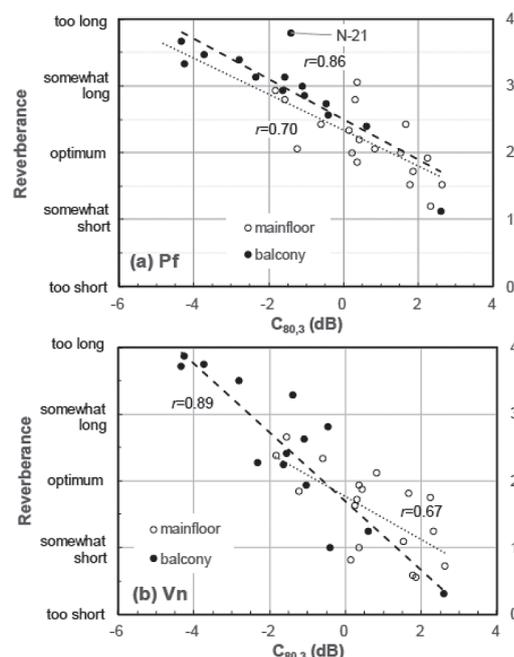


Fig. 11 メインフロアとバルコニーで分離したときの残響感とC_{80,3}の関係
The plot of reverberance vs C_{80,3} comparing the main floor and balcony seats.

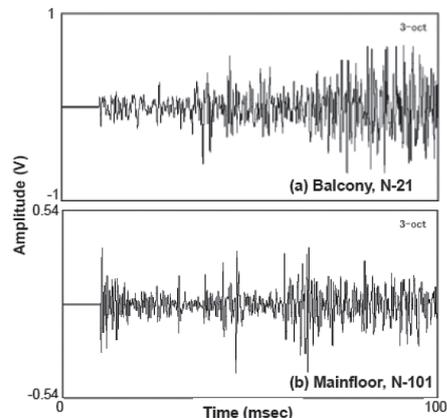


Fig. 12 Hall Nで8の字型マイクのポールゼロをステージセンターに向け、測定したリフレクトグラム
The reflectograms measured at hall N with a figure-eight microphone, directing its pole zero to the stage center.

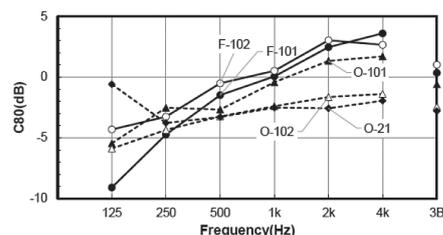


Fig. 13 Hall FとHall OにおけるC₈₀
The C₈₀ of halls F and O

双指向性マイクロフォンで測定したこの位置でのリフレクトグラム (Fig. 12 (a)) を参照すると、直接音に続いて、強い側方反射音の塊が約30ms遅れて到来している。このワインヤード型ホールでは、客席を囲む初期反射面はかなり大きく、かつ滑らかな石材でできており、ほとんど拡散反射は発生しない。これに関連して、Griesinger³⁰⁾は「(特に後方の座席で) 過剰な初期反射音が直接音を混濁させる。…最近のホールは、1次反射音を側壁や天井から返すことに重点が置かれているが、その結果は悲惨である」と述べている。さらに、ピアノの音は1,000~4,000Hz帯域では、鉛直・水平方向に鋭いローブからなる複雑な放射指向性を持っており、そのために、輝かしい響きを持つ放射方向はかなり狭い範囲に限られてしまう⁸⁾。すなわち、空間的に様な反射音が到来しない席では、ピアノの音質に不満を生じることになる。上述の判定結果はこの考察によっておそらく説明できよう。なお、同一ホールのメインフロア (N-101) では正常な判定が得られており (Fig. 12 (b)), 反射音のパターンは正常である。

4.3 センターラインから離れた席の評価

ヴァイオリンの判定に際して、センターラインから離れた2つの受音点P102 (Fig. 2, Table 1) を聴感試験に混入したが、Hall OではP102とP21が、Hall FではP101とP102がともにほぼ同一の残響感を持つ結果となった (Fig. 7)。Fig. 13が示すように、これらホールの2つの受音点は C_{80} の値が500Hz以上の帯域においてほぼ等しく、この結果は、ソロ演奏の残響感 C_{80} によって説明できることを改めて示している。

4.4 室内楽用ホール

本報告では、シンフォニーホールにおけるヴィルトゥオーゾ的なソロ演奏を対象としている。勿論、室内楽ホールでもこうしたタイプの作品は重要な演目である。そこでヴァイオリンの判定時に、1つのシューボックス型室内楽ホール (多数の室内楽演奏会を催している国際的に著名なホール) を評価対象のリストに追加した (Hall R, Table 1)。

この結果、その残響感 C_{80} はメインフロア、バルコニー席に差はなく、ピアノについては「やや不足」、ヴァイオリンについては「不足」と判断された。透明感 $C_{80,3}$ はメインフロア、バルコニー席とも「はっきり聞こえる」の判断となったが、一部の評価者はメインフロアでのピアノを「ほぼ聞こえる」と判断した。この原因は無指向性音源でRIRを測定したことによるものと考えられ、実際のピアノ演奏会に比べると、聴感上過剰な反射音を生じた可能性がある。室内楽ホールに求められる響きはシンフォニーホールに求められるものとは異なり、奏者との視覚的な親密感が重要⁸⁾であり、室内楽ホールの残響感の適正性は音の提示だけで論じるのは難しいかもしれない。

5 結論

ピアノとヴァイオリンのソロ演奏に対する RT_M の適正値はそれぞれ1.2~2.0秒と1.8~2.4秒となり、両方を満足する適正値は1.8~2.0秒となる。ただし、この範囲を上回っても $C_{80,3}$ が適正値であれば、適正な評価を得られる場合がある。ソロ演奏の残響感の知覚に関して、 $C_{80,3}$ は RT_M と同等またはそれ以上に有効なパラメータである。ピアノとヴァイオリンについて $C_{80,3}$ の最適範囲は0~2.4dBと-1.6~0.7dBとなり、両者共通の適正範囲は0~0.7dBとなる。さらに、残響時間が同じであっても $C_{80,3}$ が異なれば、残響感には顕著な差を生じることとなり、言い換えれば、音場の残響感が適正であるか否かは $C_{80,3}$ によって判定可能である。つまり、ソロ演奏に対する残響感 C_{80} は初期エネルギーと残響エネルギーとのバランスに依存すること、ひいては、ソロ音楽の残響感と透明感 $C_{80,3}$ は非常に近い関係性を持つ心理属性であると解釈できる。

上述の結果から、ピアノとヴァイオリンにとって、残響感と透明感を同時に満足する $C_{80,3}$ の値は、それぞれ0.1~2.4dB、-0.8~0.7dBとなり、その共通範囲は0.1~0.7dBとなる。この幅は狭いが、この2つの属性を同時に満たすような好ましい音場を実現できる可能性はある。シンフォニーホールにおいて、ピアノは最も演奏機会が多いソロ楽器である一方、ピアノにとっての $C_{80,3}$ の推奨範囲を達成することは必ずしも容易ではない。本報告の結果は、過剰なバルコニー席数を持つ大規模なホールは残響感の観点からは好ましくないことを示唆している。

本報では紙面の制約により、判断とスコアの関係、実験結果の信頼性と安定性については割愛した。これらについては文献²⁰⁾を参照されたい。

謝辞

本研究にご支援いただいた竹中研究所の鈴木和憲、山田祐生、両主席研究員に感謝します。

参考文献

- 1) G. v. Békésy, *Elektrische Nachrichten Technik*, 11, 369-375 (1934).
- 2) R. H. Bolt and P. E. Doak, *J. Acoust. Soc. Am.*, 22, 507-509 (1950).
- 3) B. B. Atal, M. R. Schroeder, and G. M. Sessler, *Proceedings of the 5th Int'l Congress on Acoustics*, Liège (1965), 1b, G32.
- 4) L. L. Beranek, *Concert halls and opera houses* (Springer-Verlag, N.Y., 2003), Chapter 4.
- 5) M. Barron, *Acustica*, 66, 1-14 (1988).
- 6) G. A. Soulodre and J. S. Bradley, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 294-301 (1995).
- 7) D. Lee, D. Cabrera, W. L. Martens, *International Symposium on Room Acoustics*, August 29-31 (2010), p4a.
- 8) J. Meyer, *Akustik und musikalische Aufführungspraxis* (PPVMEDIAN GmbH, Bergkirchen, 2015), Chap. 8.2.
- 9) L. L. Beranek, *Sound*, 1, 22-26 (1962).
- 10) S. Weinzierl, S. Lepa, and D. Ackermann, *J. Acoust. Soc. Am.*, 144, 1245-1257 (2018).
- 11) S. Kaak, Master thesis, Technische Universität Berlin (2013).
- 12) W. Kuhl, *Acustica*, 4, 618-634 (1954).
- 13) T. Somerville, *Acustica*, 5, 99-100 (1955).
- 14) W. Reichardt, E. Kohlsdorf, and H. Mutscher, *Hochfrequenztechnik U. Elektroak.*, 64 (1), 18-25 (1955).
- 15) T. Hidaka, L. L. Beranek, S. Masuda, N. Nishihara, and T. Okano, *J. Acoust. Soc. Am.*, 107, 340-354 (2000).
- 16) T. Hidaka and N. Nishihara, *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, 357-372 (2004).
- 17) K. Suzuki and T. Hidaka, *International Symposium on Room Acoustics*, September 15-17, pp. 297-303 (2019).
- 18) H. Kuttruff, *Proceedings of the 14th International Congress on Acoustics*, Beijing (1992), F2-2.
- 19) H. Kuttruff, *Acustica*, 74, 3-7 (1991).
- 20) T. Hidaka and N. Nishihara, *J. Acoust. Soc. Am.*, 151, 2192-2206 (2022).
- 21) J. Meyer, *Kirchenakustik* (Erwin Bochinsky GmbH, Frankfurt am Main, 2003), Chap. 2.2.2.
- 22) G. C. Izenour, *Theater Design* (McGraw-Hill, New York, 1977), Fig. 9.11 and Chap. 9.3.5.
- 23) L. L. Beranek (personal communication, 1991).
- 24) W. Reichardt, O. Abdel Alim and W. Schmidt, *Acustica*, 32, 126-137 (1975).
- 25) L. L. Beranek, T. Hidaka, and S. Masuda, *J. Acoust. Soc. Am.*, 107, 355-367 (2000).
- 26) ISO 3382-1:2009, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2009).
- 27) T. Hidaka, Y. Yamada, and T. Nakagawa, *J. Acoust. Soc. Am.*, 122, 326-332 (2007).
- 28) L. L. Beranek, *J. Acoust. Soc. Am.*, 139, 1548-1556 (2016).
- 29) D. Griesinger, *J. Acoust. Soc. Am.*, 133, 3224-3232 (2013).
- 30) D. Griesinger, *Acoust. Today*, 7, 15-23 (2011).