

氏名(本籍)	おかのとしゆき (兵庫県)		
学位の種類	博士(情報科学)		
学位記番号	情 第 31 号		
学位授与年月日	平成16年1月15日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当		
最終学歴	昭和62年3月 神戸大学大学院工学研究科環境計画学専攻 修士課程		
論文題目	音像の空間的属性に着目したホール音響評価指標の研究		
論文審査委員	(主 査)		
	東北大学教授 鈴木 陽一	東北大学教授 木下 哲男	
	東北大学教授 牧野 正三	東北大学教授 吉野 博	
	(工学研究科)	(工学研究科)	

論文内容要旨

第1章 序論

本研究は、コンサートホールの音響評価において重要な主観評価属性である音像の2つの空間的属性、音像幅と音像偏移、に関する検討である。ホール音場は、音源(演奏体)から直接受聴者に到達する直接音、壁などで反射し、直接音から少し遅れて到達する初期反射音、更に反射を繰り返して到達する後部残響音から構成される。このうち、直接音と初期反射音は融合し、音源の像である音像を形成する。従って、音像幅と音像偏移は、いずれも、初期反射音性状に大きく影響される。初期反射音はホールの室形状と関連するので、音像の2つの空間的属性に着目することによって、ホールの室形状の違いがもたらす音響評価の違いを有効に表現する評価指標を見いだすことができる考えた。

音像幅は、初期反射音の補強効果の1つであり、音像の水平方向の拡がり言う。音像幅は強い側方反射音によって増大し、音響評価の高いホールで大きい傾向がある。しかし、反射音が強すぎると、音像が音源の視覚的な位置からずれ、音像偏移の阻害効果となる。従って、音像幅は音像偏移を生じない範囲で最大化する必要がある、これら2つの空間的属性の評価指標が必要となる。

従来、音圧レベル指標(G)、両耳間相関($IACC$)、側方エネルギー率(LF_0)などが音像幅の物理指標として提案されている。初期反射音の評価と関連する LF_0 や明瞭さ指標(C_{80}) は、インパルス応答の初期 80 ms を初期反射音部分としているが、両耳間相関では、後部残響音も評価に含めて来た。また、両耳間相関に影響する両耳信号差は、周波数によって生じ方が異なるが、全ての周波数帯域を一律に扱って来た。そこで、遅れ時間と周波数の範囲を限定し、感度の良い指標にする必要があると考えた。一方、音像偏移の評価指標はこれまで提案されていない。以上から、本研究の目的を、(1)音像幅の違いを最も感度良く表現する評価指標の提案、(2)音像偏移の生起条件の把握と評価指標の提案、(3)提案した評価指標の目標値の設定、の3項目に定めた。

第2章 音像幅の評価指標の提案

本章では、初期反射音に対応した音像幅の違いを感度良く表現する3帯域両耳間相関指標($1-IACC_E$)を提案した。また聴感実験で初期反射音性状の違いによる音像幅の差異を調べ、評価指標との対応関係を確認した。

まず、実在ホールで測定したインパルス応答の比較から、既存の音響評価指標で用いられて来た 80 ms が、初期反射音の範囲の上限として妥当と判断し、音像幅と正の相関を示す $1-IACC_E$ (E は初期の 80 ms を示す)を両耳

間相関指標とした。また、音像幅に関する両耳間相関の等寄与帯域を探索し、(1) 側方反射音の 250 Hz～2 kHz の各 1/1 オクターブ帯域の成分は音像幅の増大にほぼ等しく寄与する、(2) 500～2300 Hz の信号と、200 Hz 以下の信号は、両耳間相関と音圧レベルが等しくても寄与が異なる、ことから、500 Hz、1 kHz、および 2 kHz の 3 つの 1/1 オクターブ帯域の平均値を 3 帯域両耳間相関指標(1-IACC_{E3})とした。

次に、合成音場を用いた聴感実験によって、音像幅と評価指標の対応関係を検討した。初期反射音の諸条件を変化させ、125 Hz～4 kHz の周波数帯域ごとに、音像幅と両耳間相関指標(1-IACC_E)および側方エネルギー率(LFE)の関係性を求めた。1-IACC_Eは、音像幅と 125 Hz～4 kHz の各帯域で有意な相関を示した。また、特に 500 Hz～2 kHz の 3 帯域において感度が高く、寄与がほぼ等しい。図 1 に、それら 3 帯域における 1-IACC_Eと音像幅の対応関係を示す。一方 LFE と音像幅の対応関係は、250 Hz と 500 Hz 帯域でのみ有意となり、比較的弱い。

最後に、音像幅と音圧レベル指標の対応関係を調べるため、355 Hz 未満の低音域の利得(G_{Elow})と、355 Hz 以上の中高音域の利得(G_{Ehigh})をパラメータとした聴感実験を行った。その結果、 G_{Elow} の変化は、 G_{Ehigh} の変化に比べて、音像幅に約 2 倍寄与することが判った。

以上の検討によって、3 帯域両耳間相関指標(1-IACC_{E3})と音圧レベル指標(G_{Elow} または G_{Ehigh})の組み合わせを音像幅の有効な評価指標として提案した。

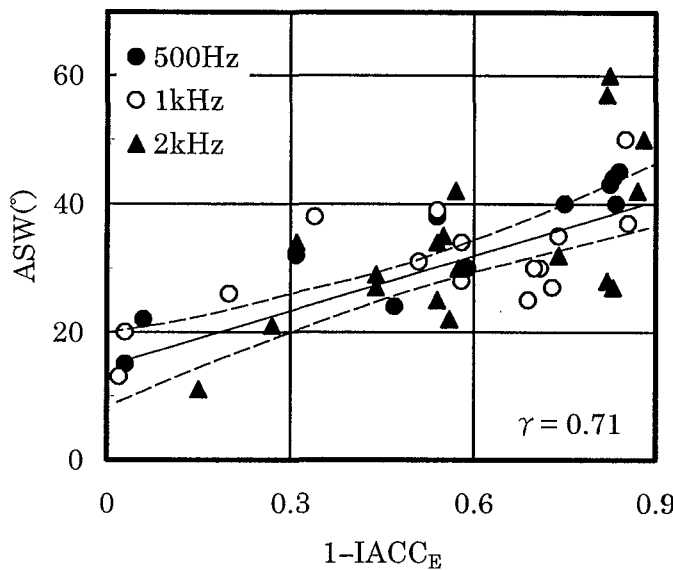


図 1 500 Hz、1 kHz、2 kHz の 3 帯域における両耳間相関指標(1-IACC_{E3})と音像幅の対応関係。

第 3 章 音像偏移評価指標の提案

本章では、強い側方反射音によって生じる音像偏移、および左右対称な音場で生じる音像偏移の生起条件を探索し、評価指標を提案した。

初めに、強い側方反射音によって生じる音像偏移を、音像偏移を生じない普通音像型(0 型)と音像偏移の生じ方が異なる 3 つの音像偏移型(1～3 型)に分類した。型の数字が大きいほど音像偏移が顕著であり、ある音場で生じる、最大数字の型を代表音像偏移型とした。聴感実験の結果、型によって生じやすい周波数帯域が異なることが判り、また、各代表音像偏移型に対応する物理指標が見いだされた。それらはいずれも両耳間相互相関関数から導かれ、(1) 遅れ時間軸で $\tau = 0$ ms から最寄り位置のピークの遅れ時間(τ_0)、(2) τ_0 におけるピークと、 $|\tau| \leq 1$ ms におけるそれ以外の最大ピークの振幅比(α_{lat})、(3) 両耳間相互相関関数が $\tau = 0$ ms で負となる"逆位相"条件、の 3 つである。また、各周波数帯域で、両耳間相関指標(1-IACC_E)が一定値を超えると、それらの指標値によらず、特定の代表音像偏移型に当てはまらない。音像方向に像を生じる 0 型または 1 型と、像を生じない 2 型または 3 型の生起は、1-IACC_E と上記 3 つの物理指標で判別され、正答率は 0.81 であった。

次に、左右対称な音場における音像偏移について検討した。楕円形ホールを中心線上を模擬した合成音場を用い

て聴感実験を行い、音像偏移の生起条件を調べた。楕円形ホールで特有の、後側方から入射する左右対称な反射音対の諸条件を変化させた。主な音像偏移である頭上偏移と後頭部偏移について検討した結果、両者はそれぞれ、生じやすい入射方向、遅れ時間等の条件が異なることが判った。また、それらを解消するには、後側方から入射する相対遅れ時間差 1 ms 以内の反射音対の、いずれかの反射音を消す必要がある。

頭上偏移は、音源信号の 6~10 kHz の成分を除去すると生起しないので、音像の仰角知覚に関するスペクトルキューの働きによるものと考えられる。また、鼓膜位置における実験音場の利得を周波数分析した結果、頭上偏移生起率と有意な相関を示す物理指標が見いだされた。それは、中心周波数が 6.3 kHz の 1/3 オクターブ帯域のパワーを基準とした、a) 100~400 Hz, b) 630 Hz~1.25 kHz, c) 1.6~2.5 kHz の 1/3 オクターブ帯域をまとめた、3 帯域のパワーの比で構成される。一方、後頭部偏移と特定の周波数成分との関連は見られず、スペクトルキューと関係ないと考えられる。

以上のように、強い側方反射音による音像偏移の評価指標を提案し、左右対称な音場で生じる頭上偏移に対応する物理指標を見いだした。

第 4 章 実在ホールにおける総合音響評価と評価指標の相関

本章では、実在ホールにおける総合音響評価と評価指標について検討し、音像幅および強い側方反射音によって生じる音像偏移の、評価指標の目標値を示した。

まず、稼動状態の実在ホールに対する総合音響評価を導いた Beranek, および Haan と Fricke による結果は、互いに一定の整合性が見られ、総合音響評価の客観性が確認された。

次に、各ホールの 3 帯域両耳間相関指標(1-IACC_{E3})と側方エネルギー率(LF_{E4})の平均値を求めると、両者に一定の相関関係が見いだされた。しかし、1-IACC_{E3}はホール間の差に比べてホール内のばらつきが小さく、 LF_{E4} よりもホールの違いを説明するのに適している。実際、各指標によって、Beranek の総合音響評価の判別すると、 LF_{E4} は最上位と中位の分類グループを区別できない。

また 1-IACC_{E3}は、後部残響音を含む場合や周波数範囲が異なる種々の両耳間相関指標に比べて、室形状の違いをよく反映する傾向がみられる。特に、音圧レベル指標(G_{mid} , mid は 500 Hz と 1 kHz の 2 帯域平均を示す)と組み合わせると、評価分類グループを 91%の正答率で判別できる(図 2)。更に、1-IACC_{E3}を他の 2 つ以上の評価指標と組み合わせると、他の種々の両耳間相関指標を用いた場合に比べて、組み合わせる評価指標によらず安定した対応を示した。これは 1-IACC_{E3}が、総合音響評価のある 1 面を正確に反映している現れと考える。同時に、異なる分類グループの 1-IACC_{E3}の差が、丁度可知差に比べて十分大きいことが確認された。最後に、最上位の分類グループと同等になるための目標値として、1-IACC_{E3}が概ね 0.6 以上、 G_{mid} が概ね 4~5 dB 以上(または G_{Emid} が概ね 0~1 dB 以上)を導いた。ただし、他の音響評価指標も同時に最適化される必要がある。

音像偏移評価指標について、実在ホールの座席ごとのデータを比較し、有害な音像偏移を生じない指標値の許容範囲を求めた。それは、表 1 に示す通り、1 kHz 帯域における α_{lat} の上限値、500 Hz 帯域において"逆位相"条件でないこと、および 500 Hz~4 kHz 帯域における 1-IACC_Eの上限値から成る。ここで、500 Hz~2 kHz の上限値を平均し、1-IACC_{E3}の上限値の目安として 0.85 を得た。

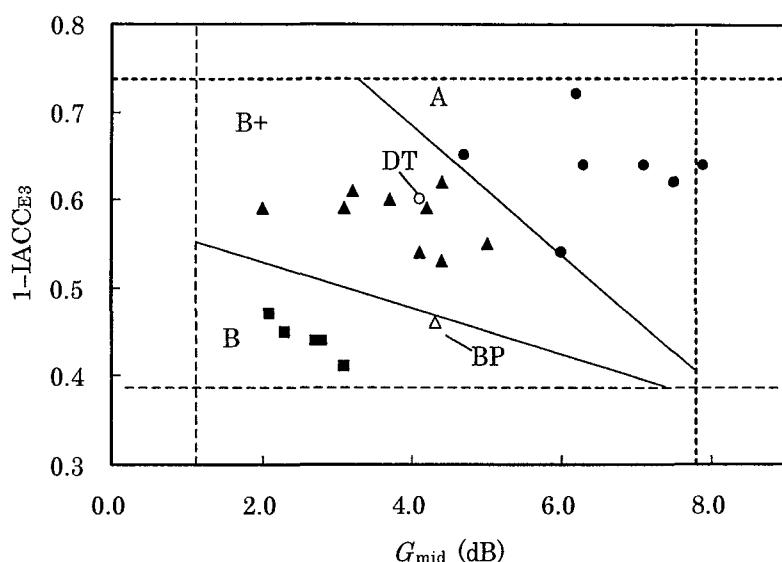


図2 1-IACC_{E3}と G_{mid} による Beranek の総合音響評価の判別. 丸印は A, 三角印は B+, 四角印は B の分類グループに属するホールのプロットを示す. 白抜印は誤判別, 黒塗印は正判別のケースである. 破線は, 各音響評価指標における, 全データのばらつきの 95% 区間を示す.

表1 有害な音像偏移を生じない評価指標の範囲

評価指標	1/1 オクターブ帯域中心周波数 (Hz)			
	500	1k	2k	4k
1-IACC _E	0.83 未満	0.85 未満	0.88 未満	0.88 未満
α_{lat}		2.7 未満		
“逆位相”条件	非逆位相			

第5章 結論

本研究を通じて, 音圧レベル指標との組み合わせによって音像幅の違いを感度良く反映する 3 帯域両耳間相関指標 (1-IACC_{E3}) を提案した. また, 強い側方反射音による音像偏移について, 両耳間相互相関関数から導かれる評価指標を提案し, 音像偏移を定量的に評価できるようにした. 同時に, それらの評価指標の目標値を示した. 更に, 両耳間相関が理想的に 1 となる左右対称な音場で生じる, 種々の音像偏移生起条件を探求し, スペクトルキューと関連して生じる頭上偏移の生起と対応する物理指標を見いだした. このように, 音像の空間的属性を評価する上で, 両耳間相互相関関数が非常に重要な手がかりになることが確認された.

本研究で提案した評価指標を, 残響時間など他の音響評価指標と共に用いることによって, コンサートホールの音響品質をより正確に評価することが可能となった. また, 提案した評価指標は, 設計工程の中で利用可能な音響模型実験やコンピュータシミュレーションの検討手段に適用性が高く, それらの有用性を増すと同時に, 室形状に関する音響設計の目標が, 数値によって, より明確に示された. このように, 本研究は今後設計されるホール音響品質の向上に貢献しうると考えられる.

論文審査の結果の要旨

コンサートホールの音響設計は、聴覚コミュニケーションに関する中で最も高度な価値判断を求められる問題の1つである。ホールの音響評価指標として広く用いられている残響時間が同じ値であっても、音響品質はホールの形状によって大きく異なる。しかし、これまで室形状設計に具体的な数値目標を示すことは困難で、高品質実現の制約となっていた。著者は、室形状と初期反射音特性が密接に関係することから、初期反射音に起因する音像の2つの空間的属性である音像幅と音像偏移に着目し、それらの有効な評価指標と目標値を導くための研究に取り組んできた。本論文は、その成果をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、初期反射音の補強効果である音像幅を取り上げ、音像幅を精度よく推定しうる評価指標について合成音場を用いた聴感実験による検討をおこなっている。その結果、500, 1000, 2000 Hz の3帯域における両耳間相関の平均値が音像幅を精度よく推定することを明らかにし、これを音像幅の指標とすることを提案している。これは、音像幅の高精度で実用的な評価値を提案したものとして評価できる。

第3章では、初期反射音に起因する阻害効果である音像偏移の生起を取り上げ、実際のホールで生じうる音像偏移について、合成音場を用いた聴感実験による検討をおこなっている。強い側方反射音による音像偏移および左右対称な音場における音像偏移の生起条件を探索し、各種の音像偏移に対して、両耳間相互相関関数及び両耳入力信号のスペクトル情報から導かれる評価指標を提案している。これは音像偏移を初めて定量的に予測可能とした成果として評価できる。

第4章では、世界的に評価されている多くのコンサートホールにおいて、従来から定評のある主観的総合音響評価結果と、提案した指標を含む音響評価指標との相関について検討している。総合音響評価の違いが、提案した評価指標によって高い正答率で判別可能なことを示し、同時に高い総合音響評価を得るための音響評価指標の目標値を導いている。これは、高品質ホールの室形状設計を行う際の具体的な数値目標を与えたもので、高く評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、コンサートホールの室形状設計に関し、音響学と聴覚情報処理過程の理解に基づき、主観的音響評価の精度向上を図ると共に、音響品質を高めるための具体的な数値目標を与えたもので、システム情報科学ならびに音響情報工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。