

氏名（本籍地）	やまだ よしなり 山田 祐生
学位の種類	博士（情報科学）
学位記番号	情博第353号
学位授与年月日	平成18年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻
学位論文題目	室内音響設計における妨害エコーの予測と評価
論文審査委員	（主査）東北大学教授 鈴木 陽一 東北大学教授 中尾 光之 東北大学教授 牧野 正三 （工学研究科）

論文内容の要旨

第1章 序論

妨害エコーは、直接音と分離して聞こえる反射音であり、だれもが「不快だ」と感じる粗悪な印象をもたらす性質を備える。コンサートホールや劇場では、運用に支障を与える致命的な欠陥となるため、設計段階で十分に検討を行い、適切な対策を講じる必要がある。そのため、本研究では、妨害エコーを発生させない室内音響設計を目指し、それを実現するための音場予測手法と音響評価指標について検討を行うこととした。

検討を進めるにあたり、既存のホールにおける妨害エコーの実態について文献調査を行った。その結果、曲面形の壁や天井が妨害エコーの発生要因となりやすいことが明らかとなった。これに対し、室内音響設計において音場解析手法として重用されている幾何音響理論は、曲面境界の反射解析への適用に際して、少なからず問題を有することが知られている。一方、妨害エコーに関する音響評価指標は、いくつか提案されているが、室内音響設計で実際に活用された事例は極めて少なく、その有用性は立証されていない。さらに、本質的な問題として、残響場における反射音の検知性について、これまで、詳細には検討されていない。

以上のことから、本論文では、近似波動理論に基づく曲面境界からの反射音の解析手法を提案するとともに、音場解析や模型実験の結果から妨害エコーを検出するための音響評価指標を提案することを目的とした。さらに、提案した手法を室内音響設計に適用するための具体的な方法について考察を行うとともに、本研究を通じて得られた知見を整理して、妨害エコーを発生させないための基本的な設計指針を提示することとした。

第2章 曲面境界からの反射音の解析手法

本章では、妨害エコーと関係が深い曲面境界からの反射音の解析手法を提案した。Helmholtz 積分を出発点とする近似波動理論を導入し、反射音の物理特性を精緻に求めることを可能とするとともに、幾何音響理論の適用性を明らかにすることを目標に検討を進めた。

はじめに、曲面境界の表面音場の規定方法について検討を行った。球面波が生成する表面音場の漸近解を導出し、その初項に対応する接平面近似の適用条件を示した。それは、次式で与えられる。

$$(2\pi a\lambda^{-1} \cos^3\theta)^{-1} \leq 0.1, \quad 6(2\pi s_s\lambda^{-1} \cos^2\theta)^{-1} \leq 1, \quad (1)$$

ここに、 λ は波長、 a は境界の曲率半径、 s_s は音源距離、 θ は入射角である。次に、接平面近似を仮定し、2次関数曲面からの反射音を定式化した。これにより、任意の曲面に関して、その形状を区分的な2次関数曲面を連結

て近似することにより、反射音を容易に計算することが可能となった。さらに、無限に長い2次柱面からの反射音を計算し、曲面境界の基本的な反射特性を明らかにした。図1には、検討結果の1例として、放物柱による反射音の空間分布を、反射音線の包絡である火線(黒太線)、領域を反射音線の照射領域と影領域に2分する影境界(点線)とともに示す。幾何音響理論を用いた場合、反射音の振幅は音線密度に比例するため、火線近傍や影領域では、実質的な振幅値を求めることができない。それに対して、近似波動理論を導入することにより、反射音場の定量的な把握が可能となった。最後に、近似波動理論に基づいて、曲面境界の音響反射係数を導出した。幾何音響理論に基づく音響反射係数を α_{GA} とすると、それは次式で表される。

$$\alpha = \alpha_{GA} \times \alpha_c \times \alpha_H(g_H) \times \alpha_V(g_V). \quad (2)$$

α_c は入射角に依存し、 α_H と α_V はパラメタ g_H と g_V に依存する。それらは、幾何学的条件と次の関係を有する。

$$g_H, g_V \propto |a| \lambda^{-1} \delta \phi^2 |as_r^{-1} - as_f^{-1}|, \quad (3)$$

ここに、 a は境界の曲率半径($a > 0$: 凹曲面, $a < 0$: 凸曲面)、 $\delta\phi$ は見込角であり、 s_r と s_f は、各々、観測距離と焦点距離である。図2には、 α_H と α_V のレベル値(L_H と L_V)を g_H と g_V の関数として示す。この図を用いることにより、幾何音響理論の適用性を把握するとともに、それに基づき求めた反射音の振幅を補正することができる。

以上の検討により、任意の形状の境界について、反射音の物理特性を定量的に把握することが可能となった。

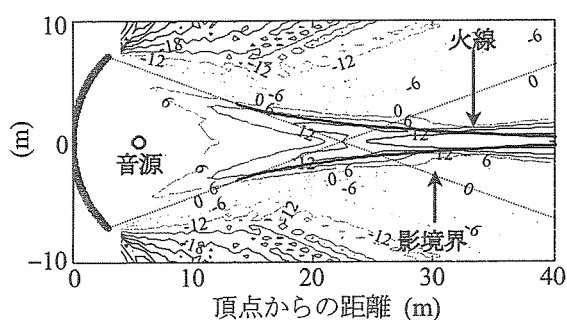


図1 放物柱による反射音の空間分布
(中心周波数 500 Hz のオクターブ帯域の平均)

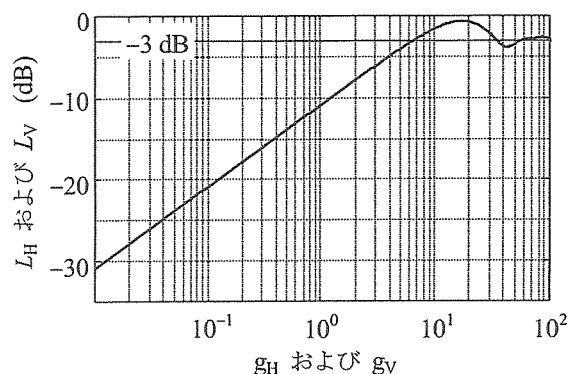


図2 音響反射係数の計算図

第3章 妨害エコーの検出手法

本章では、音場数値解析や縮尺模型実験の結果から妨害エコーを検出する手法を提案した。音場の構成要素を、反射を繰り返した多数の反射音の群である残響音、および、それ以外の独立して到達する反射音に分類し、それらに関する聴覚の情報処理メカニズムを考慮した検出手法を構築することを目標に検討を進めた。

はじめに、残響音、および、独立して到達する反射音が特定の反射音の検知性に与える影響を調べるために、残響場のインパルス応答を模擬した信号を用いて、反射音の検知限を測定した。その結果、妨害エコーの抑制に付して、残響音は極めて有意であることが分かった。次に、測定した検知限から、反射音の知覚に関する聴覚モデルを構築した。そのモデルは、ラウドネスの加算や減衰のモデルとして知られる RC 積分回路で表される。回各出力 (RMS) による検知限の曲線適合を行い、その時定数を $\tau=10$ ms、出力ゲインを $G=-2$ dB と定めた。この RC 回路の入出力の関係を図3に示す。RMS 出力波形は反射音の到来と同時に大きく跳ね上がる。ここで、反射音レベル L_{ENV} と跳ねる直前の RMS 出力波形レベル L_{RMS} の差 $L_{ENV}-L_{RMS}$ に着目すると、それは、反射音レベルが検知限を超えるか否かにより、正または負の値をとると考えられる。本研究では、このレベル差を Echo Index (EI) と呼ぶこととし、妨害エコーの検出指標として提案した。また、インパルス応答中の EI の最大値を Characteristic

Echo Index (CEI) と呼ぶこととし、音響設計のための評価指標として用いることとした。最後に、EI および CEI の音響評価指標としての有用性を検証するため、妨害エコーが発生した実在ホールの評価を行った。その結果、提案した評価手法は、90 % 以上の検出精度を備えており、音響評価指標として有用であることが立証されたといえる。その一方で、周期的な反射音が存在する場合や残響音に不連続な段差がある場合には、誤って評価される可能性があることが明らかとなった。これらを検出するための何らかの前処理を導入する必要があると考えられた。

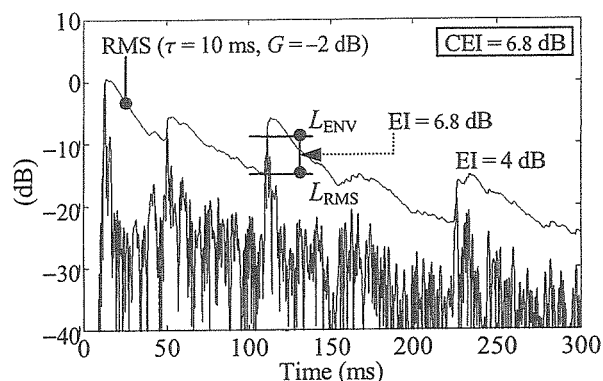


図3 EIによる妨害エコーの検出原理

第4章 室内音響設計への適用に関する総合的考察

本章では、提案した手法を室内音響設計へ適用する具体的な方法とその効果について考察するとともに、本研究から得られた知見を整理して、妨害エコーを発生させないための基本的な設計指針を提示した。考察を進めるにあたり、各手法の適用対象を、室形状を決める工程でのインパルス応答の予測とインパルス応答からの妨害エコーの検出と定め、既存の設計技術とあわせて効果的に活用する方法を示すこと目標とした。

はじめに、接平面近似の適用性について検討を行った。図4には、式(1)で表される接平面近似が成立する物理条件を示すとともに、実在ホールのデータと比較している。これより、この近似がホールの音場に対して妥当な仮定であることが確認された。次に、インパルス応答の具体的な計算方法として、虚像法や音線法との併用により解析対象を高次の反射音まで拡張する方法について述べるとともに、反射音レベルを逆 Fourier 変換法によらず、周波数領域で算定する方法を提案した。一方、数値解析によって予測された、残響音を含まないインパルス応答から妨害エコーを検出する方法として、第3章で測定した検知限レベルを評価基準として応用する方法を提案した。最後に、妨害エコーの発生と関連が深い曲面境界を対象として、基本設計で活用するための反射音の検討図を作成した。さらに、研究から得られた知見をまとめ、妨害エコーを発生させないための指針として提示した。主な指針を以下に記す。

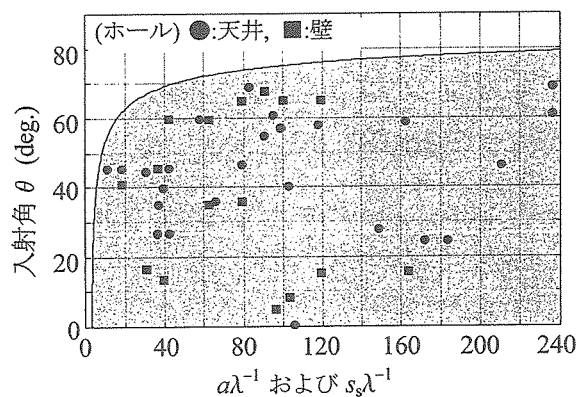


図4 接平面近似の成立範囲 (周波数 1 kHz)

- (1) 焦点や火線近傍の反射音レベルは少なくとも 10 dB 以上に達する。客席や舞台に形成されるのを避ける。
- (2) 室隅に用いる凹曲面の曲率半径は、3 m 以下に抑える。
- (3) 天井に凹曲面を用いる場合、曲面から曲率半径の 1/3 程度までの領域に空間を設ける。

第5章 結論

本章では、本論文の結論として、4章にわたる検討と考察の内容を要約した。本研究によって、妨害エコーを発生させない室内音響設計を行うために、従来では不足しており、しかも重要度が極めて高い要素技術を得ることができたと考えられる。接平面近似が成立しない条件に対応できる解析手法、および、周期的な反射音や残響音中の段差を検出する方法を見いだすことが今後の課題である。

論文審査結果の要旨

分離して聞き取れる反射音、即ち妨害エコーは、音響伝送品質を著しく低下させる。そのため、ホールなど良好な音響性能が要求される空間において、妨害エコーは致命的な欠陥となる。妨害エコーは曲面境界と密接な関係を持っているが、これまで、曲面境界からの反射音場の適切な解析手法や、その解析結果から妨害エコーの存在の有無を精度よく検知するための手法は存在しなかった。そこで、著者は、妨害エコーを発生させない室内音響設計の確立を目指し、妨害エコーを高精度に予測・評価するための研究に取り組んできた。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、妨害エコーの主要な原因となっている曲面境界からの反射音の物理特性を正確に与えるための解析手法について検討している。Helmholtz積分を出発点とする近似波動理論を導入し、球面波の漸近級数解の初項に対応する接平面近似を用いることを提案している。これにより、任意の曲面からの反射音を、従来の幾何音響理論と比較して、大幅な計算量の増加なしに、より高精度に求めることが可能となった。これは、実用的な室内音響解析手法として重要な成果である。

第3章では、音場を構成する多数の反射音の中から、妨害エコーの存在の有無を的確に判断するための検出・評価指標の提案を行っている。まず、残響場のインパルス応答を模擬した信号を用いて、反射音の検知限を測定した。次に、反射音の知覚に関する聴覚モデルを構築し、その出力と検知限とを比較することにより妨害エコーの有無を判断する評価指標 Echo Index を提案した。これを実在ホールのインパルス応答に適用したところ、90%以上の検出精度を持つことが示された。これは、数値予測や実測結果から妨害エコーの存在を精度よく検出するための提案として評価できる。

第4章では、第2章と第3章で提案した手法を室内音響設計へ適用するため、これらの提案手法を既存の設計技術とからめて効果的に活用するための具体的な方法について総合的に考察し、その結果に基づいて詳細な設計指針を与えている。これは、室内音響設計において、妨害エコーを効果的に防止することを可能にしたものとして高く評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、ホールの音響品質を著しく低下させる妨害エコーの発生を未然に防止するための音響設計指針を確立したものであり、システム情報科学ならびに音響情報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。