

論文の内容の要旨

論文題目 室内における音響拡散・反射体の効果に関する研究
氏名 横田 考俊

本論文は、室内、とくにコンサートホール等においてしばしば用いられる、音響拡散体および不連続音響反射板（浮雲）の設計指針を得ることを目的として、その音響特性を把握し、物理的/聴感的効果を明らかにすることに主眼をおいて検討を行った結果をまとめたものである。

まず序章において、優れたホールを創るためには音響拡散・反射体の設計指針（試料）が不可欠であることを示した。また実際の設計において、過去の研究成果があまり有効に活用されていない現状を示し、拡散・反射体の設計指針の提案においては、意匠設計者を納得させられるだけの音響効果の裏付けを伴ったものであり、また意匠設計の自由をある程度許すものであることが重要であることを示した。そのことを踏まえ本論文においては、次に示す3つの検討を行うことにより、直感的に理解しやすく、物理的/聴感的にその効果を保証した設計指針を提案することを最終目的とした。

- (1) まず拡散・反射体による音波散乱・反射現象を可視化・可聴化することにより、形状の変化とそれに起因した音響現象の変化を一对一で結びつける。
- (2) 音響現象を十分把握した上で、その物理特性および効果について定量的評価を行う。
- (3) 最後に拡散・反射体について聴感的評価を行う。

第1章では、本論文の全ての章において用いた数値解析手法である、時間領域差分法の定式化について概説した。この手法は、音場内における音波伝搬の過程を時々刻々追うことができる点が特徴であり、この手法を用いることで、室の形状や壁面の形状等、音場を構成する要素が変化した場合に、それに伴って変化する音波の伝搬の様子を直接的に捉えることができる。また室内音響の分野において最も重要とされるインパルス応答を直接求められる点も特徴である。

第2章では、基本的な室形状について、その音響特性を把握することを目的として検討を行った。基本的な室形状について、時間領域差分法による解析結果をもとに、音波伝搬の様子を可視化し、受音点におけるインパルス応答を可聴化した。音波伝搬の様子を可視化することにより、それぞれの室形状に起因した音響的特徴を直感的に理解することができた。また、室内の各点における累積エネルギーの空間分布を可視化し、その時間変化を見ることで、音場内においてエネルギーが集中する位置およびその時刻を確かめることができた。インパルス応答の可聴化からは、室形状によって異なる音波伝搬特性に起因した室形状ごとのインパルス応答の聴感的な違いを明瞭に確認することが出来た。

また、これらの検討を通して音場の可視化・可聴化が、形状とそれに伴う音響現象を直接的に結びつける有効な手段となり得ることが確認された。

第3章では、音響拡散体の物理特性について検討を行った。まず、拡散体の効果を直感的に理解するために、拡散体による音波散乱の様子を可視化した。この可視化により、拡散体による音波散乱現象を直感的に理解することができた。また、音響効果の優れたホールの一つとして有名なウィーンのムジークフェラインスザールの側壁に沿って並べられた女神像について、その音響効果（拡散効果）を確かめることができた。

つぎに拡散体単体による音波散乱特性について検討を行った。検討の結果、拡散体の音波散乱特性は、拡散体形状、構成寸法、音波の入射角度、入射波の波長によって変化することが確認された。このことを踏まえ、拡散体の音波散乱特性を直感的に理解できる表示方法を示すとともに、拡散体の設計資料として種々の拡散体形状について音波散乱特性をデータベースとして蓄えることが重要性であることを示した。その後、拡散体による音波散乱効果について定量的評価を行い、音波の入射角度ごとに散乱効果の高い拡散体形状を示すとともに、各形状について散乱効果の高い構成寸法を示した。

最後に、室内に拡散体を設置した場合の効果について検討を行った。その結果、拡散体形状によって室内音場の拡散性を高める効果が異なることが確認された。また同じ形状の拡散体であっても、室形状によってその効果が異なることが確認された。これは室形状および音源位置によって、壁面への音波入射角度が異なるためと考えられ、音波の入射角度に応じて、その入射角度に対して散乱効果の高い拡散体を用いることで、音場の拡散性を高める効果が得られることが確認された。この結果は、ある特定の入射角に対して散乱効果を示すような形状であっても、音波の入射角度を考慮することで、いわゆる優れた拡散体などと同程度の効果が得られることを示しており、今後の拡散体設計における形状デザインの自由度が増したことを意味している。

第4章では、浮雲の反射特性について物理的検討を行った。まず浮雲による音波反射の様子を可視化し、反射板形状および配置の違いによって音波反射の様子が異なることを確認した。また、浮雲からの反射音の周波数特性はピークディップをもつ乱れた特性になることを示し、その理由について、可視化された反射波の伝搬性状から考察を行い、ピークディップの生じるメカニズムを明らかにした。

つぎに平面的に配列された浮雲の反射特性について、Fresnel-Kirchhoffの近似回折理論を用いて検討を行った。その結果、受音点における反射特性は、各反射板の形状にはあまり影響されず、各反射板の配置に大きく影響されることが確認された。また、各反射板の配置については、規則性を持たせて配置した場合には、反射音の周波数特性が乱れた特性となり、ランダムに配置することで周波数特性の乱れを改善することができることを示した。

第5章では、音響拡散体および浮雲の聴感的効果について検討を行った。検討に先立ち、聴感実験に用いた4ch(6ch)数値音場シミュレーションシステムについて概説し、そのシステムの基本的な音場の再現精度について示した。

音響拡散体の聴感的な効果については、室内に拡散体を設置した場合のフラッターエコーの低減効果について検討を行った。検討の結果、拡散体の形状および寸法の違いによってフラッターエコー低減効果が異なることが確認された。また同じ拡散体であっても室形状によって、その効果が異なることが確

認められた。フラッターエコーの低減効果に関しては、拡散体による音波散乱効果と対応が見られ、拡散体による散乱効果の小さい条件においては、フラッターエコーが確認された。

最後に、浮雲からの反射音について聴感実験を行った。自由音場内に反射板を設置した状態を想定し、反射板なしの状態と比べて受音点において聴感的な差異が感じられるか、また設置する反射板を変えた場合に聴感的な差異が感じられるかについて実験を行った。実験の結果には個人差が見られ、反射音の違いを聞き分けられた被験者と聞き分けられなかった被験者がいた。違いを聞き分けられた被験者について考察を行った結果、「直接音から分離して聞こえる浮雲からの反射音の音色」を聞いて違いを判断した被験者と、「直接音と反射音をトータルに聞き、その音色の変化」によって差を判断していた被験者がいたことが確認された。これまで浮雲の音響効果については、反射音のみに着目して検討を行ってきた。この被験者実験の結果は、前者については反射音のみについて検討することの有意性を指摘しており、後者は直接音と浮雲からの反射音を分離せずに検討すべきであることを示唆するものであったと考えられる。

以上のように、本論文では室内における音響拡散・反射体の効果について物理的/聴感的検討を行った。その結果、設計方法について以下のような知見を得ることができたとともに、本論文で行ったような検討をさらに種々の拡散・反射体について行い、その音響特性について意匠設計者が参考にできる形でデータベースとしてまとめることの重要性が明らかになったと考えられる。

以下、本論文において得られた知見

まず音響拡散・反射体が用いられる音場について、その音響特性を把握することが重要である。その上で音響拡散体については、

- (1) 音波の入射角度を考慮して、その入射角度に対して散乱効果が得られる形状を選択する。
- (2) 拡散体の寸法についても音波の入射角度を考慮して決定する。凹凸の幅は、拡散を目的とする音波の波長程度とし、音波が斜めに入射する面については、入射角度が浅くなるほど幅を狭くしても良い。凹凸の出については、幅の15%~35%程度を目安とし、音波が斜めに入射する面ほど出を深くする必要がある。
- (3) 円柱などの壁面に沿って離散的に配置するものについては、配置間隔が重要であり、配置する物の寸法にもよるが、今回の円柱の様に直径が0.4 m程度の場合には、音波が斜めに入射する面については、1.5 m程度（最大で3.0 m程度）の間隔で配置することが効果的である。

浮雲については、

- (1) 各反射板の形状は反射特性にあまり影響が無いことから、意匠性を重視して良い。
- (2) 各反射板の面積は大きいほど有効な反射エネルギーが得られる。
- (3) 各反射板の配置は、規則性が無いように配置することでにより、反射音の周波数特性を平坦な特性にすることができる。

以上の点について留意し、意匠性を考慮して設計することが望ましい考えられる。また、それぞれ形状を決定した段階でその都度、本論文で用いた検討手法および評価手法によって、その物理的・聴感的効果を確認することが重要と考えられる。