

|          |                                               |
|----------|-----------------------------------------------|
| 氏 名      | 堀之内 吉成                                        |
| 学位(専攻分野) | 博士(工学)                                        |
| 学位記番号    | 論工博第3952号                                     |
| 学位授与の日付  | 平成19年3月23日                                    |
| 学位授与の要件  | 学位規則第4条第2項該当                                  |
| 学位論文題目   | 大規模空間を対象とした積分方程式法による音場解析の実用化に関する研究            |
| 論文調査委員   | (主査) 教授 高橋 大 式      教授 鉦井 修 一      助教授 伊勢 史 郎 |

### 論 文 内 容 の 要 旨

コンサートホール等の大規模空間を対象とした音場解析手法において、音線法・虚像法に代表されるような幾何音響的方法は既に実用の段階にあると言えるが、音の波動性を無視した手法であることから、低音域では適用できない。一方、境界積分方程式法のような波動的解析手法も各種の音響問題の解析に用いられつつあるが、その適用対象は比較的小規模であったり、床に座席が無く全面剛であるなど境界条件が単純化されたものなどが多い。本論文は、大規模空間を対象とした積分方程式法による音場解析の実用化を目標に、主に座席面の境界条件の設定ならびに解析に必要な計算負荷の低減について論じた結果をまとめたものであり、10章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的、さらに本論文の構成について説明している。

第2章では、本論文で用いる境界積分方程式法の基礎となる概念・式などを概説している。

第3章では、前章で記された境界積分方程式を実際に計算できる形に変換する手法について述べている。ここでは、一定平面要素を用いた3次元の音場解析において、2要素の位置に関係なく統一的に計算出来るアルゴリズムを示すとともに、実験値との比較や各種の解析解との比較を行い、本論文で用いる解析手法が十分な精度を持つことを示している。

第4章は、第6章以降において用いられる2次元問題の解析手法について、精度の検証を行っている。2枚の剛板を十分に狭い間隔で向かい合わせた実験装置を用い、その中の音場が十分に2次元音場と見なしうことを示し、さらに、その装置を用いた実験値と本論文の手法で求めた計算値との比較を行い、2次元の計算の信頼性を示している。また、解析解が既知の問題での比較検証も良好な結果が得られている。

第5章は、第3章の知見をもとに、55 Hz以下の低周波数域において簡単な形状のコンサートホール内の音圧分布ならびにインテンシティ分布の解析を行っている。その結果、境界積分方程式を用いた解析がホール形状の検討に有用であることが示されている。

第6章では、コンサートホールなどの大規模音響解析を行う際に取り扱いが困難である座席列を近似的に取り扱う手法について、2次元の開空間において基礎的な検討を行っている。人とイスを一つの吸音体とみなし、それが列状に並んだ「吸音体列」の周辺の音場を詳細に観察した結果、おおよそ125 Hz以下程度では一様と見なせることを明らかにし、具体的な物性値(インピーダンス、アドミッタンス)の推定方法を提案している。また、吸音体列での計算結果と、一様な仮想吸音面で近似して計算した結果を比較し、音源が平面波の場合、垂直入射に関しては良好な結果が得られること、必要とされる計算機容量、計算時間も大幅に削減されることなどを明らかにしている。

第7章では、座席周辺を対象に、定常状態での音圧分布及びインテンシティー分布を可視化し、その定性的な特徴について論じている。剛板モデルでの結果は、座席間及び座席下部空間のもっとも基本的な音場を理解するのに有効であり、垂直方向の定在波の卓越や、アンダーパスによるインテンシティーフロー、インテンシティーの渦の存在を確認している。また、吸音体列の場合では、アンダーパスによるディップの移動などを確認している。

第8章では、第7章で得られた知見をもとに第6章での検討内容を更に発展させ、座席列をその音響特性を再現する簡素

な仮想インピーダンス境界で置き換えることで解析負荷を軽減する方法について提案を行い、その妥当性、有効性を検証している。まず、座席列上の仮想境界設定位置における音響アドミッタンス値を算出し、これを層モデルによるアドミッタンスと比較することにより、座席形状周辺で座席列による過剰減衰効果（SDE）の現象が実際に生じている様子を示し、超低音域におけるアドミッタンス値の相違も明らかにしている。さらに、アンダーパスのない座席列周辺でのインテンシティー分布から、座席下部空間の音響特性がSDEを引き起こすことが示されている。また、ここで求めた数値的仮想面アドミッタンスをホール音響解析に用いることで、実際に座席を設置した場合の周波数特性を高い精度で再現できることを明らかにしている。

第9章では、法線微分型の境界積分方程式法（NDF）を用いた音場解析の計算負荷の低減について検討している。まず、2次元問題、3次元問題ともに、必要な精度を確保するための必要最低限の要素分割数を明らかにし、さらに、3次元問題において2要素間の距離が大きい場合は、第3章で述べた周辺積分を行わず近似計算を用いて解析を行うことで、十分な精度を保ったまま計算時間を短縮出来ることを示している。また、この近似手法と反復解法を組み合わせることで計算時間の短縮と必要メモリ容量の低減を図る方法を提案している。

第10章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、大規模空間を対象とした積分方程式法による音場解析の実用化を目標に、主に座席面の境界条件の設定、ならびに解析に必要な計算負荷の低減について検討したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 3次元問題において、平面一定要素内2重積分を要素周辺に沿った積分に変換し統一的に計算する解析手法を示し、その計算結果と理論解や模型実験結果との比較により、解析結果が十分な精度を持つことを示した。また、小規模なコンサートホールにおける低音域での音場を計算し、本手法が基本的なホール形状の検討を行う際の有用なツールとなりうることを示した。
- (2) 大規模空間の解析を行う際の境界条件の設定、特に室内音場の挙動に多大な影響を及ぼす座席面の取り扱いについて検討し、開空間、閉空間いずれの場合でも、その音響特性を再現する仮想インピーダンス境界で近似できることを示した。また、この手法の導入により要素数、計算時間ともに大幅に低減できることを明らかにした。
- (3) 解析に必要な計算負荷の低減を図るため、2次元問題、3次元問題それぞれについて十分な精度を保つための最低限必要な要素分割数について明らかにした。また、より計算負荷の大きい3次元問題については、要素間の距離に応じた近似計算を導入することにより、計算時間の大幅な低減が可能であることを示した。さらに、連立方程式の解法として反復解法を用い、かつ前述の近似手法を導入して解析することにより、記憶容量の大幅な低減も可能であることが示された。

このように、本論文は、積分方程式法を用いて大規模空間を対象とした音場解析を行う際に生ずる問題点の解決方法を提案し、その妥当性を検討したものであり、学術上においても、実際上においても寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。