

## 波動関数展開に基づいた散乱音場の準理論解析手法

木田, 佳孝

<https://doi.org/10.15017/1441244>

---

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済



## 博士学位論文の調査及び 最終試験 の結果報告書

論文調査委員会 幹事

職名 准教授 氏名 鮫島 俊哉



- 1 学位の種類 博士 ( 芸術工学 ・ 工学 ) ( 甲 ・ 乙 )
- 2 氏名 木田 佳孝
- 3 学位論文の題目 波動関数展開に基づいた散乱音場の準理論解析手法
- 4 学位論文の審査の結果の要旨

本論文では、音場の予測・解析の具体例として、基礎的な音響問題の一つである、障害物による散乱音場を取り上げ、その波動音響解析手法として、理論解析手法と数値解析手法を併用した「準理論解析手法」をいくつか新規に構築している。これらにおいては、理論解析手法としては、音場の支配方程式である波動方程式の一般解となる波動関数を用いており、数値解析手法としては、最小二乗法や Kirchhoff-Huygens の公式を用いている。そして、解析対象となる音場をそれらの波動関数の展開形式で表し、最終的には、その展開係数を未知数とするマトリクス方程式に帰着させるような手法となっている。申請者が本研究を遂行するにあたっては、適切な研究指導が行われた。

近年、音環境の設計や音響機器の開発に対して、有限差分法、有限要素法、境界要素法といった波動音響数値解析手法が活用されている。音場の支配方程式である波動方程式について、その理論解析解が得られている境界条件は限られているため、これらの波動音響数値解析手法は欠かせないものとなっている。本論文では、音場の予測・解析にまず求められることとは、設計段階における音場の基本的な特徴の把握や本質的な物理現象の理解であるとし、解析対象となる音場を厳密にモデル化し解析を行うのではなく、単純化したモデルについて解析すれば十分な結果が得られる場合もあることを述べている。また、解析モデルが単純化されることで、数値計算に頼ることなく理論的に解析を進められる部分が多くなるであろうことを述べ、このような場合に対しても波動音響数値解析手法を用いるのは、計算機資源の有効利用という観点からすると計算コストが大きすぎる場合があり、解析対象のモデルに応じて適切な解析手法を選択すべきであることを論じている。

これらの背景を基に本論文では、波動関数展開に基づいた準理論解析手法を提案し、障害物による散乱音場の解析手法としての有効性を確認することを試みている。準理論解析手法を適用する音場として、(1)障害物は単一の閉曲面で構成されており区分的に滑らかである、(2)境界条件は特定の座標系を用いて単純な形で表すことができ、極端な凹凸を持たない、ということ想定し、5つの準理論解析手法を構築している。

まずは、単一の障害物による散乱音場を対象に、障害物形状が球形に近い場合の準理論解析手法を構築している。これは、音場の展開表現には球座標系における波動関数である球波動関数を用い、展開係数については境界条件に関する二乗誤差を評価関数とした最小二乗法によって、マトリクス方程式に帰着させる手法となっている。次に、音場の展開表現には同じく球波動関数を用い、展開係数については音場の積分方程式である Kirchhoff-Huygens の公式を用いてマトリクス方程式に帰着させることで数値的に求める手法を構築している。次に、前述の球波動関数と Kirchhoff-Huygens の公式を用いた手法を基に、複数個の障害物による多重散乱音場へ対応可能な準理論解析手法を構築している。ここでは、多重散乱音場を扱うために新たに球波動関数の多重極再展開を導入して、展開係数に関するマトリクス方程式を組み立てている。さらに、障害物形状が球形から乖離し、扁平な形状となった場合における準理論解析手法を構築している。この手法では、マトリクス方程式の構築には Kirchhoff-Huygens の公式を用いているが、音場の展開表現には扁球座標系における楕円体波動関数

を用いることで、計算精度の向上を図っている。最後に、薄板による散乱音場の解析を目的とした手法として、音場については楕円体波動関数による展開表現を用い、マトリクス方程式については、境界条件に関する評価関数に最小二乗法を適用してそれを構築する手法を定式化している。

以上の5つの準理論解析手法を用いて実際に数値計算を行い、提案手法による計算結果と境界要素法による計算結果との比較を通して、提案した準理論解析手法の妥当性について確認するとともに、それぞれの手法の数値特性について綿密な検証を行っている。その結果、準理論解析手法の適切な使用方法と、その適用範囲を明らかにし、整理している。

本研究によって得られた成果により、解析条件によっては、境界要素法などの純粋な数値解析手法よりも、本論文で構築した準理論解析手法を使用することが、解析精度や計算コストの観点から有効であることが示されている。このことは、波動音響解析に基づく、各種の音環境の設計や音響機器の開発に寄与するものと考えられる。

以上より、学位審査を厳正に実施した結果、本論文は博士（工学）の学位授与に値するものと認める。

## 5 最終試験の結果の要旨

最終試験を兼ねて、当該博士申請論文に係わる公開発表会を開催した。音響心理学、音響工学、音響生態学、建築音響学、電気音響・信号処理、および音響教育の専門家など、関連分野の専門家が出席した。

申請者の発表に対して、(1)提案手法の計算精度を検討した周波数範囲が低域に限られており、応用する際にそれで十分か否か、(2)計算精度を真数およびレベルで見たときの妥当性、(3)提案手法にてユーザが設定すべきパラメータが煩雑であるが、最も重要なものはどれか、(4)計算タスクとして取り上げた円柱の形状に最も適した座標系は何であるのか、(5)提案手法の妥当性について数値計算のみと比較を行うことの妥当性、(6)提案手法が元の波動方程式およびその理論解と、どの程度の整合性を有しているか、などについて、活発な質疑・討論が行われた。いずれの質疑についても、申請者から納得のいく説明が得られた。

以上の公開発表会の終了後、本最終試験について厳格に審査した結果、審査委員合議で、合格と判断した。