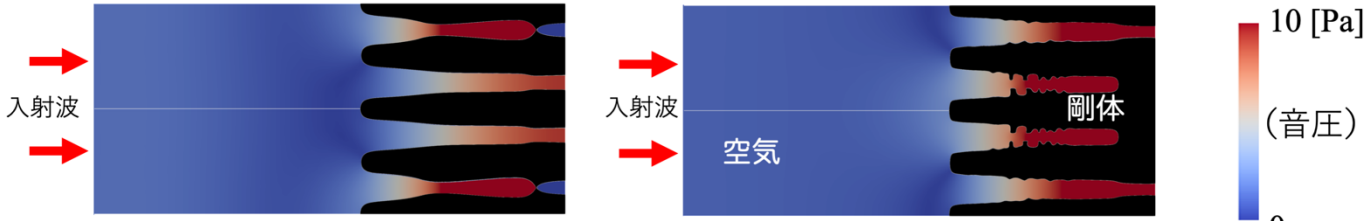
研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

研究題目	境界層効果を考慮した音響メタマテリアルのトポロジー最適化法の構築	報告書作成者	野口　悠暉
研究従事者	野口　悠暉		
研究目的	私達の快適な生活の実現には，騒音の低減や音質の向上等の観点から効率的な音波の制御が必要となる．このために，自然界に存在する均質材が示さないような特異な音響特性を示す人工材料である音響メタマテリアルが注目されている．音響メタマテリアルは，負の屈折率や負の質量密度，負の体積弾性率等，通常の音響材料では見られない特性を示すことが知られており，これらを用いた革新的なデバイス（音響クローキング，音響ハイパーレンズ，音響ダイオード等）の実現が期待されている． メタマテリアルの多くは，微小で複雑な形状を有するユニットセル構造が周期的に配列された構造を有しており，メタマテリアルの示す特性はその構造に強く依存する．このため，所望の特性を示すメタマテリアルを得るために試行錯誤的なアプローチに基づきメタマテリアルの設計を行うのは非常に困難である． このような問題を解決する方法としてトポロジー最適化が挙げられる．トポロジー最適化は，物理モデルと数理最適化手法に基づき構造物の最適な形状を同定する，構造最適化手法の中でも最も設計自由度の高い手法である．1980 年代にトポロジー最適化の概念が提唱されて以降，構造問題を中心にトポロジー最適化の研究例は多く報告されており，近年では音響問題を対象とした適用例も見られる．例えば，防音壁や吸音構造の最適化例や，負の屈折率を示す音響メタマテリアルを対象とした研究例も報告されている． 一方，音響問題を対象とした従来の最適化手法では，構造表面に本来存在する熱・粘性境界層の影響が無視された系を前提に最適化理論が構築されている．境界層効果は流路の表面で現れるため，メタマテリアルのように表面積の占める割合が大きな構造においてその影響が顕著となる．このため，音響メタマテリアルの系において境界層効果を無視してモデリングを行えば，実際の物理現象と大きく乖離した現象を扱っていることとなり，たとえトポロジー最適化によってメタマテリアルの設計案が得られたとしても，その構造が所望の機能を実際に示すとは限らない． そこで本研究では，境界層効果を考慮したトポロジー最適化法を構築する．本研究で得られた最適化手法を援用することで，最適化計算によって得られた音響構造体が，設計者の意図した機能を発揮することが期待でき，防音デバイス等，様々な音響デバイスの高性能化に繋がると考えられる．さらに，境界層を考慮した音響メタマテリアルの最適設計によって，境界層効果を最大限に利用した革新的な音響デバイスの実現も可能になると考えられる．		

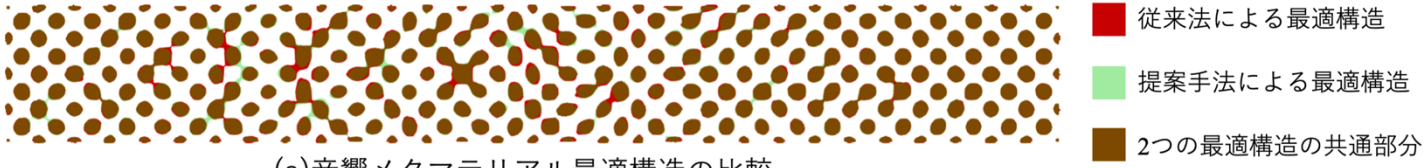
研究内容	前述の研究目的を達成するために，以下の事項について研究を行った． **・SLNS モデルによる境界層効果の評価に基づくトポロジー最適化法の構築** トポロジー最適化の過程では，設計対象の構造物の性能を表す目的関数を繰り返し評価する必要がある．このため，境界層効果を考慮したトポロジー最適化を行うためには，計算効率良く境界層効果を評価可能な適切な数理モデルが必要となる．本研究では逐次線形化ナビエ・ストークスモデル（Sequential Linearized Navier-Stokes model, SLNS モデル）を導入し，トポロジー最適化法と組み合わせた手法を提案する．SLNS モデルは，流れ場及び温度場に相当するスカラー場を解析した後に音場を解析する弱連成解析を特徴としており，非線形ナビエ・ストークス方程式の系を解析する通常の流体解析と比較して計算コストが極めて小さく，最適化計算に適している．まず，SLNS モデルによって得られる音圧分布を用いて目的関数を設定し，レベルセット法に基づくトポロジー最適化法の枠組みで最適化問題の定式化を行った．次に，目的関数を最小化するための形状更新の指針となるトポロジー導関数を近似的に導出し，有限要素法に基づく最適化アルゴリズムの構築を行った． **・吸音構造の最適設計** (1)の手法の妥当性を確認するために吸音構造を対象にトポロジー最適化を行い，従来の音響問題を対象としたトポロジー最適化によって得られた最適構造と比較を行う．なお，従来法では境界層効果を考慮しない，ヘルムホルツ方程式を用いた音波伝搬問題のモデル化が行われており，提案手法と従来法とで得られる最適構造との形状の差異は，境界層効果によるものと考えられる． **・音響メタマテリアルの最適設計** さらに，(1)の手法を用いて音響メタマテリアルの最適化計算を行う．ここでは代表的なメタマテリアルとして，負の屈折現象を実現するメタマテリアルを対象とする．メタマテリアル内は狭小な流路が多く存在することから，境界層効果を考慮した場合と無視した場合とで設計案に差異が生じると考えられる．

研究のポイント	これまでの音響問題を対象としたトポロジー最適化の研究例の多くは，境界層効果を無視したモデルに基づき最適化手法が構築されてきた．近年，いくつかの研究例で境界層効果を考慮した構造最適化が行われているが，構造物の断面形状のみしか扱えないモデル等，解析で扱える形状に制約のあるモデルが最適化手法と組み合わせられた研究例や，トポロジー最適化とは異なり，構造物の外形形状のみしか設計変数として扱えない形状最適化が行われた研究例が報告されているのみである．本研究で導入した SLNS モデルは可聴音の音波に対して広く有効であり，解析で扱う形状に制約はない．さらに，本研究では最適化計算に必要なトポロジー導関数を近似的に導出することに成功している．これによって，最適化過程で空孔が創出される等の形態の変化も許容するトポロジー最適化が可能となった．SLNS モデルに基づく音響解析は計算効率が良いため，SLNS モデルとレベルセット法に基づくトポロジー最適化手法を組み合わせた提案手法を用いれば，境界層効果を考慮しつつ音響構造体を効率的に最適設計できる．
研究結果	**・吸音構造の最適設計**　図 1(a)は従来法によって得られた最適構造を，(b)は提案手法によって得られた最適構造を示す．(a)では滑らかな表面形状が見られるのに対して，(b)では複数の突起状の構造が見られる．これは，(b)では構造物の表面積を増やし，境界層効果を利用して吸音率を向上したものと考えられる． **・音響メタマテリアルの最適設計**　図 2(a)は，従来法と提案手法で得られた最適構造を比較したものである．境界層効果を考慮した設計案は，考慮しない設計案と比べて，構造が占める面積が小さいことがわかる．これは，境界層効果によってメタマテリアルを透過する波のエネルギーが吸収されるのを防ぐ効果があると考えられる．図 2(b)と(c)は境界層効果を考慮した最適構造と考慮しない最適構造に対して，SLNS モデルに基づく音響解析を行った際の音圧分布を示す．(b)の方が透過波振幅が大きくなっていることから，最適化計算において境界層効果を考慮することで，負の屈折現象を明確に示す最適構造が得られることが分かった． 以上の成果を論文として，国際学術誌「***Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering***」に発表した．
今後の課題	本研究で得られた最適構造は全て 2 次元問題を対象としたものであったが，実用上は 3 次元問題における境界層効果を考慮したトポロジー最適化手法が重要である．SLNS モデルは 3 次元問題についても有効であるため，提案手法を 3 次元問題へ拡張することは容易である．ただし，3 次元の場合，FEM 解析における要素数の増大に伴い解析に必要な計算量が増加するため，並列化計算等を導入し計算効率を向上する必要がある．また，本研究では簡単のために，構造物が剛体であると仮定し方法論を展開している．構造物の振動が空気を伝わる音に与える影響を無視できない場合は，固体内の動弾性方程式の解と SLNS モデルによる解を連成させる，音響構造連成効果を考慮したモデルを導入する必要がある． 合わせて，提案手法の有用性を実験的にも確認するために，本研究で得られた最適構造に対して音響管等を用いた実証実験を行う必要がある．

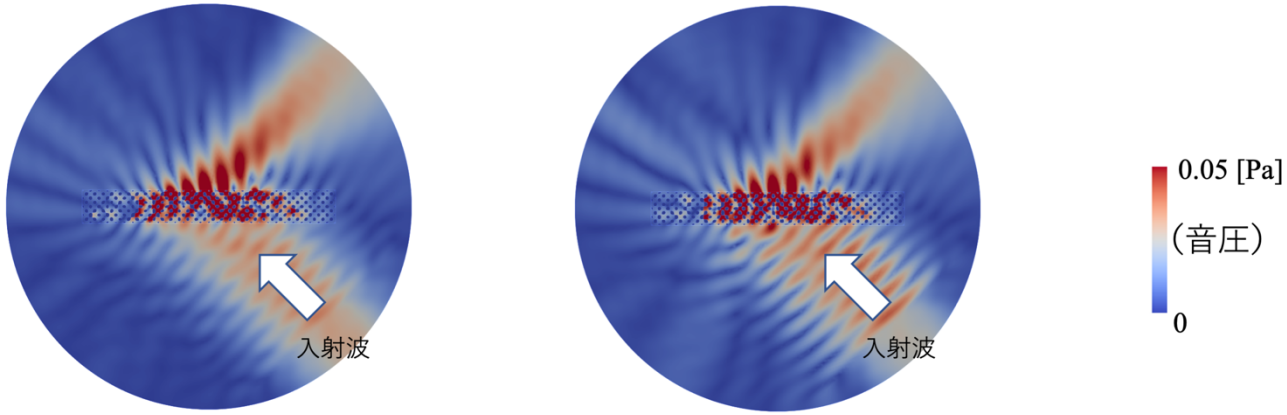


(a)従来法による最適構造　(b)提案手法による最適構造

図1：吸音構造の最適設計



(a)音響メタマテリアル最適構造の比較



(b)音圧分布 with 提案手法による最適構造　(c)音圧分布 with 従来法による最適構造

図2：音響メタマテリアルの最適設計