

研究テーマ	ヘルムホルツ共鳴器を利用した MEMS ミラー	報告書作成者	高橋英俊
研究従事者	高橋英俊		
研究目的	MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)ミラーは、高速で精密な光スキャンが可能であり、プロジェクタやスキャナなどに広く使われている。従来、ミラーの駆動には主に静電駆動や圧電駆動が用いられてきたが、近年、ミラー構造と分離して製作でき、非接触で駆動可能な音響駆動方式が提案されている。しかし、音響駆動は空気を媒介とするため、他の駆動方式に比べて変形が小さいという課題があった。そこで、本研究では、弦楽器などで一般的に利用されるヘルムホルツ共鳴器 (HR) を組み合わせ、音響エネルギーを効率的に増幅し、大変形が可能な音響駆動の MEMS ミラーの構築を目指す。 具体的な方法として、ミラーの機械構造と小型マイクによる音響駆動型 MEMS ミラーと HR を組み合わせることで、ミラー周囲の音響振動を増幅し、ミラーの変形を拡大する。具体的には、2 軸の回転軸を有するミラー構造の下側に、並列配置された HR アレイを小型マイクの間挟み込む形で配置する。HR アレイは、各回転方向に対応する異なる共振周波数を持つように設計されており、それぞれの共振周波数に一致する 2 つの HR 素子で構成される。この構造により、2 つの共振点で効率的に振動を増幅することが可能となる。HR は、気柱共鳴を利用するホーンやパラボラアンテナに比べ、共鳴器の大きさが音波の波長に左右されにくく、複数の共鳴器を組み合わせ利用できる。この特性を活かし、提案する 2 つの共振周波数を持つ HR アレイは、小型・薄型の設計が可能である。本研究では、大変形が必要な応用例として、ミラー面上にフォトダイオードアレイを有するプラズモニック光検出器を想定し、HR アレイを組み合わせた MEMS ミラーを試作する。さらに、試作した HR アレイによるミラーの変形量を評価し、提案手法の有用性を実証する。		

研究内容	研究目的で示した構想に基づき、まず 2 軸駆動に適した MEMS ミラーの機械構造を設計した。ミラーには、音圧を面全体で受けて効率的に変位へ変換できるよう、ねじり変形ではなく曲げ変形を利用するカンチレバー型の二重フレーム構造を採用した(図 1)。デバイスは厚さ 70 μm のガラス基板上に形成し、中央のミラー部を約 5 mm 角とした。外側と内側のフレームを異なる幅・形状の支持ばねで接続することで、互いにほぼ直交する 2 つの変形モードを形成した。有限要素解析により、これらのモードが 100~200 Hz の範囲で異なる共振周波数を持つよう各部の寸法を決定した。 次に、2 つの機械共振モードを効率的に励起するための HR アレイを設計した。HR はネック内の空気の慣性と空洞内の空気の圧縮性によって共振するため、ネックおよび空洞の寸法を調整することで音響共振周波数を設定できる。本研究では、中央に音波を通過させる貫通孔を設け、その周囲に 5 個の HR を五角形状に配置した構造を 1 層とし、これを上下 2 層に積層した合計 10 個の HR からなる構造を採用した。単層構造では主として 1 つの増幅ピークが形成されるのに対し、2 層構造における HR 間の音響的相互作用を利用することで、2 つの異なる周波数帯で音圧を増幅することを狙った。 HR アレイの設計には COMSOL Multiphysics による有限要素解析を用い、50~200 Hz の周波数範囲について音圧のゲインと位相を評価した。その結果、2 層 HR アレイでは約 130 Hz および 174 Hz 付近に異なる音響共振が形成されることが確認された。一方、各層を単独で解析した場合の共振は約 146~147 Hz 付近に集中しており、2 層化によって複数の音響共振を形成できることが示された。また、各共振周波数における HR 内部の音圧分布や空気振動についても解析し、2 層間の相互作用によって異なる増幅モードが生じることを確認した。 解析結果に基づき、MEMS ミラーと HR アレイをそれぞれ試作した。MEMS ミラーは 25 mm $\times$ 25 mm、厚さ 70 μm のホウケイ酸ガラスを UV レーザで加工し、ミラー面に反射金属膜を形成した(図 2(a))。HR アレイは光造形方式の 3D プリンタを用いて製作し、上部・下部を個別に造形した後に接合して 2 層構造とした(図 2(b))。 製作したデバイスについては、まず MEMS ミラー単体の機械共振特性と HR アレイ単体の音響特性を個別に評価し、その後、両者を組み合わせて音響駆動時のミラー変位をレーザ変位計により計測した(図 3)。さらに、ミラーにレーザ光を照射し、反射光をスクリーン上で観察する光学系を構築することで、各共振モードにおける走査方向および変形状態を評価した。このように、機械構造設計、音響構造設計、数値解析、試作、個別特性評価、統合駆動評価の順に研究を進め、HR アレイと MEMS ミラーを組み合わせた 2 軸音響駆動システムを構築した。
------	--

研究のポイント	本研究では、音圧を利用して非接触で駆動する 2 軸 MEMS ミラーの高性能化を目的として、並列 2 層構造のヘルムホルツ共鳴器 (HR) アレイを用いた音響増幅機構を開発した。音響駆動は、電極や配線をミラー上に形成する必要がなく構造を単純化できる一方、音波のエネルギー密度が小さいため、大振幅化や多軸駆動が難しいという課題がある。本研究では、約 5 mm 角のミラーに 100–200 Hz の範囲で直交する 2 つの機械共振モードを持たせるとともに、5 個の HR を五角形状に配置した層を 2 段積層し、合計 10 個の HR からなるアレイを構成した。これにより HR アレイに 2 つの異なる音響共振周波数を発生させ、それぞれを MEMS ミラーの 2 つの機械共振周波数に対応させることで、単一の音響システムによる高振幅な 2 軸駆動を実現した。
研究結果	厚さ 70 μm 、25 mm x 25 mm のガラス基板を UV レーザで加工してカンチレバー型 MEMS ミラーを作製するとともに、HR アレイを光造形 3D プリンタにより作製した。作製した 2 層 HR アレイは約 123 Hz および 168 Hz に異なる音響増幅ピークを示し、1 層構造では得られない 2 つの共振特性を実験的に確認した。MEMS ミラーと HR アレイを組み合わせた評価では、約 119 Hz および 168 Hz にミラーの共振ピークが現れ、HR を使用しない場合と比較して、両周波数において振動応答が約 34 dB 増幅された。さらに、ミラーから 14 cm 離れたスクリーンに反射レーザ光を投影して動作を評価したところ、112 Hz では約 6.6 cm の軌跡、すなわち約 $\pm 12.5^\circ$ の走査角が得られ、166 Hz では約 10.7 cm、約 $\pm 18.7^\circ$ の走査角が得られた。両モードの振動方向はほぼ直交しており、2 つの周波数を利用することで 2 次元光走査が可能であることを実験的に示した。
今後の課題	本研究により、2 層 HR アレイを利用することで、音響駆動 MEMS ミラーの 2 つの共振モードを同一システム内で大きく増幅できることを示した。今後は、MEMS ミラーと HR アレイの共振特性をより精密に設計し、効率的かつ安定した 2 軸駆動を実現することが課題である。また、HR アレイや音源を含めたシステム全体の小型化・一体化を進める必要がある。さらに、本研究で得られた知見をもとに、MEMS 構造の機械共振と HR の音響共振を組み合わせた設計指針を構築し、ミラー以外の MEMS デバイスや多自由度機構への展開を検討する。これにより、外部から非接触で駆動可能な新しい MEMS アクチュエーション技術として、光走査やセンシングなど幅広い応用につなげることを目指す。

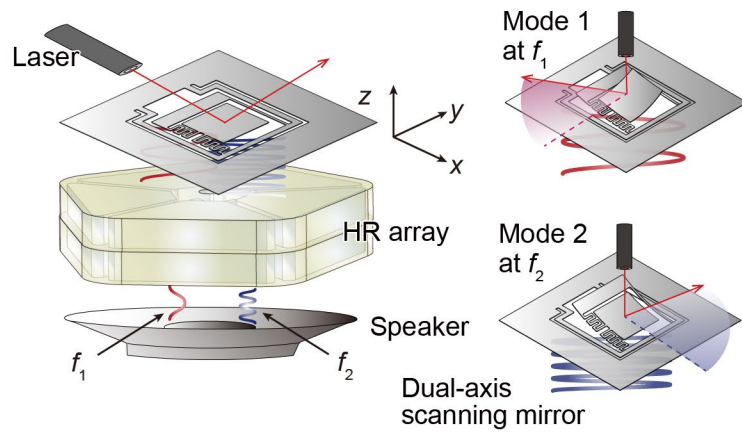


図 1 提案するミラーの概念図

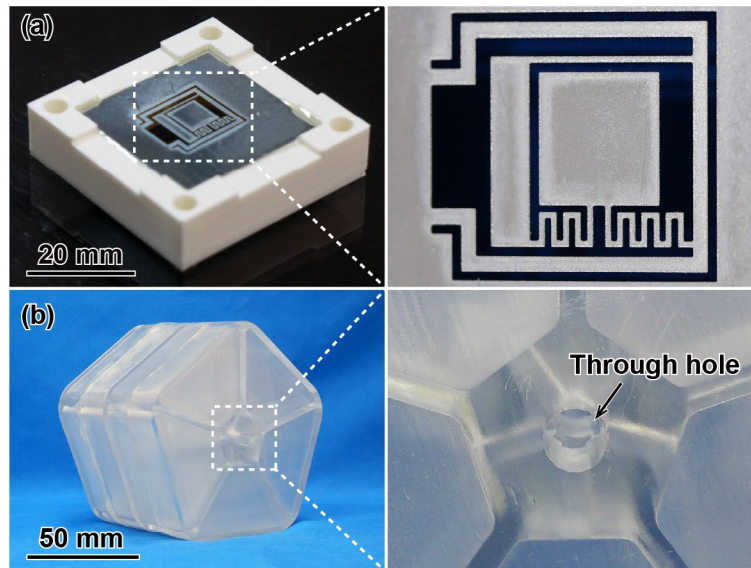


図 2 製作したデバイスの写真

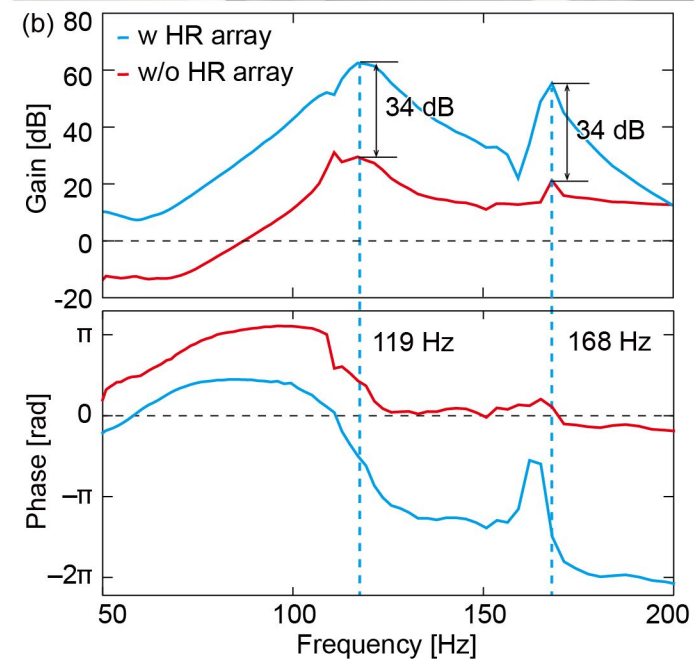
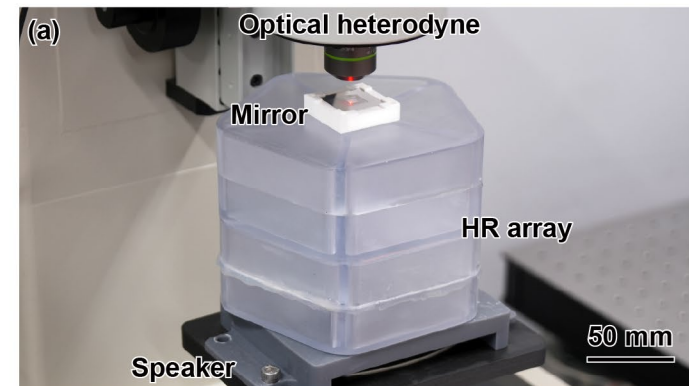


図 3 実験結果