

「圧電 MEMS を用いた浮遊センサ実現のためのフィージビリティスタディ」

兵庫県立大学工学研究科

神田 健介

1 研究の背景と目的

浮遊する事が可能な装置でもっとも小型かつ制御可能であるものは、現時点ではドローンである。既に 2 cm 角程度まで小型化が実現されているが、消費電力が極めて大きく、数分程度の動作が限界である。これはそのプロペラの駆動源がモータであり、常に電流が流れることに起因する。稼働時間を増やそうとすると大型のバッテリーが必要となる。また、非ドローン型の圧電材料を用いた飛行ロボットの小型化研究も近年は進展が著しく、昆虫サイズの羽ばたき型ロボットが 110-120 mW の消費電力で実現した例もある (N. T. Jafferis, et al, *Nature* **570**, pp. 491-495, 2019)。ただし、サイズはまだ数 cm オーダであり、駆動電圧も 100 V 以上を必要とするなど、まだ改善の余地が大きく、今後の発展が期待される。一方、圧電薄膜を用いた圧電 MEMS は近年、インクジェットヘッドや MEMS ミラーなど、小型かつ大発生力が必要なアクチュエータへの利用が進んでいることに加え、非常に低消費電力である。しかしながら、基板材料が通常シリコンであり、大変形すると脆性破壊を生じるという欠点がある。そこで申請者らは、基板がシリコンでありながら構造体は樹脂と圧電 PZT 薄膜の積層構造であるアクチュエータのバッチ製造技術を確立し、大変形でも破損せず動作可能であることを実証した (T. Okubo ら, *Proc. IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr.* 2015, pp.178-181)。この構造は可動量が非常に大きいことに加え、センサや回路との将来的な集積化が可能であり、さらに低消費電力 (10 μ W オーダ) である。これらの特徴は、浮遊センサの翼への応用に非常に適している。研究の最終目的としては、各種センサを集積化させた圧電 MEMS によるマイクロ飛行ロボットを実現することである。本助成研究としては、その第一歩として、飛行のために必要な羽構造を圧電 MEMS で構成し、その実現可能性について検討することを目的とした。

2 研究方法・研究内容

浮遊する超小型センサを実現するためには、翼となるアクチュエータの時空間的に非対称な振動を大変位で生じさせ、空気排除体積を稼ぐ設計およびその方法論の確立が非常に重要である。本申請研究では、樹脂と圧電 PZT 薄膜の積層構造をベースとして、アクチュエータとなる翼構造を共振駆動させながら、DC バイアスを制御する組合せ動作によって非対称な振動を生み出すことを検討した。設計した構造について、実際に半導体微細加工技術を用いてプロトタイプの試作を行い、運動解析や発生力測定を含む力学的評価、流れの可視化による流体力学的評価を行う。以上のように、MEMS 工学と振動工学的な手法によりデバイス試作を行い、機械力学的および流体力学的な評価を行うことで設計にフィードバックするアプローチで研究を実施していく計画となっている。有限要素解析を援用した設計と半導体製造工程を用いた試作を行い、実デバイスについて非対称運動やフラッピング動作等がどの程度の範囲で実現可能なのかを明らかにする。

3 研究成果

3. 1 羽構造の設計

先行研究をベースとした利用可能な製造プロセスから、羽は感光性樹脂、圧電 PZT 薄膜、Si の 3 層が利用可能な 2.5 次元構造となる。羽構造を支える翅脈を Si とし、羽ばた

きの駆動源は PZT と感光性樹脂の積層構造によるベンディングアクチュエータとして、有限要素解析による変形状の計算を行った。図 1 はその例である。

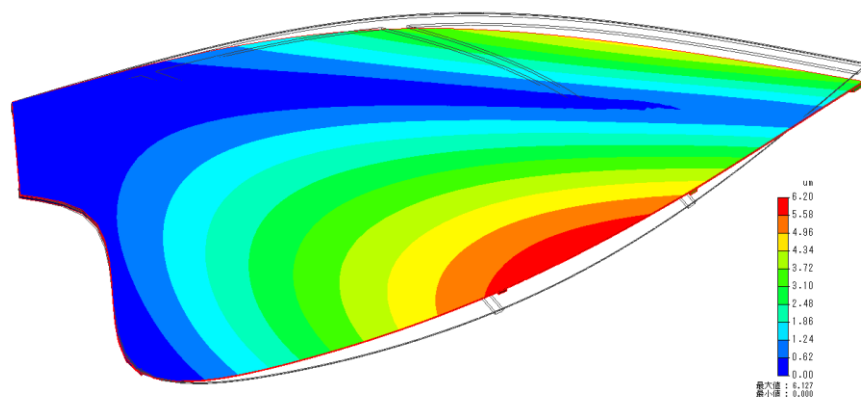
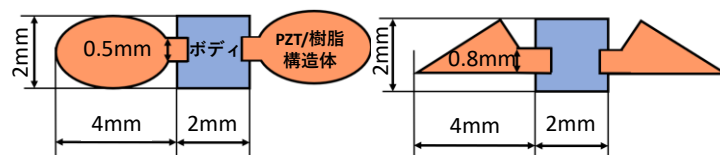


図 1 圧電 MEMS による翼構造の静解析結果

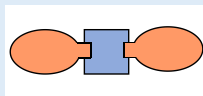
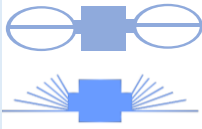
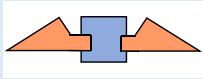
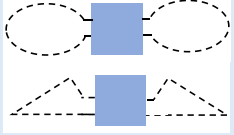
この結果は静解析であるが、長手方向に対してねじれを生じていることが確認できる。これと共振 1 次モード形状を重ね合わせることで、仰角を制御した羽ばたきが実現できる。

3. 2 プロトタイプ試作

弊学の MEMS デバイス開発支援センターの設備を用い、プロトタイプ試作を行った。プロトタイプの試作に際しては、図 2 のような設計パターンを用い、図 3 のように試作を行った。まず、Si ウエハを酸化して表面に SiO₂ 膜を形成する。次に下部電極となる Pt、圧電薄膜である PZT、上部電極である Pt を順次 RF マグネトロンスパッタ法によって成膜する。上部電極、PZT、下部電極の順に塩素系ガスプラズマを用いたドライエッチングによってパターン形成を行う。次に感光性樹脂を用いて羽形状を形成する。この Pt/PZT/Pt 構造は上下電極間に電圧を印加することで面内方向に伸縮する。この伸縮運動は積層される樹脂層によって、曲げ運動に変換されることで羽ばたきの動作となる。構造を支えるための翅脈は Si で形成する。この Si をプロトタイプ試作に際しては、羽形状と Si 翅脈の有無、樹脂材料を変化させた素子を作製した（図 4）。予定していた構造を試作するためには、Si の厚さを薄くする必要があるが、試作時の強度が不足したため完成にはいたらなかった。そのため、翅脈 Si 厚を 150 μm とした構造を作製したが、剛性が高く大きな変位は得られなかった。よって本研究では、試作できた Si 翅脈無しの構造について中心的に評価を行った。



(a) 素子寸法

形状	翅脈(Si)	樹脂素材
 楕円形	 あり	SU-8
 三角形	 なし	
		ポリイミド

(b) 試作パラメータ

図2 試作素子形状とパラメータ

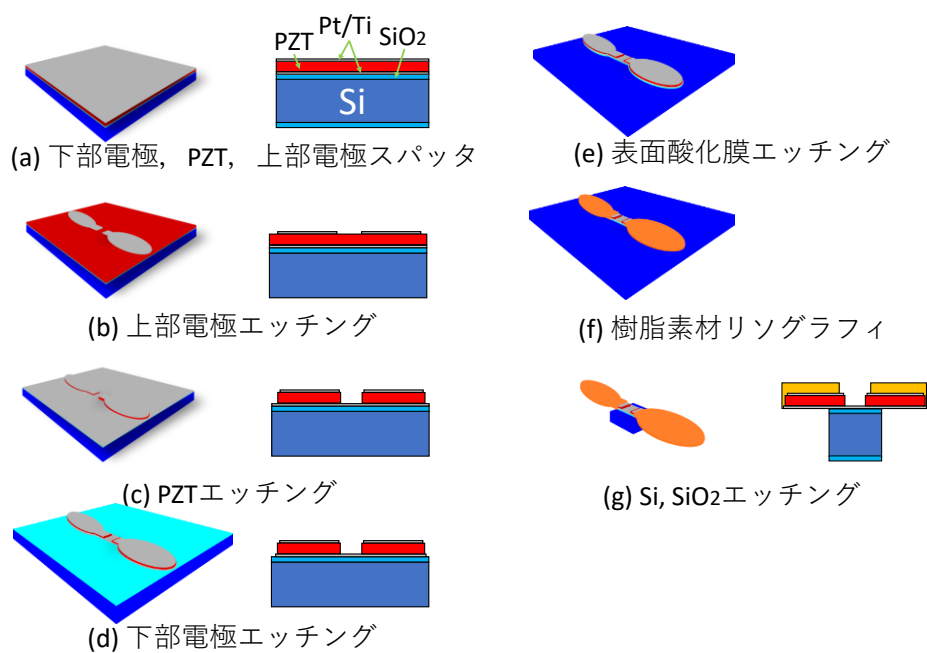


図3 素子作製プロセスフロー

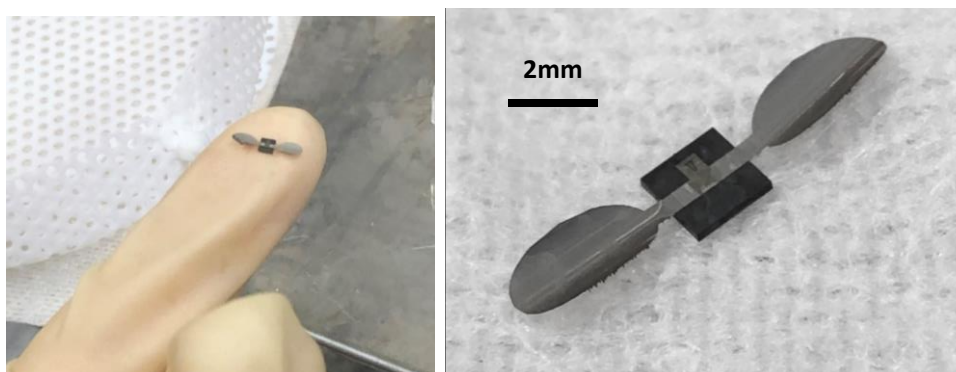
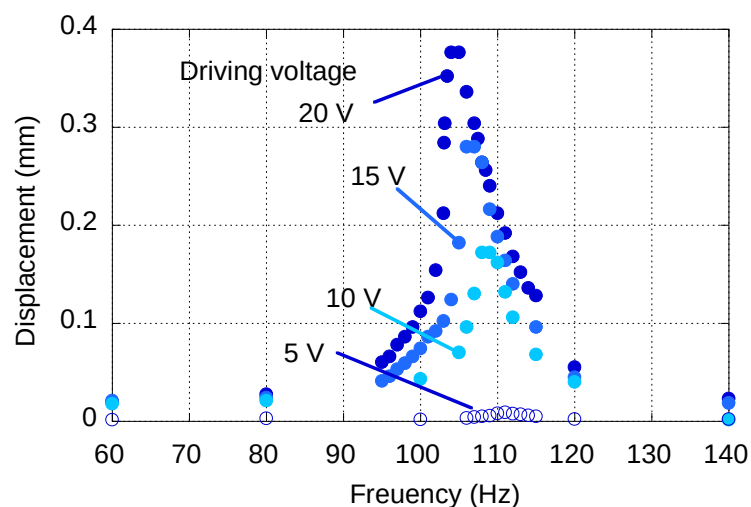


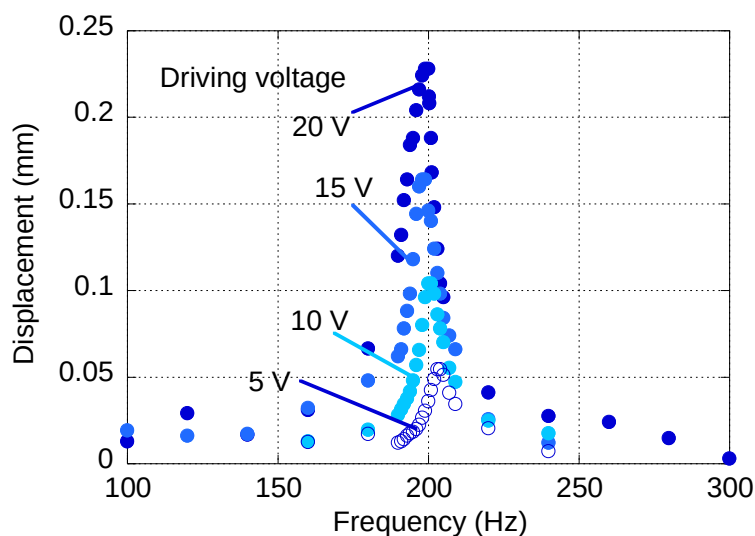
図4 試作素子写真例

3. 3 プロトタイプ評価

試作した素子の羽に電圧を印加し、その際の先端変位をレーザー変位計を用いて測定した。Si 翅脈無しの楕円形状羽について2種類の樹脂素材（ポリイミド、エポキシ樹脂（SU-8））のものについて測定した周波数応答を図5に示す。ポリイミドについては振動の性能指数は21.3、SU-8については24.0であった。周波数特性からは、振幅の増加とともに最大変位周波数がずれる、明らかな非線形効果が観察されたことに加え、本来は mm オーダの変位が得られるはずが非常に小さな変位となった。これらの大きな要因は、図4の写真でも分かるように翼幅方向に反りが生じたことである。これにより圧電駆動による変位が低下しただけでなく、振動の性能指数が低下して所望の変位を得ることができなかったと考える。以上のことから、圧電 MEMS による浮遊センサ実現のためには反り改善が必要不可欠であることが明らかとなった。



(a) ポリイミド



(b) SU-8

図5 試作素子の周波数応答

高速度カメラによる羽ばたきによる渦の生成や揚力の測定については、以上の試作上のトラブルから十分な評価を行うに至っていないが、測定環境の整備はある程度できた。一部測定できた羽ばたきの様子を図6に示す。今後は、素子の反りを改善して所望の変位を得る

とともに、これらの測定を継続して行っていきたい。

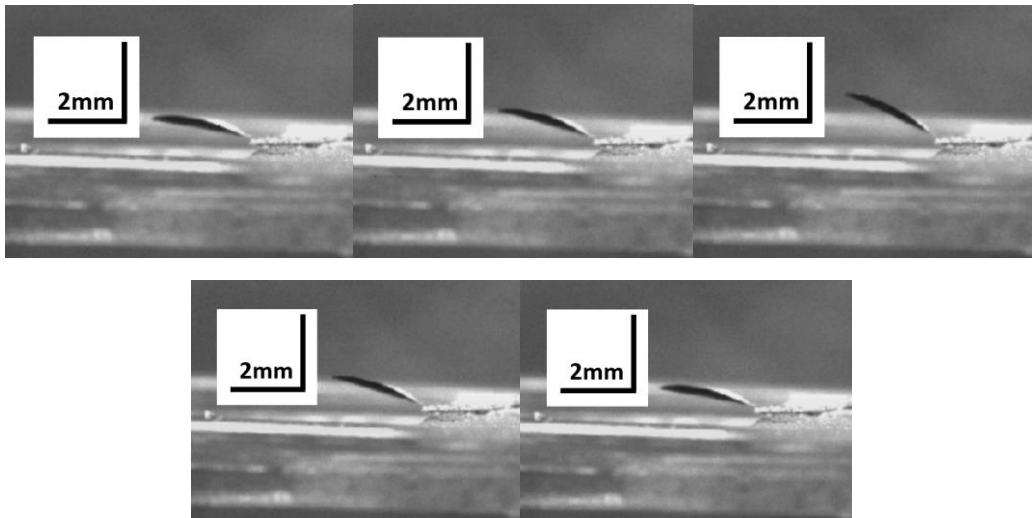


図6 高速度カメラによって撮影した羽ばたきの様子

4 生活や産業への貢献および波及効果

MEMS による浮遊センサの実現可能性評価が本研究の目的であるが、これが実現すると大量生産による安価かつ超小型な浮遊センサがネットワークでつながって多点の情報を得ることが可能となる。例えば、人が立ち入ることができない原子炉の廃炉中や、パイプなどの小さな空間内の環境情報を収集するなどの応用が考えられる。