

# 共振点の連続変化を実現する液体アンテナ

代表研究者 氏名 野田 堅太郎 富山県立大学 知能ロボット工学部 役職 講師

## 1 はじめに

ミリ波とは、mm 長さの波長、30~300 GHz 帯域の電波のことを指し、直進性が強く、環境に存在する飴屋ちりなどの微小物に影響を受けることが少ないという特徴を有している。こうした特徴から屋外環境にて近・中距離に存在する物体の存在・位置を検出するためのレーダへの応用が期待されており、例えば車やロボットなどへの適用が試みられている。このような応用を実現するために必要となるのが小型化と死角なく電波を放射することが可能なレーダシステムの実現である。

車やロボットなどの限られたスペースに組み込むことが可能なレーダシステムとしては、フェイズドアレイレーダが一般的に用いられている。フェイズドアレイレーダとは、アンテナを回転させることなく任意の方向に電波を照射もしくは電波を受信することが可能な装置のことで、物理的な回転を必要としないため、狭いスペースへの組み込みが可能である。フェイズドアレイレーダの一般的な構成としては、面上に並べたアンテナアレイに位相変換素子を配置し、各アンテナから送受信可能な電波の位相をそれぞれ制御している。位相が異なる電波は干渉により、場所によっては強め合い、また場所によっては弱めあうため、総合すると見かけ上の電波の照射もしくは受信方向が各アンテナの位相によって移動する。こうした原理によってフェイズドアレイアンテナは面上に並べたアンテナアレイのみという非常に省スペースな構成のみで広い範囲に電波を照射・受信することが可能となる。しかしこれまでのフェイズドアレイレーダで用いられている位相変換素子は主にサイズの制限から長さの異なる伝送路をスイッチャで切り替えることで、離散的に位相を変えることしかできないものが多い。このため、任意に干渉を起こすことができず、電波の照射・受信方向に死角が生じるという課題が存在している。特に車やロボットなどは我々の生活空間で動作することが期待される。我々の生活空間は非常に多くの障害物が存在しており、またその位置も時々刻々変化する。こうした環境で安全に動作するためには周辺環境とその変化を詳細に知ることが重要となり、死角なく周辺環境や障害物の位置を検出することが可能なレーダシステムが必要である。こうした背景から、死角なく電波を照射することが可能なフェイズドアレイレーダを実現することが必要とされている。

本研究では、フェイズドアレイレーダの波面を任意に制御するための方法として、著者らがこれまでに研究を行ってきた誘電体厚みを連続的に変化させることが可能なマイクロ液体アクチュエータを応用し、このアクチュエータを用いてアンテナ電極-グラウンド間の誘電体厚みを連続的に変更することが可能な可変周波数アンテナを実現し、フェイズドアレイレーダへの応用することを目的とした。従来研究では、大型のジグ・アクチュエータを利用することでアンテナ電極間の距離・誘電体厚みを変化し、共振周波数を連続的に変化することが可能な可変周波数アンテナに関する研究・開発は行われているものの、可動部・アクチュエータ部が大きいため、アレイ化することが困難であり、フェイズドアレイへの応用は実現されていない[1~5]。本研究では、著者らがこれまでに研究を進めてきた小型・薄膜の液体アクチュエータを用いることによって、連続的な周波数変動を可能とするアンテナによるフェイズドアレイレーダの実現が初めて可能になる。本研究期間中にはフェイズドアレイレーダの実現のために必要となる可変周波数アンテナの変形を拡大するための方策に関して研究を進めた。

以下に可変周波数アンテナとそれを構成する液体アクチュエータの構成に関して概要を説明し、また本研究の具体的な成果に関して説明する。

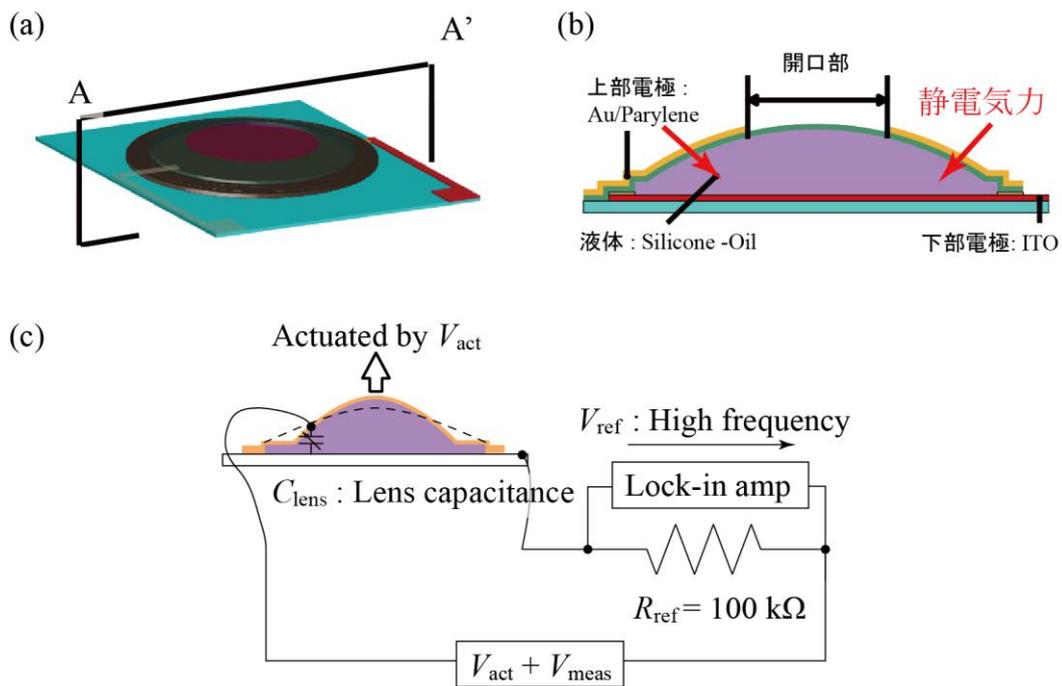


図 1. 提案するマイクロ液滴を用いたアクチュエータ

## 2 液体アクチュエータを用いた連続的に共振周波数を変化する可変周波数アンテナ

前述の通り、本研究では著者らがこれまでに研究を進めてきたマイクロ液体アクチュエータを応用し、フェイズドアレイレーダのための可変周波数アンテナを実現する。本節ではこのマイクロ液体アクチュエータの原理とこのアクチュエータを用いた可変周波数アンテナの構成・原理に関して概要を説明する[6, 7]。

### 2-1 液体アクチュエータの構成と原理

マイクロ液体アクチュエータの構成を図 1 に示す。このアクチュエータは電極上に形成した厚み  $100 \mu\text{m}$  の液滴を厚み  $1 \mu\text{m}$  の高分子膜（パリレン膜）中に封止し、さらにパリレン膜上に金属薄膜を形成したデバイスである。液滴下の電極とパリレン膜上に形成した電極間に電圧を印加することで発生させた静電気力によって液滴端部を変形し、液体をアクチュエータ中央部に集中することによってアクチュエータ中央部の厚みを増減することが可能である（図 1(b)）。

下部電極の周縁部には厚み  $200 \text{ nm}$  の疎水性膜（CYTOP、旭硝子株式会社）が形成されており、液滴の位置・形状を制御することを可能としている。またこのアクチュエータは液体材料として不揮発性のシリコンオイル（HIVAC F-4、信越シリコン株式会社）を利用し、パリレン膜を PoLD（Parylene on Liquid Deposition）法を用いて直接シリコンオイル上に蒸着することで液滴をパリレン膜中に封止している。PoLD 法はシリコンオイルなど蒸気圧が低い液体が真空中でも蒸発せずに形状を維持することができる特性を利用し、CVD（Chemical Vapor Deposition）によって液体上に直接高分子膜を形成する方法であり、著者の研究グループにて研究を進めてきた膜形成方法である。この方法を用いることによって面上の広い範囲に配置した液体を高分子中に封止することが可能であり、膜中に封止した液体は液体由来の表面張力や膜の張力によって球状の表面形状を作り上げることが可能となる。また封止後のパリレン膜上には抵抗加熱法によって金属を蒸着することや電解メッキ、フォトリソグラフィを用いたパターンニング作業を施すなどといった追加工を行うことが可能であることも確認している。この方法によって高分子膜中に封止する液滴は、単一であることに限定されず、面内に形成した同一もしくは異なる形状の液滴のアレイを同時に高分子膜中に封止することも可能である。また液滴を挟み込む、上部・下部配線をパターンニングすることで、アレイ配置

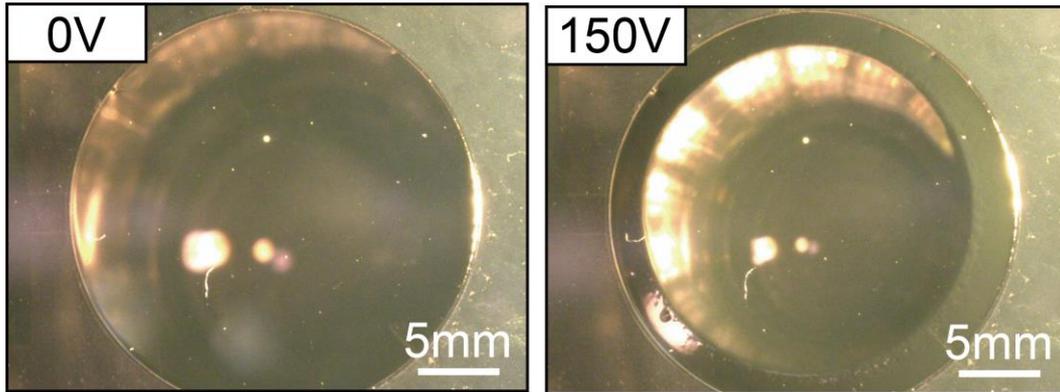


図 2. 提案するマイクロ液滴アクチュエータの変形の様子

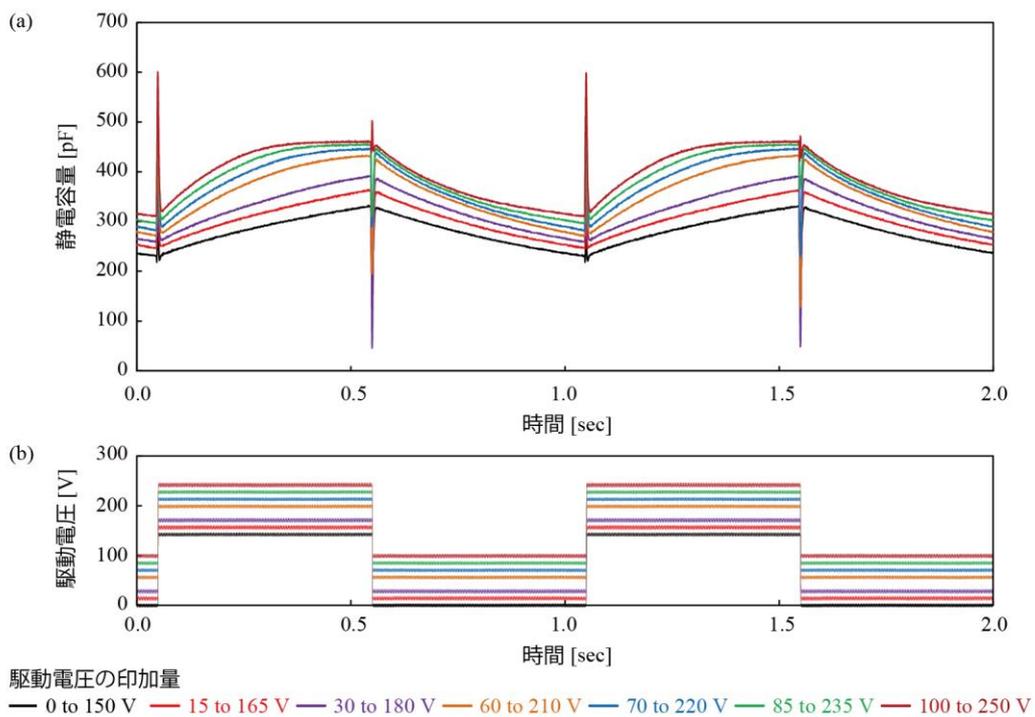


図 3. バイアス電圧と液体アクチュエータの静電容量変化量の関係

した個々の液滴に個別に駆動電圧を印加することが可能なアレイ配線を施すことも可能であることから、アレイデバイスを実現する上で非常に有効なアクチュエータ形成方法であるといえる。次節にて説明する可変周波数アンテナの形成ではこれらの追加加工を施すことによってアクチュエータ上にアンテナ電極を形成することに成功している。

このアクチュエータは液体の粘性により、印加電圧と変形量との間にヒステリシスが生じてしまう。そこでアクチュエータの静電容量を元に形状を制御することが必要となる。このアクチュエータの上部電極と下部電極とは液体を誘電体としたコンデンサを形成している。静電気力の特徴から、提案するアクチュエータでは、二電極間の距離が最も近いアクチュエータの端部から中央部分に向かって徐々に変形する。この変形の特異性のために、提案するアクチュエータは二電極間の静電容量の変化量から形状が一意に定まる。このため、静電容量の変化量を計測することによって現在の形状を知ることが可能であり、液体の粘性に伴うヒステリシスに影響を受けることなく、形状の計測・制御を行うことが可能となる。提案する液体アクチュエータでは静電容量値を計測するため、アクチュエータに対して直列に抵抗を接続した直列 CR 回路を形成し、液体アクチュエータの変形に影響を与えない、高周波 (100 Hz)・低電圧 (3 V<sub>pp</sub>) の交流信号を印加し、抵抗に流れる電流・電圧値を同期検波法で計測することで算出することが可能となる (図 1 (d))。

表 1. バイアス電圧と液体アクチュエータの静電容量変化量の関係

	0 to 150V	15 to 165V	30 to 180V	60 to 210V	70 to 220V	85 to 235V	100 to 250V
静電容量変化 [pF]	95.2	109.8	126.5	152.8	155.9	148.2	140.4
静電容量変化速度 [pF/s]	198.3	228.7	263.5	318.4	324.8	308.7	292.5

この液体アクチュエータの試作例および 150 V の直流電圧を印加した際の変形の様子は図 2 に示す通りである。このアクチュエータはアンテナの電極間距離の制御だけではなく、液体の透過性・屈折特性を利用することで可変焦点レンズを実現するなどの応用が可能である。また複数アクチュエータのアレイ配置・個別駆動が可能であるという特徴を応用することで、昆虫の複眼のようなアレイレンズを実現することができることも確認している。

当然のことではあるが、試作した液体アクチュエータを駆動する際にバイアス電圧を印加すると、アクチュエータの変形量はバイアス電圧を加えた分だけ大きくなる。この関係を測定した結果を図 3・表 1 に示す。この実験では、バイアス電圧を印加した状況から、さらに 1Hz、150Vp-p の変形電圧を印加しアクチュエータの静電容量変化量・変化速度を計測している。この結果が示す通り、バイアス電圧によって初期変位を与えた場合、アクチュエータの変形量すなわち静電容量の変化値は向上し、70 Vp-p のバイアス電圧を加えた際に変形量・静電容量変化値が最大の 150 pF となることが確認できた。一方で 70 Vp-p より大きなバイアス電圧をアクチュエータに印加するとアクチュエータの変形量・静電容量変化値が減少することが確認できる。例えば 100 Vp-p のバイアス電圧を印加していると静電容量の変化値は 140 pF まで減少する。これは液体アクチュエータの変形に限界値が存在することを示している。すなわちバイアス電圧を印加し、初期に変形を与えることによってアクチュエータの変形限界に近づき、その後に 150 Vp-p の変形電圧を追加してもアクチュエータの変形量が制限される、という結果を示している。これは図 3 に示す、100 Vp-p～250 Vp-p の変形電圧をアクチュエータに印加した際の静電容量の時間変化の軌跡からもうかがえる。すなわち、100 Vp-p～250 Vp-p の変形電圧を印加した際に 0.45～0.5 sec の静電容量値がほぼ変化しておらず、一定値を示すことが確認できる。これはアクチュエータの変形限界に達したことを示している。またこの実験の結果によると、変形速度・静電容量の変化速度も 70 Vp-p のバイアスを印加したときが最大値を取り、バイアス電圧を 70 Vp-p よりも向上しても変化速度が変わらないことが図 3 の静電容量の時間変化の傾き値からも確認できる。一方、表位置では、バイアス電圧を 70 Vp-p よりも向上させた際に時間当たりの変形量・静電容量変化量が減少しているものの、これは静電容量の最大値を基準として算出しており、アクチュエータの変形限界の影響を受けたためであり、実際の変形速度は図 3 に示すように、変形速度はバイアス電圧を 70 Vp-p 以上ではほぼ一定である。一方で、いずれのバイアス電圧を印加した場合においても変形電圧を除荷することで初期状態に形状が戻ることが確認されており、1 Hz で液体アクチュエータが駆動可能であることが確認できる。

## 2-2 可変周波数アンテナ

次に本研究にて使用する可変焦点アンテナの構成を図 4 に示す。このアンテナ構造ではアクチュエータを駆動するための電極としてテフロン基板上に形成した金電極を利用し、その周縁部に形成した CYTOP 膜中に直径 10 mm、厚み 100  $\mu\text{m}$  の HIVAC F-4 液滴を滴下、厚み 1  $\mu\text{m}$  のパリレン膜中に封止した。アンテナのグラウンド電極にはテフロン基板上に形成した銅箔を利用した。液体アクチュエータの下部電極にあたる金電極はリング状になっており、中央部に直径 8 mm の空白部分を設けている。これはアクチュエータの駆動電極がアンテナ電極-グラウンド間に挟まってしまうと電波の伝達を妨げるためである。またアンテナ電極はパリレン膜上に蒸着・フォトリソグラフィ法・ウェットエッチング法によってパターニングした金配線をシードレイヤーとして利用し、この金配線上に銅膜を電解メッキ法を用いることで形成している。抵抗加熱法による金属蒸着で形成可能な金薄膜は 100 nm 程度であり、アンテナ電極として電波を伝搬するために十分な厚みを確保することは非常に困難である。これは膜厚を増すために多くの加熱した金属をパリレン膜上に蒸着すると熱によってパリレン膜が変質・ガラス化し、変形量の減少をまねくのみならず、熱によってパリレン膜が損傷するためである。そこで蒸着によって形成した金薄膜上に厚み 3  $\mu\text{m}$  の銅を電解メッキ法によ

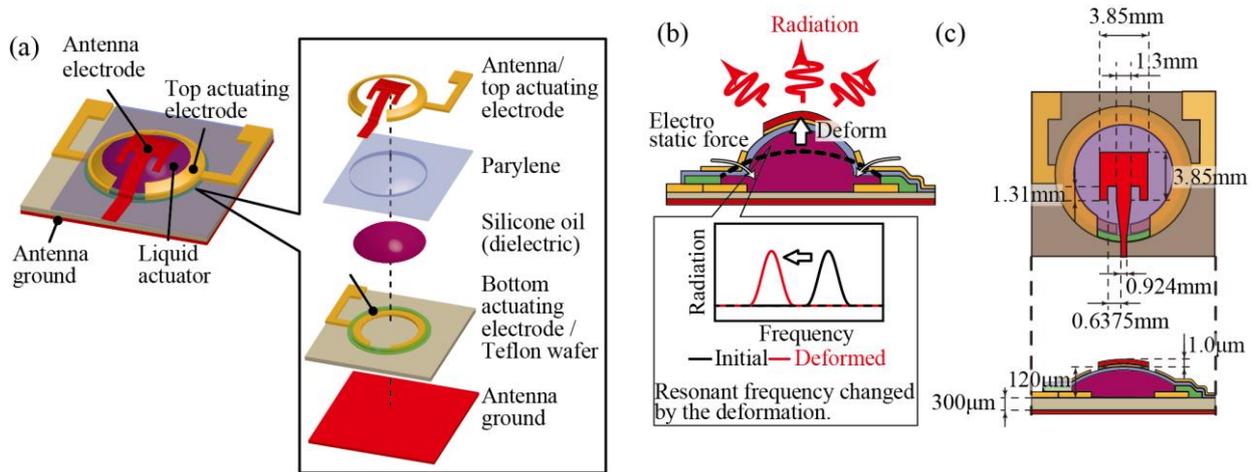


図 4. 液体アクチュエータを用いた可変周波数アンテナ

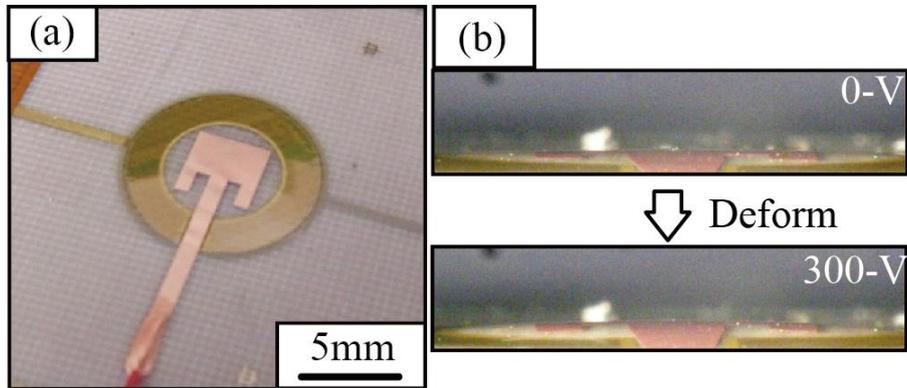


図 5. 試作した可変周波数アンテナの変形の様子

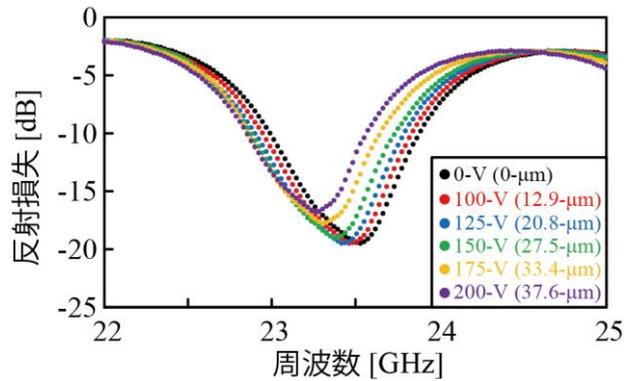


図 6. 変形量と周波数変動の関係

って製膜することでアンテナ電極の厚みを確保した。

試作した可変周波数アンテナを図 5 に示す。またこのアンテナの共振周波数並びに電圧印加による共振周波数の変化特性を計測した結果を図 6 に示す。この結果が示す通り、試作したアンテナは、アンテナ中央部の厚みが 150  $\mu\text{m}$  から 200  $\mu\text{m}$  程度まで、40  $\mu\text{m}$  上昇した際に、静電容量が約 40 pF 程度変化することを確認した。アンテナ形状の計測にはレーザ変位計を利用し、アンテナ電極部でのレーザ光の反射光量の変化をフォトダイオードを用いて計測することで変位量を測定した。アンテナの共振周波数は、23.5 GHz から 23.3 GHz まで 200 MHz 以上変化することを確認した。

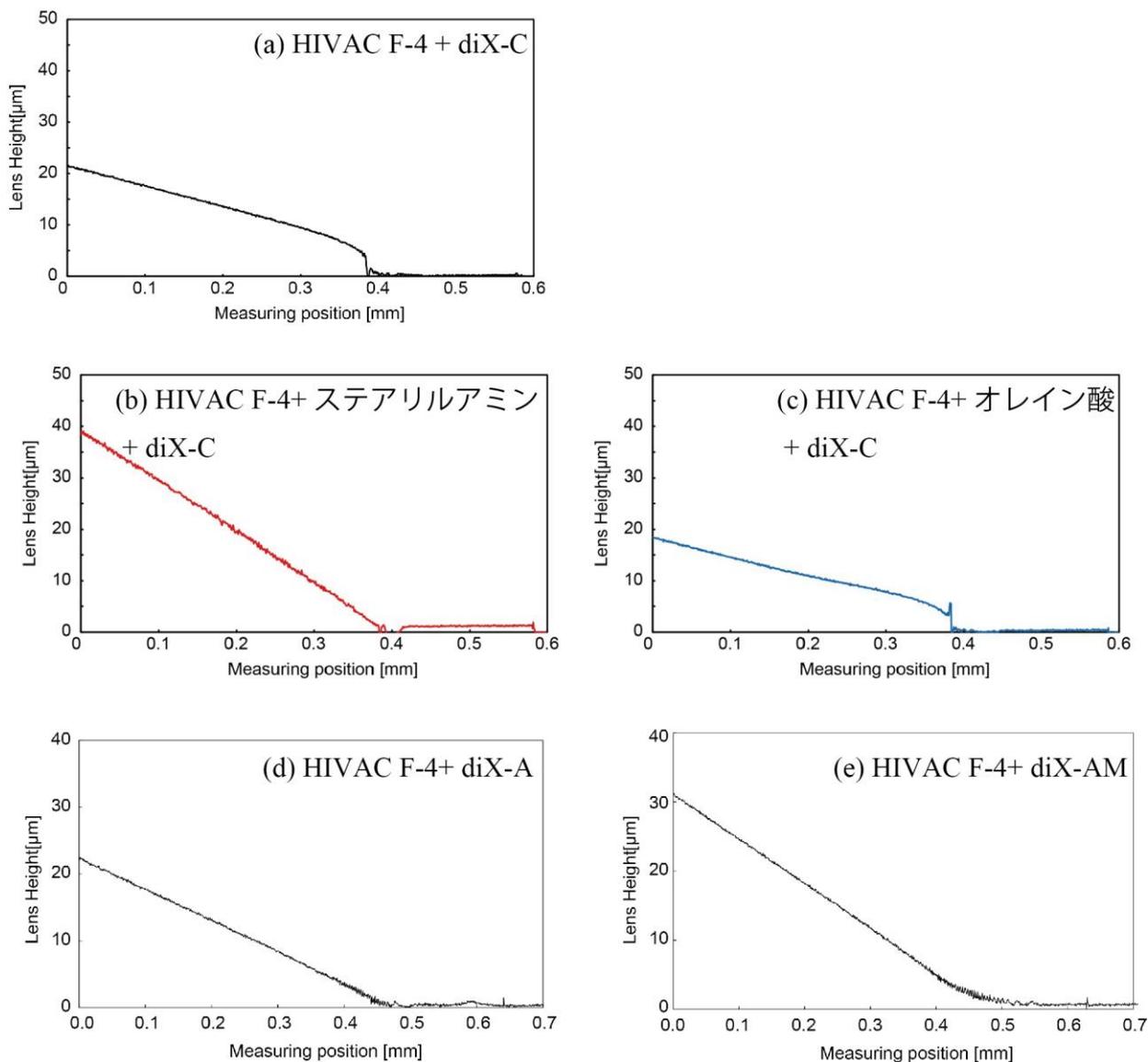


図 7. 液体アクチュエータの鋼製部材と端部の形状の関係

### 3 極性材料を活用した液体アクチュエータの機能向上

本研究期間中には当初、可変液体アンテナのアレイ化・フェイズアレイレーダの実現を行うことを想定していたものの、設計段階において、さらなるアクチュエータの変形量の向上・変形速度の向上が必要となることが分かった。このため本研究課題の目的であるフェイズドアレイレーダを実現するため、アクチュエータの変形量ならびに変形速度の向上、すなわちわずかな電圧でも大きな変形を得ることが可能なアクチュエータの実現に関する研究を進めた。

当初実現した液体アクチュエータの断面形状をレーザ段差計を用いて計測した結果を図 7 に示す。この図が示す通り、液体アクチュエータの端部・周縁部の形状が球面形状から逸脱し、段差構造を形成している。これは当初液体アクチュエータに使用していたシリコンオイル HIVAC F-4 と封止ためのパリレン膜 diX-C (KISCO) の極性が関与している。HIVAC F-4 および diX-C はともに無極性の素材であるため、図 7 に示す通り、蒸着によって膜が形成される過程で図 7 のように形状の偏りが生じることが分かった。この段差の高さは図が示す通り、約  $5 \mu\text{m}$  程度であるもののこの段差があることによって  $40 \text{ pF}$  以上静電容量が上昇し、

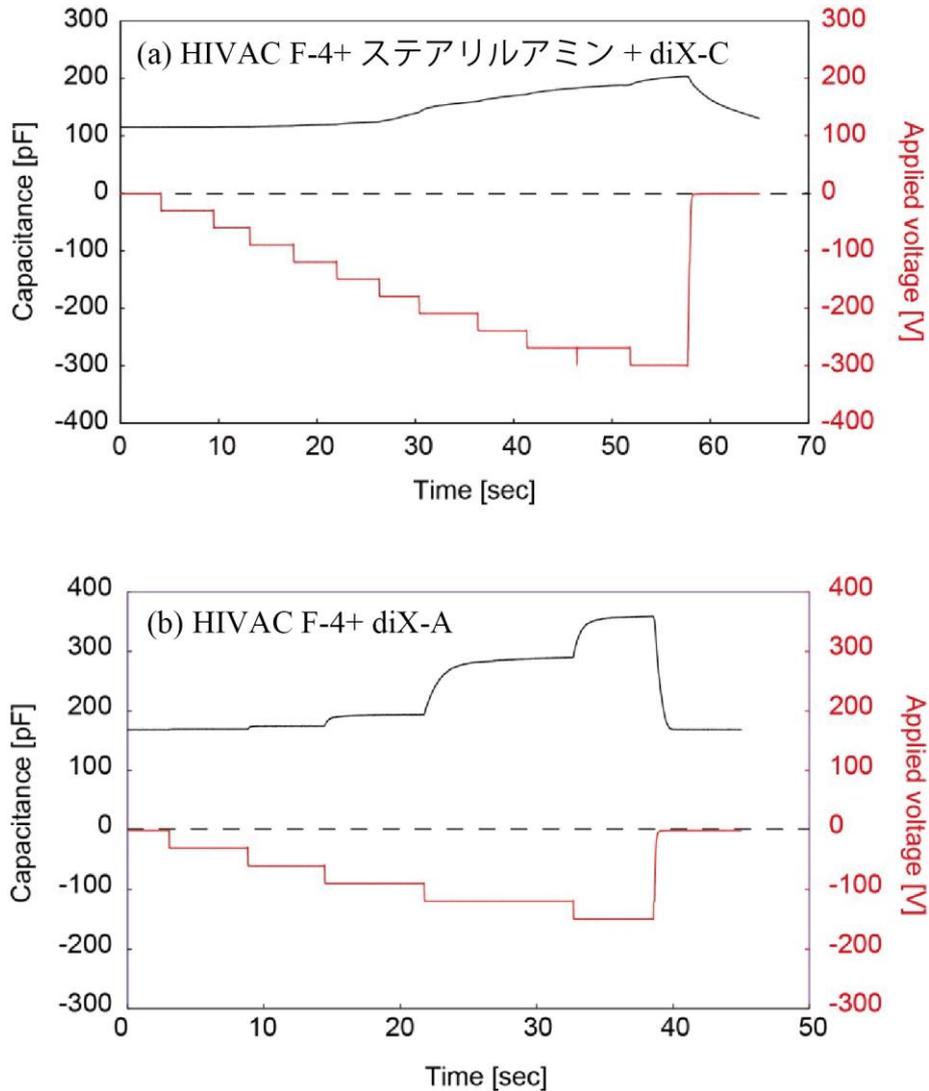


図 8. 各液体アクチュエータのステップ入力にタする変形特性

同じ印加電圧に対する変形量が減少する。一方、アクチュエータに印加することが可能な最大電圧値は、diX-C 並びに HIVAC F-4 の絶縁体性によって定まる。すなわち、diX-C・HIVAC F-4 が絶縁破壊してしまうとアクチュエータが破損するだけでなく、電荷が抜けることでアクチュエータが元の形状に戻ってしまう。こうした点から、diX-C・HIVAC F-4 が絶縁破壊することがない微小な電圧でアクチュエータを駆動することができるように、また変形速度を向上しフェイズドアレイを実現するための制御性能を向上するために、アクチュエータ端部の段差構造をなくし、静電力に対する変形性能を向上することが必要となった。そこで液体アクチュエータを構成する液体材料と膜材料の極性を変化した場合のアクチュエータ形状と変形特性に関して試作・評価を行った。

まず液体試料に関しては、PoLD を行うために蒸気圧を低く保つ必要があるため、溶媒としては従来と同じく HIVAC F-4 を利用し、内部に極性材料であるステアリルアミンおよびオレイン酸を微量溶解することで極性を持たせた液体試料を用意し、その表面に diX-C を蒸着して液体アクチュエータを試作した。これらの液体アクチュエータの断面形状を計測した結果を図 7(b), (c) に示す。図 7(b) の結果が示す通り、オレイン酸を混合した液体では図 7(a) の HIVAC F-4 のみの上に diX-C を蒸着して試作した液体アクチュエータと同様に端部に数  $\mu\text{m}$  の段差が生じることを確認した。一方で、ステアリルアミンを混合した場合には端部段差が消滅し、理想的な局面形状を描くようになったことが確認できる (図 7(c))。この違いは、オレイン酸の HIVAC F-4 への溶解度が低いこと、ならびにアミンの極性がオレイン酸よりも強いことの二つの要因が考えられるものの、アミン基が作用することによって液体アクチュエータの形状をより理想的な曲面に近づ

けることができることを確認することができた。一方で、活性の低いシリコーンオイルである HIVAC F-4 にはステアリルアミン・オレイン酸とも溶解度が低く、液体内に結晶が目視できる程度の量残留してしまうことが確認された。この残留結晶が液体アクチュエータの変形やアンテナの信号伝達を阻害する恐れがあるという課題も残された。

そこで液体を覆う膜材料側の極性を変更するという取り組みに着手した。この取り組みでは液体材料は HIVAC F-4 のみを利用し、蒸着する膜材料に diX-A (KISCO) ならびに diX-AM (KISCO) を利用した。diX-A は diX-C の末端基をアミノ基に変更した材料であり、diX-AM は diX-C の末端基にメチル基を介してアミノ基を形成した材料である。両方の膜材料ともに末端にアミノ基を有するため、diX-C とは異なり大きな極性を有し、前述のステアリルアミンと同等の極性を示すことが期待される。これらの膜材料は一般的には細胞やたんぱく質の固定などに多く用いられる材料である。HIVAC F-4 上に diX-A、diX-AM をそれぞれ蒸着して試作した液体アクチュエータの断面形状を図 7(d)、(e) に示す。これらの結果が示す通り、膜材料に極性を有する diX-A、diX-AM を利用することで液体材料が極性のない HIVAC F-4 上に膜を形成することで端部形状の段差が減少し、理想的な球面形状を形成することができることを確認した。ただし、diX-A と diX-AM とのアクチュエータ形状を比較すると、diX-AM は液体と疎水性膜である CYTOP 端部付近で球面形状から外れ、なだらかな凹形状の軌跡を描いている。一方で、diX-A はステアリルアミン混合液上に diX-C を蒸着した場合と同様に球面状の表面形状を描いている。diX-A と diX-AM との違いはパリレン分子とアミノ基にメチル基を有するか否かである。この分子間距離の違いが表面形状の違いに影響したものと考察される。この結果から diX-A を HIVAC F-4 上に蒸着し、封止することにより、液体中の残留結晶をなくし、理想的な球面状表面形状を有する液体アクチュエータを形成することができることを確認した。

試作したステアリアルアミン+HIVAC F-4 を diX-C 内に封止した液体アクチュエータと HIVAC F-4 を diX-A 内に封止した液体アクチュエータの動作特性を計測・評価した結果を図 8 に記す。この実験では、液体アクチュエータに対して最大 150 V のステップ入力を印加し、液体アクチュエータの変形量を静電容量変化値から算出した。これらの結果が示す通り、150V までのステップ入力を加えることによって、液体アクチュエータの静電容量は 200 pF ずつ程度向上することとなり、また時定数も向上していることを確認した。これらの結果から、極性が異なる材料を組み合わせることで液体アクチュエータを形成することで、アクチュエータの変形性能を向上することができることが確認できた。今後、この材料を利用することにより、周波数可変アンテナの駆動性能を向上し、フェイズドアレイアンテナの実現・操作方法の確立を進めていく。

## 4 結びに

本稿は 2019 年 4 月～ 2020 年 3 月までの一年間の研究期間中に実施した研究に関して、その背景や基礎原理を含めて詳細を報告したものである。限られた期間での研究であり、また研究途中に見つかった課題を解決するために尽力することとなってしまったものの、研究の最終目的とする死角なく電波の照射を行うことが可能なフェイズドアレイレーダを実現するための可変周波数アンテナの高精度化を実現することが可能となり、研究の実現に大きくつながる貴重な成果を得ることができたと考えている。今後、本研究期間中に得られた成果を活用し、フェイズドアレイレーダの小型・高精度化、ならびに車やロボットなどの動作制御への応用に関する研究へと発展させることに注力する。

### 【参考文献】

- [1] S. J. Mazlouman, A. Mahanfar, C. Menon, and R. G. Vaughan, "Square Ring Antenna With Reconfigurable Patch Using Shape Memory Alloy Actuation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.60, no.12, pp.5627-5634, 2012.
- [2] S. J. Mazlouman, M. Soleimani, A. Mahanfar, C. Menon, and R. G. Vaughan, "Pattern reconfigurable square ring patch antenna actuated by hemispherical dielectric elastomer," Electronics Letters, vol.47, no.3, pp.164-165, 2011.
- [3] S. Hage-Ali, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, "A Millimeter-Wave Inflatable Frequency-Agile Elastomeric Antenna," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.9, pp.1131-1134, 2010.
- [4] M. Ali, A. T. M. Sayem, and V. K. Kunda, "A reconfigurable stacked microstrip patch antenna for satellite and terrestrial links," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.56, no.2, pp.426-435, 2007.

- [5] R. Al-Dahleh, L. Shafai, and C. Shafai, "A Frequency-Tunable Mechanically Actuated Microstrip Patch Antenna," Antennas and Propagation Society International Symposium, vol.4, pp.548-551, Columbus, OH, USA, 2003.
- [6] N. Binh-Khiem, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Polymer thin film deposited on liquid for varifocal encapsulated liquid lenses," Applied Physics Letters, vol.93, 123101, 2008.
- [7] K. Noda, N. Binh-Khiem, Y. Takei, T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Focal length measurement of a varifocal liquid lens with capacitance detection," Applied Physics B, vol.115, pp.69-76, 2014.