

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18846

研究課題名(和文)自己修復可能な絶縁層を有するプラズマアクチュエータ

研究課題名(英文)Plasma actuator with a self-repairable insulating layer

研究代表者

瀬川 武彦(SEGAWA, Takehiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：50357315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：絶縁層に人工的なボイド構造が形成されたプラズマアクチュエータ(PA)に高周波高電圧を印加し、誘電体バリア放電を利用したボイド構造の変形や収縮による自己修復機能の評価を行った。絶縁材として熔融温度が異なる油脂2種類を選定し、2枚の石英ガラス板の間に封入したうえで表裏電極を非対称配置することでPA構造を構築した。デジタルマイクロスコープによるボイド構造のその場観察、PIVを用いた誘起ジェットの空間速度分布解析、V-Qリサーチ法によるPA消費電力評価を行い、ボイド構造の収縮による自己修復メカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマアクチュエータは次世代の流体制御素子として期待されているが、流体機械の効率改善や騒音低減といった制御効果を実現するデバイスとして活用するためには、ジェットの誘起効率、低電圧化、装着性などの改善だけでなく、耐久性の向上を実現しなければならない。自己修復材料に関する研究は材料科学分野で長い歴史を持つが、本来好まれないボイド構造をプラズマを利用して絶縁材料を自己修復するという新しい考え方の導入により流体制御素子の開発が飛躍的に発展し、流体工学と材料科学などの複合・境界領域にまたがる技術課題の解決に寄与する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Radio-frequency high-voltage was applied to the plasma actuator (PA) with insulating layer in which artificial void structures were formed, and self-repairing processes by deformation and shrinkage of the void structure by means of dielectric barrier discharge were analyzed in this study. Two types of solid oils-and-fats with different melting temperatures were selected as the insulating material. After sealing the solid oils-and-fats between two quartz glass plates, a PA structure was constructed by arranging exposed and encapsulated electrodes asymmetrically on the glass surfaces. The in-situ observation of void structures by a digital microscope, spatial velocity distribution analysis of jet induced by PA by means of particle image velocimetry (PIV), and power consumption evaluation of PA by V-Q Lissajous method revealed the self-repairing mechanism by shrinkage of the void structure.

研究分野：流体工学

キーワード：誘電体バリア放電 アクチュエータ 流体技術 自己修復 絶縁層 省エネルギー 高機能材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、層流乱流遷移の遅延、壁面摩擦抗力の低減、剥離離流れの抑制といった流れを能動的に制御するための様々なデバイスが開発されてきたが、機械的可動部を持たないプラズマアクチュエータ (PA) の活用が期待されている。図 1(a) に示すプラズマアクチュエータの基本構造は、1998 年に Roth *et al.* により提唱された。絶縁層として機能する誘電体の表裏面に非対称配置された 2 つの電極間に bipolar の交流高電圧を印加した場合、露出電極 (Exposed electrode) の片側エッジに誘電体バリア放電 (DBD) が発生し、図 1(b) に示すような露出電極から埋込電極に向かう一方方向のジェットが壁面近傍に誘起される。

将来的にプラズマアクチュエータを自動車、航空機、ガスタービン、風車、高速列車といった流体機械に適用することを想定し、効率改善や騒音低減といった制御効果を実現するデバイスとして活用するためには、ジェットの誘起効率、低電圧化、装着性などの改善だけでなく、耐久性の向上を実現しなければならない。DBD による絶縁材の劣化を抑制するために、耐コロナ性に優れたセラミックスなどの硬質材料を採用したプラズマアクチュエータも存在する。しかし、振動する環境における破断リスクや 3 次元曲面への装着のための製造コスト増大など、実用化に向けて解決すべき課題が多く残されており、新しい手法の考案が必要であった。

2. 研究の目的

プラズマアクチュエータを 3 次元曲面や絶縁層の劣化を生じさせる振動環境に適用する場合、将来的には樹脂やゴムなどの柔軟な材料が採用される可能性が高い。一方、絶縁材料の中で、比較的耐コロナ性に優れたシリコン樹脂・ゴムを採用した場合でも DBD に起因する部分的な破断が生じ、長時間連続駆動することで薄膜化が進む。よって、単純に「露出電極／絶縁層／裏面電極」という構造のままでは、必然的に局所的な短絡が生じ、絶縁層の破損に至る。

そこで、プラズマアクチュエータを構成する絶縁材の中間層として比較的融点が高い油脂を選択し、高電圧印加のもとでボイド構造に発生する誘電体バリア放電で溶解することができれば、絶縁性能を回復する新しい機能を付与できる可能性がある。そこで、破損確率が極めて低い革新的なプラズマアクチュエータの実現に向け、本研究では交流高電圧印加により誘起されるジェットの流動特性や絶縁材の内部構造をリアルタイムで測定し、絶縁体中間層の自己修復機能を果たすために必要な手法や条件を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

絶縁層の自己修復機能を確認するため、低融点の熱可塑性高分子材料や油脂の中から、30°C から 90°C の範囲で液状化する物質を探索し、熔融温度が異なる 2 種類の油脂 (LT 型および HT 型) を選定した。インキュベータ内に設置して熔融する様子を観察した結果、主成分が飽和脂肪酸である LT 型では 30°C で部分的な熔融がみられ、40°C では完全に液化することが確認された。一方、HT 型は 130°C に加熱したオリーブオイルにヒドロキシステアリン酸を混入し、冷却することで固化させた試料であり、45°C 付近で一部熔融し、55°C で液化に至った。

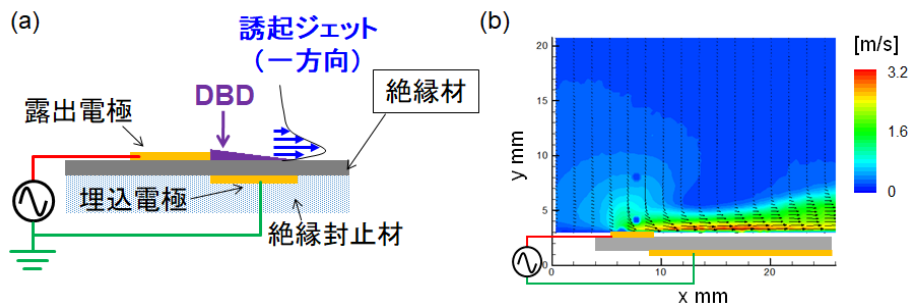


図 1 (a) プラズマアクチュエータの基本構造, (b) PIV 解析による誘起ジェット空間速度分布

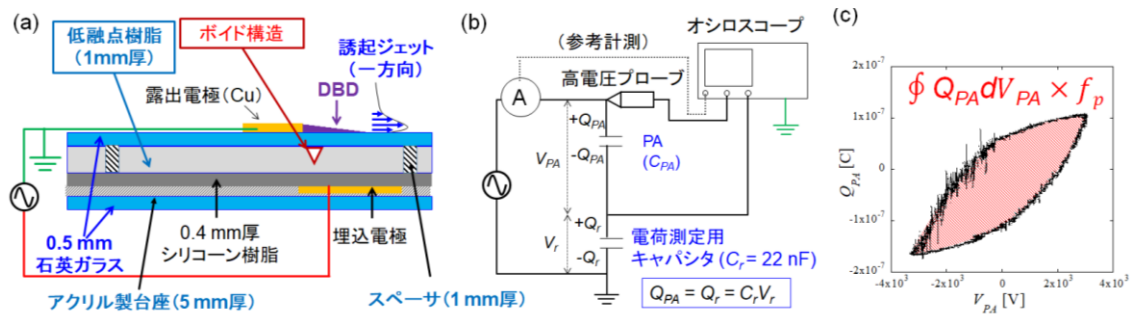


図 2 (a) ボイド構造を有するプラズマアクチュエータ供試体の概略図, (b) 消費電力測定回路, (c) V-Q リサーチ法による消費電力評価

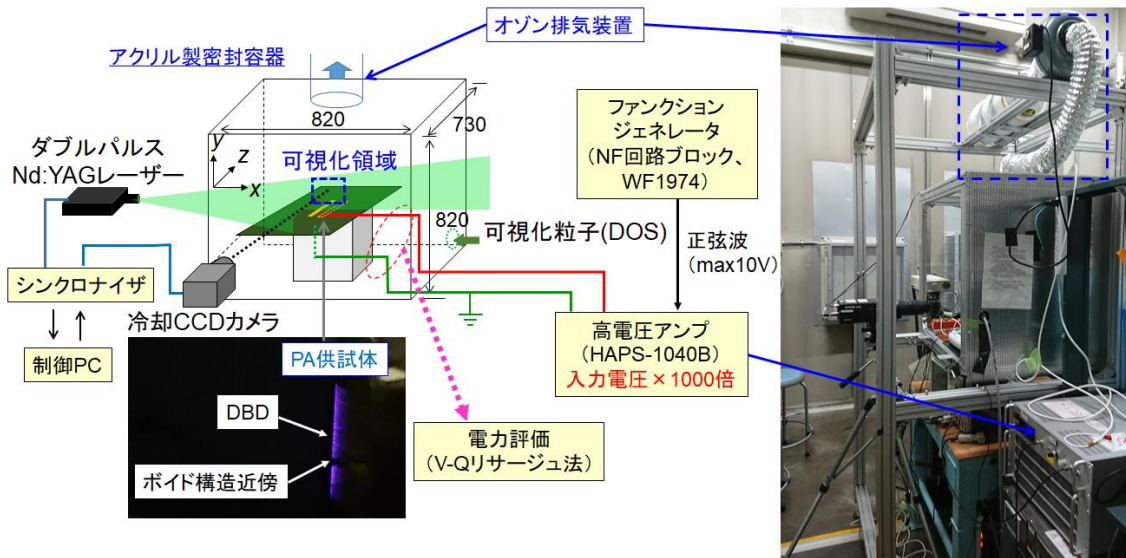


図3 実験装置の模式図と側方からの外観写真

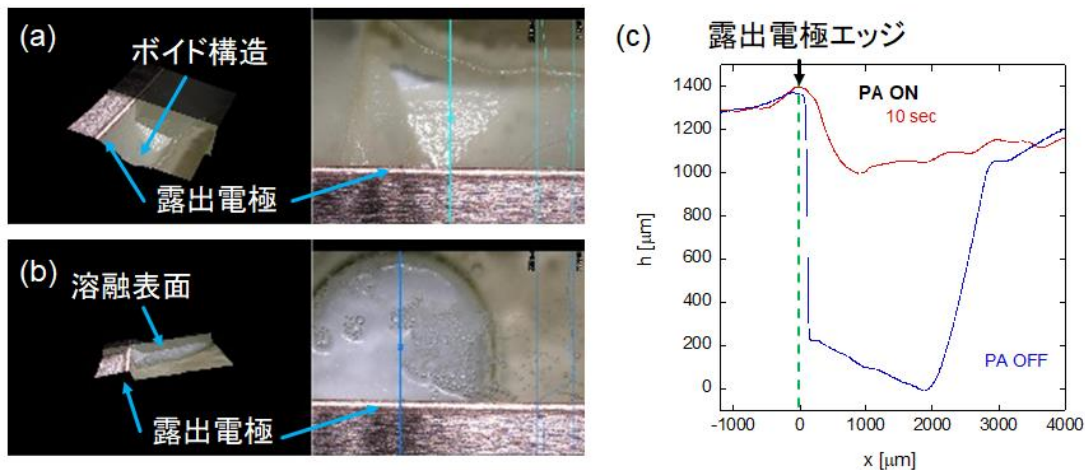


図4 LT型プラズマアクチュエータ供試体ボイド構造の時間変化
(a) PA 駆動前, (b) 10 sec, (c) ボイド中心断面の深さ比較

図2(a)に本研究で試作したプラズマアクチュエータ供試体断面構造の模式図を示す。0.4 mm厚シリコン樹脂両面銅張積層板を両面エッチング処理を施し、片面に18 μm 厚埋込電極、反対面の銅箔層はエッチングにより全て除去することで、低融点油脂と接触する面を形成した。2枚の石英ガラス板(厚み:0.5 mm)の間に1 mmのスペーサを挿入して設置し、その空隙内にLT型およびHT型の油脂を注入できる構造とした。これは、低融点油脂が溶融した場合でも表裏電極間距離が変化しないようにするためである。注入した油脂内のボイドは、供試体上方から石英ガラスを通して可視化できる構造を採用した。露出電極は、約70 μm の銅箔テープを気泡が混入しないように石英ガラス上面に接着した。

電圧印加により時間的に変化するボイド構造は、3次元構造が解析できる顕微鏡(デジタルマイクロスコップ)でその場観察を行った。また、プラズマアクチュエータ供試体から誘起されるジェットの流動特性および電気的特性を定量的に解析するために、供試体を図3に示すアクリル製密封容器内に固定し、粒子画像流速測定法(PIV)による瞬時の誘起ジェット空間速度分布解析、V-Qリサージ法による消費電力解析を実施した。また、アクリル製密封容器の天板に接続可能なオゾン排気装置を開発し、測定中は100 ppm、密封容器開閉時は10 ppmを超えないようにファンを調整し、オゾン分解フィルタを介して密封容器外に排出した。

4. 研究成果

4.1 デジタルマイクロスコップを用いたボイド構造のその場観察

露出電極と埋込電極がオーバーラップする位置に混入させたボイド構造が、電圧印加時に変形する過程のその場観察を試みた。プラズマアクチュエータ駆動前後のボイド構造の変化を比較した写真、およびボイド中心断面(x方向)の深さ(h)をデジタルマイクロスコップ(Keyence, VHX-6000)で解析した。デジタルマイクロスコップは図3のアクリル容器内に設置することは困難であり、別室の定盤に固定したため、プラズマアクチュエータの駆動はポータブル型高周波高電圧電源(PSI製, PG-1040F)を使用し、peak-to-peak電圧(V_{p-p})と周波数(f_p)を $6 \leq V_{p-p} \leq 12 \text{ kV}$ 、 $5 \leq f_p \leq 9.6 \text{ kHz}$ の範囲で設定した。LT型絶縁層を有するプラズマアクチュエータ供試

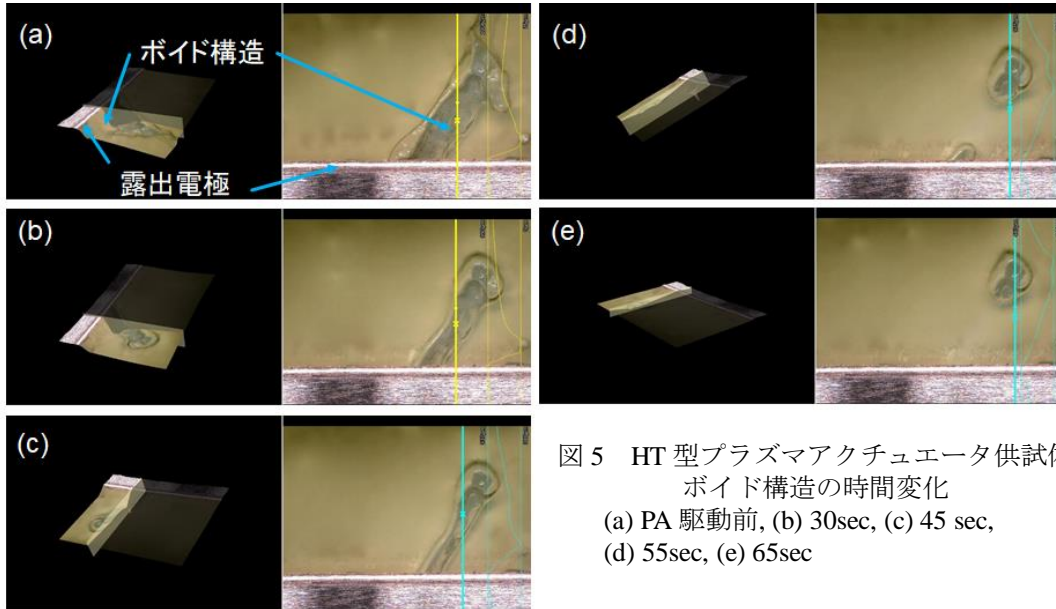


図5 HT型プラズマアクチュエータ供試体ボイド構造の時間変化
(a) PA 駆動前, (b) 30sec, (c) 45 sec, (d) 55sec, (e) 65sec

体に対して、 $V_{p-p} = 12 \text{ kV}$ 、 $f_p = 9.6 \text{ kHz}$ の疑似矩形電圧を 10 秒間連続 (Duty: 100%) で印加した結果を図 4 に示す。PA 駆動前は 2 枚の石英ガラス板の空隙とほぼ同程度のボイド構造が存在するが、電圧印加直後からボイド構造の油脂壁面が激しく振動し、内包されている空気が流動している様子が確認された。また、駆動前に見られた平坦な境界が熔融し、10 秒後は球状の気泡となり、表面は液状化した油脂で覆われていることが図 4(c) で確認できる。供試体を水平に設置した場合は気泡の位置が固定されるが、垂直に設置した場合には浮力により露出電極エッジから移動させることができる。

一方、図 5 は HT 型絶縁層を有するプラズマプラズマアクチュエータ供試体に、LH 型と同様に $V_{p-p} = 12 \text{ kV}$ 、 $f_p = 9.6 \text{ kHz}$ の疑似矩形電圧を連続的に印加した場合のボイド構造の変化を示している。また、図 6 は露出電極直下から x 軸に沿って空隙が広がるボイド構造の中心断面における深さの時間変化を解析した結果である。HT 型は LT 型より融点が高く、ボイド構造の変化は比較的緩やかであるが、露出電極エッジ直下に取り込まれていた気泡も 55 秒後には消滅した。また、気泡消滅時間は、電圧および周波数の増大に伴って減少する傾向を確認した。

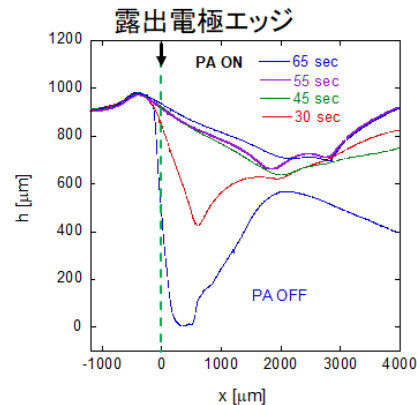


図6 HT型絶縁層に存在するボイド構造中心断面深さの時間変化

4.2 PIV による空間速度分布解析

LT 型を絶縁層とするプラズマアクチュエータ供試体では、人工的に施されたボイド構造が短時間で収縮するが、本研究で使用する PIV システムでは流れの可視化は最大 3.75 Hz であるため、空間速度分布の過渡的な変化を解析することが困難であった。そこで、LT 型より熔融・変形速度が遅い HT 型を用い、任意波形が出力できる高周波高電圧アンプ (松定プレジジョン, HAPS-1040B) により $V_{p-p} = 18 \text{ kV}$ 、 $f_p = 10 \text{ kHz}$ の正弦波電圧を 100% の Duty で印加した。3.75 Hz で取得した瞬時の空間速度分布は乱れているため、連続する 20 枚 (約 5.3 秒間) の速度分布を平均し、電圧印加開始から 80 秒後までの自己修復過程における速度分布を比較した (図 7)。印加直後から時間経過とともに x - y 断面の最大流速は増加傾向を示すが、露出電極下流 $x = 10 \text{ mm}$ の水平速度成分 (u) 分布は、図 8 に示すように 50 秒以降はほぼ一定になった。また、 x - z 断面では誘起ジェットが時間経過とともに空間的に一樣な分布に近づくため、ボイド構造の消滅によりプラズマアクチュエータの性能が回復することが明らかになった。

ボイド内に発生する誘電体バリア放電による油脂の熔融は、印可電圧条件により熔融速度が異なるため、ボイドが消滅すると推察される 50 秒以降の空間速度分布 (PIV 可視化画像: 3.75 Hz で 300 組, 80 秒間取得) を解析し、ボイド構造がない通常のプラズマアクチュエータとしての性能評価を行った。 $f_p = 10 \text{ kHz}$ 固定のもとで $12 \leq V_{p-p} \leq 18 \text{ kV}$ の正弦波電圧を印加した場合、露出電極下流 $x = 10 \text{ mm}$ の最大水平速度成分 (u_{max}) は $u_{max} \sim V_{p-p}^{3.4}$ となり、Thomas et al. (AIAA J. 47, pp.2169-2178, 2009) で報告されている従来型プラズマアクチュエータの性能 ($u_{max} \sim V_{p-p}^{3.5}$) とほぼ一致した。これらの結果から、電圧印加から 50 秒以降の HT 絶縁層を有するプラズマアクチュエータでは、絶縁層が自己修復したと考えられる。

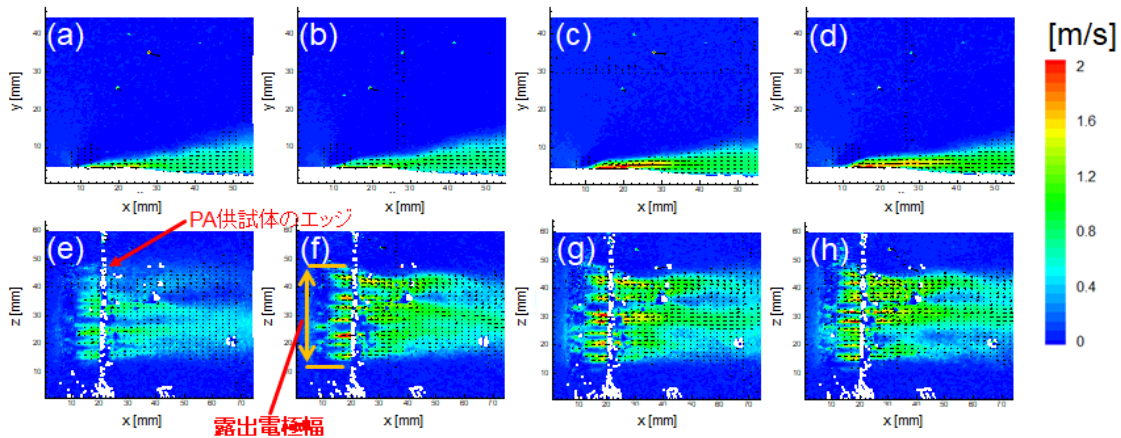


図7 x-y断面およびx-z断面における空間速度分布 ($V_{p-p} = 18 \text{ kV}$, $f_p = 10 \text{ kHz}$, 20回平均)
(a), (e) 5 sec, (b), (f) 27 sec, (c), (g) 53 sec, (d), (h) 80 sec

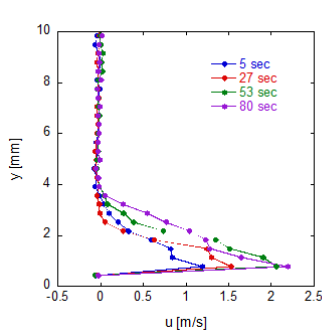


図8 露出電極下流10 mmにおけるu時間変化

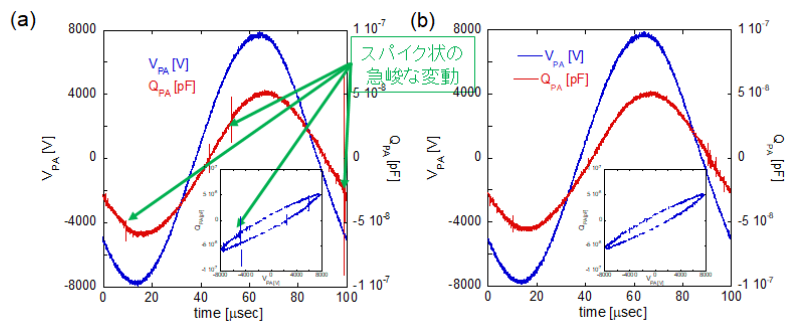


図9 HT型におけるV-Q計測結果の時間変化
電圧印加からの経過時間：(a) 35 sec, (b) 80 sec

4.3 V-Q リサージ法による消費電力解析

プラズマアクチュエータの消費電力は、V-Q リサージ法により評価した(参考：八木重典, バリア放電 (2012), 朝倉書店)。計測回路の概略図を図2(b)に示す。 C_{PA} は本研究で使用したプラズマアクチュエータ供試体の静電容量を示し、電極間に印加される電圧を V_{PA} とする。 C_r は電荷測定用コンデンサの静電容量であり、本研究では概算で評価した C_{PA} に対して1,000倍以上大きい $C_r = 22 \text{ nF}$ の銀マイカコンデンサを用いた。プラズマアクチュエータ供試体の表裏電極間にチャージされる電荷 ($Q_{PA} = C_{PA} V_{PA}$) は電荷測定用コンデンサにチャージされる電荷 ($Q_r = C_r V_r$) と等しいため、 $C_{PA} V_{PA} = C_r V_r$ の関係が成立する。よって、電荷測定用コンデンサに印加される最大数10V程度の電圧を低電圧測定用のプローブ (Tektronix, P6139A, 500MHz 帯域) を用いて計測することで評価できる。一方、 V_{PA} は高電圧プローブ (Tektronix, P6015A, 75MHz 帯域) を用いて測定した。図2(c)に例示するように、 V_{PA} を x 軸、 Q_{PA} ($= Q_r$) を y 軸としてプロットすることで描画されるリサージ図形で囲まれた面積は1周期当たりの放電エネルギーを示しており、面積と周波数 (f_p) の積を消費電力 (P) として評価した。

図9にHT型絶縁層を有するプラズマアクチュエータに $V_{p-p} = 16 \text{ kV}$, $f_p = 10 \text{ kHz}$ の正弦波電圧を連続的に印加し、35秒後および80秒後に計測した1周期 V_{PA} および Q_{PA} 波形を示す。また、消費電力を算出するためのV-Qリサージ図形をそれぞれの図中に挿入した。電圧印加から35秒には、図9(a)に示すような絶縁層にチャージされる電荷が急峻に変化する現象が見られるが、80秒後では急峻な変化がほとんど確認できない。この原因を明らかにするため、リサージ図形の解析により得られた電極単位長さあたりに換算した消費電力の時間変化(図10)を解析した結果、HT型では30秒後から40秒後の約10秒間は他の時間と比較して消費電力が急激に増加していることがわかった。ボイド構造のサイズや露出電極との位置関係によって熔融速度は異なるが、この10秒間に図5と同様にボイド構造が急激に収縮し、絶縁層の自己修復が行われたと推察される。その結果、図7のようにジェット誘起速度の増加や空間速度分布の均一化が実現したと考えられる。また、50秒以降は速度分布や消費電力が一定に近づくため、

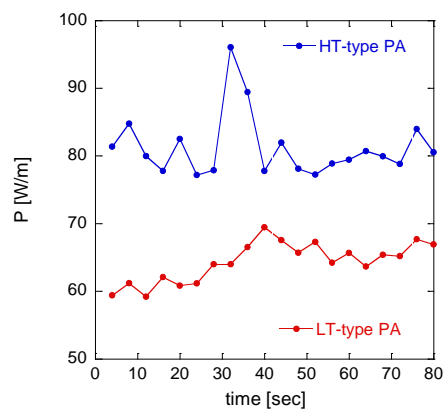


図10 消費電力の時間変化

$f_p = 10 \text{ kHz}$ 固定のもとで $12 \leq V_{p-p} \leq 18 \text{ kV}$ の正弦波電圧を印加した場合の消費電力と印可電圧の関係を調べた結果、 $P \sim V_{p-p}^{2.8}$ となった。この傾向は Hanson *et al.* (J. Appl. Phys. **115**, 043301, 2014) が示した $P \sim V_{p-p}^{3.4}$ と比較して、指数が小さい値となった。これは、ボイド構造は 80 秒後でも完全に消滅していない可能性を示唆している。

一方、図 10 には LT 型絶縁層を有するプラズマアクチュエータについて、消費電力の時間変化が示されているが、HT 型と異なって時間経過とともに消費電力が上昇する傾向が見られた。この原因は、LT 型絶縁層では露出電極直下で電圧印加直後から油脂の溶融が進み、10 秒程度で絶縁層全体が液化に至ることに起因すると考えられる。

4.4 今後の方針

本研究では、絶縁層に自己修復機能を付与するための材料として油脂を選択して評価したが、自己亀裂治癒能力を有するアルミナ等の固体の自己修復絶縁材の可能性についても調査も行った。今後は、固体の絶縁材と油脂の組み合わせにより素子全体の機械強度や時間耐久性能を向上させ、流体機械に実装可能でメンテナンスフリーのプラズマアクチュエータの創出を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

- (1) 瀬川武彦, 松沼孝幸, 異なる電極構造を有するプラズマアクチュエータから誘起されるジェットの流れ特性と消費電力の関係, 日本機械学会 2018 年度年次大会 (2018)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://staff.aist.go.jp/t-segawa/segawa.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：廣瀬 信吾

ローマ字氏名：HIROSE Shingo

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域

職名：研究グループ長

研究者番号 (8 桁)：10357874

研究分担者氏名：松沼 孝幸

ローマ字氏名：MATSUNUMA Takayuki

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：エネルギー・環境領域

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁)：40358031

(2) 研究協力者

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。