

機関番号：16101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760216

研究課題名(和文) 圧電トランス型プラズマリアクタの電気特性解析法の開発

研究課題名(英文) Development of Electrical Characteristics Measurement for Piezoelectric Transformer-Based Plasma Reactors

研究代表者

寺西 研二 (TERANISHI KENJI)

徳島大学・大学院ゾナ科学部・助教

研究者番号：80435403

研究成果の概要(和文)：

PT を用いたプラズマリアクタの電気特性解析法の確立を目的として、これに必要な特性解析装置と PT の 2 次側高電圧測定用分圧器を開発し、PT 表面電位ならびに放電電力空間分布測定法について検討した。開発した高入力抵抗分圧器を用いることで、計測する上で外乱となっていた 2 次側先端部分の表面電位低下を改善することができた。更に PT 先端部分で生じる電極端効果による誤差を補正し、非放電時と DBD 発生時の表面電位ならびに放電電力空間分布を決定することができた。

研究成果の概要(英文)：

The present study is intended to develop further the measurement method of the electrical characteristics for the piezoelectric transformer (PT)-based plasma reactors. The reactor that allows us to measure the spatially-resolved surface potential on the PT and discharge power for the dielectric barrier discharge (DBD) is constructed. A high-input resistance potential divider suitable for the measurement is also developed, which is possible to avoid the disturbance during the surface potential measurements. Also, it is found that the edge effect near the tip of the PT cannot be negligible for the measurement, which behaves another disturbance for the surface potential profile. The correction method is therefore investigated and the surface potential and discharge power distributions can be determined accurately.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：プラズマリアクタ、圧電トランス、誘電体バリア放電、表面電位分布、放電電力

## 1. 研究開始当初の背景

大気圧において比較的容易に非熱平衡プラズマが得られる誘電体バリア放電 (DBD) はオゾン生成やプラズマテレビ、真空紫外光源 (エキシマランプ) などに実用化されてい

る。このような DBD の生成には、目的用途に応じた高電圧電源と放電電極が必要であり、電源の占有スペースや高電圧配線等の絶縁を考えると装置が大規模化しやすい。一方近年、医療分野における殺菌や家庭内での空

気清浄など、屋内で利用する放電機器の需要が高まっている。そこでは限られた空間で必要なだけプラズマを生成することが重要であり、小型プラズマ発生装置が要望されている。

申請者は、小型・軽量の高電圧発生素子である圧電トランス (PT) を独自の方法で用いた放電プラズマリアクタを提案し、その動作特性と応用について検討している。PT は主に液晶ディスプレイのバックライト点灯用電源として用いられてきたが、本研究では、圧電効果により高電圧が発生する素子表面で直接放電プラズマを生成するという利用法である。この場合、素子自身が高電圧電源と放電電極を兼ねるので、小型で低電圧駆動のプラズマリアクタを実現できる。更に電極構造を工夫することで、DBD に加えグロー放電やコロナ放電などの各種放電プラズマが幅広いガス圧力範囲で生成できる。

上述した DBD の電気的諸量を測定することは、その放電現象を議論する際やこれらを応用する上で重要である。しかし、PT 表面を放電電極とする独自の利用法においては、PT の機械振動共振に伴い発生する表面電位が振動方向に対して定在波状に分布するため、表面電位分布を考慮した取扱いが必要である。これを考慮しない場合、上記の手法により得られる測定値は誤差を含む可能性がある。申請者はこの問題を解決するために、DBD リアクタの電極を PT の振動方向に分割した構造を採用した PT 表面電位ならびに放電電力空間分布測定法を提案した。これにより PT 型 DBD リアクタの表面電位や放電電力等を測定できるが、以下のような問題がある。

- (a) 上記の表面電位測定法において、PT 先端 (2 次側) 電圧の測定が必須であるが、これを市販の高圧プローブで行うと、先端部分の表面電位が低下し、理論と一致した結果にならない。
- (b) (a) は PT の垂下特性が原因と考えられるが、負荷の種類や大きさによる表面電位の変化についての詳細は不明であり、他の研究でも明らかにされていない。
- (c) 本手法の特徴である分割した電極構造を PT 型オゾン発生器や真空紫外光源等の応用機器に採用して測定することは困難である。

(a) の表面電位低下は、PT2 次側にプローブを接続しない条件では起こらず、計測上の外乱になっている。更にこれは(c)の解決に必要な理論的解析を困難にしていることから、(b) について詳細な検討を行い、(a) を解決する必要がある。これら(a)と(b)の問題を解決できれば実験と理論解析を併用しながら(c)の問題解決が可能である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は PT を用いた DBD 型プラズマリアクタにおける放電現象の機構解明と実用機器に応用する上で重要な電気特性解析法を確立することである。申請者が以前に提案した PT 型プラズマリアクタの表面電位分布測定法を発展させ、実験と理論の立場からその問題点を検討・解決しながら電気特性解析装置を開発する。これにより PT を用いた DBD リアクタの電気的諸量を正確に測定できれば、放電現象の物理に関する詳細な議論が可能となり、PT 型プラズマリアクタの実用機器への応用促進が期待できる。

## 3. 研究の方法

### (1) 高入力抵抗分圧器の開発

本研究で開発した分圧器の構造を図 1 に示す。分圧器は抵抗容量分圧回路とし、PT の出力抵抗を考慮して同図中の分圧抵抗  $R_1$  と  $R_2$  をそれぞれ  $1\text{ G}\Omega$  と  $1\text{ M}\Omega$  に決定した。従って、入力抵抗は約  $1\text{ G}\Omega$ 、分圧比は約  $1/1000$  である。また、分圧器に接続する測定器の入力インピーダンスの影響を少なくするために、 $R_2$  両端の電圧は、オペアンプで構成したインピーダンス変換回路を介してオシロスコープで測定している。また、筐体との浮遊容量や  $R_1$  と  $R_2$  に含まれる等価並列容量  $C_1$  と  $C_2$  が分圧比の周波数特性に影響するため、 $R_2$  と並列に位相補償用の可変コンデンサ  $C_p$  を挿入し、 $R_1 C_1 = R_2 (C_2 + C_p)$  を満たすような値に  $C_p$  を調整した。

### (2) 表面電位・放電電力測定装置

実験装置を図 2 に示す。実験に使用した PT は強誘電体ジルコンチタン酸鉛  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  製であり、寸法は長さ  $60\text{ mm}$ 、幅  $13\text{ mm}$ 、厚さ  $2\text{ mm}$  である。図中の PT 長さ方向の中央部を境に右側が 1 次側部分 (駆動部)、左側が 2 次側部分 (発電部) である。PT の表面電位と放電電力空間分布を測定するために、誘電体電極の背後にある金属電極は PT の長さ方向に対して  $15$  分割してある。各分割電極とアース間に電位検出用コンデンサ  $C_i$  を接続し、その両端の電圧  $V_{ci}$  を PT2 次側電圧と共にオシロ

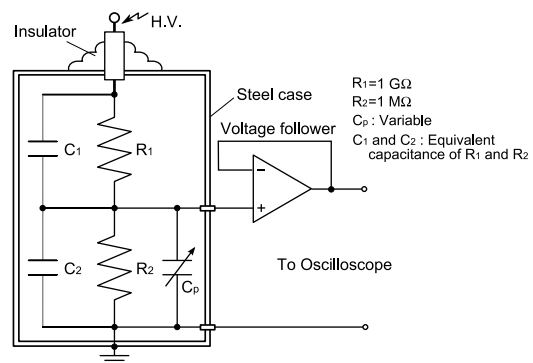


図 1. 高入力抵抗分圧器

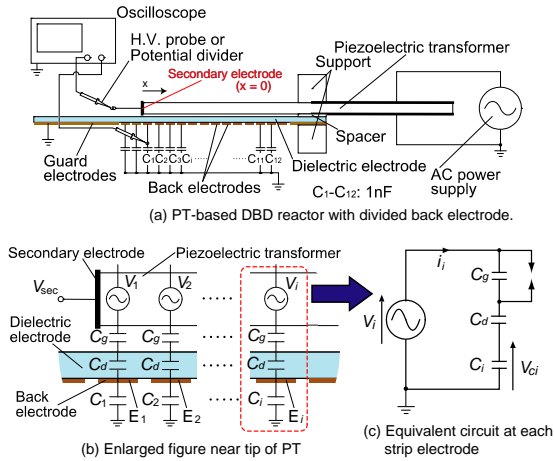


図 2. 実験装置と等価回路

スコープで測定した。

PT先端から $n$ 個の各分割電極真上のPT表面電位を $V_i$ とすると、この電圧は誘電体電極とPT表面との空隙の静電容量 $C_g$ と誘電体電極の静電容量 $C_d$ 、さらに各金属電極とアース間に挿入したコンデンサ $C_i$  ( $i=1,2,3\dots 13$ )によって分圧される。従って図 2 (a)の各金属電極について同図(b)の等価回路を考えることができる。このとき各金属電極上に発生するPT表面電位 $V_i$ は次式で表すことができる。

$$V_i = \frac{C_i}{C_T} V_{ci} \quad (1)$$

ここで $C_T$ は $C_g$ 、 $C_d$ 、 $C_i$ の直列合成容量であり、 $V_{ci}$ は $C_i$ 両端の電圧である。

一方、1次側電圧を増加させギャップ間でDBDが発生する場合には、多数のマイクロ放電が、時間的に正弦波状に変化するPT表面電位が正負に立ち上がる半周期中でのみパルス的に発生する。DBDが発生しない場合の等価回路は図 2 (b)と等しいが、放電発生時には空隙 $C_g$ が絶縁破壊により短絡することになるので、その等価回路は $C_d$ と $C_i$ の直列回路となる。従って、各短冊電極に接続されたコンデンサ $C_i$ に蓄えられる電荷 $Q_i$ とこれに対応するPT表面電位 $V_i$ との関係は

$$\text{(非放電時)} \quad Q_i = C_T V_i \quad (2)$$

$$\text{(放電時)} \quad Q_i = \frac{C_d C_i}{C_d + C_i} V_i \quad (3)$$

となる。実験では2次側電圧 $V_{sec}$ と各コンデンサ $C_i$ に蓄えられる電荷 $Q_i$  ( $= C_i V_{ci}$ )によりリサージュ図形を描かせ、後述する補正を施した後、図形の面積から各分割電極位置での放電電力 $P_i$ を求めた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 分圧器の周波数特性

図 3 は本研究で開発した高入力抵抗分圧器の周波数特性である。図中(a)と(b)の縦軸はそれぞれ分圧器入出力電圧の分圧比と位相差を示している。同図は分圧器への入力電圧を $100 \text{ V}_{\text{rms}}$ 一定とし、周波数を $10 \sim 100 \text{ kHz}$ まで変化させて測定した結果である。図中●と○印はそれぞれ図 1 中の位相補償用コンデンサ $C_p$ がある場合とない場合である。同図より $C_p$ がない場合では、 $100 \text{ Hz}$ 以下で分圧比と位相差はそれぞれ $10^{-3}$ と $0^\circ$ 一定であるが、 $1 \text{ kHz}$ 以上で分圧比と位相差が変化していることがわかる。一方、 $C_p$ を接続した場合には $100 \text{ kHz}$ までの全周波数領域において分圧比と位相差はそれぞれ $10^{-3}$ と $0^\circ$ になっていることを確認した。PTの駆動周波数が約 $27 \text{ kHz}$ であるため、本研究においては十分な周波数特性を有しているといえる。図中実線と点線は図 1 の回路において未知であった $C_1$ と $C_2$ 、 $C_p$ の値を調整し、フィッティングにより求めた分圧比と位相差の周波数特性である。フィッティングによる計算結果は実験結果と良く対応しており、この結果、 $R_1=1 \text{ G}\Omega$ 、 $C_1=0.1 \text{ pF}$ 、 $R_2=0.98 \text{ M}\Omega$  (LCRメータで測定)、 $C_2=8.8 \text{ pF}$ 、 $C_p=94 \text{ pF}$ が得られた。これらの結果から、周波数 $0 \sim 100 \text{ kHz}$ までの範囲で利用可能な入力抵抗 $1 \text{ G}\Omega$ の入力抵抗を有する分圧器を開発することができた。

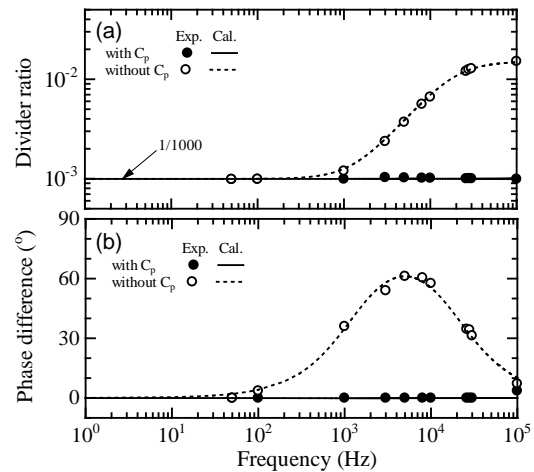


図 3. 分圧器の周波数特性

##### (2) 表面電位分布の測定 (非放電時)

図 4 は PT の 1 次側電圧を  $2 \text{ V}$  として駆動した際の PT 2 次側表面電位分布である。図中 (a)と(b)はそれぞれ PT の 2 次側電極に入力抵抗  $50 \text{ M}\Omega$  の市販高圧プローブと本研究で開発した分圧器を接続して得られた結果である。図中実線は PT が線形動作時に推定される表面電位分布の理論曲線であり、実験結果に合うようフィッティングにより決定した。同図より入力抵抗  $50 \text{ M}\Omega$  の高電圧プローブ

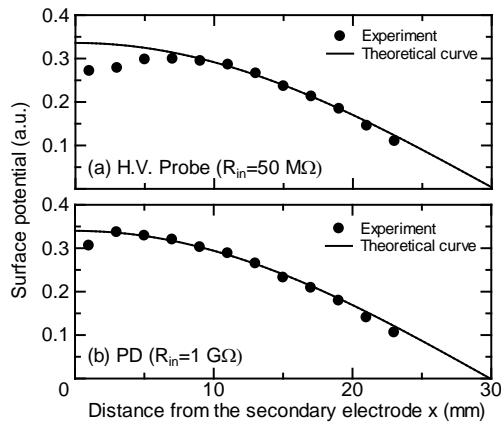


図4. 非放電時のPT2次側表面電位分

ブでは、PT先端から10 mmの範囲で表面電位が低下している様子がわかる。一方、本研究で開発した分圧器を用いた場合、2次側先端1 mm付近において理論曲線に対して約9%程度の表面電位低下は見られるものの、殆どの位置で実験値は理論曲線と一致している。図(a)で観測されたPT先端部分の表面電位低下はPTの出力インピーダンスが大きいため2次側電極に接続した50MΩのプロブが負荷となり、その先端での表面電位が大きく低下したものと考えられる。本研究で開発した高入力抵抗分圧器を使用することで、表面電位の低下を大幅に改善することができた。

次に、図4(b)で観測されたPT先端部分での表面電位低下の原因について検討した。これまではPT表面と各分割電極との間に形成される合成容量 $C_T$ は場所に依らず一定であると仮定し、表面電位や放電電力を決定してきた。しかし、PT先端部分では電極の端効果により電界が歪むため先端部分での合成容量 $C_T$ が低下し、これにより先端部分の表面電位が見掛け上低く検出されたと考えた。そこで、PTと同形状の金属銅電極を用いて各位置での合成容量 $C_T$ を予め測定しておき、この値を用いて測定した表面電位と放電電力空間分布を補正した。具体的には、図2の装置においてPTをPTと同一形状の銅電極に交換し、これに別のPTを用いて電圧を印加する。この電圧を表面電位 $V_i$ とし、各分割電極の $V_{ci}$ と併せて測定することで、(1)式より各位置での合成容量 $C_T$ を求めた。その結果を図5に示す。図中の横軸はPT先端からの距離である。先端の分割電極( $i=1$ )の合成容量は他の部分より低く0.48 pFであった。それ以外の分割電極( $i \geq 2$ )の合成容量は0.52 pFでほぼ一定であり、先端部分の合成容量は他の部分より約8%低いことが分かった。これは図4(b)の表面電位低下分とほぼ一致する。

図5で示した各位置における合成容量を用いて決定した表面電位分布を図6に示す。ここではPTの2次側に本研究で開発した分圧

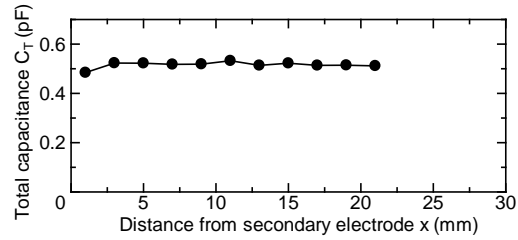


図5. 各分割電極における合成容量

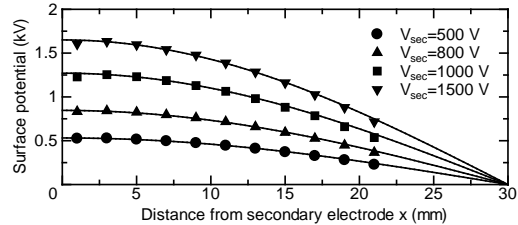


図6. 各位置での合成容量を用いて決定した表面電位分布

器を接続し、2次側電圧 $V_{sec}$ を500~1500 Vの範囲で変化させて測定した。同図よりPT先端部分の表面電位低下は更に小さくなり、PTの広い範囲に亘って表面電位分布の測定値が理論曲線と一致していることがわかる。しかし、PTの2次側電圧測定値と $x=0$ mmの表面電位分布の理論曲線による値を比較すると、2次側電圧の測定値が低くなっている。 $V_{sec}=500\sim 1500$  Vの範囲では、約5%程度2次側電圧の測定値が低くなっている。この減少分はPT先端部分の電極端効果による影響が取り除けているとすれば、PT自身の表面電位低下を検出していることになる。今後更なる検討が必要である。

### (3) DBD発生時の表面電位と放電電力分布

DBD発生時の表面電位分布と放電電力空間分布について検討した。図7(a)はPTの2次側電圧を3600 Vとし、各分割電極で測定したDBD発生時のリサージュ図形である。縦軸は各分割電極 $E_i$ で測定した電荷量 $Q_i$ を示し、横軸は2次側電圧 $V_{sec}$ を示している。同図よりDBDのリサージュ図形は典型的な平行四辺形の形をしている。各位置でのリサージュ図形を比較すると、縦軸の電荷量にのみ違いが見られるのに対し、横軸の値は全てにおいて約7200 V<sub>p-p</sub>であり変化していない。これは各位置での表面電位を直接測定できないため、全ての位置において2次側電圧 $V_{sec}$ を横軸としてリサージュ図形を描いたためである。各位置での放電電力はリサージュ図形の面積から求まるが、本研究では横軸を各位置での表面電位 $V_i$ に換算する必要がある。DBDのリサージュ図形において、平行四辺形を構成する4辺のうち傾きの小さい2辺は非放電期間の合成容量に対応する。従って、(2)式より横軸を表面電位として描いたリサージュ図形では、各位置で測定した非放電期間の図

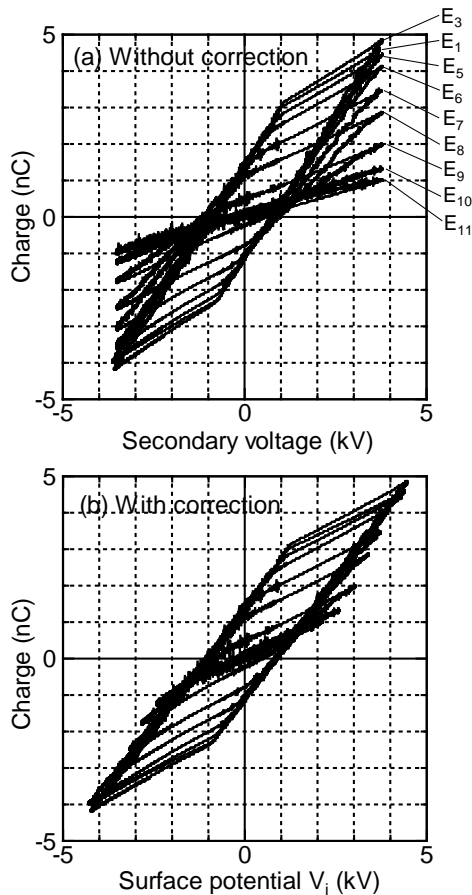


図7. 各位置で測定したリサージュ図形

形の傾きが図5で得られた合成容量 $C_T$ に等しいはずである。そこでこの仮定に基づき、各位置で得られたリサージュ図形の非放電期間の傾きが図5の合成容量と等しくなるよう、横軸の2次側電圧 $V_{sec}$ に係数を乗じ表面電位 $V_i$ に換算した。その結果を同図(b)に示す。この補正したリサージュ図形の横幅と面積からそれぞれ表面電位と放電電力を計算した。

図8(a)は図7(b)のリサージュ図形から決定したDBD発生時のPT表面電位と放電電力の空間分布を示している。同図よりDBD発生時のPT表面電位分布は先端部分でわずかに減少するものの、 $x=9\sim 21$  mmの範囲で理論曲線と一致している。一方、各位置で測定した放電電力はPTの先端部分が最も高く、表面電位分布の大きさに対応して分布している。同図中(b)に発生したDBDの発光をデジタルカメラで撮影した結果も示した。この結果からDBDの発生範囲は約 $x=0\sim 18$  mmの間と推測され、これは放電電力が検出された範囲とほぼ一致していることがわかる。

(4) まとめ

PTを用いたプラズマリアクタの電気特性解析法の確立を目的として、これに必要な特性解析装置とPTの2次側高電圧測定用分圧

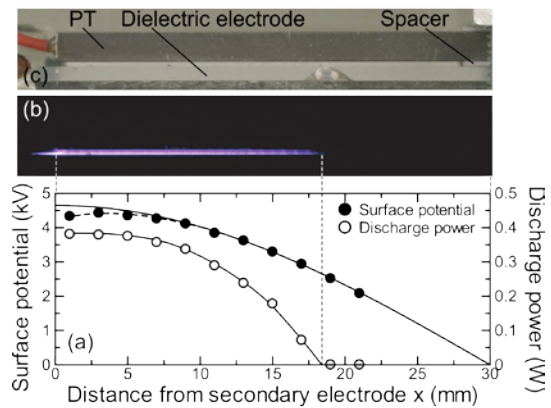


図8. DBD発生時のPT表面電位と放電電力の空間分布

器を開発し、PT表面電位分布と放電電力について検討した。

- (a) PT型プラズマリアクタの2次側電圧測定用高入力抵抗分圧器を開発した。本分圧器を用いることで以前から問題であった2次側先端部分の表面電位低下を改善できることを確認した。
- (b) PT先端部分の端効果に伴う電界歪により、先端部分の表面電位は低く検出されることが分かった。
- (c) (b)については、PTと同形状の金属銅電極を用いて各位置での合成容量を予め測定し、この値を用いて測定した表面電位と放電電力空間分布を補正することで、端効果による影響を除去することができた。
- (d) 非放電時の表面電位分布とDBD発生時の表面電位ならびに放電電力空間分布を決定した。

引き続きデータを収集しながら再現性を確認し、今後は得られた結果を理論的な観点から解析し、PTを用いたプラズマリアクタの電気特性解析法の確立を目指したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- (1) Kenji Teranishi, Saitoh Shota, Naoyuki Shimomura and Haruo Itoh: "Spatial Distribution of Surface Potential and Discharge Power in Piezoelectric Transformer-Based Plasma Reactor", Proceedings of the 20th European Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (CD-ROM) 2010. (査読なし)

[学会発表] (計5件)

- (1) 寺西 研二, 齋藤 将太, 下村 直行, 伊藤 晴雄 : 圧電トランス表面に発生する誘電体バリア放電の表面電位と放電電力空間分布, 平成 23 年電気学会全国大会, 2011 年 3 月.
- (2) 齋藤 将太, 寺西 研二, 下村 直行, 伊藤 晴雄: 「圧電トランス型プラズマリアクタの表面電位と放電電力空間分布」, 平成 22 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2010 年 9 月 25 日 (愛媛大学)
- (3) 寺西 研二, 齋藤 将太, 下村 直行, 伊藤 晴雄: 「圧電トランス型プラズマリアクタの 2 次側電圧測定用分圧器の開発」, 2009 年放電学会年次大会, 2009 年 11 月 14 日 (東京都)
- (4) 齋藤 将太, 寺西 研二, 下村 直行, 鈴木 進, 伊藤 晴雄: 「圧電トランスを用いた誘電体バリア放電型プラズマリアクタの表面電位と放電電力空間分布の測定」, 平成 21 年度電気関係学会四国支部連合大会, 2009 年 9 月 26 日 (愛媛県)
- (5) Kenji Teranishi, Shota Saitoh, Naoyuki Shimomura, Susumu Suzuki and Haruo Itoh: “Measurement of Surface Potential and Discharge Power for Piezoelectric Transformer-Based Plasma Reactors”: Improvement of Potential Divider, 29th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Cancun, Mexico 12-17, July 2009.

[その他]

<http://pub2.db.tokushima-u.ac.jp/ERD/person/155803/profile-ja.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

寺西 研二 (TERANISHI KENJI)  
徳島大学・大学院リソテクノサイエンス研究部・助教  
研究者番号 : 80435403

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし