

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760204

研究課題名 (和文) 実用化に向けた圧電トランス型プラズマリアクタと駆動用電源の開発

研究課題名 (英文) Development of Plasma Reactors Based on Piezoelectric Transformer and Their Power Supply Toward Practical Uses

研究代表者

寺西 研二 (TERANISHI KENJI)

徳島大学・大学院リサーチサイエンス研究部・助教

研究者番号：80435403

研究成果の概要：

本申請では、小型軽量の高電圧発生素子である圧電トランスを独自の方法で利用した小型放電プラズマリアクタの実用化を目的として、PT がつくる放電プラズマの性質を調べながら、各種プラズマリアクタの動作特性解析ならびに駆動用電源の開発を行った。PT 型オゾン発生器では、PT の並列運転を採用することで大流量化が可能となり、オゾン発生量を従来の装置より 3 倍高めることができた。PT を用いた紫外線光源では、発光強度や発光効率が最大となる動作条件を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	0	1,700,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：放電プラズマ工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：圧電トランス，放電プラズマ，プラズマリアクタ，誘電体バリア放電，オゾン発生器，真空紫外光

## 1. 研究開始当初の背景

放電プラズマは半導体製造プロセス、新物質創製、蛍光灯やプラズマテレビ、オゾン生成や排気ガス処理など、幅広い分野で利用されている。このような放電プラズマの生成には、高電圧電源と放電電極が必要であり、電源設備の占有スペースや高電圧配線の絶縁等を考えると装置全体が大規模になる傾向がある。

本申請者の研究グループは、小型高電圧発生素子として知られている圧電トランス (PT) を独自の方法で用いることで、コンパクトな放電プラズマ発生器が実現できることを見出した。PT は既に液晶ディスプレイの小型バックライト用電源として用いられ、情報機器の小型化に大きく貢献してきた。これ

に対して、申請者は PT 自身の機械振動により、その先端だけでなく PT 発電部全面に亘って高電圧が誘起される事実に注目し、PT 自身を放電電極としても用いることで、素子表面で直接放電プラズマを生成できることを確認した。この場合、PT 自身が高電圧電源と放電電極を兼ねるので、他の方法と比較して装置がコンパクトになるという利点がある。さらに電極構造を工夫することで、グロー放電やコロナ放電、誘電体バリア放電 (DBD) などの各種放電プラズマが低気圧から大気圧以上のガス圧力で生成できる。これにより、従来から問題であったプラズマ発生装置の大型化を解消し、様々な分野で応用できる装置の開発を目指している。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、PT 型プラズマリアクタの実用化を目指し、PT 自身を高電圧発生源としてだけでなく、放電電極としても用いるというこれまでに例のない新しい手法により生成された放電プラズマの性質やリアクタの動作特性を調べながら、その構造や動作条件の最適化を行い、駆動用電源を含めたプラズマリアクタの開発を行うことである。申請当初の具体的な検討項目を以下に示す。

### (1) PT の並列駆動を利用したオゾン発生器の大流量化

PTを用いたDBD型オゾン発生器のオゾン生成効率は純酸素供給時に 223 g/kWhという最高値が得られている。しかし、試作したオゾン発生器は 1 個のPTで構成されている為、小型ではあるが、生成オゾン濃度は 20 g/Nm<sup>3</sup>と低く、比較的小さいガス流量で動作せざるを得なかった。特に上下水道などで利用されている工業用オゾン発生器では 150 g/Nm<sup>3</sup>以上のオゾン濃度が必要であるとされている。そこで、PT型オゾン発生器の高濃度、大流量化を目的とし、複数のPTの並列運転を利用したオゾン発生器の開発を行う。これまで使用してきた既製品のRosen型PTから逸脱し、本プラズマリアクタに最適な形状のPTを設計し、構造の簡略化や小型化、発熱等の問題解消も試みる。

### (2) PT を用いた水銀フリーの蛍光ランプの開発

PT がつくるグロー放電により蛍光体が励起される現象を利用した小型蛍光ランプの開発を行う。蛍光ランプには微量の水銀が封入されているが、水銀は人体や環境などに悪影響を及ぼすため、水銀フリーの蛍光ランプの開発が現在の設計思想である。本研究でもこの点を考慮し、放電ガスには Xe や He/Xe 混合ガスを用い、放電から放射された真空紫外光により蛍光体を励起する。他の蛍光ランプよりコンパクトで低電圧駆動の蛍光ランプ実現を目指す。

### (3) PT 型プラズマリアクタ駆動用電源の開発

PT はその機械振動が固有振動数と一致した場合にのみ高電圧を発生する。この共振周波数が負荷インピーダンスや PT 自身の温度により変動するため、上記の(1)や(2)で PT を駆動する際には、駆動周波数が PT の共振周波数と常に一致するように電源側で調整する必要がある。そこで、今回は PT 型プラズマリアクタ専用の駆動電源の開発を行う。PT の周波数制御には、電圧一周波数変換 IC による方法が実用化されているが、本研究では制御素子に PIC マイコンを用いることで従

来の方法より制御回路を簡略化し、駆動電源の小型化を含めたリアクタの開発を試みる。

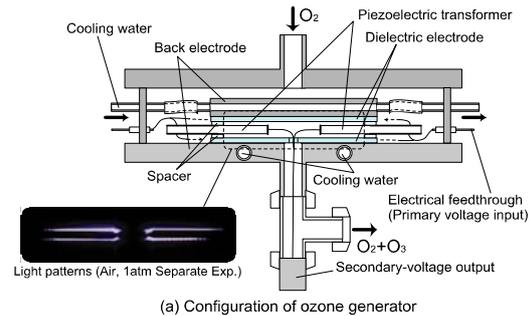
## 3. 研究の方法

本研究は 2 年間で行い、2 種類のプラズマリアクタの開発と駆動用電源の開発を同時並行で遂行した。PT 型プラズマリアクタの動作特性を調べながら、駆動用電源の仕様を決定し、最終的に駆動電源を含めた各種プラズマリアクタのプロトタイプを完成させた。全体を通して見ると、概ね当初の計画に沿って研究を遂行できたが、上述した 2 節(2)の検討項目については、研究遂行の過程で、蛍光ランプの開発まで至らないと判断したため、それまでに得られた真空紫外発光特性の研究データを生かし、真空紫外光源の開発として研究を進めた。得られた成果は国内外の学会、研究会等で随時発表した。

## 4. 研究成果

### (1) PT 並列駆動型オゾン発生器の開発

図 1(a)(b)にそれぞれ本研究で開発したオゾン発生器の構造と写真を示す。オゾン発生器は、2 枚の PT と誘電体電極、ステンレス製背後電極と外側容器から構成されている。図に示すように、2 枚の PT を向かい合わせて配置し、その 1 次側電極を並列に接続して 1 つの電源により駆動した。PT の両側には厚さ 1 mm の誘電体電極とその背後に金属背後電極を配置し、厚さ 0.3 mm のスペーサを介して、PT の中央部で挟み込む形で固定した。PT 駆動に伴い 2 次側表面に高電圧が誘起され、PT 表面と誘電体電極間で、誘電体バリア放電(DBD)が発生する。ガス流入口から供給した酸素ガス(99.9%)が、スペーサの隙間を通して放電空間を通過することで、その



(a) Configuration of ozone generator



(b) Photograph of the ozone generator

図 1 PT 並列運転型オゾン発生器

一部がオゾンになる。

図2(a)はエネルギー密度に対してオゾン濃度をプロットした結果である。エネルギー密度が増加するとオゾン濃度も増加し、ガス流量が低いほどオゾン濃度は高くなった。又、エネルギー密度が低い領域ではオゾン濃度はガス流量に殆ど依存しないが、エネルギー密度が高くなるとガス流量ごとに曲線は枝分かれし、飽和する特性を示した。本実験では、最大オゾン濃度がガス流量 0.3 L/min、エネルギー密度 29 W·min/Lにおいて得られ、74.8 g/Nm<sup>3</sup>であった。図中(b)のオゾン生成効率は、エネルギー密度の増加に伴い減少する特性を示した。ガス流量が小さいほどオゾン生成効率は高く、その最大値はガス流量 1.5 L/min、エネルギー密度 2.2 W min/Lで 296 g/kWhであった。

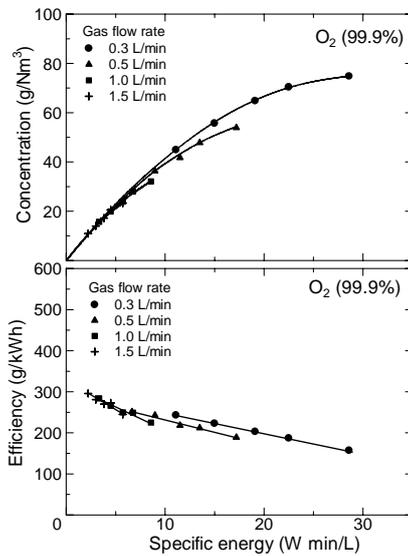


図2 PT 並列運転型オゾン発生器の性能比較

表1に本研究で開発した並列運転型オゾン発生器の最大オゾン濃度、オゾン発生量、生成効率を過去に報告した単独駆動型オゾン発生器の結果と併せて示した。今回試作したPTの並列運転を利用したオゾン発生器は単独駆動型の結果と比較して、オゾン濃度とオゾン収量をそれぞれ 3.7 倍、3 倍に高めることができた。更に、最大生成効率は約 1.3 倍と増加し、2 枚のPTの並列運転と短ギャップ化によりオゾン濃度・発生量だけでなく生成効率も高めることができた。現在までに報告されているDBDを用いた工業用オゾン発生器は、100 g/Nm<sup>3</sup>以上のオゾン濃度が得られるものが多い。このような中でPT並列運転型オゾン発生器では、最大オゾン濃度 75 g/Nm<sup>3</sup>、最大生成効率 296 g/kWhを得ている。これは他のオゾン発生器と比較して、オゾン濃度は低いが、室温で動作するオゾン発生器の中では最も高効率でオゾン生成が可能であり、特に低濃度のオゾンを高効率で生成できる特長があることがわかった。これらの成果を

2007年7月にチェコ共和国で開催された第28回電離気体现象国際会議、電気学会プラズマ/放電合同研究会、28th IEEE International Power Modulator Conference、平成20年ならびに平成21年電気学会全国大会において発表し、その一部を論文にまとめ Plasma Sources, Science and Technology誌に投稿中である。

表1 オゾン生成特性の比較

	最大オゾン濃度 <sup>*1</sup> (g/Nm <sup>3</sup> )	最大オゾン収量 <sup>*2</sup> (g/h)	最大生成効率 <sup>*2</sup> (g/kWh)	ギャップ長 (mm)
並列駆動	74.8	2.1	296	0.3
単独駆動	20.3	0.7	223	0.5

\*1: ガス流量 0.3 L/min、\*2: ガス流量 1.5 L/min

## (2) PTを用いた真空紫外光源の開発

図3に本研究で開発したPT型真空紫外光源の構造を示す。PTの寸法は 60×13×2 mmで、ランプの寸法は 80×40×35 mmと小型である。図中のテフロン樹脂製の板中央にPTと同じサイズの穴を開け、そこにPTを差し込むことで固定した。誘電体電極である石英ガラスは、厚さ 1 mm、光の透過率は 170 nmで 80%である。背後電極にはステンレス製のメッシュを用い、ギャップ間で発生したVUVを石英ガラスとメッシュ電極を通して外部に取り出す構造になっている。このランプを放電容器の中央に設置し、容器内をいったん高真空にした後、He-Xe混合ガス(10%)を封入した。この状態でPTを駆動すると放電ギャップ間でDBDが発生し、このときXe<sup>2+</sup>エキシマが放射する 172 nmのVUV光が放射される。VUV発光強度の検出には 160~320 nmの波長範囲に感度を持つ光電管を用いた。

図4は放電電力と発光強度の関係を示している。ギャップ長は 2 mm一定とし、ガス圧力を 400~1000 Torrの間で変化させ実験を行った。放電電力の増加に伴いVUV発光強度は高くなるが、放電電力が大きくなると飽和する特性を示した。又、ガス圧力が高い程、VUV発光強度も高くなった。これはガス圧力増加に伴い、エキシマ生成の 3 体衝突

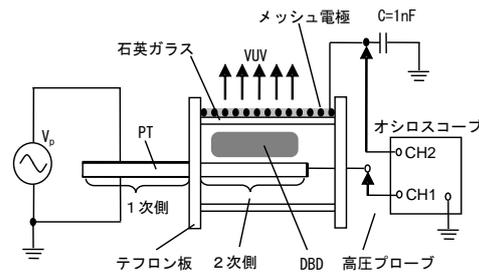


図3 PT型真空紫外光源の構造

$Xe^*+Xe+M \rightarrow Xe_2^*+M$  (MはHeあるいはXe)が促進されたためと考えられる。更に、ギャップ長を変化させて同様の測定を行った結果、ギャップ長 2 mm、ガス圧力 1000 Torr でVUV発光強度が最大になった。同図中(a)で得られた発光強度を放電電力で除して相対的な発光効率を求めた。その結果を同図中(b)に示す。放電電力の増加に伴い発光効率は次第に低下するが、ガス圧力が高い程、発光効率は高くなる結果を得た。これらの成果は2008年電気関係学会四国支部連合大会、放電学会若手セミナー、放電学会年次大会、2009年電気学会全国大会で発表した。

上述した結果は放電容器中にランプを封入して得られたVUV発光特性であるが、これらの基礎データを元に図5に示すような封じきりタイプの小型真空紫外光源を開発した。現在このランプの発光特性について詳細に検討している。

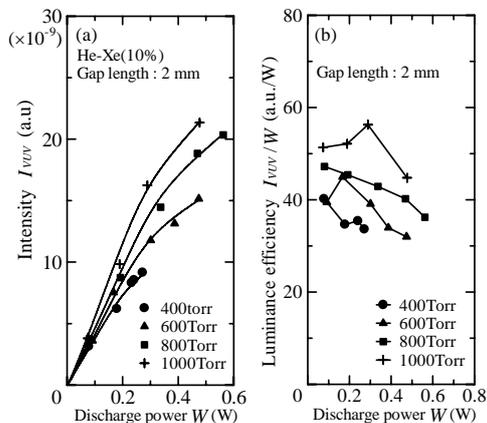


図4 真空紫外光発光特性

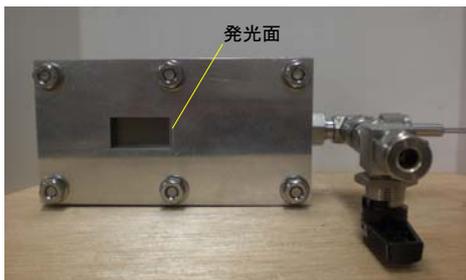


図5 封じ切り型真空紫外光源

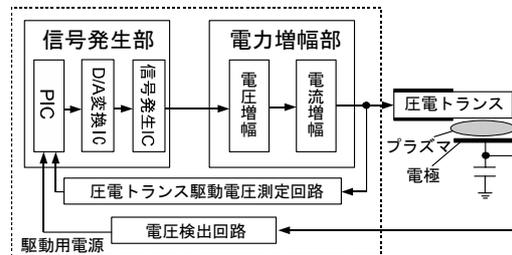
### (3) PT型プラズマリアクタ駆動用電源の開発

PT型リアクタの駆動用電源については、前述のオゾン発生器の実験により得られた結果から仕様を決定しながら開発を進めた。信号発生用ICやPICマイコン等を組み合わせたフィードバック制御により、PTの共振周波数を自動追従できる駆動用電源を開発した。

図6(a)は駆動用電源の構成図である。開発した駆動用電源は、信号発生部、電力増幅部、

PT駆動電圧測定回路、参照電圧測定回路から構成される。信号発生部では、信号発生用ICにより、最大110kHzの正弦波電圧が発生する。この正弦波電圧を電力増幅部において電圧、電流増幅し、PTの駆動電圧として1次側電極に印加する。信号発生ICの発振周波数はPICのデジタル信号により制御する為、8ビットD/Aコンバータを介して信号発生ICと接続した。また、PTの共振周波数の自動追従は、図中のコンデンサ両端の電圧を、参照電圧測定回路を介してPICに入力し、この参照電圧をA/D変換してその値が常に最大となるようPICが信号発生ICの周波数を調整するフィードバック制御により実現した。同図中(b)に開発した駆動電源の写真を示す。本電源では必要な機能のみを組み込んだことで、従来から使用してきた既製品の信号発生器と電力増幅器を組み合わせた電源システムより小型のものとなった。

先ず、PTに負荷抵抗を接続して駆動した



(a)駆動用電源の構成図



(b) 駆動用電源の外観

図6 PT型プラズマリアクタ駆動用電源

際の基礎動作特性を検討した。これにより駆動電圧や負荷抵抗の大きさによるPTの線形・非線形動作領域を明らかにした。PTの電力変換効率は負荷抵抗に大きく依存し470kΩで最大90%を示した。

図7はPTを無負荷状態で連続運転した際のPT共振周波数と2次側電圧の時間変化を示している。赤色と黒色曲線は駆動電源の共振周波数の自動追従機能をそれぞれ有効・無効にした場合の結果である。駆動開始直後のPT2次側電圧は何れの場合も約11kVであったが、自動追従機能がない場合では、時間とともに2次側電圧が減少し、約500s付近で2次側は7kV程度まで低下した。そ

の後も 2 次側電圧は増減を繰り返し、PT の動作が不安定であることがわかる。これは PT の機械振動に伴う温度上昇により、共振周波数が変化したためと考えられ、このような現象は主に PT の非線形動作領域で観測された。一方、自動追従機能を有効にすると、温度上昇により変化する共振周波数に電源が追従し、2 次側電圧は駆動開始直後、一旦 10 kV 程度まで減少するが、その後は時間に対してほぼ一定となった。これにより本研究で開発した駆動用電源により共振周波数の自動追従を行うことで、出力電圧をほぼ一定に保ち PT の連続運転が可能であることを確認した。

以上述べたように、本申請では、PT がつ

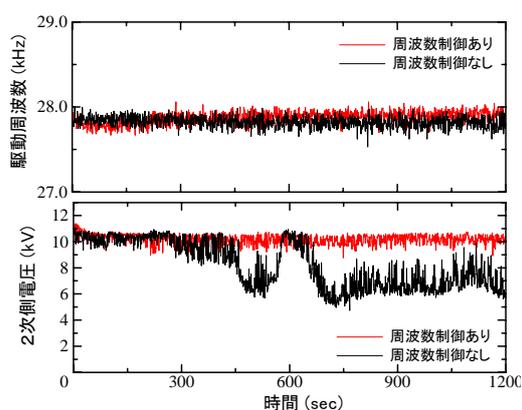


図 7 駆動用電源による PT 連続運転特性 (PT2 次側無負荷)

くる放電プラズマの性質を調べながら、PT 型プラズマリアクタの応用としてオゾン発生器と真空紫外光源を開発し、その動作特性について検討した。PT 型オゾン発生器では、PT の並列運転を採用することで大流量化が可能となり、オゾン発生量を従来の装置より 3 倍高めることができた。PT を用いた紫外線光源では、発光強度や発光効率が最大となる動作条件を明らかにした。更に、時間的に変化する PT の共振周波数を自動追従する駆動用電源を開発した。これにより PT の出力電圧をほぼ一定に保ちながら連続運転が可能となった。

近年、生体工学や医療分野における殺菌・浄化、家庭内での空気清浄など屋内で利用する放電プラズマ実用機器の需要が近年高まっている。本研究で提案した PT 型プラズマリアクタはこのような限られたスペースで必要なだけプラズマを生成するといった用途において威力を発揮するものと考えられ、上述した分野での実用化が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① K. Murayama, N. Matsumura, M. Taguchi, Y. Kato, K. Teranishi, S.

Suzuki and H. Itoh: "Experimental Investigations of the Ozone Zero Phenomenon", European Physical Journal Applied Physics, Vol. 47, pp. 22814-p1-22814-p5 (2009) 査読有

- ② H. Itoh, K. Teranishi, Y. Hashimoto, N. Shimomura and S. Suzuki: "Self-Organized Patterns of Dielectric-Barrier Discharge Generated by Piezoelectric Transformer", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, No. 4, pp. 1348-1349 (2008) 査読有

- ③ K. Teranishi, D. Inada, N. Shimomura, S. Suzuki and H. Itoh: "VUV Spectroscopic Measurement for Dielectric Barrier Discharge Excited by Piezoelectric Transformer in He-Xe Mixture", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, No. 4, pp. 1340-1341 (2008) 査読有

- ④ Y. Kashiwagi, H. Ito, K. Noguchi, K. Teranishi, S. Suzuki and H. Itoh: "Observation of VUV Emission Spectra from DC Positive Corona Discharge", IEEE Trans. FM, Vol. 127, No. 9, pp. 537-542 (2007) 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 寺西研二: 「圧電トランス型オゾナイザの電極温度がオゾン生成に及ぼす影響」平成 21 年電気学会全国大会 2009 年 3 月 19 日 北海道大学 (北海道)
- ② 守屋康平: 「圧電トランスを用いた小型 Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプの開発」平成 21 年電気学会全国大会 2009 年 3 月 17 日 北海道大学 (北海道)
- ③ 守屋康平: 「圧電トランスを用いた DBD 型エキシマランプ」2008 年放電学会年次大会 2008 年 11 月 15 日 早稲田大学 (東京)
- ④ 島田洋司: 「圧電トランス型オゾン発生器の電極温度がオゾン生成に及ぼす影響」2008 年放電学会年次大会 2008 年 11 月 15 日 早稲田大学 (東京)
- ⑤ 寺西研二: 「圧電トランス型プラズマリアクタの表面電位分布と放電電力の測定」2008 年放電学会年次大会 2008 年 11 月 15 日 早稲田大学 (東京)
- ⑥ 守屋康平: 「圧電トランスを用いた小型 Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプ」電気関係学会四国支部連合大会 2008 年 9 月 27 日 徳島大学 (徳島県)
- ⑦ 寺西研二: 「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動作特性」平成 20 年電気学会基礎・材料・共通部門大会 2008 年 8 月 22 日 千葉

- 工業大学 (千葉県)
- ⑧ Haruo Itoh: "Traces of Accumulated Charges on Dielectric Electrode in Self-Organization", Gaseous Electronics Conference 2008年10月15日 Texas, USA
  - ⑨ Kenji Teranishi: "Occurrence condition of self-organization in barrier discharge generated by piezoelectric transformer", 19th Europhysics Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases 2008年7月17日Granada, Spain
  - ⑩ Kenji Teranishi: "DBD-type Ozone Generator Using Piezoelectric Transformers: Effect of Barrier Electrode Material on Ozone Generation", 28th IEEE International Power Modulator Conference 2008年5月28日Nevada, USA
  - ⑪ 寺西研二:「DBD型オゾン発生器の誘電体電極材料がオゾン生成に及ぼす影響」平成20年電気学会全国大会 2008年3月19日 福岡工業大学 (福岡県)
  - ⑫ 寺西研二:「圧電トランスを用いたDBD型オゾン発生器の開発」電気学会プラズマ/放電合同研究会 2007年9月14日 北海道大学 (北海道)
  - ⑬ Haruo Itoh: "Discharge Plasmas Generated by Piezoelectric

Transformer and Their Applications: VUV Emission from Xe and Ar Excimers", 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases 2007年7月17日, Prague, Czech Republic

- ⑭ Kenji Teranishi: "Discharge Plasmas Generated by Piezoelectric Transformer and Their Applications: Material Effect of Dielectric Barrier Electrode on Ozone Generation", 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 2007年7月17日, Prague, Czech Republic
- ⑮ 寺西研二:「圧電トランスの並列運転を利用したオゾン発生器」第17回日本オゾン協会年次研究講演会 2007年6月15日 松山市 (愛媛県)

[その他]  
ホームページ等  
<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・大学院ソノテクノサイエンス・助教  
研究者番号: 8043540