

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13735

研究課題名（和文）水中プラズマを用いた植物育成環境の新規的制御技術の開発

研究課題名（英文）Development of a novel environment control system for plant growth using plasma discharge under water.

研究代表者

高橋 克幸（Takahashi, Katsuyuki）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：00763153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：水耕栽培において自家中毒を引き起こす生長阻害物質を処理する目的で、水中気泡内プラズマを用いた培養液の処理システムを開発した。農産物にはキュウリを用い、強い生長阻害を示す2,4-ジクロロ安息香酸混入させた。約24時間のプラズマ処理で20 Lの培養液中のDCBAはほぼ全て分解された。プラズマ処理した培養液を用いて18日間のキュウリの栽培を行った結果、2,4-ジクロロ安息香酸を与えた試験区では顕著な生長阻害効果が見られた一方、プラズマ処理区においてはコントロール区とほぼ同等に植物が生長した。これらの結果からプラズマ処理は生長阻害物質による影響を除去できる手法として期待できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、植物生長阻害物質の分解効果とそのメカニズム、プラズマ進展とラジカル発生および処理効率の関連性、水耕栽培を用いたプラズマ処理培養液の植物の生態への影響をそれぞれ明らかにし、プラズマによる水耕栽培における植物生育環境の制御技術の確立に必要な学術的知見を十分に得ることができた。これらは、将来的に先進的な農産物生産環境の制御技術の開発・確立につながり、農工の融合連携研究の発展と学理進化とともに、農業における課題解決につなげることができる。

研究成果の概要（英文）：Allelochemicals are organic compounds exuded from the roots of plants, which have autotoxic effects on plant growth. In this study, the decomposition of 2,4-dichlorobenzoic acid, an allelochemical of cucumber, by plasma generated in an air bubble in solution is examined, and the influence of plasma treatment of the solution on cucumber growth in a hydroponics system is investigated. The concentration of DCBA decreases. Consequently, most DCBA has decomposed after 24 hours' treatment. The discharge-treated solution is used as a nutrient solution for cultivating cucumber plants in a rockwool hydroponic system. The results show that the growth of most plants is inhibited by adding DCBA, as well as by the decrease in pH during discharge treatment; in contrast, plants subjected to discharge treatment with pH adjustment grow healthily.

研究分野：高電圧プラズマ工学

キーワード：プラズマ 水耕栽培 植物育成環境 放電 農工連携 アレロパシー ラジカル ジクロロ安息香酸

1. 研究開始当初の背景

農業従事者の超高齢化・従事者数の減少などによる農産物の生産力の低下が、我が国だけではなく、世界的に喫緊の課題となっている。さらに、農業所得が低いことも農業従事者の減少に拍車をかけている。これらの課題を根本的に解決するためには、新しい技術導入による高度な環境制御を実現し、農産物の生産性を飛躍的に向上させることが必須であり、従来に無い新たな取り組みが重要となる。

農産物の生産において栽培される植物は、自らの生長の場を確保するために根や葉などから、菌や微生物の繁殖阻害や、他の植物の生長を抑制する有機化合物(植物生長阻害物質)を分泌する。この植物生長阻害物質は、植物自身の生長に寄与する一方、養液や土壌への蓄積により自家中毒を引き起こし、生育抑制などの生理障害(図1)を発生させ、収穫量の減少など生産効率の低下を招く。近年、生産性の高さから注目されている養液栽培においては、環境への配慮とコスト低減を目的とし、養液を栽培槽内で循環し繰り返し利用する閉鎖型の養液循環方式が用いられているが、このような栽培方式では、植物生長阻害物質の蓄積による影響が顕著となる。植物生長阻害物質の対策としては、活性炭や微生物の生理作用を利用したものなどが提案されているが、コストや反応速度、作業面などに大きな課題があり、有効な手段ではない。そのため、既存技術では植物の生育障害リスクの低減には課題が多く、革新的な新規技術の開発が急務である。

高電圧・パルスパワーを用いて水中で放電プラズマを作り、そこで生成されるヒドロキシラジカルなどのラジカルを利用した有機汚染水の処理方式(図2)は、短時間で難分解性の有機化合物の分解が期待できる手法である⁽¹⁾。本方式は、他の処理方式にはない特徴として、1)従来の方式では分解不可能な難分解性の有機化合物を短時間かつ高効率で分解可能、2)薬品を用いず電力のみによって局所的にラジカルを直接生成可能、3)溶液の pH や成分に依らず処理が可能の3点があり、申請者によって有機化合物を含む工業排水などの汚水処理への有効性は確認されている⁽²⁾。

水中プラズマ処理方式は、処理効果が高い一方、従来の薬品を用いた化学処理などとは異なり、生体に悪影響となる残留成分が少ない。そのため、水中プラズマを用いて植物栽培用養液を処理することにより、農産物生産環境における重大な課題を解決しうる、これまでにない画期的な植物育成環境制御システムの構築が可能となる。さらに、水中プラズマ処理は、植物の病害や生育障害を引き起こす植物病原菌の不活化に有効(図3)であり⁽³⁾、プラズマにより生成される硝酸態窒素は、植物の栄養源になり植物の成長を促進することが可能である⁽⁴⁾ことなどから、植物栽培において有利な複合的効果が期待できる。しかし、技術の確立に必要な、有効性と安全性の確保のためには、これまで明らかになっていない、プラズマによって発生したラジカルが有機化合物の分解反応に消費される過程や、有機化合物特有の分解過程、またそれらの副生成物が植物の生体へ与える影響などをその作用機序とともに解明することが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、植物の養液栽培において、植物の根から放出される植物生長阻害物質を、水中プラズマによって分解除去することにより、障害発生リスクと栽培コストの低減、栽培効率の向上を行う革新的な新規技術を開発することである。そのために、プラズマによって生成されたラジカルが、どのように液中の有機化合物へ供給されるか定量的に解明す



生長阻害物質有り 生長阻害物質無し (コントロール)

図1 生長阻害物質による植物への影響: キュウリの水耕栽培において生長阻害物質の存在(左)により地上部と根の生長低下、変色、葉の萎縮などの障害がみられる。

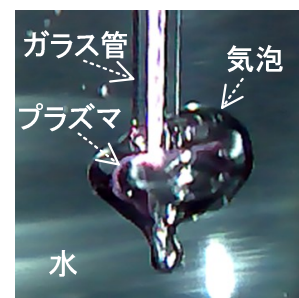
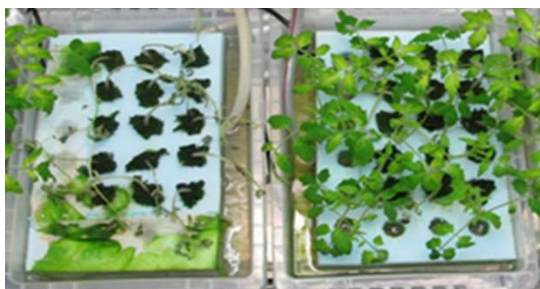


図2 水中プラズマ処理方式: 気泡内でプラズマを発生し、そこで生成されたラジカルを水に溶け込ませ水中の有機化合物を分解除去する。



プラズマ処理無し プラズマ処理有り
図3 プラズマ処理による青枯病発病抑制: トマト幼苗の栽培に青枯病菌を添加した場合に、プラズマ処理(右)により病原菌を不活化し、青枯病の発病が抑制される。

るとともに、生長阻害物質の分解経路を明らかにする。また、本方式を栽培現場に導入し、水中プラズマが植物の生体へ及ぼす影響を、酸化ストレス反応の評価、果実内成分の定量分析を行い明らかにする。そして、プラズマによって生成されたラジカルの、液中への輸送過程と植物生長阻害物質の分解過程、植物の生体への作用機序を明らかにするとともにその安全性を評価する。これにより、地下系環境が植物生理に与える影響の機序を学術的に明らかにする。

3. 研究の方法

研究背景と目的を踏まえ、本研究では、「植物生長阻害物質の分解特性の評価」、「プラズマ進展とラジカル発生および処理効率との関連性の解明」、「植物の生体への影響の検証」、の3つの観点により、科学的かつ工学的に検証・評価する。水中プラズマの発生方式としては、水中にガスを注入し気泡を生成し、気泡内でプラズマを発生し、そこで生成されたラジカルを溶液に溶解させ有機化合物を高効率で分解する、気泡内プラズマ方式を用いる。

項目 1;植物生長阻害物質の分解特性の評価では、生長阻害物質として、キュウリなどの植物から分泌される2,4-ジクロロ安息香酸や、わさびなどの栽培で問題となっているアリルイソチオシアネートを対象とし、その分解効果を評価する。さらに、ギ酸、クロロベンゼンといった副生成物を定量することによって、その分解過程を明らかにするとともに、プラズマ処理の妥当性と安全性を評価する。測定には、液体クロマトグラフィ、イオンクロマトグラフィ、全有機炭素濃度計、全有機炭素濃度計などを用いる。

項目 2;プラズマ進展とラジカル発生および処理効率との関連性の解明では、電圧、周波数などの電気的パラメータや、注入ガスの種類と分解効率および反応経路との関係を調べ、処理における最適な条件を明らかにする。この検証では、各条件による、プラズマの進展の様子と、生成されるラジカルの種類およびその比率への影響を、バンドパスフィルターを用いた ICCD カメラや、分光計測、種々の化学プローブを用いることにより調べ、植物生長阻害物質の処理効率との関連性を解明する。

項目 3;植物の生体への影響の検証では、農産物を栽培した場合の、プラズマ処理による植物の生体への影響を調べる。農産物には、栽培と生育阻害の様子の確認が比較的容易なキュウリやトマトを用いる。植物の生体における影響は、クロロフィル量の測定や、酸化ストレスの指標となる過酸化脂質や8-OHdgを抽出し定量することで評価する。また、果実の収穫を行い、アミノ酸、色、糖度などの果実成分と品質の評価を行い、プラズマ処理との関連性を明らかにする。

4. 研究成果

「研究項目 1:植物生長阻害物質の分解特性の評価」では、水中気泡内発生したパルス放電によって生成される化学的活性種を用い植物の生長阻害物質の分解を試みた。気泡を生成するためのガスとしてアルゴンを用い、キュウリの生育阻害物質である2,4-ジクロロ安息香酸が含まれる水溶液に対して放電処理を施し、その分解を試みた。処理時間の経過とともに全有機炭素濃度が減少することがわかった。これは、放電により生成されたヒドロキシラジカルやオゾンが2,4-ジクロロ安息香酸と反応し、分解することが要因として考えられる。また、イオンクロマトグラフおよび高速液体クロマトグラフを用いて分解副生成物の定量を行ったところ、処理時間の経過とともに塩化物イオン、ギ酸イオン、シュウ酸イオン濃度が増加することがわかった。また、どの放電処理時間においてもギ酸イオン、シュウ酸イオン濃度は塩化物イオン濃度と比較し、低濃度であることがわかった。このことから、有機化合物の分解より優先して、2,4-ジクロロ安息香酸自体または分解によって生じる副生成物から塩素の脱離がおきていることが考えられる⁽⁵⁾。

「研究項目 2:プラズマ進展とラジカル発生および処理効率との関連性の解明」液面に沿って発生する放電の進展様相を調べる目的で、連続観測可能な高速フレーミング ICCD カメラを用いて同一の放電路を観測し(図4)、放電進展速度を定量的に測定した。底面に接地電極を設置した円筒容器に溶液をいれ、液面上部に設置した線電極にパルス電圧を印加し放電を発生させた。容器内はアルゴンガスを注入し置換をおこなった。その結果、液面放電の進展速度は導電率に依

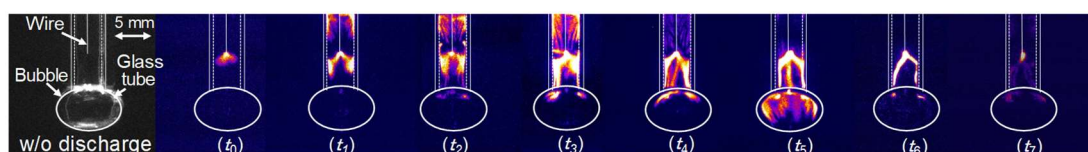


図4 気泡内放電の進展：気泡内放電は約0.2 mm/nsの速度で気泡表面に沿って進展しヒドロキシラジカルなどの化学的活性種を生成し液中へ供給する。

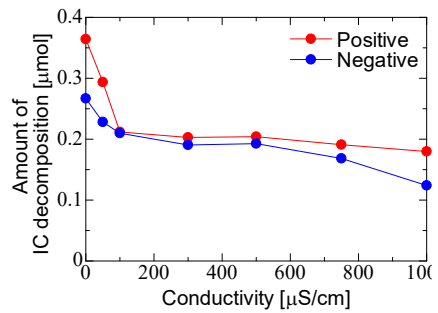
らず 0.2 mm/ns 程度となることがわかった。放電の進展長は、導電率が高い場合に減少する。また、パルス電圧の波高値が同じ場合、負極を印加した場合の方が、速度および最大進展長は大きいことがわかった。発光スペクトルを測定したところ、ヒドロキシラジカルの励起種に相当する 308 nm の波長の発光強度は、負極の方が大きいことがわかった⁽⁶⁾。

次に、電気的パラメータが、放電進展とラジカル発生ならびに溶液の処理効率に及ぼす影響を調べるため、有機染料であるインジゴカルミンをヒドロキシラジカルの化学プローブとして用い、溶液中へのラジカル供給効率を評価した。有機染料の分解量すなわち、溶液へのヒドロキシラジカルの供給量は正極の方が大きいことがわかった。また、ヒドロキシラジカルの再結合によって生成される過酸化水素を測定したところ、過酸化水素の生成量も同様に正極の方が大きく、溶液へのヒドロキシラジカルの溶解量が大きいことがわかる。一方、放電の進展性と発光強度は負極の方が大きく、この結果と矛盾する(図 5)。この要因としては、正極放電では放電チャンネルと液面間にシーブが形成され、放電によって生成された正イオンが液面へスパッタされることによりヒドロキシラジカルが生成されていることが考えられる。

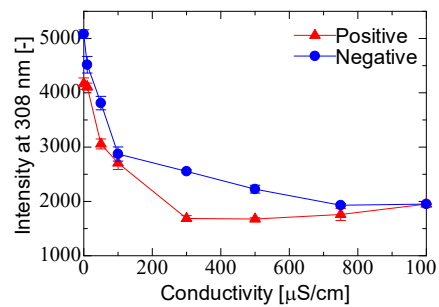
注入気体を酸素とした場合は、湿度が低い気相中でオゾンを高効率で生成し、溶液へ溶解することによって、脱色効率が向上した。アルゴンを入れた場合は、ガラス管内ではなく、気泡内での放電体積を増加することにより、脱色へ寄与するヒドロキシラジカルを効率よく生成することができ、脱色効率が向上することがわかった。印加電圧および、放電繰り返し間隔を小さくし、ガラス管本数を増加することによって多箇所放電を行うことによって、気泡内における化学的活性種の高濃度化を抑制し、脱色へ寄与する化学的活性種の割合を増加できることがわかった。また、電極間隔を広げ、電極面積を小さくすることにより、溶液の抵抗成分が増加し、導電損失を低減できることがわかった⁽⁷⁾。また、処理対象の揮発性が高い場合は、液中ではなく気相中で主に分解反応が生じることが明らかになった⁽⁸⁾。

「研究項目 3: 植物の生体への影響の検証」では、液面放電処理方式を用いた養液処理ならびに、植物栽培システムの構築を行った。植物栽培に用いる養液の量は 20L とし、養液タンクと放電処理部間で養液を循環させて処理するリアクタを用いた。予備実験として、キュウリの栽培を行ったところ、10 μM の濃度の 2,4-ジクロロ安息香酸の混入により、有意に生育阻害がみられることがわかった。

次に、水中気泡内で発生したパルス放電によって処理した培養液を用い農産物を栽培するシステムを構築した。農産物にはキュウリを用い、キュウリに対し強い生長阻害を示す 2,4-ジクロロ安息香酸(DCBA)を培養液に 20 μM の濃度で混入させた。約 24 時間の放電処理で 20 L の培養液中の DCBA はほぼ全て分解され、分解生成物として塩化物イオンや、ギ酸などが残留することがわかった。放電処理した培養液を用いて 18 日間のキュウリの栽培を行い、栽培期間中の地上部高さ、葉の長さ、幅、SPAD 値、栽培後に収穫した植物体の葉面積、乾燥重量、根の長さ、クロロフィル含有量を評価し、植物体への影響を調べた。その結果、2,4-ジクロロ安息香酸を混入していないコントロール区に比べ、2,4-ジクロロ安息香酸を与えた試験区では明かな生長阻害

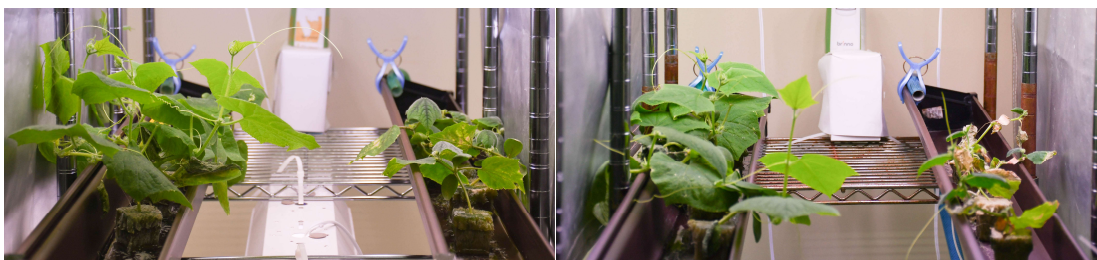


(a) 脱色率



(b) 発光強度

図 5 極性の違いによる脱色率と発光強度: OH ラジカル液中への溶け込み量とプラズマ中発生量の極性による差の傾向が異なる。



コントロール区 DCBA 混入無処理区 放電処理区 (pH 調整) 放電処理区

図 6 栽培 18 日目のキュウリの様子: DCBA が混入された区は著しい生長阻害が発生するが、放電処理し pH を調整することによって、健康に生長することが可能となる。

効果が見られた一方、放電処理をしその後 pH を調整した試験区においてはコントロール区とほぼ同等に植物が生長した(図 6、7)。また、根の様子を電子顕微鏡にて観察したところ、2,4-ジクロロ安息香酸を混入した区では表皮組織が損傷している一方、コントロール区、放電処理区ではきれいな状態を保っていることがわかった(図 8)。一方で、放電処理後に pH を調整しない場合、プラズマによって生成される硝酸塩によって、培養液の pH は 3 以下に低下し著しい生長阻害を示した。これらの、適切な pH 調整が必要ではあるが、プラズマ処理は生長阻害物質による影響を除去できる手法として期待できることが明らかになった(5)。

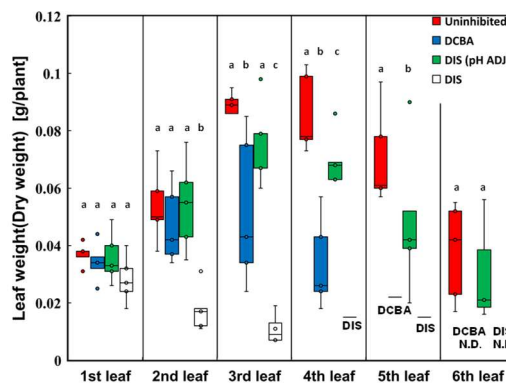
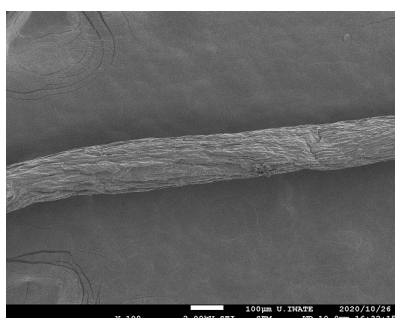
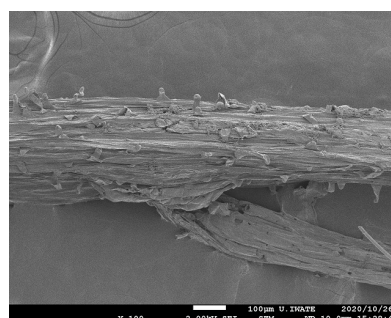


図 7 収穫後の葉ごとの乾燥重量：放電処理し pH を適切に調整することにより、植物を健康に生長させることができる。



(a) 放電処理区



(b) DCBA 混入無処理区

図 8 根の SEM 画像：ジクロロ安息香酸が混入した場合は根が損傷されるが、放電処理区ではコントロールと同様に綺麗な状態を保つ。

引用文献

- (1) K. Takahashi, K. Takaki and N. Satta: “Water remediation using pulsed power discharge under water with advanced oxidation process”, *J. Adv. Oxidat.*, Vol. 15, No. 2, pp.365-373 (2012. 6)
- (2) 高橋克幸・高木浩一・颯田尚哉・秋山雅裕: 「水中気泡内放電を用いた1,4-ジオキサンの分解」, 環境工学研究論文集, Vol. 47, pp. 507-514 (2010) (査読有)
- (3) T. Okumura, Y. Saito, K. Takano, K. Takahashi, K. Takaki, N. Satta and T. Fujio, “Inactivation of bacteria using discharge plasma under liquid fertilizer in a hydroponic culture system”, *Plasma Medicine*, 6, 247-254 (2017). (査読有)
- (4) J. Takahata, K. Takaki, N. Satta and K. Takahashi, “Improvement of Growth Rate of Plants by Bubble Discharge in Water”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 54, 01AG07 (2015). (査読有)
- (5) K. Takahashi, S. Kawamura, R. Takada, K. Takaki, N. Satta and T. Fujio: “Influence of a plasma-treated nutrient solution containing 2,4-dichlorobenzoic acid on the growth of cucumber in a hydroponic system”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 129, 143301 (2021.4) (査読有・研究成果)
- (6) K. Takahashi, H. Takayama, S. Kobayashi, M. Takeda, Y. Nagata, K. Karashima, K. Takaki, and T. Namihira: “Observation of the development of pulsed discharge inside a bubble under water using ICCD cameras”, *Vacuum*, Vol. 182, 109690, 8p (2020. 8) (査読有・研究成果)
- (7) K. Takahashi, S. Kawamura, I. Yagi, M. Akiyama, K. Takaki and N. Satta: “Influence of Reactor Geometry and Electric Parameters on Wastewater Treatment Using Discharge inside a Bubble”, *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 13, No.2, pp.74-82 (2019. 12) (査読有・研究成果)
- (8) K. Takahashi, H. Takayama, I. Yagi, K. Takaki, and N. Satta, “Decomposition process of volatile organic compounds dissolved into water by pulsed discharge inside bubble”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 59, SHHA06, 8p (2020. 3) (査読有・研究成果)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Takahashi, H. Takayama, S. Kobayashi, M. Takeda, Y. Nagata, K. Karashima, K. Takaki, and T. Namihira	4. 巻 182
2. 論文標題 Observation of the development of pulsed discharge inside a bubble under water using ICCD cameras	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 109690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2020.109690	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Takahashi, S. Kawamura, R. Takada, K. Takaki, N. Satta, T. Fujio	4. 巻 129
2. 論文標題 Influence of a plasma-treated nutrient solution containing 2,4-dichlorobenzoic acid on the growth of cucumber in a hydroponic system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 143301 (12pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高橋克幸, 林信哉	4. 巻 141
2. 論文標題 プラズマ化学反応～植物生育制御と青果物鮮度保持～	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会誌	6. 最初と最後の頁 155-158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 南谷靖史, 高橋克幸, 王斗艶, 大嶋孝之	4. 巻 44
2. 論文標題 電界・放電プラズマの農業や食品産業への応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 238-247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高木浩一, 高橋克幸	4. 巻 9
2. 論文標題 農水食分野での高電圧・プラズマ利用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 スマートプロセス	6. 最初と最後の頁 108-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takahashi, S. Kawamura, I. Yagi, M. Akiyama, K. Takaki and N. Satta	4. 巻 13
2. 論文標題 Influence of Reactor Geometry and Electric Parameters on Wastewater Treatment Using Discharge inside a Bubble	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Plasma Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 74-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Katsuyuki, Takayama Hirotooshi, Yagi Ippei, Takaki Koichi, Satta Naoya	4. 巻 59
2. 論文標題 Decomposition process of volatile organic compounds dissolved into water by pulsed discharge inside bubble	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SHHA06 ~ SHHA06
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab72cd	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 パルスパワーによる水面上プラズマの形成と環境浄化および農水分野への利用
3. 学会等名 仙台プラズマフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 パルス放電プラズマによる液中へのラジカル供給機構とファインバブルを用いた供給効率向上技術
3. 学会等名 第6回ファインバブル学会連合シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高山大聖，榊原哲，高橋克幸，高木浩一，堀米達矢，兼平憲男
2. 発表標題 水中気泡内放電を用いたリン酸ジブチルの分解
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第75回学術講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村修平，高橋克幸，高木浩一，堀田尚哉，藤尾拓也
2. 発表標題 水中気泡内放電を用いた水耕栽培用溶液中の植物生育阻害物質の分解
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋克幸，高木浩一
2. 発表標題 パルスパワーによる水中プラズマの形成と環境浄化および農水分野への利用
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋克幸, 高木浩一
2. 発表標題 パルスパワーを用いた液面放電の発生と液中ラジカル供給量の評価
3. 学会等名 プラズマ材料科学第153委員会第146回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takahashi, K. Takaki
2. 発表標題 Use of high voltage and plasma for agriculture, forestry and fisheries
3. 学会等名 The virtual international conference on science and agricultural technology 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta and T. Fujio
2. 発表標題 Decomposition of allelochemicals in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3. 学会等名 13th International symposium on advanced plasma science and its applications for nitrides and nanomaterials/14th international conference on plasma-nano technology&science (ISPlasma2021/IC-PIANTS2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi and K. Takaki
2. 発表標題 Radical production and treatment of nutrient solution using pulsed discharges contact with water surface
3. 学会等名 3rd International workshop on plasma agriculture (IWOPA3) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Takahashi, R. Oikawa, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta, and T. Fujio
2 . 発表標題 Decomposition of allelochemicals in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3 . 学会等名 The 4th international symposium on Application of high-voltage, Plasma & Micro/Nano Bubble (Fine Bubble) to Agriculture and Aquaculture (ISHPMNB2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takahashi, R. Oikawa, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta, and T. Fujio
2 . 発表標題 Decomposition of 2,4-dichlorobenzonic acid in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3 . 学会等名 The 2019 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference (PPPS 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takahashi, R. Oikawa, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta, and T. Fujio
2 . 発表標題 Decomposition of allelochemicals in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3 . 学会等名 XXXIV International conference on phenomena in ionized gases (XXXIV ICPIG) & 10th International conference on reactive plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takahashi, K. Takaki
2 . 発表標題 Agricultural Applications of High Voltage Pulses and Atmospheric Discharges
3 . 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 川村修平, 及川陸也, 高橋克幸, 高木浩一, 颯田尚哉, 藤尾拓也
2. 発表標題 水中気泡内放電を用いた植物栽培液中の2,4-ジクロロ安息香酸の分解
3. 学会等名 電気学会放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高山大聖, 武田尚大, 高橋克幸, 高木浩一, 颯田尚哉
2. 発表標題 水中気泡内放電による揮発性有機塩素化合物の分解
3. 学会等名 電気学会放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋克幸, 高山大聖, 武田尚大, 辛嶋一樹, 高木浩一, 浪平隆男
2. 発表標題 印加電圧の極性が液面放電の進展とヒドロキシラジカルの生成に及ぼす影響
3. 学会等名 第43回静電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 液面上パルス放電の進展観測とヒドロキシラジカルの生成効率の評価
3. 学会等名 2019年度静電気学会東北支部研究会・プラズマ・ナノバブル研究会(第413回生存圏シンポジウム) 合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 パルスパワーを用いた液面放電による化学的活性種の生成とその利用
3. 学会等名 2nd Science Meeting for Plasma and Nanobubble Research (413th RISH symposium)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 高電圧とプラズマの農林水産業への利用
3. 学会等名 次世代食育のグローバル化フォーラム(FFSMILE2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 パルス高電圧・大気圧放電の農業利用
3. 学会等名 2019年度第一回静電気学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋克幸
2. 発表標題 パルス高電圧・大気圧放電を用いた農水利用
3. 学会等名 仙台プラズマフォーラム・電気通信研究所共同プロジェクト研究会・核融合科学研究所ネットワーク型共同研究研究
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高山大聖, 武田尚大, 高橋克幸, 高木浩一, 颯田尚哉
2. 発表標題 水中気泡内放電による揮発性有機塩素化合物の分解
3. 学会等名 放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村修平, 及川陸也, 高橋克幸, 高木浩一, 颯田尚哉, 藤尾拓也
2. 発表標題 水中気泡内放電を用い植物栽培液中の2,4-ジクロロ安息香酸の分解
3. 学会等名 放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takahashi, R. Oikawa, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta and T. Fujio
2. 発表標題 Decomposition of allelochemicals in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3. 学会等名 The 4rd International Symposium on Application of High-voltage, Plasmas & Micro/Nano Bubbles (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takahashi, R. Oikawa, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta and T. Fujio
2. 発表標題 Decomposition of 2,4-dichlorobenzonic acid in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3. 学会等名 The 2019 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takahashi, R. Oikawa, S. Kawamura, K. Takaki, N. Satta and T. Fujio
2. 発表標題 Decomposition of allelochemicals in hydroponic nutrient solution using discharge inside bubble
3. 学会等名 The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------